



全国教育科学“十一五”规划课题研究成果

机械优化设计

主 编 李志峰

 高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

机械优化设计

Jixie Youhua Sheji

主 编 李志峰
副主编 徐林林 孙 伏 李鹏阳
参 编 何亚银 张昌明 魏伟锋 魏锋涛
审 阅 宋 莉 杨明亮



高等教育出版社·北京
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

内 容 提 要

本书主要介绍优化设计的基本概念、基本原理和常用优化方法以及机械优化设计应用实例, 主要内容包括优化设计的基本概念和数学基础、一维搜索的优化、无约束优化方法、约束优化方法、机械优化设计实例、遗传算法的基本理论和方法、机械模糊优化设计方法与实例, 书中还介绍了 MATLAB 在优化设计中的应用。

本书内容广泛, 方法介绍全面, 图例丰富, 可作为高等学校机械类专业的本科生教材, 也可供有关专业的学生、教师及工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

机械优化设计/李志峰主编. —北京: 高等教育出版社, 2011.3

ISBN 978-7-04-031192-1

I. ①机… II. ①李… III. ①机械设计: 最优设计—高等学校—教材 IV. ①TH122

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 262023 号

策划编辑	段博原	责任编辑	薛立华	封面设计	于 涛
责任绘图	于 博	版式设计	余 杨	责任校对	杨健艺
责任印制	韩 刚				

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100120

购书热线 010-58581118
咨询电话 400-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>

经 销 蓝色畅想图书发行有限公司
印 刷 高等教育出版社印刷厂

网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>
畅想教育 <http://www.widedu.com>

开 本 787×960 1/16
印 张 17.5
字 数 320 000

版 次 2011 年 3 月第 1 版
印 次 2011 年 3 月第 1 次印刷
定 价 27.60 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题, 请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 31192-00

前 言

优化设计是一种现代设计理论和方法。它将工程实际问题按照一定的方法和准则转化为数学模型，然后利用优化方法和计算机从众多可行设计方案中找出最优的设计方案。通过优化设计可有效提高产品的设计水平和质量，缩短设计周期，因此掌握优化设计的理论和方法是非常有意义的。

机械优化设计是优化理论和方法在机械设计领域的移植和应用，其基本思想是根据机械设计的理论、方法和标准规范等建立一反映工程设计问题和符合数学规划要求的数学模型，然后采用数学规划方法和计算机计算技术自动找出设计问题的最优方案。

机械优化设计是机械类专业的一门必修课程，其目的是使学生掌握优化设计的基本概念和基本方法，树立优化设计的基本思想，获得解决机械优化设计问题的基本能力。

本书系统地介绍了机械优化设计的理论和方法：首先是优化设计的基本概念和数学基础；其次是具体的优化设计方法，包括一维搜索方法、无约束优化方法、约束优化方法，简要介绍了机械优化设计实例、遗传算法的基本理论和方法；最后是机械模糊优化设计以及 MATLAB 在优化设计中的应用。本书在内容编排上由浅入深，循序渐进，注意逻辑性和系统性，便于学习和应用。

本书由陕西理工学院李志峰主编并负责统稿，参加编写的有北京石油化工学院徐林林、陕西理工学院孙伏、西安理工大学李鹏阳等。其中绪论、第 1 章、第 3 章由李志峰编写，第 2 章、第 6 章由何亚银编写，第 4 章由徐林林编写，第 5 章由孙伏编写，第 7 章由张昌明编写，第 8 章、第 9 章由李鹏阳、魏锋涛编写，第 10 章由魏伟锋编写。全书由宋莉教授、杨明亮教授审阅。

由于编者水平有限，书中缺点、错误在所难免，敬请广大读者批评指正。

编者

2010 年 3 月

目 录

绪论	1
0.1 机械优化设计的特点	1
0.2 机械优化设计发展概况	2
0.3 本课程的主要内容和目的	3
第 1 章 概述	5
1.1 机械优化设计的含义	5
1.2 优化设计问题的数学模型	8
1.2.1 设计变量	9
1.2.2 目标函数	10
1.2.3 约束条件	11
1.2.4 数学模型的一般形式	13
1.3 优化问题的几何描述	13
1.4 优化设计问题的基本解法	16
习题	17
第 2 章 优化设计的数学基础	19
2.1 函数的方向导数与梯度	19
2.1.1 函数的方向导数	19
2.1.2 函数的梯度	21
2.2 函数的泰勒展开式与黑塞矩阵	24
2.3 二次型与正定矩阵	27
2.3.1 二次型与实对称矩阵	27
2.3.2 正定矩阵	27
2.4 凸集、凸函数与凸规划	28
2.4.1 凸集	29
2.4.2 凸函数	30
2.4.3 凸规划	32
2.5 无约束优化问题的极值条件	32

2.5.1 一元函数的极值条件	33
2.5.2 二元函数的极值条件	33
2.5.3 多元函数的极值条件	35
2.6 约束优化问题的极值条件	37
2.6.1 等式约束优化问题的极值条件	37
2.6.2 不等式约束优化问题的极值条件	40
习题	44
第3章 一维搜索的优化方法	45
3.1 确定搜索区间的外推法与区间消去法原理	46
3.1.1 确定搜索区间的外推法	46
3.1.2 区间消去法原理	48
3.1.3 一维优化方法分类	49
3.2 黄金分割法	49
3.2.1 基本思想	49
3.2.2 迭代过程和算法框图	50
3.3 一维搜索的插值方法	53
3.3.1 牛顿法	53
3.3.2 二次插值法	55
习题	57
第4章 无约束优化方法	58
4.1 最速下降法	59
4.1.1 最速下降法的基本原理	59
4.1.2 最速下降法的迭代过程	60
4.2 牛顿法	66
4.2.1 牛顿法的基本原理	66
4.2.2 阻尼牛顿法的迭代过程	70
4.3 变尺度法	71
4.3.1 变尺度法的基本原理	71
4.3.2 DFP 变尺度法的迭代过程	73
4.4 共轭梯度法	76
4.4.1 共轭方向	76
4.4.2 共轭方向的性质	78
4.4.3 共轭梯度法的基本原理	78

4.4.4	共轭梯度法的迭代过程	80
4.5	坐标轮换法	82
4.5.1	坐标轮换法的基本原理	82
4.5.2	坐标轮换法的迭代过程	84
4.6	鲍威尔法	87
4.6.1	鲍威尔法的基本原理	88
4.6.2	鲍威尔法的迭代过程	88
4.6.3	改进的鲍威尔法	90
4.6.4	改进的鲍威尔法的迭代过程	91
4.7	单纯形法	94
4.7.1	单纯形法的基本原理	95
4.7.2	单纯形法的迭代过程	97
4.8	无约束优化方法的评价和选择	101
	习题	102
第 5 章	约束优化方法	103
5.1	约束随机方向法	105
5.1.1	约束随机方向法的基本原理	105
5.1.2	迭代步骤及程序框图	108
5.2	复合形法	111
5.2.1	复合形法的基本原理	111
5.2.2	初始复合形的产生	114
5.2.3	终止条件	115
5.2.4	迭代步骤及程序框图	115
5.3	可行方向法	119
5.3.1	可行方向法的搜索策略	119
5.3.2	产生可行方向的条件	121
5.3.3	可行方向的产生方法	123
5.3.4	步长的确定	125
5.3.5	迭代终止条件	127
5.3.6	迭代步骤及算法框图	127
5.4	惩罚函数法	130
5.4.1	内点惩罚函数法	132
5.4.2	外点惩罚函数法	136
5.4.3	混合惩罚函数法	139

习题	141
第 6 章 机械优化设计实例	144
6.1 机械优化设计的一般步骤	144
6.1.1 机械优化设计的一般过程	144
6.1.2 建立数学模型的基本原则	145
6.2 平面铰链四杆机构再现运动规律的优化设计	146
6.3 凸轮机构的优化设计	149
6.3.1 凸轮机构的计算公式	149
6.3.2 设计实例	152
6.4 最小体积二级圆柱齿轮减速器的优化设计	154
第 7 章 遗传算法简介	159
7.1 概述	159
7.2 遗传算法	161
7.2.1 遗传算法介绍	161
7.2.2 遗传算法涉及的主要问题	162
7.2.3 遗传算法的主要步骤	170
7.3 应用遗传算法进行机械优化设计	170
7.4 遗传算法在机械工程中的应用前景	172
习题	173
第 8 章 多目标及离散变量优化方法简介	174
8.1 多目标优化	174
8.1.1 多目标优化问题	174
8.1.2 多目标优化方法	176
8.2 离散变量优化	186
8.2.1 离散变量优化问题	186
8.2.2 离散变量优化方法	186
习题	194
第 9 章 机械模糊优化设计方法	196
9.1 机械模糊优化设计方法概述	196
9.1.1 模糊性现象与模糊优化方法的产生	196
9.1.2 模糊优化方法的发展概况	197

9.1.3	机械工程中的模糊优化设计	198
9.2	基本概念和运算	199
9.2.1	模糊概念	199
9.2.2	模糊集合的基本运算	202
9.3	模糊优化设计的数学模型	203
9.4	对称模糊优化设计	204
9.4.1	对称模糊优化模型的直接解法	204
9.4.2	对称模糊优化模型的迭代解法	205
9.4.3	模糊约束清晰目标函数极值问题的求解方法	208
9.5	非对称模糊优化设计方法	212
9.5.1	模糊约束下函数的条件极值	212
9.5.2	非对称模糊优化设计的数学模型	214
9.5.3	非对称模糊优化模型的水平截集法	219
9.5.4	非对称模糊优化模型的限界搜索法	227
9.6	多目标模糊优化设计	228
9.6.1	多目标普通优化设计问题的模糊解法	228
9.6.2	多目标模糊优化问题的求解	230
9.6.3	多目标模糊优化问题的一般求解方法	237
9.6.4	多目标优化设计的模糊综合评判方法	240
9.7	机械模糊优化设计实例	242
9.7.1	减速器模糊优化设计	242
9.7.2	弹簧模糊优化设计	246
	习题	248
第 10 章	MATLAB 在优化设计中的应用	249
10.1	MATLAB 简介	249
10.1.1	MATLAB 系统界面	249
10.1.2	主要特点	250
10.2	MATLAB 编程优化实例	251
10.2.1	MATLAB 编程基本知识	251
10.2.2	程序设计简介	252
10.2.3	编程实例	253
10.3	MATLAB 优化工具箱的应用	257
10.3.1	MATLAB 优化工具箱简介	257
10.3.2	常用工具箱函数的应用	258

10.3.3 常见问题及解决方法	262
10.3.4 对使用 MATLAB 的建议	263
习题	264
参考文献	265
后记	266

绪 论

优化一直是人类在生产和社会活动中追求的目标。在人类活动中，要办好一件事（指规划、设计等），都期望得到最满意、最好的结果或效果。为了实现这种期望，必须有好的预测和决策方法。优化方法就是各类决策方法中普遍采用的一种方法。

优化设计（optimal design）是 20 世纪 60 年代初发展起来的一门新学科。它是将优化技术和计算技术应用于设计领域的一种先进设计方法。任何一项工程或一个产品的设计都需要根据设计要求，合理选择设计方案，确定各种参数，以期达到最佳的设计目标，如体积小、质量轻、材料省、结构紧凑、成本低、性能好、承载能力强等。优化设计正是基于这样的需要而产生并发展起来的。利用这种新的设计方法，人们就可以从众多的设计方案中寻找出最佳的设计方案，从而大大提高设计效率和质量。

0.1 机械优化设计的特点

一般工程设计都有多种可行的设计方案。如何根据设计任务和要求，从众多的可行方案中寻找一个最好的方案，即最优方案，是设计者的首要任务。要圆满完成这样困难的任务，必须掌握可靠的先进设计方法。

传统设计者采用的是经验类比的设计方法。其设计过程可概括为“设计—分析—再设计”的过程，即首先根据设计任务及要求进行调查、研究和搜集有关资料，参照相同或类比现有的、已完成的较为成熟的设计方案，凭借设计者的经验，辅以必要的分析及计算，确定一个合适的设计方案，并通过估算初步确定有关参数；然后对初定方案进行必要的分析及校核计算，如果某些设计要求得不到满足，则可进行设计方案的修改、设计参数的调整，并再一次进行分析及校核计算，如此反复，直到获得满意的设计方案为止。显然，这个设计过程是人工试凑与类比分析的过程，不仅需要花费较多的设计时间，延长设计周期，而且只限于在少数几个候选方案中进行分析比较。

优化设计具有常规设计所不具备的一些特点，主要表现在两个方面：

1) 优化设计能使各种设计参数自动向更优的方向进行调整,直至找到一个尽可能完善或最合适的设计方案。常规设计虽然也能找到比较合适的设计方案,但都是凭借设计人员的经验来进行的,它既不能保证设计参数一定能够向更优的方向调整,同时也不可能保证一定能找到最合适的设计方案。

2) 优化设计的手段是采用电子计算机。

对工程实际问题进行优化设计,首先要将工程实际问题转化为数学模型,然后选择合适的优化方法和计算程序,通过计算机进行求解,获得最优设计方案,这是常规设计所不能比的。

0.2 机械优化设计发展概况

优化方法包括解析方法和数值计算方法。解析方法利用的是微分学和变分学,在较短的时间内从大量的方案中选出最优的古典优化方法主要是应用微分法和变分法。直到20世纪40年代初,由于军事上的需要衍生了运筹学,提供了许多用古典微分法和变分法不能解决的最优化方法。数值计算方法是利用已知的信息,通过迭代计算过程来逐步逼近优化问题的最优解。数值计算方法运算量大,只有在电子计算机出现和发展以后才得到了一定的应用和发展。20世纪50年代发展起来的数学规划理论,为优化设计奠定了理论基础。而20世纪60年代计算技术和计算机的发展,为优化设计的发展与应用提供了强有力的手段,使工程技术人员从大量烦琐的计算工作中解放出来,把主要精力转到模型的建立和优化方法的选择方面来,优化设计的应用从此得到飞速发展。

近40多年来,优化设计方法已在许多工业部门得到应用,并发挥着重要的作用,相对来讲,优化方法在机械设计中的应用稍晚一些,直到20世纪60年代后期才开始有较成功的应用,但发展却十分迅速,在机构综合、机械零部件设计、专用机械设计和工艺设计等方面都获得应用,并取得丰硕的成果。

机构运动参数的优化设计是机械优化设计中发展较早的领域,主要研究了连杆机构、凸轮机构等再现函数和轨迹的优化设计问题。机构动力学优化设计方面也有很大进展,如惯性力的最优平衡,主动件力矩的最小波动等的优化设计。机械零、部件的优化设计,最近20多年也有很大发展,主要是研究各种减速器的优化设计,滑动轴承和滚动轴承的优化设计以及轴、弹簧、制动器等的结构参数优化。除此之外,在机床、锻压设备、压延设备、起重运输设备、汽车等的基本参数、基本工作机构和主体结构方面也进行了优化设计工作。

近几十年来机械优化设计的应用愈来愈广，但还存在许多问题需要解决。例如，机械产品设计中零、部件的通用化、系列化和标准化，整机优化设计模型及方法的研究，机械优化设计中离散变量优化方法的研究，更为有效的优化设计方法的发掘等一系列问题，都需做较大的努力才能适应机械工业发展的需要。

20 世纪 80 年代发展起来的计算机辅助设计（CAD），在引入优化设计方法后，使得在设计过程中既能够不断选择设计参数并评选出最优设计方案，又可以提高设计速度，缩短设计周期。在科学技术发展要求机械产品更新周期日益缩短的今天，把优化设计方法与计算机辅助设计结合起来，使设计过程完全自动化，已成为设计方法的一个重要发展趋势。

美国 Math Works 公司 1994 年推出了科技应用软件 MATLAB，具有强大的科学计算、图形处理、可视化功能和开放式可扩展环境，其中所带的工具箱包含一系列优化算法和模块，可以用于求解无约束条件非线性极小值、约束条件非线性极小值（包括目标逼近问题、极大极小值问题、半无限极小极值问题）、线性规划和二次规划问题、非线性最小二乘逼近和曲线拟合、非线性方程求解、约束条件下的线性最小二乘优化以及复杂结构的大规模优化问题等，为在计算机上使用各种有效的优化方法创造了条件。

0.3 本课程的主要内容和目的

本课程研究优化方法在机械设计中的应用，即机械优化设计的有关问题。

机械优化设计包括建立优化设计的数学模型和选择恰当的优化方法及程序两方面的内容，即建立数学模型和求解数学模型两方面的内容。建立数学模型除必须遵循一定的规范外，主要依靠机械学科的专业知识，所以不是本书所能解决的。求解数学模型一靠相应的优化方法，二靠计算技术、程序软件，并一般通过计算机实现。其中计算技术、优化程序编制及计算机的使用，也由专门学科解决。所以，本课程的主要内容概括地分为优化设计的基本概念、常用优化方法和典型机械优化设计实例三大部分。具体来讲，绪论及第 1 章介绍机械优化设计的基本概念；第 2 章介绍一些与优化设计有关的数学基础知识，以便为以后各章学习打好基础；第 3、4、5 章分别介绍一维优化、无约束优化和约束优化的原理和算法；第 6 章介绍机械优化设计实例；第 7 章简单介绍遗传算法；第 8 章介绍多目标优化、离散变量优化方法；第 9 章介绍机械模糊优化设计方法；第 10 章介绍 MATLAB 在优化设计中的应用。

希望通过对本课程的学习，了解优化设计的基本概念，掌握常用优化方法的原理、算法及应用特点，初步树立正确的优化设计观点，具备处理一般机械优化设计问题的能力。

第 1 章 概 述

1.1 机械优化设计的含义

在进行机械产品设计时，根据规定的约束条件，经过分析计算，优化设计参数，使某项或几项设计要求获得最优值，这就是机械优化设计。工程设计上的“最优值”（optimum）或“最佳值”是指在满足多种设计目标和约束条件下所获得的最令人满意和最适宜的值。

传统的机械设计一般需要经过调查研究，拟订方案，分析计算，绘图和编制技术文件等一系列的工作过程。传统设计通常是在调查分析的基础上，参照同类产品，通过估算、验算、类比或试验等方法来确定产品的初步设计方案，然后对产品的设计参数进行强度、刚度和稳定性等性能的分析计算，检查各项性能指标是否满足设计要求，若不能满足要求，则根据经验或直观判断对设计参数进行修改。因此，可以说整个传统设计过程是人工“试凑”和定性分析比较的过程。实践证明，按照这种方法求出的设计方案一般为可行方案，还有进一步改进和提高的空间。当然，传统设计中也存在着“求优”的思想，设计人员可以在有限的几种可行的设计方案中，分析评价出较好的方案。由于传统的设计方法受到计算方法和计算手段等条件的限制，一般不可能得到最佳的设计方案。

机械产品的优化设计就是把最优化方法（最优化理论 + 计算机）引入机械设计领域，为设计提供一种新的科学设计方法，使得在解决复杂设计问题时，不用逐个尝试就能从所有可能的设计方案中找到尽可能完善或最佳的设计方案。应用优化设计方法，可以缩短设计周期，提高设计精度和设计质量，获得显著的技术与经济效益。例如对具有 10 个变速挡的机床主轴箱进行优化设计，与传统设计相比，中心距可以减少 16.5%；如果对整体结构进行优化设计，与传统设计相比，简单结构可以节约材料约 7%，较复杂结构可以节约材

料约 20%，复杂结构可以节约材料约 35% ~ 40%；美国的一个飞机制造公司采用最优化方法对具有 450 个设计参数的飞机机翼进行设计，使其质量减小了 35%。一般来说，所涉及的因素越多，设计对象越复杂，优化设计取得的效果就越显著。

优化设计与传统设计相比，具有如下三个特点：

- 1) 设计的思想是追求最优（设计）；
- 2) 设计的方法是优化方法；
- 3) 设计的手段是计算机。

对于机械类专业的学生学习优化，目的不是研究优化方法，而是能够将实际问题建立优化的数学模型，然后会选择优化方法，用优化方法求解，对求解的结果是否合理能够进行分析。下面通过一个引例来进行说明机械优化设计的内容。

例题 1.1 如图 1.1 所示，一中心受压的空心管柱，所承受的轴向压力 $F = 22\ 680\ \text{N}$ ，柱长 $L = 254\ \text{cm}$ ，材料为铝合金，密度 $\rho = 2.768 \times 10^3\ \text{kg/m}^3$ ，弹性模量 $E = 7.03 \times 10^4\ \text{MPa}$ ，许用应力 $[\sigma] = 140\ \text{MPa}$ 。截面中心线直径（平均直径） $D = (D_0 + D_1)/2$ ，并不大于 $8.9\ \text{cm}$ ，壁厚 T 不小于 $0.1\ \text{cm}$ 。对该管进行最优设计，在保证强度和稳定性的条件下寻找一组参数 D 和 T ，使管柱的质量最小。

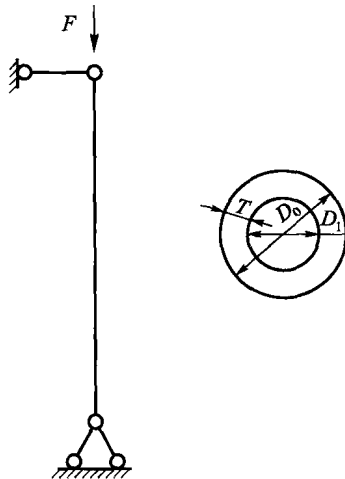


图 1.1 受压管柱

分析：管子的质量表达式为 $W = \rho L \pi D T = 2.2 D T$ ，显然它是变量 D 和 T 的函数，称为该优化问题的目标函数， D 和 T 称为设计变量。现在，优化设计的任务就是找到一组设计变量 D 和 T ，使目标函数 $W(D, T)$ 达到最小值，并满足以下条件：

(1) 压杆的强度条件

$$\sigma \leq [\sigma] \Rightarrow \frac{22\,680}{\pi DT \times 10^2} - 140 \leq 0$$

或者

$$DT - 0.516 \geq 0$$

(2) 压杆的稳定性条件

$$\sigma \leq \sigma_c \Rightarrow \frac{22\,680}{\pi DT} - \frac{7.03 \times 10^4}{8 \times 254^2 / 10^2} \pi^2 D^2 \leq 0$$

或者

$$1.35D^2 - \frac{72.2}{DT} \geq 0$$

其中, 稳定临界应力 $\sigma_c = \frac{\pi^2 E}{8L^2}(D^2 + T^2) \approx \frac{\pi^2 E}{8L^2}D^2$ (两端铰支杆), 由于 $D \gg T$,

可将 T^2 忽略不计。

(3) 局部稳定性条件

$$\sigma \leq \sigma_c \Rightarrow \frac{22\,680}{\pi DT} - \frac{2.812 \times 10^4 T}{D} \leq 0, \text{ 可简化成 } 0.05 - T \leq 0$$

其中, 局部稳定性临界应力 $\sigma_c = \frac{0.4ET}{D}$ 。

(4) 工艺、几何尺寸限制

$$0.1 - T \leq 0, D \geq 0, D - 8.9 \leq 0$$

以上选择设计变量、确定目标函数和约束条件的过程称为建立优化问题的数学模型。接下来的工作就是求解数学模型, 得到问题的最优解。求解数学模型可以用解析法、图解法和各种优化算法。对于这个简单问题, 可以采用图解法来求。

如图 1.2 所示, 以设计变量 D 、 T 分别为横坐标和纵坐标, 建立一个二维

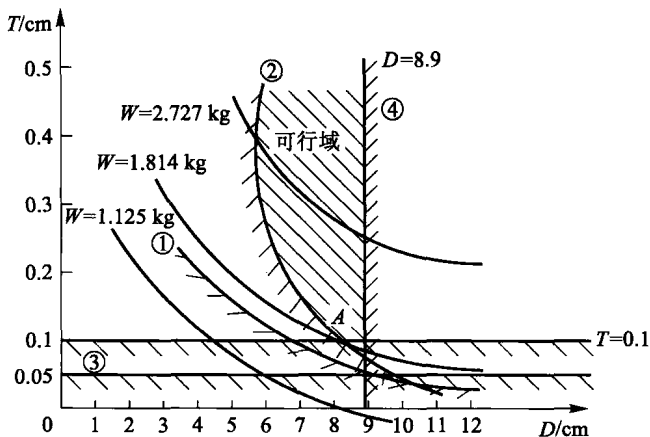


图 1.2 受压管柱优化设计图解