

研究生精品教材

吕新生 张 晔 著

JIXIE YOUHUA SHEJI
机械优化设计



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

研究生精品教材

机械优化设计

吕新生 张 晔 著

合肥工业大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

机械优化设计/吕新生,张晔著. —合肥:合肥工业大学出版社,2009.12
ISBN 978-7-5650-0114-7

I. 机… II. ①吕…②张… III. 机械设计:最优设计—高等学校—教材 IV. TH122

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 201436 号

机械优化设计

吕新生 张 晔 著 策划编辑 马国锋 责任编辑 郑 洁

出 版	合肥工业大学出版社	版 次	2009 年 12 月第 1 版
地 址	合肥市屯溪路 193 号	印 次	2010 年 9 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—2903038	印 张	11.75
	发行部:0551—2903198	字 数	210 千字
网 址	www.hfutpress.com.cn	印 刷	合肥学苑印务有限公司
E-mail	press@hfutpress.com.cn	发 行	全国新华书店

ISBN 978-7-5650-0114-7

定价:28.00 元(附光盘)

如果有影响阅读的印装质量问题,请与出版社发行部联系调换。

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,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)、高校教师在岗攻读硕士学位等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,将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

2009年12月

前 言

改革开放之初,一批高校教师迈出刚刚开启的国门,成为首批赴西方发达国家学习、交流的访问学者,看到计算机在国外已得到广泛应用,他们敏锐地感觉到:这将给工程设计领域带来一场根本的变革。

数年后,带着在国外研究的成果,也带着各种计算机应用程序(那时计算机绘图技术还没有得到实际应用,在工程设计领域,计算机还主要用于计算,特别是优化设计计算),他们回到了祖国,随后,关于机械产品优化设计的论文陆续出现在国内各种学术刊物和学术会议上,引起了国内工程技术人员浓厚兴趣,但同时也出现了低水平重复研究的倾向。例如,这位学者从美国带回来一个程序,用于四杆机构的优化;那位学者从英国带回来一个程序,也用于四杆机构的优化。

针对这一问题,国内多所高等院校向国家相关部委提出建议:收集整理各种优化设计算法和程序,建立程序库提供给工程技术人员使用,促进优化设计技术的推广应用,克服低水平重复研究的倾向。于是,在“六五”国家科技攻关项目中,由合肥工业大学、华中科技大学牵头,联合北京理工大学、北京科技大学、东南大学、广州机床研究所、上海机床厂有限公司、上海大学、清华大学、内蒙古科技大学、西安交通大学、西安理工大学、兰州理工大学、武汉理工大学、哈尔滨理工大学共同承担了常用优化方法程序库、常用机械零部件及机械优化设计程序库的建立研究项目(“两库”项目)。

1985年12月,“两库”项目在北京香山饭店举行鉴定会,鉴定委员会主任、中科院学部委员雷天觉高级工程师对“两库”项目的意义给予高度评价。他说:“我们这些老工程技术人员,一辈子不知手工计算过多少次简支梁,今后,我们可以用计算机代替这种重复性劳动,而且可以计算得更精确,得到最佳参数。”

在鉴定会结束后的晚宴上,酒酣耳热之际,有人志得意满地说:“从今以后,优化设计方面已经没有什么事可做了。”但酒醒之后,立即清醒地察觉到:优化设计技术决不会因为“两库”的建立而停止发展,那么,下一步的研究方向是什么呢?经过一番讨论,大系统优化和多目标优化成为新的研究目标,从此以后,对机械优化设计技术的研究和应用就一直没有停止过,本教材从一个侧面反映了这一长期的研究和应用过程。

由于本教材的使用对象是研究生,因此,与本科生的教材相比有以下几个特点:

(1)教材内容从约束优化开始,与本科生教材(如哈尔滨工业大学孙靖民教授主编的《机械优化设计》)相衔接。

(2)给出了一些重要定理的证明过程,要求研究生不仅要知其然,更要知其所以然。

(3)给出了一些优化设计方法在研究生研究课题中的应用实例,而每一个应用实例的背后都有一篇硕士论文(应用实例中叙述不尽之处可在网上查阅相关硕士论文),它们分别来自合肥工业大学机械与汽车工程学院研究生周志斌、韩燕、王敬芝、王淑杰、徐东镇的硕士论文,在此一并对他们为本教材做出的贡献表示感谢。

(4)教材所附光盘中给出了本教材大部分优化方法的源程序并附有使用说明,以便为研究生在今后的课题研究和后续开发上提供帮助。

作 者

2010年6月

目 录

第 1 章 概 述	(001)
1.1 基本概念	(001)
1.1.1 优化的概念	(001)
1.1.2 机械产品优化设计的主要步骤与过程	(003)
1.2 优化数学模型的建立	(004)
思考与练习	(009)
第 2 章 约束优化设计的直接法	(010)
2.1 约束优化设计的特点与直接法的基本概念和理论	(010)
2.1.1 约束优化设计的特点	(010)
2.1.2 约束优化直接法的基本概念和理论	(011)
2.2 可行方向法	(015)
2.2.1 下降可行方向的确定	(016)
2.2.2 有约束一维搜索	(017)
2.2.3 收敛准则	(018)
2.2.4 框图	(020)
2.2.5 特点	(020)
2.3 可变容差法	(021)
2.3.1 可变容差法的基本策略思想	(021)
2.3.2 超容差点的处理	(024)
2.3.3 总框图	(027)
思考与练习	(028)

第3章 约束优化设计的间接法	(029)
3.1 约束优化间接法的基本思想和理论	(029)
3.1.1 约束优化间接法的基本思想	(029)
3.1.2 约束优化间接法的基本理论	(029)
3.2 罚函数法	(036)
3.2.1 外点罚函数法(外点法)	(037)
3.2.2 内点罚函数法(内点法)	(044)
3.2.3 混合罚函数法	(047)
3.3 增广拉格朗日乘子法	(048)
3.3.1 等式约束问题	(048)
3.3.2 不等式约束问题	(051)
3.3.3 应用实例——运用弹簧—质点模型和最优化技术 解决三维曲面(布片)的展开计算问题	(055)
3.4 约束变尺度法	(059)
3.4.1 用序列二次规划寻找 P_k	(060)
3.4.2 一维搜索中的监控(Watchdog)技术	(064)
3.4.3 尺度矩阵的修正	(066)
3.4.4 框图	(067)
思考与练习	(068)
第4章 混合离散变量的优化设计方法	(069)
4.1 混合离散变量优化设计问题的数学模型	(069)
4.2 圆整法(化离散量为连续量求解)	(069)
4.3 MDCP法(化连续量为离散量求解)	(070)
4.3.1 化连续量为离散量求解的理论合理性	(070)
4.3.2 MDCP法(在复合形法基础上改造而成的混合离散 变量优化方法)	(071)
4.3.3 应用实例——ZZS系列圆锥—圆柱三级齿轮 减速器优化设计	(074)
4.4 混合离散变量组合优化方法(Optmdv)	(076)
4.4.1 定义了广义目标函数来代替传统的外点罚函数	(076)

4.4.2 定义了离散梯度 $\bar{\nabla}_x F$	(077)
思考与练习	(078)
第5章 多目标优化设计方法	(079)
5.1 多目标优化设计的基本概念和理论	(079)
5.1.1 多目标优化设计问题的特点	(079)
5.1.2 多目标优化设计的基本概念	(080)
5.2 多目标优化方法概述	(081)
5.3 满意协调法	(083)
5.3.1 策略思想	(083)
5.3.2 优化设计数学模型的建立	(085)
5.3.3 化为单目标优化问题求解	(086)
5.3.4 协调机制	(087)
5.3.5 计算实例	(088)
5.3.6 应用实例——重型载货汽车悬架系统的多目 标优化设计	(093)
5.4 目标规划法	(102)
5.4.1 目标规划的特点	(102)
5.4.2 目标规划数学模型	(104)
5.4.3 目标规划的求解方法	(106)
5.4.4 应用实例	(109)
思考与练习	(112)
第6章 复杂系统优化的分解—协调法	(114)
6.1 分解协调优化设计的数学模型	(114)
6.2 分解协调优化方法的数学基础——拉格朗日函数的分解 ..	(116)
6.3 可行分解法	(117)
6.3.1 子系统优化	(117)
6.3.2 协调级优化	(118)
6.4 非可行分解法	(121)
6.4.1 子系统优化	(121)
6.4.2 协调级优化	(122)

6.5 混合法	(124)
6.5.1 子系统优化	(124)
6.5.2 协调级优化	(125)
6.6 应用实例——外圆磨床主轴的动静压轴承系统优化设计 ...	(126)
思考与练习	(128)
第7章 其他优化设计方法	(129)
7.1 遗传进化法简介	(129)
7.1.1 遗传进化法的仿生基础	(129)
7.1.2 框图	(133)
7.1.3 特点	(134)
7.2 蚁群算法	(134)
7.2.1 旅行商问题与广义旅行商问题	(134)
7.2.2 蚁群算法	(135)
7.2.3 用蚁群算法求解广义旅行商问题	(138)
7.2.4 验证算例	(139)
7.2.5 应用实例——数控多轮廓加工走刀空行程路径优化 ...	(139)
思考与练习	(146)
[附录]优化方法程序使用说明	(147)
一、可变容差法	(147)
二、增广拉格朗日乘法	(149)
三、线性规划单纯形法	(151)
四、满意协调多目标优化方法	(152)
五、约束变尺度法	(158)
六、混合离散变量复合形法	(160)
七、混合离散变量组合优化方法	(163)
八、非线性目标规划法	(166)
九、线性目标规划法	(168)
十、蚁群算法	(172)
参考文献	(176)

第1章 概述

1.1 基本概念

1.1.1 优化的概念

从客观上来说,优化是自然发展的规律,也是社会发展的规律,所谓“生存竞争,优胜劣汰”,就包含了优化的概念。

从主观上来说,优化是人类一切活动的准则,是人的本能,所谓“人往高处走,水往低处流”,也包含了优化的概念。

但是,我们在这里所讲的“优化”,是作为一项工程技术而提出的,它体现了人类在认识和掌握自然和社会发展规律的基础上,运用自己的聪明才智和积累的经验,追求美好事物、创造美好世界的主观能动性,因而是改造客观世界的有力武器和工具。特别是在电子计算机问世以后,使许多优化理论和方法得以应用于实际,因此,优化技术又是一项与计算机密不可分的先进技术。

“优化”这个概念已被广泛用于当今各行各业,例如:优化产业结构、优化资源配置、优化生存环境、企业劳动力的优化组合、产品的优质优价,直至下一代的优生优育。这里我们只想讨论一下“优化”与机械,特别是与机械CAD的关系。

设计是人类社会重要的生产活动,从人类制造第一件石器时,就产生了设计这一活动,不过在相当长的历史时期内,设计制造这两项活动集中于工匠一身,直到社会化的大工业生产时期,设计才分离成为一个独立的生产部

门,成为专门化的科学。由于自然和社会发展的客观规律,由于人类追求完美的本能,设计过程从来就是一个对设计对象的优化过程。早期的优化设计,总要经历反复多次的“设计——制造——再改进设计”的漫长过程。随着设计科学本身的发展,特别是随着优化设计技术的发展,这个过程越来越短,人们对最优设计方案、最佳设计成果的追求也越来越迫切。当今国内外市场对产品质量的要求越来越高,产品的更新换代越来越快,产品的市场生命周期越来越短,这就告诉我们,不掌握优化设计技术,就很难设计出适应市场需求、拥有竞争力的产品。实事求是地说,我国机械产品设计水平至今仍比较低,类比设计、经验设计仍是很多设计部门的基本设计方法。迅速推广优化设计技术,是从根本上改变这一落后现状,迅速提高我国机械产品设计水平的重要战略措施。

企业实施的“甩图板”工程,把电子计算机这个技术手段和工具引进设计部门,开展计算机辅助设计(CAD)的应用。应用CAD的目的在于:一要缩短设计周期,提高设计效率;二要提高设计质量,提高产品设计的一次成功率。不论是世界工业发达国家,还是我国CAD应用开展较早、开展较好的单位,他们的经验都表明:“甩图板”即用计算机代替人工绘制二维图纸,是开展CAD应用关键的第一步,但也仅仅是第一步,它对于缩短设计周期、提高设计效率,能起到较明显的效用。但是,要提高产品的设计质量和一次成功率,仅仅靠“甩图板”是远远不够的。只有充分利用电子计算机强大的软硬件功能,并结合自己企业的具体产品,广泛应用先进的设计理论、方法,特别是优化设计方法,才能实现引进CAD的预期目的,才能体现出计算机应用技术的经济效益。

机械CAD决不能仅仅被理解为计算机绘图,而是一项贯穿机械产品设计全过程的先进技术。按照设计方法学的观点,产品设计通常由原理方案设计、结构方案设计、结构设计、参数设计、图纸设计、技术文档设计等阶段组成,“甩图板”只解决了其中的图纸设计问题,优化设计则贯穿于上述各个设计阶段,用于获得最佳原理方案、最佳结构方案、最佳结构参数、最佳运动参数、最佳性能参数,最终得到兼具最佳技术指标和最佳经济指标的最佳产品。因此,优化设计技术是机械CAD中的一项核心技术。

1.1.2 机械产品优化设计的主要步骤与过程

对机械产品进行优化设计,大体上可分为以下几个主要步骤:

1. 根据具体设计对象和具体设计要求建立优化设计的数学模型

优化技术与电子计算机的应用密不可分,许多优化理论和方法都是借助于电子计算机才能得以实际应用的,而电子计算机从本质上来说是数值计算的工具。凡是希望用计算机处理的问题,都必须首先建立处理这个问题的数学模型。要完成这一步骤,需要我们掌握一定的计算机程序设计方面的知识,但更多地需要我们运用本身的工程技术专业知识和数学知识。关于建立优化设计数学模型的问题,后面还要专门展开讨论,这里暂不细说。

2. 根据建立的优化数学模型,选用合适的优化方法

长期以来在对优化理论的研究和应用中,人们开发出各种各样的优化方法。要想列出一张包容所有优化方法的清单是根本办不到的,特别要指出的是,每种优化方法都有它自己的特点和适用范围,就如同工具箱中的工具各有各的用处,无法发明一种真正的万能工具一样,我们也找不到一种能解决所有优化问题的万能方法。人们必须根据数学模型的规模、特点、数学性态,选用适合求解这一优化问题的优化方法。优化方法的选择是否得当,事关优化设计的成败,这就要求我们了解各种优化方法的原理特点和适用范围,以便作出正确的选择。

3. 运行优化方法程序进行优化设计

尽管优化理论较为深奥、优化设计的计算过程较为复杂,但是软件工程师们已经将它们开发成商品化的优化方法程序,我们只要按照不同程序的使用说明,在计算机上正确地运行它们,就可以得到预期的优化结果。

4. 优化结果分析

优化设计的结果是否满足我们的设计要求,是否符合工程实际,需要我们凭借工程技术专业知识加以分析和认定。如果不符合工程实际和设计要求,就要修改数学模型或更换优化方法,重新运行优化程序,直至得到满意的优化结果。整个优化设计过程如图1-1所示。

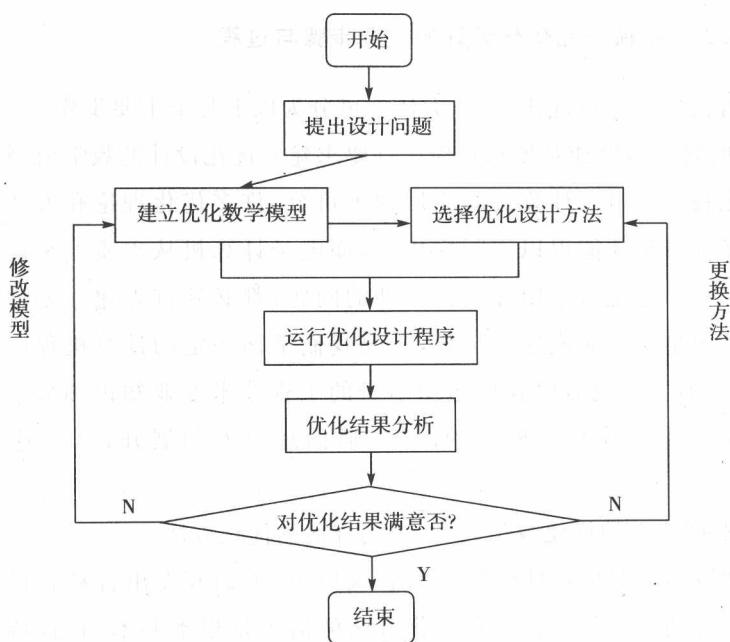


图 1-1 优化设计过程

1.2 优化数学模型的建立

我们在前一节中讲到,在提出一个具体的优化设计问题以后,第一步就要建立一个相应的优化数学模型,这是成功进行优化设计关键的第一步。

如果我们站得更高一点,看得更远一点,我们还可以有充分理由预言:随着电子计算机的广泛应用,随着CAD技术的推广,建立数学模型将成为每一个工程技术人员必须具备并且要大大加强的基本技能。这是因为计算机软硬件的强大功能已经把工程技术人员从许多工作中解放出来。例如:

(1) 计算机快速精确的计算功能将代替我们复杂的人工运算。

(2) 计算机的存贮记忆功能以及各种数据库,将使我们不必花气力记忆各种参数,不必为此去反复地查阅相关手册。

(3) 许多复杂的计算公式、计算方法将被编制成商品化的软件,工程技

术人员只需调用这些程序就可以得到正确的计算结果,而不必去记忆推导那些公式。

(4) 计算机的图形绘制功能将免除工程技术人员成年累月趴在图板上制图之苦,快速画出漂亮规范的工程图纸。

从这些单调枯燥而又冗长繁复的工作中解放出来的工程技术人员将投入更富于创造性的工作,例如研究设计方法及理论、建立数学模型、编制开发程序等,这是历史发展的必然,也是时代对工程技术人员提出的新要求。

优化数学模型是从产品设计实践中抽象出来的。产品设计的内涵可以这样加以表述:为了满足人们的某一特定需求,在一定的物质和技术条件下,工程技术人员通过分析、综合的方法,最终形成能满足这一特定需要的装置、设备、过程、系统或其他产品。从这里,我们可以看到:

(1) 设计有很强的目的性,对任何设计对象总有一定的要求。如使用性要求、经济性要求、工艺性要求等。

(2) 设计要受到客观条件的制约。如材料的制约、加工设备的制约、工艺手段的制约、成本价格的制约等。

(3) 设计方案往往是非唯一的,在众多的设计方案中,必有优劣之分。

从设计实践中抽象出来的优化数学模型,恰恰反映了设计的这些特点,它主要由下面这些“构件”组成:① 目标函数,即优化设计要达到什么目的,它反映了对设计对象的各种要求;② 约束函数,即优化中要服从哪些约束,它反映了客观条件对设计的制约;③ 设计变量,它是能影响目标函数、约束函数的各种可变设计参数,每一组设计变量对应着一个设计方案。

用这样的优化数学模型加以表述的优化设计过程是在满足所有约束函数的前提下,通过改变设计变量的值,来寻找一个最佳的设计方案,使其能最大限度地满足事先提出的设计目标。

下面我们看几个具体的例子。

① 某化工厂用甲、乙两种原料,生产A、B两种产品。其单位产品消耗原料的用量及产品利润见表1-1。

表 1-1

原料 \ 产品	A(x_1)	B(x_2)	原料库存量(kg)
甲(kg)	0.5	0.3	3000
乙(kg)	0.1	0.3	1800
产品利润(元/kg)	7	10	

问 A、B 产品各生产多少,可以使总利润最大?

解:设 A 产品生产 x_1 kg、B 产品生产 x_2 kg,总利润则为 $7x_1 + 10x_2$ 元,
 x_1 、 x_2 要受到原料库存量的约束,即

$$0.5x_1 + 0.3x_2 \leq 3000$$

$$0.1x_1 + 0.3x_2 \leq 1800$$

此外, x_1 、 x_2 都不能是负数,即 $x_1 \geq 0$ 且 $x_2 \geq 0$,上述数学模型记为

$$\max 7x_1 + 10x_2$$

$$\text{s. t. } 0.5x_1 + 0.3x_2 \leq 3000$$

$$0.1x_1 + 0.3x_2 \leq 1800$$

$$x_1 \geq 0 \text{ 且 } x_2 \geq 0$$

② 四杆铰接静定平面桁架如图 1-2 所示,已知 $P_1 = 2\text{kN}$, $P_2 = 1\text{kN}$,
 $L = 1732\text{mm}$,杆 AB、BC、BD 采用相同截面 A_1 ,根据图中几何关系可算出上
 述四杆杆长均为 1000mm ,杆 AD 截面为 A_2 ,各杆采用相同材料,受拉许用
 应力 $\sigma_t = 0.16\text{kN/mm}^2$,受压许用应力 $\sigma_c = -0.1\text{kN/mm}^2$,弹性模量 $E =$
 207kN/mm^2 。要求:结构重量
 最轻,各杆满足强度要求,且节
 点 A 处的垂直位移不超
 过 3mm 。

解:由于结构静定,杆长给
 定,各杆内力均可算出,分别记
 为 F_{AB} 、 F_{BC} 、 F_{BD} 、 F_{AD} ,设计变
 量为 A_1 、 A_2 。

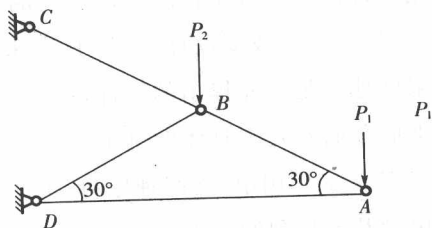


图 1-2

则目标函数为 $W = 3 \times 1000A_1 + 1732A_2$; 约束函数为:

$$\text{应力约束} \quad \frac{F_{AB}}{A_1} \leq \sigma_t, \frac{F_{BC}}{A_1} \leq \sigma_t, \frac{F_{BD}}{A_1} \leq \sigma_c, \frac{F_{AD}}{A_2} \leq \sigma_c$$

$$\text{位移约束} \quad \frac{600}{E} \left(\frac{3}{A_1} + \frac{\sqrt{3}}{A_2} \right) \leq 3$$

此外还有 $A_1 \geq 0, A_2 \geq 0$

上述数学模型记为

$$\min W = 3000A_1 + 1732A_2$$

$$\text{s. t.} \quad \frac{F_{AB}}{A_1} \leq \sigma_t, \frac{F_{BC}}{A_1} \leq \sigma_t, \frac{F_{BD}}{A_1} \leq \sigma_c, \frac{F_{AD}}{A_2} \leq \sigma_c$$

$$\frac{600}{E} \left(\frac{3}{A_1} + \frac{\sqrt{3}}{A_2} \right) \leq 3$$

$$A_1 \geq 0, A_2 \geq 0$$

③ 设计一个扭簧, 已知预加扭矩 $T_1 = 2\text{Nm}$, 最大工作扭矩 $T_2 = 6\text{Nm}$, 工作圈数 $n = 6 \sim 10$, 中径 $D_2 = 16\text{mm} \sim 30\text{mm}$, 钢丝直径 $d = 2\text{mm} \sim 6\text{mm}$, 希望重量最轻, 吸收能量最大, 材料常数 $[\sigma] = 720\text{N/mm}^2$, $E = 2 \times 10^5\text{N/mm}^2$, $\rho = 7.7 \times 10^{-5}\text{N/mm}^2$, 取 D_2, d, n 为设计变量。

解: 目标函数为: 重量 $w = \frac{\pi^2 \rho}{4} D_2 n d^2$

$$\text{吸收能量: } v = \frac{32(T_1^2 - T_2^2)}{E} \cdot \frac{D_2 n}{d^4}$$

$$\text{约束函数为: 强度约束} \quad \frac{32T_2}{\rho} \left(\frac{4D_2 - d}{4D_2 + 4d} \right) \frac{1}{d^3} \leq [\sigma]$$

$$\text{设计变量边界约束} \quad \begin{cases} 6 \leq n \leq 10 \\ 16 \leq D_2 \leq 30 \\ 2 \leq d \leq 6 \end{cases}$$

上述数学模型记为

$$\min w = \frac{\pi^2 \rho}{4} D_2 n d^2$$

$$\max v = \frac{32(T_2^2 - T_1^2)}{E} \cdot \frac{D_2 n}{d^4}$$