

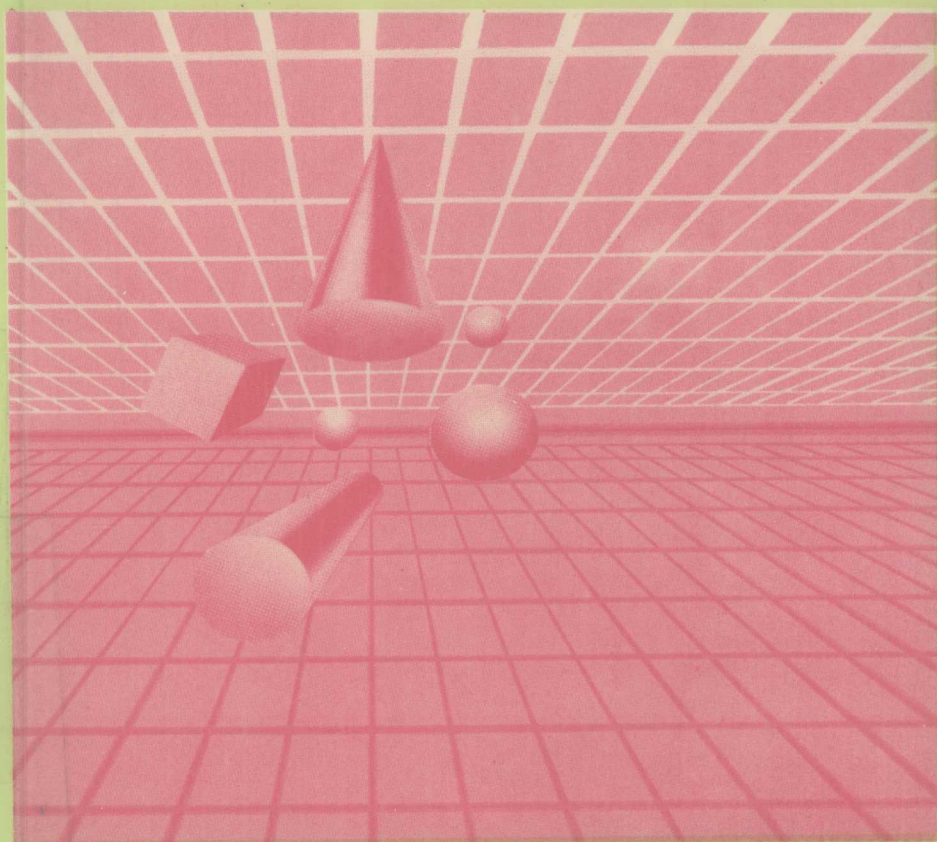
科技用書

電腦輔助設計生產解析

(CAD, CAM, CAE概論)

硬體，軟體，系統
電腦製圖及模型化

工程設計有限要素
NC 機械及機器人



賴耿陽 編撰

復漢出版社印行

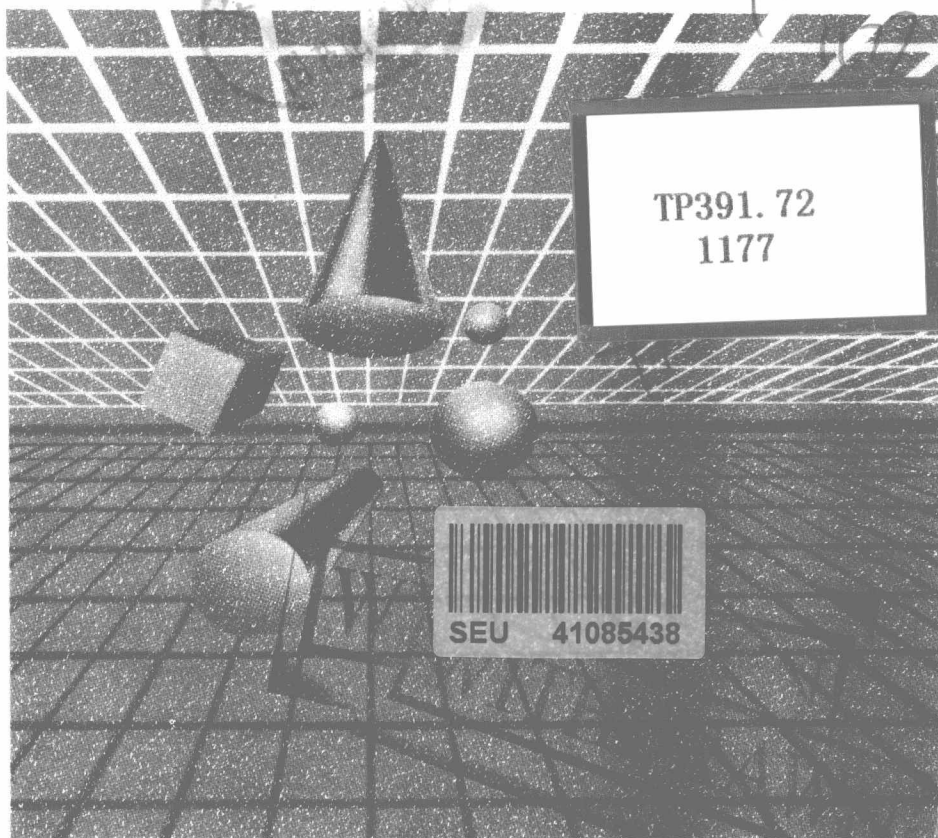
科技用書

電腦輔助設計生產解析

(CAD, CAM, CAE概論)

硬體，軟體，系統
電腦製圖及模型化

工程設計有限要素
NC 機械及機器人



賴耿陽 編撰

復漢出版社印行



THE HONG KONG POLYTECHNIC

中華民國七十六年十月一日出版

電腦輔助設計生產解析

版權所有
翻印必究

B 平裝 二七〇元
精裝 三〇〇元

著者：賴

耿

陽

出版者：復漢出版社

地址：台南市德光街六五一號
郵政劃撥 〇〇三一五九一三號

發行人：沈

岳

林

印刷者：國

發

印

刷

廠

本社業經行政院新聞局核准登記局版台業字第〇四〇二號

序

隨電腦的進步，設計、生產方法大起變化，昔日占領設計室的製圖板幾乎消失踪影，今天是面向電腦的顯示器進行製圖作業。以前在設計完了前，不得不試作數次，今天只在顯示器中用實物模型，檢討製品的成效、性能、機能。生產現場也以 NC 工作母機、機器人取代人工進行加工、裝配。

如此利用電腦，增進從設計到生產的作業效率，實現自動化的設計、生產方法稱為 CAD/CAM，最近追加 CAE 成 CAD/CAM/CAE，CAD/CAM/CAE 的內容總合電腦工學、應用數學、機械工學、電氣電子工學、土木建築工學等，對年輕的技術者、學生是充滿魅力的課題。也是各製造企業贏得激烈競爭的必須技術。

本書為學習者從基礎解說 CAD/CAM/CAE，平易說明 CAD/CAM/CAE 的一系列技術。

本書可供大專理工科一學期 3 學分，或一學年 4 學分教材，第 1 至 5 章為 CAD/CAM/CAE 一般性討論，6、7、8 三章專門討論產業模具 CAD/CAM 系統，9～11 章着重於一般性 CAE，而 12 至 21 章包括工程設計，NC 工作母機系統，及產業機器人系統。總之全書內容頗為寬廣，教授課程亦可隨機增刪，但習題却須由教授自行命題。為供現職人員研讀的方便，習題篇幅只可省略。

本書主體 CAD/CAM/CAE 今後將急速發展，故本書不僅在供學生作授課教材，亦供企業領導人，產業工程師研究參考之用，但願經由本書了解 CAD/CAM/CAE 的基礎，探索其內容，經由深入淺出的敘述中導入新科技的認知，進而發揮其實用功能。

編者謹識

目 次

第 1 章 概述 CAD/CAM/CAE 內容..... 1

- 1.1 何謂 CAD/CAM/CAE 1
- 1.2 CAD/CAM/CAE 的歷史..... 4

第 2 章 CAD/CAM/CAE 系統的硬體..... 9

- 2.1 電腦..... 9
- 2.2 CAD/CAM/CAE 系統的機器構成..... 14
- 2.3 顯示器..... 17
- 2.4 輸入裝置..... 18
- 2.5 輸出裝置..... 22

第 3 章 CAD/CAM/CAE 系統的軟體..... 24

- 3.1 自動製圖系統 24
- 3.2 各種二次元 CAD 系統 27
- 3.3 三次元 CAD 系統 29
- 3.4 CAE 系統 30
- 3.5 CAM 系統 31

第 4 章 電腦製圖..... 32

- 4.1 電腦製圖..... 32
- 4.2 圖形的發生..... 33
- 4.3 圖形的變換..... 35
- 4.4 三次元電腦製圖 41
- 4.5 投影法 45
- 4.6 隱面與隱線的消失 49

第 5 章 形狀模型化..... 52

- 5.1 形狀模型化 52
- 5.2 線框模型與面模型 52

5.3	自由曲線與自由曲面的形狀模型化	55
5.4	實體模型	61
5.5	質量性質的計算	66
第 6 章	產業用模具的 CAD/CAM 系統	68
6.1	硬體與軟體	68
6.2	硬體	78
6.3	軟體	84
6.4	利用個人電腦的系統	93
6.5	利用小型電腦的 CAD/CAM	97
6.6	利用大型電腦的 CAD/CAM	102
第 7 章	產業用模具 CAD/CAM 技術的導入	106
7.1	目標的明確化	106
7.2	現狀分析	108
7.3	與素來技術的連結	115
7.4	製造廠及系統的選擇	116
7.5	新模具製造系統的設計	121
第 8 章	產業用模具的 CAD/CAM 營運	128
8.1	營運的方法	128
8.2	硬體的維護	129
8.3	軟體的維護	130
8.4	技術的改進	132
8.5	提升系統的等級	133
第 9 章	CAE 技術	135
9.1	CAE	135
9.2	有限要素法	135
9.3	有限要素法的基本觀念	136
9.4	有限要素法的要素自動分割	142
9.5	邊界要素法	144

9.6	邊界要素法的基本觀念	145
9.7	形式解析	152
9.8	形式解析的應用法	158
9.9	機構解析	160
第10章	電學上有限要素法應用例	164
10.1	電子電纜內電位分佈	164
10.2	變壓器的洩漏磁場	165
10.3	有任意斷面的導波管	171
10.4	電容器與天線	177
10.5	展望	180
第11章	電學上有限要素法計算法	184
11.1	計算手續	184
11.2	網孔數據的作成	185
11.3	帶寬的計算	191
11.4	要素矩陣的計算	192
11.5	帶矩陣的收存	192
11.6	邊界條件的編入	194
11.7	連立方程式的解法	196
11.8	記憶領域的節約	198
第12章	工程設計	200
12.1	工程設計	200
12.2	判斷表方式的工程設計	201
12.3	創成方式與準創成方式的工程設計	203
第13章	NC 控制概論	205
13.1	NC 工作母機與切削中心機	205
13.2	NC 工作母機的程式設計	208
13.3	自由曲面的加工	212
第14章	NC 控制實務	215

14.1 工作物程式設計	215
14.2 控制的種類	217
14.3 補間	221
14.4 利用脈衝分配的補間方法	224
14.5 APT	228
14.6 工具準備	230
14.7 程序表與工具佈置表	234
14.8 工作物程序設計實例	239

第15章 NC控制加工中心 251

15.1 展望	251
15.2 構造特色	258
15.3 工具整備	266
15.4 程式設計	274
15.5 保養	278
15.6 加工實務	279

第16章 機器人概論 286

16.1 何謂機器人	286
16.2 機器人程式設計	289
16.3 機器人的運動	291

第17章 產業用機器人的機構 296

17.1 前言	296
17.2 構成	298
17.3 依輸入情報、教導分類（主分類）	300
17.4 依動作形態分類（副分類的Ⅰ）	300
17.5 依自由度分類（副分類的Ⅱ）	303
17.6 依可搬重量與作動領域分類	304
17.7 依順序情報分類（參考分類）	305
17.8 依動力源分類	306
17.9 機構例	307

17.10 特性的表示	312
第18章 產業用機器人的手	319
18.1 所謂的手	319
18.2 何謂把持	320
18.3 把持機能	321
18.4 動力源與驅動源	324
18.5 把持的構成	325
18.6 結語	330
第19章 產業用機器人的控制技術	332
19.1 前言	332
19.2 偵知、計測機構	332
19.3 驅動機構	337
19.4 動作控制方式	355
19.5 利用計算機控制	371
第20章 產業用機器人工智慧	380
20.1 前言	380
20.2 機器人與知覺	381
20.3 觸覺	381
20.4 視覺	393
20.5 積體比系統	406
第21章 產業用機器人系統設計	413
21.1 前言	413
21.2 產業用機器人在生產線內的地位	414
21.3 模組構成的產業用機器人	417
21.4 系統構成	424
21.5 產業用機器人與其周邊裝置	430
21.6 可靠性、安全性的評價	436
第22章 數據庫與知識工學對 CAD/CAM/CAE 的應用	441
22.1 數據庫	441
22.2 CAD/CAM/CAE 系統間的統合化	445
22.3 知識工學對 CAD/CAM/CAE 的應用	447

第 1 章 概述 CAD/CAM/CAE 內容

1-1 何謂 CAD/CAM/CAE

1-1-1 CAD / CAM / CAE 的定義

電腦的進步促使設計、生產方法起大變革，以往只能依賴人手的很多單純作業改由電腦自動化，達成設計、生產、設計解析的效率化、高精度化。如此利用電腦，謀求效率化、高精度化，實現自動化的設計、生產、解析方法分別稱為 CAD (Computer Aided Design ，電腦輔助設計) 、 CAM (Computer Aided Manufacturing, 電腦輔助製造) 、 CAE (Computer Aided Engineering ，電腦輔助工程) 。

CAD、CAM、CAE 常統合表成 CAD/CAM/CAE，這表示單純結合 CAD、CAM、CAE，不如有機統合它們，謀求更高的效率化，建立從設計到生產的總合技術。

爲究明 CAD、CAM、CAE 涵蓋的範圍，下文簡單觀察完成一個製品的各過程中如何利用電腦。

1-1-2 CAD，CAE 的範圍

作成 1 個製品的過程因製品而異，一般標準過程如圖 1.1 所示，可分爲基本設計、詳細設計、生產準備、製造。

基本設計是爲滿足必要機能，檢討製品全體形狀或構成，進行大概的性能預測、強度解析、機構解析等解析、模擬，電腦在此過程用於參考過去的設計例或文獻。電腦的檢索能力優秀，所以須預先備好設計例、文獻等的數據庫 (data base)，電腦檢索必要者。其次，此過程必

要的性能預測、強度解析、機構解析等解析、模擬可利用電腦。電腦的解析、模擬能力令人驚訝。

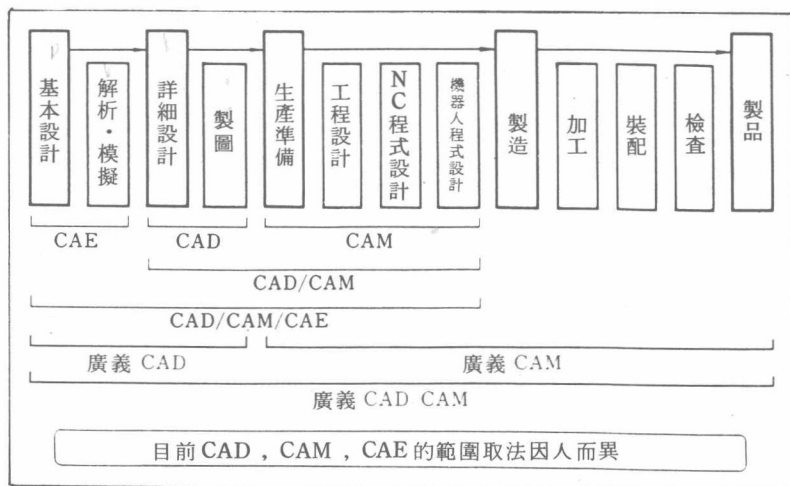


圖 1-1 作成製品的過程與 CAD/CAM/CAE 的範圍

詳細設計是對已在基本設計決定大綱的製品決定各部份的詳細形狀、尺寸、材料等，電腦在此過程也用於高效率檢索設計標準、規格類等儲存於數據庫的數據。電腦用於詳細決定、檢討形狀。設計者在稱為顯示器的電視畫面前，用宛如實物的真實圖像檢討決定形狀，取代傳統的粘土模型，設計者擁有稱為形狀模型的電子模型。而且此電子模型可用於此過程必要的解析、模擬，在電腦上仔細檢討性能、機能，如此在最終審核設計時，可大幅減少試作品的作成次數。

完成基本設計、詳細設計後，將其結果存入數據庫或表成圖面。把設計結果圖面化的製圖作業早就利用電腦建立自動製圖系統，今天的製圖室已幾乎不用製圖板、三角板。

在上述設計、解析過程中的電腦利用狀況，CAD、CAE 是指何一範圍？實際上，CAD、CAE 正急速發展中，尚未確立意義、範圍，在此如下規定 CAD、CAE 的範圍。

CAD 是指利用電腦的形狀檢討、決定、製圖作業，圖 1.1 為簡單

起見，CAD只指製圖作業，其實也包括與製圖作業有關的形狀模型技術。

CAE 是指利用電腦的解析、模擬，CAE 包括基本設計、詳細設計雙方的解析、模擬。

CAD 有時更廣義，廣義的 CAD 包括上述意義的 CAD 和 CAE，即圖 1.1 的廣義 CAD。

1.1.3 CAM的範圍

在圖 1.1 的生產過程，生產的準備需要若干作業。

第一是工程設計，檢討製品的零件加工依可順序利用何種加工法？用何種工作母機？工程設計是需要經驗的作業，以往只有熟練的技術員才勝任。但今天的加工要訣已存入數據庫，與電腦對話，經驗少的作業者也可担任工程設計。

生產準備的第二項目是零件加工準備，目前大都用 NC (Numerical Control, 數值控制) 工作母機加工，加工準備即指使 NC 工作母機運轉的 NC 程式設計。今天利用電腦已比以前容易設計工程。

接著是零件裝配的準備，最近的裝配作業常委任機器人，裝配準備是指使機器人運轉的程式設計。利用電腦也可簡化機器人程式設計。

完成以上的生產準備後，進入實際的加工、裝配、檢查過程，實際加工時，NC 工作母機本身利用電腦而高性能化，同時，利用電腦使多部機械全體高效率運轉。裝配用機器人也隨最近電腦技術的進步而增廣利用範圍。最後檢查過程也有利用電腦的自動試驗裝置。

以上為生產中利用電腦的狀況，CAM 的意義、範圍有多種說法，本書的 CAM 指工程設計、NC 程式設計、機器人程式設計等生產準備。更廣義的 CAM 不只是生產準備，包括利用電腦的實際製造。本書着重前一意義的 CAM，必要時也觸及廣義的 CAM。

設計、生產上的 CAD、CAM、CAE 進步程度因各過程而異，若各過程的技術充分進步，促進全體統合化時，正格的 CAD/CAM/CAE 即可誕生（圖 1.2）。此時，人類可擺脫單純的作業專心於非人不可的創造部份。人在顯示器前，與電腦會話，使自己的構思具體化，從工廠作成期望的製品。

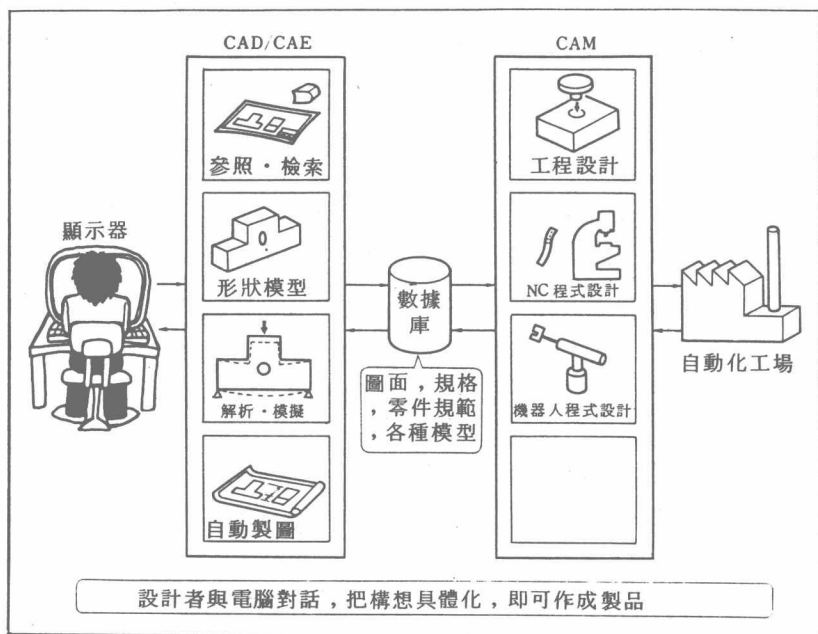


圖 1-2 CAD/CAM/CAE

1-2 CAD/CAM/CAE 的歷史

為加深瞭解 CAD/CAM/CAE 的意義和現狀，本節回顧 CAD/CAM/CAE 的歷史，這須先談電腦的歷史。

1-2-1 電腦的歷史

圖 1.3 為電腦的歷史。

數位電腦誕生於 1940 年代，當時的電腦為電機式，當時最大的電腦 MARK I 進行 23 位的加減算需 0.3 秒，乘算需 0.6 秒。

以真空管置換機械部份的「電子」計算機是於 1946 年首為美國陸軍開發的 ENIAC，此即第 1 世代電腦的誕生，10 位的 2 個數之乘算需 1 / 40 秒，1950 年半葉縮短為 1 / 2000 秒。

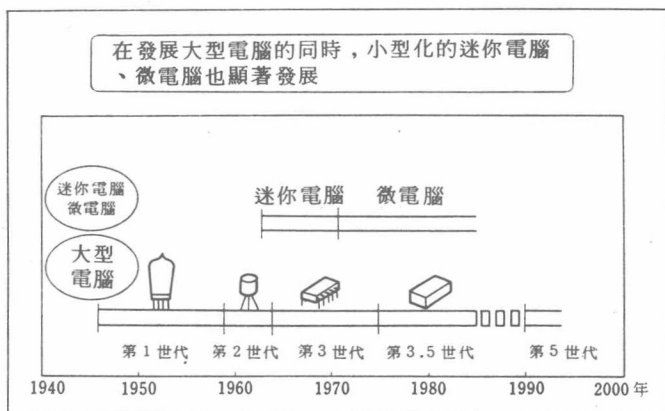


圖 1-3 電腦的發展

1950 年代末用電晶體的第 2 世代電腦誕生，10 位的 2 個數相乘需 1 / 100000 秒。

1970 年代開發把數千電晶體電路集中於小矽晶方上的積體電路（IC），用它產生第 3 世代電腦，1 秒間可計算數百萬次。目前是用大型積體電路（VLSI）的第 3.5 世代電腦活躍，而且電腦邁向高性能化、低價格化。

以上是大型電腦或中央處理裝置（main frame）電腦的發展，同時，小型化電腦也顯著發展。

1960 年代中期開發迷你電腦，比起占用全室的大型電腦，只占房間的一角落，供少數人方便使用。1970 年代更小型化，以 1 個或多個半導體晶方構成微電腦。以微電腦為中心，附加輸入出裝置的電腦系統即是已普及的個人電腦。

1.2.2 CAM 的歷史

CAD/CAM/CAE 的歷史從 CAM 開始，在圖 1.4 的 CAD/CAM/CAE 歷史中處於拐彎處。

1952 年 MIT（麻省理工學院）開發世界首部 NC 工作母機，把以往的手作業加工委任機械，但由人製作控制它的紙帶，此作業費時，錯

誤也多，所以 MIT 在開發 NC 工作母機的同期，推進委由電腦製作 NC 工作母機紙帶的計劃，開發 APT (Automatically Programmed Tools) 系統，APT 的目的在從欲製零件的形狀自動計算工具路線，為 CAM 歷史的起點。

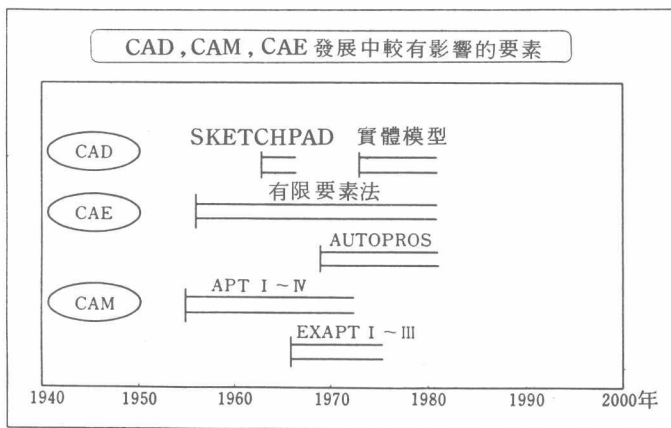


圖 1-4 CAD/CAM/CAE 的發展

最初的 APT 未完成，但 1957 年、1961 年分別發表 APT-II、APT-III，1964 年起，以伊利諾工學院為中心，負責 APT 長期計劃，1969 年完成 APT-IV。

APT 技術輸出到西德的阿亨大學，發展為 EXAPT-I、EXAPT-II、EXAPT-III。

工程設計在歷史上也是早就嚐試自動化的過程之一，1969 年挪威已開發最初的正格工程設計系統 AUTOPROS，但不確知工程設計宜進行何種處理，後來的進步緩慢，在 CAD/CAM/CAE 技術中成為開發最晚的部份。AUTOPROS 對後來的工程設計系統大有影響，但不大普及。

1.2.3 CAD 的歷史

在開發 APT 的 1950 年代後半，MIT 不只利用電腦加工，也探討擴張到設計過程的可能性，此事由 MIT 的學生 Sutherland 完成，他發

表用電腦以對話方式處理圖形的 SKETCHPAD 系統，此系統是以光筆指示顯示器上的必要點，以簡單的命令可自由畫出直線、圓、弧等圖形，如此，把圖形情報存入電腦，用為製圖數據，或用於其他用途。以會話形式使電腦處理圖形，這是實現今天 CAD 概念的第一步。

CAD 首先用於電氣工業而達成，1960 年終頃，電路變極複雜，利用電腦的圖形處理能力，推進電路設計的效率化。

電氣工業的 CAD 成功經驗應用於同為二次元設計的工業，諸如化工廠的配管設計、土木工業的橋、高速公路的配置設計、都市計劃的水路、電線、電話線、瓦斯管的配置設計等。

二次元 CAD 成功後，邁向三次元 CAD，機械設計時須解決三次元的問題。宛如有實物般，把三次元立體忠實存入電腦而供利用於設計的系統——實體模型系統（solid modeler）首度發表於 1973 年的布達佩斯國際會議，其後即積極開發。

1.2.4 CAE 的發展

在電腦誕生之初就進行設計上必要的解析。1953 年的電力用變壓器設計計算就使電腦進行某種收斂計算。

在 CAD/CAM/CAE 發揮威力的有限要素法誕生於 1950 年代後半，1950 年代，飛機從螺旋槳機轉變為噴射機。決定高速噴射機的機翼構造時須高精度解析振動特性，傳統手法不合用。1956 年波音公司的技術者開發劃時代的手法，此即有限要素法的誕生，有限要素法後來的發展不只用於構造解析，也常用於熱傳導解析、流體解析、電磁解析等。

利用電腦的解析手法尚有邊界要素法、形式解析法等。

但這些解析方法以往常單獨使用，很少與 CAD、CAM 連繫，不過，CAD 太着重利用電腦的圖形處理，發展出 CAE 的概念，由於解析手法發達，CAE 終能實用化，與 CAD、CAM 並駕齊驅。

1.2.5 CAD、CAM、CAE 的統合化

CAD 與 CAM 本來幾乎獨立發展，在實際的生產現場，CAD 與 CAM 也互無關係，以 CAD 設計，把製品的形狀數據存入電腦，却因 CAM 而更改同一形狀的數據，為避免這種浪費，須把 CAD 與 CAM 統合化，

却缺乏可實現的核心技術，發表實體模型後，成為統合化的核心。因以實體模型決定形狀後，可據而總合進行解析、模擬、生產準備。目前正以實體模型為核心，推進CAD、CAM、CAE的統合化，謀求設計、生產的自動化、效率化。