

基于系统工程的产品综合设计理论与方法

产品的结构性能 及动态优化设计

闻邦椿 韩清凯 姚红良 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

基于系统工程的产品综合设计理论与方法

产品的结构性能 及动态优化设计

闻邦椿 韩清凯 姚红良 编著



机械工业出版社

本书是对“基于系统工程的产品综合设计理论与方法”进行系统叙述的六部系列著作中的第三部。该系列著作分别是：①产品全功能与全性能的综合设计；②产品的主辅功能及功能优化设计；③产品的结构性能及动态优化设计；④产品的使用性能及智能优化设计；⑤产品的制造性能及可视优化设计；⑥机械产品设计质量的检验与评估。

本书总结了作者所在科研团队长期从事机械产品研究、设计和开发的科学研究工作所取得的实际成果，也吸取了国内外学者在该领域的一些主要研究成果。

本书从产品的结构性能出发，首先介绍现代机械动态优化设计的意义和种类，讨论动态优化设计的目标、主要内容与方法，接着介绍动态优化设计方法的若干理论基础：线性与非线性振动、线性与非线性动力有限元、多体系统动力学、产品优化设计方法及机器零部件可靠性与系统可靠性设计，进而叙述传统的与深层次的动态优化设计方法，最后列出了动态优化设计方法在典型机械中的具体应用。

本书可作为工程专业的研究生和高年级本科生阅读，也可作为科研院所从事产品研究与设计及企业部门的工程技术人员的参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

产品的结构性能及动态优化设计/闻邦椿，韩清凯，姚红良编著. —北京：机械工业出版社，2008.7
(基于系统工程的产品综合设计理论与方法)
ISBN 978-7-111-24581-0

I. 产… II. ①闻…②韩…③姚… III. 产品-设计 IV. TB472

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 099490 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)
责任编辑：沈红 版式设计：霍永明 责任校对：张莉娟
封面设计：鞠杨 责任印制：邓博
北京京丰印刷厂印刷
2008 年 10 月第 1 版·第 1 次印刷
169mm × 239mm · 28 印张 · 543 千字
0001—4 000 册
标准书号：ISBN 978-7-111-24581-0
定价：55.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换
销售服务热线电话：(010) 68326294
购书热线电话：(010) 88379639 88379641 88379643
编辑热线电话：(010) 68351729
封面无防伪标均为盗版

前 言

众所周知，机械产品在国内外市场中竞争力的强弱，在很大程度上取决于产品的质量。产品的质量是通过精心设计、精密制造和严格管理而获得的。产品的设计工作对其质量有十分重要的影响，这是因为产品的设计可赋予产品“先天性优劣”这种至关重要的本质特性。

产品的设计质量包括用户、企业及社会对产品设计工作提出的所有质量要求，包括对产品全部功能和性能的质量要求。为了满足产品设计质量的要求，科技工作者已提出并研究了数十种设计方法，这些设计方法能够在不同程度上满足产品某一方面或某些方面设计质量的要求。

为了较全面地满足用户、企业及社会对产品设计质量提出的要求，本系列著作构建了基于系统工程的产品设计的总体规划的理论模型，即7D总体规划模型，其中包括设计思想、设计环境、设计过程、设计目标、设计内容、设计方法及产品设计质量检验等七个方面的内容，阐明了它们的内涵，并将产品设计工作划分为规划、实施和检验等三个阶段，即三段设计。在此基础上，提出了将几种对产品质量有决定性影响的设计方法有机地结合在一起对产品进行设计，我们把这种设计方法称为综合设计法。

综合设计法明确地提出了以用户需求为驱动，以产品的设计质量为目标，以多种学科的理论与技术为基础，以功能设计、动态设计、控制系统设计和智能设计及可视化设计为内容，以广义优化、现代仿真技术和数字化技术为手段。本系列著作中不仅讨论了以线性理论为基础的一般综合设计法，还讨论了以非线性理论为基础的深层次的综合设计法，因此，本系列著作提出的方法对于各类机械设备的设计均具有较好的适用性。

综合设计法的主要内容是功能优化设计、动态优化设计、智能优化设计和可视优化设计，因此也可以称它为四优设计法，或面向产品全部功能和性能的综合设计法。本系列著作把这种设计法概括为 $1+3+X$ 设计法，1即为功能优化设计，3为“动态优化、智能优化和可视优化”融合在一起的三化设计或三优设计，X为对某种产品有特殊要求的设计方法。随着科学技术的快速发展，综合设计法的内涵也将随着科学技术的进步和发展不断得到补充和完善。

综合设计法的主要内容之一：产品的7D总体规划模型及 $1+3+X$ 综合设计的理论框架。

综合设计法的主要内容之二：产品的功能优化设计，是从产品所要实

能和用户所提出的基本要求出发,选定产品的设计方案,确定产品机构的形式、各种系统和结构的组成,计算与选择产品的主要参数等。

综合设计法的主要内容之三:产品的动态优化设计。即在已完成产品方案设计(初步方案)的基础上,进一步分析和计算机械设备及其系统的运动学和动力学参数等,计算零部件的刚度、强度及工作耐久性等,进而确定机械设备及其零部件的尺寸;通过理论分析,并在可能进行的结构或其模型试验的基础上,对初步设计阶段的图形和方案进行修改。本书研究并提出了基于非线性动力学理论的深层次的动态设计理论与方法。

综合设计法主要内容之四:产品的智能优化设计。它有两种不同的含义,一是采用智能化手段,来完成产品设计;二是对所设计的产品的主要参数和工作过程实现智能控制和优化,使机械设备具有更高的工作性能及智能化程度。本书提出的智能优化设计是对机器的主要参数和工作过程实行智能控制和优化,其主要目标是提高产品的工作性能。

综合设计法主要内容之五:产品的可视优化设计,也是局部范围内的虚拟设计。在设计过程中采用三维造型和各种先进的可视化技术和手段,将机械设备的结构、制造和装配过程、工作过程的特征形象地表现出来,并通过可视化来检验产品各种工作过程的可行性和合理性,发现产品设计中的不足,进而对产品的设计进行修改,以便提高产品的设计质量。

综合设计法主要内容之六:产品设计质量的检验与评估。可以采用三种方法:一是采用理论方法进行评估;二是通过模型试验检验产品设计质量;三是通过用户使用检验产品设计质量。

这六方面的内容组成了一个完整的设计系统。从系统工程的角度来看,它是一个完整的技术系统。为了系统地讲述提出的理论与方法,特分为六个分册出版。这六部著作分别是《产品全功能与全性能的综合设计》、《产品的主辅功能及功能优化设计》、《产品的结构性能及动态优化设计》、《产品的使用性能及智能优化设计》、《产品的制造性能及可视优化设计》和《机械产品设计质量的检验与评估》。

本系列著作是闻邦椿教授及他所领导的科研团队,经过30余年从事产品设计实践的经验和对设计理论与方法进行系统研究所取得科研成果的总结。本书所提出的创新点有:

- 1) 鉴于目前科技界对已提出的数十种设计理论与方法还未进行分类,从宏观角度来看,对设计理论与方法的研究和讲述尚处于零散、无序、缺乏整体性和完整性的散乱状态。对它们进行分类有利于找出它们的共性与特性,并促进其进一步的快速发展,因此,本书首先对数十种机械产品的设计理论与方法的分类进行了有益的尝试。

2) 提出并阐明了基于系统工程的产品设计的7D(设计思想、设计目标、设计内容、设计方法、设计环境、设计质量评价)规划模型。

3) 阐明了产品功能和性能的概念,明确地把产品的设计质量具体化为产品的主辅功能和三大性能,详细地论述了产品的总功能和产品三大性能的内涵。

4) 给出了产品质量和设计质量的定义。

5) 研究并提出了面向产品全部功能与性能的综合设计理论与方法。

6) 给出了 $1+3+X$ 综合设计法简洁的公式。

7) 研究并提出了深层次的,即考虑机械系统的非线性、非稳态、高维、强耦合、不确定等的综合设计理论与方法。

8) 对产品设计质量的检验与评估方法进行了研究。

9) 用综合设计方法研究了典型机械的设计问题。

本书为系统著作中的第三部,第1章为概论,第2章讲述动态优化设计方法的种类和特点,及其目标、内容和方法,第3、4、5、6、7章介绍动态优化设计若干理论基础:线性与非线性振动分析方法、线性与非线性动力有限元方法、线性与非线性多体系统动力学、机器零部件的优化设计方法和机器零部件与系统可靠性分析,第8、9章研究传统的和深层次的动态优化设计方法,第10、11、12章列出了动态优化设计的应用实例。

本书由闻邦椿教授、韩清凯教授和姚红良博士撰写。书中吸取了科研组其他同志的一些研究成果,他们是佟杰新、张国忠、任立义、纪盛青、刘树英、柳洪义、刘杰、张天侠、张义民、李奎贤、袁惠群、李以农、何勍、宋伟刚等教授,林文强、赵春雨、李东升、王凤兰、宿苏英等副教授,任朝晖、罗忠、张晓伟、李鹤、李小彭、陈宏、孙伟、刘杰博士等,本书还参阅了国内外一些重要技术文献中的一些重要成果。在编写过程中,东北大学机械设计及理论研究所及有关兄弟单位给予了支持和帮助。

特别应该指出的是,本系列著作是东北大学985工程建设项目“重大机械装备设计制造关键共性技术”创新平台建设的一部分成果之一,也是本课题组正在执行的“现代机构创新及机械系统动态优化设计理论与方法的研究”国家自然科学基金重点项目(50535010)和“面向先进装备制造的现代设计方法与示范应用”沈阳市重大科技攻关项目等研究的部分成果。

本书会有许多不妥之处,望读者给予指正。

作者

2008年6月

目 录

前言

第 1 章 概论 1

- 1.1 动态优化设计的概念及研究的意义 1
- 1.2 动态优化设计的发展 1
- 1.3 传统的与深层次的动态优化设计的特点 3
- 1.4 动态优化设计的若干理论基础 5
- 1.5 结语 12

第 2 章 产品动态优化设计的目标、内容与方法 13

- 2.1 概述 13
- 2.2 动态优化设计的广义目标与具体目标 14
- 2.3 产品动态优化设计的具体内容 20
- 2.4 动态优化设计的方法 22
- 2.5 产品动态优化设计的主要步骤 24
- 2.6 动态优化设计的目标、内容与方法的关联方程式 25
- 2.7 动态优化设计对产品设计质量的影响 26
- 2.8 结语 28

第 3 章 线性与非线性振动设计 30

- 3.1 概述 30
- 3.2 单自由度线性系统的振动 30
- 3.3 二自由度线性系统的振动 41
- 3.4 多自由度线性系统的振动 51
- 3.5 单自由度非线性系统

的振动 59

- 3.6 弱非线性多自由度振动系统的渐近法 91
- 3.7 慢变参数系统的渐近法 98
- 3.8 非线性振动系统的分岔与混沌 101
- 3.9 非线性振动系统的设计计算实例 111
- 3.10 结语 113

第 4 章 线性与非线性动力有限元法 115

- 4.1 概述 115
- 4.2 弹性力学理论基础 116
- 4.3 平面三角形单元的有限元法 122
- 4.4 机械结构的动力有限元法 133
- 4.5 利用有限元求解机械结构的固有特性 136
- 4.6 机械结构的动态响应分析 141
- 4.7 非线性动力有限元法 148
- 4.8 结语 160

第 5 章 线性与非线性多体系统动力学 161

- 5.1 多刚体系统的运动表示方法 161
- 5.2 多刚体系统的运动学分析 165
- 5.3 多刚体系统的动力学分析 172
- 5.4 多刚体系统动力学的微分

| | | | |
|---|-----|---|-----|
| 代数方程分析 | 178 | 第 9 章 以非线性理论为基础的深层次动态优化设计 | 345 |
| 5.5 柔性多体系统的动力学分析 | 182 | 9.1 概述 | 345 |
| 5.6 多体系统动力学仿真举例 | 187 | 9.2 深层次的动态优化设计的目标和特点 | 345 |
| 5.7 结语 | 190 | 9.3 深层次动态优化设计的内涵 | 346 |
| 第 6 章 优化设计方法 | 191 | 9.4 深层次动态优化设计的步骤和方法 | 349 |
| 6.1 概述 | 191 | 9.5 深层次动态优化设计应用举例 | 355 |
| 6.2 优化方法的数学基础 | 199 | 9.6 结语 | 367 |
| 6.3 无约束优化方法 | 209 | 第 10 章 一般机械动态优化设计举例 | 368 |
| 6.4 有约束优化方法 | 226 | 10.1 概述 | 368 |
| 6.5 多目标函数的优化方法 | 239 | 10.2 单斗挖掘机的结构与工作原理 | 368 |
| 6.6 应用举例 | 242 | 10.3 单斗液压挖掘机的动态优化设计 | 378 |
| 6.7 结语 | 255 | 10.4 结语 | 389 |
| 第 7 章 可靠性设计 | 256 | 第 11 章 振动机械动态优化设计举例 | 390 |
| 7.1 概述 | 256 | 11.1 概述 | 390 |
| 7.2 可靠性设计常用的分布函数 | 264 | 11.2 新型振动沉拔桩振动机构的选取 | 390 |
| 7.3 零件可靠性设计 | 272 | 11.3 隔振系统设计 | 395 |
| 7.4 系统可靠性设计 | 291 | 11.4 振动沉拔桩机振动系统的动力学方程 | 396 |
| 7.5 随机参数非线性系统的可靠性和可靠性灵敏度分析 | 300 | 11.5 振动沉拔桩机系统数学模型及其动力学特性 | 397 |
| 7.6 故障转子系统的可靠性和可靠性灵敏度分析 | 301 | 11.6 振动沉拔桩机慢变参数系统的动力学特性 | 401 |
| 7.7 结语 | 316 | 11.7 结语 | 405 |
| 第 8 章 以线性理论为基础的 传统动态优化设计 | 317 | 第 12 章 旋转机械轴系振动设计 计算举例 | 406 |
| 8.1 概述 | 317 | 12.1 概述 | 406 |
| 8.2 传统的动态优化设计的目标与特点 | 318 | | |
| 8.3 传统的动态优化设计的内容与方法 | 320 | | |
| 8.4 传统的动态优化设计的步骤 | 322 | | |
| 8.5 传统的动态优化设计举例 | 327 | | |
| 8.6 结语 | 343 | | |

12.2 有限元方程的建立及方程求解 406

12.3 转子轴系的扭转振动分析 408

12.4 转子轴系的弯曲振动分析 412

12.5 转子轴系弯扭组合振动

分析 417

12.6 裂纹故障对转子系统固有特性的影响 425

12.7 转子系统的响应分析 426

12.8 结语 430

参考文献 432

第1章 概 论

1.1 动态优化设计的概念及研究的意义

现代机械动态优化设计是在产品的研究和开发过程中,对机械产品的运动学与动力学及与此相关的动态可靠性、安全性、疲劳强度和工作寿命等问题,进行分析和计算,以保证所研究和开发的设备具有优良的结构性能及其他相关性能。动态优化设计是产品设计的核心内容。它既有广度和深度,而且也有相当大的难度,是产品设计工作者一般难以全面掌握并加以灵活运用的一种十分重要的设计方法。对于一些设计难度较大的产品,这项工作最理想的是通过生产、教学、科研三个方面的密切结合加以完成,不然,很难全面和深入地完成这项设计任务。

在现代机械产品设计中,动态优化设计占有十分重要的地位。这是因为绝大多数现代机械设备都处在连续运转过程中,而且由于这些机械的工作速度越来越高,结构越来越复杂,尺寸越来越大(对微型机械来说,尺寸越来越小),精度越来越高,功能越来越齐全,所以对其工作的可靠性、安全性和工作连续性的要求也越来越高。在这种情况下,产品动态优化设计已成为现代机械研究开发不可缺少的和至关重要的环节,对保证产品的工作可靠性、安全性、工作耐久性,以及建设环境友好型和资源节约型社会等都具有十分重要的意义。因此,国内外科技工作者进行了大量的研究^[1-149]。

众所周知,国内外许多大型高速旋转机械屡屡发生严重事故,甚至是机毁人亡的事故,这迫使企业部门及有关科技工作者对所发生的事故进行仔细的分析和研究,从中吸取经验和教训,以防止这些严重事故再次发生。同时这类事故的发生,也给从事产品研究、设计和开发的科技工作者敲起了警钟。对这类机器的动态优化设计不能粗心大意,必须深入地去研究和寻找事故发生的原因,以及采用新的理论和先进的技术去解决所遇到的问题。

1.2 动态优化设计的发展

随着科学技术的迅速发展,机械动态设计的内容,其广度与深度及所研究的对象正在发生深刻的变化。

就研究的广度而言, 研究内容已由狭义的向广义的方向发展, 由此, 机械动态设计按其涵盖内容的广度可分为以下两类: 狭义动态设计与广义动态设计。

就研究的深度而言, 正由线性系统向非线性系统转变; 由稳态向非稳态方向过渡; 由少数自由度向多自由度方向发展; 由单一和可分离的系统向复杂和强耦合的系统转移等。因此, 现代机械动态设计的内涵自然而然地已经或正在发生根本性的改变。

再就研究的对象而言, 以往仅以有害振动的防止为研究对象, 而现已扩展为研究有害振动的防止和有用振动的利用两方面的问题。

以上三个方面的内容可归纳为以下三个发展方向:

(1) 由狭义动态设计向广义动态设计方向发展 狭义的机械动态设计, 是以机器中结构型零部件为研究对象, 以线性动力有限元法为手段, 采用理论研究和模型试验相结合的方法, 找出产品初步设计中的缺陷和问题, 进而对零部件或结构进行动力修改, 避免结构在工作时发生共振和出现不稳定振动。它的研究内容限于结构型零部件的固有特性, 即机器零部件的动态特性。

广义的动态设计和狭义的机械动态设计有不相同的含义。动态设计, 顾名思义, 它应该包括机器工作过程中所发生的运动学、动力学等与动态特性有关的所有设计内容, 即包括机器运动学和动力学分析及相关参数的计算等。由此可见, 动态设计的广度已经大大扩展了, 改变了狭义动态设计的内容和范围。

(2) 由传统的动态优化设计向深层次的动态优化设计发展 机械动态设计的内容的深度也正在发生变化, 即由传统的向深层次方向发展。由此, 机械动态优化设计的深度, 可分为传统的和深层次的两类。

传统的动态优化设计是以线性动力学理论为基础, 深层次的动态设计是以非线性动力学理论的基础。

这两种动态设计的理论基础是不相同的, 前者仅考虑机械系统的线性振动问题, 后者考虑的是非线性动力学问题, 所以广义动态设计不只是以线性动力学理论为基础, 而且要提升到以非线性动力学理论为基础。对于很多机械来说, 如果不去研究非线性动力学问题, 就很难揭示机器运转过程中所发生的非线性动力学现象, 例如超谐和亚谐振动、跳跃和滞后、分岔与混沌、慢变与突变等。

(3) 从一般机械的动态设计扩展到包括振动机械在内的动态设计 从研究的对象看, 机械动态优化设计不只局限于研究那些有害的振动, 而且已扩展到研究有用振动的利用。因此, 机械动态优化设计按照机器的类别, 即可分为有害振动的防止和有用振动的利用两个方面, 从而形成两种类型的动态优化设计。

一般机械的动态设计是以避免或减轻机器或结构出现共振及不稳定的振动为主要目的。振动机械的动态设计, 不只考虑消除那些有害的振动, 还要考虑如何充分地利用振动, 甚至是利用共振给生产和人类生活带来益处, 进而创造出重大

的经济效益和社会效益。

振动机械的动态设计法在机器工作过程中要有效地利用振动，即在这些机械中要充分利用振动给机械工作过程带来的益处，如振动压路机、振动筛、振捣器、超声马达、利用振动与波动原理的医疗设备与仪器等。但是在这些振动机械的工作过程中，也会产生一些有害的振动，如将动载荷传给基础；长距离振动输送机在工作时要产生弹性弯曲，影响物料的正常输送。对这些有害的振动，也要设法予以消除。所以对振动机械而言，既要利用有用的振动，也要消除那些有害的振动。

1.3 传统的与深层次的动态优化设计的特点

下面将分别讨论传统的动态优化设计与深层次动态优化设计的特点和内涵。

1.3.1 传统的动态优化设计法

传统的动态优化设计法（图 1-1）是以提高产品结构性能为主要目标、以线性动力学理论为基础的动态优化设计法。具体地说，它的主要目标是使机器获得优良的结构性能，其中包括产品的系统可靠性、人机安全性、工作耐久性、结构紧凑性、造型艺术性、无环境污染性和设计经济性，以及其他相关性能，如功效实用性、运行稳定性、操作宜人性、维修方便性等。

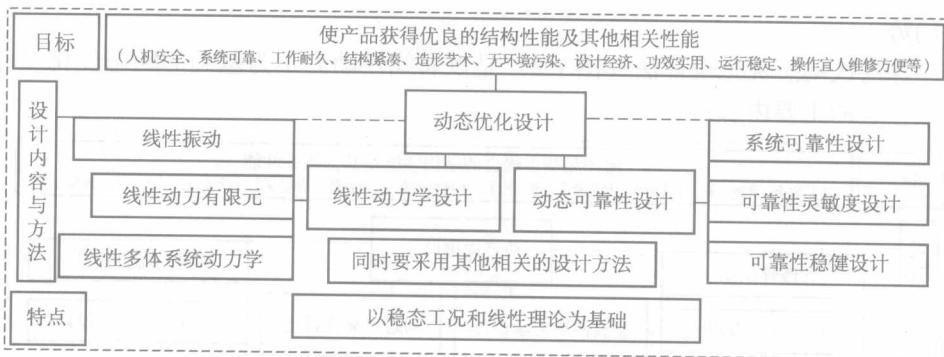


图 1-1 传统的动态优化设计法的理论框架

本书叙述动态优化设计是广义，对于传统的动态优化设计也是如此，指的是对机器的运动学和动力学相关的所有主要问题进行分析与计算，而不是一般意义上的狭义动态设计。它主要包括以下几个方面的内容：①动力学设计；②可靠性分析；③动强度的设计计算；④其他动力学问题，例如，摩擦学问题、耐腐蚀问题等。

1.3.2 深层次动态优化设计法

深层次的动态优化设计与传统的动态优化设计的区别，它是非线性动力学理论为基础。即：

(1) 以非线性动力学理论为基础的动态设计 研究的重点是多自由度非线性振动系统动态设计理论。它是一种以提高产品结构性能为主要目标，以非线性动力学理论为基础，以机器运动学和动力学分析与计算为内容，以广义优化为手段的动态优化设计。为了做好此项工作，应该建立以非线性振动、非线性动力有限元和非线性多体系统动力学为基础的非线性动态优化设计体系和设计平台。

(2) 以非线性可靠性理论为基础的机器及其零部件可靠性设计 研究的重点是多自由度非线性随机系统的可靠性理论。它是一种以提高产品运行可靠性为主要目标；以非线性随机理论为基础；以机器零部件可靠性和系统可靠设计为内容；以广义优化为手段的动态可靠性设计。为了做好此项工作，应该建立起以线性与非线性的机器零部件动态可靠性及机械系统动态可靠性设计的体系和设计平台。

现代机械设计理论与方法的主导研究方向呈现出这样一个特点和模式，它正在确立以产品广义质量为主要目标，采用综合集成技术将几种对产品设计质量有重要影响的设计法有机地结合在一起的系统化设计模式，来解决包括复杂非线性系统等有关问题在内的一些深层次设计问题。这是产品设计理论和方法发展的必然趋势。

深层次动态优化设计法（图 1-2）是以非线性动力学为基础的动态优化设计方法，它的主要内容：

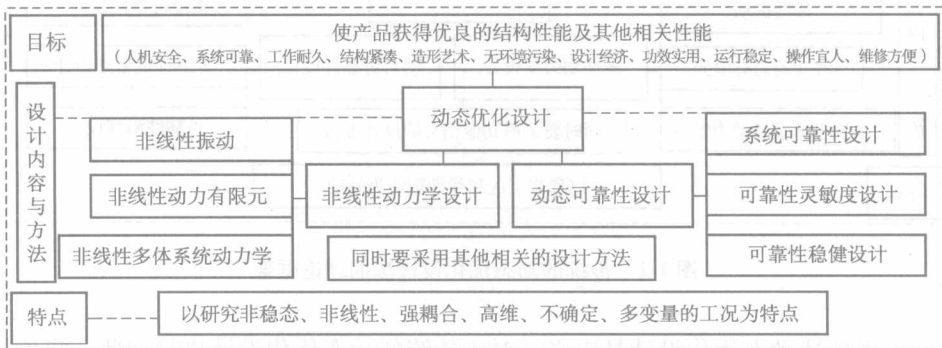


图 1-2 深层次的动态优化设计法的理论框架

在完成上述设计的机器投入生产后，它们能处在较理想的状态下工作，不仅

能获得满意的技术性能指标,能安全可靠地工作,还能满足工作寿命的要求。

和传统动态优化设计方法相同,深层次的机械动态优化设计通常包括狭义的和广义的两类目的。深层次机械动态优化设计也因机器的不同类型而有区别,各类机械的动态优化设计的内容也不完全相同。

现在我们还是以振动机械为例,来讨论深层次的,即以非线性动力学理论为基础的现代机械动态优化设计方法。

从动力学的具体内容来看,非线性机械动态设计涉及以下三个方面的内容:非线性多体系统动力学、非线性振动和非线性动力有限元分析等。

由于目前工程中所遇到的非线性振动问题越来越多,利用一般线性振动理论和方法,很难解决或很难全部解决所遇到的实际问题。例如,一些非线性振动机械及汽轮发电机组等机械设备运转过程中所发生的非线性振动问题,只有采用非线性动力学理论与方法才能得到解决。因此,目前机械动态设计正向更深层次的方向发展,这就要求科技工作者不仅要研究一般线性振动问题,还要重视非线性动力学问题的研究。

1.4 动态优化设计的若干理论基础

动态优化设计所涉及的基础学科相当广泛,要想搞好动态优化设计工作,为产品的安全性和可靠性提供必要的保障,必须掌握好相关的基础理论。从动态优化的具体内容来看,其理论基础有机构动力学、结构动力学及系统动力学(包括机械振动学、动态有限元方法、多体系统动力学)、动态可靠性理论、动强度理论和动态摩擦理论等。从动态优化的方法来看,其理论基础有振动分析方法、动态有限元方法、多体系统动力学方法、优化设计方法、动态仿真方法和试验方法等。下面分两个方面叙述。

1.4.1 有关动态设计内容方面的理论基础

动态优化设计内容的理论基础十分广泛,它涉及到机械设计内容的各个方面,如结构动力学、机构动力学、机械系统动力学、可靠性理论、动强度理论、动态摩擦理论等。

1. 结构动力学

对于机器的结构型零部件来说,在设计时常常要考虑其动力学问题,研究结构动力学问题的学科或课程即称为结构动力学。在机器内部,也常常含有许许多多的结构型零部件,这些零部件也像建筑结构一样,需要对其进行动态分析,例如,计算其固有频率、振型和振动响应等,以便选择合理的运动学和动力学参数,保证机器工作在理想的工作状态下。

对于简单的构件,可直接采用振动分析的方法加以计算;对于复杂的构件,常常采用有限元方法对其进行分析。

2. 机构动力学

机构是机器的重要组成部分,机构的运动学与动力学是机构学研究的重要内容之一,研究的目的是使机构处在较理想的状态下工作,除了获得优良的工艺指标,还要保证机构工作安全可靠。

3. 机械系统动力学

机械系统动力学问题在机械设计中占有十分重要的地位。因为机械设备通常由各主要系统所组成,每个系统都有其动力学问题,也就是说每个系统都存在振动问题。如果这个问题不能合理地处理,就有可能出现振动超标的问题。当振动力量超过规定的数值后,系统就会产生过大的振动,进而可能引发更严重的问题,甚至会导致机械设备的破坏。所以对于动态优化设计而言,必须要对系统进行动力学分析。

机械系统动力学最主要的研究工作是计算与分析系统的动力学特性,找出合理的动力学参数,使机器始终工作在理想的工况下。

4. 可靠性理论

机械产品的安全可靠是工机械产品设计的主要目的。在设计中使用的安全系数,以及对机械产品合格率的估计方法,在很长时期内,都停留在确定性的概念上,即没有考虑事物的不确定因素,因而不能真正反映设计的本质内容。近30年来,在许多工程技术中,已逐渐扬弃旧的安全系数概念和估计方法,而代之以建立在概率统计基础上的可靠性分析方法。可靠性设计理论的基本任务是在故障物理学研究的基础上,结合可靠性试验以及故障数据的统计分析,提出可供实际计算的力学模型及方法。这样,就可以在机器研制阶段,即在机器的设计和样机试制阶段,估计或预测机器及其主要零部件在规定工作条件下的工作能力状态或寿命,保证机器具有所需的可靠性。

零部件是组成机器的基本单元,因此,讨论零部件可靠度计算是可靠性设计的理论与方法的基础。这些方法包括应力-强度干涉模型法、等效正态分布法、随机摄动法和二阶矩法等。

机械强度可靠性设计,就在于揭示载荷(应力)及零部件强度的分布规律,合理地建立应力与强度之间的力学模型,严格控制失效概率,以满足可靠性设计要求。应力-强度分布干涉模型简称为干涉模型,可以清楚地揭示零部件强度可靠性设计的本质。

5. 动强度理论

机器的零部件通常工作在连续变化的载荷作用下,材料内部的应力与应变常常处在连续变化的情况下,为了保证机器零部件在规定寿命的条件下工作,必须

要对其动强度或疲劳强度进行计算。由于机器的载荷十分复杂，但可按照不同的类型的载荷对其疲劳强度进行分析与计算，以保证机器的零部件在有限的寿命范围内安全可靠的工作。

6. 动态摩擦理论

机器及其零部件通常工作在相对运动的工作情况下，因此，通常存在着相对摩擦。例如，机器的轴与轴承之间的摩擦，机器工作机构与被处理物质间常常存在摩擦等；而与此同时，被处理物质与加工零部件会出现不同程度的磨损，并消耗一定的能量和材料，所以，研究机器零部件的摩擦与磨损也是动态设计一项重要内容。

7. 造型设计中的动力学问题

有些机械的造型设计是与动力学问题密切相关的。例如，轿车的外形设计、飞机的外形设计和船舶的外形设计都不能不考虑流体动力学问题，因为外形不合理就会增加运行阻力，增加不必要的动力消耗。

1.4.2 有关动态设计手段方面的理论基础

从设计手段来看，有振动分析、有限元和边界元方法、优化设计、动态仿真、试验方法等。下面分别地加以叙述。

1. 振动分析方法

在机械动态设计中，振动分析与计算起着十分重要的作用。一种机器，特别是高速运转的机器，如果工作在连续运转的状态下，应该通过振动分析的方法，研究其动力学特性，即研究系统的固有特性（包括固有频率与振动型）及系统在某一或某些激励下响应等，进而选择理想的技术参数，使系统处在较理想的状态下工作。要设法限制系统出现有害的振动；对于有用的振动，要采取相应的有效措施，使振动得到有效的利用。

振动的种类较多，形式各异，要针对不同形式开展相应的研究。振动按其位移、速度与加速度关系式的不同，可分为线性振动与非线性振动两类。此外，按能量积聚所表现出的特殊运动形式及通常只能用统计方法加以分析与处理的，有自激振动、随机振动等。

振动分析的方法，按系统自由度的多少，可分为单自由度系统、双自由度系统、多自由度系统与连续体系统等；按方法的种类可分为解析法、图解法、数值法、实验法等；按求解的精确程度来分，有近似方法与精确方法两类。由于求解非线性振动系统，特别求解多自由度非线性振动系统，在数学上存在一定的困难，因此，对于非线性振动系统常常采用近似求解方法。

由于科学技术的发展，目前振动学已逐渐扩展为许多研究分支和相邻的交叉学科。如线性振动与非线性振动、随机振动、模态分析与模态试验、结构动力

学、机械动力学、转子动力学、包装动力学、土动力学、振动与噪声控制、结构抗振振动及控制、振动利用工程、振动测试、信号分析和故障诊断等。

2. 有限元与边界元方法

对于结构型零部件,若要对其振动模态及动变形和动应力进行分析计算,常常采用有限单元法(Finite Element Method, FEM)。

为了对已完成初步设计的产品或需要改进的产品进行机械结构系统动力学建模和动态特性分析,进行结构修改,或对修改结构进行动态特性预测,以使产品获得良好动态特性,采用有限元法,它是有效的数值分析方法。

有限单元法实质上是求解数理方程的一种数值计算方法,由于其灵活、快速和有效性,已经迅速发展成为求解各领域数理方程的一种通用的近似方法,成功应用于固体力学、流体力学、热传导、电磁学、声学 and 生物力学等领域,能够求解由杆、梁、板、壳和块体等各类单元构成的弹性(线性和非线性)、弹塑性或塑性问题(包括静力和动力三问题),求解各类场分布问题(流体场、温度场、电磁场等的稳态和瞬态问题),求解水流管路、电路、润滑、噪声以及固体、流体、温度的相互作用等。

有限单元法的主要思想是,首先对连续体的求解域(物体)进行单元剖分,通过边缘节点相互连接成为一个整体;然后用每一单元内所假设的近似场函数(如位移场)来分片表示全求解域内的未知场变量;利用相邻单元公共结点场函数数值相同的条件,将原待求场函数的无穷自由度问题;转化为求解场函数节点值的有限自由度问题;最后采用与原问题等效的变分原理或加权余量法,建立求解场函数节点值的代数方程组并加以求解,从而得到问题的解答。

在机械工程领域中,有限元法的应用主要包括静力学分析(即求解所受的外部载荷不随时间变化或随时间变化缓慢的机械系统平衡问题)、模态分析(即求解关于系统的某种特征值或稳定值的问题)、瞬态动力学分析(即求解所受的外部载荷随时间发生变化的动力学响应问题)、非结构力学分析(主要有机械系统的热传导、噪声分析与控制、多场耦合分析)等。在这方面,目前已经有许多知名的商用软件,如 NASTRAN、ANSYS、MARC 等。

边界元法是由有限单元法的进一步发展,它是对结构的局部部位进行细化有限元分析的一种方法,目前在工程领域得到了广泛的应用。

3. 多体系统动力学方法

在研究机构和机器人动力学的过程中,多体系统动力学得到广泛的应用。多体系统动力学是研究多刚体或多柔体系统运动学和动力学特性的一门学科或课程。机构或机器人的运动学和动力学问题,如其各个杆件的位移、速度和加速度及其运动轨迹,以及系统及各个子系统或元件的固有频率与振型和系统在某些激励下响应,都是多体系统动力学所关注的问题。通过分析,寻求并获得最理想的