


[美] Singiresu S. Rao 著 李欣业 杨理诚 译

 Pearson

Fifth Edition

Mechanical Vibrations

机械振动

(第5版)



清华大学出版社

Mechanical Vibrations

机械振动

(第5版)

Fifth Edition

[美] Singiresu S. Rao 著

李欣业 杨理诚 译

Li Xinye Yang Licheng

清华大学出版社

北京

Authorized translation from the English language edition, entitled MECHANICAL VIBRATIONS, Fifth Edition, 978-0-13-212819-3 by SINGIRESU S. RAO, published by Pearson Education, Inc, publishing as Pearson Prentice Hall, Copyright © 2011.

All Rights Reserved. No part of this book may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording or by any information storage retrieval system, without permission from Pearson Education, Inc.

CHINESE SIMPLIFIED language edition published by PEARSON EDUCATION ASIA LTD., and TSINGHUA UNIVERSITY PRESS, Copyright © 2016.

本书中文简体翻译版由培生教育出版集团授权给清华大学出版社出版发行。未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

北京市版权局著作权合同登记号 图字:01-2014-8574

本书封面贴有 Pearson Education(培生教育出版集团)激光防伪标签,无标签者不得销售。
版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

机械振动:第5版/(美)辛格雷苏·S.拉奥(Singiresu S. Rao)著;李欣业,杨理诚译.—北京:清华大学出版社,2016

书名原文:Mechanical Vibrations(Fifth Edition)

ISBN 978-7-302-44058-1

I. ①机… II. ①辛… ②李… ③杨… III. ①机械振动 IV. ①TH113.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 128014 号

责任编辑:许龙 赵从棉

封面设计:傅瑞学

责任校对:赵丽敏

责任印制:杨艳

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 刷 者:北京富博印刷有限公司

装 订 者:北京市密云县京文制本装订厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×230mm

印 张:60.75

字 数:1322千字

版 次:2016年12月第1版

印 次:2016年12月第1次印刷

印 数:1~2000

定 价:128.00元

产品编号:060752-01

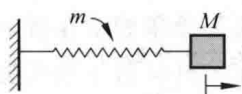
内 容 简 介

本书以单自由度系统、多自由度系统(包括两自由度系统)和无限自由度系统(即连续系统或分布参数系统)的线性振动问题为切入点,结合有阻尼和无阻尼情况下的自由振动和受迫振动的求解,逐渐将理论分析推广到数值分析(包括微分方程的数值积分和有限元分析方法等),即将求精确解推广到求近似解,再将视野拓展到非线性振动问题和随机振动问题。本书还讨论了诸如振动的(被动和主动)控制问题、振动信号的测试以及振动的实验分析方法等这些与工程实际密切相关的问题。本书在每一章的开头和结尾都新增了导读、学习目标和本章小结,相信这对初学者又是一个好消息。书中提供的大量工程实例和 30 多个设计性题目一定会大大提高读者的学习兴趣,让他们体会到利用所学理论知识解决工程实际问题的乐趣。本书提供的大量的各种形式的思考题和习题以及利用 MATALB 求解的示例(包括 MATLAB 源代码)一定会使读者受益匪浅。

本书可作为工程力学、机械工程、车辆工程、动力工程、航空航天工程等专业本科生或研究生的教材使用,亦可供相关专业的工程技术人员参考。

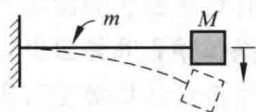
等效质量、等效弹簧与等效黏性阻尼器

等效质量



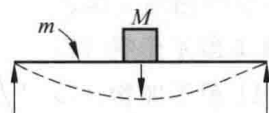
质量为 m 的弹簧末端连接一个质量 M

$$m_{eq} = M + \frac{m}{3}$$



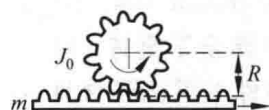
质量为 m 的悬臂梁在自由端具有一个集中质量 M

$$m_{eq} = M + 0.23m$$



质量为 m 的简支梁在跨度中点具有一个集中质量 M

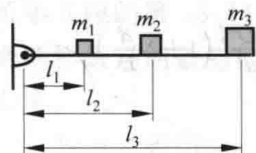
$$m_{eq} = M + 0.5m$$



平动质量与转动质量耦合的情况

$$m_{eq} = m + \frac{J_0}{R^2}$$

$$J_{eq} = J_0 + mR^2$$



铰支杆上的若干集中质量

$$m_{eq} = m_1 + \left(\frac{l_2}{l_1}\right)^2 m_2 + \left(\frac{l_3}{l_1}\right)^2 m_3$$

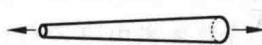
等效弹簧



受轴向载荷作用的杆

(l 为杆的长度, A 为杆的横截面积)

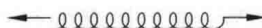
$$k_{eq} = \frac{EA}{l}$$



受轴向载荷作用的变截面杆

(D 和 d 分别为两个端面的直径)

$$k_{eq} = \frac{\pi EDd}{4l}$$



轴向载荷作用下的螺旋弹簧

(d 为簧丝直径, D 为簧圈的平均直径, n 为有效圈数)

$$k_{eq} = \frac{Gd^4}{8nD^3}$$



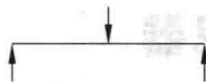
载荷作用在跨度中点的两端固定梁

$$k_{eq} = \frac{192EI}{l^3}$$



载荷作用在自由端的悬臂梁

$$k_{eq} = \frac{3EI}{l^3}$$



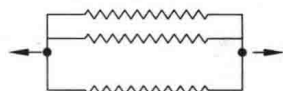
载荷作用在跨度中点的简支梁

$$k_{eq} = \frac{48EI}{l^3}$$



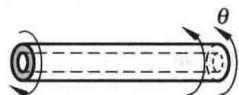
串联弹簧

$$\frac{1}{k_{eq}} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \dots + \frac{1}{k_n}$$



并联弹簧

$$k_{eq} = k_1 + k_2 + \dots + k_n$$

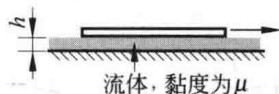


发生扭转变形的空心轴

(l 为长度, D 为外径, d 为内径)

$$k_{eq} = \frac{\pi G}{32l} (D^4 - d^4)$$

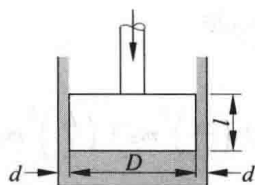
等效黏性阻尼器



两个平行表面间有相对运动

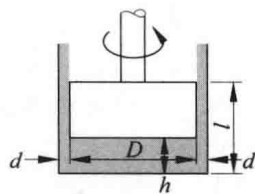
(A 为较小板的面积)

$$c_{eq} = \frac{\mu A}{h}$$



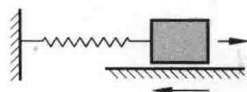
缓冲器(活塞在缸体中作轴向运动)

$$c_{eq} = \mu \frac{3\pi D^3 l}{4d^3} \left(1 + 2 \frac{d}{D}\right)$$



扭转阻尼器

$$c_{eq} = \frac{\pi \mu D^2 (l-h)}{2d} + \frac{\pi \mu D^3}{32h}$$



干摩擦(库仑阻尼)

(fN 为摩擦力, ω 为频率, X 为振幅)

$$c_{eq} = \frac{4fN}{\pi \omega X}$$

译者序

美国迈阿密大学 Singiresu S. Rao 教授的力作《机械振动》(Mechanical Vibrations)一书的第 5 版秉承了其一贯的内容翔实、叙述简洁、强调工程背景与计算技术的风格,很能体现美国工程与技术鉴定委员会(Accreditation Board For Engineering And Technology)所要求的能力培养目标,即应用数学、科学以及工程方面知识的能力,对工程问题进行识别、公式化建模和求解的能力,利用工程实践所必需的技术、方法和现代工程工具的能力,设计和进行实验以及分析和解释实验数据的能力。

与第 4 版的中译本相比,此译本的亮点如下:

- (1) 补全了第 1 章中关于振动研究简史部分的翻译。
- (2) 增加了第 11 章(振动分析中的数值方法)和第 12 章(有限元方法)的翻译。
- (3) 第 7 章未作任何改编,完全依原著翻译。
- (4) 补全了全部 6 个附录的翻译。

此外还对第 4 版中译本中个别翻译不准确的地方和个别文字错误进行了修正。虽然原著第 5 版的第 13、14 两章为可在网站下载的电子文档,但此中译本仍将它们包括进来。译者这样做是期望能给国内读者呈现一个“高保真”的、不做任何改动的美国优质教材的中译本。

与第 4 版相比,本版又新加了 128 道例题,160 道习题,70 道思考题和 107 个插图。并且在每章的开头和结尾分别增加了导读、学习目标和本章小结。我们想这些一定都是读者非常期待的。

本书第 1 章主要介绍机械振动理论的若干基本概念以及振动的运动学基础,如简谐运动的表示方法和谐波分析;第 2 章讨论有阻尼和无阻尼单自由度系统的自由振动;第 3 章讨论单自由度系统在简谐激励下的受迫振动问题;第 4 章讨论单自由度系统在任意激励下的受迫振动问题;第 5 章讨论两自由度系统的自由振动和受迫振动问题;第 6 章借助矩阵运算讨论多自由度系统的振动分析方法。第 7 章介绍确定多自由度系统固有频率和固有振型的各种近似方法,如 Rayleigh 法、Dunkerley 法和矩阵迭代法等;第 8 章讨论弹性体包括弦、杆、轴、梁和薄膜的振动问题;第 9 章讨论振动的(被动和主动)控制问题;第 10 章介绍振动信号的测量原理、测试仪器与振动测量之应用,如实验模态分析和机械运行状况检测技术等;第 11 章介绍振动分析中的数值积分方法;第 12 章介绍有限单元方法及其在振动分析中的应用;第 13 章和第 14 章分别介绍非线性振动和随机振动问题的基础理论。

第 1~8 章的大部分内容可以作为本书的基本部分;第 9~10 章可以作为本书的拓展部

分,亦可理解为是振动理论的应用部分,这两章对应的“振动控制理论与应用”和“振动测量技术”亦有单独成册的专著;第11~12章可以作为本书的提高部分,无论是这两种数值计算方法中的哪一种,对解决工程实际问题都是十分重要的;第13~14章可以作为本书的专题部分。最后这6章只是给读者提供一个入门知识。涉及这六方面内容的专著,不论是中文的还是外文的,都很容易找到。

— 指导者也完全可以根据需要选用本书的部分内容作为任何层次之教学与培训的辅导材料。

本书第1、7、9、11、12、13章由李欣业执笔,第2~5章及附录由杨理诚执笔,第6、8章由梁勇执笔,第10、14章由陈涛执笔。

感谢硕士研究生忽伟、王振静、段晓炳、白静峰、韩善凯、王旭等在文字和程序校对方面付出的大量时间。

感谢河北工业大学机械工程学院和湖南工程学院的鼎力支持,希望本书的付梓能为我们所在学院特色强势学科的发展尽微薄之力。

衷心感谢清华大学出版社的赵从棉编辑,作为本书的责任编辑,她的专业和敬业非常令人钦佩。

限于水平,译文不准确之处难免,恳请广大同行与读者指正。

译者

2016年8月于天津

xylihebut@163.com

前 言

本版的变化

本书是为本科大学生准备的一本关于振动工程课程的入门读物。来自读者对《机械振动》第 4 版的肯定和赞许一直鼓励着作者为大家呈现本书的第 5 版。本版依然保持了前几版的风格,比如在振动理论、计算与应用方面的介绍都是以尽可能简单的方式给出的,并强调分析中所涉及的计算技术。此外,还对一些基本概念和原理作出了进一步的说明,以便加强对物理含义和概念的理解,这些都有赖于在本科生阶段学习力学所积累的经验。所选的大量例题和习题都是为了说明一些重要的原理和概念。

在这一版中,对某些题目进行了修改和重写,并增加了一些新的题目。此外,还引入了一些新的特色。而这些新增加或修正的内容大多数都是由这本书的使用者和评论者提出的。一些重要的变化体现在以下几个方面:

- (1) 在每一章的开头,给出了“导读和学习目标”。
- (2) 在每一章的结尾,给出了“本章小结”。
- (3) 为了扩大覆盖的范围以及更加清晰的表述,对部分题目进行了改写。这些题目包括振动系统的基本组成——弹簧元件、阻尼元件和质量或惯性元件,振动的隔离和振动的主动控制。
- (4) 详细地论述了许多新的题目并配以直观的例子,这包括一阶系统的响应和时间常数,特征根和解的图形化显示,参数变化和根轨迹表示法,系统的稳定性,受迫振动问题的传递函数方法,求自由和受迫振动问题解的拉普拉斯变换方法,频率传递函数方法,有阻尼单自由度系统的波特图,阶跃响应,瞬态响应的描述和塑性及弹性冲击。
- (5) 又新加了 128 道例题,160 道习题,70 道思考题和 107 个插图。
- (6) 删去了前几版中在每章最后给出的基于 C++ 和 Fortran 程序的例题和习题。

本书的特色

机械振动中的每一个题目都自成一章,所有的概念都给出了详尽的解释,所有的推导都给出了全部的细节。

全书从始至终都强调计算方面的原理和技巧。每一章中的最后都给出了基于 MATLAB 的例题和一些通用 MATLAB 程序。此外,还给出了大量需要利用 MATLAB 或 MATLAB 程序求解的习题。

在某种程度上,某些题目的介绍可能是以不太方便的方式给出的,尤其是第 9~11 章。

大多数教科书都会在不同的章节讨论隔振器、吸振器和机械的平衡问题。既然研究振动的主要目的之一就是要控制振动响应,所以第 9 章中的每一个题目都是和振动控制直接相关的。第 10 章介绍振动测量仪器和激振器、实验模态分析以及设备状态监测。类似地,所有可应用于单自由度和多自由度以及连续系统的数值积分方法构成了第 11 章的全部内容。

本书的特色之处体现在以下几个方面:

- 240 多道说明性的例题以配合大多数所讨论的问题。
- 980 多道思考题帮助学生复习和检验他们对教材内容的理解。思考题的形式包括多项选择题、简述题、判断题、连线题和填空题。
- 每一章所给出的大量习题旨在强调所涉及内容之不同应用。全部习题的数量达到了 1150 多道。习题解答专门编成了一个教师手册。
- 在各章的最后,共有 30 多道设计性题目,它们中的许多解并不是唯一的。
- 超过 25 个 MATLAB 程序以帮助学生理解如何实现教材中讨论的数值方法。
- 在每一章和附录的起始页,给出约 20 位对振动理论的发展曾作出过重要贡献的科学家和工程师的传记信息。
- 书中给出的 MATLAB 程序、思考题和习题的答案可以在公司的网站上找到: www.prenhall.com/rao。选用本书作为教材的教师可以得到包含全部习题解答和设计性题目的有关提示的题解手册。

符号和单位

在本书的例题和习题中,同时采用了国际制单位和英制单位。在致谢的后面,不仅给出了符号表,还列出了各种物理量的国际制单位和英制单位。在附录 E 中,又给出了国际制单位应用于振动领域时的简要讨论。其中,用黑斜体字母表示列向量,用方括号表示矩阵。

材料的组织

本书包括 14 章正文和 6 个附录,其中第 13、14 两章是以电子文档的形式提供的,可以在公司的网站下载。阅读本书的读者应该具备静力学、动力学、强度理论以及微分方程方面的基础知识。尽管也期望读者具备矩阵理论和拉普拉斯变换方面的一些背景知识,但还是在附录 C 和 D 中分别给出了一个概要。

第 1 章简要地讨论了振动研究的历史和重要性,同时还介绍了对实际系统进行振动分析时如何进行简化以及振动分析的各个步骤。接下来介绍了振动系统的基本组成——刚度、阻尼和质量(惯性)以及振动分析中要用到的基本概念和术语。

第 2 章介绍了单自由度无阻尼和黏性阻尼平动系统以及扭振系统的自由振动分析。讨论了特征根和相应解的图形化显示方法、参数变化以及根轨迹表示法。尽管在控制系统中根轨迹法会经常用到,本章还是直观地示意了其在振动分析中的应用。本章还介绍了单自由度系统有库仑阻尼和滞后阻尼时如何求自由振动响应。

第 3 章讨论了单自由度无阻尼和有阻尼系统在简谐激励下的响应。还概要地介绍了力

传递率和位移传递率的概念以及它们在实际系统中的应用。第3章还介绍了传递函数方法、受迫振动的拉普拉斯变换解、频率响应以及波特图。

第4章涉及的是单自由度系统在一般力函数作用下的响应。在这一章里还通过示例概要地介绍了周期函数傅里叶级数展开的作用、卷积积分、拉普拉斯变换以及数值方法。此外还利用峰值时间、上升时间和镇定时间讨论了弱阻尼系统响应的特性。

第5章讨论了两自由度系统的自由振动和受迫振动问题。在这一章里还讨论了自激振动和系统的稳定性问题。还通过示例给出了传递函数方法、无阻尼和有阻尼系统的拉普拉斯变换解。

第6章介绍了多自由度系统的振动问题,在理论上使用了矩阵分析方法。针对受迫振动问题的求解,详细地给出了模态分析的全部过程。

第7章介绍了求解离散系统固有频率和模态的几种近似方法,包括邓克莱(Dunkerley)法、瑞利(Rayleigh)法、霍尔茨(Holzer)法、雅可比(Jacobi)法和矩阵迭代法。

与离散系统运动微分方程的形式是常微分方程不同,连续或分布参数系统的运动微分方程的形式是偏微分方程。第8章讨论连续体的振动,包括弦的振动、杆的振动、轴的振动、梁的振动和薄膜的振动。这一章还介绍了求解与连续系统有关的偏微分方程时用到的分离变量方法。此外,这一章还通过示例介绍了求解连续系统固有频率的近似方法——瑞利(Rayleigh)法和瑞利-李兹(Rayleigh-Ritz)法。

第9章讨论了振动控制方面的问题,包括消振问题、隔振问题和吸振问题。本章还给出了振动列线图和振动标准,据此可以判断可以接受的振动强度。这一章还讨论了旋转和往复运动机械的平衡问题以及轴的弓形回转问题。第9章的内容还包括用于控制振动系统响应的主动控制技术。

第10章讨论了用于振动响应测量的实验方法,以及振动测量要用到的硬件和信号分析技术。最后介绍了设备运行状态监测和故障诊断技术。

第11章讨论了求离散和连续系统动力学响应的几种数值积分方法,包括中心差分法、龙格-库塔法(Runge-Kutta)、侯伯特(Houbolt)法、威尔逊(Wilson)法和纽马克(Newmark)法,并给出了示例。

第12章结合一维单元介绍了有限单元分析方法,对桁架、受扭杆和梁进行静力和动力分析时分别用到了杆单元、轴单元和梁单元。本章还讨论了进行振动分析时一致质量矩阵和集中质量矩阵的使用问题。

非线性振动问题的描述表现为非线性微分方程,非线性振动表现出的某些现象经常是不能用相应的线性问题预测的,甚至是不能提供任何线索。第13章关于非线性振动介绍性的内容包括亚谐振动、超谐振动、极限环、时变系数系统和混沌。

第14章讨论的是线性振动系统的随机振动问题,介绍了随机过程、平稳过程、功率谱密度、自相关、宽带和窄带随机过程等概念,并讨论了单自由度和多自由度系统的随机振动响应。

附录 A 和 B 分别介绍数学关系以及梁和板的变形。附录 C、D 和 E 分别介绍矩阵理论基础、拉普拉斯变换和国际制单位。最后,在附录 F 中介绍了 MATLAB 程序设计基础。

典型的课程提纲

本书的素材为不同类型的振动课程提供了一个弹性的选择。第 1~5 章、第 9 章和第 6 章的部分内容构成了本课程的基本内容,对于不同的侧重或定位,可按如下的提示增加额外的章节。

- 第 8 章是针对连续或分布参数系统的。
- 第 7 和 11 章是针对数值解的。
- 第 10 章是针对实验方法和信号分析的。
- 第 12 章是针对有限元分析的。
- 第 13 章是针对非线性振动的。
- 第 14 章是针对随机振动的。

期望的课程效果

本书所提供的材料有助于达到工程与技术鉴定委员会 (Accreditation Board for Engineering and Technology, ABET) 指定的某些培养方案的效果,它们是:

- 应用数学、科学以及工程方面知识的能力。

如本书所呈现的这样,振动课程是利用数学知识(不同形式的方程、矩阵代数、矢量方法和复数)和科学知识(静力学与运动学)求解工程中的振动问题。

- 对工程问题进行识别、公式化建模和求解的能力。

大量的例题、习题和设计性题目都是为了帮助学生识别各种各样的实际振动问题,建立数学模型、分析、求解以及对结果进行正确的解释。

- 利用工程实践所必需的技术、方法和现代工程工具的能力。

在每一章的最后一节都给出了利用 MATLAB 软件求振动问题解的示例,并在附录 F 中总结了 MATLAB 编程的基础知识。

利用现代分析技术——有限元方法求振动问题的解单独成章(第 12 章)。有限元方法是工业领域广为人知的对复杂振动系统建模、分析和求解的一种技术。

- 设计和进行实验以及分析和解释实验数据的能力。

本书的第 10 章为读者呈现的是实验方法和与振动相关的数据分析方面的内容,还讨论了进行振动实验、信号分析和系统参数识别所需的仪器和设备。

致 谢

我愿意表达我对许多学生、研究人员和同事们的谢意,是他们的评价帮助我对本书做了很大的改进。我最感谢的下列人员为我提供了大量的评价、建议和观点。他们是:

亚利桑那大学(University of Arizona)的 Ara Arabyan;加拿大蒙特利尔理工学校(Polytechnic School of Montreal)的 Daniel Granger;印度 V. R. S. 工程学院维杰亚瓦达分校(V. R. S. Engineering College Vijayawada)的 K. M. Rao;;印度班加罗尔燃气轮机研究所(Gas Turbine Research Establishment, Bangalore)的 K. S. Shivakumar Aradhya;缅因大学(University of Maine)的 Donald G. Grant;亚利桑那州立大学(Arizona State University)的 Tom Thornton 和应力分析专家 Alejandro J. Rivas;华盛顿大学(University of Washington)的 Qing Guo;加州理工州立大学(California Polytechnic State University)的 James M. Widmann;佛罗里达大西洋大学(Florida Atlantic University)的 G. Q. Cai;得克萨斯农机大学(Texas A & M University)的 Richard Alexander;俄克拉荷马大学(University of Oklahoma)的 C. W. Bert;圣母大学(University of Notre Dame)的 Raymond M. Brach;哥伦比亚(Universidad Distrital "Francisco Jose de Caldas")的 Alfonso Diaz-Jimen[F1]ez;达顿大学(University of Dayton)的 George Doyle;南达科塔州立大学(South Dakota State University)的 Hamid Hamidzadeh;东北大学(Northeastern University)的 H. N. Hashemi;伍斯特理工学院(Worcester Polytechnic Institute)的 Zhikun Hou;田纳西理工大学(Tennessee Technological University)的 J. Richard Houghton;加州大学欧文分校(University of California, Irvine)的 Faryar Jabbari;康涅狄格大学(University of Connecticut)的 Robert Jeffers;北卡莱罗那州立大学(North Carolina State University)的 Richard Keltie;宾夕法尼亚州立大学(Pennsylvania State University)的 J. S. Lamancusa;克莱姆森大学(Clemson University)的 Harry Law;弗吉尼亚理工大学(Virginia Polytechnic Institute and State University)的 Robert Leonard;哥伦比亚大学(Columbia University)的 James Li;波士顿大学(Boston University)的 Sameer Madanshetty;普渡大学盖莱默分校(Purdue University, Calumet)的 Masoud Mojtahed;中佛罗里达大学(University of Central Florida)的 Faissal A. Moslehy;斯蒂文思理工学院(Stevens Institute of Technology)的 M. G. Prasad;密歇根理工大学(Michigan Tech)的 Mohan D. Rao;加利福尼亚州立理工大学(California State Polytechnic University)的 Amir G. Rezaei;多伦多大学(University of Toronto)的 F. P. J. Rimrott;奥本大学(Auburn University)的 Subhash Sinha;密苏里大学罗拉分校(University of Missouri-Rolla)的

Daniel Stutts;佐治亚理工学院(Georgia Institute of Technology)的 Massoud Tavakoli;利哈伊大学(Lehigh University)的 Theodore Terry;辛辛那提大学(University of Cincinnati)的 David F. Thompson;马里兰大学伯克分校(University of Maryland, College Park)的 Chung Tsui;伊利诺伊大学香槟分校(University of Illinois, Urbana Champaign)的 Alexander Vakakis;密西根理工大学(Michigan Technological University)的 Chuck Van Karsen;蒙大拿州立大学(Montana State University)的 Aleksandra Vinogradov;宾夕法尼亚州立大学(Pennsylvania State University)的 K. W. Wang;佛罗里达大学(University of Florida)的 Gloria J. Wiens,和 GMI 工程与管理学院(GMI Engineering and Management Institute)的 William Webster.

感谢普渡大学(Purdue University)同意我在习题 2.104 中使用锅炉制造厂特刊(the Boilermaker Special)。真诚地感谢 Qing Liu 博士帮助我写了部分 MATLAB 程序。最后,我要对我的妻子 Kamala 致以深深的谢意,没有她的耐心、鼓励与支持,本版或许永远无法得以完成。

SINGIRESU S. RAO

srao@miami.edu

符 号 表

符 号	含 义	英制单位	国际制单位
a, a_0, a_1, a_2, \dots	常量, 长度		
a_{ij}	柔度影响系数	in/lb	m/N
\mathbf{a}	柔度矩阵	in/lb	m/N
A	面积	in ²	m ²
A, A_0, A_1, \dots	常量		
b, b_1, b_2, \dots	常量, 长度		
B, B_1, B_2	常量		
\mathbf{B}	平衡重量	lb	N
c, \underline{c}	黏性阻尼系数	lb · sec/in	N · s/m
c, c_0, c_1, c_2, \dots	常量		
c	波速	in/sec	m/s
c_c	临界黏性阻尼常数	lb · sec/in	N · s/m
c_i	第 i 个阻尼器的阻尼常数	lb · sec/in	N · s/m
c_{ij}	阻尼影响系数	lb · sec/in	N · s/m
\mathbf{c}	阻尼矩阵	lb · sec/in	N · s/m
C, C_1, C_2, C'_1, C'_2	常量		
d	直径, 维	in	m
D	直径	in	m
\mathbf{D}	动力矩阵	sec ²	s ²
e	自然对数的底		
e	偏心距	in	m
\vec{e}_x, \vec{e}_y	平行于 x 和 y 方向的单位矢量		
E	杨氏模量	lb/in ²	Pa

续表

符 号	含 义	英制单位	国际制单位
$E[x]$	x 的数学期望		
f	线性频率	Hz	Hz
f	单位长度上的力	lb/in	N/m
f, f	单位脉冲	lb · swc	N · s
\tilde{F}, F_d	力	lb	N
F_0	力 $F(t)$ 的幅值	lb	N
F_1, F_T	传递的力	lb	N
F_i	作用在第 i 个质量上的力	lb	N
\mathbf{F}	力矢量	lb	N
$\underline{F}, \mathbf{F}$	脉冲	lb · sec	N · s
g	重力加速度	in/sec ²	m/s ²
$g(t)$	脉冲响应函数		
G	剪切模量	lb/in ²	N/m ²
h	滞后阻尼常数	lb/in	N/m
$H(i\omega)$	频率响应函数		
i	$\sqrt{-1}$		
I	面积的惯性矩	in ⁴	m ⁴
\mathbf{I}	单位矩阵		
$\text{Im}()$	复数的虚部		
j	整数		
J	极惯性矩	in ⁴	m ⁴
J, J_0, J_1, J_2, \dots	转动惯量	lb · in/sec ²	kg · m ²
k, \underline{k}	弹簧常数	lb/in	N/m
k_i	第 i 个弹簧的弹簧常数	lb/in	N/m
k_t	扭转弹簧常数	lb · in/rad	N-m/rad
k_{ij}	刚度影响系数	lb/in	N/m
\mathbf{k}	刚度矩阵	lb/in	N/m
l, l_i	长度	in	m

续表

符 号	含 义	英制单位	国际制单位
m, \underline{m}	质量	lb · sec ² /in	kg
m_i	第 i 个质量	lb · sec ² /in	kg
m_{ij}	质量影响系数	lb · sec ² /in	kg
\underline{m}	质量矩阵	lb · sec ² /in	kg
M	质量	lb · sec ² /in	kg
M	弯矩	lb · in	N · m
$M_1, M_{t_1}, M_{t_2}, \dots$	扭矩	lb · in	N · m
M_{t_0}	$M_1(t)$ 的幅值	lb · in	N · m
n	整数		
n	自由度		
N	法向力	lb	N
N	时间步长的总数		
p	压力	lb/in ²	N/m ²
$p(x)$	x 的概率密度函数		
$p(x)$	x 的概率分布函数		
P	力, 拉力	lb	N
q_j	第 j 个广义坐标		
\underline{q}	广义位移矢量		
$\dot{\underline{q}}$	广义速度矢量		
Q_j	第 j 个广义力		
r	频率比 = $\frac{\omega}{\omega_n}$		
\underline{r}	径向矢量	in	m
Re()	复数的实部		
$R(\tau)$	自相关函数		
R	电阻	ohm	ohm
R	瑞利耗散函数	lb · in/sec	N · m/s
R	瑞利商	1/sec ²	1/s ²
s	方程的根, 拉普拉斯变量		