



土木工程应用软件

——理论基础及其工程应用

王春江 编著

中国建筑工业出版社

土木工程应用软件 ——理论基础及其工程应用

王春江 编著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

土木工程应用软件：理论基础及其工程应用/王春江编著. —北京：中国建筑工业出版社，2019.3
ISBN 978-7-112-23323-6

I. ①土… II. ①王… III. ①土木工程-应用软件-高等学校-教学参考资料 IV. ①TU-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 028253 号

本书是为了满足土木建筑类本科教学阶段中关于软件应用和相关实践类课程的教材需要而编写的。不局限于简单的软件操作，而是从原理和方法出发，较详细介绍了结构分析类的土木工程应用软件。本教材共分为 12 章，第 1 章，概述了计算机、软件、土木工程计算等方面的历史背景和发展脉络；第 2~5 章，从有限元的基本概念讲起，让学生掌握结构分析和有限元的基本原理；第 6 章，概述了目前发展比较迅猛的 BIM 技术，并就其在土木工程应用软件的数据库和二次开发技术方面做了简要介绍；第 7~10 章，分别以 MIDAS, ABAQUS, SAP2000 等软件为操作平台，分别针对多层框架结构、高层框架-剪力墙结构、大跨空间结构等几种基本结构类型介绍了分析和设计的软件操作过程；第 11 章，分别从简单原理和软件操作层面介绍了静力弹塑性、动力弹塑性分析方法；第 12 章，是作者的一点教学心得和体会，介绍了本教材所针对的“土木工程应用软件”课程的教学建议和改进思路。

本书可作为高等院校土木建筑类软件实践课程的教材，也可供结构工程技术人员参考之用。

责任编辑：赵梦梅 郭 栋

责任设计：李志立

责任校对：李欣慰

土木工程应用软件——理论基础及其工程应用

王春江 编著

*

中国建筑工业出版社出版、发行（北京海淀三里河路 9 号）

各地新华书店、建筑书店经销

北京科地亚盟排版公司制版

北京富生印刷厂印刷

*

开本：787×1092 毫米 1/16 印张：14 $\frac{3}{4}$ 字数：365 千字

2019 年 6 月第一版 2019 年 6 月第一次印刷

定价：69.00 元

ISBN 978-7-112-23323-6

(33623)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题，可寄本社退换

（邮政编码 100037）

前 言

我国土木工程设计的发展历史，经历了从手工计算，到计算机计算，以及现在的如火如荼的云计算和智能计算阶段。自改革开放以来，我国土木工程建设取得了举世瞩目的辉煌成就。目前，在已经建成的高楼中，2016年落成的上海中心大厦（632m）总高度排名世界第二，排在迪拜哈利法塔（828m）之后。在已经建成的大跨径桥梁中，中国苏通长江大桥（主跨1088m），位列斜拉桥跨度排名世界第一；舟山西堠门大桥（主跨1650m），位列悬索桥跨度排名世界第二；已经建成通车的港珠澳大桥，主体工程全长49.968km，成为世界最长的跨海大桥。为迎接2008年奥运会，北京建设了一大批大跨空间结构，像国家体育场“鸟巢”结构、国家游泳中心“水立方”、国家大剧院等。所有这些土木工程的建设成就，都离不开土木工程应用软件的技术支撑。无法想象，如果没有土木工程应用软件作为计算工具，上述任何一项巨大工程的建设将面临何种困难。

伴随着这些巨大、复杂工程项目的实施，对工程技术人员的综合素质，提出了更高的要求。高校土木工程专业现在的目标也是培养未来的卓越工程师，从理论基础到专业素养全面培养出工程师的好苗子。目前，国内土木工程专业方向，关于软件课程的设计，大致分为几个方面：一是计算机语言课程，有的学校开设C或C++，有的开设FORTRAN，也有的不开设相关语言类课程，从实践角度考虑，为土木专业的本科生开设计算机语言类的课程是非常有必要的；二是制图类与CAD操作类课程，有的学校是开设两门课程，分别讲述工程制图和CAD操作，有的是把两门课程合并；三是软件应用类课程，有的学校是以ANSYS为主，有的是以PKPM为主，有的是以SAP2000为主，课程名称是各有不同，教材也是五花八门。

本教材就是针对土木工程专业软件应用方面的教学需求，所开设课程“土木工程应用软件”的教学参考书。伴随着土木工程建设和相关领域的飞速发展，土木工程应用软件的功能也发生了翻天覆地的巨大变化，工程应用的实例也是非常的丰富。通过本教材的编写，力图把“土木工程应用软件”这门课程打造成土木工程专业从基础理论到应用实践的桥梁，以及学生融会贯通的知识交汇点和创新创造力的起点。

本教材的基本编排如下，全书分为12章。其中，第1章概述，从计算机的发展、软件的发展、土木工程计算手段的发展阐述其历史背景和发展脉络；通过介绍软件的开发原理和基本过程，以及软件开发模式的发展历程，让学生掌握软件开发的基本方法。第2-5章，从有限元的基本概念讲起，让学生掌握结构分析和有限元的基本原理，结合工程实际软件应用中的单元类型和分析手段进行介绍，这部分可作为本科生的选学内容；第6章BIM技术与土木工程应用软件，该章节是适应目前土木工程应用软件发展的趋势而新增的，系统介绍了BIM的原理和基本应用方法，目前，随着工程项目复杂程度的提高，从土木工程跨专业角度提高效率，已经成为必然的选择，BIM中工程数据库的应用也是很多设计单位和施工单位，甚至是业主单位的选择；第7-10章，分别以Midas, Abaqus,

SAP2000 等软件为操作平台,介绍了一般多层混凝土框架结构、多层钢框架结构、高层框架-剪力墙结构、大跨空间钢结构等几大类常见工程结构类型,及其分析和设计的软件操作过程;第 11 章,是软件的高级应用专题部分,分别从简单原理和软件操作层面详细介绍了静力弹塑性、动力弹塑性分析方法。针对大型复杂工程应用,这一章的学习内容是必要的。第 12 章,系统介绍了本教材所针对的《土木工程应用软件》课程的改革思路和教学建议,为本课程的课堂教学提出了一些建议。

本教材的编写,得到了浙江大学董石麟院士、同济大学钱若军教授和王人鹏副教授、上海民用建筑设计研究院李亚明教授级高工和徐晓明教授级高工等专家的大力支持,课题组的滕念管副教授、龚景海研究员等各位老师在本教材的具体细节上都有比较深入的交流探讨和指点;本教材的出版得到了上海交大船建学院赵金城副院长、夏利娟副院长和袁敏主任的关心和支持,并得到了上海交大教务处在教学改革项目上的经费支持;在本教材的编辑和内容整理过程中,研究生贾如钊、蔡文涛等在算例和图表的编辑整理方面付出了辛勤的工作,在此一并表示衷心的感谢!由于时间仓促,错误和不当在所难免,敬请读者不吝指正!

王春江

2019 年 4 月 3 日

于上海交大木兰楼

目 录

1 概述	1
1.1 背景介绍	1
1.2 计算机的发展历史	2
1.3 软件的发展历史	5
1.4 软件工程概述	11
1.4.1 需求分析	11
1.4.2 软件系统设计	12
1.4.3 软件文档	14
1.4.4 软件开发	15
1.4.5 集成与测试	16
1.4.6 升级与维护	16
1.4.7 软件危机	17
1.5 结构工程计算理论的发展	18
1.6 土木工程应用软件的发展	19
1.7 应用软件简介	21
1.7.1 通用有限元软件	22
1.7.2 工程专业软件	24
1.8 展望	28
2 数值分析与有限元	31
2.1 有限元简介	31
2.2 有限元的基本过程	33
2.2.1 基本分析过程	33
2.2.2 基本推导过程	34
2.3 基本单元类型	41
2.3.1 单元特性	41
2.3.2 单元类型	44
2.4 网格划分	50
2.5 单元分析	51
2.6 数值计算过程	53
2.6.1 线性代数方程组的求解	53
2.6.2 线性代数方程组的性态	57

2.6.3	非线性方程组的求解方法	58
2.6.4	迭代收敛准则	61
3	工程中的一维单元	62
3.1	概述	62
3.2	平面梁单元	62
3.2.1	单元刚度矩阵	62
3.2.2	刚度矩阵的坐标变换	64
3.3	线性空间梁单元	65
3.3.1	单元刚度矩阵	65
3.3.2	刚度矩阵的显式形式	67
3.3.3	刚度矩阵的坐标变换	69
3.4	非线性空间梁单元	72
3.4.1	几何非线性梁单元	72
3.4.2	材料非线性梁单元	79
3.5	半解析非线性索单元	85
3.5.1	单索的解析表达式	86
3.5.2	半解析索单元的刚度矩阵	89
4	工程中的二维单元	92
4.1	概述	92
4.2	矩形平面薄板单元	92
4.2.1	薄板基本原理	92
4.2.2	薄板弯曲的基本方程	93
4.2.3	位移模式	94
4.2.4	刚度矩阵	95
4.2.5	等效节点力	95
4.3	壳体弯曲问题	96
4.4	膜单元	96
4.4.1	单元概述	96
4.4.2	位移函数	97
4.4.3	几何条件和物理条件	99
4.4.4	基本方程及单元刚度矩阵	102
4.4.5	整体坐标系中的有限元方程	103
4.4.6	应力矩阵	103
5	工程中的三维单元	105
5.1	概述	105
5.2	单元坐标系	105

5.3	四面体单元的体积坐标	106
5.4	四面体单元变换矩阵	107
5.5	四面体单元的线性插值函数	108
5.6	四面体单元的单刚矩阵	112
6	BIM 技术与应用	113
6.1	概述	113
6.2	工程数据库与 CAD	113
6.3	面向对象与工程数据库	115
6.3.1	面向对象技术简介	115
6.3.2	面向对象数据库	116
6.4	BIM 数据简介	118
6.5	BIM 软件简介	120
6.6	基于 Revit 的二次开发	122
6.6.1	开发环境介绍	122
6.6.2	Revit 二次开发	123
6.7	小结	124
7	多层混凝土结构工程的软件应用	125
7.1	设计概述	125
7.1.1	建筑方案设计	125
7.1.2	结构方案设计	126
7.1.3	结构详细设计	126
7.2	设计准则	127
7.3	结构体系概述	128
7.4	软件工具介绍	129
7.5	单元类型	131
7.5.1	梁单元	131
7.5.2	板壳单元	132
7.6	工程介绍	132
7.6.1	模型基本信息	132
7.6.2	荷载分析	134
7.7	软件操作过程	135
7.7.1	设定操作环境及定义材料和截面	136
7.7.2	利用建模助手建立框架	137
7.7.3	建立框架柱及剪力墙	139
7.7.4	生成层数据	141
7.7.5	定义边界条件	142
7.7.6	输入楼面荷载	142

7.7.7	输入风荷载	145
7.7.8	输入反应谱分析数据	145
7.7.9	定义结构类型	147
7.7.10	定义质量	147
7.7.11	运行分析	148
7.7.12	荷载组合	148
7.7.13	查看结果	148
7.7.14	配筋设计	157
7.8	小结	161
8	多层钢结构工程的软件应用	162
8.1	概述	162
8.2	软件应用	162
8.2.1	SAP2000 简介	162
8.2.2	建立模型	163
8.2.3	定义荷载	165
8.2.4	运行分析与计算结果	170
8.2.5	设计校核	172
8.3	小结	174
9	高层建筑结构的软件应用	175
9.1	概述	175
9.2	结构类型与布置	175
9.3	计算结果分析	176
9.3.1	一般性验算	176
9.3.2	规则性验算	177
9.3.3	整体抗倾覆验算	182
9.3.4	结构整体稳定验算	182
9.3.5	结构抗震验算	183
9.3.6	楼层抗剪承载力验算	184
9.3.7	风振舒适度验算	185
9.3.8	内外力平衡验算	186
9.4	小结	188
10	大跨空间结构的软件应用	189
10.1	概述	189
10.2	结构失稳类型	190
10.3	失稳(屈曲)分析方法	193
10.3.1	特征值屈曲分析——buckle 分析	193

10.3.2	非线性屈曲分析——Riks 分析	195
10.3.3	考虑结构初始缺陷的 Riks 分析方法	197
10.3.4	ABAQUS 中的稳定性分析方法	198
10.4	稳定性分析算例 1	199
10.4.1	球面网壳结构简介	199
10.4.2	特征值屈曲分析	199
10.4.3	非线性屈曲分析	201
10.5	稳定性分析算例 2	202
10.5.1	球面网壳结构简介	202
10.5.2	特征值屈曲分析	203
10.5.3	非线性屈曲分析	204
10.6	小结	205
11	高等结构分析专题	207
11.1	概述	207
11.2	静力弹塑性分析	207
11.2.1	概述	207
11.2.2	软件应用	208
11.2.3	小结	215
11.3	动力弹塑性分析	215
11.3.1	概述	215
11.3.2	软件应用	216
11.3.3	小结	219
12	课程教学与思考	221
12.1	概述	221
12.2	课程目标	222
12.3	教学方法与措施	223
12.4	教学大纲探讨	223
12.5	展望	224
	参考文献	225

1 概 述

1.1 背景介绍

在我们国家改革开放 40 多年的时间里,我国土木工程领域发生了翻天覆地的变化。高楼大厦鳞次栉比,高度不断刷新纪录,2016 年落成的上海中心大厦(高度 632m)排名世界第二,排在迪拜哈利法塔(高度 828m)之后;大跨空间结构和大跨桥梁结构如雨后春笋般大量涌现,苏通长江大桥(主跨 1088m),位列斜拉桥跨度排名世界第一;舟山西堠门大桥(主跨 1650m),位列悬索桥跨度排名世界第二;港珠澳大桥,主体工程全长 49.968km,成为世界最长的跨海大桥。随着社会的飞速发展,如此鲜活耀眼的工程实例不胜枚举,并在日新月异地发展当中。比照 20 世纪 70、80 年代中国土木工程领域的半手工、半机械化的设计和建造水平,目前在土木工程领域体现出来的生产力水平是非常高的。土木工程的飞速发展与计算手段的飞速发展是息息相关的,土木领域计算对象及其计算方法的复杂度也有了质的提升。

土木工程领域高生产力水平的重要体现,除了机械化和自动化等先进的制作和施工手段普及以外,非常重要的一点就是分析和设计手段的现代化,土木工程应用软件的大量应用。设计工程师从繁琐的图纸工作中解放出来,把智力用于土木工程中复杂模型的分析 and 设计,以及专业问题的解决。在这 40 多年的发展历程中,土木工程应用软件的种类、功能以及智能化程度都有显著的提升。软件代表了土木行业的先进生产力,是极其重要的工具。软件的发展也反映了土木领域结构新形式发展和重大工程问题研究的新方向。

在我国提出《中国制造 2025》国家战略之际,软件作为土木工程制造领域的关键核心之一,必将得到更大的发展机遇,将来分析、设计、制造、管理一体化将是重要的发展方向。土木工程应用软件已经完全突破了简单绘图工具的发展瓶颈,以及简单设计某一类构件或结构等非常单一的功能的限制,将向跨学科、跨专业、跨领域的智能制造方向发展;也必将为土木领域的再次蓬勃发展到起到重要的推动作用。作为土木专业的学生以及一线的土木工程师,掌握 1~2 门土木工程应用软件的使用以及必要的软件技术已经成为土木工程师的必要选择。

本教材试图从计算机和软件的发展历程、软件工程的基本知识、软件编写的专业背景以及具体软件的操作等方面,多角度多层次介绍土木工程应用软件。毕竟土木工程应用软件是一个非常庞杂的对象,要想在一本书里介绍透彻是不可能的,本教材本着重在原理、讲求实效的原则,力图对土木工程应用软件进行较系统性地介绍。

1.2 计算机的发展历史

在介绍土木工程应用软件之前，我们不得不首先介绍一下软件的运行载体——计算机的发展历史。计算机是人类历史上第三次科技革命中的重要产物，为人类生产力的提高起到了巨大作用。计算机是人类征服自然改造自然过程中发明的重要工具，也是人类科技发展史上的杰作，是第三次科技革命中的重要发明。伴随而来的科技革命把人类认识世界、改造世界的能力大大往前推进了。

第三次科技革命是人类文明史上继蒸汽技术革命（第一次科技革命）和电力技术革命（第二次科技革命）之后科技领域里的又一次重大科技飞跃。第三次科技革命以原子能、电子计算机、空间技术和生物工程的发明和应用为主要标志，涉及信息技术、新能源技术、新材料技术、生物技术、空间技术和海洋技术等诸多领域的一场信息技术革命。其中，计算机的发明和应用是其间的重要科技成就，并对其他科技成果的诞生产生了重要的支撑作用。第三次科技革命的出现，既是由于基础科学理论出现了重大突破，并具备了一定的物质和技术基础而形成的科技领域的重大进步，也是由于当时社会发展的需要以及各国对高科技迫切需求的结果。电子计算机技术的利用和发展是其中一项重大科技成果。

在推动计算机发展的众多因素中，电子元器件的发展起着非常重要的基础作用；其次，计算机系统结构和计算机软件技术的发展也起了重要的推动作用。从生产计算机的主要技术要素来看，计算机的发展过程大致可以划分为四个阶段：

（1）第一代计算机，电子管计算机时代（1943~1957年）

第一代计算机的基本特征是采用电子管（Election Tube）作为计算机的逻辑元件；内存存储器采用水银延迟线；外存储器采用磁鼓、纸带、卡片等。最早的计算机运算速度只有每秒几千次到几万次基本运算，内存容量只有几千个字节，而且，只能用二进制表示的机器语言或汇编语言编写程序。由于第一代计算机的体积大、功耗大、造价高、使用不便，因此，当时主要用于军事和大型科研部门的数值计算，在民用领域应用很少。

1943年二战期间英国推出了一款可编程的计算装置，主要用于破译德国的密码，该装置包括了2400个真空电子管，每秒能解译5000个字符。世界上第一台真正意义上的电子数字式计算机于1946年2月15日在美国宾夕法尼亚大学正式投入运行，它的名称叫ENIAC（埃尼阿克），是电子数值积分计算机（The Electronic Numerical Intergrator and Computer）的缩写。它使用了17468个真空电子管，耗电174kW，占地170m²，重达30t，每秒钟可进行5000次加法运算。虽然它的功能还比不上今天最普通的一台微型计算机，但在当时它已是运算速度的绝对冠军，并且其运算的精确度和准确度也是史无前例的。以圆周率（ π ）的计算为例，中国的古代科学家祖冲之利用算筹（用一根根同样长短和粗细的小棍子制作的计算工具，功能类似算盘），耗费15年心血，才把圆周率计算到小数点后7位数。一千多年后，英国数学家香克斯·威廉（Shanks William）以毕生精力计算圆周率，计算到小数点后707位。而使用ENIAC进行计算，仅用了40s就达到了这个记录，还发现香克斯的计算中，第528位是错误的。ENIAC奠定了电子计算机的发展基础，开辟了一个计算机科学技术的新纪元，人们将其视为人类第三次科技革命开始的标志。

ENIAC 诞生后的 1946 年 6 月，数学家冯·诺依曼针对计算机的体系结构提出了重大的改进理论，起草了一个存贮程序通用电子计算机方案（Electronic Discrete Variable Automatic Computer, EDVAC），对 ENIAC 进行了改造，主要有两点：（一）电子计算机应该以二进制为运算基础；（二）电子计算机应采用存储程序方式工作，并且进一步明确指出了整个计算机的结构应由五个部分组成：运算器、控制器、存储器、输入装置和输出装置。该体系的设计体现了“存储程序原理”和“二进制”的思想，这就是著名的冯·诺依曼型计算机结构体系，对后来计算机的发展产生了深远的影响。冯·诺依曼这些理论的提出，解决了计算机运算的自动化问题和速度配合问题，对后来计算机的发展起到了决定性的作用。直至今日，绝大部分的计算机还是采用冯·诺依曼体系结构。

虽然二进制在计算机中使用的合理性以及关于存储器的设想，在冯·诺依曼之前就有人提出。但是，冯·诺依曼的功绩在于他不仅提出并论证了这些新思想、新概念，而且还研究了实现它们的方法，即提出了 EDVAC 和 IAS 机方案（IAS 是普林斯顿高等研究院，the Institute for Advance Study at Princeton，的简写）。1951 年，IAS 机以比 ENIAC 快几百倍的事实以及后来的研制计算机的经验证明了冯·诺依曼结论的正确性。冯·诺依曼的报告是对通用电子计算机线路结构方面的巨大贡献。人们确认，计算机工程的发展很大程度上归功于冯·诺依曼，因为无论是计算机的逻辑图式，还是计算机中存储、速度、基本指令的选取以及线路之间相互作用的设计，都深深地受到冯·诺依曼思想的影响，因此，冯·诺依曼被人们誉为“电子计算机之父”。

（2）第二代计算机，晶体管计算机时代（1958~1964 年）

第二代计算机的特征是用体积更小的固体晶体管（Solid Transistor）代替了体积较大的玻璃电子管（Electronic valve）；采用磁芯作为内存存储器，采用磁盘、磁带等作外存储器；不但体积缩小、功耗降低，运算速度也提高到了每秒几十万次基本运算，内存容量也扩大到了几十万字节。在这个时候，计算机软件技术才开始有了真正的起步和发展，出现了像 FORTRAN、ALGOL-60、COBOL 等高级程序设计语言，大大方便了计算机的使用。因此，它的应用从数值计算扩大到了数据处理、工业过程控制等领域，并开始进入商业市场。在那个年代，代表性的计算机是 IBM 公司生产的 IBM-7094 机和 CDC 公司的 CDC-1604 机。虽然以今天的眼光来看，那就是个巨大而笨重的机器，但是，在当时代表着最先进的生产力。

（3）第三代计算机，集成电路计算机时代（1964~1975 年）

第三代计算机的特征是采用集成电路（Intergrated Circuit, IC）代替了分立元件。集成电路是把多个电子元器件集中在几平方毫米的基片上形成复杂的逻辑电路（Logic Circuits）。第三代计算机发展，从每个基片上集成几个到十几个电子元件（逻辑门）的小规模集成电路，逐步发展到每个基片上集成几十个元件的中规模集成电路的基本电子元件。第三代计算机已开始采用性能优良的半导体存储器取代磁芯存储器；运算速度提高到每秒几十万到几百万次基本运算。在存储器容量和可靠性等方面都有了较大的提高。

同时，计算机软件技术的进一步发展，尤其是操作系统的逐步成熟是第三代计算机的显著特点。多处理机、虚拟存储器系统以及面向用户的应用软件的发展，大大丰富了计算机软件资源。为了充分利用已有的软件，解决软件兼容问题，出现了系列化的计算机。当时，比较有影响的机型有：IBM 公司研制的 IBM-360 计算机系列；DEC 公司研制的 PDP-8 机、PDP-11 系列机以及后来的 VAX-11 系列机等。这些机型都曾对计算机的推广和发

展起到极大的推动作用。

(4) 第四代计算机，大规模集成电路计算机时代 (1975 年~今)

第四代计算机的特征是由每个基片上集成几百到几千个逻辑门的大规模集成电路 LSI (Large-Scale Integration) 来构成计算机的主要功能部件；主存储器采用集成度很高的半导体存储器；运算速度可达每秒几百万次甚至上亿次基本运算。大规模集成电路技术的产生，对电子元器件的发展和计算机的发展起到了巨大的推动作用，计算机领域也因此出现了反映计算机硬件发展速度的摩尔定律 (Moore Law)。在软件方面，出现了数据库系统、分布式操作系统等，应用软件的开发已逐步成为一个庞大的现代产业。

时至今日，计算机硬件的体系结构已经发展到一个相对稳定的阶段，或者说一个瓶颈阶段，当前硬件发展的摩尔定律已经到了极限。目前流行的冯·诺依曼结构的计算机体系结构图如图 1-1 (a) 所示；计算机的详细设备构成如图 1-1 (b) 所示。

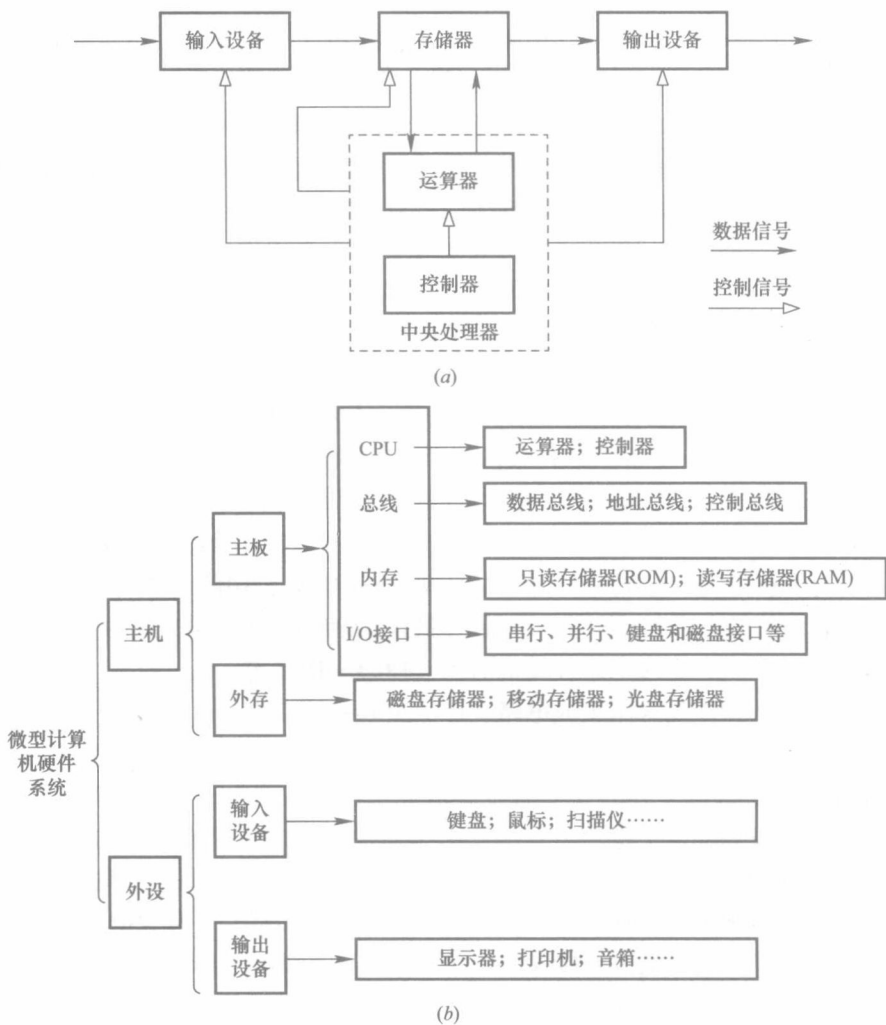


图 1-1 计算机硬件体系结构图

(a) 冯·诺依曼计算机体系结构示意图；(b) 计算机硬件设备关系示意图

在计算机的发展历史上，出现过两种计算机存储器结构：冯·诺依曼结构和哈佛结构。冯·诺依曼结构的计算机，其程序和数据共用一个存储空间，程序指令存储地址和数据存储地址指向同一个存储器的不同物理位置；采用单一的地址及数据总线，程序指令和数据的宽度相同；处理器执行指令时，先从存储器中取出指令解码，再取操作数执行运算，即使单条指令也要耗费几个甚至几十个 CPU 时钟周期，在高速运算时，在传输通道上会出现瓶颈效应。哈佛（Harvard）结构，是一种将程序指令存储和数据存储分开的存储器结构；哈佛结构是一种并行体系结构，它的主要特点是将程序和数据存储在不同的存储空间中，即程序存储器和数据存储器是两个相互独立的存储器，每个存储器独立编址、独立访问；分离的程序总线 and 数据总线可允许在一个机器周期内同时获取指令字和操作数，从而提高了执行速度，取指令和执行能完全并行重叠。两种计算机存储器结构各有优缺点和适用对象，其体系示意图如图 1-2 所示；CPU 内部各个逻辑单元之间的详细关系如图 1-3 所示。

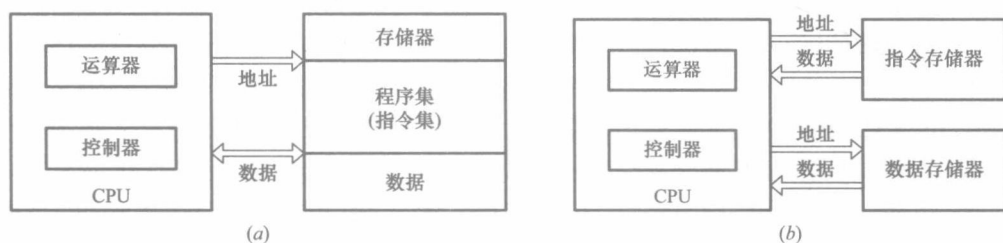


图 1-2 计算机存储器体系结构示意图
(a) 冯·诺依曼体系结构；(b) 哈佛体系结构

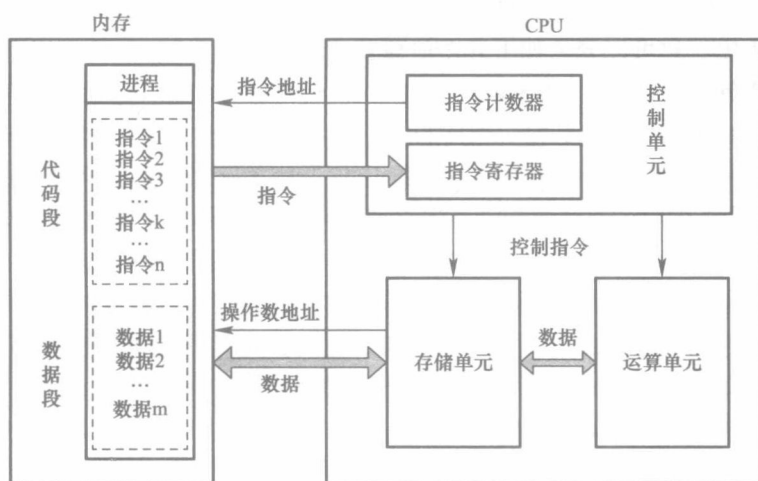


图 1-3 CPU 体系结构示意图

1.3 软件的发展历史

计算机软件（Computer software）是一系列按照特定顺序组织的计算机数据和指令的集合，是用户与硬件之间的通信接口。用户主要是通过软件与计算机进行交流，为了方便

用户，使计算机系统具有更高的总体效用，在设计计算机系统时，必须通盘考虑软件与硬件的性能结合，以及用户对软件的要求。

一般来讲，软件被划分为系统软件、应用软件和作用介于这两者之间的中间软件等三大类。其中系统软件为计算机的使用和硬件功能的发挥提供了最基本的功能，但是并不针对某一特定的高级应用领域。而应用软件则恰好相反，不同的应用软件根据用户和所服务的领域不同，来提供具有针对性的不同的软件功能。

系统软件是负责管理计算机系统中各种独立的硬件，使得它们可以协调工作。系统软件使得计算机使用者和其他软件将计算机当作一个整体而不需要顾及到底层每个硬件是如何工作的。一般来讲，系统软件包括操作系统和一系列的基本工具（比如编译器，数据库管理，存储器格式化，文件系统管理，用户身份验证，驱动管理，网络连接等方面的工具）。目前比较流行的系统软件有：WINDOWS，LINUX 等。

应用软件是为了某种特定的用途而被开发的软件。它可以是一个特定的程序，比如一个图像浏览器；也可以是一组功能联系紧密，可以互相协作的程序的集合，比如微软的 Office 软件；也可以是一个由众多独立程序组成的庞大的软件系统，比如数据库管理系统 SQL SERVER。

计算机出现之前，就已经有很多数学家为计算机软件的诞生和发展打下了坚实的数学理论基础，比如著名的英国数学家阿兰·图灵（Alan Mathison Turing）和他的导师一起努力，在 20 世纪三、四十年代建立了“图灵机”理论，从理论上解决了计算机软件的核心问题——“计算复杂性”以及“算法表示”。前者研究的是“能不能计算”的问题，后者研究的是“如何计算”的问题，正是有了这样的数学理论作为基础，加上当时电子技术的突飞猛进，二者相结合，才产生了计算机和计算机软件这样一个划时代的伟大产物。计算机软件的发展历史大致可以分为如下几个阶段：

(1) 第一代软件 (1946~1953 年)

计算机内部处理的全都是 1 和 0 这样的二进制数字，表示“开”和“关”，而计算机刚刚发明出来的时候，操作人员就必须用很多真正的“开/关”来操作计算机，进步一点以后，出现了“机器语言”的概念，使用例如在纸带上打孔的方式，把一些原来需要人手工拨动开关的操作序列，变成按照某种规则打在纸带上的一系列孔的序列，这种打着孔的纸带可以被看作是今天的鼠标、键盘、打印机、显示器、磁盘这些外设所提供信息的总和。

第一代软件是用机器语言编写的，机器语言是内置在计算机电路中的指令，由 0 和 1 组成。例如数字计算 $2+6$ ，在某种计算机上的机器语言指令如下：

```
10110000 00000110
00000100 00000010
10100010 01010000
```

第一条指令表示将“6”送到寄存器 AL 中，第二条指令表示将“2”与寄存器 AL 中的内容相加，结果仍在寄存器 AL 中，第三条指令表示将 AL 中的内容送到地址为 5 的单元中。

不同的计算机使用不同的机器语言，程序员必须记住每条及其语言指令的二进制数字组合，因此，只有少数专业人员能够为计算机编写程序，这就大大限制了计算机的推广和使用。用机器语言进行程序设计不仅枯燥费时，而且容易出错。想一想如何在一页全是 0

和1的纸上找一个打错的字符?! 这就是当时计算机软件发展极其困难的状况。

在这个时代的末期出现了汇编语言 (Assembly Language), 它使用助记符 (一种辅助记忆方法, 采用字母的缩写来表示指令) 表示每条机器语言指令, 例如 ADD 表示“加”, SUB 表示“减”, MOV 表示移动数据。相对于机器语言, 用汇编语言编写程序就容易多了。例如数字计算 $2+6$ 的汇编语言指令如下:

```
MOV AL, 6
ADD AL, 2
MOV #5, AL
```

由于程序最终在计算机上执行时采用的都是机器语言, 所以需要一种称为汇编器的翻译程序, 把用汇编语言编写的程序翻译成机器代码。编写汇编器的程序员简化了他人的程序设计工作, 是最初的系统程序员。机器语言和汇编语言统称为低级程序设计语言 (简称低级语言)。

(2) 第二代软件 (1954~1964 年)

当硬件变得更复杂时, 就需要更复杂的软件工具使计算机得到更有效地使用。汇编语言向正确的方向前进了一大步, 但是程序员还是必须记住很多汇编指令。第二代软件开始使用类似于自然语言和数学语言相结合的方法 (例如, 计算 $2+6$ 的高级语言指令就是 $2+6$), 不仅容易学习, 方便编程, 也提高了程序的可读性。这类计算机语言统称为高级程序设计语言 (简称高级语言)。

1954年, 就职于 IBM 公司的约翰·巴科斯 (John Warner Backus) 提出了计算机高级语言的思想, 并设计出了世界上第一个真正意义上 (至今仍被广泛应用) 的高级语言——FORTRAN, 这也是第一个真正意义上完全脱离机器硬件环境的高级语言。之后, 又有几种高级语言诞生, 1958年, 麻省理工学院的麦卡锡 (John Macarthy) 发明了第一个用于人工智能的 LISP 语言; 1959年, 宾州大学的霍普 (Grace Hopper) 发明了第一个用于商业应用程序设计的 COBOL 语言; 1964年达特茅斯学院的凯梅尼 (John Kemeny) 和卡茨 (Thomas Kurtz) 发明了 BASIC 语言。

高级语言的出现产生了在多台计算机上运行同一个程序的模式, 每种高级语言都有配套的翻译程序 (称为解析器或编译器)。解析器可以把高级语言编写的语句翻译成等价的机器指令, 并逐条或逐批执行; 编译器可以把高级语言编写的语句一次性翻译成等价的机器指令, 然后连续执行。根据编写软件的目的不同, 编写程序的人员分为系统程序员和应用程序员。系统程序员编写诸如编译器这样的辅助工具, 而使用这些工具编写应用程序的人, 称为应用程序员。随着包围硬件的软件变得越来越复杂, 应用程序员离计算机硬件越来越远, 不再需要考虑计算机硬件的操作和资源分配等问题。那些仅仅使用高级语言编程的人一般不需要懂机器语言和汇编语言, 这就大大降低了对应用程序员在硬件及机器指令方面的要求。因此, 这个时期有更多的计算机应用领域的人员参与程序设计。甚至, 高级语言编程成了很多工科专业毕业生所必须掌握的基本学习和应用的工具和技能。

由于高级语言程序需要转换为机器语言程序来执行, 因此, 高级语言对软硬件资源的消耗就更多, 运行效率也较低。由于汇编语言和机器语言可以利用计算机的所有硬件特性并直接控制硬件, 同时, 汇编语言和机器语言的运行效率较高, 因此, 在实时控制、实时检测等领域的许多应用程序仍然使用汇编语言和机器语言来编写。