



机械设备故障诊断实用技术丛书

旋转机械故障诊断 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)



作者简介

杨国安,教授,博士生导师,机电设备状态监测及故障诊断专家。1985年毕业于石油大学炼油化工机械专业,于东南大学机械制造及自动化专业取得博士学位。承担国家自然科学基金等国家及省部级项目多项,企业项目30余项,发表论文60余篇,独立出版专著1本。在机电设备状态监测和智能诊断系统开发、往复机械及管道减振技术、压力容器安全性评价及寿命评估技术等方面取得了独具特色的技术成果。多次为中国石化、中国石油、天山股份、乌石化、金川集团、哈石化、辽阳石化、齐鲁石化、燕山石化、大唐多伦煤化工、天津石化、武汉钢铁公司、一汽轿车、胜利油田、中原油田和大港油田等几十家国有大型企业开展讲座并进行项目合作。相继开发Y308智能点检管理系统、Y303四通道机械设备状态监测及故障诊断分析仪、Y305双通道智能点检及动平衡仪、Y505多通道声发射系统。

机械设备故障诊断实用技术丛书

- 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
- 电动机故障诊断实用技术

责任编辑:潘向阳 孙诗会
责任校对:李伟
封面设计:七星博纳

ISBN 978-7-5114-1332-1



9 787511 413321 >

定价:40.00元

机械设备故障诊断实用技术丛书

旋转机械故障诊断 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3分册。本分册共分四部分：第一部分为第一章和第二章，简要介绍常用旋转机械及其故障诊断的基础知识、旋转机械的振动基础；第二部分为第三章至第十一章，详尽说明旋转机械的转子不平衡故障、转子不对中故障、转子弯曲故障、动静件摩擦故障、转子热套配合过盈不足故障等，重点，讲述了它们的故障类型、机理、特征、诊断方法、故障原因及治理措施等；第三部分为第十二章，重点介绍常用旋转机械及联轴器的点检方法和点检标准；第四部分为第十三章，详细列举旋转机械综合故障实例。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，同时本书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

旋转机械故障诊断实用技术 / 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；3)
ISBN 978 - 7 - 5114 - 1332 - 1

I. ①旋… II. ①杨… 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 (2011) 第 276702 号

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 13.25 印张 276 千字

2012 年 1 月第 1 版 2012 年 1 月第 1 次印刷

定价：40.00 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人意料的实效，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够发挥作用。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、积累了丰富的诊断经验。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

目 录

第一章 概述	(1)
第二章 旋转机械振动基础	(5)
第一节 旋转机械振动分类	(5)
一、强迫振动	(5)
二、自激振动	(5)
三、非定常强迫振动	(5)
第二节 转子振动的基本特性	(6)
第三节 临界转速及其影响因素	(7)
一、转子的临界转速	(7)
二、影响临界转速的因素	(10)
三、转子轴承系统的稳定性	(11)
四、多盘转子	(12)
五、扭转振动	(13)
六、非线性振动特征及识别方法	(14)
第四节 旋转机械振动标准	(15)
一、轴承座振动	(15)
二、转轴振动标准	(18)
三、旋转机械振动通用标准	(20)
第三章 转子不平衡的故障机理与诊断	(26)
第一节 转子不平衡的种类	(26)
第二节 转子不平衡的故障机理	(26)
第三节 转子不平衡故障的特征	(27)
第四节 转子不平衡诊断方法	(28)
第五节 转子不平衡故障原因分析及治理措施	(29)
第六节 转子不平衡故障诊断实例	(30)
第四章 转子不对中故障机理与诊断	(35)
第一节 转子不对中的类型	(35)
第二节 转子不对中的故障机理	(36)
第三节 转子不对中的故障特征	(38)
第四节 转子不对中的故障诊断	(39)

第五节 转子不对中故障原因与治理措施	(40)
第六节 转子不对中故障诊断实例	(40)
第五章 转子弯曲的故障机理与诊断	(49)
第一节 转子弯曲的种类	(49)
第二节 转子弯曲振动蹬机理	(49)
第三节 转子弯曲的故障特性	(49)
第四节 转子弯曲的故障诊断	(50)
第五节 转子弯曲的故障原因与治理措施	(50)
第六节 直轴原理和方法	(51)
第七节 转子弯曲故障诊断实例	(52)
第六章 动静件摩擦的故障机理与诊断	(59)
第一节 转子与静止件摩擦的分类	(59)
第二节 转子与静止件径向摩擦的振动机理	(59)
一、局部动静件碰磨的故障特征	(59)
二、动静件摩擦接触弧增大时的故障特征	(60)
第三节 转子与静止件轴向摩擦的振动机理	(61)
第四节 动静件摩擦的诊断方法	(61)
第五节 动静件摩擦的故障原因与治理措施	(62)
第六节 动静件摩擦故障诊断实例	(62)
第七章 转子热套配合过盈不足的故障机理与诊断	(65)
第一节 转子热套配合过盈不足的振动机理与故障特征	(65)
一、振动机理	(65)
二、故障特征	(66)
第二节 转子热套配合过盈不足的诊断方法	(67)
第三节 转子热套配合过盈不足的故障原因与治理措施	(67)
第四节 转子热套配合过盈不足故障诊断实例	(68)
第八章 转子支承部件松动的故障机理与诊断	(71)
第一节 转子支承部件松动的故障机理与故障特征	(71)
一、故障机理	(71)
二、故障特征	(73)
第二节 转子支承部件松动的诊断方法	(73)
第三节 转子支承部件松动的故障原因与治理措施	(74)
第四节 转子支承部件松动故障诊断实例	(74)
第九章 旋转失速与喘振的故障机理与诊断	(78)

第一节 旋转失速的机理与故障特征	(78)
一、旋转失速	(78)
二、旋转失速的振动机理	(79)
三、旋转失速的故障特征	(79)
第二节 喘振的机理与故障特征	(80)
一、喘振	(80)
二、喘振的故障特征	(81)
第三节 旋转失速与喘振的诊断方法	(81)
第四节 旋转失速与喘振的故障原因与治理措施	(82)
第五节 旋转失速与喘振故障诊断实例	(83)
第十章 转轴裂纹的故障机理与诊断	(91)
第一节 转轴裂纹的故障机理	(91)
一、闭裂纹	(91)
二、开裂纹	(91)
三、开闭裂纹	(91)
第二节 转轴裂纹的故障特征	(92)
第三节 转轴裂纹的诊断方法	(92)
第四节 转轴裂纹的故障原因与治理措施	(93)
第五节 转轴裂纹故障诊断实例	(93)
第十一章 迷宫密封气流激振的故障机理与诊断	(104)
第一节 迷宫密封气流激振的故障机理	(104)
第二节 迷宫密封气流激振的故障特征	(106)
第三节 迷宫密封气流激振的诊断方法	(106)
第四节 迷宫密封气流激振的故障原因与治理措施	(106)
第五节 迷宫密封气流激振故障诊断实例	(107)
第十二章 常用旋转机械的点检方法	(110)
第一节 点检的基础知识	(110)
一、点检的含义	(110)
二、点检的目的	(110)
三、点检的分类	(110)
四、点检的主要环节	(111)
五、点检员所需的技能	(112)
第二节 常用旋转机械的点检方法	(112)
第三节 常用联轴器的点检方法	(135)

第四节 点检标准	(155)
第五节 推广点检工作应注意的问题	(166)
第十三章 旋转机械综合故障实例	(168)
附录	(178)
一、部分旋转机械常见故障处理	(178)
二、常见故障诊断图表	(189)
参考文献	(198)

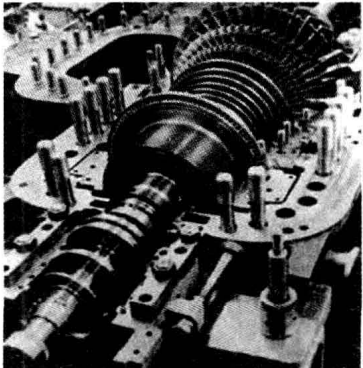
第一章 概 述

绝大多数机械都有旋转件，所谓旋转机械是指主要功能由旋转运动来完成的机械，尤其是指主要部件作旋转运动的、转速较高的机械。旋转机械种类繁多，有汽轮机、燃气轮机、离心式压缩机、发电机、水泵、水轮机、通风机以及电动机等。这类设备的主要部件有转子、轴承系统、定子和机组壳体、联轴器等，转速从每分钟几十转到几万、几十万转。

大型旋转机械，如汽轮机、压缩机、发电机、风机、泵等是大型生产企业的关键设备。它们通常具有大型、高速、连续工作及处于核心地位的特点，其运行状况好坏直接影响企业的生产，一旦故障停机，将造成巨大的经济损失和严重的乃至灾难性的后果。国内外曾发生过的各种空难、爆炸和断裂等恶性事故，不但造成人员伤亡和巨大的经济损失，而且造成了严重的社会影响。例如，1972年日本关西电力公司 Kaman 电厂一台 600MW 汽轮机发电机组，因为异常振动发生轴断为 18 段的严重事故，并引起氢气爆炸造成火灾，直接经济损失达 9 千万马克；1986 年 4 月前苏联的切尔诺贝利核电站四号机组发生严重振动而造成核泄漏，致使 2000 多人死亡，直接经济损失达 30 亿美元；1987 年山西大同发电 200MW 机组转子断裂，1988 年秦岭电厂 5 号机组主轴断裂，两次事故经济损失均达亿元以上；1998 年我国某钢厂一台大功率高炉鼓风机数级叶片折断，导致了该高炉停产，直接经济损失达数千万元。保证大型旋转机械设备连续正常满负荷运行是提高企业生产率的关键。为了掌握设备运行状态，避免事故的发生，需要研究并应用先进的状态监测与故障诊断技术。这种技术不仅可以早期发现故障，避免恶性事故的发生，还可以从根本上解决目前设备定期维修不足和维修过剩的问题。

几种典型的旋转机械如表 1-1 所示。

表 1-1 常用的旋转机械

名称	简介	图 示
汽轮机	汽轮机 (Steam Turbine) 是将蒸汽的能量转换成为机械功的旋转式动力机械，又称蒸汽透平。主要用作发电用的原动机，也可直接驱动各种泵、风机、压缩机和船舶螺旋桨等。还可以利用汽轮机的排汽或中间抽汽满足生产和生活上的供热需要	

名称	简介	图 示
离心压缩机	<p>离心式压缩机 (Centrifugal Compressor)，通过叶轮对气体做功，将能量传递给气体，最终使其压力得到提升。可以为单级叶轮，也可为多级。离心式压缩机是一种叶片旋转式压缩机(即透平式压缩机)。在离心式压缩机中，高速旋转的叶轮给予气体的离心力作用，以及在扩压通道中给予气体的扩压作用，使气体压力得到提高</p>	
发电机	<p>发电机 (Electric Generator) 是将其他形式的能源转换成电能的机械设备。最早产生于第二次工业革命时期，由德国工程师西门子于 1866 年制成。它由水轮机、汽轮机、柴油机或其他动力机械驱动，将水流、气流、燃料燃烧或原子核裂变产生的能量转化为机械能传给发电机，再由发电机转换为电能。发电机在工农业生产、国防、科技及日常生活中有广泛的用途</p>	
水泵	<p>水泵 (Water Pump) 是输送液体或使液体增压的机械。它将原动机的机械能或其他外部能量传送给液体，使液体能量增加。主要用来输送液体，包括水、油、酸碱液、乳化液、悬乳液和液态金属等，也可输送液体、气体混合物以及含悬浮固体物的液体</p>	

续表

名称	简介	图 示
风机	<p>风机(Fan)是依靠输入的机械能,提高气体压力并排送气体的机械,它是一种从动的流体机械。排气压力低于$1.5 \times 10^5 \text{Pa}$。风机广泛用于工厂、矿井、隧道、冷却塔、车辆、船舶和建筑物的通风、排尘和冷却,锅炉和工业炉窑的通风和引风,空气调节设备和家用电器设备中的冷却和通风,谷物的烘干和选送,风洞风源和气垫船的充气 and 推进等。</p>	
电动机	<p>电动机(Motor)是把电能转换成机械能的设备,它是利用通电线圈在磁场中受力转动的现象制成,电动机按使用电源不同分为直流电动机和交流电动机,电力系统中的电动机大部分是交流电机,可以是同步电机或者是异步电机。电动机主要由定子与转子组成。通电导线在磁场中受力运动的方向跟电流方向和磁感线(磁场方向)方向有关。电动机工作原理是磁场对电流受力的作用,使电动机转动</p>	

近年来,随着现代工业的发展,大型旋转机械需求数量不断增加,而且这类机械本身还不断向大功率、大容量、高转速、高效率 and 复杂化等方面发展。如何管理好这些设备,确保工作过程的安全性和可靠性,避免事故发生,让设备发挥最大的经济效益,已成为现代企业管理的重要目标之一。为此,要求通过对机器的在线监测尽早识别较小的故障,并监视故障的发展,以便在整个系统受到较大破坏之前,及时实施补救措施或有准备地停机。

另一方面,对大型旋转机械进行状态监测,可以更有效地指导设备的维修管理,将早期的事后维修方式和计划维修方式发展为预知维修,可以让机器在有限的使用寿命期内创造最大的价值。

机械故障是指机器的功能失效,即其动态性能劣化,不符合技术要求。例如,机器运行失稳,产生异常振动和噪声,工作转速、输出功率发生变化,以及介质的温度、压力、流量异常等。机器发生故障的原因不同,所反映出的信息也不一样,根据这些特有的信息,可以对故障进行诊断。但是,机器发生故障的原因往往不是单一的因素,一般都是多种因素共同作用的结果,所以对设备进行故障诊断时,必须进行全面的综合分析研究。

由于旋转机械的结构及零部件设计加工、安装调试、维护检修等方面的原因和运行操作方面的失误，使得机器在运行过程中产生振动，其振动类型可分为径向振动、轴向振动和扭转振动，其中过大的径向振动往往是造成机器损坏的主要原因，也是状态监测的主要参数和进行故障诊断的主要依据。

从仿生学的角度来看，诊断设备的故障类似于确定人的病因：医生需要向患者询问病情、病史、切脉(听诊)以及量体温、验血相、测心电图等，根据获得的多种数据，进行综合分析才能得出诊断结果，提出治疗方案。同样，对旋转机械的故障诊断，也应在获取机器的稳态数据、瞬态数据以及过程参数和运行状态等信息的基础上，通过信号分析和数据处理提取机器特有的故障征兆及故障敏感参数等，经过综合分析判断，才能确定故障原因，做出符合实际的诊断结论，提出治理措施。

根据故障原因和造成故障原因的不同阶段，可以将旋转机械的故障原因分为几个方面，如表 1-2 所示。

表 1-2 旋转机械故障原因分类

故障分类	主要原因
设计原因	<ul style="list-style-type: none"> ①设计不当，动态特性不良，运行时发生强迫振动或自激振动； ②结构不合理，应力集中； ③设计工作转速接近或落入临界转速区； ④热膨胀量计算不准，导致热态对中不良
制造原因	<ul style="list-style-type: none"> ①零部件加工制造不良，精度不够； ②零件材质不良，强度不够，制造缺陷； ③转子动平衡不符合技术要求
安装、维修	<ul style="list-style-type: none"> ①机械安装不当，零部件错位，预负荷大； ②轴系对中不良； ③机器几何参数(如配合间隙、过盈量及相对位置)调整不当； ④管道应力大，机器在工作状态下改变了动态特性和安装精度； ⑤转子长期放置不当，改变了动平衡精度； ⑥未按规程检修，破坏了机器原有的配合性质和精度
操作运行	<ul style="list-style-type: none"> ①工艺参数(如介质的温度、压力、流量、负荷等)偏离设计值，机器运行工况不正常； ②机器在超转速、超负荷下运行，改变了机器的工作特性； ③运行点接近或落入临界转速区； ④润滑或冷却不良； ⑤转子局部损坏或结垢； ⑥启停机或升降速过程操作不当，暖机不够，热膨胀不均匀或在临界区停留时间过久
机器劣化	<ul style="list-style-type: none"> ①长期运研，转子挠度增大或动平衡劣化； ②转子局部损坏、脱落或产生裂纹； ③零部件磨损、点蚀或腐蚀等； ④配合面受力劣化，产生过盈不足或松动等，破坏了配合性质和精度； ⑤机器基础沉降不均匀，机器壳体变形

第二章 旋转机械振动基础

旋转机械的主要功能是由旋转部件来完成的，转子是其最主要的部件。旋转机械发生故障的主要特征是机器伴有异常的振动和噪声，其振动信号从幅域、频域和时域反映了机器的故障信息。因此，了解旋转机械在故障状态下的振动机理，对于监测机器的运行状态和提高诊断故障的准确率都非常重要。

第一节 旋转机械振动分类

旋转机械振动按机械振动性质可以分为3类：

一、强迫振动

强迫振动又称同步振动，是由外界持续周期性激振力作用而引起的振动。强迫振动从外界不断地获得能量来补偿阻尼所消耗的能量，使系统始终保持持续的等幅振动。该振动反过来并不影响扰动力。产生强迫振动的主要原因有转子质量的不平衡、联轴器不对中、转子的静摩擦、机械部件松动、转子部件或轴承破损等。强迫振动的特征频率总是等于扰动力的频率。例如，由于转子质量不平衡引起的强迫振动，其振动频率恒等于转速频率。

二、自激振动

机器运行过程中由机械内部运动本身产生的交变力引起的振动叫自激振动，一旦振动停止，交变力也自然消失；自激振动频率即机械的固有频率(或临界频率)，与外来激励的频率无关。旋转机械中常见的自激振动有油膜涡动和油膜振荡。它主要由转子内阻、动静部件的干摩擦等引起。与强迫振动相比，自激振动出现比较突然，振动的强度比较严重，短时间内就会对机器造成严重破坏。

三、非定常强迫振动

非定常强迫振动是由外来扰动力引起的一种强迫振动。其特点是与扰动力具有相同的频率；振动本身反过来会影响扰动力的大小与相位；振动的幅值和相位都是变化的。比如转子轴上某一部位出现不均匀的热变形，就相当于给转子增加了不平衡质量，它将会使振动的幅值和相位都发生变化。反过来，振动幅值和相位的变化又影响不均匀热变形的大小与部位，从而使强迫振动连续不断地发生变化。

第二节 转子振动的基本特性

旋转机械的主要部件是转子，其结构型式虽然多种多样，但对一些简单的旋转机械来说，为分析和计算方便，一般都将转子的力学模型简化为一圆盘装在一无质量的弹性转轴上，转轴两端由刚性的轴承及轴承座支承。该模型称为刚性支承的转子，对它进行分析计算所得到的概念和结论对于简单的旋转机械是适用的。由于做了上述种种简化，若把得到的分析结果用于较为复杂的旋转机械时不够精确，但基本上能够说明转子振动的基本特性。

大多数情况下，旋转机械的转子轴心线是水平的，转子的两个支承点在同一水平线上。设转子上的圆盘位于转子两支承点的中央，当转子静止时，由于圆盘的重量使转子弯曲变形产生静挠度，即静变形。此时，由于静变形较小，对转子运动的影响不显著，可以忽略不计，即认为圆盘的几何中心 O' 与轴线 $AO'B$ 的中心 O 点相重合，如图 2-1 所示。转子开始转动后，由于离心力的作用，转子产生动挠度。此时，转子有两种运动：一种是转子的自身转动，即圆盘绕其轴线 $AO'B$ 的转动；另一种是弓形转动，即弯曲的轴心线 $AO'B$ 与轴承连线 AOB 组成的平面绕 AB 轴线的转动。

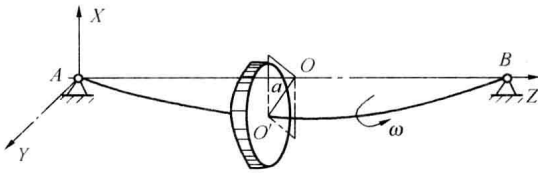


图 2-1 单圆盘转子

上。设转子上的圆盘位于转子两支承点的中央，当转子静止时，由于圆盘的重量使转子弯曲变形产生静挠度，即静变形。此时，由于静变形较小，对转子运动的影响不显著，可以忽略不计，即认为圆盘的几何中心 O' 与轴线 $AO'B$ 的中心 O 点相重合，如图 2-1 所示。转子开始转动后，由于离心力的作用，转子产生动挠度。

此时，转子有两种运动：一种是转子的自身转动，即圆盘绕其轴线 $AO'B$ 的转动；另一种是弓形转动，即弯曲的轴心线 $AO'B$ 与轴承连线 AOB 组成的平面绕 AB 轴线的转动。

圆盘的质量以 m 表示，它所受的力是转子的弹性力 F

$$F = -ka \tag{2-1}$$

式中 k ——转子的刚度系数；

$$a = OO'$$

圆盘的运动微分方程为

$$\begin{cases} m\ddot{x} = F_x = -kx \\ m\ddot{y} = F_y = -ky \end{cases} \tag{2-2}$$

$$\begin{cases} \ddot{x} + \frac{k}{m}x = 0 \\ \ddot{y} + \frac{k}{m}y = 0 \end{cases} \tag{2-3}$$

令 $\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$ ，则

$$\begin{cases} x = X\cos(\omega_n t + \varphi_x) \\ y = Y\cos(\omega_n t + \varphi_y) \end{cases} \tag{2-4}$$

式中 X 、 Y ——振动幅度；

φ_x 、 φ_y ——相位。

由(2-4)式可知，圆盘或转子的中心 O' ，在互相垂直的两个方向作频率为 ω_n 的简

谐振动。在一般情况下, X 、 Y 振幅不相等, O' 点的轨迹为一椭圆。 O' 的这种运动是一种“涡动”或称“进动”。转子的涡动方向与转子的转动角速度 ω 同向时, 称为正进动; 与 ω 反方向时, 称为反进动。

第三节 临界转速及其影响因素

随着机器转动速度的逐步提高, 在大量生产实践中人们觉察到, 当转子转速达到某一数值后, 振动就大得使机组无法继续工作, 似乎有一道不可逾越的速度屏障, 即所谓的临界转速。Jeffcott 用一个对称的单转子模型在理论上分析了这一现象, 证明只要在振幅还未上升到危险程度时, 迅速提高转速, 越过临界转速点后, 转子振幅会降下来。换句话说, 转子在高速区存在着一个稳定的、振幅较小的、可以工作的区域。从此, 旋转机械的设计、运行进入了一个新时期, 效率高、质量轻的高速转子日益普遍。需要说明的是, 从严格意义上讲, 临界转速的值并不等于转子的固有频率, 而且在临界转速时发生的剧烈振动与共振是不同的物理现象。

一、转子的临界转速

如果圆盘的质心 G 与转轴中心 O' 不重合, 设 e 为圆盘的偏心距离, 即 $O'G = e$, 如图 2-2 所示。

当圆盘以角速度 ω 转动时, 质心 G 的加速度在坐标上的位置为

$$\begin{cases} \ddot{x}_G = \ddot{x} - e\omega^2 \cos \omega t \\ \ddot{y}_G = \ddot{y} - e\omega^2 \sin \omega t \end{cases} \quad (2-5)$$

参考式(2-2), 则轴心 O' 的运动微分方程为

$$\begin{cases} m\ddot{x} + kx = me\omega^2 \cos \omega t \\ m\ddot{y} + ky = me\omega^2 \sin \omega t \end{cases} \quad (2-6)$$

令 $\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$, 则

$$\begin{cases} \ddot{x} + \omega_n^2 = e\omega^2 \cos \omega t \\ \ddot{y} + \omega_n^2 = e\omega^2 \sin \omega t \end{cases} \quad (2-7)$$

式(2-7)中右边是不平衡质量所产生的激振力。令 $Z = x + iy$, 则(2-7)的复变量形式为:

$$\ddot{Z} + \omega_n^2 Z = e\omega^2 e^{i\omega t} \quad (2-8)$$

其特解为

$$Z = Ae^{i\omega t} \quad (2-9)$$

代入式(2-8)后, 可求得振幅

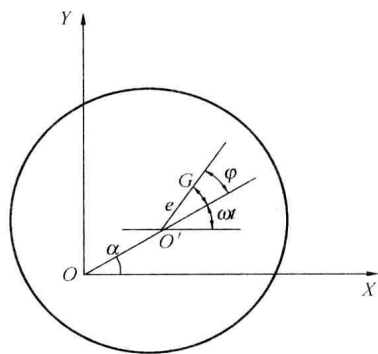


图 2-2 圆盘质心位置