

# 机械优化设计建模 与优化方法评价

万耀青 等著



北京理工大学出版社

# 机械优化设计建模与 优化方法评价

国家自然科学基金和中国科学院  
计算所 CAD 开放实验室资助课题

万耀青 黄心渊 王文清 著  
马璐 李畅

北京理工大学出版社

## 图书在版编目(CIP)数据

机械优化设计建模与优化方法评价/万耀青等著. —北京:北京理工大学出版社,1995

ISBN 7-81045-052-2

I. 机… I. 万… III. 机械设计:最佳化-最优化算法-数学模型-评价模型 IV. TH122

中国版本图书馆 CIP 数据核字(95)第 13218 号

北京理工大学出版社出版发行

(北京市海淀区白石桥路 7 号)

(邮政编码 100081)

各地新华书店经售

北京地质印刷厂印刷

\*

850×1168 毫米 32 开本 10.5 印张 264 千字

1995 年 10 月第一版 1995 年 10 月第一次印刷

印数:1—2000册 定价:9.95元

※图书印装有误,可随时与我社退换※

## 内 容 简 介

机械优化设计的研究和应用,关键在于建立正确、合理的数学模型和选择合适的求解方法。本书是这方面科研成果和应用经验的总结。全书共分四篇:第一篇是优化设计建模总论,重点介绍建模的有关理论、方法和步骤;第二篇介绍优化设计模型的分析 and 变换;第三篇为优化设计建模的示例,大部分示例已在实际中应用;第四篇介绍计算机辅助智能建模原理与建模方法,及优化求解方法软件的评价。全书注重理论与工程应用的密切结合,使读者易于学以致用,提高本书的可读性和实用性。

本书以机电工程技术人员为主要对象,作为自学和深化提高用书,也可作为大学生、研究生和教师的教材或参考书。

本书经国家教委评审,已列入国家教委“85”重点图书目录。

## ABSTRACT

This book presents two key problems in the application and research of mechanical optimization design: (a) building proper and reasonable mathematical model; (b) choosing suitable optimization method software. It is a summary of research achievements and experience. The subject matter of this book is broad and has been divided into four parts. Part one focuses on general principle of optimization modelling, such as theory, method and procedure. Part two introduces the method of translating and analysing optimization design model. Part three presents some samples of optimization design model, most of them have been used in real life. Part four discusses the theory and method of computer aided intelligent modelling and the evaluation of optimization method software. This book emphasizes the unity of theory and practice, so it is readable and practicable.

This book addresses the reader who is technical personnel of mechanical and electrical engineering. It can be used as a guidebook in selfstudy, also can be used as teaching material or reference book by university students, postgraduates and teachers.

# 序 言

应用现代设计理论和方法来改进和提高机电产品的设计质量,降低成本,缩短开发周期,增强产品的竞争能力,已为各国实践证明是非常有效的途径和发展方向,而且在不断扩展和深化。优化思想几乎可渗透到人类的一切活动中,机械优化设计是现代设计方法中最活跃的分支之一。

我国从 20 世纪 70 年代后期,首先由高等院校开始对优化设计进行研究和应用,本书著者就是积极推动者之一。此后在“六五”、“七五”、“八五”计划中不断得到国家各个方面的支持,并在研究院、所和工厂中推广应用,已取得重大效果。随着应用的深入,设计对象的复杂性和问题规模的扩大,提出很多问题需进一步深化研究。

作者在国家自然科学基金和中国科学院计算所 CAD 开放实验室的赞助下,选择机械优化设计建模为主题,进行理论和方法学方面的研究。确实,模型的正确性和合理性是优化设计成败的关键。建立一个好的优化设计模型,需要对工程问题(建模对象)有本质的理解,而建模的难点在于如何将实际工程问题抽象化为有实用价值而又易于求解的数学模型;当建立一个模型后如何对其评价,选择哪种优化方法求解是随之要解决的问题;以往建模都是靠人工完成的,计算机高度发展的今天,如何实现计算机辅助智能建模,这是本领域的发展方向。作者针对以上几个方面做了较系统深入地研究,在目前已有的出版物中还很少看到此类著作。

本书另一个特点,是包含作者多年辛勤劳动的研究成果——应用实例,即不仅有理论和方法上的发展,而且结合实际去应用,使读者既感受其新意,又有应用的亲切感,这是工程理论方法研究的可贵之处。

这是一本机械优化设计方面较深化的专著,本书的出版,相信

对我国优化设计的深化和提高会有所助益,也为我国广大设计工作者、大专院校教师和学生提供一种有价值的参考书。

**中国科学院院士 雷天觉**

**1995年5月**

# 前 言

现代设计方法学、设计理论和方法的发展,优化理论和方法的不断完善,工程设计学的推动与深化,特别是计算机技术综合应用的普及,使机电产品的现代设计成为可能,并正向应用的深度和广度发展。这种发展和应用的趋势已证明是不可阻挡的潮流,并已成为世界各国产品开发和竞争的重要策略与手段。

机械优化设计已在国内外研究和应用多年,产生了很大经济效益和社会效益。它是将优化理论、方法和计算机技术等与机械产品设计结合,进行再研究,直接付诸应用,产生商品经济的效果,其中要解决如何架好结合的“桥梁”问题。如果说理论和方法是指导实践的基础,那么如何应用理论去跨过“桥梁”使之在产品设计中获得应用价值,就是应用基础和应用研究的主题。

将优化理论和方法应用于机械产品结构设计的范畴来说,大致可分为结构参数优化、形状优化和拓扑优化。产品设计首先要解决的是参数优化,也是最早引入机械设计中的内容之一。通过寻找最佳参数可以直接得到好的设计,它是在已定结构方案、零部件结构形状和选择材料下完成参数设计的优化。形状优化是在结构类型、材料和布局已定条件下,对结构几何形状进行优化,包括二维和三维的形状优化及与形状有关的参数优化,这是优化设计的深化。而拓扑优化是对结构中的构件布局和节点的联结关系进行优化,即在外部设计要求下首先要从结构方案、类型、布局等方面去寻优,这是更高层次的优化,也是更富有创新的概念设计。从目前研究和应用的成熟程度来看,形状优化的提出尽管已经历了近 20 多年,还处在研究和应用探索阶段,而拓扑优化则处于孕育阶段。本书主要涉及参数优化的有关问题,因此今后提到优化设计概念均属这个范畴,但有些原理和内容对形状优化也可适用或借鉴的。

随着优化设计研究和应用的深入,还有很多问题有待研究。根据作者多年来从事优化设计的体验,其中建模方法与技巧、模型变

换方法、优化方法的选择与评价等是优化设计能否成功地应用的基础和关键。因为优化设计的本质是通过建立模型来预测和评价设计的好坏,帮助设计师决策。模型不完善,尽管采用优化设计方法,其结果或是实用价值不大,或是难于求解甚至得出荒谬结论而不觉察。当建立好一个模型后,用什么优化方法求解能顺利成功,花费少,是应用者最关心的问题之一;特别是 CAD 的发展,优化设计作为 CAD 的资源之一,如果优化环节成为 CAD 的瓶颈,则严重影响 CAD 的成效。此外,作者对计算机辅助优化设计智能建模也作了探讨和一定实践,这是建模的发展方向。因此,本书将围绕这些方面来展开论述。

优化理论方面已有很多著作,本书为系统性起见只作某些介绍。本书是国家自然科学基金和中国科学院计算技术研究所 CAD 开放实验室项目资助的部分研究成果。第一篇由万耀青教授执笔,并负责全书的审改;第二篇由王文清副教授和万耀青教授执笔;第三篇由万耀青教授和马璐博士、李畅讲师执笔;第四篇由黄心渊博士、副教授执笔;全书由陈立周教授主审。

本书涉及的内容,有属于探索性的,有直接可应用的,但不可能概全,目的在于期望通过本书的出版,使更多的读者能了解优化设计建模的重要性和复杂性,启示人们向深度发展和应用。书中难免有不足之处,敬请读者指正。

为编好本书有关应用的某些实例,赵季华、孙大克、高琳、马顺利等均付出了辛勤劳动,在此一并表示感谢。

万耀青  
1995年8月

# 目 录

## 第一篇 优化设计建模总论

<b>第一章 研究机械工程设计问题的方法</b> .....	( 1 )
一、引言 .....	( 1 )
二、设计理论与方法的关系 .....	( 1 )
三、研制机械产品的方法 .....	( 3 )
<b>第二章 优化设计数学模型</b> .....	( 8 )
一、概述 .....	( 8 )
二、优化设计数学模型分类 .....	( 12 )
三、优化设计数学模型示例 .....	( 16 )
四、建立优化设计数学模型的条件和原则 .....	( 21 )
<b>第三章 建立优化设计数学模型的一般步骤和方法</b> .....	( 27 )
一、宏观建模过程 .....	( 27 )
二、微观建模过程 .....	( 35 )
三、试验性数学模型在建模中的地位 .....	( 53 )
<b>参考文献</b> .....	( 58 )

## 第二篇 优化设计模型的分析与变换

<b>第一章 模型变换总论</b> .....	( 59 )
一、模型变换概念及其意义 .....	( 59 )
二、量纲分析 .....	( 62 )
三、灵敏度分析 .....	( 70 )
<b>第二章 尺度变换和模型变换</b> .....	( 83 )
一、尺度变换的概念 .....	( 83 )
二、约束的变换 .....	( 89 )
三、模型降维 .....	( 96 )
四、模型线性化 .....	( 100 )
五、将代数模型变换为几何规划模型 .....	( 106 )

六、将非线性规划模型变换为可分离规划模型 .....	(113)
七、随机规划模型转化为确定型模型 .....	(115)
八、多目标决策中的某些变换技术 .....	(117)
九、曲线拟合模型的选择 .....	(123)
<b>参考文献</b> .....	(128)

### 第三篇 优化设计建模示例

<b>第一章 机械零件优化设计建模</b> .....	(131)
一、圆柱螺旋压缩弹簧断裂事故的分析 and 建模 .....	(131)
二、圆柱螺旋压缩弹簧设计的优化模型 .....	(136)
三、发电机最大输出功率时的负载电阻 .....	(140)
<b>第二章 部件优化设计建模</b> .....	(141)
一、二级圆柱齿轮减速器的传动比最优分配模型 .....	(141)
二、五级齿轮传动的传动比最优分配模型 .....	(141)
三、弹簧小车系统在外力作用下的最小位移模型 .....	(143)
四、多自由度行星变速箱方案机构参数优化模型 .....	(144)
五、分层降维枚举法 .....	(151)
六、三级行星减速器结构参数优化设计模型 .....	(154)
七、汽车定轴变速箱一体化优化匹配模型 .....	(169)
八、车辆主离合器结合过程仿真与优化设计模型 .....	(182)
<b>第三章 系统性能和部件选型匹配优化模型</b> .....	(192)
一、系统性能概述 .....	(192)
二、载重汽车传动系动力性能优化模型 .....	(192)
三、载重汽车传动系经济性优化模型 .....	(201)
四、用分析模型对六工况百公里油耗有关试验方法的分析 .....	(204)
五、军用履带车辆档数和传动比的优化分配模型 .....	(208)
<b>参考文献</b> .....	(218)

### 第四篇 计算机辅助智能建模原理与建模方法

<b>第一章 计算机辅助工程建模总论</b> .....	(221)
一、引言 .....	(221)

二、智能建模概况 .....	(223)
三、机械优化设计智能建模系统的结构 .....	(225)
<b>第二章 计算机辅助建模方法 .....</b>	<b>(228)</b>
一、计算机辅助建模的信息源和哲理 .....	(228)
二、模型的描述方法 .....	(231)
三、计算机辅助建模过程 .....	(236)
四、知识的表示方法 .....	(237)
五、控制策略和推理机 .....	(241)
<b>第三章 模型的存储和管理 .....</b>	<b>(246)</b>
一、模型的分层 .....	(246)
二、优化模型库管理系统 (OMBMS) 的结构 .....	(248)
三、模型定义语言 (MDL) .....	(252)
四、模型操作语言 (MML) .....	(257)
<b>第四章 优化方法软件的评价方法 .....</b>	<b>(260)</b>
一、考题的选择与描述 .....	(260)
二、考题的产生 .....	(263)
三、优化方法程序的评价模型 .....	(267)
<b>第五章 优化方法程序的评价结果及程序的选择 .....</b>	<b>(280)</b>
一、评价工具的建立 .....	(280)
二、考核方法及约定 .....	(282)
三、评价结果 .....	(284)
四、优化方法程序的选择方法 .....	(290)
<b>第六章 计算机辅助优化设计智能建模系统应用实例 .....</b>	<b>(296)</b>
一、机械优化设计智能建模系统 (MODIMS) 的结构 .....	(296)
二、传动箱优化设计建模专家系统 .....	(298)
三、传动箱优化设计中的模型库 .....	(310)
四、传动箱建模与优化设计示例 .....	(313)
五、关于计算机辅助优化设计建模的一些讨论 .....	(317)
<b>参考文献 .....</b>	<b>(319)</b>

# 第一篇 优化设计建模总论

## 第一章 研究机械工程设计问题的方法

### 一、引言

机械工程是含义广泛的术语,随着科学技术的发展,各学科的相互交叉和渗透,机械工程的边界、范围都有一定模糊性。而机械设计方法,由于计算机、应用数学、物理学(力学,电工学,摩擦学等)、人文科学等的发展并向机械设计中渗透,形成和正在发展为各种新的设计方法。但从设计理论和方法角度去分,可分为工程设计学和工程模型学两大领域。前者研究机械工程中各个专业产品的设计机理,例如汽车理论和设计,机车理论和设计,机床理论和设计等;其中有很多共性问题,从而形成各种专门的研究方向,如强度、刚度理论,振动理论,摩擦磨损与润滑理论等,并把这些理论演变为可用于具体设计的方法。后者研究从模型入手来解决产品设计,即先不直接设计真实的产品本身,而是通过模型的转换或过渡,把产品的各种现象、行为体现在模型中,等到获得满意的模型结果后再去设计真实的产品,这样可以减少盲目性,特别对于大型、复杂、精密的产品,模型学具有重大效能,而且已成为现代产品设计不可缺少的手段。

### 二、设计理论与方法的关系

设计理论与设计方法两者既有密切联系又有阶段性的区别。设计理论是涉及设计原则并在实践中验证了关系的系统阐述,这些原则和关系解释了设计过程并为在设计中创造有效的方法学提

供必要的理论基础。设计方法是设计理论的具体化、实用化,是具体设计准则的体现,要能回答利用这些准则设计出的方案、结构尺寸是否满足要求。能称得上一种设计方法,至少必须具备三个条件:①这种设计方法有一定理论依据,应能反映设计对象有关本质方面并能定量描述;②应有完整的设计准则、设计步骤和各种系数在实践或实验验证了的选择方法;③能用试验来测定与设计准则有关的指标,设计计算结果有实用价值,有良好的再现性。

设计理论必须发展为设计方法才能实用。例如齿轮赫兹应力计算方法,已在大量实践中验证了是引起点蚀的原因,有理论依据,可用试验测定。但在近代科学研究中发现,有些齿轮的损坏或失效,单用目前的弯曲疲劳,接触疲劳和胶合等设计准则不能作出准确的解释,并已研究出一些新的设计理论,但至今尚未形成设计方法,故还不能直接用于设计中。

在工程设计中已形成的各种设计方法,很多是基于严格理论而导出的,但亦有已在实践中行之有效的设计方法而一时还不能上升为理论,例如基于经验、统计的设计计算公式,或基于局部的理论而构成的设计方法等。因此,设计方法的发展过程,总是伴随着基于理论和基于实践经验的双轨发展。很多设计问题都要等待设计理论成熟而形成设计方法后才去开发产品,往往延滞了新产品的问世。当然,设计方法必须深化上升为理论,才有科学性,不能始终停留在经验性的权宜之计阶段。

在优化理论和优化方法之间亦有类似规律。优化理论必须发展为具体的优化方法才能变为可应用的程序。但有些理论一时还难以达到有具体迭代步骤的优化方法,有些优化方法在实践中已颇有成效而一时还难以上升为有严格证明的理论,但并不影响其应用。因此,理论要向方法化发展,基于经验的方法要上升为理论。

作为机械设计的优化设计理论和方法实际应包括两类范畴:

1. 专用设计理论和方法 即各种工程专业本身的运动学、动力学和摩擦学等的设计理论和方法。由于多年来已形成的理论和

方法还不足以完整地揭示和反映产品的实际行为及工作机理,必须向现代化发展。

2. 通用的设计理论和方法 它并不针对具体专业,具有广泛的通用性和科学性,例如优化、有限元、可靠性、价值工程和工业设计等理论和方法。

单有专用的设计理论和方法,仍然使设计缺乏科学性。因为任何机器是一个复杂的综合系统,尽管已有先进的理论和公式来描述机器的行为和机理,若靠人工试凑或计算机试凑来寻找各种结构参数及其对性能指标的影响规律、局部与整体的匹配、复杂结构的应力与应变的分布、静态和动态的变化规律等是很难甚至不可能实现优化和可靠的设计。通用设计理论和方法就是在专用设计理论和方法基础上找出优化和可靠的设计,是设计的现代化、科学化。然而,单有通用的而无专用的现代化,缺乏针对性,两者结合才构成完整的称之为现代设计理论和方法,使一次设计的成功率大,设计质量高,极大地缩短设计周期,降低产品设计费用,提高产品的竞争能力。

### 三、研制机械产品的方法

#### (一) 实物法

按设计好的图纸,1:1地制造出来,通过试验、修改直至定型,投入批生产、销售。这种研制过程的优点是:

1. 真实性 一切问题都可在实物试验中考验、暴露,并反馈到设计、制造中修改。

2. 形象感强 看得见,摸得着。

缺点是:

1. 风险大,耗资大,定型周期长 如果一次研制试验中暴露出重大问题,必须作重大修改,重新制造试验,往往要经多轮研制后才能定型,由于时间的延长,可能定型后的产品已落后于时代。

2. 分析问题困难 研制试验后暴露的问题往往是错综复杂、

相互联系地交织在一起,难以分析其部位和原因;

3. 有时难于建立实验条件 有些设计对象难以立即用实物法来考核。例如新型飞机、炮弹、核武器、葛洲坝大型工程等;有的是试验太危险,有的是难于甚至不可能创造严峻的试验条件。

## (二) 模型法

模型法并不立即设计制造真实产品,而是先通过模型的模拟试验,分析其内部机理和实际可能行为,满意后才设计制造真实产品。这样做的把握大,减少以至避免上述实物法的缺陷。

1. 系统与模型 系统是互相作用的一些物体(真实实体或抽象实体)的集合。实体的特征称为属性,通常以某些逻辑的数字值或关系式表示。系统内发生变化的过程称为活动。在指定的时间,系统的实体、属性和活动组成的整体,称为系统在该时间的状态,系统状态用一组状态变量表示,例如输入变量、输出变量等。系统可以是实际存在的,也可以是人们的构思或设想。

应当说明,对系统的描述并不完全由系统本身的特征决定,很大程度上由研究目的而决定系统的类别和变量的选取等。

模型是为研究系统而构造的用来收集有关信息的替代物。人们用这些信息预测系统的性能或运动状态进行设计或控制等。对模型必须进行确认,以确保所需研究的一些特征,在模型中与原系统是相似的,可以替代的。这样,通过模型来研究系统而所得信息才有实用价值。我们可以用以下 3 个特征来说明什么叫模型。

- (1)它是现实的抽象或模仿,是现实的代表;
- (2)它由那些与分析问题有关的因素构成;
- (3)它表明这些因素之间的关系。

概括地说,模型是用来再现另一事物(研究对象)的实体或概念,它真实地按比例或转换来形成我们能理解、预测研究对象的形成。

2. 模型分类 丘奇曼(c. churchman)等学者把模型分成三类<sup>[1]</sup>:

(1)形象模型(iconic model)。将研究对象根据需要按比例放大或缩小来设计制造与实际产品形象相似的实物模型,它是利用相似原理、类比原理、模拟原理等产生形象模型,可以模拟整个产品,也可以模拟局部的关键部分,以小的代价或风险,便于多方案比较,易于改变试验条件,找出好的产品方案和结构。这种模型有抽象出的实物形象,故称形象模型。例如飞机、导弹的风洞模型,万吨水压机的以大化小比例模型,作战沙盘模型等。

(2)模拟模型(analog model)或物理模型(physics model)。利用一组物理特性去模拟另一组所要研究真实系统的特性,两者形态不同,但只要在性质、规律方面有一一对应关系,就可以达到投资少,周期短,易于改变结构参数去考核对性能的影响,从中选择好的参数方案作为研制实际产品的依据。

模拟模型大多利用力-电相似原理的电路或模拟计算机进行。现以力-电相似原理来说明。

图 1-1(a)表示一个机械振动系统,图(b)表示与此相应的交流电物理系统。图(a)中  $P$  为外加干扰力,  $m$  为质量,  $k$  为系统刚性系统,  $c$  为阻尼,  $x$  为振动位移。图(b)中  $L$  为电感,  $R$  为电阻,  $C$  为电容,  $V$  为额定电压,  $e$  为随相位  $\omega$  和时间  $t$  而改变的电压,  $i$  为电流。

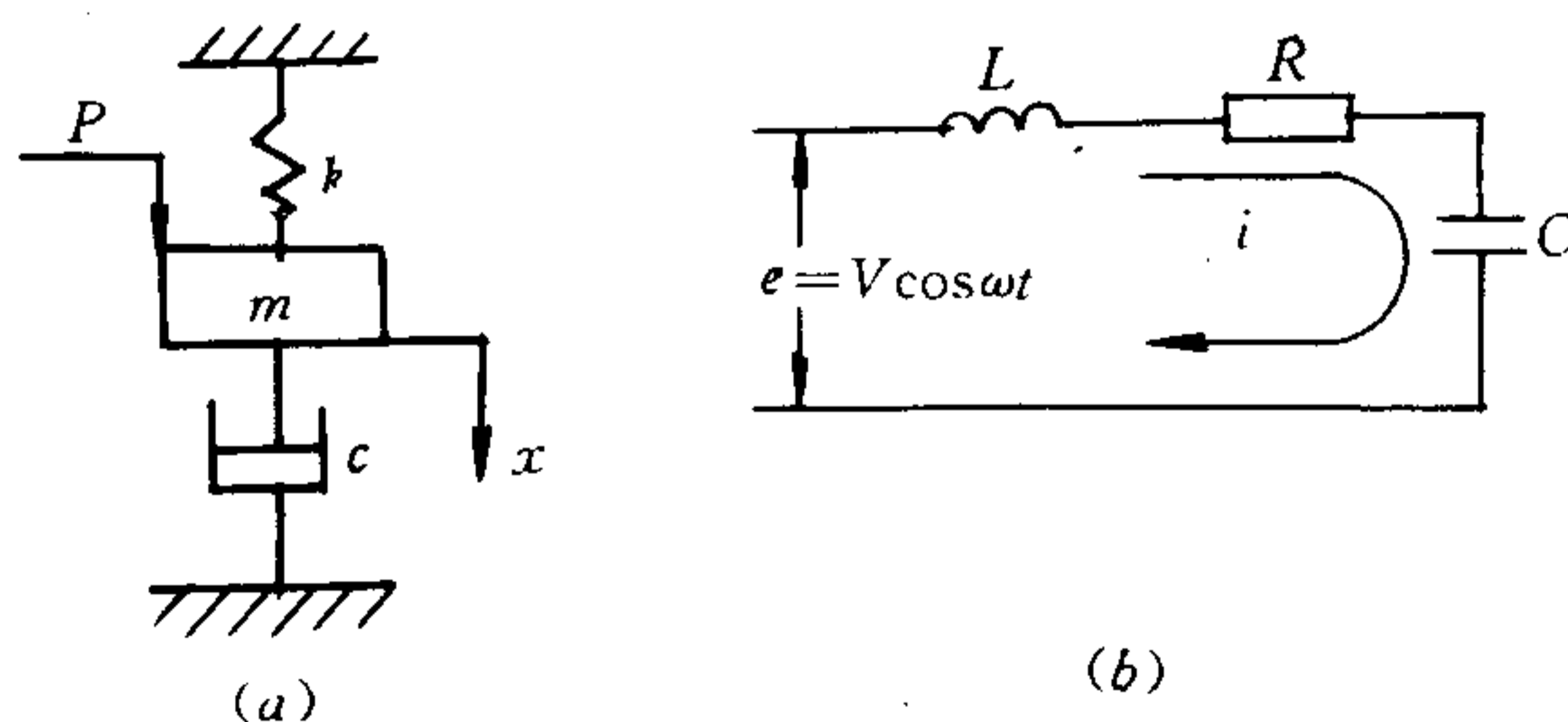


图 1-1 力-电压相似原理

(a)机械振动系统;(b)交流电物理系统

机械振动系统的微分方程为

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + f \frac{dx}{dt} + kx = P(t) \quad (1-1)$$

交流电路系统的微分方程为

$$L \frac{d^2i}{dt^2} + Ri = \frac{1}{C} \int i dt = e(t) \quad (1-2)$$

比较式(1-1)和式(1-2),具有相似形式和变化规律,彼此的物理量是相似量,其对应关系如下表。

表 1-1 力-电压相似模拟对应量

机械振动系统	交流电模拟系统
干扰力 $P$ (或力矩 $T$ )	电压 $e$
质量 $m$ (或转动惯量 $J$ )	电感 $L$
粘性摩擦系数 $f$	电阻 $R$
弹簧刚性系数 $k$	电容倒数 $1/C$
位移 $x$ (或角位移 $\theta$ )	电量 $q$
速度 $\dot{x}$ (或角速度 $\dot{\theta}$ )	电流 $i$

这样,可把复杂的机械振动系统简化为交流电系统来研究振动规律,显然,要改变机械振动系统中各参数,必须设计制造众多个实际系统,而改变交流电中各参数很方便。

在机械系统中还可以利用其他原理去建立模拟模型。

(3) 符号模型(symbolic model)或数学模型(mathematical model)。它是利用字母、数字、各种数学符号来描述设计对象的本质,反映所要求的设计内容,通常是一组数学方程式构成的模型。这是最一般、最抽象的模型,它已完全舍弃事物的真实形象或模拟形象,但包含设计对象的参数和相互关系、性能、破坏形式和几何结构要求等本质内容。其突出优点是把设计对象抽象化为数学模型后,利用计算机对数学模型的综合、分析和求解,最容易定量地改变或调整各设计变量对各种性能、设计目标的要求,了解其变化规律,求得最优方案或最优解。CAD的发展,已有可能把求解结