



国际制造业先进技术译丛

旋转机械 诊断技术

Fundamentals of Rotating Machinery Diagnostics

(美) Donald E. Bently 著
Charles T. Hatch

姚红良 译

沈阳创思佳业科技有限公司 组织翻译



国际制造业先进技术译丛

旋转机械诊断技术

(美) Donald E. Bently 著
Charles T. Hatch
姚红良 译

沈阳创思佳业科技有限公司 组织翻译



机械工业出版社

本书有助于深刻理解机器常见运行的基本原理,其中包括电力工业中的大型蒸汽和燃气轮机发电机组、石化工业中的蒸汽和燃气轮机驱动的压缩机、电动机驱动的通风机、冷却塔风机、鼓风机和大小不同的泵。

本书第一部分(1~3章)介绍了振动、相位和振动矢量的基本概念;第二部分(4~9章)讨论了许多不同种类的数据图(可以由机器数据生成)及如何构建和解释这些数据图;第三部分(10~16章)研究了转子动态行为,即从第10章开始,介绍了基本转子动力模型的演变过程,动力学刚度在第11章转子行为的内容中讨论,这部分其他章节(12~16章)的内容包括振动模态、刚度呈各向异性的转子系统的行为、应用根轨迹法进行转子稳定性分析及扭转和轴向振动;第四部分(17~22章)介绍了最常见的转子系统故障和用于检测的信号特性;第五部分(23~29章)给出了许多案例。本书的9个附录是一些常用的数据资料的汇总。

本书可供机械设备管理、维修人员,设备诊断技术及研发人员,以及相关专业院校师生参考。

Copyright © 2002 by Bently Pressurized Bearing Co.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means whatsoever without written permission from the publisher.

Chinese Simplified-language edition published by China Machine Press.

本书中文版由机械工业出版社独家出版发行。未经机械工业出版社的书面许可,不得以任何方式复印本书的任何部分。

北京市版权局著作权合同登记 图字:01-2012-3765号。

图书在版编目(CIP)数据

旋转机械诊断技术/(美)本特利(Bently, D. E.),哈奇(Hatch, C. T.)著,姚红良译.—北京:机械工业出版社,2014.3

(国际制造业先进技术译丛)

ISBN 978-7-111-45475-5

I. ①旋… II. ①本… ②哈… ③姚… III. ①旋转机构-故障诊断
IV. ①TH210.6

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第010946号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:沈红 责任编辑:沈红 王彦青

版式设计:霍永明 责任校对:丁丽丽

封面设计:路恩中 责任印制:李洋

北京振兴源印务有限公司印刷

2014年5月第1版第1次印刷

184mm×260mm·27.5印张·663千字

0001-3000册

标准书号:ISBN 978-7-111-45475-5

定价:98.00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

策划编辑电话:(010) 88379778

销售一部:(010) 68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010) 88379649

机工官网:<http://www.cmpbook.com>

读者购书热线:(010) 88379203

机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

封面防伪标均为盗版

译者序

旋转机械在能源、动力、化工等行业广泛应用，目前正在向大型化、高速化方向发展。与此同时，与旋转机械相关的研究也发展很快，每年有大量的转子动力学和故障诊断方面的文章出现。相比之下，关于旋转机械方面的专著比较少，尤其是适合于工厂操作者和旋转机械研究刚起步人员使用的基础性著作更少。

因此，译者精心选择唐·本特利先生的著作进行翻译。唐·本特利先生在旋转机械诊断领域是赫赫有名的，同时他还是本特利内华达公司的创始人，在旋转机械故障诊断方面有数十年的实践经验。

本书全面介绍了旋转机械故障诊断的基础知识，以及不同诊断方法在典型故障中的应用，还包含很多在生产中遇到的实例及解决办法，供读者参考。本书还结合了著名转子动力学专家 Agnes Muszynska 博士多年的研究成果，因此在学术上也有很大的参考价值。

本书最大的特点是对于理论讲述深入浅出，因此非常适合工厂人员和初学者学习，这也是译者选择该著作的原因。

本书由沈阳创思佳业科技有限公司组织翻译，沈阳创思佳业科技有限公司的相关人员共同完成了本书的录入、校对等工作。本书的出版是集体智慧的结晶。

译者的研究生赵倩、许琦、杨浩杰、孙聪、姚卓晨、孙云、付小静等也参与了部分核对工作，在此对他们的辛勤工作表示感谢！

同时，感谢国家重点基础研究发展计划（973 计划）2011CB706504、2012CB026006 和中央高校基本科研业务费 N120403007 的资助。

译者在翻译过程中难免存在疏漏与错误之处，恳请读者批评指正。

译者：姚红良

前 言

对旋转机械的振动分析，需要使用对于许多机械工程师而言仍然相当陌生的原理。在其他领域，人们对这些原理可能知之甚少，但这些原理对于高速、高功率机器的设计、运行和诊断却至关重要。在过去的 100 年，转子动力学描述中的错误概念、错误陈述和其他错误使问题更加复杂。

在当今对轴动力学进行详细研究的时代，飞速发展的技术没有以直接、突出的方式正确传达给一线工程师和工程专业的学生。当然，目前大多数工程师没有足够的时间来领悟所有出版物。其中，最强大的新理念之一就是动力学刚度。

我们测量的振动是一个比率，即动力与机器动力学刚度的比率。本书介绍了如何使用动力学刚度来理解和识别故障行为；本书也是描述转子动力学基本原理和机器行为方式的专门教材；本书还纠正了困扰该学科的错误概念，并为理解旋转机械动力学开辟了新的领域和道路。

例如：在现有文献中，交叉刚度项 K_{xy} 和 K_{yx} 被视为独立的变量，将这些项称为正交项，且它们的关系十分简单。“交叉刚度”实际上是切向刚度项（正交项），其作用方向与位移方向垂直。我们在基本转子动力学参数中定义了切向刚度项 $D\lambda\Omega$ ，以便在诊断机器操作时提供更有用的信息。

探讨新领域总是一种奇妙的冒险，并且永远不会一帆风顺。探讨旋转机械的基本性质时，我经常遇到意料之外的绝境、困难和其他障碍。解决问题之后，蓦然回首，会感觉这些困难趣味横生。

跨入新领域后，如果旧传统存在错误，或者大致正确但有些许误解，则有时必须摒弃这些旧传统。因此，前进的巨大阻力来自于对理论持有错误观点的人们。

自旋转机械发明后，对更高功率输出的追求推动着机器的速度不断提高。随着一阶平衡共振“障碍”被打破（1895 年由德·拉法尔使用蒸汽涡轮机实现），证明了旋转机械能够在一阶平衡共振点之上运行。然而，对于使用液体润滑轴颈轴承的机器，这种新功能带来一个新的问题：流体诱发的失稳。在过去几年，研究人员已开发出许多不同方法来确定和理解影响转子稳定性的重要参数，并因此提高了机器的可靠性。

可靠性经常被认为与长时间无故障使用寿命同义，而改善可靠性意味着延长无故障使用寿命，但这些定义不能被人接受。当机器或零件的运行和动作可以预测时，它们才变得可靠。预测这些动作的精确度才是衡量可靠性的真正标准。由此可见，通过尽可能多地了解设备运行的相关知识，并使用这些知识尽可能多地减少或消除不可预测的项目，就可以最大限度地改善可靠性。应该精确地预测可用来进行分析的准确、有意义的的数据。如果拥有可正确预测机器运行的必要数据，那么自然能够改善设计、延长零件使用寿命，甚至可能降低其成本，并提高其安全性。

有意义的信息是关键。在确保可通过机器专家不断增长知识，将良好数据变为有意义的信息方面，本书迈出了一大步。本书是通往未来之桥的坚实基础。

目前,机械诊断技术日新月异,新发展也总是引领着机器前进的步伐。本特利内华达公司正在开发的外部受压轴承是一种非常有发展前景的新技术。此轴承是一种外部受压(静压)的流体膜轴承,能够在被动模式、半主动模式或全主动模式下运行。在被动模式下,该轴承以固定的设计压力运行,也就是以固定的设计弹簧刚度和阻尼运行;在半主动模式下,操作人员可以在机器运行时调整外部供给压力来更改刚度和阻尼的值;在主动模式下,该轴承能够使刚度和阻尼产生全自动的瞬时变化,从而实时控制转子位置。

2001年6月,在德国慕尼黑的国际燃气轮机展览中,我们通过增加轴承压力,演示了对油膜涡动的抑制。2001年8月,我们演示了对油膜振荡的抑制,这是关于处于旋转机械跨距中央的副轴承的首次演示。

虽然我们对油膜涡动和油膜振荡的抑制研发成功,但并未解决所有失稳问题,只是实现了对数十年来向旋转技术研发人员提出各种挑战的两个重大问题的控制。这项新技术有望改变机器动态响应的方式,并改变我们解释和应用机器数据的方式。

例如:人们通常认为,平衡共振发生在固定的运行速度下,即此时运行速度与固定转子系统的固有频率一致。使用半主动或全主动轴承时,固有频率和平衡共振速度在机器操作人员的控制下都成为变量。通过在半主动模式下改变轴承的弹簧刚度,可将平衡共振点快速移动到另一个速度处,操作人员或机器控制系统可在开机或关机期间,使机器快速通过共振点。这种行为将极大地改变甚至消除极坐标图或伯德图中常见的平衡共振特征。

平衡共振速度的变化也会影响平衡。共振点的主动偏移会使极坐标图看起来有所不同,从而改变我们识别重点的方式。如果将某个共振点移动到不同的速度处,则重点/高点关系可能发生变化。例如,两者中原来高于共振点的一方现在可能低于共振点,反之亦然。原为异相的响应现在则可能为同相。影响矢量可能取决于轴承设置,而重复性将需要类似的轴承设置。

轴承刚度的变化也会改变转子振型。通过较高的轴承刚度可将低轴承刚度相关的模态(例如刚体模态)修改为弯曲模态。此振型变化会改变与不平衡分布的匹配度,从而导致平衡状态发生变化。现有的不平衡分布与新振型的匹配度可能更高也可能更低,并且可能需要以特定的轴承设置,专门对转子进行平衡。

某些故障将表现为系统固有频率下的自激振动。由于平衡共振中存在新的可变性质,此固有频率将存在于频带中某处,具体取决于轴承设置的范围及其对转子模态刚度的影响。在某些情况下,轴承允许操作人员将固有频率点移动到不会发生故障振动的位置。诊断专家需要了解可变参数轴承的运行将如何影响其对数据的解释,以及如何使用这种轴承来抑制不必要的振动。

新技术将带来重大的新机遇和严峻的新挑战。无论出现何种新发展,本书介绍的转子动力学的基本原理都将保持不变。拥有扎实基础知识的机械诊断专家能够应用本书介绍的基本原理来解决机器问题。

引 言

为什么要读本书？如果负责维护或操作工业旋转机械，一定会懂得一台关键机器的灾难性失效，无论大小，都会造成严重的伤亡，导致整台机器受损，延长工厂的停产时间，并危害企业的公共安全。为此，不能等机器发生了故障才解决问题，机器管理人员必须采取前瞻性态度来应对问题。本书将介绍检测机器问题所需的知识，以免这些问题引发设备效率降低、意外关机、损坏或严重的生产损失，进而蒙受经济损失。

本书介绍了机械常见行为的基本原理，包括电力工业中的大型蒸汽和燃气轮机发电机组、石化工业中的蒸汽和燃气轮机驱动的压缩机、电动机驱动的通风机、冷却塔风机、鼓风机和大小不同的泵。

本书还针对机械诊断进行了翔实的讨论，因为当利用振动、位置和过程数据来确定引发机械故障的根本原因时，所运用的知识和技术的主体就是机械诊断。在诊断过程中，一个假设成立与否，必须要有数据的支持（或根据数据作出否定），并且还要通过检查或校正来进行验证，在这种意义上，机械诊断是一门科学。从某种意义上说，机械诊断也是一门艺术，通常需要从一系列纷繁复杂的数据中找出一个富有意义的形式来表现。无论看做科学还是艺术，机械诊断首先要求：诊断者必须充分理解基本的转子动态行为和各种故障的信号特性。

本书所阐述的基本知识主要来源于直观的实践经验，而不是理论上的主观臆断。本书为从事旋转机械操作、维护、管理或故障诊断的读者撰写。对于为旋转机械应用编写技术标准或设计传感器、检测系统及软件包的人员，本书还为他们提供信息资源。本书还是机械设计师的宝贵资源，若要设计出经久耐用的好机器，则必须了解并应用书中的基本原理。

本书涵盖了本特利内华达（Bently Nevada）公司这些年来开设的诊断课程的许多材料。长期以来，这些都是世人所公认的最好课程，但由于自身的特点，这些课程都有一定的局限性。本书极大地扩展了所涉及内容的深度，并且增加了参考资料。

本书第一部分（1~3章）介绍了振动、相位和振动矢量的基本概念。相位是很难理解的，因此，人们在处理机器数据时经常忽略相位的内容。由于相位提供的时序信息是一个强有力的工具，所以忽略掉相位将是十分遗憾的。没有相位，诊断将变得困难得多，而且也无法进行高效的平衡，希望第2章的讨论有助于理解这个论题。在振动分析中，“矢量”数据是一个重要的工具。振动矢量实际上是复数，可以简化与振幅和相位相关的计算，了解其含义和用法对于机械诊断者来说极其重要。第3章详细讨论了振动矢量，读者应彻底掌握本章内容。纵览本书，含有振幅和相位的振动矢量以黑斜体表示，而仅含有振幅的标量则以斜体表示。数据的表现方式必须有意义，而且为了便于交流，数据必须符合人们普遍接受的标准。

本书第二部分（4~9章）讨论了许多不同种类的数据图（可以由机器数据生成）及如何构建和解释这些数据图：时基图和轨迹图，平均轴心线图，极坐标图、伯德图和 APHT 图，频谱图，趋势图及 XY 图。每一章均包含大量实际机器数据的例子。

本书第三部分(10~16章)研究了转子动态行为:从第10章开始,介绍了基本转子动力模型的演变过程。模型的引入为我们带来了一种强大的新工具,即动力学刚度,将在第11章转子行为的内容中讨论。这部分其他章节论述的内容包括振动模态、刚度呈各向异性的转子系统的行为、应用根轨迹法进行转子稳定性分析及扭转和轴向振动。这部分的结尾介绍了转子的平衡。

本书第四部分(17~22章)介绍了最常见的转子系统故障和用于检测的信号特性。这些故障包括不平衡、转子弯曲、径向载荷和不对中、摩擦和松动、流体诱发的失稳和轴裂纹。每一章还列出了具有相似特征的其他故障,并且就如何区分这些故障给出了指导。

本书第五部分(23~29章)给出了许多案例,这些案例说明了如何应用这些知识解决实际的机器问题。而且这些案例均配有数据加以说明,还讨论了解决问题的思路。在保护客户隐私的前提下,本书在说明事件和数据时,已尽可能提高准确度。于是我们虚构出某些情节,但是数据却都是真实的,问题也是真正出现过的,并且问题的解决方法也和书中说明的一致。

最后,针对想对某些论题做深入研究的读者,本书附录部分收录了其他技术信息,还收录了常用单位的转换表和机械诊断词汇表。

本书尽量减少数学上的内容,但还是不可避免地使用了一些。普通读者应该具备代数学和基本三角函数的知识;高程度读者应掌握微分方程,因为在第10章转子模型的演变过程和第14章的一些内容中用到了微分方程。对于那些不具备以上知识的读者,可以直接跳过这些复杂的计算,而且不会影响理解。本书阐述重要概念时,总是尽可能少地使用数学知识;但更重要的是,要很好地去理解这些基本原理,而不要死记硬背。

本书主要使用公制(SI)度量单位,随后在括号中加上美国的常用单位,至少这是本书的原意。本书使用的许多数据均使用美国常用的计量单位,与其试图将所有数据转化成公制,倒不如在数据图中采用采集数据时所使用的计量单位。于是,读者会发现本书很多地方用美国常用的计量单位来阐述,然后在其后加上公制单位。在此,为给读者带来的不便表示歉意,并希望读者能耐心读完本书。

在许多方面,本书只是做了抛砖引玉的介绍。正如本书题目所说,本书介绍了旋转机械诊断技术。旋转机械的世界是极其复杂的,并且转子动力学是出现较晚的科学,也正是因为如此,本书才能趣味横生,还没有一本書能够彻底地阐释清楚这一内容。我希望本书能够对这一学科的初学者有所帮助,并能给出一些新的观点,为有经验的专业人士提供一个有用的参考。

致 谢

大家都知道一本书的出版往往凝结了众多人的努力。早在15年前我就期盼本书的问世，是耐心、信念和支持铸就了本书。

本书在编写过程中得到很多人的帮助，他们有的提供给我资料，有的帮我审稿，在大家的帮助下本书的深度和广度都有很大的提高，也使本书更加简明易懂。

第10章介绍的转子动力学模型的数学内容有很多是由阿格尼斯·姆施柴纳斯科 (Agnes Muszynska) 定稿的。其中的部分数学内容是阿格尼斯本人的研究成果，而本书中其他的数学模型则是我们共同努力的结果。

公司内部的一些技术专家为本书提供了深度详尽的专业知识。比尔·劳斯 (Bill Laws) 在大型蒸汽涡轮机方面的独到见解完善了转子弯曲章的内容。在本书的整个编写过程中，我一直都把罗恩·波斯曼斯 (Ron Bosmans) 和理查德·托马斯 (Richard Thomas) 作为我的导师和领路人。由于旋转机械行为方面的某些内容十分费解，我们经常为此争论，这些争论既有趣又有益。他们还提供了很多微妙的技术细节，这些细节在本书中均有体现。

本书的每一章都由具有多年机械诊断经验的专家进行了细致的审阅。罗恩·波斯曼斯 (Ron Bosmans) 和理查德·托马斯 (Richard Thomas) 是主要的审稿人，他们阅读了每一章的内容。其他审稿人还有唐·索斯威克 (Don Southwick)、雷特·杰西 (Rett Jesse)、保罗·高曼 (Paul Goldman)、韦斯·富兰克 (Wes Franklin)、鲍勃·哈雅诗达 (Bob Hayashida)、约翰·温特唐 (John Winterton)、罗布·布卢姆奎斯特 (Rob Bloomquist)、克莱尔·福兰德 (Clair Forland)、戴夫·怀特菲尔德 (Dave Whitefield)、克雷格·塞弗 (Craig Sever)、麦克·昆兰 (Mike Quinlan) 和帕斯卡·斯蒂夫斯 (Pascal Steeves)。我们还得到了两位杰出工程师英格丽·福斯特 (Ingrid Foster) 和苏珊·麦克杜尔 (Susan McDole) 的帮助，他们对附录内容进行了细致的审阅。

本书的案例均来自于本特利内华达机械专家的实践中，编写完成后，又经过了他们的审核。在列举事件的过程中，我们阅读了他们的报告和文章，而且只要有可能，就与他们一起讨论其中的细节。佩顿·斯旺 (Peyton Swan) 为第25章中的压缩机问题提供了宝贵的信息，佩顿同时还是一个出色的作家，我们借用了他为《ORBIT》杂志撰写的文章中的素材，对此我们深表谢意。佩顿还与凯文·法雷尔 (Kevin Farrell) 一起研究了第27章中的发电机问题。我们还多次针对造成发电机异常行为的基础转子动力学机理展开了有趣的讨论。约翰·金汉姆 (John Kingham) 就他遇到的通风机问题提供了附加资料，这个问题在第26章有所描述。罗布·布卢姆奎斯特 (Rob Bloomquist) 提供了大量有关管道压缩机问题的详细资料，这个问题在第29章有所描述。

我们要感谢本书的编辑鲍勃·格瑞森 (Bob Grissom)。鲍勃曾多次讲解过本特利内华达的课程，他拥有渊博的专业知识。在编写和编辑过程中，鲍勃指出了很多技术细节上的问题，这充分说明了他的编辑工作认真细致。如果没有鲍勃的付出，这本书就不会这么完整。

对于沃尔特·埃文斯 (Walter Evans) 在根轨迹方面提供的帮助，我还欠他一个人情。

我与沃尔特曾一起在加州唐尼市的罗克达因 (Rocketdyne) 公司工作, 我还去听过加州大学洛杉矶分校的课程, 其中包括沃尔特讲授的根轨迹和其他控制理论的基本原理。在整个职业生涯中, 我广泛使用了根轨迹法, 尽管在过去许多年, 我曾一度认为根轨迹法已过时。我曾经在 5 年前访问过加州圣路易斯-奥比斯保的加州州立理工大学, 那里的一位教授给我看了该大学当时使用的教科书——绪方胜彦 (Katsuhiko Ogata) 编写的《现代控制工程》(第 3 版)。书中描述的理论有很大一部分是以沃尔特·埃文斯的根轨迹法为基础的。我希望今天的学生和我当初一样, 要认识到根轨迹在今后的工作中是很有用的。

查理·哈奇 (Charlie Hatch) 的名字和我的名字一起出现在本书的封面上, 这一点非常重要。当查理取得了第一个林学学位后, 他又就读于加利福尼亚大学伯克利分校, 取得了机械工程学士和硕士学位。毕业后, 他在本特利内华达公司工作, 担任过生产工程师; 后来调到研究工作实验室与阿格尼斯·姆施柴纳斯科 (Agnes Muszynska) 和我一起工作。他的第一个工作是构建变磁流轴承, 这是一种轴承内部具有独特磁悬浮颗粒的油轴承。这种方法证明不可行后, 查理随后参与写了一篇关于挠性转子系统阻尼行为的论文, 且这篇出色的论文在所有本特利内华达的研讨会上都被拿来讲授。我和查理从那之后便一直在一起工作, 记录一些研究成果和科研项目的详细资料。我为查理讲解了根轨迹法, 他随即成了这方面的专家。所以, 选择他帮助完成本书是再好不过的事。除了校对和编辑外, 查理还是一个带给人灵感的合作者和研究员, 对本书的很多理念都做出了贡献。

本特利 D E 于内华达州明登市

2002 年 3 月 11 日

目 录

译者序
前言
引言
致谢

第 1 章 振动	1
基本振动信号	1
频率	2
振幅	3
位移、速度和加速度	4
机器的振动	5
旋转和进动	6
自由振动	7
受迫振动	8
共振	9
自激振动	10
总结	11
第 2 章 相位	12
相位简介	12
相位的重要性	12
键相事件	13
相位测量	14
绝对相位	15
相对相位	16
差分相位	18
总结	18
第 3 章 振动矢量	19
未经滤波处理的振动	19
滤波和振动矢量	20
振动矢量的使用	21
慢滚动矢量	25
总结	26

第 4 章 时域图	27
时域图的结构	27
键相标记	28
时域图的补偿	28
时域图中包含的信息	30
总结	36
第 5 章 轴心轨迹	38
轴心轨迹的结构	38
键相标记	41
轴心轨迹的补偿	42
轴心轨迹中包含的信息	44
轴心轨迹/时域图	53
总结	54
第 6 章 平均轴心位置图	55
平均轴心位置图的结构	55
平均轴心位置图中包含的信息	57
完整图: 轴心轨迹与平均轴心位置	61
总结	62
第 7 章 极坐标图、伯德图和 APHT 图	63
极坐标图和伯德图的结构	63
慢滚动补偿	65
极坐标图和伯德图中包含的信息	66
APHT 图	73
可接受的区域图	74
总结	75
参考文献	75
第 8 章 半频谱图和全频谱图	76
半频谱图	77
技术问题	78
全频谱	80
频谱级联图	85
频谱瀑布图	88
总结	90

第 9 章 趋势图和 XY 图	91
趋势图	91
XY 图	93
总结	94
参考文献	94
第 10 章 转子系统模型	95
建模简介	96
假设	98
坐标系和位置矢量	98
流体循环的模型	101
油膜轴承的力和刚度	102
弹簧刚度的其他来源	104
阻尼力	104
扰动力	105
自由体图	106
运动方程	106
运动方程的解	107
异步动力学刚度	108
方位角：对静态径向载荷的转子响应	109
同步转子响应	109
同步动力学刚度	110
预测转子振动	110
非线性	113
简单模型的优点和局限	113
扩展的简单模型	114
总结	117
参考文献	118
第 11 章 动力学刚度和转子行为	119
动力学刚度	119
转子参数和动力学刚度	121
同步转子行为	123
低于共振点的同步行为	123
不平衡共振点处的同步行为	125
高于共振点的同步行为	126
动力学刚度的变化如何影响振动	126
总结	128

第 12 章 振动模态	130
振型	130
受迫振动振型与多模态响应	135
模态参数	137
振型的测量	139
模态识别探头	141
总结	142
第 13 章 各向异性刚度	144
各向异性刚度简介	144
分离共振	146
转子行为和各向异性刚度	148
引起反向轨迹的因素	151
探头安装的方向和测量到的响应	152
虚拟探头旋转	154
正向与反向矢量	156
总结	158
参考文献	158
第 14 章 转子稳定性分析：根轨迹	159
稳定性	159
稳定性和动力学刚度	161
稳定性分析	162
特征值问题的状态空间模型化	166
根轨迹图	167
根轨迹和放大系数	170
参数变化和根轨迹	174
各向异性和多模态系统的根轨迹	176
根轨迹和对数衰减率	178
根轨迹和坎贝尔图	179
机器稳定性问题的根轨迹分析	180
总结	181
参考文献	182
第 15 章 扭转振动和轴向振动	183
转子的扭转视图	183
静态和动态扭转响应	186
扭转/径向交叉耦合	188

扭转振动的测量	191
轴向振动	192
总结	194
参考文献	194
第 16 章 转子系统的基本平衡	195
不平衡和转子响应	195
振动传感器和平衡	197
平衡方法	198
使用极坐标图定位重点	200
使用速度和加速度数据的极坐标图	202
选择校准配重	203
将平衡环位置与极坐标图位置相关联	204
使用校准配重进行单平面平衡	206
配重分配	209
影响矢量	211
影响矢量和动力学刚度	215
多模态和多平面平衡	216
通过影响矢量进行多平面平衡	220
平衡出问题的原因	222
总结	222
参考文献	223
第 17 章 故障	224
故障简介	224
故障的检测	225
第 18 章 不平衡	228
不平衡造成的转子系统振动	228
应力和损伤	229
看似不平衡的其他问题	231
振摆	231
转子弯曲	232
传感器系统中的电噪声	232
耦合问题	233
轴裂纹	233
松动件或碎屑	233
摩擦	234
弹簧刚度的变化	234

与电动机有关的问题	235
松动的旋转件	238
总结	239
第 19 章 转子弯曲	240
转子弯曲简介	240
转子弯曲的原因	241
转子弯曲的转子动态效应	245
运行期间的热弯曲	246
诊断转子弯曲	248
消除转子弯曲	249
总结	250
参考文献	251
第 20 章 大径向载荷与不对中	252
静态径向载荷	252
不对中	254
温度变化与对中	254
不对中的原因	255
大径向载荷与不对中的表征	256
轴承温度	256
振动变化	257
应力和磨损	258
异常的平均轴心位置	259
轨迹形状	260
摩擦	261
流体诱发的失稳	261
总结	262
第 21 章 摩擦和松动	263
摩擦和松动简介	263
局部径向摩擦	264
全周摩擦	266
摩擦力和弹簧刚度变化	266
摩擦和稳态 1X 振动	268
共振期间的摩擦和 1X 振动	269
次同步振动	269
摩擦的故障特征	272
与摩擦故障特征相似的其他故障	274

总结	275
第 22 章 流体诱发的失稳	278
流体诱发失稳的原因	278
失稳模态：涡动和振荡	281
流体诱发失稳的故障特征	284
能够产生相似故障特征的其他故障	285
确定失稳源	287
消除流体诱发的失稳	287
总结	289
第 23 章 静压轴承和机械诊断	291
轴承的类型	291
动压油膜轴承	291
静压油膜轴承	292
油膜轴承中的刚度和模态阻尼	293
动压轴承中的可变刚度	294
静压轴承中的刚度	296
可变轴承刚度的转子动力学意义	297
可变轴承刚度的诊断意义	298
总结	300
参考文献	301
第 24 章 轴裂纹	302
裂纹的产生、增长和断裂	302
裂纹导致的轴刚度降低	304
轴不对称和 2X 振动	305
裂纹检测的第一条规则 (1X)	306
裂纹检测的第二条规则 (2X)	307
能够产生 1X 振动变化的其他故障	308
能够产生 2X 振动变化的其他故障	309
设计和运行建议	309
监测建议	310
总结	311
第 25 章 合成气体压缩机组的大幅振动	312
稳态分析	313
瞬时数据分析	314
机器的检查和改动	316