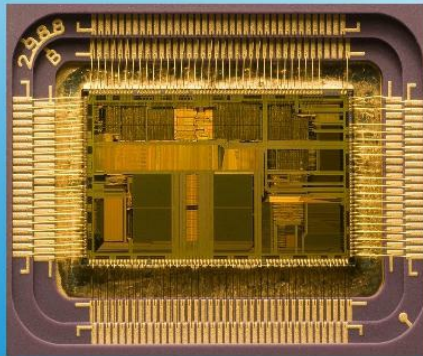


# 計算理論

程式人觀點



- 布林邏輯
- 一階邏輯
- 哥德爾定理
- 停止問題
- *NP-Complete*

作者：陳鍾誠 — 本書部分圖片與內容來自維基百科  
採用「創作共用」的「姓名標示、相同方式分享」之授權





1. 前言
  1. 序
  2. 授權聲明
2. 計算理論簡介
  1. 邏輯推論系統
  2. 哪些問題是可計算的？
  3. 參考文獻
3. 邏輯世界的歷史
  1. 簡介
  2. 布爾 (Boole) (出生於 1815年)
  3. 弗雷格 (Frege) (出生於 1848年)
  4. 希爾伯特 (David Hilbert) (出生於 1862年)
  5. 哥德爾 (Kurt Gödel) (出生於 1906 年)
  6. 羅賓遜 (John Alan Robinson) (出生於 1928 年)
  7. 結語
  8. 參考文獻
4. 布林邏輯與推論系統 -- 何謂嚴格的數學證明？
  1. 前言
  2. 一般的證明
  3. 嚴格的證明
  4. 布林邏輯
  5. 公理系統 1
  6. 公理系統 2
  7. 推論法則
  8. 參考文獻
5. 謂詞邏輯、一階邏輯與「哥德爾完備定理」
  1. 前言
  2. 謂詞邏輯
  3. 一階邏輯
  4. 二階邏輯
  5. 一致性與完備性
  6. 哥德爾完備性定理
  7. 結語
  8. 參考文獻
6. 從程式人的角度證明「哥德爾不完備定理」
  1. 理髮師悖論
  2. 哥德爾不完備定理的描述

3. 哥德爾不完備定理的程式型證明
4. 結語
5. 參考文獻
7. 圖靈與停止問題
  1. 停止問題不可判定
  2. 停止問題的意義
8. NP-Complete 問題
  1. 演算法的複雜度
  2. 非決定性演算法 (Nondeterministic algorithm)
  3. NP (Nondeterministic Polynomial Time) 問題
  4. NP-Complete 問題
  5. SAT 問題
  6. 證明：SAT 是 NP-Complete 問題
  7. 結語
  8. 參考文獻
9. 結語

# 前言

## 序

我在念碩士班的時候，修了一次「計算理論」這門課，然後在博士班的時候又修了一次，兩次都是必修課。

但是、我這兩次的課程都在似懂非懂之間就修完了。

為甚麼呢？我總是感到疑惑？計算理論中的圖靈機 (Turing Machine) 和現代電腦真的差好多，而「哥德爾」的那些奇怪的編碼方式更是和「二進位」表示法南轅北轍。

後來、我試圖用自己的語言來說明「計算理論」到底是甚麼？於是就寫出了您現在所看到的這本書。

希望透過我這個「現代程式人」的語言，能讓您更容易理解那些「古代學術巨人」的想法。

陳鍾誠 2014/8/13 於 金門大學 資訊工程系

## 授權聲明

本書內容由 [陳鍾誠](#) 創建，其中部分內容與圖片來自 [維基百科](#)，採用 [創作共用：姓名標示、相同方式分享](#) 之授權協議。

若您想要修改本書產生衍生著作時，至少應該遵守下列授權條件：

1. 標示原作者姓名為 [陳鍾誠](#) 衍生自 [維基百科](#) 的作品。
2. 採用 [創作共用：姓名標示、相同方式分享](#) 的方式公開衍生著作。

[陳鍾誠](#) 於 [金門大學](#), 2014 年 8 月

# 計算理論簡介

計算理論是資訊科學的理論基礎，主要探討電腦能力極限的問題，哪些是電腦有可能解決的問題，哪些是電腦無法解決的問題，以下是計算理論的兩大問題：

- 哪些問題是可計算的？ (What can be computed?)
- 計算該問題需要花費多少時間與空間？ (Given a problem, how much resource do we need to compute it ?)

計算理論有一些子領域，像是自動推論領域，探討的就是如何利用電腦證明數學定理。(Prove mathematical theorem using computer)，但是這個問題其實不像我們想像的那麼狹窄，廣義的來看，自動推論問題其實就是在探究如何利用電腦解決問題 (Computer-based problem solving)。

舉例而言，以下是一些邏輯規則，

$$\forall x \forall y \forall z \quad x * (y * z) = (x * y) * z$$

$$\exists x \exists y \quad x * y = y$$

說明：以上形式中的前面部份，是一階邏輯中的量詞限制條件，而內容部份的寫法則通常可以用下列形式表達。

$$A_1 \& \dots \& A_n \Rightarrow P_1 \& \dots \& P_n$$

在自動推論中，經常使用某些公理系統，作為推論的基本法則，這些公理系統必須具備「一致性」(consistent)，不能有邏輯矛盾的情況出現。計算機科學家必須研究如何利用這些公理證明所有可證明的定理，這幾乎就是在研究電腦能力的極限了。

## 邏輯推論系統

為了討論電腦的能力極限，我們往往需要藉助邏輯系統來進行描述，以下是經典邏輯系統所探討的主題，也是很多計算理論書籍的切入點。

- 邏輯系統：布林邏輯 (Boolean Logic)、謂詞邏輯 (Predicate Logic)、一階邏輯 (First Order Logic)、哥德爾完備定律、哥德爾不完備定律。

為了讓讀者感受到「邏輯與計算理論之間的關係」，請讀者先看看以下這個「皮諾公設系統」(Peano Axiom of Natural Number System)，這是一個「數論」領域的簡單公理系統。

PE1 : 0 exist

PE2 :  $x' = x + 1$

PE3 :  $x' > x$

PE4 : if  $x' = y'$  then  $x = y$

PE5 : (數學歸納法) if  $P(0)$  and  $P(x) \Rightarrow P(x')$  then  $\forall x P(x)$

您可以看到上述的公理系統都是採用邏輯的方式描述的，我們可以透過數學思考去解析這類的公理系統，以變理解該「數學系統的能力極限」，而這也正是計算理論課程所想要探討的主題。

計算理論與演算法所探討的，可以說是一體兩面的東西。演算法探討用電腦解決問題的方法，但計算理論則注重電腦是否能解決該問題，或者能否在有限的時間內解決某問題。

以計算理論的角度看來，演算法所做的事情是：「尋找一個程式，該程式可以正確的輸出某個問題的答案」。如果我們將該問題改寫成邏輯數學式，則可以寫成如下的語句。

$$\forall x p(x) \Rightarrow \exists z q(x, z)$$

上述語句中的  $p(x)$  是「輸入限制函數」，而  $q(x, z)$  則是「輸出限制函數」。

## 哪些問題是可計算的？

在還沒有電腦的時代，哥德爾、圖靈等數學家就已經用數學在討論電腦能力的極限了。

在 1900 年的時候，數學大師希爾伯特就提出 20 世紀待解決的 23 個數學問題，其中第二題是希望能解決「算術公理之相容性」的問題，也就是探討「數學公理系統是否一致且完備」的問題，這個問題在當時並無法解答。

希爾伯特本人並沒有在這個問題上取得多少進展，但是在 1929 年的時候，哥德爾證明了一階邏輯系統的完備性，這是一個非常重要的結果，後來這個證明被稱為「哥德爾完備定理」。

「哥德爾完備定理」證明了像「一階邏輯」這麼強大的系統都可以是一致且完備的，因此整個數學體系可計算化的目標似乎就近在眼前了，但接下來的發展卻令人感到驚訝。

「哥德爾」繼續研究「一階邏輯延伸系統」的完備性，他將「皮諾數論系統」加了進來，結果卻發現這個小小的延伸卻無法同時具有「一致性與完備性」。

更重要的是，「哥德爾」很嚴格的證明了這件事情「絕對不可能」。換句話說，如果「一階邏輯加上皮諾數論系統」所形成的數學體系，如果是完備的，那麼就會產生矛盾(不一致)。

這個結果說明了一件事，那就是「夠強大的數學系統中必然有些定理是無法透過計算推論程序去證明的」，這個結論後來被稱為「哥德爾不完備定理」。

於是、「哥德爾」摧毀了「希爾伯特」的夢想，並且宣告了「數學系統公理化」只能到此為止。

止了。

後來、圖靈開始研究「計算機」能力的極限，結果發現「停止問題」是不可能被電腦百分之百正確判定的，因而為電腦的能力劃下了一道難以逾越的無形邊界。

圖靈和哥德爾兩人，分別從「電腦」與「數學」領域出發，但是卻得到了非常類似的結論，那就是「足夠強大的系統，必然有些事情做不到」。

這讓我想起一個奇特的論證，該論證如下：

有個具有虔誠信仰的教徒說：「上帝是無所不能的」，於是乎有人問了一個問題。  
「那麼、上帝是否能夠創造出一顆石頭、重到讓他自己舉不起來呢？」

當然、這樣的問題牽涉到重力，其實問的還不夠好。且讓我們改用數學的角度來問這個問題：

「上帝是否能夠設計出一個數學問題，困難到讓他自己解不出來呢？」

## 參考文獻

- [Wikipedia:希爾伯特的23個問題](#)



# 邏輯世界的歷史

## 簡介

邏輯學是西方科學中淵遠流長的一門學問，從西元前 350 年亞里斯多德的三段論開始，就開啟了歐洲文明對邏輯學的興趣之窗。然而這一個興趣同樣隨著西方文明的發展而起伏不定，直到西元 1850 年左右，George Boole (布爾) 開始研究布林代數，才讓邏輯學成為近代數學的一個重要領域。接著，Gottlob Frege 在 1870 年左右所提出的一階邏輯系統，繼承布林系統並向上延伸，形成一個數學基礎穩固且強大的邏輯系統，於是整個經典的邏輯系統建立完成。

雖然如此，這些邏輯系統仍然是掌上的玩物，而且沒有人能確定這樣的邏輯系統，其能力到底有多強，是否一致且完備，是否有某些極限。希爾伯特在 1900 年所提出的 25 個數學問題中，這個問題被排在第二個提出。然而，希爾伯特並沒有能證明一階邏輯系統的完備性，而是在 1929 年由哥德爾證明完成了。

哥德爾的成就不僅於此，1931 年他更進一步證明了一個非常令人驚訝的定理，在「一階邏輯的擴充系統 - 皮諾數論系統」當中，不具有完備性，而且它證明了假如該系統是完備的，將會導致矛盾。

哥德爾在證明完備定理與不完備定理時，採用的都是矛盾証法，也就是透過排中律所證明的，這樣的證明並非建構性的，因此即使建立了完備定理，也沒有人能構造出一個建構式的證明方法，可以檢證一階邏輯的定理。

1965 年，Robinson 提出了一條非常簡單的邏輯證明規則 -- Resolution，並且說明了如何利用矛盾檢證程序 Refutation，證明邏輯規則在某系統中的真假，這個方法既簡單又優美，因此廣為數學界與計算機科學界所稱道。以下，我們將更詳細的說明上述人物在邏輯學上的貢獻。

## 亞里斯多德 (Aristotle) (出生於西元前 322 年)

亞里斯多德在其理則學 (zoology) 研究中，提出了下列的三段式推論規則 Barbara，簡稱為三段論。

類型	語句	說明
大前提	所有人都終會死亡	普遍原理
小前提	蘇格拉底是人	特殊陳述
結論	蘇格拉底終會死亡	推論結果

## 布爾 (Boole) (出生於 1815年)

Boole 研究邏輯時，提出了一種只有真值與假值的邏輯，稱為二值邏輯，通常我們用 0 代表假值，1 代表真值。布爾研究這種邏輯系統，並寫出了一些代數規則，稱為布林代數，以下是其中的一些代數規則。

規則 (數學寫法)	名稱
$x \vee (y \vee z) = (x \vee y) \vee z$	OR 的結合律
$x \vee y = y \vee x$	OR 的交換律
$x \wedge (y \wedge z) = (x \wedge y) \wedge z$	AND 的結合律
$x \wedge y = y \wedge x$	AND 的交換律
$\overline{x \vee y} = \overline{x} \wedge \overline{y}$	狄摩根定律(1)
$\overline{x \wedge y} = \overline{x} \vee \overline{y}$	狄摩根定律(2)

說明：上述規則中的  $\wedge$  代表邏輯或 (AND) (在程式語言裏常寫為 `&` 或 `and`)， $\vee$  代表邏輯或 (OR) (在程式語言裏常寫為 `|` 或 `or`)。所以若改用於程式領域的寫法，可改寫如下。

規則 (數學寫法)	名稱
$x   (y   z) = (x   y)   z$	OR 的結合律
$x   y = y   x$	OR 的交換律
$x \& (y \& z) = (x \& y) \& z$	AND 的結合律
$x \& y = y \& x$	AND 的交換律
$\neg(x y) = \neg x \& \neg y$	狄摩根定律(1)
$\neg(x\&y) = \neg x   \neg y$	狄摩根定律(2)

## 弗雷格 (Frege) (出生於 1848年)

Frege 在研究邏輯系統時，將函數的概念引入到邏輯系統當中，這種函數被稱為謂詞，因此該邏輯系統被稱為謂詞邏輯。然後，Frege 又引入了兩個量詞運算， $\forall$  (對於所有) 與  $\exists$  (存在)，透過謂詞的限定作用，以及這兩個量詞，Frege 架構出了這種具有函數的邏輯系統，後來被稱為一階邏輯系統 (First Order Logic)。

以下是我們將亞里斯多德的三段論，轉化為一階邏輯後，所寫出的一階邏輯規則。

類型	語句	說明
大前提	$\forall x \text{ people}(x) \rightarrow \text{mortal}(x)$	所有人都終會死亡
小前提	$\text{people}(\text{Socrates})$	蘇格拉底是人
結論	$\text{mortal}(\text{Socrates})$	蘇格拉底終會死亡

## 希爾伯特 (David Hilbert) (出生於 1862 年)

事實上，在電腦被發明之前，數學界早已開始探索「公理系統」的能力極限。在西元 1900 年時，德國的偉大數學家希爾伯特 (Hilbert)，提出了著名的 23 個數學問題，其中的第二個問題如下所示。

證明算術公理系統的無矛盾性 The compatibility of the arithmetical axioms.

在上述問題中，希爾伯特的意思是要如何證明算術公理系統的 Compatibility，Compatibility 這個詞意謂著必須具有「一致性」(Consistency) 與「完備性」(Completeness)。

所謂的「一致性」，是指公理系統本身不會具有矛盾的現象。假如我們用 A 代表該公理系統，那麼 A 具有一致性就是 A 不可能導出兩個矛盾的結論，也就是  $A \Rightarrow P$  與  $A \Rightarrow \neg P$  不可能同時成立。

所謂的「完備性」，是指所有「永遠為真的算式」(也就是定理) 都是可以被證明的，沒有任何一個定理可以逃出該公理系統的掌握範圍。

然而，希爾伯特耗盡了整個後半生，卻也無法證明整數公理系統的一致性與完備性。或許是造化弄人，這個任務竟然被希爾伯特的一位優秀學生 - 哥德爾 (Godel) 所解決了，或者應該說是否決了。

## 哥德爾 (Kurt Gödel) (出生於 1906 年)

哥德爾實際上證明了兩個定理，第一個是 1929 年提出的「哥德爾完備定理」(Gödel's Complete Theorem)，第二個是 1931 年證明的「哥德爾不完備定理」(Gödel's Incomplete Theorem)，這兩個定理看來似乎相當矛盾，但事實上不然，因為兩者所討論的是不同的公理系統，前者的焦點是「一階邏輯系統」(First Order Logic)，而後者的焦點則是「具備整數運算體系的一階邏輯系統」。

哥德爾完備定理證明了下列數學陳述：

一階邏輯系統是一致且完備的

一致性代表一階邏輯系統不會具有矛盾的情況，而完備性則說明了一階邏輯當中的所有算式都可以被證明或否證。

哥德爾不完備定理證明了下列數學陳述：

任何一致且完備的「數學形式化系統」中，只要它強到足以蘊涵「皮亞諾算術公理」，就可以在其中構造在體系內「既不能證明也不能否證的命題」。

哥德爾不完備定理改用另一個說法，如下所示：

如果一個包含算術的公理系統可以用來描述它自身時，那麼它要麼是不完備的，要麼是不一致的，不可能兩者皆有！

(筆者註：若該公理系統包含無限條公理時，必須是可列舉的 recursive enumerable)

## 羅賓遜 (John Alan Robinson) (出生於 1928 年)

雖然哥德爾證明了一階邏輯是完備的，但是卻沒有給出一個建構式的方法，可以推理出所有的一階邏輯定理。這個問題由 John Alan Robinson 在 1965 年解決了。

Robinson 提出的 refutation 邏輯推論法是一種反證法，任何一階邏輯的算式 P 只要在系統 S 當中是真的，只要將 -P 加入該系統 S 中，就可以經由反證法導出矛盾。如果 P 在系統 S 當中不是真的，那麼將 P 加入 S 當中就無法導出矛盾。

所謂的 refutation 反證法是依靠一個稱為 resolution 的邏輯規則，該規則如下所示：

$$\frac{a_1 \dots |a_i| \dots |a_n \quad ; \quad b_1 \dots |-a_i| \dots |b_m}{a_1 \dots |a_{i-1}|a_{i+1}| \dots |a_n|b_1 \dots |b_{j-1}|b_{j+1}| \dots |b_m}$$

假如我們將上述算式中的  $a_1 \dots |a_{i-1}|a_{i+1}| \dots |a_n$  寫為 A，將  $b_1 \dots |b_{j-1}|b_{j+1}| \dots |b_m$  寫為 B，則上述算式可以改寫如下：

$$\frac{A|a_i \quad ; \quad B|-a_i}{A|B}$$

## 結語

邏輯學在西方文化中扮演了非常重要的角色，而且可以說是「現代科學」會出現在歐洲的重要原因，假如將「邏輯學」從西方文化中拿掉，或許工業革命就不會出現在歐洲了？

您可以想像「孔子」整天追根究柢，常常和人辯論一件事情到底是真的還假，而且要轉換成符號，並且用邏輯的方式去證明嗎？

但是「亞里斯多德」在那個年代就是這樣追根究柢的，所以他才會去研究解剖學，把動物給切開看看裡面有甚麼，我想這也是他提出三段論背後的原因吧！

## 參考文獻

- [維基百科：亞里斯多德](#)
- [維基百科：喬治·布爾](#)
- [維基百科：三段論](#)
- [維基百科：哥德爾不完備定理](#)
- [維基百科：哥德爾完全性定理](#)
- [維基百科：戈特洛布·弗雷格](#)
- [維基百科：大衛·希爾伯特](#)
- [維基百科：希爾伯特的23個問題](#)
- [維基百科：庫爾特·哥德爾](#)
- [Wikipedia:Zoology](#)
- [Wikipedia:Aristotle](#)
- [Wikipedia:Boolean Logic](#)
- [Wikipedia:George Boole](#)
- [Wikipedia:Frege](#)
- [Wikipedia:Hilbert's\\_problems](#)
- [Wikipedia:John Alan Robinson](#)
- [Wikipedia:Resolution \(Logic\)](#)
- [Hilbert's Mathematical Problems](#)
- [Wikipedia:Kurt Gödel](#)

【本文由陳鍾誠取材並修改自 [維基百科](#)，採用創作共用的 [姓名標示、相同方式分享] 授權】

# 布林邏輯與推論系統 -- 何謂嚴格的數學證明？

## 前言

當我還是個學生時，我總是困惑著如何應付老師的考試，其中一個重要的數學困擾是，老師要我們「證明」某個運算式。

最大的問題不在於我不會「證明」，因為在很多科目的證明題當中，我也都「答對了」，但是這種答對總是讓我感到極度的沒有把握，因為有時老師說「這樣的證明是對的」，但有時卻說「這樣的證明是錯的」。

更神奇的是，老師的證明永遠都是對的，他們可以突然加入一個「推論」，而這個推論的根據好像之前沒有出現過，然後他們說：「由此可證」、「同理可證」....。

直到有一天，我終於懂了。

因為課堂上老師的證明往往不是「嚴格的證明」，因為嚴格的證明通常「非常的困難」，每個證明都可以是一篇論文，甚至在很多論文當中的證明也都不是嚴格的。

所以在課堂上，老師總是可以天外飛來一筆的，跳過了某些「無聊的步驟」，奇蹟式的證明了某些定理，而這正是我所以感到困擾的原因。

## 一般的證明

一般而言，日常生活中的證明，通常是不嚴格的。

舉例來說，我可以「證明」某人殺了死者，因為殺死死者的兇刀上有「某人」的指紋。

但是這樣的證明並不嚴格，因為有很少的可能性是「某人摸過兇刀、但是並沒有殺人」。

所以我們總是可以看到那個「外表看似小孩，智慧卻過於常人」的「名偵探柯南」，總是天外飛來一筆的「證明」了某人是兇手，這種證明與數學證明可是完全不同的。

## 嚴格的證明

數學的證明通常不能是「機率式」的，例如：「我證明他 99% 殺了人」，這樣的證明稱不上是嚴格的證明。

嚴格的證明也並非結果一定要是 100% 的正確 (當然也不是說結果不正確)，真正的證明是一種過程，而不是結果。

怎麼說呢？

數學其實很像程式領域的演算法，或者就像是電腦的運作過程，當我們設計出一顆 CPU 之後，你必須用該 CPU 的指令撰寫出某些函數，以便完成某個程式。

那麼，數學的 CPU 是甚麼呢？

答案是「公理系統」(Axioms)！

只有透過公理系統，經由某種演算方式，計算出待證明定理在任何情況下都是真的，這樣才算是證明了該定理。

這些公理系統其實就是數學的 CPU 指令集。

布林代數大概是數學當中最簡單的系統了，因為布林代數的值只有兩種--「真與假」(或者用 0 與 1 代表)。

為了說明嚴格的數學證明是如何進行的，我們將從布林代數的公理系統 (CPU?) 開始，說明如何證明布林代數的某些定理，就好像是如何用指令集撰寫程式一樣。

## 布林邏輯

對於單一變數  $x$  的布林系統而言， $x$  只有兩個可能的值 (0 或 1)。

對於兩個變數  $x, y$  的布林系統而言， $(x, y)$  的組合則可能有 (0,0), (0,1), (1,0), (1,1) 四種。

對於三個變數  $x, y, z$  的布林系統而言， $(x, y, z)$  的組合則可能有 (0,0, 0), (0,0,1), (0,1,0), (0,1,1), (1,0, 0), (1,0,1), (1,1,0), (1,1,1) 八種。

基本的布林邏輯運算有三種，AND (且), OR (或), NOT (反)，在布林代數當中，通常我們在符號上面加一個上標橫線代表 NOT，用  $\wedge$  代表 AND，用  $\vee$  代表 OR。

但是在程式裏面，受到 C 語言的影響，很多語言用驚嘆號  $!$  代表 NOT，用  $\&$  代表 AND，用  $|$  代表 OR。以下我們將採用類似 C 語言的程式型寫法進行說明。

NOT	AND	OR																																				
<table><tr><th>x</th><th>!x</th></tr><tr><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td></tr></table>	x	!x	0	1	1	0	<table><tr><th>x</th><th>y</th><th>x&amp;y</th></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr></table>	x	y	x&y	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	1	1	<table><tr><th>x</th><th>y</th><th>x y</th></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr></table>	x	y	x y	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1
x	!x																																					
0	1																																					
1	0																																					
x	y	x&y																																				
0	0	0																																				
0	1	0																																				
1	0	0																																				
1	1	1																																				
x	y	x y																																				
0	0	0																																				
0	1	1																																				
1	0	1																																				
1	1	1																																				

假如我們想知到某個邏輯式的真值表，例如  $(\neg x | y)$  的真值表，只要透過列舉的程序就可以檢查完畢。



x	y	-x	-x y
0	0	1	1
0	1	1	1
1	0	0	0
1	1	0	1

接著，我們就可以定義一些公理系統，這些「公理系統」就像是數學推理的指令集，讓我們可以推論出哪些邏輯式在這個公理系統下是真的 (定理)，哪些邏輯式這個公理系統下不一定是真的。

## 公理系統 1

舉例而言，假如我們制定了一個公理系統如下所示。

公理 1:  $\neg p \mid q$   
公理 2:  $p$

那麼，我們就可以列出這個布林系統的真值表。

p	q	$\neg p \mid q$
0	0	1
0	1	1
1	0	0
1	1	1

在上述真值表中，凡是無法滿足公理系統的列，就代表該項目違反公理系統，因此在此公理系統下不是真的，可以被刪除 (不是該公理系統的一個「解答」)。

註：在邏輯的術語中，滿足該公理系統的解答，稱為一個 Model (模型)。

在上述表格中，前兩條的  $p$  為 0，因此不滿足公理 2，而第三條的  $\neg p \mid q$  為 0，不滿足公理 1，因此符合該公理系統的項目就只剩下了一個了。

p	q	$\neg p \mid q$
1	1	1



在這個滿足公理系統的真值表當中，我們可以看到  $q$  只能是 1，也就是  $q$  其實是個定理。

說明：在上述邏輯推論系統當中， $\neg p|q$  可以簡寫為  $p \rightarrow q$ ，因此上述公理系統可以改寫如下，這樣的推論法則稱為 **Modus Ponus** (中文翻成「肯定前件」)。

公理 1:  $p \rightarrow q$

公理 2:  $p$

-----

結論:  $q$

## 公理系統 2

假如我們定義了以下的公理系統：

公理 1:  $\neg p \mid q$

公理 2:  $p \mid r$

那麼我們可以列出真值表如下：

p	q	r	$\neg p q$	$p r$
0	0	0	1	0
0	0	1	1	1
0	1	0	1	0
0	1	1	1	1
1	0	0	0	1
1	0	1	0	1
1	1	0	1	1
1	1	1	1	1

當我們將不符合公理系統的項目拿掉之後，以上的真值表就只剩以下這些項目。

p	q	r	$\neg p q$	$p r$
0	0	1	1	1
0	1	1	1	1

1	1	0	1	1
1	1	1	1	1

此時，如果我們檢查這些項目中  $q|r$  的真值表，會發現  $q|r$  為真者其結果全部為 1，因此  $q|r$  在這個公理系統下是真理。

p	q	r	$\neg p q$	$p r$	$q r$	$p q$
0	0	1	1	1	1	0
0	1	1	1	1	1	1
1	1	0	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1

但是如果我們檢查這些項目中  $p|q$  的真值表，會發現有一項為 0，因此  $p|q$  在這個公理系統下並非真理。

所以  $q|r$  在此公理系統下是一個定理，但  $p|q$  則不是定理。

說明：在上述邏輯推論系統當中， $\neg p|q$  可以簡寫為  $p \rightarrow q$ ，而  $p|r$  則可以想成  $\neg(\neg p)|r$ ，於是寫成  $\neg p \rightarrow r$ 。

於是您可以觀察到當  $p=1$  時  $q=1$ ，當  $p=0$  時  $r=1$ ，而  $p$  只有可能是 1 或 0，於是  $q$  與  $r$  兩者至少有一個成立，這也就是推論出的定理  $q|r$  成立的原因了。

## 推論法則

現在，我們已經具備了足夠的基本知識，可以用來說明何謂嚴格的數學證明了。

假如我們將公理系統 2 中推論出  $q|r$  的程序，變成一條明文的規則，如下所示：

$$(\neg p \mid q) \ \& \ (p \mid r) \rightarrow (q \mid r)$$

那麼，我們就可以用這樣的規則進行推論，這個推理方式乃是 Robinson 所提出的，稱為 Resolution 法則。

於是我們可以根據這條規則，推論出某個邏輯公理系統下的定理。

必須注意的是，在以上的描述中，我們並沒有區分變項與常項。讓我們在此先說明一下。  
在一般的邏輯系統中，通常我們用小寫代表變項，大寫代表常項。其中的變項可以設定成任意的項目，而常項則只能代表自己。

舉例而言，A, B, C, DOG, SNOOPY 等代表常項，而 x, y, z, w, .... 等則代表變項。

公理系統理可以包含變項與常項，舉例而言，假如有個公理系統如下所示。

A		-B																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			</
---	--	----	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	----

而這整個邏輯系統的推論法則只有一條，那就是 Resolution 法則，也就是  $(-p \mid q) \ \& \ (p \mid r) \rightarrow (q \mid r)$ 。

我們可以透過推論法則對公理系統中的公理進行綁定 (例如 p 設定為 A，q 設定為 -B ....) 與推論，得到下列結果：

(A		-B)	&	(-A		C)	$\rightarrow$	(-B		C)	；	令	p=A,	q=-B,	r=C	，	於是	可以	推出	(-B		C)。
(-B		C)	&	(-(-B		C)		D)	$\rightarrow$	D	；	令	p=(-B		C),	q=D,	r=空集合	，	於是	可以	推出	D。

透過這樣的推論、我們就得到了以下的「事實庫」。

A		-B		
-A		C		
-(-B		C)		D
(-B		C)		
D				

如此我們就可以不需要依靠真值表，直接從公理系統開始，透過嚴格的計算程序，推論出該公理系統中的定理了。

這種證明方式，就是一種為嚴格的數學證明。

這種證明所遵循的，乃是一種『公理 / 推論 / 定理1 / 推論 / 定理2 / ...』的方式，這種方式讓證明變成了一種計算過程，是可以寫成電腦程式的，這種證明方式乃是一種嚴格可計算的證明方式。

## 後記

大部分的數學系統，都希望能達到這樣嚴格的程度，但可惜的是，並非所有數學系統都能完全達到這樣嚴格的程度。舉例而言：歐氏幾何可以說是公理化的早期經典之作，但其中仰賴圖形直覺的證明過程仍然有很多，並非完全達到公理化。而微積分等數學的嚴格公理化也一直是數學家還在研究的問題。

但對公理化數學體系最精彩的一段歷史是，希爾伯特對公理化的問題與歌德爾不完備定理對

數學可完全公理化的反證，以下是這段歷史的簡要說明。

20 世紀的大數學家 Hilbert 曾經於 1900 年提出的 23 個數學問題中提到一個問題，就是「是否能為數學系統建立證明法則，讓數學證明可以完全被計算出來」，後來歌德爾 (Godel) 在 1926 年證明了一階邏輯的完備定理，讓大家看到了一線曙光，但歌德爾在 1929 年又提出了一個數論系統的不完備定理，證明了有些定理無法透過計算程序證明。

歌德爾的研究，後來在電腦領域，被圖靈 (Turing) 重新詮釋了一遍，圖靈證明了「停止問題」是電腦無法 100% 正確判定的問題，這也開啟了後來計算理論的研究之河。圖靈也因此而成為計算理論領域的第一人，所以 ACM 這個組織才會將電腦界的最重要獎項稱為「圖靈獎」(Turing Award)。

## 參考文獻

- 維基百科：[命題邏輯](#)
- 相關討論：為甚麼國中的數學證明是從「歐式幾何」開始教，而不從「布林代數」開始教呢？
  - <https://www.facebook.com/ccckmit/posts/10151056707046893>
- 數學中的公理化方法 (上) 吳開朗
  - [http://w3.math.sinica.edu.tw/math\\_media/d171/17111.pdf](http://w3.math.sinica.edu.tw/math_media/d171/17111.pdf)
- 數學中的公理化方法 (下) 吳開朗
  - [http://w3.math.sinica.edu.tw/math\\_media/d172/17203.pdf](http://w3.math.sinica.edu.tw/math_media/d172/17203.pdf)

【本文由陳鍾誠取材並修改自 [維基百科](#)，採用創作共用的 [姓名標示、相同方式分享] 授權】

# 謂詞邏輯、一階邏輯與「哥德爾完備定理」

## 前言

在 [布林邏輯與推論系統 -- 何謂嚴格的數學證明？](#) 這篇文章中，我們介紹了「布林邏輯」(Boolean Logic) 這種簡單的推論系統，這種邏輯系統又稱為「命題邏輯」(Propositional Logic)。

在本文中，我們將介紹一個能力較強大的邏輯系統，稱為「一階邏輯」(First Order Logic) 系統，這是一種「謂詞邏輯」(Predicate Logic) 的實例，然後再說明這種邏輯系統中的一個重要定理，稱為「哥德爾完備定理」。

## 謂詞邏輯

在布林邏輯中，只有用來代表真假值的簡單變數，像是 A, B, C, X, Y, Z .... 等，所以邏輯算式看來通常如下：

- $P \ \& \ (P \Rightarrow Q) \Rightarrow Q$ .
- $A \ \& \ B \ \& \ C \Rightarrow D \mid E$ .
- $\neg(A \ \& \ B) \Leftrightarrow \neg A \mid \neg B$ .

這種命題邏輯裏沒有函數的概念，只有簡單的命題 (Proposition)，因此才稱為命題邏輯。

而在謂詞邏輯裏，則有「布林函數」的概念，因此其表達能力較強，例如以下是一些謂詞邏輯的範例。

- $\text{Parent}(x,y) \Leftarrow \text{Father}(x,y)$ .
- $\text{Parent}(\text{John}, \text{Johnson})$ .
- $\text{Ancestor}(x,y) \Leftarrow \text{Parent}(x,y)$ .
- $\text{Ancestor}(x,y) \Leftarrow \text{Ancestor}(x,z) \ \& \ \text{Parent}(z,y)$ .

您可以看到在這種邏輯系統裏，有「布林變數」的概念 (像是 x, y, z 等等)，也有函數的概念，像是 Parent(), Father(), Ancestor() 等等。

## 一階邏輯

在上述這種謂詞邏輯系統中，如果我們加上  $\forall$  (對於所有) 或  $\exists$  (存在) 這兩個變數限定符號，而其中的謂詞不可以是變項，而必須要是常項，這種邏輯就稱為一階邏輯。

- $\forall \text{People}(x) \Rightarrow \text{Mortal}(x)$ ; 人都是會死的。
- $\text{People}(\text{Socrates})$ ; 蘇格拉底是人。
- $\text{Mortal}(\text{Socrates})$ ; 蘇格拉底會死。

當然、規則可以更複雜，像是以下這個範例，就說明了「存在一些人可以永遠被欺騙」。

- $\exists x(Person(x) \& \forall y(Time(y) \Rightarrow Canfool(x,y)))$ .

## 二階邏輯

如果一階邏輯中的謂詞，放寬成可以是變項的話 (這些變項可以加上  $\forall$  與  $\exists$  等符號的約束)，那就變成了二階邏輯，以下是一些二階邏輯的規則範例。

- $\exists P(P(x) \& P(y))$ .
- $\forall P \forall x (x \in P | x \notin P)$ .
- $\forall P (P(0) \& \forall y (P(y) \Rightarrow P(succ(y))) \Rightarrow \forall y P(y))$ . ; 數學歸納法。

## 一致性與完備性

在邏輯系統中，所謂的「一致性」，是指公理系統本身不會具有矛盾的現象。假如我們用 A 代表該公理系統，那麼 A 具有一致性就是 A 不可能導出兩個矛盾的結論，也就是  $A \Rightarrow P$  與  $A \Rightarrow \neg P$  不可能同時成立。

## 哥德爾完備性定理

哥德爾於 1929 年證明了「哥德爾完備定理」(Gödel's Complete Theorem)，這個定理較簡化的陳述形式如下：

- 一階邏輯系統是一致且完備的，也就是所有的一階邏輯定理都可以透過機械性的推論程序證明出來，而且不會導出矛盾的結論。

以下是哥德爾完備定理的兩種陳述形式，詳細的證明方法請參考 [Wikipedia:Original proof of Gödel's completeness theorem](#)。

- Theorem 1. Every formula valid in all structures is provable.
- Theorem 2. Every formula  $\phi$  is either refutable or satisfiable in some structure

## 結語

「哥德爾完備性定理」似乎得到了一個很正向的結果，讓人對邏輯系統的能力擁有了一定的信心。

但是、當哥德爾進一步擴展這個邏輯系統，加入了「自然數的加法與乘法」等運算之後，卻發現了一個令人沮喪的結果，那就是「包含自然數加法與乘法的一階邏輯系統，如果不是不一致的，那就肯定是不完備的，不可能兩者都成立」。

這將引出我們的下一篇文章，[從程式人的角度證明「哥德爾不完備定理」](#)。

## 參考文獻

- [維基百科：謂詞邏輯](#)
- [維基百科：一階邏輯](#)
- [維基百科：二階邏輯](#)
- [Wikipedia:First-order logic](#)
- [Wikipedia:Second-order\\_logic](#)
- [維基百科：哥德爾完備性定理](#)
- [http://www.encyclopediaofmath.org/index.php/Henkin\\_construction](http://www.encyclopediaofmath.org/index.php/Henkin_construction)
- [Wikipedia:Original proof of Gödel's completeness theorem](#)

【本文由陳鍾誠取材並修改自 [維基百科](#)，採用創作共用的 [姓名標示、相同方式分享] 授權】

## 從程式人的角度證明「哥德爾不完備定理」

1900 年，德國的偉大數學家希爾伯特 (Hilbert)，提出了著名的 23 個數學問題，其中的第二個問題如下所示。

證明算術公理系統的無矛盾性 The compatibility of the arithmetical axioms.

在上述問題中，希爾伯特的意思是要如何證明算術公理系統的 Compatibility，Compatibility 這個詞意謂著必須具有「一致性」(Consistency) 與「完備性」(Completeness)。

為此、許多數學家花費了一輩子的心力，企圖建構出一個「既一致又完備」的邏輯推論系統，像是「羅素與懷德海」就寫了一本「數學原理」，希望為數學建構出非常扎實的「公理系統」。

結果、這樣的企圖心被哥德爾的一個定理給毀了，那個定理就是「哥德爾不完備定理」。

要瞭解「哥德爾不完備定理」之前，最好先瞭解一下「邏輯悖論」這個概念。

當初、羅素在努力的建構數學原理時，卻發現了數學中存在著邏輯悖論，於是發出感嘆：「當我所建構的科學大廈即將完工之時，卻發現它的地基已經動搖了...」。

羅素的話，其原文是德文，據說翻譯成英文之後意義如下：

Hardly anything more unwelcome can befall a scientific writer than that one of the foundations of his edifice be shaken after the work is finished

結果，在 1950 年，羅素獲得諾貝爾文學獎 (天啊！羅素不是數學家嗎！但是看他上面那句話的文筆，我很能體會他得諾貝爾文學獎的原因了 ...)

## 理髮師悖論

理髮師悖論可以描述如下：

在某一個小世界裏，有一個理髮師，他宣稱要為該世界中所有不自己理頭髮的人理髮，但是不為任何一個自己理頭髮的人理髮！

請問、他做得到嗎？

您覺得呢？

這個問題的答案是，他絕對做不到，原因出在他自己身上：



如果他「為」自己理頭髮，那麼他就為「一個自己理頭髮的人理髮」，違反了後面的宣言。

如果他「不為」自己理頭髮，那麼他就沒有為「該世界中 "所有" 不自己理頭髮的人理髮」，因此違反了前面的宣言。

於是、他理也不是、不理也不是，這就像中國傳說故事裏「矛與盾」的故事一樣，他的問題陷入兩難，產生「矛盾」了。

所以、該理髮師想做的事情是不可能做得到的！

這樣的悖論，在邏輯與電腦的理論裏有很深遠的影響，哥德爾正是因為找到了邏輯體系的悖論而發展出「哥德爾不完備定理」，而電腦之父圖靈也事發現了「停止問題」會造成悖論而證明了有些事情電腦做不到 ....

## 哥德爾不完備定理的描述

當初「哥德爾」提出的「不完備定理」，大致有下列兩種描述方法，後來簡稱為「哥德爾第一不完備定理」與「哥德爾第二不完備定理」，如下所示。

哥德爾第一不完備定理

定理 G1：若公理化邏輯系統 T 是個包含基本算術 (皮諾公設) 的一致性系統，那麼 T 中存在一種語句 S，但是你無法用 T 證明 S，卻也無法否證 S。

哥德爾第二不完備定理

定理 G2：若公理化邏輯系統 T 是個包含基本算術 (皮諾公設) 的一致性系統，那麼 T 無法證明自己的一致性。

但是、對於「程式人」而言，上述描述都太邏輯了，讓我們改用「程式人」的角度來看這個問題，提出另一種「程式型版本」的說法：

哥德爾不完備定理的程式型：

定理 G3：不存在一個程式，可以正確判斷一個「包含算術的一階邏輯字串」是否為定理。

## 哥德爾不完備定理的程式型證明

接著、就讓我們來「證明」一下上述的程式型「哥德爾不完備定理」吧！

由於牽涉到矛盾，所以我們將採用反證法：

證明：

假如這樣一個程式存在，那麼代表我們可以寫出一個具有下列功能的函數。

```
function Proveable(str)
  if (str is a theorem)
    return 1;
  else
    return 0;
end
```

這樣的函數本身，並不會造成甚麼問題，「包含算術的一階邏輯」(簡稱為 AFOL) 夠強，強到可以用邏輯式描述 `Provable(str)` 這件事，因此我們可以寫出 `Provable(s)` 這樣一個邏輯陳述。

更厲害的是，我們也可以將一個字串在 AFOL 裏，是否為定理這件事情，寫成邏輯陳述 (註：邏輯符號  $\exists$  代表存在， $-$  代表 not， $\&$  代表 and， $|$  代表 or)。

接著、我們就可以問一個奇怪的問題了！那個問題描述如下。

請問 `isTheorem( $\exists s$  -Provable(s) & -Provable(-s))` 是否為真呢？

讓我們先用 `T` 代表  `$\exists s$  -Provable(s) & -Provable(-s)` 這個邏輯式的字串，然後分別討論「真假」這兩個情況：

1. 如果 `isTheorem(T)` 為真，那麼代表存在無法證明的定理，也就是 `Provable` 函數沒辦法證明所有的定理。
2. 如果 `isTheorem(T)` 為假，那麼代表 `-T` 應該為真。這樣的話，請問 `Provable(-T)` 會傳回甚麼呢？讓我們分析看看：

```
function Proveable(-T)
  if (-T is a theorem) // 2.1 這代表 -( $\exists s$  -Provable(s) & -Provable(-s))
    // 是個定理，也就是 Provable() 可以正確證明所有定理。
    return 1;           // 但這樣的話，就違反了上述 「2. 如果 isTheorem(T) 為假」的條件了。
  else                  // 2.2 否則代表 -T 不是個定理，也就是存在 ( $\exists$ ) 某些
    // 定理 s 是無法證明的。
    return 0;           // 但這樣的話，又違反上述 「2. 如果 isTheorem(T
```

) 為假」的條件了。

end

於是我們斷定：如果 `Provable()` 對所有輸入都判斷正確的話，那麼 2 便是不可能的，因為 (2.1, 2.2) 這兩條路都違反 2 的假設，也就是只有 1 是可能的，所以我們可以斷定 `Provable(s)` 沒辦法正確證明所有定理。

## 結語

在本文中，我們沒有寫出 `Provable(s)` 的邏輯陳述，也沒有寫出 `isTheorem()` 的邏輯陳述，因為這需要對「程式的指令集」，也就是 CPU 做一個邏輯描述，這樣說來故事就太長了！

而這個 CPU，通常後來的「計算理論」書籍裏會用「圖靈機」來描述，但這並不是哥德爾當初的證明，因為「哥德爾證明不完備定理」的年代，圖靈還沒有提出「圖靈機」的概念。

事實上、當初「哥德爾」的證明，根本也沒有「程式與電腦的概念」，所以「哥德爾」花了很多力氣建構了一個「哥德爾化的字串編碼概念」，這種字串編碼是建構在包含「+,\*」兩個運算的算術系統上，也就是「皮亞諾公設」所描述的那種系統。這也是為何要引進「算術」到一階邏輯中，才能證明「哥德爾不完備定理」的原因了。

1931 年「哥德爾」證明出「不完備定理」之後，後來「圖靈」於 1936 年又提出了一個電腦絕對無法完全做到的「停止問題」(Halting Problem)，該問題乃是希望設計出一個函數 `isHalting(code, data)`，可以判斷程式 `code` 在輸入 `data` 之後會不會停，也就是 `code(data)` 會不會停。圖靈利用圖靈機的架構，證明了該問題同樣是不可判定的，也就是沒有任何一個程式可以完全正確的判定這樣的問題。

「圖靈」的手法，與「哥德爾」非常類似，但是卻又更加簡單清楚。(不過即使如此，我還是很難直接理解圖靈的證明，因為本人在碩博士時連續被「圖靈機」荼毒了兩次，再也不希望跟「圖靈機」有任何瓜葛了 ....)

但是、我們仍然希望能夠讓「對程式有興趣」的朋友們，能夠清楚的理解「圖靈」與「哥德爾」在「計算理論」上的成就與貢獻，以免過於自大的想寫出一個「可以解決所有問題的程式」，我想只有站在前人的肩膀上，才能看清楚「程式」到底是個甚麼東西吧！

(當然、其實想要「寫出一個可以解決所有問題的程式」是非常好的想法。雖然「圖靈」與「哥德爾」已經都告訴過我們這是不可能的，但是身為一個程式人，就應該有挑戰不可能任務的決心，不是嗎？ ..... 雖然、不一定要去做這種不可能的問題啦 ....)

## 參考文獻

- [Wikipedia:Russell's paradox](#)
- [維基百科:羅素悖論](#)
- [An Outline of the Proof of Gödel's Incompleteness Theorem](#), All essential ideas - without the

final technical details.

- [Godel's Incompleteness Theorem](#), By Dale Myers
- [哥德尔轶事](#)
- [A Short Guide to Godel's Second Incomplete Theorem \(PDF\)](#), Joan Bagaria.
- [Wikipedia:Proof sketch for Gödel's first incompleteness theorem](#)

【本文由陳鍾誠取材並修改自 [維基百科](#)，採用創作共用的 [姓名標示、相同方式分享] 授權】

# 圖靈與停止問題

圖靈是計算理論的先驅，他在 1936 年於「On Computable Numbers, with an Application to the Entscheidungsproblem」這篇論文中提出了「圖靈機」的概念，並且證明了「停止問題」是任何圖靈機都無法完美解答的問題，以下是停止問題的簡單描述。

1. 請問您是否有辦法寫一個程式，判斷另一個程式會不會停，
  2. 如果會停就輸出 1，不會停就輸出 0。

## 停止問題不可判定

由於圖靈的證明是建構在圖靈機上的，而圖靈機又很難用幾句話簡單描述，因此我們改用「現代程式」的方法證明停止問題，證明過程如下：

停止問題採用教數學的方式來說，是我們想定義一個函數 `isHalt(code, data)`，該函數可以判斷程式 `code` 在輸入 `data` 之後，是否會停止，也就是 `code(data)` 會不會停止。

如我用程式寫下來，可寫成如下的演算法：

```
isHalt(code, data) = 1  假如 code(data) 會停就輸出 1
                     = 0  假如 code(data) 不停就輸出 0
```

但是、假如上述函數真的存在，那麼我們就可以寫出下列這個函數：

```
function U(code) // 故意用來為難 isHalt(code, data) 的函數。
  if (isHalt(code, code)==1) // 如果 isHalt(U, U)=1，代表判斷會停
    loop forever // 那 U 就進入無窮迴圈不停了，所以 isHalt(U, U) 判斷錯誤了。
  else // 如果 isHalt(U, U)=0，代表判斷不停
    halt // 那 U 就立刻停止，所以 isHalt(U, U) 又判斷錯誤了。
end
```

如此、請問 `isHalt(U,U)` 應該是甚麼呢？這可以分成兩種情況探討：

1. 假如 `isHalt(U, U)` 傳回 1，那麼就會進入無窮回圈 `loop forever`，也就是 `U(U)` 不會停

=> 但是 `isHalt(U,U)=1` 代表 `isHalt` 判斷 `U(U)` 是會停的啊？於是 `isHalt(U, U)` 判斷錯誤了。

  2. 假如 `isHalt(U, U)` 傳回 0，那麼就會進入 `else` 區塊的 `halt`，

也就是  $U(U)$  會立刻停止

=> 但是  $\text{isHalt}(U, U)=0$  代表  $\text{isHalt}$  判斷  $U(U)$  是不會停的啊？  
於是  $\text{isHalt}(U, U)$  又判斷錯誤了。

於是、我們證明了停止問題是不可能做到 100% 正確的，  
因為  $\text{isHalt}$  永遠對  $U(U)$  做了錯誤的判斷。

## 停止問題的意義

從上述的論證中，我們看到  $\text{isHalt}(\text{code}, \text{data})$  這個問題是無法被 100% 正確解答的，因為這個問題與「羅素的理髮師問題」一樣，都是會導制矛盾的，因此我們可以根據「矛盾證法」的推論，發現這樣的問題是無法被「圖靈機或現代電腦」所正確解答的。

在「[韓非子/難一](#)」篇當中，曾經提到一個「矛與盾」的故事，原文截錄如下：

楚人有鬻楯與矛者，譽之曰：『吾楯之堅，物莫能陷也。』又譽其矛曰：『吾矛之利，於物無不陷也。』或曰：『以子之矛陷子之楯，何如？』其人弗能應也。

現代電腦的能力基本上也只相當於一個記憶空間有限的圖靈機，因此一但證實了圖靈機無法解決某問題，那麼現代電腦也就無法解決該問題了。

相反的、假如我們可以證明「一個擁有無限記憶體의現代電腦」無法解決某個問題，那麼、應該也就可以證明圖靈機無法解決該問題了。

【本文由陳鍾誠取材並修改自 [維基百科](#)，採用創作共用的 [姓名標示、相同方式分享] 授權】

# NP-Complete 問題

## 演算法的複雜度

通常我們會用 BigO 的觀念來描述一個演算法的複雜度。舉例而言、泡沫排序 (Bubble Sort) 的複雜度為  $O(n^2)$ ，而插入排序 (Insertion Sort) 的複雜度則為  $O(n \log n)$ 。

對於那些複雜度可用  $O(n^k)$  規範的演算法而言，在  $n$  很大的時候，其成長速率會比  $O(2^n)$  這類的函數要慢上許多。因此、在理論上而言，我們寧可用  $O(n^k)$  的演算法，也不要使用  $O(2^n)$  的演算法。

我們稱那些複雜度受  $O(n^k)$  限制的演算法為「多項式時間演算法」(Polynomial Time Algorithm)，而那些超越  $O(n^k)$  限制，但受  $O(2^n)$  限制的演算法為「指數時間演算法」(Exponential Time Algorithm)。

但是、有些問題很明確的需要  $O(2^n)$  的時間，例如河內塔問題，在圓盤數為  $n$  的時候，需要移動  $2^n - 1$  次才能完成。

不過、有些問題我們並不知道需要多久的時間才能完成，甚至不知道其複雜度到底是  $O(n^k)$  或  $O(2^n)$ ，在這類的問題當中，有一群稱為 NP-Complete 的問題，特別受到「計算機科學」領域的學者所重視。

## 非決定性演算法 (Nondeterministic algorithm)

在電腦領域，非決定性演算法是指那些「針對相同的輸入，每次執行結果可能不同的演算法」，像是「平行的演算法」就會與「執行順序」有關，而「隨機式演算法」則會與「亂數的產生方式」有關。

## NP (Nondeterministic Polynomial Time) 問題

如果一個「隨機式演算法」有時只需要「多項式時間」，但有時又需要「指數時間」才能完成，這類的演算法就稱為「非決定性多項式時間」(Nondeterministic polynomial time) 演算法。

而那些可以用「非決定性多項式時間演算法」解決的問題，我們就稱為 NP 問題。

當然、有很多問題都屬於 NP 問題。

舉例而言、像是排序問題可以用  $O(N \log N)$  複雜度的演算法解決，由於  $N \log N < N^2$ ，所以排序問題的複雜度低於  $O(N^2)$ ，所以當然屬於「多項式時間」的問題。

同樣的、像是「搜尋、矩陣相乘、計算反矩陣、....」等等常見的問題，幾乎都屬於「多項式時間」的問題，當然也可以用「決定性多項式時間的演算法」(Deterministic Polynomial Time Algorithm)來解決。



事實上，上述那些明確受制於  $O(N^k)$  的問題，像是「排序、搜尋、矩陣相乘、計算反矩陣、....」等等，都屬於「決定性多項式問題」(Polynomial Time Problem)，簡稱 P 問題。

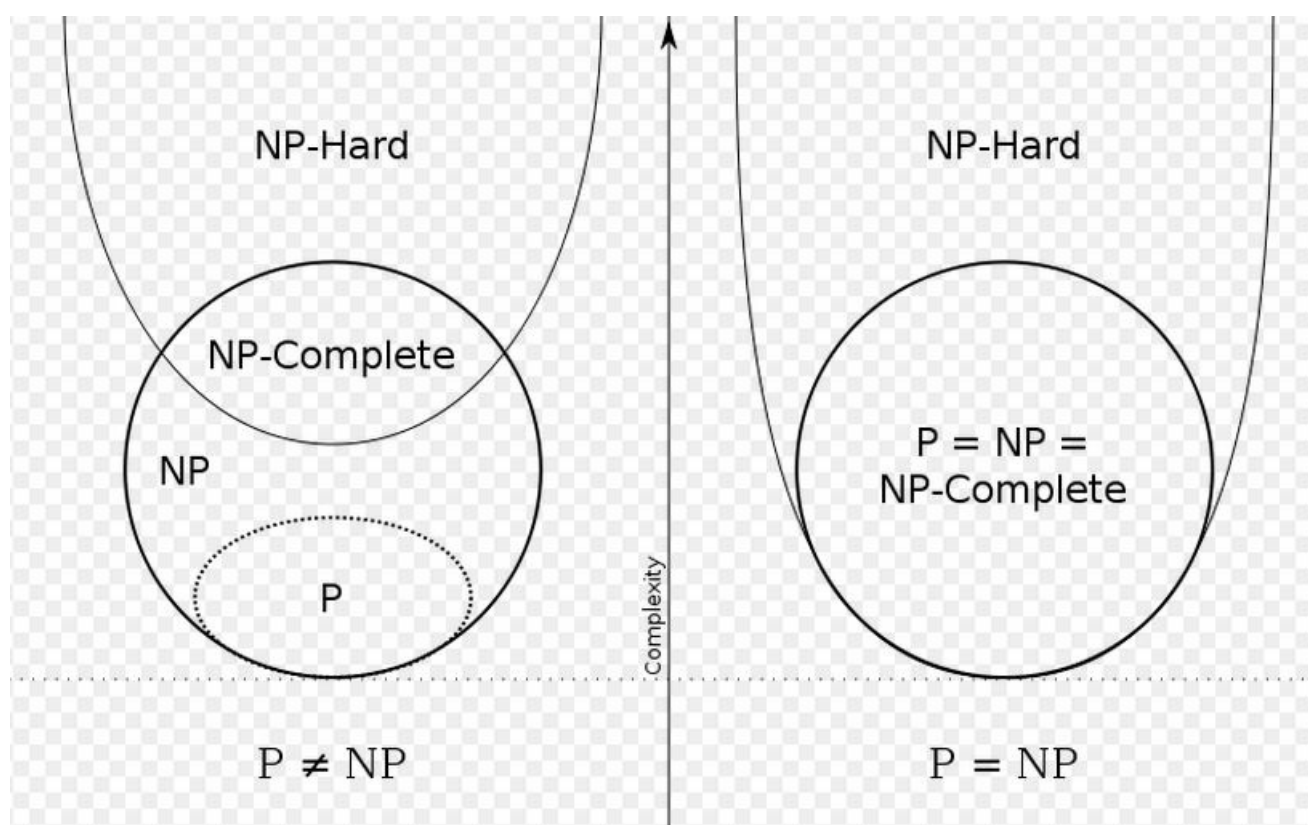
但是、對於某些問題，我們知道當採用「非決定性演算法」的時候，有時可以很快的傳回解答 (在  $O(n^k)$  之內)，有時卻又要很久才能傳回解答 (需要  $O(2^n)$  的步驟)，但是我們卻沒有把握每次都能多項式時間  $O(n^k)$  內傳回解答。這種問題屬於「非決定性多項式時間」當中較難的一類問題，這類問題是我們特別想要關注的「較難的 NP 問題」。

## NP-Complete 問題

在這類較難的 NP 問題當中，有一群很特別的問題，他們相互之間可以互相轉換 (在多項式時間內)，只要其中一個問題可以在多項式時間內解決，那麼其他問題也都將可以在多項式時間內解決，這一群問題稱為 NP-Complete 問題。

而那些至少與 NP-Complete 問題一樣難，甚至是更難的問題，則稱為 NP-Hard 問題。

下圖顯示了 P, NP, NP-Complete, NP-Hard 等四類問題之間的關係。



由於到目前為止，我們並不知道 NP 與 P 問題兩者是否相等，也就是無法找到一個問題是落在 NP 當中，卻又能證明不屬於 P，因此我們無法知道「P、NP 與 NP-Complete」之間的關係究竟應該是如上述左圖或右圖的情況。

從 1971 年 Stephen Cook 提出 NP-Complete 概念與證明以來，從來沒有人能有效解答「P 是否等於 NP」的這個問題，因此這個問題已經成為資訊領域當中最大的謎團之一。(Stephen Cook 因此在 1982 獲得了「圖靈獎」(Turing Award))。

後來、Richard Karp 緊接著在「Reducibility Among Combinatorial Problems」這篇論文中提出



了 21 個互相可化約的 NP-Complete 問題。後來 Richard Karp 在 1985 年更因此獲得了「圖靈獎」。

目前已知的 NP-Complete 問題有很多，以下是一些具有代表性的 NP-Complete 問題。

- Boolean satisfiability problem (SAT) -- 布林式滿足問題
- Knapsack problem -- 背包問題
- Hamiltonian path problem -- 漢彌爾頓路徑問題
- Travelling salesman problem -- 旅行推銷員問題
- Graph coloring problem -- 著色問題

## SAT 問題

在上述的 NP-Complete 問題當中，SAT 問題是特別具有歷史價值的，因為 SAT 問題是 Stephen Cook 提出 NP-Complete 概念的關鍵，所以我們必須先理解 SAT 問題，才能理解 NP-Complete 理論的核心。

SAT 問題的全稱是 Boolean satisfiability problem，也就是「布林式滿足問題」，要瞭解 SAT 問題，首先必須先瞭解何為「布林代數式」。(請參考本書「布林邏輯」一章)。

舉例而言，以下是一些布林代數式：

- 範例 1:  $(A \mid B \mid C) \& (B \mid -A \mid -C)$
- 範例 2:  $(P \& -P) \mid (Q \& -Q)$
- 範例 3:  $(P \mid -P) \& (Q \mid -Q)$

針對上述的「布林代數式」，您可以看到範例 2 是無法被滿足的，因為不管 P 與 Q 如何指定， $(P \& -P)$  和  $(Q \& -Q)$  永遠都會傳回 false，因為兩者都是矛盾式，所以無法被滿足。

相反的、範例 3 是永遠都會被滿足的，不管我們怎麼指定， $(P \mid -P)$  永遠為真，而  $(Q \mid -Q)$  也是一樣，這種「布林代數式」稱為恆真式 (Tautolog，有人採用音譯的方式，翻譯成套套邏輯)。

對於範例 1 而言，如果我們指定  $(A=0, B=1, C=0)$ ，那麼該運算式將會被滿足 (傳回 1, 也就是 true)。如果我們指定  $(A=0, B=0, C=0)$ ，那麼該運算式將會傳回 0 (也就是 false)。這種可備滿足的「布林代數式」就稱為 satisfiable。

如果任意給定一個「布林代數式」，我們是否能設計一個演算法去找出滿足該「布林式」的解答呢？這個問題就稱為 Boolean satisfiability problem，也就是 SAT 問題了。

## 證明：SAT 是 NP-Complete 問題

那麼、SAT 為何是 NP-Complete 問題呢？換句話說、為何所有的「非決定性多項式時間演算

法」(Nondeterministic polynomial time algorithm) 所能解決的問題 (NP 問題)，都可以化約為 SAT 問題呢？

關於這個問題，得先讓我們仔細想想到底「非決定性演算法」在做些甚麼事情？

更明確的說，一個「非決定性的圖靈機」到底在做些甚麼事情？

您只要看看下列表格，就能夠理解 Stephen Cook 到底在玩些甚麼把戲了！

如果我們用  $(Q, \Sigma, s, F, \delta)$  來描述一台非決定性圖靈機，其中各個符號的意義如下：

符號 說明	
$Q$	狀態集合
$\Sigma$	磁帶上的字母集合
$s$	起始狀態，是 $Q$ 中的一個元素
$F$	結束狀態，是 $Q$ 的子集合
$\delta$	轉換關係，是 $((Q \setminus F) \times \Sigma) \times (Q \times \Sigma \times \{-1, +1\})$ 的子集合

接著我們可以定義一大群布林變數如下：

符號 說明	
$T_{ijk}$	當磁帶的第 $i$ 格為符號 $j$ (在第 $k$ 步時) 傳回 true
$H_{ik}$	當機器的讀寫頭在第 $i$ 格上 (在第 $k$ 步時) 傳回 true
$Q_{qk}$	當機器處於狀態 $q$ 時 (在第 $k$ 步時) 傳回 true

然後、根據上述的符號定義，我們可以寫出一大堆邏輯式來描述這台「非決定性圖靈機」的行為，如下表所示：

布林運算式	條件	說明
$T_{ijk} \rightarrow \neg T_{ij'k}$	$j \neq j'$	磁帶上每格只能有一個符號
$T_{ijk} \& T_{ij'(k+1)} \rightarrow H_{ik}$	$j \neq j'$	磁帶未被寫入時符號不變
$Q_{qk} \rightarrow \neg Q_{q'k}$	$q \neq q'$	機器在單一時間只能

		有一個狀態
$H_{ik} \rightarrow -H_{i'k}$	$i \neq i'$	讀寫頭單一時間只能有一個狀態
$(H_{ik} \& Q_{qk} \& T_{i\sigma k}) \rightarrow \bigvee_{(q,\sigma,q',\sigma',d) \in \delta} (H_{(i+d)(k+1)} \& Q_{q'(k+1)} \& T_{i\sigma'(k+1)})$	$k < p(n)$	第 k 步時讀寫頭在位置 i 的狀態轉移描述
$\bigvee_{f \in F} Q_{fp(n)}$		最後結束時必須在接受狀態

如此我們就可以完整的描述一台「非決定性圖靈機」的行為，並且將這些行為與「SAT 布林代數式滿足問題」畫上等號，只要該圖靈機最後會停在接受狀態，「SAT 布林代數式就能被滿足」。

透過這種方式，Stephen Cook 將「非決定性圖靈機」轉換成 SAT 問題，然後證明了「SAT 問題的滿足與 NP 問題是否有解等價」，於是 NP 問題巧妙的轉化成 SAT 問題，並且創造出了 NP-Complete 這個奇特的概念。然後當 Richard Karp 找出了 21 個可化約為其他 NP-Complete 的問題之後，這一整群的問題就通通都被視為計算複雜度上等價的問題了。

## 結語

雖然 Stephen Cook 所造出來的這個「SAT 布林代數式」很大，但該代數式與「非決定性圖靈機」之間的轉換卻可以在「多項式時間內」轉換完成(幾乎都小於  $O(n^2)$ )，因此這個轉換並不會造成複雜度膨脹太大的問題。

透過這種轉換方式，SAT 成了全世界第一個 NP-Complete 問題，而對於某個問題 X 而言，只要我們能在多項式時間內將 SAT 問題或任何一個已知的 NP-Complete 問題轉換為 X (在多項式時間內)，那麼就可以再度找到一個 NP-Complete 問題，於是 NP-Complete 問題就成了一個互相可化約 (reduce) 的族群。

## 參考文獻

- [Wikipedia:NP完全](#)
- [Wikipedia:NP-complete](#)
- [Wikipedia:河內塔](#)
- [Wikipedia:Oracle machine](#)
- [Wikipedia:預言機](#)
- [Wikipedia:Cook-Levin理論](#)
- [Wikipedia:Nondeterministic algorithm](#)
- [Wikipedia:Cook–Levin theorem](#)

【本文由陳鍾誠取材並修改自 [維基百科](#)，採用創作共用的 [姓名標示、相同方式分享] 授權】

## 結語

撰寫至此，筆者已經將「計算理論」裏較重要的問題都用自己的語言闡述了一遍，希望透過這種「較接近人類思考」的語言，讓讀者能用比較輕鬆的方式，快速瞭解那些「先知」所提出的各種奇思妙想，雖然這樣的訓練並不能讓大家寫出更強大的程式，但是卻能讓我們對電腦的理解，升華到一種異常高遠的層次。

不知哪位偉人曾經說過：「我們只有站在巨人的肩膀上、才能看得更高更遠」！

而在計算理論的世界裏，「圖靈、哥德爾、Steven Cook」等人，就是那些巨人，如果您想在計算理論上有新的突破，理解這些巨人的思想應該是有所幫助的。

筆者也是在努力理解這些「學術巨人」的過程中，撰寫出本書的，也希望這本書對讀者能有所幫助！