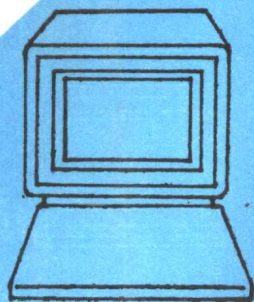
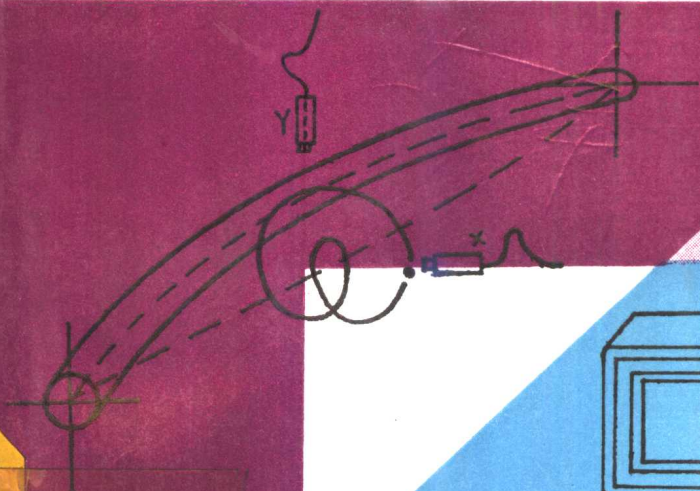


# 旋转机械振动 监测及故障诊断

张正松 傅尚新 冯冠平 徐玉铮 等编著



机械工业出版社

# 旋转机械振动监测及故障诊断

张正松 傅尚新  
冯冠平 徐玉铮  
等编著

机械工业出版社

(京)新登字054号

本书系统地介绍了旋转机械振动监测及故障诊断的各种理论及方法。

全书共分九章。首先介绍了旋转机械振动监测学科所面临的问题，并详细地介绍了各类传感器及仪器的原理及其应用，以及旋转机械振动分析所用的分析技术。同时着重介绍了转子各类故障振动响应特性的机理，它是故障分析的理论基础，最后讨论了旋转机械监测及故障诊断系统的原理。

本书可供从事机械、电机、动力、化工、航空专业方面工作的工程科技人员参考，亦可作为高等院校有关专业师生的参考书。

## 旋转机械振动监测及故障诊断

张正松 傅尚新  
冯冠平 徐玉铮 等编著

\*  
责任编辑：高金生 版式设计：吴静霞  
封面设计：郭景云 责任校对：肖新民  
责任印制：王国光

\*  
机械工业出版社出版 (北京阜成门外百万庄南街一号)  
(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

\*  
开本787×1092<sup>1</sup>/<sub>32</sub>·印张15<sup>1</sup>/<sub>4</sub>·插页1·字数335千字  
1991年11月北京第一版·1991年11月北京第一次印刷  
印数 0,001—3,000·定价：11.30元

\*  
ISBN 7-111-02528-8/TH·412

## 前 言

旋转机械指的是蒸汽透平，燃气轮机透平、离心压缩机、水力透平、发电机组、电动机、给水泵、航空发动机以及各种减速增速用的齿轮传动装置等机械设备。这类设备在各种机械中占相当大的比重。它们的共同特点是：转速高、功率大。例如，某些坦克发动机的增压器转速已高达 $200000\text{ r/min}$ ，又如电站透平单机容量已高达 $1000\text{ MW}$ 。它们大部分分属动力机械，又都属于工厂中的关键设备。这类设备一旦事故停机，就会影响整个工厂的正常生产流程。因此保证这类旋转机械的安全可靠运行，提高其开工率，对国民经济有着重要的意义。

旋转机械设备的振动有很多害处，它会产生噪声，降低工作效率，配合松动，元件断裂，从而导致事故发生。目前监测旋转机械正常工作的手段虽然很多，但是至今人们仍认为，振动信号监测是一种易于实现而又可靠的办法。振动信号中携带有机械设备内部运行状态的大量信息，根据这些信息作出故障诊断，这就形成了“旋转机械的振动监测及故障诊断”这门学科。该学科是基于以下几个学科基础上即传感及测试技术、电子学、信号处理、计算机技术以及转子动力学、摩擦学等等。甚至还包括了信息科学及人工智能等边缘科学。可以说“旋转机械的振动监测及故障诊断”本身并不是一门基础学科，它是应用技术，掌握它需要有多方面的基础知识。它随着有关基础学科的发展以及生产的发展而迅速

#### IV

发展着。

本书是为了推广旋转机械振动监测及故障诊断技术而编写的，着重介绍这门技术及其有关的基础知识，使广大读者对其有一基本了解。

本书第一章总论着重介绍旋转机械振动监测及故障诊断学科所涉及的问题性质及范畴；第二章主要介绍传感器的基本技术，特别是电涡流传感器；第三章介绍常用测试分析仪器的基本原理，对于旋转机械振动测试分析来说主要是两种仪器，即数字向量滤波器及快速傅里叶分析仪，同时还介绍了HZ-8500振动位移监视仪；第四章介绍了分析技术基础知识，大部分旋转机械振动信号基本上都属于周期信号，特别是同步信号与次同步信号，随机成分并不十分突出；第五、六、七章介绍转子-轴承动力学的基本理论，这些基本知识对研究旋转机械故障诊断的技术人员来说，是必不可少的，尤其是大型透平机械用的都是油膜轴承，而油膜轴承的动静特性对机组动特性有着重要的影响。第八章介绍了旋转机械常见故障的机理以及诊断的基本方法，这一章对如何从繁杂的征兆中找出旋转机械的故障所在是十分重要的；第九章主要介绍大型旋转机械监测保护系统的构成以及在该系统中数据的采集、传输、管理、储存、分析、显示等整个过程；附录由两部分组成：一是旋转机械的测量、监视及分析时常用的术语；二是VDI—2059透平机组转轴的振动测量及其评价和电站透平转轴振动的测量和评价。

本书由清华大学精密仪器与机械学系和上海发电设备成套设计研究所的几位同志集体编著，其分工如下：

前言 张正松；

第一章、第九章 傅尚新；

第二章	徐玉铮、卢道江；
第三章	陈俊春、张正松；
第四章	张正松；
第五章、第六章	冯冠平；
第七章	葛中民；
第八章	龚汉声、张正松；
附录	傅尚新、徐玉铮。

本书在分工执笔的基础上，由张正松、傅尚新、冯冠平、徐玉铮整理编写，最后由张正松同志统编定稿。

本书在编写过程，黄文虎、夏松波、屈维德教授提出了许多宝贵意见，在此表示深切谢意。

由于作者的水平和经验有限，书中缺点和错误在所难免，敬请广大读者批评指正。

# 目 录

## 前言

第一章 概述 .....	1
一、引言 .....	1
1. 旋转机械的基本构成及特点 .....	1
2. 振动监测与故障诊断技术的发展概况 .....	2
3. 我国在旋转机械振动的检测、监视及故障诊断方面的概况 .....	4
二、振动测量与监视的目的 .....	7
1. 旋转机械的预防性维修与预测性维修 .....	7
2. 振动监测的目的 .....	9
三、振动基本概念 .....	11
1. 周期振动与简谐振动 .....	11
2. 振动位移、速度和加速度 .....	12
3. 振动波形的峰值、峰-峰值、有效值和平均值 .....	14
4. 简谐振动系统的自振频率 .....	15
5. 振动的合成与分解 .....	16
四、旋转机械的常见振动 .....	19
1. 按振动频率分 .....	20
2. 按振动发生的部位分 .....	20
3. 按振幅方位分 .....	20
4. 按振动原因分 .....	21
五、旋转机械测量和监视的基本参数 .....	21
1. 动态参数 .....	22
2. 静态参数 .....	24

3. 其它参数 .....	26
第二章 传感器 .....	27
一、电涡流传感器 .....	27
1. 电涡流传感器的工作原理 .....	27
2. 等效电路分析 .....	28
3. 传感器的结构 .....	29
4. 测量线路 .....	30
5. 主要性能和应用举例 .....	36
6. 传感器的安装 .....	39
7. 传感器的标定 .....	41
二、速度传感器 .....	43
1. 工作原理 .....	43
2. 结构形式 .....	45
3. 性能和应用 .....	47
4. 标定 .....	48
三、加速度传感器 .....	49
1. 原理简述 .....	49
2. 等效电路 .....	51
3. 结构形式 .....	54
4. 安装和使用 .....	56
5. 标定 .....	58
四、复合式传感器 .....	61
1. 工作原理 .....	61
2. 复合式传感器的结构 .....	62
3. 测量电路 .....	62
4. 复合式传感器的特性和应用 .....	63
五、温度传感器 .....	64
1. 热电偶温度传感器 .....	65
2. 特殊热电偶 .....	67



3. 热电阻温度传感器 .....	68
第三章 旋转机械振动监测常用仪器 .....	72
一、转速、振动和相位测量 .....	72
1. 转速测量原理 .....	72
2. 振动测量原理 .....	75
3. 相位测量 .....	83
二、旋转机械状态监测典型仪器 .....	84
1. DVF 2 型数字矢量滤波器 .....	84
2. HZ-8500 型监视仪 .....	89
三、磁带记录仪 .....	91
1. 概述 .....	91
2. 模拟磁带机的基本结构, 工作原理及其特点 .....	92
3. 模拟磁带机的选用 .....	97
四、信号分析仪 .....	100
1. 概述 .....	100
2. 信号分析仪的功能 .....	101
3. 信号分析仪的工作原理 .....	102
4. 常用信号分析仪的技术规格 .....	106
5. 信号分析仪的操作 .....	108
第四章 分析技术基础 .....	111
一、概述 .....	111
二、时间域的分析 .....	114
1. 波形分析 .....	115
2. 轨迹分析 .....	121
3. 键相器分析 .....	124
4. 直流分量及浮起量的问题 .....	127
三、幅值域分析 .....	129
四、时差域分析 .....	134
1. 自相关函数 .....	134

# X

2. 互相关函数 .....	136
五、频率分析 .....	139
1. 滤波方法 .....	141
2. 相关滤波技术 .....	154
3. 离散傅里叶变换 .....	158
4. 用快速傅里叶变换进行频率分析 .....	168
六、阶次比分析 .....	169
七、提高作谱质量的几个方法 .....	175
1. 功率谱分析 .....	175
2. 同步平均谱 .....	179
3. 有效分辨率及改进分析能力 .....	180
4. 细化分析 .....	182
5. 实时分析 .....	184
八、频谱的三维显示 .....	185
九、倒频谱分析 .....	189
十、频响函数的测量 .....	194
1. 频响函数的测量 .....	194
2. 相干函数的测量 .....	197
3. 相干功率谱 .....	198
十一、模态的分析与测量 .....	200
1. 模态与模态参数 .....	200
2. 模态测量方法 .....	201
3. 转轴在临界转速下的振型 .....	203
第五章 转子动力学基础理论 .....	206
一、转子振动的一般概念 .....	206
1. 转子的受力分析 .....	206
2. 转子的振动分析 .....	207
二、单质量转子在不同条件下的各种振动 .....	207
1. 单质量转子的振动方程 .....	207

2. 无阻尼的动不平衡的单质量转子 .....	209
3. 有阻尼的动不平衡的单质量转子 .....	210
4. 有阻尼有周期旋转外力作用的单质量转子 .....	213
5. 有阻尼的单质量转子的自激振动 .....	214
6. 有周期旋转力作用的弹性支承单质量转子的振动 .....	217
7. 弹性支承的单质量转子的自激振动 .....	221
三、转子的临界转速 .....	226
1. 单圆盘转子临界转速 .....	226
2. 多圆盘转子的临界频率 .....	228
3. 临界转速计算 .....	231
第六章 动平衡 .....	237
一、概述 .....	237
1. 转子的不平衡原因和危害 .....	237
2. 转子不平衡 .....	237
3. 静不平衡与动不平衡 .....	238
4. 刚性转子与挠性转子 .....	239
二、刚性转子的平衡 .....	240
1. 平衡原理 .....	240
2. 刚性转子的平衡方法 .....	242
三、挠性转子的动平衡 .....	246
1. 挠性转子的平衡特点 .....	246
2. 挠性转子的平衡方法 .....	247
3. 高速动平衡机 .....	250
四、不平衡引起振动的主要特征 .....	252
1. 刚性转子不平衡的主要特征 .....	252
2. 柔性转子不平衡的主要特征 .....	252
第七章 高速旋转机械中的滑动轴承 .....	254
一、流体动压润滑的基本原理 .....	254
1. 油楔承载机理 .....	254

## Ⅷ

2. 雷诺方程 .....	255
二、动压润滑向心轴承的静态特性 .....	263
1. 单油楔向心轴承的几何参数与静平衡曲线 .....	263
2. 单油楔向心轴承的短轴承近似分析 .....	265
三、流体动压润滑推力轴承 .....	272
1. 几何参数 .....	272
2. 动压推力轴承的静态特性 .....	273
四、油膜紊流对轴承静特性的影响 .....	276
五、滑动轴承油膜的动态特性 .....	277
1. 轴承油膜动态特性的定义 .....	278
2. 油膜动力及油膜力增量 .....	280
六、轴承油膜对转子振动特性的影响 .....	284
1. 油膜轴承支承的转子的振动特性 .....	284
2. 油膜振荡现象及其特性 .....	285
3. 油膜振荡机理的解说 .....	288
七、轴承油膜稳定性准则与失稳转速 .....	291
1. 系统的运动方程式 .....	292
2. 油膜稳定性准则 .....	294
3. 失稳转速的计算 .....	296
八、防止油膜振荡的措施 .....	301
1. 合理选择轴承结构与参数 .....	301
2. 采用稳定性好的轴承形式 .....	303
3. 利用外加阻尼支承 .....	303
九、高速滑动轴承的形式 .....	305
1. 高速轴承形式 .....	305
2. 各种形式轴承的性能比较 .....	311
第八章 其它原因引起的振动 .....	317
一、密封间隙中流体激起的振动 .....	317
1. 间隙激振的重要性 .....	317

2. 间隙激振的基本理论 .....	318
3. 间隙激振力的刚度系数 .....	326
4. 间隙振荡的识别 .....	328
5. 间隙振荡的消除 .....	329
二、压缩机系统的喘振 .....	330
1. 旋转失速 .....	330
2. 喘振 .....	332
3. 喘振与运行参数的关系 .....	332
4. 喘振的频率特性 .....	334
三、气流脉动 .....	334
1. 气流脉动的成因 .....	334
2. 频率特性 .....	335
四、摩擦引起的振动 .....	335
1. 转轴材料内摩擦引起的振动 .....	335
2. 叶轮与轴的紧配合造成的不稳定振动 .....	337
3. 转子动静接触时引起的摩擦 .....	339
五、转轴不对中 .....	342
六、转轴裂纹引起的振动及其诊断方法 .....	344
1. 裂纹类型及其影响 .....	345
2. 裂纹转子在重力作用下的响应 .....	347
3. 裂纹转子的不平衡响应 .....	349
4. 裂纹的监测及诊断 .....	351
七、倍频共振及分频振动 .....	352
1. 倍频共振 .....	352
2. 分频振动 .....	353
八、叶片及导叶 .....	356
九、滚动轴承 .....	358
1. 由滚动轴承元件的缺陷而造成的振动的频率特征 .....	360
2. 导致频率特性修改的因素 .....	361

3. 频谱举例 .....	365
4. 频谱图上的一些细节 .....	366
5. 多种缺陷的转速频率的旁瓣 .....	367
十、齿轮 .....	369
1. 齿轮啮合频率 .....	370
2. 自振频率 .....	371
3. 旁瓣或边带 .....	371
4. 齿轮故障的分析方法 .....	372
十一、振动分析与故障征兆 .....	372
十二、机组故障诊断实例 .....	381
1. 某化肥厂低压压缩机 K 1501 的振动 .....	381
2. 某电厂 TK-120 12 万 kW 机组振动 .....	385
3. 某化肥厂 55 万 t 尿素装置中合成气压缩机驱动透平的 振动 .....	386
4. 某电厂 3 号机的振动问题 .....	388
第九章 旋转机械状态监测与故障诊断系统 .....	391
一、旋转机械常用的监视仪表系统 .....	391
1. 主要功能与类型 .....	391
2. 监视仪表的基本组成及电路结构特点 .....	392
二、旋转机械监视仪系统的选用原则 .....	394
1. 旋转机械的分类 .....	394
2. 机械方面的因素 .....	395
3. 传感器方面的因素 .....	397
4. 旋转机械监视系统选择流程图 .....	401
5. 大型汽轮机组的保护系统选择 .....	403
三、汽轮机监视仪表系统 (TSI) 简介 .....	407
四、动态数据处理系统 .....	409
1. 动态数据处理系统的功能 .....	409
2. 动态数据处理系统的组成及作用 .....	410

五、旋转机械故障自动诊断系统	421
1. 旋转机械自动诊断系统的基本功能及组成部分	421
2. 旋转机械健康监控系统简介	423
附录	429
一、旋转机械状态监测与故障诊断常用术语	429
二、透平机组转轴的振动测量及其评价	448
1. 前言	448
2. 轴振动测量中的一些问题	449
3. 轴振动的力学	450
4. 轴振动的测量	455
三、电站透平转轴振动的测量和评价	459
1. 前言	459
2. 应用范围	460
3. 测量须知	461
4. 特有的振动现象	461
参考文献	471

# 第一章 概 述

## 一、引 言

机器的振动总是伴随着机器的运转而存在的。即使是机器在最佳的运行状态，由于很微小的缺陷，也将产生某些振动。例如，飞机在飞行时机翼的振动，火车在铁轨上行驶时产生的振动和噪声，机床在切削时刀具的振动等。同样，旋转机械，包括蒸汽透平、燃气透平、水力透平、压缩机、鼓风机、离心机、发电机、泵及各种齿轮减速（增速）器等在运行时，也必然会产生各种振动和噪声。

### 1. 旋转机械的基本构成及特点

我们所说的旋转机械的主要构成部件是指转子、支承转子的轴承、定子或机器壳体、联轴节，此外还有齿轮传动件、叶轮叶片及密封等。转速范围一般为几千  $r/min$  至几十万  $r/min$ ，所以这类机组通常称为高速旋转机械。又由于有的机组结构复杂、功率大，如30万 kW 汽轮发电机组，所以又称为大型高速旋转机械。当然也有低转速的水轮机组，其转速只有  $100 r/min$ 。

由于转子、轴承、壳体、联轴节、密封和基础等部分的结构及加工和安装方面的缺陷，使机器在运行时引起振动，过大的振动又往往是机器破坏的主要原因，所以对旋转机械的振动测量、监视和分析是非常重要的。又由于振动这个参数比起其它状态参数，例如润滑油或内部流体的温度、压力、流量或电机的电流等更能直接地、快速准确地反映机组



运行状态，即正常状态还是异常状态，所以振动一般作为对机组状态进行诊断的主要依据。

图1-1为燃气透平发电机组结构示意图，图中标明了振动幅值和频率的测点。机组是由燃气透平、齿轮箱和发电机三个部分所组成，每个部分又由转轴、轴承和机壳构成，并通过联轴节连接成一个整体。图中的字母代表相应的测点位置，其中  $A_1$ 、 $A_2$  为发电机轴， $B_1$ 、 $B_2$  为联轴节， $C_1$ 、 $C_2$  为齿轮轴， $D_1$ 、 $D_2$  为小齿轮轴， $E_1$ 、 $E_2$  为轴承支架。

通过检测仪器测出这些部位的振幅和频率，便能得到该机组运行状态的主要信息，根据这些信息来判断该机组运行是否正常。

## 2. 振动监测与故障诊断技术的发展概况

机组的振动监测与故障诊断技术和其它学科一样，也是有其发展过程的。在第二次世界大战以前，对机器振动问题的

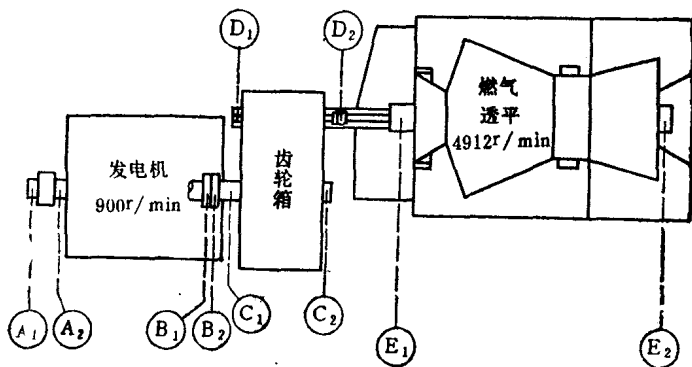


图1-1 燃气透平发电机组结构示意图

$A_1$ 、 $A_2$ —发电机轴  $B_1$ 、 $B_2$ —联轴节  $C_1$ 、 $C_2$ —齿轮轴

$D_1$ 、 $D_2$ —小齿轮轴  $E_1$ 、 $E_2$ —轴承支架