

# 土木工程结构分析程序设计

TUMU GONGCHENG JIEGOU FENXI CHENGXU SHEJI

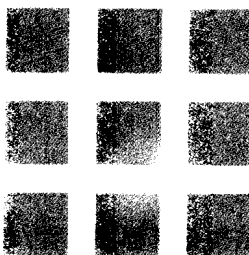
赵更新 编著



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn

# 土木工程结构分析 程序设计

赵更新 编著



中国水利水电出版社  
[www.waterpub.com.cn](http://www.waterpub.com.cn)

## 内 容 提 要

本书是为高等院校土木工程、工程力学专业的学生学习“结构分析程序设计”而编写的教材。

全书共十一章,包括绪论、矩阵位移法及平面刚架静力分析程序,平面刚架静力分析程序的改进及功能扩展,连续梁、桁架及交叉梁系结构静力分析程序设计,弹性力学有限单元法的基本概念,平面问题的三结点三角形单元及程序设计,平面问题的高次单元和等参数单元,结构动力分析的有限单元法及程序设计,线性代数方程组的解法及程序,矩阵特征值及特征向量的计算,程序调试。书中有大量的例题和习题,习题附有答案。

本书采用基本原理、程序设计、上机实习三者紧密结合的方式编写。取材适当,点面结合,由浅入深,叙述细致,便于学习。

本书还可作为有关专业硕士研究生的教材,也可供有关工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

土木工程结构分析程序设计/赵更新编著. —北京:中国水利水电出版社, 2001

ISBN 7-5084-0920-5

I. 土… II. 赵… III. 土木工程-结构分析:计算机辅助分析-程序设计-高等学校-教材 IV. TU311.41

中国版本图书馆CIP数据核字(2001)第088821号

书 名	土木工程结构分析程序设计
作 者	赵更新 编著
出版、发行	中国水利水电出版社(北京市三里河路6号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sale@waterpub.com.cn
经 售	电话: (010) 63202266(总机)、68331835(发行部) 全国各地新华书店
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	水利电力出版社印刷厂
规 格	787×1092毫米 16开本 23.75印张 563千字
版 次	2002年1月第一版 2002年1月北京第一次印刷
印 数	0001—4100册
定 价	38.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

# 前 言

随着电子计算机的广泛应用,在土木工程结构分析中形成了适应电子计算机的杆系结构矩阵分析方法,后来进一步发展成为适用于各类工程结构分析的系统、有效的现代工程数值分析方法——有限单元法。将计算机解决结构分析方法引入结构力学和弹性力学课程,是结构力学和弹性力学课程改革的主要方向。近年来,许多高等院校的土木工程专业已将“结构矩阵分析”和“有限单元法”的内容从结构力学和弹性力学课程中分离出来,单独开设“结构分析程序设计”课程,并逐渐成为土木工程专业的必修课程。本书正是为适应这一发展的需要,以笔者多年来在重庆建筑大学从事该课程的教学实践和教学研究为基础,并广泛吸收国内外同类教材的优点,将所编写的教材和讲义修改、增补而成。内容包括杆系结构的矩阵位移法和弹性力学问题的有限单元法的程序设计,从静力分析到动力分析,重点是静力分析。可作为高等工科院校土木工程、工程力学等专业的本科生或研究生的教材,也可以作为有关专业工程技术人员的进修读物和参考书。笔者相信,读者在掌握了本书的内容后,对于自己动手编写一些专用程序,对于正确地选择和有效地使用大型的综合性程序都会大有帮助。

本书编写时,力求做到对基本概念的阐述条理清楚,内容安排由浅入深,点面结合,理论联系实际。以平面刚架为典型,详细介绍杆系结构矩阵位移法的基本原理和计算步骤;以平面问题三结点三角形单元为典型,全面阐述了弹性力学有限单元法的分析过程和步骤。紧密结合它们的分析过程,采用原理、程序、上机实习相结合的方式,介绍了相应的程序设计基本方法和常用技巧。对基本程序的解释详尽,但又在一些方面给学生留有思考和扩展的余地,书中编排了丰富的上机作业,有利于培养学生的动手能力和创新能力。

本书共分十一章。第一章介绍了学习本课程的目的和当前普遍采用的结构化程序设计的指导思想 and 一般步骤,使学生在接触具体的结构分析程序设计之前,在思想上就具备了一个高起点。

第二章结合最典型的杆系结构平面刚架,介绍矩阵位移法的基本原理、计算步骤及其在计算机上的实现过程。包括支承条件的后处理法和先处理法,前者详细阐述,而后者只介绍与前者的不同之处。对这两种方法都给出了相应的源程序,但把各子程序分散在各节中,采用一节原理(公式)、一个相应子程序的编写方式。这样做对于矩阵位移法原理与计算机程序的紧密结合,对于初学者读懂程序,反过来又加深对基本理论的理解,都是有益的。本章给出的两个源程序都是基本原理的直接应用,不追求程序设计技巧,例如结构刚度矩阵均采用满阵存储方式,目的是突出最基本的概念、原理和方法。第二章是本书的基本内容。

第三章是将基本内容向纵深发展,通过对第二章中两个源程序的改进和功能扩展,介绍杆系结构分析程序设计的一些常用技巧,以及实际工程中一些常见问题的处理方法。一部分内容给出了相应的子程序,有的仅给出框图,子程序留给学生完成。本章最后给出一

个改进的平面刚架源程序，是本章内容的综合应用，有助于提高初学者的程序设计能力。

第四章是基本内容的横向发展，将矩阵位移法应用于连续梁、桁架及交叉梁系等杆件结构的分析。由于矩阵位移法对不同形式结构的计算过程是大同小异，故本章只介绍了它们与平面刚架分析的不同之处和程序设计要点。学生应用第二章的基本内容和第三章的若干技巧，不难将平面刚架程序修改成连续梁、桁架或交叉梁系结构分析程序。

第五章是将杆系结构的矩阵位移法推广应用于弹性连续体问题。主要介绍了弹性力学有限单元法的基本概念和分析步骤，充分注意与杆系结构矩阵位移法相应内容的联系比较，使读者加深对有限单元法基本原理的理解。

第六章用三结点三角形单元解弹性力学平面问题，进行有限单元法的全过程分析，介绍相应的程序设计方法。使读者清楚地掌握有限单元法的计算步骤和在计算机上的实现方法，对学习更复杂的单元有举一反三的示范作用。

第七章介绍平面问题的高次单元和等参数单元，重点介绍这些单元的位移函数和单元刚度矩阵，使读者了解有限单元法中单元形式多样化的特点，有益于选择和使用大型综合性应用程序。

第八章是结构动力分析的有限单元法及程序设计。应用一致质量矩阵，介绍了平面刚架自由振动分析程序；应用集中质量矩阵，介绍了用振型分解反应谱法计算剪切型框架结构水平地震作用的程序。使读者对结构动力分析程序的特点和设计方法有个初步了解。

第九、十章是结构分析中常用的数值计算方法及相应的子程序。考虑到有先修课程的基础，这两章的内容一般不在课堂上讲解，主要由学生自学掌握。书中对所介绍的每种数值计算方法的适用条件、计算公式的来龙去脉以及怎样在计算机上实现均有详尽说明，对每种方法均给出程序框图或对子程序的详细解释及源程序，使读者能自学读懂子程序，并予以正确应用。

第十一章结合杆系结构分析程序，介绍上机调试程序的一般步骤和常用方法，供学生上机实习时参考。相信这一章的内容对提高学生的实际工作能力会有帮助。

作为教材，在第二至十章后附有习题，书末给出了大部分习题的答案。

书中程序采用 FORTRAN 77 语言编写。阅读本书要求读者具备结构力学、算法语言和矩阵代数方面的基础知识。

在本书的编写过程中，得到了重庆大学有关部门和土木工程学院领导的大力支持，还得到了结构力学教研室老师们的支持和帮助，助理工程师赵俊刚为本书绘制插图。在此，笔者对他们表示衷心的感谢！

限于水平和经验，书中难免存在不妥和错误之处，诚恳地希望读者提出批评和指正。

赵更新

2001.8



# 目 录

前 言	
第一章 绪论	1
第一节 学习程序设计的目的	1
第二节 程序设计的步骤	2
第三节 程序质量评价	4
第四节 结构化程序设计方法	4
第二章 矩阵位移法及平面刚架静力分析程序	8
第一节 概述	8
第二节 杆系结构的离散化	9
第三节 平面刚架程序 PFL 的输入数据和使用方法	12
第四节 单元坐标系中的单元刚度矩阵	20
第五节 结构坐标系中的单元刚度矩阵	24
第六节 结构的原始刚度矩阵	28
第七节 结构的综合结点荷载列阵	36
第八节 引入支承条件	43
第九节 求解结点位移和单元杆端力	45
第十节 矩阵位移法(后处理法)的计算步骤及算例	48
第十一节 后处理法程序 PFL 的总框图、模块接口设计及源程序	52
第十二节 平面刚架程序 PFL 的灵活应用	62
第十三节 矩阵位移法的另一种形式——先处理法	69
第十四节 先处理法程序 PFF 及算例	77
习题	92
第三章 平面刚架静力分析程序的改进及功能扩展	97
第一节 输入数据的简化	97
第二节 结点位移分量编号的自动生成	100
第三节 结构刚度矩阵的二维等带宽存储	105
第四节 结构刚度矩阵的一维变带宽存储	112
第五节 支座位移和温度变化问题的处理	116
第六节 多种荷载工况和单元指定截面的内力计算	121
第七节 改进的平面刚架程序 PFF2	124
习题	141
第四章 连续梁、桁架及交叉梁系结构静力分析程序设计	144
第一节 连续梁矩阵分析及程序设计	144
第二节 平面桁架矩阵分析及程序设计	150

第三节	空间桁架矩阵分析及程序设计 .....	158
第四节	交叉梁系矩阵分析及程序设计 .....	165
习题	.....	173
第五章	弹性力学有限单元法的基本概念 .....	176
第一节	引言 .....	176
第二节	连续体的离散化 .....	177
第三节	单元位移函数及其收敛条件 .....	180
第四节	单元分析及单元刚度矩阵的计算公式 .....	184
第五节	单元等效结点荷载的计算公式 .....	187
第六节	有限单元法分析过程概述 .....	188
第七节	梁单元的有限元分析 .....	191
习题	.....	194
第六章	平面问题的三结点三角形单元及程序设计 .....	196
第一节	两类平面问题 .....	196
第二节	三结点三角形单元的位移函数及形函数 .....	198
第三节	单元刚度矩阵 .....	202
第四节	结构的原始刚度矩阵 .....	206
第五节	单元等效结点荷载的计算 .....	209
第六节	单元应力计算及计算结果整理 .....	213
第七节	有限元位移法的计算步骤及算例 .....	215
第八节	用三结点三角形单元解平面问题的程序设计 .....	220
第九节	有限元分析的前处理和后处理 .....	231
习题	.....	232
第七章	平面问题的高次单元和等参数单元 .....	234
第一节	四结点矩形单元 .....	234
第二节	面积坐标 .....	241
第三节	确定形函数的几何法 .....	244
第四节	六结点三角形单元 .....	246
第五节	四结点四边形等参数单元 .....	251
第六节	高斯求积法 .....	260
第七节	八结点曲边四边形等参数单元 .....	264
第八节	等参数单元应用的几个问题 .....	268
习题	.....	271
第八章	结构动力分析的有限单元法及程序设计 .....	273
第一节	概述 .....	273
第二节	离散结构的运动方程 .....	274
第三节	质量矩阵 .....	277
第四节	用有限单元法求平面刚架的自振频率和振型 .....	280
第五节	平面刚架自由振动分析程序设计 .....	284
第六节	剪切型多层框架结构的自振周期和振型 .....	298

第七节	振型分解反应谱法计算剪切型框架结构的水平地震作用 .....	302
习题	.....	311
第九章	线性代数方程组的解法及程序.....	313
第一节	概述 .....	313
第二节	高斯消去法 .....	313
第三节	系数矩阵等带宽存储的高斯消去法 .....	316
第四节	三角分解法 .....	320
第五节	对称正定方程组的 UTDU 分解法 .....	321
第六节	系数矩阵等带宽存储的 UTDU 分解法 .....	325
第七节	系数矩阵变带宽存储的 UTDU 分解法 .....	329
第八节	对称正定方程组的 LDLT 分解法 .....	334
习题	.....	341
第十章	矩阵特征值及特征向量的计算.....	343
第一节	概述 .....	343
第二节	幂法及反幂法 .....	344
第三节	雅可比法 .....	348
习题	.....	354
第十一章	程序调试.....	355
第一节	FORTRAN 源程序的编辑、编译、连接和运行 .....	355
第二节	MS-FORTRAN V5.0 的使用 .....	357
第三节	程序的静态检查 .....	358
第四节	程序的动态调试 .....	360
第五节	结构分析程序的调试方法 .....	363
附录	部分习题答案.....	366
参考文献	.....	371



# 第一章 绪 论

## 第一节 学习程序设计的目的

在土木工程结构的设计和科研工作中，电子计算机已经成为普遍使用的工具。计算机只能按照程序安排的步骤实行操作来完成某项任务，而程序是靠人工研制设计的。结构分析程序设计，就是将结构力学中的静力、动力等计算问题，预先设计好计算步骤及每一步计算的内容，并用计算机能接受的算法语言描述出来，通知计算机去完成这些计算。

学习程序设计首先是为了编写用来解决实际问题的新程序，包括解决专门问题的专用程序和面向一批问题的通用程序。随着经济建设的发展，工程实践中所提出的结构分析问题越来越复杂，例如高层建筑、大跨结构、高耸结构等；要求也越来越高，从平面体系发展到空间结构，从静力分析发展到动力分析，从线性分析发展到非线性分析，从被动地对给定的结构进行计算校核发展到主动地对结构体系进行优化设计。所有这些都要完成庞大的计算工作量，必须使用高效率的计算工具电子计算机才能完成。提出一种新的结构分析方法，固然很不容易。要把一种分析方法编制成正确、适用的计算机程序，也是相当困难的工作。编写结构分析程序，需要掌握结构分析的基本原理和方法，熟悉数值计算方法，某种算法语言及计算机的有关知识，还应该广泛地研究现有各种程序，比较优劣，探索规律，才能编制出优良的程序。

学习程序设计也是为了改进和维护现有程序。因为程序编好以后，并不是可以一成不变永久地使用。除了原理的更新、算法的改进而需补充新内容、增加新功能外，同时计算机技术的飞速发展，例如高速度中央处理器、大容量存储器的出现、算法语言功能的不断扩充等，都会使得应用程序很快落后于时代，现有程序需要不断改进才能与之相适应。另外，大型程序编成之后，其中可能还会有隐蔽得很深的错误存在，只有在长期运行中才会陆续发现，这就需要不断对程序进行维护，即在程序的使用过程中不断改正新发现的错误。因此，对目前使用的程序，必须进行经常的发展、改进和维护，使之不断增强功能、延长寿命。

学习了程序设计，可以更好地使用程序。通常认为程序的使用者只需要了解输入哪些数据和按什么格式输入数据，而不必知道程序的详细内容。虽然在程序的使用说明书中列出了输入数据的要求和方式，但往往因一些具体问题的特殊情况需要对输入数据作一些灵活处理。如果使用者对程序中有关数据输入的模块有一定的了解，就能正确地处理这些问题，而不致因此产生差错。另外，使用程序解题时，常因使用不当而出现各种各样的错误，造成运算中止或计算结果失效，这时需要针对具体情况采取不同的处理措施。一般在使用说明书中并未列出出错诊断信息的详细解释。如果使用者对程序设计有一定了解，就可以有效地处理这些错误。一个结构工程师如果只会被动应用从市场得到的计算机软件，而对其内涵一无所知，包括对该程序的假设前提与规定的了解及对结构边界条件的理解等，那

么一旦出了差错，就会不知所措，甚至可能酿成重大事故。

结构分析程序是连接结构分析原理和电子计算机的纽带。由于一般的计算机软件工程师不懂土木工程专业知识，结构分析程序的设计任务理应由结构工程师来承担，这是以计算机辅助设计为主要标志的现代工程设计方法对结构工程师的要求。土木工程专业的大学应当具有对土木工程结构分析程序的使用、阅读、修改和编制的基础知识和技术素质。本书介绍用微型计算机计算土木工程结构的一般性原理、方法和技巧，试图在结构分析原理与程序设计之间架起一座桥梁，使未来的土木工程结构工程师们逐渐具备主动应用计算机解决各种复杂结构分析问题的能力。

## 第二节 程序设计的步骤

程序是有序的计算机指令的集合。程序设计就是根据所提出的任务，编制一个使计算机能正确运行并完成该任务的程序，即用计算机能识别和理解的计算机语言（本书采用 FORTRAN 语言）来描述计算机的运行步骤。设计用于结构分析的程序，一般包括确定程序功能和计算模型、算法设计、程序编码、程序调试、建立文档等步骤。

### 一、确定程序功能和计算模型

应用结构力学和弹性力学等学科的知识，分析所要求解的问题的已知条件和最后要求，确定本程序的输入数据、功能、适用范围、输出项目及数据格式，包括对计算精度的要求，并选择相应的计算模型。例如，是仅用于平面桁架的静力分析程序，还是适用于各种平面杆系结构（连续梁、桁架、刚架、组合结构等）的静力分析程序；对于杆件的刚度和自重，是由人工输入，还是由计算机根据杆件的截面尺寸和材料的有关常数自动计算。在刚架的静力分析中，电算通常考虑杆件的轴向变形，这不但提高了计算结果的精度，而且给程序设计带来了方便。对土木工程结构分析的许多问题有现成的计算模型，但有些问题则需要寻找或建立计算模型。对于比较复杂的结构分析问题。为了把所要求解的问题说明清楚，最好写出程序系统说明书。该说明书是下阶段进行程序设计的基础，也是最后程序验收的依据。

### 二、算法设计

算法是指利用计算机解决问题的方法和步骤。算法中的每一步都必须是确定的，可以被计算机执行的。算法在执行有限次操作并输出所要求的结果后结束。常采用框图来表示一个算法，因此也称之为框图设计。

算法设计可分为总体设计和详细设计两个阶段进行。总体设计是决定程序的总体结构，考虑如何把整个程序系统划分成若干个逻辑相关的模块，定义每个模块的功能，决定模块的接口（模块间的相互关系及模块间传递的数据）。即把要求解的问题划分成若干个相对独立的子问题，从而得到程序流程的总框图。详细设计是对每个模块内部的具体算法进行设计，列出详细的计算步骤和每一步的计算公式，并绘出相应的子框图。应当根据问题的性质和所要求的计算精度，来选择合适的计算方法，注意减少误差的影响和改善算法的数值稳定性。应尽量采用现有的成熟的算法和子程序，例如求解线性代数方程组的一些标准程序段等。

任何一个算法总是与某些数据相联系的，包括输入的原始数据、计算的中间结果及输

出的最后结果。在设计算法时要考虑如何合理地组织这些数据，即所谓数据结构的问题，算法和数据结构互相依赖、相辅相成，一个好的数据结构可以有效地降低算法的复杂性和提高程序的质量。

杆系结构静力分析问题的计算机算法通常采用矩阵位移法（详见第二章）。首先要输入若干数据把结构的计算简图告诉计算机，例如结构的几何尺寸、荷载、支承情况等。要设置一些变量和数组来存储输入数据、中间结果及最后的输出结果。数据结构的选取要有利于实现正确有效的算法，要特别注意各模块之间的数据传递问题，接口要尽量简单。

### 三、程序编码

编码就是根据各模块的流程框图，把解决问题的步骤和计算公式用一种计算机语言来表示，即编写源程序。在确定了详细框图之后，进行编码并不困难，但工作量大，容易出现错误。因此编写源程序时要细致、耐心、反复推敲，尽量避免语法错误，并使程序简明，便于阅读和使用，也要充分注意节省存储空间和缩短运行时间。

### 四、程序调试

调试是寻找和纠正程序错误的过程。程序中的错误可分为语法错误和逻辑错误。出现语法错误是因为违犯了某些语法规则而产生的错误。逻辑错误是指将一个通过编译、连接后得到的可执行文件提交运行，但不能产生正确的结果。例如程序流程不对、计算公式错误等。

程序调试通常分静态检查和动态调试两步进行。所谓静态检查，就是由人工对源程序进行仔细的检查，主要检查程序中的语法规则和逻辑结构的正确性。动态调试是将源程序输入计算机，进行编译、连接和测试运行，寻找错误，改正错误。应精心选择足够多的考题，尽可能多地覆盖程序运行的可能路径，以便尽可能多地发现和改正程序中的错误。

程序调试的工作量和所花费的时间，在整个程序设计中所占的比例是很大的。初学者调通一个程序所用的时间往往要比程序编写本身所用的时间多得多。程序调试具有很强的技术性和经验性，本书在第十一章对程序调试的一般步骤和基本方法作了介绍。

### 五、建立程序文档

程序文档指对程序加以说明的各种书面材料。这些书面材料可分为内部文档和用户文档两类。

内部文档的内容包括：工程问题的原始资料、计算模型和计算方法；程序中使用的计算公式及其推导；对某些特殊问题和算法的说明；程序总框图及各模块的功能说明；主要标识符的含义；程序调试情况及考题；有详细注释的源程序清单；参考文献目录等。内部文档主要用于今后对程序进行维护。

用户文档也就是程序的使用说明书。其内容包括：程序的适用范围和功能；程序的编写依据和基本原理；运行程序所需原始数据的填写方法、详细的操作步骤及算例；程序输出结果的说明；特殊情况的处理方法等。用户文档叙述要简明、准确，以便于用户使用程序。

以上介绍的程序设计步骤主要是针对较大的程序而言，对于较小的程序，其设计步骤和内容可大大简化。例如在算法设计阶段不必划分为总体设计和详细设计；对于简单的模块可以不画框图而直接编码等。此外，实际的程序设计工作并不是简单地按上述五个阶段

的顺序进行的，而是反复交替进行的。例如，有些关键的模块可能要先编写和调试，而不是等到最后才对整个程序进行调试。又如在调试阶段发现模块接口上的错误或不合理，就要返回算法设计阶段重新设计。总之，上述五个阶段不是截然分开的。

### 第三节 程序质量评价

即使对于一个很简单问题的解决，不同的程序也会有优劣之分。为了使读者从一开始就养成良好的程序设计习惯，下面说明一个质量好的程序应具有的特性。

#### 1. 正确性

一个好的程序首先当然应该是正确的，即当用户正确地输入程序所要求的数据，并完成程序要求的操作后，程序给出的计算结果是正确的。一个程序的正确性，目前还不能用一套完善的理论来证明，而是靠大量的实践、反复的运用来验证。通常采用大量的考题对程序进行测试，尽可能让程序的各种情况、各个组成部分都得到机会运行，全面验证它的正确性。但测试只能指出程序的错误而不能证明程序没有错误。因此，一些使用多年的程序还会陆续地发现小错误。

#### 2. 易读性

一个好的程序应该具有清晰的逻辑结构，读起来易懂。

早期的计算机容量小、速度慢，衡量程序质量的主要指标是程序的效率（指程序占用内存的大小和运算时间的长短），程序设计者总是千方百计地追求节省内存和机时的技巧。然而，越是技巧性高的程序，往往越难读懂和查错。当今的计算机不但容量大、速度快，且价格不断降低。而软件的功能愈来愈全，规模日益庞大与复杂化，程序的可靠性问题变得越来越突出。程序的调试、验证、维护的工作量常远远超过编写的工作量，软件维护的费用占的比例越来越大。现代程序设计强调可读性，首先是为了易于保证程序的正确性，其次，是为了易于维护修改。可读性好了，程序的调试、维护、修改都更加方便。

#### 3. 有效性

这是指程序执行速度要快和占用内存空间要小，以取得高效率。程序的效率主要由算法的复杂性决定，对于执行次数很多的通用程序，要尽可能选用效率高的算法。程序的效率和可读性常常是有矛盾的，在当今的多数情况下，是牺牲一些效率来保证程序的可读性。在不影响可读性的前提下，尽可能提高程序的运行速度和节省存储空间。

#### 4. 面向用户、易于使用

一个高质量的程序应该有良好的用户手册，手册中对程序的特点、适用范围应叙述清楚，对于如何输入数据、运行程序、解释输出结果应有详细的说明，以方便用户自学。

程序的输入数据应尽可能少，且易于准备，应符合工程技术人员的习惯作法，具有明确的物理、几何及工程意义。程序的输出结果应便于工程设计直接使用、整理分析和存档。

### 第四节 结构化程序设计方法

程序设计是算法、数据结构和设计方法三者的统一。算法是程序设计的核心，数据结

构是程序数据的组织形式，是影响程序设计的重要因素，程序设计方法是设计优质、高效程序的技术措施。目前，程序设计已发展出许多成熟的方法。结构化程序设计（structured programming）就是其中的一种，它是适应大容量、高速度的计算机和编制大规模程序而发展起来的程序设计方法。

随着计算机硬件的迅速发展，软件的规模和复杂程度逐年增加。面对庞大而复杂程序的大量故障，人们逐渐认识到，光靠调试技术已经难以解决问题了，在程序的算法设计和编码阶段应当为以后的调试、维护工作提供方便，应当有科学的方法去指导程序设计。我们需要有一种好的程序结构，在这种结构下，程序的可读性大大增强，程序调试的难度将大大降低。

结构化程序设计就是为了解决上述问题而提出的一套程序设计的原则和方法。它要求人们不能随心所欲地编写程序，而要按照一定的合理的结构形式来设计程序。结构化程序设计方法的基本思想是任何复杂的程序都可用顺序、选择、循环三种基本结构组成，利用自顶向下、逐步求精、模块化等方法编制程序，使程序结构清晰、易于阅读，便于查错、修改，也就降低了程序使用中出现故障的概率，因而提高了程序的可靠性。

对于初学者的小程序，不按结构化思想去设计也未尝不可。而大的应用软件若不按结构化进行设计，就会在阅读、测试、修改和维护时付出很大的代价。对程序设计的初学者来说，一开始就应该培养用结构化方法设计程序的好习惯，并坚持下去，这将会大大提高工作效率和程序的可靠性。下面简要介绍结构化程序设计的基本原则和方法。

### 一、结构化程序设计的三种基本结构

结构化程序设计规定了三种基本结构，即顺序结构、选择结构和循环结构，如图 1-1 所示。图中 A、B、C 可以是一个语句，也可以是某一基本结构形式的程序段。结构化程序就是由这三种基本结构组合、嵌套而成的程序。已经从理论上证明，任何程序（满足只有一个入口和一个出口，且无死循环）均可由上述三种基本结构组合而成。

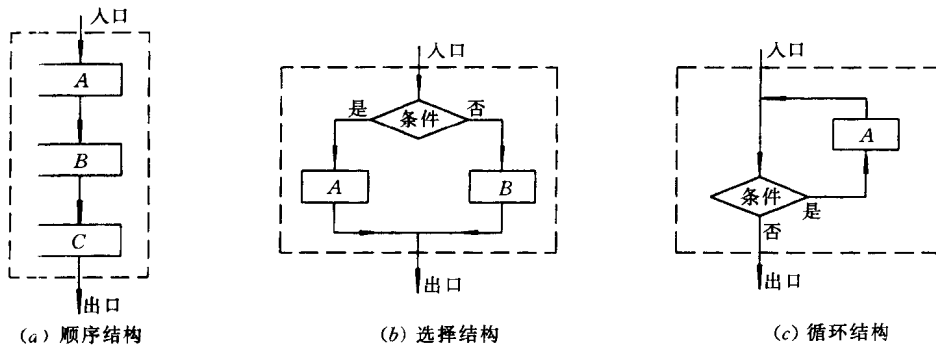


图 1-1

上述三种基本结构都遵从“一个入口、一个出口”的原则，这是结构化程序最本质的要求。正是由于遵从这一原则，一个复杂的程序才可以分解为若干个及若干层子结构，因而使程序结构层次分明，清晰易读。

显然，如果在程序中不加限制地使用 GO TO 语句，特别是使用回跳的 GO TO 语句，

会破坏程序结构的单入口、单出口特点，把程序的结构层次搞乱，导致程序难读懂、难调试。因此，结构化程序设计的一个重要原则是尽可能不用或少用 GO TO 语句，例如只限在一个基本结构内部使用，而不允许从一个基本结构跳到另一个基本结构。

## 二、模块化程序设计

程序设计中的所谓模块，是具有一定功能、相对独立的程序段。每个模块由对外接口和内部构造细节这两部分组成。例如，在 FORTRAN 语言中，一个子程序就是一个模块，对外接口就是子程序的哑元表和公共区，内部构造则为完成一定功能的执行语句序列。

模块一般具有下列特征：

- (1) 每个模块都有一个名称，以便调用。
- (2) 每个模块具有明确的功能，具有清晰的输入量和输出量作为与其他模块的接口。如果各模块之间的接口已定义，那么一个模块的内部构造不管如何修改，都不会影响其他模块。
- (3) 除主模块（主程序）只能由操作系统调用外，原则上各模块间可相互调用，也就是具有可拼装性。
- (4) 每个模块都能作为一个独立的编译单位对其单独进行编译和调试，人们在使用某个模块之前就能确定它的正确性。对于一个模块的使用者来说，只需要知道该模块的名称、功能及接口（输入和输出），就能正确使用这个模块，不会因为在这个模块在使用时所处的上下文不同而影响它的正确性。

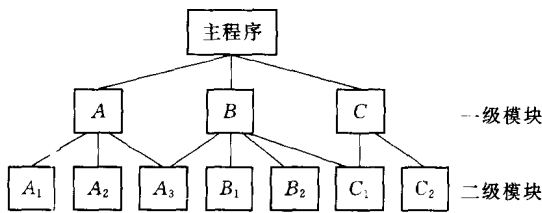


图 1-2 程序分层结构示意图

对于一个较大的程序，首先应划分模块，建立程序系统结构的框架。模块化程序设计按层次结构组织模块，即把一个程序按照各部分的功能划分为若干个模块，每个模块又可再划分为下一级的若干模块，直到划分为功能单一、容易实现的小模块为止。每个模块都由顺序、选择和循环这三种基本结构组合、叠加而成。图 1-2

是一个模块化程序的分层结构示意图。结构化程序设计遵守从上而下的调用原则，即任何模块只允许调用层次比它低的模块，而不能调用同层或上层的模块。这样就使整个程序的结构具有单入口、单出口的特点。从某种意义上来说，结构化程序设计的核心就是自上而下、层次分明的模块化程序设计。划分模块和各模块之间的接口设计是模块化程序设计的两个关键。

模块化程序的优点是：程序结构清晰、易读；各模块的功能单一，当要修改某一功能时，只涉及一个模块，不会出现“牵一发而动全身”的情况，有利于程序的修改；当一个模块发生问题时，只需要从该模块本身去找原因，而用不着怀疑是别的模块错误所引起的，这有利于程序的调试；在扩充程序功能或编写程序时，可以充分利用已有模块，用积木式的方法进行开发。

## 三、自顶向下逐步求精的设计方法

自顶向下逐步求精的设计方法是以模块化设计为基础的。首先，从程序的总体要求出发，把总任务进行分解，形成一个用自然语言描述的抽象的算法（总体设计）；然后再将这



个抽象的算法逐步分解成能够具体实现的子算法。这个把总任务进行层层分解的过程，也就是从抽象到具体的模块划分过程。对每一个模块来说，也是从其抽象的功能要求出发，逐步分解精细化为详细的处理步骤，直到用高级语言书写的源程序。自顶向下、逐级抽象与精化的过程是分阶段展开程序逻辑的设计方法，编写出来的程序层次结构清晰，易读、易维护。

程序设计自顶向下逐步求精已是公认的高效率方法。但是有些实际问题是比较复杂的，为了设计更有把握起见，常常伴随使用关键部分优先考虑的设计方法。

#### 四、结构化编码

在编写源程序时，不仅要严格遵守所用程序设计语言的语法规则，还应当遵循良好的程序设计风格的要求，编写出易读易维护的程序。以下是一些有助于提高结构化程序设计质量的具体措施。

(1) 源程序中的注释行是非常必要的。在子程序或关键语句前加上适当的注释语句，说明它们的作用，这给阅读程序带来很大方便，增强了程序的可读性。

(2) 程序中的变量名、数组名、子程序名等应尽可能地与它们的作用或功能相联系，一般可取用有关公式中的常用字符、相应的英文或汉语拼音缩写。

(3) 避免与值为实型数的表达式进行“相等”的比较。由于计算机进行实型数运算时会产生误差，这种误差可能导致一个理论上是成立的关系式变为不成立，从而引起判断错误。例如，若以实型数  $A$  与  $B$  是否相等作为条件来选择路径时，应把条件写成：

```
IF(ABS(A - B).LT.1E - 6)...
```

而不应该写成：

```
IF(A.EQ.B)...
```

(4) 将多次重复出现的表达式预先计算，并将其值赋给一个变量，以便多次使用，避免重复计算。

(5) 避免使用混合类型运算。计算机在碰到例如  $5 * A$  这样的混合类型运算，都是首先转换成  $5.0 * A$  后再执行运算。因此，应将  $5 * A$  直接写成  $5.0 * A$ ，以免额外增加机时。

(6) 应将循环内部所有能够在循环外确定和完成的运算处理提到循环外进行，避免重复执行这些语句。

(7) 为了节省存储单元，可以令先后出现的变量占用相同的存储单元（当先前出现的变量值不再有用时）。

(8) 尽可能少用 COMMON 语句，这样可以使程序系统的组织工作易于实现，程序中的错误易于分割查找。

(9) 将输入的原始数据立即输出打印，以便存档，同时也用于校核所输入的原始数据是否有错误。

总之，编写程序时首先要使程序简明，便于阅读和使用，也要充分注意节省存储空间和缩短运行时间。

## 第二章 矩阵位移法及平面刚架静力分析程序

### 第一节 概 述

结构分析的任务是计算结构在荷载、支座位移、温度变化等外因作用下的内力和变形。电子计算机的广泛使用，为结构分析提供了强有力的计算手段。适用于计算机的杆系结构分析方法——结构矩阵分析方法得到了迅速的发展。结构矩阵分析在理论上是以传统结构力学为基础，在公式推导中采用矩阵形式，而计算工具则是采用电子计算机。结构矩阵分析方法将计算过程中的表达式全部采用矩阵形式表示，这不仅使表达简洁，更重要的是使计算过程规格化，非常适应计算机的工作，便于编制计算机程序。

结构矩阵分析沿用传统结构力学的基本假定、基本原理和基本方法。在线性弹性结构中，假定材料是完全弹性且服从虎克定律，结构只产生小变形，杆件轴力对弯曲变形的影响可以忽略。因此，荷载与位移之间呈线性关系，可以应用叠加原理。在结构矩阵分析的整个过程中，静力平衡条件和变形协调条件也是必须遵守的规则。

与结构力学中的力法和位移法相对应，在结构矩阵分析中，若取结构的多余未知力作为基本未知量，称为矩阵力法（柔度法）；若取结构的结点位移作为基本未知量，称为矩阵位移法（刚度法）。对于某一超静定结构，矩阵力法可以采用不同形式的基本结构，这使得分析过程与某一基本结构联系在一起，不便于编制通用计算程序。而对于给定的结构，矩阵位移法的基本结构一般来说是唯一的。另外，矩阵力法不能用于求解静定结构，而矩阵位移法对静定结构和超静定结构都适用，求解过程也是完全一致的。由此可见，矩阵位移法的分析过程比矩阵力法更容易规格化，也就更适宜于用电子计算机来实现其分析过程，便于编制通用程序。因此，矩阵位移法是电子计算机上广泛使用的结构分析方法，本章将详细介绍其分析过程和程序设计。

将杆系结构的矩阵分析方法推广应用于分析连续体结构，称为有限单元法。结构矩阵分析有时也称为杆系结构的有限单元法。

矩阵位移法实际上是以矩阵形式表达的位移法。矩阵位移法的基本原理与位移法是相同的，即都是以结点位移为基本未知量，并通过平衡方程来求解基本未知量，然后计算结构的内力。为了使整个计算过程便于在计算机上实现，矩阵位移法的表达形式和某些作法与位移法不同。矩阵位移法的基本要点是：

(1) 结构离散化。把结构划分为有限个单元，各单元只在有限个结点处相互连接（例如铰结或刚结）。对于杆系结构，通常以一根等截面直杆作为一个单元，把整个结构视为由有限个单元组成的集合体。这相当于建立位移法的基本结构。

(2) 单元分析。分析单元的内力与位移的关系。对于杆件单元，只要确定了杆件两端截面的内力（简称杆端力），其余截面内力便容易确定，因而杆件的内力可用杆端力作代表。单元分析的任务是确定杆端力与杆端位移之间的关系，建立所谓单元刚度矩阵。这与位移

法中杆件的形常数及转角位移方程相对应。

(3) 整体分析。把各单元集成整体结构，这就要求在各结点处满足变形协调条件（包括支座处的约束条件）和平衡条件。整体分析的任务是由单元刚度矩阵按照刚度集成规则直接形成结构刚度矩阵（即位移法典型方程的系数矩阵），并建立整体结构的刚度方程（即结构的位移法典型方程），它反映了结构的结点位移与结点荷载之间的关系，可由此方程求解结点位移。

一旦求出了结点位移，再回到单元分析，便可确定各单元的内力。

在计算机上实现矩阵位移法时，由计算机根据输入的结构原始数据，自动建立并求解结构刚度方程，计算并输出结构的位移和内力。

学习本章时，既要看到矩阵位移法与位移法在基本原理上的相同处，又要看到在具体作法上的不同点。从手算的观点出发，会觉得矩阵位移法的步骤死板、运算量大。而从电算的角度看则是方便的，因为它便于编制系统性、通用性强的程序，容易在计算机上实现。

## 第二节 杆系结构的离散化

### 一、单元与结点的划分和编码

杆系结构是由若干根杆件组成的结构。在矩阵位移法中，必须首先把结构离散成一根根独立的杆件——单元，把结构看成有限个单元的集合体，这就是结构的离散化。

为了计算方便，通常采用等截面直杆这种形式的单元。单元与单元通过结点互相连接，并通过支座与基础相连。因此，划分单元的结点应该是杆件的连接点、截面的突变点、结构的支承点和自由端等。有时为了计算上的需要也把杆件中某些特殊点当作结点，例如当集中荷载作用于单元中间时，也可将该荷载作用点当作结点，即一根直杆也可划分为几个单元（桁架杆件除外，否则桁架将成为瞬变体系）。确定了结构的全部结点，也就确定了单元的划分。

为了便于电算，需要分别对单元和结点进行顺序编号，分别称为单元码和结点码。它们都是从1号开始逐个地编到最后一个单元或结点。为了区别，单元码用①、②、③…表示，结点码用1、2、3…表示，如图2-1所示。

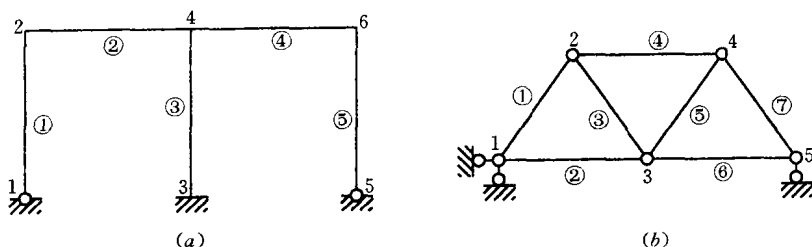


图 2-1

单元码和结点码的编号顺序原则上是任意的，对同一个结构可以有不同的编号方法。但要指出的是，结点码的编号顺序对电算时占用内存的多少及所花费的机时等会有影响（详见本章第六节），应使相邻结点编号的差值尽可能小。