



KAIWU

SCIENCE,
TECHNOLOGY &
CULTURE

開 物

2025年第一期
科技與文化

目錄

能源新想像 專題

- 05 能源和汽車革命
——高屋建瓴的四網四流 踏上人類文明新征程
陳清泉
- 21 電的面面觀
陳福祥
- 41 探索碳的奇妙世界
——從科學到藝術，從生活到材料
嚴晉躍

科學與社會

- 51 多媒體視頻教學中導師在線的社會情感效應
古嬋媛、彭穎澄、李平
- 61 生成式 AI 在教育中的應用
——從基礎認知見解到蘇格拉底式學習遊樂場
胡祥恩、徐升
- 75 PM_{2.5} 與公共健康
——破除污染的障礙，邁向綠色健康未來
吳楊洋、楊茜、謝嘉雯、李向東

科技文化談

- 93 還原與建構
——去中心化的現象學意涵
郭世恒
- 111 19 世紀法國學者對中國珠算的認識與評論
吳燕、陳志輝

能源和汽車革命——

高屋建瓴的四網四流
踏上人類文明新征程

陳清泉

能源和汽車革命 —— 高屋建瓴的四網四流 踏上人類文明新征程



陳清泉

理大電動車研究中心兼電機及
電子工程學系

一、能源與文明進步

人類透過智力和科學，利用外部能源——從發現火種開始，到利用木材、煤、油等燃料，再發展至使用內燃機和核反應爐。能源的使用，促進了社會的經濟發展，便利了人類的各種活動。

至於能源模式的轉變，則往往是發展使然。過往人類大量使用化石能源，雖然推展了社會的經濟活動，開展了大規模的經濟生產，然而在燃燒的過程當中，釋放出大量空氣污染物，構成嚴重環境問題。因此，在完成歷史任務後，化石能源將會漸漸被淘汰。緊接其後的是，人類致力開發可再生能源，邁向低碳社會。在這樣的背景下，電動車乘時而起。它的出現，不是一種熱潮或偶然，而是隨能源革命、人類通過電氣化改變社會生產模式的另一次壯舉。

工業革命之後，人類文明發展一日千里。歷史上經歷多次能源革命，每

次均提升了生產力，促進了文明進步。最有名的論述可追溯至1964年，蘇聯天文學家尼古拉·卡爾達肖夫(Nikolai Kardashev, 1932-2019)提出的「卡爾達肖夫指數」(Kardashev Scale)。他將能源消耗速度，與文明科技發展的關係掛鉤。

工業革命與科技發展密不可分。科技發展愈急速，能源消耗愈上升，是亙古不變的定理。我們現正身處第四次工業革命之中，而第五次工業革命輪廓漸露，因此可以預期，能源需求將有增無減。

然而，科技也是一把雙刃劍，有時會帶來負面後果。以工業革命初期為例，雖然生產規模大幅擴充，但亦同時帶來嚴重環境污染問題、個人疏離感的加劇，以及人性的物化等。一代笑匠差利·卓別林(Sir Charles Chaplin, 1889-1977)的著名電影《摩登時代》(Modern Times)，便是諷刺機器化非人性，且質疑工業進步是否會帶來正面影響。

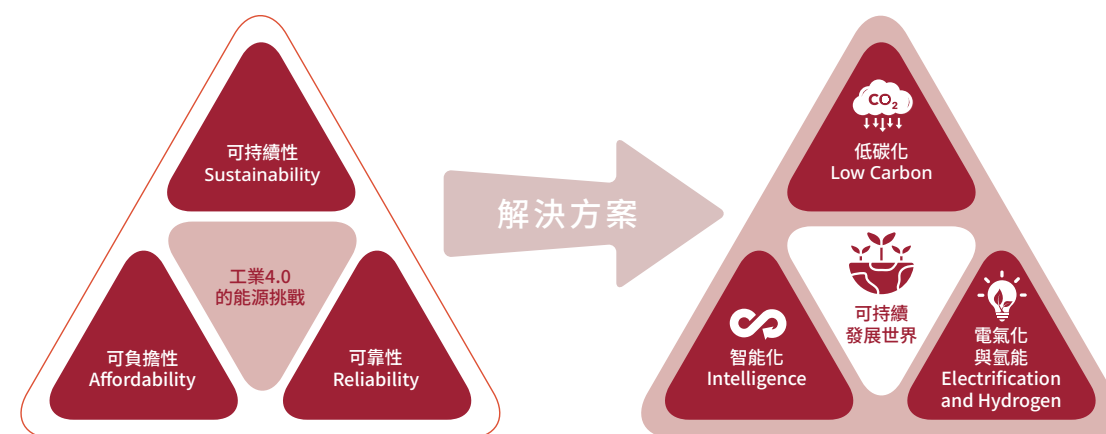
工業革命的初期，粗獷式的發展缺少了人文思想，結果帶來沉重代價，令人深感不安。西方燃燒煤炭造成環境災難，化石燃料從開採、運輸、提煉過程，亦有不少「外部效應」，引發無數爭端。近代的「潔淨化石能源」天然氣，其主要成分甲烷，更是溫室效應的元兇之一。

人類破壞自然平衡，下一代無以為繼。極端天氣正是警號，令人類反思與自然的關係。科技缺乏人文思想的指導，未必帶來長遠幸福，只有人本思維才能引領科技向善。

二、能源革命：挑戰與回應

人類須尋找替代能源，是全社會共同努力的目標，儘管替代的路徑，仍是爭論不休。可幸的是，全球科學家已有共識，要走上可持續發展的未來之路，探索新能源的各種可能，自是必要。

能源變革的核心挑戰，如圖一所示，主要圍繞三方面；首先是「可持續性」(Sustainability)，再生能源可以源源不絕；其次要「可負擔性」(Affordability)，成本具有競爭力，



圖一 核心解決方案來自低碳化、智能化、電氣化與氫能

人人皆可受惠；第三是必須「可靠性」(Reliability)，供應也不能斷斷續續。

回應上述挑戰（見圖一），首先要擺脫對石化能源的依賴，要尋找依靠天然產生的低碳能源 (Low Carbon Energy)；其次須降低成本，透過智能化 (Intelligence)，如節能和新材料、數字化優化，降低開採儲存耗用成本；第三應提高能源可靠性，配合電氣化和氫能等，確保能源供應穩定。

三、走向能源革命

人類能源的轉型，結合技術的突破，正是蓄勢待發。過去十年，全球科技商業發展，以至金融投資和政府政策，均注入了人文價值觀，以推動社會責任為己任，將成果與世界共享，解決人類共同面臨的危機。

面對時代之問，中國以建構命運共同體，作為回應。

我曾在演講中指出，人工智能固然厲害，但必須有人文思想作指導。沒有人文思想加持，人工智能足以破壞世界的秩序。上個世紀，我們專注於物理世界進步；本世紀初，我們專注於網絡信息世界的發展和數字化

的復興。網絡信息世界的出現，創造了新的價值，提高了生產力，但同時亦改變了人際關係。

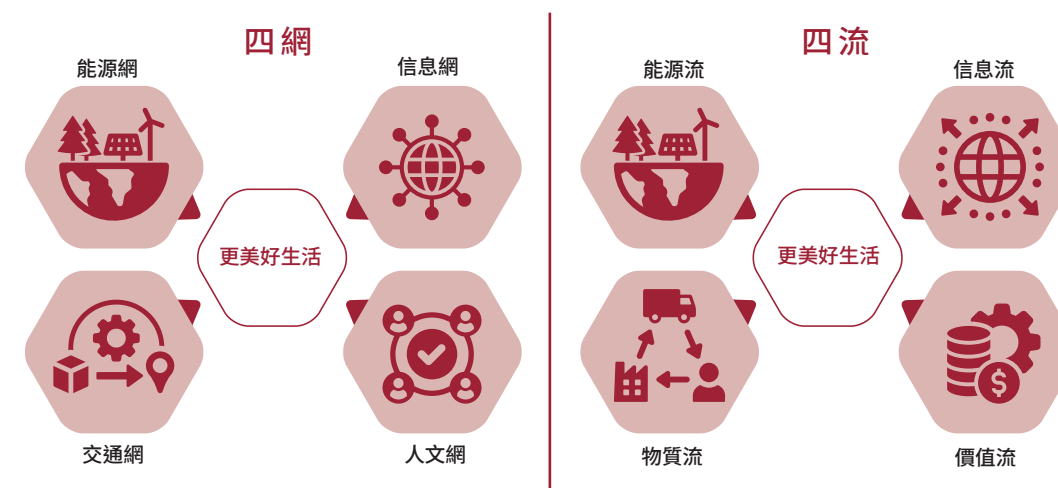
我們還要進一步透過顛覆性的思維，將物理世界、信息世界和人文世界三者作深度融合，有效地將數據轉化為信息→知識→智能，從而解決更複雜的問題。在現實世界中，僅僅依賴技術，不能解決複雜問題和迎接新挑戰，我們必須將人文世界、物理世界和信息世界深度融合，才可以找到出路。

可持續能源在發展初期，從可靠性和成本兩方面而言，實難與傳統能源競爭。隨着科學家的努力研發，同時政府透過綠色金融和政策補貼，為可持續發展帶來商機，令兩者可以並行不悖。聯合國的報告指出，單是2015年全球投資在綠色能源的資金，已達2,860億美元，比化石能源多出一倍。¹

全球不少創新技術，轉化為綠色技術，既有益於環境，亦能推動經濟發展。綠色能源也可促進投資經濟成長，以中國為例，被稱為「新三樣」的新能源汽車、鋰電池、太陽能電池，早已成為出口的增長亮點。

香港理工大學(理大)是綠色科技全球最堅定支持者之一。香港政府在2020年成立了低碳綠色基金，至2024年中為止，理大的八項研究共獲4,000萬港元資助，總額為全港大學之冠。

電動車是交通能源的重要轉型，我提出的「四網四流」融合概念，指出電動化只是上半場，我們還有更遠的路要走。透過這樣的進程，將可引領人類文明至另一境界。「四網四流」究竟是甚麼呢？「四網」便是能源網、信息網、交通網、人文網，而「四流」則是能源流、信息流、物質流、價值流。（圖二）它們互為表裏，發揮了重要的作用。



圖二 「四網」和「四流」的概念示意圖

四、能源革命中國故事

中國能源革命風起雲湧，領導全球從化石走向再生能源，以智能化降低成本，人人可享受綠色能源。中國大力發展電網和氫能技術，令能源結構產生了重大轉變。能源的供應可以保持穩定，源源不絕。

中國是高度發展的國家，提高人民生活水平是首要任務。然而，若要推動工業化和城市化，能源自是不可或缺。中國又是製造業大國，在製造過程中會消耗大量能源，因此中國要達到碳中和，將會是長路漫漫的旅程。

1. <https://www.fs-unep-centre.org/>

另一方面，氣候變化是全球共同面對的挑戰，各國須攜手合作，才能有效應對。全球經濟發展一直處於不平衡的狀態，因此在歷史排放責任上，一直存在爭議，減排目標遲遲未能達標。事實上，因各自利益關係，發達國家與發展中國家在氣候問題上，往往存在極大分歧，甚至彼此對立。發展中國家在應對氣候變化時，只能在「經濟發展」和「減排」之間苦苦掙扎，常常陷入兩難的局面。

從1850年到2019年，全球共排放16,100億噸二氧化碳，中國佔2,200億噸，即13.7%，遠低於中國人口在全球的佔比；美國同期排放4,100億噸，佔比高達25%以上；G7集團整體排放量7,340億噸，佔比達45.6%。² 全球氣候談判中，歷史總排放量是碳排放的問責焦點。排放量高的國家，理論上應承擔更多責任。

榮鼎諮詢(Rhodium Group)在分析報告中指出，2023年中國人均能源消耗量仍遠低於美國，每年碳排放量約為10.1噸，美國則為17.6噸。³ 中國仍處於經濟發展期，必然消耗更多能源。但是，中國卻在《巴黎協定》(Paris Agreement)中承諾，在2030年前實現「碳達峰」，保證風能、太陽能和核能等非化石燃料能源，使用比例提高至25%。

2020年9月，習近平主席更在聯合國鄭重承諾，力爭在2060年前實現「碳中和」。

自此，中國面對「雙碳」目標，可說義無反顧。然而，中國以減碳為機遇，卻為全世界帶來啟示。從各國「碳達峰」至「碳中和」時間去估算，歐盟大約要70年，美國、日本約為40年，中國則只有短短30年，實在是分秒必爭。中國謀求經濟成長，減排之餘也同時增加能源供應，「雙碳」似是一場考驗。結果，中國以科技創新及新質生產力，證明了只要目標正確，便可化挑戰為機遇。

五、綠水青山文化基因

中國作為高度發展的大國，其能源轉型過程，有一定的代表性。首先是能源消耗快速增長，其次是傳統化石能源使用比例，一直都極高。

中國向有天人合一之說，尊重自然，和諧共生，不主張焚林而獵，不主張竭澤而漁，在上古神話傳說中，更有女媧補天之說。中國人敬天愛自然，大大降低了走向低碳的難度。早在12年前，習近平主席就有「綠水青山就是金山銀山」之說，即使經濟為先，亦不會置環境於不顧，決心帶領全球走向碳中和。

中國大規模發展再生能源，全力發展電氣化和氫能，以確保供應穩定。全球由此認識到，碳中和與經濟發展，其實可以並行不悖。「雙碳」關鍵是能源轉型，首先便是開發清潔能源，其次就是電力轉型。

數據顯示，電力成為中國經濟增長動力的來源之一，清潔能源轉型的根本路徑，須從生產和消費兩端着力，同時實現兩個「替代」。兩者要同時轉變，否則無法實現能源轉型。中國以可再生能源發電，消費端以電力替代，在能源結構轉型上有多重意義。

六、可持續發展命題

中國不斷致力尋求能源來源多元化，積極拓展清潔能源，其中包括水力、核能、生物物質、光伏和風能、研究核聚變，從生產至儲電，不斷努力研發。中國清潔能源研究有多項貢獻，包括在可控核聚變(Nuclear Fusion)「人造太陽」方面取得重大突破，正一步一步走向商業化。⁴ 2022年英國《自

然》(Nature)增刊《自然指數-能源》(Nature Index – Energy)指出，中國在清潔和可負擔能源領域，研究產出位居全球第一。⁵

中國亦是光伏發電大國，2023年新增光伏裝機達216.88吉瓦，同比增長一倍半，幾乎是過去四年的總和。

中國的輸電技術，包括特高壓的傳輸、高溫超導和智能微電網，發展迅速。中國特高壓輸變電投產後，實現了超遠距離高效能輸電，將西北部豐富的清潔能源北電南送，傳至高需求東中部地區。而儲能解決再生能源斷續供應的難題，也為電力提供削峰填谷，充分利用再生能源和冗餘電力。

根據國家能源局的數據，2023年，中國全社會用電量9.22萬億千瓦時，同比增長6.7%，較美國發電量多上超過一倍。**2020年至2024年中，中國用電量增速連續四年超過GDP的增速。**

2. <https://ricn.sjtu.edu.cn/Web/Show/235>

3. <https://www.nytimes.com/2023/07/19/climate/us-china-climate-issues.html#:~:text=The%20average%20Chinese%20person%20uses,analyses%20from%20the%20Rhodium%20Group>

4. <https://english.news.cn/20240723/2eb7ca318f554cfe853c8cd6d925be7a/c.html>

5. http://big5.news.cn/gate/big5/www.news.cn/world/2022-09/09/c_1128989670.htm

從用電結構而言，中國三大產業用電量快速增長。2023年，第一產業用電量是1,278億千瓦時，同比增長11.5%；第二產業用電量是6.07萬億千瓦時，同比增長6.5%；第三產業用電量是1.67萬億千瓦時，同比增長12.2%。中國三大產業GDP增速分別為4.1%、4.7%、5.8%，製造業增長5%。產業用電量增長超過GDP增長率。⁶

電能替代是中國走向減碳排放的重要策略，中國要減少污染，實現氣候承諾，走向「雙碳」目標，電力消費成為優先。即使國內產業結構不變化，中國仍以第二產業為主，電氣化推動的電能替代，導致電力消費增長，卻不一定增加中國石化燃料消耗，相反以電能替代，還能成為減排的契機。

2023年首三個季度，中國的可再生能源發電量，已超過了2萬億千瓦時，佔全國總用電量三分之一。⁷

七、智能化降低成本

從歷史的進程而言，每次能源革命後，都會帶來新技術產業，然後再推動社會進步。能源革命是改變開採

蒐集、儲存和消耗能源的過程，從端到端改變能源結構，包括終端消費和電網的互動。

智能化令能源有分佈式結構，電力因地制宜，以再生能源發電和消耗。例如未來的建築物將是「光伏建築一體化」BIPV (Building Integrated Photovoltaics, BIPV)，建材結合光伏板可以發電，以鈣鈦礦 (Perovskite) 光伏電池為例，部署上有如刷油漆，比起矽晶，更易做出超大面積的太陽能電池。

以理大為例，我們在鈣鈦礦研究有多項突破，率先製備二維全有機鈣鈦礦，提高能源轉換效率和降低成本，未來可整合軟性基板鋪設在建築物外牆上，將是光伏發電建材首選材料之一，中國更已量產鈣鈦礦光伏電池，光伏發電量可望翻倍。

最近，我牽頭的理大團隊致力於人工智能引擎平台的開發，提出開發人工智能引擎的哲學思想、科學思想和工程思想。其哲學思想就是人文世界、資訊世界和物理世界的融合；其科學思想就是深入分析大模型規律、數位孿生規律、大資料規律；

其工程思想就是以上三個規律的結合優化，再進而孵化為產品，推出市場，帶來經濟效果。

八、電氫蓄勢待發

能源轉型後，確保供應穩定是關鍵，電氫儲能、燃料電池和分佈式的技術，有助於削谷填峰，供需平衡。中國發展不同的儲能，包括壓縮空氣儲能、飛輪儲能、抽水蓄能的物理儲能、電化學、液流電池和氫儲能等，以技術加速能源結構轉型。

眾所周知，可持續能源有不穩定的特性，許多時難以併網，須同時發展傳輸和儲能。中國儲能技術不斷進步，持續提升再生能源的利用率。2023年，中國併網風電和光伏發電，合計裝機規模從2022年底的7.6億千瓦，達至年底的10.5億千瓦，同比增長是38.6%。⁸據國家能源局所公佈的數據，中國新型儲能發展迅速，投運裝機已超過3,000萬千瓦，推動了逾一千億元人民幣投資。

氫能的儲存和運輸成本高昂，往往要原地消耗。不過合成變了綠色甲醇，就可儲存為「低碳」能源，航運業

便是應用領域之一。全球船運公司已紛紛使用綠色甲醇作為替代能源。「綠色」電力電解水製成了綠氫，再合成變為綠色甲醇，將為低碳經濟提供另一種替代能源。

傳統化石原料生產「灰氫」和「灰醇」，即將退出舞台，中國發展風光儲氫氨醇一體化項目，其中包括吉林遼寧廢煤礦坑轉為綠色修復風光儲氫醇的一體化，通過氫能獲得脫碳的綠色燃料，為交通運輸業減碳。

九、能源結構與電動車

不少人以為，電動車只將動力從石化燃料，換成電池或燃料電池，那麼又何需要有「四網四流」？其實，**電動車不單是在消費端替代石化能源，反過來，它又能推動智慧城市的創建，營造和諧社會，為人類帶來更多的幸福感。**

筆者一直以電動車作為研究方向，從1980年代已開始參與研究，1990年代初更致力研發電動車“HKU2001”。想當年，一次充電便能續航160公里，相關指標領先國際，其後又向中央提出了發展電動車產業的構想。

6. <http://finance.people.com.cn/BIG5/n1/2024/0327/c1004-40203939.html>

7. <http://fgw.gxzf.gov.cn/fzgqgz/xnyhkszy/t18040450.shtml>

8. <https://www.nea.gov.cn/xwfb/202401zb/index.htm>

電動車經過40年的演化，在多番技術改良之後，終於迎來開花結果，再次走上舞台的前端。汽車是對社會發展極具關鍵性的產業，電動車轉用了電力，既改變了能源結構佈局，又帶動了城市和產業生態，其中包括智能化、網聯化、數字化，再進入智慧社會。

十、電動車三步曲

電動車的歷史使命是甚麼？最基本的，一定是滿足駕駛者的需要，相關設備，一應俱全。然後便是以電力配合再生能源的消耗。再進一步，便是改變能源儲存和電網互動方式。最後是「四網四流」，推動智慧社會發展，邁向和諧共生，建立以人為本的社會。

工業革命從18世紀60年代開始，作為化石燃料其中一員的煤碳推動了蒸氣機，快速擴大生產，後來再擴展至使用石油、天然氣等，滿足了能源的龐大需求。化石能源徹底改變了人類的生產模式，人類從勞動中解放出來，社會進入了大規模生產工業時代。汽車工業就在流水線和規模化生產下，不斷成長改變發展格局，第一次改寫了現代城市文明和景觀。

詹姆斯·瓦特 (James Watt,1736-1819)發明的蒸汽機，可用於火車，卻不能用在汽車，原因是體積太大，當時稱為「外燃機」，即燃燒和動力分開。至於「內燃機」，則是燃燒和動力合在一起，很快便成為主流。1886年，卡爾·賓士 (Carl Benz,1844-1929) 發明了第一部以汽油引擎推動的三輪汽車，取得了專利，從此改變了汽車的發展進程。其實，內燃機汽車發明之前，電動機已經出現了。世上第一台電動汽車，早在1832-1839年間已經存在，比內燃機汽車出現足足早了半個多世紀，可惜卻是生不逢時。

內燃機汽車的出現，更遇上了工業大生產時代。亨利·福特 (Henry Ford,1863-1947) 發明了流水線生產，大幅降低內燃機的成本，性價比超過電動汽車，另外美國又發現大油田，令油價顯著下降，凡此種種，均為內燃機汽車發展，締造良好條件。以性能和成本而言，內燃機汽車徹底超越電動車。

電動車動力來自電池，雖有過百年歷史，但最早只是鉛酸電池，功率密度比現時鋰電低得多，當時無法競爭。直至上世紀70年代初，石油危機爆發，美國才重新啟動電動車研究。

不過電動車可擺脫石化燃料，低碳而環保，還不是唯一優點。電動車推動交通工具數字化轉型，深度結合數字技術，配合分佈式能源、輸電和儲能轉變，才是長遠的優勢。

上世紀80年代，我在研究電動車一段時間後，創立了「世界電動汽車協會」，向國家大力建議發展電動車，中央從善如流，政策和市場「雙輪」驅動，搖身一變成為電動車大國，如今可稱之為「換道超車」。中國電動車業產迅速發展，在國家政策配合下，加快了技術創新，拉近了電動與燃油車之間差距，再適逢其會參與了能源革命。

十一、下半場拉開帷幕

雖然說，石油的能量密度較高，然而內燃機轉化能量效率，遠遠不及電動車。電力是高層級能量，而機械能又同屬高層級能量，轉變效率加上電機效率，完全優於內燃引擎。電池技術進步，加上數字化技術加持，電動車發展潛力，更是表露無遺。此消彼長下，電動車性能後來居上，性能指標大幅拋離燃油車。

電力能源轉換有較高效率，大家比較家中的火爐、電爐和煤氣，便可知

用電安全可靠，效率更高。電動車輛有效使用能源，減少二氧化碳排放，與燃油車相比，同樣行車里數的耗能更少，又不產生熱氣、噪音，空氣和路邊污染。

汽車革命內涵不單是內燃機改成電機，電動化只是第一步。電動車的性能不斷提升，效率提高、噪音減低、電池成本降低、車體邁向輕量化、動力總成一體化，配合高效能馬達制動和智能充電。

我曾經提過，汽車革命可以分為三個階段，上半場是電動化，下半場是智能化和網聯化。當電動車研發進入一定階段，將面臨兩大挑戰:首先是電動車和電網之間，如何良好互動；另一挑戰是人、車、路、雲一體化，發展出令人滿意的業界標準。

十二、數字經濟軟件可期

為進一步推動電動車的發展，在2024年2月，理大成立了電動車研究中心，推進新一代電動車的研發工作。我們的目標是建立先進的研發平台，聚焦研究電動車技術、智慧交通系統和能源管理。理大與中國電力國際發展及威馳騰汽車合作，致力研發上述解決方案。

電動車不是單獨個體，與其他經濟部件是可以有所聯繫的。人類下階段是數字經濟，而電動車比燃油車，更適合數字化，能夠引領汽車的電子電氣架構 (EEA) 演進。數字經濟之所以重要，因為數字既可賦能，又可複製，數字本身亦可產生價值，不斷為電動車增值。

從智能電話的發展可見，現時在經濟本質上，乃通過數字創造價值，手機的通話功能，反而成為次要。電動車也遵循同一規律，長遠聯網和算力，會改變電動車本質，趨向以軟件定義，成為軟件定義汽車 SDV (Software Defined Vehicle)。軟件定義發展下去，軟件所佔價值比例將上升，最終是軟件決定一切，不斷為電動車創造價值。

我們可以想像一下，未來的電動車與智能電話，愈來愈相似，通過軟件加入功能，隨時升級和衍生新功能，催生出商業模式和價值鏈，例如共享交通工具和城市通訊，推動智慧社會發展，再一次改寫城市文明。

十三、生產消費兩端發力

我們都知道，智能化可以令能源價格下調，同時數字化又可進一步降

低成本。在這裏，我想談一談電動車與分佈式能源的深層次關係。

上文提及中國發展儲能，投產全鈮液流電池儲能 (Vanadium Redox Battery, VRB) 儲能裝置，猶如超巨型「充電寶」，儲存可再生能源。中國的儲能技術日新月異，着力建設消納再生能源的大型電力系統，例如在可再生能源的發電站之旁，加建不同儲能裝置，發展下去將演變成分佈式能源系統。從以前只靠發電廠中央發電，到日後家家戶戶安裝太陽能、風能，甚至儲能設施，逐步演變為分佈式能源發展的格局。

能源革命核心要做到可持續、可負擔又具可靠性，關鍵是透過「四化」，即低碳化、智能化、電氣和氫能化。

比方說，在構建智能化電力系統時，可以蒐集、利用風能和光伏等清潔能源，做到多源互補，以及「源、網、荷、儲」協同，從而推動低碳能源發展。

十四、「源、網、荷、儲」協同

談到「源、網、荷、儲」協同，「源」是能源；「網」是發電網、電網輸送；「荷」是指負荷用電單位；「儲」便是

儲能。如要使用太陽能、風能，第一要務是儲能，太陽能和風能不穩定，時斷時續，有時候有，有時候卻沒有，必須靠平時積極儲能，到使用時才不虞匱乏。儲能在電力系統中相當重要，日常用電需求本已隨季節轉變而十分波動，加上了電動車就更難預測，所以必須與電網緊密互動。電網在能量輸出的高峰期，供電成本會大大增加。因此不只發電，甚至是輸配電以至在用電，也要智能化，才能有效降低成本。

從以上可見，無論能源是透過何種途徑而產生，有一點卻是可以肯定的，那就是電力轉型是可持續能源的重要一環。

儲電和電網技術的進步，深度結合數字技術，實現高度的可視化，優化電力的分配，通過智能化有效管理電力傳輸、儲存和消耗。電動車能有助實踐能源轉型，促進生產和消費的轉型，令社會趕上另一次工業和科技升級潮。理大亦有幸參與其中，近年與中國南方電網共同成立「綠色安全電網聯合研究院」，在電力裝備、綠色安全管理、智慧城市、綠色安全供電領域，利用高水平科研成

果和跨學科技術，合力推動國家「新型電力系統」的建設與發展。

到2024年中為止，中國的新能源車保有量，已達2,000萬輛，純電動車則超過1,600萬輛，⁹佔新能車總量的八成，產銷量連續九年保持世界第一，未來估計將可達5,000萬輛，截至2023年底，中國充電基礎設施累計達859.6萬台，同比增加65%，為全球數量之冠。中國正建立全球最先進的電力基建，以迎接低碳轉型年代的來臨。

日後的電動車都是移動儲能，會變成分佈式電力系統一部分。這些電動汽車電池，不用的時候，泊在車位時，便可給家庭充電、給鄰居充電。這種模式被稱之為“V2X” (Vehicle to Everything)，以後充電是雙向充電而非單向。理想的情況是：電網可給您充電，您也可反充給電網，也就是以上所述分佈式儲能的延續。

電網智能化後，充電將是很大的行業。華為曾提出兩個口號：一個口號是「一杯咖啡充滿電」，喝一杯咖啡的時間便充滿了。還有更厲害的「一秒一公里」，充電一秒續航一公里，

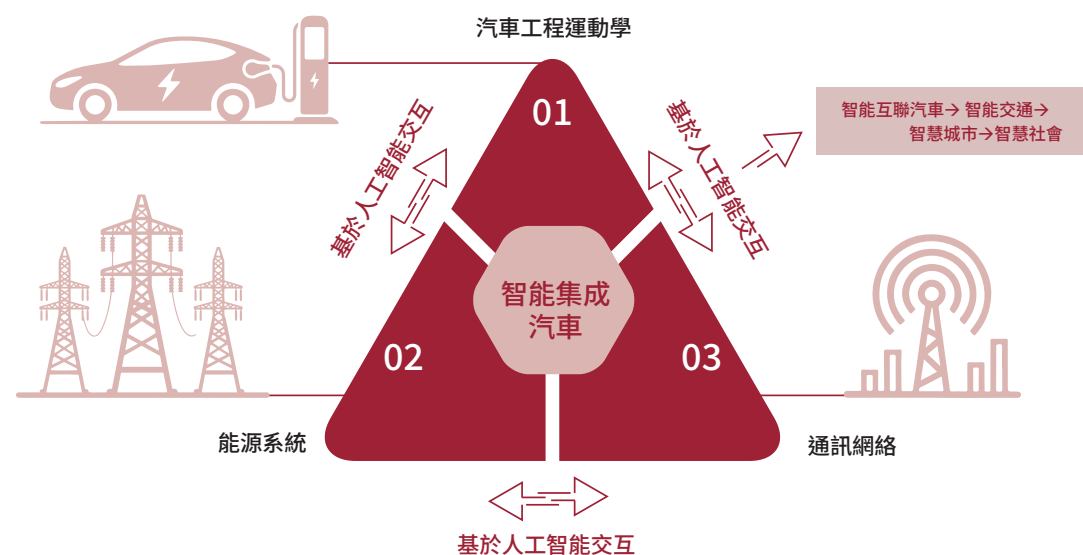
9. <http://www.caam.org.cn/tjsj>

可媲美汽油車，前題就是電網須具足夠承受能力，確保電動車和電網能友好互動，電網時刻源源不絕供電，成為「源、網、荷、儲」協同的一部分。

今天中國已經歷過從孵化期、成長期到快速發展期，將技術創新和政策、企業生產、市場、金融融合，構建完善的生態鏈，能夠生產高性能且成本低的電動汽車系列產品，還能生產兆瓦級的雙向、液冷、高效、智

慧的充電系統，以便電動汽車和電網、太陽能、風能、儲能友好互動。

我提出「技術普惠」理念，倡議中國與東盟共建電動汽車產業生態鏈，並承諾為印尼提供技術諮詢與人才培養支援。印尼媒體作出了正面評價：「陳教授的理念，是對故土的深情反哺，更是對全球碳中和目標的莊嚴回應。」今天中國車企出海，已經從簡單的產品貿易，走向「產品、技術、人才、管理」全產業鏈輸出了。



圖三 智能集成汽車理念

在這一理念下，汽車不再單單是普通的交通工具，屬性已出現改變。我們應將汽車工程中運動規律、能源規律和通訊規律集成，通過人工智能實現友好互動。

汽車革命的使命是電氣化、智能化、網聯化，令出行變成了既自由又幸福的事情。從智能汽車到智慧交通，再到智慧城市，再更進一步到智慧社會。如今汽車的屬性，已經發生了變化。汽車不僅是交通工具，更是移動的智慧能源和移動的智慧通信。因此我們應該借助人工智能，整合汽車行走的規律和能源互動及通信互動的規律，重塑為集成、智慧的汽車(Integrated Intelligent Vehicles)。這是我提出的當前開發電動汽車新理論。

十五、電動車「四網四流」

可以憧憬終有一天，電動車將變成智能聯網車，支持智能交通，推動智慧城市和智慧社會的發展。

電動車發展有不少研究要做；包括材料到汽車部件，從硬體至軟件，開發先進的晶片，汽車智能化要有芯片。現在一輛汽車內，大概至少20至30枚芯片，性能愈好，晶片量愈多；從駕駛、動力、座椅、座艙、娛樂控制，要比一部智能手機複雜許多。

電動車本身可以衍生出許多好處。它既可提高能源效率和環境效益，又能創造新機遇。未來，電動車可跟任何事物互聯，例如汽車和其他設備、汽

車和汽車、汽車和家庭、汽車和建築。汽車聯網後，可以發揮許多不同功能。最重要的先決條件，是良好的訊號基建，實現人車雲一體化，保證可靠和安全行車，同時防止黑客入侵。

電動車下一步，是發展智能聯網至智能交通介面，以助建成智慧城市，推動智慧社會，不再停留在交通工具層面，通過智能和網聯化，以軟件創造更大價值。電動車猶如一個機械人，結合人工智能芯片，實現高階輔助和自動駕駛，再添上人文價值，從而成為人類的真正助手。

十六、智慧社會以人為本

運輸自動化之後、座艙也會智能化，相較於傳統汽車座艙，智能座艙具備社交、娛樂、家庭、工作等多個屬性，成為家居辦公以外的「第三生活空間」。

數字化會為電動車賦與新的意義，注入新的功能，產生新的價值。電動車核心競爭力是算力和創新，且具備互連能力，能切合個人需求，推動共享共乘，照顧不同利益，惠及乘客行人，令交通聯網發揮更大價值和作用。

所以汽車革命，最終就是「四網四流」：「四網」就是能源網、信息網、交通

網、人文網，以融合「四流」能源流、信息流、物資流和價值流。

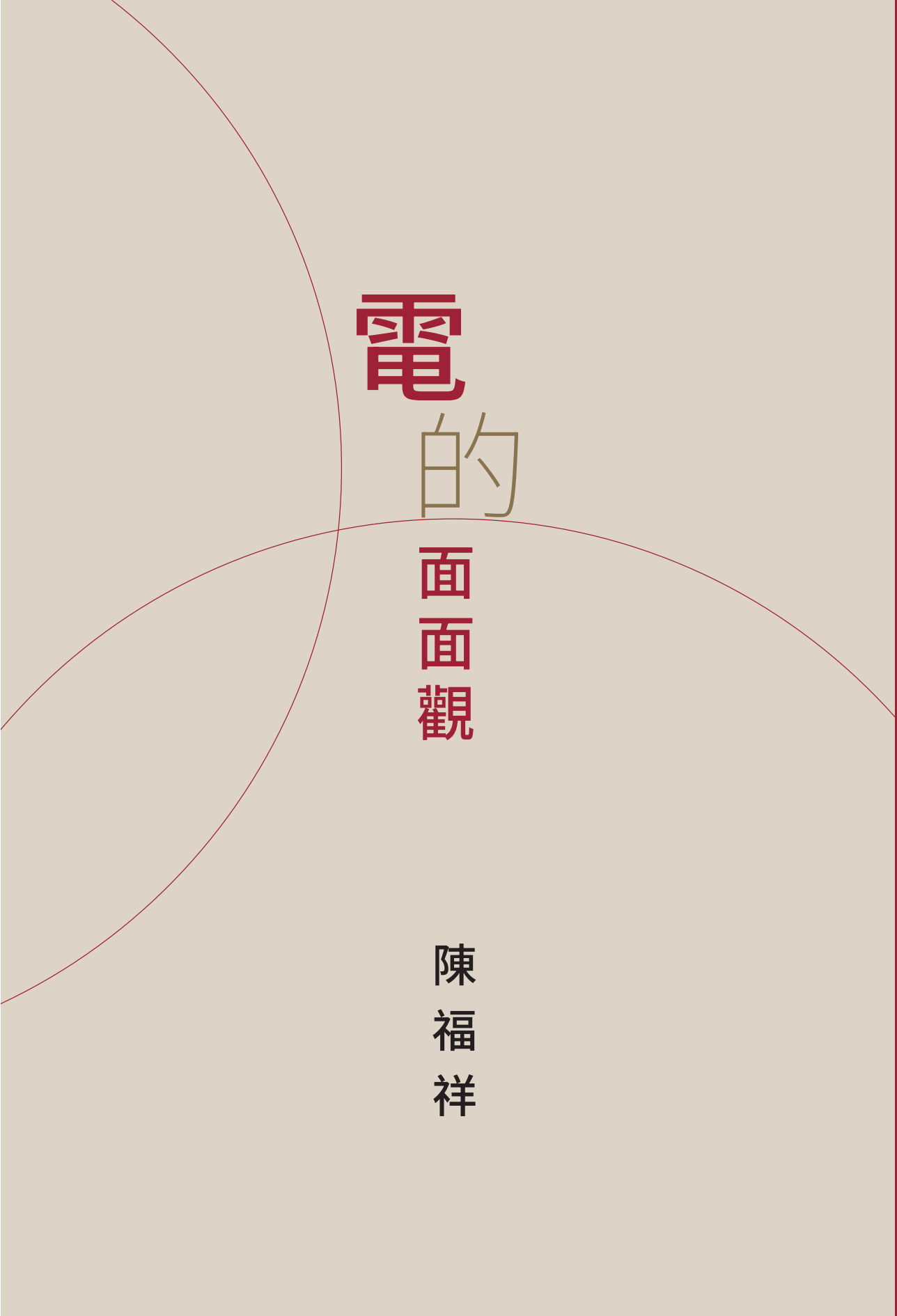
歸根究柢，科技若不以人的價值作為依歸，便很容易走向極端。只有透過「四網四流」的大連結，才能彰顯更大的經濟和環保效益。通過耦合和共用，電動車提升了能源和資產使用率，為經濟發展作出了重大貢獻。

上述哲學思想是讓人文世界、物理世界和信息世界，得以真正融合。電動車「以人為本」，以符合個人、社會和環境利益的方式運作。「四網四流」的精神所在，是汽車要成為人類的第三個空間，通過利用可持續發

展的能源，減少對環境的負面影響，並推動社會發展，實現科技促進社會發展的願景。

在此，我想以自身經歷勉勵青年，科研需要「六隻眼睛」：前瞻性、歷史觀、全域思維、落地能力、借鑑西方、關注東方。科技發展雖然日新月異，但是在千變萬化當中，總是有規律可循的。透過這「六隻眼睛」，相信可以助您們看清形勢，運籌帷幄。

「上善若水，利萬物而不爭」，科技亦復如此，最高境界是厚德載物，生生不息，與我們校訓「開物成務，勵學利民」，可謂一脈相承。讓我們攜手合作，以科技改變未來，為人類的共同福祉努力奮鬥。



電 的 面 面 觀

陳福祥

電的面面觀



陳福祥
香港工程師學會

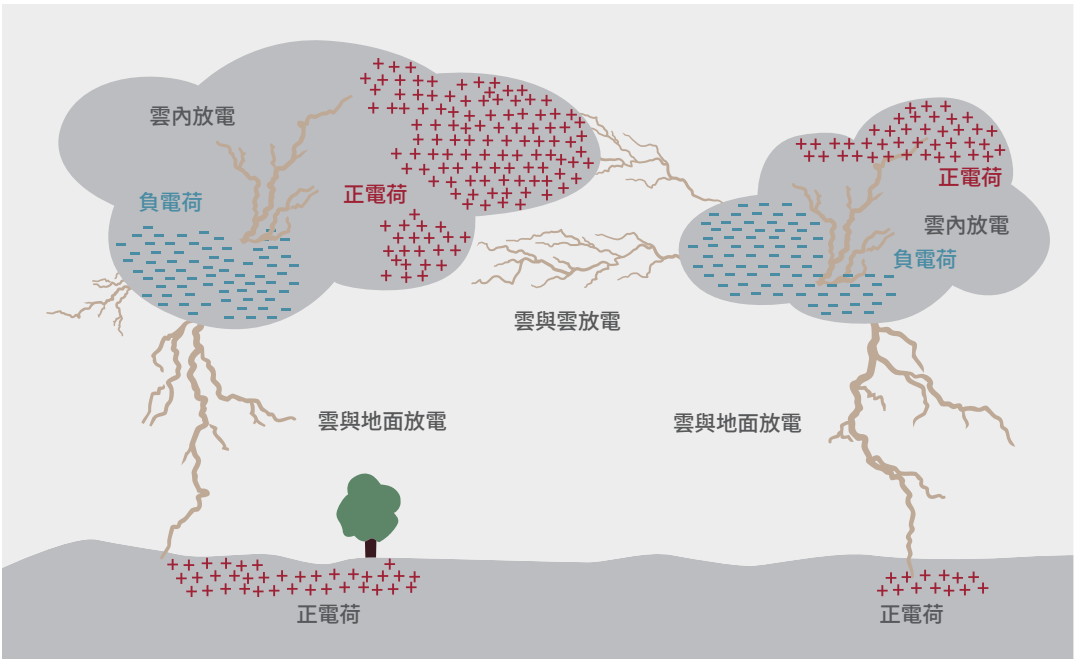
一、閃電與富蘭克林

在2024年4月30日晚上，香港天文台全日共錄得6,106次雲對地的閃電，而在晚上10時至11時之間，更佔了5,914次，即98%。閃電的「電」，其實是非常危險的：如果建築物被閃電擊中，有可能引發火災而導致建築物損毀；如果輸配電網的架空天線被閃電擊中，有可能引起供電中斷；如果人被閃電擊中，有可能即時死亡。因此，我們要認識閃電，也要知道應對之法。為了減低閃電所造成的破壞，現代的建築物都安裝了避雷針，架空天線塔頂則有連接地線裝置。大家請緊記，如有閃電，切記不要留在露天場所，或在樹下避雨，因為這樣很容易被閃電擊中。

閃電是一種自然現象，產生在積雨雲中，包括在雲與雲之間、雲與地之間或者雲體內各部位之間的強烈放電現象。圖一展示了積雨雲內及地面上電荷的可能分佈。在積雨雲內的正負電荷層之間，當電場有足夠強度時，便會產生閃電。通常在積雨雲內產生的電荷，底層為陰電負電

荷，頂層為陽電正電荷。隨着雲的移動，正電荷和負電荷彼此相吸，但由於空氣是不良導電體，地面上的正電荷會移至樹木、山丘，或是高大建築物的頂部，故有機會與帶負電的雲層相遇。再者，負電荷亦以枝狀的觸角向下伸展，更可能接近地面。最後正負電荷終於穿越空氣的阻障而相互連接，所造成的巨大電流沿着一條可傳導的路徑從地面直向雲湧去，產生出一道明亮奪目的閃光，這就是所謂的「閃電」。由於閃電的溫度極高，可達攝氏28,000度，使閃電途經的空氣快速膨脹。隨着空氣迅速移動，觸發出巨響，這便是轟隆轟隆的雷聲了。

在17世紀初，當時對電的認知只限於靜電，而靜電是經摩擦產生的。用絲綢摩擦過的玻璃棒上所帶的是正電荷，用毛皮摩擦過的橡膠棒所帶的是負電荷。靜電累積之後，電荷間通過瞬間電流發生轉移的過程稱為「放電」。在冬天時，手摩擦了金屬，便會產生微量電火花。靜電可以用萊頓瓶（Leyden Jar）來儲存。



圖一 積雨雲內及地面上的電荷分佈

萊頓瓶是一個玻璃容器內外覆蓋着導電金屬箔作電極板。瓶口上端連接一個球形電極，下端利用導體與內側金屬箔或是用水連接，內部與外部的金屬會攜帶相等但極性相反的電荷。

美國發明家班哲文·富蘭克林（Benjamin Franklin, 1706-1790）在1752年研究閃電。他進行了風箏實驗，在雷雨天氣下放風箏。經過實驗，他證明了雷雨雲中的閃電與靜電放電的火花相同。該實驗是在一個預計有雷雨雲的下午，他在雷雨雲未出現前讓風箏飛向天上。當雷雨雲掠過時，他估算雲中的電荷會傳到風箏上，然後沿着濕絲線、鑰匙

和電線傳到萊頓瓶。該風箏是用絲手帕和雪松木條做的，而風箏則用絲綢製造，那便可以避免被雨水破壞。雪松木條的頂端，繫着一條長的細鐵絲，用來吸引靜電，在風箏上綁了一根絲帶線（即風箏線）。而在線上的另一端，繫着一把鐵鑰匙。他在鑰匙圈上綁了一條絲帶和一根細長的鐵絲。鐵絲的另一端則連接了一個可儲存靜電的萊頓瓶。

富蘭克林在做實驗時是停留在某種遮蓋物之下，因此他放風箏的那段絲帶線就能保持乾燥。如果弄濕了，他可能會因接觸到雲層靜電而觸電身亡。他亦特別注意到不要讓風箏線或鑰匙接觸任何金屬框架或

物體，從而使自雲層的電流能進入萊頓瓶。透過實驗，富蘭克林能夠進一步理解「電接地」的原理。他推斷，如果雷雨雲中的電荷能夠傳導到地面，那麼被閃電擊中的建築物就不會受到任何損害。因此，他發明了以一根鐵棒製成的避雷針，其長度足以將一端插入地下約一米深，穿過建築物，另一端高出建築物最高點約一米。避雷針就是這樣發明的，至今已有270年的歷史了！其實避雷針的真正作用是將雷電引到地上去，並不是避開雷擊。如果將避雷針改名為「引雷器」會更貼切。

二、電的歷史

要追溯電的歷史，首先要了解物質結構及原子中的電子，再看看電學中歷史名人的眾多發現。另外，電網供電亦曾發生過交流電與直流電之爭，從而奠定了現在電網供電的基礎。

(一)物質結構

佔有空間的物質可分割之最小微粒，是為「分子」(Molecule)。組成分子的基本單元，稱為「原子」(Atom)。例如水由水分子組成，水分子則由兩個氫原子及一個氧原子結合而成。

而組成原子的基本構造包括原子核(Nucleus)及圍繞在原子核外圍的電子(Electron)，而原子核內則由中子(Neutron)及質子(Proton)所組成。電子與質子是帶有大小相同但電性相反之電荷量(即 1.602×10^{-19} 庫侖)，而中子是不帶電的。由於每個原子中的質子數目與電子數目相同，所以淨電荷為零，即帶正電荷的質子與帶負電荷的電子總電量相同，故原子總電量呈中性。每個元素圍繞在原子核外的電子數目均不同，每一層的最大電子數為 $2 \times n^2$ (n 為層數)。例如在第二層最多可容納八粒電子。

帶負電的電子是受原子核內帶正電的質子吸引，在固定的軌道上環繞原子核而運轉，愈靠近原子核吸引力愈強。在原子中其最外層的電子可稱為「價電子」(Valence Electron)。價電子與原子核的距離最遠，受到的吸引力也最弱，當受到外來能量的影響，價電子能脫離軌道自由活動，而這些可自由活動的電子稱為「自由電子」(Free Electron)。當原子失去電子時，會成為帶正電的原子，稱為「正離子」(Positive Ion)；當原子獲得額外電子時，會成為帶負電的原子，稱為「負離子」(Negative Ion)。使原子變成離子的過程，則稱為「電離」(Ionisation)。

以導電性強弱可將物質種類分為導體(Conductor)、半導體(Semiconductor)及絕緣體(Insulator)。物質可利用其構成原子的價電子數目來初步判斷其導電性能。當價電子數目少於四個，該物質的價電子容易受外來能量而游離成為自由電子，因此該物料容易導電成為導體，如銅及鋁等金屬。銅的導電系數約為 5.8×10^7 (歐姆 $\times$ 米) $^{-1}$ 。當價電子數目等於四個時，此物料的導電性是介於導體與絕緣體之間。當受外來因素影響時，會有不同的導電性，如矽及鍺等物料。當價電子數目多於四個，此物料的價電子是被緊密束縛在其原子周圍，其不易受外來影響成為自由電子而成為絕緣體，如玻璃及陶瓷等物料。玻璃的導電系數約為 10^{-9} – 10^{-14} (歐姆 $\times$ 米) $^{-1}$ 。絕緣體在電氣設備中的功用，是用作支撐或隔離各個不同的導體，從而不讓電流通過。

(二)電學名人

眾所週知，在電學中常用的方程式是電壓＝電流 $\times$ 電阻。電壓的單位是伏特，電流的單位是安培，而電阻的單位是歐姆。這些單位之所以用電學名人命名，是為了紀念他們對電學的貢獻。

在1785至1791年間，夏爾·庫侖(Charles-Augustin de Coulomb, 1736-1806)發表了七篇有關電與磁的重要論文，當中包括了電的吸引及排斥定律、電的分佈及庫侖定律。電荷的單位因此以「庫侖」命名。

1800年，亞歷山得羅·伏特(Alessandro Volta, 1745-1827)發明了第一個電池。他以一串的金屬磁碟，以酸或鹽水浸泡成的紙板將磁碟分開，從而產生電流。電壓的單位後以「伏特」命名。

1822年，安德烈-馬里·安培(André-Marie Ampère, 1775-1836)發表了一篇論文，發現兩根平行載流導線以各自產生的磁場對另一根導線產生作用力。1826年，安培提出載有電流的長直導線，在其周圍所建立的磁場強弱，和導線上的電流大小成正比，和導線距離成反比之間的關係，即是所謂「安培定律」。至於導線周圍磁場的方向亦可判斷，這就是「安培右手定則」。電流的單位後以「安培」命名。

1826年，格奧爾格·歐姆(Georg Simon Ohm, 1789-1854)發現許多物質有一個共同特性：在一定的電壓範圍內，電阻是有定值的，這便是「歐姆定律」。後來電阻的單位，亦以「歐姆」命名。

1831年，邁克爾·法拉第 (Michael Faraday, 1791-1867) 提出他一生中最重要的發現「電磁感應現象」。有一天，他得到一塊圓柱形的長型磁石，長約22厘米，直徑約為1.9厘米。他以70米的銅絲，繞成一個中空圓柱形，並在銅絲接上電流計。實驗的結果是沒有在銅絲上發現電流。法拉第突然靈機一觸，把整塊的磁石快速插入中空的銅圈之中，電流計上的指針便擺動了，因此他又快速地將磁石抽出，指針又再擺動。於是一種以感應方法產生的電流便出現了。該圍繞變化磁通量的電導體中產生電動勢。這一原理後來被稱為「法拉第定律」，是在圍繞變化磁通量的電導體中產生了電動勢。他在1833年更提出電解法則（定量地算出電能與化學能之間互換的關係），對化學、合金等領域均有很大貢獻。因此電容的單位，後以「法拉第」命名。

1831年，約瑟·亨利 (Joseph Henry, 1797-1878) 利用他新開發的變動的電流和感應電壓之原理，創造了史上最早的電磁驅動機器之一。這就是現代直流電動機的最早範例。它沒有旋轉運動，只將一個電磁體放置在桿子上，來回搖擺。電感單位是以「亨利」命名的。

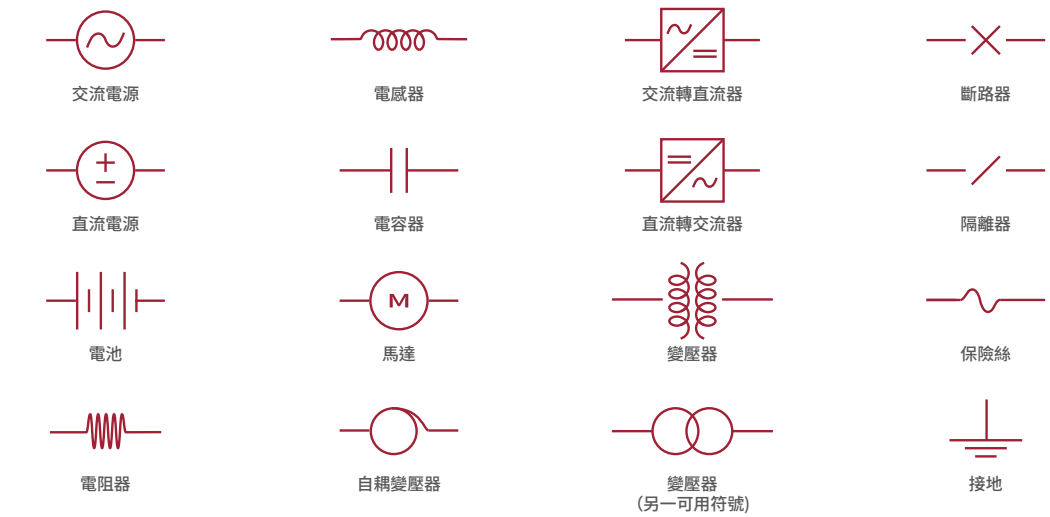
1887年，海因里希·赫茲 (Heinrich Rudolph Hertz, 1857-1894) 提出了製造電磁振盪器的方法，後來又在實驗中觀察了電磁波的反射、折射等現象。他的研究證明電磁波能在空氣傳播，其速度為光速，頻率的單位亦以「赫茲」命名。交流電在本地、英國等的頻率是50赫茲，在美國的頻率則是60赫茲。

圖二是一些電學中常見的符號。電路線圖通常用單線配以符號來表示。

(三)交流電與直流電之爭

法拉第在1831年發現的電磁感應展示了一種構造簡單發電的方法，但直到使用電的商業應用（例如燈）出現之前，人們對這種設備的需求很小。電的最早商業用途，例如電報、弧光照明系統和金屬電鍍都是使用非常昂貴的電池作為電源的。

弧光燈是人類最早期電燈的前身，用電來發光。弧光燈的原理是將可以導電的細木碳棒，連接上一個高電壓的電池，當電從電池正極在第一根碳棒傳導出來時，接上電池負極的另一根碳棒，便能產生閃亮的光芒。1878年的巴黎的劇院大道、羅浮宮或是夏特萊劇院便已用上弧光燈取代煤氣燈。當時的弧光燈是會滋滋作響的，主要用作街道照明。



圖二 電學中常見符號

1878年，英國人約瑟夫·斯旺 (Joseph Wilson Swan, 1828-1914) 成功發明了白熾燈，並且申請了白熾燈的專利。斯旺的這項發明被刊登在知名雜誌《科學美國人》 (Scientific American) 上，遠在美國東岸的湯瑪士·愛迪生 (Thomas Alva Edison, 1847-1931) 看到這篇報道後，在1879年10月召集了幾位得力助手，並吩咐他們分別去製作燈泡、計算公式以及尋找燈絲。在那幾個不眠不休的晚上，他們終於找到完美的燈泡雛形。他們嘗試了不同材料的燈絲，最後選用了熔點超過攝氏 3,500 度的碳化綿絲。1879年10月21日，這顆碳絲白熾燈連續燃亮了45個小時（經繼續研發的燈泡能持續發亮1,400小時）。

1880年代初期的發電機有兩種：直流 (Direct Current) 發電機及交流 (Alternating Current) 發電機。事實上，直流發電機在交流發電機加上換向器 (Commutator) 便可產生直流電。有了發電機，電力供應商可以將電力照明帶入客戶的企業或家庭。當年，美國共有三間供應商。

愛迪生的愛迪生照明公司在1882年成立，它基於相對較低的110伏特直流電源，為其高電阻白熾燈供電。直流發電機可以直接與蓄電池一起使用，從而在輕負載時使用較小的機器實現經濟化運作並提高可靠性。直流供電的有效傳輸範圍相對較短，而發電廠必須靠近人口中心，為距離少於1.6公里的客戶

提供供電服務。在1884年，喬治·威斯汀豪斯 (George Westinghouse, 1846-1914) 的西屋電氣公司 (Westinghouse Electric) 亦進軍電氣照明行業，他在1885年知道英國正在開發交流電系統，因此認為自己的事業大有可為。隨着變壓器的發展，變壓器能將電壓「升壓」到更高的傳輸電壓 (此電壓是3,000伏特)，然後降至較低的最終用戶電壓供商業和住宅使用。高電壓使中央發電站能夠為大面積、長達11公里的電路供電。在1886年3月，安裝了第一個多電壓的交流電源系統為白熾燈供電。到1887年底，湯姆森·休斯頓電力公司 (Thomson-Houston Electric Company) 亦建造了22個發電站，能提供直流及交流供電系統。當時的愛迪生照明公司擁有121個直流電站，西屋電氣公司則擁有68個交流電站。

在電力行業中，尼古拉·特斯拉 (Nikola Tesla, 1856-1943) 的交流電研究在1887-1888年間，共獲得了30多項發明專利。特斯拉的基本專利發明將「兩相」發電機與電動馬達連接一起。在該專利中，亦描繪了一種具有三個線圈的發電機，其末端連接到六個絕緣接觸環，形成三個獨立的電路 (這是日後「三相」供電電網的雛型)。特斯拉於1888年5

月應邀在美國電氣工程師學會發表演講，講題是「交流馬達和變壓器的新系統」，引起了威斯汀豪斯的注意。因為特斯拉的交流電機和相關電源系統，是符合西屋電氣公司所需。特斯拉在西屋電氣公司工作期間，他專注於頻率相對較高 (125Hz 和133Hz) 的兩相和單相感應馬達，但他未能製造出可靠的感應電機。其後，在俄國的米哈伊爾·多利沃-多布羅沃爾斯基 (Michail Osipovič Dolivo-Dobrovolsky, 1862-1919) 觀看了特斯拉的兩相系統後亦成功製作了三相感應馬達。其後，三相六線更可以減少至三相三線供電，交流供電成為了供電的經濟模式。交流電與直流電之爭可算是結束了。

以上的供電歷史故事，成為了在2017年拍攝電影「電流戰爭」 (The Current War) 的題材，其內容講述支持直流電的愛迪生與支持交流電的威斯汀豪斯，如何競爭成為美國最大的供電商！

三、電力系統的發電輸電配電

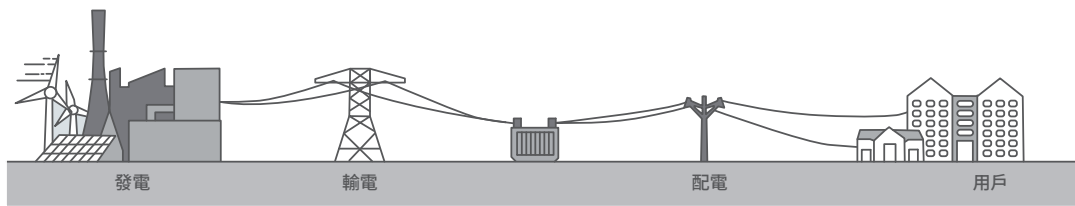
電力系統的發電、輸電及配電，從1880年開始計起，已有140年的歷史了。但電力從發電機將能源轉化為電能再經三相供電電網傳送至用戶

仍然是不變的。這些當然改變了以前依靠蠟燭和煤油燈照明的歲月，而電力更是日常都市家庭生活的必需品，以供電燈，電視機、雪櫃、冷氣機等各種家電之用。如圖三所示，電力系統是包括發電、輸電及配電等主要部分，將電能從發電送至每一個用戶。以下是有關電網發電、輸電及配電的一些歷史進程。

(一)輸電設備

最早期的電力供電設計，發電廠是比較接近用電中心的。香港第一座發電廠位於現在灣仔星街，但在1922年已經拆卸。1919年在北角電氣道落成的發電廠及1973年在青衣島南部落成的發電廠，亦早已拆卸。現時為港島供電的是南丫發電廠，在九龍及新界供電的是青山發電廠及龍鼓灘發電廠。這些發電廠都遠離市區的用電中心。

電力傳送最大的損耗是導電體 (如銅或鋁等金屬) 的電阻，電力傳送=電壓×電流，損耗=(電流)²×電阻。因此要在定量電流下而可傳送較多電力，必需將電壓提升。以香港供電為例，在1948年的輸電電壓是11,000伏特；從1982年開始，在九龍及新界的輸電電壓是400千伏特，在港島的輸電電壓則是275千伏特。現時在世界上作遠距離 (超過400公里) 輸電的最高電壓是1,150千伏特。值得注意的是在中國的特高壓 (Ultra-high Voltage) 輸電的技術優良，其電壓包括有直流電±800千伏特，直流電±1,100千伏特，交流電1,000千伏特；使中國在西電東送時將損耗減至最低。



圖三 電力系統之發電、輸電及配電

在電網的發展歷史中，俗稱「開關」的斷路器是重要的元件，用於設置線路安排、系統控制及隔離故障。例如，400千伏特斷路器的切斷故障能力為44,000兆伏安。斷路器的絕緣介質分別有油、壓縮空氣、六氟化硫(SF₆)和真空。「油斷路器」在1900年代初推出，隨後於1930年代改進為「最少油斷路器」。六氟化硫作為氣體絕緣的斷路器，亦於1970年代初啟用於275千伏特輸電網中，其後亦用於275及400千伏特輸電網中。由於六氟化硫是溫室氣體，其替代品如氮氣仍在研發中，所以在斷路器整個生產、運作、維護和處置過程中，必須有效地控制六氟化硫，使它不會被釋放出來。而真空斷路器，主要用在11和22千伏特配電網中。

架空天線及地底電纜是構成電網輸送電力的必需線路元件。而高壓的地底電纜是十分昂貴的，要開坑掘路放在地底來鋪設。因此地底電纜價格會比架空天線價格高達十倍或以上。如果是超高壓作遠距離傳送，價格應會更高。而架空天線用作輸電時，有可能會受到雷擊或植物生長的影響。

時至今日，香港的電網供電的可靠性已達至99.999%的世界水平，但每年仍然可能會有大約五分鐘停

電。為甚麼不能達致100%呢？因為電網供電是受到很多因素影響的。例如天氣、結冰和強陣風可能導致架空線路結構上的機械超載。再者，電力系統由各種組件組成：發電機、變壓器、電纜、架空天線和斷路器等設備。此類組件的絕緣性能會因老化而降低，最終導致絕緣擊穿，產生短路故障。違反安全程序和不安全行為等的人為錯誤亦可導致停電。所以在電網設計及運行時，要預計發生和處理單一故障的情況下，都不會影響整體的運作，這叫作「N-1考慮」。

(二)供電質素

當我們享受着穩定電力供應時，如果一但突然發生停電，便會帶來很大不便。在高樓大廈林立的香港，有超過50%的人口是在15樓或以上居住或工作。如果停電，電梯便無法運作，他們要爬樓梯上下樓，好不吃力！其實在世界各地，大停電時有發生。大停電超過四小時而影響超過3,000萬人亦有七次！第一次是在1965年11月9日下午5時28分在北美洲發生，北美紐約州全境、美國東北部各州及加拿大東部部分地區停電。超過3,000萬人和207,000平方公里的地區受到影響，而停電亦長達12小時。事後，當局調查了停電的原因，供電方亦作出了相應改善。該

事故是由數個原因導致的，其中包括人為錯誤。事後的重要改善措施，是成立能源管理系統，以及在架空天線組裝自動重合裝置。

1971年8月中旬，九龍及新界全部地區也發生一次大停電。當時颱風「露斯」吹襲香港，在懸掛十號風球期間，有一塊金屬片被吹進觀塘區一座室外132千伏特變電站，導致母線短路。不幸的是，由於颱風前一天進行了測試，母線的繼電保護已被停用。母線短路故障不能清除，因此所有發電機全部跳停，九龍及新界所有地區停電。在事故發生後，有關方面進行全面審查並作出改善安排。所以在輸電網上，規定要有兩套主繼電保護系統，以確保短路故障發生時，繼電保護能「可靠」及「準確」地將故障隔離。

此外，電力也有一種特性，就是發電機產生的電是要即時應用，即供應等於負荷需求，而供電的頻率剛好是額定頻率（在香港是50赫茲，在美國則是60赫茲）。如果供應量多於需求量，額定頻率會上升；如果供應量低於需求量，額定頻率會下降。因此，電力供應及需求的平衡，可從實時的頻率來檢視。

電壓驟降也是電力系統有時會發生

的，這是供電的質量問題。當有電網發生「短路故障」，電壓會受到影響而會在短時間（如100毫秒）內驟降，電力供應不會中斷，但有些比較舊式的電梯，是沒有過渡能力的。電梯會即時停止，更可能停在樓層間，電梯內的人因而被困。新式的電梯會在電壓驟降後，運行到最近樓層才停止及安全開門。

(三)碳中和

根據2015年的《巴黎協定》(Paris Agreement)，我們需要將全球平均氣溫上升控制在攝氏1.5度的上限。然而，全球二氧化碳排放量持續增加，這種情況將帶來日益惡化的極端天氣和潛在災難性的海平面上升，使地球的某些地區無法居住！因此，我們要盡一切努力實現二氧化碳零排放，才可在2050年達至碳中和。因此，我們要加速開發及應用可再生能源。過往百餘年以化石燃料經機械能轉為電能的發電機應逐步減少甚至停用。水力發電及核能發電是不會排放二氧化碳的。而電能亦可以由太陽能、風能等轉變而產生，並且不會排放二氧化碳。

如果引入可再生能源，電網必需要更「有效的」(Effective)控制及管理。由於太陽能或風能是斷斷續續、時有時無的供電，所以電網亦要配

合。電池儲能系統 (Battery Energy Storage System) 可平衡能源供需、維持電網供電穩定性及防止再生能源的浪費。另外電網亦應使用人工智能及物聯網等技術，使之成為智能電網。

(四)電氣安全

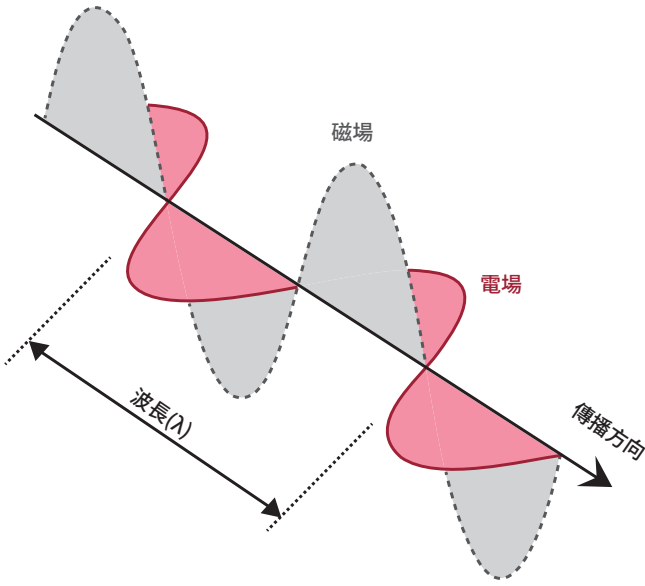
電氣安全是指所有與發電、輸電、配電以至用電各方面的安全。不安全的電力裝置會導致人命傷亡及財物損害。高壓電力裝置通常在發電、輸電及配電的電網中，由有專業知識及有經驗的人員操作，並且有不同的工作守則以保障電力系統安全運作。

在家居用電中(即220伏特)，一定要安裝漏電保護器 (Residual Current Device, RCD)，家用插座通常採用30mA的RCD，以保護用戶免受漏電甚至電擊的危害。此外，電弧故障斷路器 (Arc Fault Detection Device, AFDD) 是一種偵測到電氣迴路中有電弧故障發生，即會自行斷路以避免電弧故障產生損害的保護裝置。由於一般的微型斷路器不可能檢測到小電流的電弧故障，時間長了是會引起高熱並燃點附近物件，繼而引致嚴重的火災。所以RCD及AFDD是現代家居的重要保護裝置！

四、電「波」

電與光是有相關的好拍檔。電最初是應用在照明方面。愛迪生研發的白熾燈至今超過百多年，但白熾燈的鎢絲通過電流時會產生大量熱量，電能只有10%成為光能而90%是被消耗為熱能。在節約能源的今天，白熾燈已被淘汰並被發光二極管(LED)所取代，LED可以直接把電轉化為光。LED中的五價元素(n型半導體)電子較多，這些多餘的電子會流向擁有電洞的三價元素(p型半導體)。電子和電洞結合後即會釋出「光子」。

我們日常用的「電」是電原子以「粒」子的型態出現。而電原子亦能以「波」動的型態出現。這種雙型態的特性，與「光子」或「光波」的雙型態出現是相同的。「光電效應」是阿爾伯特·愛因斯坦 (Albert Einstein, 1879-1955) 在1905年提出的，他亦憑此發現在1921年獲得諾貝爾物理學獎(Nobel Prize in Physics)!現在且看看「電磁波」中，電在「波」動的型態及其應用。



圖四 電磁波的前進

(一)電磁波

光電效應 (Photoelectric Effect) 是指當光的能量並非均勻分佈，而是負載於離散的「光子」，而這光子的能量和其所組成的光的頻率有關。這個突破性的理論不但能夠解釋光電效應，也推動了量子力學的誕生。

1905年，愛因斯坦在論文〈關於光的產生和轉變的一個啟發性觀點〉(“On a Heuristic Point of View about the Creation and Conversion of Light”)裏，重新解釋光電效應，他提出光量子假設，光束是由一群離散的能量粒子組成，稱為「光量子」，而不是連續性波動。這光量子後來

簡稱為「光子」。對於馬克斯·普朗克 (Max Planck, 1858-1947) 先前在研究黑體輻射中所發現的普朗克關係式，愛因斯坦給出了另一種詮釋：頻率為f的光量子擁有的能量為hf，h因子是普朗克常數。當光照射到金屬表面時，只有高於某特定頻率的光才會導致光電效應(電子射出)。

由此「電子」能以「粒」子或「波」動的兩種型態的其中一種出現，這現象要到1924年才由路易·德布羅意 (Louis de Broglie, 1892-1987) 提出，也是建基於愛因斯坦和麥克斯韋對光波的研究，而推論出來的任何物質同時具備波動和粒子的性質。

德布羅意在1929年亦因發現了電子的波動性而獲得諾貝爾物理學獎。

其實電磁波存在的研究，早在1820年已經開始。1831年法拉第提出電磁感應現象時，已預言了電磁波的存在！電磁波是一橫波，電場方向與磁場方向相互垂直於傳播方向。圖四是一條電磁波的前進圖像。

在電磁學上最重要的定律應是詹姆斯·麥克斯韋 (James Clerk Maxwell, 1831-1879) 方程式，這是他在1864年將數學分析方法引進電磁學的研究領域。他首先提出光的電磁理論，其後發展成電磁波的一般方程式，他整合了庫侖定律、高斯定律、法拉第定律、安培定律等而成為有名的電磁波方程式。

這也許是電學中比較深奧少許的數學，不過麥克斯韋電磁場理論有以下結論：

- 各帶電體或電流，它們之間的一切電磁作用，都通過它們之間的區域而傳遞；
- 電能或磁能不僅帶電、磁化或流動，且大部分是分佈在周圍的電磁場中；
- 磁通量既無始點又無終點，即不存在磁荷；
- 光波也是電磁波。

其實電場及磁場的相互作用，除了以上在發電機的應用，以「波」的型態作應用，這就是電磁波，也是與電相關連。電磁場在自由空間的傳播速度是「光」速，即 $c=3 \times 10^8$ 米/秒。如電磁波的頻率為 f ，其波

長是 $\lambda=c/f$ 。以下是電磁波的簡單介紹：

電磁波	頻率
γ射線	$>3 \times 10^{19}$ 赫茲
X射線	3×10^{16} 赫茲 – 3×10^{19} 赫茲
紫外光	3×10^{15} 赫茲 – 3×10^{16} 赫茲
光譜	3×10^{14} 赫茲 – 3×10^{15} 赫茲
紅外線	3×10^{11} 赫茲 – 3×10^{14} 赫茲
無線電	3×10^3 赫茲 – 3×10^{11} 赫茲

電磁波是包羅萬有的。其最重要的應用是在通訊方面。

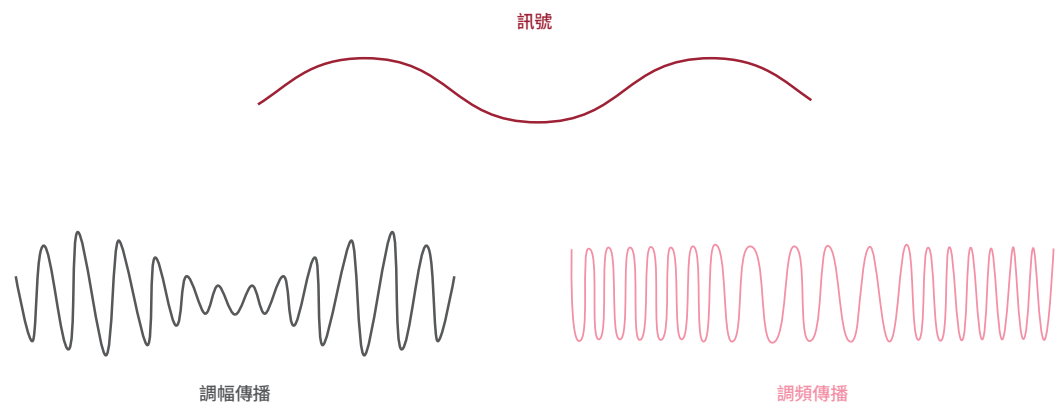
(二)「電」訊

人類早在古代已有需要作即時遠距離溝通。如煙霧訊號是其中一種，並且要在良好的能見度才能傳送。而利用電線作訊息的傳送演示是在1837年由薩繆爾·摩斯 (Samuel Morse, 1791-1872) 開發的電報機。而電話要到1870年才被發明。

在1864年，麥克斯韋的電磁波理論亦啟發了不少的專家以無線電作通訊的實驗或示範。在1895年，古列爾莫·馬可尼 (Guglielmo Giovanni Maria Marconi, 1874-1937) 在當

時已啟用的簡單無線電裝置進行了改進，在接收機和發射機上都加裝了天線，成功地進行了無線電波傳輸信號的實驗。翌年，他在英國進行了14.4公里的通訊試驗成功，並取得專利。在1897年，他在倫敦成立馬可尼無線電報公司 (The Marconi Company)。1901年12月，馬可尼的研究小組在美國紐芬蘭 (Newfoundland) (現在則是加拿大的一個省) 接收到從英國發送出來的第一個橫跨大西洋的無線電信號。當時，很多人都不明白為甚麼無線電可以不受地球表面彎曲的影響，傳播那麼遠的距離？後來，人們才知道是因為電離層「反射」了無線信號！人類的通訊方式，亦開始發生了鉅變。在1909年，馬可尼榮獲諾貝爾物理學獎。他亦被後世尊稱為「無線電之父」。

1900年加拿大發明家范信達 (Reginald Fessenden, 1866-1932) 首度經無線電在1.6公里的距離發出「聲音」，這相信是最原始的無線電廣播，更在日後發展成收音機廣播。調幅 (Amplitude Modulation, AM) 和調頻 (Frequency Modulation, FM) 是廣播信號的兩種方式，現在還在應用。調幅是頻率保持恆定，用載波的幅度改變來傳輸訊息，其頻率由535至1,705千赫茲。而調頻是振幅保



圖五 調幅與調頻傳播分別

持恆定，用載波的頻率改變來傳輸訊息，其頻率由88至108兆赫茲(1兆相等於一百萬)。圖五簡單說明了調幅與調頻傳播的分別。

而電視廣播的雛型要算是在1909年可傳送8×8解像度的影像作開始。至1928年時可以用每秒20幀的速度傳送24條直線。其後的發展是應用了陰極射線管(Cathode Ray Tubes)來作顯像。電視的發明家是菲洛·法恩軒沃斯(Philo Taylor Farnsworth, 1906-1971)。彩色電視機到1954年才研發。到現在已踏入數碼廣播的高清年代，電視機的解像度是1920×1080。

通訊人造衛星是一種中繼器，用來傳遞和放大無線電通訊訊號的衛星，它需要在地面上設有發射站與

接收站以作通訊渠道。通訊衛星可用於電視、電話、廣播、網路等領域。現時在地球軌道上有10,000多顆通訊衛星，使用電磁波來作直線傳遞訊號，其目的是不受地球地形限制，從而作遠距離的通訊。通訊衛星的理論早在1945年提出，而第一顆人造衛星是在1957年由蘇聯發射，其通訊的頻率為20.005兆赫茲和40.002兆赫茲。這也許是人類邁向太空探索的第一步。

隨着時代進步，人類對於長距離通訊的需求日益增加，在1941年的同軸電纜(Coaxial Cable)可作480條電話線路。在1960年代，微波通訊是以頻率在0.3千兆赫茲至300千兆赫茲的微波為載體，在視線無阻擋的自由空間作直線傳播傳輸，亦開始廣泛應用。使用

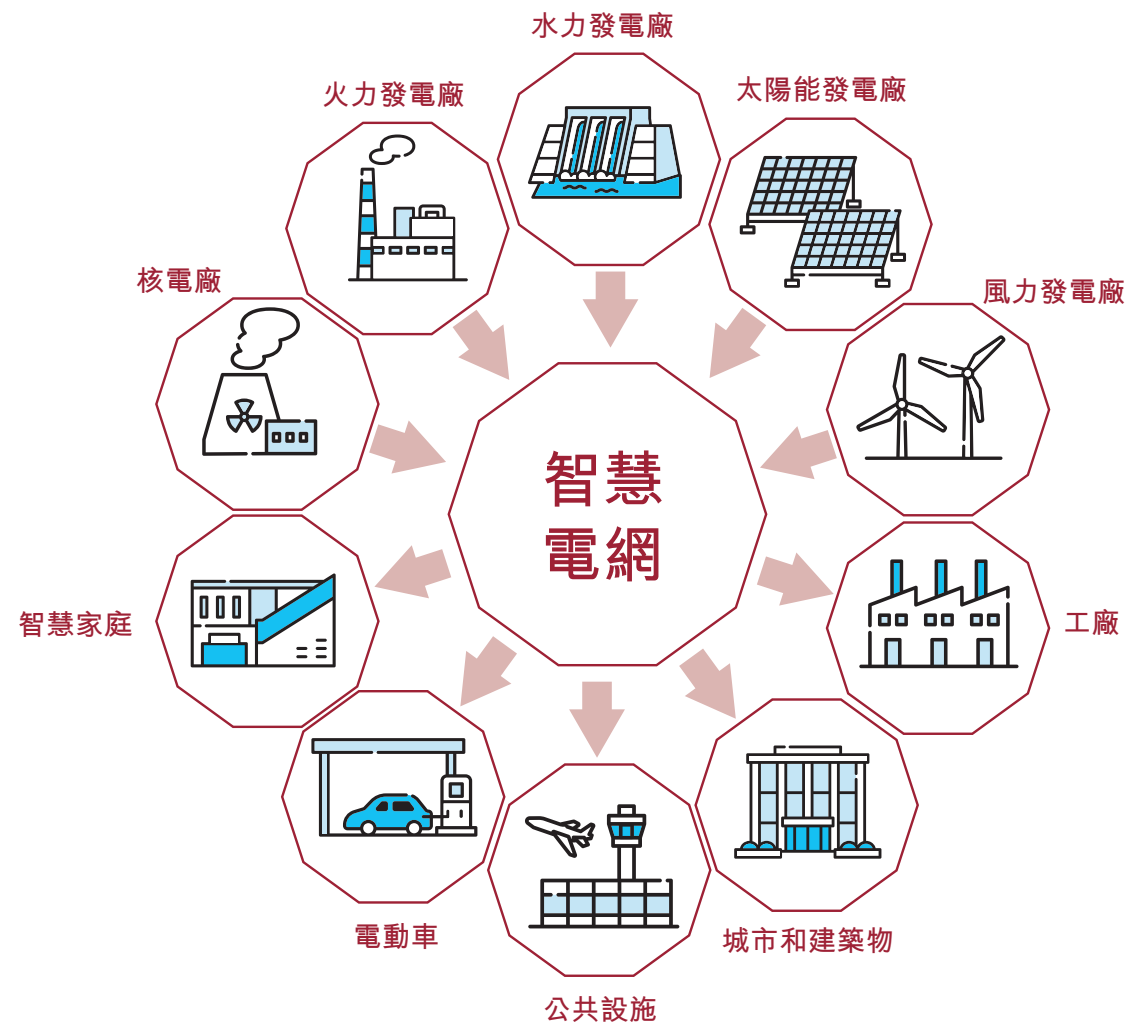
光來傳遞資訊要到1960年代，激光(Laser)的發明才有同調性高的發光源(Coherent Light Source)。在1965年，高錕(1933-2018)研發的光纖通訊技術，使用了玻璃纖維的結構特徵，提出使用玻璃纖維來實現光通訊，這是當今光纖通訊的基礎。他所提出玻璃纖維約每公里衰減20分貝(20dB/km)，證明光纖作為通訊媒介的可能性。時至今日，光纖通訊的進步已經是數字通訊(如數據中心)重要的設備。一條標準的單模單芯光纖的傳送速度可達至每秒10千兆位元(同軸電纜每秒300兆位元，通訊衛星每秒25兆位元)。高錕在2009年獲得諾貝爾物理學獎。他亦被世人尊稱為「光纖之父」。

無線手提電話的發展，差不多每十年便有新一代的突破。第一代1G在1979年研發。第二代2G在1991年引進，可以有文字信息。第三代3G在2000年引進，數據信息可以增至每秒2兆位元。第四代4G在2010年引進，其數據信息可以增至高於每秒100兆位元。第五代5G則在2020年引進，數據信息可以增至高於每秒1千兆位元。現在則已經進入了6G的準備及計劃年代！

五、能源與通訊的發展

前面概括地說到了電的方方面面，現在則談談電的最新發展和展望。

近年來，環保議題受到社會廣泛關注，世界各個經濟體正致力於減碳減排。為了實現二氧化碳零排放，全球能源結構正經歷前所未有的轉型，當中最矚目的一環，當推新能源。新能源技術的崛起，不僅是應對氣候變化的關鍵良策，更是推動經濟永續發展的核心動力。可再生能源如太陽能、風能、氫能等清潔能源技術的高速發展，更重塑了人類社會的能源使用模式。傳統的發電與輸配電網亦轉變成為智慧電網(Smart Grid)，以應對可再生能源間歇性供電的問題，同時進一步利用自動化技術和人工智能去優化電力資源的調度和管理，使電網能及時應對故障，並擁有實踐「自我修復的能力」。間歇性可再生能源的大規模併網，對電力系統靈活性提出了更大更高的要求。如圖六所示，智慧電網能整合各種類型的能源，將電力供應給不同的客戶，從而滿足不同的需要。



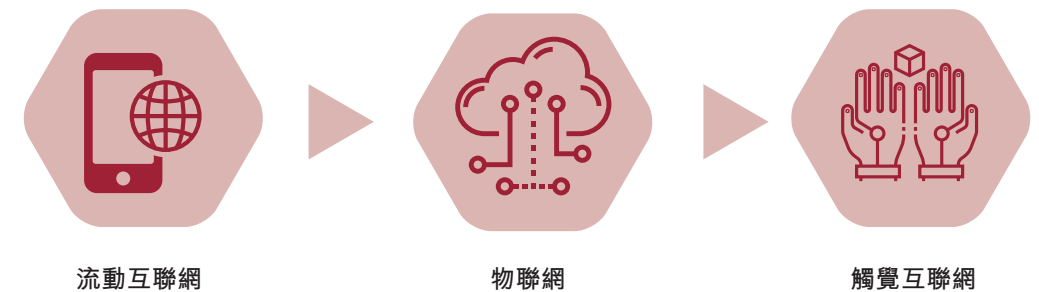
圖六 智慧電網

新能源的發展，有着無限潛力，應用場景亦不斷擴展。在交通領域方面，電動汽車銷量已呈現爆炸式和指數級的增長。電動商用車、電動船舶、電動飛機（低空經濟）等新興應用技術也開始嶄露頭角。在工業領域方面，綠電和綠氫正逐步替代

化石能源，用於鋼鐵、水泥、化工等高耗能產業的低碳轉型。在建築領域的能源革命，亦同樣進行得如火如荼。被動式建築、零碳建築等新概念逐步落地，城市中的建築物亦從能源消費者一變而為「產消者」（prosumer）。

另一重大突破亮點是在通訊方面。隨着6G通訊的研發和落實，超低延遲（約1毫秒）的觸覺互聯網（Tactile Internet）將是應用的另一個重要里程碑。圖七描繪了一種情況，那便是流動互聯網朝着物聯網、觸覺互聯網方向前進。先進的觸覺回饋系統、穿戴式裝置和感測器技術的研究也不斷推進，旨在提升真實感和互動品質，令技術精益求精。中外學者們正致力探索機器學習，着力研發更複雜的觸覺應用。這對於遠端手術、工業自動化和沉浸式虛擬實境體驗等應用至關重要。整體而言，觸覺互聯網有望徹底改變遠端物理交互，實現融合實體和虛擬實境的新型通訊、遠端操作和沉浸式體驗等。

在未來，通訊上的發展亮點將會是量子通訊。顧名思義，量子通訊利用量子力學原理實現信息傳輸，提供了理論上絕對安全的通訊方式，並有望突破傳統的速率極限，成為通訊安全和數字經濟的戰略性技術。量子密鑰分發（QKD, Quantum Key Distribution）技術是當前量子通訊最成熟的應用。與傳統的加密方式不同，QKD利用量子態的特性分發密鑰，任何竊聽行為都會留下可檢測的痕跡，從而實現「可證明的安全性」。中國在2016年成功發射世界首顆量子科學實驗衛星「墨子號」，此外在2017年亦建成連接北京至上海的2,000公里級量子保密通信骨幹網「京滬幹線」。2022年，中國科研團隊實現了1,200公里距離的量子糾纏（Quantum Entanglement）分發，刷新了世界紀錄，為全球量子通信網絡奠定了穩固的技術基礎。



圖七 流動互聯網朝着大型物聯網、觸覺互聯網方向前進示意圖

探索碳的 奇妙世界——

從科學到藝術，
從生活到材料

嚴晉躍

新能源與量子通訊兩大前沿先進技術領域並非獨立發展，它們是並肩而行，存在着深刻的協同效應。這種協同既體現在技術層面的相互支撐，也反映在系統層面的融合創新，共同推動未來智慧基礎設施的建設。同時，量子數據中心的高能耗問題也可透過清潔能源得到緩解，實現「綠色量子計算」。由此可見，文明進步是可與環保並存的。

六、總結

「電」是現代生活不可或缺的一環。電能發光，照亮世界，是推動人類社會進步的重要力量，而各式各樣的

電器用品，既便利了我們的日常起居，亦提升了我們的生活質素。綜觀電的發展，是無數科學家、工程師的智力創新、解決難題而達致的成果，當中更有多位科學家因在電力方面有重大發見而榮獲諾貝爾物理學獎。電力行業是極具挑戰性的，能源和通訊的創新和發明是兩大重要發展領域。當中有許多重大課題，例如「怎樣可以使廣大地區永遠不會大停電？」、「怎樣可以發電而沒有碳排放？」、「怎樣應用人工智能在電網中更有效運作？」、「怎樣可以突破傳統通訊的速率極限」等均亟待解決。期望年青一代能投身專業工程師行列，在「電」的行業及領域，承先啟後，繼往開來！

（作者按，本文嘗試深入淺出解釋一些電學原理，如想學習更多相關知識，可考慮修讀香港理工大學電機及電子工程學系的課程。）

探索碳的奇妙世界 —— 從科學到藝術， 從生活到材料



嚴晉躍

香港理工大學
建築環境及能源工程學系及
國際城市能源研究中心

一、引言

碳，作為週期表中的第六元素，其價值遠不止於純粹的化學性質。它承載着科學的基石，啟發藝術和文化的靈感泉源，構成了生命的基本元素，亦是應用廣泛的多功能材料。本文將深入探討碳在各個領域中的卓越地位，探索其多樣形態及對科學、生活、藝術和材料等領域的深遠影響。同時，我們將探討碳在全球可持續發展中的永恆價值，揭開碳這個元素的神秘面紗，展現碳的奧妙與神奇！

二、科學中的碳：引領創新的萬用元素

碳是一個看似平凡卻不可或缺的元素，擁有驚人的多功能性，就像科學界的「瑞士軍刀」，可以組合成無數種化合物和結構。

在有機化學中，碳是一個真正的明星。它能與其他元素形成共價鍵，這使得碳能構建各種分子結構，從簡單的甲烷到常見的二氧化碳，都離

不開碳的參與。有機化學的根本理論，在於碳的粘合力。因是之故，它可以形成線性鏈、分支結構、環狀化合物和立體異構。如此的多樣性，有助自然界和實驗室合成大量的有機化合物，推動該領域的創新和發現。這種多功能性和多樣性，使碳成為有機化學中至關重要的元素，推動了無數新化合物的發現與合成，豐富了我們的生活。

同時，碳在材料科學和納米技術領域扮演着關鍵角色。石墨烯、納米碳管和富勒烯等碳基材料展現出卓越的特性，包括強度、導電性和靈活性。舉例來說，石墨烯由單層碳原子組成，具有出色的導電性，納米碳管在納米技術中扮演着重要角色，而富勒烯則廣泛應用於醫學和材料科學領域。這些碳基材料的問世，改變了許多產業的形態，同時為許多先進技術的應用帶來了新的可能性。從電子學到醫學，從能源到材料科學，它們的出色特性使其成為各種應用領域的理想選擇。

隨着我們深入探索宇宙的奧秘，拓展科學探索的前沿，碳仍然是貫穿不同科學領域創新的核心元素。它的適應性、多樣性和結構多功能性，使它成為不可或缺的元素。展望未來，它將持續引領科學探究和技術革新的整體發展。

三、生命中的碳：生物系統的重要支柱

碳是生命中不可或缺的元素，也是所有生物體的基本組成部分。它存在於所有生命形式中，是構成蛋白質、脂質、核酸和碳水化合物等大分子的主要成分。碳的獨特性質使它能够與多達四個不同的原子形成共價鍵，使其成為這些大分子的多功能骨幹。

在蛋白質領域中，碳扮演着重要的角色，因為它形成了胺基酸的骨幹，而胺基酸是這些重要生物分子的基本構成。蛋白質不僅提供結構上的支援，還可扮演酶的角色，催化對生命至關重要的生化反應。

另一類重要的生物分子則依賴碳原子來維持其結構和功能。單糖如葡萄糖是製造能量的重要分子，展現了碳在細胞代謝過程中的作用。複雜碳水化合物如植物細胞壁中的纖

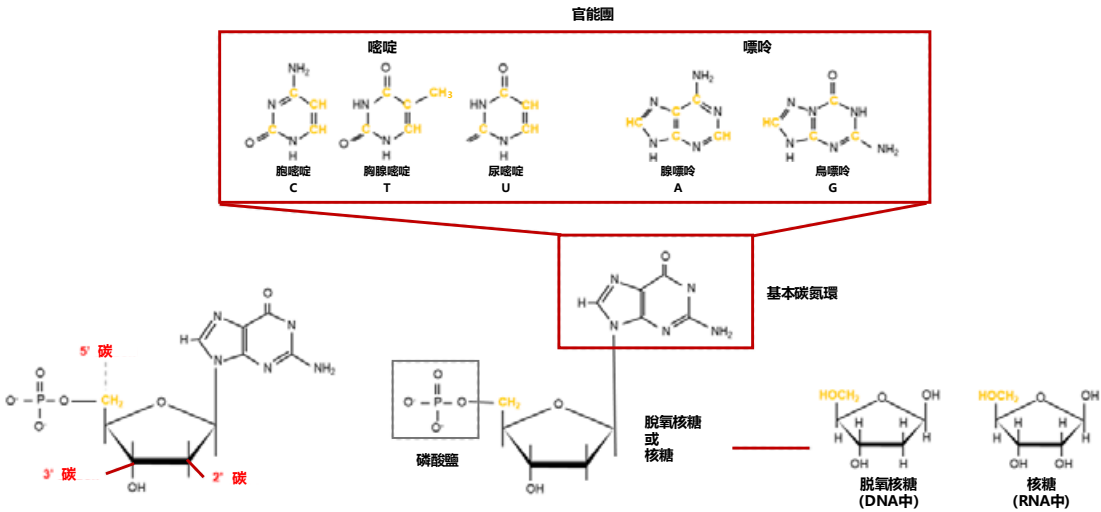
維素由碳鏈組成，為許多生物提供結構支援和膳食纖維。

脂質包括脂肪、油和磷脂，主要由碳水化合物組成，在生物系統中扮演多樣的角色。例如，不飽和脂肪中由碳原子形成的雙鍵賦予這些分子獨特的個性。

核酸是遺傳資訊的載體，其結構和功能都依賴含碳成分。DNA和RNA這兩種核酸是由糖-磷酸骨架和附着的含氮鹼基構成。這些鹼基，包括腺嘌呤、鳥嘌呤、胞嘧啶、胸腺嘧啶和尿嘧啶，均含有碳元素，可編碼生物生長、發育和繁殖所需的遺傳指令。

核酸是遺傳資訊的載體，其結構和功能依賴含碳成分。DNA中的每個核苷酸都含有四種可能的含氮鹼基之一：腺嘌呤(A)、鳥嘌呤(G)、胞嘧啶(C)和胸腺嘧啶(T)。腺嘌呤和鳥嘌呤被歸類為嘌呤。嘌呤的主要結構是兩個碳氮環。胞嘧啶、胸腺嘧啶和尿嘧啶被歸類為嘧啶，它們的主要結構是單個碳氮環。每個基本碳氮環都附有不同的官能團。DNA包含A、T、G和C，而RNA則包含A、U、G和C。

碳在這些基本生物分子中錯綜複雜的相互作用，突顯了它在生命過程中



圖一 藏在遺傳信息中的碳
資料來源：本文作者研究團隊繪製

的核心地位。從蛋白質的優雅摺疊到碳水化合物的能量儲存、再到脂質中的結構完整性，以及核酸中的遺傳訊息編碼，碳編織出多姿多彩的生命形態，突顯出其在地球上各式各樣的生命體中不可或缺的作用。

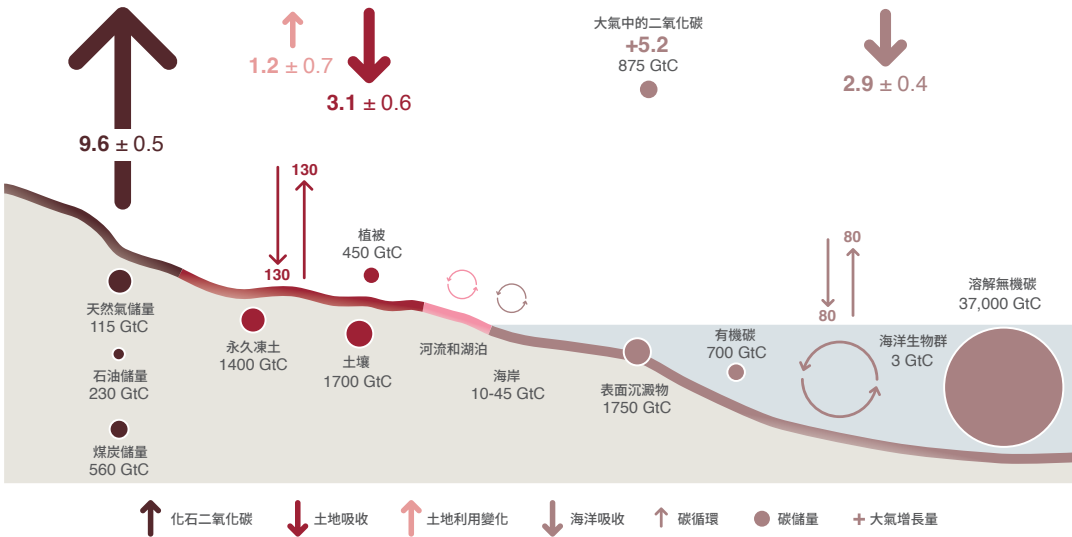
四、碳循環：元素交換的和諧之舞

在地球生態系統的複雜網絡中，碳循環掀起了一場和諧的元素互換交響樂曲，它支撐了生命的各個方面，維持着地球的平衡。碳是一種多樣化且無處不在的元素，在碳循環這個偉大的過程中處於中心位置，透過不同的儲存方式和途徑，在蛻變和更新的微妙旅程中進行轉換。

碳循環：碳循環的核心是一系列相互關聯的過程，這些過程調節大氣、陸地、海洋和生物之間的碳流動。從植物在光合作用中吸收二氧化碳開始，到二氧化碳透過呼吸作用和腐爛釋放到大氣中，碳循環的每一個步驟，都有助於地球上碳的無縫交換。

天然碳匯：碳以多種形式存在於地球的碳匯中，包括大氣、陸地植被、土壤、海洋以及埋藏在地球表面下的化石燃料。這些碳匯扮演着碳儲存庫的角色，透過生物、地質和物理過程，使碳在各碳匯之間流動。

碳循環全過程



圖二 大千世界的碳循環
資料來源：Global Carbon Project. (2022). Supplemental Data of Global Carbon Budget 2022 (Version 1.0) [Data set]. Global Carbon Project. <https://doi.org/10.18160/gcp-2022>
(版權遵守：Creative Commons Attribution 4.0 International)
本文作者研究團隊中譯原圖文字

人類影響與氣候變化：人類的活動破壞了碳循環的微妙平衡，導致大氣中的二氧化碳含量空前增加。化石燃料的燃燒、伐林和土地使用的變化，均改變了自然界的碳通量和碳平衡，加劇了全球氣候變遷及其對生態系統和生物多樣性的相關影響。

海洋性影響：海洋作為巨大的碳匯，在調節大氣中的二氧化碳含量上十分重要。透過海洋吸收和生物固碳等過程，海洋起了關鍵的碳匯作用，吸收並儲存大量原本會造成溫室效應的碳排放。

減緩碳排放：減緩碳排放和恢復碳循環平衡的努力包括重新造林計劃、可持續土地管理措施、碳抵消計劃和開發可再生能源。這些策略旨在減少碳排放、加強碳封存，並促進人類活動與環境之間的可持續關係。

支撐地球上的生命：碳循環以其複雜的相互作用過程和反饋機制，對維持地球上的生命至關重要。碳循環維持大氣中二氧化碳含量的平衡、調節全球氣候模式，並支持生物的滋長與發展，是地球自然系統相互緊扣的明證。

五、藝術與文化中的碳：靈感與象徵的來源

除了其科學和生物意義之外，碳在歷史上也為藝術和文化留下了種種不可磨滅的印記。從古代的象徵到當代的藝術表現，碳的各種形態及其在生活中的重要作用，都以無數的奇妙方式描繪出來。

藝術家們從碳的特性及其在自然界中的重要性中汲取靈感。碳從原材料到精煉形態的轉化過程，象徵了創造和轉化的藝術旅程。碳與生命力的緊密聯繫在各種藝術形式上中得以體現，象徵着韌性、持久性和循環性。

在文化背景中，碳一直象徵着轉化與更新。在碳循環的框架中，碳在生物、大氣和地球之間進行循環，一直是不同文化中的故事、儀式和傳統的靈感之源。作為生命中的基本元素，碳在文化敘述中極為重要，因為它引出了成長、變化和相互連結的主題。

碳基材料在藝術和設計中的使用，進一步突顯了其在創造性表達中的影響力。無論是用於繪畫的木炭還是碳黑顏料，碳基材料一直是藝術實踐中不可或缺的一部分，為視覺表現增添了深度、廣度和象徵意義。

在當代藝術中，碳的特性及其與環境問題的關係已成為藝術論述的中心主題。藝術家通過裝置藝術、雕塑以及多媒體作品，探討碳排放、氣候變遷和人類與環境的互動影響，旨在提高公眾對這些全球迫切問題的關注，並引發批判性的反思。

透過其在藝術與文化中的多樣表現，碳已超越其科學本源，成為創造力、轉變與相互連結的象徵。碳在藝術表現和文化敘述中的持久影響，對於塑造人類文明和激發創造力，具有無可比擬的重要性。

六、碳與洞穴繪畫

碳最早的藝術用途之一可以追溯到史前時代，當時木炭（碳的不純形式）被用於洞穴繪畫。在法國的拉斯科洞穴（Lascaux Cave）中發現的這些藝術作品，是已知最古老的人類藝術之一。木炭的深黑色是創造圖像的理想材料，用來描繪動物、人像和抽象符號，這些畫作歷經數千年仍保持着顯著的清晰度與色彩，不稍褪色。

七、材料中的碳：穿越鑽石與石墨的極限之旅

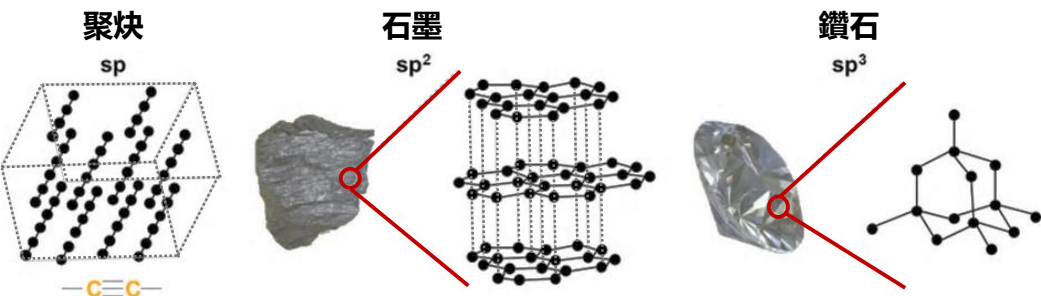
碳作為週期表上的第六元素，展現出多樣化的同素異形體和化學性質，在科學、工業、藝術和文化領域中都有舉足輕重的影響力。在碳的各種表現形式中，鑽石和石墨是最具代表性的兩個極端。



圖三 拉斯科洞穴

資料來源: Bandarin, F. (2006). Lascaux Cave. Prehistoric Sites and Decorated Caves of the Vézère Valley (France). UNESCO. <https://whc.unesco.org/en/documents/108435E>.

(版權遵守: Creative Commons Attribution-ShareAlike 3.0 IGO)



圖四 鑽石與石墨

資料來源：O'Bannon, G. Xia, F. Shi, R. Wirth, A. King, L. Dobrzhinetskaya, "The Transformation of Diamond to Graphite: Experiments Reveal the Presence of an Intermediate Linear Carbon Phase," *Diamond and Related Materials*, Volume 108, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2020.107876>.

(版權遵守: Elsevier)
本文作者研究團隊繪製

鑽石由碳原子組成，排列在緊密的晶格結構中，具有極高的硬度和折射率。這種獨特的結構賦予了鑽石非凡的特性，使其成為人類已知最堅硬的天然物質。鑽石的璀璨和耐用性不僅使其具有寶石的瑰麗，還因其在工業和技術上的應用而廣受推崇。

相較於鑽石，石墨則展現出截然不同的特性，它呈現層狀結構，層與層之間的分子間作用力很弱。這種結構賦予石墨優異的潤滑性能，使其

在鉛筆、潤滑劑和電池電極等領域有廣泛應用。石墨的導電能力和熱穩定性進一步擴大了其在工業領域的應用。

碳基材料的多功能性和高度可塑性不斷推動材料科學的創新和進步，為各行各業尖端技術的發展鋪路。無論是鑽石的璀璨，還是石墨的多樣性，碳的千變萬化展現了其持久的影響力，以及在材料世界中無可替代的地位。

八、結語

碳在科學、生物、藝術和材料領域中的多樣性和無處不在的特性，證明了這一基本元素有着永恆的價值，並與複雜的碳循環緊密交織在一起。從影響科學的創新到啟發藝術表現，碳在各個領域都極為關鍵。作為宇宙中最常見的元素之一，碳連接了萬物，其在自然界和人類社會中的影響深遠且多樣。

透過探索複雜的碳循環，並揭開碳的各種形式和應用的神秘面紗時，我們自然十分稱許這種非凡的元素。碳的特性超越無邊界限，它不僅在地球上發揮作用，還在宇宙中扮演着重要的角色。它無處不在，從星際塵埃到生命的基本組成要素，都彰顯了碳的卓越性。這種無窮魅力將為未來帶來無限的可能性，並持續啟發各個領域的發現和進步。

中
導師在線的
多媒體視頻教學

社會情感效應

李平
彭穎
古嬋媛

多媒體視頻教學中導師在線的社會情感效應



古嬋媛 彭穎滢 李平

香港理工大學人文學院中文及雙語學系
香港理工大學沉浸式學習及元宇宙教育研究中心

一、新型學習模式之多媒體教學

隨着疫情在全球爆發，線上視頻教學迅速發展成為一種新型的教學模式。相比傳統教學，雖然線上視頻教學存在着一定的不足，但無可否認的是，線上視頻教學靈活便捷，學生可以隨時隨地觀看。因此，如何有效地設計視頻教學以及理解設計特點與學生學習特徵的交互作用，是當下教育工作者迫切需要回答的問題。

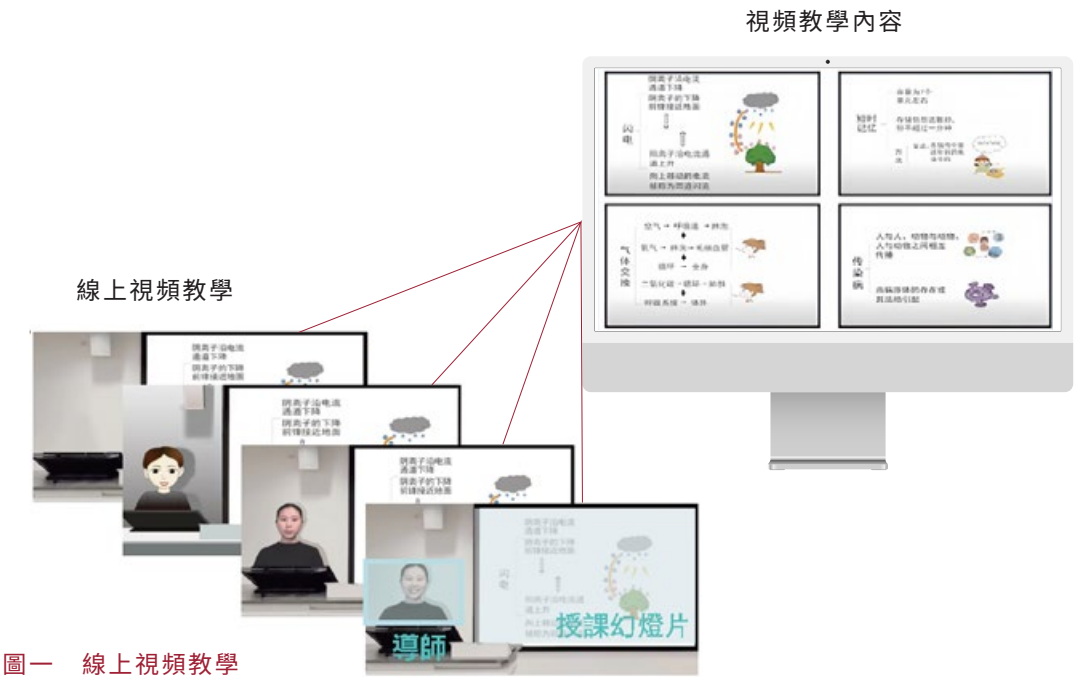
線上視頻教學是多媒體學習的其中一種形式，在教學過程中利用了多種媒體渠道共同傳遞知識，例如書面文字、口頭文字、圖片和動畫等。在多媒體學習的研究領域中，「社會代理理論」和「社會負荷理論」是兩個重要的理論。「社會代理理論」是指教學中的社會線索可以激發學生的社會情感反應，並增強學生選擇、組織和整合信息的深層認知加工，從而提升教學和學習效果。¹此外，根據認知

負荷理論，²關聯認知負荷參與有效學習的深層認知加工過程包括選擇、組織、整合學習內容等。結合「社會代理理論」和「社會負荷理論」，研究者認為視頻教學中的社會線索可能會激發學生的社會情感反應，並進一步激勵其分配更多的關聯工作負荷，從而完成深層認知加工。

基於多媒體學習的不同特點，著名教育心理學家Mayer教授及其實驗團隊提出了多個學習準則。³我們的研究則主要聚焦在與社會和情感特點有關的圖像準則 (Image Principle) 以及具身準則 (Embodiment Principle)。圖像準則指導師圖像的存在會增強學生的社會情感反應，並增強深層認知加工從而提高學習效果 (見圖一)。現有行為學研究表明，導師圖像是否提高學生的學習成績還存在爭議。一部分研究發現，相比無導師存在的條件，在有導師存在的條件下，學生的學習成績會更佳。這些研究

認為，導師的存在通過增強學生的社會情感反應來達到提高學習效果的目的。另一些研究則發現，導師圖像的存在對學生的學習成績沒有顯著的影響，甚至會令表現有所降低。這些研究指出，導師的存在反而會將學生的注意力分散到導師的圖像上，而非學習的材料上。因為已有的多數研究僅僅記錄了學生的行為或

眼動數據，所以導師的存在如何激發學生的社會情感反應，或如何阻礙學生的注意資源分配及其背後的神經機制，目前尚未清楚。透過神經成像技術，我們的研究不僅可以為闡明圖像準則的機制提供更深入的探討，還可以為當下的研究爭議提供新的神經證據。⁴



圖一 線上視頻教學

* 按：古嬋媛、彭穎滢兩人為本文作者，各自擔承50%的撰寫工作。文章由李平教授指導及編輯。此文章的主要內容基於三位作者已發表的英文原文（見註4）以及相應中英文文獻改編。

1. Richard E.Mayer, *Multimedia Learning* (3rd ed.) (Cambridge : Cambridge University Press, 2002) (<https://doi.org/10.1017/9781316941355>) ; Logan Fiorella & Richard E. Mayer, "Principles Based on Social and Affective Features of Multimedia Learning," in Logan Fiorella & Richard E. Mayer(eds), *The Cambridge Handbook of Multimedia Learning* (3rd ed.) (Cambridge: Cambridge University Press, 2021), pp. 275-336 (<https://doi.org/DOI: 10.1017/9781108894333.028>).

2. John Sweller, "Cognitive Load Theory: Recent Theoretical Advances," in Jan L.Plass, Roxana Moreno & Roland R.Brünken (eds), *Cognitive Load Theory* (Cambridge : Cambridge University Press, 2010), pp.29-47 (<https://doi.org/10.1017/CBO9780511844744.004>);John Sweller, "Cognitive Load During Problem Solving: Effects on Learning," *Cognitive Science*, 12(2)(1988), pp. 257-285 ([https://doi.org/10.1016/0364-0213\(88\)90023-7](https://doi.org/10.1016/0364-0213(88)90023-7)).

3. Richard E.Mayer, *Multimedia Learning* (3rd ed.).

4. Chanyuan Gu, Yingying Peng, Samuel A.Nastase & Ping Li, "Onscreen Presence of Instructors in Video Lectures Affects Learners' Neural Synchrony and Visual Attention During Multimedia Learning," *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 121(12)(2024), e2309054121(<https://doi.org/10.1073/pnas.2309054121>).

在圖像準則的基礎上，具身準則強調當視頻教學中的社會性線索呈現出像人類一樣的特徵時，學生的社會情感反應會被激發且注意力會被該線索所吸引，例如眼睛對視、手勢、臉部表情和像人類一樣的卡通導師。與圖像準則的研究現狀不同，Mayer等人指出，現有的研究較一致地發現學生在高具身條件下的學習成績，均高於低具身條件。有鑒於此，研究認為視頻教學中多媒體渠道的具身性，能通過影響學生的社會認知情感反應來影響學生的學習效果。但與圖像準則類似的是，目前的研究多數基於行為和眼動，因此具身性如何影響學習的神經機制尚未明確。

二、自然神經成像技術及多模態數據分析

功能性磁力共振掃描 (fMRI, Functional Magnetic Resonance Imaging) 是常用於探討神經機制的一種影像學技術。此項技術利用磁振造影來觀察在特定任務下神經活動所引起血液動力的改變。鑒於其高空間分辨率的特性，fMRI被廣泛應用於各個認知研究領域，比如新興的自然神經成像領域。在自然成像領域中，研究者採用fMRI去記錄人在自然情景下完成特定任務的神經活動信號，例

如觀看電影視頻。為了揭示相應的神經機制，研究者們針對自然神經成像提出了新的數據分析方法。⁵因為多媒體學習研究也是呈現教學視頻，所以自然成像領域的研究方法對揭示多媒體學習的神經機制有一定啟示作用。有鑒於此，本文將介紹兩個常用於自然神經成像領域的研究方法。

第一個方法是被試間相關性 (ISC, Intersubject Correlation)。ISC假定相同的刺激會在不同的被試間誘發相似的大腦活動，所以其採用數據驅動的方法揭示自然情景下特定任務的神經機制。⁶通過衡量被試間大腦體素或者腦區的神經信號的相關性，ISC反映了被試間的神經活動同步性。ISC被廣泛用於各類自然情景的研究中，包括聽故事、看電影以及閱讀文本。許多研究發現，顯著的ISC不僅體現在負責感知覺加工的初級聽覺/視覺皮層中，還體現在負責語言理解以及認知控制等高級大腦皮層。

第二個方法是被試間表徵相似性 (IS-RSA, Intersubject Representational Similarity Analysis)。IS-RSA旨在通過計算神經信號矩陣與行為信號矩陣的相關性，以揭示不同模態數據之間的關聯。⁷因此，IS-RSA常被用於探討個體差異如何影響神經活動。與ISC不同，IS-RSA

這一方法的解釋性與行為信號矩陣的構建緊密相關。現有研究採用 Anna Karenina (AnnaK) 和Nearest Neighbors (NN) 兩種常用準則構建行為矩陣。⁸AnnaK準則遵循的是行為分數高的人會呈現出更相似的神經活動模式，而行為分數低的人會呈現出更不相似的神經活動模式。與之不同，NN準則遵循的是行為分數相似的人會呈現出更相似的神經活動模式。已有研究採用IS-RSA方法發現在觀看情緒性視頻或閱讀敘事性文本時，被試間神經活動的相似性矩陣，與被試間認知加工能力或社會情緒模式的相似性矩陣，存在着緊密聯繫。這一結果表明個體差異會影響被試間神經活動同步性。在這一方面，Mayer教授也呼籲研究者和學者要考察成功學生和不成功學生的神經活動模式及其背後的個體差異。

神經成像技術的引入，可以讓研究者採用多模態技術去實時記錄學生的眼動以及神經信號。近期有研究應用ISC這一方法，分析了學生在觀看教學視頻的眼動數據。⁹研究發現觀看教學視頻時的眼動ISC可以預測觀看後的學習成績。更重要的是，觀看教學視頻時的眼動ISC與電生理ISC存在緊密聯繫。這一結果表明，學生在學習時所表現出的眼動和神經信號均至關重要，且多模態信號可能緊密相連。鑒於眼動和神經信號能捕捉不同方面的電生理信號，所以眼動與神經信號結合的多模態技術已廣泛應用於其他研究領域當中，例如閱讀，決策以及視覺搜尋等。因此，我們的研究採取了眼動和fMRI結合的多模態技術，考察學生在不同學習條件下，如何分配視覺注意力，以及加工視聽和社會認知信息 (見圖二a和二b)。

5. Uri Hasson, Yuval Nir, Ifat Levy, Galit Fuhrmann & Rafael Malach, "Intersubject Synchronization of Cortical Activity During Natural Vision," *Science*, 303(2004), pp.1634-1640 (<https://doi.org/10.1126/science.1089506>) ; Samuel A Nastase , Valeria Gazzola , Uri Hasson & Christian Keysers, "Measuring Shared Responses Across Subjects Using Intersubject Correlation," *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, 14(6)(2019), pp.667-685 (<https://doi.org/10.1093/scan/nsz037>); Emily S Finn, Enrico Glerean, Arman Y Khojandi, Dylan Nielson, Peter J Molfese, Daniel A Handwerker, Peter A Bandettini, "Idiosynchrony: From Shared Responses to Individual Differences During Naturalistic Neuroimaging," *NeuroImage*, 215(2020), 116828 (<https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2020.116828>).

6. Uri Hasson, Yuval Nir, Ifat Levy, Galit Fuhrmann & Rafael Malach, "Intersubject Synchronization of Cortical Activity During Natural Vision" ; Samuel A Nastase , Valeria Gazzola , Uri Hasson & Christian Keysers, "Measuring Shared Responses Across Subjects Using Intersubject Correlation".

7. Emily S Finn, Enrico Glerean, Arman Y Khojandi, Dylan Nielson, Peter J Molfese, Daniel A Handwerker, Peter A Bandettini, "Idiosynchrony: From Shared Responses to Individual Differences During Naturalistic Neuroimaging".

8. Emily S Finn, Enrico Glerean, Arman Y Khojandi, Dylan Nielson, Peter J Molfese, Daniel A Handwerker, Peter A Bandettini, "Idiosynchrony: From Shared Responses to Individual Differences During Naturalistic Neuroimaging".

9. Jens Madsen, Lucas C Parra, Cognitive Processing of a Common Stimulus Synchronizes Brains, Hearts, and Eyes. *PNAS Nexus*, 1(1)(2022), pgac020(<https://doi.org/10.1093/pnasnexus/pgac020>); Jens Madsen, Sara U Júlio, Pawel J Gucik, Richard Steinberg, Lucas C Parra, "Synchronized Eye Movements Predict Test Scores in Online Video Education," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118(5)(2021), e2016980118 (<https://doi.org/10.1073/pnas.2016980118>).

三、導師的存在促進學生的學習成績

在我們的研究中，我們招募了在校大學生觀看不同類型的教學視頻，其中包括導師不存在的視頻、真人導師存在的視頻以及動畫導師存在的視頻。¹⁰在觀看的過程中，我們記錄了學生的實時眼動以及大腦信號。觀看結束後，我們採用了以往研究使用的三類行為測試考察了學生的學習成績。通過統計學分析，我們發現在真人或者動畫導師存在的

情況下，學生的三類行為測試成績均比導師不存在的情況下為佳。這一研究結果與以往部分研究結果一致，表明導師的存在普遍促進學生的學習。如圖像準則所預期，導師的存在作為社會性線索，會激發學生的社會情感反應，並增強與學習有關的深層認知加工。與此同時，我們發現學生在真人導師與動畫導師存在的條件下，表現出相似的學習成績。這一結果支持了具身準則，表明高具身的動畫導師可以達到和真人導師相類似的促進效果。

四、導師的存在可能是「雙刃劍」

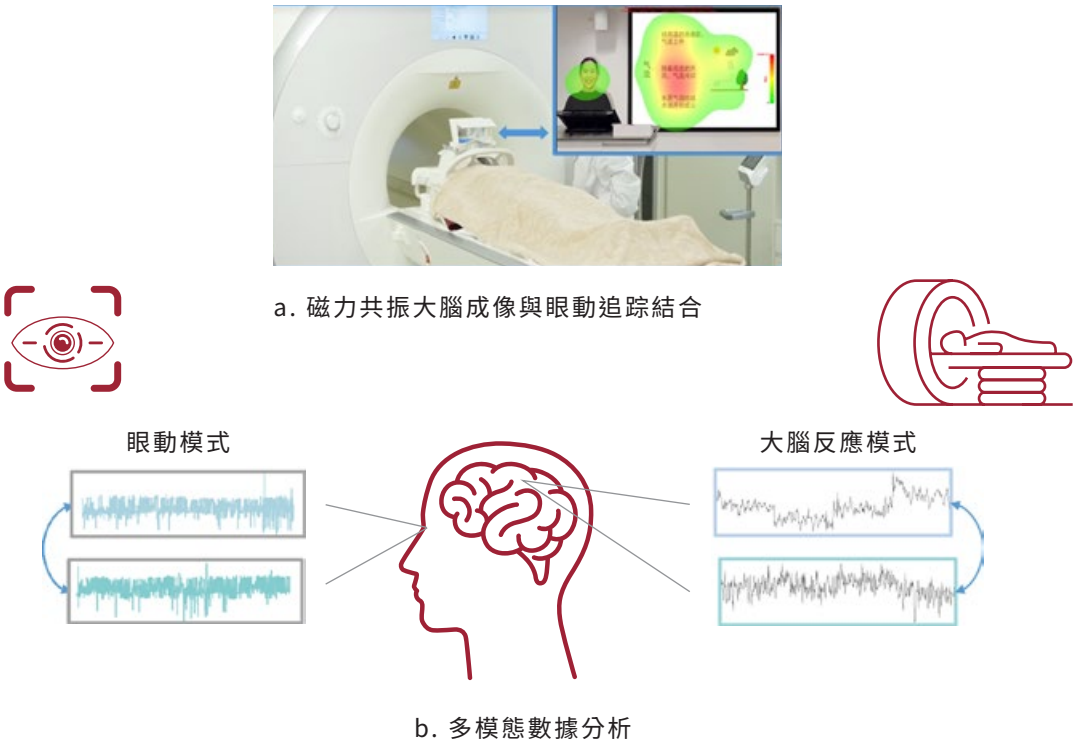
我們的研究也利用磁力共振成像技術收集了學生進行線上視頻學習時的大腦活動。採用上文提到的ISC分析方法，我們比較了學生在有無導師及導師為動畫或真人時的大腦活動同步性。結果顯示，相較於無導師存在的條件，導師存在的條件引起了更高程度的神經同步。同時，相較於動畫導師，學生在真人導師的條件下，表現出更低程度的神經同步。這一結果表明，真人導師引起的學生間的神經反應的差異性更大。

基於這一發現，我們進一步使用IS-RSA，將學生在不同條件下的線上學習時的大腦活動，與他們的社會情感處理及認知能力聯繫起來。這些能力包括注意力控制、社會情感處理以及工作記憶。我們發現，只有在導師現身的情況下(如線上視頻中包含導師授課時的臉部視頻錄影)，具備較高注意力控制、社會情感處理和工作記憶能力的學生才表現出更高的神經活動同步性(相較於無導師的條件)。我們認為，這些高能力學生之所以表

現出更為一致的神經同步性，是由於導師的存在導致了額外的認知(如注意力控制)和社會情感處理需求(如學習動力提升)。因此，這些擁有更高能力的學生會傾向於表現出更為類似的神經認知策略以應對這些額外的需求。這一結論支持我們的假設，即導師的存在既可能引發更多的社會情感共鳴及增加學習動力，同時也可能導致學生注意力分散。

五、導師的存在如何影響學習表現

我們進一步探討了學生大腦中與注意力控制、情緒處理和工作記憶相關的腦區活動與他們學習成績的關係。¹¹結果顯示，在導師存在的線上學習中，學生的學習成績與這些功能相關的特定腦區存在着相關性。將這些腦區的神經活動同步性，與學生在學習過程中的眼動注視同步性結合，我們發現，眼動注視同步性既與社會情感處理和工作記憶相關腦區的同步性呈正相關，也與學習成績呈正相關。但是，眼動注視同步性與注意力分配腦區的同步性無關。結合多媒體學習中的社會代理



圖二 磁力共振大腦成像與眼動結合的多模態技術

10. Chanyuan Gu, Yingying Peng, Samuel A.Nastase & Ping Li, "Onscreen Presence of Instructors in Video Lectures Affects Learners' Neural Synchrony and Visual Attention During Multimedia Learning".
11. Chanyuan Gu, Yingying Peng, Samuel A.Nastase & Ping Li, "Onscreen Presence of Instructors in Video Lectures Affects Learners' Neural Synchrony and Visual Attention During Multimedia Learning".

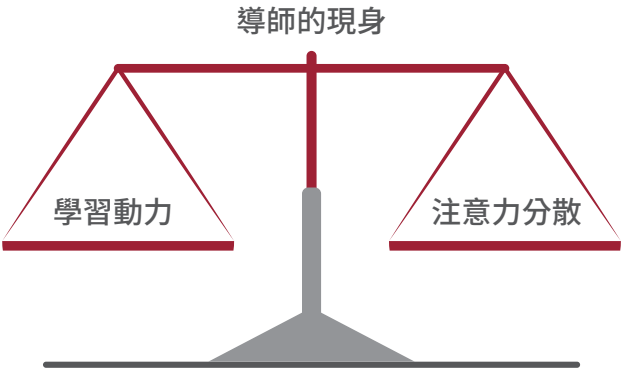
理論，我們推論導師的存在增強了線上學習中的社會情感處理和學習動力，促使學生更專注地學習，這反映在更一致的注視即視覺注意力分配上。更加專注的學習進而使得學生對課程內容有更深入的理解和學習，具體體現在與工作記憶相關的腦區顯現出較高的同步性。這些發現強調了社會情感處理和工作記憶對加深認知處理的重要性，這是預測多媒體學習中更好學習結果的基礎，也符合社會代理理論。¹²

然而，對真人導師和動畫導師條件下的數據分析表明，只有注意力控制相關的腦區同步性與學習成績顯著相關，但與眼動注視同步性無顯著關聯。這表明，注意力控制在學習結果

中的作用不似社會情感處理和工作記憶這樣明確，可能反映了由導師現身引起的注意力分散。與導師現身與否的情況不同，社會情感和工作記憶相關的腦區同步性，在真人導師條件下，與學習表現無顯著關聯。

六、權衡機制假說

為了解釋不同條件下大腦活動-眼神注視-學習成果對應模式的差異，我們提出了權衡假說（見圖三）。該假說旨在闡釋導師的存在，在不同條件下產生的不同程度的利弊，揭示不同的學生在相同條件下呈現出不同學習效果的原因，並解釋為甚麼前人研究在導師的存在對學習的影響方面往往得出看似矛盾的結論。



圖三 權衡機制假說

具體來說，導師的存在同時具有利（提升學習動力）和弊（注意力分散）。學生需要最大限度地利用導師的存在帶來的益處，並最小化其可能引發的潛在弊端。在真人和動畫導師的條件下，學生對導師的眼動注視呈現出不同的模式：在有動畫導師的條件下，學習表現較好的學生比學習表現較差的學生更多地注視導師；而在有真人導師的條件下，兩者之間沒有顯著區別。這可能是因為螢幕上的真人導師引發了更高水平的社會情感處理，同時也需要更強的注意力控制來避免分心，以便學生能有效地從對導師的注意轉換到對學習內容的注意。然而，當螢幕上的導師是動畫形象時，由於導師形象的擬人特徵（即模擬真人但不是真人），會產生相對較弱的社會情感反應，隨之也產生較弱的注意力分散。這一論點進一步得到動畫導師與無導師條件下的大腦活動同步性數據比較的支持。這一比較顯示，動畫導師的存在，在心智化網絡中的右側顳上回引發了一定程度的社會情感反應，但在經典面部處理區域梭狀回並未見到如此強烈的神經反應。因此，總體而言，導師存在的利弊權衡可能最終相互抵消，導致真人與動畫導師條件下的學習結果相似。然而，權衡的實質不在於導師形象引發的正面與負面因素的簡單

疊加，而在於學生對認知投入和注意力管理的權衡能力；即社會情感處理和認知投入必須有相當大的益處，才足夠抵消和超越注意力分散帶來的負面影響，從而對學習成果產生明顯的正面效果。權衡假說也有助於我們解釋迄今為止行為實驗中為甚麼會有相反的發現，也有助於進一步探討眼動-腦-學習對應模式背後的個體差異。

綜合以上所論，導師的現身同時包含了激勵學習以及注意力分散的因素，這些因素來自於注意力控制和社會情感處理需求的同時增加。權衡假說重點強調，我們應當在多媒體線上教學中，積極思考如何能夠增加對學習有益的社會情感刺激，使其消弭注意力分散的影響，從而產生正面的學習效果。

七、未來展望

（一）採用多模態數據分析考察多媒體學習

為了更全面地揭示多媒體教學的機制，我們的研究採用了行為、眼動以及神經成像結合的多模態技術，考察導師圖像的存在如何影響多媒體學習。儘管行為數據的結果與前人研究較一致，但多模態技術使我們的研究能進一步闡明其背後的認知

12. Richard E.Mayer, *Multimedia Learning* (3rd ed.) ; Logan Fiorella & Richard E. Mayer, "Principles Based on Social and Affective Features of Multimedia Learning".

生成式AI在

教育中的應用

從基礎認知見解到
蘇格拉底式學習遊樂場

胡 徐
祥 升
恩

機制。行為測驗往往只能反映學生在觀看視頻後的學習效果，但實時眼動和神經信號能更靈敏地反映導師圖像的存在如何影響學生的學習狀態。更重要的是，我們的研究同時採集了捕捉低層次視覺注意分佈的眼動數據及高層次神經元活動的大腦數據。因此，我們的研究可以充分探討導師圖像的存在，如何從自下而上以及自上而下的不同層次，影響學生的學習狀態。這一技術的應用將加深研究者和教育工作者對多媒體學習機製的理解。有鑒於此，在未來的研究中，研究者應該採用多模態技術，以考察多媒體信號的不同特點，如何在不同層次上影響學生的學習狀態。

（二）注重學生的個體化差異，開展個性教育

我們的研究表明，個體差異在多媒體線上學習過程中，扮演着至關重要的角色。由於不同學生在注意力控制、社會情感處理和工作記憶能力上存在顯著差異，教育工作者應當根據每個學生的具體情況量身定制教學方案。例如，可以利用自適應學習系統，通過實時監控和分析學生的行為數據，眼動注視甚至大腦活動，同步調整教學內容和節奏，以最大限度地提高學習效果。對於具

備較高注意力控制和社會情感處理能力的學生，教育工作者可以設計更具挑戰性和互動性的學習任務，激發他們的學習動機；而對於那些能力較弱的學生，教育工作者則可以提供更多的指導和支持，幫助他們逐步提升這些關鍵能力。

（三）保持學生注意力的前提下，增強社會情感，提升學習動力

我們的研究結果還強調，探索如何在保持學生注意力集中的同時，增強社會情感認知，以實現更深層次學習的重要性。最前沿的教育科技或許可以在這方面發揮重要作用。例如，在虛擬現實（VR）或增強現實（AR）環境中，通過設計沉浸式學習體驗，學生能夠與虛擬導師或同學進行互動，從而增加社會情感刺激。同時，可以通過遊戲化學習（gamification）和社交學習平台，促進學生之間的合作與交流，增強他們的社交參與度和學習動機。最後，研究者和教育工作者可以利用人工智能和快速發展的虛擬人物技術，使學生得以擁有24小時在線的線上AI老師與AI助教。新興技術在教育科學中的應用將有助於學生獲得更加個人化定製化的教育，提高師生社會互動的效率，革新現有的師生互動模式。

生成式AI 在教育中的應用 —— 從基礎認知見解到 蘇格拉底式學習遊樂場



胡祥恩、徐升

香港理工大學
高等教育研究與發展院

一、引言

隨着生成式AI技術迅速發展及大語言模型 (LLMs) 的廣泛應用，教育領域正迎來一場前所未有的變革。傳統教育模式中，師生面對面互動與個別輔導雖然被證明效果顯著，但受限於資源與時間等因素，難以大規模實現。相較之下，LLMs具備強大的語言生成與理解能力，為實現大規模個別化輔導提供了技術可能性。¹然而，單純依靠技術並不能保證學習成效，²如何使AI輔助教學與經典教育理論有機結合，成為當前研究與實踐中亟待解決的重要議題。

本研究旨在探討生成式AI在教育應用中的潛力，並從認知科學與教學法兩個層面，論證技術與教育理念融合的重要性。本文首先介紹LLM與人類認知之間的相似性與互補性，

接着闡述如何以教學法為本位來克服技術應用中的挑戰。隨後，本文回顧AutoTutor系統的發展歷程，剖析其成功經驗與局限，並在此基礎上提出蘇格拉底式學習遊樂場系統。該系統不僅利用大語言模型實現高效內容生成，還通過結構化提示工程與多模式互動，促進學生主動反思與深度學習。本文最後將討論未來研究方向與應用挑戰，展望如何進一步推動教育創新與智能輔導系統的落地。

總體而言，本文力圖從理論與實踐兩方面，提供一個全面的視角來審視生成式AI在教育中的應用前景，並指出未來發展的潛在路徑與關鍵問題。

二、LLM與人類認知的平行與觀點

(一) 語境理解與模式識別的相似性

在過去幾年，學者們發現LLM在處理自然語言時展現出與人類大腦類似的語境理解能力。目前大語言模型採用的主流架構Transformer中所採用的注意力機制，能夠動態捕捉句子中各部分之間的關係，³這與人類在閱讀與對話時聚焦關鍵信息的方式頗為相似。這種技術上的相似性不僅使得LLM能夠生成連貫且具邏輯性的文本，同時也為理解人類認知提供了新視角。⁴許多研究指出，LLM在一定程度上模擬了人類認知中的信息整合與記憶檢索過程，這對設計智能輔導系統具有深遠意義。

近年來，認知科學與人工智慧的研究揭示了LLM與人類認知之間有趣的平行性。⁵人類學習者和大型語言模型都能夠在語境中處理語言、基

於先前知識進行推理，並在新的情境下進行泛化。例如，GPT-4能夠通過預測合理的下一個詞彙或結構來續寫故事或回答問題，這與人類在對話中預測並補充彼此語句的方式類似。⁶從認知的角度來看，這與大腦在語言理解過程中利用語境和經驗來產生預期的機制相呼應。

(二) 認知科學與人工智能之間的互補性

認知科學長期致力於解析人類思維、語言與學習的內在機制，而LLM的崛起為這一領域帶來了全新的實驗平台。透過觀察LLM如何處理大量數據並進行自動推理，研究人員能夠獲得有關人類語言處理及認知結構的啟示。例如，神經符號混合架構 (如NEOLAF) 試圖結合符號推理與神經網絡的學習優勢，以模擬人類靈活且具層次性的認知過程。⁷這種雙向啟示不僅促進了人工智能技術的進步，也推動了認知科學理論的發展。

1. Wayne Xin Zhao, Kun Zhou, Junyi Li, Tianyi Tang, Xiaolei Wang, Yupeng Hou, Yingqian Min, Beichen Zhang, Junjie Zhang, Zican Dong., et al., "A Survey of Large Language Models," arXiv preprint arXiv:2303.18223 (2023).

2. National Research Council, *How People Learn: Brain, Mind, Experience, and School* (Washington, DC: National Academy Press, 2000).

3. Ashish Vaswani, Noam Shazeer, Niki Parmar, Jakob Uszkoreit, Llion Jones, Aidan N. Gomez, Lukasz Kaiser, Illia Polosukhin, "Attention Is All You Need," *Advances in Neural Information Processing Systems* 30, 2017.

4. Bahar Memarian & Tenzin Doleck, "Chatgpt in Education: Methods, Potentials and Limitations," *Computers in Human Behavior: Artificial Humans* (2023): 100022.

5. Andrew G. Clark, "Whatever Next? Predictive Brains, Situated Agents, and the Future of Cognitive Science," *Behavioral and Brain Sciences* 36, no. 3 (2013), pp.181-204.

6. OpenAI. GPT-4 Technical Report. 2023. <https://openai.com>.

7. Richard Jiarui Tong, Cassie Chen Cao, Timothy Xueqian Lee, Guodong Zhao, Ray Wan, Feiyue Wang, Xiangen Hu, Robin Schmucker, Jinsheng Pan, Julian Quevedo and Yu Lu, et al. "Neolaf, an LLM-Powered Neural-Symbolic Cognitive Architecture," arXiv preprint arXiv:2308.03990 (2023).

然而，這種平行性也有其局限性，需要謹慎解讀。人類擁有後設認知能力——我們可以反思自己的思考過程、體驗情緒並具有內在動機，而當前的LLM並不具備真正意義上的理解能力。⁸它們僅依賴數據模式進行運算。這一區別至關重要，因為它調整了我們對AI教學系統的期望：一個AI輔導系統或許能夠表達流暢、知識豐富，但它未必能夠真正理解學生為何困難重重，或如何鼓勵受挫的學習者。儘管如此，該領域的研究仍在持續發展，許多研究正在探討LLM作為某些認知功能的模型，例如問題解決步驟或敘事理解，⁹這將為AI輔導系統的設計提供有價值的參考。

(三) 個別化學習與自適應輔導的潛力

透過上述技術與理論基礎，LLM在智能輔導系統中的應用前景顯得尤為引人注目。傳統教育中，教師難以對每位學生的學習進程進行精細監控與即時反饋，而LLM則可利用大數據

技術和動態語境分析，實現對學生學習行為的個別化追蹤。這不僅有助於準確識別學生在知識結構中的薄弱環節，也為制定針對性的輔導策略提供了數據支持。從這一角度看，生成式AI有望成為促進教育公平與提升學習成效的重要工具，真正實現因材施教。

此外，通過對比LLM和學生的學習路徑，我們可以更深入理解人類的學習方式。如果LLM能夠逐步解決物理問題，那麼我們可以比較其解題過程與學生的思維模式，以識別學生在哪些步驟出現了困難。¹⁰這意味着生成式AI不僅可以作為個性化教學的工具，還能成為一面鏡子，反映人類認知的某些特徵，例如常見的推理模式或概念誤解。這些視角奠定了AI在教育領域應用的基礎，確保技術能夠真正符合學習者的認知需求，而非與其背道而馳。

三、與教學法對齊的技術挑戰與原則

在現代教育中，將基於大型語言模型（LLM）的AI工具引入教學並非僅僅是一項技術工程，而是一個植根於教學法的挑戰。過去在教育科技應用中的經驗顯示，只有當科技與教學法高度契合時，才能真正促進學習成效。¹¹如果先進的AI系統在部署時未能充分考慮教學設計，其強大的生成能力可能不僅無法幫助學生，反而可能產生適得其反的效果。

(一) 教學法驅動的AI系統設計與信任構建

為確保AI能夠符合既有的教學策略，系統設計必須以教學法作為出發點。有效的人類導師在面對學生錯誤時通常會提供提示或引導性問題，而非直接給出答案；同理，我們期望AI導師能夠採取類似策略。未經調整的LLM在面對學生提問時，往

往可能直接給出答案或提供冗長解釋，這並非自然符合教學法的做法。為此，有必要對AI輸出進行教學腳本約束，確保其能夠針對學生的錯誤進行精準、啟發式的追問。¹²

另一方面，LLM常被形容為「黑盒子」，其內部推理過程缺乏透明性，這在教育現場可能導致教師和學生對其決策產生疑慮。教師無法輕易解釋AI為何會給出特定回答，這不僅使得及時糾偏變得困難，也增加了檢驗AI是否遵循預定教學策略的難度。例如，在蘇格拉底式問答中，需要確保每次對話都以啟發性問題呈現，而非無意中轉為講解或直接揭示答案。為解決此問題，系統設計應該包含一定程度的監控與透明機制，使教育者能夠審計AI的決策過程，進而建立信任。¹³同時，確保AI生成內容的準確性與安全性，避免虛假信息或數據偏見，也是設計時必須考慮的重要環節。

8. Sébastien Bubeck, Varun Chandrasekaran, Ronen Eldan, Johannes Gehrke, Eric Horvitz, Ece Kamar, Peter Lee, Yin Tat Lee, Yuanzhi Li, Scott Lundberg., et al., "Sparks of Artificial General Intelligence: Early Experiments with GPT-4," arXiv preprint arXiv:2303.12712 (2023).

9. Qian Niu, Junyu Liu, Ziqian Bi, Pohsun Feng, Benji Peng, Keyu Chen, et al., "Large Language Models and Cognitive Science: A Comprehensive Review of Similarities, Differences, and Challenges," arXiv preprint arXiv:2409.02387 (2024); Ishita Dasgupta, Andrew K. Lampinen, Stephanie C. Y. Chan, Hannah R. Sheahan, Antonia Creswell, Dharshan Kumaran, James L. McClelland and Felix Hill, "Language Models Show Human-Like Content Effects on Reasoning," arXiv preprint arXiv:2207.07051, 2(3) (2022).

10. Dazhen Tong, Yang Tao, Kangkang Zhang, Xinxin Dong, Yangyang Hu, Sudong Pan and Qiaoyi Liu, "Investigating ChatGPT-4's Performance in Solving Physics Problems and Its Potential Implications for Education," *Asia Pacific Education Review* (2023a), pp.1-11.

11. Richard E. Clark, "Reconsidering Research on Learning from Media," *Review of Educational Research* 53, no. 4 (1983), pp. 445-459.

12. Ethan Mollick & Lilach Mollick, "Assigning AI: Seven Approaches for Students, with Prompts," arXiv preprint arXiv:2306.10052 (2023); Kehui Tan, Tianqi Pang, Chenyou Fan and Song Yu. "Towards Applying Powerful Large AI Models in Classroom Teaching: Opportunities, Challenges and Prospects," arXiv preprint arXiv:2305.03433 (2023).

13. Hassan Khosravi, Simon Buckingham Shum, Guanliang Chen, Cristina Conati, Yi-Shan Tsai, Judy Kay, Simon Knight, Roberto Martinez-Maldonado, Shazia Sadiq and Dragan Gašević, "Explainable Artificial Intelligence in Education," *Computers and Education: Artificial Intelligence* 3 (2022): 100074; Krzysztof Fiok, Farzad V. Farahani, Waldemar Karwowski and Tareq Ahram. "Explainable Artificial Intelligence for Education and Training." *The Journal of Defense Modeling and Simulation* 19, no. 2 (2022), pp. 133-144.

(二) 針對性回饋與精細化問答

雖然LLM具備強大的語言生成能力，但在應用於教育時，如何使其回答既具針對性又符合教學性成為一大挑戰。有效的輔導系統不僅要求準確回答問題，更需要在回饋中引導學生思考與自我反省。這意味着，AI系統必須能夠識別學生回答中的具體錯誤或認知偏差，並根據情況提出啟發性問題。例如，在蘇格拉底式問答中，教師通常不會直接給出答案，而是通過系列追問幫助學生自我發現問題所在。¹⁴因此，建立一個能夠自動檢測學生認知偏差並生成適當追問的系統，是當前研究的重要方向。

(三) 動態調整與個別化教學策略

在個別化學習環境中，每位學生的知識水平、學習風格與動機均存在顯著差異。這要求輔導系統能夠根據學生的實時表現動態調整教學內容與策略。為達到這一目標，系統必須整合持續監控、數據分析以及智能反饋等多項技術。這樣的動態調整機制不僅有助於提升學生學習效率，還能在一定程度上彌補傳統教育中教師資源不足的問題。¹⁵然而，這也對系統的透明度與可解釋性提出了更高要求，因為教

師需要能夠理解AI的決策過程，以便在必要時進行有效干預。

(四) 結構化提示工程與透明回饋機制

為了解決上述挑戰，本文主張採用結構化提示工程 (Prompt Engineering) 與透明回饋機制。具體而言，可利用JSON格式對輔導對話進行嚴格劃分，將學生回答、誤解檢測、追問提示等信息以結構化形式呈現，從而使整個對話過程既透明又便於審計。這種方法不僅有助於減少人工內容編寫成本，還能保證AI生成內容嚴格遵循預設的教學法則。¹⁶例如，系統可在每次對話後記錄學生的回答與AI的回饋，並生成相應的數據報告供教師檢查與調整。

(五) 教學法與技術融合的核心理念

綜上所述，先進技術與教學法的有機融合應以教學法為驅動，而非僅依賴技術本身。正如科技僅是傳遞教學內容的載體，其本身並不會直接影響學生成就。在生成式AI的應用中，這一原則顯得尤為重要：只有在系統設計初期便嵌入蘇格拉底式問答、鷹架教學以及最佳反饋實踐等成熟的教學模型，才能確保AI輔導工具真正發揮提

升學習成效的作用，避免因技術主導而忽略教師專業知識與學生個別需求的風險。

四、AutoTutor的成功、局限與經驗教訓

AutoTutor作為最早的全尺度智能輔導系統之一，成功地展示了對話式教學的潛力。從二十多年前的開創性工作到今日先進AI技術的蓬勃發展，AutoTutor的經驗為後續智能輔導系統的設計提供了豐富的啟示。以下各節將綜合先前的翻譯內容與現有文獻，對其創新成就、局限不足及獲得的寶貴經驗進行有機整合與闡述。

(一) AutoTutor的創新成就與局限

AutoTutor作為早期智能輔導系統，利用自然語言處理和潛在語義分析 (LSA) 模擬教師，通過多輪對話與「學習者特徵曲線」(LCC) 診斷學生知識狀態，實現了接近中等水平人類導師

一對一輔導的效果。¹⁷然而，該系統依賴大量預編寫對話腳本，內容成本高且回饋固定，難以靈活應對非標準回答；同時，LSA在複雜語境中的表現有限。這些局限為後續借助生成式AI如Transformer改進動態內容生成與互動提供了方向。

(二) 從AutoTutor中獲得的寶貴經驗

儘管存在上述不足，AutoTutor的研發工作仍為後續智能輔導系統的發展提供了極具啟發性的經驗。首先，其基於對話的互動設計證明了：通過動態、以學生回答為依據的回饋，能顯著提升學習成效。其次，LCC方法的應用為自適應教學系統提供了量化數據支持，使得個別化輔導成為可能。更重要的是，AutoTutor 的成功與不足提醒我們，先進技術必須與嚴謹的教學法有機結合，才能真正推動教育創新。¹⁸未來的系統應在減少人工內容編寫負擔的

14. Richard Paul & Linda Elder, *The Miniature Guide to Critical Thinking Concepts and Tools* (California : Foundation for Critical Thinking Press, 2008).
15. National Research Council, *How People Learn: Brain, Mind, Experience, and School*.

16. Xiangen Hu, Sheng Xu, Richard Tong and Art Graesser, "Generative AI in Education: From Foundational Insights to the Socratic Playground for Learning," arXiv preprint arXiv:2501.06682 (2025).
17. Arthur C. Graesser, Natalie K. Person, et al. "Autotutor: A Cognitive System That Simulates a Tutor That Facilitates Learning Through Mixed-Initiative Dialogue," *Cognitive Systems: Human Cognitive Models in Systems Design 2* (2004): 19-31; Benjamin S. Bloom, "The 2 Sigma Problem: The Search for Methods of Group Instruction as Effective as One-to-One Tutoring," *Educational Researcher* 13, no. 6 (1984), pp.4-16; Xiangen Hu, Donald M. Morrison and Zhiqiang Cai, "On the Use of Learner Micromodels as Partial Solutions to Complex Problems in a Multiagent, Conversation-Based Intelligent Tutoring System," In Robert Sottolare, Arthur Graesser, Xiangen Hu and Heather Holden (eds), *Design Recommendations for Intelligent Tutoring Systems: Volume 1 – Learner Modeling* (Florida : U.S. Army Research Laboratory, 2013), chapter 9, pp.97-110.
18. Xiangen Hu, "Introduction to Team Tutoring," In Robert Sottolare, Arthur Graesser, Xiangen Hu & Anne M. Sinatra (eds), *Design Recommendations for Intelligent Tutoring Systems: Volume 6 – Team Tutoring*(Florida : U.S. Army Research Laboratory, 2018), chapter 1, pp.19-21.

同時，提高語意解析與靈活應變能力，借助 ChatGPT 等現代大型語言模型實現更自然、更具 Socratic 風格的互動，以更好地滿足個性化學習需求。

總結而言，AutoTutor 的經驗既展示了對話式教學的巨大潛力，也揭示了傳統系統在內容創建與動態交互方面的不足，為新一代智能輔導系統指明了發展方向。

五、蘇格拉底式學習遊樂場：下一代智能輔導系統

(一)系統設計與技術架構

鑑於 AutoTutor 的經驗教訓，本研究提出以蘇格拉底式問答為核心的「蘇格拉底式學習遊樂場」。該系統採用最先進的 LLMs 模型 (例如 GPT-4¹⁹) 作為語言引擎，並通過結構化提示工程實現動態內容生成。系統設計上，將整個對話過程劃分為多個模塊，包括學生回答、誤區檢測、動態追問與回饋生成，並以 JSON 格式對每一環節進行精確控制。這種設計

既降低了手動編寫內容的工作量，又確保 AI 輸出符合預定的教學策略。

(二)高精度語言處理與動態回饋

蘇格拉底式學習遊樂場利用 LLMs 模型在語言理解與生成方面的優勢，能夠準確捕捉學生回答中的細節，並識別出其中隱藏的認知誤區。基於這一能力，系統通過動態生成追問提示，促使學生反思並自我糾錯。這種動態回饋機制使得每次對話都能根據學生的實時表現進行調整，大大提高了教學的針對性與有效性。與傳統的固定回饋相比，該系統能夠實現真正的個別化輔導，從而滿足不同學生的學習需要。²⁰

(三)多模式互動與教學策略融合

除了基本的對話輔導，蘇格拉底式學習遊樂場還整合了多種互動模式，以促進學生在不同學習階段中的全面發展。這些模式包括：

- **評估模式**：通過動態測驗與自我評估，幫助學生了解自身知識水平與認知盲點。
- **輔導模式**：進行一對一的深度對

話，根據學生回答進行精準回饋與啟發式提問。

- **觀摩模式**：學生觀察虛擬討論，從中學習專家或同儕的思考方式與問題解決策略。
- **遊戲模式**：將知識點融入遊戲情境中，通過競賽或合作激發學習興趣，促進知識的鞏固與應用。
- **可教代理模式**：學生扮演教師角色，向虛擬學生講解概念，從而達到「教學相長」的效果。

這些模式的有機融合構成了一個動態且互補的學習循環，使得學生能夠在不同情境中獲得針對性的輔導，進一步提升批判性思維和元認知能力。²¹此外，系統還將通過數據記錄與學習進程分析，為教師提供詳細的學生表現報告，從而促進師生之間的有效互動與協同改進。

(四)實證試驗與初步成果

在初步實驗中，蘇格拉底式學習遊樂場已在多個領域中展現出良好的應用效果。試驗結果顯示，經由該系統輔導的學生在概念理解、問題解

決能力和批判性思維等方面均有顯著提升。學生反饋普遍認為，動態追問與即時回饋能夠幫助其更快識別自身知識漏洞，進而實現自主學習。²²這些初步成果驗證了先進 AI 技術結合嚴謹教學法的可行性，也為未來大規模應用提供了有力支持。

六、討論：以教學法為本位的發展與挑戰

(一)教學法與技術結合的核心價值

智能輔導系統的發展關鍵在於技術與教學法的深度融合。雖然大型語言模型提供了強大的語言生成能力，但僅憑技術本身無法保證有效教學。真正有效的學習來源於啟發式問答與學生自我反思的過程，這也是教育心理學與學習科學領域所強調的關鍵要素。²³

蘇格拉底學習遊樂場 (Socratic Playground) 正是基於這一理念，透過結構化提示工程與多模式互動，確保 AI 的輸出內容與教學目標保持一致。²⁴這種「技術服務於教學」的

19. OpenAI. GPT-4 Technical Report. 2023. <https://openai.com>.
20. Richard Paul & Linda Elder, *The Miniature Guide to Critical Thinking Concepts and Tools* (California : Foundation for Critical Thinking Press, 2008).
21. Xiangen Hu, "Introduction to Team Tutoring," In Robert Sottolare, Arthur Graesser, Xiangen Hu & Anne M. Sinatra (eds), *Design Recommendations for Intelligent Tutoring Systems: Volume 6 – Team Tutoring* (Florida : U.S. Army Research Laboratory, 2018), chapter 1, pp.19-21.

22. Liang Zhang, Jionghao Lin, Ziyi Kuang, Sheng Xu and Xiangen Hu, "SPL: A Socratic Playground for Learning Powered by Large Language Model," arXiv:2406.13919v4 (2024); Siyang Liu,Xiaorong Guo,Xiangen Hu and Xin Zhao, "Advancing Generative Intelligent Tutoring Systems with GPT-4: Design, Evaluation, and a Modular Framework for Future Learning Platforms," *Electronics* 13, no. 24 (2024).
23. Richard Paul & Linda Elder, *The Miniature Guide to Critical Thinking Concepts and Tool*.
24. Matthew J. Koehler & Punya Mishra, "What Is Technological Pedagogical Content Knowledge?" *Contemporary Issues in Technology and Teacher Education* 9, no. 1 (2009), pp. 60-70.

模式不僅提高了教學效率，還讓教師能夠更精準地識別並解決學生在學習過程中遇到的實際問題。

此外，過往對智能輔導系統（如AutoTutor）的研究已經表明，當AI教師建立在堅實的教學原則之上時，它可以顯著提升學習成效，但同時也帶來了內容創作與靈活性方面的挑戰。²⁵蘇格拉底學習樂園的發展代表了一種基於LLM的新型智能輔導模式，它不僅利用AI的語言能力來提供個性化的對話式教學，更通過預設的蘇格拉底方法，確保AI的輔導行為符合學習科學中的最佳實踐。²⁶

這種方法不僅適用於蘇格拉底提問法，也可以作為其他教學模型與AI結合的範例。例如，可以設計一個基於支架式教學（Scaffolding）的AI輔導系統，讓AI隨着學生能力的提升逐步減少輔助，從而培養學習者的獨立解決問題能力。²⁷關鍵在於，我們應當先確立教學方法，再讓AI適應這一框架，而不是讓AI主導教學策略的選擇。

(二) 透明性與可解釋性的挑戰

在AI教學應用的推廣過程中，系統的透明性與可解釋性成為教師與研究人員關注的重要議題。²⁸教師需要理解AI如何生成回饋及其內部決策邏輯，才能有效監控AI的教學效果，並適時進行教學干預。

為了解決這一問題，蘇格拉底學習遊樂場採用了結構化提示工程（Structured Prompt Engineering），並建立詳細的數據記錄機制，確保每一次AI與學生的互動都可追溯。這種可視化的機制能夠讓教師深入了解學生的思維過程，例如：

- 學生常見的錯誤概念
- AI如何引導學生進行思考與修正
- 學生在學習過程中的認知模式與變化

透過這些數據，教師可以調整AI的教學風格，例如在某些情境下，調整AI提問的難度或改變其對話策略。²⁹

(三) 未來研究與實踐中的挑戰

1. 如何在多學科領域中確保內容質量？目前，AI在某些特定學科（如數學、編程）中已經展現出良好的輔導效果，^{30,31}但對於需要高度語境理解的學科（如歷史、倫理學），AI的內容生成仍存在局限。

2. 如何提升AI在多輪對話中的語義理解？雖然LLM具備強大的自然語言處理能力，但仍可能在長對話交互中出現語義偏差，影響學習者的體驗與學習效果。³²

3. 如何增強AI的情感回應與學習動機支持？學習不僅是知識的獲取過程，更是情感與動機的體驗。過去研究表明，學生的學習動機與情感狀態對學習成效有顯著影響。³³

(四) 結論：AI在教育中的角色與發展方向

總結來說，生成式AI在教育中的真正價值，取決於它是否能夠支持符合教學法的學習過程。在蘇格拉底學習樂園的開發過程中，我們展示了一種能夠滿足這一標準的AI教學實踐：

- 技術服務於教學法，而非教學法適應技術
- 確保 AI 以透明、可解釋的方式輔助教師與學生
- 持續優化AI在多學科領域的適應性與教學效果

4. 當AI的規模化能力與個人化教學結合時，教育科技的未來將充滿可能性。³⁴但更重要的是，我們如何以「教學法為核心」來引導AI的發展，確保 AI不是取代教師，而是成為真正促進個人化學習的可靠助手。

25. Arthur C. Graesser, et al., "The Impact of Conversational Interactions with Intelligent Tutoring Systems on Student Learning," *Applied Cognitive Psychology* 25, no. 4 (2011), pp. 611-617.
26. Michelene T. H. Chi & Ruth Wylie. "The ICAP Framework: Linking Cognitive Engagement to Active Learning Outcomes," *Educational Psychologist* 49, no. 4 (2014), pp. 219-243.
27. Brian J. Reiser, "Scaffolding Complex Learning: The Mechanisms of Structuring and Problematising Student Work," in Elizabeth A. Davis & Naomi Miyake (eds), *Scaffolding: A Special Issue of the Journal of the Learning Sciences*(New York: Psychology Press, 2018), pp. 273-304.
28. National Research Council, *How People Learn: Brain, Mind, Experience, and School*.

29. Nitin Rane, Saurabh Choudhary and Jayesh Rane, "Education 4.0 and 5.0: Integrating Artificial Intelligence (AI) for Personalized and Adaptive Learning," 2023. Available at SSRN 4638365; Andrew Thomas Bimba, Norisma Idris , Ahmed Al-Hunaiyyan , Rohana Binti Mahmud and Nor Liyana Bt Mohd Shuib "Adaptive Feedback in Computer-Based Learning Environments: A Review," *Adaptive Behavior* 25, no. 5 (2017), pp.217-234.
30. Owen Henkel, Hannah Horne-Robinson, Nessie Kozhakhmetova, Amanda Lee, "Effective and Scalable Math Support: Evidence on the Impact of an AI-Tutor on Math Achievement in Ghana," arXiv preprint arXiv:2402.09809 (2024) ; Iris Ma, Alberto Krone-Martins, and Cristina Videira Lopes. "Integrating AI Tutors in a Programming Course," in *Proceedings of the 2024 on ACM Virtual Global Computing Education Conference*, V. 1, 130-136 (2024).
31. Rishab Jain & Aditya Jain, "Generative AI in Writing Research Papers: A New Type of Algorithmic Bias and Uncertainty in Scholarly Work," in *Intelligent Systems Conference*, pp.656-669. Springer, 2024.
32. Kurt VanLehn, "The Relative Effectiveness of Human Tutoring, Intelligent Tutoring Systems, and Other Tutoring Systems," *Educational Psychologist* 46, no. 4 (2011), pp.197-221.
33. Arthur C. Graesser & Sidney D'Mello, "Emotions During the Learning of Difficult Material," in *Psychology of Learning and Motivation*, vol. 57, pp.183-225. Elsevier, 2012.
34. Rosemary Luckin, Wayne Holmes, Mark Griffiths & Laurie. B. Forcier, *Intelligence Unleashed: An Argument for AI in Education* (London: Pearson, 2016).

七、未來方向：新興可能性的想像

儘管蘇格拉底式學習遊樂場已展現結合先進NLP與教學策略的威力，智慧教學系統的潛能並不限於個人化內容推送。呼應“Design Recommendations for Intelligent Tutoring Systems”與通用智慧教學框架（GIFT）的方針，研究者逐漸朝向整合認知、情感與社群向度的學習生態系前進，並再次強調只有在穩固教學策略的基礎上，最精巧的技術才能真正落地。

（一）團隊教學與自我優化系統

未來有望的發展之一是「團隊教學」，也就是由新一代ITS來協調多名學習者的協同解題過程，包括如何分配任務並促進組內互動。³⁵AI還能透過大規模學習者數據的分析，不斷修正並優化自身教學邏輯，以預測新教學策略的成效，這就是自我優化的自適性系統所代表的趨勢。³⁶透過模擬多種「虛擬學習者」情境，系統能在真實課堂部署前就預先評估方法的可行性。

（二）後設認知儀表板與行為分析

另一個興起的趨勢是「後設認知儀表板」，讓學習者能視覺化檢視自己的進度、設定個人目標，並追蹤學習習慣。若再結合行為數據分析，系統可偵測出某個學習者即將出現倦怠或過度負荷，並即時介入與輔導。其核心不再只是「推播更多內容」，而是塑造一個鼓勵自我調控、深度參與和反思的環境。

（三）教育公平與全球合作

教育公平仍是未來推動AI教育必須面對的挑戰之一。先進的AI教學工具通常仰賴穩定的網路與硬體環境，若基礎設施不足，便易造成教育鴻溝擴大。因此，政策制定者、技術開發者和教育工作者必須共同努力，確保連線品質、成本負擔及設計的包容性。否則，強大的LLM只會進一步放大原本的差異，而非縮小它。

（四）呼應基礎洞見

最終，AI在教育領域的發展並不僅由技術決定。LLM與人類認知之間的相似性，為對話式教學帶來了充足的

理由；更何況在某些特殊任務中，最先進模型已超越人類。但唯有教學法仍居核心，先進模型才能發揮卓越的教學成果。正如開篇便強調的，更多的運算能力並不等於更好的教與學效果，真正的關鍵在於如何將前沿技術與精心設計的教學法完美結合。也因此，要在教育現場推動新一輪的創新，必須持續回歸到教師與教學策略所扮演的核心角色，只有「好的技術+好的教學」才能真正帶來學習體驗與成效的深遠改變。

八、結論

生成式人工智慧與教育的交匯點為個人化、對話式教學帶來了變革性的機遇。在本文中，我們探討了如何將人類認知研究與過往智慧型輔導系統的經驗應用於現代AI教師的開發。對AutoTutor的回顧顯示，當AI教師建立在堅實的教學原則之上時，它能顯著提升學習成效，同時也提醒我們需關注內容創作的難度與系統的靈活性。借助以大型語言模型為代表的AI領域突破，我們提出了蘇格拉底學習遊樂場（Socratic Playground）。此系統運用強大的語言模型，並結合蘇格拉底教學法，以提供自適應輔導。它向着人們長久以來期望的可擴展的一對一輔導邁出了重要一步——理論

上，它能夠在任何主題上為任何學生提供輔導，並且以對話的方式進行，使學習體驗更具個人化，同時嚴格遵循教學法的原則。

至關重要的是，從理論基礎到實際應用的整個過程中，我們始終堅持「教學法優先」的理念。無論AI技術如何先進，它都必須被教育者與設計者作為實現學習目標的工具，而非一個自行決策的「自主教師」。透過將教學策略直接嵌入AI的運作方式（如我們在蘇格拉底方法中的應用），我們確保技術能夠增強有效的教學，而非取代或偏離它。這種與教學法的深度結合不僅提升了AI的教學成效，同時也使其更容易被教師與學生信任與接受。畢竟，教育本質上是一項高度人性化的事業——鼓勵、批判性思考、好奇心等核心能力，皆是經過數百年教學實踐所精煉而成。即便生成式AI具有創新性，我們仍應將其用於強化這些以人為本的教學實踐。

展望未來，實現蘇格拉底學習遊樂場等系統的全部潛力仍需進一步努力。在真實課堂環境中進行嚴謹評估至關重要，這將幫助我們衡量AI輔導對學習成效、學生參與度及實際應用挑戰的影響。此類研究將揭示

35. Xiangen Hu, “Introduction to Team Tutoring”.
36. Min Chi, Xiangen Hu and Gautam Biswas, “Self-Improving Systems in Intelligent Tutoring Systems SWOT Analysis,” in *Design Recommendations for Intelligent Tutoring Systems: Volume 10 – SWOT Analysis of Intelligent Tutoring Systems*, edited by Anne M. Sinatra, Arthur C. Graesser, Xiangen Hu, Gregory Goodwin and Vasile Rus, (Massachusetts : U.S. Army Combat Capabilities Development Command-Soldier Center, 2023), pp.101-114.

AI驅動的蘇格拉底式對話，在多大程度上能接近一名經驗豐富的人類教師的成效，以及其可能的短板與優勢。此外，AI需要持續優化，包括降低錯誤輸出、提升多輪推理能力等，以進一步強化學習體驗。與此同時，我們預期教育工作者的回饋將在系統開發過程中發揮關鍵作用，以確保AI能夠滿足課堂的實際需求，如課程標準對接、時間管理等問題。唯有與教師與學生緊密協作，不斷迭代優化，蘇格拉底學習遊樂場才能真正發展為一個可靠的「共同教師」(Co-teacher)。

總的來說，生成式AI正在開啟教育科技的新篇章，它將AI的規模化能力與人類輔導的個人化優勢結合在一起。本文的研究邁出了這一願景的重要一步，展示了如何將LLM的強大能力與教學理論的深厚智慧結合。只要我們始終堅持以學習與認知為核心——換言之，確保「蘇格拉底式的對話」始終貫穿於「學習遊樂場」之中，我們便能夠打造出不僅提供資訊與指導，更能啟發與吸引學習者的AI系統。個人化學習的規模化時代已在眼前，而透過以教學法為核心的設計，我們能夠確保這一願景得以真正實現，從而為所有人帶來更優質的教學與學習體驗。

PM_{2.5} 與 公共健康

破除污染的障礙，
邁向綠色健康未來

吳 楊 謝 李
楊 茜 嘉 向
洋 雯 東

PM_{2.5}與公共健康—— 破除污染的障礙， 邁向綠色健康未來



吳楊洋 楊茜 謝嘉雯 李向東

香港理工大學土木及
環境工程系

一、微小顆粒的「隱匿威脅」

現代社會環境問題日益凸顯，污染事件層出不窮，其中PM_{2.5}污染，又名「細顆粒物」（香港環保署：微細懸浮粒子）污染，對人類健康的影響備受關注。PM_{2.5}是粒徑小於或等於2.5微米的細顆粒物，這個尺寸比人類頭髮絲還要細，微小到肉眼幾乎無法察覺。它是微觀世界中的「小不點」，如隱匿在空氣中的「幽靈」。由於尺寸極小，PM_{2.5}能夠突破呼吸系統防線，無聲無息地威脅着人體健康，對公共衛生構成了嚴峻挑戰。¹長期暴露於高濃度的PM_{2.5}環境中，已被證實可能導致癌症、心臟病、腦血管疾病等多種致命疾病。²

PM_{2.5}並非某種物質的集合，其組成遠比我們想像中複雜。³不同地區的PM_{2.5}顆粒成分組成差異巨大、來源



圖一 空氣污染下的城市

資料來源：本文作者研究團隊攝

各異，這也意味着其對健康的威脅等級並不相同。⁴例如，在那些飽受工業污染困擾的城市，PM_{2.5}往往裹挾着大量工業廢氣中的有害物質，如鉛、鎘、汞等重金屬，以及硫酸鹽等化學物質。這些成分不僅會對呼吸系統造成直接損害，更可能如「潛伏的殺手」，通過血液循環潛入人體內部，對心臟、肝臟乃至神經系統發起攻擊；而在交通密集的城市中心地區，PM_{2.5}中常含有更多來自汽車尾氣的二次生成物和有毒組分，如由氮氧化物和揮發性有機物轉化而成的硝酸鹽和有機氣溶膠等。

二、無處不在的「奇幻漂流」

PM_{2.5}的健康威脅還在於它們的「流動性」。這些微小的顆粒不僅能夠在空氣中自由懸浮，還能隨着風的流動跨越長距離傳播，猶如「流浪微粒」於空氣中「漂泊」不定。一旦從排放源進入空氣這一廣闊的舞台，它們便能迅速穿越城市、鄉村甚至跨越國界和洲界。

「流動性」還意味着PM_{2.5}的健康威脅會隨着暴露時間和濃度的變化而改變。這種流動性預示着單一地區

的治理措施很難獲得持續的成效，因為即使某個地區已經嚴格控制了污染源，鄰近或上風向地區的排放仍然可能導致空氣質量惡化。

因此，PM_{2.5}污染的治理需要多個部門、多個地區甚至多個國家之間的協作，才能有效降低大氣中顆粒物的濃度，減輕其健康風險。跨區域的協作治理不僅包括共同減少污染排放，還需要在監測、預警、科學研究等方面進行協同合作，以確保有效應對顆粒物的長距離傳播及其對公共健康的威脅。

三、敲響污染暴露事件的警鐘

PM_{2.5}空氣污染問題可以追溯到19世紀末期的工業革命。在那個時代，隨着蒸汽機和工廠化生產的興起，大規模的煤炭燃燒、工業排放和城市建造開始釋放出大量的顆粒物和有害氣體。那一時期的顆粒物污染主要由較大的懸浮顆粒（如煙塵、經反應生成的硫酸鹽）構成，這些顆粒源源不斷地從城市煙囪和工業設施排放出來，讓清澈的天空覆蓋了一層灰色的陰影，嚴重污染了空氣。

1. World Health Organization (WHO), "WHO Global Air Quality Guidelines: Particulate Matter (PM_{2.5} and PM₁₀), Ozone, Nitrogen Dioxide, Sulfur Dioxide and Carbon Monoxide," (2021), pp.74-88.
2. Aaron J.Cohen., et al, "Estimates and 25-year Trends of the Global Burden of Disease Attributable to Ambient Air Pollution: An Analysis of Data from the Global Burden of Diseases Study 2015," *The Lancet* 389 (2017), p.10082.
3. Michelle L.Bell., et al, "Spatial and Temporal Variation in PM_{2.5} Chemical Composition in the United States for Health Effects Studies," *Environmental Health Perspectives* 115 (2007), pp.989-995.

4. Ling Jin., et al. "Contributions of City-Specific Fine Particulate Matter (PM_{2.5}) to Differential in Vitro Oxidative Stress and Toxicity Implications between Beijing and Guangzhou of China," *Environmental Science & Technology* 53 (2019), pp.2881-2891.



圖二 密集的城市交通車輛

資料來源：本文作者研究團隊攝

然而，PM_{2.5}這一微小顆粒物在工業革命初期並未被科學家們所關注。在當時，他們認為空氣污染主要由更大顆粒的物質如煙塵和灰塵造成，PM_{2.5}等更細小顆粒物的累積和暴露對人類健康產生的長期危害並未被深入認識，就好像只看到了森林中的大樹，卻忽略了隱藏在草叢中的「小刺」。

進入20世紀，隨着城市化與工業化的加速、汽車的普及與人口的爆發增長，城市中PM_{2.5}的排放量急劇增

加，PM_{2.5}污染問題加劇，引發了多次廣為人知的空氣污染事件。儘管這些事件的主要污染物是二氧化硫和氮氧化物，但PM_{2.5}的潛在危害逐漸浮出水面。尤其是在幾個著名的全球污染暴露事件之後，⁵PM_{2.5}污染問題引起了全球廣泛關注。

1952年12月，倫敦發生了著名的「倫敦煙霧事件」，即「殺人霧霾」。這場持續了五天的大霧，由大量煤炭燃燒產生的煙塵、硫化物和其他污染物形成。⁶事後經估計，在



圖三 生物質燃燒釋放的PM_{2.5}污染

資料來源：本文作者研究團隊攝

這場煙霧期間超過4,000人死亡，十萬人以上受到呼吸道疾病的困擾，其中多為慢性病患者、兒童與老人等脆弱族群。雖然當時的科學家還未能明確認識到PM_{2.5}的具體健康風險，但日益嚴重的空氣污染現象，促使科學界和公眾開始重新審視顆粒物污染對呼吸道、心血管系統等的影響機制。隨着空氣質量監測技術的發展與健康監測系統的完善，PM_{2.5}被更精確地從粗顆粒物中測量，大量流行病學證據開

始湧現。透過哈佛大學（Harvard University）「六城市研究」等一系列研究，科學家們發現這些小顆粒對健康影響的廣度和深度遠超預期，PM_{2.5}的健康危害開始成為學術界關注的焦點之一。⁷

進入21世紀後，中國、印度等發展中國家的城市化進程迅猛推進。由於比較側重經濟發展，特別是工業經濟，而忽視空氣污染控制，導致PM_{2.5}污染事件頻發。尤其是中國的城市群和印度的首都新德里，成為全球空氣污染的「高危區」。

2013年，北京等城市的極端霧霾事件成為中國PM_{2.5}治理和健康問題的轉折點。⁸在這場霧霾事件中，北京的PM_{2.5}濃度一度突破當時世界衛生組織建議的最安全水平（24小時平均濃度標準：25μg/m³）的20倍以上。媒體的廣泛報道使這一問題引起了全球範圍的廣泛關注，公眾和政府也對PM_{2.5}的健康威脅有了更深刻的認識。中國政府隨即加強了對PM_{2.5}污染的監管和治理，出台了一系列政策，包括減少煤炭使用、推廣清潔能源和加大對綠色技術的研發投入。⁹

5. Han Shi., et al, "Preventing Smog Crises in China and Globally," *Journal of Cleaner Production* 112 (2016), pp.1261-1271.

6. Devra L Davis, "A Look Back at the London Smog of 1952 and the Half Century Since," *Environmental Health Perspectives* 110 (2002), pp.734-735.

7. Douglas W. Dockery., et al. "An Association between Air Pollution and Mortality in Six U.S. Cities," *The New England Journal of Medicine* 329 (1993), pp.1753-9.

8. Han Shi., et al, "Preventing Smog Crises in China and Globally".

9. Han Shi., et al, "Preventing Smog Crises in China and Globally".



圖四 來自工廠生產排放的煙塵顆粒
資料來源：本文作者研究團隊攝

與此同時，印度德里的霧霾危機也成為了全球空氣污染的標誌性事件。由於農田焚燒、交通排放、工業污染等多重因素，德里冬季PM_{2.5}濃度屢次突破健康警戒線。2017年11月，德里的污染濃度一度達到1000μg/m³的驚人程度，¹⁰遠遠超出了世界衛生組織的健康安全標準，大量市民出現呼吸道疾病和心血管

疾病症狀，嚴重影響當地居民的正常生活。

相較而言，歐美等發達國家在這一階段制定了較為嚴格的空氣質量標準，但因其大規模的工業生產、能源消耗和汽車使用，PM_{2.5}污染問題依然存在，只不過在對健康的威脅程度上相對較輕。

四、從局部到全身的「健康侵襲」

「無形無質，無不在也」，PM_{2.5}正是這種看似無形無質卻又無處不在的「幽靈」，時刻準備對人們的健康發起侵襲。它絕非僅僅是空氣中普普通通的一部分，而是一種潛伏的健康威脅，恰似悄無聲息的「刺客」，能夠不動聲色地潛入每個人的身體，在人們毫無察覺之際，悄然施展其「危害魔法」。

科學家們發現，PM_{2.5}憑藉呼吸這一自然的通道，大搖大擺地進入我們的肺部，進而如同狡猾的「入侵者」，通過血液循環這一「秘密通道」，將其危害的觸角延伸至其他器官。¹¹PM_{2.5}一旦進入人體，就會「糾纏不休」，激活肺部炎症反應、破壞肺組織結構、加劇氧化應激，長期吸入不僅使呼吸功能下降，「病魔軍團」也將蜂擁而至，給人類健康帶來沉重打擊。¹²長期暴露在高濃度PM_{2.5}環境中的人群，尤其容易患上慢性支氣管炎、哮喘、慢性阻塞性肺疾病以及肺部感染等呼吸系統疾病，如同陷入惡劣環境中的「健康沼澤」。尤其是那些含有有毒化學物質

和重金屬的PM_{2.5}，它們的危害性遠高於普通顆粒物，對人體的累積性影響不容忽視。¹³

令人擔憂的是，PM_{2.5}的危害絕非呼吸道這一「局部戰場」。它能夠直接與肺部組織接觸，進而通過血液循環在全身「遊走」。當這些微小顆粒成功突破肺部防線進入血液之後，它們便能夠肆意地影響心血管系統、神經系統和免疫系統等諸多重要的「健康堡壘」。例如，PM_{2.5}暴露可能導致血壓升高，如同給心血管系統施加了額外的「壓力砝碼」；會引發心臟病發作，彷彿在心臟這片「生命的引擎」上投下了一顆「定時炸彈」；還會造成認知能力下降，如同給大腦這一「智慧的中樞」蒙上了一層「迷霧」；甚至會影響胎兒的發育和兒童的成長，就像在生命的最初階段設置了重重「障礙」。越來越多的研究表明，孕婦長期暴露於高濃度PM_{2.5}環境中，不僅可能增加流產的風險，還可能影響胎兒的正常發育。¹⁴胎兒在發育過程中對有害物質的抵抗力較弱，PM_{2.5}的顆粒能夠通過胎盤進入胎兒體內，影響其肺部及神經系統的發育，甚至引發生缺陷。

10. Basu Mausumi, "The Great Smog of Delhi," *Lung India* 36 (2019), pp.239-240.
11. Yu-Fei Xing et al., "The Impact of PM_{2.5} on the Human Respiratory System," *Journal of Thoracic Disease* 8 (2016), pp.69-74.
12. Yu-Fei Xing et al., "The Impact of PM_{2.5} on the Human Respiratory System"; Chi-Yuan Chen et al., "The Role of PM_{2.5} Exposure in Lung Cancer: Mechanisms, Genetic Factors, and Clinical Implications," *EMBO Molecular Medicine* 17 (2025), pp.31-40.

13. Yijing Feng et al., "Long-term Exposure to Ambient PM_{2.5}, Particulate Constituents and Hospital Admissions from Non-respiratory Infection," *Nature Communications* 15 (2024), p.1518.
14. David M. Stieb et al., "Associations of Pregnancy Outcomes and PM_{2.5} in a National Canadian Study," *Environmental Health Perspectives* 124 (2016), pp.243-249.

可以說，PM_{2.5}不僅直接影響人的呼吸這一基本生理功能，更是如同一場「健康風暴」深刻改變着全身各個器官的健康狀況，讓整個身體都陷入「健康危機」之中。隨着對PM_{2.5}健康威脅的深入研究，全球公共衛生領域的證據不斷積累。¹⁵

世界衛生組織和各國公共衛生機構的研究已經明確指出，PM_{2.5}是導致早死、疾病和功能喪失的關鍵因素之一。據全球疾病負擔評估，全球每年因空氣污染導致的早死人數高達700萬人，其中90%以上都可歸因於PM_{2.5}，主要致死病因包括心臟病、中風、糖尿病、肺癌和慢性阻塞性肺病。¹⁶時至今日，PM_{2.5}污染仍然是最重要的環境風險因子之一，同時也是全球公共健康共同面臨的重要挑戰。

各國逐漸意識到，PM_{2.5}污染對健康的危害已經遠遠超出了單一學科解決問題的範疇，我們已不能單單依賴某一類技術方法，或者某一種管理準則應對這一錯綜複雜的全球性環境健康危機。

五、全球污染形勢與地區差異

儘管PM_{2.5}污染在全球範圍內普遍存在，但其濃度分佈與主要來源在不同地區存在顯著差異。根據世界衛生組織的最新統計，¹⁷2020年，全球約有80.2%的人口居住在PM_{2.5}濃度超過10μg/m³的地區（2021年9月年均濃度標準進一步收緊至5μg/m³，97.3%人口生活環境超標）。根據社會經濟水平劃分，低收入和中等收入國家的空氣質量問題尤為嚴重。尤其是在快速發展的城市地區，工業排放、交通污染和燃料使用等導致的環境問題更為突出，PM_{2.5}濃度長期維持在高水平。

從空間上看，¹⁸亞洲是全球PM_{2.5}污染最為嚴重的地區之一，特別是中國、印度和東南亞國家。在2019年之前，中國許多城市的PM_{2.5}年均濃度在國家標準35μg/m³以上，個別重工業城市甚至超過50μg/m³。雖然近年來通過實施嚴格的環保政策，空氣質量有所改善，但污染程度仍是世衛組織標準的6倍以上；印度的PM_{2.5}

污染問題更為嚴峻，首都新德里的年均PM_{2.5}濃度曾高達107μg/m³，全國許多城市的PM_{2.5}濃度在55-90 μg/m³之間，主要污染源包括生物質燃燒、工業排放和交通尾氣；東南亞地區如柬埔寨和泰國在疫情期間顆粒物年均濃度分別上升了25.8%和10.8%，印尼及其下風向國家常面臨旱季火災頻繁導致的短期污染急劇上升；中非和西非地區正經歷前所未有的能源消耗，高硫燃料、工業排放與柴油發電等將導致該地區面臨持續惡化的空氣污染形式；歐洲大部分地區的PM_{2.5}年均濃度在5-15μg/m³之間，北歐國家如瑞典和挪威通常低於10μg/m³，但在東歐一些國家污染濃度可能達到20-30μg/m³；美國、加拿大及澳洲的PM_{2.5}年均濃度一般在7-12 μg/m³之間，部分地區如加州等地由於森林火災，短期內PM_{2.5}濃度可能急劇上升至100μg/m³以上。總體而言，全球PM_{2.5}污染的空間差異顯著，亞洲和非洲部分地區的PM_{2.5}濃度遠高於世界衛生組織的安全標準，而歐美和大洋洲等發達地區的濃度相對較低，但仍存在短期內濃度急劇升高引致的健康風險。¹⁹

隨着全球氣候變化、野火事件和人口老化，各國公眾面臨的PM_{2.5}污染健康挑戰將進一步加劇。

六、誰在承受更多健康風險？

PM_{2.5}污染不僅僅是一個環境問題，還涉及深刻的社會公平性問題。²⁰不同社會群體在面對PM_{2.5}污染時，所處的環境、承受的負擔以及獲取保護和健康照護的能力存在顯著差異。長期以來，環境污染的受害者往往是社會中最脆弱的群體，包括低收入群體、少數族裔以及老年人和兒童等。

低收入群體和貧困地區的居民往往生活在污染源較多的區域，比如工業園區、交通主幹道旁等。由於缺乏資源和技術手段，這些群體接觸的空氣質量往往較差，長期暴露於高濃度的PM_{2.5}污染中。而且，這些群體通常沒有足夠的經濟能力購買空氣淨化器或選擇更為清潔的生活方式，且缺乏足夠的醫療保障，加劇了他們面臨的健康風險。

15. Aaron J.Cohen., et al, "Estimates and 25-year Trends of the Global Burden of Disease Attributable to Ambient Air Pollution: An Analysis of Data from the Global Burden of Diseases Study 2015".
16. Aaron J.Cohen., et al, "Estimates and 25-year Trends of the Global Burden of Disease Attributable to Ambient Air Pollution: An Analysis of Data from the Global Burden of Diseases Study 2015 ; Arnold Carrie, "Disease Burdens Associated with PM_{2.5} Exposure: How a New Model Provided Global Estimates," *Environmental Health Perspectives* 122 (2014), p.111.
17. World Health Organization (WHO), 環境(室外)空氣污染和健康: [https://www.who.int/zh/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/zh/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health), 訪問日期:2024年10月24日.

18. Jing Wei et al, "First Close Insight into Global Daily Gapless 1 Km PM_{2.5} Pollution, Variability, and Health Impact", *Nature Communications* 14 (2023), p.8349.
19. Michael Greenstone et al., "Air Quality Life Index", (2022), p.30.
20. Jun Rentschler et al., "Global Air Pollution Exposure and Poverty," *Nature Communications* 14 (2023), p. 4432.

城市與農村之間的PM_{2.5}污染差異也非常顯著。在很多地區，城市由於工業化、交通密集以及建築施工等因素，PM_{2.5}濃度往往較高且通常富含重金屬和多環芳烴等有毒物質，造成城市居民，尤其是低收入群體，面臨更大的健康威脅。而農村地區雖然整體PM_{2.5}濃度相對較低，但由於農業活動和燃料使用（如燃燒農作物殘餘和木柴取暖）等問題，其PM_{2.5}中可能含有較多的生物質燃燒產物，如有機碳和黑碳等，因此冬季農村居民使用固體燃料取暖導致的室內/外空氣污染尤為嚴重。²¹

兒童和老年人等群體，因其生理特點與行為活動模式，往往比成年人更容易受到PM_{2.5}的傷害。兒童期是人體生長發育的關鍵階段，各器官和系統都尚未發育成熟，呼吸頻率較成人更高，對污染物的吸入量也更多，因此污染更易導致肺功能發育不良，並增加哮喘、支氣管炎等疾病的患病風險。此外，PM_{2.5}暴露還可能影響兒童的認知能力和行為表現，對其長期社會發展產生負面影響。對老年人而言，隨着年齡增長，免疫系統就像一台「老化的機器」，

功能大不如前，PM_{2.5}很容易就突破變弱的免疫防線，肺部、心血管等器官更容易受損，因此也常面臨更高的風險。

PM_{2.5}污染的治理不僅是科學技術的挑戰，更關乎社會公平。如何確保低收入群體和弱勢群體能夠平等地享有清新的空氣和健康的生活環境，已成為當前環境治理與公共衛生政策中亟待解決的關鍵問題。

七、從懵懂到明晰的應對策略

自20世紀90年代以來，全球對PM_{2.5}危害的認知逐漸清晰，世界衛生組織等國際權威機構發佈了一系列研究報告，揭示了PM_{2.5}與心血管疾病、呼吸系統疾病等慢性病之間的緊密關聯。這些研究成果為全球範圍內的空氣質量標準提供了科學依據，並且極大地促進了各國政府對空氣污染治理的重視和政策行動。世界衛生組織在這一進程中扮演了重要角色，尤其是於2006年發佈的《空氣質量準則》就已經明確指出PM_{2.5}是公共健康的重要威脅，並為各國制定空氣質量標準提供了指導原則。²²

歐美國家在空氣質量管理方面起步較早，通過了嚴格的空氣質量標準與產業調整升級。例如，美國環保局自1970年代起便加強了污染物排放監管，推出《清潔空氣法案》(Clean Air Act)，逐步降低了污染源的排放量。美國和歐盟通過實施排放標準、投資綠色技術和推廣清潔能源，減少了煤炭和石油等傳統能源的使用，成功降低了PM_{2.5}濃度。

中國在PM_{2.5}污染治理方面的政策響應相對較晚，2008年北京奧運前夕，PM_{2.5}作為空氣污染的代表性指標首次引起公眾和政府的廣泛關注。隨着2013年嚴重霧霾事件的爆發，PM_{2.5}濃度在多個城市的急劇上升，引發了社會各界對空氣污染的強烈反應。這一事件促使中國政府意識到PM_{2.5}對公眾健康的重大威脅，PM_{2.5}治理逐漸成為政府工作的重中之重。

為了更有效地控制PM_{2.5}污染，中國啟動了大規模的空氣質量監測與評估網絡，建立了全國範圍的PM_{2.5}監測系統。通過衛星監測、地面監測和智能監控系統等手段，實時掌握全

國範圍內的空氣質量變化。這一系統為各級政府制定精確的污染防控措施提供了重要的數據支持。

在治理的過程中，政府意識到需要根據不同地區的PM_{2.5}污染水平、成分和來源差異採取針對性的區域、行業管控措施。例如，某些地區的PM_{2.5}污染源以交通為主，重點可能是控制車輛尾氣排放；而在以工業為主的地區，減少污染源則需要更多依賴清潔能源和工業升級。因此，中國政府着手從源頭上控制污染，實施了多項有力的政策措施²³，其中包括：

- 1. 限制高排放車輛：針對交通排放問題，中國實施了「排放標準升級」和「機動車限行」政策，大力推動電動汽車和清潔能源汽車的普及。此外，各大城市推出了車輛尾氣檢測與清潔技術應用，大幅減少了交通污染源。
- 2. 淘汰高污染的燃煤鍋爐：為減少煤炭燃燒對PM_{2.5}的貢獻，中國開始大力推進燃煤鍋爐的改造和淘汰計劃，鼓勵使用天然氣和電力等更清潔的能源。
- 3. 加強對工業廢氣的監管：中國制

21. Wu Di et al., "Toxic Potency-adjusted Control of Air Pollution for Solid Fuel Combustion," *Nature Energy* 7 (2022), pp.194-202.
22. World Health Organization (WHO), "Air Quality Guidelines: Global Update 2005: Particulate Matter, Ozone, Nitrogen Dioxide, and Sulfur Dioxide", (2006), pp.217-306.

23. Xi Lu. et al., "Progress of Air Pollution Control in China and Its Challenges and Opportunities in the Ecological Civilization Era", *Engineering* 6 (2020), pp.1423-1431.

定了更加嚴格的工業排放標準，對鋼鐵、水泥、化工等高污染行業的排放進行了嚴格管控，並大力推廣環保設施和清潔生產技術。

4. 綠色能源與可再生能源推廣：為了減少對煤炭和石油等傳統能源的依賴，中國加大了風能、太陽能等可再生能源的投資和技術研發，逐步實現能源結構的綠色轉型。

在這一系列政策的推動下，近年來中國的空氣質量有所改善。多個大城市的PM_{2.5}年均濃度持續下降，治理成效逐步顯現。這些城市在空氣質量監測和大數據分析方面的成功實踐，為全國乃至全球的污染管理提供了寶貴經驗。

然而，PM_{2.5}的全球治理依然面臨挑戰，尤其是在快速發展的經濟體中，PM_{2.5}污染問題依然嚴峻。為此，世界衛生組織推動全球加強國際合作，支持中低收入國家實施有效的空氣質量管理政策，尤其是通過技術援助、資金支持和政策建議，幫助這些國家提升空氣污染治理能力。

PM_{2.5}組成成分複雜，且污染來源多樣，這意味着我們需要根據地區特點和污染源類型，實施精確的控制和干預措施，從而有效降低其健康風險。²⁴從環境治理角度去嘗試解決這一棘手問題，更應當高瞻遠矚，整合多來源、多介質、多途徑與多健康結局的污染暴露-健康響應特徵，探尋如何才能真正扭轉這一不容樂觀的現狀，邁向更加綠意盎然、充滿生機的健康未來。

八、綠色技術與智能化應對

隨着對PM_{2.5}危害認知的日益深入，全球許多國家紛紛採取了不同的措施來減少污染的排放。大力推動能源使用的「綠色革命」，如太陽能、風能等可再生能源，能夠有效減少依賴高污染的煤炭和石油。同時，歐美、中國等許多國家還提高了燃煤電廠的排放標準，就像給燃煤電廠戴上了一頂「緊箍咒」，以減少有害顆粒物的排放，讓其排放更加規範和環保。

電動汽車的推廣也在一定程度上緩解了交通排放對PM_{2.5}的貢獻。傳統

燃油車的尾氣排放是PM_{2.5}的重要來源之一，而電動汽車的普及，就如同在交通領域開啟了一場「綠色出行革命」，不僅直接減少傳統燃油車廢氣排放，還為智能城市的發展提供了動力，就像給智能城市的發展裝上了「綠色引擎」。智能電網和儲能技術的發展，也為控制PM_{2.5}提供了新的思路。建設更為高效的電力傳輸和儲存系統，就如同在能源傳輸和儲存的道路上鋪設了一條「高速通道」，可以有效降低能源消耗帶來的污染排放，實現低碳環保的目標，在環保的征程上邁出了堅實的一步。

PM_{2.5}的治理不僅僅是清除空氣中的污染物，更是通過推動綠色技術、創新產業、發展低碳經濟，逐步實現資源的循環利用，推動社會走向可持續發展的未來。正如在荒蕪的土地上播下「綠色的種子」，這些技術和政策的普及將漸漸生根發芽，最終長成參天大樹，構建起更加美好的綠色家園。

九、智慧社會與低碳轉型

「君子務本，本立而道生」，空氣品質的改善是建立健康生活方式不可忽視的基礎條件。PM_{2.5}的排放關乎我們日常生活的方方面面，是我們邁向健康、綠色社會的必由之路。

人類要從根本上變革生產和生活方式，推動綠色低碳的轉型，才能實現真正的健康目標——不僅是呼吸清新的空氣，更是建設一個長期、可持續的健康社會。這一轉型就如人生道路上的「方向標」，為我們指引着未來的發展軌跡，幫助我們擺脫傳統高污染模式的束縛，轉向更加健康、公平的生活方式。

推動低碳轉型，不僅僅是減少PM_{2.5}的排放，更是重新定義我們的生活方式、生產方式、能源結構乃至社會發展模式。通過加快電動交通、智能電網和可再生能源等綠色技術的普及，我們不僅能夠有效減少PM_{2.5}排放，還能通過整體系統的優化，實現更高效、更環保的社會結構。如上文所述，電動交通的普及可以直接減少傳統燃油車輛帶來的尾氣排放，而智能電網的建設則有助於優化電力使用，提升能源效率，從而減少不必要的資源浪費和污染物排放，實現保障社會民眾健康福祉的目的。

隨着智慧城市的發展，我們將進入一個前所未有的高效、環保的生活新時代。智慧城市不僅僅是技術的集中體現，更是人與自然和諧共生的典範。通過集成先進的數字技術、物聯網、大數據、雲計算等工具，讓城市管理如同擁有了「智慧大腦」，

24. Xiangdong Li. et al., "Air Pollution: A Global Problem Needs Local Fixes," *Nature* 570 (2019), pp.437-439.

能夠更加智能化，資源利用也更加高效。例如，智能交通系統通過實時數據優化交通流量，不僅緩解了城市交通壓力，還有效減少了交通擁堵帶來的尾氣排放；智能建築系統則通過對建築能源的精準調控，減少了不必要的能耗和排放，推動城市更加綠色、宜居。

在智慧城市中，能源、環境、交通等系統的協同優化，使得城市運轉更加環保與高效。未來的城市應更加注重資源的循環利用、能源的綠色替代和排放的精確管控，PM_{2.5}的治理不再是單一的環保舉措，而是作為城市健康文化與綜合發展戰略的一部分，融入城市建設的每個細節中。

十、領唱綠色轉型的「先鋒」

作為全球最大的發展中國家之一，中國在PM_{2.5}治理和全球綠色轉型中的作用尤為重要。中國面臨着嚴峻的空氣污染挑戰，但與此同時，中國也在綠色技術推進、低碳能源發展以及PM_{2.5}治理方面取得了顯著成就。近年來，中國在大氣污染防治、能源結構轉型和綠色技術創新方面的投入不斷加大，已成為全球綠色轉型的先鋒之一。

中國在電動交通、智能電網和可再生能源領域的技術進步，正為全球綠色轉型提供重要的經驗和技術支持。例如，全球最大的電動汽車市場在中國，隨着新能源汽車政策的推進和市場的擴大，中國不僅成功減少了交通領域的PM_{2.5}排放，還推動了全球電動汽車產業的發展。此外，中國在風能、太陽能等可再生能源領域的投資也在不斷增加，逐步減少對化石能源的依賴，推動了全球能源結構的綠色轉型。

從「十三五」規劃到「十四五」規劃，中國政府明確提出了「碳達峰」和「碳中和」目標，積極推動產業結構升級，減少高污染、高排放行業的比重。通過綠色財政政策、環境稅收政策以及嚴格的排放標準，中國為全球綠色低碳轉型提供了政策支持和成功案例。

作為全球重要的國際金融和貿易中心，香港也在全球綠色轉型中扮演着獨特的角色。香港具備豐富的金融資源、先進的技術創新能力和成熟的市場機制，在推動PM_{2.5}治理和綠色轉型方面有着巨大的潛力。尤其是香港在綠色金融方面的領導地位，能夠吸引全球投資，推動綠色技術的研發和應用，為全球綠色社會轉型提供資金支持。作為中國的一

部分，香港可以發揮其獨特的地理優勢和國際化平台作用，為全球和區域性環保合作提供橋樑。

香港理工大學的智慧城市發展理念為PM_{2.5}治理提供了有力的支持。大學在智能交通、綠色建築、可再生能源和環保技術方面的創新，不僅直接協助改善地區空氣質量，也為全球其他大都會提供了示範。例如，低碳綠色城市建設技術、智慧電動車和電網現代化等項目，能夠有效減少污染排放，提高能源利用效率，改善城市環境的質量。

十一、攜手編織全球健康網絡

PM_{2.5}一直是當今全球公共健康面臨的重大挑戰，跨越這一挑戰不僅需要技術創新，還需要全球範圍內的合作與智慧共享，單憑任何一個國家或地區的努力都是無法獨自應對的。在這個問題上，從污染源的削減到健康保護，從技術創新到政策協調，全球社會必須形成共識並採取一致行動。只有在全球範圍內建立起系統化、科學化的治理框架，才能應對PM_{2.5}跨國遷移和擴散的挑戰。全球政策協調，將如同織女手中的絲線，將世界各國緊密相連。通過國際合作，我們應共同制定和執行空氣質量標準，推動全球範圍內的污染減排行動。

全球合作的必要性體現在多個層面。PM_{2.5}污染並不受國界限制，它能夠跨越大洲，隨着氣流流動，將污染物帶到其他地區，這也意味着任何國家在空氣污染治理方面都離不開國際合作。我們需要通過共享數據、經驗和技術，加強全球範圍內的污染監控、應急響應和政策協調，確保每個國家、每個城市都能根據實際情況採取科學有效的管控措施。基於聯合國等國際組織的支持，各國應加強環保合作，共享技術、資金和經驗，特別是在發展中國家和地區。

PM_{2.5}治理不僅僅是政府、企業或科研機構的任務，更是全社會共同的責任。只有在各方通力合作的基礎上，才能實現對空氣質量的有效改善，進而為人類創造更加健康、綠色的未來。從政府到企業、從公眾到學術界，各個層面的合作和行動必不可少。

政府是環境治理的主導力量。政府需要制定並嚴格執行空氣質量標準，出台有效的環保政策，推動清潔能源和綠色交通的發展。通過實施嚴格的污染排放標準和法律法規，直接限制工業排放、控制交通污染和減少建築施工揚塵，從源頭上減少PM_{2.5}的產生。同時，政府還應當加

大對公共環境健康教育的投入，提升民眾對PM_{2.5}生態環境與公共健康威脅的認知，鼓勵綠色生活方式和低碳消費。國際組織和政府間的政策協調可以形成更具規模的治理體系，為全球健康保護提供更有力的支持。

企業在減少PM_{2.5}排放方面同樣承擔着重要責任。隨着科技創新的不斷推進，企業應當採取綠色生產模式，研發更加環保的產品和技術。企業可以通過提高能源效率、採用清潔能源、減少工業廢氣排放、推廣低排放車輛等方式，直接減少PM_{2.5}的源頭排放。此外，企業還可以通過創新技術加速行業綠色轉型（如智能電網、可再生能源、綠色建築材料等）。在全球化經濟體系中，企業的全球佈局和供應鏈也決定了其環保影響力。跨國企業應當在全球範圍內推動普及環保技術，採用綠色供應鏈管理，為全球PM_{2.5}的控制貢獻力量。

公眾是空氣污染的最終承擔者，也是治理過程中的積極參與者，公眾的環保意識和參與度對空氣質量的改善至關重要。公眾可以主動採取

行動，如選擇公共交通、購買低排放汽車、減少煤氣和燃煤使用等，從而減少PM_{2.5}的排放源。每位公民的努力都至關重要，追求低碳生活、綠色出行和減少能耗等日常行為，積少成多便可以為減少PM_{2.5}污染作出一份貢獻。此外，公眾參與不僅限於個人行為，還包括社區的環保倡導、參與環境保護活動、支持環保政策的落實等。

科研界在PM_{2.5}治理中的作用不可或缺。科學家們通過深入研究PM_{2.5}的組成、來源及其對健康的具體影響，可以幫助政策制定者和公眾更好地理解污染物的特性和傳播機制。通過先進的空氣質量監測技術，科研機構可以為政府提供數據支持，幫助他們制定更加精準的污染控制政策；科研機構和企業應加強合作，尤其是在空氣淨化技術、清潔能源技術、廢氣處理技術等方面，可以推動綠色技術的研發與推廣。科學研究不僅要關注如何減少PM_{2.5}的排放，還應該研究如何提高城市環境的自我淨化能力、如何減少污染對人體的直接傷害，呼籲社會各界採取更有效的應對與管控措施。

十二、邁向綠色健康未來

在追求PM_{2.5}年均值降至世界衛生組織年均濃度指引值5µg/m³的征途上，我們不僅在追逐一個數字，更是在擁抱一個更加綠色、健康的未來。²⁵這不僅是世界衛生組織設定的空氣質量標準，更是代表着全人類共同的願景。我們也需要認識到，這是一項長期且艱巨的挑戰，是一個需要全球共同行動的長遠目標，需要我們以堅定的步伐，持之以恆、精誠合作，共同繪製一幅藍天白雲的畫卷。

通過科技創新，我們點亮了對抗PM_{2.5}的智慧之光。智能監測、精準預測、清潔能源等技術的發展，為我們提供了淨化空氣的利器；全球政策協調，如同指揮家的手勢，引領着各國協同奏響減排的交響曲；社會動員，則如同春風化雨，喚醒每個人的環保意識，讓綠色生活成為新常態。

讓我們攜手同行，在科技創新的引領下，在全球政策的協調中，在社會動員的推動下，攜手邁向綠色健康的未來。在那時，天空將恢復它的湛藍，空氣將恢復它的清新，而我們，將與自然和諧共生。這應是我們對地球的承諾、對未來的希望！

25. World Health Organization (WHO), "WHO Global Air Quality Guidelines: Particulate Matter (PM_{2.5} and PM₁₀), Ozone, Nitrogen Dioxide, Sulfur Dioxide and Carbon Monoxide".

還原 與

建構

—

去中心化的現象學意涵

郭
世
恒

還原與建構—— 去中心化的現象學意涵



郭世恒
南洋理工大學

一、引言

去中心化(Decentralization)是Web 3時代的關鍵概念，從區塊鏈(Blockchain)、去中心化自治組織(DAO)，到元宇宙(Metaverse)，都提倡人與人之間去中心化的連結模式。根據當前最大區塊鏈平台以太坊(Ethereum)對Web 3的定義，Web 3的特點是它由用戶建立、營運和擁有。¹這種互聯網模式有別於Web 2.0依賴大型的數據和資源平台，用戶之間的訊息交換、交易、合作等等，直接以智能合約的方式點對點(Peer-to-peer)進行，不需依賴第三方平台。

作為一種互聯網技術，Web 3的初衷是要規避訊息集中在第三方平台造成的訊息安全、資源不平等和不透明審查制度的問題。因此，對Web 3

的討論和研究除了在技術細節和技術應用以外，很重要的議題是它所造成的社會效應。因此，大部分人文學者的相關討論都從政治學、社會學、法學方面探討去中心化技術可能潛在的挑戰和危機。²這些反思和討論無疑十分重要，但它們都尚未觸及一個更深刻的問題：如果Web 3稱得上一個時代，它憑甚麼能成為一個時代，能成為支撐起一個新世界的方式？

根據海德格(Martin Heidegger, 1889-1976)，一個「時代」的根基是它的形而上學(Metaphysics)，亦即是對存在與真理的本質的決斷。³換句話說，一個「時代」代表的是它根本的「世界觀」，這個「世界觀」對「何謂真實？」、

「何謂存在？」的問題給出了屬於這個時代的答案。⁴因此，Web 3能否真的成為一個時代，關鍵在於它能否建立起一個世界觀，對人類本來的生活世界(Lifeworld)帶來一種新的理解。

目前對Web 3的技術哲學思考都傾向於後現象學(Post-phenomenology)的研究進路。這種研究進路傾向於從宏觀角度揭示技術與人類生存境況的相互構成。⁵換句話說，它的側重點是技術與人的互動，而不是人透過技術能建立起的世界觀。這種研究進路雖然能揭示某些Web 3對人類活動已經作出的重塑，卻無法透過Web 3的特質對它的可能性和本質作出展望。為了把握Web 3之於哲學與世界觀建構的可能性，本文嘗試從後現象學進路回到胡塞爾(Edmund Husserl, 1859-1938)的現象學方法，證明Web 3不只是一個技術應用，還可以是一種全新的哲學思考方式。結合現象學和Web 3的構想，我們可以有一個雙重收穫：(一)從現象學的角度，可以看出Web 3有能力作為一種世界觀的還原與建構的雙重運作。因此，Web 3的意義在於，它可以建立

起一種新的、去中心化的世界觀，並以此世界觀定義一個新的「時代」。(二)從技術層面來看，Web 3的去中心化技術可以在現實層面落實胡塞爾提出的建基於交互主體性之上的共同體，並為哲學活動提供一個新的運作模式。

本文將分為四個部分，第一部分將分析現時對Web 3的後現象學思考的局限和回到現象學式思考的必要性。第二部分將從現象學的角度揭示Web 3與Web 2.0的最大特點，在於去中心化理念中涵蘊着一種對世界觀的解構和還原功能。第三部分將基於Web 3的現象學考察，揭示Web 3建構世界觀的潛能。第四部分將探討Web 3如何可能成為一種現象學的技術，幫助哲學思想者在交互主體性上實現對生活世界的探索。

二、Web 3技術的哲學思考

Web 3構想所引起的風潮，始於一篇署名中本聰(Satoshi Nakamoto)的網文——“Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System (White Paper)”，一般譯作〈比特

1. Ethereum, “Introduction to Web 3”. Available online: <https://ethereum.org/en/web3/#introduction> 於2023年6月9日上傳，2023年6月15日訪問。

2. 參見Quinn DuPont, “The Politics of Cryptography: Bitcoin and The Ordering Machines,” *Journal of Peer Production*, 4:1, (January, 2014), pp. 1-10. 葉娟麗、徐琴，〈去中心化與集中化：人工智能時代的權力悖論〉，《上海大學學報》(社會科學版)，第36卷第6期(2019年11月)，頁1-12。Yuming Lian, *Sovereignty Blockchain 1.0: Orderly Internet and Community with a Shared Future of Humanity* (Singapore: Springer, 2021).

3. Martin Heidegger, *Off the Beaten Track* (Cambridge: Cambridge University Press, 2002).

4. 根據海德格的說法，「現代」的特質不只是建立了一個與古代不同的世界觀，而恰恰是以「世界圖像」的方式來把握存在的時代。(Martin Heidegger, *Off the Beaten Track*, pp. 57-85.)

5. Lucas Introna, “Phenomenological Approaches to Ethics and Information Technology,” *Stanford Encyclopedia of Philosophy*, 29 Jun 2017. Available online: <https://plato.stanford.edu/entries/ethics-it-phenomenology/#PostPhenHumaRela>

幣白皮書》。在這篇論文中，中本聰構想出了一種去中心化的虛擬貨幣——比特幣(Bitcoin)。比特幣概念的初衷是要解決第三方金融機構的信任問題。傳統主權貨幣由國家統一發行，屬於中心化的產物。原則上國家中央銀行擁有決定貨幣發行量和幣值的權力。⁶這種金融制度使資產集中在銀行體系之中，市場承受着個別金融機構的風險。⁷整個虛擬貨幣的基本構想是，如果我們有一個帳本，可以記錄一切交易，以防止同一筆錢被重覆支付(Double-spending)，那麼實體的貨幣就不是必須的，市場從而可以繞過統一的貨幣發行機構。而且，如果帳本是被分佈式的儲存，沒有任何人能夠篡改所有帳本，那麼整個交易系統就不可能被任何機構或實體把持，也就能解決信任的問題。這個分佈式的、由所有人共同編寫和記錄的帳本，通過區塊鏈技術來實現點對點的轉帳和記帳，就可以實現金融的去中心化。Web 3的概念則是區塊鏈技術的深化與拓展，它倡導透過區塊鏈技術使得互聯網用戶可以擁有自己的數據和內容，以擺脫

Web 2.0 時代數據集中在少量巨頭企業的局面，使得互聯網可以實現去中心化。

自Web 3構想逐步實施以來，不少學者都曾探討區塊鏈技術的潛在風險和社會效應。然而不少討論都集中在虛擬貨幣會否被用於非法用途、會否導致新的權力不平等、會否衝擊現行政治制度等倫理問題。這些討論都不足以回應一個問題：如果Web 3稱得上一個時代，它憑甚麼能成為一個時代，能成為支撐起一個新世界的方式？換句話說，它能否建立起一種新的世界觀，在其中人類對「何謂存在？」、「何謂真實？」等根本問題有一個新的回答？

現時學界對這個問題最接近的思考應該是Reijers和Coeckelberg於2016年發表的文章“The Blockchain as a Narrative Technology: Investigating the Social Ontology and Normative Configurations of Cryptocurrencies”。在文章中，Reijers和Coeckelberg嘗試證明Web 3底層的區塊鏈技術不只是一般

的工具(Instrument)，而是一種「敘事技術」(Narrative Technology)。⁸

「敘事技術」這個概念借用了法國哲學家保羅·利科(Paul Ricoeur, 1913-2005)的詮釋學理論。Reijers和Coeckelberg認為技術，尤其是像區塊鏈這樣的訊息與交流技術(Information and Communication Technologies, ICT)，可以被理解為一個文本，大眾與文本的互動經歷「預置」(Pre-figuration)、「配置」(Configuration)、「重置」(Re-figuration)三個環節。⁹比如，一個人在學會開車之前，就有對交通系統前置的理解。當他真的學會開車之後，他就會把這種前置的理解配置到實際的駕駛活動之中，這種經驗除了實際改變了交通系統的狀態，也會重新塑造對「交通系統」這個文本的重新理解。¹⁰Reijers和Coeckelberg認為，正是在技術的配置中，我們可以達成一種新的對世界的理解。他們舉例說，區塊鏈技術一方面是我們用以組織交易行為的方式，但與此同時，塑造了我們對「金錢」和「財產」的理解。

Reijers和Coeckelberg的研究無疑揭示出，Web 3除了作為一種應用技術，也具有建立一種新的世界觀功能。然而這個進路有兩個問題：第一，如果Reijers和Coeckelberg的觀點是正確的，那麼很多技術其實都是具有文本性的。更具體的說，Reijers和Coeckelberg強調技術重新配置我們對世界理解的過程，是一個「讀取」和「寫入」的雙向過程。在這個過程中，文本被閱讀，也重新被編寫。這個過程，其實在Web 2.0中已經實現了。Web 2.0中代表性的社交平台如Facebook、YouTube，就允許用戶寫入和讀取訊息，形成龐大的數據和訊息庫。這些平台自然也作為一種技術配置重塑了人與人之間的社會關係。因此，這個分析並不能把握到Web 3與Web 2.0最大的區別。Web 3和Web 2.0最大的分別在於，用戶之間連接的方式不再是中心化的第三方平台，而是區塊鏈。雖然現實中的區塊鏈也往往有一個像以太坊這樣的平台負責運營，但差別在於Web 3的數據並非儲存在平台的伺服器內，而是儲存在區塊

6. 在不考慮其金融後果、對外貿易、協議等情況之下。

7. 一般認為，促使比特幣受到廣泛社會注意的背景是2008年的金融危機。

8. Wessel Reijers and Mark Coeckelberg, “The Blockchain as a Narrative Technology: Investigating the Social Ontology and Normative Configurations of Cryptocurrencies”, *Philosophy and Technology*, 31 (October, 2016), pp. 103-130. Available Online: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13347-016-0239-x> DOI: 10.1007/s13347-016-0239-x

9. 此為利科的術語，見Paul Ricoeur, David Pellauer (trans), *Hermeneutics* (Cambridge: Polity Press, 2013), p. 17.

10. 此為Reijers和Coeckelberg原文中的例子。

鏈之中。區塊鏈不是一個靜態的記憶體，而是一個不斷被生成的文本。例如比特幣的區塊鏈中，每一個新生成的區塊除了包含了該時間段的所有交易訊息，還包含了前一個區塊的加密雜湊(Hash Function)、相應的時間戳(Time Stamp)和交易資料。¹¹其中，加密雜湊使得當前區塊之中包含了以往一切的訊息。也就是說，一切歷史記錄是在不斷的迭代中，被保留在一個固定的時間序列之中。

雖然Reijers和Coeckelberg也注意到了這個特點，但他們認為，這個特點表明區塊鏈把原本沒有固定順序的事件編入一個不可逆的序列之中，其後果是掩蓋了人與人交往中原本的那種非時序的自由的維度。隨之，社會性的關係也會變得固化(Rigid)、不可逆轉(Irreversible)和沒有協商餘地(Non-negotiable)。¹²這個分析展示出Reijers和Coeckelberg分析取向的第二個問題，即他們傾向於揭示技術在實際運作後造成的社會

後果，而不是人在使用該技術時如何理解這個世界。這個傾向並不是偶然。從Reijers和Coeckelberg多次聲稱自己的進路為「後現象學」(Post-phenomenology)，可見他們主要受到當代著名技術哲學家唐·依德(Don Ihde)的影響。依德稱自己的哲學方法為「後現象學」。這個概念是直接針對現象學的提出者胡塞爾而來。依德認為，胡塞爾的現象學中欠缺了對技術的系統分析。¹³他認為胡塞爾的現象學分析過於依賴意識所直接把握到的對象，因此受制於肉體感官的天然極限，不能汲納由觀測儀器和技術擴展了的經驗。因此他提出結合現象學和實用主義，建立一種「後現象學」。這種「後現象學」最大的特色是關注經驗在具身化的環境互動中如何展現，而非主體的反思和主體當下對世界的第一身理解。¹⁴Reijers和Coeckelberg明顯地繼承了這個觀點，只是他們表明不同意依德太注重具身性的經驗，忽略了語言和文本的作用，所以引入了利科的詮釋學作為補充。

後現象學與現象學的最大分別在於，現象學是對第一人稱的經驗分析，它從主體自身直接的經驗出發，思考事物被經驗到或者被給予的方式；依德的後現象學，則強調經驗不是透過主體反思自身而得到表述，而是觀察經驗如何在物理的、文化的、社會的環境中體現出來。因此，Reijers和Coeckelberg明顯是把區塊鏈作為一種能夠塑造經驗的技術和環境來觀察的。這種分析，固然能夠指出區塊鏈技術如何潛在地影響一個人的觀念，如對金錢、交易的理解，但卻不能深入闡釋這種新的理解為何？對於一個正在使用Web 3的人，從他的第一身角度(First-person perspective)如何理解Web 3技術和Web 3建構出來的世界？換句話說，這種研究進路不能揭示主體在Web 3的具體運用中可能建構起的世界觀。為此，本文嘗試從後現象學回到現象學，以深入探討Web 3建構世界觀的可能性。¹⁵

三、Web 3與去中心化構想的現象學分析

在進入具體分析之前，先來簡單總結一下現象學的背景和特點。與依德的技術考量不同，胡塞爾哲學思考的重心是邏輯與科學。在胡塞爾晚年發表的《歐洲科學危機與超越論現象》(*The Crisis of European Sciences and Transcendental Phenomenology*)中，他認為歐洲現代科學的決定性事件是伽里略(Galileo Galilei,1564-1642)對自然的幾何化和數學化。對自然的幾何化和數學化是現代物理學的最重要特徵之一。¹⁶數學化的作用是，它可以在可觀測的現象之上建立一個無限的數學模型。例如，當我們掌握了行星軌道的公式之後，它的一切運動和每一刻的位置都能準確計算出來。從此，科學就不再只是有限的經驗觀測和總結，更可以無限的預測將來。甚至對我們仍然沒有觀測到的天體，也可以用同一個模型來描述。

11. 加密雜湊，又稱為「哈希函數」，它能夠把任意長度的字符串映射為一個固定長度的二進制數值，通過這個映射，一個新生成的區塊就可以記錄上一個區塊的訊息。時間戳的作用是確認每一筆交易的準確時間，以定義它們的前後次序。

12. Reijers and Coeckelberg, “The Blockchain as a Narrative Technology: Investigating the Social Ontology and Normative Configurations of Cryptocurrencies”, pp. 103-130. Reijers 和 Coeckelberg 沒有進一步解釋這三個概念，但我們可以理解為，在虛擬貨幣交易中，一旦交易被執行了，就不可能被修改，因此如果發生錯誤交易，就無法挽回損失。

13. Don Ihde, *Husserl's Missing Technologies* (New York: Fordham University Press, 2016).

14. Don Ihde, *Husserl's Missing Technologies*, p. 19.

15. 本文評審曾指出後現代結構理論、商談倫理學和馬克思主義都可以用來研究Web 3去中心化構想的哲學意義，這些進路無疑都能從某些角度揭示Web 3的特質，但由於本文的重點在於Web 3是否能成為一種建立世界觀的技術，因此本文關注的首要主體在Web 3中構築起的對世界的認知，而非實存上的交往、商談、生產活動等。在認知與世界觀建構的議題上現象學是更為對題的方法，而且它與後現象學之間的張力更能幫助我們找到突破的方向。

16. Edmund Husserl, David Carr (trans), *The Crisis of European Sciences and Transcendental Phenomenology* (Evanston: Northwestern University Press, 1970). 原著以德文在1935年發表。

自然的數學化的結果是，我們相信由理論所描述的世界比我們直接經驗到的世界更為真實。我們觀測到的宇宙只是世界的一部分而已。然而，胡塞爾認為，這種通過理論模型來表象的世界觀不能窮盡理性的追問。比如，我們用以建構理論的概念，例如數、連續性、邏輯等等，都不是物理的實體，關於它們的真理自然不能用自然科學的方式來解答。因此，自然科學是不能自證其根的。而事實上，數學、邏輯的根基正是胡塞爾哲學的核心問題。標誌着他從數學進入哲學領域的代表性著作，正是1901年發表的《邏輯研究》(*Logical Investigations*)。在這部奠基性的著作中，胡塞爾提出用現象學(phenomenology)方法來研究邏輯和知識的根基。

現象學的最基本定義是對經驗的第一身描述。不同於心理學上對心理過程的客觀描述，也不同於文學上對主觀感受的描寫，現象學嘗試在第一身的經驗中找到某一種現象和經驗的必然結構，並嘗試從這些結構之中找到事物被感知的方式和它們的本質。例如，心理學或神經科學對視覺的描述可能是針對視覺神

經的機制，但我們在第一身的經驗之中，是不會看到自己的視覺神經的。當我看到一個杯子，就是看到了這個杯子，而不是它引起的神經訊號。看到這個杯子的時候，每個人可能有不同的感受、聯想、體會，但無論這些感受的差別如何，一個杯子被感知為一個杯子，它一定是在空間中以某一面向我呈現的。我通過這個向我呈現的側面，把它看成一個杯子。而我無論如何都不能同時看到這個杯子的所有面向，所以一個杯子是在它的連續轉變中的側顯(*Abschattung*)向我呈現的。這種描述，不會因為我的個人感受而改變，甚至跟我不是一個人類都沒有關係，只要談得上是視覺感知，都必然具有這個結構。¹⁷在《邏輯研究》中，胡塞爾就用類似的現象學方法探討一些基本的邏輯概念，比如整體、部分、性質等等，如何在我們的認知經驗中被理解。

基於這種現象學方法，胡塞爾認為，像上帝視角般的對世界的理論化並不能真實把握到世界豐富的意義來源。我們認為客觀實在的物理世界，其實都必須像那個杯子一樣，通過不同的方式向我們顯現。如果

我們把世界都理解為一個預先被無限的理論規定好的世界，恰好忽略了我們是如何從有限的經驗開始建構概念，然後以理論表象整個世界的過程。從我們樸素地依賴了一個理論來表象一個實在世界，到發掘其表象如何在第一身經驗中構成起來，就是所謂的「現象學還原」(*Phenomenological Reduction*)。胡塞爾認為，現象學是第一哲學，換句話說，哲學的任務不只是理解一個預先被給予的世界，更重要的是對這個世界如何被給予、如何被建構有一個後設的認識，才能達至真正的哲學。

因此，與後現象學的進路不同，現象學更關注的是對一個現成的世界觀，如物理學世界觀的解構；而解構的目的不是要把世界觀還原為人實存上的活動，如對技術的使用、依賴於技術的交互過程、建基於技術的生產活動等，而是人第一身的對世界的理解和認知。換句話說，在解構了某現成的世界觀之後，現象學期望可以從第一身的經驗開始建立起一個新的、可能的，且建基於親身經驗的世界觀。

運用現象學來分析Web 3與區塊鏈技術，我們將會看到現象學和區塊鏈的原始構想都具有去中心化的特

質。上文說過，區塊鏈技術挑戰的對象是中心化的貨幣金融體系。這套中心化的系統與自然的數學化的共通之處是，它透過設置一個抽象的架構，使得系統內的一切事物都可以被量化，並通過架構被定義。與物理學中的理論相似，貨幣制度也可以被理解為一個無限的架構。雖然現實的經濟規模是有限的，但我們先行預設了一切交易、物品都可以市場化，被標上價格。因此在市場裏，貨幣就是一種客觀實在，它比一切具體的商品更真實，是衡量一切價值的標準，以至於我們認為錢才是唯一真實的財富。從這個對比可以看出，中心化的貨幣和數學化的自然，都是以一個抽象的理論建構來取代了原來的現實，並使一切事物都通過這個理論或架構的中介得以表象。

如果我們按照現象學的方法，而非後現象學的方法對貨幣體系進行還原。我們着眼的便不再是區塊鏈作為一個中介結構的分析，而是對於支付行為本身的分析。假如我是一個貨幣的使用者，我的第一身經驗是這個手上貨幣可以換來我希望得到的物品或者服務。這種交易的意向性和行動實踐的意向性不同。對比一下「我親自下廚做一頓晚飯」和「我去餐廳買了一份晚餐」。客觀來說，兩者同樣是

17. 因此，人工智能的物件識別也需要有這個變化的參量，以便在側顯變化中認出同一個物件。

先進行一些行動，然後導致一個新的事態——「我吃了晚飯」，但兩個意向性具有不同的結構。前者是基於我對食材的化學物理屬性，按照因果律來意向將來的結果，後者是基於我對市場規律的理解來意向將來的結果。因此，交易行為的本質不在行為與結果的因果性之中，而在對等價性的意識。只有當我們具有等價性的概念，才能理解和進行市場交易行為。

如果這個現象學分析是正確的，那麼虛擬貨幣，乃至任何貨幣，都不是如Reijers和Coeckelberg所說的，是一個被建構出來的擬實體(Quasi-entity)，以代替(Stand For)實體層面的交易事件。¹⁸因為貨幣和實體之間存在的是等價交換關係，而不是代替關係。正如我向某人付出了一百塊錢，並不能代替我向他提供了一個價值一百元的理髮服務。貨幣不能代現(Re-present)或者代替它的等價物，只能交換它的等價物。因此，虛擬貨幣，乃至任何貨幣的體系，即使如Reijers和Coeckelberg所言具有一定的文本屬性，但它不能像一個真正的文本一樣，意指或代現現實，因此也不存在貨幣體系對一階實體層面的掩蓋和覆寫。

情況恰好相反，比特幣之所以可能，正是因為看到了貨幣的現象學本質是交易行為，因此我們並不需要一個作為中介的貨幣體系架構，只需要一個帳本來記錄一切的交易行為，就可以把原本經過中心化貨幣體系作為中介的市場行為還原到它前理論的交易行為之中。換句話說，我們並不是先有了一個虛擬貨幣，然後在實際的運用中以它為中介來配置(Configure)我們的行為和對區塊鏈的理解，而是先了解了交易的本質，然後按被現象學還原了的交易經驗來設計區塊鏈和虛擬貨幣的體系。

由此可見，現象學和Web 3去中心化的構想，都具有還原的功能，可以把曾經被架構或理論代現或中介的事物還原為它們被代現或中介前的原初狀態，並重新思考該架構或理論的根基。當我們使用虛擬貨幣時，除了有一種新的交易行為，也誕生了一種新的對貨幣的理解，而且這個理解是在懸置了現行的貨幣體系下，一種建基於第一身交易經驗的理解。這個理解帶來了一種新的世界觀，以解釋貨幣的「存在」和其真實性。如果忽略了這個現象學的

視角，則我們只能從已經被投入使用了的技術開始進行後現象學的分析(例如虛擬貨幣的真實效用)，不能看到Web 3技術如何在原初的生活世界(Lifeworld)中獲得其合理性(如原初交易行為的目的)。正是基於上述現象學式的考察，我們才能看出Web 3與Web 2.0的差別不在於它的「寫入」和「讀取」功能，而是它對中心化的、被架構所表象的世界觀的還原與解構，而且其還原與解構的方式都與現象學方法有深刻的共通之處，即探索人類在使用某種中心化架構前的原初體驗和生活方式。

四、還原與建構：現象學對Web 3的哲學啟示

除了上述的共通點，現象學相比Reijers和Coeckelberg的後現象學進路，更能幫助我們深入使用Web 3時的第一身經驗，並從這個經驗理解Web 3如何可能建構起新的世界觀。雖然Reijers和Coeckelberg的研究也有從重置(Refigure)的角度來解釋Web 3和區塊鏈作為文本技術的建構功能，但這個描述無法幫

助我們理解作為一個真正在使用Web 3的人，我們能期望Web 3為我們建構一個怎樣的世界？我們在何種意義上可以利用Web 3創造一個新的世界觀和新的時代？

從現象學的角度來看，Web 3除了是對傳統中心化體系的去中心化解構，其目的更在於建構一種新的去中心化體系；其中，體系的建構是基於每一個主體的第一身經驗與行動。例如，Web 3其中一個重要應用就是去中心化自治組織(DAO)，它能夠把機構的組織架構還原為成員的每一次交流、參與和貢獻。¹⁹去中心化自治組織沒有固定的層級架構，成員可以隨時按須以智能合約的方式聯繫合作，也可以共同投票修改組織的規則。組織的公共區塊鏈可以透過虛擬貨幣或代幣(Token)的方式記錄每一個人的貢獻，這些貢獻成為每個成員在組織中的持份。²⁰因此，DAO的組織形式實際上把一個抽象的組織架構還原為每一個具體成員的實際參與。只有被真實記錄下來的每一次互動、協作，才構成了組織的本體。這種組織正是一種新的建構方式。

18. Reijers and Coeckelberg, “The Blockchain as a Narrative Technology: Investigating the Social Ontology and Normative Configurations of Cryptocurrencies”, pp. 103-130. 此處的「實體」和「擬實體」也是取自利科的概念，「實體」或「一階實體」指的是具體的個體，如個人；「擬實體」指的是抽象出來的高階實體，如國家、制度等等。

19. Samer Hassan and Primavera De Filippi, “Decentralized Autonomous Organization,” *Internet Policy Review*, 10:2 (April, 2021), pp. 2-10. Available online: <https://policyreview.info/pdf/policyreview-2021-2-1556.pdf> DOI: <https://doi.org/10.14763/2021.2.1556>
20. 以代幣(token)進行連結不是DAO的唯一形式，通常代幣的連結形式能對成員的主動參與起激勵作用。

由此可見，Web 3的概念不只是解構。目前社會上很多對Web 3技術的質疑，都在於這種去中心化的解構是否可能成立。不少學者擔心去中心化最後還是會導致新的權力架構出現。²¹如果從現象學角度來考察這個問題，至少可以作出兩點回應。

首先，如果上述的分析是正確的話，那麼Web 3便不只是一個普遍的技術應用。很多對Web 3的討論都基於一種前設，就是Web 3是一個可以供我們選擇的技術選項，它可以被應用，也可以不被應用。也就是說，這些分析預設了世界本來應該是中心化的，而去中心化技術是對這種中心化體制的偶然挑戰，它最終會回到一種新的中心化。如Reijers和Coeckelberg所言，當技術被配置之後，會對世界帶來一個重置(Refigure)的理解。但從現象學的角度來看，這個世界本來就不是中心化的。

上文已經說過，現象學的最基本定義是對經驗的第一身分析。從這

個「第一身」可見，現象學關注的不只是一個客觀的實在，而是客觀實在向主體顯現出來的方式。經過現象學還原，客觀的世界變成了一個被「我」經驗着的世界。但這並不表示現象學回到了一種主觀主義或者唯我論。在《純粹現象學通論》(*Ideas Pertaining to a Pure Phenomenology and to a Phenomenological Philosophy*)中，胡塞爾就論證了現象學最終研究的領域是純粹意識。這個純粹意識的領域實際上是整個向「我」的意識呈現的，作為被意指的世界。²²所以這個「我」不是經驗中有名有姓的具體的我，胡塞爾甚至說，作為現象學者的自我也要被現象學還原排除。²³只有通過這個排除，我們才能找到意識的先驗結構。因此，經過現象學還原後，我們得到的不是一個具體的自我及其內在的意識活動，而是作為被意識到的世界本身。

經過現象學還原，以物理理論和數學模型為中心建構起的實在論世界觀就被懸置(Epoche)了。懸置的意

思不是說世界不存在了，而是我們不再運用物理學給我們的世界觀來進行任何推論。因此，現象學還原本身就帶有解構理論架構的作用，其根本思路就是對以理論作為中介的世界觀的懷疑。後來胡塞爾更進一步分析純粹意識的構成方式。胡塞爾發現，純粹意識不是靜止不動的，像鏡子一樣反映着世界。意識內容前後是有關聯的，比如我當下見到一個杯子，這個印象會讓我期望下一刻這個杯子還在這個位置，或者至少還在附近。而當下一刻這個杯子還在這裏出現，我們就會把這個經驗連結為杯子的連續側顯，這就是意識的被動綜合(Passive Synthesis)。²⁴被動綜合的研究發現，純粹意識是會受到觸動的。這種受觸動的現象，讓我們能判別出世界不是我們主觀的幻想。例如，我面前的杯子不會隨我的意志而消失。反之，假如我看到一個杯子，下一秒突然消失了，我會懷疑剛才看到的是不是幻覺。

意識的被動性揭示出純粹意識不是一個封閉的領域，而是一個開放的整體。²⁵意識流不僅會受到過往的記憶、習慣的影響，更會受到他人，乃至文化習俗、觀念傳統的影響。因此，在胡塞爾後期哲學中，其中一個重要的議題就是交互主體性(Intersubjectivity)。胡塞爾認為，交互主體性是我們建構世界客觀性的重要條件。如上所述，在我的純粹意識之中，一個杯子的真實性主要靠它是否呈現為一個連續側顯(Adumbration)，並符合我的預期來判定。但滿足了這些條件，也只能說明杯子是一個實在被意識到的個體而不是幻相。真正能令我意識到它為客觀存在的條件是，其他人也看到同樣的杯子，並且從他的描述和與杯子的互動中，看出他有着和我相似的理解。因此，對現象學來說，所謂的客觀性(Objectivity)其實離不開交互主體性。所謂的客觀，是一種共同的建構。²⁶

21. Quinn DuPont, “The Politics of Cryptography: Bitcoin and the Ordering Machines”, pp. 1–10. 葉娟麗、徐琴，〈去中心化與集中化：人工智能時代的權力悖論〉，頁1-12。
22. 胡塞爾著，李幼蒸譯，《純粹現象學通論》(北京：商務印書館，1996)。
23. 胡塞爾，《純粹現象學通論》，第64節。
24. Edmund Husserl, Antony Steinbock (trans), *Analyses Concerning Passive and Active Synthesis* (Dordrecht: Springer, 2001).

25. 因此，胡塞爾修改了萊布尼茲(Gottfried Leibniz,1646-1716)的單子論。萊布尼茲認為每一個個體都是一個單子(monad)，單子是一個連續的整體，但單子之間是沒有窗戶，不能溝通的。因此單子之間的共存需要上帝保證的前定和諧(pre-established harmony)。見Lloyd Strickland, *Leibniz's Monadology: A New Translation and Guide* (Edinburgh: Edinburgh University Press, 2014)。這是一個以上帝為中心的世界觀。胡塞爾則認為，單子之間是可以互相觸動的，甚至，單子在其構成之中就先驗地包含了交互主體性(intersubjectivity)。見Edmund Husserl, Dorion Cairns (trans), *Cartesian Meditations*. (The Hague: Martinus Nijhoff, 1960) 因此，胡塞爾的哲學不需要預設一個上帝的中心化世界觀。
26. 「……我將另一些人經驗為是進行經驗的共主觀，並且在他們的共同經驗當中，我獲得作為我們的世界的客觀的世界：在這當中，我和我的原始的當前同時承擔這整個的世界經驗和這整個的世界認識，以及另一些人的存在。」見胡塞爾著，王炳文譯：《共主觀性的現象學》(北京：商務印書館。2018)，冊3，頁53。

因此，我們不應該預設Web 3只是一個中心化世界中的偶然事件，是對正常制度的衝擊；相反，一切中心化的體系都是先由一些原初的經驗和交互主體的活動來建構的。理論上，一切社會建構、理論建構都是首先以去中心的模式，在眾多的主體間通過交互主體性才能建立的。換句話說，中心化和去中心化並不是兩種對立的世界觀；相反，去中心化是一種更原初的狀態，在其中蘊涵着世界觀的再建構的可能。如果Web 3的目標不只是解構現有的中心化結構，而是像現象學一般回到更原初、更根本的生活世界，那麼去中心化就不是一個遙遠的將來，而是重新發現被中心化的結構遮蔽了的真實世界。

其次，從現象學的角度來看，如果Web 3具有重新建構世界觀的能力，那麼它更重要的功能是重新建構。運用區塊鏈技術，個體之間的交互可以在一個記錄事件前後的序列中得到重構。這種再中心化，當然會面臨一些風險，如新權力的興起，或者虛擬貨幣的幣值不穩定等等。但如果按照現象學的思路，Web 3的建

構不應該是憑空而起的虛構，而是基於原來已經被中心化體系掩蓋了的原初交互主體活動而已。因此，如果Web 3是這些原初活動(如既有的經濟活動、交易、協作)的再組織，它的再建構就有堅實的基礎。換句話說，Web 3雖然在真實使用上可能會引發一些新的風險或新的權力架構，但只要原初的、前中心化的活動仍然存在，它仍然可以成為一種再組織的力量，讓社會持續反思和檢視一個組織存在的根基。例如，當一個去中心化組織得不到成員的認同，成員可以隨時以同樣的技術框架創造一個新的組織。

因此，從現象學的角度來說，Web 3所帶來的第一身體驗，是一種涵蘊着再中心化可能的交互體驗。它不只是一個不斷寫入和讀取，不斷配置和重置的循環；相反，在Web 3的組織化過程中，人們是在去中心化的基礎上思索和期待着各種再中心化的可能。例如，比特幣的初創理念就是金融系統的透明化和公平化。各種去中心化組織(DAO)，也可以圍繞着各種理念、主義、興

趣、生活方式等等而展開。²⁷DAO參與者的第一身經驗並不在於區塊鏈的寫入和讀取活動本身，而是在於如何利用DAO連結世界各地志同道合的人去實現某種理想。這些形成去中心化自治組織背後的理念、理想，正是用戶之間共同形成的世界觀，也正是在這個意義，Web 3才有可能建構與實現新的世界觀乃至新的時代。

五、去中心化作為一種新的哲學模式

反過來說，如果Web 3的還原與建構功能得以成功，我們可以預見它可以成為一種新的哲學模式，甚至成為一種現象學式的技術。事實上，胡塞爾就曾提出過現象學的研究不是哲學家的獨白，而必須是一個發生在世界和歷史中的進程。²⁸現象學家除了要研究自己的第一身經驗，也要在交互主體性中通達他人的視域，務求達到對世界整全的理解。Web 3的去中心化自治組織正可以成為聯結哲學工作者的一個組織模式。

事實上近年來DAO的協作模式已經開始被運用在科研事業之上。很多DeSci組織可以提供從融資、評審到發表的整個科研流程的支持。²⁹近年來也有學者總結出了以代幣為連結的學術評審、編輯和發表模式。³⁰這些組織已經在某程度上實施了一種去中心化的科研模式，科研的項目有機會突破中心化的壟斷和操控，讓新的對世界的探索得以展開。在某種意義上，這些科研工作也在運用去中心化的技術建立新的世界觀。

然而，如果去中心化和現象學的基本思路是一致的，而且現象學是作為對科學根基的哲學追問，那麼去中心化應該可以超越一般的科研組織的應用，變成一種哲學性的探索模式，甚至可以成為一種現象學式的技術。根據胡塞爾的現象學理念，哲學思考最終關注的應該是生活世界(Lifeworld)。³¹生活世界是一個前理論、前科學，卻由所有人的經驗所共同構築起的世界。生活世界是一切理論和知識的基礎，因為一切知識的生產活動都發生在科學家和學者的真實生活之中。胡塞爾認為，每

27. 例如以環保為主題的EcoDAO。以華人為主體的SeeDAO也在積極推動和探索各種聯結世界各地華人的方式和社會實驗。
28. Edmund Husserl, *The Crisis of European Sciences and Transcendental Phenomenology*, p. 264.
29. 例如DeSci Community、DeSci Foundation 等。

30. Flávio Codeço Coelho and Adeilton Brandão, “Decentralising Scientific Publishing: Can the Blockchain Improve Science Communication?” *Memórias do Instituto Oswaldo Cruz*, 114 (2019), e190257.
31. Edmund Husserl, *The Crisis of European Sciences and Transcendental Phenomenology*, pp. 132-135.

個人基於不同的職業(Vocation)和文化(Culture)，會對世界產生不同的興趣和理解。³²因此，哲學或現象學作為一種思考世界的方式，雖然可以作為一種職業，但它的首要任務不是集中於世界的某個方面或某種職業化的世界觀，而是整個生活世界本身。換句話說，如果生活世界本身已經貫穿着不同職業和文化的人對世界的不同理解，那麼哲學和現象學都必須突破職業和學科的邊界，才能澄清哲學活動和生活世界之間的關係。筆者認為，Web 3用以建設去中心化自治組織(DAO)的技術特點，正有助於哲學和現象學研究活動超越職業和學科的限制，建立一種新的與生活世界的連繫。基於現象學和Web 3的共通點，筆者構想一個服務於哲學和現象學研究的去中心化自治組織可以從以下兩方面利用到技術的優勢：³³

(一) 研究議題的預測市場

亞里士多德(Aristotle, 384-322BC)說，哲學始於驚奇(Wonder)，這種驚奇揭示人的無知。用現象學的概念說，哲學乃至一切科學的追問都源自於我們對世界的關心和興趣。但如上

所說，我們對世界追問的方式往往受制於一種職業或文化的角度。因此，如果哲學和現象學活動要超越這個限制，必須要了解哲學家 and 學者以外的群體對生活世界有着甚麼樣的思考、興趣和問題。

筆者認為，這個目標可以用DAO的預測市場(Prediction Market)實現。預測市場是創作者DAO中常用的機制，以投票方式對某事進行預測。除了對某些社會事件(如選舉、股市走勢)的投機性預測外，預測市場也可以用來預測內容的受歡迎程度。成員可以就感興趣的議題進行投票、融資，如果內容最後的閱讀量達到預期，就可以獲得相應的回報。

一個哲學的去中心化組織可以運用預測市場來聆聽大眾對哲學的希望。首先，這個組織應該可以讓大眾和非哲學專業學者向哲學家提問，讓尚未被反思的問題得以進入哲學家的視野之中，也讓驚奇得以在跨界的交流中發生。其次，成員可以對重要的哲學議題進行預測，判斷哪一些議題對社會大眾和當下各學科的前沿更有意義，並針對這些問題

進行研究和發表論文。這個機制不但有助於提高哲學論文的閱讀量和與其他專業的相關性，更可以讓哲學家更容易觀測到哲學問題如何在哲學研究以外，在生活世界之中發生。

(二) 評審代幣與智能合約

除了職業化哲學的邊界外，文化邊界也決定着哲學是否能達到對生活世界充分的理解。Bryan van Norden 就曾批評世界上主流的哲學對非西方哲學的重視不足，導致文化上的偏蔽。³⁴這裏的文化，不一定專指由歷史、語言、習俗決定的文化，也可以包括任何生活方式差異導致的世界觀差異，包括不同學科所造成的差異。

從現象學詮釋學的角度來看，這些文化構成了人類理解世界時所必要的前見(Prejudice)。³⁵這些前見構成我們了解事物的視域(Horizon)。³⁶雖然沒有任何理解是絕對沒有前見，但人不總是受困在自己的前見之中；通過歷史性的詮釋活動，我們可以超出自己的前見，達到視域的融合(Fusion)。³⁷從現象學近年來在

跨文化領域的應用來看，現象學具有打破邊界，以顯示更基源問題的作用。³⁸這些跨文化的基源問題，就是跨文化視域融合的方式。因此，如果哲學和現象學活動必須超越文化的限制，則必須有一個機制讓來自不同背景、專業和文化的學者，以批判的角度互相揭示彼此理論前見的限制。這種解構式的相互批判，可以讓被前見遮蔽了的問題得以成為新的追問的起點。

現行的論文評審機制主要以同行評審為主，由於只有同行評審，學術研究容易忽視研究內容對其他背景、文化的學者的意義。像ArXiv這樣的論文預印發表平台雖然可以在論文正式發表前獲得更多學者的意見，讓研究過程更具開放性，但這種平台在哲學學界並不流行，主要原因是哲學和其他人文學科的研究通常不包含有學者私有的數據，而只是學者自己所形成的想法，因此完全公開的預印模式容易導致學者擔心觀點被抄襲。要在盲審模式下推動評審的開放性，代幣(Token)和智能合約(Smart Contract)是十分適用的技術。

32. Edmund Husserl, *The Crisis of European Sciences and Transcendental Phenomenology*, pp. 135-140. 此處的「職業」在德文和英文翻譯裏都有「呼喚」的意思。因此，職業不只是一種工作，而是某種使命。
33. 此為筆者的倡導性建議，本文無意論證Web 3與哲學連結的方式僅限於這兩個方面。
34. Bryan van Norden, *Taking Back Philosophy: A Multicultural Manifesto* (New York: Columbia University Press, 2017).

35. Hans-Georg Gadamer, Joel Weinsheimer & Donald Marshall (trans), *Truth and Method* (New York: Continuum, 1993), p. 277.
36. Hans-Georg Gadamer, *Truth and Method*, p. 302.
37. Hans-Georg Gadamer, *Truth and Method*, p. 306.
38. Sai Hang Kwok. “Phenomenology and Intercultural Questioning”. *Comparative and Continental Philosophy*, 13:2 (September, 2021), pp. 153-166.

對 19世紀法國學者 中國珠算的

——
認識與評論

吳陳
燕志
輝輝

哲學研究的DAO可以推行團體內部的半公開盲審模式，讓不同專業、文化、領域背景的哲學學者共同參與盲審。評審意見同樣在DAO的社群內公開發佈，讓成員監察其評審質量。最後，DAO可以通過智能合約(Smart Contract)記錄每一個評審的質量和貢獻，轉化成社群的代幣。這些代幣除了代表了評審的質量和評審人的貢獻，也可以用來作為權重，用來計算論文在社群內受到的評價。同時，由於有智能合約的追蹤，有誰在評審階段參閱了預審的論文都會被記錄在區塊鏈的紀錄之中，有助於防止論文在評審階段遭到剽竊。有了這套機制，哲學學者就能夠在研究的過程中汲納更多來自不同背景學者的意見，有助於超越文化和領域訓練上造成的偏蔽。

綜上所述，Web 3的去中心化技術有可能成為一個現象學的技術，幫助學者突破現有的職業特點，重新建立一種與生活世界的連繫，使得哲學思考可以再次突破領域、文化和學術的現有框架，在現象學的意義上展開一種新的對生活世界的探索。

六、總結

讓我們回到本文一開始提出的問題：如果Web 3稱得上一個時代，它

憑甚麼能成為一個時代，能成為支撐起一個新世界的方式？如果一個時代和一個世界指的是一個對生活世界作出一個整全表象的世界觀，或諸種世界觀，那麼Web 3的獨特之處在於：它不是某一個時代或者某一個世界觀之下的技術產物，而是一種有能力塑造世界觀的技術。它不只是一種讓人任意讀寫的「敘事技術」，更可能是一種「現象學技術」，它可以還原被中心化架構中介掩蓋了的原初活動，並從這些原初活動之中重新建構一個世界的組織秩序，任何人都可以圍繞一種原初的信念、理念或生活方式構想一種再中心化的可能。另一方面，現象學也可以按照Web 3的方式建立一個去中心化的自治組織，在一個真實的群體中實現交互主體的現象學還原與建構，以超越哲學職業的局部限制，重新展開一種建基於交互主體模式的對生活世界的再探索。Web 3與現象學的關係使我們看到Web 3不只是一種工具或訊息技術、敘事技術，我們也不應只以一般的技術和技術哲學的角度去考察它對社會造成的影響。去中心化的理念和現象學的精神背後，都是我們如何共同理解和建構這個世界的根本問題。

19世紀法國學者對中國珠算的認識與評論¹



吳燕 陳志輝
內蒙古師範大學
科學技術史研究院

一、引言

中國式珠算盤（以下在無中外對比的情況下簡稱「算盤」）是中國數學史、商業史上的重大發明。因其在算術計算上的便捷性，自明清以降直至20世紀末，它都有着廣泛的應用。由此，算盤也吸引了許多中外學者，從多個角度對它進行研究。明清之際，西學陸續傳入，至清康熙（1654-1722，1661-1722在位）一朝達至頂峰，特別是中法之間的物質文化交流頻繁，法國人對中國珠算已有若干介紹。1850年代以後，隨着鴉片戰爭之後中國門戶開放，來華西人漸多，他們能更為深入考察算盤的各個方面，並與歐洲本土學者多有互動。1886年的《自然》（*La Nature*）雜誌刊載了題為〈中國的書寫記數法〉（“La numération écrite chez les Chinois”）的文章，介紹中國的書寫記數法及其與中國珠算的關係。作為法國科學作家，該文作者豐維埃爾（Wilfrid de

Fonvielle, 1824-1914）在文中尤其提到傳教士童文獻（Paul Hubert Perny, 1818-1907）的研究，即童文獻的研究是豐維埃爾的知識來源之一。筆者在追溯豐維埃爾的知識來源時也找到更多其他法國學者的研究。因此，本文選取五位19世紀的法國學者作為代表，在當時歐洲漢學、數學等學術文化背景下，分析他們關於中國珠算的論著，由此理解他們對中國珠算盤研究的特色及其對中國數學文化以至中國文明的思考。

二、近代早期歐洲學者對中國珠算文獻的引介及其背景

葡萄牙人曾德昭（Álvaro de Semedo, 1585/1586—1658）早在17世紀出版的《大中國志》（*Relacao da grande monarquia da China*）中便介紹了中國的算術以及算盤的形制。²

康熙年間，法王派遣「國王數學家」來華，中法之間交往頻密。除了為中國帶來了近代早期的西方器物 and 知識外，來華耶穌會士也對中國傳統的器物 and 知識抱有濃厚的興趣，算盤和珠算即是其中的表表者。康熙年間來華的李明（Louis Le Comte, 1655-1728）在其《中國近事報道》（*Nouveaux mémoires sur l'état présent de la Chine*）介紹了中國人使用算盤的情況，但跟曾德昭的著作一樣，記載非常簡略。³ 杜赫德（Jean-Baptiste Du Halde, 1674-1742）雖未到過中國，但作為耶穌會（Jesuits）檔案室主管，他能夠查閱海外傳教的耶穌會士寄回的書信，並在此基礎上編纂了耶穌會士書簡集；也是在這些書信的基礎上，他還編撰了《中華帝國全志》（*Description de l'empire de la Chine*），該著作在介紹中國的算術時提到了算盤，並附有算盤的圖片。⁴

1697年，國王數學家之一的白晉（Joachim Bouvet, 1656-1730）從中國返回法國時，曾將《算法統

宗》帶回到法國，作為獻給路易十四（Louis XIV, 1638-1715, 1643-1715在位）的禮物之一。《算法統宗》十三卷，是明代程大位（1533-1606）所著的一部重要的中國傳統數學著作，以極為詳盡的珠算知識而聞名於世。該書傳入法國以後，利布里（Guillaume Libri, 1803-1869）和E.畢奧（Édouard Biot, 1803-1850）先後對它有所研究。⁵ 特別是E.畢奧，早在1835年3月和5月，他的父親、法國天文學家J.B.畢奧（Jean-Baptiste Biot, 1774-1862）在《博學者雜誌》（*Journal des savants*）上分兩次發表了關於數學家納皮爾（John Napier, 1550-1617）的傳記；在5月刊的納皮爾傳記之後，即附有E.畢奧撰寫的一條關於《算法統宗》的注釋（Note），對比了其中「開方求廉率作法本源圖」與「帕斯卡三角」（圖一左、中），他認為中國人在這方面的計算更為領先。⁶ 1839年，E.畢奧更進一步撰文介紹了《算法統宗》，並將其目錄和部分內容譯為法文，⁷ 該書也是最早被翻譯成歐洲文字的古代數學

1. 本文是國家社科基金一般項目「偉烈亞力中國科學史著作的整理、譯釋與研究」（20BZS155）階段成果。
2. 曾德昭在其著作中稱：「他們有完善的算術，至少四則算法是這樣，根據我在他們書中所見到的，他們也有論證和計算。他們完全不知代數，也不用普通的算術去演算。在全國及其鄰近的國家，他們用一種器具去計算，葡萄牙人稱之為Gina，中國人稱之為算盤（Suonpuon），即『計算的盤』。它是小方形，分為10部分，有一些小銅棍或條附在裏面，每根棍上串有7個大如我們念珠的小球或珠，5個在下（因為小棍分為兩部分），作為個數，2個在上，代表10。他們用這種工具，上下移動小球，很方便地計數。」見曾德昭著，何高濟譯，《大中國志》（北京：商務印書館，2012），頁78-79。

3. Louis Le Comte, “Lettre à Monseigneur de Phelipeaux, Secrétaire d’Etat. Du caractère particulier de l’esprit des chinois,” in *Nouveaux mémoires sur l’état présent de la Chine*. Tome I. (Paris, 1696), pp. 443-444.
4. J. B. Du Halde, *Description géographique, historique, chronologique, politique, et physique de l’empire de la Chine et de la Tartarie Chinoise* (Haye: H. Scheurleer, 1736), pp. 330-331.
5. 汪曉勤，〈畢甌與中國數學史〉，《自然辯證法通訊》，卷26期6（2003年12月），頁67-69。
6. Édouard Biot, “Note,” in *Journal des savants* (Paris: De l’imprimerie Royale, 1835), pp. 270-273.
7. 郭世榮，〈《算法統宗》導讀〉（武漢：湖北教育出版社，2000），頁50。

著作之一。⁸不過，E.畢奧更關注的是跟「開方求廉率作法本源圖」類似的、較複雜的算法算圖，所以並沒有對《算法統宗》的重要基礎器具——算盤多加介紹，僅僅對目錄中提到算盤之處意譯為「計算箱」(la caisse à calcul)，並在第一次出現時括注其譯音“le souan-pan”而已。⁹不過，這些譯介都是之後法國學者們討論研究珠算的重要基礎之一。(參見圖一右、下文第三節)

三、19世紀中葉以後法國學者關於中國珠算的研究概述

19世紀中葉，隨着兩次鴉片戰爭之後中國門戶開放，西人來華漸多，法國人比起其前輩同胞更能切實深入地認識中國算盤和珠算。除

了《自然》雜誌所載豐維埃爾的文章及其所引用的童文獻之外，筆者還找到另外三篇19世紀法國漢學家所撰寫的介紹或討論中國算盤的文獻，共計五篇。這裏首先以表格形式對這些文獻做出簡要梳理(表一)。

從表一可以看到，五位作者可以概括分為三類：漢學家、東方學者及數學家、科學作家。以下根據相關史料簡要梳理他們的生平。

漢學家包括童文獻和微席葉(Arnold Vissière,1858-1930)，前者是以傳教士身份進入中國並由此接觸中國文化，後者則因早年修習中文以及外交官經歷而成為漢學家。

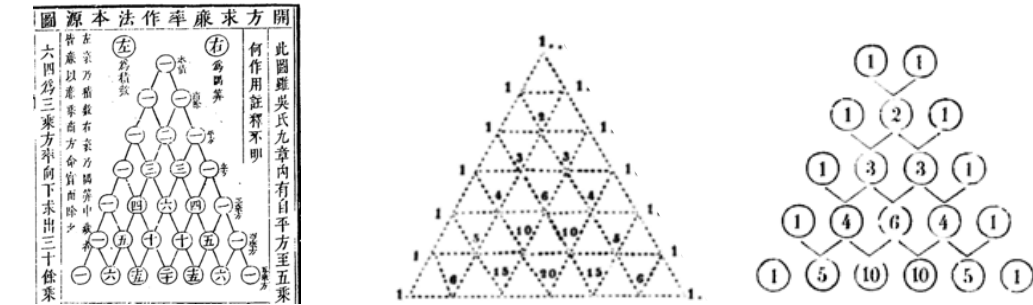
姓名	在華時間及其工作	身份	論著標題	發表時間
童文獻 (Paul Hubert Perny) 1818-1907	1847-1869 天主教巴黎外方傳教會傳教士	漢學家 (中國語言的語文學研究)	「中國算盤或計算器」 ("De l'abaque Chinois ou machine à compter. Souán pân", 《西漢同文法》中的一節)	1873
羅代 (Léon Rodet) 1832?-1895	無	東方學者、 數學家、 文獻學家	中國算盤與錢莊 ("Le Souan-pan des Chinois et la Banque des argentiers")	1880
拉克伯里 (Albert Étienne Jean-Baptiste Terrien de Lacouperie) 1844-1894	有	東方學者	古老的數字、算籌與中國算盤 ("The Old Numerals, the Counting-Rods and the Swan- Pan in China")	1883
豐維埃爾 (Wilfrid de Fonvielle) 1824-1914	無	科學作家、 氣球飛行者	書寫記數法在中國 ("La numération écrite chez les Chinois")	1886
微席葉 (Arnold Vissière) 1858-1930	1882-1899 法國駐北京公使館翻譯，上海總領事、駐中國全權公使	漢學家	中國算盤起源研究 ("Recherches sur l'origine de l'abaque Chinois et sur sa dérivation des anciennes fiches à calcul")	1892

表一 19世紀法國學者及其有關中國算盤的研究

童文獻在進入巴黎外方傳教會(La Société des Missions Etrangères)修院之後，於1847年7月5日乘船赴中國，擔任貴州代理副本堂神父；後於1862年被派到重慶(四川)；他於1868年前往上海，最後在1869年返回法國。1872年，他離開了巴黎外方傳教會。在華傳教期間，童文獻致力於博物學相關的研究，並且在1861年木刻了一本《拉漢詞彙》，之後更出版了《補編》，其中包括各

種歷史、地理等表格。他對中國語言的語文學研究涉及多個方面，與之對應的是他所出版的相關著作包括《諺語》、《對話》，以及《語法》等多種。¹⁰

微席葉1876年至1879年在國立東方語言學校(École spéciale des langues orientales)學習中文課程，係該校第六屆畢業生。他在即將接替國家圖書館的中文圖書編



圖一 (左)《算法統宗》中的「開方求廉率作法本源圖」；(中)畢奧文章中為解釋「開方求廉率作法本源圖」而作的示意圖；(右)羅代文章中引用的「開方求廉率作法本源圖」。

8. 韓琦、段異兵，〈畢奧對中國天象記錄的研究及其對西方天文學的貢獻〉，《中國科技史料》，卷28期1(1997年)，頁80-81。
9. Édouard Biot, "Table générale d'un ouvrage chinois intitulé Souan-fa-tong-tsong," *Journal Asiatique*, (mars 1839), p. 202.

10. Henri Cordier(1849-1925), "Paul Perny, 童 Tong," *Toung Pao*, Second Series, 8:1 (1907), pp. 125-127.

目工作時，被外交部暫調加入巴西駐北京使團，並於1880年1月16日開始了他的翻譯生涯，在巴西與中國商談和簽署一項條約時擔任翻譯工作。兩年後的1882年2月21日，他被派往法國駐北京公使館開始擔任翻譯，在此職位上工作近20年；1899年回到巴黎在東方語言學校教授中文，同時仍效力於法國外交部。¹¹

對於微席葉的中文水平和學識，法國漢學權威沙畹（Édouard Émile Chavannes, 1865-1918）曾在1899年7月22日的一封信中表示「他無疑是有着關於中國的口頭語言和事務語言最深入知識的法國人」。東方語言學校的行政主管布瓦耶（Paul Boyer, 1864-1949）¹²在1930年4月2日微席葉的葬禮上代表校方稱頌他說，「他的課程是簡明清晰的典範，有着數學般的準確和細緻的分析。他的話語明確、果斷、不容置疑，不含糊、不囉嗦，也不會改來改去。受到最高最嚴格的職業道德激勵，一絲不苟地履行他

的教師職責，在他給自己訂立的道德標準上始終不變，他因其品格而令人不得不對他肅然起敬；他的學識為他在中國和法國贏得了無與倫比的威望」。¹³法國漢學泰斗伯希和（Paul Pelliot, 1878-1945）則評論說，「他的角色不只是電訊的譯者，也因其對與我們非常不同的文明的熟悉以及對古老傳統的喜愛而成為部長們真正的顧問，他們更願意去了解以及探討這些不同的文明和傳統而不去傷害它。」¹⁴

東方學者則包括拉克伯里（Albert Étienne Jean-Baptiste Terrien de Lacouperie, 1844-1894）和羅代（Léon Rodet, 1832?-1895）。拉克伯里是法國東方學者，出生於諾曼底。他的父親是商人，他本人則接受了商科教育。拉克伯里早年在香港居住，在那裏，他很快便把注意力從商業轉向東方語言研究，還開始努力學習中文。隨着巴比倫（Babylon）泥板讀解方面的研究進展，他又對有關中國字與早期阿卡德（Akkadi）象形文字之間的相似性產生了濃厚興趣，其後半生的

大部分時間都花在這兩種語言的比較語文學上。1879年他來到倫敦，同年當選皇家亞洲學會（Royal Asiatic Society of Great Britain and Ireland）的會員。1884年，他成為比較語文學教授，在倫敦大學學院（University College, London）從事東南亞語言研究。他晚年專注於《易經》研究，並於1892年出版了專著《中國最古老的書》（*The Oldest Book of the Chinese*）的第一部分，他在此書中陳述了他的「易經」性質理論，並翻譯了其中一些段落，惜書未成而人先逝，成為了他的未竟之業。為肯定他在東方學研究上的成績，比利時魯汶大學（University of Louvain）向他頒發文學博士學位；有一段時間，他更曾享受一小筆來自法國政府的退休金，並因其東方語文學的優秀研究而兩次獲得儒蓮獎（Prix Stanislas Julien）。¹⁵

在拉克伯里有關中國的研究中，最著名的就是他的中國人種和文明起源於巴比倫說。該學說於晚清傳入

中國以後也經歷了從被認同到被拒斥的過程。拉克伯里的「中國文明西來說」並不為主流漢學界所接受，但也確得到一些研究者的支持。¹⁶

至於在羅代方面，目前能找到的文獻很少。他既是數學家，亦是文獻學家和東方學者，承法國科學史家林力娜（Karine Chemla）教授惠告，羅代專精於科學史和梵文文獻的研究。¹⁷他曾研究過代數學之父花拉子密（Muḥammad ibn Mūsā al-Khwārizmī, 約8世紀末-約9世紀中）及其與古代印度和希臘數學之間的關聯。¹⁸另外，因微席葉向他介紹了畢奧關於《算法統宗》的文章，他又對後者感興趣，並且指出畢奧在複製「開方求廉率作法本源圖」時刪去了包圍在係數周圍的圓框以及表示這些係數關係的線段是不對的。¹⁹由此可見，羅代對東方學的興趣，主要是古代東方世界諸文明的數學及其比較研究。

與其他幾位作者不同，豐維埃爾既非

11. E. Gaspardone, "Arnold Vissière," *Bulletin de l'École française d'Extrême-Orient*, 30:3/4 (1930), p. 649.
12. 1908年至1936年任該校行政主管。
13. E. Gaspardone, "Arnold Vissière," p. 650.
14. Paul Pelliot, "Arnold Vissière," *T'oung Pao*, Second Series, 27:4/5 (1930), p. 407.

15. Edward Irving Carlyle, "Terrien de la Couperie, Albert Etienne Jean Baptiste (d. 1894)," in Sidney Lee (ed.), *Dictionary of National Biography*. Vol. LVI. (New York: The Macmillan Company, 1898), pp. 79-80.
16. 相關研究可見李帆，〈人種與文明：拉克伯里（Terrien de Lacouperie）學說傳入中國後的若干問題〉，《西南民族大學學報（人文社會科版）》，期2（2008年2月），頁31-35；孫江，〈拉克伯里「中國文明西來說」在東亞的傳佈與文本之比較〉，《歷史研究》，期1（2010年1月），頁116-137、191等。
17. 2020年5月31日Karine Chemla致兩位筆者的電子郵件。
18. Léon Rodet, "L'algèbre d'Al-Khārizmī et les méthodes indienne et grecque," *Journal Asiatique*, Septième série, Tome XI (1878), pp. 6-98.
19. Léon Rodet, "Le Souan-pan des Chinois et la Banque des argentiers," in *Bulletin de la Société Mathématique de France*, 8(1879-1880), p. 163.

漢學家，也非東方學者。他是法國科學作家、氣球飛行者，曾為很多科普雜誌撰文。他所撰寫的〈書寫計算法在中國〉是一篇介紹性的文章，發表在當時法國的科普雜誌《自然》上。

從以上的生平整理，可見五位作者來自不同的文化和知識背景，與中國文化的距離也各有遠近。就與中國文化的距離來看，童文獻和微席葉由於有多年在華工作經歷，因此對語言的熟悉程度和對中國文化的接觸方面都遠比另外三位作者更為深入。

五篇關於中國算盤的文章中，童文獻在其《西漢同文法》中對算盤的相關介紹是較早的作品。《西漢同文法》是童文獻編撰的一部語法工具書，由於其性質為中文學習入門書，加上篇幅所限，書中對中國算盤只有概括的介紹，其中包括算盤結構、數字表示法等。除了認為中國算盤計算加法比歐洲快20倍，中國算盤使用已推廣到俄羅斯、波蘭等地的結論外，該著作並無評價算盤算法和操作方法。正如作者所說，他在此篇中的「目標只是提供一個一般性的概念」，同時他也建議「住在中國的歐洲人學習使用這種計算器，或者是研讀提到的中國作品，或者是向熟手的中國人請教算盤的使用」。²⁰



圖二 童文獻著作《西漢同文法》(1873年)的扉頁

羅代、微席葉、拉克伯里的三篇文章為學術論文，其中羅代基於微席葉所提供的部分譯本討論了算盤的算法，並將之與歐洲數學作了比較；微席葉精通漢語，翻閱了大量中國古籍，引經據典，追溯中國算盤的起源，認為算盤可能是14世紀下半葉的產物；拉克伯里從語言學和古文字學、錢幣數字證據、數學和歷史證據等幾個方面對算盤在中國存在的痕跡進行了爬梳，得出結論認為算盤並非起源於中國，而是在比較晚近的時期(12世紀)被引入到中國的。

中國科學史權威李約瑟(Joseph Needham, 1900-1995)在其《中國科學技術史》(*Science and Civilisation in China*)中也曾提到微席葉和拉克伯里的工作，認為他們的研究「也許是西文文獻中(有關珠算盤研究)最有價值的貢獻」。他特別提到微席葉「將大約1700年時梅文鼎的著作《古算器考》部分譯成了西文」，「在梅氏寫作此書時，有一些最重要的中國數學著作尚未被重新發現，但微席葉對其論述作了必要的補充」。²¹

豐維埃爾的文章更偏向普及性，主要是向讀者介紹中國算盤，但除了引用前人研究成果外，也加入了自己的一些意見。

通過上文對幾位作者著述的分析，可以看到三個特點：一、對中國算盤的興趣是對中國文化或中國數學的興趣的組成部分。以童文獻的《西漢同文法》為例，它是一部中文及其語法的工具書，內容包括中文的語調、詞彙、數量詞、中國的姓氏、習慣用語等內

容。關於中國算盤的介紹就是其中有關數量詞一章的組成部分。

二、幾位作者相互之間有聯繫或互相影響。例如童文獻的《西漢同文法》中對中國珠算的介紹雖然只是概述，但他的工作受到其後作者的關注：微席葉在其有關中國珠算起源的文章中即提到「我們在童文獻的《西漢同文法》中找到這些數字的表格，但沒有交代其起源」；²²豐維埃爾的文章中則引用了《西漢同文法》中的中國乘法表。又如從羅代的文章也可以看到，他與微席葉在對中國數學的興趣上相互影響：羅代知道微席葉有中文基礎，因此曾建議微席葉研究中國數學，而後者亦欣然接受其提議。羅代在文章中主要分析的《算法統宗》，則來自微席葉的建議，其中的相關部分也是由微席葉翻譯的。²³

三、文章對中國珠算的研究興趣基本覆蓋了與之相關的幾個方面，包括中國珠算的起源、中國算盤的結構與基本算法，以及與歐洲珠算的比較。

20. Paul Perny, *Grammaire de la Langue Chinoise Orale et Ecrite* (《西漢同文法》) (Paris: Maisonneuve & Cie, 1873), p. 111.
21. Joseph Needham, Wang Ling(1918-1994), *Science and Civilisation in China. Volume 3. Mathematics and the Sciences of the Heavens and the Earth* (Cambridge: Cambridge University Press, 1959), pp. 69-70.
22. Arnold Vissière, "Recherches sur l'origine de l'abaque Chinois et sur sa dérivation des anciennes fiches à calcul," *Bulletin de Géographie Historique et Descriptive*, No. 1(1892), p. 77.
23. Rodet, "Le Souan-pan des Chinois et la Banque des argentiers," p. 158.

上述幾位研究者在介紹算盤的結構、運算方法以及起源等問題的基礎上，總結了中國算盤上的運算特點，並與歐洲算盤的不同進行了比較，從中可以梳理出這樣幾個線索：一是對珠算與書寫記數法之關係的討論，以及由此延伸到對中國與歐洲所採用的兩種不同記數系統的比較；二是由算盤計算中所體現的計算思路可知，在解決乘方、開方等問題時，中國數學採用的是幾何學方法，其思路與當時西方已普遍採用的代數方法明顯不同；三是不保留運算過程，因此無法進行驗算，這與歐洲當時的筆算不同。下文將以這些文章中對中國珠算算法以及與歐洲珠算的比較研究為主要研究對象，考察作者們不同的認識，以及這些認識所依託的數學文化背景。

四、對書寫記數與珠算之關係的討論

關於中國書寫記數法與珠算之關係的討論是西人有關中國珠算的研究中所關注的問題之一，而由此更延伸出對不同記數系統之差異的討論。

豐維埃爾對中國珠算的介紹正是由對中國書寫記數法的介紹與評論所引出的：

自遠古以來，中國人就有了口頭十進制記數法，並將之用到了他們的度量衡系統。但是做出如此驚人發現的天才之人並未想到發明一種實現我們的零的功能的專用數字。儘管他們與印度有着親密的關係，並且還對之極為看重，但他們並未採納這一重要的記數符號，而後者是全部書寫記數法的基礎。

他們的漠不關心是可以理解的，是他們擁有一個特殊的符號用以表示某一個量、一個質甚至是某一個單位的空缺。但是這個符號並不是數字序列的一部分，而是一個僅以書面語言表示的名詞。

在過去的幾個世紀中，傳教士曾試圖將之引入算術中，並且將之與代表不同單位的符號組合起來，一言以蔽之，引進阿拉伯數字，從而取代那套數字；但帝國如此強大，這一嘗試從未成功過，時至今日中國人還在使用一套像古代羅馬一樣如此不規範的記數法。沒有零就使他們不得不採用一個特殊的字來表示十，另一個字表示百，再有一個字表示千，等等。但是，使得他們不接受這個名詞的固執變得更難以理

解是，他們會在千的符號上加上十以及百，以表示萬或十萬等。…

零的缺席對於我們的十進制算術三角學方法的推廣是一個相當大的障礙。²⁴

在豐維埃爾看來，中國的書寫記數法是迥異於印度-阿拉伯數字的另一套記數系統，表示零的記數符號無法納入這一系統，這些缺陷使得記數和計算都更為複雜，也阻礙了印度-阿拉伯數字的引入。珠算盤的使用則消除了這種記數與計算的複雜性：

數的書寫的複雜性使中國人想出了一個名叫算盤（souampan）的小設備，我們可以在所有的生意人手上都找到它，不管它有多麼精妙，這個獨特的東西都必定要被看作是他們的算術很低等的一個標誌，但我們也必須承認，他們對算盤的使用驚人的靈巧。²⁵

在豐維埃爾看來，中國的書寫記數法是一種用文字表達的方式，因此

無法像印度-阿拉伯數字一樣進行筆算，儘管中國因此而發明了算盤用於進行實際運算，但算盤本身也以另一種方式表明中國的算術並不發達。在對算盤的運算方式進行簡要介紹之後，豐維埃爾在文章的最後更評論說：「這群人是如此缺少一般性的概念，以至於都沒想到要將已經存在，也就是說他們實際上已經在算盤上實現的記數系統轉化到紙上。」²⁶

豐維埃爾上述所說到的區別其實是兩種記數系統——乘法累數制 (multiplicative grouping systems) 和位值制 (place value systems) ——的差異。中國自古便使用10進的乘法累數制，也就是說使用13個文字符號（即一二三四五六七八九十百千萬）即可表示較大的數字，而對於萬以上的數，後來又增加了一些新的字符以表示更大單位。²⁷與之不同，印度-阿拉伯數字屬位值制記數法，對任意數均可表示為 $a_n \times 10^n + a_{n-1} \times 10^{n-1} + \cdots + a_1 \times 10 + a_0$ ，位值制記數法在書寫時可以省略10的乘幂和加號，只需將0-9這十個數字寫在相應的

24. W. de Fonvielle, "La numération écrite chez les Chinois," *La Nature*, No. 660 (23 Jan, 1886), p. 124.

25. Fonvielle, "La numération écrite chez les Chinois," p. 124.

26. Fonvielle, "La numération écrite chez les Chinois," p. 124.

27. 梁宗巨,《世界數學通史(上)》(瀋陽:遼寧教育出版社,2001),頁66-70。

位數，一個數碼所表示的具體數值視其所在的位置而知。因此，使用位值制表示數字，就必須要有表示0的符號。豐維埃爾的評論也正基於此。

與豐維埃爾的觀點不同，拉克伯里、羅代等研究者則認為位值制在較早時已經在中國存在了，或者更確切地說，上述所提到的乘法累數制和位值制兩套系統在古代中國是並存的。

拉克伯里從語言學和古文字學、錢幣數字證據、數學和歷史證據等多個角度討論了算盤在中國存在的情況。他特別強調「從錢幣中得出的證據比其他任何證據都更為重要，因為錢幣是歷史上最可靠的見證」，「它們是未經造假而從上述所說時期的錢幣上複製下來的」，「並無經註釋者或抄寫者之手而被修改、添加或改進的可能性」。因此他對錢幣上的數字表示法進行了考證，認為這些數字的寫法「看來與算籌有關」（見圖三）。

拉克伯里特別以具有兩位數的數字為例，指出在算籌記數中已經存在位值知識以及趨近於使用零號的意味，並認為這一點奇怪得令人意外：

因為這在西方被證明伴隨着巨大的困難，而在這裏是自然而然的結果，僅僅是為了一直所尋求的簡潔而忽略了對值的正式命名，從而實現了一個尋常且更古老的完整的數字書寫體系的自我改善。我們可以清楚看到這個過程是怎樣發展的；比如在 𠄎₅₅ 中，10 仍然還被寫出來，雖然被簡化為一筆，以取代像在 𠄎₁₄ 中那樣的 𠄎。……另一個例子是 𠄎 和 𠄎，在這裏圓圈（○？）或三角形，也就是 𠄎 的簡略形式，無疑顯示了這一轉變過程。最後這幾個例子來自公元前4世紀，前一個例子來自公元前3世紀。很顯然，位值知識在那個稍晚的時期已經存在。²⁸

當然，這種寫法與中國傳統文獻一樣是垂直書寫，而不是像算籌和印度-阿拉伯數碼一樣橫寫，因此拉克伯里的論斷尚有討論的空間，但這也是他對相關材料和中國人使用位值制問題的拓展和深入。拉克伯里在他的論文中同時引述英國漢學家、傳教士偉烈亞力（Alexander Wylie, 1815-1887）關於中國人已經使用位值制的觀點：

1	一, 1	11	士	21	𠄎, 𠄎	31	𠄎	41	𠄎	51	
2	二, 2	12	𠄎	22	𠄎	32	𠄎	42	𠄎	52	𠄎, 𠄎, 𠄎, 𠄎
3	三, 3	13	𠄎	23	𠄎	33	𠄎	43	𠄎	53	𠄎, 𠄎
4	𠄎, 𠄎, 𠄎, 𠄎, 𠄎	14	𠄎, 𠄎, 𠄎	24	𠄎	34	𠄎	44	𠄎	54	
5	𠄎, 𠄎, 𠄎, 𠄎	15	𠄎, 𠄎, 𠄎	25	𠄎, 𠄎, 𠄎	35	𠄎, 𠄎	45	𠄎, 𠄎	55	𠄎
6	𠄎, 𠄎, 𠄎, 𠄎, 𠄎, 𠄎	16	𠄎	26	𠄎, 𠄎	36	𠄎	46		56	
7	𠄎, 𠄎, 𠄎, 𠄎, 𠄎, 𠄎	17		27	𠄎, 𠄎, 𠄎	37	𠄎	47	𠄎	57	𠄎
8	𠄎, 𠄎, 𠄎, 𠄎, 𠄎	18	𠄎	28	𠄎	38	𠄎	48	𠄎, 𠄎	58	
9	𠄎, 𠄎, 𠄎	19	𠄎	29	𠄎	39	𠄎	49	𠄎	59	
10	𠄎, 1, 𠄎, 𠄎, 𠄎	20	𠄎, 𠄎, 𠄎, 𠄎, 𠄎	30	𠄎, 𠄎, 𠄎	40	𠄎, 𠄎	50	𠄎, 𠄎	60	𠄎, 𠄎
										65	𠄎

圖三 拉克伯里論文中所附的「公元前4世紀至公元前3世紀中國錢幣上的數字」(Numerals from the Chinese Coins of the Fourth and Third Cent. B.C.)

應注意且最重要的是，中國人至少在六個世紀前已知道位值自右向左增大（正如在算盤上一樣）。一位偉大的學者（即偉烈亞力）在其有關中國算術的極為重要的論文中說：「值得注意的是，儘管歐洲最受尊敬的專家曾斷言中國人對位值的意義一無所知，但我們在這裏的發現正好相反，他們將這個原理推到了西方尚無經驗的精細程度。」²⁹

偉烈亞力的英文論文〈中國科學略記·算術〉（“Jottings on the Science of the Chinese Arithmetic”）曾詳細介紹過中國傳統的算籌記數法，並認為中國人在位值制知識的基礎上，比同時期的歐洲人推廣得更加深入，³⁰羅代亦由此認識到上述數字的古代寫法或與算籌有關。羅代的研究還注意到珠算與筆算的差異之一，即在珠算中減法從高位算起，並認為這相對於筆算的從低位算起更具有優勢：

28. A. Terrien de La Couperie, “The Old Numerals, the Counting-Rods and the Swan-Pan in China,” *The Numismatic Chronicle and Journal of the Numismatic Society*, Third Series, Vol. 3 (1883), p. 314.
29. A. Terrien de La Couperie, “The Old Numerals, the Counting-Rods and the Swan-Pan in China,” p. 321.
30. 拉克伯里引述的偉烈亞力的說法出自後者所作〈中國科學略記·算術〉（“Jottings on the Science of the Chinese. Arithmetic,” 1852年首次連載於*The North-China Herald*（《北華捷報》））一文，參見Alexander Wylie, “Jottings on the Science of the Chinese. Arithmetic,” in *Chinese Researches*, 1897, pp. 159-194.

在珠算盤以及所有相似的算具上運算減法，從高位算起可以更為簡單且更為自然地完成，正如我們將會從下例中所看到的，它呈現的是減法 $2025 - 1296 = 729$ 的連續過程。

實話實說，這種計算方法更為合理：一旦確定了高位的餘數，那就可以自由安排一個或幾個餘下位數，以滿足低位的要求。這也就是為甚麼古代作者阿本-埃茲拉 (Aben-Ezra，羅得島，12世紀)³¹……規定從左開始進行減法運算。但當我們用筆進行運算，由於這個運算方式要求劃掉已經寫上的數而以更小的數取代之，人們更願意從低位數開始運算，這可以立即寫出餘數。³²

由此可知，通過對書寫記數法以及珠算的考察，偉烈亞力、拉克伯里、羅代等人已經注意到古代中國兩種記數制度的並存，即作為書寫方式的乘法累積制以及在涉及實際應用（尤其是計算時）所使用的位值制記數法，在前者的體系中，位值以及作為位值制重要體現的零都無法納

入其中；在後者的體系中，位值知識以及零的概念則隱現其中。

除了偉烈亞力數學論文的啟發，法國學者對中國傳統的記數法和算術表現出濃厚興趣，也很可能與拉格朗日 (Joseph-Louis Lagrange, 1736-1813) 等人先前的數學課程改革有關。有學者發現，拉格朗日在法國大革命時期參與了測量單位改革，並將公制單位建立在十進位值制的基礎上，這促使他將目光投向算術這門最基礎的數學分支。緊接着，拉格朗日在共和曆三年師範學校 (École normale de l'an III) (被認為是後來巴黎高等師範學校 (École normale supérieure) 的前身) 和巴黎綜合理工學校 (École Polytechnique) 將算術作為其數學課程的開始，他的觀點革新並發展了這門分支：他將算術視為計算的科學並強調算術的基礎地位。拉格朗日引入古希臘算術著作用於教學，注意與古代不同記數符號和計數文化的比較，由此他突顯和強調了十進位值制為當代算術的核心特徵。³³

豐維埃爾的觀察所形成的觀點與上述漢學和數學研究者不同。該文注意到中國所採用的乘法制書寫記數法在實際運算 (筆算) 中並不便利，而將中國珠算產生的動因歸結於此，並以珠算作為中國算術不發達的佐證。在豐維埃爾的觀察中，有兩點值得注意：一是豐維埃爾本人並未到訪過中國，從他的文本可以看出，他有關中國的書寫記數法的知識主要來自漢學家童文獻。童文獻的《西漢同文法》對中國數的介紹出現在該書第四章，其中介紹了中國的數字書寫方式以及在書面及口語中的表達方式，而在介紹算盤時首先提到「為了進行各種計算，中國人會使用算盤而非筆算」，但童文獻書中對中國算盤的介紹只是概述，包括算盤結構、數字表示法等，而對於具體的運算方法與過程並未有介紹，除了認為中國算盤計算加法比歐洲快之外，也沒有其他更多的評論。因此豐維埃爾很可能是基於其本身的科學背景，並通過包括童文獻著作在內的西人文獻，而對中國算盤及數學有所了解後所作出的推論。二是豐維埃爾的評論中其實隱含着一種預設，即認為筆算是算術

的最優方式，並以此為標準對其他不同方式的算術作出評價。數學家羅代則更關注兩種算術所依託的算法，而非在二者之間比出高下，也因此得以探究兩者在算法上的差異。

五、從珠算看中西算法之差異：代數與幾何之別

偉烈亞力的數學論文並沒有提及《算法統宗》，不過後來評價其「記錄了《九章算術》公式的一般細節，但幾乎沒有原創，作品風格極為粗糙繁瑣」。³⁴數學家羅代似對於是否原創不甚在意，而是意圖通過《算法統宗》考察中國傳統算法與西方的差異。他以《算法統宗》中關於勾股弦的計算為例，介紹了用珠算盤進行計算的方法，其所依據的文本是由微席葉翻譯的。《算法統宗》中的原文如下：

今有勾二十七尺，股三十六尺，問弦斜若干。

答曰：弦斜四十五尺。

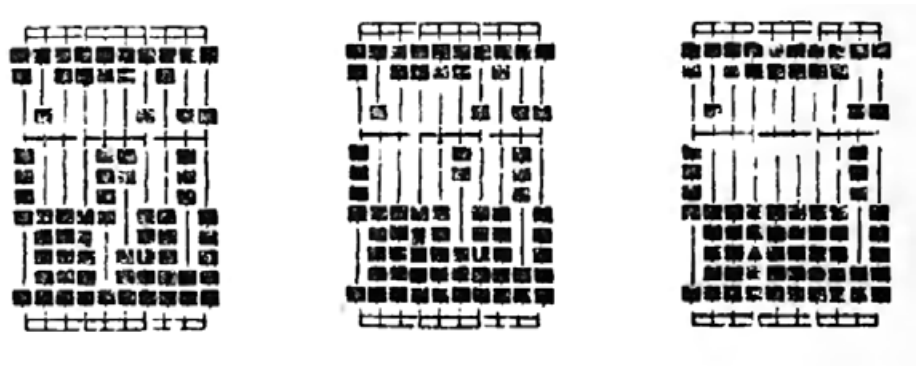
法曰：置勾二十七尺，自乘得七

31. 阿本-埃茲拉 (1092-1167)，12世紀天文學家、數學家。
32. Rodet, “Le Souan-pan des Chinois et la Banque des argentiers”, pp. 164-165.
33. Xiaofei Wang, “How Jean-Baptiste Delambre Read Ancient Greek Arithmetic on the Basis of the Arithmetic of ‘Complex Numbers’ at the Turn of the 19th Century,” *Historia Mathematica*, 59 (2022), pp. 147-151.
34. Alexander Wylie, *Notes on Chinese Literature* (Shanghai: American Presbyterian Mission Press; London: Trübner & Co., 1867), p. 95.

百二十九尺。另以股三十六尺，自乘得一千二百九十六尺。二數併之，得二千令二十五尺（按：「令」即「零」之簡寫，下同）。為實（乃合弦自乘數），以開平方法除之，初商四十於左，亦置四十於右，為方法，左四對右四，呼四四除實一千六百尺，餘實四百二十五尺，却以下位初商方法四十，倍作八十為廉法。次商五尺於左位初商四十之次，亦置五於右位廉法八十之次為隅法。左五對右八，呼五八除實四百，又左五對右五，呼五五除實二十五尺，恰盡得弦斜四十五尺。³⁵

此為《算法統宗》卷十二「勾股第九章」中的一例，已知勾股值，求弦。以代數方式表示即為

$$x=\sqrt{(27^2+36^2)}=\sqrt{2025}$$



圖四 羅代解釋在算盤中進行開平方 $\sqrt{2025}$ 計算所使用的示意圖

該例計算先後涉及乘方、加法和開方，全部計算完全在珠算盤上進行。羅代以相應的圖形逐步呈現這段文本所講述的運算過程。在開始解說這段文本之前，羅代作出說明，稱他所配的圖形僅會顯示那些有效欄，即運算時會用到的欄位，從而指出「數字的位置，也就是說如果願意，你在這個器具上選定作為單位的欄是任意的；甚至我們將會在開平方的例子中看到，我們可以同時在同一個算盤上記下好幾個數字。」³⁶

在這個實例中，涉及開平方的步驟為 $\sqrt{2025}$ 的計算。羅代結合文本，以連續三個示意圖（圖四）作出了說明。

這是增乘開方法在算盤上的操作。由圖可見，這一計算分為如下幾步：1) 首先估出平方根的十位數，得到初商40，分別置於算盤上左右兩側，此40即為「方法」， $40 \times 40 = 1600$ ，然後算出 $2025 - 1600 = 425$ ，即圖四左，中間所顯示的三位數字；2) 將方法乘以2，即 $40 \times 2 = 80$ ，此80為「廉法」（如圖四左，右側兩位數的十位）；3) 根據425再對平方根的個位數進行預估得到次商5，並將其分別加於算盤左邊初商40之後以及右邊廉法80之後的個位，此5為「隅法」（如圖四左，左右側兩個兩位數的個位）；4) 分別以左側隅法5乘以右側85中的80得400，用中間的數425減得25（如圖四中間圖像的兩位數）；最後用左側隅法5乘以右側85中的5得25，恰好能減盡前述步驟中的25（如圖四右，中間清空的檔位），則左側兩位數45即為2025的平方根。

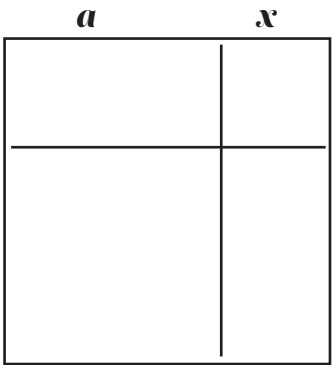
羅代用這個例子直接地說明了在算盤上進行運算時數位並不固定，而且實際運算時還可以在同一個算盤上並列放置多個數字。這一運算過程本身並不複雜。但這段表述中涉及一些中國傳統數學術語，即「方法」、

「廉法」、「隅法」，羅代在對它們作出解釋時指出了其中所體現的中國數學與當時西方數學的明顯不同：

它們來自中國人，像阿拉伯人（見我的〈花拉子密代數學〉）、希臘人以及大概所有的古代數學家一樣，從開平方規則中推出的用語，並非像我們現在的以及至少自阿耶波多（Aryabhata）以來的印度人那樣由代數公式

$$(a+x)^2=a^2+2ax+x^2$$

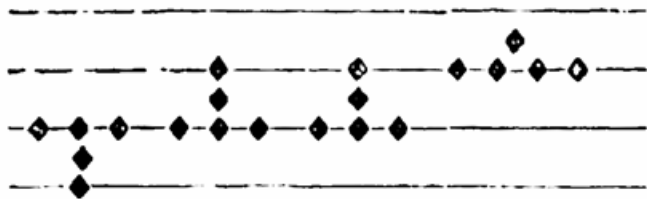
得出，而是由幾何圖形得到的。



該圖形由一個方法（等於 a^2 ）、兩個廉法（等於 $2ax$ ）以及一個隅法（等於 x^2 ）組成。³⁷

35. [明] 程大位，《算法統宗》，卷12，收入郭書春主編：《中國科學技術典籍通彙·數學卷》（鄭州：河南教育出版社，1993），第二冊，頁1366。
36. Rodet, “Le Souan-pan des Chinois et la Banque des argentiers,” p. 159.
37. Rodet, “Le Souan-pan des Chinois et la Banque des argentiers,” pp. 162-163.

在這個例子中，羅代顯然注意到中國珠算中的開平方算法是把被開方數分為十位數和個位數兩個部分，並藉由完全平方公式求出這兩個數字而得到答案。不過他利用「方」、「廉」、「隅」等術語，認為這一算法並非如古印度、歐洲一樣源於代數中的完全平方公式，而是源自於與之等價的、基於正方形面積割補的幾何算法。根據中國傳統數學和語源的解釋，「方」即正方形，「廉」通「棱」為直邊，「隅」本義角落，特指為角落上的小正方形，確有幾何含義，因而羅代的解釋是正確的，但這已經超出了《算法統宗》只對算法操作具體描述的範疇，顯示出其作為數學家對該算法的敏銳而深刻的洞見。



圖五 羅代在解釋歐洲算盤(即記數板)在運用時會留下每一步計算結果時給出的示意圖。從左至右的四個數字分別為36、180、180、900。

圖片來源：Léon Rodet, “Le Souan-pan des Chinois et la Banque des argentiers,” *Bulletin de la Société Mathématique de France*. 1880, 8(1879-1880), p. 166.

六、不保留中間步驟：從數學延伸至文化

羅代在對中國算盤的算法作出介紹之後，也將之與歐洲算盤進行比較，認為中國算盤在計算時消除了中間的運算步驟，並不利於驗算以及錯誤的識別：

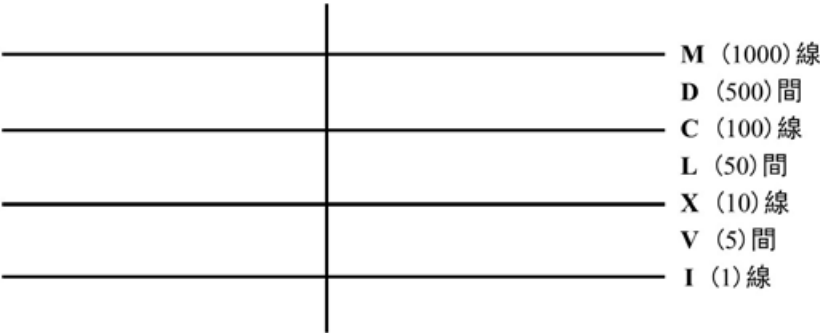
在中國算盤上，由於每個欄上的算珠數目有限，人們就不得不總是要立刻減掉部分的乘積，這就會消除掉所有中間計算的痕迹，而只留下最後的結果，而在歐洲的算盤上則可能有像這樣的計算痕跡：

因為在所有算珠都放在每條線和線間空白後才計算，最終結果也還可以寫在桌上的部分結果一側，我們不需要在最後結果的準確性得到驗算之前刪掉；如果驗算表明算錯了，我們可以重新每一步運算，了解哪一步存在錯誤，並因此來加以糾正。由此可知，算盤只能減輕一個已經熟練的計算者的記憶負擔，而歐洲算盤可能是一種儀器，用於個人研究與演示。³⁸

羅代在這裏提到的歐洲算盤其實是指以羅馬數字記數法為基準的記數板(Counting Boards)，其知識來源是德國數學家Josef Peter Treutlein(1845-1912)於1877年發表的〈16世紀的計算〉(“Das

Rechnen im 16. Jahrhundert”)一文。³⁹而羅代所討論是否保留計算痕跡的問題，包含有中國算盤與歐洲算盤(即「記數板」)在形制、操作程序和功用三個層面上的不同。

記數板的主要組成部分是一個桌子(或任何可以劃線的載體)，其上劃有水平線，水平線由下至上分別代表個位、十位、百位……依次類推；線間空白為其下方水平線位數的五倍，例如第一線與第二線的線間空白代表5，第二線與第三線的線間空白代表50……依次類推。將算珠(Counter)置於相應的線上或線間即可代表相應的數字。當進行運算的時候，人們會將算珠擺放在適當的位置，以分別表示要參與運算的數字，然後逐一進行運算操作，⁴⁰而



圖六 歐洲算盤(記數板)的構成，最下線代表羅馬數字I(1)，其上一線代表X(10)，它們之間的空代表V(5)，餘類推，直至最上線代表M(1000)。

圖片來源：Jack Oliver, “Calculations in Medieval Europe,” *Mathematics in School*, Vol. 26, No. 3 (1997), pp. 12.

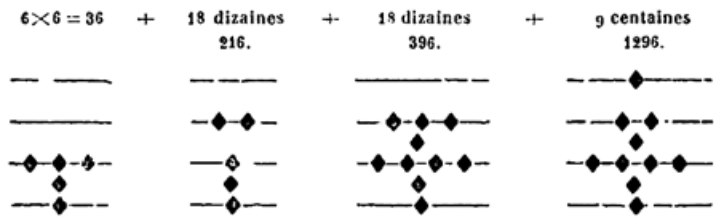
38. Rodet, “Le Souan-pan des Chinois et la Banque des argentiers,” pp. 166-167.
39. P. Treutlein, “Das Rechnen im 16. Jahrhundert,” *Abhandlungen zur Geschichte der Mathematik*. (Leipzig: Verlag von B. G. Teubner, 1877), pp. 1-100.
40. Jack Oliver, “Calculations in Medieval Europe.” *Mathematics in School*, 26:3 (1997), pp. 12-14

中式算盤則必須在有限的檔位和算珠內進行，每次操作都在原有結果上做疊加並直接得出新的結果。

以下以羅代在該文中給出的計算實例（計算36的平方）為例，來說明其所認為的保留中間步驟為何。第一步計算 $6 \times 6 = 36$ ；第二步計算 $30 \times 6 = 180$ ；第三步計算 $30 \times 6 = 180$ ；第四步計算 $30 \times 30 = 900$ 。上述計算的每一步結果都在算盤上留下相應的顯示（見圖五）。最後一步將上述四個結果相加，每一步也都在算盤上留下相應的計算結果（見圖七），從左至右分別顯示的是 $6 \times 6 = 36$ ； $36 + 180 = 216$ ； $216 + 180 = 396$ ； $396 + 900 = 1296$ 。顯示的是 $396 + 900 = 1296$ 。由於每一步都會在算盤上保留痕迹，因此在需要時可以對每一步進行驗算。

由此可見，羅代所謂的歐洲算盤保留中間步驟，實際上是利用桌子（或任何可以劃線的載體）的可用空間，留下中間步驟的算珠。而從理論上而言，中式算盤也可以通過增加檔位或多個算盤來實現這一功能，這也有一些實物可資證明。不過中式算盤的最重要特點之一是快速運算，在原有結果上連續操作而不留中間步驟確實符合大多數情況，這也正是中式算盤實際功用的體現。

羅代的觀點在西人中並非孤例。20世紀初在滬英文報紙《每周評論》(Weekly Review)中曾發表一篇題為〈在中國是否有一種算盤思維〉(“Is There an Abacus Mind in China?”)的文章更認為，對算盤的使用，尤其是這種不保留中間過程的計算方式可能塑造了一種「算盤思維」，即認為：



圖七 羅代在解釋歐洲算盤(即記數板)在運用時會留下每一步計算結果時給出的示意圖。從左至右的四個數字分別為36、216、396、1296。

圖片來源：Léon Rodet, “Le Souan-pan des Chinois et la Banque des argentiers,” *Bulletin de la Société Mathématique de France*. 1880, 8(1879-1880), p. 166.

中國學童學習使用算盤計算，其過程僅只呈現其計算結果，而無達到結果的步驟，假如他算錯了，他不可能追溯其步驟以查看錯誤是在何處出現的；他必須再次運算這個題目——包括手動清盤和計算過程都要重來。學童所用的方法也被延伸到成年人的事業中。現代西方用紙筆計算的方法一步步顯示出達到結果的過程以及錯誤——假如存在錯誤的話——從何處開始發生。而且手指拂過也不會破壞證據：擦除需要細心和時間，並且通常會留下並不好看的印記。其結果是西方人在其年幼時學會了小心翼翼以避免出錯、探求錯誤的位置以及原因的價值，並且了解錯誤所帶來的結果並不能通過搖晃算盤重新開始來得到糾正。⁴¹

隨後作者即對當時北洋政府班底的更迭做出評論，認為錯誤一次次重犯的原因也可能與這種算盤運算中所體現出的特點相仿，即「明顯缺乏想要找出錯誤或薄弱的原因並從過去的錯誤中獲利的能力」。至此，有關中國珠算的分析與思考已延伸到

珠算之外，進入對中國政治文化的批評。雖然並未直接表述，但上述評論中其實隱含着一種意味，即計算活動及其方法是某種文化的體現。

七、結論

一般認為，法國漢學以國王數學家來華為開端，在他們的影響下，法國本土的漢學研究者也逐漸形成，⁴²本文提到的李明、杜赫德是其中代表。1814年法蘭西學院首創漢學講座，中國文化得到了更多的關注，在研究方法上呈現出強調跨國和跨文化比較研究的特點，⁴³畢奧對《算法統宗》的翻譯與比較研究，以及後續各人對算盤和珠算的研究，都體現了這一方法論。

發表在法國《自然》雜誌上有關中國的文章，其中有一部分的內容是對中國古代科學與技術的介紹，以及運用西方科學方法對之進行的研究與驗證。這些文章表明中國古代科學與技術的相關知識，經由各種不同渠道傳播至歐洲之後的情況，有關中國珠算的介紹是其中具有代表性的典型個案。

41. Anonymous, “Is there an Abacus Mind in China?” *Weekly Review* (Shanghai), 5 May 1923, p. 334.
42. 許光華，《法國漢學史》(北京：學苑出版社，2009)，頁1-6。
43. 許光華，《法國漢學史》，頁94。

中國珠算是西人持續關注的話題。除了上述提到的法國研究者以及偉烈亞力之外，曾任香港總督、英國漢學家德庇時（港人習慣稱之戴維斯或爹核士，John Francis Davis, 1795-1890）在其1865年出版的《中國雜集》（*Chinese Miscellanies: A Collection of Essays and Notes*）中也寫到了中國的珠算。德庇時同樣觀察到中國的書寫記數與計算分屬兩套系統：「他們的數字通常會寫成一長串字詞，換句話來說，它與阿拉伯記數系統不同，後一個系統中，數字的乘方或值根據其位置以十進制增大或減小。這種不便在計算中得到克服，借助一種名叫算盤的小器具，十進制算術得到採用。」隨後他還提到一位已故文化名人的書信，該名人稱：「我被鄧恩（Dunn）先生以及其他人士告知，中國人用它（按：指算盤）以同樣快的速度和同樣的準確性完成所有的算術運算；因此我設想，他們必定有某種簡單而近乎機械性的運算程序，就像用於加法的運算方法一樣。算盤的實用性，正如他們使用的那樣，遠勝於巴貝奇（Babbage）⁴⁴先生著名的計算機……」⁴⁵此外，本文的兩

位作者於2021年在國際科學史大會上報告相關論文時，也有歐洲學者對珠算表現出濃厚的興趣。

法國自法國大革命時期拉格朗日數學課程改革以後，也有重視比較不同文化算術的傳統。對於運算之簡便以及由珠算所實現的十進制算術，多位後來法國研究者更注意到這一運算與中國傳統的書寫記數法分屬不同系統，但這一觀察也因所基於的預設而有差異。豐維埃爾認為中國珠算的產生和運用是中國算術不發達的表現，這是將之與使用印度-阿拉伯數字進行的筆算加以比較而形成的觀點，其背後所隱含的預設即為筆算是算術的最優方式。

歷史學者于爾根·奧斯特哈默（Jürgen Osterhammel）在其著作《世界的演變：19世紀史》（*The Transformation of the World: A Global History of the Nineteenth Century*）中，將「知識」置於19世紀的背景下做出定義，指知識是「用以在現實世界中解決問題和應對生活狀況的認知資源。這是一個與19世紀現實狀況相符的初步概念。當時

至少在歐洲和北美產生了對知識的理性主義和工具化的理解。知識應該有用。它應該提升人類掌控大自然的能力，通過運用技術增加整個社會的財富，使人們的世界觀擺脫迷信的影響，即知識應盡可能在方方面面發揮作用。較之其他事物，知識的豐富和增長最能體現進步，而在歐洲精英眼中進步是時代的標誌」。⁴⁶

知識的積累是人類進步的體現，知識是一種有用的資源，能為人類造福並給人類社會帶來財富，這種基於進步的知識觀，構成了觀察彼時西人在華科學考察與知識採集之書寫與闡釋的基本背景。19世紀是西方科學與技術飛速發展的時期，科學與技術也給社會帶來巨大變革。這一社會文化背景形塑了西人觀察異域知識與文化的視野。

除了對中國珠算以及算術的批評之外，在1885年和1888年，豐維埃爾都曾在法國《自然》雜誌上撰文批評中國天文學活動中的星占成分，並認為中國製造的天文儀器刻度精確性不足，同時也通過與歐洲天文學的對比褒揚歐洲近代天文學革命以

來的成就，⁴⁷與其珠算的文章都相似地顯示出一種以法國科學成就為榮的民族自豪感，和在此基礎上建立的法蘭西中心主義思想傾向。⁴⁸

同樣在對中國珠算的闡釋中，一方面，作為數學家的羅代在其文章中做出了具有啟發意義的工作，即結合具體的計算去探究珠算所體現的中國算術與西方算術之差異，從而將之呈現為實作（practice）上的不同，而非文明之高下；另一方面，羅代的文章是嚴格意義上的學術論文，從目前所能找到的文獻來看，羅代也從未撰寫過相關主題的科普文章。事實上，這種對差異性的解說因為涉及更為細節的數學實作，所以也很難以簡短易懂的方式向普通讀者加以介紹。這種體現在研究者與科學寫作者以及學術研究與科普文章之間的距離，看來也給兩個群體帶來認知上的差異。

44. 查爾斯·巴貝奇（Charles Babbage, 1791-1871），英國數學家，因其在設計與製造差分機方面的工作而被認為是計算機先驅。
45. John Francis Davis, *Chinese Miscellanies: A Collection of Essays and Notes* (London: John Murray, 1865), pp. 1-3.

46. [德]于爾根·奧斯特哈默著，強朝暉、劉風譯，《世界的演變：19世紀史》（北京：社會科學文獻出版社，2016），頁1434。
47. W. de Fonvielle, “L’ année Chinoise,” *La Nature*, No. 645 (10 Oct. 1885), pp. 298-302 ; “L’ astronomie en Chine : L’ Observatoire de Pékin,” *La Nature*, No. 808 (24 Nov. 1888), pp. 406-410.
48. 陳志輝，〈近代與否之辨：19世紀七八十年代歐洲人對北京古觀象台的雙重印象〉，《自然科學史研究》，卷39期4，2020年12月，頁476-490。

編輯委員會 韓琦（主任）
馮錦榮
徐啟軒
潘律
李鵬
宗喀·漾正岡布
李建深
方小平

編輯組 張贊 鄒冬心（組長）
潘亦迎
李萌
胡光明
林稚暉

助理編輯 胡楠

本冊編輯統籌 李平
甄梓祺
黃振威

開物：科技與文化 2025年第一期（總第三期）

香港理工大學中國歷史及文化學系
中國歷史與文化研究中心 編
版權所有 不得翻印©2025香港理工大學

出版日期：2025年6月
出版：香港理工大學出版社
香港 九龍 紅磡
ISBN：978-962-367-910-7

電 子 版



香港理工大學中國歷史及文化學系
中國歷史與文化研究中心 編



PolyU Press
香港理工大學出版社

ISBN 978-962-367-910-7



9 789623 679107