

艾倫・圖靈

探尋電腦與人工智慧的開端



金京鎮律師

目錄

開啟新時代思維的人

第1章. 孩提時代的好奇心與自學 (1912~1926)

第2章. 謝伯恩學校與60英里的自行車之旅 (1926~1931)

第3章. 克里斯多福·莫康與靈魂的本質 (1928~1930)

第4章 劍橋國王學院的自由 (1931~1935)

第5章 可計算數與通用圖靈機 (1935~1936)

第6章. 普林斯頓留學與神諭機 (1936~1938)

第7章. 入駐布萊切利園與密碼戰的開始 (1938~1940)

第8章 解密機「炸彈機」(Bombe) 的設計與活躍 (1939~1941)

第9章. Hut 8、海軍恩尼格瑪與班布里斯姆斯 (1940~1942)

第10章. 秘密技術交流與黛利拉 (Delilah) 專案 (1942~1945)

第11章 NPL 與早期電腦 ACE 的設計 (1945~1948)

第12章. 曼徹斯特大學與最初的內儲程式型電腦 (1948~1951)

第13章. 圖靈測試：機器能思考嗎？ (1950)

第14章 形態發生學：以數學解開生命的圖樣 (1951~1952)

第15章. 審判與國家的歧視 (1952~1954)

第16章. 圖靈之死與遲來的名譽恢復 (1954年以後)

第17章. 人工智慧的歷史與發展 (1950年代~2020年代)

第18章 2026年的人工智慧與留下的課題

主要參考資料 · 生平與原始資料

開啟新時代思維的人

在電腦被廣泛使用之前，艾倫·圖靈就探問了機器能夠做些什麼。童年時期的好奇心引領他走向數學研究，戰爭期間則與同僚一同破解了德軍的密碼。戰爭結束後，他研究了電腦設計與生命的紋樣。然而，英國卻因他是同性戀者而懲罰了他。在他的生命中，同時蘊含著對新知的探求，以及未能守護一個人的社會面貌。

圖靈將人類依循規則進行計算的過程逐一拆解思考。在此過程中，他提出了能夠執行多種計算的通用機器原理。認為可以透過程式來改變機器所做工作的想法，成為了今日理解電腦的基礎。

他也探討了機器與人類對話、並透過經驗學習的可能性。雖然如今的人工智慧是眾多研究者共同累積的成果，但圖靈的提問正是其中的起點之一。本書循著他的人生軌跡，探討看待計算、智慧與生命的思維是如何萌芽發展的。

圖靈重新探問習以為常之事的原理，並試圖以數學和實驗來驗證答案。這也正是我們閱讀他的原因。從學習既有技術更進一步，我們能從這位開啟新時代思維的人身上，學習如何展開嶄新的思考。

金京鎮律師

第1章. 孩提時代的好奇心與自學 (1912~1926)



圖 1. 描繪年幼圖靈觀察植物的插圖。

艾倫·圖靈大約從 1 歲起就離開父母身邊長大。由於父親的工作地點在印度，艾倫被託付給英國的另一個家庭，與父母主要透過信件互通消息。入學之後，他也常常被看作是個古怪的孩子。這並不是一段光鮮亮麗的童年。

這個孩子日後成為數學家並破解了密碼，被譽為奠定電腦科學基礎的人。今天我們與電腦、智慧型手機、人工智慧生活在一起，而艾倫·圖靈正是最早深入探究這些機器以何種原理運作的人之一。本章探討從艾倫出生的 1912 年到進入中學的 1926 年這段時期。我們將沿著留存至今的紀錄，探尋艾倫在遠離父母的孤獨中，好奇心是如何茁壯成長的。

1.1. 倫敦的出生與寄養教育

艾倫·麥席森·圖靈於 1912 年 6 月 23 日出生於英國倫敦的麥達維爾。出生的地點是一棟名為沃靈頓別墅的建築，這棟建築後來成為了柱廊飯店。現在該建築的外牆上掛著一面藍色圓形牌匾。在英國，名人出生或居住過的房屋都會掛上這種牌匾，稱為藍牌（Blue Plaque）。

雖然艾倫出生於倫敦，但家族的生活重心卻在印度。父親朱利葉斯·麥席森·圖靈（1873～1947）是一名在印度工作的英國公務員。當時印度是由英國統治的土地，英國為了治理印度，便選拔本國人派駐擔任公務員。負責這項職務的組織是印度高等文官，英文縮寫為 ICS。朱利葉斯在印度東南部的馬德拉斯省工作。艾倫父母居住的海濱城市查特拉普爾，如今屬於印度的奧迪沙邦。

母親艾瑟爾·莎拉·圖靈（1881～1976）的家族也與印度淵源頗深。莎拉婚前的姓氏是史東尼，父親愛德華·沃勒·史東尼曾是馬德拉斯鐵路的首席工程師。史東尼家族的根基在愛爾蘭。朱利葉斯與莎拉於 1907 年 10 月 1 日在愛爾蘭都柏林的一座教堂舉行了婚禮，並於次年 1908 年迎來了長子約翰·費里爾·圖靈。艾倫是比約翰小 4 歲的次子。

朱利葉斯和莎拉決定在英國而不是印度撫養孩子。這是因為他們認為印度氣候炎熱且疾病頻發，對幼童的成長而言是個艱苦的地方。他們也極為希望孩子們能在英國歷史悠久的傳統名校讀書。莎拉回到英國生下艾倫也是出於這個原因。然而，父親的工作地點依然在印度。在艾倫大約 1 歲時，父母再次啟程前往印度，兄弟兩人則留在了英國。

這對兄弟被託付的地方是英格蘭南部海濱小鎮濱海聖倫納茲。該鎮山坡路段上有一棟名為巴斯頓別墅的大宅，陸軍退役的沃德上校與其夫人住在那裡。宅邸裡還住著沃德夫婦的孩子們以及照顧孩子的保姆。像這樣由其他家庭代替父母撫養孩子的方式稱為寄養。艾倫大約從

1913 年到 1921 年，也就是從 1 歲到 9 歲，都在這棟房子裡長大。在艾倫誕辰 100 週年的 2012 年 6 月 23 日，巴斯頓別墅也掛上了藍牌。

父母每隔幾年才能請假回英國一次，兒子們也只有在那時才能見到父母的面容。其餘時間維繫父母與孩子之間聯繫的便是信件。比起父母的懷抱，艾倫不得不先適應別人家裡的規矩。雖然同一個屋簷下有幾個孩子，但比起和同齡人打鬧嬉戲，艾倫更喜歡獨自專注觀察事物的時光。數字與符號、地圖與計算，就是艾倫的玩具。

關於巴斯頓別墅時期的艾倫，流傳著幾則軼事。首先，艾倫識字非常快。根據母親莎拉留下的紀錄，艾倫透過一本名為《無淚閱讀》（Reading Without Tears）的書，僅用了約 3 週時間就自學會了閱讀。他是個即使沒有人逐一指導，也能自己找出規律的孩子。

他還有一種非要把一個故事徹頭徹尾弄清楚的執拗。大約在 1918 年母親回英國期間，莎拉在巴斯頓別墅大聲朗讀約翰·班揚的《天路歷程》給艾倫聽。書中途出現了冗長而枯燥的宗教闡釋時，莎拉便悄悄跳過了那個段落。結果艾倫大發雷霆，說這樣漏掉內容會毀了整個故事，隨後跑回了自己的房間。對艾倫而言，故事是從頭到尾相連的一個整體結構，哪怕漏掉一塊拼圖，整體都會失去協調。

艾倫甚至還會自己造詞。在海濱小鎮上，海鷗常為了爭奪食物而吵鬧不休，艾倫便指著那種聲音，自創了「quockling」這個詞來稱呼它。遇到沒有名字的事物，他便會自己為它命名。

1921 年回到英國的母親發覺兒子變了。昔日活潑多話的孩子話變少了，成了一個總是獨自沉思的孩子。長期與父母分離的生活，想必在幼小的心靈上留下了痕跡。那一年，艾倫離開了沃德夫婦的家。從他童年時期的信件中，可以看出他凡事都想親自探究好奇之事的模樣。

1.2. 早期學校生活與非凡的好奇心

艾倫最初就讀的學校是位於濱海聖倫納茲查爾斯路 20 號的聖麥可學校。艾倫從 1918 年到 1921 年，也就是 6 歲到 9 歲期間就讀於這所學校。在課堂上，艾倫常常顯得心不在焉。因為比起照搬老師要求的方式，他更喜歡用自己的方式解題。然而，這所學校的校長卻看出了艾倫的與眾不同之處。據母親莎拉所述，校長曾說自己至今見過聰明的孩子，也見過勤奮的孩子，但艾倫是個天才。他對一個還不到 9 歲的孩子用了「天才」這個詞。

1922 年 1 月，年滿 9 歲的艾倫進入了位於薩塞克斯郡弗朗特村的黑澤爾赫斯特學校。黑澤爾赫斯特是一所寄宿預備學校。預備學校是英國學生在進入大型私立中學前就讀的學校，學

生們離開家，在學校宿舍同吃同住並用功讀書。哥哥約翰也曾就讀這所學校，在艾倫入學時，約翰就讀最高年級，而艾倫則在最低年級。艾倫在這所學校一直待到 1926 年春天。

在黑澤爾赫斯特，艾倫的成績並不突出。在語言或文學等學校看重的科目上，他表現平平或僅略高於平均。然而，一旦鑽研起課本之外自己選定的主題，情況就完全不同了。那時的艾倫會廢寢忘食地沉浸在一件事情上。

為他開啟其中一個主題的是一本書。1922 年，10 歲的艾倫讀到了美國作家愛德溫·坦尼·布魯斯特所著的《每個孩子都該知道的自然奇觀》（Natural Wonders Every Child Should Know）。這本書以科學的視角解釋了生物如何誕生與成長、我們的身體如何運作。書中蘊含著一種思想：生命並非源於某種神秘力量，而可以被視為一種依照自然法則運轉的機械。艾倫徹底迷上了這本書。日後母親莎拉回憶道，正是這本書首次引領艾倫睜開了探索科學的雙眼。

艾倫在課本之外沉迷於什麼，可以從他寄給身在印度的父母的信件中得到印證。這些信件至今仍然留存，保存在英國劍橋大學國王學院的檔案館中。依日期順序閱讀這些信件，就能一窺這位小小發明家腦袋裡的想法。

最引人注目的是書寫工具。1923 年 4 月，10 歲的艾倫在信中講述了自己製作鋼筆的事，甚至畫出了墨水如何流向筆尖的示意圖。在 1923 年至 1924 年間，他用自製的墨水寫信，並稱之為「專利墨水」。他還曾寄出過自己研究打字機內部零件如何相互咬合運轉的圖稿。

在 1924 年的夏天與秋天，他的心思全被山與地圖吸引。地圖上將高度相同的各點相連所畫出的線稱為等高線。艾倫計算了如何利用等高線測量山的高度，並在信中附上了 2 張親手繪製的等高線地圖。也是在這段時期，他寫下了能在水上行駛的自行車這種異想天開的點子寄給父母。

在 1924 年 9 月至 1925 年 3 月間，他深深迷上了化學。艾倫在信中描述了人體血液中的二氧化碳如何變化，並向父母央求購買實驗器材，表示想自學化學。艾倫想要的是陶製蒸餾皿。蒸餾是將液體煮沸後將產生的蒸氣冷卻，藉此單獨收集所需物質的方法。他還多次寫信討論化學反應的規則以及不符合該規則的例外。據說他還做過將海邊拾得的海藻燃燒以提取「碘」這種物質的實驗。

1925 年 10 月，他想出了一種踩踏固定在原地的自行車踏板來為蓄電池充電的裝置。蓄電池是可以充電重複使用的電池。他的構想是將人的腳力轉化為電能。

信中並非只有發明和實驗的故事。艾倫還迷上了西洋棋。西洋棋是在既定規則中尋找最佳著法的遊戲。每個棋子能走的路線都有規定，走了一步棋，後續的局勢就會接連發生變化。艾倫參加了學校的西洋棋比賽，並在 1924 年 11 月將參賽經歷寫在明信片上寄給父母。他還參加了學校的辯論聚會。日後圖靈甚至還鑽研了如何用電腦下西洋棋的方法。

將鋼筆、墨水、打字機、地圖、化學、蓄電池、西洋棋逐一排列開來，這個 10 歲上下孩子展現出的興趣看似雜亂分散。然而，這些興趣都有一個共通點。正如他在信中所寫的墨水流動路徑、打字機零件咬合方式、化學反應的規則與例外那樣，艾倫總是渴望知道事物依循何種原理運作。相較於外表，尋找隱藏在內部的規律才是艾倫好奇心之所向。

1.3. 「粗糙原石」的天才特質

原石是剛從地底開採出來的寶石礦石。表面坑坑窪窪且沾滿泥土，乍看之下與普通石頭無異，但只要打磨拋光，內在就會綻放出光芒。年幼的艾倫·圖靈就是這樣一塊原石。在旁人眼中，他是個古怪而笨拙的孩子，但其內心深處卻潛藏著用自己獨特方式理解世界的力量。

艾倫之所以顯得笨拙，當時學校的評判標準也脫不了干係。當時英國的私立學校致力於培養研習拉丁文、希臘文及古典文學，並且嚴格遵守團體生活規矩的學生。科學與數學受到的重視程度相對較低。曲棍球與橄欖球等團體運動也受到極大推崇。艾倫所喜愛的事物與學校所看重的價值，從一開始就背道而馳。

事實上，艾倫與學校期盼的模範生相去甚遠。他的字跡歪歪扭扭難以辨認，也不擅長把物品整理得井井有條。多人一同參與的體育競賽對他而言更是難以適應，他幾乎無法對這類運動產生興趣。

有一幅留存至今的畫作生動地展現了這種模樣。那是 1923 年母親莎拉畫的一幅鉛筆畫。畫面中的操場上，孩子們正追逐著曲棍球奔跑。唯獨艾倫在稍遠離比賽的地方彎著身子，凝視著地上盛開的雛菊。莎拉給這幅畫取名為「曲棍球，或看雛菊生長」。在母親眼裡，兒子也是個比起球來、對花朵如何生長更好奇的孩子。約 30 年後，成年後的圖靈用數學研究了植物在生長過程中葉片與花朵以何種形狀與順序排列，而在該研究中探討的植物之一正是雛菊。

在課堂上產生衝突的原因在於他的學習方式。艾倫討厭死記硬背別人定好的答案。相反地，他試圖從最基礎的原理出發，一步一步親自找出答案。這種態度有時也被稱為「從第一原理思考」。這種方式往往耗時良久，且經常與老師要求的解題格式大相逕庭。因此他在學校常常遭遇碰壁。然而，自己親自找出的原理，卻在艾倫的腦海中深深紮下了根基。

有一則故事展現了這種方式在課堂之外是如何應用的。那是幼年的艾倫與家人一起到戶外時發生的事。艾倫久久注視著蜜蜂飛行的姿態。蜜蜂從花朵採集花蜜後，幾乎會筆直飛向蜂巢。艾倫在多個不同地點觀察蜜蜂飛行的方向後，嘗試將那些方向連成了直線。他推測這些直線相交之處必然會有蜂巢。艾倫果然在該地點找到了野生蜂蜜，並將蜂蜜帶給了家人。大人們只看到了到處飛舞的蜜蜂，艾倫卻在蜜蜂的移動中看出了規律，並將該規律轉化為幾何圖形與計算，從而得出了答案。

這正是艾倫看起來與眾不同的原因。大多數孩子都學習並遵循大人傳授的方法。比起大人的說明，艾倫更相信自己親眼所見與親自思考推理的結果。沒有適當的詞彙他就自創詞彙，沒有實驗器材他就寫信央求購買，有了好奇疑問他就找書獨自研讀。為海鷗的叫聲命名、畫出鋼筆內部墨水的路徑、用線條連接蜜蜂的飛行軌跡，這些全都源自於同一種初心——想要探明這個世界究竟是如何運作的底層渴望。

當然，撫養並教導這種孩子的大人們充滿了憂慮。母親莎拉非常擔心兒子是否能順利適應學校生活。學校期望培養的學生特質與艾倫的興趣背道而馳，因此這種擔憂也事出有因。

童年時期的信件中，完整記錄著他對事物的原理充滿好奇並親自進行實驗的模樣。日後圖靈研究了機器能夠執行哪些計算，以及機器是否能夠思考。這些深刻的叩問，很難僅憑童年時期的孤獨或某一段單一經歷就能解釋周全。

當時 13 歲的艾倫通過了共同入學考試，於 1926 年進入位於英國西南部多塞特郡的謝伯恩學校。謝伯恩是一所擁有數百年歷史的寄宿學校。艾倫就此離開了黑澤爾赫斯特，邁向了新的學校。

第2章. 謝伯恩學校與60英里的自行車之旅（1926-1931）



圖 2. 重現騎自行車前往謝伯恩學校的旅程。

1926年春天，13歲的艾倫·圖靈正準備進入一所新學校。那是位於英國西南部多塞特郡小城謝伯恩的謝伯恩學校。謝伯恩學校是一所擁有數百年歷史的寄宿學校，學生在校內宿舍食宿並學習。艾倫即將入住的宿舍是韋斯特科特宿舍（Westcott House）。

在英國，這類學校被稱為「公學」（Public School）。單聽名字似乎是人人皆可就讀的公立學校，但實際上卻是學費昂貴的私立寄宿學校。當時，公學被視為培養引領國家與帝國人才的場所。學生們學習拉丁語和希臘語，研習古詩與歷史，並透過橄欖球、板球等團體運動習得規則與禮節。當時的氛圍極為看重這些學問，相比之下，數學與科學常被視為次一等的科目。

艾倫從1926年5月到1931年7月都在這所學校度過。他並不是個對老師教的解法照單全收的學生，而是凡事都喜歡從頭自己推敲探究，因此經常與老師發生摩擦。然而，正是這段時期，艾倫靠著自己的力量自學了愛因斯坦的相對論，並奠定了日後成長為數學家的思維根基。在謝伯恩度過的5年，是從一輛自行車開始的。

2.1. 大罷工與騎自行車上學

當時，艾倫的父母住在法國。謝伯恩學校的新學期預定於1926年5月4日開始。艾倫獨自從法國聖馬洛港乘船橫渡英吉利海峽，抵達英國南部的港口城市南安普敦。如果照原定計畫，他只要從這裡搭乘火車前往謝伯恩即可。

然而那天，整個英國陷入了停擺。因為在1926年5月4日，英國全國大罷工爆發了。罷工的起點是煤礦。煤礦業主企圖削減礦工工資並延長工時，礦工們起而對抗，其他行業的勞工也站在礦工這一邊，共同停工響應。鐵路工人、公車司機、碼頭工人，甚至印刷工，無數的人沒有前往工作崗位。火車停駛，報紙也無法正常出刊。這場罷工一直持續到5月12日，整整進行了9天。

由於火車停駛，沒有合適的前往謝伯恩的方法。從南安普敦到謝伯恩大約有60英里。根據不同記載，有寫60英里、63英里或65英里的，略有出入。1英里約為1.6公里，因此相當於近100公里的距離，大致相當於從首爾到天安的路程。對成年人而言，這也是一天內騎自行車難以輕鬆應付的距離。

許多學生都在家等待罷工結束。艾倫卻選擇了另一條路。他決定騎自行車去學校。母親莎拉·圖靈日後為兒子撰寫傳記時，詳細記錄了這件事。根據該記錄，艾倫在白天時分抵達南安

普敦後，先給宿舍舍監傑弗里·奧漢倫老師發了電報，表示自己將於次日抵達。隨後，他將大件行李另外托運，帶上一張地圖，便騎上了自行車。對艾倫來說，這是一條從未走過的路。

艾倫分2天騎完了這段路程。因為當他說要騎自行車去的時候，母親曾叮囑他不要在1天之內騎完60英里。母親擔心兒子隔天一早可能就得去上課。艾倫聽從了母親的話，途中在布蘭德福德的王冠飯店投宿了一晚。晚餐、住宿加上早餐的費用總共只需6先令，隔天早晨飯店員工全都出來為他送行。在飯店員工的眼中，一個獨自騎著自行車奔馳於陌生道路上的13歲少年，想必顯得相當新奇。艾倫在寫給父母的信中記錄了這件事。

艾倫於1926年5月5日抵達謝伯恩學校。他騎自行車上學的故事甚至刊登在地方報紙上。

這趟旅程充分展現了艾倫是個怎樣的人。他沒有因為道路受阻就止步不前。他展開地圖估量距離，決定過夜的地點，憑藉著自己的雙腿踩踏踏板。如果沒有現成的方法，就自己找出辦法來——這種態度貫穿了艾倫的一生。強健的雙腿同樣也是他一生的資產。艾倫成年後熱衷於長跑，馬拉松實力甚至達到了足以角逐奧運代表選拔的水平。

這趟自行車之旅在校內校外都長久為人所銘記。根據母親的記錄，在1、2年後艾倫的成績跌落谷底時，舍監老師為了找出值得稱讚之處，曾說過「這孩子畢竟是自己騎自行車來到這裡的」。而在整整100年後的2026年5月，謝伯恩當地學校的師生們重現了艾倫的這趟旅程。他們從南安普敦騎自行車100公里前往謝伯恩，於5月5日下午6點抵達謝伯恩，並在市內街道上舉行小型遊行，以紀念這一天。

2.2. 古典教育與科學自學的摩擦

在謝伯恩獲得的第一學期成績單並不算差。舍監奧漢倫老師形容艾倫是一個「有獨創性且極為有趣的孩子」，校長諾威爾·史密斯也附註說是「令人非常滿意的起步」。同期的其他記錄中，也有評價提到艾倫喜歡獨處。老師認為原因並非性格陰沉，而是因為害羞內向。

隨著時間推移，問題接二連三浮現。謝伯恩的課程以拉丁語和希臘語為核心。拉丁語是古羅馬人使用的語言，希臘語則是古希臘人使用的語言。學生們背誦兩種語言的文法，翻譯古代詩歌與演說詞，並親自用拉丁語造句作文。艾倫對背誦別人制定好的文法規則毫無興趣，在拉丁語和英語科目上經常拿到接近全班墊底的成績。他的字跡難以辨認，筆記本上滿是墨水污漬。老師們屢次指責艾倫髒亂的筆記本與散漫的生活習慣。

就連在艾倫喜歡的科目中，摩擦也同樣發生了。艾倫喜歡數學，但從不按照課本上給出的方法解題。拿到題目後，他會先推敲這道題到底在問什麼，然後用自己琢磨出的途徑尋找答案。即便答案正確，老師們也常因這不是規定的標準解法而猶豫是否該給高分。在化學實驗室裡，艾倫也往往沉迷於自己構思的實驗，而非老師指定的實驗，因而屢屢受到警告。

學校對這樣的艾倫深感憂慮，校長甚至寫信給艾倫的父母。為艾倫·圖靈撰寫傳記的安德魯·霍奇斯介紹了這封信，信中寫道：「我希望他不要在兩張椅子之間摔落下來。如果想留在公學，他就必須以成為一個有教養的人為目標。若只是想成為科學專家，那他在公學就是在浪費時間。」

「在兩張椅子之間摔落」是一句英國諺語，意思是兩頭落空、一無所獲。校長所說的「有教養的人」，是指能吟誦拉丁詩篇、引用古典名著的紳士。以那種眼光來看，一頭鑽進數學和科學裡的艾倫不過是個半吊子的學生。艾倫並未迎合學校所期望的模樣來改變自己，但也未曾與學校發生正面衝突。下課之後，他便悄悄回到自己所鍾愛的學問世界中。

他的自學內容遠遠超前了學校課程。光是在1927年，艾倫甚至還沒在學校學過微積分的基礎。微積分是用於計算某種量變化的快慢以及曲線所圍面積等數值的數學領域。即便如此，他仍獨自解開了高難度的數學問題。他甚至自行推導出將某個數值表示為無窮連加求和的公式。那本該是在大學學過微積分的人才能涉獵的內容。

大約在15歲時，他開始自學阿爾伯特·愛因斯坦的相對論。相對論是愛因斯坦於1905年與1915年發表的理論，闡述了時間與空間會隨著觀察者的運動狀態而改變。在當時，這是一門連大學教授也直搖頭喊難的理論。艾倫閱讀了愛因斯坦的著作，不僅理解了其中的內容，甚至還讀出了書中未曾明確寫出的深意。他自己敏銳地察覺到，愛因斯坦正在對統治物理學基礎200多年的牛頓運動定律提出質疑。

艾倫渴望與母親分享自己所理解的內容。在15歲半時，他在一本紅皮小筆記本上按章節整理了相對論。標題為《阿爾伯特·愛因斯坦相對論摘要》，篇幅共31頁。艾倫把這本筆記本送給了母親。筆記中不僅記錄了相對論的內容，還融入了艾倫對於應該以何種順序、何種心態閱讀這套理論的見解。這本筆記如今保存在劍橋大學國王學院的檔案館中。

艾倫的興趣並未止步於相對論。他閱讀了英國天文學家亞瑟·愛丁頓於1928年出版的《物理世界的本質》。愛丁頓正是那位在1919年透過日食觀測證實愛因斯坦理論正確性的科學家。艾倫透過這本書接觸到了量子力學。量子力學是解釋如原子般極微小世界中物質如何運動的嶄新物理學。大約在1929年，艾倫在寄給父母的信中寫道，他想找奧地利物理學家埃爾溫·

薛丁格關於量子理論與波動方程的文獻來讀。一名17歲的學生，竟然打算直接研讀那個時代最頂尖的物理學前沿研究。

在鑽研相對論與量子力學的過程中，艾倫心中孕育出巨大的疑問。世界是否僅依循既定的定律運轉？物質與心靈之間究竟存在著何種關聯？驅動我們身體與思維的數學原理又是什麼？這些疑問，引領著艾倫日後構想出能夠思考的機器。

2.3. 獨立知性的形成

雖然常與老師發生衝突，但這並不意味著艾倫的校園生活就只有孤獨或叛逆。艾倫以自己的方式參與學校的各項活動，並在學校群體中逐漸找到了屬於自己的位置。

從入學初期的記錄中便能看見這樣的身影。艾倫進入謝伯恩之後，前3個學期都在學校禮拜堂的合唱團中歌唱。他負責的聲部是變聲期前男童的高音部（treble）。他還參加了學校音樂會，在1926年12月20日舉行的音樂會節目單上，便留有艾倫作為童聲高音團員登台演出的名字。1927年11月7日，他在學校禮拜堂領受了堅振聖事。堅振聖事是基督徒親自確認自身信仰的儀式。看似只沉迷於數學和科學的艾倫，也藉由在禮拜堂歌唱、參與學校儀式，作為學校的一份子生活著。

在體育方面，他的喜好十分鮮明。艾倫不喜歡橄欖球或板球這類團體運動，而是偏好高爾夫和長跑等個人運動。即便如此，他仍曾2次代表宿舍參加宿舍間的橄欖球對抗賽，盡到了自己的職責。

大約從1928年起，艾倫與高他一屆的學長克里斯托弗·莫康熟絡起來。兩人暢談科學與數學，對彼此產生了深遠的影響。莫康是艾倫第一位敞開心扉深交的朋友。然而，莫康卻在1930年2月猝然離世。

成為高年級生的艾倫經常造訪學校圖書館。從1928年10月到1931年5月，他從圖書館借閱了33本書，其中小說只有3本。1930年11月4日，他一口氣借閱了《愛麗絲夢遊仙境》作者路易斯·卡羅的3本書。路易斯·卡羅不僅是童話作家，也是一位兼研邏輯學與數學的數學家。

這段時期，艾倫不再僅僅局限於獨自鑽研，在校內承擔的職責也逐漸拓展。他經常輔導其他同學的數學作業，舍監老師對此深表讚許。在1930年秋季學期，他成為了學校的級長（prefect）。級長是負責維持學校秩序並引導學弟的高年級生。同個學期，他加入了名為「

達弗斯」(Duffers)的學生討論小組，並發表了題為〈其他世界〉的文章。他還活躍於科學社團「煉金術學會」。

那位在課堂上不循常規標準解法的學生，在畢業時幾乎包攬了學校所有的數學與科學獎項。謝伯恩學校記錄中艾倫的獲獎紀錄如下：

1926年 初級班柯比數學獎

1927年 里昂考試獎

1928年 中級班普朗普特里數學獎

1930年、1931年 迪格比數學與科學獎

1930年、1931年 克里斯托弗·莫康自然科學獎

1931年 國王獎牌數學獎

1931年 韋斯特科特宿舍古德曼畢業獎學金

其中，「克里斯托弗·莫康自然科學獎」是莫康的家人為了紀念離世的莫康而設立的獎項。艾倫連續2年獲得了該獎項。

艾倫於1931年7月從謝伯恩學校畢業。幾年前對他憂心忡忡的校方評價，如今已大不相同。校長查爾斯·鮑伊(Charles Boughey)在最後的成績單上寫道，艾倫是一位才華橫溢且優秀的少年，並表示將帶著極大的關注注視著他未來的道路。他評價艾倫和藹親切，且出色地履行了級長職責。

5年來在最近距離注視著艾倫的舍監奧漢倫老師也寄來了信。他寫道，感謝艾倫所展現的幫助與忠誠，以及共同生活所帶來的愉悅。他更斷言，在當代人有生之年，圖靈這個名字將會被長久銘記。

歲月流逝，1966年，謝伯恩學校將新擴建的科學館命名為「艾倫·圖靈實驗室」。根據謝伯恩學校的記錄，這是世界上第一座以艾倫·圖靈命名的建築物。如今，圖靈這個名字，凡是學習電腦與人工智慧的人無人不知、無人不曉。

在謝伯恩度過的5年對艾倫來說絕非輕鬆的時光。學校渴望的是精通拉丁語的紳士，而艾倫卻想從根本親自探究數學與科學的原理。在這兩者之間的夾縫中，艾倫遭受責備、拿到低分，甚至被喚作古怪的孩子。即便如此，他也未曾放棄自己的思考。他獨自研讀愛因斯坦與愛丁頓的著作，在合唱團中歌唱，輔導朋友的作業，並在數學與科學領域屢獲獎項。那個獨自

奔馳60英里前來上學的少年，在5年後成長為具備獨特思考方式的青年離開了學校。1931年10月，艾倫進入劍橋大學國王學院，邁出了作為數學家的全新一步。

第3章. 克里斯多福·莫康與靈魂的本質 (1928~1930)



圖3. 重現圖靈與莫康一同學習的場景。

在雪伯恩學校就讀的艾倫·圖靈，大部分時間都獨自一人度過。他在拉丁文和希臘文課上總是心不在焉，解數學題時也不依循教科書上的方法，而是按照自己的方式來解。老師們認為圖靈是個固執且散漫的學生，同學們也無法理解他為何對化學藥品和星座話題如此著迷。對圖靈來說，幾乎沒有人能讓他盡情傾訴腦海中的想法。

1928年秋天，在年僅16歲的圖靈面前出現了一位少年。兩人相處的時間還不到1年半。然而，這場短暫的相遇與突如其來的離別，卻極大地改變了圖靈的人生。何謂人心？心靈與肉體又是如何相連的？圖靈終其一生都在探求的這個問題，正是始於這個時期。

3.1. 與靈魂知己的相遇

那位少年的名字是克里斯多福·科蘭·莫康（Christopher Collan Morcom）。莫康於1911年7月13日出生於英國伍斯特郡福克伯里的「時鐘屋」（The Clock House）。他比圖靈大1歲，年級也高了一屆。莫康家與科學有著深厚的淵源。父親雷吉納德·莫康是領導一家機械公司的工程師，外祖父約瑟夫·斯旺更是因發明白熾燈泡而聞名的科學家之一。哥哥魯珀特也在雪伯恩學校榮獲數學獎後，進入劍橋大學三一學院就讀。

莫康於1925年5月以獎學金生身分進入雪伯恩學校，住在名為里昂宿舍（Lyon House）的寄宿樓中。這與圖靈所住的韋斯科特宿舍（Westcott House）不同。莫康在數學和科學方面表現優異，天文學知識也非同凡響。每逢夜晚，他便把望遠鏡帶進宿舍房間觀察星空，並依據紀錄繪製屬於自己的星圖。他也很喜歡攝影與聆聽音樂。

他並不是個只會讀書的學生。莫康也很愛惡作劇，在1928年冬季學期，他曾把好幾個氣球灌滿瓦斯，接上浸過蜂蠟的繩子當作導火線，隨風放飛。他還曾偷偷拍下老師上課的模樣作為禮物相贈，而那位老師非但沒有認為這很失禮，反而將其視為尊重的表達。

在這樣的莫康身上，卻隱藏著一個無人知曉的憂慮。他小時候因飲用帶有病菌的生牛奶而感染了牛結核病。牛結核病是一種由牛傳染給人的結核病。自那之後，莫康家便改養山羊來獲取羊奶，以取代牛奶。莫康來到雪伯恩的第1年也經歷了一場大手術，休學了2個學期。即便如此，他還是迅速趕上了學業，並在1927年獲得了數學獎。

圖靈與莫康走得親近是在1928年9月。當時圖靈升入研習數學與科學的六年級初級班（Lower Sixth），開始與莫康上同一堂課。將兩人聯繫在一起的，是一個關於行星軌道的問題。這番討論延續到了足球比賽的中場休息時間，兩人也一同將熱情投入到化學實驗中。他們的談話主題無窮無盡，時而推敲其他學生食用的加碘鹽成分，時而又轉向探討恆星的年齡。

兩人一同學習的機會也逐漸增加。每週三下午，他們都會在學校圖書館碰面，分享各自的研究心得；在1929年春季和夏季學期，他們還私下向化學老師安德魯斯學習有機化學。據說在課堂上，他們還會用紙條寫下只有兩人才看得懂的符號，藉此交流數學想法。熱愛音樂的莫康，還曾帶著圖靈參加數學老師埃珀森主持的留聲機音樂聚會。

對圖靈而言，莫康是第1個能與他暢所欲言的朋友。圖靈的姪子德莫特·圖靈日後在談到莫康時曾說明，莫康是不會用異樣眼光看待沉迷於方程式與天文學的圖靈的人。然而，這並不意味著兩人的思考方式相似。圖靈往往才思敏捷、靈光乍現，但收尾時常顯粗糙；莫康在理解原理後並未就此止步，而是將每個過程單獨拆解、嚴密推敲。當宿舍舍監問及莫康時，圖靈回答說，自己最為欽佩的就是莫康那份嚴謹徹底的態度。

圖靈是如何看待莫康的，也留存在他日後寫給莫康母親的信中。圖靈這樣寫道：「我從未遇見過像他那樣既才華洋溢、又充滿魅力且毫不自傲的人。我一直認為，自己的學業以及對天文學的興趣，都是應該與他一同分享的事物。」引導圖靈認識天文學的人，正是莫康。

圖靈的情感並未止步於友誼。圖靈深深喜歡著莫康，日後更將這份感情銘記為自己的初戀。並沒有紀錄顯示莫康知曉圖靈的心意。莫康始終將圖靈視為思想契合的珍貴摯友。對於孤獨的圖靈來說，莫康是點亮了他整個世界的存在。

1929年12月，兩人一同前往劍橋，參加劍橋大學三一學院的獎學金選拔考試。在為期1週的時間裡，他們感受著大學的氛圍，憧憬著未來繼續一同求學的日子。然而結果卻大相逕庭。莫康獲選為獎學金生，預定於次年10月進入三一學院，圖靈卻落榜了。必須在雪伯恩多留1年的圖靈下定決心，1年後一定要追隨朋友的腳步前往劍橋。

然而這項計畫還不到2個月就破滅了。1930年2月6日星期四傍晚，在雪伯恩學校的大禮堂「大校舍」（Big Schoolroom）舉行了索爾茲伯里歌手合唱團的音樂會。莫康與包括圖靈在內的朋友們一同前往聆聽。那天傍晚成了兩人共度的最後時光。

3.2. 突如其來的悲劇與哀痛

音樂會結束的當晚，莫康突然感到劇烈疼痛而倒下。隔天，學校將莫康送往雪伯恩的耶特曼醫院觀察情況。2月9日星期日，莫康被轉送至倫敦的一家醫院，並在那裡接受了2次手術。童年時感染的結核病引發了腹膜發炎，進而導致腸梗阻。手術後出現了併發症，莫康最終未能康復。1930年2月13日正午，克里斯多福·莫康在倫敦曼徹斯特街19號的療養院離世。莫康當時18歲，圖靈17歲。

奪走莫康生命的結核病，是一種由名為結核桿菌的細菌侵入人體而引起的疾病。主要發生在肺部，但也會侵犯骨骼、腸道或腹膜。正如莫康感染的牛結核病一樣，過去許多人因為直接飲用混有病菌的生牛奶而患上結核病。如今牛奶經過高溫殺菌，也有優良的藥物，絕大多數都能治癒。但在1930年，醫學上尚未研發出治療結核病的藥物。

在莫康倒下前後，圖靈經歷了一件奇妙的事。圖靈日後回憶，那段時期的某個夜晚，他從睡夢中醒來望向窗外西沉的月亮時，心中莫名浮現出莫康出事了預感。這種難以用科學解釋的經歷，長久地留在了圖靈的心頭。

2月15日清晨，莫康被安葬在家鄉附近的卡茨希爾基督堂教會墓園。隔天的2月16日，雪伯恩學校禮拜堂舉行了悼念莫康的追思禮拜。全校都沉浸在失去優秀學生的悲痛之中。

那天，圖靈寫了一封信給母親：「我確信自己會在某個地方與莫康重逢。正如我們深信在此處有共同要做的事一樣，在那裡也必定有我們要一同完成的事。如今這項任務落到了我一個人身上，我絕不能讓他失望。即便不像他在身邊時那樣有趣，我也必須傾注同樣的心力。」這封信中蘊含著深沉的悲傷與全新的決心。圖靈決意由自己來繼承摯友未竟的學業。

圖靈將這份決心付諸實行。他接下的第1件事，是替朋友挑選得獎的書籍。雪伯恩學校決定將1929年度的迪格比數學與科學獎頒給離世的莫康，而受獎書籍則由圖靈代為挑選。圖靈挑選的書籍是亞瑟·愛丁頓的《物理世界的本質》與《恆星內部結構》，以及詹姆士·金斯的《天文學與宇宙生成論》與《我們周圍的宇宙》。這些全都是探討恆星、宇宙與新物理學的著作，也是兩位少年生前一同探討的主題。

就在同一年，即1930年，莫康的父母為了紀念兒子，在雪伯恩學校設立了「克里斯多福·莫康獎」。這座獎項並不以考試成績作為評選標準，而是由科學老師們綜觀一整年的學習情況，評估進步幅度、獨創性與理解深度後，頒發給最傑出的學生。獲獎者還會同時獲贈一幅莫康的肖像畫。

圖靈暗下決心一定要贏得這座獎項。而在1930年，他憑藉一篇研究酸性溶液中亞硫酸鹽與碘酸鹽化學反應的獨創性論文，成為了首位獲獎者。他也持續堅守前往劍橋的誓言。全心投入學業的圖靈於1930年12月再次參加劍橋大學獎學金考試，這一次他獲選為國王學院的獎學金生。圖靈在1931年也再次榮獲莫康獎。連續2年獲得以摯友之名命名的獎項，圖靈一步步實踐著自己的承諾。

3.3. 《靈魂的本質》 散文

莫康離世後，圖靈開始與莫康的母親法蘭西絲·伊索貝爾·莫康通信。莫康夫人是一位雕塑家兼畫家。她熱情溫暖地接納了這位兒子生前最要好的朋友，圖靈也從莫康的家人那裡獲得了慰藉。圖靈借用了莫康生前使用的望遠鏡與天球儀，繼續進行星象觀測。天球儀是一種將天空中的星座繪製在球體表面的工具，用於觀察星體的位置與運動。

通信並未在1、2年內結束。每逢莫康的生日7月13日與忌日2月13日，圖靈都會寄信給莫康夫人，傳達自己從未忘記摯友的心意。這樣的信件往來持續了10餘年，直到莫康夫人於1941年逝世為止。兩位少年的友誼雖然還不到1年半，但圖靈與莫康家人的情誼卻遠比這要長久得多。

在這段情誼之中，誕生了一篇文章。在莫康離世2年後的1932年4月左右，圖靈已成為劍橋大學國王學院的學生。這段期間，圖靈寄宿在布羅姆斯格羅夫附近的時鐘屋，陪伴莫康一家人，並在此為莫康夫人寫了一篇短文，題為《靈魂的本質》（Nature of Spirit）。圖靈親筆寫下的這份手稿，至今仍保存在劍橋大學國王學院的檔案館中。

要理解這篇文章，必須先了解當時物理學所發生的變革。長久以來，科學家們一直以牛頓物理學來解釋世界。根據這種思維，宇宙就像一座巨大的鐘錶，按照既定的法則運轉。如果知道當前所有物體的位置與速度，就能毫無遺漏地計算出未來將會發生的一切。這種思想被稱為「決定論」。看著天文學家連幾十年後的日食日期都能準確預測，人們更加堅信了這種觀點。

然而在1920年代，名為「量子力學」的新物理學誕生了。量子力學是一門研究原子和電子等微觀極小世界的學問。科學家發現，在這個微觀世界中，無法同時精確測出物體的位置與速度。微觀世界中所發生的事情，只能用機率來描述。圖靈代莫康挑選的愛丁頓著作《物理世界的本質》，正是向大眾讀者闡明這門新物理學如何改變人們看待世界眼光的書籍。

圖靈在《靈魂的本質》中，試圖以這門新物理學來理解朋友的死亡。文章的開篇探討了決定論。過去的科學認為，只要掌握宇宙的所有狀態就能預測未來；然而在面對原子和電子時，卻無法得知它們的精確狀態，因為我們所使用的測量工具本身就是由原子和電子構成的。圖靈以此為依據，認為那種像日食一樣將人類所有行為都視為早已註定的想法將會破滅。

倘若行為並非預先決定，那麼究竟是什麼決定了行為？這個問題油然而生。圖靈在此談到了人類的「意志」。圖靈認為，人具有能夠決定大腦微小局部、甚至整座大腦中原子運動的意

志。他解釋道，身體的其餘部分就像是將這種微小運動大幅放大的裝置，類似於將微弱聲音放大的擴音器。大腦中少數原子的微小運動，就這樣被放大為牽動雙臂與雙腿的大幅動作。圖靈補充道，宇宙中的其他原子因為沒有這種放大裝置，其運動看起來便如同偶然。

在文章的中段，圖靈由意志轉入靈魂，探討了靈魂與物質的關係。圖靈借鑒了劍橋哲學家麥克塔格特的思想，認為若沒有靈魂，物質也毫無意義。他還認為，靈魂與物質永恆相連，但並非總是停留在同一具肉體之中。他寫道，過去人們曾相信靈魂在死後可能會前往一個與我們所處宇宙截然不同的宇宙，但如今既然靈魂與物質密不可分，那種想法便自相矛盾了。

如果靈魂無法脫離物質，那麼就必須解釋肉體死亡之後靈魂會如何。圖靈試圖從肉體與靈魂連結的方式中尋找答案。活著的肉體正因其活著，才能吸引並留住靈魂。只要肉體活著且清醒，肉體與靈魂便緊密相連。圖靈坦率地寫道，睡著時會發生什麼事尚無法揣測；然而一旦肉體死亡，原本束縛靈魂的肉體「裝置」便會消逝，而靈魂不久之後——甚至可能立刻——就會尋找新的肉體。

在文章的最後，圖靈提出了疑問：靈魂為何要擁有肉體？難道靈魂之間不能脫離肉體自由自在地生活並交流對話嗎？圖靈給出的答案是：縱然那樣也是一種可能，但如此一來將無事可做。肉體為靈魂提供了照料與運用的對象。在這樣的回答中，寄託了圖靈懷念與莫康一同做實驗、觀測星空的時光的心緒。對圖靈而言，生命便是交流思想、並肩協作。

《靈魂的本質》是一篇僅有1頁左右的短文。然而這篇文章中，完整保留了19歲的圖靈努力承受痛失摯友之悲痛的痕跡。為了戰勝悲傷，圖靈並未僅僅寄託於虛無縹緲的信仰，而是鑽研了當時最新穎的科學知識——量子力學，試圖以此理解心靈與肉體的關係。由於這是一位19歲學生所寫的文章，以今日的科學眼光來看，自然有不合時宜之處；即便如此，圖靈依然在這篇文章中主動探究無人知曉答案的難題，並試圖以邏輯來加以解答。

這篇文章中的思想並未一直保持不變。隨著在劍橋繼續深造，圖靈的思維逐漸發生了轉變。他漸漸遠離了死後仍有靈魂留存的信念，轉而傾向於認為心靈的運作同樣能以物質與法則來解釋。然而，問題本身卻從未離開過圖靈：人類思考的過程能否用規則來表達？心靈能否被製造成機器？

1936年，圖靈構想出了一台以簡單規則呈現人類計算過程的假想機器。這項今日被稱為「圖靈機」的構想，成為了電腦科學的理論基石。1950年，他在題為〈計算機器與智慧〉的論文中探討了機器是否能夠思考。在失去莫康後所寫的文章中，留下了年輕圖靈苦思心靈與肉體關係的思想印記；只不過，我們無法斷言當年的這份沉思便直接促成了他日後的研究。

第4章 劍橋國王學院的自由（1931~1935）



圖4. 描繪在劍橋求學時期的圖靈之插圖。

艾倫·圖靈收拾行囊前往劍橋是在1931年秋天，當時他19歲。在此之前，他在雪伯恩學校度過的5年並不順遂。雪伯恩是一所重視拉丁語與希臘語的學校，老師們總是以擔憂的眼光看待只專注於數學與科學的圖靈。在那裡最理解圖靈的朋友克里斯多福·莫卡姆，於1930年2月因結核病離世。圖靈懷著這份悲傷開始了大學生活。

圖靈進入的是劍橋大學國王學院。劍橋大學是英國最古老的大學之一，由多所學院組成。所謂的學院，是指學生與教授在同一個校園內食宿並共同學習的小型社群。在國王學院度過的4年間，圖靈第一次遇見了一個可以盡情伸展自己想法的容身之處。他取得了身為數學家的首批成果，也逐漸接納了自己是個什麼樣的人。日後向世人提出電腦原理的想法，也在這個時期萌芽了。

4.1 進入國王學院

兩次獎學金考試

在進入國王學院之前，圖靈不得不參加了兩次獎學金考試。第1次考試是在1929年12月。圖靈與莫卡姆一同報考了劍橋三一學院的獎學金考試。三一學院是艾薩克·牛頓就讀過的地方，是喜愛數學的學生夢寐以求的學院。考試結果，莫卡姆獲得了獎學金資格，圖靈卻未能如願。兩人原本期待著在劍橋一同求學的日子，然而2個月後莫卡姆離世，這份心願終究未能實現。

圖靈在雪伯恩學校多留了1年繼續學習，並於1930年12月再次應考。這次他也沒能進入三一學院。不過，第二志願的國王學院錄取了他為獎學金生。獎學金每年為80英鎊，這是一筆為籌措學費與生活費帶來極大助益的金額。

成為國王學院的獎學金生也並非易事。國王學院長期以來將許多名額保留給伊頓公學這所名門學校的畢業生，因此分給其他學校出身者的名額並不多。然而，國王學院的主考官們比起學生能把公式背得多熟，更看重是否具備獨立思考的能力。他們高度評價那些以不同於常人的途徑解決問題的學生。在雪伯恩被評為解題缺乏條理的圖靈，其解題方式在這裡反而成了優勢。

自由的學風

1931年10月，圖靈成為國王學院數學系的學生。國王學院是以自由與包容氛圍聞名的地方。在帶動這種氛圍的學者之中，包括經濟學家約翰·梅納德·凱因斯。凱因斯日後提出了改變

世界許多國家經濟政策的理論。在國王學院，學生與教授在餐廳一同用餐，不論年齡與家世背景共同交流想法，也完全不會將想法與眾不同的人視為異類。

這樣的環境非常適合圖靈。圖靈不修邊幅，說話時也經常結巴猶豫。在雪伯恩，他常因為這些舉止受到責難，但在國王學院，沒有人會因為這種事責備圖靈。圖靈不再因他人的評價而畏縮，自由穿梭於數學、物理學、邏輯學與哲學之間，閱讀並思考。

靠自己的力量找到的答案

圖靈在這個時期是如何學習的，可以從他於1932年1月31日所寫的信件中略見一斑。根據信件內容，圖靈靠自己的力量證明了一道數學難題。然而後來才發現，波蘭數學家瓦茨瓦夫·謝爾賓斯基早已證明過這條定理。他在未獲得任何人幫助的情況下，得出了與著名數學家完全相同的結論。

這種事情在圖靈身上發生過好幾次。圖靈在從書本尋找答案之前，習慣先自己試著解題，因此經常重新發現他人早已找出的成果。這雖然是更耗費時間的方法，但圖靈藉此培養了不走他人開拓好的道路、而是走出屬於自己之路的能力。這種自己開拓道路的習慣，日後也促成了他當選研究員。

從書籍與課堂中獲得的提問

雖然有著自己解題的習慣，但這並不意味著圖靈遠離書本。圖靈也讀了許多深奧的書籍。他研讀了匈牙利裔數學家約翰·馮·諾伊曼於1932年出版的《量子力學的數學基礎》。量子力學是解釋原子等極微小世界中所發生現象的物理學。失去莫卡姆之後，圖靈一直好奇心靈與肉體之間究竟有何種關係，而量子力學恰好與這個疑問息息相關。1933年，他閱讀了英國哲學家伯特蘭·羅素的《數理哲學導論》。這是一本探討數學建立在何種基礎之上的書。幾年後圖靈構想出電腦原理時，這些閱讀經驗成了重要的基石。

圖靈也參加了課程與學會聚會。1933年秋天，他聽了天文學家亞瑟·愛丁頓講授的科學方法論課程，同年底在討論哲學的聚會「道德科學俱樂部」發表了關於數學與邏輯的報告。其中，愛丁頓的課程引領圖靈展開了他的第1項重大研究。

對世界的關懷

在圖靈就讀大學的1930年代初期，歐洲局勢動盪不安。大蕭條使許多人失去工作，而在德國，希特勒於1933年奪得政權。在劍橋學生之中，反對戰爭與法西斯主義的呼聲也日益高漲。

法西斯主義是一種主張國家踐踏個人自由、並以武力壓迫他國的思想。圖靈也參與了這項運動。1933年5月，他加入了名為反戰委員會的學生團體，同年11月還參與了抗議煽動戰爭電影的示威遊行。

輝煌的畢業

劍橋數學系的學生必須參加名為「Tripos」的畢業考試。這是一門以考題艱深聞名的考試。圖靈於1934年6月在此考試中獲得最優等成績，取得學士學位。他同時還獲得了僅授予成績特別優異學生的特別標記。曾在雪伯恩令人擔憂的學生，成了劍橋數學系屈指可數的傑出畢業生。

4.2 獨立的數學成果

始於愛丁頓課堂的提問

圖靈的第1項重大研究始於畢業考試之前、他在1933年秋天所聽的愛丁頓課程。愛丁頓在課堂上解釋了實驗測量值是如何分散的。如果多次測量同一個物體的長度，得出的數值都會有些微差異。當測量中疊加了許多微小誤差時，測量值往往會集中在中央，越往兩端越稀疏。愛丁頓只是介紹了這種現象，並未深入證明。圖靈開始自行研究這種誤差分布是在何種條件下出現的。

鐘形曲線的秘密

圖靈鑽研的問題可以用骰子來解釋。擲1顆骰子時，從1到6的任何數字出現的機率都是相同的。這次我們考慮擲2顆骰子並將兩個數字相加的情況。總和要得到2，兩顆骰子必須都是1。相對地，總和為7的情況則有1與6、2與5、3與4等多種組合。因此7出現得最頻繁。雖然每顆骰子本身不偏向任何一個數字，但總和卻會集中在中間值。

若將骰子增加到10顆、100顆來計算總和，並將這件事重複無數次繪製成圖表，就會呈現出獨特的形狀。這是一條中央隆起、越往兩端越低的鐘形曲線。在疊加了許多微小因素的測量誤差中，也能看見類似的形狀。然而，並非只要收集大量資料就一定會形成這種形狀。數學家將這條曲線稱為常態分布。由於德國數學家卡爾·弗里德里希·高斯曾深入研究這條曲線，因此它也被稱為高斯分布。

闡明總和的分布在何種條件下會趨近於鐘形曲線的，正是中央極限定理。簡單的例子如多次投擲相同且互不影響的骰子。在各個結果遵循相同的機率規則，且平均值與離散程度為有限的條件下，當調整總和的中心與寬度進行比較時，總和的分布會趨近於常態分布。即使在遵循不同機率規則的情況下，只要符合追加條件，此結果依然成立。圖靈研究的正是這些條件。該定理廣泛應用於民意調查或評估實驗結果誤差的統計方法中。

圖靈大約在1934年2月完成了該定理的證明。當時他還是一名大學生。

早已由他人證明的定理

然而卻出現了一個問題。這條定理早已由芬蘭數學家亞爾·瓦爾德馬爾·林德伯格於1922年證明並發表。圖靈直到完成證明為止都不知道這件事。就像謝爾賓斯基的那次一樣，他又靠著自己的力量重新得出了他人早已找到的答案。

在理應揭示嶄新事實的研究中，重新提出已知結果通常很難獲得好評。然而國王學院的學者們比起結果本身，更看重得出該結果背後的思維力量。數學家菲利普·霍爾建議圖靈將這項研究整理成申請研究員的論文。

研究員論文

畢業後，圖靈決心成為國王學院的研究員（Fellow）。研究員是學院親自選拔的研究人員。一旦成為研究員，就能在學院內獲得一間房間，在餐廳與教授們一同用餐，並在領取薪酬的同時全心投入研究。此外也具備了教導學生的資格。這是任何年輕學者都夢寐以求的職位。

要成為研究員，必須提交研究論文。圖靈於1934年11月提交了題為〈論高斯誤差函數〉的論文。在這篇論文中，圖靈以自己獨特的方法從頭到尾完整證明了中央極限定理。審查該論文的數學家阿布拉姆·貝西科維奇評價圖靈的證明具有原創性。他在審查報告中表示，如果這篇論文發表在林德伯格之前，將會成為那一年數學界屈指可數的重大成果。

凱因斯的午餐邀約

約翰·梅納德·凱因斯也參與了研究員的遴選。凱因斯是在國王學院具有巨大影響力的學者。1935年3月11日，凱因斯邀請身為候選人的圖靈共進午餐。當天，他寫信給身為芭蕾舞者的妻子莉迪亞·洛波科娃。凱因斯在信中寫道，他親自會見了書面資料上看起來最優秀的候選人，連指甲都仔細端詳了一番，那是個非常優秀的年輕人，名字叫圖靈。

凱因斯端詳指甲是有原因的。據說凱因斯初次與人見面時有仔細看對方雙手的習慣，而且不喜歡咬指甲的人。這雖然看似微不足道的軼事，卻充分展現出學院的大老對圖靈的重視，甚至親自會見這位22歲的候選人。這段軼事也記載在記述凱因斯生平的傳記中。

22歲的研究員

5天後的1935年3月16日，國王學院選任圖靈為研究員。當時圖靈年僅22歲，大學畢業還不滿1年。在如此年輕的年紀成為研究員是極為罕見的。

成為研究員的圖靈隨即投入研究。1935年4月，他將題為〈左右幾乎週期性的等價性〉的論文寄給了《倫敦數學學會期刊》。這是圖靈在學術期刊上發表的第一篇論文。隔年的1936年，他憑藉中央極限定理的研究榮獲史密斯獎。史密斯獎是劍橋大學頒發給數學領域優秀年輕學者的獎項。

中央極限定理的研究本身在那之後幾乎被遺忘了。人們並不將圖靈銘記為研究機率與統計的數學家。然而，此時累積的機率知識，在幾年後的第2次世界大戰中被用於破解德軍密碼。深刻理解偶然性是如何累積的這項經驗，在截然不同的領域發揮了巨大的力量。

4.3 學術自由與同性戀認同

無須隱藏之地

國王學院給予圖靈的不僅僅是數學成果。圖靈在這裡能夠坦誠地面對自己是個怎樣的人。圖靈不是對女性，而是對男性產生愛意的人。他在雪伯恩學校時期對莫卡姆所抱持的情感，也是這樣的心意。

在當時的英國，這是必須隱瞞的事情。英國法律將男性之間的特定性行為定為犯罪並予以處罰。1885年的《刑法修正案》將男性之間的「嚴重猥褻行為」列為處罰對象，且同樣適用於在私人場所發生的行為。一旦被發現，可能會失去工作並銀鐐入獄。因此，喜愛同性的人大多隱瞞這個事實生活著。

國王學院的氛圍與外面的世界截然不同。以凱因斯為首的學院眾多學者，並不會對誰愛上誰說三道四。在這些人當中，也有喜愛同性的人。雖然在學院圍牆之外法律依然令人畏懼，但在學院內部親近的朋友之間，並不需要刻意隱瞞。圖靈在這樣的氛圍中，逐漸接納了身為同性戀者的自己。他既不以此為恥，也不勉強去改變。圖靈終生保持了這種態度。

交心的朋友們

在劍橋，圖靈結交了能夠推心置腹的朋友。大衛·錢珀瑙恩是與圖靈同年進入國王學院的數學獎學金生。朋友們都叫他「錢普」（Champ）。圖靈非常信任錢普，甚至會將寫有自己內心想法的文字給他看。錢普日後雖然成為經濟學家，但兩人的友誼長久維繫。1948年，他們還一起設計了下西洋棋的電腦程式。這個程式結合了兩人的名字，被稱為「圖羅錢普」（Turochamp）。

1933年，他與數學系的朋友詹姆斯·阿特金斯一同前往英格蘭西北部的湖區徒步旅行。湖區是湖泊與山巒交織的優美之地。以這次旅行為契機，兩人成為彼此傾慕的伴侶，這段關係持續了數年之久。

圖靈也與研讀古典學的年輕學者弗雷德·克萊頓過從甚密。克萊頓與圖靈一樣，是個反對戰爭與法西斯主義的人。圖靈與志趣相投的朋友們相處，將眼界拓展到了數學以外的世界。

運動與觀星

圖靈也喜歡活動身體。1935年5月，他作為國王學院划船俱樂部的划船選手出賽划槳。他也熱中於獨自長跑。跑步成為圖靈終生熱愛的運動，日後圖靈甚至跑出了不亞於馬拉松選手的優秀成績。

圖靈還有個與眾不同的愛好，就是觀察夜空中的星星來精準校對自己的手錶。星星會在特定的時刻經過特定的位置。圖靈利用這條規律校正了手錶的誤差。認為世界依照某種既定規律運行的想法，以及找出該規律並加以活用的過程，是圖靈一生樂此不疲的事。

自由孕育的思想

就這樣，圖靈在國王學院培養的並不僅僅是數學實力。他同時學會了相信自己的想法，以及與眾不同也無妨的心態。曾在雪伯恩孤獨自學的少年，在這裡收穫了摯友與恩師。然而，這份自由只能在學院圍牆之內享有。英國社會的法律依然如故，而這部法律日後將給圖靈的人生留下巨大的創痛。

與判定問題的相遇

成為研究員而得以專注於研究的1935年春天，圖靈聽了數學家馬克斯·紐曼的課程。課程名稱為「數學基礎」。紐曼在課堂上介紹了奧地利數學家庫爾特·哥德爾於1931年發表的不完

備性定理。不完備性定理指出：任何包含自然數基本算術、能以機械方式確定公理且不具矛盾的數學體系中，必定存在雖然為真、但單憑該體系本身卻無法證明的命題。

紐曼也一同探討了德國數學家大衛·希爾伯特提出的判定問題。判定問題是關於1階邏輯的提問。1階邏輯是處理個體性質與關係的基本邏輯體系。在該體系中，是否存在一種程序，能始終判定給定的陳述是否可由邏輯規則加以證明，這就是判定問題。希爾伯特深信必然存在這樣的方法。圖靈開始深入鑽研這個問題。

1935年夏天，圖靈在劍橋附近的格蘭徹斯特草地上跑步休息時，反覆琢磨了這個問題。隨後他找到了破解問題的線索：將人類用鉛筆和紙張計算的過程，分解成極為簡單的動作，會是怎樣的呢？這個想法促成了1936年的論文〈論可計算數及其在判定問題上的應用〉。如今我們稱為圖靈機的想像中的機器，以及作為所有電腦原理基礎的通用機，正是誕生於這篇論文。

第5章 可計算數與通用圖靈機（1935–1936）

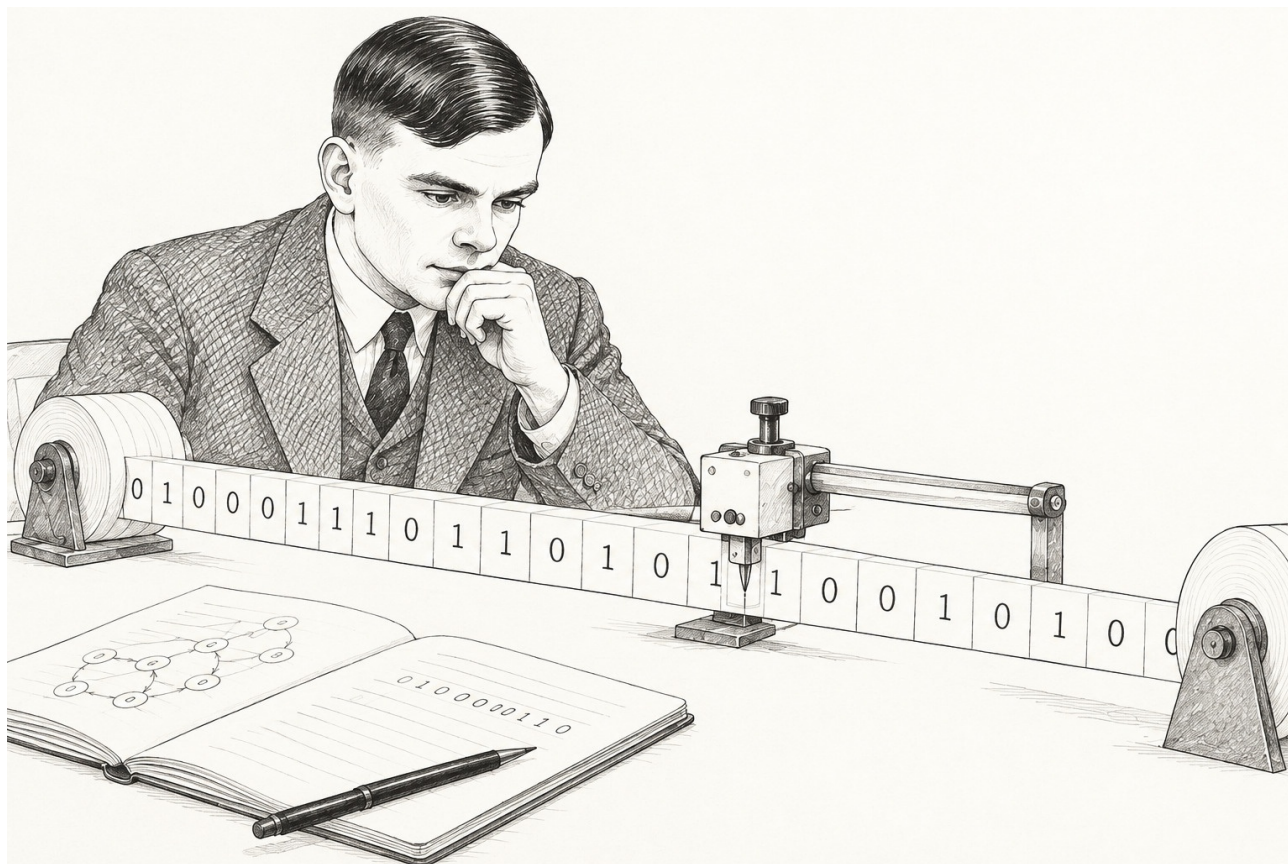


圖 5. 以紙帶與規則進行計算的圖靈機概念圖。

1935年3月，劍橋大學國王學院選任艾倫·圖靈為研究員（Fellow）。那年春天，圖靈22歲。成為研究員後，圖靈獲得學校提供的住宿與研究經費，得以盡情從事自己想做的研究。正是在那個春天，圖靈遇到了一個數學家們長久未能解決的問題。為了解答這個問題，他在腦海中構想了一台機器，而紙上的這個計算模型，日後成為理解通用電腦原理的重要基礎。

5.1. 希爾伯特的判定問題

這個問題源自德國數學家大衛·希爾伯特（David Hilbert）。希爾伯特是引領20世紀初數學諸多領域的學者。他希望能將數學建立成一座天衣無縫的嚴密建築。他希望從數學家稱為「公理」的幾條基本規則出發，能夠證明或反駁所有的數學命題。

要實現這個目標，數學必須回答三個問題。第一是數學是否完備的問題，也就是能否證明所有為真的命題；第二是數學是否無矛盾的問題，也就是是否不會出現同時證明某個命題與其反面命題的情況；第三是數學是否可判定的問題，也就是無論給定任何數學命題，是否存在一種只要按部就班遵循，就能得出該命題是否可被證明之答案的方法。

針對第三個問題，希爾伯特提出的具體問題是以一階邏輯的命題為對象。一階邏輯是處理個體的性質與關係的基本邏輯體系。這個問題探討的是：是否存在某種程序，能夠始終判定這類命題是否可依據邏輯規則加以證明。德語稱為「Entscheidungsproblem」，中文則稱為「判定問題」。希爾伯特在1928年與同事威廉·阿克曼（Wilhelm Ackermann）合著的邏輯學著作中，將此問題列為數理邏輯的重要課題。只要想像一本說明書，就很容易理解判定問題的要求。任何人只要輸入一個數學命題，嚴格按照說明書上寫的步驟操作，最後就會得出「可證明」或「不可證明」的答案。如果真有這樣的說明書，數學家就不用徹夜苦思了；只要輸入命題並照步驟執行即可。希爾伯特堅信，這樣的方法有朝一日一定會出現。

然而在1931年，奧地利年輕數學家庫爾特·哥德爾（Kurt Gödel）讓希爾伯特的夢想出現了裂痕。哥德爾發表的「不完備定理」是以具備特定條件的數學體系為對象。包含自然數的基本算術、公理可由機械化方式判定，且無矛盾的體系，正是其條件。哥德爾證明了：只要符合這樣的體系，其中必定存在雖然為真、卻無法僅憑該體系自身的規則予以證明的命題。他還指出，這樣的體系甚至無法單靠自身體系的方法，來證明自身是沒有矛盾的。

哥德爾並非證明了整個數學存在矛盾。只不過對於希爾伯特的第一個問題，答案已經明確是否定的；而關於第二個問題，也揭示了無矛盾的體系無法自我證明其無矛盾性的局限。然而，第三個問題——判定問題，依然沒有人能夠解決。

圖靈遇見這個問題的地方，是馬克斯·紐曼（Max Newman）的課堂。紐曼是劍橋大學的數學家，同時研究探討圖形性質的拓撲學與數理邏輯。1935年春天，紐曼開設了一門名為「數學基礎（Foundations of Mathematics）」的高階課程，圖靈選修了這門課。紐曼詳細講解了哥德爾的不完備定理後，介紹了希爾伯特的判定問題。接著他問道：是否存在一種能夠告知數學命題能否被證明的「機械化方法」？

所謂「機械化方法」，是指無需動腦思索，只要遵循預先寫好的規則即可進行的方法。小學學到的直式加法就是很好的例子。從個位數開始相加，如果超過10，就向高位進1。只要遵守規則，無論由誰來算都會得出相同的答案。這樣的方法被稱為「演算法」。

問題在於當時的數學家並未確切定義何謂「機械化方法」。大家直覺上雖然明白，卻沒有人用嚴密的數學語言將其寫下來。若要對判定問題給出「是的」這種肯定回答，即便沒有這樣的定義也無妨，因為只要找出並展示一種這樣的方法即可。但若要回答「世上絕無這種方法」，情況就截然不同了。必須檢驗所有可能的方法，而要做到這一點，就必須先定義何謂「方法」。這就像要宣稱「任何選手都不得進入運動場」之前，必須先界定誰是選手一樣。

圖靈緊抓著這個問題，獨自陷入了沉思。為圖靈撰寫傳記的安德魯·霍奇斯（Andrew Hodges）記錄了1935年初夏的一個場景。圖靈在劍橋附近的格蘭徹斯特草地（Grantchester Meadows）沿著康河漫步，躺在草地上休息時，腦海中浮現了核心靈感。這個想法就是：不要用艱澀的公式來定義「機械化方法」，而是將人在計算時實際進行的事情拆解為極微小的動作，轉化為機器的運作。

5.2. 歷史性論文的誕生

從1935年夏天到1936年春天，圖靈幾乎是獨自進行研究。他鮮少與其他學者交流意見。他就像在身旁觀察一個正在計算的人一樣，仔細審視自己腦海中發生的一切。

在1930年代，「電腦（computer）」這個詞指的不是機器，而是人。在政府機關或天文台整天計算數字的職員就被稱為計算員（computer）。圖靈想到了這樣的人拿著鉛筆在方格紙筆記本上計算的情景。人在計算時，會在格子裡寫下數字、擦除、把視線移到相鄰的格子，並記住自己當下正在做什麼。

圖靈在這個過程中只保留了計算所不可或缺的要素，並將其拆解得更為細小。筆記本的方格雖然是縱橫交錯展開的，但就算把格子連綴成一長條，對計算也不會有任何影響。由於人一

次只能看幾個格子，因此機器一次也只需看一個格子即可。由於人的記憶是有限的，因此機器所記憶的狀態也只需幾種便已足夠。能夠使用的符號也只需幾種即可。

就這樣，圖靈想像中的機器具備了具體雛形。這台機器由四個部分組成。第一是紙帶。這是一條劃分成許多格子的長紙帶，若有需要可以向兩端無限延伸。每個格子裡可以寫入一個符號。第二是讀寫頭，英文稱為head。讀寫頭位於紙帶的其中一格之上，負責讀取該格的符號。它可以寫入新符號或擦除原有符號，並能向左或向右移動一格。

第三是機器的狀態。正如人會記住「現在正在進位」一樣，機器也以狀態來記住自己目前處於哪一個步驟。狀態的數量是有限的。第四是規則表。這是一張彙整了各種規則的表格，例如「若當前狀態為甲，且讀寫頭讀到的符號為0，則在該格寫入1，向右移動一格，並將狀態轉變為乙」。

機器只會參照規則表一步步運作，不做其他任何事情。圖靈在論文中舉出的第一個範例，是一台交替且無止境地寫下0與1的機器。這台機器僅憑4個狀態與4行規則，就能在紙帶上永無休止地寫下0、1、0、1。

圖靈取「自動機器（automatic machine）」之意，將這台機器稱為「a-機器」。我們如今所稱的「圖靈機」，則是美國邏輯學家阿隆佐·邱奇（Alonzo Church）於1937年在介紹圖靈論文的書評中首次使用的名稱。

圖靈的機器乍看之下微不足道。但圖靈主張，只要是人類遵循規則所能進行的任何計算，這台機器也同樣都能做到。因為無論多麼複雜的計算，歸根結底不過是反覆多次進行讀取一格、寫入一格、移動一格以及改變狀態而已。紐曼課堂上懸而未決的「機械化方法」之定義，圖靈等於是用這台機器所能做到的事情為其下了定義。

論文題目中出現的「可計算數」，也是藉由這台機器來定義的。圖靈把機器依據規則能夠逐一且無限寫出小數點後數字的數，稱為可計算數。圓周率 π 雖然是3.14159...這樣無限延續，但擁有適當規則表的機器可以將這些數字一個接一個持續寫下去，因此 π 是可計算數；自然常數 e 也是如此。然而，圖靈也證明了存在著即便可以用言語描述、卻無法由任何機器寫出其小數點後數字的數。這是表明可計算的世界存在極限的第一個信號。

1936年4月，圖靈將幾乎完成的手稿拿給紐曼看。正巧在那個時候，從美國傳來了一則消息。普林斯頓大學的阿隆佐·邱奇以其獨創的「 λ 演算（ λ -calculus）」解決了判定問題。邱奇於1936年在《美國數學期刊》（American Journal of Mathematics）發表了〈初等數論中

不可解的問題〉（An Unsolvable Problem of Elementary Number Theory），證明了存在 λ 演算無法解決的數論問題；並於同年在短篇論文〈關於判定問題的備忘錄〉（A Note on the Entscheidungsproblem）中直接探討了希爾伯特的判定問題。邱奇給出的答案也是「並無此種方法」。

得知自己傾注近1年心血的研究竟被別人搶先得出答案，圖靈大失所望。然而，紐曼對圖靈的論文卻有著不同的看法。因為即便結論相同，通往該結論的途徑卻截然不同。邱奇的 λ 演算是逐步替換符號的抽象函數語言；而圖靈的機器則是將人類計算的過程原原本本地呈現出來，任何人都能如歷歷在目般理解何謂「機械化方法」。紐曼致信倫敦數學學會，說明圖靈是在完全獨立於邱奇的情況下進行研究，並極力懇請刊登圖靈的論文。他同時也寫信給邱奇，向其引薦了圖靈。

1936年5月28日，倫敦數學學會收到了圖靈的論文〈論可計算數及其在判定問題上的應用〉（On Computable Numbers, with an Application to the Entscheidungsproblem）。當時圖靈23歲。同年8月，圖靈在論文末尾補充了一篇附錄。這是一項證明：凡是能用他的機器計算的事物，與能用邱奇的 λ 演算表達的事物完全相同。這表明了兩人是經由不同的途徑登上了同一座山頂。

倫敦數學學會於1936年11月30日與12月23日分兩次將這篇論文刊登於學會期刊《倫敦數學學會會刊》（Proceedings of the London Mathematical Society）第42卷上。總篇幅為36頁。隔年即1937年，圖靈在同一期刊上發表了一篇更正微小錯誤的簡短補遺。

後來的學者將邱奇與圖靈的構想結合起來，稱之為「邱奇-圖靈論題」。這一思想認為，凡是人類能以機械化方法計算的事物，都能由圖靈機來計算。電腦科學至今仍以此思想為基礎，來界定何謂「可計算」。

5.3. 停機問題與現代電腦的原型

圖靈在論文第6節中介紹了「通用機器（universal machine）」。

前面所見的圖靈機，每台機器所做的工作都只有一項。交替書寫0與1的機器只做這件事，書寫 π 的機器就只書寫 π 。若要做加法就必須有加法機，若要做乘法就必須有另外的乘法機。現實世界中的計算機器也是如此。以齒輪運轉的計算機，只能執行製造時所設定好的計算。

圖靈在此又向前邁進了一步。出發點在於：任何圖靈機的規則表，歸根結底都能寫成一串符號。圖靈制定了一種將規則表轉化為字串的方法，並稱之為「標準描述（standard description）」。將這一字串再轉化為一個大數字的結果，則稱為「描述數（description number）」。如此一來，每一台機器都會轉變為一個數字。

如果規則表能以符號記錄，那麼也可以將這些符號放在另一台機器的紙帶上。圖靈利用這一點設計了一台特殊的機器。在這台機器的紙帶前端，以符號記錄另一台機器的規則表；後端則放置該機器要進行計算的材料。這台特殊的機器逐行讀取前端的規則表，並在後端原樣模仿那台機器本該進行的動作。如果在紙帶放入加法機的規則表，它就執行加法；放入 π 機的規則表，它就書寫 π 。圖靈稱這台機器為「通用計算機器」，今日則稱之為「通用圖靈機」。圖靈在論文中寫道，可以建造出一台能計算任何可計算數列的單一機器。

若將這個想法換成今日的用語，就是只需一台機器，而要做的工作則由程式來決定。一支智慧型手機既能當計算機，又能當相機、遊戲機，原因就在於此。無需更換智慧型手機內部的零件，只要更換應用程式（App），執行的功能就會改變。圖靈在電子通用電腦問世之前的1936年，就以數學方式提出了這項原理。

通用機器還有一個值得關注的特點。通用機器將「指令」與「材料」以相同的符號一起記錄在同一條紙帶上。指令歸根結底也是資料的一種。現代電腦也是將程式與資料存放在同一個記憶體中運作，這種方式被稱為「內儲程式架構」。圖靈的通用機器正是該架構的理論起點。

1936年的圖靈機是一台既沒有實體紙帶也沒有實體讀寫頭的想像中機器。然而，這份想像不久後便化為現實。第二次世界大戰結束後的1945年至1946年間，圖靈在英國國家物理實驗室設計了名為ACE的電子計算機。1948年6月，曼徹斯特大學的「曼徹斯特寶貝」首次執行了儲存於記憶體中的程式。如今的筆記型電腦、智慧型手機以及人工智慧電腦，也都是透過更換程式來執行各種計算。通用圖靈機正是解釋這種計算能力的理論模型；而實體電腦的結構與零件設計，則是由眾多研究人員和工程技術人員共同發展出來的。

回到1936年的論文，通用機器也是圖靈用來解答判定問題的工具。掌握了通用機器的圖靈，開始尋找機器做不到的事情。因為若要對判定問題給出「否」的回答，就必須指出一個任何機器都無法解決的問題。

圖靈首先將機器分為兩類。一類是能夠無休止地持續寫出小數點後數字的機器，另一類則是只寫出有限個0與1便無法再寫出數字的機器。後者不僅包括中途徹底停下來的情况，也包括雖然持續運轉卻無法再寫出數字的情况。圖靈將前者稱為「無循環機器（circle-free

machine)」，將後者稱為「循環機器（circular machine）」。接著，他探討了是否能製造出一台判定機器，只要接收某台機器的描述數，就能始終辨別該機器究竟是無循環機器還是循環機器。

圖靈的答案是「無法製造」。圖靈原本的證明圍繞著區分循環機器與無循環機器的問題展開，過程相當複雜。今日在解釋計算的極限時，經常使用與此相關的「停機問題（halting problem）」。停機問題的內容是：給定任意程式與輸入時，無法打造出一個始終能判定該程式終究會結束工作而停機、還是永遠不會停機的程式。圖靈的論文中並未出現「停機問題」一詞；停機問題是後來在可計算性理論中被廣泛引用的闡釋方式。

停機問題的證明如下：假設存在一台機器，只要接收程式與輸入，就必定給出答案，並準確判定其執行是否會停機。利用這台判定機器，建構一個行為反其道而行的全新程式。這個新程式一旦接收某個程式的編號，就會詢問判定機器：若將該編號本身作為輸入傳給該程式，它是否會停機。若得到的答案是「會停機」，它就無休止地運轉；若答案是「不會停機」，它就立刻停機。現在，把這個新程式自身的編號輸入給它自己。如果判定機器預測它會停機，新程式反而不會停機；如果判定機器預測它不會停機，新程式卻會停機。無論哪種情況，預測都是錯誤的。因此，最初「存在能準確判定所有程式與輸入的機器」這項假設無法成立。

這個證明類似於「我現在說的是謊話」這句話。如果這句話為真，它就成了謊話；如果為假，它就成了實話。指向自身的語句引發了矛盾。圖靈以德國數學家格奧爾格·康托爾（Georg Cantor）研究無限時提出的「對角線論證法」為基礎，在數學上精確提煉了這個思想。

圖靈並未就此止步。他證明了「判斷某台機器是否會在紙帶上哪怕只寫下一次0」這個問題，也無法由機器解決。接著，他將這個問題轉化為希爾伯特所探討的邏輯學命題。如果存在解決判定問題的機械化方法，那麼用該方法也應該能解決「這台機器是否會寫下0」的問題；然而這個問題是不可解的。因此，不存在任何機械化方法能夠在所有情況下判定一階邏輯的命題是否可被證明。對於希爾伯特的判定問題，圖靈給出的答案是「不可能」。

這一結果並沒有只為數學家留下失望。知道什麼不可計算，與知道什麼可以計算同樣具有價值。今日的程式設計師深知，無法打造出能毫不遺漏揪出所有程式錯誤的檢查程式。因此，他們會並行採用多次測試與審查的方法。邱奇與圖靈的研究，成為共同理解計算之力量與極限的基石。

1936年9月，圖靈乘船橫渡大西洋前往美國普林斯頓。這是為了去見比自己更早解決判定問題的阿隆佐·邱奇，並與他共同展開研究。

第6章. 普林斯頓留學與神諭機 (1936-1938)

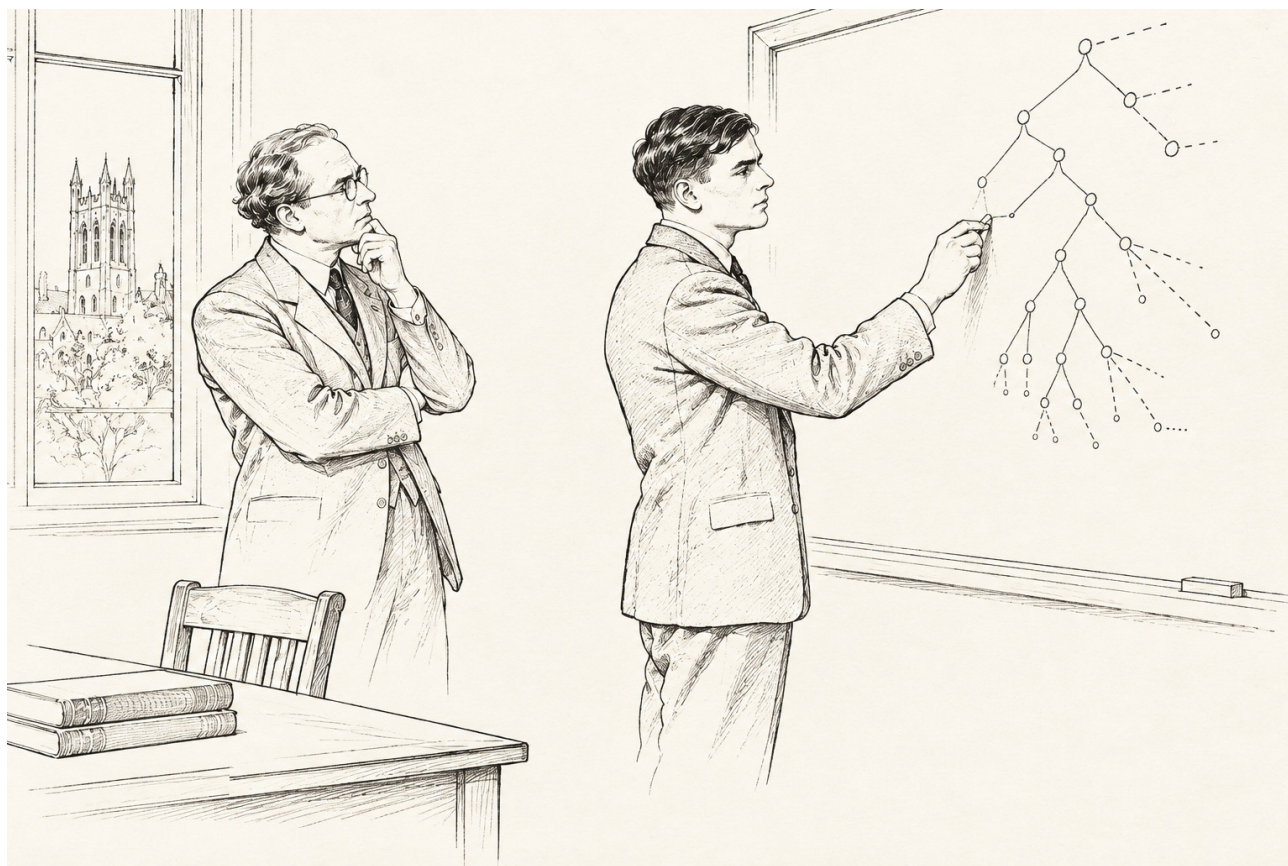


圖 6. 重現於普林斯頓研究邏輯時的樣貌。

1936年春天，身為劍橋大學國王學院年輕特別研究員（Fellow）的艾倫·圖靈，僅憑腦海中構想的一台機器，就為希爾伯特的判定問題給出了答案。然而幾乎在同一時期，美國普林斯頓大學的邏輯學家阿隆佐·邱奇也以完全不同的方法得出了相同的結論。圖靈等於慢了一步。在劍橋教導過圖靈的麥克斯·紐曼卻反而將這件事視為契機。因為圖靈習慣獨自埋頭研究，紐曼認為，若能留在同樣對該問題有深入研究的邱奇身邊學習，圖靈將會獲得極大的成長。於是，紐曼從中牽線，安排圖靈前往普林斯頓跟隨邱奇學習。

當時的普林斯頓並非只有邱奇一人。1930年代中期，希特勒與納粹在德國奪取政權，歐洲學術界籠罩在一片陰影之下。在哥廷根、柏林與維也納工作的傑數學者為了躲避迫害紛紛橫渡大西洋，其中許多人在美國紐澤西州的一座小大學城——普林斯頓落腳。隨著普林斯頓大學與新成立的高等研究院匯聚了世界頂尖的數學家，普林斯頓成了新興的數學之都。

就這樣展開的普林斯頓留學生活，從1936年9月一直延續到1938年夏天，歷時將近兩年。在這段期間，圖靈取得了博士學位，提出了名為神諭機的新構想，並親手組裝了電機設備。最後，他做出了改變自己人生方向的重大決定。

6.1. 與邱奇的研究及博士學位

1936年9月底，圖靈搭乘客輪貝倫加利亞號橫渡大西洋。圖靈在船上也一刻沒有閒著。他用名為六分儀的儀器測量太陽與星辰的高度，親自計算輪船目前航行到了何處。六分儀是昔日水手在茫茫大海上測定自身位置時使用的工具。圖靈在寫給母親莎拉·圖靈的信中提到了這件事。這正是圖靈從小就喜歡親手製作、親身驗證的一貫作風。

抵達紐約後，圖靈在普林斯頓大學研究生宿舍安頓了下來。當時普林斯頓數學系設在一座名為范恩大樓的建築內。大學數學系與高等研究院共用這棟建築，每天下午都有茶會時間。學者們端著茶杯聚在一起，針對數學問題自由交換意見。1936年10月6日，圖靈在寫給母親的信中列出了他在這裡遇見的學者姓名：約翰·馮·諾伊曼、赫爾曼·外爾、理查·庫朗、高德弗利·哈代、阿爾伯特·愛因斯坦、索羅門·萊夫謝茨，以及他的指導教授阿隆佐·邱奇。教科書上赫赫有名的學者們，此刻就在他的身旁。

圖靈在邱奇的指導下展開了博士研究。兩人雖然解答了相同的問題，但處理計算的方法卻截然不同。邱奇透過名為 Lambda 演算的方法來研究計算。Lambda 演算是一種僅以符號和規則來建立函數並進行計算的方法。圖靈則是構想出一台在紙帶上逐格讀寫的機器來解決同一個問題。兩人走過的道路雖然不同，抵達的終點卻是一致的。

然而，普林斯頓的生活從一開始並非一帆風順。1936年12月，圖靈在邱奇的建議下，於數學俱樂部發表了自己的論文〈論可計算數〉。然而前來聆聽演講的人並不多，因為當時知道圖靈這個名字的人還寥寥無幾。圖靈雖然感到失望，卻未曾停下研究的腳步。

明確闡明圖靈方法之優勢的人正是邱奇。邱奇承認圖靈的方法遠比其他方法更加通俗易懂且直觀。1937年，邱奇在介紹圖靈論文的文章中，首次將圖靈所構想的機器稱為「圖靈機」。如今出現在全球資訊科學教科書中的這個名詞，便是由此誕生的。

大約在此時，數學家們發現了邱奇的 Lambda 演算、庫爾特·哥德爾修飾的遞迴函數，以及圖靈機所能計算的範疇完全相同。遞迴函數是從簡單函數出發，透過反覆套用既定規則來建構更複雜函數的方法。三人循著不同的路徑攀登同一座大山，最終都登上了同一個山頂。由於三種起點截然不同的方法達到了相同的範疇，數學家們開始認為：凡是人類依照既定程序所能計算的一切，也都能以圖靈機進行計算。這一構想被稱為「邱奇-圖靈論題」。這使得彼此不同的計算方法得以依據單一標準進行比較。

圖靈的研究並未局限於邏輯學。他也研究了數學的另一個領域——群論。群論是研究數字或對稱等依照特定規則組合之對象的領域。圖靈將這些研究成果發表為數篇論文。

第一年的研究成果獲得了良好評價。普林斯頓大學在1937年至1938年的第二學年，選拔圖靈擔任珍·伊麗莎·普羅克特訪問研究員。多虧了這個職位，圖靈得以免除學費與生活費之憂，全心投入研究。IEEE 電腦學會（IEEE Computer Society）的記錄也記載道，圖靈於1936年至1938年在普林斯頓度過了兩年，其中第二年以普羅克特研究員的身分與邱奇共同進行研究。

6.2. 神諭機與序數邏輯

要理解圖靈在博士論文中所探討的問題，首先必須回到1931年。那一年，奧地利年輕數學家庫爾特·哥德爾證明了一項震撼數學界的真相：任何能夠涵蓋自然數加法與乘法等基本算術、規則明確得足以讓機器一一列舉，且自身不存在矛盾的規則系統中，必定存在雖然為真、卻無法僅憑該系統規則加以證明的命題。這便是著名的「哥德爾不完備定理」。

我們可以將這類數學系統的公理比喻為遊戲規則手冊。在具備上述條件的系統中，必定會留下僅憑規則手冊無法判定的命題。既然如此，便可以考慮額外增添一條規則來解決這種情況。圖靈深入研究的正是這個方法。如果將原本無法證明的真命題作為新規則補充進去，規則手

冊就會變得更加強大。然而，新的規則手冊依然滿足先前的條件，因此其中又會產生無法證明的命題。於是便再次予以增補。就這樣，規則手冊被一步一步不斷擴充下去。

這個步驟有如 1、2、3 一般無窮無盡地延續。然而圖靈並未在此止步。德國數學家格奧爾格·康托爾認為，就連無限也可以排列順序。在經過了所有的 1、2、3 之後，迎來的第一個位置被稱為 Omega，接下來則是 Omega 加 1，依此類推。像這樣超越無限持續延伸的順序，被稱為「超限序數」。圖靈沿著這種序數構建了一個讓規則手冊無限擴張的體系，並將其稱為「序數邏輯」。接著，他探討了能否藉由這種不斷增強的規則手冊，填補哥德爾所揭示的漏洞。

結果並非十全十美。圖靈自己表明，即便使用這種方法，也無法乾淨俐落地填補所有的漏洞。但在這一過程中，他對數學家的思考方式留下了至關重要的見解。圖靈認為，在數學推理中，有兩種能力在共同發揮作用：一種是技巧，另一種則是直覺。技巧是遵循既定規則一步步推演證明的敏銳能力，這可以由類似圖靈機的機器代勞；直覺則是能夠一眼看清該增添何種新規則、何種命題為真的洞察能力。圖靈解釋道，考慮到哥德爾定理，單憑技巧絕無法完善整個數學，在某些地方必然需要直覺的介入。機器與人類的思維究竟有何不同？這個問題自此終生伴隨著圖靈。

在這篇論文中，如今最廣為人知的部分另有所在，那就是神諭機。圖靈本人僅將神諭機作為輔助論文證明的工具短暫提及，並未進行更深入的研究。所謂的 Oracle，是指古希臘人向神明祈求旨意的神殿預言者，亦即「神諭」。圖靈設想在普通的圖靈機旁，附帶了這樣一個宛如神諭般的幫手。神諭是一種能針對預先設定的問題種類給出精確答案的假想裝置。以現今的例子而言，可以想像一個能夠回答一般程式停機問題的神諭：假定只要輸入程式與資料，它就能告知該程式是否終將停機。這種設定是為了探究：對於一般圖靈機在所有情況下都無法解答的問題，若有了這種幫助，究竟能解決到何種程度。

神諭機運作的方式很單純。平時它就像普通的圖靈機一樣讀寫紙帶並進行計算。一旦依照規則表輪到向神諭提問時，它便發送預定種類的提問並接收答案，然後繼續進行計算。神諭並非實際被發現的裝置，而是為了研究而設立的假設。因此，這裡並不探討其產生答案的物理原理。

這一構想為數學開闢了嶄新的道路。多虧了神諭機，數學家得以提出新的問題：如果有一個能給出問題 A 答案的幫手，是否就能借助其力量解出問題 B？這被稱為「相對可計算性」。若以數學考試作比喻，就如同探討「若已知上一題的答案，是否就能解出下一題」。藉由這

種方式，便能比較問題之間的計算難度。不過，並非所有問題都能排列成單一先後順序，也存在著即便利用對方的答案也無法解出彼此問題的關係。

圖靈指出，即便附加了神諭，計算的極限也依然不會消失。若以現代的停機問題來解釋：僅憑某個特定神諭的協助，並無法隨時判定所有使用該神諭的程式是否都會停機。即使增添了一種援助，依然會留下超出其能力範疇的問題。

將圖靈隨筆帶過的這一構想發揚光大的，是後世的學者們。在以美國邏輯學家埃米爾·波斯特為首的學者研究中，誕生了將問題難度分級劃分的「圖靈度」，以及將一個問題轉換為另一個問題來求解的「圖靈歸約」等概念。如今資訊科學家在比較問題難度時所使用的方法，也都植根於這一思想。

圖靈完成論文後，於1938年5月底將其寄送給倫敦數學學會。隨後於1938年6月，他自普林斯頓大學獲得了博士學位。論文題目為《基於序數的邏輯系統》。這篇論文經修訂後，於1939年刊登於《倫敦數學學會會刊》第45卷，篇幅達68頁。

6.3. 返國的決定

身在普林斯頓的圖靈並未只守著紙和筆。他的興趣延伸到了邏輯學之外，其中之一便是密碼。在抵達普林斯頓不久後的1936年10月14日家信中，有一段耐人尋味的內容：圖靈好奇最普遍形式的密碼究竟為何，並告訴父母自己正在構思一種他人難以破解、卻能迅速產生的密碼。當時誰也沒有料到，這份興趣會在數年之後將圖靈引領至戰爭的核心。

圖靈並未將構想僅停留在紙面上。他從小就是個會修理鋼筆、親手製作化學實驗器材的孩子。在普林斯頓，這個習慣依然如故。圖靈借用了物理系的機械工坊，親手製作了用作開關的繼電器。

繼電器是當時電話交換機所使用的電子開關。通電時，微型電磁鐵會吸引金屬片接通電路；斷電時，金屬片彈開，電路隨之切斷。它只有開與關兩種狀態。圖靈注意到這兩種狀態可以視為數字 1 與 0。僅用 0 與 1 兩個數字表示所有數值的方法稱為二進位。圖靈用導線連接繼電器並進行焊接，開始打造一台以二進位執行乘法的機器。他實際完成了整台機器中的三、四個階段。傳記作家安德魯·霍奇斯解釋說，這台乘法器與圖靈利用大數相乘來建構密碼的構想緊密相連。圖靈在進行抽象計算研究的同時，也展開了打造實際計算裝置的實驗。

大約在此時，圖靈也對數學界古老的謎題——黎曼猜想產生了興趣。黎曼猜想是與質數分布規律密切相關的問題。質數是指大於 1 的自然數中，只能被 1 和自身整除的數；而黎曼猜想至今仍未被破解。圖靈構想出一台以齒輪進行該問題相關計算的機器，並在返回英國後的 1939 年實際繪製了設計圖並開始加工齒輪。這台機器因戰爭爆發而未能完工。

在普林斯頓密切關注圖靈研究的人之中，包括了約翰·馮·諾伊曼。馮·諾伊曼是匈牙利裔數學家，日後以確立現代電腦架構而留名青史。兩人在 1935 年於劍橋初次相遇，圖靈在普林斯頓與馮·諾伊曼重續前緣。馮·諾伊曼注意到圖靈在他自己的主要研究領域——連續群理論中，也取得了嶄新的成果。

1938 年，在圖靈即將完成博士學位之際，馮·諾伊曼向他提出了一項提議：邀請他擔任自己在普林斯頓高等研究院的研究助理並留在美國。這是一個擁有優渥研究環境、能與世界頂尖學者共同研究，並享有穩定未來的職位。圖靈的父親朱利葉斯·圖靈也希望兒子能離開日益危險的歐洲，在美國安家落戶。

然而圖靈拒絕了這個提議。1938 年 5 月 17 日，他在寫給母親的信中透露，雖然收到了擔任馮·諾伊曼教授助理的職位邀請，但他予以婉拒，並決定返回劍橋。

圖靈決定回國有幾個原因。首先，歐洲局勢正在急劇惡化。1938 年 3 月，希特勒吞併了奧地利，隨後又威脅捷克斯洛伐克。許多人都預感到一場大戰即將來臨。

其次，劍橋大學國王學院是圖靈的學術故鄉。國王學院在自由的氛圍中，讓圖靈能夠保有真實的自我。1938 年春天，國王學院延長了圖靈的研究員（Fellow）資格。普林斯頓校友刊物也提到圖靈當時思鄉心切。一部傳記辭典記載，儘管當時劍橋並沒有講師職缺，圖靈依然選擇了回國。

1938 年夏天，圖靈取得博士學位後返回劍橋。等待著他的不僅僅是數學講堂。英國政府的機密密碼機構——政府密碼學校，為了防備即將爆發的對德戰爭而召募了圖靈。圖靈回國後在此接受了密碼解密培訓，並在不向任何人透露的情況下開始協助工作。在普林斯頓家信中所提及的對密碼的好奇心，如今即將轉變為攸關國家命運的重大使命。

在普林斯頓度過的兩年裡，圖靈同時推進了邏輯學研究與計算裝置的實驗。他在邱奇身邊撰寫的博士論文與神諭機表明，在可計算與不可計算之間存在著無數層級。在物理系工坊親手打造的繼電器乘法器，是將腦海中的機器轉化為現實機器的第一步。而毅然放棄馮·諾伊曼

的邀請、選擇返回英國的決定，更將圖靈引領至布萊切利園，引領至與恩尼格瑪密碼搏擊的戰場。

第7章. 入駐布萊切利園與密碼戰的開始（1938-1940）



圖 7. 描繪聚集在布萊切利園的研究人員的插圖。

在美國普林斯頓大學獲得博士學位的艾倫·圖靈於1938年夏天返回英國。當時26歲的他，是劍橋大學國王學院的研究員。所謂研究員，是指留在大學從事研究並指導學生的學者。

在他返回的歐洲，戰爭的陰雲密布。德國領導人希特勒在那年春天將奧地利併入德國，隨後又索求捷克斯洛伐克的領土。9月，英國與法國在德國慕尼黑與希特勒簽署協定，同意將捷克斯洛伐克的部分領土割讓給德國。雖然這是為了避免戰爭而做出的選擇，但許多人仍預感到一場大戰已迫在眉睫。

這段時期，圖靈所從事的工作也出現了轉變。在此之前，他是一位在黑板前書寫數學公式、研究想像中機器的安靜數學家。然而，英國政府打算將破解敵軍密碼的任務交給他，圖靈因而接下了一項不能對任何人透露的秘密任務。這項任務始於政府密碼機構為了備戰而籌備人力與場所的過程。

7.1. 政府密碼學校的召喚

要在戰爭中取勝，就必須先知道敵人打算做什麼。進入20世紀後，軍隊透過無線電通訊傳達命令。由於任何人都能截聽無線電波，軍隊便將訊息轉換成密碼發送。敵方唯有破解該密碼，才能得知對方的計畫。這種在看不見的地方展開的較量，被稱為密碼戰。

在英國負責這項工作的機構是政府密碼學校。其英文全名為 Government Code and Cypher School，簡稱 GC&CS。雖然名稱中帶有「學校」二字，但這裡並非教導學生的地方，而是一個秘密破譯他國密碼的情報機構。它就是今日英國情報機構政府通訊總部（GCHQ）的前身。該機構成立於1919年，曾由海軍軍官出身的阿拉斯泰爾·丹尼斯頓長期擔任實務負責人。

隨著戰爭逼近，政府密碼學校必須做好兩項準備：一是應對新型密碼的人才，二是在戰時也能安全開展工作的場所。

首先是人才問題。當時政府密碼學校的密碼破譯員大多是古典語言學者。他們是研究拉丁語和希臘語等古語言的人，擅長推敲詞彙與文句的含意。然而，德軍當時使用的卻是名為恩尼格瑪的密碼機。與人類用紙筆編製的密碼不同，恩尼格瑪透過電路與轉輪將字母無數次打亂。丹尼斯頓判定單憑語言能力無法戰勝這台機器。他擬定了一份戰事爆發時能立即徵召的人員應急名單。這份名單囊括了劍橋與牛津的數學家、邏輯學家及西洋棋高手。丹尼斯頓稱他們為「教授型人物」。英國召集如此眾多的數學家參與密碼破譯，在當時是相當罕見的事。

圖靈於1938年入選政府密碼學校。他參加了政府密碼學校開設的特別培訓課程。平時他繼續在劍橋從事研究，偶爾前往位於倫敦的總部與密碼專家們進行研討。對圖靈而言，密碼並非陌生的領域。他從學生時代起就對密碼與符號懷有濃厚興趣。在普林斯頓期間，他甚至曾親手製作以電氣開關進行乘法運算的小型機器。在他於1936年發表的論文中，構想出能依照規則讀取與寫入符號的想像機器。他這種能同時駕馭機器、符號與規則的能力，恰好非常適合用來對抗恩尼格瑪。

接下來是場所問題。一旦爆發戰爭，倫敦可能會遭受轟炸，因此需要將密碼機構遷往安全的鄉間。1938年5月，英國秘密情報局（MI6）首長休·辛克萊海軍上將買下了位於倫敦西北方白金漢郡的一處鄉間莊園與土地。當政府表示缺乏預算時，他自掏腰包拿出了6,000英鎊。這座莊園的名字叫布萊切利園。布萊切利地處牛津與劍橋之間，鄰近火車站與主要公路，非常便於召集兩所大學的學者。

同年秋天，情報機構與政府密碼學校的人員齊聚布萊切利園。為了隱匿身分，他們自稱為「雷德利上尉的狩獵聚會」，甚至帶來倫敦高級飯店的廚師，偽裝成前來度週末的賓客。在慕尼黑危機達到頂峰之際，他們在此實際演練密碼業務以備戰。人們後來也以代號「X站」來稱呼布萊切利園。這裡的X不是英文字母X，而是代表羅馬數字10。

如此籌備的人力與場所，在1939年夏末真正派上了用場。政府密碼學校於8月15日離開倫敦，遷至布萊切利園。9月1日，德軍入侵波蘭；兩天後的9月3日，英國對德國宣戰。第2次世界大戰就此爆發。宣戰後的次日，即1939年9月4日，圖靈便來到布萊切利園開始工作。他在布萊切利西邊的小村莊申利布魯克角的「王冠客棧」租了一間房間，並在那裡一直住到1944年夏天。

來到布萊切利園的所有人都簽署了依據《官方機密法》制定的誓約書。這是保證對在此所見所聞絕不向包括家人在內的任何人透露的承諾。圖靈始終恪守了這項承諾。因此，他在戰時所做的工作，直到他逝世約20年後的1970年代，才逐漸公諸於世。

7.2. 迪利·諾克斯與波蘭密碼局留下的禮物

來到布萊切利園的圖靈，加入了由迪利·諾克斯領導的恩尼格瑪研究小組。諾克斯的全名是艾爾弗雷德·迪爾溫·諾克斯。他與圖靈同樣畢業於國王學院，是一位專攻古希臘文學的學者，也是從第1次世界大戰起便破解敵軍密碼的資深專家。1937年西班牙內戰期間，他因破譯義大利海軍使用的恩尼格瑪而聲名大噪。只不過那台機器是結構比軍用恩尼格瑪更簡單的商用型號。

諾克斯的研究小組在莊園後方馬廐庭院裡的一座小木屋中工作。諾克斯與約翰·傑弗里斯、艾倫·圖靈、彼得·特溫一起在此安頓下來。人們直接稱這座建築為「小屋」。圖靈從1939年冬天到翌年初，一直在這座小屋裡與恩尼格瑪搏鬥。沒過多久，諾克斯便報告說圖靈不斷提出新穎的想法。

他們所面對的恩尼格瑪外表看起來像一台打字機。當按下鍵盤上的一個字母時，電流穿過機器內部，上方燈板上的另一個字母就會亮起。機器內部裝有三個被稱為「轉子」的輪盤。轉子內部布滿錯綜複雜的電線，將輸入的字母替換為另一個字母。每按壓一次字母，最右側的轉子就會轉動一格，其他轉子也會按照特定條件轉動。由於替換字母的線路狀態隨之改變，即使連續按下相同的A，顯示出來的也可能是完全不同的字母。轉子末端設有「反射器」，可將電流折返送回。在軍用恩尼格瑪上，還額外安裝了一種稱為「接線板」的裝置，這是一個透過插接導線將兩個字母相互交換的配電盤。

破譯這種密碼之所以困難，比起機器本身結構，更在於其設定。德軍通信兵每天都會依照規定的設定準備機器。每天更換放入哪些轉子、排列順序為何、轉子起始位置對準哪個字母，以及接線板上的哪些孔位彼此連接。1939年左右，如此可選擇的可能組合數量約為1垓5,900京種。這是一個在數字159後面接著18個0的龐大數字，比1億乘以1兆還要大。若是單靠人力逐一測試，耗費數百萬年也無法完成。德軍之所以深信恩尼格瑪是無法攻破的機器，原因正在於此。

然而，最早戰勝這台機器的並非英國人，而是波蘭人。由於波蘭與德國接壤，比任何人都更加憂心德軍的動向。波蘭密碼局挑選了三位在波茲南大學攻讀數學的年輕人：馬里安·雷耶夫斯基、耶日·魯日茨基與亨里克·齊加爾斯基。雷耶夫斯基於1932年秋天在華沙受命研究德軍的軍用恩尼格瑪，並於同年12月取得了重大的破譯成果。他運用名為「置換」的數學理論，推導出了轉子內部的線路連接。置換是探討將多個對象按特定順序排列方式的數學概念。法國情報機構從德國密碼部門內部的線人手中獲取的文件，也提供了極大的助益。波蘭以此為基礎，甚至仿製出與恩尼格瑪一模一樣的複製品。

此後數年間，波蘭團隊持續破譯德軍密碼，並親手製作協助破譯的工具。1938年秋天，他們打造出了一台協助破譯作業的電機設備，其名為「波姆巴」。在波蘭語中，這是炸彈的意思。關於為何取這個名字，流傳著多種說法。齊加爾斯基則構想出一種將多張打孔紙卡重疊比對的方法，人們將其稱為「齊加爾斯基穿孔紙板」。

然而德軍也並未坐以待斃。1938年12月，德軍將可使用的轉子從三個增加到了五個。雖然每次裝入機器的轉子仍為三個，但必須從五個之中選出三個並決定排列順序。因此，裝入轉

子的組合方式從6種增加到了60種，暴增為10倍。1939年1月，接線板上插接的導線數量也增加了。波蘭團隊若想跟上這一步伐，就必須製造比現在多出10倍的波姆巴。這對於一個小國的預算與人力而言，是一件難以承受的重擔。

隨著戰爭日益逼近，波蘭做出了一項重大決策。1939年7月25日與26日，波蘭、法國和英國的密碼專家在華沙附近會晤。會面地點位於華沙以南皮里森林中的波蘭密碼局秘密設施。英國方面由政府密碼學校負責人丹尼斯頓以及領導恩尼格瑪研究的諾克斯出席。波蘭毫無保留地展示了歷年來取得的成果，全盤傳授了轉子接線、波姆巴的設計以及齊加爾斯基穿孔紙板的原理。並且將仿製的恩尼格瑪機器向英國和法國各轉交了一台。

英國與法國的代表在此次會面中得知，波蘭的進展遠遠超前於他們。波蘭不僅早已破譯了大量德軍訊息，甚至還親自設計並製造出了協助破譯密碼的電機設備。分給英國的仿製機器於8月中旬經由法國情報官古斯塔夫·貝特朗之手送抵倫敦。當時距離德國入侵波蘭大約還有兩週。

在布萊切利園的小屋裡，圖靈仔細研讀了波蘭交接的資料。他高度評價雷耶夫斯基的數學造詣，同時也找出了波蘭方法中潛藏的弱點。當時德軍通信兵在每則訊息的最開頭，會將表示轉子起始位置的三個字母連續鍵入兩次。這是為了讓接收方萬無一失地辨識而養成的習慣。波蘭的波姆巴與齊加爾斯基穿孔紙板，正是以這種重複所產生的規律作為破譯線索。圖靈預見到，一旦德軍改掉這個習慣，波蘭式的方法將不再奏效。他的預測完全正確：德軍在1940年5月取消了這種重複操作。

因此，圖靈尋求了一條不依賴訊息開頭重複機制的全新途徑。他將目光轉向密文中可能包含的字詞。德軍的訊息中每天都會反覆出現相似的表述，例如預報天氣的詞彙、部隊番號，或是「無事可報」之類的語句。密碼破譯員將這種可預先推測的原文字句片段稱為「已知明文」。將已知明文與密文並列推敲，便能排除許多自相矛盾的機器設定候選值。圖靈希望由機器代替人工，快速找出這些矛盾。使用已知明文的方法，無論德軍如何更改訊息開頭的格式，都能持續發揮作用。

圖靈從1939年秋天至年底不斷完善這台機器的設計。為了紀念波蘭的波姆巴，他將這台新機器命名為「邦布機」。

在此期間，波蘭密碼團隊已離開了自己的祖國。戰爭爆發後，他們途經羅馬尼亞流亡至法國，並在距離巴黎東南方約40公里的秘密基地與法國合作，繼續進行恩尼格瑪的破譯工作。圖

靈於1940年1月在巴黎與波蘭密碼專家親自會面，並在此次會面中獲得了推動自身研究更進一步的關鍵線索。

邦布機的設計圖交給了英國製表機公司（BTM）的工程師哈羅德·基恩。他就是被同事們冠以「醫生」綽號的人。第一台邦布機於1940年3月進駐布萊切利園，人們將這台機器命名為「勝利號」，意即勝利。

7.3. 布萊切利園的怪咖教授

隨著戰爭持續進行，在布萊切利園工作的人數迅速攀升。1939年9月時僅有數十人，但到了大戰結束時，已有將近1萬人在這裡工作。數學家、語言學者、西洋棋選手、填字遊戲高手、機械工程師，以及為數眾多的女性職員都在此共同工作。

在如此眾多的人群中，圖靈依然格外引人注目。同事們稱他為「教授」，這是英文單詞「Professor」（教授）縮寫而成的綽號。雖然圖靈並非正式教授，但因其總是沉思冥想的學者風範而獲得了這個綽號。比起他人的目光，他更在乎何者合乎理性。同事與傳記作家們所傳述的幾則逸事，充分展現了他的這種性格。

第一則是防毒面具的故事。圖靈有著嚴重的花粉過敏症。每年到了6月，他都會為流鼻水和打噴嚏所苦。為了在騎自行車上下班時阻擋花粉，他戴上了防毒面具。戰時每個人都配發了一具防毒面具以防備毒氣攻擊，圖靈卻將其當成了防花粉口罩來戴。據說鄉村居民看到他戴著防毒面具在鄉間小路上騎行，還以為發生了什麼大事而大吃一驚。

第二則是自行車鏈條的故事。圖靈的自行車有個鏈條老是脫落的毛病。換作普通人，大概會送去修車店或換一條新鏈條。圖靈卻先找出了鏈條脫落的規律。他數了數踏板踩踏幾圈鏈條會脫落一次。此後，他便在心裡默默計算踩踏板的次數，在鏈條即將脫落的前一下車調整鏈條，然後繼續騎乘。據說後來他甚至在自行車上安裝了一個計算踏板旋轉次數的小裝置。這是一則生動展現出他即使面對一處故障，也習慣先找出週期與規律的軼事。

第三則是馬克杯的故事。在布萊切利園，喝茶用的馬克杯經常不翼而飛。為了保護自己的杯子，圖靈在手把上加了掛鎖，並用鐵鏈將其鎖在暖氣散熱器管道上。暖氣散熱器是指透過循環熱水為房間供暖的暖氣設備。為了一只杯子居然動用鐵鏈和掛鎖，這副模樣長久留在同事們的記憶中。

第四則是長跑的故事。圖靈熱愛長跑。當工作疲憊或思緒紛亂時，他常在布萊切利周邊的鄉間小路上長時間奔跑。據傳他甚至曾從布萊切利園一路奔跑約64公里（40英里）前往倫敦開會。大戰結束後，他的跑步實力甚至提升到了足以參加馬拉松比賽的水平。

光聽這些故事，圖靈或許看起來像個古怪離奇的人。然而他的行為舉止背後，始終有著其自成一套的理由。既然防毒面具能阻隔花粉就戴上它，既然掌握了鏈條脫落的週期就依此應對。這種比起他人眼光更優先考量原理的態度，在面對恩尼格瑪時也一以貫之。當其他人都說那是不可攻破的機器時，圖靈卻沉著冷靜地找出該機器所遵循的規則與破綻。

布萊切利園正是一個接納了這類怪才的地方。在這裡，實力與創意遠比著裝或禮儀更加重要。諾克斯本身也是以行為特立獨行著稱的人物，布萊切利園中更聚集了許多性格極其鮮明的人。在這樣的氛圍中，圖靈得以盡情思考與運算，充分施展自己的才華。

從1938年夏天到1939年冬天這段時間裡，圖靈的人生發生了巨大轉變。那位曾在紙上研究想像中機器的數學家，蛻變為與真實機器交鋒的密碼破譯家。他並非隻身開闢這條道路：有為其鋪路的波蘭數學家，有傾囊相授多年經驗的諾克斯，也有識得數學家潛力並將其召集而來的丹尼斯頓。圖靈以從他們那裡繼承的成果為基礎，建構出更寬廣、更堅實的方法。其最終成果便是邦布機。

第8章 解密機「炸彈機」(Bombe) 的設計與活躍 (1939~1941)

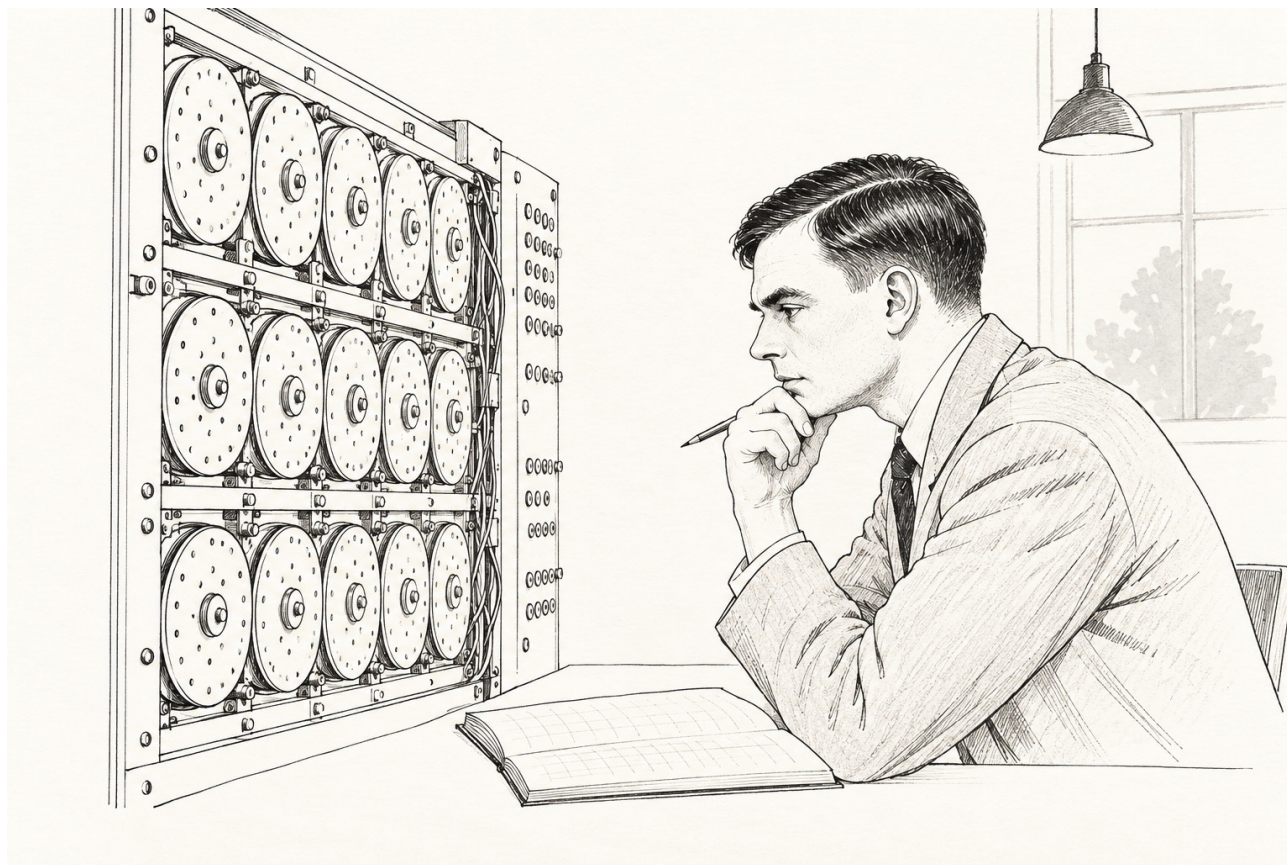


圖 8. 呈現利用炸彈機進行密碼解密研究的場景。

1939年9月3日，英國對德國宣戰，正式參加第二次世界大戰。坐落於倫敦西北方白金漢郡的古老莊園布萊切利園（Bletchley Park），自這一天起成為沒有槍聲的戰場。聚集在此的人們，不用槍械，而是以鉛筆、紙張以及頭腦來戰鬥。

對手是德軍的密碼機恩尼格瑪（Enigma）。恩尼格瑪是一個外觀宛如打字機的木盒。只要按下鍵盤，電流便會通過被稱為轉子的3個圓輪以及前方插線板的線路，轉變成另一個字母，並在上方的燈板上亮起該字母的燈。由於每鍵入一個字母，轉子就會轉動一格，因此即使連續按下兩次相同的A，每一次出現的字母也都會不同。

此外，德軍每天都會更換機器的設定。選用哪幾個轉子、依何種順序安裝、讓轉子從哪一個字母位置起始，以及用插線板的接線將哪些字母兩兩配對，全都會重新設定。以從5個轉子中挑選3個並插上10根接線的方式計算，可能的設定約達1垓5,900京種。若由人工逐一逐一核對，是就算幾個人窮盡一生也無法完成的數字。德軍之所以深信恩尼格瑪是任何人都無法破解的機器，原因便在於此。

27歲的艾倫·圖靈卻有不同的想法。他認為既然是機器製造的謎團，就能用機器來解開。圖靈在3年前的論文〈論可計算數〉中，曾將所有計算解釋為一連串極為簡單的機器動作。現在，正是把這個想法從紙上轉移到鋼鐵與線路的時候了。

8.1. 機電式解密機設計

始於波蘭的Bomba

圖靈在布萊切利園最初面對的工作，是研究波蘭轉交的技術。在戰爭爆發前夕的1939年7月，英國與法國的密碼專家齊聚於波蘭華沙附近的皮里（Piry）森林秘密基地。波蘭密碼局在此場合中，展示了他們數年來破解恩尼格瑪的方法以及仿製的機器。

其核心人物是波蘭數學家瑪麗安·雷耶夫斯基（Marian Rejewski）。雷耶夫斯基於1938年秋天打造了一台以電動馬達運轉的解密裝置，並將其命名為「Bomba」。Bomba抓住了德軍通信兵的一項習慣。當時德軍在傳送訊息時，會將該訊息所使用的3個字母金鑰，在開頭連續鍵入兩次發送。這是為了讓接收方能毫無失誤地接收並確認。例如金鑰若是DKV，就會將DKV DKV轉換為密文發送。連續發送兩次相同的字母，彼此之間就會顯現出規律，而Bomba正是利用了這個漏洞。

圖靈立刻看出了這種方法的弱點。由於Bomba依賴德軍的一項習慣，一旦德軍改變習慣便會失去作用。事實上，德軍此前就曾改變方式而增加波蘭解密的難度。1938年12月，當德軍將轉子種類從3種增加到5種時，可選擇的組合大幅增加，依照波蘭的方法就必須製造數倍於以往的機器。而且事實上，德軍自1940年5月1日起，便在大部分通信網中停止了連續發送兩次金鑰的做法。

名為Crib的新鑰匙

圖靈尋找即使德軍改變習慣也能適用的方法。那便是預先推測密文中必定會出現的字詞。布萊切利園的人將這種推測出的字詞稱為「Crib」。Crib原本是指英國學生在考試時暗中偷看的小抄。

之所以能推測出Crib，是因為德軍的報告中總是包含相似的詞彙。在每天早晨同一時間發送的天氣報告中，代表天氣的德語「WETTER」幾乎從不缺席。圖靈認為，將這類詞彙與實際密文逐字配對，並循著這些配對之間的關係推導，便能反向找出機器的設定。

恩尼格瑪的兩大弱點

在此方法中，圖靈所依據的是恩尼格瑪具備的兩項特性。

第一，在恩尼格瑪中，任何字母都不會轉變為其自身。這是因為機器最內側的反射器必然會將電流導向其他字母的路徑。按下A時，除了A以外，其餘25個字母中的某一個會亮起燈來。因此，將Crib疊在密文上比對時，若同一位置出現了相同的字母，該位置便是錯誤的位置。密碼解讀員便將Crib一格一格往旁移動，逐一排除這些位置。

第二，插線板的接線在兩端具有相同的雙向作用。若用接線連接A與E，A會變成E，E也會變成A。而且一個字母上只能插一根接線。

消除錯誤答案的機器

圖靈利用這項特性，將「先建立假設，若產生矛盾便捨棄該假設」的方法轉移到了機器電路上。這與數學上所使用的反證法思路相同。反證法是先假設某個內容為真，在進行推導檢驗時若得出自相矛盾的結果，便判定最初的假設為錯誤的方法。

例如，假設當轉子處於某個位置時，插線板上的A與E相連。將此假設依序套用至Crib的字母配對並持續推算，有時會得出A也必須與F相連的結果。由於一個字母只能插一根接線，這種

結果絕不可能成立。這意味著最初的假設是錯誤的。此時只要將包含轉子位置在內的該整套設定捨棄，並跳至下一個設定即可。

依序套用假設的Crib與密文字母配對，可以連貫繪製成圖表。布萊切利園的人將這張圖表稱為「菜單」（Menu）。在菜單中，字母形成環狀迴圈並繞回起始字母的部分越多，炸彈機（Bombe）便越能有效篩除錯誤設定。

炸彈機以電氣方式處理此一過程。電流在電路中繞行一圈所需的時間連一眨眼都不到。與其說炸彈機是找出正確答案的機器，倒不如說它是以極快速度消除錯誤答案的機器。當遇到未產生矛盾的設定時，機器便會停下來。接著工作人員便記下那一瞬間的轉子位置，直接輸入恩尼格瑪仿製機中，以確認是否為真正的答案。

以鋼鐵與線路打造的機器

圖靈的設計圖被送往位於萊奇沃思（Letchworth）的英國製表機公司（British Tabulating Machine Company, BTM）。該公司的工程師哈羅德·金恩（Harold Keen）在眾人間有著「醫生」（Doc）的綽號。金恩負責將圖靈的邏輯電路轉換為實際的開關、繼電器與齒輪。

後來廣泛使用的標準型炸彈機，是一台高與寬各接近2公尺、重約1噸的巨大鐵箱。正面整齊排列著充當恩尼格瑪轉子功能的圓形滾筒。3個滾筒相當於一台恩尼格瑪的作用，而一台炸彈機內部包含相當於36台恩尼格瑪的電路。單一滾筒的後方裝有104根細鐵絲刷，連接26個英文字母的電氣路徑。這些電路根據菜單，以捆綁了26條電線的電纜相互連接。

1940年3月18日，第一台炸彈機進駐布萊切利園的1號小屋（Hut 1）。人們將這台機器稱為「勝利號」（Victory），意即勝利。

8.2. 高登·韋爾奇曼的對角線板結合

「勝利號」的苦惱

「勝利號」在理論上是一台無可挑剔的機器，但實際使用後卻發現了問題。德軍用插線板的10根接線將26個字母中的20個兩兩配對。由於可能的情況數量過於龐大，「勝利號」若要確實篩除錯誤設定，菜單中就必須有多個字母繞回起始處的迴圈。而要構成這樣的迴圈，Crib就必須夠長。

然而，在實際密文中尋找冗長且確鑿的Crib並非易事。若以迴圈不足的菜單運轉炸彈機，機器便會在非正確答案之處頻繁停下。這被稱為「錯誤停機」（false stop）。由於每次停下都必須由人工手動確認，解密速度因而無法如預期般提升。

韋爾奇曼的構想

解決這個問題的人是高登·韋爾奇曼（Gordon Welchman）。韋爾奇曼出生於1906年，比圖靈年長6歲，曾在劍橋大學教授數學，隨後進入布萊切利園。他領導著負責德軍陸軍與空軍恩尼格瑪的6號小屋（Hut 6）。

在1939年底至1940年初之間，韋爾奇曼仔細研讀圖靈的炸彈機設計，察覺到炸彈機並未充分利用插線板的雙向特性。若A與E相連，則E與A也必然相連。將這項理所當然的事實同時套用於整台機器上，就能更快地找出矛盾。

韋爾奇曼將這個構想製成了被稱為「對角線板」（diagonal board）的裝置。對角線板是將26乘以26，即676個端子如棋盤般排列，並以對角線為基準將相對應的端子以導線相連的板子。當炸彈機電路感應到B與E的連接時，對角線板在那一瞬間也會將E與B的連接同時導入電路。如此一來，從某一處獲得的資訊便能立即傳播至整台機器。

韋爾奇曼在日後的回憶錄中寫道，當他向圖靈展示這個構想時，圖靈起初難以置信，但很快就欣喜萬分。對於改善了自己設計的同僚構想，圖靈欣然予以接納。

阿格努斯的誕生

裝上對角線板的炸彈機，即使藉由迴圈較少的簡短Crib，也能篩除絕大多數的錯誤設定。錯誤停機大幅減少，需要人工確認的工作量也隨之降低。

1940年8月8日，自始即配備對角線板打造的第二台炸彈機開始在布萊切利園運轉。其名稱取自拉丁語中代表「上帝的羔羊」的「Agnus Dei」，命名為「阿格努斯」（Agnus）。人們也親切地稱這台機器為阿格妮絲（Agnes）或艾姬（Aggie）。先前製造的「勝利號」也送回工廠重新裝上了對角線板。

這種結合了圖靈與韋爾奇曼構想的機器，在今天被稱為「圖靈-韋爾奇曼炸彈機」（Turing-Welchman Bombe）。這台炸彈機針對單一轉子安裝順序，僅用20多分鐘便能檢驗轉子的全部1萬7,576種位置（ $26 \times 26 \times 26$ ）。這在過去純靠人工是根本無法企及的任務。

炸彈機此後持續增加。操作機器的任務主要由英國皇家海軍女子服務隊（WRNS）隊員擔任。她們依照菜單插接電纜、更換滾筒，並在機器停下時記錄結果。至戰爭結束之際，在英國運轉的炸彈機已超過200台。

8.3. Crib攻擊與即時解密

尋找Crib的人們

炸彈機縱然再快，若未輸入正確的Crib也是徒勞無功。尋找Crib是人而非機器的工作。密碼解讀員孜孜不倦地觀察德軍通信兵的習慣與失誤。

德軍每天都會重複相同格式的報告。天氣報告、意指毫無狀況的「無特殊狀況」報告，以及像部隊番號與指揮官軍階等，總是在固定位置出現的詞彙。有些基地每天發送幾乎相同的文句，這些句子便成了密碼解讀員絕佳的Crib。

甚至還有刻意製造出Crib的作戰行動。英國皇家空軍在德軍使用的特定海域投放水雷。德軍隨後便會發送包含該地點名稱的警告訊息，密碼解讀員便以該地點名稱作為Crib。這項作戰被賦予了「園藝」（Gardening）的綽號。

最大的成果出現在德國空軍方面。布萊切利園稱為「紅色」（Red）的德國空軍密碼，通信兵失誤頻繁且Crib極為豐富。6號小屋自1940年5月22日起，幾乎每天都能破解該密碼。

最棘手的對手：德國海軍

圖靈所迎戰的對手，是更為棘手的德國海軍恩尼格瑪。布萊切利園將U型潛艇使用的這套海軍密碼稱為「海豚」（Dolphin）。

海軍密碼之所以變得至關重要，是因為大西洋的戰況。1940年6月法國投降後，率領德國潛艇部隊的卡爾·鄧尼茨（Karl Dönitz）海軍上將在包括洛里昂（Lorient）在內的法國大西洋沿岸港口建立了潛艇基地。德國潛艇U型潛艇得以輕易出擊至大西洋中央。鄧尼茨將多艘U型潛艇散佈在海域中，一旦其中一艘發現運輸船隊，便透過無線電召集其他潛艇發動協同圍攻。人們將此戰術稱為「狼群戰術」（Wolfpack）。身為島國的英國必須依賴船運從美國和加拿大運入糧食、燃料與武器，因此每當運輸船沉沒，英國的生命線便被一點一滴地切斷。

然而，德國海軍恩尼格瑪的防禦比陸軍和空軍更為堅固。陸軍和空軍從5個轉子中挑選3個，使用60種順序；海軍則額外製造了3個轉子，從8個中挑選3個。排列順序的種類增加到了336種。此外，海軍還使用專門編製的密碼本與雙字母轉換表，將訊息金鑰再次加密隱藏。因此，即便找到了Crib，在輸入炸彈機之前仍有許多關卡必須克服。

布萊切利園的許多人都搖頭認為海軍恩尼格瑪無法破解。圖靈卻正是被這一點所吸引。圖靈日後曾說，正因為無人著手該項工作，他才能獨自專注投入其中。圖靈掌管了8號小屋（Hut 8），展開了與海軍密碼的漫長搏鬥。為了縮短運轉炸彈機的時間，他還創立了利用機率與統計的新計算方法。

從海中打撈出的鑰匙

光靠數學仍有所不足。必須親手取得德國海軍的密碼資料。1940年4月26日，英國驅逐艦格里芬號（HMS Griffin）在挪威近海截獲了偽裝成荷蘭漁船的德國船隻波拉雷斯號（Polares）。多虧該船上查獲的文件，8號小屋得以破解1940年4月底數天內的海軍訊息。雖然解密耗時過長而無法立即用於作戰，但圖靈與同僚們藉此深入掌握了海軍恩尼格瑪的結構。

決定性的資料於次年落入手中。1941年5月9日，英國軍艦鬥牛犬號（HMS Bulldog）與奧布里埃塔號（HMS Aubrietia）在冰島以南海域攻擊了德國潛艇U-110，迫使其浮出水面。艇長弗里茨-尤里烏斯·倫普（Fritz-Julius Lemp）在棄艇逃生時喪生，由大衛·鮑姆（David Balme）少尉率領的英國水兵登上了即將沉沒的潛艇。他們將恩尼格瑪機與密碼本完好無損地帶了出來。

結合運用這批資料、炸彈機以及圖靈的計算方法，解密速度大幅加快。在1941年6～7月間，8號小屋甚至能在一小時之內解密接收到的海軍通信。

改變大西洋的航道

解密得出的情報被賦予「超級機密」（Ultra）的代號。Ultra情報隨即送交倫敦海軍部。海軍部查明U型潛艇埋伏的海域位置，並引導護航船隊繞道避開該海域。狼群最終只能守在空中無一物的茫茫大海。1941年下半年在大西洋沉沒的盟軍運輸船數量，比起上半年大幅銳減。

密碼解密對整場戰爭所造成的影響只能透過推估得知。有推估認為，布萊切利園的密碼解密使戰爭提前約2年結束。圖靈研究學者傑克·科普蘭（Jack Copeland）推估，若戰爭多持續2年以上，可能會有約1,400萬人以上額外喪生。這個數字是依計算方式不同而有所差異的

估計值。即便如此，絕大多數研究學者皆一致認為，密碼解密是改變大西洋戰役走向的強大力量。

1939年秋天，面對被認為無人能解的恩尼格瑪，圖靈選擇了以機器對抗機器之路。在這條道路上，凝聚了波蘭數學家的先驅研究、韋爾奇曼的對角線板、金恩的工程技術，以及日夜運轉炸彈機的無數隊員的雙手。炸彈機雖然是僅能執行單一任務的機器，但這種將人類思維轉移到電路上的經驗，成為引領至圖靈在戰後所欲打造的真正電腦的重要跳板。

第9章. Hut 8、海軍恩尼格瑪與班布里斯姆斯 (1940-1942)



圖9. 呈現了密碼解密與保護運輸船之間的關係。

1940年夏天德軍佔領法國後，英國在歐洲不得不獨自對抗德國。作為島國的英國，糧食、石油和武器的大部分都需從海外運入，載運這些物資的船隻成群結隊橫渡大西洋。像這樣一同航行的船群便稱為運輸船團。

率領德國海軍潛艦艦隊的卡爾·鄧尼茨海軍上將企圖切斷這條海上通道。他在法國西海岸的洛里昂等港口建立了潛艦基地。德國潛艦被稱為U艇，多艘U艇如同狼群圍獵般包圍並攻擊運輸船團。人們將這種方法稱為狼群戰術。溫斯頓·邱吉爾首相在戰後回憶道，戰爭期間真正讓他感到恐懼的，唯有U艇的威脅。

要防禦U艇，首先必須知道U艇的位置。U艇在海上透過無線電與司令部聯絡，而英國能夠攔截這些無線電通訊。問題在於，無線電的內容被一種名為海軍恩尼格瑪的密碼所隱藏。海軍恩尼格瑪比陸軍和空軍使用的恩尼格瑪更難破解，甚至在布萊切利園的幹部之間，也流傳著海軍密碼終究無法解讀的說法。

艾倫·圖靈的判斷卻有所不同。他認為既然沒有人願意接手海軍密碼，自己便能獨自放手深入研究。別人放棄的難題對他而言反而是絕佳的機會。就這樣，圖靈接手了專門負責海軍恩尼格瑪的團隊。由於該團隊工作的木製營房編號是8，因此團隊名稱也成了Hut 8。當時的圖靈是一位20多歲後半的年輕數學家。

9.1. Hut 8與U艇密碼

海軍恩尼格瑪之所以如此難以破解，有幾個原因。首先是轉子的數量。恩尼格瑪密碼機內裝有三個用來替換字母的圓輪，這些圓輪被稱為轉子。陸軍和空軍從五個轉子中挑選三個並依序裝入。如此一來，安裝轉子的組合方式就有60種。相較之下，海軍則是從八個轉子中挑選三個，組合方式便增加到了336種。從破解密碼的角度來看，需要檢驗的情況增加了5倍以上。

其次是隱藏指標的方式。使用恩尼格瑪發送的訊息，開頭都會附上一組簡短的字母組合。這被稱為指標，是用來告知收件人應該從哪個位置開始解讀訊息的標記。陸軍和空軍採用相對簡單的方法來隱藏指標。海軍則是從特殊的密碼手冊中挑選指標後，再使用將兩個字母替換為另兩個字母的對照表進行二次隱藏。如果不清楚這張對照表，即使收集到再多的訊息，也無法找到開始解密的切入點。

圖靈結合了波蘭密碼專家留下的舊資料與數學推理，到1939年底已在腦海中大致推導出這套指標系統的運作方式。然而，理解其結構與獲取實際使用的對照表完全是兩回事。對英國而

言，必須直接從德國艦船上繳獲密碼資料。布萊切利園的人們將這種行動稱為「夾取」（pinch），也就是順手牽羊的意思。

第一次機會出現在1940年4月26日的挪威外海。英國驅逐艦格里芬號截獲了偽裝成荷蘭漁船的德國海軍巡邏艇波拉雷斯號，在德國船員來不及銷毀的文件中，包含了4月下旬數日份的密碼設定。Hut 8利用這些資料回溯破解了過去的通訊。休·福斯於1940年11月破解了同年5月8日的海軍通訊。同事們所稱的「福斯日」，正是這份通訊的發送日期。儘管這已是時隔許久的舊通訊，卻是證明海軍恩尼格瑪能夠被破解的重要成果。

第二次機會出現在隔年春天。1941年3月4日，英國與挪威突擊隊襲擊了挪威的羅弗敦群島，從德國武裝拖網漁船克雷布斯號上繳獲了一套恩尼格瑪轉子和密碼資料。雖然克雷布斯號的艦長將恩尼格瑪密碼機扔進了大海，但留下的資料中包含了德國海軍2月份的密碼設定。

最大的機會出現在1941年5月9日。在冰島以南海域伺機襲擊運輸船團的U艇U-110，遭到英國軍艦門牛犬號與奧布列塔號的深水炸彈攻擊後浮出水面。深水炸彈是在水中引爆以攻擊潛艦的炸彈。艦長朱利葉斯·倫普上尉認為該艦即將沉沒，便下令船員棄船。然而，U-110並沒有沉沒。由大衛·鮑姆少尉率領的英國水兵冒著危險進入潛艦內部，從無線電室完好無損地取出了恩尼格瑪密碼機與密碼本。英國對此事嚴格保密，因為一旦德國得知密碼被繳獲，就會立刻更換密碼。

這些繳獲的資料，加上圖靈設計的炸彈機，以及下一節將說明的「班布里斯姆斯」統計技術，讓局勢發生了轉變。從1941年6月起，Hut 8幾乎每天都能解讀U艇使用的海軍密碼。布萊切利園將這種密碼稱為意為海豚的「海豚」（Dolphin）。解密出的情報以代號「超級機密」（Ultra）傳送給海軍部，海軍部掌握了U艇群集結的海域，引導運輸船團繞開該海域航行。1941年下半年，在大西洋沉沒的盟軍船隻數量顯著減少。

即便如此，事情並非總是進展順利。Hut 8的人手始終短缺。由於缺乏足夠的人員來整理並打字轉錄破譯的訊息，當天的工作常常被迫拖延到隔天。1941年9月6日，邱吉爾首相造訪布萊切利園慰勞員工。大約六個多星期後的10月21日，圖靈與休·亞歷山大，以及負責陸軍和空軍密碼的Hut 6的戈登·韋爾奇曼、斯圖爾特·米爾納-巴里一起，直接給邱吉爾寫了一封信。信中提到，由於人手不足，尋找海軍密碼設定的工作每天至少被延誤12個小時。米爾納-巴里帶著這封信前往倫敦唐寧街10號。邱吉爾讀完信後，向首席軍事助理伊斯梅將軍下達指示：今天立即處理，給予他們所想要的一切。自此之後，布萊切利園的人員與機器大幅增加。

然而破解工作在隔年再次受阻。1942年2月1日，大西洋的U艇開始使用裝有四個轉子的新型恩尼格瑪密碼機。布萊切利園將這種新密碼稱為意為鯊魚的「鯊魚」（Shark）。Hut 8將近10個月無法解讀該密碼，在此期間盟軍船隻的損失再次擴大。突破口依然是從海上獲取的資料。1942年10月30日，在地中海，英國水兵登上了正在沉沒的U艇U-559並帶出密碼本。執行此任務的軍官安東尼·法森與水兵柯林·格雷齊爾隨船沉入大海殉職，而16歲的少年湯米·布朗則倖免於難。多虧了他們搶救出來的密碼本，Hut 8在1942年12月得以重新開始解讀「鯊魚」。

這段時期，圖靈逐漸退出了Hut 8的日常業務。他雖然擅長深入鑽研難題，但並不擅長管理眾人，實際運作多半由副主管休·亞歷山大負責。隨著圖靈於1942年11月啟程前往美國，亞歷山大正式接管並領導Hut 8。

9.2. 班布里斯姆斯統計法

炸彈機是一種逐一測試轉子設定的機器。然而在1940年和1941年，布萊切利園僅有幾台炸彈機，連用來破解陸軍與空軍密碼都捉襟見肘。如果要用炸彈機去測試海軍恩尼格瑪全部336種轉子排列，將耗費過多時間而根本不可能實現。

因此圖靈設想，在啟動炸彈機之前，先透過計算排除可能性較低的排列。若能從336種當中只留下少數看似合理的幾種輸入炸彈機，機器運行的時間便能大幅縮短。源於這個構想的方法就是班布里斯姆斯。圖靈是從波蘭密碼專家耶日·羅濟茨基所發明的「時鐘法」技術中獲得了線索。

班布里斯姆斯抓住了海軍恩尼格瑪的一個弱點。海軍每天都規定了通信兵共同使用的基本設定。德語中將這種基本設定稱為「Grundstellung」。通信兵為每條訊息單獨選擇起始位置，並使用這個基本設定將起始位置加密後附加在訊息開頭發送。因此，每條訊息實際開始加密的位置各有不同。然而，如果同一天發送的兩條訊息起始位置相近，只要將其中一方平移幾格適當重疊，兩條訊息中就會出現機器在完全相同狀態下替換字母的區間。將這種在相同機器狀態下加密的區間重疊比對，隱藏的規則便會顯現出來。

為了找出兩條訊息應該如何重疊，圖靈團隊使用了細長的紙卡。紙卡上一格一格印有英文字母，操作員會依照密文中的每個字母在相應的格子打孔。這種紙卡是在牛津郡名為班伯里的小鎮印刷廠印製的。因此這種紙卡被稱為「班伯里紙條」，而使用這種紙卡的整個方法則被稱為班布里斯姆斯。

其作業方式如下：將兩條訊息的紙卡重疊，並從下方打光。接著將上方的紙卡逐格向旁平移，同時計算兩張紙卡孔洞重合處的數量。孔洞重合的地方，代表兩條訊息在相同位置出現了相同的字母。

重合點的數量之所以具有意義，是因為機率的緣故。若將以相同機率隨機挑選26個英文字母所組成的兩組字母串重疊，在相同位置出現相同字母的機率是26分之1，因為英文字母共有26個。然而，若將德國海軍在機器處於相同狀態下產生的兩份通訊文正確重疊，這一機率會提高到約17分之1。這是根據當時海軍通訊文的字母分布所得到的近似值。這是因為德語中有像E這樣常用的字母，原文中字母重複出現的比例在密文中也依然會保留下來。操作員不僅計算單個字母重合之處，也計算連續兩個字母、三個字母重合之處。重合點越多，兩條訊息被正確重疊的可能性就越大。

剩下的問題在於，需要有多少個重合點才值得信賴。為了解答這個疑問，圖靈創立了一種衡量證據權重的單位。若某個證據能使假設為真與為偽的機率比率改變10倍，他就將該證據的權重定為1班。名稱「班」源自班伯里小鎮。然而1班在實際應用中單位過大，因此圖靈主要使用其10分之1的單位——分班。這與衡量聲音大小的單位分貝方式相似。

分班的優點在於只需進行加法運算。假設一開始正確與錯誤的可能性各半。當證據累積達到10分班時，正確的可能性就會比錯誤的可能性高出10倍。若是20分班就是100倍，50分班則是10萬倍。操作員每找到一個重合字母便累加分數，當分數超過設定的基準時即可得出結論。圖靈的助手傑克·古德曾解釋說，大約1分班是一個人能夠感知自身信念程度產生變化的最小差異。

像這樣每當有新證據出現便逐步修正判斷的方法，被稱為循序分析。美國數學家亞伯拉罕·沃爾德也創立並發表過類似的方法，但圖靈早在其之前便已在密碼破譯第一線使用此方法。只不過由於圖靈的工作屬於戰時機密，外界長久以來對此一無所知。

透過班布里斯姆斯找出多組訊息如何重疊之後，便能根據該結果縮小右側轉子與中間轉子的可能範圍。如此一來，在336種排列中，需要用炸彈機測試的候選項目就減少到了僅僅幾種。班布里斯姆斯做得最出色的人是身兼西洋棋冠軍的休·亞歷山大，而瓊·克拉克也是一位卓越的班布里斯特。亞歷山大與傑克·古德與其說將這項工作視為職業，倒不如說把它當成了動腦的智力遊戲。這是一項既不因過於簡單而乏味，也不因過於艱深而令人疲憊的工作。

Hut 8連續2年不間斷地使用這種方法，直到1943年炸彈機數量充足時才停止使用。在這段期間，班布里斯姆斯大幅節省了炸彈機的運轉時間。戰爭結束後，為了保密，大部分班伯里紙

條都被銷毀。然而在2013年9月，維修布萊切利園營房的工人們在Hut 6天花板的縫隙中意外發現了幾張班伯里紙條。原來是在寒冷營房中工作的人們為了擋風，將用過廢棄的紙張塞進了縫隙中。

9.3. 教授之書

布萊切利園的人們稱圖靈為意為教授的「Prof」。雖然他並非真正的教授，但他總是沉思數學問題的模樣儼然像個教授。

1940年秋天，圖靈將自己推導出的恩尼格瑪密碼解密原理整理成一份報告。其正式名稱為《恩尼格瑪機的數學理論》，但在布萊切利園內部，大家都將這份報告稱為《教授之書》。圖靈用打字機鍵入正文，公式和圖表則是親手繪製填入。

這本書包含了運用數學解析恩尼格瑪轉子與接線板如何替換字母的說明。書中還介紹了將已知猜測的語句與密文進行比對以尋找矛盾的方法，並闡述了炸彈機的運作原理以及如何攻破海軍指標。新加入布萊切利園的數學家們正是透過這本書學習恩尼格瑪的解密技術。《教授之書》長年作為機密文件保存，直到1996年才在美國解密公開。如今以編號HW 25/3收藏於英國國家檔案館。

除此之外，圖靈還撰寫了兩篇關於在密碼破解中應用機率方法的論文。其中一篇探討如何將機率應用於密碼學。在這篇文章中，圖靈說明了如何將貝氏定理與分班計算應用於各種類型的密碼。貝氏定理是一種機率公式，告訴人們在獲得新證據時該如何修正最初的想法。另一篇則是探討語句中相同字母重複出現之頻率的文章。這兩篇論文在英國政府通訊總部（即GCHQ）作為機密保存了將近70年。直到圖靈誕辰100週年的2012年4月，這兩篇論文才被移交至國家檔案館對公眾開放。當時GCHQ的一位數學家評價道，這些論文被保密如此之久的事實本身，就足以證明其價值。

如同以分班衡量證據權重一樣，圖靈試圖用數字衡量資訊量的想法，與同一時期美國克勞德·夏農獨立創立的資訊理論有異曲同工之處。夏農也建立了衡量資訊量的單位。兩人在戰爭期間的1943年於美國會面，並進行了交流討論。

圖靈的統計方法並未止步於恩尼格瑪。1942年7月，圖靈創立了一種用手工推算德國國防軍最高統帥部使用的另一種密碼機「洛倫茲」轉子凸輪排列（即齒輪圓周上改變信號的凸起配置）的方法。同事們以圖靈的名字將這種方法稱為「圖靈法」。用分班累積證據的方式也被

應用於破解洛倫茲密碼的其他方法中。這一脈絡延續至工程師湯米·弗勞爾斯於1943年至1944年間製造的電子密碼破譯機「巨人機」。巨人機是一台使用真空管運作的電子機器。

從1940年到1942年，Hut 8破譯海軍恩尼格瑪的歷程交織著眾人的心血。圖靈承接了布萊切利園內部原本認為無法破解的海軍密碼，分析了指標系統，設計了炸彈機，藉由機率計算減少了炸彈機需測試的候選項目，並將這些方法著書成冊供同僚共同使用。再加上從德國艦船上繳獲密碼資料的水兵們，以及清點班伯里紙條孔洞並累計分數的Hut 8同仁的辛勤工作。海軍部之所以能夠引導運輸船圍繞開U艇聚集的海域，正是因為所有這些努力共同發揮了作用。

第10章. 秘密技術交流與黛利拉（Delilah） 專案（1942～1945）

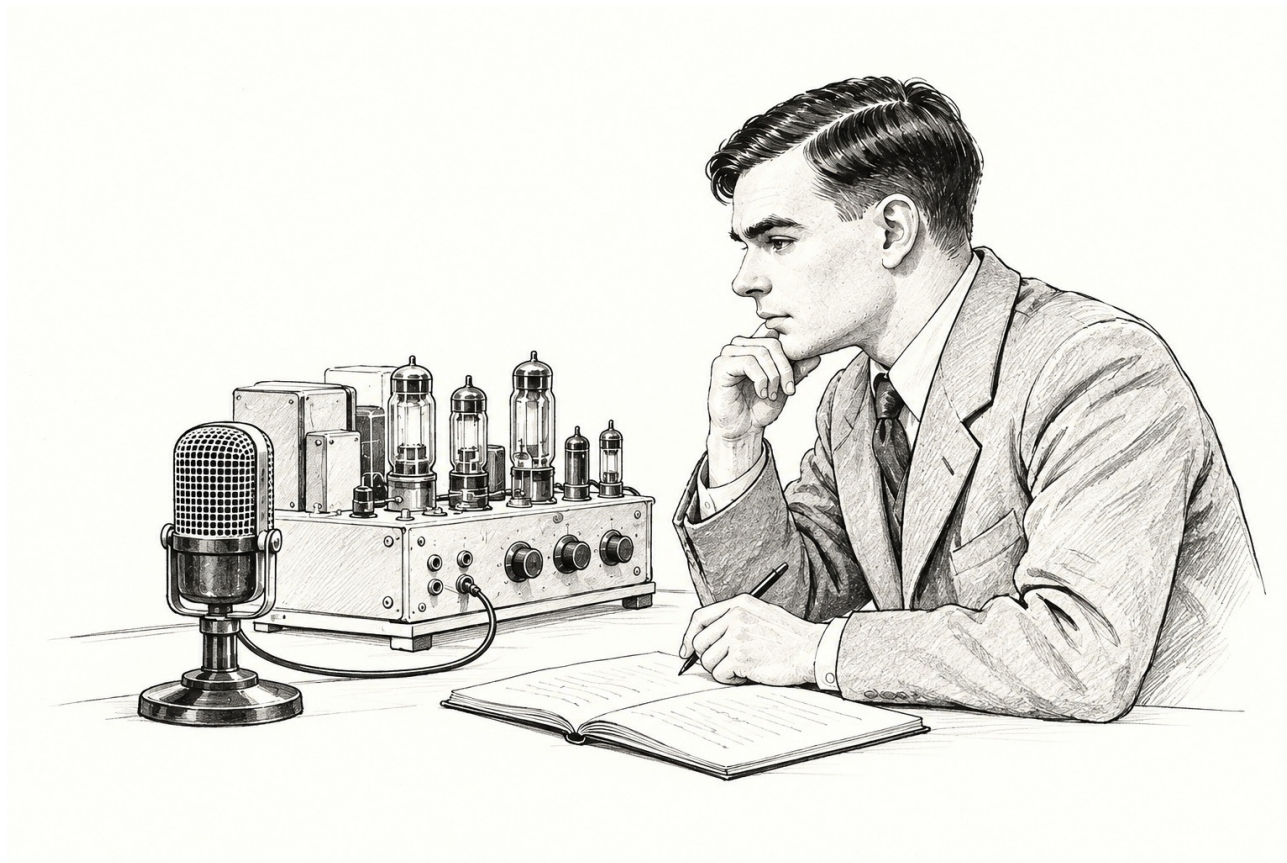


圖 10. 重構了將語音加密的「黛利拉」研究。

1942 年秋天，大西洋上德國潛艇 U 艇接連擊沉同盟國的運輸船。艾倫·圖靈正在布萊切利園（Bletchley Park）的 Hut 8 負責破譯德國海軍恩尼格瑪密碼。就在此時，他被賦予了一項新任務：前往美國，與美國同僚分享英國所累積的密碼破譯技術。

這項任務的背景是美國的參戰。1941 年 12 月，美國以日本偷襲珍珠港為契機投入戰爭。面對同一個敵人，若兩國各自獨立破譯密碼，耗費的時間與精力將倍增。於是兩國決定攜手合作，圖靈成為了其中的紐帶之一。

從 1942 年到 1945 年，圖靈所做的工作大致可分為三項。首先是造訪美國，傳授密碼破譯技術並檢視語音加密裝置；返回英國後，他親手打造了將人類語音轉化為密碼的機器「黛利拉」（Delilah）；戰後他雖獲頒勳章，但該勳章究竟表彰何種功績，卻在很長一段時間內都無法公開。

10.1. 造訪美國密碼破譯機構與研究所

未帶齊證件抵達的訪客

1942 年 11 月，圖靈搭乘輪船橫渡大西洋。那是一片隨時有 U 艇伺機獵殺運輸船的危險海域。他於 11 月 12 日抵達紐約，這次訪問一直持續到翌年 3 月。

剛抵達時便發生了一場小風波。由於圖靈未能備妥能證明其身分的文件，移民官員曾一度猶豫是否放行。這件事完整記錄在圖靈 2 週後親手撰寫的報告中。

對圖靈而言，美國並非初次踏足之地。紐約與華盛頓之間，座落著他 6 年前攻讀博士的普林斯頓。當時他還是一位撰寫數學論文的年輕學子，這一次，他則是以代表英國政府密碼技術的秘密特使身分重返美國土地。

華盛頓的 OP-20-G

圖靈首先造訪的是位於華盛頓特區的美國海軍密碼破譯部門 OP-20-G。這個名字宛如密碼般令人陌生，但它其實是美國海軍總部負責通訊的部門中某個小組的編號。這個團隊也與英國的 Hut 8 一樣，正全力嘗試破解德國海軍的恩尼格瑪密碼。

圖靈與美國密碼專家齊聚研討，向他們說明英國的做法，包括如何操作炸彈機（Bombe），以及如何透過班布里斯姆斯（Banburismus）縮減候選解等內容。起初他對初次見面的美

國海軍團隊實力評價並不高，但隨著安德魯·格里森（Andrew Gleason）等傑出年輕數學家的加入，團隊的水準迅速獲得提升。

代頓的炸彈機工廠

1942 年 12 月 21 日，圖靈走訪了位於俄亥俄州代頓的 NCR（國家現金出納機公司）工廠。這家原本製造收銀機的公司，在戰時負責為美國海軍製造炸彈機。工程師約瑟夫·德許（Joseph Desch）領導了這項工程。

美國海軍的計畫規模極為宏大，而這項龐大的規模源自恩尼格瑪的結構。美軍面對的 4 轉子恩尼格瑪中，主要運轉的三個轉子是從 8 個當中挑選 3 個依序裝入，第四個轉子則與這三個分開單獨選擇。第一位置有 8 種選擇，第二位置有剩下的 7 種選擇，第三位置有剩下的 6 種選擇，因此 8 乘以 7 乘以 6，總共得出 336 種組合。美國的炸彈機計畫，便是為每一種組合各配置一臺機器，建造 336 臺炸彈機。

圖靈的想法則不同。他認為與其增加機器數量，不如提高每臺機器的速度，並透過數學推理預先排除要檢驗的組合。他在代頓參訪報告中也寫下建議，認為美方應將精力投入在提升炸彈機的速度上。德許與圖靈在設計思路產生了分歧。最終，代頓實驗室製造的炸彈機並非 336 臺，而是總共 121 臺。

貝爾實驗室與語音密碼

圖靈當時還有第二項任務，那就是檢視紐約貝爾實驗室正在研發的語音加密裝置。英國首相邱吉爾與美國總統羅斯福隔著大西洋透過無線電話會談，但當時使用的語音轉換裝置存在著被德國竊聽的風險。貝爾實驗室為了解決這個問題，正在研發一種日後被稱為 SIGSALY 的新裝置。

實驗室的大門並未輕易開啟。美方堅持，縱使是同盟國專家，也不能展示最高機密裝置。圖靈若要檢視這項裝置，必須由英國陸軍元帥約翰·迪爾出面，親自向美國將軍喬治·馬歇爾請求。兩國情報機構甚至為此產生了嚴重的爭端。

1943 年 1 月，圖靈終於在貝爾實驗室展開工作。SIGSALY 是一座佔據整間房間的龐大裝置，重達數十噸。該裝置將聲音轉換為數位訊號後，以錄有毫無規律雜音的黑膠唱片作為金鑰來混淆訊號。接收端也必須擁有完全相同的唱片，才能還原出原本的聲音。

圖靈從數學角度縝密探究了該裝置是否真正安全。他撰寫的評估報告，在英國決定引進該裝置並安裝於倫敦的過程中發揮了核心作用。自 1943 年夏天起，SIGSALY 被用於連接倫敦與華盛頓之間的機密通話。

自助餐廳裡的對話

貝爾實驗室當時有一位名叫克勞德·夏農（Claude Shannon）的年輕研究員。夏農日後創立了資訊理論，奠定了數位通訊的基礎。圖靈在參訪期間結識了夏農，兩人在實驗室的自助餐廳共進午餐並展開交流。

由於各自肩負的機密任務無法向對方透露，對話便轉向了能思考的機器、人腦與機器的相似之處等主題。圖靈也向他談起了自己於 1936 年發表的通用機論文。在漫天烽火之中，日後為電腦與人工智慧開闢道路的兩大先驅就這樣面對面坐在一起。

重返布萊切利園

圖靈於 1943 年 3 月返回英國。在此期間，曾獲西洋棋冠軍的休·亞歷山大（Hugh Alexander）已接掌了 Hut 8 主管的職位。亞歷山大向來善於打理 Hut 8 的日常運作，在人事管理方面也頗具手腕。對圖靈而言，這項人事變動反而是件求之不得的好事，因為比起繁瑣的文書與會議，他更喜歡專注於解決難題。

負責人的更替並不意味著圖靈的貢獻遭到低估。亞歷山大日後在回顧整理 Hut 8 的歷史時寫道，毫無疑問，該部門之所以能取得成功，最首要的原因就是圖靈的研究。此時的圖靈不再受限於單一部門，而是擔任起顧問角色，為整個布萊切利園解決各類棘手的密碼難題。

10.2. 語音加密裝置「黛利拉」

在貝爾實驗室看到的 SIGSALY 給圖靈留下了一道課題。SIGSALY 雖然安全，但體積過於龐大。戰場上的軍人不可能攜帶佔據整間房間的裝置。是否能用體積小得多的裝置，透過電子電路將人類聲音完全隱匿後再還原出來？這正是擺在他面前的課題。圖靈決定親自打造一款輕巧緊湊、能實際應用於作戰的語音加密裝置。

漢斯洛普園的秘密實驗室

圖靈建立新實驗室的地點是漢斯洛普園（Hanslope Park）。這是英國秘密情報局無線電安全部門所使用的設施，配備了可親手製作與測試電子設備的工場。如今，英國政府通訊中心便設在此處。

漢斯洛普園距離布萊切利園約 16 公里鄉間路程，圖靈經常騎著腳踏車往返於兩地之間。他於 1943 年在此展開「黛利拉」的研發工作，從 1944 年起乾脆常駐漢斯洛普園全職投入工作。

年輕工程師唐納德·貝利

1944 年，自伯明罕大學畢業的電機工程師唐納德·貝利（Donald Bayley）前來擔任圖靈的助手。貝利生於 1921 年，比圖靈小 9 歲。他初次見到圖靈設計的電路時，只見電線交錯盤繞、凌亂不堪。貝利日後回憶道，那組電路簡直就像蜘蛛網一樣糾纏不清。

兩人在彼此眼中互為良師。貝利教導圖靈焊接與配線等工作檯上的實務技術。他稱呼圖靈為意指「教授」的「Prof」，布萊切利與漢斯洛普的同仁也都這麼稱呼圖靈。圖靈則教導貝利與同儕工程師設計電路所需的數學知識。晚餐結束後，圖靈便會開班講課，貝利則鉅細靡遺地將授課內容筆記下來。這份筆記後來成為專為電路工程師編寫的高階數學教科書。

「黛利拉」是如何運作的

「黛利拉」的運作原理可分為三個階段來理解。

首先是將聲音轉換為電子訊號。聲音是空氣的震動，亦即聲波。「黛利拉」以固定的時間間隔擷取此訊號的振幅大小，並將其用於加密。這被稱為取樣（Sampling）。雖然這也是當今數位錄音所採用的概念，但在「黛利拉」中，混淆訊號振幅則是運用類比電子電路來完成。圖靈甚至留下了計算究竟需要以多高頻率擷取訊號才能還原原音的數學筆記。

其次是混入金鑰訊號。發送端的機器會產生看似不規則的金鑰訊號，並依特定方式將其與語音訊號相加疊加。如此一來，原本的說話聲便會變成難以辨識的雜音。

最後，接收端在同一時刻產生完全相同的金鑰訊號，並從混合訊號中還原出原始聲音。讓兩臺機器的金鑰訊號與運作時序精準同步，正是「黛利拉」設計的核心關鍵。

這項原理與圖靈在布萊切利園處理德國電報密碼時所掌握的思維一脈相承。只不過他是將相同的理念從文字轉移到了聲音上。然而與文字不同的是，聲音是持續不斷流動的，因此真空

管電路必須運轉得極為迅速且精確。圖靈與貝利在日誌中逐一記錄實驗結果，並據此不斷修改改良電路。

「黛利拉」這個名字

「黛利拉（Delilah）」是聖經中女子大利拉的英文名字。大利拉欺騙了大力士參孫，探得其力量的秘密。用欺瞞者之名，來為這部只讓竊聽者聽見雜音、徹底瞞天過海的裝置命名，可謂相得益彰。這個名字並非圖靈一人所取。他為這項裝置徵集命名，最終由他的好友、日後成為其遺囑執行人的羅賓·甘迪（Robin Gandy）入選。

將邱吉爾的聲音隱匿後又重新還原

「黛利拉」終於大功告成。兩人在英國政府官員面前進行了實機展示。當錄有邱吉爾首相演說的聲音輸入「黛利拉」時，揚聲器裡只傳出陣陣雜音；然而一旦經過接收端裝置，邱吉爾的聲音又再次清晰可辨。關於這次展示的時間點，不同資料記載略有出入：邦瀚斯（Bonhams）拍賣行介紹為 1944 年底，其他研究人員則認為是 1945 年初。

1945 年 5 月 8 日，隨著德國無條件投降，歐洲戰事宣告結束。圖靈與貝利一同漫步長談，慶祝這場勝利。

未能投入實戰的機器，留下的寶貴經驗

「黛利拉」最終未能投入實際戰場。當機器研製完成時，戰事已接近尾聲，根本沒有時間進行量產並分發給軍隊。此外，它在設計上也存在局限。「黛利拉」是針對短距離電話線路或無線電設計的裝置，因此難以用於橫跨大西洋的長途通訊。實際上製成的，僅有一臺原型機。

儘管如此，這 2 年的經歷對圖靈而言仍是極具價值的淬鍊。原本在紙上演算的數學家，變成了親手組裝真空管、動手焊接、修理故障電路的技術工程人員。他用雙手親身體會了電子電路的運轉速度有多快、問題容易出在哪裡。1945 年秋天，圖靈進入英國國家物理實驗室（NPL）著手設計電子計算機 ACE，而這項設計便原汁原味地融入了他在漢斯洛普園所累積的實務經驗。

相隔 70 餘年重見天日的筆記

「黛利拉」的故事在長達數十年間鮮為人知。貝利將相關文件珍藏在身邊，直至 2020 年與世長辭。2023 年 11 月，這批被稱為「貝利文件」的珍貴史料現身倫敦拍賣會，並以 38 萬

1,400 英鎊成交。其中收錄了圖靈親筆書寫的演算推導與備忘錄、實驗日誌，以及貝利聽講時記錄下的上課筆記。

英國政府出手阻止了這批珍貴文物流往海外。2024 年 8 月，當局頒布了暫停海外出口的禁令。此後各方募集了超過 39 萬 7,000 英鎊的資金，2025 年 3 月，圖靈曾就讀與從事研究的劍橋大學國王學院購得這批文獻。文獻隨後被數位化，收錄於全球研究人員與學子皆可查閱的圖靈數位檔案庫中。

10.3. 沉默的勳章（OBE）

授勳名單上的一行字

戰爭結束後，英國政府對為國奉獻之士頒發勳章。圖靈也是其中一員。他所獲頒的是大英帝國勳章中的「官佐」勳銜，簡稱 OBE。

英國政府會將受勳者的姓名刊登在官方公報《倫敦憲報》（The London Gazette）上。在 1946 年 6 月 18 日出刊的《倫敦憲報》第 37617 期第 3124 頁中載明，服務於「外交部所屬部門」的艾倫·麥席森·圖靈獲頒 OBE。雖然有些資料將授勳決定記載為 1945 年，但刊載於官報的日期則是 1946 年 6 月。

在這短短一行字中，完全沒有提及他究竟立下了何種功勞。既不能寫下恩尼格瑪，也不能提及炸彈機、班布里斯姆斯或「黛利拉」。就連領取勳章的過程也極為低調。圖靈並未前往白金漢宮親領勳章。勳章是伴隨著國王的信函透過郵寄送達的；據說圖靈將這枚勳章隨手收在裝有螺絲、鐵釘與螺栓的鐵罐子裡。

名為《官方保密法》的重鎖

圖靈之所以無法吐露自己的功績，原因就在於《官方保密法》（Official Secrets Act）。在布萊切利園與漢斯洛普園工作的人員，全都依法宣誓恪守秘密。即便在戰事結束之後，這道誓言也從未解除。無論對家人、朋友或新聞記者，都隻字不能提及自己究竟從事了什麼工作。

圖靈的母親也不例外。母親莎拉·圖靈（Sara Turing）日後為兒子撰寫了傳記。她在書中寫道，自己從未得到過關於兒子秘密工作的任何蛛絲馬跡。她還寫道，正是因為這種被迫的沉默，兒子的來信才變得愈發稀疏簡短。甚至連母親都對兒子在戰爭期間建立的功勳一無所知。

不為人知的功勳

在同一場戰爭中研發出雷達或原子彈的科學家們，在戰後聲名大噪並執掌大型研究機構。然而圖靈的處境卻截然不同。他透過密碼破譯為拯救無數運輸船與寶貴生命做出了重大貢獻，但知曉這一切的，唯有共同保守秘密的少數人。許多歷史學家認為，布萊切利園密碼破譯專家的傑出表現，讓戰爭縮短了約 2 年時間。而圖靈，正位居這項歷史偉業的核心。

沉默也對圖靈戰後的研究工作產生了深遠影響。1945 年秋天，圖靈進入英國國家物理實驗室，投身於打造電腦的工作。那裡的大多數人都不知道，圖靈在戰時曾親手設計並組裝過電子電路。圖靈無法拿出自己的實務經驗作為佐證，一切只能從頭開始說服眾人。

布萊切利園的秘密直到進入 1970 年代才逐漸為世人所知。1974 年，隨著一本講述戰時密碼破譯的專書出版，代號為「超級機密」（Ultra）的情報作戰才公諸於世。此時距離圖靈離世已過去了 20 年。而「黛利拉」的全貌，則是在那之後又過了近半個世紀、直到貝利的筆記現身拍賣會時，才終於大白於天下。

被隨手收在鐵罐子裡的勳章，是圖靈所獲得的官方認可，但這枚勳章究竟是在表彰何等壯舉，在極長的一段歲月裡卻無人知曉。

第 11 章 NPL 與早期電腦 ACE 的設計（1945～1948）

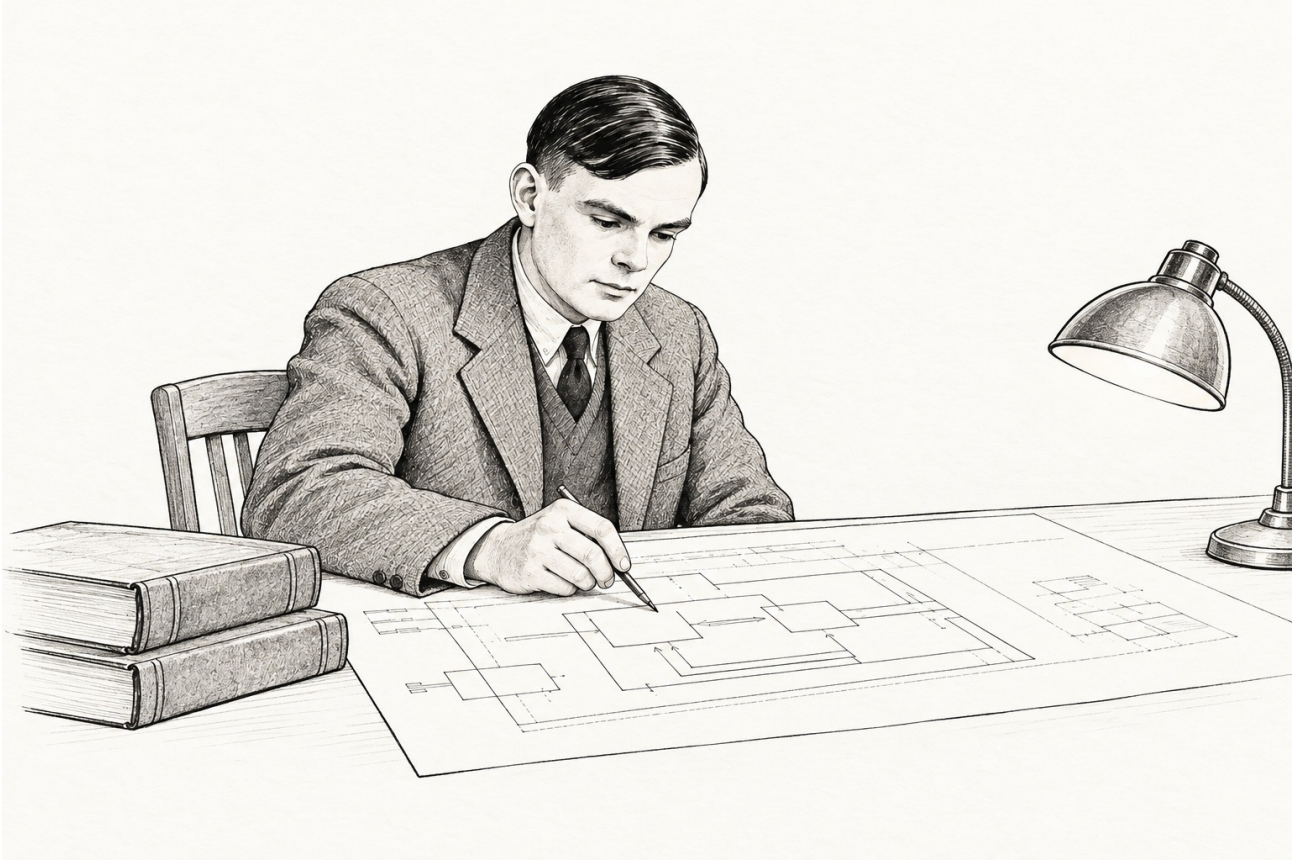


圖 11. 描繪圖靈構思電腦設計時的插圖。

持續近 6 年的第二次世界大戰於 1945 年 5 月在歐洲落下帷幕。戰爭結束後，在布萊切利園與漢斯洛普園工作的人們陸續回到原本的工作崗位，艾倫·圖靈也必須尋找新的出路。那年 6 月，圖靈迎來了他的 33 歲生日。

戰爭期間，圖靈近距離操作並觀察了多種機器。為了破解恩尼格瑪密碼機，他設計了炸彈機；他也親眼目睹同事們用數千支真空管打造的巨人機進行快速運算。在戰爭尾聲，他甚至親自動手焊接，製作出語音保密裝置「黛利拉」。經歷這些歷練後，圖靈確信了一件事：只要利用真空管構成的電子電路，就能將他在 1936 年論文中於紙上勾勒的「通用機器」化為現實。

通用機器是指僅憑一部機器就能完成任何運算的概念。即使運算內容改變，也無需重新製造機器，只需更換輸入給機器的指令，也就是程式即可。今天我們使用的電腦和智慧型手機正是依據這個原理運作。用同一部智慧型手機既能玩遊戲、查地圖，又能做作業，原因就在於此。1945 年秋天，圖靈獲得了將這個想法付諸實際機器的契機。

11.1 進入國家物理實驗室（NPL）

在倫敦西郊的特丁頓，坐落著英國國家物理實驗室。取其英文名稱 National Physical Laboratory 的首字母縮寫，通常簡稱為 NPL。NPL 是一所負責制定長度、重量、時間等國家標準，並進行各項科學研究的政府研究機構。

在戰爭即將結束之際，英國政府決定在 NPL 內部新設數學部門。這項計畫旨在將戰爭期間突飛猛進的計算技術應用於科學與工業領域。新部門的負責人是應用數學家約翰·沃默斯利（John R. Womersley）。沃默斯利是少數早在 1936 年便讀過圖靈的論文《論可計算數及其在判定問題上的應用》，並洞察其價值的人之一。

當時，大多數人仍將計算機視為只能執行單一任務的工具。計算砲彈飛行軌跡的機器就只能做該項計算，若要進行其他計算就需要別的機器。1945 年美國研製完成的大型電子計算機 ENIAC 也是如此。ENIAC 是一台使用了約 1 萬 8 千支真空管的龐然大物，但每當要解決新問題時，都必須由人工逐一拔下並重插導線、切換開關。光是計算前的準備工作，有時就得花上好幾天。

沃默斯利希望在 NPL 打造一部大型電子計算機，並選中圖靈來承擔這項任務。沃默斯利拜訪圖靈時，向他展示了一份剛從美國出爐的報告。那就是匈牙利裔美國數學家約翰·馮·諾伊曼於 1945 年 6 月撰寫的《EDVAC 報告書第一草案》。該報告闡述了一種將程式儲存在機

器內部運作的電腦，也就是儲存程式型電腦的基本架構。馮·諾伊曼早在圖靈於普林斯頓求學時期就熟知其研究。沃默斯利認為，《EDVAC報告》核心思想中的許多部分，實際上正是源自於圖靈。

1945 年 10 月 1 日，圖靈正式以主任研究員身分第一天到 NPL 數學部門上班。沃默斯利將這項新電腦計畫命名為 ACE。這是 Automatic Computing Engine 的縮寫，意思是「自動計算機關」。使用「Engine」（機關）這個詞是有典故的。19 世紀英國數學家查爾斯·巴貝奇在設計以齒輪運作的計算機器時，命名為「差分機」與「分析機」。沃默斯利為了紀念巴貝奇，在 ACE 中也使用了同一個詞。這個名字也蘊含著由圖靈繼承 100 年前巴貝奇所懷抱之夢想的深意。

圖靈所構想的電腦與 ENIAC 不同，無需重新插拔導線。機器本身保持不變，只需重新輸入程式與資料即可。如此一來，同一部機器今天可以計算天氣，明天可以計算橋樑承受的重量，後天則可以下西洋棋。圖靈並未將 ACE 僅僅視為快速算數的計算機，而是視為能夠取代人腦進行各種智慧工作的機器。將 1936 年的通用機器轉化為真空管與導線所構成的實體，這正是圖靈在 NPL 所肩負的工作。

11.2 ACE 報告書

圖靈的工作進展神速。進入 NPL 還不到 3 個月的 1945 年底，圖靈便完成了 ACE 設計報告書。標題為《電子計算機提案》（Proposed Electronic Calculator）。這份以打字機打出、長達 48 頁的報告中，包含了電路圖、零件說明、記憶裝置設計、預算，甚至還附上了實際可執行的程式範例。如果說馮·諾伊曼的《EDVAC報告》是闡述宏觀架構的未完成草案，那麼圖靈的報告則更接近一份可以直接照著建造的設計圖。

1946 年 3 月 19 日，圖靈向 NPL 執行委員會說明了 ACE 計畫，委員會同意推進該計畫。圖靈計算出建造 ACE 需要花費 1 萬 1,200 英鎊。報告中也記載了 ACE 能做的工作。圖靈認為，ACE 不僅能進行複雜的科學計算，甚至還能解謎題或在西洋棋中預測後續幾步棋局。

圖靈在報告中詳細探討的部分是記憶裝置。電腦若要運作，必須將程式與數字存放在某個地方，這個裝置稱為記憶裝置或記憶體。圖靈認為電腦設計中最棘手的問題就是記憶裝置，只要解決這個問題，其餘電路就相對簡單。在那個年代，並沒有今天這樣的半導體記憶體。若用真空管來製作記憶裝置，光是記住一個數字就需要好幾支真空管，無論在成本還是體積上都難以負擔。

圖靈選擇的方法是水銀延遲線。水銀延遲線是戰時雷達技術所衍生出的裝置。在長約 1.5 公尺（5 英呎）的鋼管中注滿液態金屬水銀，並在兩端安裝石英晶片。石英能將電訊號轉為聲波訊號，並將聲波訊號再轉回電訊號。從一端發射代表 0 與 1 的聲波脈衝，聲波穿過水銀抵達另一端。將這個訊號重新送回起點，數字便會在管內循環不息地流動。機器就是透過讓數字持續循環流動的方式來記憶數字。這就像是在操場跑道上不停奔跑的田徑選手，每位選手各自拿著一個數字在跑步，這樣想便很容易理解。

圖靈打算串聯約 200 根這樣的管子。一根管子大約能容納 1,024 個 0 與 1，總計約為 20 萬個。換算成今天的單位，大約是 25 千位元組。雖然這遠小於如今智慧型手機拍下的一張照片，但在 1946 年，這卻是任何人都不曾擁有過的龐大記憶裝置。

圖靈也清楚水銀延遲線的缺點。因為數字在管內循環，必須等待所需的數字運行到管子出口。等待時間一長，計算就會變慢。因此，圖靈精密地安排了記憶裝置中的位置，讓下一條要用的指令與數字正好在需要的那一瞬間抵達出口。後人將這種方法稱為「最佳化程式設計」。此舉是為了縮短在延遲線中等待的時間，以提升計算速度。

圖靈還設定了機器的速度。電腦是配合固定的節奏運作的，這種節奏稱為時脈。圖靈將 ACE 的時脈設定為 1 百萬赫茲。這代表每 1 秒配合 100 萬次節奏。以當時的標準來看，這是非常快的速度。

在 ACE 的設計中，還融入了另一個極具圖靈風格的思想：盡可能少用機械零件，將複雜的工作交由程式處理。美國工程師為了乘法或除法製作了專門的電路，而電路增加，真空管的數量也隨之增加。圖靈並未採用這種做法。他讓機器只負責加法、減法與搬移數字等簡單指令，至於乘法、除法或平方根等計算，則透過將簡單指令串聯多次的程式來解決。圖靈稱這種程式為「指令表」（instruction tables）。

這樣設計是有原因的。真空管就像燈泡一樣容易燒壞，數量越多，機器就越常停擺。減少真空管數量，故障就會減少，製造也更容易。圖靈力求讓機器輕量化，不足之處則靠編寫良好的程式來補足。他認為編寫程式正是自己從 1936 年以來一直在做的事情。數十年後，電腦設計師們也重新找到了精簡指令以提升速度的方法，而圖靈的設計被視為率先展現該思想的範例。

若要將繁重的工作託付給程式，也需要有效率的程式編寫方法。報告中便包含著副程式的概念。這是將常用的計算單獨製作成小程式，每當需要時便呼叫使用，執行完畢後再返回原處

的方法。這就像在食譜中只寫一次「醬汁調製法」，之後在多道菜餚中讓讀者直接翻閱該頁一樣。如今的程式設計師每天都在使用這種方法。

1947年2月20日，圖靈在倫敦數學學會發表了關於ACE的演講。在此場合中，圖靈的思維比單純的設計說明更進了一步。他表示，我們所期望的是能夠從經驗中學習的機器。這是一種認為機器能夠自行修改自身指令並逐漸進步的思想。在世界上連一部能正常運作的儲存程式型電腦都尚未出現的年代，圖靈就已經在暢談會學習的機器了。

11.3 官僚體制的壁壘與劍橋休假年

設計圖雖然出色，但實際造機的工作卻遲遲沒有進展。阻礙接二連三。

最大的問題在於人力。NPL數學部門雖然數學家很多，卻沒有能夠親手製作真空管電路的電子工程師。圖靈希望能獲得戰時打造巨人機的郵政總局研究站（多利斯山）工程師湯米·佛勞爾斯與艾倫·庫姆斯的協助。然而，多利斯山研究站當時正全力投入於修復戰火摧毀的電話網絡。

保密也是一大阻礙。巨人機屬於國家機密。圖靈無法向NPL的同仁透露戰時早已有一部由數千支真空管組成的電子機器日夜不停運轉的事實。對於不知巨人機存在的NPL同事而言，ACE顯得過於好高騖遠。

研究所的辦事效率也十分緩慢。當時NPL的所長是以演化論聞名的查爾斯·達爾文之孫——查爾斯·達爾文爵士。達爾文所長是一位謹慎的行政官員，凡事都必須經過層層會議與公文審批才能逐項定奪。關於機器應由哪個部門承造、如何與其他研究機構分工等問題，討論曠日持久。期間也出現了先建造小型測試機的提議。然而圖靈不希望將時間耗費在測試機上，而是想直接打造出完整的機器。而那台測試機最終也未能完成。

圖靈逐漸感到心力交瘁。當他的設計依然被擱置在公文堆中時，其他國家與其他大學的研究團隊已經遠遠走在了前面。圖靈透過跑步來抒發心中的鬱悶。在NPL時期，他加入了附近的沃爾頓田徑俱樂部進行長跑。據說若當天在倫敦有會議，他甚至會從研究所一路跑步到會議場所。1947年8月，他參加了英國業餘田徑總會（AAA）馬拉松錦標賽，以2小時46分3秒的成績獲得第5名。這項成績甚至足以讓他有望入選1948年倫敦奧運的代表隊。然而，後來由於腿部受傷，這個夢想未能實現。

1947 年秋天，圖靈向 NPL 申請了為期 1 年的休假年，返回劍橋大學國王學院。休假年是研究人員暫時離開本職工作、休整身心或開展新研究的一段時期。圖靈離開後，NPL 的 ACE 團隊由曾擔任他助手的吉姆·威爾金森接手帶領。

在劍橋，圖靈展開了新的研究。為了探究人類大腦與神經是如何運作的，他深入研讀了生理學與神經學。因為他認為若要製造會思考的機器，就必須先了解身為思考器官的大腦。這項研究日後也延續為以數學來解析生物體表面圖案斑紋的研究。

1948 年夏天，圖靈將這段時間的思考加以整理，向 NPL 提交了一份報告。標題為《智慧型機器》（Intelligent Machinery）。該文具體探討了他在倫敦數學學會演講中所提及的會學習的機器究竟該如何實現。今天，許多學者將這篇文章視為正式探討人工智慧的最早報告之一。

在報告中，圖靈提出了「無組織機器」的概念。這與一開始就為了執行特定任務而精密設計的機器有著不同的出發點。圖靈構想了一種將多個電子元件隨機連接成網絡般的模型。他認為，如果給予這個網絡獎勵與懲罰來進行訓練，良好的連結就會被保留，不良的連結則會被改變，從而使該網絡自行成長為有用的機器。這與孩子在讚美與責備中學習成長的過程十分相似。這種思維與當今人工智慧核心的「類神經網路」如出一轍。

圖靈還寫下了「遺傳搜尋」或「演化搜尋」的想法。這種方法是指透過隨機微調多種可能的解答，從中挑選出較優者再反覆進行調整，最終便能找到優良的解答。這相當於將生物歷經漫長歲月演化的機制借鑑到計算領域中。這正是日後發展為「遺傳演算法」的核心思想。

在這份報告中，圖靈同時看到了賦予機器智慧的兩條途徑。一條是由人類預先制定規則並輸入給機器；另一條則是讓機器累積經驗自行學習。圖靈並未執著於單一途徑。他認為，就像孩子在學校學習既定課程的同時，也能透過遊戲與經驗自行領會一樣，機器同樣可以兼顧這兩條路徑。

然而，達爾文所長對這份報告並不以為然。他甚至將這篇文章視為學生寫的拙劣作文。NPL 並未將該報告出版成書，《智慧型機器》就這樣在研究所的公文櫃中沉睡了許久。這篇文章直到 1968 年才首次正式出版成書，那時距離圖靈離世已過去了 14 年。

大約在同一時期，從曼徹斯特傳來了消息。曾在劍橋時期教授圖靈邏輯學、並在布萊切利園一同並肩作戰的麥克斯·紐曼，已出任曼徹斯特大學教授並成立了計算機實驗室。雷達工程師弗雷迪·威廉斯與湯姆·基爾伯恩在那裡打造了一部小型的電子電腦。人們稱這部機器為

「曼徹斯特嬰兒機」。1948 年 6 月 21 日，曼徹斯特嬰兒機成功執行了儲存在記憶裝置中的程式。這是將程式儲存在機器內部運作的電子電腦首次在現實中真正運轉的瞬間。

圖靈做出轉職決定的時間其實早於嬰兒機的首次運作。他在 1948 年春季便接受了紐曼的提議，並於 5 月向 NPL 提出了辭呈。同年 9 月，他便正式開始在曼徹斯特大學任職。

即使在圖靈離開之後，ACE 的設計依然延續了下來。威爾金森與同事唐納德·戴維斯、麥克·伍傑（Mike Woodger）等人縮減了圖靈的設計規模，製造出一部小型機器。這部機器就是「試驗型 ACE」。試驗型 ACE 於 1950 年 5 月 10 日成功執行了第一個程式。雖然它的真空管僅約 800 支，遠少於 ENIAC 的 1 萬 8 千支，但它完全依照圖靈的設定，以 1 百萬赫茲的節奏運作。在 1950 年代初期，試驗型 ACE 是全世界速度最快的電腦之一。英國電氣公司以這部機器為基礎，研發出商用電腦 DEUCE，並自 1955 年起對外銷售。至於達到圖靈最初構想規模的 ACE，則直到 1958 年才宣告完成。

在 NPL 度過的 3 年歲月裡，圖靈未能親眼見到任何一台由自己親手完成的電腦。即便如此，在這段時期，他繪製出了儲存程式型電腦的詳盡藍圖，並向世人拋出了「會學習的機器」這一嶄新提問。試驗型 ACE 如今陳列於倫敦科學博物館中。而在 2021 年 6 月英國新發行的 50 英鎊紙鈔背面，便印有圖靈的肖像以及這部機器的身影。

第12章. 曼徹斯特大學與最初的內儲程式型電腦 (1948-1951)



圖 12. 描繪了早期電腦研究時期的景象。

1948年，36歲的艾倫·圖靈在倫敦附近泰丁頓的國家物理實驗室（NPL）投入電腦設計已有2年多。他所編寫的自動計算機 ACE 設計方案，在當時是相當具體的電腦設計藍圖。然而，光有設計方案並不意味著機器就能造得出來。負責製作的工程師嚴重短缺，決策也總是拖延不決。圖靈一心想把1936年在紙上構想的「通用機器」打造成真正的電子機器，此時已漸漸感到心力交瘁。

就在那時，一位相識多年的數學家向圖靈發出了召喚。他就是曼徹斯特大學的麥克斯·紐曼教授。

12.1. 麥克斯·紐曼的延聘與轉任

圖靈與紐曼的緣分始於劍橋。1935年，圖靈聽了紐曼講授的「數學基礎」課程。紐曼在這門課上介紹了德國數學家大衛·希爾伯特提出的「判定問題」。該問題是指：給定一個邏輯語句時，能否像機器一樣依照既定的程序，始終判定出該語句是否能由規定的邏輯規則予以證明。圖靈苦思這個問題後，於1936年撰寫了論文《論可計算數》，圖靈機與通用機器的概念便源自這篇論文。

兩人在第二次世界大戰期間於布萊切利園重逢。紐曼領導著一個名為「紐曼組」的部門，破解德軍最高統帥部使用的羅倫茲密碼。為了這項工作，工程師湯米·佛勞爾斯用數千個真空管製造出了名為「巨人機」的電子密碼解譯機。巨人機速度飛快，但能做的事情只有密碼解碼這一項，若要讓它執行其他任務，就必須用手重新拔插開關與電線。紐曼與圖靈在此處親眼見識了電子電路能以多快的速度進行計算。只要能讓快速的電路記住程式，那麼更換程式之後，就能用同一台機器處理各類可計算的問題。

戰爭結束後，紐曼成為曼徹斯特大學純粹數學教授。他在1946年從英國皇家學會獲得高達3萬5,000英鎊的巨額研究經費，建立了「計算機器實驗室」。與此同時，曼徹斯特大學電機工程系迎來了兩位在戰時研究雷達的技術人員——弗雷迪·威廉斯與湯姆·基爾伯恩。不久之後，傑夫·圖希爾也加入了他們的行列。

威廉斯和基爾伯恩找到了利用雷達螢幕所用的陰極射線管（CRT）來儲存0與1的方法。若在陰極射線管螢幕上打出微小的光點，該處便會短暫殘留電荷。透過反覆讀取並重寫這些痕跡，就能將數字記憶下來。這個裝置被稱為「威廉斯-基爾伯恩管」。當時其他研究機構大多採用在充滿水銀的長管中循環傳遞聲音訊號的方式，這種方式必須等到所需的數字到達管子末端為止；相反地，威廉斯-基爾伯恩管隨時都可以立即讀取任何位置的數字。無需依序等待即可讀取任意位置資料的特點，正與今日的隨機存取記憶體（RAM）原理相通。

當曼徹斯特具備了研究經費、實驗室、技術團隊與記憶裝置之後，紐曼便力邀圖靈前來。圖靈辭去了 NPL 的工作，於1948年9月在曼徹斯特大學數學系就任副教授（Reader）。

Reader 是僅次於教授的職級。他還獲得了「皇家學會計算機器實驗室副主任」的頭銜。然而，這個實驗室其實並未另設主任。曼徹斯特大學的舊記錄記載，這個頭銜徒具虛名，起初圖靈承擔的正式職責究竟為何也並不明確。

圖靈在前往曼徹斯特之前，就對當地的機器表現出了興趣。他提前取得了該機器處理的指令清單，並編寫了一段進行長除法的程式寄了過去。這段程式由圖希爾進行了修改，使其得以在機器上運行。

曼徹斯特實驗室的工作大致分為兩部分。由威廉斯和基爾伯恩帶領的技術團隊負責製造真空管電路與記憶裝置等機器本體；圖靈則負責使用該機器進行實際計算的方法，也就是程式方面的工作。親手進行焊接的工程師們與用紙筆構思機器的數學家圖靈，工作方式截然不同，彼此的想法也時有分歧。即便如此，圖靈依然喜歡在能夠親眼看到真正的電子電腦運轉的曼徹斯特工作。

12.2. 曼徹斯特寶貝機、Mark 1 與程式設計師指南

在圖靈前往曼徹斯特的大約3個月前，那裡發生了電腦史上的重大事件。1948年6月21日上午11點剛過不久，一台小型的實驗用機器運行了第一個程式。這台機器的正式名稱是「小型實驗機（SSEM）」，但人們稱它為「寶貝」。

「寶貝」起初並不是作為實用的計算機而製造的機器，它只是一個用來測試威廉斯-基爾伯恩管能否正常運作的裝置。其記憶容量為32個32位元的數字，全部共1,024位元。與今日的手機相比，這是極小的容量。然而，「寶貝」能夠自行從記憶裝置中讀取存放的程式並執行。它不像巨人機那樣需要重新拔插電線，只要更改記憶裝置中的內容，就能指示它執行其他工作。這就是「內儲程式型電腦」。「寶貝」正是以這種方式實際運行的世界第一台電子電腦。

第一個程式是由湯姆·基爾伯恩編寫的。這是一個尋找某個數的最大真因數（即除了自身之外的最大因數）的程式。起初他們用較小的數字進行測試，幾天之內便將測試範圍擴大到2乘了18次的數，即262,144。262,144的最大真因數是131,072。對人類來說這是顯而易見的答案，但機器必須從較大的數開始逐一嘗試相除來尋找。在這項計算中，「寶貝」連續運轉了52分鐘，最終在螢幕上以光點顯示出了正確答案。這項成果表明，圖靈在1936年論文中提出的設想在真實的機器上得以運作。

「寶貝」獲得成功後，研究團隊隨即著手擴展這台機器。由此製成的電腦便是「曼徹斯特 Mark 1」，自1949年4月起便可供人們使用。記憶裝置擴增為128個40位元的數字，並且增加了利用磁性在快速旋轉的圓筒表面記錄數字的「磁鼓」。其運作方式是將常用的內容存放在高速的陰極射線管中，而將大量的內容存放在磁鼓中。這與今日電腦將記憶體與儲存裝置分開設置十分相似。

Mark 1 中還加入了一種稱為「B-線」的裝置。當多次重複同一計算時，該裝置能自動變更下一次要讀取的數字位置。如今它被稱為「索引暫存器」，幾乎存在於所有的電腦中。國際電機電子工程師學會（IEEE）在紀念「寶貝」時記錄道：Mark 1 是世界上首次呈現索引暫存器的機器。

當 Mark 1 可以使用時，圖靈隨即開始用這台機器展開工作。在此之前，人們必須逐一撥動開關來輸入程式。1949年夏天，圖靈找來了用打孔紙帶輸入與輸出程式及數據的裝置，並協助將其連接到 Mark 1 上。

這段時期圖靈致力於整理出一套讓人們指示電腦工作的方法。如今我們在程式語言中使用「print」等人類可讀的字詞，但當時的電腦只能處理0與1。圖靈將0與1以每5位為一組，表示為一個文字或符號。5位的0與1可以表示32種組合。圖靈借用電報電傳打字機所使用的字符代碼，將其逐一對應到這32種組合上。程式設計師得以用這些符號代替長長排列的0與1來編寫程式。這種方法減少了使用者的錯誤，但對初學者來說，看起來依然像是陌生的密碼。

圖靈將常用的計算單獨製作成小型程式，這被稱為「副程式」。當時有求平方根、對數、三角函數的副程式，以及將結果列印到紙帶上的副程式。程式設計師只需在需要時呼叫使用，而不必每次都從頭編寫相同的計算。這與今日程式設計師使用的「函式庫」是相同的概念。圖靈還制定了在陰極射線管記憶裝置與磁鼓之間以「頁」為單位傳輸資料的規則。

這項工作並非由圖靈一人獨自完成。主修數學的西西莉·波普爾韋爾擔任圖靈的助手，編寫了 Mark 1 的程式。曼徹斯特大學的記錄記載，圖靈是在波普爾韋爾全職協助下，建立了 Mark 1 的早期軟體。

圖靈將這些整理好的內容彙編成冊。書名是《曼徹斯特電子計算機 Mark II 程式設計師手冊》。標題中之所以包含「Mark II」，是因為圖靈將費蘭提公司即將交付的新機器稱為 Mark II。他在該機器抵達之前便預先撰寫了指南，指南的基礎正是他在操作 Mark 1 時累積的經驗。現存的一本初版上附有標註1951年3月日期的勘誤表。許多歷史學家將這本書視為世界上第一部為內儲程式型電腦撰寫的程式設計指南。

圖靈在這本手冊中也說明了什麼是電子計算機。將他的意思闡述開來便是：電子計算機是一種機器，用來代替以往由嚴格遵循既定規則的人所進行的計算。這個人懂得如何計算，但本身並不自主判斷。圖靈並沒有將電腦視為神秘的大腦，而是看作一個不漏掉任何一條規則、速度極快的計算員。

手冊中還有一個引人注目的指令，那就是「呼嘯（hoot）」指令。這是一條讓安裝在電腦上的揚聲器發出嗶嗶聲的指令，最初是用來向機器前的人提示計算已停止的訊號。然而，若快速多次發出這種聲音，就能產生不同高低的音調。圖靈在手冊中記錄了這種方法，而這後來成為電腦音樂的起點。

曼徹斯特電腦在實驗室外也備受矚目。1949年6月9日，曼徹斯特的神經外科醫師傑弗里·傑佛遜發表了題為〈機器人的心靈〉的演講。他表示機器不可能像人類一樣思考或感受。隔天報紙報導了這場演講，記者隨即採訪了圖靈。1949年6月11日的《泰晤士報》刊登了題為〈機器大腦：解開歷時300年的計算之謎〉的報導。這裡所謂「歷時300年的計算」，是指尋找在2連續自乘多次後減1的數當中哪些是質數的問題。這類數字被稱為梅森數。紐曼和圖靈從1948年夏天起，便著手準備用曼徹斯特的機器來解答這個問題。

在這篇報導中，圖靈表示：「這只不過是未來發展的預演，只不過是將臨之事的影子。」他認為機器將進入人類智能所涉足的領域，有朝一日能與人類一較高下。72年後的2021年，英國發行了印有圖靈肖像的新版50英鎊紙幣，該紙幣上正印著這句話。

圖靈也用 Mark 1 進行了自己的研究。1950年，他用這台機器進行了與數學界長期未解難題「黎曼猜想」相關的計算。同年，他發表了題為〈計算機器與智能〉的論文。這篇論文探討了機器是否能夠思考的問題。

12.3. 費蘭提商用電腦顧問諮詢

「寶貝」成功的消息也傳到了英國政府。政府的軍需補給部決定將曼徹斯特大學的技術移轉給企業，打造成可供銷售的電腦。1948年底，政府與曼徹斯特的電氣公司費蘭提簽訂了合約。該合約旨在由公司將大學實驗室製造的機器重新堅固地製作並對外銷售。1949年7月，新機器的基本設計移交給了費蘭提。

圖靈受聘擔任費蘭提的顧問。他就新機器的硬體設計與程式編寫規則向該公司的工程師提出了諸多建議，這些意見也處處融入了新機器的設計之中。

其中最具代表性的是「隨機數產生器」，這是一種如同擲骰子般能產生無法預知之數的裝置。在圖靈的提議下，費蘭提 Mark 1 加入了利用電子電路雜訊來產生隨機數的裝置。這類數字對於模擬天氣或生物等交織偶然現象的計算，或是進行遊戲的程式非常有用。在新機器中，B-線也增加到了8條，指令也更加豐富。

圖靈的主張是盡可能讓機器電路保持簡單，而將複雜的工作交由程式來處理。每多裝一個真空管，就會多出一個容易發生故障的地方，成本也會隨之上升；相反地，程式只要編寫完善一次，就可以重複使用無數次。這一立場延續了圖靈自1936年以來的觀點——即僅憑一台「通用機器」，只要更換程式，便能處理各類可計算的問題。

1951年2月，費蘭提製造的第一台電腦運抵曼徹斯特大學圖靈所在的實驗室。人們稱這台機器為「費蘭提 Mark 1」。費蘭提 Mark 1 是全世界第一台由企業製造並投放市場的通用電子電腦，比美國最早作為商品製造的電腦 UNIVAC I 還早了數週。

新機器運抵後，圖靈的手冊發揮了使用說明書的作用。凡是想使用這台機器的人，都是透過那本手冊學習程式設計。圖靈的朋友克里斯多福·斯特雷奇（Christopher Strachey）便是其中之一。斯特雷奇於1951年利用這台機器編寫了西洋跳棋遊戲程式，還利用呼嘯指令編寫了演奏音樂的程式。同年，英國 BBC 廣播公司造訪曼徹斯特，錄下了電腦演奏英國國歌、《黑羊咩咩叫》（Baa Baa Black Sheep）以及《In the Mood》的聲音。電腦保護協會表示，尚未發現比這更早的電腦音樂錄音記錄。

費蘭提 Mark 1 被廣泛應用於許多科學家與工程師的數值計算中。圖靈也利用這台機器計算了生物形態斑紋生成的數學原理。

1951年前後，圖靈從曼徹斯特電腦的研發工作中退後了一步。協助程式設計師的工作由新來的東尼·布魯克接替。然而，圖靈所開創的體系被原原本本地繼承了下來——用符號記錄指令的方法、集中整合副程式的方式，以及教導人們進行程式設計的手冊皆屬此類。就算有機器，如果沒有指示機器工作的方法，電腦也毫無用處。圖靈在曼徹斯特為這套方法奠定了最初的架構。

1948年，曼徹斯特工程技術團隊製造的內儲程式型電子電腦成功運轉；1951年，商用機器也隨之登場。關於計算的理論，歷經多位研究者與工程師的實踐，最終演進為真實的機器與程式。在這一過程中，圖靈對理論、設計與程式設計皆做出了貢獻，並持續推進了對機器智能的研究。

第13章. 圖靈測試：機器能思考嗎？ (1950)

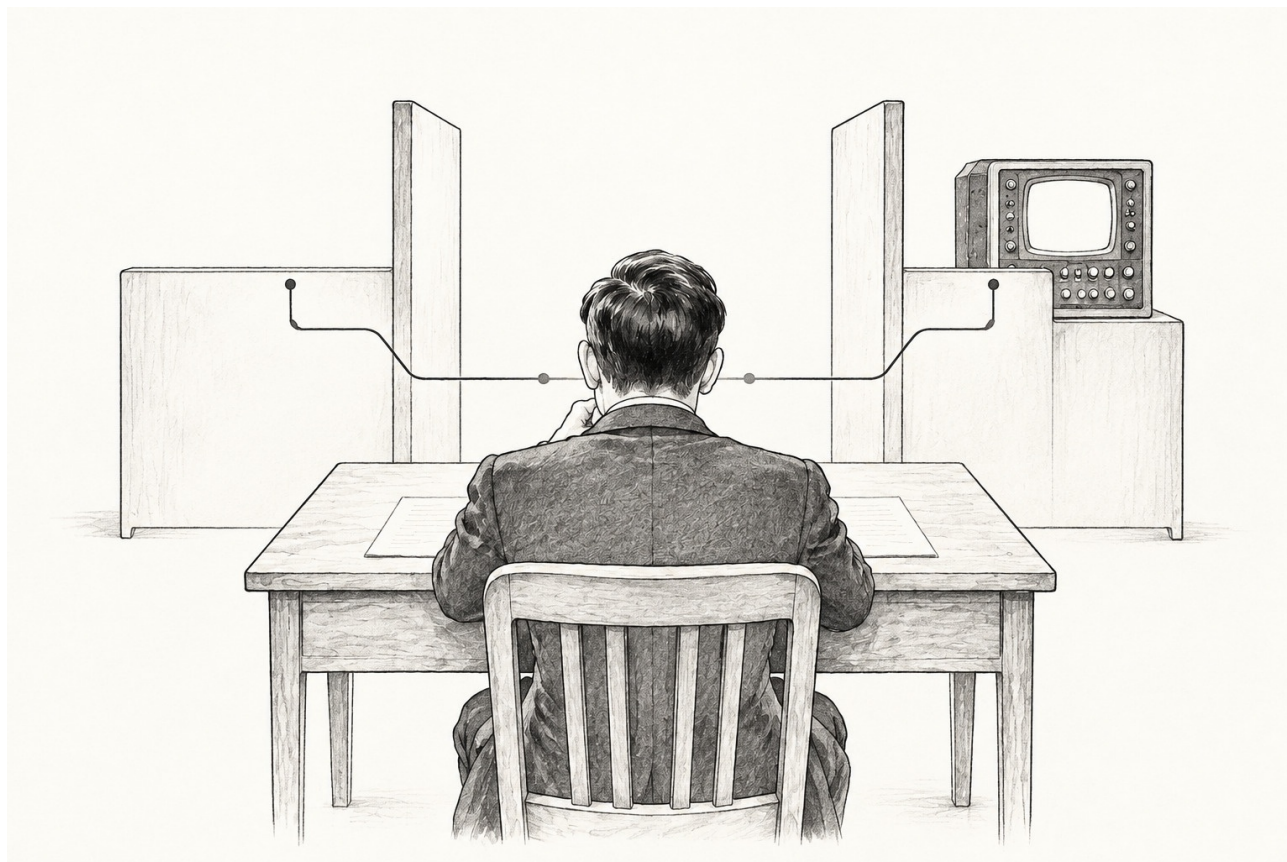


圖 13. 透過對話分辨人類與機器的模仿遊戲概念圖。

1950年10月，英國哲學期刊《心靈》（Mind）第59卷第236期刊登了一篇長達28頁的論文。題目為〈計算機器與智慧〉（Computing Machinery and Intelligence），作者是當時擔任曼徹斯特大學計算機實驗室副主任的38歲數學家艾倫·圖靈。論文以一個簡短的問題開頭：「機器能思考嗎？」

今日許多人將這篇論文視為人工智慧研究的起點。然而，在論文發表的1950年，「人工智慧」這個詞彙尚未出現。這個詞最早出現在1955年美國的約翰·麥卡錫及其同僚所撰寫的研究計畫書中，並在1956年達特茅斯學院舉行的夏季研究研討會之後廣為流傳。圖靈可說是在這門學科的名稱誕生之前，就率先提出了該學科往後將長久探討的問題。

13.1. 哲學轉向與《Mind》論文

數學家在哲學期刊發表文章

圖靈在那之前主要以數学家和工程師的身份工作。1936年，他構想出了一種以紙帶和規則模擬其他圖靈機計算的想像機器，即通用圖靈機。戰爭期間，他在布萊切利園設計了炸彈機（Bombe），並開創了名為班布里斯姆斯（Banburismus）的統計技術來破解德軍密碼。戰後，他在英國國家物理實驗室設計了ACE電腦，並自1948年起在曼徹斯特大學為實際運行的電腦編寫程式。

然而，對圖靈而言，還有另一個與這些工作並行延續的疑問。自從17歲時失去摯友克里斯多福·莫卡姆後，他便長久思索心靈與靈魂是什麼、思想究竟源自肉體的何處。當電腦從設計圖上的構想轉變為眼前的現實時，這個古老的問題以全新的形式重現。那便是：如果人類的思考終究也是依循特定規則進行的活動，那麼機器是否也能思考？

這個問題並不僅限於圖靈一個人的關注焦點。1949年，它甚至登上了報紙。當年6月，神經外科醫師傑弗里·傑佛遜教授在倫敦演講時主張，機器不可能變得與人類大腦一樣。《泰晤士報》在報導這場演講時，也一併提及了曼徹斯特電腦的故事，記者並詢問了圖靈的看法。圖靈回答表示，目前發生的事只不過是未來即將到來之事的一點預嚐。

圖靈並未將這個問題止於報紙報導中的簡短回答。他平靜梳理了自己的想法，決定發表在哲學家閱讀的學術期刊上，這便誕生了《心靈》上的那篇論文。當時該期刊的主編是牛津大學的哲學家吉爾伯特·賴爾。一位親自設計過電腦並編寫過程式的人，在哲學家的版面上探討了機器與思考的關係這一哲學問題。

從改變問題開始

圖靈在論文開頭首先對自己提出的問題提出了質疑。他認為「機器能思考嗎？」這個問題過於模糊。若試圖先定義「機器」與「思考」這兩個詞彙的意義，就會陷入無休止的口舌之爭。然而，若藉由調查人們平時如何使用這些詞彙來決定答案，在圖靈看來，這就如同用民意調查來解決科學問題一樣。

因此，圖靈捨棄了原本的問題，提出了一個意義明確且能實際檢驗的新問題。其核心在於：不要透過窺探內心來深究機器是否在思考，而是觀察機器的行為來做出評判。爭論詞彙定義的問題，自此轉變為設定條件並檢驗結果的問題。這是將哲學的古老問題轉移至實驗室中的一次轉變。

整篇論文共由七個部分組成。圖靈首先介紹了作為新提問的「模仿遊戲」，並說明用於這場遊戲的機器是數位電腦，以及數位電腦具備哪些特性。接著，他逐一剖析反對機器智慧的九種主張，最後闡述了關於如何製造能夠自主學習的機器的構想。

13.2. 模仿遊戲（Imitation Game）與圖靈測試

三人進行的遊戲

為了說明這個新問題，圖靈提出了一種遊戲。這場遊戲由三個人參與：分別是男性 A 與女性 B 參與，而提問者 C 則待在與兩人分開的房間裡。C 既看不到兩人的臉，也聽不到他們的聲音。提問與回答只能透過打字機打出的文字或稱為電傳打字機的電報打字機來傳遞。C 在交談之後，必須猜出兩人之中誰是男性、誰是女性。

兩人的角色截然不同。男性 A 負責誤導 C 作出錯誤的判斷。當被問及髮型時，A 可以說謊回答，假裝自己是女性。反之，女性 B 則協助 C 作出正確的回答。B 雖然只要說出「我是女生，請不要相信那個人」這樣的真話即可，但因為 A 也能說出完全相同的話，因此 C 無法輕易做出判斷。

圖靈對這場遊戲進行了一項改動。那便是：如果讓機器取代男性 A 的位置，會發生什麼事？提問者 C 在面對人類與機器進行對話時做出錯誤判斷的次數，是否會與面對男性和女性時一樣多？這便是圖靈提出的問題。圖靈表示，這就是取代「機器能思考嗎？」的新問題。圖靈本人將這項測驗稱為「模仿遊戲」，後來人們則冠上他的名字，稱之為「圖靈測試」。

僅以文字對話的原因

圖靈遮蔽容貌與聲音有著明確的理由。他希望將機器的身體與機器的智慧分開來看。就算製造出與人類皮膚完全相同的仿生皮膚套在機器上，也不會讓該機器變得更聰明。圖靈判定，若要衡量思考能力，不應看外表或聲音，而必須只看言語的內容。

這項條件也與公平性息息相關。人類在與飛機的賽跑中落敗，並不會因此遭人小看。同樣地，機器在選美比賽中未能得獎，也沒有理由去苛責機器。模仿遊戲正是一項經過精心設計的測驗，旨在確保人類或機器都不會因外表而吃虧。

即使遮蔽了外表，測驗也絲毫不會變得寬鬆。因為若是文字對話，能夠提問的話題是無窮無盡的。圖靈在論文中舉了幾個例子。提問者可以要求以蘇格蘭的福斯橋為題作詩，可以要求計算兩個五位數的加法，也可以提出西洋棋局的難題。

在圖靈舉的例子中，回答的一方推託說自己寫不出詩，面對加法題目則在推敲了大約30秒後給出答案。然而那個答案並不正確。面對將 34,957 與 70,764 相加的題目，它回答 105,621，但正確答案是 105,721。部分學者將此解讀為為了偽裝成人類而故意犯錯的範例，也有些學者認為是圖靈自己寫錯了數字。無論何者，這個例子都展現了像人類一樣的回答並不總是等同於正確的答案。

一台電腦模擬所有機器

接下來需要決定的，是派遣何種機器參與這場遊戲。圖靈選擇了數位電腦。數位電腦由儲存資訊的記憶裝置、進行計算的裝置，以及依序處理指令的控制裝置所構成。圖靈在此重新提出了他在1936年通用機器論文中闡明的思想。一台容量足夠大且速度夠快的數位電腦，只要輸入適當的程式，就能模擬任何按步驟運作的其他機器。因此，無須按種類逐一討論參與遊戲的機器，新問題最終便成了「輸入適當程式的電腦，能否在模仿遊戲中表現出色？」

展望50年後的預測

將問題雕琢得如此具體之後，圖靈也以數值寫下了對答案的預測。他表示，再過約50年，到了2000年左右，擁有約10億（ 10^9 ）位元記憶容量的電腦將能相當出色地進行模仿遊戲。10億位元以現今的單位來看約為125百萬位元組（MB）。他預測，一般的提問者在對話5分鐘後，正確分辨人類與機器的機率將不會超過70%。他還寫道，在20世紀末，即使人們使用「會思考的機器」這個說法，也不會遭到任何人反駁的時代將會來臨。

實際的歷史進程比圖靈的預測稍微緩慢一些。2000年左右的電腦在記憶容量上雖遠遠超過圖靈的預期，卻未能做到像人類一樣自然地交談。1991年創辦的勒布納獎競賽中，曾有部分評審將程式判定為人類。只不過首屆競賽限制了對話主題，因此很難將其結果視為具備廣泛對話能力的證據。2014年雖有發表宣稱名為「尤金·古斯特曼」的程式騙過了約三分之一的評審，但也遭批評指出，它是藉由設定為13歲烏克蘭少年來掩飾拙劣的回答。

情況大幅轉變是在進入2020年代之後。2025年，美國加州大學聖地牙哥分校的卡麥隆·瓊斯與班傑明·伯根進行了一項實驗，讓受試者同時與一名人類及一個人工智慧各交談5分鐘，然後選出哪一方是人類。接到表現得像人類之指令的 GPT-4.5，在73%的情況下被選為人類，這一比例甚至高於真正人類被選中的比例。在同一實驗中，1960年代的對話程式 ELIZA 僅達23%。這項研究隨後也刊登於學術期刊《美國國家科學院院刊》（PNAS）。

這個結果成為重新審視圖靈所提評估方式的契機。只不過在解讀數值時，必須區分兩點。首先，圖靈的70%是指提問者正確分辨人類與機器的比例，而此實驗的73%則是指 GPT-4.5 被選為人類的比例，兩者衡量的對象並不相同。此外，許多學者也表示，這項結果並不同於機器像人類一樣思考的證據。圍繞著圖靈問題的爭論，至今仍在延續。

13.3. 對人工智慧（AI）反論的回應

圖靈非常清楚，反對自己觀點的聲音必定不在少數。因此他在論文的第六部分中，親自整理出九種可能出現的反對主張，並逐一進行回答。這是在對方發起攻擊之前，先指出弱點並備受回應。這九種反論涵蓋甚廣，從源自宗教信仰與恐懼的論點，到數學定理、意識、機器的能力、大腦結構，乃至超感官知覺皆在其中。

第一，神學反論。這種觀點主張，思考是上帝只賦予人類的靈魂所進行的活動，上帝既然沒有賜給動物或機器靈魂，機器便無法思考。圖靈回應表示，這種主張反而是狹隘地看待了上帝的能力。如果相信人類生養孩子時上帝會賜給該孩童靈魂，那麼上帝也沒有理由不能賜給人類製造的機器靈魂。圖靈指出，過去在伽利略時代反對地動說時同樣搬出了宗教邏輯，但最終證明是錯的，因此他認為不能用這種主張來判斷科學問題。

第二，「把頭埋在沙堆裡」的反論。這種態度認為，如果機器能思考將是一件太過可怕的事，因此祈願並堅信這種事絕不會發生。此說名稱取自駝鳥一見危險就把頭埋入沙中的傳說。圖靈認為這與其說是反論，不如說更接近一種願望。因為期望發生什麼與實際上可能發生什麼是完全不同的兩回事。圖靈對此一笑置之，表示面對這種主張，比起反駁，安慰更為貼切。

第三，數學反論。與前兩種反論不同，這項反論立足於經過嚴密證明的定理。1931年，庫爾特·哥德爾證明了：任何包含自然數基本算術、且能按一定程序列舉公理的無矛盾數學系統，必然存在僅憑該系統自身規則既無法證明也無法反駁的陳述。圖靈也在1936年的論文中證明了存在著任何機器都無法解決的問題。反對者正是援引這些結果主張，機器存在著無法逾越的極限，因此不如人類。

圖靈承認，個別機器存在極限確實是事實。然而，若要讓此反論成立，人類的知性就必須不存在那種極限，但至今沒有任何人證明過這點。人類也經常給出錯誤的答案。再者，即使某個人能勝過某台機器，也不可能同時勝過所有的機器。儘管自己證明的定理反過來被用作攻擊自己主張的依據，圖靈依然精準指出了該定理所指涉的適用範圍並給予回應。

第四，基於意識的反論。1949年以一場演講讓這場爭論登上報紙的傑佛遜教授的主張即屬於此。傑佛遜教授表示，在機器真正能感受到思想與情感，並因此寫出詩歌或譜寫音樂之前，都不能承認機器等同於大腦。也就是說，機器必須清楚知道自己正在做什麼，且會感到喜悅與悲傷。

圖靈指出，如果把這種主張推向極致，將會得出荒謬的結論。想確切知道其他人是否真有思考與感受，唯一的方法只有讓自己成為那個人。如此一來，除了我自己以外，我將無法相信任何其他的人具備思考。因此，人們在生活中恪守著一種彬彬有禮的默契：藉由觀察彼此的言談與行為，承認對方也在思考。圖靈認為，將同樣的標準套用於機器才算公正。他還補充說，如果機器能對針對其所創作之詩的犀利提問做出合理對答，那麼傑佛遜教授也無法輕易忽視機器。

第五，指稱機器「無法做到」種種事情的反論。人們列出了一長串機器絕不可能做到的清單：待人親切、擁有幽默感、分辨是非善惡、犯錯、墜入愛河、享用草莓配鮮奶油、從經驗中學習、成就新事物等。圖靈認為這些主張大部分毫無根據。人們只是想起迄今為止所見過的拙劣機器，便臆測未來的機器也會是如此。

圖靈從這份清單中挑選了幾項具體作答。對於犯錯，他分為兩種情況進行說明：一種是因零件故障而產生的錯誤，另一種則是依據給定資訊進行推論卻得出錯誤結論的失誤。機器完全可以犯下後者這種失誤。此外，如果加入刻意算錯的程式，機器甚至能在模仿遊戲中假裝像人類一樣犯錯。針對草莓配鮮奶油的說法，他回答道，雖然或許能做到讓機器享受那種美味，但把精力耗費在這種事情上未免過於愚蠢。

第六，勒芙蕾絲夫人的反論。英國數學家愛達·勒芙蕾絲於1843年發表了一篇論述查爾斯·巴貝奇所設計之分析機的文章。她寫道，這部機器無法自主開創出任何新事物，只能執行人類吩咐它做的事。反對者遂以此為由主張，機器不可能具備原創性，也絕不可能讓人感到驚訝。

圖靈表示，看著勒芙蕾絲所處時代的機器而做出這種判斷是可以理解的。但他並不同意將該判斷推廣至所有機器。細究之下，人類的原創性說不定也是源於所學與所歷之事的積累。隨後圖靈講述了自己的經驗：機器其實經常讓他感到驚訝。編寫程式時，人類無法在腦中預先計算出全部的結果。因此，電腦給出的結果對於製造者而言往往也顯得耳目一新。

第七，關於神經系統連續性的反論。人類的神經是一套連續性機制，電訊號只要出現極微小的差異，結果就會隨之改變。反之，數位電腦則是以如同0與1般明確分離的離散狀態運作。因此有觀點主張電腦無法模仿神經系統。圖靈承認這兩種系統確實有所不同。但他回應表示，在模仿遊戲中這種差異並不會顯露出來。他舉當時使用的類比計算機——微分分析儀為例，指出數位電腦能夠充分且逼真地模擬該機器的答案，提問者將難以區分彼此。

第八，關於行為非形式化的反論。世上不可能存在一份詳盡無遺列出人類在一切情境下都必須依循的規則清單。如果人類只按規則行動，那就與機器毫無差別，但人類並非如此。因此該論點主張，按規則運作的機器不可能成為人類。圖靈以交通號誌為例：即使有「紅燈停」這條規則，但一旦遇到紅燈與綠燈同時亮起的情形，人類便能在沒有既定規則下自行判斷。

圖靈在此劃分了兩種範疇。其一是人類自覺遵守的生活常規，其二則是驅動人體與大腦運作的自然法則。交通號誌的例子所說明的，是生活常規無法涵蓋所有情境的事實。然而，我們不能因此就斷言支配大腦運作的自然法則並不存在。只不過是我們目前尚未將那些法則徹底找出罷了。

第九，關於超感官知覺的反論。該論點認為，若人類具備心靈感應或透視等能力，提問者就能藉由讀心輕易區分人類與機器。圖靈並未等閒視之這項反論。在看到當時美國的約瑟夫·萊恩等人所做的實驗結果後，他甚至寫下關於心靈感應的統計證據相當有力。因此他提出了一個解決之道：在無法傳遞心靈感應的房間裡進行遊戲即可。現今科學界尚未發現能證明超感官知覺存在的可靠證據。這個段落顯示出，即便是像圖靈這樣的人物，也無法完全超脫於其所處時代的科學氛圍。

回答這九種反論，僅止於擊退了「機器無法思考」的主張。至於實際上該如何製造會思考的機器則是另一回事，圖靈在論文的最後部分針對這個問題更往前邁進了一步。從一開始就對

成人的大腦進行全盤程式設計過於困難。因此他建議，不妨先打造最初雖懂得不多、但能藉由教育來培養能力的「兒童機器」，並施予獎懲來加以教育。這種想法認為，就像孩童與老師交談互動中成長一樣，機器也能透過接受教育而變得聰明。現今的人工智慧正朝著利用大量資料自主學習的方向發展。圖靈的兒童機器構想，蘊含了與其直接輸入完整知識、不如去設計學習歷程的思維。雖然具體的學習方式與今日的人工智慧有所差異，但藉由學習來拓展機器能力的課題至今仍在延續。

圖靈以寓意如下的句子為論文作結：我們只能看清眼前短短的一段距離，但即便是那短短的距離內，也能清楚看見有許多事情要做。

第14章 形態發生學：以數學解開生命的圖樣 (1951–1952)



圖14. 描繪在生物形態中尋找數學規律的研究。

1950年秋天，艾倫·圖靈在哲學學術期刊《心靈》（Mind）上發表了題為〈計算機器與智能〉的論文。以此論文為契機，「機器能思考嗎？」這一問題在世上廣為人知。當時圖靈38歲。他在戰爭期間破解了德軍的密碼，戰後設計了電腦並編寫了程式，如今更提出了機器智能這個嶄新的研究課題。

然而在此時，圖靈的關注焦點正轉向全然不同的對象。那就是豹皮上的斑點、斑馬的條紋，以及向日葵種子排列出的螺旋。生物在沒有接受任何人指示的情況下，創造出這些斑紋與形態。圖靈想知道這個過程是如何實現的，並決定用數學和電腦來解開這個問題。一位鑽研密碼與電腦的數學家，就此開始研究生物學這個陌生領域的問題。

14.1. 當選皇家學會院士

在展開生物學研究的這一年，圖靈當選為英國皇家學會院士。皇家學會是1660年在倫敦創立的科學團體，是世界上歷史最悠久的科學團體之一，艾薩克·牛頓也曾擔任會長。要成為院士，必須獲得現有院士的推薦，學會則在仔細審查候選人的研究成果後選出院士。當選者可在姓名後面加上「FRS」的字樣。這是代表皇家學會院士（Fellow of the Royal Society）的標誌，對英國科學家而言是極高的榮譽。

圖靈當選院士的日期是1951年3月15日，當時年齡為38歲。推薦書上所載的核心理由，是他於1936年發表的論文〈論可計算數及其在判定問題上的應用〉。圖靈在這篇論文中構想了一台想像中的計算機器，即圖靈機。他並以數學闡明了什麼是可以計算的，什麼是無法計算的。這項研究成為數理邏輯以及今日電腦科學的基礎。

也有未能載入推薦書的成就，那就是在第2次世界大戰期間於布萊切利園破解恩尼格瑪密碼的工作。由於這項工作受到《國家機密法》的規範，任何人都無法公開提及。圖靈在戰時為國家所做的最重大貢獻，就這樣隱藏在暗處。儘管如此，成為皇家學會院士這一事實，意味著圖靈已被公認為代表英國科學界的學者之一。圖靈就在這個起點上展開了新的研究。

作為該項研究對象的生物形態，並不是圖靈突然產生興趣的主題。大約10歲時，圖靈收到了名為《每個孩子都該知道的自然奇蹟》這本書作為禮物。這本書沒有將生物的身體歸因於神秘力量，而是像一台機器一樣進行說明。幼年的圖靈非常珍愛這本書，反覆閱讀了多次。在母親莎拉·圖靈留下的畫作中，有一幅描繪了在朋友們進行曲棍球比賽時，兒子獨自凝視著地上盛開的雛菊的身影。在雪邦學校就讀期間，圖靈也熱中於化學實驗，並細心觀察花瓣與葉片排列的模樣。

成年之後，他閱讀了蘇格蘭生物學家達西·湯普森於1917年撰寫的《論生長與形態》。湯普森是一位試圖用數學和物理學來解釋生物形態的學者。圖靈希望在湯普森的嘗試之上更進一步。

圖靈試圖解開的問題從胚胎出發。胚胎是指將發育為動物身體的細胞群剛開始生長時的極早期階段。這個細胞團幾乎呈圓球狀，其中的細胞彼此之間也幾乎一模一樣。然而隨著時間推移，其中一端會發育成頭部，另一端則成為尾部；眼睛形成，腿部生長。最初每個部位都相同的身體，究竟是如何產生互不相同的部位？圓球般的細胞團，又是如何發育成如同馬或人類一般，有著前後、上下之別的身體？這正是圖靈所提出的疑問。

在生物形態形成的過程中，仍有許多未解的謎題。圖靈試圖用數學來解釋其中的一部分。他認為，僅憑化學物質相互反應並擴散的定律，就能夠解釋生物的形態。圖靈決定以數學來證明這一想法是成立的。

14.2. 反應—擴散方程式的發現

1951年11月，圖靈向皇家學會提交了一篇論文，標題為〈形態發生的化學基礎〉。形態發生是指生物在生長過程中逐漸具備自身軀體形態的過程。該論文於1952年8月14日刊載在皇家學會的生物學學術期刊《自然科學會報B》（Philosophical Transactions B）第237卷第37頁至第72頁，篇幅共36頁。

在這篇論文中，圖靈首次使用了「形態發生素」（morphogen）一詞。在希臘語中，它的意思是「造就形態之物」。圖靈認為，某種在體內細胞與組織之間穿梭擴散的化學物質，會告訴細胞它們將會變成什麼。該物質濃度高的部位與濃度低的部位，細胞會走上不同的發育路徑。只不過在那個年代尚未實際發現這種物質，因此形態發生素是圖靈所假設的物質。

為了說明形態發生素如何產生斑紋，圖靈聚焦於兩個過程。一個是「反應」，另一個是「擴散」。反應是指化學物質相互接觸生成新物質或彼此抵消；擴散則是物質由高濃度處向低濃度處擴散開來。若在裝水的杯子裡滴入一滴墨水，墨水會緩慢散開，使整杯水均勻著色。這就是擴散。

正如墨水的例子所示，人們通常認為擴散會讓一切均勻混合。因為墨水散開後斑紋便消失無蹤，只留下單一顏色。然而，圖靈透過數學證明了可能會產生截然相反的結果：如果兩種化學物質在相互反應的同時以不同的速度擴散，最初均勻的狀態反而會被打破，進而形成斑紋。

在今日解釋這個想法時常使用的兩種物質模型中，物質的作用被區分如下：一種是活化劑，另一種是抑制劑。活化劑會促使自身生成更多，同時也會促成抑制劑的生成；抑制劑則會抑制活化劑的增加。此處附加了一個重要條件：抑制劑的擴散速度必須遠快於活化劑。

要理解為何這個條件會產生斑紋，如果拿森林大火作比喻就很容易明白。假設在乾燥森林的各處出現了微小的火星。火星會蔓延到附近的樹木並逐漸擴大，這相當於活化劑。一旦起火，消防員便會出動；消防員的行動遠比火勢蔓延要快得多，他們會提前在起火點周圍的樹木上灑水，這相當於抑制劑。如此一來，火勢就只會在最初點燃的地方燃燒，其周圍則保持濕潤。若從空中俯瞰森林，就能看到燒毀處與未燒處如點狀散布的花紋。在實際的數學模型中，根據物質的反應與擴散條件，會呈現出斑點或條紋等不同形態。

圖靈還解釋了這個過程從何處開始。起初，兩種物質在各處都是均勻混合的。但現實中並不存在完美的均勻狀態，在極微小的地方總會產生極細微的差異。通常這種差異很快就會消失；然而在圖靈發現的條件下，這種微小差異卻會愈來愈大。活化劑稍多的地方會變得更多，其周圍則因抑制劑的作用而變得更少。科學家將這種均勻狀態被打破的現象稱為「對稱性破缺」。這個初始平衡瓦解的現象，在今天被冠上了「圖靈不穩定性」之名。

圖靈透過求解複雜的方程式，證明了這個過程會產生斑點、條紋和波紋等圖樣。這類圖樣在今日被稱為「圖靈圖樣」（Turing pattern）。即使沒有人在外在進行繪製，物質在相互反應與擴散的過程中，斑紋也會自然生成，這正是圖靈理論的核心所在。

這一理論亦包含了對基因作用的見解。若對照論文發表的時期，這一點就更加清晰了。詹姆斯·華生與法蘭西斯·克里克是在1953年揭示了DNA的雙螺旋結構。當圖靈撰寫該論文時，根本無人知曉基因長成什麼模樣。即便如此，圖靈還是預見了基因的功能。他認為基因並非逐一描繪身體形態的藍圖；基因僅僅設定了化學物質反應有多快、擴散有多快等條件。圖靈的觀點是，實際形態是在這些條件下，依照反應與擴散的定律自然生成的。

圖靈亦在論文中指出了此理論的局限性。在論文開篇處，他寫道自己的模型是對實際生物體的簡化與理想化，因此可能與實際情況有所出入。他在提出新理論的同時，並未宣稱它能解釋一切。

14.3. 開拓計算生物學

圖靈的方程式很難用手算求解。雖然有幾種簡單的情況可以用紙筆解答，但要觀察斑紋實際如何生成，則需要大量的運算。圖靈手中有一台可以交付這項運算的機器，那就是曼徹斯特大學的費蘭蒂 Mark 1。

費蘭蒂 Mark 1於1951年2月安裝於曼徹斯特大學。這是世界上第一部由商業公司製造銷售的通用（可廣泛用於各類計算）電子電腦。圖靈親自編寫了這部電腦的程式設計手冊。正因為他比任何人都熟悉這部機器，所以他編寫了計算自己方程式的程式，並將其應用於形態發生研究中。

不過，1952年論文中刊載的斑紋圖案並非出自電腦，而是透過手算得出的。圖靈在論文中記載，該圖案是花費數小時手算求得的。在那個時代，電腦並不像今天擁有在螢幕上顯示圖像的裝置，計算結果也僅以數字形式輸出。圖靈預見，在處理更複雜形態的演變過程時，將能夠使用數位電腦。

用電腦來處理生命現象，在科學史上是一件嶄新的創舉。在那之前，電腦主要用於處理火砲彈道或密碼等數值工作。圖靈嘗試用電腦模擬生物生成斑紋的過程。他沒有在實驗室飼養動物，而是在電腦內部追蹤反應與擴散的歷程。今天這類研究被稱為計算生物學，圖靈亦被公認為開啟該領域的先驅之一。

在1952年發表論文後，圖靈將研究對象擴展至植物。這次他全力投入的問題是「葉序」。葉序是指葉片在莖上的生長順序與排列方式。觀察向日葵花盤中央，可以看到種子呈螺旋狀密密麻麻地排列著。順時針方向旋轉的螺旋與逆時針方向旋轉的螺旋並存。若計算這些螺旋的數量，會發現它們呈現規律的配對，例如34條與55條，或是55條與89條。在松果上，則經常出現8條與13條這樣的配對。

這些數字全都包含在費氏數列中。費氏數列是如同1、1、2、3、5、8、13、21、34、55、89般，將前兩個數相加得出下一個數的數列。新葉或種子大多生長在相對於前一個旋轉約137.5度的位置上。這個角度被稱為黃金角。如此排列能使葉片與種子互不重疊且緊密無縫地佔據空間。人們很早就知道了這個規律，卻一直未能解釋植物為何遵循此規律。

圖靈與曼徹斯特大學的植物學家克勞德·沃德洛一同研究了這個問題。圖靈認為，在植物莖端長出新葉的位置，同樣發生著形態發生素的反應與擴散。某處一旦長出葉片，其周圍便難

以長出新葉，而下一片葉子會在稍微有一段距離之處形成。圖靈試圖用數學追蹤這一過程不斷累積，進而展現出費氏數螺旋的歷程。

年輕的研究者們也參與了這項研究。研究生伯納德·理查茲嘗試將圖靈的方程式應用於球形表面。他將計算結果與名為放射蟲的微小海洋生物的圓形外殼形狀進行了比對。圖靈當時正在將這些研究整理成題為《葉序的形態發生素理論》的三篇手稿。然而，隨著圖靈於1954年6月突然離世，手稿未能完成。這些手稿塵封多年，直到1992年才刊載於彼得·桑德斯編纂的《圖靈全集》形態發生學卷中。

圖靈未能劃下句點的葉序問題，日後在曼徹斯特被重新探討。2012年適逢圖靈誕辰100週年，舉辦了名為「圖靈的向日葵」的公民科學活動。公民科學是指非專業科學家的普通公眾直接參與資料收集的研究。該活動收集了公眾種植的657朵向日葵的資料。雖然螺旋數為費氏數的案例占多數，但也確認了不遵循該規則的排列。這是一次由大眾共同驗證圖靈未竟之問的盛會。

關於斑紋的1952年理論，在圖靈生前亦未受到廣泛關注。1953年DNA結構被揭示後，生物學家的關注點轉向了基因與分子研究。圖靈試圖用方程式解釋生命斑紋的理論，被認為雖然在數學上看似合理，卻是在實際生物中未獲證實的想法。

數十年後情況發生了轉變。1990年，法國德凱珀的研究團隊在實驗室的化學溶液中，實際重現了圖靈所預測的斑點圖樣。1995年，日本生物學家近藤滋與朝井理華子在學術期刊《自然》（Nature）上發表了關於條紋神仙魚的研究。這種魚在生長過程中條紋會分裂並生成新條紋，其變化與圖靈方程式計算的結果完全吻合。2014年更有研究指出，小鼠腳趾分化為5根的過程中，圖靈所提出的原理同樣在發揮作用。

近年來，驗證與補充圖靈理論的研究仍不斷湧現。2023年3月，美國喬治亞理工學院弗拉維奧·芬頓教授的研究團隊在美國物理學會年會上發表了奇亞籽實驗的成果。研究團隊將奇亞籽均勻撒在托盤上，改變水分與土壤種類進行培育。結果幼苗呈群聚生長，形成如斑點或迷宮圖樣般的形狀。這些圖樣與利用反應—擴散方程式進行的電腦計算結果極為相似。研究團隊表示，這是首次在活體植物上直接證實了此一模型。

同年11月，美國科羅拉多大學波德分校安庫爾·古普塔教授的研究團隊在學術期刊《科學進展》（Science Advances）上發表了關於箱魷斑紋的研究。單憑圖靈的方程式，難以完全解釋箱魷表皮清晰的六角形斑紋。研究團隊在計算中加入了化學物質擴散時、產生色素的細

胞亦被牽引隨之移動的現象。隨後便得出了與真實魚類極為相似的鮮明斑紋。這項研究是以圖靈的理論為基礎，並在此之上增添了全新的解釋。

今日，圖靈1952年的論文被視為數理生物學（以數學解釋生命現象的學科）與計算生物學的起點。從豹的斑點、魚類的條紋、手指發育的過程，到沙漠植物叢生群聚的形貌，科學家們皆以圖靈的思想為基礎來研究生命的斑紋圖樣。用電腦模擬生命現象的研究，亦承襲了圖靈所開創的方法。

圖靈並未將生命的奧秘留給魔法。他深信生物美麗的斑紋亦遵循自然法則，而該法則可以用數學來書寫。他並親自以數學和電腦檢驗了這份信念。從密碼與電腦、機器智能，再到生命的形態，圖靈用同樣的方法處理了這些看似相距甚遠的領域中的問題。

第15章. 審判與國家的歧視 (1952~1954)



圖 15. 描繪了不得不站上法庭的圖靈當時的處境。

引言

1952年初，艾倫·圖靈39歲。他是曼徹斯特大學計算機實驗室的副主任，並在一年前的1951年獲選為對英國科學家而言極具榮譽的皇家學會院士（FRS）。那段時期，圖靈全心投入的研究，是用數學解開諸如斑馬條紋或植物長葉順序等生命圖樣。每到夜晚，他便坐在大學的費蘭蒂 Mark 1 電腦前，進行漫長的計算。

另一方面，幾乎沒有人知道他在戰時所做的工作。圖靈在布萊切利園帶頭破解德軍的恩尼格瑪密碼。他所設計的密碼解讀機 Bombe 與名為 Banburismus 的統計方法，在保護橫渡大西洋的盟軍船隻免受德國潛艇襲擊方面發揮了巨大的力量。歷史學家評估，正是由於這項密碼解讀，使戰爭縮短並拯救了無數生命。不過這只是推測。傑克·科普蘭所提出的 1,400 萬人這一數字，也是假設戰爭若持續更久的情況下所做的推算。

這一切都是國家機密。1946年6月，英國政府的公報上刊登了授予圖靈大英帝國勳章（OBE）的內容。然而，圖靈連對家人都無法透露自己為何獲頒勳章，因為《國家機密法》封住了他的嘴。因此在世人眼中，他只不過是個略顯古怪的大學數學家而已。

1952年，一起小小的失竊案徹底改變了圖靈的人生。本章將循著1952年至1954年初夏，圖靈所經歷的審判與懲罰，以及他所守護的國家如何對他反目背棄的過程展開敘述。

15.1. 失竊案與「嚴重猥褻罪」起訴

圖靈於1950年在曼徹斯特南方的小城鎮威姆斯洛買下一棟房子獨自居住。到大學通勤時搭乘火車或騎自行車，只要有空閒就會在田野鄉間奔跑。他從年輕時起就熱愛長跑，甚至曾創下不遜於馬拉松選手的紀錄。

1951年12月，圖靈在曼徹斯特市區牛津路的一家戲院附近，遇見了19歲的年輕人阿諾·墨瑞（Arnold Murray）。墨瑞是個沒有工作的貧窮青年。圖靈邀請他共進午餐，隨後兩人見面數次，發展成戀人關係。男人愛男人、女人愛女人，稱為同性戀。圖靈自學生時代起就清楚自己會被男性吸引，在摯友面前也從不隱瞞此事。

1952年1月23日，圖靈回到家中，發現遭了小偷，幾件衣物和生活用品被盜走。圖靈向警方報了案。幾天後，墨瑞向他坦白，小偷似乎是他認識的一個人，是個叫哈利的年輕人。警方比對屋內遺留的指紋，查出了犯人的身分。

然而在追查犯人的過程中，警方也得知了圖靈與墨瑞之間的關係。1952年2月，警察前來圖靈家中詢問此事。圖靈並未隱瞞。他如實陳述了與墨瑞的關係，並親手寫下陳述書提交。圖靈並不認為兩名成年人在彼此同意下的關係有任何過錯。

當時的英國法律卻不這麼認為。1885年制定的《刑法修正案》第11條，將男性之間的同性性行為定為「嚴重猥褻罪（gross indecency）」。這項法律完全不問兩人是否出於自願。若因這項罪名被判有罪，最高可入獄服刑2年。1895年將愛爾蘭著名作家奧斯卡·王爾德送進監獄的正是此條款，而在1950年代的英國，每年也有許多男性根據這部法律遭到處罰。圖靈如實寫給警方的陳述書，在這部法律之下直接成了犯罪的證據。

警方將圖靈與墨瑞一同逮捕並移送審判。1952年2月27日，威姆斯洛治安法庭舉行了第一次聽證會。正式審判於1952年3月31日在納茨福德季審法院開庭。季審法院是英國每年開庭4次、每季召開的地區刑事法院。審判的官方案名為「國王訴圖靈與墨瑞（Regina v. Turing and Murray）」。

面對即將到來的審判，圖靈必須決定如何應對。他深信這部法律是錯誤的，起初甚至打算在法庭上堅稱自己沒有做錯以進行對抗。然而，兄長約翰·圖靈與律師十分擔憂。若抗辯到底卻敗訴，就可能面臨入獄，屆時研究與電腦工作都必須全面停擺。兩人苦口婆心地勸說了圖靈許久。圖靈最終選擇了認罪。這並非他改變了想法，只不過是為了能繼續研究，而在法律面前低頭罷了。

法庭上，數學家同僚麥克斯·紐曼與布萊切利園時期的同仁休·亞歷山大出庭為圖靈的人品作證。休·亞歷山大陳述圖靈是國家不可或缺的珍貴人才。但他無法說明何以如此，因為圖靈在戰時所做的一切依然屬於國家機密。正是那個讓他無法對家人透露獲頒勳章緣由的秘密，這次又使得他的功績在法庭上一句話也無法提及。

法官宣判圖靈有罪，對墨瑞則判處附條件釋放。這意味著在指定期限內若不再犯，便不會另行處罰。審判的消息刊登在地方報紙上。鄰居、大學同仁以及母親莎拉·圖靈也都得知了這件事。

15.2. 殘酷的抉擇：強制化學投藥

在宣判有罪的同時，法官讓圖靈在兩條路中擇一：入獄服刑，或是在接受保護管束的同時接受荷爾蒙治療。保護管束是一種不將人關進監獄，而是使其留在社會生活中，並監督其是否遵守規定條件的制度。根據日後公開的特赦令，圖靈必須接受為期12個月的保護管束，並在曼徹斯特皇家醫院（Manchester Royal Infirmary）由具備資格的醫師施以治療。

法院之所以能提出以「治療」代替刑罰，是因為當時錯誤的醫學知識。當時英國許多醫師與法官都將同性戀視為一種需要矯治的疾病。他們認為這是體內荷爾蒙失衡所致，並相信注入女性荷爾蒙以抑制性慾便能達到治癒效果。這完全是毫無根據的想法。現代醫學不再將同性戀視為疾病，世界衛生組織（WHO）也在1990年將同性戀從疾病清單中剔除。當時這項處置被稱為「器官療法（organotherapy）」，如今則稱之為「化學去勢」，意思是透過藥物抑制男性的性功能。

圖靈接受了荷爾蒙治療。一旦入獄，便無法前往實驗室，推導計算中的數學公式與電腦運行的程式都得被迫停擺。如同當初認罪時一樣，這一次他判斷的基準依舊是能否繼續從事研究。表面上看是他自己選擇的道路，但在入獄的威脅面前，他根本沒有其他選擇。

自1952年4月起，圖靈開始接受名為己烯雌酚（stilboestrol）的藥物。其化學名稱為二乙基己烯雌酚（diethylstilbestrol），是一種人工合成的女性荷爾蒙。起初是以藥丸口服，後來則植入大腿皮下，讓藥效在體內緩慢釋放擴散。這項處置持續了約1年。

藥物改變了圖靈的身體。他失去了身為男性的性功能，體重增加，身形也發生改變。他甚至出現了乳房如女性般隆起的男性女乳症（gynaecomastia）。對於一個曾在原野上奔馳數十公里的人而言，自己的身軀變得如他人身體般陌生，是極大的痛苦。身體的變化也在他的心靈深處留下了深刻的創傷。

那段時期圖靈的心境留存在寄給朋友們的信件中。在審判前夕寄給弟子兼好友諾曼·勞特利奇的信中，他寫道，等熬過這一切後自己或許會變成另外一個人，但究竟會變成怎樣的人目前還不知道。而在治療開始後寄給數學家友人菲利普·霍爾的信中，他則寫道，大家都說這種藥雖會降低性慾，但在治療結束後就會恢復如初，希望這話是真的。

圖靈竭力不讓自己崩潰。他甚至還像開玩笑似地對親近的朋友說，因為藥物的關係自己的胸部正在變大。這是他試圖以笑容承受痛苦的獨特方式。雖然電影或小說常將圖靈描繪成在接受荷爾蒙治療後精神便立刻崩潰，但實際的歷史紀錄卻截然不同。

紀錄所展現的，是他在這段時期依然未曾停歇的研究。1952年，以數學解釋生命圖樣的論文〈形態發生的化學基礎〉刊登於英國皇家學會的學術期刊上。圖靈每晚依然持續使用費蘭蒂 Mark 1 電腦計算植物葉序。1953年，曼徹斯特大學為他特設了「計算理論副教授（Reader in the Theory of Computing）」的職位。1954年，他為了大眾讀者撰寫了一篇名為〈可解問題與不可解問題〉的文章，發表於科學雜誌上。

荷爾蒙治療於1953年春季結束。然而「罪犯」的標籤卻未曾消逝。身體殘留的變化與人們的眼光，在圖靈的心中留下了長久的陰影。

15.3. 遭剝奪的機密等級與孤立

有罪判決從圖靈身上奪走的，不僅僅是身體的健康。他同時也失去了經手國家機密的資格。這項資格被稱為「安全等級」或「安全許可」。政府只向擁有此等級的人出示國家機密。

戰後，布萊切利園的密碼解讀機構於1946年更名為政府通訊總部（GCHQ）。圖靈在曼徹斯特大學任職的同時，依然擔任 GCHQ 的密碼顧問。因為戰時累積的知識與經驗依然不可或缺。然而，隨著有罪判決導致安全許可遭到撤銷，戰後一直擔任的這項顧問工作也無法再繼續執行。在圖靈最初開拓的密碼研究世界裡，他的名字就這樣被抹去了。

政府之所以如此行事，有其時代背景。二戰結束後，世界分裂為以美英為首的一方與蘇聯一方，彼此充滿猜忌。儘管未曾爆發直接交火，但冷峻對峙的這段時期被稱為「冷戰」。兩大陣營為了探查對方的秘密，紛紛派遣間諜潛入。

在英國，一起事件將這種不安轉化為對同性戀者的懷疑。1951年5月，英國外交部的外交官蓋伊·伯吉斯與唐納·麥克林突然叛逃至蘇聯。兩人長期向蘇聯洩漏機密，是蘇聯的間諜，而伯吉斯則為人所知是一名同性戀者。這起事件之後，英國政府內部蔓延著一種觀念：將機密託付給同性戀者極其危險。外交部甚至暗中調查雇用同性戀者時的安全風險。

政府的邏輯如下：在視同性戀為犯罪的社會中，同性戀者一旦被發現就會受到處罰，因此敵國若以此為弱點進行脅迫，他們就可能交出機密。然而，製造出這個弱點的，正是將同性戀定為犯罪的法律本身。即便如此，政府卻沒有去修改法律，反而去懷疑人。

美國的情況也十分相似。美國政府將同性戀者逐出公務員體系，並在1952年透過新移民法阻絕外國同性戀者入境。戰時曾與美國海軍共享密碼技術並肩合作的圖靈，在被判有罪後遭到了美國拒絕入境。

繼被剝奪資格之後，監視也接踵而至。當腦中掌握著國家重大密碼機密的人淪為「罪犯」時，情報機構便將他視為危險人物。警方與情報當局時刻監視著圖靈與誰見面、去了何處。

圖靈在兩次旅行中切身體會到了這種監視。1952年，他啟程前往挪威旅行。北歐國家對同性戀的態度比英國更為寬容。在那裡，他結識了一名叫謝爾·卡爾森（Kjell Carlson）的年輕人。1953年3月，當卡爾森打算前往英國探望圖靈時，警方卻搶先採取了行動。卡爾森未能見到圖靈，便被遣送回挪威。圖靈向朋友們坦言，這件事對他而言是堪比審判的重大危機。他親身體會到了連自己見了誰，國家都一直在暗中窺探的事實。

1953年，他前往希臘的科孚島度假。科孚島隔著狹窄的海域，與共產主義國家阿爾巴尼亞隔海相望。傳記作家們指出，對於掌握國家機密的圖靈前往靠近共產陣營邊界之處旅行，情報當局始終懷著不安嚴密監視。

圖靈雖然保住了大學的研究職位，也能繼續進行研究，但他所身處的世界卻變得日益狹窄。在劍橋大學國王學院與布萊切利園時，身邊尚有包容他特異個性與思想的同僚陪伴。而如今，他卻成了一個國家無法信任的人。他再也無法與昔日同仁談論機密業務，鄰居投來的目光也與以往大不相同。

但這並不代表圖靈只是一個人苦苦硬撐。他前往曼徹斯特拜訪精神分析學家法蘭茲·格林鮑姆（Franz Greenbaum）博士並接受諮商。在格林鮑姆博士的建議下，他每晚將夢境記錄在筆記本上，藉此審視自己的內心。他與博士的家人也走得很近，甚至會去博士家中作客。他與朋友們書信往返，並持續進行關於數學難題與生物圖樣的計算。

即便如此，國家將自己視為潛在叛徒與罪犯的現實卻絲毫未變。戰時他為了國家破解德國的秘密；戰爭結束後，那個國家卻將他的私生活定為犯罪、強行對他的身體投藥、關閉機密的大門，並時刻監視著他的步伐行蹤。本章標題之所以包含「國家的歧視」一詞，原因便在於此。

1954年6月7日傍晚，艾倫·圖靈在威姆斯洛的家中離世。當時距離他的42歲生日大約還有2週。翌日6月8日早晨，打理家務的幫工發現了他。

第16章. 圖靈之死與遲來的名譽恢復（1954年以後）



圖 16. 以空長椅與筆記本表達對圖靈的緬懷之情。

1954 年初夏，在英國西北部的小城市威姆斯洛，數學家艾倫·圖靈以 41 歲之齡離世。他構想出想像中的計算機器，為電腦奠定了理論基礎；在戰爭期間，他破解了德軍的密碼，為拯救許多人的生命做出了貢獻。在曼徹斯特，他用實體電腦編寫程式，並試圖以數學解釋向日葵種子的排列以及動物花紋生成的原理。

然而，在他離世時，幾乎沒有人真正瞭解這些成就。他在戰爭期間所做的工作屬於國家機密，許多人只知道他是個因同性戀而遭受懲處的人。在此後半個多世紀的時間裡，英國社會逐漸重新找回這位被遺忘的數學家。政府遲來的道歉與王室赦免、以他的名字命名的法律，以及印有他肖像的鈔票，都展現了這一過程。

16.1. 1954 年 6 月 8 日的悲劇

在書籍與電影中，經常記載圖靈是在 6 月 8 日離世的。然而，他嚥氣的日子與被發現的日子其實並不相同。圖靈於 1954 年 6 月 7 日星期一晚間，在威姆斯洛艾德靈頓路 43 號自家臥室中離世。那天是英國的公定假日。隔天，也就是 6 月 8 日星期二早晨，前來幫忙家務的家事幫手發現他躺在床上。當時距離他的 42 歲生日僅剩 16 天。

警察與醫生來到家中勘查遺體，解剖結果顯示死因為氰化物中毒。氰化物是一種會妨礙人體細胞利用氧氣功能的毒性物質。圖靈在電鍍實驗中使用的青酸鉀，即氰化鉀也屬於這一類。幾天後舉行了死因研訊。死因研訊是官方正式判定突發死亡原因的程序。在研訊中，驗屍官判定圖靈係自殺身亡。圖靈的遺體於 6 月 12 日在沃金火葬場火化，骨灰撒在了那裡。那裡與幾年前撒放他父親骨灰的地點相同。

伴隨驗屍官的判定而廣泛流傳的，是「青酸鉀蘋果」的故事。床邊茶几上放著一顆咬了幾口的蘋果，人們認為圖靈是把蘋果浸泡在青酸鉀中後吃下的。然而，這個故事中有未經證實之處。當時警方與驗屍官並未檢驗那顆蘋果是否含有毒素。現場也沒有發現遺書。所謂蘋果是致死工具的說法，並非經過檢驗證實的事實，而是根據現場狀況所作的推測。

正因為這顆未經檢驗的蘋果與未留下的遺書，對於圖靈之死，至今仍存在著不同的解讀。第一種是依照驗屍官的判定，認為他是自殺的解讀。撰寫圖靈代表性傳記的數學家安德魯·霍奇斯便支持這一觀點。據說圖靈於 1938 年在劍橋觀看迪士尼動畫電影《白雪公主與七矮人》後，非常喜歡巫婆將蘋果浸入毒藥的那一幕，常常加以模仿。霍奇斯認為，圖靈可能模仿了那個場景，而且為了讓母親不那麼悲傷，可能故意將其偽裝成意外。

第二種是認為這是一場意外的解讀。圖靈的母親莎拉·圖靈終生都未能接受兒子自殺的判定。圖靈在家中的小房間裡設了一間實驗室，進行利用電為湯匙鍍金的電鍍實驗。這項電鍍實驗使用了青酸鉀。莎拉主張，兒子平時有不愛洗手的習慣，因此可能是在實驗過程中不慎誤食了沾在手上的毒物。

第三種則是學者們在兩種解讀之間重新審視證據後的觀點。圖靈研究學者傑克·科普蘭在圖靈誕生 100 週年的 2012 年表示，有必要重新檢視驗屍判定。他提出的根據是圖靈平時的習慣與最後幾天的行蹤。圖靈有睡前吃蘋果的習慣，且常常沒吃完就剩下。因此，很難認為床邊吃剩的蘋果具有什麼特殊意義。此外，圖靈在星期五離開辦公室時，還留下了寫有星期一再待辦事項的備忘錄，身邊的人也回憶他直到最後都開朗且富有幽默感。科普蘭認為，圖靈也有可能是在實驗過程中吸入了產生的氰化氫氣體。

在這三種解讀中，究竟何者屬實至今仍不得而知。在此有必要區分已確定與未確定的事實。圖靈死於氰化物中毒，是經由解剖證實的事實。然而，導致中毒的具體經過與途徑卻並未確定。關於蘋果含有毒素的說法，與其說是證實的事實，不如說是流傳於人們之間的故事。

關於蘋果，還有另一個流傳甚廣的傳聞。那就是美國電腦公司蘋果的標誌，即被咬了一口的蘋果形狀，是為了紀念圖靈的標記。這個傳聞並非事實。繪製該標誌的設計師羅布·詹諾夫曾多次表示這與圖靈無關。被咬過的痕跡只是為了避免讓蘋果看起來像櫻桃或番茄而添加的。據說當英國演員史蒂芬·佛萊向史蒂夫·賈伯斯詢問這個傳聞時，賈伯斯笑著回答說「要是那樣就好了」，但否認了這一說法。

16.2. 遲來的道歉與王室赦免

圖靈離世後，他在戰爭期間所做的工作依然長期保密。他雖然在 1946 年獲頒大英帝國勳章（OBE），但授勳理由僅有「在外交部所做的工作」這一句簡短說明。在布萊切利園破解恩尼格瑪密碼的事實，因《國家機密法》而無法向任何人透露。圖靈本人甚至未能向家人提及此事便離開了人世。

秘密開始解開是在 1970 年代。英國政府逐步公開了戰時的密碼解讀紀錄。1974 年，一本介紹布萊切利園密碼破譯作戰「Ultra」的書籍出版，人們才第一次得知那裡發生的事情。1983 年，安德魯·霍奇斯出版了題為《艾倫·圖靈：恩尼格瑪》的傳記。許多人透過這本書了解到圖靈是電腦之父，也是戰爭中的幕後功臣。與此同時，這樣一個人竟因同性戀而受審，且為了免於入獄而不得不接受女性荷爾蒙注射的事實，也隨之公諸於世。

隨著他的成就與受到的懲罰一同廣為人知，社會上出現了要求國家對此事展現負責態度的呼聲。2009 年 8 月，英國電腦程式設計師約翰·格雷厄姆-卡明發起了一項線上請願，要求政府正式向圖靈道歉。在數週之內，便有超過 3 萬人連署，科學家、作家與政治人物也紛紛加入聯署。

政府的答覆在大約一個月後出爐。2009 年 9 月 10 日，高登·布朗首相代表英國政府發表聲明。布朗首相反省並承認圖靈受到的待遇駭人聽聞且完全不公。他代表英國政府以及因圖靈而得以生活在自由之中的所有人說道：「我們感到十分抱歉，你本應受到好得多的對待。」這是圖靈去世 55 年後，國家首次承認錯誤。

然而，道歉並非具有法律效力的措施。圖靈的有罪判決在法律紀錄上依然存在。因此，除了道歉之外，要求對已作出的有罪判決予以赦免的呼聲接連不斷。赦免是國家寬恕並免除已經宣告的刑罰或其後果的行為。不過，赦免不同於重新開庭審理並宣判無罪。因為這並非糾正有罪判決本身有誤，而是寬恕依該判決所施加的懲處的措施。

赦免的要求同時來自議會與科學界。曼徹斯特威辛頓選區的下議院議員約翰·里奇多次向議會提交赦免圖靈的法案。在上議院，夏基勳爵也提出了相同內容的法案。2012 年 12 月，物理學家史蒂芬·霍金、皇家學會會長保羅·納斯、天文學家馬丁·里斯等科學家在報紙上刊登信件，要求予以赦免。

起初政府猶豫不決，理由是判決是依當時法律作出的，事到如今難以推翻。然而，要求赦免的輿論聲浪越來越大。終於在 2013 年 12 月 24 日平安夜，伊莉莎白二世女王赦免了圖靈。女王採納了司法大臣克里斯·葛瑞林的建議，以唯有君主才能使用的「皇家特赦特權」，赦免了 1952 年的有罪判決。

圖靈獲得赦免的消息傳遍世界各國。然而，這次赦免卻引發了新的問題。依同樣法律受罰的人多達數萬人，其中絕大多數是默默無聞的普通人。外界出現了批評聲浪，質疑僅寬恕一位著名科學家是否恰當。這項批評進一步演變為擴大赦免對象的訴求。

16.3. 「艾倫・圖靈法」與 50 英鎊新鈔

要理解這項訴求，首先必須瞭解該法律施行了多久、適用了多少人。在英格蘭與威爾斯，懲處男性之間性行為的法律實施了很長時間。1967 年，21 歲以上男性在合意下於私人場所進行的性行為被排除在處罰對象之外。部分帶有歧視性的條款此後依然存在，直到 2003 年才被廢除。在此期間，許多人遭到逮捕並受審，也有許多人失去工作或與家人疏遠。即便在法律修改之後，他們的犯罪紀錄依然保留著。

在圖靈獲得赦免後，約翰・里奇議員、夏基勳爵以及人權團體主張，應該赦免所有依同一部法律受罰的人。圖靈的家人也挺身而出。2015 年，包括圖靈的姪孫女蕾切爾・班斯在內的家屬，向首相官邸遞交了超過 50 萬人連署的請願書。各大主要政黨也相繼承諾接受這項訴求。

其結果便是《2017 年警察與犯罪法》。該法於 2017 年 1 月 31 日獲得王室御准。根據這部法律，在英格蘭與威爾斯，因過去懲處同性戀條款而被判有罪的人當中，符合一定條件者獲得了赦免。條件為：對方在當時年滿 16 歲且同意發生關係，且該行為在現今法律下亦不構成犯罪。人們將該法中的赦免條款稱為「艾倫・圖靈法」。雖然這不是正式名稱，但因為該法源自對圖靈的赦免而得名。

赦免的方式視當事人是否已經離世而有所不同。已經離世的約 4 萬 9 千人直接透過該法獲得赦免。一般常說的 5 萬餘人就是指這個數字。在世者則可向政府提出申請，在消除犯罪紀錄後獲得赦免。在英國，清除犯罪紀錄的程序被稱為「紀錄抹除」。2022 年，法律再次修正，擴大了可以清除紀錄的範圍。對一個人的赦免，最終演變為讓數萬人重獲名譽的法律。

圖靈的名字並未僅留在法典中，也刻印在人們每天握在手上的金錢上。2018 年，英國央行英格蘭銀行向民眾公開徵集印在 50 英鎊新鈔上的科學家推薦名單。徵集到了超過 20 萬件推薦。該行在篩選候選人後，於 2019 年 7 月 15 日宣布選定艾倫・圖靈作為 50 英鎊新鈔的人物。當時的央行總裁馬克・卡尼介紹圖靈為奠定現代電腦理論基礎的人。

新鈔於圖靈生日當天的 2021 年 6 月 23 日首次發行。它不是用紙印製，而是以堅韌耐磨的塑膠材質——聚合物製成。鈔票背面印有展現圖靈生平與研究的圖案。首先是 1951 年拍攝的圖靈照片，以及他在 1936 年論文〈論可計算數及其在判定問題上的應用〉中出現的表格與數學公式。此外，還包含圖靈設計的電腦 ACE 之試驗模型「Pilot ACE」，以及用於破解恩尼格瑪密碼的「Bombe」設計圖紙。在送入機器的紙帶圖樣上，以 0 和 1 組成的二進位數字印著圖靈的生日 1912 年 6 月 23 日。鈔票上的花朵造型紅色金箔取自向日葵，旨在紀念圖

靈晚年研究的形態發生學。下方則有圖靈的簽名，以及他在 1949 年接受《泰晤士報》採訪時的一段話：「這只不過是未來發展的前奏，僅僅是將來巨變的影子。」這句話蘊含著他預見電腦未來將成就更大番事業的期許。

這張鈔票除了紀念研究成就之外，還具有另一層意義。圖靈成為第一位登上英格蘭銀行鈔票的性少數族群人物。為了紀念發行，該行在倫敦總行大樓上方懸掛了彩虹旗。70 年前曾因同性戀而懲罰一個人的國家，如今將因同樣理由遭受痛苦的人印上了英格蘭銀行發行的最高面額 50 英鎊鈔票。

此後英國君主更迭，但鈔票上圖靈的位置依然未變。2022 年伊莉莎白二世女王逝世，查爾斯三世繼位，鈔票正面的肖像也必須隨之更換。自 2024 年 6 月 5 日起，印有查爾斯三世頭像的新鈔開始發行，但鈔票背面並未更換。50 英鎊鈔票的背面，至今依然是艾倫·圖靈。

紀念圖靈的方式還有許多。美國電腦協會自 1966 年起，每年頒發「圖靈獎」給在電腦科學領域取得重大成就的人，該獎項被譽為電腦科學界的諾貝爾獎。2001 年，曼徹斯特薩克維爾公園豎立起了一座圖靈手握蘋果坐在長椅上的雕像。2015 年，英國成立了研究資料科學與人工智慧的國家級研究所，並命名為「艾倫·圖靈研究所」。他曾工作過的布萊切利園如今已改建為博物館，每年吸引眾多訪客前來。

1954 年 6 月，圖靈在威姆斯洛的家中孤獨離世。他如何度過最後一個夜晚，至今仍無人知曉。然而，他所留下的思想並未消逝。如今我們使用的智慧型手機、電腦，以及與人類對話的人工智慧，其理論根源都來自於他在 1936 年於紙上描摹出的想像機器。

第17章. 人工智慧的歷史與發展 (1950年代~2020年代)



圖 17. 透過西洋棋與神經網路呈現人工智慧研究的發展脈絡。

艾倫·圖靈於 1948 年撰寫了報告〈智慧機器〉。在這份報告中，他同時展望了讓機器變得聰明的兩條途徑。第一條是由人類逐一制定規則的途徑；第二條則是由如同大腦神經元般相連的機器在累積經驗的過程中自主學習的途徑。

2 年後的 1950 年，圖靈在學術期刊《心靈》（Mind）發表了論文〈計算機器與智慧〉。在這篇論文中，他提出了「機器能思考嗎？」這一問題，並提議透過對話來分辨人類與機器的模仿遊戲。

圖靈於 1954 年 6 月離世，享年 41 歲。然而，他留下的提問並未隨之消逝。在圖靈逝世後的 70 年間，科學家們在他所展望的兩條道路上交替前行。一條路受阻時，另一條路便敞開，期待高漲後又破滅的循環也反覆上演。今日的人工智慧，正是歷經這樣的過程而誕生的。

17.1. 達特茅斯會議與符號主義 AI 的萌芽 (1956~1970s)

人工智慧之名的誕生

圖靈將自己研究的領域稱為「機器智慧」。該領域獲得現今的名稱，是在圖靈離世後的隔年。1955 年夏天，美國年輕數學家約翰·麥卡錫與 3 位同事共同撰寫了一份研究計畫書。哈佛大學的馬文·閔斯基、貝爾實驗室的克勞德·夏農，以及 IBM 的納撒尼爾·羅徹斯特皆參與其中。在這份計畫書標題中首次登場的詞彙，正是「人工智慧（Artificial Intelligence）」。

依照這份計畫書，1956 年夏天，在美國新罕布夏州漢諾威的達特茅斯學院舉行了為期約 2 個月的研討會。這場聚會被稱為達特茅斯會議。撰寫計畫書的學者們認為，如果能夠精確描述包括學習在內的智慧的所有特徵，就能讓機器加以模仿。許多學者將這次會議視為人工智慧作為一門獨立學科誕生的時刻。這發生在圖靈離世 2 年之後。

以規則與符號思考的機器

在達特茅斯會議上，支持這種想法的程式早已問世。那就是與會的赫伯特·賽門與艾倫·紐厄爾帶來的「邏輯理論家（Logic Theorist）」。該程式能自主證明數學書籍中記載的邏輯定理，被視為機器完成以往認為需要人類智慧才能勝任之任務的早期代表範例。兩人隨後又開發了試圖以相同方法解決多種問題的「通用問題解決者（GPS）」。麥卡錫則於 1958 年創造了適用於人工智慧研究的程式語言 LISP。

這些早期研究者相信人類的思維可以轉化為符號與規則。只要用符號記錄「所有鳥都會飛」與「麻雀是鳥」這兩句話，機器就能推導出「麻雀會飛」的結論。像這樣將知識表示為符號並依循邏輯規則進行運算的方式，被稱為「符號主義 AI」。由於是由人類自上方制定規則、機器遵照執行，因此也被稱為「由上而下」的方法。這種方式在人類明確指定運算規則這一點上，與圖靈曾探討過的研究取向有所相通。

博弈遊戲是符號主義 AI 熱衷處理的課題，而圖靈早在初期便涉足了這條道路。1948 年，圖靈與好友大衛·錢珀瑙恩共同設計了西洋棋程式「Turochamp」。當時並沒有能運行該程式的電腦。因此在 1952 年，圖靈用紙和筆親自按照程式的運算逐步推演，與同事下了一盤西洋棋。據說每下一著棋要花上將近 30 分鐘。Turochamp 採用了前瞻預測未來幾步棋並選擇最佳著法的方法，這種方法日後成為西洋棋程式的基本架構。這條道路在 1997 年 5 月達到了一個里程碑：IBM 的西洋棋電腦「深藍」（Deep Blue）擊敗了世界冠軍加里·卡斯帕洛夫。

進行對話交談的程式也應運而生。1966 年，美國麻省理工學院（MIT）的約瑟夫·魏澤鮑姆發表了對話程式「ELIZA」。ELIZA 模仿了心理諮商師的口氣。當使用者提起母親的話題時，它便會反問並請對方多聊聊母親。ELIZA 只是搜尋句子中的單詞並套入既定模板來回答，根本不理解文句的涵義。儘管如此，許多人依然向 ELIZA 傾訴內心深處的想法。據說魏澤鮑姆的秘書在與 ELIZA 對話時，甚至請求他暫時迴避。魏澤鮑姆見狀反而感到擔憂，因為他察覺到人們太過容易信任機器了。

1972 年，精神科醫師肯尼斯·柯爾比開發了名為「PARRY」的程式。PARRY 模仿了極度偏執多疑病患的語氣。將對話紀錄展示給精神科醫師們看時，醫師們難以準確分辨 PARRY 與真實病患。這項僅憑對話記錄來分辨人類與機器的實驗，在形式上與圖靈的模仿遊戲頗為相似。

膨脹的期待

隨著定理證明、西洋棋和對話領域接連取得成果，研究人員懷抱起遠大的夢想。赫伯特·賽門在 1965 年預測，20 年之內機器將能勝任人類所能做的任何工作。馬文·閔斯基也表示，在一個世代之內，人工智慧的核心問題將大致獲得解決。

圖靈的預測則比這更加謹慎。圖靈在 1950 年的論文中寫道，大約 50 年後，一般人在進行 5 分鐘的對話後，猜中對方是機器的機率將不會超過 70%。早期研究者的期望遠遠超越了圖靈的預測。政府與軍方相信了研究者們的承諾，投入了大量的研發經費。

17.2. AI 寒冬與連結主義的反擊 (1980s~2000s)

碰壁的符號主義

研究者們的承諾並未如預期般實現。進入 1970 年代後，符號主義 AI 面臨了兩堵高牆。

第一堵牆是「組合爆炸」。即使是西洋棋或拼圖這種規則明確的問題，每多預測一步，需要考量的可能性數量就會成倍增加。在小型練習題目中運作良好的程式，面對現實世界的問題時卻陷入了無窮無盡的計算中。

第二堵牆是「常識」。前文所見的「所有鳥都會飛」這條規則，在企鵝與鴕鳥面前便不適用。受傷的鳥、圖畫中的鳥、烤全雞也都不會飛。人類即使沒有特別學習也能理解這些例外。但對機器而言，必須將每個例外逐一寫成規則，而現實世界中的例外卻無窮無盡。

資助研究經費的一方大失所望。1973 年，英國數學家詹姆斯·萊特希爾受政府委託，發表了一份評估人工智慧研究的報告。他認定人工智慧研究未能達成所承諾的成果。在這份《萊特希爾報告》出爐後，英國政府大幅縮減了人工智慧的研究經費。美國國防部的研究機構國防高等研究計劃署（DARPA）也在相近時期減少了資助。多項研究計畫停擺，學生紛紛轉向其他領域。人們將這段時期稱為「第一次 AI 寒冬」。

專家系統之春與第二次寒冬

到了 1980 年代，人工智慧似乎迎來了第二春。這次的主角是「專家系統」。專家系統處理的不是整個世界，而是狹窄單一領域的知識。向醫師或工程師等專家詢問獲得知識後，將其整理成數百、數千條類似「若出現此類症狀，則極可能是某種疾病」的規則並輸入電腦。在規則由人類制定這一點上，它延續了符號主義的路線，但縮小了所處理的範疇。

這項技術也展現了實際的應用價值。1970 年代美國史丹佛大學開發的「MYCIN」，利用約 600 條規則為血液感染患者推薦合適的抗生素。電腦公司 DEC 從 1980 年起透過名為「XCON」的專家系統挑選符合客戶訂單的電腦零組件配置，每年省下了巨額成本。各國政府也紛紛採取行動。1982 年日本政府啟動了「第5代電腦」計畫，美國與英國也急忙再度增加人工智慧的研究經費。

然而這個春天並未持續太久。將專家腦中的知識轉化為規則需要耗費大量的時間。專家本人也往往無法用明確的規則來解釋自己的判斷。當規則增加到數千條時，規則之間開始產生衝突，修改了一處又會導致其他地方出問題。一旦遇到規則未涵蓋的狀況，系統便束手無策。

1987 年前後，人工智慧專用電腦市場崩潰。日本的第5代電腦計畫也未達成目標，於 1992 年劃下句點。從 1980 年代末延續至 1990 年代初的這段低迷期，被稱為「第二次 AI 寒冬」。

仿效大腦的機器：神經網路

在符號主義度過寒冬之際，走在另一條路上的研究人員正默默蓄積力量。他們從人類的大腦中尋找解答。人類大腦擁有約 860 億個神經元，神經元彼此相連並傳遞訊號。每當學習到新事物時，這些連結的強度便會發生改變。

模仿這種原理的電腦程式被稱為「人工神經網路」。試圖透過神經網路的連結來建構智慧的思想被稱為「連結主義」。因為它不是由上而下賦予規則，而是由機器從經驗中學習、由下而上建立智慧，因此也被稱為「由下而上」的方法。

這種思想的根源同樣有圖靈的身影。圖靈在 1948 年的報告〈智慧機器〉中構想了「非組織化機器」。他的設想是：機器最初由隨意相連的組件構成，但若透過獎懲來施教，連結便會逐漸改變，進而成長為具備實用價值的機器。圖靈認為初生嬰兒的大腦與此類似。然而，圖靈任職的英國國家物理實驗室所長卻對這份報告評價極低，貶低其僅為學生作文水準。該報告直到圖靈逝世 14 年後的 1968 年，才被收錄於書籍中公諸於世。

在圖靈的報告被埋沒期間，神經網路研究雖已在其他地方展開，但那條道路同樣充滿坎坷。1958 年，美國心理學家法蘭克·羅森布拉特發表了能透過學習辨識文字與形狀的「感知器（Perceptron）」，引起廣大關注。然而在 1969 年，馬文·閔斯基與西蒙·派珀特在著作《感知器》中，以數學方式證明了僅有單一層的感知器連簡單的邏輯問題都無法解決。兩人提出的例子是只有在兩個輸入中恰有一個為真時輸出才為真的「XOR」問題。這本書出版後，神經網路研究在很長一段時間內都難以獲得研發經費。

反向傳播：重振旗鼓的神經網路

解決問題的關鍵在於堆疊多層神經網路。只要堆疊層級，就能解決像 XOR 這類的問題。然而層數增多後，又產生了新的困難：人們難以得知該如何調整內部隱藏層的連結權重。

1986 年，大衛·魯梅哈特、傑佛瑞·辛頓與羅納德·威廉斯在科學期刊《自然》（Nature）上整理並發表了「反向傳播（Backpropagation）」方法。美國的保羅·韋伯斯早在 1974 年的博士論文中便提出了類似構想。其原理如下：神經網路給出答案後，與正確答案進行比對以衡量出錯程度，亦即計算誤差。接著將此誤差由輸出端逆向傳遞至輸入端，計算每個連結對誤差的責任大小並逐步修正。這就像考試後針對錯題回溯反思、找出失誤所在並加以改正的讀書方法。

這種方法很快便應用於實際問題上。1989 年，法國學者楊立昆在美國貝爾實驗室利用反向傳播技術，建構出能辨識手寫數字的神經網路。楊立昆的神經網路是將圖像分割成小區塊來檢視的「卷積神經網路」。這項技術在 1990 年代被美國各家銀行用於辨識支票上書寫的數字。

即便如此，直到 1990 年代與 2000 年代初期，神經網路依然未能成為人工智慧研究的主流。電腦運算速度緩慢，訓練神經網路所需的數據也嚴重不足。其他演算法表現更好的情況也屢見不鮮。然而在這樣的逆境中，辛頓、楊立昆以及加拿大的約書亞·班吉歐等學者始終沒有放棄神經網路的研究。探討機器能否從經驗中學習的探索，透過多位研究者的不同途徑得以延續。

17.3. 深度學習革命與生成式 AI 時代的揭幕 (2010s~2020s)

三種要素的匯聚

神經網路之所以未成主流，原因在於運算緩慢的電腦與匱乏的數據。2010 年前後，神經網路研究者長期引頸期盼的三種要素終於同時齊備。

第一種要素是大數據。隨著網際網路與智慧型手機的普及，照片、文字與影片呈爆發性累積。李飛飛與普林斯敦大學研究團隊於 2009 年公開了為照片內容貼上標籤的「ImageNet」。當時的論文介紹了約 320 萬張照片，隨後資料量擴增至 1,400 萬張以上。

第二種要素是 GPU。GPU 即圖形處理器，原本是為了繪製電腦遊戲畫面而研發的零組件。GPU 能夠同時運算構成畫面的無數像素點。這項能力正好完美契合了同時計算神經網路中海量連結的需求。

第三種要素是高效訓練深層神經網路的技術。辛頓等研究人員逐步找出了訓練深層堆疊神經網路的方法。利用深層神經網路進行學習的技術被稱為「深度學習」。

2012 年，這三種要素匯聚於一處。在 ImageNet 影像辨識競賽中，辛頓的學生亞歷克斯·克里澤夫斯基、伊利亞·蘇茨克維與辛頓共同開發的神經網路「AlexNet」奪得了第 1 名。AlexNet 是使用 2 顆電競用 GPU 進行訓練的。從最可能的 5 個候選答案中不包含正確答案的錯誤率來看，AlexNet 約為 15%，而第 2 名團隊約為 26%，兩者差距超過 10 個百分點。目睹這項成果的研究人員與企業紛紛爭相轉向深度學習。在幾年之內，辨識照片中的人臉、語音轉文字以及外語翻譯的表現皆有了驚人的進展。

2016 年 3 月，AlphaGo 與李世乭

讓深度學習廣為大眾所知的事件發生在首爾。2016 年 3 月 9 日至 15 日，在首爾的一家飯店裡，Google DeepMind 的圍棋程式 AlphaGo 與李世乭 9 段進行了 5 局對弈。由於圍棋可能的著法變化數量遠超全宇宙原子的總數，無法像西洋棋那樣逐一推演每一步棋。因此，許多專家曾認為電腦至少還需要 10 年才能擊敗頂尖職業棋士。

由德米斯·哈薩比斯與大衛·席爾瓦率領的研究團隊為了解決這個問題，在 AlphaGo 中加入了兩種神經網路：一種是用於挑選下一步可行著法的神經網路，另一種則是用於評估當前局勢勝率的神經網路。AlphaGo 首先透過研讀人類棋譜中提取的約 3,000 萬個盤面進行學習。接著透過與自己進行無數局的自我對弈來增強實力。它自我調整，獲勝時提高該著法的選取頻率，落敗時則降低頻率。這種學習方法被稱為「強化學習」。

對弈的結果是 AlphaGo 以 4 比 1 獲勝。第 2 局中 AlphaGo 下出的第 37 手，起初被職業棋士們視為失誤，後來卻被評價為決定勝負的妙手。李世乭 9 段在第 4 局中以第 78 手打亂了 AlphaGo 的運算並贏得該局。這局成為 AlphaGo 敗給人類的唯一一場正式對局。

AlphaGo 的學習方式與圖靈早年的提議一脈相承。圖靈在 1950 年論文的最後一節〈學習的機器〉中提議，與其模仿成人的頭腦，不如建造仿效孩童頭腦的機器，並透過獎懲來施教。AlphaGo 正是以龐大規模實現 66 年前那一提議的具體範例。隔年的 2017 年，DeepMind 發表了不藉助人類棋譜、僅憑圍棋規則自主學習的「AlphaGo Zero」。AlphaGo Zero 與曾擊敗李世乭 9 段的 AlphaGo 進行了 100 局對戰，並取得了全勝戰績。

Transformer，一次讀取整個句子

在圖像與圍棋之後，迎來的便是語言。在此之前的語言神經網路都是由前往後依序逐字讀取句子。因此，一旦句子變長，便容易遺忘前面的內容，而且必須等待前一個單詞運算完畢才能處理下一個單詞，處理速度相當緩慢。

2017 年 6 月，Google 的 8 位研究人員發表了題為〈Attention Is All You Need〉的論文，提出了名為「Transformer」的全新神經網路架構。Transformer 能將句子中的所有單詞同時並列，並計算每個單詞與其他單詞之間的關聯程度。這種運算被稱為「注意力機制（Attention）」。以「哲秀借給英姬一本書，她非常感激」這句話為例，Transformer 能夠透過計算發現「她」與「英姬」具有高度關聯。即使句子變長，它也能直接計算相距甚遠的單詞之間的關係。此外，Transformer 在訓練時可以平行處理多個位置的運算，從而高效利用了 GPU。不過在生成新文本時，它仍會依據已有內容逐步依序產生後續部分。

大型語言模型與 ChatGPT

以 Transformer 為基礎，「大型語言模型（LLM）」應運而生。大型語言模型透過閱讀書籍、文章、百科全書等海量文字，反覆練習預測句子中下一個接續出現的單詞。由於文本本身就是題目與答案，因此不需要人類逐一標註標籤。

美國的 OpenAI 自 2018 年推出首款 GPT 以來，不斷擴大模型的規模。2020 年問世的 GPT-3 包含了 1,750 億個代表連結強度的數值，即參數。隨著規模擴大，模型開始能完成未經專門學習的任務：創作詩歌、撰寫電腦程式，以及翻譯多種語言。

2022 年 11 月 30 日，OpenAI 公開了對話型服務「ChatGPT」。任何人只要進入網站並以母語提問，便能獲得自然流暢的語句回覆。據估計，ChatGPT 的使用者在公開僅 2 個月後便達到了約 1 億人。隨後，Google、Anthropic、Meta 等企業相繼推出了大型語言模型。將不僅能生成文字，還能創造圖像、音樂、影片的人工智慧統稱為「生成式 AI」。

推動人工智慧研究發展的成果在各大權威學術獎項中也獲得了肯定。辛頓、楊立昆與班吉歐榮獲 2018 年圖靈獎。圖靈獎被譽為電腦科學界的諾貝爾獎，其名稱正是取自艾倫·圖靈。在 AI 寒冬中堅守神經網路研究的三人，獲頒以圖靈為名的獎項。2024 年，為神經網路研究奠定基礎的約翰·霍普菲爾德與傑佛瑞·辛頓榮獲諾貝爾物理學獎。同年，德米斯·哈薩比斯與約翰·詹珀因透過 AlphaFold 預測蛋白質結構，與利用電腦進行蛋白質設計的大衛·貝克共同榮獲諾貝爾化學獎。

睽違 75 年重啟的模仿遊戲

圖靈提議的模仿遊戲也再度登上舞台。2025 年 3 月，美國加州大學聖地牙哥分校的卡麥隆·瓊斯與班傑明·柏根發表了完全依照圖靈最初提議之三人形式進行的實驗結果。受試者同時與一名人類及一個人工智慧進行 5 分鐘的文字對話，隨後判斷哪一方是人類。接獲扮演人

類指令的 GPT-4.5 在 73% 的情況下被判定為人類，其被選為人類的頻率甚至超越了真實的人類。在同一實驗中，ELIZA 則記錄了 23% 的數值。該項研究於 2026 年作為正式論文刊登在美國學術期刊《美國國家科學院院刊》（PNAS）上。

這項結果並不代表機器已能像人類一樣思考。前述圖靈提到的 70% 是提問者的答對率，而本實驗的 73% 則是 AI 被判定為人類的比例，因此無法直接比較這兩個數值。實驗條件亦值得深究。研究人員指示 GPT-4.5 像一位熟悉網路文化、會使用俚語且性格內向的年輕人那樣交談。而在沒有這項指示的情況下進行實驗時，得分便下滑至 36%。能否將看似合理的回答等同於理解，也是一個長久以來的爭論焦點。哲學家約翰·瑟爾在 1980 年的「中文房間」思想實驗中主張，依循規則替換符號以給出看似合理的回答，與真正理解含意是截然不同的兩回事。圍繞著這個問題，學者們至今依然各持己見。

1956 年在達特茅斯獲得命名的人工智慧，在規則之路與學習之路之間交替邁進並不斷成長。在規則之路上誕生了深藍，在學習之路上則孕育出 AlphaGo 與 ChatGPT。圖靈於 1948 年撰寫的報告，正是同時探索機器規則與學習的早期研究之一。科學家們為了回答圖靈提出的「機器能思考嗎？」這一問題，持續鑽研了 70 餘年，而在此過程中所催生出的技術，正深刻改變著我們今日的生活。

第18章 2026年的人工智慧與留下的課題



圖 18. 描繪學生們一同檢視人工智慧回答的插圖。

1950年10月，艾倫·圖靈在英國哲學期刊《心靈》（Mind）上發表了題為〈計算機器與智慧〉的論文，提出了「機器能思考嗎？」這一問題。他提出「模仿遊戲」，作為尋找這個問題答案的方法。這是一項由提問者僅透過文字進行對話後，猜測對方是人類還是機器的測試。圖靈在此基礎上補充了一項預測：大約50年後，電腦將能把這項遊戲玩得很好，以至於一般的提問者在進行5分鐘對話後，正確猜出對方的機率將不會超過70%。

距圖靈撰寫這篇文章已過去76年。如今是2026年10月。讓人聯想到圖靈所設想的「會思考的機器」的人工智慧，如今已在學校、醫院、法院、公司和研究室等各個角落廣泛應用。在本章中，我們將依序探討2026年的人工智慧發展到了何種程度、正在如何改變人們的生活，以及圖靈留下的問題如今在向我們叩問著什麼。

18.1. 2026年10月，AI的躍進與現況

被選為人類的人工智慧

在圖靈的論文發表之後，長久以來有許多程式挑戰了圖靈測試。然而，多數程式都受到了批評，被指責比起展現智慧，更多是依賴欺騙人類的技巧。2014年的「尤金·古斯特曼」（Eugene Goostman）就是這樣的例子。該程式假裝自己是一個英語不熟練的13歲烏克蘭少年，以此掩飾自己的失誤。

2025年3月，美國加州大學聖地牙哥分校的卡麥隆·瓊斯（Cameron Jones）與班傑明·伯根（Benjamin Bergen）發表了新的實驗結果。這是一項以圖靈的模仿遊戲為基礎構建的實驗。參與者同時與一名人類和一台機器進行5分鐘的文字對話，隨後選出兩者中誰是人類。在被指示要表現得像人類時，GPT-4.5在73%的情況下被選為人類，其被選為人類的頻率甚至高於一同對話的真正人類。接受相同指示的LLaMA-3.1比例為56%，而作為對照組加入的ELIZA與GPT-4o則分別僅有23%與21%。研究團隊說明，此結果是機器通過標準3人圖靈測試的第一個實驗證據。該論文隨後正式發表於《美國國家科學院院刊》（PNAS）。

有人認為這項結果意味著圖靈的預言已經實現。然而，圖靈所說的70%與這項實驗中的73%，衡量的對象截然不同。圖靈的70%是指提問者正確識破對方的比例，而該實驗中的73%則是GPT-4.5被選為人類的比例。由於評估方式與數值涵義不同，不應直接將這兩個數字相提並論。

這項實驗還有一個值得關注之處。研究團隊指示GPT-4.5像一位熟悉網路文化、會使用俚語且性格內向的年輕人那樣對話。在沒有這類角色扮演指示時，GPT-4.5被選為人類的比例降

至36%。可見扮演特定人物對話的指示對結果產生了巨大影響。因此，該實驗所評估的是在對話中看似人類的能力，僅憑此結果無法證明機器是否真正理解語言的意義。

從會說話的機器到能工作的機器

2026年人工智慧備受矚目的趨勢之一是「代理型AI」（Agent AI）。「代理」（Agent）的原意是「代為處理事務的人」。大眾所熟知的早期對話型服務主要是回答提問的模式；而代理型AI則是只要人類給予目標，就能將任務拆解為多個步驟、尋找所需資料、撰寫並執行程式、修正錯誤並持續推進工作。不過，由於它在過程中可能出錯或無法完成任務，因此仍需要由人類來確認結果。

程式設計是代理型AI活躍應用的領域。1950～1951年左右，圖靈在曼徹斯特大學為操作電腦的人員編寫了《程式設計師手冊》（Programmers' Handbook）。在那個年代，人類必須一行一行地學習機器的語言；而在2026年，人類只需用日常語言說明想要的程式，人工智慧就能撰寫、測試並修正程式碼。

那麼，人工智慧獨自一人究竟能完成多長時間的工作呢？美國研究機構METR對此進行了衡量。其方法是在軟體開發、機器學習、資訊安全等領域，設定多項熟練人員需要花費一定時間完成的任務，並測量人工智慧有大約一半機率能成功完成的任務長度。METR將這一長度稱為該人工智慧的「任務時間範圍」（task time horizon）。2024年初，即使是領先的模型，也僅能處理約4分鐘長度的任務。這段時間迅速增長，到了2026年2月，甚至出現了超過單日工作時間、約14.5小時的估計值。然而，在修正統計方法的偏差後，該數值有所下修；METR在2026年3月發布的分析中，將Claude Opus 4.6模型的任務時間範圍說明為約12小時。

正如估計值在短短一個月內發生變化所顯示的那樣，這項數值取決於挑選何種任務以及採用何種測量方法。METR自身也指出了這個數字的局限性：測試任務皆為可由單獨一人完成的任務，而人類需耗時數月進行的實際工作，大多需要多人協作。數值變大並不意味著可以直接將人類的工作全盤託付。

成為科學家研究夥伴的人工智慧

人工智慧也正在改變科學研究的面貌。首先以蛋白質研究為例，蛋白質是人體內承擔各項工作的分子。若能知曉蛋白質如何摺疊成特定結構，便更容易理解疾病的成因並設計藥物。Google DeepMind的AlphaFold能透過電腦預測這種結構。由於這項貢獻，2024年諾貝爾化

學獎頒給了打造AlphaFold的德米斯·哈薩比斯（Demis Hassabis）與約翰·詹珀（John Jumper），以及透過電腦設計全新蛋白質的大衛·貝克（David Baker）。

尋找新物質的工作也變得更加迅速。2023年11月，Google DeepMind利用名為GNoME的人工智慧，透過計算預測了220萬個新晶體結構候選物，並預估其中約38萬個結構是穩定的。該數字為計算預測的候選數量，實際合成並驗證這些候選物則是另一項課題；儘管如此，這項成果仍有助於尋找應用於電池或半導體的新材料。在製藥領域也有進展：利用人工智慧尋找治療標靶並設計藥物分子的特發性肺纖維化治療候選物質，進行了人體臨床試驗，其初步結果於2025年6月發表在學術期刊《自然-醫學》（Nature Medicine）上。

在數學領域也有重大消息。針對2025年7月在澳洲舉行的國際數學奧林匹亞（IMO）試題，Google DeepMind與OpenAI的人工智慧分別獲得了滿分42分中相當於35分的評價。若換作人類參賽者，這是足以獲得金牌的分數。然而，這並不代表人工智慧與人類一同參賽並獲頒獎牌，而是指在解答相同試題的評估中達到了金牌標準的分數。這兩項成果的性質也略有不同：Google DeepMind的成績是由大會組委會正式批改的評估，而OpenAI的成績則是該公司自行研究進行的實驗發表。儘管如此，由於機器能在考試時間內像人類一樣用文字書寫證明，數學家們也密切關注了這一結果。

通用人工智慧是否已經到來

目睹這些成果，部分企業與研究人員宣稱，我們已經達到人類水準的「通用人工智慧」（AGI），或正處於其門檻之上。所謂通用人工智慧，並非僅擅長單一任務的機器，而是指能像人類一樣學習並解決初次遇見之問題的機器。

然而，許多專家並不認同這種主張。2025年3月人工智慧推動協會（AAAI）對研究人員進行調查時，有76%的受訪者回答，僅靠擴大現有方式的規模，打造出通用人工智慧的可能性較低或極低。此外，該領域對於如何定義通用人工智慧以及如何對其進行測試，目前也尚未達成共識。既然標準尚未確立，便難以判定是否已經達到。

還有更為根本的提問。1980年，哲學家約翰·瑟爾（John Searle）提出了名為「中文房間」的思想實驗：一個不懂中文的人待在房間裡，僅僅查閱厚厚的規則手冊，便能寫出符合中文問題的答案並送出房外。從外面看來，這個人似乎中文非常流利；然而，他對文字的意義卻一無所知。瑟爾舉這個例子主張，依循規則熟練操作符號，與理解其意義是兩回事。2026年的人工智慧即使說話流暢，是否就能斷定它理解世界，這仍是一個尚未得出解答的問題。要斷言通用人工智慧已經到來，依據依然不足，該問題仍是一場未定論的爭辯。

18.2. 社會、產業及人性的重新定義

工作方式的轉變

隨著代理型AI的登場，許多職場的工作方式正在發生轉變。撰寫報告草稿、整理資料、回覆電子郵件、尋找程式錯誤等工作，先由人工智慧完成，再由人類進行審查。其結果是，有些領域的工作效率提高了，有些領域原本由人類承擔的職位則減少了。

針對這種變化將走向何方，經濟學家艾瑞克·布林優夫森（Erik Brynjolfsson）在2022年創造了「圖靈陷阱」（The Turing Trap）一詞。這是一項警示：如果技術發展只朝著完全模仿人類並取代人類的方向發展，勞動者的工資可能會下降，貧富差距可能會擴大。布林優夫森提出了另一條道路：應該朝著拓展人類能力的方向發展技術，讓人類能做到原本做不到的事，即「增強」（augmentation）。正如計算機沒有消滅數學家，反而讓數學家得以鑽研更深奧的問題一樣，人工智慧也可以用在協助人類的方向上。

醫療與法律領域的變革

在處理人類健康與權利的領域中，人工智慧承擔的工作與人類承擔的工作之間的界線更為清晰。在醫院裡，人工智慧解讀X光和CT影像並標記可疑部位，還能整理病患的病歷以提醒醫師遺漏之處。然而，在作出診斷與決定治療方案時，仍需要醫師的判斷。無論人工智慧多麼擅長解讀影像，審查其結果並對病患負責的醫師角色依然不可或缺。

法律領域的情況也類似。人工智慧可以檢索判例，並撰寫契約書與訴狀的草稿。然而，人工智慧有時也會煞有介事地捏造出根本不存在的判例。在多個國家，曾發生律師未加查證便向法院提交由人工智慧捏造的虛假判例，因而受到懲戒的事件。在法律文件上簽名並對其內容承擔責任的人是律師，因此，不盲信人工智慧撰寫的草稿、確實查核事實的律師審查依然必不可少。

各國也正在制定規管人工智慧的法律。歐盟制定了《人工智慧法》，並正分階段實施；在韓國，《關於促進人工智慧發展與建立信任基礎等事項之基本法》自2026年1月22日起施行。這些法律的共同理念是：對於可能對人類生命或權利產生重大影響的人工智慧進行更周密的監管，並讓人們能夠辨識出該產出物是由人工智慧所生成。

創作的主人是誰

人工智慧能繪畫、創作音樂、撰寫小說。人工智慧創作的歌曲也受到許多人的喜愛。在畫家與作曲家中，有些人將人工智慧視為如畫筆或樂器般的工具，藉此創photo出全新的作品。

於是，一個新的問題應運而生：人工智慧創作的作品，其主人究竟是誰？美國版權局在2025年1月發布的報告中表明立場：必須有人類在創作上有實質性貢獻的部分，才能受到著作權保護。這意味著機器獨立生成的產出物不會被賦予著作權。不僅是產出物，訓練過程也是爭議焦點。針對人工智慧在學習過程中未經許可使用作家文字與畫作的問題，多起訴訟正相繼展開。

作為工具的人工智慧與人類的位置

機器能否創造出全新事物，也是圖靈曾探討過的問題。圖靈在1950年的論文中介紹了愛達·勒芙蕾絲（Ada Lovelace）的觀點。19世紀的數學家勒芙蕾絲曾寫道，機器無法自行創造新事物，只能執行人類指示它做的工作。圖靈反對這一主張，他認為機器也能學習，並且能夠讓人類感到驚訝。

2026年的人工智慧介於兩者之間的某處。人工智慧經常讓人感到驚嘆；然而，當今的人工智慧系統是依據給定的目標與規則，來決定下一步該做什麼並採取行動。因此，必須由人類來設定目標與權限，並審查其結果。

在西洋棋中可以找到極佳的範例。1997年敗給電腦「深藍」（Deep Blue）的世界冠軍加里·卡斯帕洛夫（Garry Kasparov），隨後提議舉辦由人類與電腦組隊對弈的比賽。他的想法是，當人類的判斷與機器的計算結合時，便能產生出色的成果。2026年人們所探尋的共存方式也與此相似：機器負責快速計算並處理龐大資料，而人類則負責設定目標、明辨是非並承擔責任。

18.3. 重訪圖靈的哲學提問與未來倫理

圖靈測試之後的時代

關於僅憑圖靈測試無法全面評估機器智慧的討論由來已久。2025年的實驗為這場討論增添了具體例證。如前所述，GPT-4.5在被指示扮演特定人物對話的條件下獲得了高分。看似人類與像人類一樣思考是兩回事。如今，研究人員關心的不再是機器有多像人類，而是機器有多麼準確、安全且值得信賴。

欺瞞的智能與不被蒙蔽的知性

隨著人工智慧能像人類一樣自然地說話，也產生了新的風險。其一是「幻覺」（Hallucination）。人工智慧即便面對錯誤內容，也能以自信的口吻流暢撰寫。將非事實內容偽裝得如同事實般的現象，被稱為幻覺。其二是濫用。偽裝成人類欺騙對方的能力，可能會被用於散布假新聞或進行詐騙。瓊斯與伯根也在論文中對此類風險發出了警告。

因此，批判性運用人工智慧的態度至關重要。這並不是說要無條件遠離人工智慧，而是指無論人工智慧的回答多麼看似合理，都要退一步查證出處、與其他資料相互對照，並由自己做出判斷的態度。學生在藉助人工智慧完成作業時，同樣需要抱持這種態度。

對齊：讓機器的目標契合人類價值

僅靠使用者的謹慎是不夠的。還需要研究如何讓人工智慧本身按照人類的期望行動。當今人工智慧安全研究的核心概念之一是「對齊」（Alignment）。所謂對齊，是指將人工智慧的目標與行為引導至符合人類的價值、安全與尊嚴。

對齊之所以困難是有原因的。如果人類要求人工智慧「提高考試分數」，人工智慧可能不會提升實力，反而去尋找計分規則的漏洞。這就是機器以出人意料的方式填補了指令言辭與原本期望意圖之間的落差。隨著人工智慧獨自承擔的工作越來越多，這種落差將成為巨大的問題。英國與韓國等多個國家建立人工智慧安全研究所，並在推出強大的人工智慧之前測試其是否會產生危險行為，正是出於這個原因。

圖靈很早就預見了這個問題。在1951年左右的一場演講中，他表示一旦機器開始思考，不久後就將超越人類薄弱的能力，我們必須預料到機器終將掌握主導權的那一天。在1950年的論文中，他也留下了尋找解答的線索。他提出，與其從一開始就製造具有成人大腦的機器，不如製造類似孩童大腦的機器並對其進行教育。如今的人工智慧確實透過大量閱讀文字來學習，並在接受人類評估的過程中調整行為。圖靈關於教育機器的思想，如今進一步延伸為「我們應該教給機器什麼」的深刻提問。

機器也會有心靈嗎

隨著人工智慧能像人類一樣對話，探詢機器是否擁有心靈或情感的人也越來越多，甚至有人與人工智慧像朋友一般相處。圖靈在1950年的論文中以「基於意識的異議」為題探討了這一

問題。針對「無法確認機器是否真去感受」的反駁，圖靈回答說，我們同樣無法直接洞悉他人的內心；我們正是透過觀察彼此的言行舉止，才認定對方擁有心靈並以此共同生活的。

即便到了2026年，這個問題依然沒有確切的答案。雖然科學家與哲學家正在研究如何判斷機器是否具有意識，但要判定當前的人工智慧具有意識，至今仍未確立任何具共識的科學依據。無論關於意識的討論如何發展，責任歸屬都必須另行釐清：如果有人因機器所做的判斷而遭受損害，就必須追究開發及營運該機器的個人與機構之責任。

圖靈夢想的地平線

圖靈在17歲痛失莫卡姆後，開始思索心靈與肉體之間的關係。日後，他以數學方法分析計算過程，並提出了評估機器智慧的方法。在本書所探討的他的一生與研究中，交織著一個又一個不同的問題。沿著這些問題追溯下去，我們也將再次叩問：究竟何謂「思考」。

76年過去的今天，機器已能嫻熟地模仿人類的語言。如此一來，站上考驗之席的反而是人類自己。面對流暢的回答仍能獨立思考與審視的能力、對技術所帶來的結果負責到底的態度，正是當前人類所需具備的能力。在機器模仿人類的時代，我們該以何種方式守護「身為人」的本質，這道問題依然橫亙在我們面前。

圖靈在1950年論文的結尾寫下了這樣一句話：「我們只能看到前方不遠處，但可以清楚看見那裡還有許多事要做。」此後，許多人透過各自的研究與抉擇，推動了電腦與人工智慧的發展。這項技術該應用於何處、應依據何種標準予以評估，依然是未來需要由人類共同決定的課題。

主要參考資料・生平與原始資料

主要參考資料 • 生平與原始資料

Andrew Hodges, Alan Turing: The Enigma, Burnett Books, 1983; Princeton University Press, 2012年版。

Sara Turing, Alan M. Turing, Cambridge University Press, 2012年版（初版 1959）。Dermot Turing, Prof: Alan Turing Decoded, The History Press, 2015。

B. Jack Copeland 編, The Essential Turing, Oxford University Press, 2004。彙整了圖靈關於邏輯學、密碼、電腦與人工智慧主要文章的資料。

King's College, Cambridge, The Turing Digital Archive. 參考了信件、手稿與黛利拉研究資料。
turingarchive.kings.cam.ac.uk

The Old Shirburnian Society, 艾倫 • 圖靈相關學校紀錄、信件與展覽資料。oldshirburnian.org.uk/alan-turing/

A. M. Turing, On Computable Numbers, with an Application to the Entscheidungsproblem, Proceedings of the London Mathematical Society, 42, 1936~1937.

A. M. Turing, Systems of Logic Based on Ordinals, Proceedings of the London Mathematical Society, 45, 1939.

A. M. Turing, Computing Machinery and Intelligence, Mind, 59(236), 1950. Intelligent Machinery, NPL 報告, 1948.

A. M. Turing, The Chemical Basis of Morphogenesis, Philosophical Transactions of the Royal Society B, 237, 1952.

主要參考資料 • 電腦與人工智慧

Bletchley Park Trust, The National Museum of Computing, National Physical Laboratory, University of Manchester 的密碼破譯、炸彈機、ACE、早期電腦歷史資料。

英國政府, Royal pardon for WW2 code-breaker Dr Alan Turing(2013); Thousands officially pardoned under Turing's Law(2017). Policing and Crime Act 2017. gov.uk; legislation.gov.uk

Bank of England, Think science and celebrate Alan Turing. 圖靈肖像 50 英鎊鈔票的官方說明。
bankofengland.co.uk/thinkscience

D. E. Rumelhart 等, Learning Representations by Back-propagating Errors, Nature, 323, 1986. A. Vaswani 等, Attention Is All You Need, NeurIPS, 2017.

D. Silver 等, Mastering the Game of Go with Deep Neural Networks and Tree Search, Nature, 529, 2016.

C. R. Jones、B. K. Bergen, Large Language Models Pass a Standard Three-party Turing Test, PNAS, 2026.
doi:10.1073/pnas.2524472123

METR, Measuring AI Ability to Complete Long Tasks(2025), Impact of modelling assumptions on time horizon results(2026). metr.org

A. Merchant 等, Scaling deep learning for materials discovery, Nature, 624, 2023. Z. Xu 等, 人工智慧設計 TN1K 抑制劑之肺纖維化 2a 期臨床試驗, Nature Medicine, 2025.

AAAI, 2025 Presidential Panel on the Future of AI Research. Nobel Prize, 2024 年物理學獎、化學獎官方資料。U.S. Copyright Office, Copyright and Artificial Intelligence, Part 2, 2025.

版權頁

艾倫・圖靈

探尋電腦與人工智慧的開端

ISBN |

作者 | 金京鎮

發行人 | 金京鎮

出版處 | 金京鎮律師出版社

出版社登記 | 2025. 3. 10. (第2025-000015號)

地址 | 首爾特別市東大門區典農路 91, 百日大樓 304號

電話 | 02-6338-1905

電子郵件 | kimkj008@gmail.com

© 金京鎮 2026

本書為著作人之智慧財產，未經授權禁止轉載與重製。

封面照片：Anna Zaro / Unsplash。章節插圖由人工智慧生成。

部分內容與編輯過程獲得了人工智慧工具的協助。

支持這本 AI 圖書館書籍

如果這本書對您有所幫助，請考慮透過 PayPal 支持未來的翻譯、公開版本與開放 AI 知識專案。



PayPal

<https://paypal.me/kimkjkj>

掃描 QR Code 或開啟上方連結。