

 Springer

# 旋转机械动力学 及其发展

◎ [印度] J. S. Rao 著  
叶洎沅 译



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

旋转机械堪称人类文明进步的标志，数千年前的车轮、百年前问世的电站汽轮机和推动人类飞向太空的火箭发动机，对人类文明的进步起着巨大的推动作用。本书介绍了从古到今各种典型旋转机械的演化过程，并由此衍生出在这一演化过程背后的各种数学和物理的理论和方法。从全面性的角度讲，本书堪称当今世界旋转机械动力学领域的集大成之作，可以作为该领域的科研人员和工程师必备的教学用书和参考书。与此同时，本书还详细介绍了计算机时代来临后有限元方法的发展对当代旋转机械设计所带来的影响，这些全新的方法能够帮助工程师不断地将旋转机械的设计水平推向新的高度。

本书融合了作者数十年来丰富的工程经验和全面的理论知识，并与精彩的历史故事和真实的现代理念相结合，非常适合帮助年轻的工程师获取过去的经验、了解当前的行业现状和未来的趋势，而资深的专家也可以从这本书中获取灵感来启发其研究工作。

Translation from English language edition: "History of Rotating Machinery Dynamics" by J. S. Rao, Copyright©2011 Springer Netherlands. Springer Netherlands is a part of Springer Science+Business Media. All Rights Reserved.

本书中文简体字版由 Springer 授权机械工业出版社独家出版。版权所有，侵权必究。

本书版权登记号：图字 01-2012-1679 号

## 图书在版编目（CIP）数据

旋转机械动力学及其发展/(印度)饶(Rao,J.S.)著；叶泊沅译。—北京：机械工业出版社，2012.9

ISBN 978-7-111-39737-3

I. ①旋… II. ①饶… ②叶… III. ①旋转机构—动力学 IV. ①TH21

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2012）第 217008 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：张淑谦

责任印制：乔宇

三河市宏达印刷有限公司印刷

2012 年 10 月第 1 版·第 1 次印刷

169mm×239mm·24 印张·463 千字

0001—3000 册

标准书号：ISBN 978-7-111-39737-3

定价：80.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心：(010) 88361066 教材网：<http://www.cmpedu.com>

销售一部：(010) 68326294 机工官网：<http://www.cmpbook.com>

销售二部：(010) 88379649 机工官博：<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线：(010) 88379203 封面无防伪标均为盗版

谨以本书献给我的父母  
Jammi Chikka Rao

Jammi Ramanamma

## 译者序

首先介绍一下本书的原作者，J.S.Rao 教授是全球著名的旋转机械领域专家，他是 ASME 成员和印度国家工程院院士。J.S.Rao 教授曾是印度理工学院 (IIT) 第一位力学博士，并且是印度第一位科学博士学位获得者。在其 40 多年的职业生涯中，J.S.Rao 博士作为印度国家合作计划的主要参与者之一，曾在全球 30 多个国家和地区任职，迄今为止已经发表了旋转机械领域方面的论文 300 多篇，并著有 10 余本教科书（其中包括堪称转子动力学圣经的《Rotor Dynamics》），曾在美国、德国、加拿大、澳大利亚、新加坡、中国等地的 110 多所大学开设过短期培训课程并举办演讲。他本人还与许多企业组织有过非常深远的合作，如 GE、Washington Metro、Stress Technology、BHEL、ISRO、GTRE 和 DAE 等。J.S.Rao 教授还是国际机器和机构学理论联合会（简称 IFToMM）唯一健在的创始成员，同时还担任过国际期刊《Advances in Vibration Engineering》的主编。

译者翻译这本书的初衷来自于一个承诺。2007~2008 年间译者作为 J.S.Rao 教授的同事，陪同他拜访了多所我国国内的高校和企业，期间我们成为了忘年交。当时译者注意到一件很有趣的事情，J.S.Rao 教授的每次演讲几乎都以与专业相关的历史故事开始，而且总能激起听众的兴趣，当译者向他指出这一点时，他跟译者讲述了他的一个心愿——写一本书来总结这门他研究了一辈子的学科的历史，从而让后来者在此基础上更好地了解和发展这门学科。出于对这本书价值的认知，译者承诺他：“如果你完成了这本书，我会帮你把它译成中文并争取在中国出版。”

J.S.Rao 教授于 2009 年开始利用之前几十年来收集的各种资料动笔写这本书，期间他得了一场几乎致命的重病，这本书也差点夭折。但所幸他挺了过来，才得以在 2010 年 10 月完成这本极具价值的著作。而译者则决心履行自己的承诺，帮助他完成此书的翻译。

这就是这本书背后的故事，不分国界、不分年龄，就是一个年轻人对一个老人的承诺。

J.S.Rao 教授对本书的翻译工作给予了全力的支持，在近 3 个月时间里译者的任何问题几乎总能在几个小时内得到他的回复（尽管我们之间有时

差)。上海航天技术研究院的副院长孟光教授在百忙之中抽出时间帮译者审阅了此书的翻译初稿，提出了宝贵的修改意见，并应邀为本书的中文版作序。还有北京东方极峰公司的周传月博士和 Springer 公司的陈青先生不遗余力地帮助译者联系各项出版事宜。译者的家人和朋友也一直在背后鼓励译者把这件有意义的事坚持下去，他们的支持和信任是译者的动力源泉，在此向他们表示诚挚的感谢！

因为译者水平有限，在翻译中难免会出现错误，也希望读者给予批评指正。

译 者

## 中文版序

旋转机械动力学（又称转子动力学）在航空航天、电力、船舶、化工等领域有着极为重要的作用，而 J.S.Rao 教授堪称这个领域的大师。我认识 Rao 教授已有近 20 年了，曾在多次国际学术会议中与他有过面对面的交流，并拜读过他的另一部有关转子动力学和多部有关振动工程的著作，深知他是这一领域具有国际重要影响力的专家。作为 Rao 教授几十年工作的结晶，《旋转机械动力学及其发展》一书堪称是旋转机械动力学领域的经典之作，并且是相关领域专业人员的必备参考书。

本书把历史故事、工程实例和基础理论完美地融合在一起，深入浅出，理论联系实际，对激发读者的学习兴趣大有益处，同时还为读者提供了大量翔实的参考书目和文献，为他们提供了进一步深入探索的钥匙。

科学发展史对深入了解一门学科来龙去脉和基础原理是非常重要的，但遗憾的是国内教科书对此很少涉及，这也使得年轻一代的中国工程师们对科学技术缺乏历史观，导致他们往往只重视对工程技术的应用，而忽视了对这些技术根源的探索以及在此基础上的发展和创新。J.S.Rao 教授的这本书从历史出发，生动地讲述了科学理论的突破如何推动了工程技术的飞跃，而工程技术的发展又反过来如何促进科学理论的进步。从宏观上讲，没有始于文艺复兴后期的科学革命，人类不可能享受到工业革命带来的发展；从微观上讲，没有基本的能量法和振动原理，旋转机械不可能在 100 多年里达到数千倍的功率提升，也不可能为人们带来更多的能量和更快的速度。

最近几年来，中国机械工程领域出现的一个危险趋势是，工程师们开始倾向于盲目相信手中的有限元软件工具，而忽略了他们所需要分析问题的本质。正如 J.S.Rao 教授在文中指出的那样，尽管我们拥有的技术愈加先进，但与产品设计相关的事故却依旧频发，其中很大部分的原因是设计工程师们过于依赖仿真手段而丧失了从工程基础开始设计的能力。我们身边的许多工程师可以把有限元软件应用得非常熟练，但往往得不到正确的结果或不能很好地解释计算得到的结果，其根本原因在于对相关的基础理论掌握不够，对相关的边界条件处理不当。我们应当从这本书中了解现有设计方法的发展历程，以及其优势和潜在的缺陷。

很长时间以来，我们认为机械工程学科是一门保守的学科，需要避免激进、少犯错误。但是如果惠特尔在面对书中提到的各种困难和挫折时选择保守和放弃，喷气式发动机也许将错过其最佳的发展时机；如果拉瓦尔在遇到大幅涡动时选择了停止试验，我们也许会晚很多年才能有勇气再次尝试去突破临界转速。J.S.Rao 教授的这本书告诉我们，科学既需要理性思维，也需要激情和勇气；既需要对成功的褒奖，也需要对失败的宽容和鼓励。

我对 J.S.Rao 教授的这本书，以及由 IFToMM（国际机器人和机构学理论联合会）的现任主席 Ceccarelli 教授主导编写的《机构与机器科学史》丛书——抱有莫大的期望，希望通过其中文版的出版能够激发中国工程师们的热情，并帮助他们站在伽利略、牛顿、欧拉、拉格朗日、伯努利和哈密顿这些巨人的肩膀上，担负起我们的历史责任，成为中国的瓦特、爱迪生或者杰夫考特，在机械工程的发展史上写下更多的中国人的名字。

在此还要感谢译者的努力和将这本书引入中国的所有人们，也继续期待后续其他图书的引进和出版。

孟光 教授  
上海航天技术研究院副院长  
中国振动工程学会副理事长

# 序

从某种意义上讲，技术的发展构成了人类历史进程的重要部分。然而直到今天，旋转机械动力学却仍仿佛是历史中的一页空白，其发展历程从未被系统性地总结，Rao 博士的这本书将填补这一空白。一般而言，工程师们并非历史学家，但在撰写任何一个专业学科史的时候，又往往需要有一位工程专家——例如本书的作者 Rao 博士——挺身而出承担这一重任。要知道这些专业学科历史的写作难度极大，并非一般人所能胜任。幸运的是，我们有 Rao 博士来撰写这部《旋转机械动力学及其发展》，我们也将看到为何承担这一重任的最佳人选非他莫属。

认识到这一历史空白后，Rao 博士决定在讲述旋转机械动力学的各个专业领域之前首先为读者介绍一下这个复杂学科深远的历史背景。这一决定无疑是正确的。因为这一学科的内涵非常丰富，涉及诸如轴、叶片和轮盘的动力学问题，以及各种轴承和密封件的静态和动态属性。要以一定的深度对这些主题进行研究，就必须熟悉许多不同技术的背景。实际上，这也是为什么撰写这一专业学科史的重任长期以来需要等待一位像 Rao 博士这样的专家来担当，Rao 博士一生都在致力于这些领域的理论和实践研究，并为撰写这本书积累了珍贵的素材。

Rao 博士从轮子、水车和风车的问世和发展开始展现旋转机械技术的演变。随后他分析了古代伟大的工程师——例如亚里士多德（Aristotle）和阿基米德（Archimedes）——对旋转机械技术发展的贡献，同时也介绍了一些当时偶然形成的谬论——甚至是由当时伟大的亚里士多德和托勒密（Ptolemy）所教授的。从这些历史中 Rao 博士提出了一个有趣的问题：许多人期望一门科学从诞生开始起就是完美的，从而自己可以坐享其成，但这合理吗？答案显然是否定的。与此相反，我们从自己的工作中应该认识到这本科学史书内在的价值之一就是：科学技术的创造是一个持续性的任务，科学家和工程师们必须要通过自己的出版物来承担相应的历史责任。在介绍过古代的成就之后，Rao 博士随后带我们穿越西方社会的黑暗时代和文艺复兴时代，来到工业革命时代，这个时代众多杰出的科学家用其发明创造带来了科学的复活。

Rao 博士一向是个节奏非常快的人，在介绍完学科的历史后，他很快将主



题切入了他熟悉的世界——旋转机械动力学的现代科学基础。他从历史的角度介绍了许多叶片振动的研究方法，他在过去的工作中一直在使用和研究这些方法。他的介绍让我们了解了许多天才的创新者——他们是现代旋转机械技术的奠基者——是如何取得其成就的。Rao 博士从独特而新鲜的角度描写了欧拉（Euler）、拉格朗日（Lagrange）、瑞利（Rayleigh）和邓克莱（Dunkerley）在历史上对这一领域的贡献——而不是我们从前所熟悉的那种纯技术的角度。这些科学家第一次以一种生动的形象出现在我们面前：作为 13 个孩子的父亲，失明的欧拉在圣彼得堡度过晚年；身处巴黎街头大革命中的拉格朗日，在出版其不朽的著作《分析力学（Mechanique Analytique）》时是如此担心，以至于在之后的两年中都不敢打开桌子上的这本书；而瑞利在写作其著名的《声音的原理（Theory of Sound）》时，居然是在尼罗河上幸福的蜜月旅行中。对读者来说，这些伟大人物不再只是遥远的名字，而是出现在我们面前的真实生动的人。

在这之后 Rao 博士开始介绍各种旋转机械动力学的研究方法。在 19 世纪末和 20 世纪初一直是图形法占据主流。后来人们普遍意识到还需要更好的方法，于是霍尔兹（Holzer）最先引入了当时领先的数值方法来处理那些用解析公式解决不了的问题。从那时起，我们开始看到了一个存在于数字而非公式中的未来世界。杰夫考特（Jeffcott）首次通过一个非常严谨的实验，研究了在当时争论不休的轴动力学的“临界转速”问题，并在随后使用了实验的结果来分析这一问题。他发现临界转速问题实际上是一个受迫振动问题，而并非之前许多学者所认为的失稳问题。Rao 博士认为矩阵法（包括普罗尔-米克勒斯泰德（Prohl-Myklestad）的传递矩阵法）的问世为解决真实转子的不平衡响应和平衡设计问题提供了必要的基础，然而这些方法在 20 世纪 70 年代计算机技术问世之前仍然是不适用的。结果是临界转速这一转子动力学的基本问题等待了长达一个世纪才被完全解决，其中 60 多年是等待杰夫考特来解释，而后的 40 多年是等待数值计算技术的创新。

当然这些内容还没有涵盖在 20 世纪 20 年代中涌现出来的另一个重要的问题，即转子的失稳。在本书中，Rao 博士介绍了轴承的失稳和主轴的滞后失稳，同时考虑了偏差或非对称转子等各种问题对轴系动力学的影响。通过这些介绍和分析，读者将能够理解为什么人类要花费几个世纪才找到对这些问题的完整解决方案。在本书的最后部分，Rao 博士介绍了有限元方法是如何被引入转子动力学和轴承动力学当中的，并由此转入他另外准备的主题：叶片和轮盘动力学。他以其几十年来积累的第一手知识解释了叶片振动问题的研

究方法及其演化过程——首先从采用离散的“弯-弯-扭”方法的单桨分析开始，直到最后的有限元方法。我们再次意识到如果没有计算机性能的飞跃式提升，那么对叶片、叶片组和今天的叶片-轮盘装配结构的稳态应力和动态应力的研究是不可能的。

我们充分相信这一部专业学科史——作为由 Marco Ceccarelli 教授主编的《机械与机构理论史》的一部分——将为旋转机械动力学的起源和历史演化竖立一座里程碑。这本书以及这一系列丛书中的其他著作，将激发各相关专业领域的专家和学生的兴趣去发掘其领域的背景知识。Rao 博士过去在这一领域的技术著作作为他赢得了科学界中的地位，而今天这本书将为他再一次赢得在工程学界中的地位。所有参与这一门“艺术”的人们都将感激 Rao 博士那些令人印象深刻的文献和愿景。

Neville F. Rieger 博士，ASME 会员  
STI 技术有限公司首席科学家及创始人  
美国纽约州罗切斯特理工学院 (Rochester Institute of Technology) 前机械工程教授  
1998~2006 年 IFToMM 转子动力学委员会主席，2008 年至今担任名誉主席

## 前 言

在公元纪年的第 20 个世纪，人类进入了旋转机械的快速发展和广泛使用的时期。当然这要归功于拉瓦尔（de Laval）和帕森斯（Parsons），他们分别发明了冲动式汽轮机和反动式汽轮机，从而实现了古埃及亚历山大的希罗（Hero）在 2100 年前的梦想。写作本书的目的之一就是回顾这一历史进程。

尽管本书会追踪这一历程中一系列重要的事件，但本书的重点会放在转子和叶片的动力学问题上，因为正是对这些问题不断研究才使得人类能在过去的几百年里将旋转机械的效能提升至极限。本书还会重点介绍一些研究方法，包括在计算机时代之前的图表法——它们实际上仍然以不同形式存在于现代的有限元方法之中。所有这些在过去一个世纪中衍生出来的方法都会被详细介绍以便能够帮助当代的设计师和研究人员。

在 15000 年前最后一次冰河时期结束后，人类开始制造工具并开始迁移，并从那时起就不断寻找更方便的手段来进行这些工作。于是人类发明了轮子：在 5000 年前出现了制陶工人的轮盘，随后是运输用的车轮，而在 3000 年前出现了磨盘。在本书的第 1 章中简单介绍了旋转机械的起源——即轮子的问世。

但在那个时代，科学的概念尚不存在。中世纪之前的第一次对科学有组织的思考来自于 2350 年前的亚里士多德。直到 2250 年前，亚历山大的阿基米德终于提出了一些实际而清晰的科学概念。而实际上正是在同一时代，希罗制造出人类历史上第一台可工作的反动式汽轮机。这也许是人类历史的第一台机器，但由于缺乏科学，它并未发挥任何真实的使用价值。这段历史将在第 2 章进行介绍。

尽管没有科学，人类还是尝试发明了水车和风车来降低磨坊和铁匠铺的工作强度。第 3 章和第 4 章简要介绍了这些民间发明。

在中世纪的后期，尽管仍处在严格的宗教控制之下，人们开始越来越多地感受到对科学的需要。终于出现了以达芬奇（Leonardo da Vinci）为首的科学思维方式的复兴，并在随后带动了以哥白尼（Nicholas Copernicus）发表“日心说”为标志的科学革命。随着牛顿（Newton）和莱布尼兹（Leibniz）在

300年前发明了微积分，科学的发展更加迅速了，其影响之一就是梁结构理论的出现。而现代转子动力学的理论基础实际上就来源于科学革命时期的梁结构理论。第5章将详细讨论这些基础理论。

在科学逐渐成形的同时，工程师们也在尝试开发从矿井中抽水的机械。格里克（Otto von Guericke）发现了真空，而文艺复兴时代的其他工程师们——以帕平（Denis Papin）为首——则发明了抽水用的吸气机。第6章会简要介绍这些发明。

随着布莱克（Joseph Black）在200年前发现了潜热，瓦特（James Watt）得以制造出往复直线运动的蒸汽轮机，工业革命的时代来临了。第7章将讲述这一段激动人心的历史。

然而往复直线运动的蒸汽轮机并不是人类梦想的最高点，在拉瓦尔（de Laval）和帕森斯（Parsons）的发明问世后，往复直线运动的蒸汽轮机被配有转子和叶片的汽轮机所取代，后者当时被认为是“无振动的”。此时距今正好是100年，而正是从那时起，转子动力学作为一门学科问世了。第8章将介绍这些重要的事件。

转子和叶片动力学问题很大程度上依赖于第9章中所讨论的弹性理论。但是弹性方程本身涉及具有15个未知数耦合的偏微分方程，因此是不可解的。于是基于由牛顿提出的变分原理的能量法被开发出来，并构成了现代有限元方法的基础。第10章会讨论能量法和一些同时代的采用了瑞利（Rayleigh）原理的设计案例。在第10章中还会介绍动力学中最通用的理论——哈密顿（Hamilton）原理，以及一些与之相关的具有极大难度的问题，其中有些问题即使是今天的有限元法也无能为力。

当旋转机械与发电机的结合越来越普遍时，工业界开始需要确定转子和叶片临界转速的方法。由于当时没有计算机，基于弹性理论的方法是不适用的。最开始人们采用材料强度法，后来采用图表形式的数值方法也被开发出来。第11章将会介绍这些方法。

第12章会介绍20世纪中期开始采用的矩阵法。随着计算机时代的来临，有限元方法得以快速发展。第13章将会讨论典型的基于梁、板和壳的不同有限元方法，同时还会介绍叶片-轮盘装配结构所需要用到的非线性接触单元法，最后还列举了一个典型的采用商业有限元软件进行叶片仿真的实例。

第14章会详细介绍转子动力学问题及其研究领域，其中许多针对特定问题的研究都是由杰夫考特在1918年的分析中开创的，例如油膜失稳和陀螺效应等。而第15章将会详细介绍这些以传递矩阵形式存在的方法。第16章将

会介绍转子动力学中有限元方法的应用，其中包括近年来新问世的三维实体转子动力学仿真方法。

转子上的叶片也是旋转机械上重要的部件，需要在转子动力学问题的研究中予以重点考虑，本书的第 17 章将专门讨论叶片和叶片-轮盘机构的开发。

随着商业软件的开发和成熟，旋转机械零部件的仿真和寿命计算被纳入到标准设计流程当中。近年来工业界对结构重量、寿命和性能优化设计需求也变得越来越普遍。第 18 和第 19 章将会分别简要介绍这些方法。

本书的内容可以帮助转子和叶片动力学领域年轻的工程师和学生来理解过去和现在的工作，并了解未来的研究方向。同时还可以帮助业界专家从更广泛的层面来布局未来的研发计划。

这里作者想强调一下，要对整个旋转机械进行一次历史回顾几乎是不可能完成的任务。旋转机械涵盖许多的基本学科，例如热动力学、压缩流、热传导、材料科学以及测量和控制等。我们只能限制在转子和叶片动力学上。而且即使在转子动力学领域内的很多内容，例如流道路径冲突所引起的激励、电磁轴承和环境监控等，也都不在本书的范围之内。尽管作者做了广泛的研究，还是会有一些重要的研究内容未被关注到，对此不得不深表歉意。

作者真心希望转子和叶片动力学的研究同仁能够从本书中有所收益。

J. S. Rao

## 致 谢

我首先要感谢我的妻子 Indira Rao，长期以来她给予了我完全的自由和支持来完成这本书。

接下来我要感谢在我的人生中遇到的多位良师益友，他们为我的职业生涯所取得的成就打下了良好而坚固的基础。我的两位中学老师，教数学的 Srinivasa Raghavachar 和教化学的 Jambha Veerabhadra Rao，他们点燃了我学习的激情。印度理工学院（IIT）的 Belgaumkar 教授第一个鼓励我从事旋转机械叶片动力学的研究。随后 Langhaar 和 Carnegie 两位教授引导我从事能量法的研究，而这些研究贯穿于我的整个职业生涯，甚至到今天我仍然经常怀念他们所教授的那些课程。

此外我要感谢许多海外的朋友：包括 Neville Rieger 教授、Lalanne 教授、Sankar 教授、Irretier 教授、萧教授（中国台湾中正大学萧庭朗教授——译者注）和 Hahn 教授，他们在过去的几十年中邀请我访问他们的学校并教授叶片和转子动力学，并且邀请我参加许多工业项目。我还要感谢 Rzadkowsky、Kicinski 和 Janecki 教授，他们多次邀请我到波兰科学院进行演讲并参与其研究项目。Lim 教授（中国香港城市大学 C.W. Lim 教授——译者注）和 Nataraj 教授一直不遗余力地分别为我提供各类文献，包括 Stodola 博士的书籍和 Trumpler 教授友情提供的资料。这些多年好友以其知识和经验帮助我扩展了我的视野。此外还有许多人曾经帮助我学习如何搜索文献，这些帮助都是无价的。

作为国际机器和机构学理论联合会（International Federation for Promoting Mechanism and Machine Science, IFToMM）在 1969 年时的创始成员，我与该组织一直保持着紧密的联系，并组建了其中的转子动力学技术委员会。我需要感谢 IFToMM 的现任主席 Marco Ceccarelli 教授，是他建议我应当写这本书。此外我的长期好友，也是联合会成员的 Neville F.Rieger 教授为本书作了序。我还要感谢许多印度的工业和政府组织，他们为我的许多旋转机械动力学的项目提供了资金支持，这里我仅列举其中几家：Bharat Heavy Electicals 公司、GTRE（Gas Turbine Research Establishment）、印度空间研究院、Bhabha 原子能研究中心、科学技术部和原子能部等。

我非常感谢 Grandhi Mallikarjuna Rao 先生，他曾为我提供了在印度私人能源领域工作的机会。还有 Ajit Prabhu 先生，他吸引我参与了能源和航空行业的许多工业项目，从而使我们能够为旋转机械动力学的研究做出许多贡献。此外我还需要感谢 Altair 公司，尤其是 Nelson Dias 先生和 Pavan Kumar 先生，他们为我这本书的写作提供了巨大的帮助和鼓励。

我还需要感谢许多我的学生和同仁，他们在过去近 50 年里与我一起工作并共同取得了杰出的成就。最后我必须要感谢 Lakshimi Betta Krishnamuty 女士帮助我制作了本书中的许多插图。

# 目 录

译者序

中文版序

序

前言

致谢

第 1 章 轮子的问世 .....	1
参考文献 .....	3
第 2 章 中世纪之前的技术 .....	4
参考文献 .....	6
第 3 章 水车 .....	7
参考文献 .....	10
第 4 章 风车 .....	11
参考文献 .....	12
第 5 章 文艺复兴与科学革命 .....	13
参考文献 .....	18
第 6 章 文艺复兴时代的工程师们 .....	23
参考文献 .....	29
第 7 章 工业革命 .....	31
参考文献 .....	34
第 8 章 旋转机械 .....	35
参考文献 .....	43
第 9 章 弹性理论基础 .....	44
参考文献 .....	45
第 10 章 能量法 .....	47
10.1 欧拉-拉格朗日方程 .....	48
10.2 拉格朗日 (Lagrange) 法 .....	53
10.3 瑞利 (Rayleigh) 能量法 .....	53
10.4 里兹 (Ritz) 法 .....	56



10.5	振动问题的拉格朗日法 .....	58
10.6	迦辽金 (Galerkin) 法 .....	60
10.7	哈密顿 (Hamilton) 原理 .....	64
10.8	余虚功原理 .....	75
10.9	海林格-瑞斯纳 (Hellinger-Reissner) 变分原理 .....	77
10.10	胡-鹭津 (Hu-Washizu) 原理 .....	83
10.11	杆扭转的不同定理 .....	85
10.11.1	库仑 (Coulomb, 1784) 基本定理 .....	86
10.11.2	圣维南 (St. Venant, 1853) 定理 .....	86
10.11.3	乐甫 (Love, 1944) 定理 .....	86
10.11.4	铁木辛哥 (Timoshenko, 1945) - 基尔 (Gere, 1954) 定理 .....	87
10.11.5	瑞斯纳 (Reissner, 1952) 和罗-高洛德 (Lo-Goulard, 1955) 定理 .....	88
10.11.6	巴尔 (Barr, 1962) 定理 .....	89
10.11.7	由 Rao (1974) 提出的改良定理 .....	89
	参考文献 .....	92
<b>第 11 章</b>	<b>20 世纪的图形和数值方法 .....</b>	<b>96</b>
11.1	图形方式的斯托多拉 (Stodola) - 维埃内罗 (Viannello) 法 (瑞利最大能量法) .....	96
11.2	表格方式的斯托多拉 (Stodola) - 维埃内罗 (Viannello) 迭代法 .....	98
11.3	邓克莱 (Dunkerley) 法 .....	101
11.4	布莱斯 (Blaess) 对邓克莱公式的证明 .....	102
11.5	哈恩 (Hahn) 使用矩阵代数对邓克莱公式的证明 .....	103
11.6	扭转振动的霍尔兹 (Holzer) 法 .....	104
11.7	米克勒斯泰德 (Myklestad) 法 .....	106
11.8	普罗尔 (Prohl) 法 .....	110
	参考文献 .....	112
<b>第 12 章</b>	<b>矩阵法 .....</b>	<b>113</b>
12.1	扭转振动系统 .....	116
12.2	远端耦合系统 .....	119
12.3	连续逼近的格拉菲 (Gräffe) 方法 .....	121
12.4	矩阵迭代法 .....	123