



机械设备故障诊断实用技术丛书

转子动平衡 实用技术

杨国安 编著



中国石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)

机械设备故障诊断实用技术丛书

转子动平衡实用技术

杨国安 编著

中国石化出版社

内 容 提 要

本书是《机械设备故障诊断实用技术丛书》之第4分册。本分册共分三部分：第一部分是第一章和第二章，主要介绍转子动平衡的基础知识和刚性、挠性转子动平衡的测定准则与方法以及轴系动平衡的相关知识；第二部分是第三章和第四章，主要介绍转子动平衡的几种常用平衡方法及设备；第三部分是第五章和第六章，重点说明现场动平衡的测试、校正和基本方法及其在典型机组中的应用。同时，本书精选了大量典型实例用以说明故障诊断的思路。

本书内容详尽，通俗易懂，以为企业解决实际问题为根本，主要供现场从事机械设备管理与维护的工程技术人员使用，同时也为高等工科院校相关专业研究生或本科生在深入理解机械设备故障诊断理论体系方面提供了详尽的参考资料。

图书在版编目 (CIP) 数据

转子动平衡实用技术 / 杨国安编著. —北京：中国石化出版社，2012. 1
(机械设备故障诊断实用技术丛书；4)
ISBN 978 - 7 - 5114 - 1333 - 8

I. ①转… II. ①杨… III. ①转子 - 动平衡
IV. ①TH136

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 276648 号

未经本社书面授权，本书任何部分不得被复制、抄袭，或者以任何形式或任何方式传播。版权所有，侵权必究。

中国石化出版社出版发行

地址：北京市东城区安定门外大街 58 号

邮编：100011 电话：(010)84271850

读者服务部电话：(010)84289974

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail: press@sinopec.com

北京科信印刷有限公司印刷

全国各地新华书店经销

*

787 × 1092 毫米 16 开本 16.25 印张 349 千字

2012 年 1 月第 1 版 2012 年 1 月第 1 次印刷

定价：48.00 元

序

现代化工业生产越来越大型化、高速化、自动化，特别是石化、冶金、电力等过程工业，设备投资大，连续生产流程长，机械装备故障停机可以造成重大经济损失，甚至导致机毁人亡的重大事故。现代生产和某些特种装备对人的依赖程度越来越低，对设备的依赖程度越来越高，对故障的预示和诊治越来越重要。设备状态监测和故障诊断作为一门工程技术，是 20 世纪 60 年代以后才发展起来的。

近二三十年来国内设备诊断技术的研究开发异常活跃，发展迅速，在工厂应用经常取得出人意外的实效，设备诊断技术在工厂企业得到了普及和应用。为此，迫切需要提供一批适合不同层次科技人员特别是企业一线技术人员实用的书，同时也需要一些适合本科生和研究生学习用的参考书。杨国安教授编著的《机械设备故障诊断实用技术丛书》就是应这一需求编写的。

对设备的状态监测和故障诊断，实际上从机器诞生之日就已产生。当时人们通过听、摸、看、闻机器的振动、温度、噪声等异常情况，凭借工匠的经验，可以判断机器某些故障并采取对策或者修复。设备状态监测和故障诊断作为一门工程技术正在成为信息、监控、通信、计算机和人工智能等集成技术，并逐步发展成为一个多学科交叉的新学科。我曾在工厂工作 32 年，1979 年开始研究应用设备故障诊断技术。我很赞赏本丛书的出版，因为它既有基础理论知识，又有工程应用技术，对企业工程技术人员是一套难得的实用技术丛书；对缺少工程实践经验的院校研究生也是很好的参考书。

设备状态监测及诊断技术，是将运行中的机器看成“活”的，它时时刻刻在“说话”——发出信息，对其中的故障征兆信息进行采集、处理、分析，对故障进行早期诊断、预测，在机器没损坏之前查明故障原因并适时采取修复、预防和改进对策。故障诊断工作的决定作用在人，好的仪器有了真正掌

握了故障诊断技术的人才能发挥作用。本丛书较全面地介绍了机械设备故障诊断技术的基础知识，包括设备故障诊断中的机械振动基础及信号处理，将理论与实践紧密结合，由浅入深，是一套很好的基础理论培训教材，也可供自学之用。本丛书还介绍了机电设备故障诊断实用技术、转子动平衡实用技术、轴承和齿轮故障诊断实用技术，并总结汇集了编者的若干科研成果，其内容实践性强，直观，便于掌握，可指导设备诊断工程实践。我对编者近几年不遗余力地编写这部内容丰富的丛书所付出的辛苦和做出的贡献表示钦佩。

机械装备故障诊断终极目标是有效防治故障，确保机器健康。其一是除故障：探测原因，有的放矢，消除故障；其二是防发展：早期预警，防微杜渐，预防故障；其三是防发生：查明根源，根治维修，防止故障。机械故障诊断是一门新兴的工程科学技术，它源于工程实践又应用于工程实践。企业技术人员作为机械故障诊断的“临床医生”会发现许多故障的征兆、积累丰富的诊断经验。希望读者对本书提出宝贵意见，使其不断修改完善。本人和作者同在一个科研团队，我们团队愿与读者一道，务实，求真，协力，创新，为提高我国设备诊断理论和技术水平作出应有的贡献。

深信丛书的出版能够在推广和普及机械故障诊断技术，培养更多的从事故障诊断的工程技术人才和后备力量方面发挥重要作用。是为序。

中国工程院院士 高金吉

编 者 的 话

设备诊断技术是在设备管理和维修的基础上发展起来的。设备诊断技术就是掌握设备的现在状态与异常或故障之间的关系，以预测未来的技术。它包含两方面的内容：一是对设备的运行进行监测；二是在发现异常情况后对设备的故障进行分析和诊断。

设备诊断技术首先出现在欧洲，主要是以英国倡导的设备综合诊断学为指导，在上世纪 60~70 年代，英国机械保健和状态监测协会最先开始故障诊断技术，美国的发展则是以后勤学为指导的设备服务维修，美国在 1961 年开始执行阿波罗计划后，出现了一系列因故障造成的事故。1967 年在美国航天局的倡导下，由美国海军研究室主持成立了美国机械故障预防小组，积极从事技术诊断的开发，他们在航空、航天、军事及核能等尖端领域处于领先地位。

日本则吸收了英美两国的优点，提出了全员维修(TPM)的观点。日本的新日铁自 1971 年开始开发诊断技术，1976 年达到实用化。日本的钢铁、化工、电力等行业处于世界领先。

我国自 1979 年才初步接触开发诊断技术，1984 年开始真正在企业推广故障诊断技术，并逐步形成了一支较有实力的故障诊断研究队伍，做出了许多卓有成效的研究成果，特别是自上世纪末，随着计算机技术的发展，彻底改变了故障诊断系统的软、硬件面貌，各种数据采集，分析，诊断功能的仪器被相继开发出来，各种专家系统也不断涌现，给工程技术人员提供了更有效的手段来分析解决问题。但问题也相继出现，现场工程技术人员由于受到专业知识的限制，面对琳琅满目的分析功能、界面、曲线，知其然不知其所以然；专家系统由于受到样本数量的影响，其可靠性、准确性也受到质疑。这使得故障诊断技术浮于研究层面，未有效地深入到基层，深入到生产第一线。应该讲故障诊断技术是一门实践性极强的应用科学，研究内容应本着“从实践中来，到实践中去”的原则，切实解决好生产一线存在的问题。

编者从上世纪 90 年代初开始接触大型装备预知维修技术，先后为几十家国有大型企业开展讲座和项目合作。通过这些项目的开展和与现场工作人员的广泛交流，使编者深深地认识到设备维护工作不仅直接关系到企业的生产效益和安全，而且与节能降耗和低碳环保也密切相关，甚至成为关键制约因素。当前故障诊断工作的推广应用最大的障碍是从事故障诊断技术的现场人员知识结构不合理和缺乏。他们懂得设备的结构、运行机制，却对时频变换不清楚，应该讲，故障诊断技术背后有严谨的数学知识作支撑。众多学科相互渗透构成了故障诊断技术的知识体系。有人说故障诊断就是传感器，有人说

是信号处理,有人说是数据挖掘、专家系统等等。这就充分说明了故障诊断技术知识结构的交叉性和多样性,编者近年来为很多企业培训故障诊断技术人员,和他们的亲密接触丰富了编者,也使编者感到编写一套适合于从事设备管理和维护工作的工程技术人员的实用技术丛书的必要性和迫切性。编者曾在2007年出版了《机械设备故障诊断实用技术》,该书的出版受到了企业设备管理维护人员的广泛欢迎,曾连续多次印刷。近几年通过与企业技术人员交流感到2007年出版的单行本内容上过于简捷,生产一线人员希望在内容体系、原理方法方面更细化些。鉴于此,编者决定出版一套系列丛书,以满足广大生产一线的设备管理和维修人员的需要。近几年,以一己之力编写这套丛书,虽殚精竭虑,仍力所不及,在这套丛书的编写过程中,现场技术人员和我的研究生提供了巨大的帮助。如果这套丛书对您有微薄之用,望不忘感念他们的辛勤付出。

本套丛书的目的是要较全面地对机械设备故障诊断技术的基础知识、机理、方法和应用技术进行较详尽地解释说明。尽量用一目了然的方式明确地说明关于故障诊断技术的一切。本书的宗旨是能用图形说明的尽量不去用文字解释,能用文字解释的不用数学去推演,即使用到的数学也尽量是初等的,从故障诊断基本概念出发,努力用最简单的数学来分析故障机理,而只有在确实需要时才使用复杂的方法。本书的内容参考了大量文献,包括网络上的一些优秀资源,综合汇编而成,这些内容为本书增添了许多新的知识。编者将在书后参考文献中尽量列出,争取不遗漏每一篇参考文献。但由于编者的疏忽可能存在遗漏现象,在此向遗漏参考文献的作者致以歉意,同时对这些优秀资源的作者和编者致以衷心的感谢!

这套丛书共分九分册,分别介绍了设备故障诊断中的机械振动基础、信号处理基础、旋转机械故障诊断实用技术、转子动平衡实用技术、往复机械故障诊断及管道减振实用技术、滚动轴承故障诊断实用技术、滑动轴承故障诊断实用技术、齿轮故障诊断实用技术和电动机故障诊断实用技术。在编写过程中,编者尽量照顾到整套丛书内容的系统性和完备性,尽力做到各分册间内容不重叠,但考虑到读者有选择地使用本套丛书的方便,有些内容各分册间是相通的,于是编者特意安排了适当的重叠,以加强每本分册的相对独立性,使每本分册也形成一个单独的知识体系,如第一分册和第二分册作为故障诊断技术的基础知识,各分册都会用到,但在每分册中也有相关知识的简介。

第一分册机械振动基础重点说明故障诊断中常用到的基本概念及基本原理的讲解和阐述,有针对性地介绍了与故障诊断技术相关的振动诊断标准。有些标准不同国家间可能略有差异,书中尽量同时列出,相同标准可能存在不同版本,考虑到目前现场的使用习惯,只要内容未变,也尽量照顾使用习惯列出,比如ISO2372,目前已有ISO10816,但考虑到使用习惯仍以ISO2372列出。

第二分册信号处理基础是本套丛书中的难点内容,重点说明信号处理的基础知识。本分册对数学基础有一定的要求,特别在傅里叶变换理论的阐述上,重点参考了国外的

经典教材和一些优秀的网络资源，对傅里叶变换的说明有独到之处，读者细读之必有所收获。该分册还较详尽地阐述了常用的故障诊断方法，这些知识对加深理解3~9分册的内容大有裨益。

第三分册旋转机械故障诊断实用技术重点说明旋转机械常见的故障诊断方法，该部分内容较成熟，也是故障诊断技术的重点内容之一。该分册还介绍了常用旋转机械和联轴器的点检方法和点检标准，这部分内容是企业实现预知维修和安全生产的重要保障。

第四分册转子动平衡技术主要说明轴及轴系动平衡原理，重点说明轴系现场动平衡技术，现场动平衡作为一门实用技术，广泛应用于多转子连接的轴系系统，简便易行，行之有效。书中以实例介绍了现场动平衡过程中的一些经验和方法。

第五分册往复机械故障诊断及管道减振技术主要说明往复压缩机的失效形式、故障诊断方法和常用点检方法。重点说明管道减振技术，阐述管道减振必须和往复机械整体考虑，标本兼治，才能做到本质安全，书中还以编者亲历的实例作了简要说明。往复机械故障诊断一直是世界性的难题，因此可参考的资料很少，且不系统。本书部分内容是编者结合自己多年来在往复机械及管道减振方面解决现场实际问题过程中所取得的一手资料和经验整理编辑而成。

第六分册滚动轴承故障诊断实用技术、第七分册滑动轴承故障诊断实用技术和第八分册齿轮故障诊断实用技术三分册均主要说明三种常用零件的失效形式，重点说明常用的故障诊断方法，简要说明各自的点检方法和标准，三分册分别介绍了基于油样分析的故障诊断技术。其中第六分册还介绍了滚动轴承的基础知识，以便读者查阅更方便。第七分册介绍了滑动轴承常用材料和液体润滑的基本原理，以便读者在分析滑动轴承故障时，能够与润滑理论相结合考虑，因为滑动轴承任何形式的故障无不与润滑油膜有关，至于气体润滑轴承只为增广读者知识面而考虑。第八分册介绍了齿廓啮合基本定律，以便读者在分析齿轮故障时，能充分考虑到齿轮齿廓形状，因为齿轮的大多数故障都与齿廓曲线被破坏有关，最常用的渐开线齿廓满足五线合一，不同的故障形式归结起来都是不同程度地破坏了五线合一原则。滚动轴承和滑动轴承作为独立的零件很难制定其零件的点检标准，且这样做也不存在任何意义，因为这两种零件的使用离不开机器本身，因此，所列点检标准为其所安装的相关机械设备的点检标准。

第九分册电动机故障诊断实用技术简要说明常用电动机的基本原理，以便读者分析故障时，能够结合电动机运行机制加以考虑。重点说明电动机振动故障诊断和电气故障诊断方法，简要介绍了电动机温度和噪声故障诊断方法。考虑到电机日常维护，本书还介绍了电动机的点检方法和日常修理和保养方法。

总之，故障诊断技术的终极目标是保证设备长周期、安全稳定运行，投入大量资金购买最现代化的仪器设备是必要的，但首要任务是充实现场工程技术人员的知识储备，包括理论和实际的经验。现在从事故障诊断的人员，通过望、闻、问、切能对设备的运

行状况作出评价的越来越少。当振动异常的时候，对于常见故障，能借助仪器得出诊断结论，能够对问题给出合理解释的人才越来越缺乏，故障诊断工作的决定作用在人，不在仪器。仪器仅仅是人的工具，如果人不行，再好的仪器也无用；好的仪器有了有准备的人才能够发挥作用。真正掌握了故障诊断技术，加上得力的仪器设备，才能使设备维护人员大有用武之地，而成为别人无法替代的人才！

近几年，编者有幸得到国家自然科学基金的支持，对科学基金的研究深化了编者对故障诊断技术的认识，如果说企业合作项目丰富了编者的实践知识，那么，国家自然科学基金项目则提升了编者的基础理论水平，使编者在更高的层面上更加理性地分析、判断每一种故障形式，所以，对近年来国家自然科学基金项目(50875016)的支持表示感谢。

本分册在资料查阅、收集、整理和编排上，我的研究生张森、李潇做了卓有成效的工作，这本书的出版与他们的辛勤付出密不可分。在此对张森、李潇同学表示谢意。

由于本套丛书的编写工作十分浩大，限于编者水平，恳切希望读者对本套丛书中出现的错误和不妥之处提出批评指正，编者将不胜感激。编者网址：www.ygazd.cn，E-mail：yangga@mail.buct.edu.cn 或 ygapublic@163.com。

谨以此书献给辛勤工作在生产第一线的机械设备管理维护人员和有志于故障诊断技术研究的科学技术人员！

编 者

2011 年 10 月于北京化工大学

目 录

第一章 概述	(1)
第一节 转子动平衡技术发展历程	(1)
第二节 转子动平衡技术目的及意义	(2)
第三节 转子动平衡技术中常用术语及定义	(3)
一、转子系统	(3)
二、不平衡	(4)
三、平衡	(6)
四、挠性转子	(7)
第四节 转子动平衡技术基础	(9)
一、转子定义	(9)
二、转子的状态	(9)
三、转子的临界转速	(11)
第二章 转子动平衡	(16)
第一节 刚性转子动平衡	(16)
一、刚性转子动力学和平衡基础	(16)
二、刚性转子平衡品质的测定准则	(19)
三、刚性转子平衡品质测定方法	(28)
第二节 挠性转子动平衡	(31)
一、挠性转子动力学和平衡基础	(31)
二、挠性转子平衡品质的测定准则	(36)
三、挠性转子平衡品质测定方法	(39)
第三节 轴系动平衡	(42)
一、轴系平衡重要性	(42)
二、轴系动平衡特点	(43)
三、轴系动平衡对支承动力特性的响应	(44)
第三章 转子动平衡常用平衡方法	(50)
第一节 平衡方法基本原理	(50)
一、静平衡原理	(50)
二、动平衡原理	(52)
第二节 平衡方法应用前的准备	(54)
一、不平衡轴向位置和转子不平衡形式的判断	(54)

二、加重平面的确定	(57)
三、试加重大小和方向的确定	(60)
第三节 单一转子平衡方法	(65)
一、模态平衡法	(66)
二、影响系数法	(68)
第四节 轴系平衡方法	(75)
一、单转子平衡法	(75)
二、多转子同时平衡法	(78)
三、多平面、多测点影响系数法	(78)
第五节 平衡方法应用时需要注意的若干问题	(79)
一、试加重量和角度的合理确定	(79)
二、影响系数的分散度与合理选择	(81)
三、不平衡位置和形式的判定	(82)
四、矢量优化法在动平衡工作中的应用	(84)
五、热平衡实验	(85)
六、三向振动在动平衡试验中的等效性	(86)
第四章 转子动平衡设备	(87)
第一节 静平衡架	(87)
一、导轨式静平衡架	(87)
二、滚柱式静平衡架	(88)
三、圆盘式静平衡架	(89)
四、球面支承式静平衡架	(89)
第二节 平衡机	(90)
一、平衡机发展概述	(90)
二、平衡机原理及结构	(91)
三、平衡机主要性能参数	(99)
四、平衡机故障原因及排除	(101)
五、平衡机应用实例	(101)
第五章 现场动平衡	(105)
第一节 现场动平衡简介	(105)
第二节 现场动平衡准备	(109)
一、现场动平衡的环境和安全要求	(109)
二、现场动平衡方案的准备	(110)
三、现场动平衡测试仪器和附件安装	(114)
第三节 现场动平衡测试和校正	(117)
一、现场动平衡的测量	(118)

二、现场动平衡测量要点及记录	(127)
三、现场动平衡的校正	(128)
四、现场动平衡配重块安装相位的测量	(134)
第四节 现场动平衡经验及注意事项	(136)
一、现场动平衡经验	(136)
二、现场动平衡注意事项	(138)
第六章 现场动平衡实例	(139)
第一节 汽轮发电机组实例	(139)
一、汽轮发电机组基本工作原理	(139)
二、汽轮发电机组结构特点	(139)
三、汽轮发电机组不平衡故障诊断	(140)
四、汽轮发电机组现场动平衡	(143)
五、汽轮发电机组现场动平衡实例	(144)
第二节 水轮发电机组实例	(153)
一、水轮发电机组基本工作原理	(153)
二、水轮发电机组结构特点	(153)
三、水轮发电机组不平衡故障诊断	(154)
四、水轮发电机组现场动平衡	(157)
五、水轮发电机组现场动平衡实例	(162)
第三节 风力发电机组实例	(177)
一、风力发电机组基本工作原理	(178)
二、风力发电机组结构特点	(178)
三、风力发电机组不平衡故障诊断	(178)
四、风力发电机组现场动平衡	(183)
五、风力发电机组现场动平衡实例	(185)
第四节 压缩机组实例	(190)
一、压缩机组基本工作原理	(190)
二、压缩机组结构特点	(192)
三、压缩机组不平衡故障诊断	(196)
四、压缩机组现场动平衡	(198)
五、压缩机组现场动平衡实例	(201)
第五节 风机实例	(204)
一、风机基本工作原理	(204)
二、风机结构特点	(205)
三、风机不平衡故障诊断	(206)
四、风机现场动平衡	(210)

五、风机现场动平衡实例	(211)
第六节 卧螺离心机实例	(216)
一、卧螺离心机基本工作原理	(216)
二、卧螺离心机结构特点	(216)
三、卧螺离心机不平衡故障诊断	(218)
四、卧螺离心机现场动平衡	(218)
五、卧螺离心机现场动平衡实例	(223)
附录 A 许用剩余不平衡度与工作转速的关系	(227)
附录 B 转换因子	(228)
附录 C 许用剩余不平衡量分配举例	(229)
附录 D 许用的等效振型不平衡量计算示例	(236)
附录 E 关于现场转子的注意事项	(237)
附录 F 不平衡校正计算的方法	(238)
附录 G 基于矢量合成的平衡机最小可达剩余不平衡度的测试方法	(239)
附录 H 不平衡量减少率的测试方法和程序	(243)
参考文献	(246)

第一章 概 述

第一节 转子动平衡技术发展历程

转子连同它的轴承和支座等统称为转子系统。像汽轮机、发电机、电动机、离心机以及气体压缩机等都是典型的旋转机器，都以转子作为工作的主体。

由于设计和结构方面的因素，材质不均匀以及制造安装误差等原因，所有实际转子的中心惯性主轴都或多或少地偏离其旋转轴线。这样，当转子转动时，转子各微元质量的离心惯性力所组成的力系不是一个平衡力系。这种情况称为转子具有不平衡或失衡。

转子的不平衡是旋转机械主要的激振源，也是许多种自激振动的触发因素。不平衡会引起转子的挠曲和内应力，使机器产生振动和噪声，加速轴承、轴封等零件的磨耗，降低机器的工作效率，严重时甚至会使元件断裂，从而引起各种事故。计算表明，转速 3000r/min 下质心偏离旋转中心 0.1mm 所产生的离心力近似等于转子重量，这将会产生很大振动。此外，振动还会通过轴承、基座等传递到基础和建筑物上，恶化周围的工作环境。

为了改善其工作状况，转子(小至钟表摆轮、回转仪转子，大至汽轮发电机转子、巨轮的螺旋桨)在制造、安装调试或修理时，常要进行平衡。平衡是旋转机械在制造、调试及维修过程中的一个重要工艺过程，它是通过改变转子质量分布的办法，即在转子上适当的地方，加上(或减去)一些质量(称为校正质量或配重)，从总体上尽可能地减小转子的不平衡。

由于转子工作转速、长径比(转子本体长度与直径之比)、转子本身刚度和各类不同的转子要求的平衡精度不同，因此就有各种不同的平衡方法，这些方法使转子获得所需要的平衡精度，保证机器平稳地、安全可靠地运行。

转子动力学的发展是与大工业的发展紧密相关的。由于生产上的需要，转子平衡理论发展迅速。20 世纪初，大部分转子系统工作在第一阶临界转速以下，转子挠度变形可以忽略不计，转子属于刚性转子，在这方面的研究相对简单，在 20 世纪 30 年代后刚性转子平衡理论已近成熟，30 年代初期发明了测量振动相位技术，刚性转子平衡也发展到无测相的动平衡，其平衡理论和技术经 20 多年的发展，到 20 世纪 50 年代初期也已经成熟，在后来的几十年内没有明显变化。然而刚性转子的平衡受某一速度的限制，如果转速超过这一限定转速，已经平衡了的转子又不平衡，特别是当转子工作在临界转速以上时，这种平衡方法已失去作用。

1956 年 K. Federn 提出判断转子刚挠性指标。他认为高于某一转速工作的转子系统必须考虑转子挠度的影响，转子属于挠性转子。至此，挠性转子平衡问题第一次被提出

来,这是源于氢冷发电机制造成功,致使发电机容量大幅度增加,转子变得越来越细长,其刚性显著降低,采用刚性转子平衡理论已经不能有效地平衡这种转子,运行中大机组不平衡振动问题愈来愈严重,于是国内外许多转子动力学专家相继提出了各种平衡理论及平衡方法,归纳起来可分为两大类。

第一类是以 Thearle、Baker、Goodman 为代表坚持使用的影响系数法。该方法是刚性转子动平衡的两平面向量法在挠性转子系统中的推广。第二类是以 Meldal、Bishop、Gladwell、Federn 为代表坚持使用的模态平衡法,或称振型平衡法。该方法是按旋转轴的振动理论把某转速下转子振型分解为各阶主振型,对这些主振型分别加以平衡,从而达到整个转子系统的平衡。这两类平衡理论都试图把转子的挠曲和振动降到尽可能低的程度。它们有各自不同的目标函数,影响系数法是在各选定的平衡转速下,使转子上各测振点的振动值为零,它并不能保证在全部转速范围内转子各点的振动都很小。而模态平衡法要求消除引起前 N 阶振型的不平衡量,而 N 阶以上的各高阶不平衡量在平衡后仍残留,只是高阶不平衡一般都较小,对转子系统正常工作影响不显著。目前是趋于将上面两种方法结合起来对转子进行平衡,并应用电子计算机进行计算与数据处理以提高平衡自动化的水平。同时对于现场动平衡如何进一步地改进平衡技术,减少大机组因找平衡所需的启动次数,降低轴系振动事故率也是研究的一个方向。

第二节 转子动平衡技术目的及意义

转动机械在运行中有一项重要指标,就是振动。振动要求越小越好,转动机械产生振动的原因很复杂,其中以转动机械的转动部分(转子)质量不平衡而引起的振动最为普遍。

从理论上讲,转子沿其轴的长度每一段的重心应与几何中心线重合。实际上,转子的材料内部组织不均,加工过程产生的误差,转子运行中的磨损和腐蚀不均及使用修过的转子等,均使转子质量不平衡。质量不平衡的转子在转动的过程中,就会产生不平衡的离心力。尤其是高速运行的转子,即使转子存在数值很小的质量偏心,也会产生较大的不平衡离心力。这个力通过支承部件,以振动的形式表现出来。

长时期不正常的振动,会使机组金属材料疲劳而损坏,转子上的紧固件发生松动,间隙小的装配件动静部分发生摩擦使轴发生弯曲等。振动过大,哪怕是时间很短也不允许,尤其是对高速大容量的机组,其后果更为严重。

现代技术尚不可能消除转动机械振动,因此对各类机组规定出振动的允许范围以此来衡量机组运行状态的优劣。

转子在旋转时,由于不平衡质量引起的扰动力而造成机组的振动,这现象为不平衡。一般情况下,转子不平衡分为三种类型:

(1) 静不平衡

由于转子质量分布不均,转子重心不在旋转轴心线上,在静止时,重心 G 受地心引力作用,致使转子不能在任一位置保持稳定,这种现象叫做静不平衡。

(2) 动不平衡

当转子旋转时,若转子的不平衡质量造成两个或两个以上相反的离心力 F_1 和 F_2 ,且这对离心力不在同一个平面内,使转子受到了力偶作用,产生绕轴线摆动,则这种现象称为动不平衡。显然,这种动不平衡的转子在静止时是平衡的。

(3) 动静混合不平衡

即上述两种不平衡现象同时出现在一个转子上。对于轴上装有几个工作零件的转子,都可能不同程度地存在这种混合质量不均衡现象。因此动静混合不平衡的情况比较复杂。

对于不平衡的转子进行校正,有两种方法:即静态找平衡(静平衡)和动态找平衡(动平衡)。例如对于质量分布较集中的低速转子,仅作静平衡而不作动平衡,即可达到平衡的目的。转子不平衡校正的具体方法将在后续章节中介绍。

第三节 转子动平衡技术中常用术语及定义

一、转子系统

1. 轴颈(journal)

转子上与轴承接触或由轴承支承着在其中旋转的部分。

2. 轴颈中心线(journal axis)

连接轴颈两端横截面中心的直线。

3. 轴颈中心(journal centre)

轴颈中心线与轴承横向合成力作用的轴颈径向平面的交点。

4. 轴线(shaft axis)

连接轴颈中心的直线。

5. 旋转轴(axis of rotation)

物体围绕其旋转的瞬时线。

注意:如果轴承是各向异性的,则没有固定的旋转轴;在刚性轴承的情况下,旋转轴就是轴线;但如果轴承不是刚性的,旋转轴就不一定是轴线。

6. 内质心转子(inboard rotor)

质心在两轴颈之间的双轴颈转子。

注意:为精确描述转子,可能有必要表明质心位置和校正平面的位置。

7. 外质心转子(outboard rotor)

质心不在支承之间的双轴颈转子。

8. 外悬(overhung)

指位置在支承跨度以外,如外悬质量,外悬校正平面。

9. 完全平衡转子(perfectly balanced rotor)

不平衡量为零的理想转子。

10. 轴承支架(bearing support)

将负荷由轴承传递给结构主体的部件或组合件。

11. 基础(foundation)

支承机械系统的结构。

注意：在旋转机械的振动和平衡范畴内，术语“基础”通常指其上安装整台机器的重型基础结构。

12. 临界转速(critical speed)

系统发生共振的特征转速。

注：由于支承刚度和质量与转子刚度和质量相对比值的不同，临界转速时表现明显的可以是轴颈的运动，也可以是转子的挠曲变形(刚性转子振型临界转速和挠性转子挠曲临界转速)。

同义词：共振转速(resonant speed)

13. 平衡转速(balancing speed)

平衡转子时的转速。

14. 工作转速(service speed)

转子在最终装配后或现场状态下工作的转速。

二、不平衡

1. 不平衡(unbalance)

转子旋转产生离心力所引起的振动力或运动作用于轴承时，该转子所处的状态。

需要注意：术语“不平衡”有时用作“不平衡量”或“不平衡矢量”的同义词。不平衡一般沿转子轴向分布，但可分解为：①静不平衡和偶不平衡，在三个指定平面上以三个不平衡矢量表示；②动不平衡，在两个指定的平面上以两个不平衡矢量表示。

2. 不平衡矢量(unbalance vector)

大小为不平衡量，方向为不平衡相角的矢量。

3. 不平衡量(amount of unbalance)

转子某平面上不平衡的量值大小，不涉及不平衡的相角位置。它等于不平衡质量与其质心到轴线距离(半径)的乘积。不平衡量的单位例如：克毫米($\text{g} \cdot \text{mm}$)等。

4. 不平衡相角(angle of unbalance)

在垂直于转子轴线的平面内并随转子一起旋转的极坐标系中，不平衡质量位于该坐标系中的极角为不平衡相角。

同义词：不平衡相位(phase of unbalance)

5. 不平衡质量(unbalance mass)

位于转子特定半径处的质量。该质量与向心加速度的乘积等于不平衡离心力。而向心加速度等于转子轴线和不平衡质量之间的距离与转子角速度(rad/s)平方的乘积。

6. 静不平衡(static unbalance)

中心主惯性轴平行偏离于轴线的不平衡状态。静不平衡可由两个动不平衡矢量的合