

研究生精品教材

张 晔 曹文钢 吕新生

编著

机械结构分析与优化设计

JIXIE JIEGOU FENXI YU YOUHUA SHEJI

70



合肥工业大学出版社
HEFEI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PRESS

研究生精品教材

机械结构分析与 优化设计

张 晔 曹文钢 吕新生 编著

合肥工业大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

机械结构分析与优化设计/张晔,曹文钢,吕新生编著. —合肥:合肥工业大学出版社,2015.7

ISBN 978-7-5650-1329-4

I. ①机… II. ①张…②曹…③吕… III. ①机械—结构分析—研究
IV. ①TH112

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 096118 号

机械结构分析与优化设计

张 晔 曹文钢 吕新生 编著

责任编辑 郑 洁

出 版	合肥工业大学出版社	版 次	2015 年 7 月第 1 版
地 址	合肥市屯溪路 193 号	印 次	2015 年 11 月第 1 次印刷
邮 编	230009	开 本	710 毫米×1000 毫米 1/16
电 话	总 编 室:0551-62903038	印 张	11.25
	市场营销部:0551-62903198	字 数	170 千字
网 址	www.hfutpress.com.cn	印 刷	安徽联众印刷有限公司
E-mail	hfutpress@163.com	发 行	全国新华书店

ISBN 978-7-5650-1329-4

定价:28.00 元

如果有影响阅读的印装质量问题,请与出版社市场营销部联系调换。

序

合肥工业大学是一所教育部直属的全国重点大学、国家“211工程”重点建设高校和“985工程”优势学科创新平台建设高校。学校创建于1945年,1960年被中共中央批准为全国重点大学。60多年来,学校以民族振兴和社会进步为己任,坚持社会主义办学方向,秉承“厚德、笃学、崇实、尚新”的校训,恪守“勤奋、严谨、求实、创新”的校风,形成了鲜明的办学特色,成为国家人才培养、科学研究和服务社会的重要基地。

合肥工业大学研究生教育始于1960年,1986年开始招收博士研究生。经过20多年的发展,学校形成了层次完整、类型多样的研究生培养体系。学校设有8个博士后科研流动站,6个博士学位授权一级学科,25个博士学位授权点,83个硕士学位授权点;具有建筑学硕士、工商管理硕士(MBA)、公共管理硕士(MPA)、工程硕士(23个)、高校教师在职攻读硕士学位等4种专业学位授予权。目前在校研究生7800余人。

研究生教育是精英教育,培养的是引领我国科技和经济社会发展的栋梁之材。教材是课堂教学和学生学习的主要载体,教材建设是课程体系和教学内容改革的核心。为进一步加强研究生教学工作,深化教学改革,提高研究生教育教学质量,学校于2008年启动了“合肥工业大学研究生精品教材建设”项目,系统组织编写

出版一批学科特色鲜明、学术水平较高的研究生教材。这些教材符合研究生教育改革发展趋势,反映了学科建设的新理论、新技术、新方法,在国内同类教材中水平较为先进。我们希望通过几年的努力,打造出一系列研究生精品教材。

合肥工业大学研究生精品教材编委会

2014年12月

前 言

随着计算机软硬件技术的日臻完善,模拟仿真技术在工程领域的应用越来越广泛。近年来,机械工程专业的研究生纷纷选择运动仿真、工艺流程仿真等作为自己学位论文的研究课题,其中涉及最多的是结构仿真课题。各种有限元分析软件成为研究这类课题的主要工具。但是,他们在开展这类课题研究的过程中,逐渐暴露出机械工程专业研究生数学、力学基础理论功底不足的弱点。

进行结构分析和仿真,需要掌握相当深度的结构力学、弹性力学(包括粘弹性力学、弹塑性力学),甚至分析力学的知识。但是,大多机械工程专业研究生在本科学习期间没有系统学习这些力学课程,于是在开展结构有限元分析仿真研究的过程中,不会判断、分析有限元仿真结果的正确性和合理性,导致得不到预期的分析仿真结果,也不知应采取相应的应对措施去解决问题。

为了使机械工程专业研究生弥补力学知识的不足,较深入地(与本科课程相比)掌握有限元技术的原理,我们为机械工程专业研究生开设了《机械结构分析与优化设计》这门选修课,受到了研究生们的欢迎。

需要申明的是,本书无意系统全面地讲授结构力学、弹性力学知识,而是将结构力学、弹性力学、有限元方法中的相关知识串在一起:从结构力学中的力法、位移法,到弹性力学中的按应力求解、

按位移求解,再到有限元方法,虚功原理始终贯穿其中,展现了结构分析过程中科学思路的继承和发展历程。同时,本书介绍了多物理场耦合仿真以及布局优化的基本理论和方法,希望对从事结构分析与优化设计的机械工程专业研究生和工程技术人员有所裨益。

本书作为应用实例,不仅收录了研究生侯永康、石作维硕士学位论文中的研究成果,还吸纳了王其祚副教授指导的张广圣、董玉革、陆晓军、陈雨阳等研究生的研究成果,在此一并表示感谢。

编者

2015年6月

目 录

概 述 (001)

第一部分 结构分析

第 1 章 结构力学 (005)

§ 1-1 自由度和几何不变体系 (005)

§ 1-2 静定结构的分析计算及虚功原理 (008)

§ 1-3 超静定结构的分析计算:力法和位移法 (018)

思考与练习 (028)

第 2 章 弹性力学基础 (029)

§ 2-1 弹性力学中的基本量 (029)

§ 2-2 平面应力问题与平面应变问题 (032)

§ 2-3 弹性力学平面问题的基本方程与边界条件(set 1) (033)

§ 2-4 弹性力学平面问题的解析解法 (037)

§ 2-5 虚功原理 (041)

思考与练习 (047)

第 3 章 有限单元法 (048)

§ 3-1 有限单元法的基本思想 (048)

§ 3-2 结构离散化——单元划分 (049)

§ 3-3	位移模式	(051)
§ 3-4	有限元法基本计算公式	(055)
§ 3-5	各种平面单元分析	(063)
§ 3-6	应用实例——基于 LS-DYNA 的电动汽车正面碰撞仿真 研究	(088)
	思考与练习	(095)
第 4 章	多物理场耦合仿真	(097)
§ 4-1	偏微分方程组的有限元数值解法	(097)
§ 4-2	多物理场耦合问题的定义	(098)
§ 4-3	多物理场耦合问题的分类	(099)
§ 4-4	常见物理场的控制微分方程(组)	(101)
§ 4-5	常见物理场的耦合方程	(103)
§ 4-6	耦合场的协同仿真	(106)

第二部分 结构优化设计

第 5 章	力学准则法	(111)
§ 5-1	满应力准则和应力比法	(111)
§ 5-2	满位移设计	(118)
§ 5-3	能量准则	(123)
	思考与练习	(128)
第 6 章	数学规划法	(129)
§ 6-1	结构优化数学模型的简化处理	(130)
§ 6-2	结构优化中的梯度计算——灵敏度(感度)分析	(136)
§ 6-3	二次正交回归优化设计方法	(139)
	思考与练习	(148)

第7章 布局优化	(149)
§ 7-1 布局优化发展历史概况	(149)
§ 7-2 Maxwell 定理	(150)
§ 7-3 逆静力学法(理想状态空间法)	(152)
§ 7-4 其他布局优化方法	(157)
§ 7-5 应用实例——重型卡车平衡轴支架的拓扑优化设计	(160)
思考与练习	(167)
参考文献	(168)

概 述

什么是结构？技术系统(设备、建筑等)中承受载荷而起骨架作用的部分(杆、梁、拱、桁架、刚架、板、壳等)叫做结构。以房屋为例,梁和柱是承受载荷的结构,而门和窗则不是。任何技术系统都离不开结构,因此,有关结构的知识是任何工程技术人员所不可缺少的,而且对于技术系统来说,结构存在缺陷常常是极其危险的。

什么是结构分析？在给定结构几何尺寸、材料、受力及支承情况的条件下求得结构各部分的内力、位移和稳定性叫做结构分析,其内容通常为强度、刚度、稳定性的分析计算和校核。

什么是结构优化？根据结构的设计要求(技术经济性能指标),如重量、造价、强度、刚度、频率等,寻求最合理的结构类型、布局、外形、尺寸、材料叫做结构优化,这是一个综合和优选的过程。

在一定意义上,结构分析和结构设计(结构优化)是一对互逆的过程(图0-1):结构分析是给定“形态”求其“性能”的过程,而结构设计则是给

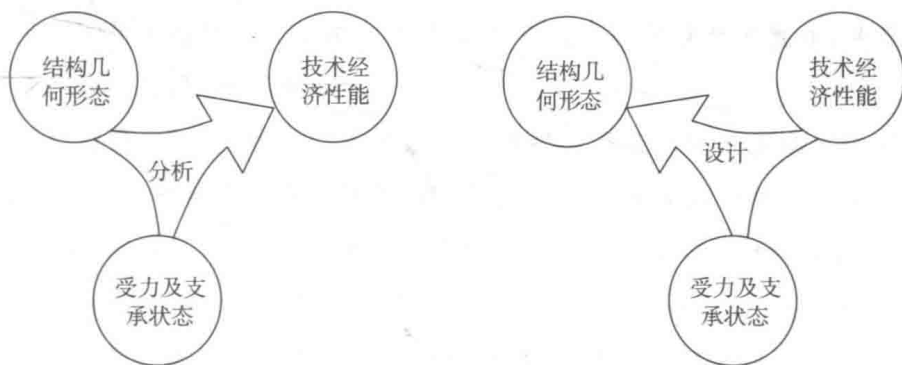


图0-1 结构分析和结构设计(结构优化)是一对互逆的过程

定“性能”(受力及支承状态已知)求其“形态”的过程。

本书内容分为两大部分:第一部分为结构分析,第二部分为结构优化。合肥工业大学自“六五”以来承担过不少有关结构设计的科研课题,如大型有限元分析程序 DYFIN 的调试和开发、结构多级优化、布局优化、机械结构理想设计等。本书尽可能地将相关研究成果介绍给广大读者。

本书共分八章。第一章为绪论,介绍机械结构优化的概念、意义、分类、发展概况、国内外研究现状、本书的主要内容等。第二章为有限元法,介绍有限元法的基本概念、有限元法的分类、有限元法的求解过程、有限元法的优缺点等。第三章为有限元法在结构分析中的应用,介绍有限元法在静力分析、动力分析、非线性分析中的应用。第四章为有限元法在结构优化中的应用,介绍有限元法在形状优化、拓扑优化、尺寸优化中的应用。第五章为机械结构的理想设计,介绍机械结构的理想设计的基本概念、理想设计的方法、理想设计的应用。第六章为机械结构的布局优化,介绍机械结构的布局优化的基本概念、布局优化的方法、布局优化的应用。第七章为机械结构的多级优化,介绍机械结构的多级优化的基本概念、多级优化的方法、多级优化的应用。第八章为机械结构的性能优化,介绍机械结构的性能优化的基本概念、性能优化的方法、性能优化的应用。



图 1-1 机械结构优化的分类

第一部分 结构分析

结构分析综述

结构分析是指在给定结构几何尺寸、材料、受力及支承情况的条件下求得结构各部分的内力、位移和稳定性的过程。因此,进行结构分析时,总离不开外力、内力、应力、应变、位移这些物理量。研究生对这些物理量并不陌生,在本科阶段的《材料力学》这门课程中曾学习过。要解决结构分析问题,当然要用到《材料力学》中的知识,但是不足以完成结构分析的任务。

对于从事机械产品结构分析的工程技术人员来说,其具备的知识至少涉及三门课程:材料力学、结构力学和弹性力学(针对一些特定的结构分析任务,甚至还要涉及弹塑性力学、断裂力学等课程)。那么,材料力学、结构力学和弹性力学相互之间有什么异同和内在联系呢?

它们的研究对象都是连续的、均匀的和各向同性的理想弹性体,并且都以小变形作为前提,这是共同点。

它们的明显区别:材料力学和结构力学都是用来研究长度远大于高度和宽度的构件,也就是常说的杆件(杆、梁、桁架、刚架等),而弹性力学除了用来更精确地研究杆件外,还用来研究板、壳以及更一般的空间实体。

同样以杆件为研究对象的材料力学和结构力学之间的区别:材料力学着重研究单根杆件以及较简单的杆件组合结构,并在此基础上建立强度条件、刚度条件和稳定性条件,研究与各种内力对应的应力性质和分布规律,为确定构件的截面尺寸提供理论依据和简单适用的方法。结构力学的研究

对象为复杂的杆件结构,而且主要涉及计算各杆件的内力,至于其应力分布、强度、刚度和稳定性,则是在求得各杆件内力后直接利用材料力学中的结论和公式进行分析和计算。

也就是说,结构分析就是材料力学、结构力学和弹性力学等知识的综合与运用。

由于材料力学在本科时已学习过,本书将不再重复,在分析过程中直接利用材料力学中的一些结论、定理、公式、计算方法。

本书着重介绍结构力学中处理结构分析问题的一些典型思路和方法,特别是与有限元相关的内容。

对于弹性力学,本书只介绍弹性力学的基础知识。整个结构分析部分的落脚点放在目前用得最普遍,而且是作为计算机辅助结构分析的主要手段的有限元分析上。也就是说,无论是结构力学简介还是弹性力学基础,都是为掌握和运用有限元服务的,而有限元法则是结构分析内容的归宿。

需要说明的是,无论是结构力学还是弹性力学,本书只讨论平面问题,至于空间结构分析问题,相信大家能举一反三自学解决。

第1章 结构力学

§ 1-1 自由度和几何不变体系

结构力学的研究对象是杆件结构(图 1-1):

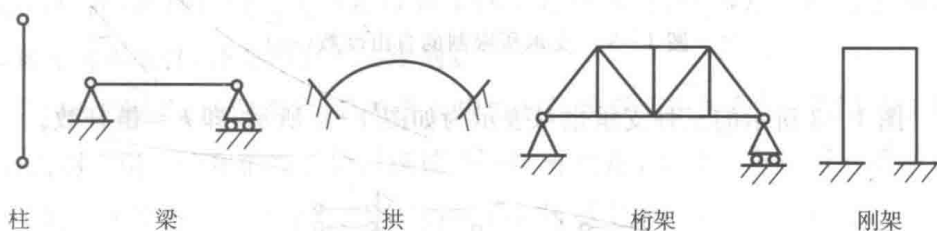


图 1-1 杆件结构简图

图 1-1 表明:杆件结构是由杆(直杆、曲杆、梁)、联结(铰结、刚结)、支承组成的。

杆件的任意组合是否都能作为结构使用? 否!

Johnson 在《机械设计综合》中利用自由度这一概念对杆系作了很好地划分,为此,本书先介绍自由度的概念。

一个机械系统如果发生运动,那么在运动中唯一确定系统各部分位置的独立坐标的数目叫做自由度。对于杆系,其自由度则是,在发生运动时唯一确定各杆位置的独立坐标的数目。

对于平面杆系,其中任一杆在不受任何约束的情况下有三个自由度(两个平动自由度、一个转动自由度),那么 n 根杆件则有 $3n$ 个自由度,但加上联结和支承后,情况就发生了变化,其变化规律是

$$F = 3n - 2m - k$$

其中： n 是杆数， m 是单铰数， k 是支承所限制的自由度数。

单铰指两杆杆端用一铰联结，使一杆端相对另一杆端失去两个平动自由度，只剩一个转动自由度。

如果是两根以上的杆（如三杆）用一铰联结，可视为两个单铰，即 m 杆通过一铰相联，视为 $m - 1$ 个单铰，通过联结失去 $2(m - 1)$ 个自由度，这称之为复铰（图 1-2）。

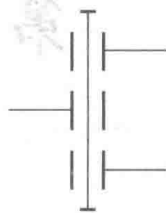


图 1-2 复铰

k 是支承所限制的自由度数，如图 1-3 所示。



图 1-3 支承所限制的自由度数(一)

图 1-3 所示的三种支承也可表示为如图 1-4 所示，即 $k = \text{链杆数}$ 。

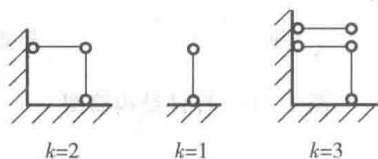


图 1-4 支承所限制的自由度数(二)

值得一提的是，如果各杆都是用铰将杆端联结起来（桁架），还有一种计算自由度的方法：[注意：(1) 都用铰，没有组合联结；(2) 都在杆端]

$$F = 2m' - n - k$$

其思路是，以铰结点为出发点，每个点在平面内有两个自由度， m' 个铰结点在不受任何约束时，总自由度为 $2m'$ 个，两个点之间用一杆相连，则使一点对另一点少了一个自由度，加一链杆亦然。

通过上述公式计算出不同杆系的自由度后，Johnson 将其分为以下几类：

- (1) $F = +2$ 差动杆机构
- (2) $F = +1$ 单自由度杆机构
- (3) $F = 0$ 结构
- (4) $F < 0$ 结构或内力加压装置

$F > 0$ 说明杆系在受到一定外力时可发生运动,不能作结构,只能作机构,称为几何可变体系。

$F \leq 0$ 是几何不变体系的必要条件。

其中 $F = 0$ 说明体系所具有的联系(联结与支承)恰好保证了体系的几何不变性,这就涉及后面要研究的静定结构。

$F < 0$ 说明体系有多余的联系,这就涉及后面要研究的超静定结构。

值得强调的是, $F \leq 0$ 只是几何不变体系的必要条件,其逆否定理“ $F > 0$ 必不是几何不变体系”成立,但其逆定理“ $F \leq 0$ 体系必定几何不变”并不成立,因此,利用自由度还不足以判定体系几何不变性(不充分),为了判定体系几何不变性,还要用到下述规则:

(1) 二刚片(所谓刚片,是指平面中的刚体或平面中的几何不变部分)规则:二刚片用一铰和轴线不通过该铰的一链杆相连,或者二刚片用三根不完全平行也不交于一点的链杆相连,则体系几何不变。

(2) 三刚片规则:三刚片用不在一条直线上的三铰两两相连,则体系几何不变。

(3) 二元体(所谓二元体是指用两根不在一条直线上的链杆联结一个新接点)规则:刚片上增加二元体后体系仍几何不变。

此外,还要注意瞬变(所谓瞬变,是指体系在某一特定位置、某一瞬时几何可变)体系的存在,例如:

三根链杆汇交于一点,体系几何可变;三根链杆的延长线汇交于一点,体系几何瞬变。

三根等长链杆相互平行,体系几何可变;三根不等长链杆相互平行,体系几何瞬变。

三铰位于一条直线上,体系几何瞬变。