

石油化工仪表自动化培训教材



旋转机械状态监测及控制系统

《石油化工仪表自动化培训教材》编写组 编

中国石化出版社

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

内 容 提 要

本书是《石油化工仪表自动化培训教材》的分册，主要介绍旋转机械状态监测及控制系统的基础知识。以 Bently 公司的 3300 和 3500 为例，讲述了旋转机械状态监测的方法、原理及应用；以 Woodward 公司的 505 和 505E 为例，讲述了汽轮机的自动控制系统及操作；以 Tricon 公司的 ITCC 为例，讲述了机组系统的集中控制及实践。

该书由企业从事自动化操作与管理的技术人员执笔，实用性强，通俗易懂，可作为企业自动化专业的培训教材，亦可供自动化设备与装置技术人员和操作人员参考使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

旋转机械状态监测及控制系统 / 《石油化工仪表自动化
培训教材》编写组编. —北京: 中国石化出版社, 2009
石油化工仪表自动化培训教材
ISBN 978-7-5114-0054-3

I. 旋… II. 石… III. ①转动机构-监测-技术培训-
教材 ②转动机构-自动控制系统-技术培训-教材
IV. TH133 TH17

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 145805 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.cn

河北天普润印刷厂印刷

全国各地新华书店经销

*

787 × 1092 毫米 16 开本 13.5 印张 339 千字

2010 年 5 月第 1 版 2010 年 5 月第 1 次印刷

定价: 35.00 元

前 言

随着石油化工生产装置的日趋大型化、连续化，企业对生产过程参数自动检测和控制在要求越来越高。在计算机技术广泛应用到检测仪表和自动控制系统后，检测仪表日趋智能化，控制系统向着冗余容错技术发展，现场总线技术已经在大型石油化工装置上得到成功应用。石化企业为炼油改造、乙烯二轮改造、资源优化等项目的实施，新增了一大批新型的检测仪表和控制系统，急需提高仪表专业技术人员和检维修人员的技术素质，以适应生产装置自动化程度不断提高的需求，现有的教材已经不能适应现实需求。

为提高仪表工程技术人员先进控制系统的应用能力，提高仪表维护人员的维护水平和故障处理能力，我们组织了《石油化工仪表自动化培训教材》的编写工作。该系列教材共分九册：《自动控制基础理论》、《测量仪表》、《调节阀与阀门定位器》、《可编程序控制器》、《集散控制系统及现场总线》、《安全仪表控制系统(SIS)》、《旋转机械状态监测及控制系统》、《在线分析仪表》和《仪表及控制系统故障案例》。在教材中，除简要介绍了自动检测、自动控制基础知识外，重点讲述了常用检测仪表、在线分析仪表、控制系统(DCS、SIS、PLC、ITCC)的原理、使用方法和日常维护知识，并收集了近年来发生的仪表及控制系统故障案例与技术分析。该教材既可作为各炼化企业仪表专业人员培训教材，亦可供仪表专业工程技术人员和现场维护人员参考使用。

本教材编写组由齐鲁石化公司设备管理部、人力资源部、培训中心和各生产厂的管理人员、教师和工程技术人员组成，参与策划及审定的人员有王玉岗、李建民、潘慧、张会国、张道强、赵业文、王昌德、慕晓红、孙庆玉、卞洪良、苏耀东、赵林、生显林、张慧、徐磊、徐纪恩、张景春等，另有齐鲁石化公司各单位共计30余人也参加了编写工作。同时，还得到了各单位和车间的大力支持，在此一并表示衷心的感谢。

《旋转机械状态监测及控制系统》主要介绍旋转机械状态监测及控制系统的基础知识。以Bentley公司的3300和3500为例讲述了旋转机械状态检测的方法、原理及应用；以Woodward公司的505和505E为例，讲述了汽轮机的自动控制系统、功能及操作；以Tricon公司的ITCC为例，讲述了机组系统的集中控制及实践。

参加本册编写的有焦守平、李桂芝、王敏、徐强、王维霄、王昌德、慕晓红等。

由于水平有限，不足及错误之处在所难免，欢迎读者批评指正。

目 录

第一篇 旋转机械状态监测及控制系统概述

第一章 旋转机械状态监测的基本概念	(1)
第一节 振动测量	(1)
第二节 位置测量	(4)
第三节 其他参量测量	(6)
第二章 传感器系统	(7)
第一节 主要性能指标	(7)
第二节 电涡流非接触式传感器	(8)
第三章 旋转机械状态控制的基本原理	(25)
第一节 转速(负荷)控制	(25)
第二节 防喘振控制	(27)

第二篇 Bently 状态监测系统

第一章 3300 状态监测系统	(32)
第一节 系统组成及作用	(32)
第二节 故障判断和处理方法	(36)
第三节 安装注意事项及日常维护	(38)
第二章 3500 状态监测系统	(39)
第一节 硬件	(39)
第二节 软件使用方法	(39)
第三节 探头安装	(50)
第四节 通讯架构	(53)

第三篇 Woodward 505&505E 系统

第一章 控制器	(55)
第一节 控制器的控制功能	(55)
第二节 控制器的功能键	(64)
第二章 电气连接与输入输出	(67)
第一节 电气连接与要求	(67)
第二节 输入与输出	(71)
第三章 功能配置	(74)
第一节 比率/限制器配置	(74)
第二节 转速优先与抽/补汽优先	(79)

第三节	透平启动	(81)
第四节	透平控制	(88)
第四章	编程配置	(118)
第一节	程序基本结构说明	(118)
第二节	编程与组态	(119)
第三节	编程组态的错误信息	(158)
第四节	阀门/执行机构标定与试验	(160)
附录	505E 编程模式工作表	(164)

第四篇 机组控制系统

第一章	硬件组成及工作原理	(174)
第一节	系统配置	(175)
第二节	系统结构和工作原理	(180)
第三节	卡件结构和工作原理	(183)
第四节	安装	(188)
第五节	维护与故障处理	(190)
第二章	软件	(198)
第一节	编程软件 Tristation MSW	(198)
第二节	Tristation 1131	(199)
第三章	系统的功能	(201)
第一节	防喘振控制	(201)
第二节	速度控制	(206)
第三节	TS3000 系统(ITCC)的应用	(208)

第一篇 旋转机械状态 监测及控制系统概述

第一章 旋转机械状态监测的基本概念

旋转机械状态监测，是指利用各种仪器和仪表，对反映旋转机械运动状态的参数进行测量和监视，从而了解其运动状态，保证安全运行，提高设备的科学管理水平。

目前采用常规仪表固定安装，实施在线监测，其状态参数主要有轴的径向振动、轴向位移、机器转速、键相、轴承温度等。

第一节 振 动 测 量

大型旋转机械振动测量具有其特殊性，测量的主要对象是一个转动部件，即转子或转轴，以及转动体与静止体之间的相对关系等。所谓振动测量就是机械相对于某一已知参考系的振动的测量。转轴、汽封、轴承箱以及机壳均为最受关注的机械部件。准确地对这些部件进行测量和监测可以对机器的机械状态有一个全面的了解。

一、振幅

一般来说，振幅是振动强度的标志，它可用来监测机器运行的平稳程度。非接触式电涡流探头具有对转轴直接进行测量的能力，因此使用非接触式电涡流探头能极大地帮助我们得到有关振动幅度的更精确数据。以往我们仅能对机壳进行测量，机壳的振动幅度是可得到的标志振动强度的惟一参量。尽管进行机壳测量，能够表明某些机器故障的存在，但对机器进行全面保护，仅进行机壳测量是不够的。例如，有人在一台5万千瓦汽轮发电机组的高压缸轴承（椭圆瓦油膜轴承）部位的振动测量中，观察到轴承座的振动只有峰-峰振幅0.03~0.04mm，但轴颈相对于瓦座的峰-峰振幅已达到0.4~0.5mm。如果局限于轴承座的振动数据，那么这台机组的振动是合格的，没有超过0.05mm及格的标准。但是经打开轴承检查，发现瓦的局部位置已被磨损。一般说来，油膜轴承（圆瓦、椭圆瓦、可倾瓦等）具有较大的轴承间隙，因此轴颈的相对振动比之轴承座的振动有显著的差别。特别是当支承系统（轴承座、箱体及基础等）的刚度比较硬（或者说机械阻抗较大）时，轴振动可以比轴承座的振动大几倍到十几倍。上述5万千瓦机组的例子，测得轴振动轴承座振动大10倍以上。当然在某些20万千瓦以上的大型汽轮机，由于支承系统的刚度相对较弱，二者的差别相对小一些。对于滚动轴承而言，轴颈与轴承之间只有极小的间隙，因此轴的相对振动量值较小，但是当滚动轴承出现严重磨损或损坏时，这一振动量值明显增加。

从目前的情况来看，绝大部分大型旋转机械，都采用非接触式电涡流探头直接测量轴（相对于轴承）的振动振幅。通常，一台正常运行的机器有一个稳定的、可接受的低振幅值。

因此，任何振幅读数的变化都反映机器状态的改变。为了考查机器的特殊运行状态，我们应该考虑机器振幅的增加或减少。

二、频率

振动频率(周/分)通常表示为机器转速的倍数，其原因主要是由于机器的振动频率趋向于机器转速的整数或分数倍。这样，就给我们提供了表达振动频率的一种方便形式。通过这种方式，可将所有振动频率表示为周/分(r/min)或 Hz，就是表示为机器转速的一倍、两倍或机器转速的 43% 等。对频率分析重要性的认识主要来自于机壳测量。进行机壳测量时，振幅和频率是仅有的可以用来测量和分析的主要参量。有些机器故障通常在某些特定的频率下发生，这样就有助于区分这些故障的类型。另外，必须认识到，频率和故障的关系并不是相互对应的。也就是说，某一特定频率的振动通常和多种机器故障相联系，在振动频率和机器故障之间并不存在一一对应的关系，不应简单地企图将某一特定频率和某一特殊机器故障直接联系起来。在对旋转机械进行分析时，频率是重要的参量，有助于对机器故障进行分类。但是，它仅是一种参量。如果要想得到正确的结果，还必须对所有参量进行分析。

表示频率的通常方式有：

1X = 1 × r/min 表示振动频率和机器的转速相同；

2X = 2 × r/min 表示振动频率是机器转速的两倍；

1/2X = 1/2 × r/min 表示振动频率是机器转速的一半；

0.43X = 0.43 × r/min 表示振动频率是机器转速的 43%。

转子的振动问题按机械振动的性质大体上可分为三类：

第一类属于强迫振动问题。是指由外来确定的扰动力引起的振动问题，而振动本身并不反过来影响扰动力。比如，由于质量不平衡引起的强迫振动，发电机转子不均匀磁拉力而引起的强迫振动等等。强迫振动问题的特点在于强迫振动的频率总是等于扰动力频率。由质量不平衡力引起的强迫振动其频率恒等于转速；由 3000r/min 二级发电机不均匀磁拉力引起的强迫振动，其频率为 6000r/min，即 100Hz。

第二类属于自激振动问题。自激振动的引起归于转子-支承系统中存在某一机械能量的反馈环节。这一反馈环节使转子从转动中获取能量，并转变为某一特定频率下的横向振动能量(一般不等于转速)，而这一横向振动又通过反馈环节进一步从转动中取得能量，从而加剧了横向振动，直至获取的能量等于消耗于阻尼的能量，则振动稳定在某一极限环上。实际上，有时自激振动未到达极限环之前，转子已不允许再运转或已引起破坏。这些在转子-支承系统中出现的自激振动现象主要由于油膜半速涡动和油膜振荡；由于转子的内阻而引起的不稳定自激振动；由于动静部分间的干摩擦而引起的自激振动，以及由于不均匀蒸汽泄漏所引起的气隙振荡(蒸汽轮机)等等。

第三类属于非定常强迫振动。这一类问题在性质上属于强迫振动，因为振动仍然是由外来扰动力所引起的，而且与扰动力具有相同的频率。但不同的是振动本身又反过来影响扰动力的大小与相位。这样，它虽属强迫振动，但强迫振动的幅值与相位是在变化的。比如，转子轴上某一局部出现不均匀热变形，它相当于给转子增添了不平稳质量，从而使强迫振动的幅值和相位都发生了变化，而当强迫振动的幅值和相位发生变化时，反过来又影响转子轴上局部不均匀热变形的部位。这样，表现出来的强迫振动，其幅值和相位都在连续不断地变化。这里，暂且将这类强迫振动称之为不定常强迫振动，并单列为一类。

三、相角

长期以来在研究旋转机械时，人们并不把振动相角看成是一个重要参量，但实际上相角是很重要的，相角测量可用来描述某一特定时刻机器转子的位置。一个好的相角测量系统能够确定每一传感器信号上对应的机器转子的“高点”相对转子上某一固定点的位置。通过确定机器转子上“高点”的位置，就可能确定机器的平衡状态，机器转子平衡状态的改变将引起高点的变化，这种变化通过相角变化而显示出来。在平衡机器的转子时，相角测量非常重要，在分析机器的某一特殊故障时，相角测量也可能非常重要。通过测定机器转子的相角数据，可以得到机器体系运行状态的宝贵资料。

测量相角的最准确可靠的方法是利用一个键相器(转轴参考系)。使用一个非接触式电涡流探头或一个光电探测器，就能得到这一键相器。

在使用键相器作为相角参考标志时，可定义相角为键相器脉冲和振动的第一正峰之间的度数。第一正峰相应于机器转子上高点位置。

为了准确测定相角，需要使用滤波器将输入信号过滤为频率和转速相同的信号，然后进行准确测量，并在振动输入波形图上显示键相器和第一正峰之间的度数。用来滤波的滤波器必须消除输入波形中一切由噪声和谐波引入的误差，也必须消除由滤波器本身引入的误差。

目前，不论是在机器平衡过程中，还是在旋转机器的分析诊断过程中，相角作为一个重要参量正在被人们迅速接受。电力生产部门的大型汽轮机组件中常常包括测量相角的仪器。对于驱动机器的蒸汽涡轮机和燃气涡轮机、压缩机、气泵和风扇等，可利用便携式仪器对相角进行测量。

四、振动形式

对振动形式的观测与研究是分析振动数据的最重要的方法。通过对振动形式的观测，能直观地了解某机器的运行状态。上面讨论的振幅、频率、相角等三种参数都是可测量的参数，并能在仪表上指示或显示出来，而振动形式是显示在示波器上的原始振动波形。

振动形式可以分为两种：时基形式是把振动信号输入到示波器，并以时基模式显示在荧光屏上，其振动信号为正弦波形，它是转轴的位置与示波器上水平时间轴的关系曲线；而轴心轨迹形式是由两个互成 90° 的非接触式传感器感受的振动信号，分别输入到示波器的两个通道内，并以X-Y模式显示在荧光屏上。在这种模式中，所显示的是对应于两传感器的轴截面的中心线的运动。如果传感器安装在轴承上，则轴心轨迹是轴的中心线相对于轴承的运动关系。

这两种振动形式的分析对维修工程师是很有用的。通过观测时基振动形式，能够确定基本的振幅、频率和相角；通过观测轴心轨迹，能够了解轴的实际运动情况。

五、振型

所谓振型，是转轴在一定的转速下沿轴向的一种变形。测量振型的方法是沿转轴的轴向每隔一定间距放置一组X-Y(互成 90°)传感器，分别测得相应转轴截面的中心线振动情况。综合所测得的这些数据便能得到转轴的振型。振型有助于估算转子与固定部件之间的内部间隙，并能估算出转轴上“节点”的位置。

在分析一台机器的振动(动态运行)状态时，需要用到上述所有参量。通过这些参量，能够在动力学的基础上了解“机器的运行状态”。上面提到的振幅、频率、相角、振动形式和振型不仅适用于机器转轴或转子的测量，而且也适用于对机器外壳的测量。对机器进行全面的系统分析非常重要，通过它，不仅能够知道机器转子的动力学状态，而且还能知道机器

外壳的动力学状态。通过对机器的非转动部件进行测量，可以判断这样一些状态，如机器的构件共振或管道共振；有孔的或有裂缝的机座；外部振动源信号的输入等。因此，在对机器的运动状态进行全面分析时，机器外壳的测量也十分重要。

在确定机器的全面运行状态时，机器转轴或转子振动和机器外壳振动之间的比较也是一个重要参量。如前所述，由于存在各种不同的参量，因此机器转轴和外壳之间的变换阻抗可能大幅度变化。已经证明，在解决某一具体的机器故障问题时，比较机器外壳振动和转轴振动之间的振幅和频率关系非常有用。

如果不对相对测量和绝对测量之间的关系进行讨论，那么任何有关动态运动(振动)的分析都不完整。一个安装在轴承盖或机壳上的非接触式电涡流探头，能够用来进行相对运动测量，这种测量可以描述机器转轴和安装电涡流探头的机壳之间的相对运动。已经证明，在对大多数机器进行连续监测时，相对运动测量令人满意。但是，对于另一部分机器，在进行连续监测时，绝对运动测量则变得很重要。通过使用一个复合式探头，就能够进行绝对运动测量。复合式探头由一个电涡流探头和一个速度传感器组成。

电涡流探头用来测量机器转轴相对于机壳的运动。速度传感器安装在和电涡流探头同一平面内的机壳上，可用来测量机壳的绝对振动。来自复合探头的两个传感器的输入信号的矢量和能够给出转轴的绝对运动状态。采用这种方法，可以得到四种信息：

- (1) 机器转轴相对机壳的运动；
- (2) 机壳相对某一惯性参考系的绝对运动；
- (3) 转轴相对于某一惯性参考系的绝对运动；
- (4) 利用电涡流探头传感器给出的直流输出信号可测出转轴在轴承中的径向位置。

对于具有活动机座的机器或机壳强烈振动的机器，绝对运动测量显得特别重要。X-Y(二平面)监测对于分析大多数类型的机器，都具有重要意义，因为在某一具体的轴承部位，垂直方向和水平方向的振动可能完全不同。例如，在某一轴承的两个不同平面上，可能存在不同的振幅和频率，绝大多数机器分析情况已经证明了这一点。因此，在径向轴承位置上安装X-Y探头是十分必要的。

第二节 位置测量

在分析机器总的运行情况时，还应测量和估计另外一些参量，这些参量属于位置测量的范围。对某些特殊机器及其故障进行监测分析时，这些参量可能特别重要。下面我们将对这类位置参量进行讨论。

一、轴在轴承内的径向位置(或称偏心位置)

所谓径向位置，是指转子在轴承中的径向平均位置。在转轴没有内部和外部负荷的正常运转情况下，大多数转轴会在油压阻尼作用下，在设计确定的位置浮动。然而，一旦机器承受一定的外部或内部的预加负荷(稳态力)，轴承内的轴颈就会出现偏心。这种偏心是测量轴承磨损，预加负荷状态(例如不对中)的一种指示。

定期测量偏心位置是绝对必要的。因为在出现重大负荷情况下，偏心较大，振幅无法增加，在这种情况下当振幅没有报警的情况下，可能由于偏心太大而发生故障。因此，必须及时地检查偏心位置，才能对故障作出早期预报。

在机器启动期间，也应该密切注意偏心位置。机器在启动时，人们一般预计由于油流的

作用，转轴会从轴承底部逐渐向轴承中心处升起。一般认为，油膜厚度约为 $1\mu\text{m}$ ，对许多轴承的观察表明，油膜厚度常常约为转轴预加负荷方向的轴承间隙的 $1/3$ 。

偏心位置的测量是通过安装在轴承处的监测径向振动的同一个传感器进行的，其输出信号的直流成分即代表偏心位置（径向间隙）。

因为偏心位置随机器负荷，轴线对中情况而改变，所以电涡流传感器要有足够大的线性范围，使偏心位置的改变不致使转轴越出传感器的测量范围。对大多数机器来说，定期检查偏心位置对预测性维修是足够的。但是，对于在中心线偏移或其他的预负荷条件下，则可能导致故障，必须密切地监测，以致于需要连续监测。收集整理机组的“冷”偏心位置和“热”偏心位置的数据，建立一个参考系统，对以后比较偏心位置是很重要的。

二、轴向位置

轴向位置测量可用来描述止推法兰和止推轴承之间的相对位置。对于一台离心压缩机或一台蒸汽轮机来说，轴向位置可能是最重要的测量参量。轴向位置监测的主要目的是为了保证消除机器转子和定子之间的轴向摩擦。轴向止推轴承的故障可能是最严重的故障，因此应该认真地进行监测，以防止发生这种类型的故障，保护机器的安全。

通常至少应该安装一个，最好是两个电涡流探头，以便更可靠地测量轴向位置，从而对机器起到保护作用。

利用电涡流探头进行轴向位置测量的另一优点是，轴向振动参量数据能够从同一电涡流探头上测出。尽管轴向振动对于离心类机器设备来说不需要进行连续监测，但是在分析诊断某些特殊机器故障情况时却非常有用。如果在分析一台特殊机器时，监测轴向振动，那么观测表面必须光滑并垂直于转子中心线。这样做有助于减少对探头输出的影响，并提供准确的轴向振动数据。

三、偏心度峰 - 峰值

偏心度峰 - 峰值是对转轴在静态时弯曲的测量。在发电用的大型蒸汽透平和某些工业用的汽轮机中，经常需要测量偏心度峰 - 峰值。当转轴在启动时，弯曲量可以用电涡流传感器测量的直流峰 - 峰值信号来表示。当峰 - 峰幅值处于允许的低水平时，机器可以启动，而无须顾虑因残余弯曲及相应的不平衡引起的密封件与转轴之间的摩擦影响。慢转速偏心度最好由安装在远离轴承的传感器来测量，以测得最大的弯曲偏差。

四、差胀

对发电用大型蒸汽透平等机组，启动时，机壳与转子必须以同样的比率受热膨胀。如果转子与机壳受热膨胀的比率不同，就可能发生轴向摩擦而使机器受到损害。为了测量差胀，要把电涡流传感器安装在机器末端与止推轴承相反的一侧，便于观测到机壳和转子之间的相对膨胀。测量差胀的传感器的线性范围一般为 25mm 。对某些大型机组来说，要求传感器的线性范围为 50mm 或 75mm 。当然，也有小于 25mm 的。

五、机壳膨胀

对某些大型机组，除了测量差胀以外，还要进行机壳膨胀的测量。这种机壳膨胀测量通常是由安装在机壳外部，以地基为参考基准的线性可变差动变压器 (LVDT) 进行的。

知道了机壳膨胀和差胀，就可以确定转子和机壳的膨胀率。如果机壳膨胀不正常，机壳的“滑脚”就会被卡住。

六、对中

对一些机组来说，各机壳之间的对中性是有一定要求的。不对中是经常出现的一种故障

状态，特别是在压缩机机组和燃气轮机驱动泵机组的安装过程中常常发生这种故障。通常，利用机组中各种不同机器的膨胀资料，经过计算画出一份安装对中图纸，作为一种粗略的参考，最后用仪器来确定机器的热运转状态。

在热对中测量技术方面，可以利用类似于大地测量用的光学仪器或激光技术来测量不同机壳转轴之间的相对位置变化。

第三节 其他参量测量

一、转速测量

在对机械运行状态分析中找出振动和转速之间的关系是很重要的。在设计离心类机器时，它的转速运行范围应避开机器的平衡共振，并且使其运行转速不会激发机器的这些特殊共振。机器启动时的数据在确定平衡共振时是重要的，这些数据可表示为振动幅度和相角与机器转速之间的关系曲线，在描绘这种曲线和寻找这些参量之间的关系时，可以很容易地确定机器的平衡共振(临界共振)。

二、温度测量

在旋转机械运行状态的分析中，温度也是最常用和最重要的参量之一。比如，径向和轴向轴承的巴氏合金衬的温度测量正变得越来越重要。找出温度数据和振动测量结果以及(或者)温度数据和位置测量结果之间的关系有助于发现机器可能存在的故障。

第二章 传感器系统

传感器是将机械振动量转换为电量的机电转换装置，它的性能及传感器的选用直接影响整个测试系统的功能。要了解机器的运行情况是否正常，要对机器的状态进行监测，就需要了解传感器。在旋转机械测试装置中，用于测量振动和位移的传感器主要有三种：趋近式电涡流非接触式传感器、惯性式速度传感器、压电式加速度传感器等。

趋近式电涡流传感器系统，将机械振动转换为一个正比于振动位移的电信号，可反映位置距离发生的变化。趋近式电涡流传感器系统可直接测量转轴在径向和轴向两个平面的运动。

速度传感器系统，将机械振动转换为正比于振动速度的电信号，如速度即为位移相对于时间变化的速率。这种传感器主要用来测量基座或壳体的振动。

压电式加速度传感器系统，与普通的速度传感器系统进行同样的测量，并提供同样类型的输出。惟一不同的是速度传感器由磁铁、弹簧、线圈系统组成，而压电式加速度传感器则由质量块、弹簧、压电陶瓷系统组成。

目前，最为常用的是趋近式电涡流传感器系统。

传感器的选用应从两方面考虑：一方面是传感器的性能；另一方面是测试对象的要求。只有这两方面的结合，才能选择出满足测试要求的传感器。

第一节 主要性能指标

一、灵敏度

灵敏度是指沿传感器灵敏度轴方向，对应于每单位正弦变化机械量输入时，测振仪在稳态响应时的同频率正弦电压输出。若输入机械量为 $x = X e^{i\omega t}$ ；测振仪对应的电压输出为 $u = U e^{i(\omega t - \varphi)}$ 。

则测振仪的灵敏度为
$$S = U/X$$

其中， X 可以是任何机械量的振动位移、振动速度或振动加速度。

这里，灵敏度 S 只考虑输入输出幅值之比，未考虑输出与输入在相位上的差别，这一差别另立相移指标说明。如果在某一指定频带范围内，灵敏度 S 不随输入的频率而变，则称在该频带范围内无频率失真，否则称之为频率失真。一般说来，灵敏度 S 应是频率的函数，所以需指明所给的灵敏度适用哪一段频带范围，或哪一个频率下的灵敏度。对于灵敏度变化超过所规定的准确度范围而仍需使用的频率段，应给出修正曲线。当输入的频率为零，即静态输入，测振仪仍有相应的输出电压，则称该测振仪具有零频率响应或静态响应。对于具有静态响应的测振仪可以用于测量静态机械量，比如静位移、恒加速度等，而且可以用静态标定法校准其灵敏度。

二、频率范围

频率范围是指测振仪的灵敏度不超出某一规定精度范围时输入机械量的频率范围。如果相移必须考虑的话，则频率范围应限于相移角不超过某一规定角度之内的频率范围。在旋转

机械上，振动的频率可能很宽，从轴心的静偏移直至频率高达十几 kHz 的气流脉冲和振动噪声，这是很宽频带内的振动，不是某一种传感器所能单独承担的，因此必须根据研究测试的部位和要求选用对应频带宽度的传感器。

三、分辨率

分辨率是指输出电压 U 的变化量 Δu 可以分辨时，输入机械量的最小变化量 Δx 。

四、最低与最高可测振级

最低可测振级是指输出电压信号，信号电平与噪声电平之比不低于某一指定数时的最小输入机械量。有的公司规定这一比值为 $S/N = 5\text{dB}$ ，即信号的总有效值 u_s 与噪声的总有效值 u_N 之比为 $u_s/u_N = 1.78$ 或 $u_N/u_s = 0.56$ 。再小的信噪比，意味着信号电压将“淹没”在噪声信号之中而难以分辨。最小可测振级有时是由于传感器存在死区而引起的。

最高可测振级是指传感器容许输入的最大机械振动量。能得到这一容许的最大输入机械量在不同传感器上有不同的原因：

- (1) 由于灵敏度变化越出规定的范围(但不损坏传感器)；
- (2) 由于传感器本身行程所限；
- (3) 由于传感器机械结构、强度所限。

五、相移

相移是指输出电压信号对正弦输入机械量的相位差。设在稳态响应时，输入机械量与输出电压的复数幅值为 X 及 U ，则有 $U = S_c^{-\psi} X$

上式表示输出正弦电压信号在相位上落后于输入机械量 ψ 角。一般理想测振仪的相移应该是 0° 或 180° ，因为 180° 的相移意味着输出信号反方向，对测试角度不产生任何影响。但实际的测振仪总是会在某些频率范围内存在或多或少的相移，有的甚至是很大的。例如对于惯性式速度传感器，一般商用测振仪多数只给灵敏度指标，而不给相移指标，但这不等于说没有相移。众所周知，在旋转机械振动测试中，相角的测定是非常重要的测试内容。例如，在转子-支承系统的阻抗测试中或动平衡试验中，都要求准确测定振动的相位角。如果测振仪本身有显著的相移而未加以修正，则相角的测定是不可靠的。

六、传感器的接收形式

是指传感器的机械接收形式，一般有惯性式和相对式两种。惯性式传感器总是固定在被测物体上，或通过某种机械方式使振动传递给传感器外壳，一般用于测量物体相对于静止坐标系的绝对振动，例如测量轴承座的振动；相对式传感器必须有一个参考点以固定传感器，但与被测物的关系则有接触式与不接触式之分，一般用于测量物体相对于参考点的相对振动，例如测量转轴相对于轴承座的振动。

七、环境条件

很多旋转机械在热状态下工作，有些部件具有较高的温度。因此，必须考虑传感器在该温度下能否正常工作，对灵敏度有何影响。另外，还应考虑强电磁场(例如发电机定子端部)、强声场、化学气体等对传感器在测量上的影响。

第二节 电涡流非接触式传感器

非接触式电涡流传感器适于测量转子对轴承的相对位移(包括轴心平均位置及振动位移)。由于转轴表面具有很大的切线速度，因此用接触式传感器难以实现振动的接收。比

如，大型汽轮发电机组的发电机转子，轴颈直径为 300 ~ 400mm，转速为 3000r/min，因此其轴颈表面的线速度达 47 ~ 62m/s，至于某些高速离心式压缩机，其转子轴表面的线速度可能更高。涡流传感器是利用转轴表面与传感器探头端部间的间隙变化来测量振动，从而避免了与转轴表面的直接接触。涡流式位移传感器另一特点是具有零频率响应，因此它不仅可测出转轴轴心振动位移，而且还可测出转轴轴心的静态位置的偏离，这对判断在运转过程中轴心是否处于正常的偏心位置是很有用处的。

概括起来，电涡流传感器的特点主要有：

- (1) 非接触式测量；
- (2) 测量范围宽；
- (3) 动态响应好；
- (4) 能连续长期可靠地工作；
- (5) 长线传输抗干扰能力强；
- (6) 能在油、气及某些化学成分介质中工作；
- (7) 能直接与计算机 A/D 接口相连；
- (8) 可直接测量轴相对于机壳的振动；
- (9) 可测量轴的位置或机械的其他部分与探头的相对位置。

由于电涡流传感器具有上述特点，因而被广泛用于石油、化工、冶炼、机械、电力、大专院校、航空航天等部门，作为旋转机械的轴向位移、轴的径向振动、轴转速的在线检测和安全监控，也可用于转子动力学研究、零件尺寸检测等方面。

电涡流非接触式传感器由探头、延伸电缆、前置器等三部分组成，如图 1-2-1 所示。

一般从探头到前置器总的电缆长度有两种规格，分别为 5m 和 9m。这两种都可以由探头所带电缆加上延伸电缆组成；也可以由探头本身就带有 5m 或 9m 长电缆，这样就不再需要延伸电缆，因而整个传感器组成就只有两部分了。图 1-2-2 为探头与被测物的相对位置图，探头端部与被测物表面之间有一间隙，二者不能接触，这是电涡流探头的特点之一。

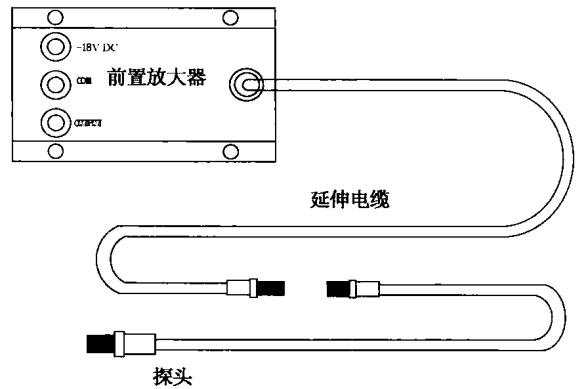


图 1-2-1 电涡流传感器的组成

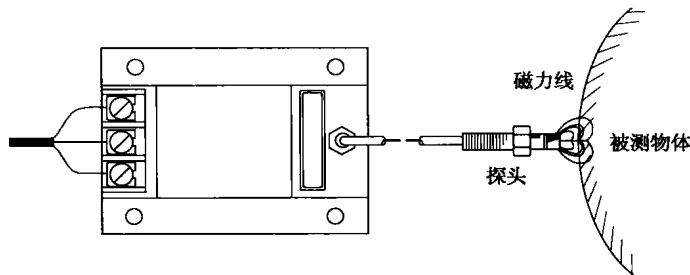


图 1-2-2 电涡流与被测物体的相对位置

一、电涡流传感器的工作原理

电涡流传感器是通过传感器端部线圈与被测物体(导体)间的间隙变化来测量物体的

振动和静位移的。它与被测物之间没有直接的接触，特别适合测量具有表面线速度的转子的振动。电涡流传感器具有很宽的使用频率范围，从0~10kHz。因此，它不仅可以测量频率较高的振动位移，而且可以测量转子的平静位移，比如轴心的偏心率。虽然有好几种其他变换原理的传感器也可进行非接触式测量，例如变电容式和变电感式等，但相比之下，电涡流传感器具有线性范围宽（一般是端部线圈直径的一半），在线性范围内灵敏度不随初始间隙而变等优点。因此，目前被广泛应用于转子的振动监测。

在传感器的端部有一线圈，线圈通以频率较高（一般为1~2MHz）的交变电压。如图1-2-3所示，当线圈平面靠近某一导体面时，由于线圈磁通链穿过导体，使导体的表面层感应出一涡流*i_e*，而这一涡流*i_e*所形成的磁通链*ψ_e*又穿过原线圈。这样，原线圈与涡流“线圈”形成了有一定耦合的互感。耦合系数的大小又与二者之间的距离及导体的材料有关。其等效电路图如图1-2-4(a)所示。

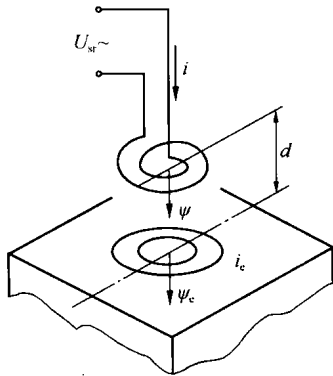


图1-2-3 电涡流传感器原理图

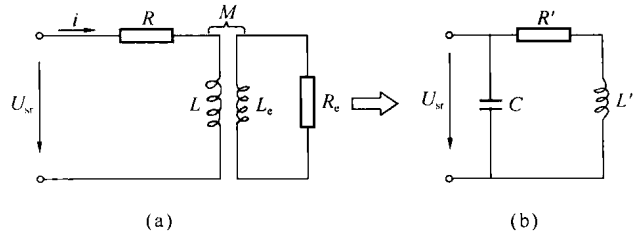


图1-2-4 电涡流传感器的等效电路图

图中*R*和*L*为原线圈的电阻与自感；*R_e*和*L_e*为涡流的电阻与自感；*M*为互感系数。当所加的*U_{sr}*的频率*f_{sr}*很高时，有

$$2\pi f_{sr} \cdot L \gg R_e$$

可以证明图1-2-4(b)中

$$R' = R + \frac{L}{L_e} K^2 R_e$$

$$L' = L(1 - K^2)$$

其中

$$K = \frac{M}{\sqrt{LL_e}}$$

*K*称为耦合系数。当导体材料给定时，耦合系数*K*与距离*d*有关，亦即*K*是*d*的函数，则

$$K = K(d)$$

*K*值在0~1之间变化。当距离*d*增加，耦合减弱，*K*值减少，即

$$d \uparrow \Rightarrow K \downarrow \Rightarrow L' \uparrow$$

这样，*d*的变化反映出图1-2-4(b)中的*L'*的变化，因此测定*L'*的变化，也就是间接测定*d*的变化。

为了测定*L'*的变化，可采用谐振分压线路。为此，在图1-2-4(b)中并上一电容*C*，

构成 R' 、 L' 、 C 谐振回路。这一谐振回路的谐振频率(即阻抗 Z 达最大值时的频率)为

$$f_{\text{谐}} = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{L'C}}$$

当 $d = \infty$ ，即 $K = 0$ 时， $L' = L$ 。此时，谐振频率最低，

$$f_{\text{谐}} \left(\begin{matrix} d=\infty \\ K=0 \end{matrix} \right) = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

因此有

$$f_{\text{谐}} = \frac{f_{\text{谐}} \left(\begin{matrix} d=\infty \\ K=0 \end{matrix} \right)}{\sqrt{1 - K^2}}$$

这样，结合谐振频率来看，其变化关系为

$$d \uparrow \Rightarrow K \downarrow \Rightarrow L' \uparrow \Rightarrow f_{\text{谐}} \downarrow$$

即间隙增加，谐振频率下降。为了将这一谐振频率的变化转变为某一输出电压的变化，可在线路图 1-2-4(b) 中引进分压电阻 R_e ，即如图 1-2-5 所示。引进的分压电阻要足够大，使得谐振回路的阻抗 $|Z| \ll R_e$ ，于是近似有

$$\bar{V}_{\text{sc}} = \frac{Z}{R_e} \bar{V}_{\text{sr}}$$

从上式可看出：当输入 \bar{V}_{sr} 的频率 f_{sr} 等于谐振频率 $f_{\text{谐}}$ 时， Z 具有极大值，这时输出 V_{sc} 的幅值也达极大值。而当 f_{sr} 大于或小于 $f_{\text{谐}}$ 时，输出 V_{sc} 都将减小。对应不同的 K (或 d) 的输出 V_{sc} 的幅值 \bar{V}_{sc} 随输入频率 f_{sr} 的变化可见图 1-2-6(a)。

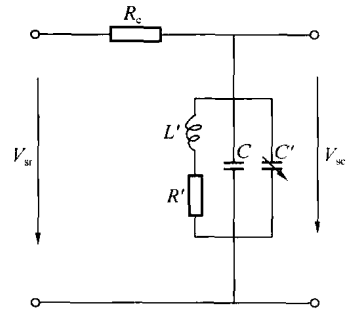


图 1-2-5 分压线路图

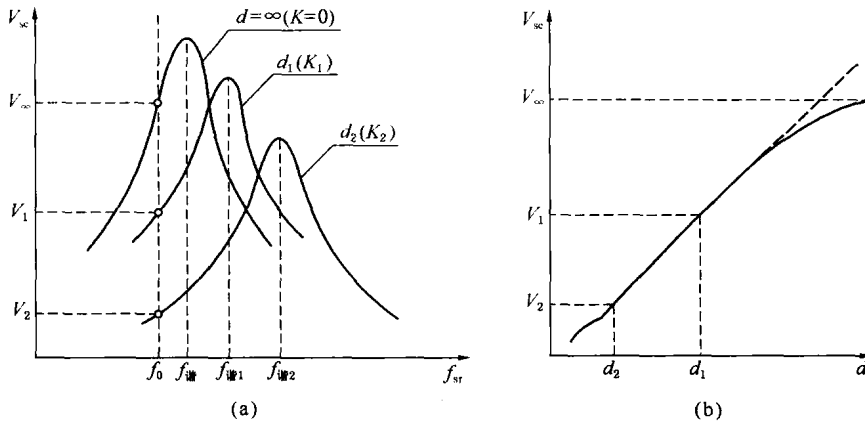


图 1-2-6 电压幅值随输入频率的变化

如果将输入频率 f_{sr} 严格固定在某一频率 f_0 (比如 1MHz) 时，则对应于 $d = \infty$ ， d_1 ， d_2 ，... 时的输出电压 V_{sc} 如图 1-2-6(b) 上实线所示。实线的两端部都偏离直线，只有中段非常接近直线。在直线部分，输出 V_{sc} 的变化量与间隙的变化量成正比，这正是最佳使用间隙范围。为了得到尽可能宽的线性范围，在线路电容 C 上再并联一个可调电容 C' ，以得到最佳的谐振点。 V_{sc} 还并不是最后所要的电压，因为它是载波频率为 f_0 的调幅信号。为了得到最后正比于间隙的直流电压输出，还需对输出 V_{sc} 进行检波，才是得到最后间隙随时间变化的电压

波形。综上所述，为了实现电涡流位移测量，必须有一个专用的测量路线。这一测量路线应包括频率为 f_0 的稳定的振荡器(一般用石英振荡器)和一个检波环节等，传感器加上测量线路(称之为前置器)如图1-2-7所示。从前置器输出的电压 V_d 正比于间隙 d 的电压，它可以分为两部分：一为直流电压 V_{dc} ，对应于平均间隙(或初始间隙) d_0 ；一为交流电压 V_{ac} ，对应于振动间隙 d_a 。如果只对振动间隙感兴趣，可用电容隔直或加反向偏置的办法取出振动部分电压。

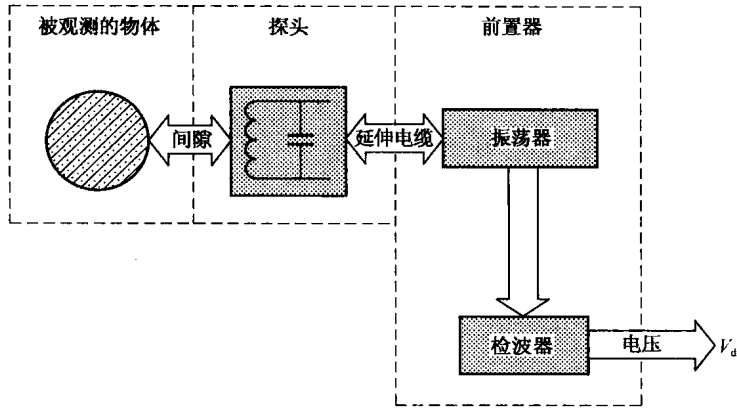


图 1-2-7 前置器原理简图

二、系统响应特性

图1-2-8为电涡流传感器系统响应特性，亦即固定输入频率 $f_{sr} = f_0$ 时，其间隙与输出电压的关系曲线。由于它是电涡流传感器的十分重要的特性，在此进行较详细的讨论。

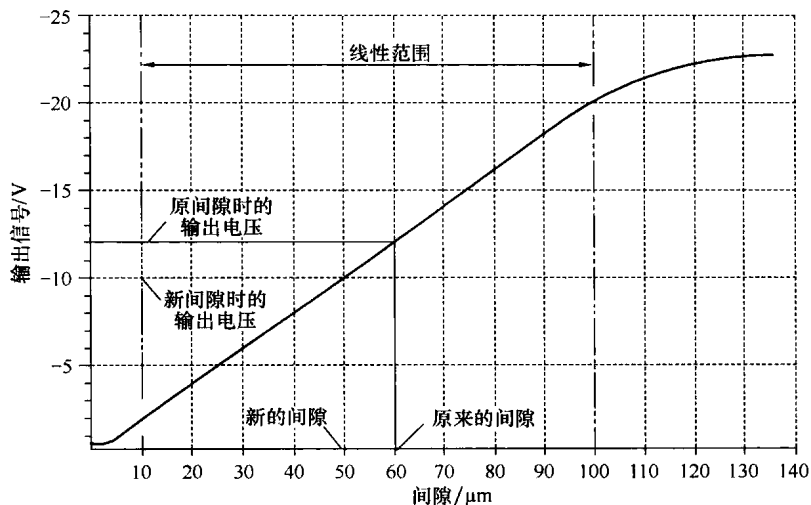


图 1-2-8 电涡流传感器系统响应特性曲线

从图1-2-8可知，该传感器的线性范围为 $10 \sim 100 \mu\text{m}$ (不同大小直径的探头，其线性范围不同)，亦即在使用该探头时，探头表面与被测物表面之间的距离，必须在 $10 \sim 100 \mu\text{m}$ 之内，在此范围之外不能使用。当二者的间隙为 $60 \mu\text{m}$ 时，其前置器的输出电压为 -12V ，当间隙变成 $50 \mu\text{m}$ 时，其电压输出变成 -10V 。由输出的电压即可知二者之间的间隙。图1-2-8为静态情况，即相当于轴相对于轴承壳的振动频率为零的情况。而机器在运转时，