

结构动力学与 气动弹性力学导论

(第2版)

Introduction to Structural
Dynamics and Aeroelasticity

Second Edition

DEWEY H. HODGES G. ALVIN PIERCE

[美] 杜威 H·霍奇斯 著 戴玉婷 朱斯岩 译
[美] G 阿尔文·皮尔斯 著 杨超 [陈桂彬] 审校



北京航空航天大学出版社
BEIHANG UNIVERSITY PRESS

策划编辑：胡晓柏

封面设计：runsign 品牌设计

内容简介

本书重点针对常规飞行器，提供了结构动力学与气动弹性力学的导论。主要内容包括结构动力学、静气动弹性力学和动气动弹性力学。结构动力学素材强调振动、模态表示和动响应。讨论的气动弹性现象包括发散、副翼反效、气动载荷重新分布、气动弹性剪裁、非定常气动力理论和颤振。超过100幅图、表有助于理解本书，超过50个例题便于学生学习。

本书涵盖了截至目前的结构动力学和气动弹性力学的处理方法，能够满足工程专业高年级本科生或航空工程专业初级研究生的需求。

上架建议：力学

ISBN 978-7-5124-1854-7



9 787512 418547 >

定价：45.00元

结构动力学与气动弹性力学导论

(第2版)

Introduction to Structural Dynamics and Aeroelasticity
Second Edition

[美] 杜威 H·霍奇斯 著
[美] G 阿尔文·皮尔斯
戴玉婷 朱斯岩 译
杨 超 陈桂彬 审校

北京航空航天大学出版社

内 容 简 介

本书重点针对常规飞行器,提供了结构动力学与气动弹性力学的导论。主要内容包括结构动力学、静气动弹性力学和动气动弹性力学。结构动力学素材强调振动、模态表示和动响应。讨论的气动弹性现象包括发散、副翼反效、气动载荷重新分布、气动弹性剪裁、非定常气动力理论和颤振。超过100幅图、表有助于理解本书,超过50个例题便于学生学习。

本书涵盖了截至目前的结构动力学和气动弹性力学的处理方法,能够满足工程专业高年级本科生或航空工程专业初级研究生的需求。

图书在版编目(CIP)数据

结构动力学与气动弹性力学导论:第2版/(美)霍奇斯,(美)皮尔斯著;戴玉婷,朱斯岩译.--北京:北京航空航天大学出版社,2015.8

书名原文:Introduction to Structural Dynamics and Aeroelasticity, Second Edition

ISBN 978-7-5124-1854-7

I. ①结… II. ①霍… ②皮… ③戴… ④朱… III. ①航空发动机—结构动力学②航天器—气动弹性动力学
IV. ①V231.9②V415.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第172477号

英文原名:Introduction to Structural Dynamics and Aeroelasticity, Second Edition

Copyright © 2011 by Dewey H. Hodges, G. Alvin Pierce.

Translation Copyright © 2015 by Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press. All rights reserved.

本书中文简体字版由英国剑桥大学出版社授权北京航空航天大学出版社在中华人民共和国境内独家出版发行。版权所有。

北京市版权局著作权合同登记号图字:01-2013-8722

结构动力学与气动弹性力学导论(第2版)

Introduction to Structural Dynamics and Aeroelasticity, Second Edition

[美] 杜威 H·霍奇斯

[美] G 阿尔文·皮尔斯 著

戴玉婷 朱斯岩 译

杨超 陈桂彬 审校

责任编辑 宋淑娟

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路37号(邮编100191) <http://www.buaapress.com.cn>

发行部电话:(010)82317024 传真:(010)82328026

读者信箱:emsbook@buaacm.com.cn 邮购电话:(010)82316936

涿州市新华印刷有限公司印装 各地书店经销

*

开本:710×1 000 1/16 印张:14.25 字数:304千字

2015年9月第2版 2015年9月第1次印刷 印数:2 000册

ISBN 978-7-5124-1854-7 定价:45.00元

若本书有倒页、脱页、缺页等印装质量问题,请与本社发行部联系调换。联系电话:(010)82317024

译者序

气动弹性力学是一门研究弹性物体在气流中,由弹性变形与所受到的空气动力之间相互作用的学科。其中,结构动力学是构成研讨气动弹性力学的基础学科,二者在学科上是不可分割的,但又各自有其独立的体系。

很多年以来,佐治亚理工一直为本科三年级学生开设“振动与颤振”课程。由于教学工作的需要以及多年来教学经验的积累,形成了更加丰富的教学内容,由此该课程更名为“结构动力学与气动弹性力学导论”,并出版了《结构动力学与气动弹性力学导论》全新教材。目前出版的是该书的第2版,更加丰富了第1版教材的内容。在结构动力学方面,强调振动、模态表示和动响应。在气动弹性力学方面,注重对现象和原理的讨论,包括发散、副翼反效、气动载荷重新分布、气动弹性剪裁、非定常气动力理论和颤振。第2版增加了习题的数量及内容,以利于初学者学习;阐述了该学科领域对各种问题的处理方法。因此,本教材能够满足高年级本科生和航空工程专业研究生的需要。

本书的作者 Dewey H. Hodges 是佐治亚理工航空航天工程学院的教授,是美国多个学会的会士,担任过多个重要国际期刊的编委。Hodges 教授的主要研究方向包括:旋翼飞行器飞行动力学、结构动力学、气动弹性力学、结构力学及稳定性、计算力学及最优控制。2013 年获 AIAA Ashley 气动弹性奖。

引进本教材的目的,一方面,为该领域的教学及学术交流提供参考资料;另一方面,也为理工科大学生提供结构动力学与气动弹性力学领域的引导读物,它可以当做高年级本科生及刚入学的研究生的有益参考书。除此之外,正在工作的相关技术人员,如果对气动弹性学科感兴趣,这本教材将是一本极好的入门书。

本教材是北京航空航天大学航空科学与工程学院气动弹性研究室在与作者的学术交流中确定引进的,可作为相关专业的重要参考书。在引进的过程中,得到北京航空航天大学出版社的大力支持。本书分为两大部分,分别由戴玉婷译结构动力学部分,由朱斯岩译气动弹性力学部分。全书由杨超、陈桂彬审校。

译者

2014 年 8 月

第 2 版序言

本教材重点针对常规飞行器提供了结构动力学与气动弹性力学的导论。主要内容包结构动力学、静气动弹性力学和动气动弹性力学。结构动力学素材强调振动、模态表示和动响应。讨论的气动弹性现象包括发散、副翼反效、气动载荷重新分布、非定常气动力、颤振和气动弹性剪裁。超过 100 幅的图、表有助于理解这本教材,超过 50 个例题便于学生学习。

本教材涵盖了截至目前的结构动力学和气动弹性力学的处理方法,能够满足高年级本科生或航空工程专业初级研究生的需求。

第 1 版的赞语

“这本教材由两位该领域无与伦比的专家撰写,写作精彩,包含大量重要的信息,涵盖了截至目前的结构动力学和气动弹性力学的处理方法,能够满足高年级本科生或航空工程专业初级研究生的需求。”

——*Current Engineering Practice*

“Hodges 和 Pierce 撰写的这本重要的著作填补了航空工程教育的重要空白。高度推荐。”

——*Choice*

“……对于对气动弹性感兴趣的人来说,这本教材是一个很受欢迎的补充……作为一本教材,它可以当做高年级本科生和刚入学的研究生气动弹性课程的优秀资源……更进一步,正在工作的对气动弹性背景感兴趣的工程师,会发现这本教材是一本友好的入门书。”

——*AIAA Bulletin*

Dewey H. Hodges 是佐治亚理工航空航天工程学院的教授,他撰写了超过 170 篇期刊论文和三本书:《非线性复合梁理论》(2006 年),《结构稳定性基础》(2005 年,与 G. J. Simitses 合著),《结构动力学与气动弹性力学导论》(第 1 版)(2002 年,与 G. Alvin Pierce 合著)。他的研究领域包括气动弹性、动力学、计算结构力学与结构动力学、摄动方法、计算最优控制和数值分析。

后一位作者 G. Alvin Pierce 是佐治亚理工航空航天工程学院的名誉退休教授。他是《结构动力学与气动弹性力学导论》(第 1 版)(2002 年)中与 Dewey H. Hodges 合作的著书者。

第 2 版补充说明

第 2 版的计划始于 2007 年,那时 Pierce 教授依然健在。2008 年 11 月,当听到他逝世的消息时,他的佐治亚理工和技术界的同事都很悲伤。然后,第 2 版的计划由于各种原因进展缓慢。

第 2 版所做的改动包括:补充了一些素材以及做了大量的重新编排。在不打断整体授课连续性的情况下,教师可以选择忽略部分章节。扩充了一些力学与结构的基础素材,使之能够自我包含并且成为单独一章。希望这个新的组织形式能够帮助那些不需要这些知识回顾的学生轻松略过;把这些知识统一到相对短小的一章,可以帮助那些需要这部分知识的学生学起来更方便。在讨论稳定性的时候,回顾了当关键参数变化时单自由度系统如何运动的知识。为了得到结构动力学特征方程的数值解,补充了更多的细节。向学生介绍了有限元的结构模型,使得素材更加结合工程实际。补充了静气动弹性里的操纵反效。用 Mathematica 求解颤振特征值的数值解的讨论代替了第 1 版里通过一些代表减缩频率插值的方法。这种基于复数特征值的颤振分析方法扩展为包含状态变量的非定常气动力模型。最后,对飞行试验和适航的角色予以讨论。希望第 2 版不仅保留了这本教材作为本科生学习这门学科的唯一性,而且将证明它对一年级研究生课程的学习更有用。

Dewdy H. Hodges

亚特兰大,佐治亚州

第 1 版序言

在学季制下,佐治亚理工的三年级本科生课程“振动与颤振”已经讲授很多年了。这门课涉及结构单元的静/动力学特性的基本主题,既有包含流场的影响,也有不包含流场的影响。这门课不讨论没有流体流过的结构的静力学行为,因为这一般会在“结构力学”课程里考虑。因此,这门课主要涉及结构动力学领域(不考虑流体流过的情形)和气动弹性力学领域(考虑流体流过的情形)。

顾名思义,结构动力学关心结构部分的振动与动响应。气动弹性力学是一门研究弹性物体在气流中弹性变形与所受到的空气动力之间相互作用的学科。结构动力学是它的子集合。气动弹性现象在日常自然中均可观察到(如树在风中摇摆,威尼斯百叶窗在风中发出的嗡嗡声),最常见的气动弹性现象包含动力学,但是静气动弹性现象也很重要。这门课扩展为一个整学期,并且课程名称相应地改为“结构动力学与气动弹性力学导论”。

气动弹性与结构动力学的现象会导致危险的静态与动态变形以及失稳。因此它在许多技术领域具有重要的实际作用。特别的,现代飞机与航天器都要求非常轻质的结构,当考虑这些飞行器的设计时,结构动力学与气动弹性力学问题的解是获得工作可靠且结构最优的系统的基本要求。气动弹性现象在叶轮机械、民用工程结构、风能转换器,甚至在乐器演奏时声音产生的过程中都扮演着重要的角色。

气动弹性问题可粗略地分为响应与稳定性两个范畴。稳定性问题在这本教材里最受关注,并不是因为响应问题要次要些,而是因为变形幅值在线性稳定性问题里是不确定的,大家可能专门考虑了线性处理方法,并试图去求解许多实际问题。然而,因为幅值在响应问题里很重要,所以在试图求解它们的时候,大家需要更多地考虑非线性行为。尽管非线性方程已经很接近地代表实际问题了,但是非线性方程的解析求解仍有问题,特别是在本科生学习的背景下。

这本教材的目的是提供结构动力学与气动弹性力学领域的导论。它的课时和范围适合一个学期,可供本科三年级课程或研究生一年级课程使用,重点是针对常规飞机。对于那些单独提供了结构动力学的课程,气动弹性力学章节补充了丰富的素材,这样从这本教材出发,可以发展为单独讲授全部“气动弹性力学”课程。

这本教材建立在 Pierce 教授提供的课程讲稿的基础上。他的笔记自 1970 年起就用于“振动与颤振”课程。自从 1995 年 Pierce 教授退休,这门课程转由 Hodges 教授负责讲授以后,他产生了这样一个想法:将讲稿变为更实际的教材。1997 年秋季,这个过程从将 Pierce 教授的原始课程笔记艰难地转换为 LaTeX 格式开始。作者非

常感谢 Margaret Ojala, 那段时间, 他是 Hodges 教授的行政助手, 他帮助完成了这个格式转换的过程。然后, Hodges 教授开始扩充材料, 并在每章中补充例题。一些最可观的补充是在气动弹性力学章节里, 主要受佐治亚理工转变为学期制的启发。Mayuresh J. Patil^① 博士当时是航空航天工程学院的博士后, 他和 Hodges 教授一起工作, 主要在 1999—2000 学年补充了气动弹性剪裁和非定常气动力的材料。作者感谢华盛顿大学 David A. Peters 教授关于非定常气动力部分处理的评论。最后, 在 2001 年初夏, Pierce 教授在享受他的退休时光、建造一座新房子, 在缺少计算机硬件的条件下, 在被孙子看望的同时, 仍然尽力增加了气动弹性力学的历史、 k 法和 $p-k$ 法的素材。

Dewdy H. Hodges 和 G. Alvin Pierce

亚特兰大, 佐治亚州

2002 年 6 月

^① 现在, Patil 博士是弗吉尼亚理工州立大学航空航天航海工程系副教授。

图形清单

- 图 1.1 气动弹性研究领域示意图
- 图 2.1 弦振动示意图
- 图 2.2 显示位移分量和拉力的弦微元
- 图 2.3 承受扭转变形的梁
- 图 2.4 承受扭转变形的梁的横截面微段
- 图 2.5 梁的弯曲动力学示意图
- 图 2.6 梁微段示意图
- 图 2.7 弯曲和扭转耦合的梁的横截面
- 图 2.8 静平衡位置的特性
- 图 2.9 有限扰动下的静平衡位置特性
- 图 2.10 单自由度系统
- 图 2.11 k 为正数时的系统响应($x(0)=x'(0)=0.5, \zeta=0.04$)
- 图 2.12 k 为正数时的系统响应($x(0)=x'(0)=0.5, \zeta=-0.04$)
- 图 2.13 k 为负数时的系统响应($x(0)=1, x'(0)=0, \zeta=-0.05, 0, 0.05$)
- 图 2.14 ζ 取不同值时简谐激励系统的放大系数 $|G(i\Omega)|$ 随 Ω/ω 变化的关系
- 图 2.15 $\zeta=0.1, \Omega/\omega=0.9$ 时简谐激励系统的激励 $f(t)$ (实线) 和响应 $x(t)$ (虚线) 随 Ωt 变化的关系
- 图 3.1 振动弦的前三阶模态振型
- 图 3.2 拨动弦的初始形状
- 图 3.3 移动坐标系 x_L 和 x_R 示意图
- 图 3.4 初始波形实例
- 图 3.5 不同时刻的行波形状
- 图 3.6 作用于弦上的集中力
- 图 3.7 狄拉克函数 δ 的逼近
- 图 3.8 作用于弦上的分布力 $f(x, t)$
- 图 3.9 集中力在半展长处的弦
- 图 3.10 梁的固支端
- 图 3.11 梁的自由端
- 图 3.12 梁 $x=l$ 端的示意图, 显示了扭转力矩 T 和作用于刚体上的大小相等、方向相反的扭矩

- 图 3.13 梁 $x=0$ 端的示意图,显示了扭转力矩 T 和作用于刚体上的大小相等、方向相反的扭矩
- 图 3.14 具有刚体和弹簧的例子
- 图 3.15 一端受弹性约束的梁
- 图 3.16 一端受惯性约束的梁
- 图 3.17 固支-自由梁扭转示意图
- 图 3.18 固支-自由梁扭转振动的前三阶模态
- 图 3.19 自由-自由梁扭转示意图
- 图 3.20 自由-自由梁扭转振动的前三阶弹性模态
- 图 3.21 具有弹簧约束的扭转问题示意图
- 图 3.22 对于 $\zeta=5$, $\tan(\alpha l)$ 与 $-\alpha l/\zeta$ 随 αl 的变化曲线
- 图 3.23 对固支-弹簧约束的扭转梁的 α_i 最小值随 ζ 的变化曲线
- 图 3.24 $\zeta=1$ 时固支-弹簧约束扭转梁的前三阶模态振型
- 图 3.25 铰接端状态示意图
- 图 3.26 滑动端状态示意图
- 图 3.27 在 $x=0$ 端具有弹簧的承受弯曲的梁的实例
- 图 3.28 两端均具有平动弹簧的梁的示意图
- 图 3.29 右端具有扭转弹簧的承受弯曲的梁的实例
- 图 3.30 两端都具有扭转弹簧的梁的示意图
- 图 3.31 刚体示意图
- 图 3.32 刚体连接在承受弯曲梁右端的实例
- 图 3.33 机构连接在承受弯曲梁左端的实例
- 图 3.34 对于左端连接机构的承受弯曲梁实例的自由体示意图
- 图 3.35 简支-简支梁示意图
- 图 3.36 固支-自由梁示意图
- 图 3.37 固支-自由梁弯曲的前三阶模态振型
- 图 3.38 弹簧约束、铰接-自由梁的示意图
- 图 3.39 弹簧约束、铰接-自由梁弯曲运动时前三阶模态振型
 $(\kappa=1, \omega_1=1.247\ 92^2\sqrt{EI/(ml^4)}, \omega_2=4.031\ 14^2\sqrt{EI/(ml^4)},$
 $\omega_3=7.134\ 13^2\sqrt{EI/(ml^4)})$
- 图 3.40 最小特征值 $\alpha_i l$ 随无量纲刚度参数 κ 的变化
- 图 3.41 弹簧约束、铰接-自由梁弯曲的基准模态的模式振型
 $(\kappa=50, \omega_1=1.839\ 29^2\sqrt{EI/(ml^4)})$
- 图 3.42 自由-自由梁示意图
- 图 3.43 自由-自由梁弯曲的前三阶自由振动的弹性模态振型

- 图 3.44 受单位长度分布扭矩的非均匀梁示意图
- 图 3.45 非均匀梁受离散的内部扭矩示意图
- 图 3.46 假设除了 θ_i 外所有节点的扭矩值都为 0 时的扭矩分布
- 图 3.47 受单位长度分布力和弯矩的非均匀梁示意图
- 图 3.48 滑动-自由梁的第一阶弹性模态振型(注意到“第零阶”模态是刚体平移模态)
- 图 3.49 当 $i=1,2,3$ 时, $(\alpha_i l)^2$ 对 κ 的变化(梁的右端自由、左端具有平移弹簧约束的滑移条件)
- 图 3.50 当 $\kappa=1$ 时的第一阶模态振型(梁的右端自由、左端具有平移弹簧约束的滑移条件)
- 图 3.51 当 $\mu=1$ 时梁的第一阶模态振型(梁的左端固定、右端连接刚体)
- 图 3.52 在 $x=lr$ 处连接质点 ml 的固支-自由梁的基准固有频率的近似值
- 图 4.1 扭转弹性支撑的风洞模型平面图
- 图 4.2 风洞模型翼型图
- 图 4.3 由气动弹性效应引起的升力的相对变化
- 图 4.4 $1/\theta$ 对 $1/q$ 的曲线图
- 图 4.5 悬臂支杆式风洞模型示意图
- 图 4.6 悬臂梁详细视图
- 图 4.7 悬臂支杆式机翼详细视图
- 图 4.8 支柱支撑风洞模型示意图
- 图 4.9 支柱支撑风洞模型横截面图
- 图 4.10 带有副翼的二元机翼截面风洞模型示意图
- 图 4.11 均匀、平直的固支-自由升力面
- 图 4.12 展向均匀升力面横截面图
- 图 4.13 对于 $\alpha_r + \bar{\alpha}_r = 1^\circ$ 的翼尖扭角与 $\bar{q}$ 的关系曲线
- 图 4.14 保持 α_r 为常数时刚性/弹性机翼升力分布
- 图 4.15 保持总升力为常数时刚性/弹性机翼升力分布
- 图 4.16 飞机滚转示意图
- 图 4.17 具有正向副翼偏转的右翼剖面
- 图 4.18 当 $e=0.25c$, $c_{l_\beta}=0.8$, $c_{m_\beta}=-0.5$ 时滚转速度敏感度关于 λl 的曲线(等效点为 $\lambda l=0.984\ 774$)
- 图 4.19 式(4.86)中三项对滚转力矩 R (无量纲化)的作用
- 图 4.20 后掠翼示意图(Λ 为正)
- 图 4.21 发散动压随 Λ 的变化曲线
- 图 4.22 Λ 为正值、零、负值时的升力分布
- 图 4.23 弯曲-扭转耦合发散的 τ_D 对于 β_D 的曲线

- 图 4.24 弯扭耦合发散的 τ_D 对于 r 的曲线
- 图 4.25 耦合的弯曲-扭转发散的 τ_D 对于 r 的曲线
- 图 4.26 弹性非耦合后掠翼的无量纲化发散动压($\overline{GJ}/\overline{EI}=1.0, e/l=0.02$)
- 图 4.27 弹性非耦合后掠翼的无量纲化发散动压($\overline{GJ}/\overline{EI}=0.2, e/l=0.02$)
- 图 4.28 对于一个具有 $\overline{GJ}/\overline{EI}=0.2$ 和 $e/l=0.02$ 的弹性耦合的掠角机翼的无量纲化发散动压
- 图 4.29 发散动压无穷大时机翼($\overline{GJ}/\overline{EI}=0.5$)的掠角
- 图 4.30 发散动压无穷大时机翼($e/l=0.02$)的掠角
- 图 5.1 当 $\Omega_k \neq 0$ 时各典型模态幅值的状态
- 图 5.2 具有俯仰和沉浮弹簧约束的翼剖面几何形状说明示意图
- 图 5.3 当 $a=-1/5, e=-1/10, \mu=20, r^2=6/25, \sigma=2/5$ 时, 模态频率关于 V 的曲线(定常流理论)
- 图 5.4 当 $a=-1/5, e=-1/10, \mu=20, r^2=6/25, \sigma=2/5$ 时, 模态阻尼关于 V 的曲线(定常流理论)
- 图 5.5 弹簧约束下俯仰运动二维机翼的翼型示意图
- 图 5.6 p 法和 k 法关于双发喷气运输机颤振分析的比较(参考 Hassig(1971 年)的图 1, 经许可使用)
- 图 5.7 p 法和 $p-k$ 法关于双发喷气运输机颤振分析的比较(参考 Hassig(1971 年)的图 2, 经许可使用)
- 图 5.8 $p-k$ 法和 k 法关于水平尾翼的颤振分析的比较(参考 Hassig(1971 年)的图 3, 经许可使用)
- 图 5.9 k 从 0 变化到 1 时 $C(k)$ 的实部和虚部曲线, 其中 $C(k)=1$
- 图 5.10 $C(k)$ 的实部和虚部对于 $1/k$ 的曲线
- 图 5.11 零升力线、相对于气流的速度方向、升力方向几何示意图
- 图 5.12 模态频率随 $U/(b\omega_\theta)$ 的变化曲线($a=-1/5, e=-1/10, \mu=20, r^2=6/25, \sigma=2/5$)
- 图 5.13 模态阻尼随 $U/(b\omega_\theta)$ 的变化曲线($a=-1/5, e=-1/10, \mu=20, r^2=6/25, \sigma=2/5$)
- 图 5.14 减缩颤振速度随质量比 μ 的变化曲线($\sigma=1/\sqrt{10}, r=1/2, x_\theta=0, a=-3/10$)
- 图 5.15 无量纲颤振速度随频率比的变化曲线($\mu=3, r=1/2, a=-1/5$)
- 图 5.16 无量纲颤振速度随 e 的变化曲线($\mu=10, \sigma=1/\sqrt{2}, r=1/2$)
- 图 5.17 典型 2 倍声速战斗机的飞行包线
- 图 5.18 运用 k 法和 Theodorsen 气动力理论的 ω/ω_θ 随 $U/(b\omega_\theta)$ 的变化曲线($a=-1/5, e=-1/10, \mu=20, r^2=6/25, \sigma=2/5$)

- 图 5.19 运用 k 法和 Theodorsen 气动力理论的 g 随 $U/(b\omega_\theta)$ 的变化曲线
($a=-1/5, e=-1/10, \mu=20, r^2=6/25, \sigma=2/5$)
- 图 5.20 运用 $p-k$ 法和 Theodorsen 气动力理论(圆点线)、 p 法和 Peters 等人的气动力理论(实线)的 Ω/ω_θ 估算值随 $U/(b\omega_\theta)$ 的变化曲线
($a=-1/5, e=-1/10, \mu=20, r^2=6/25, \sigma=2/5$)
- 图 5.21 运用 $p-k$ 法和 Theodorsen 气动力理论(圆点线)、 p 法和 Peters 等人的气动力理论(实线)的 Γ/ω_θ 估算值随 $U/(b\omega_\theta)$ 的变化曲线
($a=-1/5, e=-1/10, \mu=20, r^2=6/25, \sigma=2/5$)
- 图 A.1 例 5 力学系统简图
- 图 A.2 例 6 力学系统简图

列表清单

表 3.1 固支-自由梁在 $i=1, \dots, 5$ 时对应的 $\alpha_i l, (2i-1)\pi/2$ 和 β_i 值

表 3.2 自由-自由梁在 $i=1, \dots, 5$ 时对应的 $\alpha_i l, (2i+1)\pi/2$ 和 β_i 值

表 3.3 对带有梢部质量 μml 的固支-自由梁应用 3.3.4 小节方程(3.258)的
 n 阶固支-自由模态得到的 $\omega_1 \sqrt{\frac{ml^4}{EI}}$ 的近似值

表 3.4 对带有梢部质量 μml 的固支-自由梁应用 3.3.4 小节方程(3.258)的
 n 阶固支-自由模态得到的 $\omega_2 \sqrt{\frac{ml^4}{EI}}$ 的近似值

表 3.5 对带有梢部质量 μml 的固支-自由梁应用 n 项多项式函数解得
 $\omega_1 \sqrt{\frac{ml^4}{EI}}$ 的近似值

表 3.6 对带有梢部质量 μml 的固支-自由梁应用 n 项多项式函数解得
 $\omega_2 \sqrt{\frac{ml^4}{EI}}$ 的近似值

表 3.7 对固支-自由梁问题,应用 n 项多项式函数在 $i=1, 2, 3$ 时 $\omega_i \sqrt{\frac{ml^4}{EI}}$ 的
 近似值

表 3.8 对固支-自由梁问题,应用 n 阶幂级数的降阶运动方程在 $i=1, 2, 3$ 时
 $\omega_i \sqrt{\frac{ml^4}{EI}}$ 的近似值

表 3.9 应用有限元法得到的由梁的扭转导致的梢部扭转结果

表 3.10 根部连接弹性常数为 $\kappa \overline{EI}/l$ 的扭转弹簧的铰支-自由梁。利用一个刚
 体模态 x 和 $n-1$ 个 3.3.4 小节中方程(3.258)给出的固支-自由模态
 得到的 $\omega_1 \sqrt{\frac{ml^4}{EI}}$ 的近似值

表 3.11 根部连接弹性常数为 $\kappa \overline{EI}/l$ 的扭转弹簧的铰支-自由梁。利用一个刚
 体模态 x 和 $n-1$ 个 3.3.4 小节中方程(3.258)给出的固支-自由模态
 得到的 $\omega_2 \sqrt{\frac{ml^4}{EI}}$ 的近似值

表 3.12 根部连接弹性常数为 $\kappa \overline{EI}/l$ 的扭转弹簧的铰支-自由梁。利用一个刚

体模态 x 和 $n-1$ 个满足固支-自由梁所有边界条件的多项式得到的

$$\omega_1 \sqrt{\frac{ml^4}{EI}} \text{ 的近似值}$$

表 3.13 根部连接弹性常数为 $\kappa \overline{EI}/l$ 的扭转弹簧的铰支-自由梁。利用一个刚体模态 x 和 $n-1$ 个满足固支-自由梁所有边界条件的多项式得到的

$$\omega_2 \sqrt{\frac{ml^4}{EI}} \text{ 的近似值}$$

表 3.14 固支-自由锥形梁。基于里兹法, 利用 n 个满足固支-自由梁所有边界

$$\text{条件的多项式得到的 } \omega_i \sqrt{\frac{m_0 l^4}{EI_0}} \text{ 的近似值}$$

表 3.15 固支-自由锥形梁。基于里兹法, 利用 n 项多项式 $(x/l)^{i+1}$ ($i=1,$

$$2, \dots, n) \text{ 得到的 } \omega_i \sqrt{\frac{m_0 l^4}{EI_0}} \text{ 的近似值}$$

表 3.16 固支-自由锥形梁。基于伽辽金法的方程(3.329), 利用 n 项多项式

$$(x/l)^{i+1} (i=1, 2, \dots, n) \text{ 得到的 } \omega_i \sqrt{\frac{m_0 l^4}{EI_0}} \text{ 的近似值}$$

表 3.17 有限元法得到的弯曲梁的固有频率结果, 其中, 梁的刚度 $\overline{EI}$ 线性变化, $\overline{EI}(0) = \overline{EI}_0 = 2 \overline{EI}(l)$, 且每个单元的刚度 $\overline{EI}$ 线性变化

表 5.1 Γ_k 与 Ω_k 不同组合对应的运动类型和稳定性特性

表 5.2 典型飞行器的不同质量比

目 录

第 1 章 绪 论	1
第 2 章 力学基础	5
2.1 质点和刚体	5
2.1.1 牛顿定律	6
2.1.2 欧拉定律和刚体	6
2.1.3 动 能	7
2.1.4 功	7
2.1.5 拉格朗日方程	7
2.2 弦的动力学建模	8
2.2.1 运动方程	8
2.2.2 应变能	11
2.2.3 动 能	12
2.2.4 外加分布力的虚功	12
2.3 基本梁理论	12
2.3.1 扭 转	13
2.3.2 弯 曲	14
2.4 复合梁	17
2.4.1 弯曲和扭转耦合的本构定律和应变能	17
2.4.2 弯曲和扭转耦合的惯性力和动能	17
2.4.3 弯曲和扭转耦合的运动方程	18
2.5 稳定性概念	19
2.6 单自由度系统	20
2.6.1 非受迫运动	20
2.6.2 简谐受迫运动	22
2.7 小 结	24
习 题	24
第 3 章 结构动力学	25
3.1 均匀弦动力学	25
3.1.1 驻波(模态)求解	26
3.1.2 模态振型正交性	29