



全国高校素质教育教材研究编审委员会审定

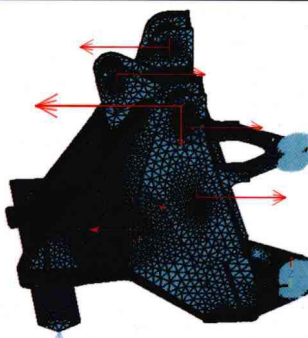
工程结构系统的分析、综合与优化设计

—— 理论、方法及工程应用案例

GONGCHENG JIEGOU XITONG DE FENXI ZONGHE YU YOUHUA SHEJI

—— LILUN FANGFA JI GONGCHENG YINGYONG ANLI

陈树勋 著



中国科学文化出版社

CHINA SCIENCE CULTURE PUBLISHING HOUSE

全国高校素质教育教材研究编审委员会审定

工程结构系统的分析、综合与优化设计

——理论、方法及工程应用案例

陈树勋 著



中国科学文化出版社
CHINA SCIENCE CULTURE PUBLISHING HOUSE

图书在版编目 (CIP) 数据

工程结构系统的分析、综合与优化设计——理论、方法及工程应用案例 / 陈树勋 著.
—中国: 中国科学文化出版社, 2008.2

ISBN 978-988-17372-2-9

I. 工… II. 陈… III. 工程结构—方法应用—参考书 IV. TB1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008)

工程结构系统的分析、综合与优化设计
——理论、方法及工程应用案例
陈树勋 著

特约编辑: 李国强

责任编辑: 易永恒

封面设计: 张骐年

出版发行: 中国科学文化出版社

地 址: 香港干诺道中 168-200 号信德中心西翼 3703 室

电 话: 00852-34210868 传真: 00852-34262347

排 版: 科事洁文印中心

印 刷: 新颖印务有限公司

开 本: 787mm×1092mm 1/16

印 张: 26.2

字 数: 621 千字

版 次: 2008 年 2 月第 1 版

印 次: 2008 年 2 月北京第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-988-17372-2-9

定 价: 45.00 元

版权所有 翻印必究

内 容 简 介

本书是作者二十多年来主要原创性研究成果自成体系的有机组合。主要内容包括结构优化设计导重法、结构系统按预定性能设计综合、天线结构近似保型与严格保型优化设计、普遍型模糊规划和结构多目标模糊优化设计的理论与方法、结构系统全局协调优化设计理论与方法、互联网环境下分布式工程结构系统设计参数的协同优化技术、对工程结构有限元分析中一些关键问题的深入思考、处理技巧以及以上理论方法在电子机械、航空航天、机械工程、微机电系统、工程机械与专用汽车结构设计中成功应用的多个案例。本书内容充满创新，理论严密，意义明确，论述严谨，表达简洁，方法完整。广泛适用的结构优化导重法与国内外流行的结构优化一般数学规划法与虚功准则法相比，优化效率与优化效果有大幅度提高，20多年来大量的工程应用证实了其优越性；按预定性能设计结构的理论方法给出了结构分析反问题——结构综合问题求解的高效方法，实现了大型天线结构的严格保型设计，以往国际上只能作到近似保型设计；普遍型模糊规划和结构多目标模糊优化设计的理论与方法使优化设计理论更加符合工程设计的实际情况；工程大系统与工程结构系统全局协调优化设计理论与方法和互联网环境下的分布式工程结构系统设计参数协同优化技术成功应用于卫星等空间飞行器结构系统的结构优化设计，为航空航天器总体优化设计提供了新途径，该项研究曾连续获得国家自然科学基金三次资助。

本专著内容丰富，理论与应用并重，可用作电子机械、航空航天、土木建筑、机械工程、微机电工程、工程机械与专用汽车等专业高校教师与研究生的科研与教学参考书，还可用作有关企业技术人员学习提高、产品改进与新产品研发的参考书。

绪 言

本书介绍作者二十多年来在工程结构系统分析、综合与优化设计的理论、方法与工程应用方面的原创性研究成果。

系统是由若干既相对独立又相互联系的单元组成，并具有特定功能的整体，若干子系统组成较大一级的系统。本书的工程系统是指工业建造的系统。机械系统（或机械产品）是由若干具有一定质量与刚度的物件组成，通过可控运动利用机械能（动能、势能）完成其特定功能的整体。任何机械系统都是由起支承与受力作用的结构系统，完成可控运动的机构系统以及控制、电气、液压或气动等子系统组成的机电光磁液气一体化工程系统。结构系统与机构系统在任何机械系统必不可少的主要子系统，其他子系统都是辅助子系统。结构系统还是航空航天器、土木建筑物、车辆船舶、机器设备、微机电系统等工程系统不可或缺的主要子系统。因此，本书研究的工程结构系统的分析、综合与优化设计的理论、方法具有广泛适用性，本书中的工程应用实例具有广泛参考价值。

结构分析（analysis）是给定结构设计方案，分析计算该结构的重量、惯矩、振动模态、稳定性等静动力特性和在各种静动力载荷作用下的结构位移、构件应力等结构性态。总之，结构分析是给定结构设计方案分析计算结构性态，当前最主要的结构分析技术是结构有限元分析；结构综合（synthesis）是相对结构分析而言的反问题，结构综合包括按预定性态设计结构和结构优化设计。按预定性态设计结构是预先给定结构所应具有刚度、谐振频率、位移、变形、应力等结构性态，寻求结构类型、材料特性、几何形状与构件尺寸等结构设计方案。总之，按预定性态设计结构是给定结构性态寻求结构设计方案；结构优化（optimization）则是寻求结构的材料特性、拓扑形状与构件尺寸等设计方案，在满足一些性态限制和变量范围限制前提下使结构的某（些）项性态达到最优。结构优化的宗旨是合理解决结构性态与设计资源的矛盾，结构优化的实质是结构材料的合理分配。

作者的研究成果大部分集中在结构系统优化设计方面，包括：结构优化设计的导重法、结构多目标模糊优化设计、结构系统全局协调优化与结构系统设计参数的网络化协同优化和大量的工程应用实例。

八十年代初，作者创立了一种意义明确、严密简洁的结构优化设计通用方法——导重法（Guide-weight Method）^[104, 109, 113]，与国内外流行的以位移用虚功表达为特点的结构优化虚功准则法及一般数学规划法相比，优化效率与优化效果大幅度提高。在航空航天器结构、精密天线结构与高速运转的机械结构优化设计中，由于构件尺寸等设计变量的变化必然会引起结构自重、惯性载荷等与由构件质量所引起的载荷的变化，在结构最优准则推导与敏感度分析计算中，这种变化的导数是不容忽略的。但是国内外流行的结构优化虚功准则法^[2, 5, 18, 26, 45, 48, 52, 55, 58]由于位移用虚功表达而不得不忽略这种导数，这就使得虚功准则法的最优性准则是不准的，将其用于航空航天器结构、精密天线结构与高速运转的机

械结构优化时, 计算结果与原问题的最优解相差甚远。作者严格按照有约束优化问题的库恩—塔克(Kuhn—Tucker)条件推导出了最优结构应当满足的导重准则方程组, 求解该导重准则方程组即可使结构得到优化。导重准则可表述为:“**最优结构应当按照各组构件的导重正比分配各组构件的重量**”, 意义明确、表达简洁。一组构件的导重被定义为优化目标随该组构件设计变量增加而改善的速率与该设计变量的乘积, 对导重与导重准则的数学定义与物理意义作者给出了深入的剖析, 并从而给出了衡量结构最优化程度的定量指标——结构最优性指标。由于导重法中的敏度计算是从求解结构位移的刚度方程出发的, 避开了位移的虚功表达, 从而保证了导重法的严密性。在多性态约束 Kuhn—Tucker 乘子求法上, 采用了二次规划中求解线性互补问题的 Lemker 算法, 有效地自动区分了临界约束与非临界约束, 从而使导重法兼蓄了数学规划法与准则法两者的优点, 既能使优化效果大幅度改善, 又能使优化迭代很快收敛。导重法所涉及的设计变量不但包括构件尺寸, 还包括了结构几何形状、节点坐标, 可对包括杆单元、梁单元、板壳单元与体单元在内的多种工程结构进行优化设计; 所涉及的目标和性态约束可包括结构重量、精度、动力基频和结构特征应力等。结构特征应力是作者提出的用以代替数量庞大的构件应力约束函数的方根包络函数。由于考虑自重、惯性载荷随设计变量变化的导数具有通用性, 不考虑这种变化导数具有局限性, 所以导重法是一种新的广泛适用的结构优化高效通用方法, 值得大力推广应用。遗憾的是, 八十年代初提出导重法后, 由于作者一直忙于结构优化理论创新研究, 对导重法的推广工作做得很是不够, 导致了解和应用导重法的人较少。好在经过时间与实践的考验, 导重法已发展成为理论完善、方法完整、工程实用、自成体系的结构优化优秀方法。二十多年来导重法已在精密天线结构、航空航天器结构、土木建筑结构设计中获得成功应用, 尤其是作者被引进到广西大学工作的近几年来, 为了服务于广西机械制造业, 作者将导重法与结构分析商用软件结合, 研制成以 ANSYS 为分析器、以导重法为优化器的工程结构优化设计实用软件 SOGA, 并将其应用于工程机械、专用汽车和机器设备等机械产品的整机结构优化设计, 获得了大量成功应用的范例, 充分验证了导重法的优越性, 采用导重法往往只需要 4~6 次迭代即可在满足结构刚度、强度要求前提下使产品结构重量减少 25%~35%或在结构重量不变的前提下, 使结构刚度、强度提高 30%~50%^[145, 164, 170, 173, 175, 176, 177], 这是虚功准则法及商用结构分析软件自带的一般数学规划法根本无法做到的。

求解非线性方程组的直接迭代步长因子法因其简便而经常被人们用于许多问题的数值计算, 作者也用它来求解导重准则方程组, 但长期以来人们对它的收敛性缺乏简捷实用的研究。作者为保证结构优化迭代算法的可靠性和有效性, 研究证明了在一般情况下使迭代收敛的步长因子必定存在, 并给出了其理论取值范围和规律, 提供了在实际计算中步长因子的取值方法。作者还根据求解一维非线性方程埃特金(Atkin)法的线性化原理, 提出了求解多维非线性方程组的拟埃特金法(Simulant Atkin)^[157]和计算效率更高的埃特金—陈(Atkin—Chen)法^[161], 将其应用于结构优化准则方程组求解, 收到了很好的效果。

由于一般工程结构优化设计中存在着多个目标、多个性态约束, 而这些目标与约束又在一定程度上具有模糊性, 必须合理正确地处理这些模糊因素, 进行工程结构的多目标模糊优化设计, 否则会给结构设计带来一些实质性的困难^[37]。为此, 作者在八十年代

中期发展了结构模糊优化理论^[60],提出了普遍型模糊规划的理论和解法^[117, 118]。普遍型模糊规划是指不仅多个约束函数本身及其取值范围具有模糊性,而且多个目标函数本身及其趋优也具有模糊性的数学规划。为解此规划,作者提出了目标函数的模糊满意区间及满意度等概念,为避免次要目标与次要约束起控制作用,还考虑了按各目标与各约束的重要程度进行调整的问题,作者还提出了普遍型模糊规划解的理论,给出了普遍型模糊规划所应追求的满足满意解的定义。最后提出了普遍型模糊规划的对称型解法——模糊判决法和不对称型解法——最优约束水平法,并从理论上证明了两类解法所求得解均为满足满意解。普遍型模糊规划的提出为一般工程结构的多目标模糊优化设计乃至一般工程设计问题的模糊优化奠定了理论和解法基础^[120, 122, 124],并使得美国著名学者赫伯特·西蒙(Herbert Simon)追求“令人满意解”的思想在工程设计中得以实现^[14, 33]。在普遍型模糊规划的理论基础上,作者以天线结构为例进行了工程结构多目标模糊优化设计研究。涉及的目标包括结构重量、精度、动力基频和安全度。此处的安全度是作者提出用以衡量结构所有构件强度与稳定性应力贮备的综合指标,它等于结构特征应力与许用应力之比。安全度目标的提出是为了解决一般工程技术人员总希望自己设计的结构宁愿较重一些也要安全可靠,在意外载荷作用下不易破坏的心理要求。天线结构多目标模糊优化设计算例表明了该工程结构多目标模糊优化模型与算法的合理性。天线结构多目标模糊优化是在计算机上对多变量、多工况、多约束、多目标大型工程结构进行模糊优化设计的成功实践^[123, 125, 130]。

航空航天器等复杂工程系统是由若干既相对独立又相互联系的分结构或分系统组成,总体设计部门往往将各分系统、分结构的设计任务、设计资源与设计指标等分配给位于不同地点的设计单位或不同科室人员分别独立地进行分析、设计与优化,并由系统总体设计部门进行综合调控。由于系统总体性能与各分系统性能间存在相互耦合的制约关系,使各分系统单独优化设计后组合起来的总系统一般说来并不能真正得到优化(只有在很特殊的情况下各分系统单独优化才能使总系统得到优化)。因而对这种分布式工程系统必须进行全局协调优化才能真正收到优化的效果。另一方面,总体人员又经常遇到各分系统设计人员向总体设计部门要求更多的“设计余量”、“设计条件”,如成本、重量、体积等设计资源的问题,而为缺乏使系统总体最优的全局调控理论方法与现代技术手段所困扰。作者在三期国家自然科学基金的资助下,从1992年开始,以我国空间飞行器总体优化设计为背景,开始从事工程系统与工程结构系统全局协调优化设计的理论、方法及应用研究^[131],主要研究成果包括:提出了一般工程系统全局协调优化设计的理论与方法,从数学规划极值条件理论上论证了各分系统单独优化与总系统优化的关系^[137];提出了具有广泛一般性的普遍型分解协调规划的数学模型与求解途径,本普遍型分解协调规划模型可概括目前所见到的国内外几乎所有分解协调优化的数学模型^[144];提出了设计条件最优分配的两种对偶主导思想及其数学模型和求解算法,为一类常见的工程系统全局协调优化问题提供了实用模型与求解途径^[134]。根据设计条件最优分配的两种主导思想,提出了工程结构系统全局协调优化设计数学模型的具体表达形式与求解算法;提出了可以考虑相互影响的各分结构单独进行静动力分析的结构模型与分析技术,成功解决了由各分结构单独分析求得的强度、刚度等静动力性态计算结构总系统强度、刚度等静动力性态的理论难题^[138, 139, 140, 141]。将以上理论与方法成功应用于某双旋卫星等空间飞

行器结构系统的全局协调优化设计^[135, 136]和工程系统可靠度全局协调优化^[129]。提出了在互联网上对异地分布式工程结构系统进行全局协调优化设计的问题与实现信息交流的技术途径。研制了相应软件,在互联网上成功实现了某卫星结构系统的全局协调优化设计计算,将目前的产品网络化协同概念设计推进到网络化协同参数优化设计阶段^[152]。结构系统全局协调优化设计的有关研究成果发表于本学科顶级国际学术期刊“*Structural And Multidisciplinary Optimization*”^[147, 148, 150, 160]。

在按预定性态设计结构的结构综合方面,作者的原创性研究成果包括:按预定位移设计桁架结构、天线结构严格保型设计、按预定性能设计微机电系统(MEMS)器件结构。

为解决大型高精度保型天线结构的严格保型设计问题,作者从一般桁架结构按预定位移设计的理论研究着手,从结构线性分析方程出发推导出求解桁架杆截面积变量的线性设计方程组。提出的理论在实质上是结构分析的反问题,是典型的结构综合问题,将提出的方法用于一般精密结构的设计,可以使结构的变形满足工程设计提出的由等式方程决定的严格要求。基于按预定位移设计结构的理论,作者给出了天线结构严格保型设计的简捷方法,本方法可使设计的天线反射体在任何姿态的自重及外载作用下变形后,表面点都能落在预定的理想同族反射曲面上,首次严格地实现了冯·霍纳(Von. Hoener)1967年提出的天线结构保型设计思想^[44],为某些有严格变形条件的精密结构设计提供一条新的途径^[111, 112, 115]。近年来,作者与美国加州大学伯克利分校(U.C. Berkeley)机械系的教授合作,将按预定性态设计结构的理论推广到微机电系统(MEMS)器件的结构设计,从MEMS器件性能分析的SUGOR软件出发,推演出性能设计方程组,采用牛顿迭代解法,求解这种非线性性能设计方程组,即可使MEMS器件具有预定性能。本方法与U.C. Berkeley采用的遗传算法^[83, 85]和退火算法^[86]等自然模拟优化算法相比,计算效率与计算精度大大提高,例如对某谐振器的设计综合计算,采用遗传算法和退火算法需要上万次分析,计算时间达4~5小时,计算相对误差达5%,本方法仅需约二十次分析,计算时间不超过20秒,计算相对误差小于0.01%^[151, 159]。

结构分析是结构优化的前提。近年来,作者在将本书提出的结构优化理论与方法研究成果应用于工程结构优化设计过程中,进行了大量的结构有限元分析计算实践。本书还介绍了作者在机械结构分析方面的创新性研究和对一些结构分析关键问题的深入思考,包括:部分结构分析与整机结构分析问题、组装式机械产品结构分析中的接触非线性、螺栓预紧力与轴承等效刚度等问题、结构静动力分析中结构对称性的利用问题、对线性小变形假设的理解与利用问题、结构的无约束平衡与定位约束问题、具有俯仰驱动天线结构的分析技巧问题^[105, 107]等,如果对这些问题认识不正确,难免会在结构静动力分析中发生错误或带来不必要的麻烦,相反,如果对这些问题有深刻正确地认识,会给结构分析带来很多方便,甚至会有出乎意料的惊喜。总之,结构有限元分析仅仅会商用软件的操作使用是远远不够的,决定结构分析结果合理性与准确程度的关键在于所建模型、载荷、约束与实际情况的符合程度。对于同一机械产品结构有限元分析问题,由于不同力学功底的人对模型、载荷、约束的不同认识和不同处理,结构分析计算结果会有很大差异,处理不当,分析结果与实际情况会严重不符,会使企业人员丧失对产品结构进行有限元分析的信心,反而败坏了结构有限元分析技术的名声!

大型复杂结构优化设计电算软件的研制及上机算题是十分繁重的工作,往往需要花

费很多时间和精力,作者在这方面花费的时间和精力不少于用于理论及方法研究所用的时间和精力。以往人们往往不够重视这方面的工作,有关理论及方法研究的文献也很少述及这方面的工作。实际上,很多理论方法问题往往必须通过电算才能发现问题,使之得到严格考验,从而更加深入和符合实际,有这种体验的人往往在自己的理论与方法未上机计算得到合理结果之前是不能安心的。

近年来,随着系统论、信息论、控制论、概率论、模糊数学、计算数学、计算力学、计算机科学以及人工智能等应用学科的日益成熟和发展,工程结构系统设计理论正面临着突飞猛进的局面。未来的工程结构系统设计将在以下几方面表现出其特色:

1. 信息处理的科学化:要求全面、正确、如实地处理工程设计中的各种信息。这些信息既有确定性信息,还有大量的包括随机性、模糊性、不确知性信息等在内的不确定性信息。如不考虑客观存在的不确定性信息,将会在工程设计中导致实质性的矛盾。

2. 大系统全局全寿命优化:要求必须把整个工程结构系统当做一个有机联系的大系统来考虑。工程结构设计方案的好坏不能孤立地从各个子结构系统的局部目标来判断,而要从整个工程结构系统的总体目标和全寿命周期考虑,进行全寿命多目标全局性协调优化。

3. 结构行为的自控化:对已有结构,附加消极或积极的控制机构,以控制结构的反应。进一步还可设计具有自适应能力的结构,如大型天线结构的保型设计就是一种自适应设计。

4. 设计过程人工智能化:研究工程结构的 CAD/CAE、专家系统,使计算机在一定程度上具有人类的智能,以在一定范围内代替人进行工程结构设计。这就必须使其能够较好的处理模糊性等不确定性信息。

进行工程结构现代设计理论及方法的研究,就是要从这些方面作出努力,为工程结构设计理论的飞跃助一臂之力。本书所介绍的研究成果也正是在这些方面作出了努力。

近年来,我国已迅速发展成为制造大国,标有“Made in China”的中国造产品遍布全球。提高产品质量,降低生产成本,追求利润最大化无疑是制造业追求的主要目标。但制造业市场竞争激烈,产品更新换代不断加快。谁的产品技术含量高,质量好,成本低,市场响应快,谁就能最大限度的占领市场,获取定单,创造利润。为提高机械制造业产品的市场竞争力,提高产品结构的设计质量与设计效率无疑具有重要意义。

目前,我国制造业 CAD 的普及工作已做得较好,但多停留在‘甩图板’的低级阶段,较少涉及计算机辅助分析仿真及自动优化设计的高级阶段。政府与企业人员将产品的计算机辅助设计 CAD 狭义地理解为使用计算机进行产品的造型——俗称“甩图板”,而将产品结构分析仿真与优化设计归于计算机辅助工程 CAE,实际上,因为分析与优化也是属于设计的重要环节,所以产品结构分析与优化设计也应属于 CAD,即属于 CAD 的高端技术。无论如何理解,与狭义的 CAD——“甩图板”相比,产品结构分析、综合与优化设计具有更大的难度,但对产品结构设计与设计效率的提高具有更为重要的作用。

近几十年来,学术界在结构分析与优化设计方面取得了许多很有价值理论与方法研究成果,但在制造业的产品设计中获得应用的却并不算多。这主要是因为结构分析、综合与优化设计理论具有较大难度,一般企业技术人员较难掌握,另一方面部分理论研究

成果的研究背景与工程实际有较大差距或脱离工程实际，导致难以获得应用。本书的突出特点是理论学术性与工程应用性都很强。作者从事科研的目的也正是为了以自己的学识和聪明才智为祖国的发展建设做出贡献，本书若能为此奉献绵薄之力，作者将会感到无限欣慰。

作者发现，虽然有不少高等院校师生和企事业技术人员在从事工程结构的分析设计和教学科研工作，并取得了不少研究成果，但却缺乏系统深入的参考书，故将自己的以上研究成果有机地组织起来，辅以必要的专业基本知识和数学理论预备知识，形成本书。希望本书既能成为反映作者研究成果的专著，又能成为有关工程技术人员和高校师生从事教学、科研时可以直接利用的参考书。

作者从 1978 年开始在我国著名天线结构专家叶尚辉教授的指导下，从事天线结构保型及优化设计的理论研究和工程应用工作，提出了特别适用于天线结构优化设计的结构优化导重法和严格保型设计的理论解法。1985 年开始，作者又在我国著名结构力学专家王光远院士的指导下从事工程结构设计理论研究，从按预定位移设计结构与结构自适应设计角度，将天线结构保型设计提高到对精密结构设计普遍适用的高度，提出了更为实用的解法。同时提出了全面考虑工程优化设计中各种模糊因素的结构多目标模糊优化设计的理论与解法，将其成功应用于天线等结构的多目标模糊优化设计。导师活跃的学术思想、高深的学术造诣、严谨的治学作风、正直的作人风骨使学生终生受益，永志不忘。作者愿借此机会向我尊敬的导师叶尚辉教授、王光远院士表示诚挚、衷心的感谢！

在本书理论方法的工程应用与写作过程中，我的博士研究生与硕士研究生们，做了大量的工程应用计算与书稿整理校对工作，在此深表谢意。

作者将十分感谢读者对本书内容提出的批评指正、讨论意见和改进建议。

谨以本书献给我可爱的祖国；尊敬的老师和亲友们！

陈树勋
2008 年 3 月

目 录

绪言	1
----------	---

第一篇 结构优化设计的导重法

第一章 结构优化设计的导重法	1
§ 1.1 结构优化设计概述	1
§ 1.2 结构优化设计极值理论的几个关键问题	7
§ 1.3 虚功准则法及其缺陷	13
§ 1.4 重量约束结构优化设计的导重法	18
§ 1.5 导重及导重准则的意义与迭代控制	24
§ 1.6 多性态约束结构优化的导重法	30
§ 1.7 方根包络函数与结构特征应力	34
§ 1.8 工程结构性态约束最轻量化设计	39
第二章 结构优化的敏度分析	45
§ 2.1 概述与结构静动力分析基本方程	45
§ 2.2 结构位移与构件应力的敏度分析	47
§ 2.3 刚度矩阵与载荷阵的敏度分析	50
§ 2.4 结构动力特性的敏度分析	56
第三章 结构优化导重法在天线结构优化设计中的应用	61
§ 3.1 天线结构设计	61
§ 3.2 天线结构反射面精度计算	64
§ 3.3 高精度天线结构近似保型优化设计	70
§ 3.4 天线结构精度函数的导重计算	73
§ 3.5 天线结构近似保型优化设计算例	80
§ 3.6 一般天线结构多性态约束优化设计	83
§ 3.7 天线结构多约束最轻量化设计算例	85
§ 3.8 结语	90

第二篇 求解结构优化准则方程组的迭代算法

第四章 求解非线性方程组的直接迭代步长因子法	91
§ 4.1 概述	91
§ 4.2 求解单变量非线性方程的直接迭代步长因子法	93
§ 4.3 求解多变量非线性方程组直接迭代的收敛条件	97
§ 4.4 求解非线性方程组的直接迭代步长因子法	99
§ 4.5 步长因子取值范围的复平面图解	103
§ 4.6 迭代计算中步长因子的确定	105
第五章 基于埃特金法的非线性方程组解法	109
§ 5.1 求解多变量非线性方程组的拟埃特金法	109
§ 5.2 求解多变量非线性方程组的埃特金—陈法	112
§ 5.3 结语	116

第三篇 按预定性态设计结构

第六章 按预定位移设计结构	117
§ 6.1 概述	117
§ 6.2 桁架结构的矩阵计算关系	118
§ 6.3 结构模型与设计方程	120
§ 6.4 数学模型与求解方法	122
§ 6.5 变量缩减与最少变量设计	126
§ 6.6 理论的推广与应用	131
第七章 天线结构严格保型设计	133
§ 7.1 天线结构的严格保型方程	133
§ 7.2 严格保型设计的数学模型与解法	135
§ 7.3 严格保型设计的算例	137
§ 7.4 天线结构严格保型位移的预定与算例	140
§ 7.5 结语	142
第八章 按预定性能设计微机电系统 (MEMS) 的器件结构	143
§ 8.1 概述	143
§ 8.2 微机电系统的分析方程、分析方法与分析工具	144
§ 8.3 微机电系统的设计方程与求解方法	145
§ 8.4 按预定性能设计某微型谐振器结构	147
§ 8.5 几种设计综合方法比较	150

第四篇 结构模糊优化设计

第九章 结构模糊优化设计的理论与方法	153
§ 9.1 结构软设计简介.....	153
§ 9.2 结构优化设计中的模糊性.....	155
§ 9.3 具有普通模糊约束的单目标模糊优化设计.....	158
§ 9.4 具有广义模糊约束的单目标模糊优化设计.....	163
§ 9.5 普遍型模糊规划的数学模型.....	165
§ 9.6 模糊目标的满意度与模糊约束的满足度.....	168
§ 9.7 普遍型模糊规划解的理论.....	171
§ 9.8 模糊满意域与模糊可用域.....	173
§ 9.9 对称型解法——模糊判决法.....	177
§ 9.10 不对称型解法——最优约束水平法.....	179
§ 9.11 优化目标与约束的相互转化.....	186
§ 9.12 算例.....	186
§ 9.13 结语.....	191
第十章 天线结构的多目标模糊优化设计	193
§ 10.1 概述.....	193
§ 10.2 天线结构优化设计的多个目标.....	194
§ 10.3 天线结构多目标模糊优化的数学模型.....	196
§ 10.4 模糊满意区间与模糊允许区间.....	197
§ 10.5 天线结构多目标模糊优化的解法.....	199
§ 10.6 天线结构多目标模糊优化与导重法的衔接.....	200
§ 10.7 算例.....	203
§ 10.8 结语.....	210
§ 10.9 天线结构分析与优化设计系列程序——OAS 简介.....	211

第五篇 工程结构系统设计的全局协调优化

第十一章 工程大系统设计的全局协调优化	217
§ 11.1 概述.....	217
§ 11.2 各分系统单独优化与总系统优化的关系.....	220
§ 11.3 分解协调规划的一般数学形式——普遍型分解协调规划.....	227
§ 11.4 设计条件最优分配的主导思想与数学模型.....	230
§ 11.5 设计条件最优分配问题的求解与算例.....	234

第十二章 工程结构系统设计的全局协调优化	242
§ 12.1 工程结构系统设计的全局协调优化问题	242
§ 12.2 工程结构系统设计全局协调优化的数学模型与求解方法	247
§ 12.3 严格考虑相互影响的各分结构静动力分析技术	254
§ 12.4 结构系统总体静动力性态与分结构静动力性态的计算关系	261
§ 12.5 结构系统总体刚度函数与强度函数的敏度计算	265
第十三章 结构系统全局协调优化设计的工程应用	268
§ 13.1 某卫星结构系统全局协调优化设计问题与初始结构有限元分析	268
§ 13.2 结构全局协调优化设计的计算步骤框图	270
§ 13.3 某双旋卫星结构系统全局协调优化设计计算	274
§ 13.4 结构系统全局协调优化设计编程	276
§ 13.5 基于互联网的分布式工程结构系统协同优化设计	279
§ 13.6 工程系统设计的两类分解协调优化讨论	286

第六篇 结构分析技术

第十四章 机械结构分析技术	291
§ 14.1 概述	291
§ 14.2 结构静动力分析中结构对称性的利用	295
§ 14.3 结构无约束平衡与定位约束	297
§ 14.4 具有俯仰驱动天线结构的分析技巧	300
§ 14.5 组装式机械结构分析技术	304

第七篇 结构优化设计导重法工程实用软件研制与应用案例

第十五章 结构优化设计导重法工程实用软件研制	309
§ 15.1 概述	309
§ 15.2 工程结构优化设计通用数学模型的规范化处理	311
§ 15.3 以 ANSYS 为分析器以导重法为优化器的 工程结构优化设计软件 SOGA 研制	314
第十六章 机械 — 结构优化设计导重法工程应用案例	319
§ 16.1 双模轮胎硫化机结构的有限元分析与优化设计	319
§ 16.2 散装水泥车结构的有限元分析与优化设计	326
§ 16.3 装载机前车架载荷计算、结构有限元分析与优化设计	333
§ 16.4 后装式压缩垃圾车结构的载荷表达、有限元分析与优化设计	344
§ 16.5 拉臂式压缩垃圾车的动力学仿真分析与结构优化设计	356

附 录

附录 I 模糊数学基本知识	376
§ I-1 模糊子集的概念	376
§ I-2 隶属函数的确定	378
§ I-3 模糊子集的基本运算规则	381
§ I-4 水平截集与分解原理	383
§ I-5 扩展原理	385
附录 II 广义逆矩阵与线性方程组求解	389
§ II-1 概述	389
§ II-2 几种广义逆矩阵及其求法	390
§ II-3 广义逆矩阵与解线性方程组	395
参考文献	398

第一篇 结构优化设计的导重法

第一章 结构优化设计的导重法

§ 1.1 结构优化设计概述

一、结构优化设计概要

1. 结构优化设计是利用电子计算机、现代结构分析计算技术和现代结构优化计算方法对结构进行自动设计的技术。结构优化设计可以大幅度缩短产品设计周期、提高设计效率和设计质量，对于我国经济发展具有十分重要的意义。

2. 结构优化设计的目的是寻求结构的最佳设计方案，以完美解决结构刚度、强度等静动力特性与结构重量、造价等设计可用资源之间的矛盾。

3. 结构优化设计的两种模型：

(1) 在静动力特性满足要求的前提下，最小化结构设计所需用的设计资源。

(2) 在有限的设计资源条件下，最优化结构的静动力特性。

两种优化模型是对偶的。

4. 结构优化设计的实质是合理分配设计资源，对于重量最小化问题，其实质是材料重量在结构空间及构件间的合理分配。

5. 结构优化设计是一个迭代计算的过程，需要进行“结构静动力特性分析—优化迭代产生新设计方案—结构再分析—……”的反复迭代计算，产生一系列设计方案，逐步逼近最优设计方案。

6. 只有数学理论意义上的最优设计，实际工程中不存在最优设计。这是因为实际工程产品设计中需要考虑多种目标和各种客观条件约束限制，这些目标和约束往往是相互制约的，并且具有局限性、主观性和可变性，还有目标、约束和作为寻优基础的各种信息所具有的不确定性，这些因素都导致在实际的工程结构设计中不存在绝对的“最优解”。实际工程结构设计中应当按照结构软设计理论与结构模糊优化的理论方法追求“满足满意解”。

7. 按照一般优化理论与方法求出的结构最优设计方案只具有理论指导意义。实际工程中的企业方可根据该最优设计方案结合企业实际情况产生更加符合工程实际的结构设计方案。

二、结构优化设计的数学模型与特点

遍及机械工程、航空航天、土木工程、车辆船舶、机器设备等领域的具有广泛一般性的工程结构优化设计的数学模型可以表达为

$$\text{求} \quad X = [x_1, x_2, \dots, x_n, \dots, x_N]^T \in \mathbf{R}^N, \quad (1-1)$$

$$\text{最小化} \quad f(X), \quad (1-2)$$

$$\text{并满足} \quad h_i(X) = 0 \quad (i=1, 2, \dots, I) \quad (1-3)$$

$$\text{与} \quad g_j(X) \leq 0 \quad (j=1, 2, \dots, J) \quad (1-4)$$

$$\text{及} \quad X^L \leq X \leq X^U. \quad (1-5)$$

简记为

$$\left\{ \begin{array}{ll} \text{Find} & X = [x_1, x_2, \dots, x_n, \dots, x_N]^T \in \mathbf{R}^N \\ \text{min} & f(X) \\ \text{s.t.} & h_i(X) = 0 \quad (i=1, 2, \dots, I) \\ & g_j(X) \leq 0 \quad (j=1, 2, \dots, J) \\ & X^L \leq X \leq X^U. \end{array} \right.$$

式中 $X = [x_1, x_2, \dots, x_n, \dots, x_N]^T \in \mathbf{R}^N$ 为 N 维实数设计变量组成的设计向量, 它可包括截面积、板厚等构件尺寸变量、结构形状几何尺寸变量、拓扑变量等多种设计变量; $f(X)$ 为结构重量或其他静动力特性决定的目标函数; $h_i(X)$ ($i=1, 2, \dots, I$) 与 $g_j(X)$

($j=1, 2, \dots, J$) 为由结构位移、构件应力等静动力性态与结构谐振频率、重量等静动力特性决定的约束函数, I 与 J 分别为等式与不等式约束总数; X^L 与 X^U 分别为由设计向量各分量的下限与上限构成的向量, $X^L \leq X \leq X^U$ 为设计变量范围约束, 表示设计向量的各个分量都不能超出它的上下限。

结构优化设计的主要特点是: 作为目标函数与约束函数的结构静动力性态 (位移、应力等) 与结构静动力特性 (谐振频率等) 一般是结构设计变量的高次非线性隐式函数, 一般要通过有限元分析等现代结构数值分析方法才能求得。

目前的机械优化设计教材^[16]均只涉及轴、弹簧等单个构件优化, 连杆、凸轮等运动机构优化, 齿轮、变速箱等零部件优化, 尚未涉及机械结构的优化设计。而单个构件优化、运动机构优化与零部件优化的目标函数与约束函数可通过材料力学、机构运动学与机械原理等相关计算公式表示为设计变量的显函数, 无需动用有限元分析等结构现代数值分析计算方法, 采用一般的数学规划法即可求解这类较简单的机械优化设计问题。

结构优化设计与上述一般机械优化设计相比具有较高的难度, 结构优化设计必须采用特有的更有效的优化设计方法。

三、结构优化设计方法概述

1. 数学规划法

(1) 数学规划法是求解优化问题的基本方法, 它不仅适用于求解一般优化设计问题,