

大跨桥梁建设技术指南丛书

DAKUA QIAOLIANG JIANSHE JISHU ZHINAN CONGSHU



桥梁结构分析 及程序系统

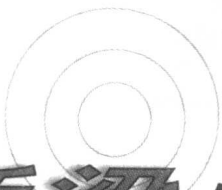
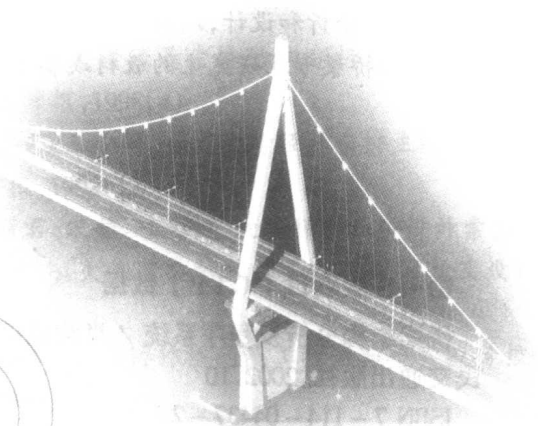
肖汝诚 编著



人民交通出版社

China Communications Press

大跨桥梁建设技术指南丛书
DAKUA QIAOLIANG JIANSHE JISHU ZHINAN CONGSHU



桥梁结构分析 及程序系统

肖汝诚 编著



人民交通出版社
China Communications Press

内 容 提 要

本书介绍了桥梁结构分析的基本理论、编程原理、桥梁特殊问题的分析理论和解决方法,以及现代软件开发技术和前后处理技术等内容。本书对应用软件进行桥梁结构分析和设计,以及从事软件二次开发的桥梁工程师将会有所裨益,也可作为桥梁专业研究生的教材或参考读物。

图书在版编目(CIP)数据

桥梁结构分析及程序系统 / 肖汝诚编著. —北京:人民交通出版社, 2002.10

ISBN 7-114-04437-2

I. 桥... II. 肖... III. 计算机应用—桥梁结构—结构分析 IV. U443-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 066750 号

桥梁结构分析及程序系统

肖汝诚 编著

正文设计:彭小秋 责任校对:刘高彤 责任印制:杨柏力

人民交通出版社出版发行

(100013 北京和平里东街 10 号 010 64216602)

各地新华书店经销

北京凯通印刷厂印刷

开本:787×1092 1/16 印张:15.75 字数:263 千

2002 年 11 月 第 1 版

2002 年 11 月 第 1 版 第 1 次印刷

印数:0001~3000 册 定价:30.00 元

ISBN 7-114-04437-2

U·03275



第二次世界大战以后,电子计算机和有限元法的应用逐渐传入土木工程界,使桥梁结构分析进入了基于计算机的新时代。

20 世纪 60 年代,现代有限位移理论的建立,使计算机前时期中十分困难的非线性分析变得便捷,从而为大跨度柔性缆索承重桥梁设计提供了有力的分析手段。

1970 年,由美国加州大学伯克利分校率先推出的结构分析通用程序 SAP 和随后 ANSYS 等公司的著名软件在全世界已有广泛的用户,发挥了主流作用,但在应用于桥梁结构分析中仍有一定的局限性。

自 20 世纪 80 年代初开始,同济大学桥梁工程系就致力于开发面向桥梁结构分析的软件,以适应国内大规模桥梁建设的形势。本书作者肖汝诚教授在 20 世纪 80 年代主持开发了桥梁分析通用程序系统 BAP,得到了工程界的好评并拥有一定的用户。20 世纪 90 年代初他在我指导下攻读博士学位的过程中又着重开发了非线性分析功能和施工控制功能。90 年代后期,作为国家自然科学基金重大项目“大型复杂结构的关键科学问题和设计理论”中的 4.1 专题,“特大跨度桥梁的体系和特殊结构形式及其空间非线性力学问题”的研究目标,肖汝诚教授完成了 BAP 程序的 Windows 版本,增加了第一类和第二类稳定分析的功能,使 BAP 系统全面地包含了大跨度桥梁结构分析中需要解决的各种问题,为中国正在建设中的许多大桥提供了服务。

本书是肖汝诚教授近 20 年工作的小结。书中介绍了桥梁结构分析的基本理论、编程原理、桥梁特殊问题的分析理论和解决方法以及现代软件开发技术和前后处理技术等内容。我相信本书对使用软件进行桥梁结构分析和设计,以及从事软件二次开发的桥梁工程师将会有所裨益,本书也可作为桥梁专业研究生的教材或参考读物。

项海帆

2002 年 7 月

2002.1.2

前 言

在桥梁的设计、施工和科研工作中,采用计算机进行结构分析已经成为当今的主流。国内外结构分析通用程序和桥梁分析专用程序的不断推出,为桥梁工作者提供了有效的分析工具。

但是,对于一个结构工程师,在应用这些软件进行分析时,如果对程序内部的分析理论、编程原理缺乏了解,或者缺少特殊结构建模技术与分析方法方面的知识,那么在分析多变的桥梁结构时,在进行特殊结构分析需要增加程序分析功能时,就会显得无能为力,对判断分析结果的正误也会带来困难。目前尚未见到专门论述桥梁结构分析及程序系统方面的书籍,本书抛砖引玉,旨在期望读者从中获取一点有关这方面的知识和帮助。这也正是编写本书的初衷。

全书共十章,以作者主持研发的“桥梁结构线性、非线性分析综合程序系统”(BAP)为主线,遵循由浅入深、结合专题的原则安排次序。第一章介绍桥梁结构分析与程序系统的基本知识;第二、三、四章介绍桥梁结构分析的基本原理和计算程序编制原理;第五、六、七、八章介绍桥梁结构中特殊问题的分析理论和方法,包括桥梁结构的施工分析、预应力效应分析、徐变分析、活载效应分析等;第九、十章介绍程序中桥梁结构的数值描述与前后处理技术。

在本书撰写过程中,除我负责全书的统稿、定稿及部分章节的编写外,孙斌老师负责了第五~八章的主要编写工作,梁鹏博士负责了第九章的主要编写工作。贾丽君老师,夏旻、郭瑞、刘煜等研究生对本书的完成也做了大量工作,在此对他们的辛勤劳动表示感谢。

本书编写过程中,得到了我的导师项海帆院士的鼓励与支持,他在百忙中对全书进行了审阅,提出了宝贵意见,借此表示衷心的感谢。

计算机技术还在日新月异地发展,桥梁工程技术也在不断进步,这将推动桥梁结构分析与程序系统的发展。由于作者水平所限,书中不当之处在所难免,敬请读者批评指正。

肖汝诚

2002年7月

目 录

第一章 概述	1
1.1 桥梁结构分析	1
1.2 程序系统	4
1.3 本书的目的和内容	8
第二章 有限元分析基本理论	10
2.1 有限元分析的基本概念和计算步骤	10
2.1.1 单元分析	10
2.1.2 整体分析	11
2.1.3 用直接刚度法形成结构刚度矩阵	12
2.1.4 支承条件的引入	14
2.1.5 非节点荷载的处理	16
2.1.6 有限元分析的基本步骤	17
2.2 基于最小势能原理的有限元法	18
2.2.1 基本理论	18
2.2.2 二力杆单元的刚度方程	19
2.2.3 自由扭转杆单元的刚度方程	20
2.2.4 平面梁单元的刚度方程	21
2.3 杆系结构的非线性分析理论	22
2.3.1 概述	22
2.3.2 几何非线性分析	24
2.3.3 材料非线性分析	26
2.3.4 非线性方程组的求解	29
2.4 稳定计算理论	33
2.4.1 概述	33

2.4.2 第一类稳定有限元分析	35
2.4.3 第二类稳定有限元分析	36
2.5 小结	36
第三章 桥梁结构的数值分析方法	37
3.1 概述	37
3.2 结构简化及其数值模拟	38
3.2.1 结构建模与离散	38
3.2.2 材料和截面特性描述	40
3.2.3 边界条件模拟	41
3.2.4 荷载模拟	41
3.3 梁式桥的结构分析	42
3.3.1 恒载内力计算	42
3.3.2 附加荷载内力计算	44
3.3.3 活载内力计算	45
3.3.4 荷载组合	45
3.3.5 预应力束的布置与计算	46
3.3.6 结构验算	48
3.3.7 东方红大桥算例	49
3.4 拱桥的结构分析	55
3.4.1 设计计算流程	55
3.4.2 合理拱轴线的确定	55
3.4.3 恒载内力确定	56
3.4.4 附加荷载内力计算	57
3.4.5 活载内力计算	57
3.4.6 荷载组合	57
3.4.7 卢浦大桥算例	58
3.5 斜拉桥的结构分析	60
3.5.1 设计计算流程	60
3.5.2 合理成桥状态确定	62
3.5.3 恒载内力	63
3.5.4 活载内力	64
3.5.5 附加内力	64
3.5.6 内力组合	64

3.5.7 变形计算	64
3.5.8 苏通大桥斜拉桥方案算例	64
3.6 悬索桥的结构分析	70
3.6.1 悬索桥的受力特征与计算流程	70
3.6.2 确定主要构件基本尺寸的计算	71
3.6.3 悬索桥恒载构形计算	73
3.6.4 悬索桥内力与变形计算	76
3.6.5 某 2300m 单跨悬索桥方案算例	77
3.7 小结	82
第四章 杆系结构静力分析程序编制原理	83
4.1 杆系有限元分析程序流程	83
4.2 空间杆系单元坐标系内的单元刚度矩阵	85
4.3 坐标转换矩阵	86
4.3.1 坐标转换矩阵的概念	86
4.3.2 坐标转换矩阵的计算	87
4.4 带刚臂单元	88
4.5 等效节点荷载的计算	91
4.6 同位移约束	95
4.7 杆端自由度的释放	96
4.8 总体刚度矩阵和右端荷载向量的集成	98
4.9 边界条件处理	100
4.10 方程求解	103
4.11 内力计算	105
4.12 支承反力计算	106
4.13 小结	108
第五章 桥梁结构施工分析程序编制原理	109
5.1 概述	109
5.1.1 施工分析程序应具备的功能	109
5.1.2 施工阶段离散模型的建立	110
5.1.3 施工分析程序流程	110
5.2 结构形成的数值模拟	111
5.2.1 单元的增减	111
5.2.2 约束的增减	111

5.2.3 杆端自由度释放信息的改变	113
5.2.4 材料特性、刚臂的改变和支座瞬时位移	114
5.3 调值计算	115
5.3.1 概述	115
5.3.2 影响矩阵及其形成方法	115
5.3.3 等变量的调值计算	116
5.4 小结	117
第六章 预应力效应分析	118
6.1 空间预应力索分析	118
6.1.1 预应力索线形描述	118
6.1.2 预应力钢索几何参数计算	119
6.2 预应力损失的计算	123
6.2.1 预应力钢索与孔道壁之间的摩擦引起的预应力损失	123
6.2.2 考虑反摩阻的锚具变形、钢索回缩、接缝压缩引起的预应力 损失	127
6.2.3 预应力钢索与养护台座之间温度差引起的预应力损失	130
6.2.4 混凝土弹性压缩引起的预应力损失	130
6.2.5 钢索松弛引起的预应力损失	130
6.2.6 混凝土收缩和徐变引起的预应力损失	131
6.2.7 有效预应力计算	131
6.3 预应力等效荷载计算	132
6.4 预应力张拉锚固后组合截面的形成	134
6.5 组合截面内力及混凝土截面内力	135
6.6 预应力分析程序流程	136
6.7 小结	143
第七章 徐变效应分析	144
7.1 混凝土的徐变理论	144
7.1.1 徐变基本理论	144
7.1.2 徐变数学表达式	145
7.1.3 徐变分析方法简介	148
7.2 徐变应变-应力基本方程	149
7.3 徐变效应分析的位移法基本方程	151
7.4 徐变效应的位移法分析	153

7.4.1 徐变效应位移法分析的基本过程	153
7.4.2 徐变效应位移法分析的递推计算	157
7.5 徐变系数的拟合	160
7.6 徐变效应分析程序流程	161
7.7 小结	163
第八章 活载效应分析	164
8.1 活载效应分析理论	164
8.2 活载影响面	166
8.2.1 影响面计算的基本原理	166
8.2.2 影响面加密	171
8.2.3 三次样条插值	171
8.3 自定义车队	174
8.4 影响面加载	174
8.4.1 纵向加载	175
8.4.2 横向加载	179
8.5 城市桥梁荷载	180
8.5.1 城市桥梁设计基本可变荷载	180
8.5.2 程序处理	181
8.6 活载效应分析程序流程	181
8.7 小结	187
第九章 程序系统的前、后处理	189
9.1 桥梁软件现代开发技术基础	189
9.1.1 面向对象的程序设计	190
9.1.2 软件构件对象模型	190
9.1.3 ActiveX Automation 技术	191
9.2 桥梁软件集成技术	191
9.2.1 系统集成	191
9.2.2 系统集成的图形支撑系统	192
9.2.3 系统集成的核心数据库系统	193
9.3 程序系统的前后处理系统	196
9.4 程序系统的前处理	197
9.5 程序系统的后处理	199
9.5.1 桥梁结构分析系统信息输出形式	199

9.5.2 桥梁结构分析系统信息输出内容	202
9.6 小结	206
第十章 桥梁结构的数值描述	207
10.1 程序系统简介	207
10.1.1 程序系统的内部约定	207
10.1.2 程序使用及其输出内容	208
10.2 桥梁施工分析的数值模拟	209
10.2.1 计算控制信息	209
10.2.2 结构控制信息	210
10.2.3 结构参数信息	210
10.2.4 施工阶段结构、荷载信息	216
10.2.5 活载计算信息	224
10.3 计算实例	228
10.4 小结	237
主要参考文献	238

·第一章· 概 述

1.1 桥梁结构分析

桥梁结构分析是通过桥梁设计资料的汇集,提炼出结构分析条件,然后运用结构分析理论和方法,进行结构计算,最后对计算结果进行判断、审核,决定取舍后将结果转换成有用的设计数据,提供给设计者评估桥梁性能和进行结构优化的全过程。

结构分析条件包括自然条件、技术条件和假设条件三部分。自然条件是指桥址处的气象、水文、地质和地形等。对于指定桥位,自然条件是客观存在的;技术条件是指桥梁上通过的车辆、行人及其它特种荷载等技术要求,包括车道数、荷载等级、行车速度等。技术条件是由主管建设部门通过全面统筹考虑,作为设计任务书内容下达的。在较复杂的工程中,也可由设计单位研究并提出设计建议书,经过专家论证并经主管建设的上级部门审查确定;假设条件是为了对结构进行合理分析,根据前面两个条件和目前已有的经验,对分析对象的结构模式、边界约束条件、工作状态等进行的假定,假定条件的正确与否是决定理论分析对象是否代表实际结构的关键。

桥梁结构分析理论是在经典结构力学理论上发展起来的,主要研究假定的桥梁结构模型在一定荷载作用下的响应。随着桥梁事业的迅速发展,传统桥梁设计思想受到了冲击,导致桥梁结构分析理论的进一步发展。在结构受力分析方面,传统设计方法仅以恒载一次落架作为结构恒载受力状态。现代桥梁设计,首先考虑施工方法对结构受力的影响,不同的施工方法最终导致结构中不同的内力状态;其次考虑结构中部分构件的可调性,利用预应力索、斜拉索、吊索或吊杆的可张拉性来改变桥梁结构内力的分配,最大限度地使结构受力趋于合理;还运用优化方法,对结构的布跨、横断面的设计和受力状态等进行优化。

由于桥梁跨径的增大,恒载在桥梁结构总荷载中所占的比例增大,因此合理确定成桥恒载状态成为桥梁设计中十分重要的环节。在结构线形设计方面,传统设计认为结构线形可根据工程需要,由设计人员设定,并以结构恒载一次落架产生的挠度值与部分活载挠度叠加后反号作为预拱度,以期成桥结构在恒活载作用下达到最佳线形。现代桥梁设计将施工过程与成桥状态结合起来考虑,以成桥线形为目标,寻找每一施工阶段的设计状态,将恒载变形消除在施工阶段。可见,现代桥梁设计已将施工方法与施工过程作为设计不可分割的重要组成部分,而结构分析也将贯穿于整个设计过程。

新材料和新的施工工艺与方法在桥梁工程中得到广泛应用,桥跨不断增大,新型桥梁结构形式不断推出,使结构分析变得更加复杂,也促进了桥梁理论的发展。当前桥梁结构分析所面临的问题主要有以下几个方面:

- 1)大跨径和新材料引起的几何、材料非线性问题;
- 2)分阶段、分层施工与体系转换带来的结构仿真计算要求;
- 3)空间预应力索及其分批、分节、分阶段张拉数值模拟与计算问题;
- 4)混凝土构件徐变、收缩和预应力索松弛引起的结构内力重分配;
- 5)不断提高的对结构关心截面内力、变位量的控制要求和结构优化要求;
- 6)横向风力等空间荷载引起的结构内力与变形及其对结构面内受力的非线性效应;
- 7)弯坡斜桥的空间受力分析、影响面及其加载问题;
- 8)结构的稳定问题。

这些基本问题及由其引出的组合性问题,促进了桥梁结构分析理论的发展,下面以悬索桥为例来回顾一下桥梁结构静力分析理论的发展。

悬索桥的计算经历了线弹性理论、挠度理论和有限位移理论的发展过程。1823年法国工程师 Navier 发表了柔性吊桥理论,后经 Steinman 发展成为标准弹性理论。这一理论不计荷载对结构线形的影响,不考虑重力刚度影响,对计算早期跨度较小、刚度较大的悬索桥,可以得到满足工程要求的计算结果。

随着桥跨增大,结构刚度相对变小;结构在外荷作用下引起的竖向位移和主缆索力改变对结构平衡的影响越来越大。Melan 于 1888 年在维也纳提出了挠度理论,将梁的平衡方程建立在变形后的位置上,并考虑了主缆拉力的二阶影响,但这一理论的平衡方程未计入吊杆伸长、结构水平位移及加劲梁剪切变形的影响,使离散吊杆等同于一刚性膜,以致于挠度理论又被称为膜理论。

挠度理论从 1908 年开始应用于纽约的 Manhattan 大桥设计后,充分显示了它的优越性。此后的数十年中,挠度理论为悬索桥的发展作出了巨大贡献。

尽管如此,这一理论的平衡方程求解还是复杂的, Timoshenko 于 1928 年提出了三角级数解, Godard 提出了线性挠度理论, 我国李国豪教授于 1941 年提出了等代梁法, 将挠度理论中的非线性项等代于偏心受拉梁的弯矩减小系数, 揭示了悬索桥受力的本质。

现代悬索桥在桥跨增大的同时, 加劲梁相对刚度不断减小, 其高跨比已小于 $1/300$ 。结构变得越来越柔, 分析中吊索伸长、水平位移等因素已变得不可忽略, 而且, 斜拉桥等一些新桥型不断朝大跨径方向迈进, 使得梁柱效应等问题突出, 挠度理论在解决这类问题时显得无能为力。

20 世纪 60 年代初, M. J. Turner、Brotton 等开始发表求解大位移、初应力力学问题的研究成果, 即后来形成的有限位移理论。这种理论是相对于微小位移理论而言的。在微小位移理论中认为, 外力产生的变形不影响力的平衡, 在挠度理论中只计入部分影响, 而在有限位移中, 荷载的平衡状态是以变形后的结构状态为基础的。在此后的发展中, Poskitt、Saffan 等在此领域里都作出了自己的贡献。

现代有限位移理论往往通过有限元方法来实现。在杆单元中, 处理构件的非线性刚度效应主要采用稳定函数法、几何刚度矩阵法。Saffan 理论就是在稳定函数的基础上, 同时考虑了结构几何变形的影响, 以增量求解的方法实现结构的有限位移分析。Fleming 也是利用稳定函数的轴力对弯矩和弯矩对轴力的影响来修正传统的线性刚度阵。Nazmy 等人把 Fleming 法的平面问题推广到空间分析中去。

现代悬索桥的分析必须计入施工过程对结构受力的影响。首先计算构件无应力长度, 然后根据施工流程逐阶段计算本次施工引起的已建结构状态变化, 并对内力和变形进行累计, 最终形成成桥内力和构形。

悬索桥计算理论的发展, 在一定程度上也代表了其它桥梁结构类型计算理论的发展。大跨径拱桥的计算就经历了与悬索桥相同的发展过程。早期中等跨径斜拉桥, 计算中用杆单元模拟斜拉索, 发现了斜拉索垂度对结构刚度的影响, Ernst 首先提出了用换算弹性模量法来改善计算结果。当索长小于 200m 且拉索应力在 500MPa 左右时, 其误差小于 5%, 因此, Ernst 公式的应用是有条件限制的。对那些跨径大、梁或塔轴力对弯矩的影响大、结构几何非线性特征明显的结构, 一般用非线性分析; 而对那些结构刚度较大, 跨径不大的桥型, 如连续梁、刚构等, 目前仍采用线弹性理论进行分析。

当今桥梁结构静力分析在大跨径桥梁计算方面, 还致力于结构的成桥状态确定和非线性施工仿真计算。分析更侧重于精细化, 比如悬索桥主缆与鞍

座在施工过程中的接触问题、斜拉桥拉索锚固区的局部应力分析等问题均有学者进行了研究。由于有限元方法的完善和计算机技术的发展,桥梁结构的静力分析方法已逐步统一于程序化有限元分析。

对计算结果进行判断、审核是桥梁结构分析的又一重要环节。在这一环节中,必须明确结构分析的目的。我们分析结构的目的,不仅是为了研究其假定模型在一定荷载作用下最可能的响应,而且还要回答分析结果与假设条件是否相符的问题。比如假定土是弹性体,而计算结果却出现桩在土内的位移量很大,相应位置的土的应变已经超过了其弹性应变,此时分析结果与土是弹性体的假定不符,应该修正假定。同样,假定结构是线弹性的,而计算结果却出现局部构件应力超过材料屈服极限的现象,也是分析结果与假定不符的例子。

将结果转换成有用的设计数据也是桥梁结构分析不可缺少的重要一环。随着计算机的发展,科学计算的可视化技术已越来越为人们所重视。它可以将科学计算过程中以及计算结果的数据转换成几何图形及图像信息,在屏幕上显示出来,并进行交互处理,成为发现和理解科学计算过程中各种现象的有力工具。这一技术在桥梁结构分析软件中的应用,不仅能使各种计算命令图像化、菜单化;数据交互输入形象化,而且能用图像检查输入文件的正误;动态显示活载影响线及加载过程;仿真显示施工过程及相应结构的变形和内力状态。一旦发现异常,便可中断计算,对结构的约束、荷载、预应力等一系列参数进行复查。

1.2 程序系统

20 世纪 60 年代初,由于计算机技术的推广和结构分析有限元法的应用,使桥梁结构分析得以向程序化方向发展。

20 世纪 70 年代,由美国加州大学伯克利分校的 K. J. Bathe、E. L. Wilson 和 F. E. Peterson 于 1970 年首先推出结构分析通用程序系统 SAP,并在航空、机械、土建等领域得到广泛应用。20 世纪 80 年代初由北京大学曲圣年教授等移植到微机上。该程序系统经历了多次改版,现工程界广泛使用的是新版 Super SAP93 和 SAP2000。SAP 程序系统拥有几十种实用的单元类型,可用于分析梁、杆、板、壳、管、三维实体等各种构件组成的结构体系的动、静力响应,Super SAP 还拥有杆、薄壳等几种单元的几何刚度阵,并能完成几何、材料非线性力学分析问题。

国内外在 20 世纪 70 年代初到 80 年代末还推出了一些类似于 SAP 功能

的其它结构分析通用程序。如 ADINA 程序,可用于结构非线性问题的分析; FEM 可用宏语言描述结构,并对多单元组合结构进行动、静力分析。世界有限元界著名的 ANSYS 公司所研制开发的 ANSYS 软件是融结构、热、流体、电磁、声学于一体的大型通用有限元分析软件。从 20 世纪 70 年代开始,ANSYS 软件就率先在有限元分析中引入了图形技术以及交互式操作方式,使有限元分析进入崭新阶段。1983 年,ANSYS 又充分预计了 PC 机的发展,开发出世界上第一个 PC 机上的分析程序。现在该程序具有完备的前处理器、强大的处理器、方便的后处理器,并提供宏语言、用户界面设计语言、用户编程特性和参数设计语言等几种工具。大连理工大学工程力学研究所开发的 JIFEX 系统,也是新一代有限元分析与结构优化设计软件系统。它是在 MS Windows9x/Windows NT 和 AutoCAD 软件平台上的商品化软件。

但是,这些程序系统应用于桥梁结构分析有一定局限性,主要体现在以下几个方面:

1)结构的描述繁复。由于要兼顾各种组合结构的分析,通用程序对结构的数据描述有很严格的规定。因此,即使描述最简单的平面杆系结构,也要填写很繁复的数据文件,既花工时又容易引起数据描述出错。

2)无法仿真桥梁施工过程进行计算。桥梁结构一般都有一个逐阶段形成的施工过程。在这个过程中,常常伴有支座增减、几何特性改变、体系转换等结构体系的改变。这就要求结构分析程序具有仿真桥梁施工过程的计算功能。一般的通用程序都不具备这一功能。

3)不具备活载自动加载功能。桥梁结构的活载分析要求对关心截面物理量的影响面进行自动加载,而平面活载分析要求对影响线进行自动加载。一般的通用程序通过改进后可以完成影响面或影响线的计算,但仍无自动加载的功能。

4)无法进行结构调值分析。现代桥梁结构常常利用强迫应变产生的应力(如斜拉索、预应力索张拉等)来调整结构体系的受力分配。按设计者的意图,指定一种期望的受力状态,用调值原理计算应施加的强迫应变变量。虽然有些通用程序可以完成装配误差应力的分析,但不具备结构调值分析的功能。

5)处理桥梁结构的徐变、收缩及与预应力有关的问题时显得无能为力。钢筋混凝土桥梁结构徐变、收缩的发展贯穿于整个施工过程和成桥状态。混凝土徐变与构件应力历史有关。随着施工阶段的向前推进,后期结构荷载对前期结构徐变、收缩及预应力损失都有影响。大部分结构分析通用程序无法处理混凝土徐变、收缩等问题。也有部分结构分析通用程序,虽然能以分析金

属蠕变的功能对混凝土徐变进行分析,但这些程序无法模拟施工过程,无法得到各施工阶段构件的应力历史,也就无法真正处理桥梁结构的徐变、收缩及与预应力相关的一系列问题。

由于以上种种原因,桥梁工程界更需要专用的程序系统来方便、准确地完成桥梁结构受力分析。

我国从 20 世纪 70 年代末开始,由中交公路规划设计院负责展开桥梁结构分析程序化的研究工作,开发完成了第一代桥梁专用综合程序。与此同时,交通部重庆科学研究所也做了大量的工作,完成了桥梁结构分析程序。综合程序后来被中交公路规划设计院朱培京、郑明珠等同志进行了改进,并推广到微机上应用,对推动桥梁电算事业起到了很大作用。由于当时受到计算机技术的限制,程序的计算规模和计算功能都有一定限制。

20 世纪 80 年代开始,我国桥梁事业迅速发展,各种新结构不断推出,跨径不断增大,促进了桥梁结构分析程序化的发展。西南交通大学推出了悬索桥分析程序系统,动力分析采用结构准空间模式,非线性活载采用交互式手动加载,该系统在汕头海湾大桥等大跨径悬索桥分析中得到了应用。

贵州省交通规划设计院周善棣高级工程师组织开发了平面杆系桥梁分析程序系统,该程序界面友好,可以模拟实桥施工过程进行分析,特别适用于钢筋混凝土拱桥的设计计算,在国内中小型设计单位得到较为广泛的推广。但由于该程序系统不能计入几何非线性,故无法对特大跨径桥梁进行分析计算。

20 世纪 80 年代初,同济大学组织完成的 BCAD 系统中,BCAD-FEA 子系统是一套由 SAP5 与 ADINA 作为计算核心,结合前后处理组成的桥梁专用综合程序。该系统针对桥梁移动荷载问题,实现了能自动形成位移和内力影响面的功能,并发展了实用的影响面加载算法。从研制报告看,该程序对完成异形桥的静力分析比较方便,但由于采用的通用程序内核自身的不足,限制了该程序系统的应用与发展。

20 世纪 80 年代中,同济大学肖汝诚教授主持开发了“桥梁结构线性、非线性分析综合程序系统”(BAP)、“桥梁施工控制综合程序系统”(FWD)和“弯坡斜桥分析系统”(SBP)。BAP 程序的主要功能包括:

- 1)可计入结构自重、节点力、局部荷载、支座沉降、温度及预应力等多种荷载和混凝土收缩、徐变,自动计入各种预应力损失,对特大跨度桥梁,可计入几何非线性的影响;

- 2)模拟施工过程的各个阶段,通过单元、支座的增减,预应力索的反复张拉与放张,以及调值计算功能,可模拟各种桥型的各种施工方法,最终输出施