

SHUANGXIANG GUDING WANGGE
JIANJIN JIEGOU YOUHUA FANGFA
JI QI GONGCHENG YINGYONG

双向固定网格 渐进结构优化方法 及其工程应用

刘毅 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

双向固定网格 渐进结构优化方法 及其工程应用

刘毅 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

·北京·

内 容 提 要

本书在渐进结构优化方法的基础上提出了一种进行形状优化的“细啃”技术和具有更好边界模拟精度的固定网格边界处理技术——双向固定网格渐进结构优化方法。该方法的优势在于能减少最优拓扑和形状对于初始迭代点的依赖，更有利于获取全局最优解。利用双向固定网格渐进结构优化方法研究了复合材料板壳结构开孔形状优化问题以及地下洞室支护拓扑优化问题，取得了较好的效果。

本书共有6章内容，分别为：绪论、渐进结构优化方法基本原理、改进的固定网格渐进结构优化方法及其应用、双向固定网格渐进结构优化方法及其应用、简单洞室支护优化及其影响因素分析、大型地下洞室群最优锚固支护探讨。

本书可供结构优化研究人员使用，也可供相关专业的大专院校师生参考。

图书在版编目（C I P）数据

双向固定网格渐进结构优化方法及其工程应用 / 刘毅著. — 北京：中国水利水电出版社，2020.12
ISBN 978-7-5170-9339-8

I. ①刘… II. ①刘… III. ①网格结构—结构设计
IV. ①TU311

中国版本图书馆CIP数据核字(2020)第272838号

书 名	双向固定网格渐进结构优化方法及其工程应用 SHUANGXIANG GUDING WANGGE JIANJIN JIEGOU YOUHUA FANGFA JI QI GONGCHENG YINGYONG
作 者	刘毅 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京瑞斯通印务发展有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 8印张 195千字
版 次	2020年12月第1版 2020年12月第1次印刷
印 数	0001—1000册
定 价	45.00元

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社营销中心负责调换
版权所有·侵权必究

前 言

渐进结构优化方法 (Evolutionary Structural Optimization, 简称 ESO) 是 1993 年由 Xie 和 Steven 所提出, 近些年来发展迅速, 已在结构拓扑优化方面展现出强大的生命力。

本书作者长期从事渐进结构优化方法的研究, 通过在工作中与国内同行的交流, 感觉到目前国内尚未有较好介绍渐进结构优化方法的入门书籍, 因此将渐进结构优化的基本原理和作者近些年来的一部分研究成果整理成书, 供从事渐进结构优化方面工作的技术人员参考使用。

本书的主要内容分为 6 章, 分别为: 绪论、渐进结构优化方法基本原理、改进的固定网格渐进结构优化方法及其应用、双向固定网格渐进结构优化方法及其应用、简单洞室支护优化及其影响因素分析、大型地下洞室群最优锚固支护探讨。力图通过结构优化方法发展历程的回顾来阐述渐进结构优化的主要特点, 通过简单算例阐述渐进结构优化的基本原理, 通过复合板开孔优化算例阐述改进的固定网格渐进结构优化方法和双向固定网格渐进结构优化方法的研究成果, 最后将渐进结构优化方法应用于洞室结构支护优化的问题。

本书的主要研究成果得到了清华大学金峰教授、澳大利亚悉尼大学李青教授的指导和帮助, 在此表示感谢!

本书内容精练、实用指导性强, 力求为读者进行深入浅出的讲解。但由于作者水平和资料所限, 书中难免存在疏漏之处, 敬请各位专家老师给予指导。

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 结构优化方法综述	1
1.1.1 结构优化方法的发展简史	1
1.1.2 传统的结构优化方法述评	2
1.2 渐进结构优化方法的研究历史及现状	3
1.3 复合材料板壳结构开孔形状优化研究综述	5
1.4 地下洞室支护优化背景	6
1.4.1 地下洞室工程的发展现状	6
1.4.2 地下洞室工程的研究方法综述	7
1.4.3 地下洞室支护设计的研究现状	10
1.5 本书的主要工作	11
第 2 章 渐进结构优化方法基本原理	13
2.1 渐进结构优化方法基本原理及特点讨论	13
2.2 传统渐进结构优化方法基本流程	14
2.3 几个常用的渐进结构优化方法敏感度	15
2.3.1 满 Mises 应力敏感度	15
2.3.2 刚度敏感度	15
2.3.3 位移约束敏感度	16
2.4 几个经典的例子	17
2.4.1 Michell 桁架	17
2.4.2 等表面应力结构	18
2.4.3 悬臂梁结构	18
2.5 重力坝基本断面形状优化	19
2.5.1 计算条件及初始域	20
2.5.2 计算结果分析	20
2.6 体积不变的可控孔数的双向渐进结构优化方法	21
2.6.1 方法流程	22
2.6.2 算例 1	23
2.6.3 算例 2	23
2.7 小结	24
第 3 章 改进的固定网格渐进结构优化方法及其应用	26
3.1 节点敏感度	26

3.1.1	Tsai - Hill 值强度准则节点敏感度	26
3.1.2	基于位移的节点敏感度推导	27
3.2	改进的用于渐进结构优化方法的固定网格技术	28
3.3	改进的固定网格渐进结构优化方法流程	30
3.3.1	控制开孔时机的方法	30
3.3.2	稳定判断和中止条件	31
3.3.3	流程概略	31
3.4	改进的固定网格渐进结构优化方法验证	32
3.5	复合材料方板开孔形状优化	33
3.5.1	单孔形状优化	33
3.5.2	不同开孔数对开孔形状的影响	35
3.5.3	不同叠层构造对最优孔形影响	37
3.5.4	两孔相互影响的历程	39
3.6	小结	40
第 4 章	双向固定网格渐进结构优化方法及其应用	41
4.1	基于统一敏感度的增加材料的技术	41
4.2	基于统一敏感度的双向渐进结构优化方法的验证	42
4.2.1	Michell 桁架算例	42
4.2.2	悬臂梁算例	44
4.3	双向固定网格渐进结构优化方法	45
4.3.1	新的中止条件	45
4.3.2	增加材料的法则	46
4.3.3	程序流程	47
4.4	复合材料壳结构开孔形状优化	48
4.4.1	壳结构开孔算例 1	48
4.4.2	壳结构开孔算例 2	49
4.4.3	壳结构开孔算例 3	50
4.4.4	荷载对最优孔形的影响	50
4.4.5	不同初始开孔对最优开孔的影响	52
4.5	小结	57
第 5 章	简单洞室支护优化及其影响因素分析	58
5.1	简单洞室有限元计算模型	58
5.2	几种典型的简单洞室稳定评价目标函数	59
5.2.1	以卸荷引起的总应变能为目标函数	59
5.2.2	防治洞室底鼓、帮鼓的目标函数	59
5.2.3	描述洞室总变形和顶底与边墙相对变形的目标函数	59
5.3	洞室稳定评价目标函数的敏感度推导	61
5.3.1	防治底鼓、帮鼓的敏感度推导	61
5.3.2	以洞室总变形为目标函数的敏感度推导	61

5.4	以卸荷引起的总应变能为目标函数的最优支护	62
5.4.1	$r=0$ 时的情况	63
5.4.2	$r=-0.35$ 时的情况	64
5.5	以防治底鼓和帮鼓为目标函数的最优支护拓扑	66
5.5.1	防治底鼓	66
5.5.2	防治帮鼓	68
5.5.3	防治底鼓和帮鼓	69
5.6	不同初始支护拓扑及迭代步长对最优支护的影响	71
5.6.1	初始支护拓扑对最优支护的影响	72
5.6.2	迭代步长对最优支护的影响	73
5.7	锚固对岩石的影响模型	73
5.7.1	锚固效应分析	73
5.7.2	锚固岩石等效模型	74
5.8	不同目标函数的最优锚固支护拓扑研究	76
5.9	不同边界条件对最优支护拓扑的影响	80
5.10	不同地应力场对最优支护拓扑的影响	81
5.11	各向异性对最优支护拓扑的影响	82
5.12	分层岩体对最优支护拓扑的影响	84
5.13	软弱带对最优支护拓扑的影响	84
5.13.1	不同部位未贯通的软弱区域对最优支护的影响	85
5.13.2	不同部位贯通的软弱带对最优支护的影响	86
5.14	限定锚固范围和深度的锚距优化设计	87
5.15	同时考虑锚距锚深优化的最优支护	88
5.16	锚固深度与洞室尺寸相对比值对最优锚固的影响	89
5.17	小结	90
第6章	大型地下洞室群最优锚固支护探讨	92
6.1	溪洛渡工程概况	92
6.2	溪洛渡地下厂房相关地质条件	95
6.3	计算模型及材料分区	96
6.4	溪洛渡二维地应力反馈计算	98
6.5	现有的锚固方案等效模型	99
6.6	洞室群稳定性评价与动态优化设计概念	101
6.6.1	简单的洞室群稳定目标函数	101
6.6.2	监测函数的基本概念及动态优化设计	102
6.7	以卸荷引起的总应变能为目标函数的最优锚固支护	103
6.8	不开挖主变室和调压井对主厂房最优锚固拓扑的影响	104
6.9	以描述边墙相对底角变形的监测函数为目标函数的最优锚固	105
6.10	小结	106
参考文献		108

第 1 章 绪 论

1.1 结构优化方法综述

1.1.1 结构优化方法的发展简史

公认的结构优化研究是从 1638 年伽利略研究等强度梁开始的。随后 300 年间的研究集中在以下几个方面：等强度梁模糊结构的设计；给定材料体积最小应变能设计；最小重量设计，特别是最小质量桁架的设计。1904 年，Michell 提出了满应力设计和同步破坏模式设计的概念，在此基础上发展了齿行法等实用技术。20 世纪 50 年代之前，结构优化所研究的问题都是相当简单的，制约结构优化发展的瓶颈是结构分析方法。

20 世纪 50 年代数学规划技术的发展极大地推动了优化方法在工程设计中的应用。1960 年，Schmit 把有限元分析和数学规划方法在结构优化设计中进行了联合，这是结构优化领域的一个里程碑，标志着结构优化成为了一门独立的学科。数学规划方法被迅速地应用到一些高度理想化的结构优化问题中，但是数学规划理论的计算量会随着设计变量的增加而迅速增加，当它应用于实际结构的优化时，因效率太低而难以推广，在这种背景下就出现了最优化准则法。

1968 年，Prager 等人针对简单连续体提出了分析形式的优化准则（COC）；同年，Venkayya 提出了离散型的优化准则（DOC）——均匀应变能密度准则，极大地带动了最优化准则方法的发展。此后，应力、位移、频率、屈曲、颤震等约束条件下的结构最优化准则被导出。

之后，大量学者研究了不同的最优准则的迭代算法。同时，以数学规划为基础的结构优化方法的研究也一直没有间断。对偶法的出现建立了数学规划方法和最优化准则方法之间的联系。

由于分析方法的限制，20 世纪 70 年代前，结构优化大多局限在尺寸优化的范畴。1973 年，Zienkiewicz 和 Gallagher 发表了形状优化领域的第一篇文章。之后，有限元、边界元等数值方法迅速被应用到结构形状优化领域。随着数值技术，特别是有限元技术的发展，结构优化的功能越来越强。进入 80 年代以后，结构优化的研究热点逐渐转向了形状优化和拓扑优化领域。

结构优化领域发展的另一个热点是仿生学方法的出现。1975 年，Holland 首先提出了模拟生物群体的进化历程的遗传算法的概念。随后，大量学者就遗传算法在结构优化领域中的应用进行了研究。

相对于形状优化而言，拓扑优化是更高层次的优化。早期的拓扑优化的研究基于基结构方法，用基结构方法研究杆系桁架结构拓扑优化已经比较广泛，但是连续体结构拓扑优

化很长时间都没有进展。

1988年, Bendsoe 和 Kikuchi 提出了均匀化结构优化方法, 这在结构拓扑优化领域开辟了一个新的天地。均匀化结构优化方法问世后立刻得到众多学者的响应。

1993年, Xie 和 Steven 发展了渐进结构优化方法, 提出了渐进优化的准则。1999年, 谢亿民等在《工程力学》发表了国内第一篇有关渐进结构优化的中文文献。近二十年来, 渐进结构优化方法已在一些公认十分复杂的问题中取得了很大进展, 目前它的基本概念和算法已被几个工程设计软件所吸收, 并已在土木建筑、机械结构等多个工程领域有所应用。

1.1.2 传统的结构优化方法述评

结构优化的概念框架包括问题识别、模型化、优化求解与评价等步骤。本书将逐项对其进行评述。

问题识别和评价是结构优化研究的第一步和最后一步。当前结构优化的应用与实际成效远远落后于优化理论的进展, 原因是多方面的, 工程师与结构优化研究人员在问题识别和评价方面的差异是重要原因之一。一方面, 工程师们不熟悉结构优化的理论和方法, 另一方面, 优化研究人员建立的优化目标不符合工程需要, 再加上在设计规范中没有明确采用优化设计的方法和要求, 这些因素限制了结构优化在实际工程中的应用。

将具体工程问题删繁就简进行识别之后, 建立相应的物理数学模型是优化的基础。所谓建模, 就是把识别后的工程问题简化为标准的优化模型。其主要过程包括: 抓住影响问题的主要因素, 提取相应的设计变量, 表示为 $X=[x_1, x_2, \dots, x_n]$; 建立评价方案优劣的目标函数或准则函数, 表示为 $F(X) \rightarrow \min$; 根据对问题的各种规定限制与要求, 确定有关的约束条件, 表示为 $h_j(X)=0, j=1, 2, \dots, k; G_i(X) \leq 0, i=1, 2, \dots, m; X \geq 0$ 。其中设计变量的选择往往是建模的核心内容。

在尺寸优化领域, 建模方式是比较简单的, 设计变量就是需要优化的尺寸变量, 目前对于这一领域的研究已比较成熟。

在形状和拓扑优化领域, 最初, 有限元节点坐标被作为设计变量, 但是学者们很快发现这一技术无法保证设计边界的光滑连续性。因此, 随后发展了采用直线、圆弧、样条曲线、多项式曲线、二次参数曲线、二次曲面等方法来描述连续体结构边界, 各类不同形式的曲线和曲面构成了不同的边界描述方法。Iman 提出了设计元方法, 他把 1 组控制几何形状的主节点作为设计变量, 减少了设计变量。但是这些方法都存在网格致畸的缺陷, 因此, 有时候需要辅以单元网格的自适应分析, 而自适应网格往往伴随着很大的计算量。边界元的发展也为形状优化提供了舞台。边界元的结点参数作为设计变量的优点在于不用重新划分网格, 但它的缺点是不够稳定。

均匀化理论和渐进结构优化方法都是以单元作为设计变量, 优化过程中, 不需要改变有限元网格, 也不存在网格畸形的问题, 但是它存在边界为阶梯状, 容易出现“棋盘”格式等问题。

建立模型之后, 接下来的工作就是寻求最优解。搜索最优解的方法大致可以归纳为三类: 数学规划法、最优准则法、仿生学方法。

在数学规划法中, 结构设计的寻优过程被当作是一个目标函数的数学极值问题, 这个

问题是被限制在有許多约束条件的 n 维空间里的, 这个极值搜索运用的是线性或非线性的数学规划法。目前常用的方法有: 单纯形法、罚函数法、乘子法、序列线性规划法、序列二次规划法、割平面法、可行方向法、梯度投影法、广义简约梯度法、复形法、可变动差法、随机试验法等。每一种数学规划法都有相应的适用范围, K. Schittkowski 等人就此进行了专门的研究。但总体来说, 直接采用数学规划理论需要很多次调用函数计算, 并且计算量随设计变量的增加而迅速增加, 因而对于实际结构的设计效率低、经济性差, 使这一类方法推广到实际的工程结构设计时存在较大的困难。

最优准则法的基本出发点是: 通过推导, 预先规定一些优化设计必须满足的准则, 然后根据一些理论化的迭代公式, 通过迭代求得最优解。优化准则法最突出的特点是迭代次数少, 且迭代次数对设计变量的增加不敏感, 因而具有很高的计算效率, 优化准则也易于编程; 然而在建立迭代公式的过程中经常需要引入一些假设, 这些假设往往与所研究问题的特点(如约束种类)等有关, 因此方法的通用性受到限制。更重要的是, 准则法的递推公式缺乏数学基础, 没有收敛性证明, 也许是引起迭代过程振荡或不收敛的原因。

混合法是将数学规划法与最优准则法相结合成为可能。实际上, 这种方法的要点是将最优准则概念与各种近似手段相结合, 把高度非线性的问题化为一系列近似的带有显式约束的问题, 之后就可以用现有的数学规划法有效地求解。这类方法目前存在的正在研究的热点问题有以下几方面: 如何选择中间函数和中间变量以得到约束函数的高度近似函数; 如何改进在每一步迭代中建立近似规划以及求解这一近似规划的方法; 如何有效求得约束函数(或中间函数)对设计变量(中间变量)的灵敏度。

最早出现的仿生学法是遗传算法, 它的哲学基础是达尔文的进化论, 物竞天择, 适者生存。对于优化设计问题, 类比于自然种群, 以一批设计点作为设计种群, 以优化目标来表示种群的适应性, 按照遗传算法的过程一代代进化, 以此产生越来越好的目标函数值。目前模拟自然界进化的算法主要有基因遗传算法, 模拟退火法和神经网络算法。遗传算法的主要优点是有很强的解题能力和很广的适应性, 有较强的全局优化性能。遗传算法的主要缺点是结构重分析次数很多, 收敛速度慢, 不利于工程应用等问题。所以它比较适合于设计变量较少的非连续性结构优化问题。

综上所述, 在结构优化领域, 传统的优化方法各有优劣, 不同的方法有不同的适用范围, 没有哪一种方法能确保求得全局最优解。一些学者指出, 以下几个方面的内容值得关注: 研制偏重于获取满意解而非严格意义上的最优解的启发式算法; 形状优化和拓扑优化领域的理论与应用研究; 根据优化的特点建立高精度近似敏感度; 结构优化的工程应用等。

渐进结构优化方法是一种研究拓扑优化和形状优化的启发式算法, 将这一领域的最新研究成果引入工程实践是一个值得研究的课题。

1.2 渐进结构优化方法的研究历史及现状

渐进结构优化方法(Evolutionary Structural Optimization, ESO)是近些年来迅速发展起来的一种结构优化方法, 其基本原理是逐步删除最不起作用的材料, 剩余结构逐步达

到最优解。

1993年, Xie 和 Steven 提出了渐进结构优化方法, 通过几个经典的结构优化的算例, 展示了这一方法应用于形状和拓扑优化的强大的优势。之后, 许多学者进行了广泛而深入的研究, 据不完全统计, 截至 2004 年, SCI 和 EI 检索到的相关论文已经超过 100 篇, 博士论文 6 篇, 专著 1 部。

Xie 和 Steven 用更多的经典算例验证了 ESO 方法的鲁棒性。Chu 等人研究了网格尺寸、单元移走速率、单元类型对最优拓扑的影响。文中指出单元移走速率处于一定限度以下时, 对最优拓扑影响较小; 网格尺寸对最优结构的细节有影响, 而对优化效率影响不大; 单元类型对最优拓扑影响较小。Zhao 等人的研究表明初始域的大小对频率约束的最优拓扑的影响显著。1997 年, Xie 和 Steven 出版了 *EVOLUTIONARY STRUCTURAL OPTIMIZATION* 一书, 对 ESO 方法的基本原理、参数影响及当前的研究进展进行了总结。

在研究的广度上, 渐进结构优化方法有了较大的进展。Xie 等人把 ESO 方法的适用范围从最初的满 Mises 应力准则扩展到刚度和位移约束、应力约束、频率约束、屈曲约束、扭转约束等其他传统力学领域, 并推导了相应的敏感度。Li 等人还把这一方法从力学问题扩展到热弹性、热传导、静磁场、不可压缩流体等一般的物理领域, 进一步扩大了 ESO 方法的应用范围。荣见华等人把 ESO 方法从各向同性均质材料扩展到了拉压性质不同的材料, 使之适用于以钢筋和混凝土为主要建筑材料的桥梁拓扑优化领域。最初的 ESO 方法应用于单工况单准则条件, 学者们把它扩展到多工况和多准则条件, 典型的有: 频率与刚度准则, 最大应力与刚度准则, 应力、刚度与稳定性约束准则。ESO 本质上是一种拓扑优化方法, 学者们把它扩展到能考虑形状和尺寸优化。最初的 ESO 方法只能应用于线弹性材料, Li 等人把它扩展到接触面优化的非线性问题。

随着 ESO 方法研究广度的拓展和深度的加深, ESO 方法也出现了许多需要解答的问题。

第一个问题是怎么评价所得到拓扑的优劣, Liang 等人建立了用于评价系统柔度以及位移的相应指标。

第二个问题是渐进结构优化方法在整个结构优化领域的地位问题。Tanskanen 研究了 ESO 方法的理论问题, 建立了满足某种限制的 ESO 方法与数学规划方法之间的联系; Kutylowski 探讨了拓扑优化中解的非唯一性问题; Rozvany 等人把 ESO 方法与传统的最优准则方法进行了综合, 就 ESO 方法的适用性提出了自己的看法, 并把 ESO 方法放到了整个结构优化领域来考虑, 提出了传统 ESO 方法的不足, 并对 ESO 方法和最优准则方法之间的关系进行了说明。

第三个问题, 是困扰所有结构优化方法的难题局部极值问题。局部极值问题指的是对于同一个结构优化问题, 当选取的初始值不同时, 得到的拓扑结构也不同, 优化结果收敛于局部极小点。与所有优化方法一样, 传统的渐进优化方法也不能确保解决局部最优问题。因此, 如何尽量保证解的全局最优性是许多研究人员正在研究的第三个热点问题。目前有 3 种解决思路: ① Zhao 等人提出的广义 ESO 方法, 主要是通过引入敏感度的精确表述避免因为敏感度的不精确造成的误删; ② 双向渐进结构优化方法 (bi-directional evo-

lutionary structural optimization, BESO), BESO 有两种增加材料的模式, 第一种增加单元的模式是在当前结构内的高敏感度单元的周边增加单元, 第二种是通过结构内单元的位移插值得到临近边界的空单元的位移以计算虚拟的敏感度, 按照虚拟敏感度的高低决定增加单元, 允许增加单元相当于提供了把错删单元重新加入结构的机会, 从而减少了误删单元的可能性; ③Reynolds 等人提出的材料进化迁移方法, 实际上, 这种方法建立了一种材料从高敏感度区域流向低敏感度区域的法则。

第四个值得关注的问题是优化解的边界光滑问题。传统的 ESO 方法是以一个单元作为材料删除的单位的, 因此, 它存在着边界为阶梯状的弊端, 其结果需要进行必要的后处理。目前的解决方法有以下几种: ①Reynolds 等人发展的逆适应方法, 它通过对边界单元的加密在一定程度上解决了边界光滑度的问题, 但是它丧失了 ESO 方法最基本的优势——简单性和高效率; ②把固定网格有限元技术引入 ESO 方法中, 这一方法虽然有一定的计算误差, 但是它较高的计算效率和光滑度保证了它是一种有前途的技术; ③周克明提出了将四边形蜕化为三角形以改善边界光滑度的方法, 取得了较好的效果。

第五个问题是网格敏感性与棋盘格式问题。网格敏感性是指对同一初始设计区域, 当采用不同的初始网格进行优化时, 所得最优结构的拓扑形式是不同的。在现有的渐进结构优化方法研究中, 有两种解决网格敏感性的方法: ①引入边界应力比参数方式来控制开孔时机; ②控制结构总的周长的方式来抑制过多的开孔。棋盘格式是 ESO 方法应该尽量避免的现象, 许多学者提出了简单的解决技巧。

如前所述, 把优化方法引入工程实际应用一直是各种优化方法研究的热点, ESO 方法也是这样, 从其诞生之日起就为学者们所关注。目前, 已经应用到桥梁结构拓扑优化、杆件连接结构的形状优化、机翼支撑设计优化、微型柔性结构优化设计、深潜器主框架拓扑优化、钢筋混凝土配筋优化、叠层复合材料方板开孔形状优化, 本书还将其引入重力坝体形优化和地下洞室开挖支护优化领域。渐进结构优化方法已逐渐由理论研究阶段进入工程应用阶段。

1.3 复合材料板壳结构开孔形状优化研究综述

由于具有比强度高特点, 叠层复合材料在结构工程、航空工程、汽车工程中应用广泛。由于一些特殊的技术要求, 如电缆布置、机构耦合、通风孔洞等, 一些开孔的结构是不可避免的。实际上, 由于孔的存在会显著地改变周围应力, 会对复合材料结构的寿命产生实质性的影响。因此, 一个很重要的设计目标就是最大程度减小开孔所引起的应力集中。

解决应力集中问题有两种典型解决方式, 一种是加固设计, 另一种是几何设计。前者是在不改变应力约束的条件下在孔的周围寻求最优化的加固形式, Becker 等人在保持孔形不变的条件下提供了一个很好的求解。但是, 加固设计需要额外的加工, 会增加制造费用。因此, 孔形的几何设计是解决应力集中问题的重要途径。许多学者就这一问题进行了研究。Backlund 等人用样条曲线模拟孔形在保持最大 Tsai - Hill 值约束下求解孔形优化问题。Vellaichamy 等人在不同的分层构造和荷载工况下优化椭圆孔形的方向和长短轴比。Ahlstrom 等人研究了不同分层构造条件下圆柱形复合材料结构压力容器的最优开孔

形状问题。Han 等人采用应变生长方法研究了以下两类问题：在体积不变的约束下得到统一的 Tsai - Hill 值分布；在保持最大 Tsai - Hill 不变的条件下最小化体积。与上述研究都是采用 Tsai - Hill 值不同，Mue 等人用 Huber - Mises - Hencky 应力作为孔形优化的准则。

除了上述强度准则，其他诸如动力和稳定约束也被作为孔形优化的准则。Sivakumar 等人以椭圆孔形的长短轴比为设计变量，以最大化基频和最小化质量为目标，采用遗传算法研究了尺寸优化问题。Bailey 等人调查了拟复合材料方板开孔形状对于屈曲和屈曲后行为的影响。Hu 等人用序列线性规划方法研究了开孔尺寸和分层方向对于最优屈曲荷载的影响。在一定程度上，这些结果反映了孔形优化设计的重要性。

实际上，由于存在可能的网格歧变，原来的形状优化技术几乎都需要进行网格重划分。传统的渐进结构优化的一个显著优点就是不需要重分网格。但是，传统的渐进结构优化方法也存在一个明显的缺点，即边界不够光滑。这一缺点在应用到形状优化时往往是致命的。Falzon 等人用传统的渐进结构优化方法研究了不同分层构造时单孔和多孔形状优化问题，得到了合理的结果，但是它的一个显著的缺点就是优化结果存在阶梯状的边界，必须要进行附加的后处理。更重要的是，阶梯边界可能会引起无法预料的应力集中从而造成对最优结果的错误的解释。而且以上的研究只能对开孔形状进行优化，而不能同时考虑开孔最优位置，因此，建立新的基于固定网格的边界光滑技术，发展功能更强的双向固定网格渐进结构优化方法，并用这种方法研究板壳结构开孔形状优化问题具有重要的意义。

1.4 地下洞室支护优化背景

1.4.1 地下洞室工程的发展现状

在水利水电工程、采矿工程、交通工程、市政建设中，地下空间的开发已经展现出强劲的发展势头。以水电工程为例，由于采用地下厂房有利于施工导流、枢纽泄洪消能布置，减少溢洪时雨雾对电站运行的影响，缩短建设周期，节省工程总投资。我国 20 世纪 90 年代后动工的峡谷高坝基本都采用地下厂房，如二滩、大朝山、江垭、棉花滩、溪洛渡、小湾、龙滩等，甚至一些河谷较宽的高坝也采用地下厂房布置，如百色水电站、向家坝水电站等。据统计，截至 2015 年底，我国已建成水电站地下厂房约 120 座，其中，装机超过 1000MW 以上的地下厂房水电站 40 余座，见表 1.1。表 1.1 中列出了我国已建单机容量排名前 20 的地下式水电站的主厂房、主变室、尾水调压室等三大洞室的特征参数。其中，溪洛渡电站厂房分左右岸地下厂房，各装机 9 台机组，分别由主厂房、主变室、尾水调压室等三大主洞室以及 9 条压力管道、9 条母线洞、9 条尾水管及尾水连接洞、3 条尾水洞、2 条出线竖井以及通排风洞、防渗排水廊道等组成。现代的地下洞室支护，一般都采用新奥法，充分利用围岩自身的抗力来实现大型地下洞室群的柔性支护。喷混凝土、岩体灌浆和锚索、锚杆支护都是现在常用的支护手段。洞室群的支护设计就是对这些支护手段的布置、范围、支护强度进行设计，支护设计关系到大型地下洞室群的安全，而且也是工程造价是否经济的关键因素。因此，发展大型地下洞室群的新的支护设计方法不

仅具有理论意义，也有很大的实际价值。

表 1.1 我国已建单机容量排名前 20 的水电站地下洞室群特征参数表 (截至 2015 年)

序号	电站名称	装机容量 (MW)× /MW	单机容量 (MW)× 台数/台	厂房尺寸 (长×宽×高) /m×m×m	主变室尺寸 (长×宽×高) /m×m×m	调压室尺寸 (长×宽×高) /m×m×m	岩性	建成 年份
1	向家坝	3200	800×4	255.4×33.4×85.2	192.3×26.3×23.9	—	砂岩, 夹少量泥岩	2014
2	溪洛渡	13860	770×18	L: 439.74×31.9×75.6 R: 443.34×31.9×75.6	349.3×33.32×19.8	317×95.0×25.0	玄武岩	2014
3	三峡右岸	4200	700×6	311.3×32.6×87.30	—	—	花岗岩	2009
4	小湾	4200	700×6	298.4×30.6×79.3	257×22×32	圆柱形, 直径 38m, 高 91.02m	片麻岩	2012
5	拉西瓦	4200	700×6	311.7×30.0×73.8	354.75×29.0×53.0	圆柱形, 直径 32m, 高 69.3m	花岗岩	2011
6	龙滩	6300	700×9	388.5×30.3×74.5	397×19.5×22.5	95.3×21.6×89.7	砂岩、泥板岩	2009
7	糯扎渡	5850	650×9	418×29×79.6	348×19×22.6	圆柱形, 直径 38m, 高 94m	花岗岩	2014
8	大岗山	5850	650×9	226.5×30.8×73.7	144.0×18.8×25.6	132.0×24.0×75.08	花岗岩	2015
9	锦屏二级	4800	600×8	352.4×28.3×72.2	374.6×19.8×31.4	192.3×26.3×23.9	大理石	2014
10	官地	2400	600×4	243.4×31.1×76.3	197.3×18.8×25.2	205×21.5×72.5	玄武岩	2013
11	锦屏一级	3600	600×6	277×29.6×68.8	201.6×19.30×32.54	圆柱形, 直径 41m, 高 80.5m	大理岩	2014
12	构皮滩	3600	600×6	230.4×27.0×75.3	207.1×15.8×21.34	—	灰岩	2011
13	瀑布沟	3300	550×6	294.1×30.7×70.1	250.3×18.3×25.3	178.87×17.4×54.15	花岗岩	2010
14	二滩	3300	550×6	280.3×30.7×65.3	214.9×18.3×25	203×19.8×69.8	正长岩、玄武岩	2000
15	水布垭	1600	400×4	168.5×23.0×65.4	—	—	灰岩、页岩	2009
16	鲁地拉	2160	360×6	267×29.8×77.2	203.4×19.8×24	184×24×74	变质砂岩	2014
17	彭水	1750	350×5	252×30×68.5	—	—	灰岩、灰质页岩	2008
18	小浪底	1200	300×4	251.5×26.2×61.44	174.7×14.4×17.85	175.8×16.6/6.0×20.6	砂岩、黏土岩	2001
19	大朝山	1350	225×6	234×26.4×63	157.65×16.2×17.95	271.4×22.4×73.6	玄武岩	2003
20	思林	1050	262.5×4	177.8×27.0×73.5	130×19.3×37.7	—	灰岩	2009

1.4.2 地下洞室工程的研究方法综述

早在原始社会, 人类为了居住开始使用地下洞穴。几千年来, 人类在生活和生产中逐渐积累了很多保持围岩稳定的方法和经验。但是对围岩稳定理论的深入研究, 还是随着科学和大工业的发展开始的。

作为地下洞室围岩稳定研究方法的岩石力学理论可以分为 4 个发展阶段。

第一个阶段是岩石力学的萌芽阶段（19 世纪末—20 世纪初）。产生了古典的压力理论以解决岩体开挖的力学计算问题。这类理论认为，作用在支护结构上的压力是其上覆盖的岩体的重量。这类理论的代表人物有海姆、朗金、金尼克等。

第二个阶段是岩石力学的经验理论阶段（20 世纪初—20 世纪 30 年代）。随着开挖深度的增加，人们发现，古典压力理论不符合实际情况。这一阶段出现了根据生产经验提出的地压理论，并开始用材料力学和结构力学的方法分析地下工程的支护问题。这其中最有代表性的就是普罗托吉雅柯诺夫和太沙基提出的散体压力理论，这类理论认为，当地下工程埋藏深度较大时，作用在支护结构上的压力只是围岩塌落拱内的松动岩体重量。这一理论指导着当时的工程实践，发挥了一定作用。但事实上，围岩的塌落并不是形成围岩压力的唯一来源，也并不是所有的地下空间都存在塌落拱，而且在很多情况下围岩和支护可以形成一个共同承载系统。

第三个阶段是岩石力学的经典理论阶段（20 世纪 30—60 年代）。力学理论的进展也为岩体工程提供了新的研究方法，弹性力学和塑性力学被引入岩石力学，确立了一些经典计算公式，形成了围岩和支护共同作用的理论，岩石力学在该阶段逐步发展成为一门独立的学科。在这一阶段，形成了“连续介质理论”和“地质力学理论”两大学派。连续介质理论以固体力学作为基础，从材料的基本力学性质出发来认识岩石工程的稳定问题。这一理论的代表人物有萨文、鲁宾涅特、芬纳、塔罗勃、卡斯特纳等。地质力学理论注重地层结构和力学性质与岩石工程稳定性的关系。这一学派的代表性人物是克罗斯、斯梯文、米勒等。该学派的一个重要贡献就是在地下洞室工程施工领域提出了著名的“新奥法”，这一方法至今仍被国内外广泛应用。

第四个阶段是岩石力学的发展阶段（20 世纪 60 年代）。随着力学理论，有限元技术，计算机技术的发展分析手段也越来越多。目前，主要的手段有以下四种：计算方法（解析和数值）；地质力学及其他物理模型试验；室内及野外岩石力学试验，原位监测及信息反馈；工程经验方法。

数值计算方法因为其具有低成本、可重复性等优势，是岩石力学的研究热点之一。目前较为常用的方法有：有限元法、边界元法、无限元法、有限差分法、加权余量法、无单元法、离散元法、刚体弹簧元法、不连续变形分析法、数值流形方法等。近年来，有许多学者把几种数值方法结合起来研究岩石力学问题，取得了较好的效果。所有这些岩土工程数值方法中，以有限元为代表的连续性数值分析方法应用较为广泛，积累了丰富的经验。

岩石力学的另一个研究热点就是对岩石本构理论的研究。岩石本构理论是建立岩石力学物理模拟、数值模拟与计算分析的基础，是进行岩石力学理论研究的核心问题。目前，在宏观意义上建立起来的岩石弹塑性理论、流变学理论以及损伤力学理论等等已经得到不断发展和完善，并且已经在水电站地下工程设计等实际工程中得到应用。

岩石力学的发展为我们预测围岩力学行为提供了可能，但是，由于岩体的复杂性，在工程应用中仍有许多很大的困难。例如在岩石力学数值计算中，根据试验提供的弹性模量计算出的位移与现场测量值有很大差别，乘以一个修正系数，才能和现场量测得到的位移值相一致，而这个系数有时仅为 0.1~0.2。因此，岩石工程师评价岩石力学“声

誉高、信誉低”。输入参数给的不准确和岩体本构关系的复杂性已经成为数值计算的两大“瓶颈”。

此外，在地下洞室工程中，怎么评价围岩的稳定性是一个很重要的问题。不少研究人员在这一方面进行了研究。黄宏伟等人提出利用围岩位移状态作为判断准则。莫海鸿等人提出洞用周围岩径向张应变变量作为判断准则。丁文其提出采用洞周围岩径向张应变，洞周围岩屈服区计算和支护结构受力状态作为围岩稳定判定依据。朱维申、李术才等用围岩屈服区大小以及综合考虑开裂破坏、塑性破坏和回弹破坏的围岩塑性耗散能作为围岩稳定判定依据。但是，迄今为止，还没有一种通用的判定准则能确保洞室的稳定。

面对这种情况，孙钧院士指出，尽管数值模拟对岩体结构进行力学分析的方法得到了广泛的应用，并且取得了许多进步，但是用数值模拟方法对岩体力学问题进行正向计算分析需要准确而充分的数据。因此，不敢断言这种传统的方法在将来是否会对这样一类问题的研究有新的突破，至少目前还不可能将这一类问题的研究提高到一个全新的高度。因此，人们不得不寻找新的解决方法。

以神经网络为代表的人工智能技术引入岩石力学就是一个新的尝试。1984年，W. S. Dershowitz 与 H. H. Einstein 发表了题为《人工智能在岩石力学中的应用》的论文。1985年，C. Fairhurst 提出用模糊数学结合专家系统解决隧道支护问题。国内，1989年，张清研究出铁路隧洞围岩分类的专家系统。1995年，冯夏庭教授在我国最早提出了智能岩石力学这一学科方向。它的基本思想是利用智能科学、系统科学、非线性科学、不确定性科学等科学综合解决岩石动力问题。智能岩石力学的提出推动了智能科学在岩土工程中的应用。许多学者对这一领域进行了研究。2000年，冯夏庭对智能岩石力学的理论和方法进行了阶段性的总结。严格意义上，智能岩石力学并不能增进我们对于岩石问题机理的认识，因为从原理上讲它完全依赖过去的经验，如果所引入的经验实例并不优秀甚至并不成功，那么这种分析的结果则谈不上经验的优化与创新，因此将智能岩石力学与经典岩石力学相结合可能是一个发展方向。

一般来说，当我们在某个问题上遇到困难时有两条解决途径，一种是建立一种新的体系来解决问题，另一种就是在旧的系统中寻找突破、变通，而这种突破和变通是在旧的框架内，但是融入了一些新的元素。经典岩石力学所遇到的困难是输入参数不准确和岩体本构关系复杂这两大问题，岩体工程的现实情况决定了我们不可能通过详细的现场试验来完备地获得这些资料，因此，使用反分析方法来解决这一问题就是一个选择，新的量测技术的发展为这种选择提供了现实的可能。

20世纪70年代初，人们就开始注意由现场量测信息确定各类计算参数的研究。1972年，Kavanagh 和 Clough 发表了反演弹性固体的弹性模量的有限元法。1976年，Kirsten 在岩土工程勘测研讨会上提出了量测变形反分析法，随后，Maier 提出了岩石力学中的模型辨识问题。1980年，Gioda 提出采用单纯形等优化方法求解岩体的弹性及弹塑性力学参数，并讨论了不同优化方法在岩土工程反分析中的适应性。国内的杨志法提出了一种实用的位移反分析方法——图谱法。之后，大量研究人员就反分析模型、优化方法、反分析的应用等领域进行了深入的研究。根据反分析时所利用的基础信息不同，反分析法可分为应力反分析法、位移反分析法和混合反分析法，其中位移反分析法为工程广泛采用。位移反

分析的特点是利用较易获得的位移信息，反演岩体的力学特性参数及初始地应力等荷载。尽管反分析方法门类较多，但对于岩体工程来说，弹性和线黏弹性问题的确定性位移反分析法仍是目前发展较为完善、应用最为广泛的方法。

综上所述，地下洞室工程所面临的岩石力学问题是一个“数据有限”的问题，反分析方法的发展为我们在施工过程中反馈得到相关数据提供了一个有效的途径，于是动态施工与设计方法应运而生。

使用系统论的思想，将开挖结构的勘察、设计、施工三者视为相互依赖并又综合相成的一个整体系统，并做到信息化。对地下洞室工程采取勘测试验→理论计算预测→施工与支护→监测、变形量测→工程实践验证、预报→反分析→工程稳定性正分析→施工与支护→……环节，经过多层控制循环和反馈修正，完善开挖结构的设计与施工，这就是动态优化设计与施工的基本思想。

这种思想提出之后，立刻引起了人们的注意，许多学者进行了相应的研究。肖世国等人阐述了岩石高边坡的动态施工模式，指出在动态设计中，不断补充最新动态信息是动态设计施工中的重要环节。李洪斌等总结了在三峡永久船闸隔墩岩体加固中的动态设计思路，监测结果表明，隔墩整体及局部都处于稳定状态。余景顺等结合工程实践指出，对于高陡岩石边坡，除了在勘察阶段深入了解岩体结构情况外，在施工中还需适时进行动态设计与监测。叶伟峰等总结了三峡工程永久船闸高边坡系统锚杆动态设计的经验，指出经过以安全监测成果为基础的动态优化设计之后，在保持稳定的前提下，工程量明显减少。胡振瀛等在总结了目前地下工程中常用的4种设计方法之后，指出了动态设计在其中应起的作用。

在地下洞室工程中，支护设计是一项重要的内容。在动态施工与设计这种一体化的方法中，并不追求在施工前的设计阶段用“精确”的本构模型和准确的岩体力学参数来准确描述岩体的力学行为，而是通过施工过程中所监测到的实际位移的反馈分析来调整原有模型，逐步逼近真实的岩体力学行为，并实时对支护的效果进行动态评估，随时调整支护设计。这样的支护设计方法已在发达国家得到应用，如日本最大的抽水蓄能电站神流川电站的地下厂房开挖就利用排水洞在主厂房开挖以前将一些多点位移计布置在预定的厂房位置，从开挖开始，就对厂房围岩的变形进行实时监测，根据监测数据，利用施工现场的工作站进行反馈，随时调整开挖和支护方案。

动态施工和设计方法是一个系统工程，一方面，这一方法中反馈分析的结果为支护优化设计提供了很好的平台；另一方面支护优化设计的研究也为动态施工和设计方法的应用提供可靠的支持。目前，在这一方法的多个步骤中，支护优化设计是其中的瓶颈之一。

1.4.3 地下洞室支护设计的研究现状

国际隧道协会结构模型研究组于1981年提出报告，把目前各个国家用到的洞室结构设计模型分为4种类型：作用—反作用模型、连续介质模型、工程类比法（经验法）、收敛—约束法。

实际上，地下洞室支护设计方法是随着人们对岩石性质的认识不断加深以及岩石力学分析方法的不断改进而发展的。初期的岩石力学把围岩体作为荷载来对待，作用—反作用模型就是在这种背景下出现的，这种方法在20世纪60—70年代的设计计算中占主导地