



高等学校土木建筑工程类系列教材

钢筋混凝土结构分析程序设计(第二版)

■ 主编 侯建国 安旭文 杨冬梅



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

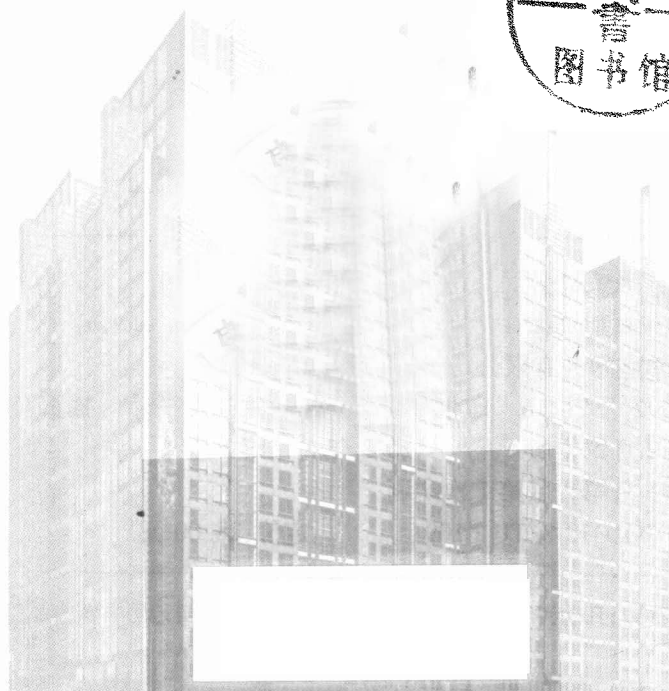
7U373.04
18-2



高等学校土木建筑工程类系列教材

钢筋混凝土结构分析程序设计(第二版)

■ 主编 侯建国 安旭文 杨冬梅



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

钢筋混凝土结构分析程序设计/侯建国,安旭文,杨冬梅主编. —2版.
—武汉:武汉大学出版社,2013.1
高等学校土木建筑工程类系列教材
ISBN 978-7-307-10310-8

I. 钢… II. ①侯… ②安… ③杨… III. 钢筋混凝土结构—结构分析—程序设计 IV. TU375.04

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 270420 号

责任编辑:李汉保 责任校对:黄添生 版式设计:支 笛

出版发行:武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件:cbs22@whu.edu.cn 网址:www.wdp.whu.edu.cn)

印刷:荆州市鸿盛印务有限公司

开本:787×1092 1/16 印张:18.25 字数:437千字 插页:1

版次:2004年9月第1版 2013年1月第2版

2013年1月第2版第1次印刷

ISBN 978-7-307-10310-8/TU·109 定价:28.00元

版权所有,不得翻印;凡购买我社的图书,如有质量问题,请与当地图书销售部门联系调换。

内 容 简 介

本书系统地介绍了利用有限单元法进行框架结构的内力分析,并按我国现行结构设计标准《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2001)(2006年版)、《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)和《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)中的相关规定,介绍了荷载组合和配筋计算的程序设计方法与编制技巧。书中结合作者编制的框架结构分析程序 FSAP 程序(Frame Structures Analysis Program),对 FSAP 程序的主要功能模块进行了详细讲解,并给出了相应的源程序。

本书可以作为高等学校土木建筑工程类专业本科生和硕士研究生有限元程序设计选修课的教材,亦可以供从事结构设计的工程技术人员以及高等学校相关教师参考。

高等学校土木建筑工程类系列教材

编 委 会

- | | | |
|-------|-----------|------------------------------|
| 主 任 | 何亚伯 | 武汉大学土木建筑工程学院, 教授、博士生导师, 副院长 |
| 副 主 任 | 吴贤国 | 华中科技大学土木工程与力学学院, 教授、博士生导师 |
| | 吴 瑾 | 南京航空航天大学土木系, 教授, 副系主任 |
| | 夏广政 | 湖北工业大学土木建筑工程学院, 教授 |
| | 陆小华 | 汕头大学工学院, 教授, 处长 |
| 编 委 | (按姓氏笔画为序) | |
| | 王海霞 | 南通大学建筑工程学院, 讲师 |
| | 刘红梅 | 南通大学建筑工程学院, 副教授, 副院长 |
| | 宋军伟 | 江西蓝天学院土木建筑工程系, 副教授, 系主任 |
| | 杜国锋 | 长江大学城市建设学院, 副教授, 副院长 |
| | 肖胜文 | 江西理工大学建筑工程系, 副教授 |
| | 徐思东 | 江西理工大学建筑工程系, 讲师 |
| | 欧阳小琴 | 江西农业大学工学院土木系, 讲师, 系主任 |
| | 张海涛 | 江汉大学建筑工程学院, 讲师 |
| | 张国栋 | 三峡大学土木建筑工程学院, 副教授 |
| | 陈友华 | 孝感学院教务处, 讲师 |
| | 姚金星 | 长江大学城市建设学院, 副教授 |
| | 梅国雄 | 南昌航空大学土木建筑学院, 教授, 院长 |
| | 程赫明 | 昆明理工大学土木建筑工程学院, 教授, 副校长 |
| | 曾芳金 | 江西理工大学建筑与测绘学院土木工程教研室, 教授, 主任 |
| 执行编委 | 李汉保 | 武汉大学出版社, 副编审 |
| | 谢文涛 | 武汉大学出版社, 编辑 |

序

建筑业是国民经济的支柱产业，就业容量大，产业关联度高，全社会 50% 以上固定资产投资要通过建筑业才能形成新的生产能力或使用价值，建筑业增加值占国内生产总值较高比率。土木建筑工程专业人才的培养质量直接影响建筑业的可持续发展，乃至影响国民经济的发展。高等学校是培养高新科学技术人才的摇篮，同时也是培养土木建筑工程专业高级人才的重要基地，土木建筑工程类教材建设始终应是一项不容忽视的重要工作。

为了提高高等学校土木建筑工程类课程教材建设水平，由武汉大学土木建筑工程学院与武汉大学出版社联合倡议、策划，组建高等学校土木建筑工程类课程系列教材编委会，在一定范围内，联合多所高校合作编写土木建筑工程类课程系列教材，为高等学校从事土木建筑工程类教学和科研的教师，特别是长期从事土木建筑工程类教学且具有丰富教学经验的广大教师搭建一个交流和编写土木建筑工程类教材的平台。通过该平台，联合编写教材，交流教学经验，确保教材的编写质量，同时提高教材的编写与出版速度，有利于教材的不断更新，极力打造精品教材。

本着上述指导思想，我们组织编撰出版了这套高等学校土木建筑工程类课程系列教材，旨在提高高等学校土木建筑工程类课程的教育质量和教材建设水平。

参加高等学校土木建筑工程类系列教材编委会的高校有：武汉大学、华中科技大学、南京航空航天大学、南昌航空大学、湖北工业大学、汕头大学、南通大学、江汉大学、三峡大学、孝感学院、长江大学、昆明理工大学、江西理工大学、江西农业大学、江西蓝天学院 15 所院校。

高等学校土木建筑工程类系列教材涵盖土木工程专业的力学、建筑、结构、施工组织与管理等教学领域。本系列教材的定位，编委会全体成员在充分讨论、商榷的基础上，一致认为在遵循高等学校土木建筑工程类人才培养规律，满足土木建筑工程类人才培养方案的前提下，突出以实用为主，切实达到培养和提高学生的实际工作能力的目标。本教材编委会明确了近 30 门专业主干课程作为今后一个时期的编撰、出版工作计划。我们深切期望这套系列教材能对我国土木建筑事业的发展 and 人才培养有所贡献。

武汉大学出版社是中共中央宣传部与国家新闻出版署联合授予的全国优秀出版社之一，在国内有较高的知名度和社会影响力。武汉大学出版社愿尽其所能为国内高校的教学与科研服务。我们愿与各位朋友真诚合作，力争使该系列教材打造成为国内同类教材中的精品教材，为高等教育的发展贡献力量！

前 言

有限单元法作为一种实用的数值分析方法随着电子计算机技术的普及而得到了工程界的广泛重视,有限单元法已成为结构分析的强有力工具。

有限单元法在 20 世纪 50 年代起源于航空工程中飞机结构的矩阵分析。该方法将整个结构看成有限个力学小单元互相连接而组成的集合体;分析每个力学小单元的力学性能,按照一定的方式装配在一起,就反映了整体结构的力学特性。

这种思路,在 1960 年被推广用来求解弹性力学问题,并开始采用“有限单元法”(Finite Element Method)术语。其基本步骤是,首先将弹性连续体进行离散化,分割成有限的小块体(即单元),让这些小块体只在指定点(即节点)处互相连接,用这种离散结构代替原来连续的结构;其次,对每个单元选择一个简单函数来近似表示其位移(或内力)分布规律,并按弹、塑性理论中的变分原理建立单元节点力与位移之间的关系;最后,把所有单元集合起来,得到一组代数方程组,求解代数方程组,得出各节点位移,进而求出各单元的应力或内力,从而得到离散结构的解。只要单元分得较多,就可能用这个解作为连续体的解答。

为了使解答尽可能接近精确解,通常划分单元较多,企图用手算完成这一任务是不可能的。电子计算机技术的进步,使这种方法得到广泛应用。电子计算机的特点是容量大、速度快、稳定性好,因而一般工程问题都能解决。这里,关键是根据有限单元法设计的计算机程序的编制。

目前,国内外已编制了许多大型通用有限单元法程序。其中著名的有 E. L. Wilson 教授等编制的 SAP 系列, K. J. Bathe 教授等编制的 ADINA 系列,美国国家航空航天管理局(NASA)发展的 NASTRAN,以及近年来在国内广为流行的美国大型有限元软件 ANSYS、ABAQUS 等;国内大连理工大学钟万勰教授等研制的 JIGFEX 和 DDJ 程序系统,国家航空工业部研制的 XAJEF 系列等。这些大型通用有限单元法程序,对于静力、动力、材料非线性、几何非线性、稳定性等问题都可以很方便地计算出来,可以解决许多复杂的工程问题。但大型有限单元法程序由于其通用性,无所不包,因而也带来了一些问题。例如,数据填写复杂,应用上不够方便。而且有些专门问题,新发展的问題,这类程序无法包括。因此,对于结构分析工作者,仅仅会使用现有程序是不够的,还必须具备根据不同的需要编制相应程序的能力。再者,有限单元法发展到现在,已积累了十分丰富的资料,计算机程序也编制了许多,在实际工作中,往往可以借鉴,这也需要学习编制程序的技巧与方法,才有可能读懂其他程序,然后再移植、改造或增加新的功能。

从工程应用的角度来看,为了推进计算机辅助设计的发展,要求结构分析进一步与工程结构数据库、网格自动剖分、图形处理、人工智能、专家系统、计算机绘图等相结合,而这些问题又更多地依赖于计算机程序设计的能力。在杆系结构方面,目前虽已有许多结

构计算软件可供使用,但这些软件有的还停留在内力分析阶段,而按照我国现行结构设计标准的相关规定,对钢筋混凝土结构构件在各种荷载作用下的内力进行荷载组合,然后进行配筋计算的软件还为数不多,从结构设计的观点来看,仅求出结构构件的内力是远远不够的。目前国内应用较多的杆系结构设计软件有 PKPM 系列、TBSA、广厦 CAD、GT Strudu、PSD(Plant Steel Design)等,但这些软件在应用中仍有一些不尽如人意的地方。例如,PKPM 用于火力发电厂主厂房的结构设计时有关风荷载的计算、荷载分项系数的取值和荷载组合及抗震设计时可变荷载的组合值系数的取值等方面就存在许多问题;GT Strudu 及 PSD 等从美国引进的软件,由于结构设计标准的不同,难以直接用于国内的工程结构设计。因此,掌握结构分析程序的编制方法,根据不同的需要编制一些专用的、单项的小型结构分析程序,尤其是根据我国现行结构设计标准中的相关规定编制相应的荷载组合和承载力计算程序,是从事工程结构设计的人员应具备的一个基本能力。

本书是在侯建国主编的《钢筋混凝土结构分析程序设计》(武汉大学出版社 2004 年第一版)的基础上修订而成,主要介绍利用有限单元法进行框架结构的内力分析,并按我国现行结构设计标准中的相关规定进行荷载组合和配筋计算的程序设计方法与编制技巧。全书由 6 章和 1 个附录所组成。

第 1 章为绪论,简要介绍结构分析程序的发展与应用,结构分析程序设计的一般方法与基本要求和框架结构分析程序的主要内容。

第 2 章主要介绍平面杆系结构有限单元法(亦称矩阵位移法)的基本原理,并列出有关基本公式。其中重点以平面框架结构为例介绍了有限单元法解题的全过程,包括离散化、单元分析、整体分析和解方程求位移及杆端内力计算等内容。

第 3 章围绕作者所编写的平面杆系结构分析程序 FSAP(Frame Structures Analysis Program)进行逐段讲解,介绍平面框架结构内力分析程序的编制方法与技巧(包括静力分析和动力分析)。重点介绍了原始数据输入、约束条件的引入、单元刚度矩阵的形成、结构刚度矩阵的组集、整体荷载列向量的形成、解方程、杆端力计算和抗震设计中的自振周期的计算、水平地震作用计算及地震作用效应(内力、位移)计算等关键性程序模块,并给出了相应的细框图和源程序,便于读者自学和参考。

第 4 章和第 5 章仍以作者编制的 FSAP 程序为对象进行逐段讲解,重点介绍按照我国现行结构设计标准《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2001)(2006 年版)、《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)和《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)的有关规定,进行荷载组合和配筋计算的程序设计。第 3 章还介绍了按我国现行《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)和《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)关于钢筋混凝土框架结构抗震设计中的“强柱弱梁”、“强剪弱弯”、“强节点”的有关规定,对地震组合内力设计值进行调整的程序设计方法和编制技巧。

第 6 章给出了 FSAP 程序的使用说明,并给出了大量的工程实例,供读者上机实习之用,或作为读者自编某些程序的考题之用。

附录中给出了 FSAP 程序中有关的其他子程序。

为了便于读者自学,书中介绍的程序力求简单明了,因此,这些程序不是一个非常精练的通用标准程序,必然有许多可修改之处。读者在读懂 FSAP 程序后,可以很方便地将这些程序改编为空间问题有限单元法程序,也可以扩充相应的前处理程序(自动形成计算

简图及图像显示)和后处理程序(形成结构配筋图等)。

本书编写中努力贯彻“少而精”的原则,力图做到深入浅出,循序渐进,使读者学习完本书后能独立修改、编制各自需要的应用程序,达到学以致用目的。在编写过程中,对于读者较为熟悉的有限单元法原理只作一般性介绍,而把重点放在计算程序(尤其是荷载组合和配筋计算程序)的编制原理和具体方法上。

本书主要作为高等院校土木建筑工程类专业高年级学生和硕士研究生结构分析程序设计选修课的教材,亦可供从事工程结构设计的技术人员和土木建筑工程类院校的师生学习与参考。

本书第1章~第4章由侯建国编写;第5章和第6章及附录由安旭文编写;按原规范进行结构设计的FSAP程序由侯建国编制;安旭文、李扬对FSAP程序按新规范的规定进行了全面修订,并增加了许多新的功能;整个程序的上机调试由安旭文、李扬负责完成。全书由侯建国修改定稿。

由于作者水平所限,尽管我们尽了很大努力,但书稿中仍难免有缺点和疏漏之处,欢迎广大读者批评斧正。

侯建国

2011年12月于珞珈山

目 录

第 1 章 绪 论	1
§ 1.1 结构分析程序的发展与应用	1
§ 1.2 结构分析程序设计的一般方法和基本要求	2
§ 1.3 框架结构分析程序的主要内容	4
第 2 章 框架结构内力分析程序的编制原理	6
§ 2.1 概 述	6
§ 2.2 平面杆系结构有限单元法的基本原理及求解步骤	7
第 3 章 框架结构内力分析程序设计	23
§ 3.1 框架结构分析程序 FSAP 简介	23
§ 3.2 输入数据程序设计	32
§ 3.3 节点位移未知量编号和单元定位向量的形成	46
§ 3.4 形成单刚程序设计	52
§ 3.5 结构刚度矩阵的形成	62
§ 3.6 组装整体荷载列向量	72
§ 3.7 解方程程序设计	84
§ 3.8 杆端力和指定截面内力计算	90
§ 3.9 动力分析程序设计	99
第 4 章 荷载组合的程序设计	118
§ 4.1 我国现行结构设计规范关于荷载组合的有关设计规定	118
§ 4.2 荷载组合程序的总体设计	127
§ 4.3 吊车荷载组合	131
§ 4.4 风荷载组合	149
§ 4.5 一般活荷载的组合	151
§ 4.6 静力组合的最终结果	155
§ 4.7 地震组合及其内力组合值的调整	161
§ 4.8 支座弯矩削减	170

第5章 配筋计算程序设计	173
§ 5.1 配筋计算程序的总体设计	173
§ 5.2 配筋计算有关参数的确定	175
§ 5.3 梁、柱纵筋计算程序设计	182
§ 5.4 梁的正截面受弯承载力计算	188
§ 5.5 偏心受压构件的正截面受压承载力计算	192
§ 5.6 偏心受拉构件的正截面受拉承载力计算	208
§ 5.7 梁、柱配箍计算程序设计	210
§ 5.8 斜截面受剪承载力计算的截面限制条件	214
§ 5.9 受弯构件的斜截面受剪承载力计算	217
§ 5.10 偏心受力构件的斜截面受剪承载力计算	219
§ 5.11 框架梁柱节点核心区抗震受剪承载力校核	223
第6章 程序使用说明及工程实例	225
§ 6.1 原始数据的输入说明	225
§ 6.2 计算结果的输出说明	230
§ 6.3 工程实例	238
附录 FSAP 的其他子程序	276
参考文献	279

第1章 绪 论

§ 1.1 结构分析程序的发展与应用

随着电子计算机技术的飞速进步和广泛应用,有限单元法和相应的结构分析程序已成为工程结构数值分析的有力工具。特别是在固体力学和结构分析领域内,有限单元法和相应的结构分析程序已取得了巨大的进展,利用上述方法与程序已成功地解决了一大批具有重大意义的课题,许多通用程序和专用程序也已投入了实际应用。目前,有限单元法仍是一个在快速发展的学科领域,有限单元法的理论、特别是结构分析程序的研发与应用方面的文献,经常大量地出现在各种专著、教材和刊物中^{[1]~[15]}。

有限单元法是以电子计算机技术为手段的“电算”方法,有限单元法以大型工程结构问题为对象,未知数的个数可以成千上万,因而为解决复杂的力学问题提供了一个有效的工具。掌握了这个工具,为结构工程师的工作提供了极大的方便。过去的一些计算难题现在已成为常规问题,过去不得已而采用的一些过于简化的计算模型已经为更加符合实际的复杂模型所代替。计算工作的高速度与高精度,使某些试验手段开始成为过时的东西;优化设计方法的发展使结构设计从单纯的验算过程变为真正的设计过程;建筑结构 CAD (Computer Aided Design) 的出现,使广大设计人员从繁琐的手工计算和绘图工作中解脱出来,这确实是设计工作中的一个飞跃。

从工程应用角度来看,在杆系结构方面,目前虽已有许多程序可供使用,但这些程序有的还停留在内力分析阶段,而按照我国现行结构设计标准的相关规定,对钢筋混凝土结构构件在各种荷载作用下的内力进行荷载组合,然后进行配筋计算的程序还为数不多。杆系结构 CAD 方面的软件,目前国内应用较多的有 PKPM 系列、TBSA、广厦 CAD、GT Strudu、PSD (Plant Steel Design) 等,但这些软件在应用中仍有一些不尽如人意的地方。例如,PKPM 用于火力发电厂主厂房的结构设计就存在许多问题;GT Strudu 及 PSD 等从美国引进的软件,由于结构设计标准的不同,难以直接用于国内的工程结构设计。在非杆系结构方面,目前国内外虽然已编制了许多大型通用有限单元法程序,如 SAP、Super SAP、ADINA、ANSYS、ABAQUS 等,但这些大型通用程序由于其通用性,无所不包,因而也带来一些问题。例如,数据准备十分复杂,有些专门问题、新发展的课题,这些程序无法包括。所以,掌握结构分析程序的编制方法,根据不同的需要编制一些专用的、单项的小型结构分析程序是工程计算所必需的。而且,为了借鉴已有的许多程序,也需要学习程序设计的方法和技巧,这样才有可能读懂别人的程序,然后再移植、改造和增加新的功能。同时,为了推进计算机辅助设计的发展,要求结构分析进一步与工程结构数据库、网格自动剖分、图形处理、人工智能、专家系统、计算机绘图等相结合,而这些问题又更多地依赖

于计算机程序设计的能力。

上述情况要求正在从事和即将参加工程建设的技术人员,特别是担负着开发和研究任务的科学技术工作者,能够较好地掌握有限单元法的基本原理和程序设计方法,以便一方面能够有效地利用现有的成果和计算程序,另一方面能够具有改进现有计算方法和计算程序的能力,并为发展新的方法、编制新的结构分析程序,掌握必需的基础理论。

本书正是为了适应上述要求,为工科院校土木建筑工程类专业高年级学生及硕士研究生学习杆系结构有限单元法程序设计提供一部教材,同时也可以作为土木建筑工程类专业的工程技术人员和高等学校教师的参考读物。

本书除了介绍杆系结构有限单元法程序的设计方法和编制技巧外,还对结构设计中的荷载组合和配筋计算等内容的程序设计方法与编制技巧也作了详细介绍,虽然这部分内容已不属于有限单元法的内容,但进行结构设计则是必不可少的,因而这部分内容也是本书的重点和特点之一。

§ 1.2 结构分析程序设计的一般方法和基本要求

1.2.1 结构分析程序设计的步骤和方法

编制一个结构分析程序,一般应遵循以下的一些方法和步骤。

(1)提出问题,确定计算模型。根据工程需要将实际结构归结为某种结构计算问题,如杆系结构计算问题、弹性力学平面问题及空间问题等。

(2)提出相关数学公式和力学公式。选择适当的计算方法,把相关数学公式、力学公式化成适于计算机解题的方法。

(3)确定变量符号及其意义。变量名宜尽量采用数学、力学中或实际问题中相同或相近的名字,如 α 用ALF表示, θ 用CT表示,周期用T表示,等等。

(4)绘制总框图。按照解决问题的流程,把想要编写的程序分成若干个大的功能模块,原则性地指出计算过程中的几个大的步骤,并将各功能模块用框图形式连接起来即构成总框图,以便有条不紊地编写程序。

对于框架结构分析程序,其总框图如图1-1所示。总框图中一些大的程序模块还可以进一步细分为若干个子块,每一子块完成某一特定功能(参见图1-1)。

(5)用算法语言编写程序。常用语言有BASIC、FORTRAN等。

(6)上机调试。首先将所编制的程序输入计算机,进而检查所编制的程序是否符合相关算法语言的语法规则,然后试算。这时往往用一个小题目,最好每一步都有结果核对。若试算结果正确,再用中型、大型考题考核,各种类型问题的考题都通过了,才能投入使用。

(7)程序维护。一个程序投入使用后,还需要做许多维护工作。例如,继续考题,因编制一个程序,常常不可能把所有问题都弄清楚,难免有考虑不周之处,程序越大,这个问题就越突出。进而扩充功能、改进方法等。

1.2.2 程序设计的基本要求

编制一个结构分析程序,特别是对于较大型的程序系统,一般应达到以下几点基本

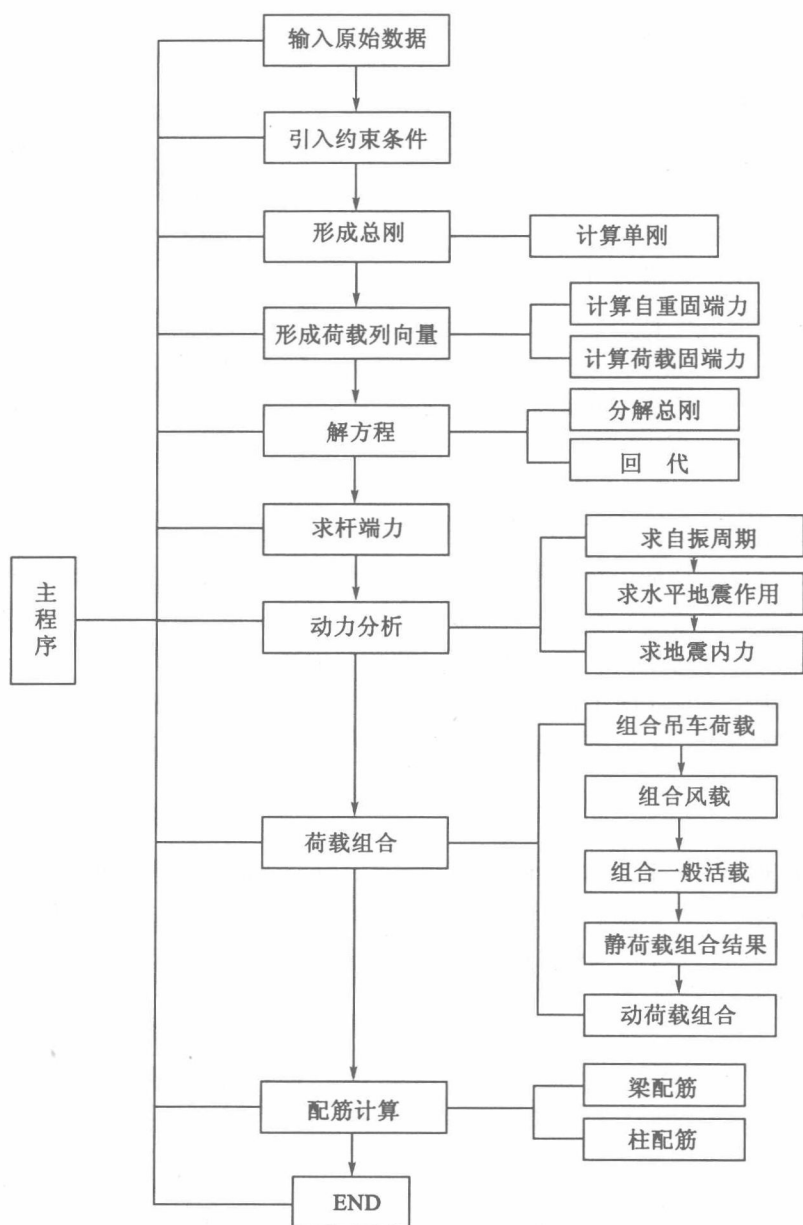


图 1-1 框架结构分析程序总框图

要求。

(1)应保证程序的正确性,即程序应能如实地反映计算模型的要求。通常采用各种各样的考题来检验程序的正确性。

(2)应使程序具有高效率,以加快运算速度,节约机时。作者在近几年编制和调试程序的过程中,尝试了几种加快运算速度的技巧,现列出如下,供读者编程时参考:

①能用加法解决的不用乘法，能用乘法解决的不用除法，能用乘法解决的不用乘方。

②能放在循环体外计算的应尽量提到循环体外,从而消除重复运算,必要时设工作单元存放中间结果。

③能用一维数组的不用二维数组。因为一维数组的存取要比二维数组的存取快得多。

④根据 FORTRAN 语言数组元素按列存放的特点,最左边的下标变化最快,因此,有关数组的运算,最内层的循环均设计成从第一个下标(即最左边的下标)开始,最外层的循环为最末一个下标。这样就大大节省了数组元素的存取时间。

⑤各程序块之间的数据传递宜采用开辟有名公用区,即 COMMON 语句的方式。这是因为不同程序块之间利用公用区交换数据的速度要比虚实结合的方式快得多。

对于在微机上运行的程序,为了充分利用内存,还可以采用在主程序中开辟两个很大的公用数组(其中一个整型数组、一个实型数组),而将其他子程序中的数组则设计成动态数组,然后以数组元素作为实在变元,将主程序中的两个公用常界数组分段提供给各动态数组作为实元。

(3)应使程序便于调试和维护。国外曾对一些大型程序的研制和使用周期所花的费用进行了调查,结果表明大约有 75% 的费用花在调试与维护上。从相关经验知道,大多数程序在交付使用后,总是在不断地进行修改与完善。因此,在程序设计中应特别关注程序便于调试和维护的问题。这就要求在编制程序时,最好采用模块化结构,体现结构化程序设计思想。各模块之间相互独立,每一个子程序只完成某一特定的功能,总体程序作为一个主程序和若干个子程序的集合体,子程序执行该程序的全部功能,主程序只是用来控制解题规模和求解进程。采用模块化程序结构,程序的来龙去脉清楚,段落层次分明,可读性强,既便于调试,又便于补充、修改或增加新的功能,从而避免“牵一发而动全身”的弊端。

程序的调试一般采用“自底向顶”的策略^[14],即先调试各子块,重点放在一些影响大而复杂的关键模块上,如数据前处理、计算单刚、形成总刚、处理荷载及约束、解方程、特征值计算等,先对它们作相对独立的调试,然后再联调,当调试到顶(即调试到主程序)时,整个调试也就完成了。

§ 1.3 框架结构分析程序的主要内容

任何一个用有限单元法编制的结构分析程序,一般都包括三个基本内容,如图 1-2 所示。

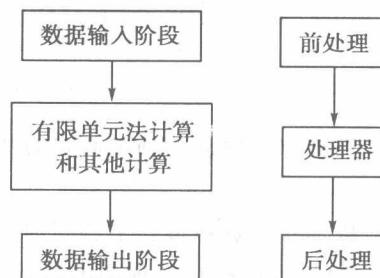


图 1-2 结构分析程序的基本内容

1.3.1 数据输入阶段——前处理

数据输入阶段,通常也称为前处理,主要是输入计算课题所必需的原始数据和生成数据,以便形成有限单元法计算模型,如框架结构分析中的计算简图、弹性力学有限单元法中的计算网格图等,为有限元矩阵的计算及其他计算作好准备。对于有限单元法计算程序,输入数据可以归结为:

(1)控制参数。控制参数包括节点总数、单元总数、问题类型、材料组数、荷载组数等。控制参数用来控制解题范围、数组规模、循环语句的终止点和求解进程等。一般说来,程序的通用性越大,这类数据就越多。

(2)几何信息。确定结构的几何形状、单元的几何形状和结构的边界支承条件的数据统称为几何信息。几何信息包括单元信息、节点坐标、边界约束信息等。

(3)材料信息。输入单元的几何特性和物理特性,如截面尺寸、弹性模量或混凝土强度等级等数据。

(4)荷载信息。输入每一个荷载作用的单元号或节点号、方向号、荷载值等。

(5)其他信息。如抗震计算时需要输入结构抗震等级、特征周期、重力荷载代表值的组合值系数等;配筋计算时需要输入纵向受力钢筋和箍筋的强度设计值等;有时梁的支座弯矩需要考虑削减,因而需要输入梁的支座弯矩削减信息等。

1.3.2 有限单元法计算和其他计算

这一阶段主要是计算单元刚度矩阵(简称单刚)、单元荷载列阵,再组集成结构整体刚度矩阵(亦称总刚度矩阵,简称总刚)、整体荷载列阵,然后进行求解。对于动力问题,还需计算质量矩阵、特征值及特征向量、自振周期等;还有荷载组合及配筋计算等。

1.3.3 数据输出阶段

数据输出主要包括两部分,一是输出原始数据,以便存档和核对;二是输出最终的计算结果,包括位移、单元内力或应力等。对于动力问题一般输出特征值、特征向量和自振周期等;配筋计算时输出最不利组合内力和相应的钢筋截面面积及配筋率等,抗震验算还要输出地震组合的最不利内力及配筋结果、轴压比等。

有时为了检查计算过程中的问题,常需设计一些中间结果的输出语句,例如,节点位移未知量编号数组、单刚、总刚等。另外,当解方程溢出时,常输出结构刚度矩阵的主对角元等。这种类型的输出,在调试程序时会设计得多一些,一旦程序被证实是正确的,就可以减少,甚至完全取消。

目前,后处理的发展很快,主要增加了图形输出,如计算简图、网格图、内力图、应力图、振型图和结构施工图等。

第2章 框架结构内力分析程序的编制原理

§ 2.1 概 述

有限单元法(Finit Element Method)是20世纪50年代中期发展起来的。有限单元法是电子计算机时代的产物。电子计算机技术为这一方法提供了特殊的方便,而电子计算机技术的进步,又使这一方法得到了广泛的应用。利用有限单元法及相应的电子计算机程序进行结构的设计计算,引起了结构分析领域的深刻变化,这一方法比原有的结构分析方法具有速度快,精度高,便于解决复杂的、大型的难题的优点。进入20世纪80年代以后,由于微机在我国的普及,使得这一方法应用得更加广泛。目前几乎所有的工程设计单位和每一个工程师都熟悉并乐于采用这一方法来解决工程结构的分析计算问题。

本章结合作者编制的框架结构分析程序FSAP(Frame Strcures Analysis Program),简要介绍平面杆系结构有限单元法的基本原理和求解步骤。

用有限单元法对平面杆系结构进行分析时,通常采用位移法,即把各节点的位移作为基本未知量来求解。平面框架中的每一节点都有三个未知位移(水平线位移 u ,竖向线位移 v ,转角位移 θ)。有的铰节点则有四个或四个以上的位移(2个线位移 u 和 v ,各杆端的转角位移 $\theta_1, \theta_2, \dots$)。在一般的结构力学位移法中,常常不考虑杆件的轴向变形,以便减少未知位移的数目,达到简化计算的目的。在有限单元法中,为了提高计算的精度,而又不增加太多的计算时间,特别是为了增加程序的通用性,往往是把轴向变形也考虑进去的。

用有限单元法求解平面框架结构时,首先把整体结构离散成有限个单元(杆件),这些单元以有限个节点相连接,承受着等效节点荷载(直接作用于节点的荷载和由单元荷载移置到节点的荷载),再根据节点的变形协调条件,建立节点的静力平衡方程,通过求解线性方程组得到所有节点的位移,最后再由节点位移求得各杆端的内力,进而求出杆中各截面的内力。这就是有限单元法分析平面框架的基本思路,其具体内容可以归结为:

- (1) 结构离散化,对单元和节点进行编号,即确定有限单元法计算简图;
- (2) 确定节点位移未知量编号 $\{\Delta\}$,同时引入约束条件;
- (3) 计算单元刚度矩阵 $[k]$;
- (4) 组装整体刚度矩阵 $[K]$;
- (5) 组装整体荷载列向量 $\{F\}$;
- (6) 解方程求位移;
- (7) 计算杆端力;

- (8) 动力分析,包括特征值和特征向量及自振周期计算、水平地震作用计算、地震内