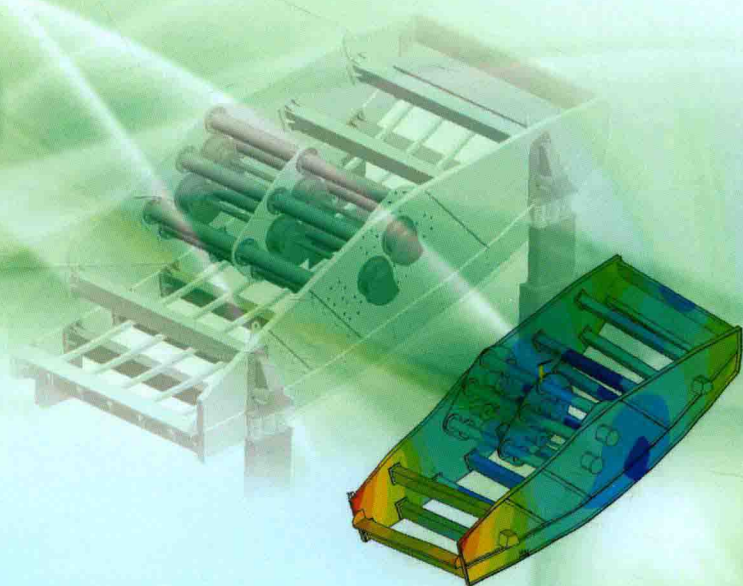


*Study on Dynamic Design of
The Large Vibration Screen with Hyperstatic Net Beams Structure*

超静定网梁结构 大型振动筛动态设计研究

贺孝梅 著



中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

超静定网梁结构 大型振动筛动态设计研究

贺孝梅 著

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书系统地研究了超静定网梁结构大型振动筛动力学特性,将动态设计法应用于大型振动筛的设计中,对大型振动筛的结构进行了动力学修改和结构优化,以提高大型振动筛的可靠性,主要内容包括新型高效筛分结构及其筛分特性分析、超静定网梁结构大型振动筛的结构及动力学参数设计、超静定网梁结构大型振动筛的动力学有限元分析、超静定网梁结构大型振动筛的实验模态分析、超静定网梁结构大型振动筛的动力学修改、超静定网梁结构大型振动筛的动态优化设计。

本书可供高校相关专业师生使用,也可供从事振动机械工作的科技工作者参考。

图书在版编目(CIP)数据

超静定网梁结构大型振动筛动态设计研究/贺孝梅

著. —徐州:中国矿业大学出版社,2016.9

ISBN 978 - 7 - 5646 - 3191 - 8

I. ①超… II. ①贺… III. ①振动筛—动态设计—研究 IV. ①TD452

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第173727号

书 名 超静定网梁结构大型振动筛动态设计研究
著 者 贺孝梅
责任编辑 李 敬 杨 廷
出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司
(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)
营销热线 (0516)83885307 83884995
出版服务 (0516)83883937 83884920
网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com
印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司
开 本 787×1092 1/16 印张 11.5 字数 219 千字
版次印次 2016年9月第1版 2016年9月第1次印刷
定 价 26.00元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

随着煤炭能源需求的增长,煤炭行业迫切需要处理能力大的振动筛进行筛分作业,同时筛分机械大型化可以减少振动筛的数量,降低设备费用,带来较好的经济效益。但是振动筛的大型化将引起筛体结构强度和刚度不足,严重影响振动筛的使用寿命。目前静强度加运动学分析的传统设计,大多是采用经验数据和安全系数的设计计算方法,不能准确揭示出结构内部动态应力分布状况,因此不能保证产品结构的设计合理性,直接影响产品的使用性能与寿命。所以研究和制造大型振动筛,提升设计水平,提高振动筛的运行可靠性已成为一项重要的研究课题。

本书课题来源于国家自然科学基金项目“基于超静定网梁结构大型振动筛的可靠性研究”(50774084)。本书以新设计的超静定网梁结构大型振动筛为研究对象,利用有限元分析法和先进的振动测试手段,将动态设计法应用于大型振动筛的设计中,提高了振动筛的可靠性。

本书根据等厚筛分原理,提出了3种筛分效率较高的新型筛分结构。运用机械系统动力学原理建立了前2种振动筛结构较准确的动力学方程;应用多自由度系统振动理论,对振动筛进行了运动分析,计算了筛面上特殊点的振幅、运动速度、抛掷指数等工艺参数,研究了各自的筛分特性;分析了香蕉筛的结构特点和筛分特性,指出了3种筛分结构各自的适用范围。

本书对超静定结构的特性和该结构应用于振动筛设计的可行性进行了分析,大型振动筛设计中,在香蕉筛基础上,采用了由管群通过跨中的静定板与两根激振器梁的耦联构成的超静定网梁结构;给出了振动筛的主要技术参数,确定了结构关键部件技术,并对振动筛进行了动力学参数的设计计算。

本书进一步分析了大型超静定网梁结构振动筛的动力学特性,研究了振动筛的结构强度和可靠性;给出了提高有限元模型计算精度及稳定性的方法,建立了合理的振动筛有限元计算模型;对螺栓连接,给出了适合的简化方法;应用有限元分析法对振动筛局部重要结构及整体结构进行了固有特性分析,分析结果为结构的动力学修改提供了依据,为实验模态分析的测点布置提供了参考;同时运用有限元分析法对振动筛进行动力响应分析,获得了工作频率下整体及局部结构的动应力和动应变,分析结果验证了超静定网梁结构的优良特性,为振动筛

的结构修改提供了参考。

本书同时采用先进的测试手段对振动筛进行了振动测试。通过对实体样机进行模态测试实验,获得了结构的模态参数。实验结果验证了有限元分析的正确性,并用于指导振动筛局部结构的修改和修正有限元计算模型。

在以上工作的基础上,本书应用灵敏度分析法对振动筛结构进行了动力学修改。根据拉格朗日乘子构造法则,用实验模态频率和振型构造目标函数对有限元模型进行修正,给出了适用于有限元模型修正的质量矩阵和刚度矩阵。基于有限元分析和实验模态分析的结果,应用特征灵敏度分析法对振动筛的进料端、出料端及侧板结构进行修改,使其动力学参数更加合理,提高了大型振动筛的刚度和结构稳定性。

为了解决大型振动筛工作过程中侧板动应力过高易损坏的问题,本书对振动筛进行了结构优化设计。首先基于多频约束,对振动筛侧板的加强筋尺寸及侧板质量进行了优化,给出了适合多频约束的优化准则,并将解析灵敏度计算程序嵌入优化分析程序中。其次,应用增广拉格朗日乘子法,编写出收敛速度快、求解精度高的程序,得到了加强筋在振动筛侧板上的最优布置,达到了以最少筋板数目满足较低应力的要求。结构优化后增加了振动筛的刚度,降低了变形,提高了结构的可靠性。该大型振动筛投入生产后,运行稳定,使用效果良好。空载运转实验检测结果表明:整机性能达到了设计所要求的工艺技术指标。

著 者

2016年6月

前言	1
1 绪论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 大型振动筛的研究现状	2
1.3 结构动态设计方法研究概况	4
1.4 结构优化设计的研究现状	9
1.5 本书的研究内容	11
1.6 小结	12
2 振动筛的工作原理及工艺参数选择	13
2.1 振动筛的筛分原理	13
2.2 惯性振动筛的工作原理	14
2.3 振动筛工艺参数的选择	20
2.4 小结	22
3 新型筛分结构的提出及其筛分特性分析	23
3.1 普通振动筛的筛分特点	24
3.2 理想筛面运动方式的特点及可行方案	25
3.3 变直线轨迹等厚振动筛的分析	26
3.4 变椭圆轨迹等厚振动筛的分析	33
3.5 香蕉筛特性分析	40
3.6 小结	44

4	超静定网梁结构大型振动筛的结构及动力学参数设计	46
4.1	超静定结构的特性	46
4.2	CWS3675 超静定网梁结构大型振动筛的设计	47
4.3	振动筛动力学参数分析	55
4.4	CWS3675 超静定网梁结构大型振动筛的动力学参数设计	58
4.5	小结	63
5	超静定网梁结构大型振动筛的动力学有限元分析	64
5.1	有限元动力学分析理论	64
5.2	CWS3675 超静定网梁结构大型振动筛有限元计算模型的 建立	73
5.3	振动筛的固有特性分析	78
5.4	振动筛的动应力响应分析	97
5.5	小结	104
6	超静定网梁结构大型振动筛的实验模态分析	106
6.1	实验模态分析理论	106
6.2	模态测试实验	111
6.3	模态实验结果分析	115
6.4	小结	121
7	超静定网梁结构大型振动筛的动力学修改	122
7.1	振动筛有限元模型的修正	122
7.2	灵敏度分析	124
7.3	振动筛结构动力学修改	127
7.4	结构修改后振动筛的动力学特性	137
7.5	小结	140
8	超静定网梁结构大型振动筛的动态优化设计	141
8.1	结构优化设计	141
8.2	基于频率约束的振动筛结构参数优化	143
8.3	基于增广拉格朗日乘子法的振动筛布局优化设计	154

目 录

8.4 应用效果	162
8.5 小结	163
9 结论与展望	164
9.1 结论	164
9.2 存在问题和展望	165
参考文献	167
致谢	176

1 绪 论

1.1 研究背景及意义

近年来,随着国民经济的快速增长和技术的进步,冶金、煤炭、矿山、建材、水电等行业迫切需要处理量大的振动筛进行高效率地筛分、脱水、脱介作业。在煤炭行业,采煤机械化程度的不断提高和国民经济的发展对煤炭的需求越来越大,使得煤矿产量日益增加,这对筛分机械处理能力的要求也越来越高^[1,2]。同时新建选煤厂和老厂改造,都面临着新的设备选型和更新,尤其在选煤厂重介工艺系统设备中,筛宽 3.0~3.6 m 的大型振动筛需求量很大。大型矿井的原煤分级和原煤干法深度筛分都需要大型振动筛^[3-5]。同时,筛分机械的大型化可以减少振动筛的使用数量,减少设备费用和设备管理费用,带来较好的经济效益。因此,研究和制造大型振动筛就成为一项重要的课题。

筛分机械的大型化对机械结构的强度和刚度提出了高要求。筛分机械结构增大,对其振动强度的要求也相应增加。筛宽增加一倍,管梁的应变要增加许多倍,所以,管梁的截面尺寸会迅速增大,这使得地基的动负荷也成倍增加,给机械制造业带来极大困难^[6,7]。另外,结构增大后,必然引起筛体的参振质量和所需的激振力增大,则筛体的动负荷也随即增大,引起筛体结构强度和刚度不足,导致筛体变形过大、侧板撕裂、横梁断裂、焊缝开裂,严重影响筛分机械的使用寿命^[8-11]。表 1-1 是国内 24 m² 以上振动筛使用情况的调研和统计分析。国内生产的振动筛使用寿命一般为 3~5 年,其中大型振动筛一般为 2 年左右,德国和波兰等国一般为 5~8 年,美国为 5 年以上,俄罗斯规定第一次大修前,使用时间为 14 000~18 000 h^[6-9]。我国大型振动筛的设计和制造起步较晚,技术还不够成熟,主要依靠引进国外图纸和技术^[8]。由于国外的技术壁垒和国内制造技术和材料的限制,国内制造的大型筛运行情况一直不理想。选煤生产对筛分设备提出了效率高、运行可靠、制造成本低、减少污染(降低噪声)等方面的要求。而目前我国振动筛分设备的设计水平还不能满足这些要求,尤其是在运行的可靠性及零部件的使用寿命等方面与国外先进设备相比还有一定差距。因此,如何提高我国振动筛分设备的设计水平,提高振动筛运

行的可靠性,是我们面临的重要课题。

表 1-1 24 m² 以上振动筛运行状况^[12]

制造厂商	设备型号	使用情况	结果分析
德国 KHD 公司	USL3675 (27 m ²)	正常工作 5 年以上,之后出现横梁断裂、侧板开裂现象	从横梁断裂部位和断口形状看,侧板裂纹为疲劳损伤所致,横梁断裂是因为振动筛结构刚度小,出现亚共振现象
日本神户制钢所	3.2×7.5 (24 m ²)	正常工作 3 年以后,出现次纵梁断裂现象,噪声较大	振动筛结构刚度小,出现亚共振现象,由于是强制同步,应力和噪声较大
洛阳矿山机械厂	3.6×7.5 (27 m ²)	正常工作 3 个月后,次纵梁出现断裂和螺栓松动现象,噪声较大	振动筛结构刚度小,出现亚共振现象,是强制同步,应力和噪声较大,螺栓松动属于质量和责任心问题
唐山分院	ZK30525	运行不平稳,有“漂振”现象,出现横摆超差	振动筛结构刚度小,出现亚共振现象;加工质量有问题,侧板上装轴承座的孔与侧板垂直度及两孔之间的同轴度不能得到保证

目前国内筛分机的设计,一般以常规的设计算法和类比设计方法为主,对振动筛结构强度的研究只作静强度计算和分析,未考虑高阶和局部结构的动态特性影响^[13]。振动筛筛箱在强大的激振力交变载荷的作用下很容易发生疲劳损坏,经验表明,振动筛的静强度大大满足要求的情况下,筛框也会发生损坏。因此在设计阶段,就需要对振动筛的性能、参数、结构和强度等作详尽的分析,把动力学分析法引入现代设计中,对大型振动筛的结构动态特性进行分析。通过对结构进行动态设计,开发新型结构的振动筛,适应大型化发展的要求,提高振动筛的稳定性和可靠性,延长其工作寿命。

1.2 大型振动筛的研究现状

为了提高综合经济效益,大型的选煤厂、选矿厂和采石厂等的建设项目日益增多,因此,发展大型振动筛并提高处理能力是今后努力的目标之一。德国在发展中小型振动筛的基础上,研制了规格为 5.5 m×10 m 的大型振动筛,筛分面积达 55 m²;申克(Schenck)公司制造了规格为 4 m×8.5 m 的焦炭筛分机,筛分面积为 34 m²,处理能力达 800 m³/h^[14]。日本神户制钢所研制的 HLW 型振动

筛,最大规格为 3.6 m×7.5 m,筛分面积为 27 m²;川崎重工还研制了 4 m×9.5 m 的直线振动筛,筛分面积为 38 m²。美国泰伯(Tabor)机械公司研制了 3.7 m×7.3 m 的直线振动筛,面积为 27 m²,入料粒度可达 1 m,属特重型振动筛^[6,8]。

1949 年以来,我国振动筛的设计走过了一个从无到有、从小到大、从落后到先进的发展过程,前后经历了测绘仿制、自行研制和引进提高 3 个阶段。我国最先引进的是日本神户制钢所的 6 台 27 m² 大型振动筛,用于淮北临涣选煤厂^[15]。近几年我国大型选煤厂较多地引进了澳大利亚约翰芬雷公司,美国康威德公司、朗艾道公司,德国申克、KHD 等公司的大型振动筛。表 1-2 为国内自行设计或引进技术生产制造的不同型号较大型振动筛。在引进的振动筛中,筛面宽度最为典型的是 3 m、3.6 m、4.2 m 几种筛型。国内制造振动筛比较著名的公司有鞍山矿山机械股份有限公司、南昌矿山机械有限公司等,可靠性较好的是筛宽 3.0 m 以下的振动筛。这些筛型由于不可避免的大激振力,对轴承的承载能力和回转精度要求都很高,所以激振器一般都采用稀油润滑,直线同步齿轮传动结构;主梁结构一般都是采用矩形或者工字梁作为激振载体,结构制造工艺复杂,生产维护困难^[16];对板材和型材的综合机械性能要求很高。国内由于结构设计、工艺技术水平 and 原材料方面的原因,筛分面积 21 m² 以上的大型振动筛一直依赖进口,花掉国家不少外汇,给企业增加了很大的经济压力。

表 1-2 我国制造的较大型振动筛^[16]

型 号	面积/m ²	处理能力/(t/h)	备 注
YAH2460 圆振动筛	14.4	1 500	引进美国 R·S 公司技术
ZMD2556 圆振动筛	14	—	
USK3.60×6.00 圆振动筛	21.6	—	引进德国 KHD 公司技术
ZKX2460 直线振动筛	14	—	引进美国 R·S 公司技术
ZK3675 直线振动筛	27	—	引进日本神户制钢所技术
USL4.50×6.50 直线振动筛	27	1 080	引进德国 KHD 公司技术
SLZ4090 冷矿筛	36	540	
LZ3090 冷矿筛	27	—	
SL3090 冷矿筛	27	—	

国内在大型振动筛的设计和研究方面,取得了一些成效。北京科技大学孙刚研制的博后筛在大型化方面取得了重要进展,博后筛采用分段驱动、软连接实现了振动筛的大型化,是我国独创的一种新型筛分机,其筛面面积达到 40 m²,

在工业应用中取得了较好的效果^[17]。QLS30120 强力筛为低频大振幅振动筛,面积约为 30 m^2 ,用于 3 mm 煤炭分级,处理量达 500 t/h ,机重 26 t ,它成功地把大型振动筛参振质量化大为小,分段组合^[16]。河南威猛振动设备股份有限公司将 12 台 $2 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ 的节肢筛组合在一起,形成了 72 m^2 振动筛,用于选煤系统的分级和脱水、脱介,效果很好^[15]。同样,中国科学技术大学为铁法矿务局小青矿研制了筛框不动、筛网振动的大型振动筛。今后,我们还要继续深入研究新的筛分理论和技术,发展新的筛分方法和技术,寻求合理的结构形式、动力配置和动力学参数,研制高效筛分机械。

1.3 结构动态设计方法研究概况

机械结构设计是随着科学技术的进步、社会的发展而不断发展的,它由早期凭人们的经验进行设计,发展到设计与力学分析相结合,直到现代的结构优化设计,但就强度而言,仍是基于静力准则的结构设计。目前工程中的机械结构设计^[18]大多仍是按静力准则进行的,然后,再采取抑制振动水平的措施,甚至当产品在使用中出现严重的振动问题后,才采取措施抑制产品的振动水平。实践证明,这种办法耗资巨大,效果并不理想,事倍功半。因而传统的基于静力准则的机械结构设计方法是无法满足现代产品的设计要求的。对承受动载荷的结构,采用结构动态设计方法是满足现代产品设计要求的有效方法,通过动态设计达到控制机械结构的振动水平、改善产品的质量、提高产品的安全可靠性等目的,即“优生”,这也是符合国际、国内机械结构设计技术发展方向的。

结构动态设计^[19]是指在设计阶段,根据结构工作的动力学环境,按照功能、强度等方面的要求对结构进行设计,以使它具有良好的动态特性,达到控制产品振动水平的目的。

1.3.1 结构动态设计的研究现状

结构的动态设计问题研究从 R. L. Fox 和 M. P. Kapoor^[20]的工作开始展开,既有对简单的、小型结构的谐波激振问题的研究,又有对复杂的、大型结构的动态载荷的优化问题的研究^[21]。一般地,按照所研究问题的性质可以将结构的动态设计分为两大类:一类是对结构特征值进行约束优化,主要针对频率和振型两个方面;另一类是对结构响应进行约束优化,主要针对位移、速度、加速度、应变响应等方面。

结构动态设计研究工作具有很强的工程背景。由于工业发展的需要,国际上工业发达国家开展这一研究工作比国内早,约始于 20 世纪 70 年代初。在结

构动态设计这一领域的研究十分活跃,一年一度的国际模态分析学术会议规模越来越大,特别是美国、西欧等一些工业发达国家,十分重视关于结构动态设计问题的研究,并将其列为结构设计领域的重点发展方向之一。但从发表的文献^[22-26]来看,研究工作大多集中在带有频率要求的结构动态设计上,基本都是设计方法与原理的研究以及简单例题的验证,很少见到经过实验验证的结构动态设计实例的报道。

近年来我国在这一领域的研究有较大的进展,但在通用机械方面的研究还比较落后。为了跟踪国际先进技术,提高我国机械产品的现代设计水平,增强我国机械产品与设备在国际市场的竞争能力,我们必须对结构动态设计理论与方法进行深入的研究,这是一项具有战略意义的工作。

我国学者在动态设计方面的研究主要是从航空航天领域开始,并深入其他领域,尤其是从 20 世纪 90 年代以来,做了许多开创性的工作。文献^[27,28]进行了结构的频率优化设计研究,并且有的工作在软件开发中已将动态设计模块与微机上通用有限元程序联结起来。同时,有的研究者进行了结构的响应优化设计研究^[29,30],主要是采用数学规划方法,对杆、梁、板等结构的位移、频率响应进行了优化设计,并且有的工作考虑了局部非线性、随机激励等因素。

灵敏度分析^[28,31]是结构动态设计的重要内容,被国内外研究者普遍关注。在结构动力学分析中,灵敏度是指结构的振动特性和动力响应因结构参数的变更而变化的程度。它决定修改哪些结构参数以使结构动力学设计目标更有效,从而指导选择设计措施。这些结构参数包括原有结构的刚度、惯性和阻尼参数,也包括附加子系统的组合参数。研究方法^[32-34]多种多样,有的是从方法角度对之进行探讨,如直接积分法、振型空间法以及各种加速方法等;有的是从结构动态特性方面进行研究,如特征值灵敏度分析、响应灵敏度分析等;还有的是从应用的角度,对不同的结构或结构特性进行研究。

1.3.2 结构动态设计的研究方法

振动机械等大型机械的动态设计方法,越来越受到人们的重视,结构动力学分析理论和与之相关的先进的实验测试手段都得到了长足的发展。研究结构动态特性最常用的方法是结构模态分析技术。结构模态分析的最终目的是识别出结构的模态参数,以便人们利用这些模态参数更好地解决实际问题。经过近 30 年的发展,模态分析技术已经有了长足的进步,并已广泛应用于机械、航空、航天、航海、汽车、动力、土木等工程领域,成为机械与结构振动排查和动态设计的重要手段,而且,在基于振动的机械、结构状态监测与诊断中有着美好的前景。

结构模态分析技术大体可分为计算模态分析(主要利用有限元法 FEM)和

实验模态分析(EMA),即理论建模和实验建模。它们相辅相成,成为解决现代复杂结构动态特性设计的重要手段。基于有限元分析和实验模态分析的关键技术主要有载荷识别、灵敏度分析、物理参数修改、物理参数识别、再分析和结构优化设计^[29,30,35]。

1.3.2.1 有限元分析法

有限元法是在差分法和变分法的基础上发展起来的一种数值方法,它吸取了差分法对求解域进行离散处理的启示,又继承了里兹法选择试探函数的合理方法^[36]。有限元分析是利用数值计算方法对系统进行理论建模的强大工具,除了对结构的形状复杂、载荷与支承也复杂的零部件进行应力分析外,结构动力学分析同样也可以借助于有限元方法来进行,是结构动态设计的一个重要组成部分。近些年来,有不少新的有限元算法问世,为动态设计提供了强大的理论工具。

小波有限元^[37,38]是在有限元的插值函数中引入小波项插值函数,它主要应用于分析具有大的梯度及具突变性质的问题,但对普通问题并无重大的实际意义。小波有限元法由于采用小波函数来构造其插值函数,因此它继承了小波分析多分辨率的特性,可以对大的梯度及具突变性质的问题给出较高分辨率的分析,这是其最大的优点。利用非协调分析及分片实验确定了解的数值稳定性及收敛性,同时也给出了插值函数的构造方法,加之具有紧支集的正交小波基函数是极易构造的,而且计算也相对较容易(例如 Daubechies 系列小波)^[39],因此这将是分析大梯度及具突变性质问题的有力工具。

近 20 多年来,计算力学中的样条有限元法^[40]已获得了长足的发展:在弹塑性力学、固体力学、流体力学、岩土力学、地基与基础、结构动静力学、厚薄板壳、叠层板壳、加筋板壳、高层建筑结构、线性与非线性问题、动力学中的多输入与多输出和时变与时不变系统等问题,都得到了应用与发展。而且,从单变量发展到多变量问题;从规则区域发展到非规则区域问题;从静力问题发展到振动、稳定与动力响应问题;从结构问题发展到流体等非结构问题;从线性问题发展到非线性问题等。到目前为止,根据不完全的资料初步统计,在国内外期刊与学术会议上,大约发表了 200 余篇有关样条有限元法的论文;在国内已出版了有关样条有限元法方面的书籍并开发了相应的计算程序。

随着计算数学中的多元样条函数理论研究^[40,41]的进展,应用多元样条构造任意单元形体的形函数,使样条有限元应用于复杂结构的分析,可望不久的将来能获得突破性进展,从而使得计算力学中的样条有限元法进一步深入发展,前景令人鼓舞。

微分方程数值解法是计算数学最活跃的分支之一,有限元方法因在求解微

分方程方面的有效性、实用性,而长期受到计算数学和工程界的喜爱,在处理非奇异的偏微分方程方面(尤其是椭圆和抛物型方程)^[42],有限元方法可以说是尽善尽美了,但是对奇异情形却有许多不尽人意之处。例如现在处理奇异情形的最常用方法——局部加密网格法,一般要预先知道解的奇异程度,另外当网格在奇点周围逐步加密时,容易破坏网格剖分单元的拟一致性,这在计算上是不利的。对给定的微分方程边值问题,在不知道其解的奇异度和奇异位置的情况下,利用小波变换由计算机自动将解的奇异位置和奇异度检测出来,然后根据检测出的奇异情况,自动引入奇异有限元基函数(局部加密网格法所引入的基是分片多项式),通过奇性抵消建立有效的奇异有限元法。这种方法的优点是:除了不要预先知道解的奇异位置和奇异度(只要求解的奇性范围),还可对求解区域使用尽可能均匀的剖分网格(这是因为它不是通过加密网格而是通过选取适当的奇异有限元空间来处理奇性的)。因而奇异有限元法是一种具有较重要的理论和实用价值的新方法^[43,44]。

1.3.2.2 模态分析法

振动模态分析法^[34,35],就是利用系统固有模态的正交性,以系统的各阶模态向量所组成的模态矩阵作为变换矩阵,对通常选取的物理坐标进行线性交换,使得振动系统以物理坐标和物理参数所描述的、互相耦合的运动方程组,能够变为一组彼此独立的方程(每个独立方程只含一个独立的模态坐标)。这个用模态坐标和模态参数所描述的各个独立方程,称为模态方程。模态分析实质上是一种坐标变换,其目的是解除方程的耦合,便于求解。由于坐标变换是线性变换,因而系统在原有物理坐标系中,对于任意激励的响应,便可视为系统各阶模态的线性组合,故模态分析法,又称为模态叠加法。而各阶模态在叠加中所占的比重或加权系数,则取决于各阶的模态坐标响应。一般说来,高阶模态比低阶模态的加权系数要小得多,通常只需要选取前 n 阶模态进行叠加,即可达到足够的精度。由此可知:模态分析的主要优点就在于,它能用较少的运动方程或自由度,直观、简明而又相当精确地去反映一个比较复杂结构系统的动态特性,从而大大减少测量、分析及计算工作量^[34,45]。

模态分析的首要任务是求出系统各阶模态参数(系统的固有频率和振型、模态质量、模态刚度及模态阻尼等)。尽管实际选取的模态阶数不是很多,但在处理大型复杂结构时,要通过理论建模与分析比较精确地完全计算出这些模态参数,也是极其困难的。这种方法只有与实验分析法相结合,才能充分发挥模态分析的优越性。

机械阻抗(或机械导纳)测试技术与 FFT 分析技术的迅速发展,为实验模态参数的识别创造了极为方便和有利的条件。近年来新的模态参数识别方法不断

涌现,模态参数识别已成为现代模态分析不可缺少的重要内容之一。

按照模态向量是实数还是复数,振动模态可分为两大类,即实模态与复模态。无阻尼系统和比例阻尼系统的模态均为实模态,一般阻尼系统的模态为复模态。模态分析方法是把复杂的实际结构简化成模态模型,来进行系统的参数识别,从而大大简化系统的数学运算。通过实验测得实际响应来寻求相应的模型或调整预想的模型参数,使其成为实际结构的最佳描述^[18,19,46-49]。

1.3.3 结构动态设计的流程

结构动态设计的基本过程^[26]如下:

(1) 初步设计。

根据设计任务进行产品初步设计,绘制初步设计结构图。

(2) 应用有限元分析对设计结果进行动态性能校核与修改。

建立结构有限元模型,首先求解特征值问题,得到结构的固有频率和固有振型,检验这些模态参数是否符合模态参数模型准则,如固有频率是否远离外部激励频率。如不符合,通过特征灵敏度分析寻找拟修改,由再分析方法或重新求解特征值问题^[50],得到修改后的频率和振型,直到满足要求。

其次,根据理论计算或经验预估结构载荷,并由经验假设系统阻尼,按上面得到的有限元模型计算系统的动态响应,包括位移、速度、加速度、变形和应力等,检验是否满足响应准则。如不满足,则通过灵敏度分析修改有限元模型,得到修正质量矩阵和修正刚度矩阵,重新计算结构响应,直到满足要求。另外,还需校核模态参数,制造样机或实验模型。

(3) 实验模态分析。

对样机或实验模型进行模态实验,获得实验模态频率 ω_i 和振型 ϕ_i 。这些参数或由其识别出的模态参数 ω_{oi} 、 φ_i 与有限元分析结果之间存在误差。检验实验模态参数是否满足模型准则,若不满足,通过特征灵敏度分析和再分析估计修改后结构参数,直至满足要求。

(4) 结构动态修改。

这一步包括:① 物理参数修改,结合实验模态结果和有限元分析得到的质量矩阵、刚度矩阵,求修改质量矩阵 ΔM 和刚度矩阵 ΔK ,得到修改后的 M 、 K ;② 物理参数识别,直接求解广义逆特征值问题,求得 M 、 K 、 C ;③ 载荷识别,根据实验模态参数和响应要求估算系统的实际振动环境。

在上述工作基础上,通过有限元分析计算系统响应,或修改样机或模型后实测系统响应,检验是否满足响应准则。如不满足,则通过响应灵敏度分析修改结构和再分析估算模态参数和响应,直到满足要求。

(5) 结构优化设计。

在上述结构动态修改工作中,一般只能得到物理参数的修改量。若以结构参数如结构尺寸、形状、材料性质等为修改参数,可直接得到满足要求的修改结构形式。

(6) 产品生产。

至此完成了结构动态设计的全过程。

为清晰起见,将上述设计过程表示出来,如图 1-1 所示。

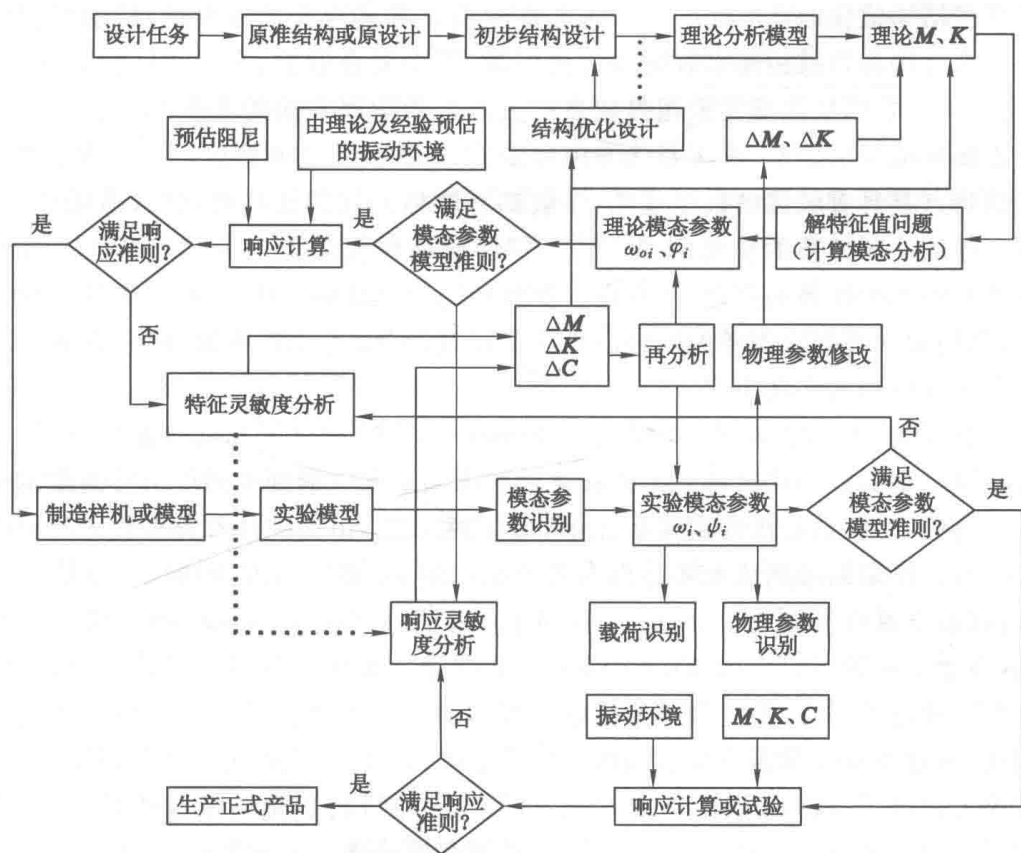


图 1-1 结构动态设计流程图^[26]

1.4 结构优化设计的研究现状

结构优化设计是优化方法在结构设计中的应用。现代结构优化设计主要指结构设计的计算机自动寻优。该方法将计算力学、数值分析与数学规划理论相结合,以具有大存储量和高速处理能力的计算机为工具,系统地、自动地进行结