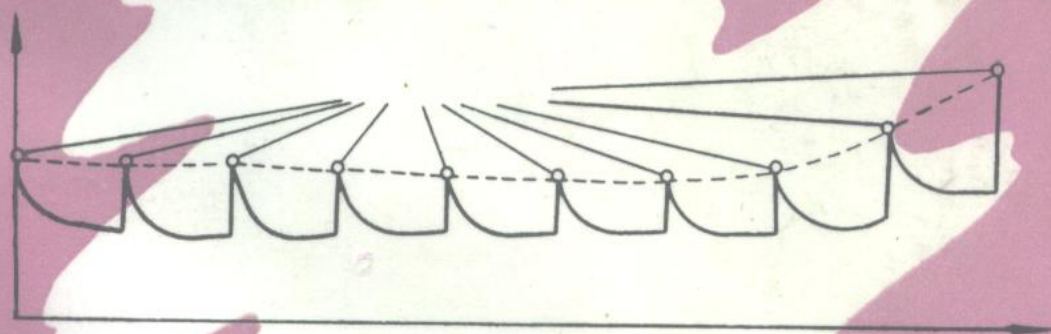


中等专业学校适用教材

机械设备状态监测 与故障诊断

山东省机械工业学校 苏杭 主编



机械工业出版社

中等专业学校适用教材

机械设备状态监测与故障诊断

主 编 苏 杭

编 者 王喜庆 武友德

苏 杭 柳 河

主 审 刘正言



机械工业出版社

本书共十三章，主要内容分为：①诊断基础知识，包括测试系统特性、故障探测传感器、中间变换装置、显示记录装置以及信号分析与处理。②机械设备的振动及噪声监测与故障诊断。③其他诊断技术，包括润滑油磨粒检测、温度监测、超声波和射线探伤及声发射技术。

本书对机械设备状态监测与故障诊断作了较全面的介绍。在编写中注重理论联系实际，使内容通俗易懂，并收集了一定的诊断实例，还考虑了适合中等专科层次的教学特点。

本书是中等专业学校设备维修与管理专业教材，也可作为职业教育及培训技术人员的教材，并可供从事设备维修与管理的技术人员和工人自学、进修时参考。

机械设备状态监测与故障诊断

山东省机械工业学校 苏杭 主编

*

责任编辑：钱飒飒 版式设计：霍永明

封面设计：方 芬 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)

邮政编码：100037

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

机械工业出版社京丰印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本787×1092¹/₁₆·印张12.5·字数363千字

1996年5月第1版第1次印刷

印数00 001—8 000 定价：10.40元

*

ISBN 7-111-04888-1/TH·639 (课)

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

ISBN 7-111-04888-1



9 787111 048886 >

前 言

本书是根据1994年8月机械工业部中等专业学校设备维修与管理专业协作筹备组第三次会议审订的“机械设备状态监测与故障诊断”课程教学大纲，为中等专业学校设备维修与管理专业编写的教材。

全书共分十三章，两大部分。第一部分是诊断基础知识，主要介绍了机械振动基础（第二章），测试系统的基本特性（第三章），振动测量（第四、五、六章），信号处理技术（第七章）；第二部分是诊断及诊断理论，包括机械设备状态监测与故障诊断的基本概念（第一章），振动诊断（第八章），噪声监测（第九章），润滑油磨粒检测（第十章），超声波探伤（第十二章），其他诊断方法（第十三章），及典型机械零部件故障诊断（第十章）。

机械设备状态监测与故障诊断技术是一门新兴学科。它涉及知识面广，所需的理论知识较深。因此，在编写本书的过程中，特别注意了这项技术的适用性，贯彻了以应用为主，理论知识以够用为度的原则，紧紧围绕中等专业学校的特点，注意了设备维修与管理专业的人才规格的需要。在内容选材上注意收集了最新的诊断方法与诊断仪器，把重点放在振动诊断技术方面。

根据设备维修与管理专业教学大纲的要求，本教材是按60学时编写的。考虑到诊断技术的特点，为便于学生掌握教材内容，推荐开设10学时左右的实验。另外，每章后选编了部分思考题与习题便于学生自我检查。

本书第一、三、四、五、六章由重庆机器制造学校王喜庆编写；第七、八、九、十章由四川省机械工业学校武友德编写；绪论和第二、十一、十三章由山东省机械工业学校苏杭编写；第十二章由黑龙江机械制造学校柳河编写。

本书由山东省机械工业学校苏杭主编，山东省机械工业学校刘正言主审。

在教材的编写过程中参考了大量的有关资料，在此对这些资料的编者表示感谢。

由于本教材是设备维修与管理专业的首轮教材，虽然经过多次修改和审核，但由于编者水平所限，不妥和错误之处在所难免，恳切希望广大读者批评指正。

编 者

1995年5月

目 录

前言	
绪论	1
第一章 设备诊断技术和预测维修	3
第一节 推广设备诊断技术的意义	3
第二节 设备诊断技术的基本构成	4
第三节 状态监测维修制度 (预测维修制度)	6
思考题与习题	9
第二章 机械振动基础	10
第一节 机械振动及分类	10
第二节 简谐振动及其基本特征	11
第三节 工程中常见的几种振动	14
思考题与习题	18
第三章 测试系统的组成及特性	19
第一节 测试系统的组成	19
第二节 对测试系统的基本要求	20
第三节 测试系统的传递特性	21
思考题与习题	36
第四章 故障探测传感器	37
第一节 概述	37
第二节 压电式传感器	37
第三节 其他类型测振传感器	45
思考题与习题	51
第五章 中间变换器	53
第一节 电荷放大器	53
第二节 电桥	56
第三节 数据采集器	63
思考题与习题	67
第六章 记录分析仪器	68
第一节 X—Y 记录仪	68
第二节 滤波器及频率分析仪	70
第三节 磁带记录仪	76
思考题与习题	80
第七章 信号处理技术简介	81
第一节 信号预处理	81
第二节 时域信号处理	84
第三节 信号的相关分析	87
第四节 信号的频域分析	91
思考题与习题	98
第八章 振动监测技术	99
第一节 设备振动状态监测的基本内容	99
第二节 故障信号的识别与评价	101
第三节 测振系统的组成	107
第四节 振动监测实例	108
思考题与习题	110
第九章 噪声监测技术	111
第一节 噪声的物理度量	111
第二节 噪声的主观评定	114
第三节 噪声测量仪器	116
第四节 噪声检测实例	118
思考题与习题	121
第十章 典型零部件的故障诊断	122
第一节 典型零部件的故障成因及故障信号的特征	122
第二节 滚动轴承的故障诊断	129
第三节 齿轮传动的故障诊断	137
思考题与习题	143
第十一章 润滑油磨粒检测技术	144
第一节 铁谱分析基础	144
第二节 铁谱分析技术及其应用	150
第三节 其他磨粒检测方法	159
思考题与习题	160
第十二章 超声波探伤技术	161
第一节 超声波及超声场	161
第二节 超声波波型特点及传播	162
第三节 超声探头及其应用	165
第四节 超声波探伤显示方法	166
第五节 超声波探伤方法及其应用	168
思考题与习题	174
第十三章 其他诊断技术	175
第一节 温度监测技术	175
第二节 声发射监测技术	183
第三节 其他无损探伤方法	187
思考题与习题	193
参考文献	194

绪 论

机械设备状态监测与故障诊断是近几十年发展起来的一门新兴技术。机械设备作为生产工具,在国民经济的各个部门获得了广泛的应用。随着社会化大生产的迅速发展,机械设备的现代化程度和生产效率日益提高,机械设备发生故障后所造成的经济损失也越来越大。因此,如何改进设备的管理手段,完善设备的维护保养制度,提高设备完好程度,成为现代设备管理与维修的工程技术人员普遍关注的问题。机械设备状态监测与故障诊断就是为适应这一需要而产生和发展起来的。

机械设备状态监测与故障诊断是通过监测设备的状态参数,判断设备的运行状态进而诊断设备的故障程度和故障部位的技术。机械设备种类繁多,反映设备运行状态的参数也不尽相同,因此,诊断设备故障的方法也呈多样性,但是诊断故障的思路却是相似的,即用测试仪器测取最能反映设备运行状态的敏感参数,经过信号处理和分析判断后,确定设备的故障状态和故障程度。这种诊断技术,一改过去那种单凭人的经验判断设备故障的方法,提高了故障诊断的可靠性和准确性,同时,也便于分析存储、比较和统计,可借助于计算机进行分析运算,使诊断工作更加迅速有效。

作为设备维修与管理专业的学生,为能适应设备现代化管理工作的需要,学习和掌握机械设备状态监测和故障诊断技术十分必要,因此机械工业部中等专业学校设备维修与管理专业协作筹备组将设备诊断技术课程确定为必修专业课程之一。通过本课程的学习学生应达到下列要求:

- (1) 了解设备状态监测与故障诊断技术的基本构成。
- (2) 掌握设备运行中的状态参数的测取和处理方法。
- (3) 掌握设备简易诊断方法,能正确使用常用的诊断仪器,开展诊断工作。
- (4) 熟悉常用诊断方法,能正确使用诊断仪器测取设备的状态参数,并能通过信号处理初步判断设备的故障。
- (5) 了解部分典型零部件的故障特征和诊断方法。

为能达到上述要求,在学习诊断技术时,要注意这门课程的特点,采取正确的学习方法。

设备诊断技术是一门涉及面广,理论较深,实用性很强的技术。它不但需要具备高等数学、普通物理等基础知识,还需要了解机械设备的构造和传动过程,以及机械加工、润滑技术等专业知识。由于设备诊断技术的基础是测试技术,所以,对一些诊断方法所用到的测试仪器还应该充分了解。可见,设备诊断技术为正确判断设备的运行状态和故障根源,开展设备预测维修和正确管理提供依据。因此,学习此课程时,应紧紧围绕这一目的,对于教材所涉及的各种诊断仪器,应了解其外部特性和基本工作过程;对于必要的数学公式,应侧重于了解其应用范围和公式含意;对于诊断的基本概念和常用技术,则应重点理解和掌握;对于理论性较强的信号处理技术则应了解各种分析方法的物理含意和所能说明的故障类型;对于教材介绍的各种诊断方法,应注重了解其基本思路和适合诊断的故障类型。

由于机械设备状态监测与故障诊断技术具有很强的应用性，因此学习该课程时，应当突出这一特点。在条件允许的情况下，尽可能多开设一些实验。通过适当的实验，可以验证各种诊断理论，同时，也只有通过实验才能真正掌握各种诊断方法。从某种意义上讲，及时而又正确的开设诊断实验，是学好这门课程的重要保证。

科学在发展，技术在进步，机械设备状态监测与故障诊断技术也像其他技术一样处于不断发展和完善的过程中。特别是计算机技术的应用，为设备诊断技术的进步起到了促进作用。近十几年，随着设备管理工作的发展和深入，设备诊断技术应用越来越广泛。新的诊断仪器不断开发和完善，新的诊断方法不断出现，可以说机械设备状态监测与故障诊断技术越来越成为现代化企业设备维修与管理工作中不可缺少的技术手段。

第一章 设备诊断技术和预测维修

第一节 推广设备诊断技术的意义

为了最大限度地提高工业生产水平，当代工厂的机电设备正朝着大型化、连续化、高速化的方向发展。其结果是：生产系统本身的规模变得越来越大；功能越来越全；各部分的关联越来越密切；设备组成与结构越来越复杂，这些变化对于提高生产率、降低生产成本、提高产品质量起到了积极作用。但另一方面，机械设备一旦发生故障，即造成停产、停工，尽管时间不会很长，但其造成的经济损失和社会影响可能比过去低生产水平时要大得多。因此，现代化工业对机械设备，乃至一个零件的工作可靠性，都提出了极高的要求。为确保各种机械设备的安全运行，提高其可靠性和安全运转率，就必须加强设备运行管理，进行在线工况监测，及时发现异常情况，加强对故障的早期诊断和预防。

现代化的机械设备必须采用现代化的设备管理制度。我国过去沿用的设备维修制度主要是以时间为基础的预防性定期检修，或者运转至损坏再维修。前者往往造成维修过剩、盲目维修或维修不足；后者则是被迫停机，导致生产中断，除了给连续生产的企业带来很大经济损失外，还潜伏着造成突发性重大设备事故的可能性。这类事例，国内外都有很多，例如：

1984年12月印度博帕尔市的美国联合碳化物公司经办的农药厂，发生异氰酸甲酯毒气泄漏事故，先后造成6000多人死亡，60多万人受害，成为世界工业史上最大的严重事故。

1986年4月27日原苏联乌克兰的切尔诺贝利核电站四号发电机剧烈振动，引起反应堆放射性物质泄漏，2000余人先后死亡，几万居民撤离该地区，损失30亿美元，核污染将持续若干年，还波及了邻国，成为震惊全球的重大事故。

我国工业生产部门由于机械设备发生故障引起的损失也十分惊人。某厂20万千瓦发电机组运转中突然严重损坏，直接损失约一亿元；海上石油钻井平台突然倒塌沉没；进口的大型万吨货轮航行中主机突然损坏，遇风暴而沉入海底。国内外这类事例很多，不胜枚举。

所以，尽管现代化企业效益很高，但机械设备一旦发生故障，就可能造成很大的经济损失和人员伤亡。根据美国国家统计局提供的资料表明，1980年美国工业设备维修费用达2460亿美元，而这一年美国全国的税收总额不过7500亿美元。据美国设备维修专家分析，有将近三分之一的维修费用（750亿美元）是由于缺乏正确的状态监测和诊断技术而造成的浪费。在日本，1982年的维修经费占国民生产总值的4.2%，而用于科学研究的经费只占国民生产总值的2%~4%。由上例可见维修的重要性。

为了最大限度的减少生产损失、降低维修费用，世界各主要工业国家都在这方面采取了很多行之有效的措施。如采用先进的诊断仪器帮助维修人员早期发现设备异常，迅速查明故障原因，预测故障影响，从而实现有计划、有针对性的按状态检修，缩短检修时间，提高检修质量，减少备件储备，提高设备的维修管理水平。可见，若在我国采用设备状态监测与故障诊断技术，不仅可以减少维修费用和提高设备利用率，而且可以尽快地改变我国长期以来

单凭个人经验去寻找故障的落后状况。

第二节 设备诊断技术的基本构成

一、设备诊断技术的含义

所谓设备诊断技术是：定量地掌握设备状态（指设备所受的应力、故障和劣化、强度和性能等）；预测设备的可靠性和性能；如果存在异常，则对其原因、部位、危险程度等进行识别和评价，决定其修正方法。

设备诊断技术——机械故障诊断学是一门涉及到数学、物理、化学、力学、声学、电子技术、机械、传感技术、计算机技术和信号处理技术等多学科的综合性学科。它依靠先进的传感技术与在线检测技术，采集设备的各种具有某些特征的动态信息，并对这些信息进行各种分析和处理，确认设备的异常表现，预测其发展趋势，查明其产生原因、发生的部位和严重程度，提出针对性的维护措施和处理方法，这一切构成了现代设备管理制度——按状态维修的方法。

随着设备复杂程度的增加，机械设备的零部件数目正以等比级数递增。各种零部件受力状态和运动状态不同，如变形、疲劳、冲击、腐蚀、磨损和蠕变等因素以及它们之间的相互作用，各零部件具有不同的失效原因和失效周期。设备的故障过程实际上是零部件的失效过程。机械故障诊断实质上就是利用机器运行过程中各个零部件的二次效应（如由磨损后增大的间隙所造成的振动），由现象判断本质，由局部推测整体，由当前预测未来。它是以机械为对象的行为科学，其最终目的就是力图发挥出设备寿命周期的最大效益。目前，国内外应用于机械设备故障诊断技术方面的检测、分析和诊断的主要方法有：

- 1) 振动和噪声诊断法；
- 2) 磨损残留物、泄漏物诊断法；
- 3) 温度、压力、流量和功率变化诊断法；
- 4) 应变、裂纹及声发射诊断法。

实行按状态维修必须根据不同机器的特点，选择恰当的诊断方法。一般来说，应以一种方法为主，逐步积累原始数据和实践经验。国内外应用最广泛的是振动和噪声诊断法。

二、振动和噪声诊断法的特点

在各种诊断方法中，利用设备运行时不可避免的振动和噪声信号进行故障识别与判断的振动和噪声诊断法，应用得十分广泛。其主要特点有：

1. 广泛性 任何机器设备运行时都会产生振动和噪声，而设备运行中的各种机械故障会加剧其振动和噪声，所以，振动和噪声反映了机器设备的运行状态。各类机械，如高精度磨床、线切割机、大功率电动机、汽轮机、汽车、船舶、甚至桥梁、铁路和高压线塔等等，时刻都存在振动。由于振动所产生的机械故障率高达60%以上，振动本身的普遍性和破坏性决定了采用振动诊断法的广泛性。

2. 多维性 与其他几种检测方法不同，反映振动的量值是多维的。不同频率、不同相位的位移、速度、加速度响应构成了一个多维函数和响应谱。振动的多维性信号处理方法十分丰富。其量的变化范围很大，频率从极低频的0.01Hz到10kHz或更高，加速度从 10^{-1}mm/s^2 到 1000km/s^2 ，分析这些量值的大小和变化可以使人们识别不同类型的故障。

3. 遥感性 振动的传递性强。用耳朵靠近钢轨，可以听到几千米远的火车行驶声。这种特点有利于采用间接测量的方法，以获取携带故障信息的振动信号。传感器可以感受到较大范围和距离内存在的故障信号，例如：在轴承座上测量的振动参数就包含了轴承内、外圈、保持架、滚动体以及转轴的大量信息。

4. 实用性 振动诊断完全可以在设备工作状态下进行（在线测量）。传感器可以安装在结构深处或人不宜接近的部位进行测量。不同的故障总有不同的振动特征，且振动信号不论有什么样的外界干扰丝毫不改变自己的固有特征。因此，可以较方便的获取和识别振动信号，有利于早期发现故障。

综上所述，振动和噪声诊断方法，就是通过对机器设备表面部件的振动和噪声的测量与分析，来监视其内部的运行状况并进而预测与判断机器设备的“健康”状态。它是一门识别机器设备运行状态的技术。正由于振动的广泛性、参数的多维性、测振技术的遥感性和实用性，决定了人们将振动监测与诊断列为设备诊断技术的最重要的手段。它的方便性、在线性和无损性使它的应用越来越广泛。

三、设备诊断技术的基本系统

设备诊断技术按诊断方法的完善程度可分为简易诊断技术和精密诊断技术（图1-1）。

1. 简易诊断技术 简易诊断技术就是使用各种便携式诊断仪器和工况监视仪表，仅对设备有无故障及故障严重程度作出判断和区分。它可以宏观地、高效率地诊断

出众多设备有无异常，因而费用较低。所以，简易诊断技术是诊断设备“健康”状况的初级技术，主要由现场作业人员实施。为了能对设备的状态迅速有效地作出概括的评价，简易诊断技术应具备以下的功能：

- 1) 设备所受应力的趋向控制和异常应力的检测；
- 2) 设备的劣化、故障的趋向控制和早期发现；
- 3) 设备的性能、效率的趋向控制和异常检测；
- 4) 设备的监测与保护；
- 5) 指出有问题的设备。

2. 精密诊断技术 精密诊断技术就是使用较复杂的诊断设备及分析仪器，除了能对设备有无故障及故障的严重程度作出判断及区分外，在有经验的工程技术人员参与下，还能对某些特殊类型的典型故障的性质、类别、部位、原因及发展趋势作出判断及预报。它的费用较高，由专业技术人员实施。

精密诊断技术的目标，就是对简易诊断技术判定为“大概有点异常”的设备进行专门的精确诊断，以决定采取哪些必要措施。所以，它应具备以下的功能：

- 1) 确定异常的类型和种类；
- 2) 了解异常的原因；
- 3) 了解危险程度，预测发展趋势；

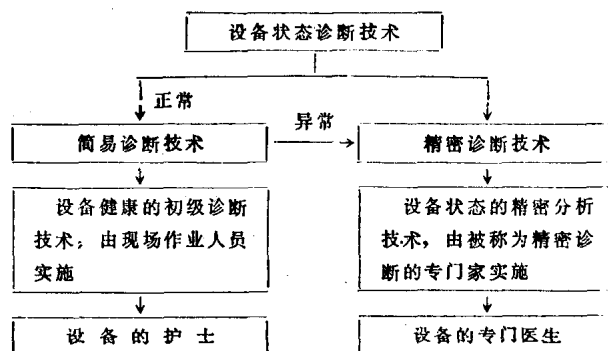


图1-1 设备诊断技术的基本系统

4) 了解改善设备状态的方法。

第三节 状态监测维修制度 (预测维修制度)

随着科学技术和工业化的发展,人们对设备维修的认识以及设备的维修制度也经历了几个阶段,即:事后维修→定期维修→状态监测维修(预测性维修)。

一、事后维修

设备运转至损坏再维修称事后维修。在某些行业中,使用着大量造价低的设备,许多重要的工艺过程也是重复的。在这种情况下,通常让设备运行到出现故障为止,由于可以采用备用机组,所以生产损失并不明显。在这种生产情况下,掌握设备状态是否良好,何时出现故障以及哪里出现故障等往往在经济上或安全方面并无明显的优越性,所以通常使用事后维修。但对于现代化生产中使用的大型、复杂、高速、连续等设备,若采用事后维修就有可能造成巨大的经济损失、人员伤亡以及严重的社会问题。

二、定期维修 (预防性维修)

在化工厂或其他一些工厂中,产品价格往往很高,大型机组一般没有备用机组,非计划停产会造成较大的经济损失。在这种情况下,通常按照固定的周期进行检修,比如运行3000 h或一年检修一次等,见图1-2。检修周期一般是根据统计结果确定的,使得在这个周期内仅有少于2%的设备出现故障,而98%的设备都有剩余的运行寿命。这种维修方式叫做“定期维修”或“预防性维修”。

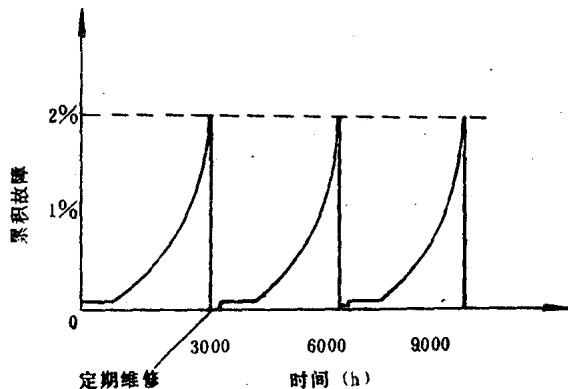


图1-2 定期维修周期的确定

人为的规定检修周期是缺乏科学性的,因为这种维修方式既可能造成过剩维修,也可能造成维修不足,并且还可能造成定期维修后的故障率反而高的情况。例如美国航空公司对235套机械设备(包括电机、泵类、控制系统等)作了普查,得到的结果是66%的设备在新的时候或刚修过后具有很高的故障率,但随着使用时间的增长故障率逐渐降低,最后趋于定值,如图1-3所示。这表明每次检修时,由于人的干预,暂时降低了设备的可靠度。因此对于这些设备来

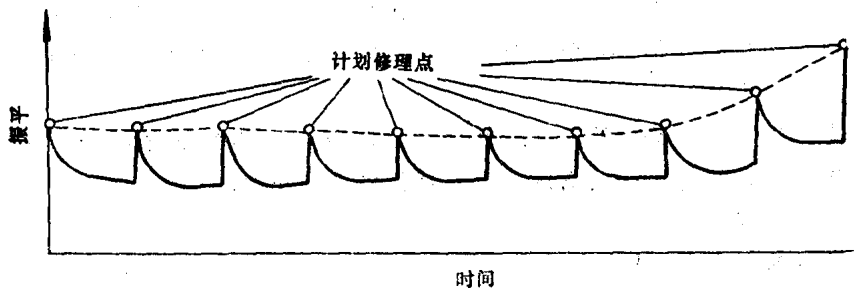


图1-3 定期维修方式振平随时间的变化关系

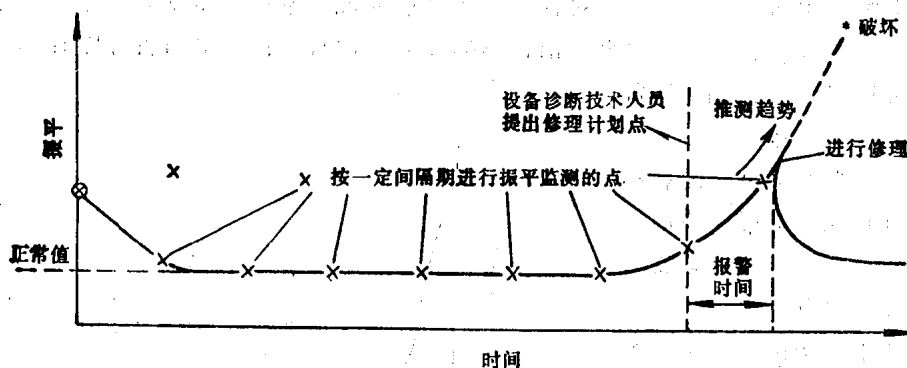


图1-4 状态监测维修方式

说，实行定期检修反而加速了它们的损坏。

经验告诉我们，在绝大多数情况中，以时间为基础的预防性维修是不经济的。所以，这种维修方式不能有效地应用，需要一个更合理的方法解决，这就是状态监测维修方式。

三、状态监测维修（预测性维修）

这是一种新的维修方式，也称预测性维修或预知维修。它是将定期检修变成定期测量设备的运行状态，比如测量设备的振动参数就能很好地表征设备的运行状态，这就是状态监测。状态监测维修的基本原则是仅当测量结果表明检修是必要的时候才进行检修，如图1-4所示。这与大多数维修人员的想法是一致的，即不应该把正常运行的设备停下来检修。而状态监测维修就是跟踪故障的发展过程，推算出何时振动值会超过允许的极限，以确定何时必须检修，因此称为“预知维修”。通过分析由定期测量结果建立的振动趋势图，就可以掌握故障发生的时间和部位，这就使得维修人员能够及时地准备好备品备件，以便在较短的时间内完成高质量的检修，同时减少了备件的库存量。当然，也可根据具体情况把周期改为不定期或连续测定，如图1-5所示。图1-6所示为机器使用寿命期内维修费用的变化情况。若在最佳机会点，即损坏刚刚开始时进行修理，则费用比正常运转期内采用的任何维修对策都要低。一般来讲，这一要求不是

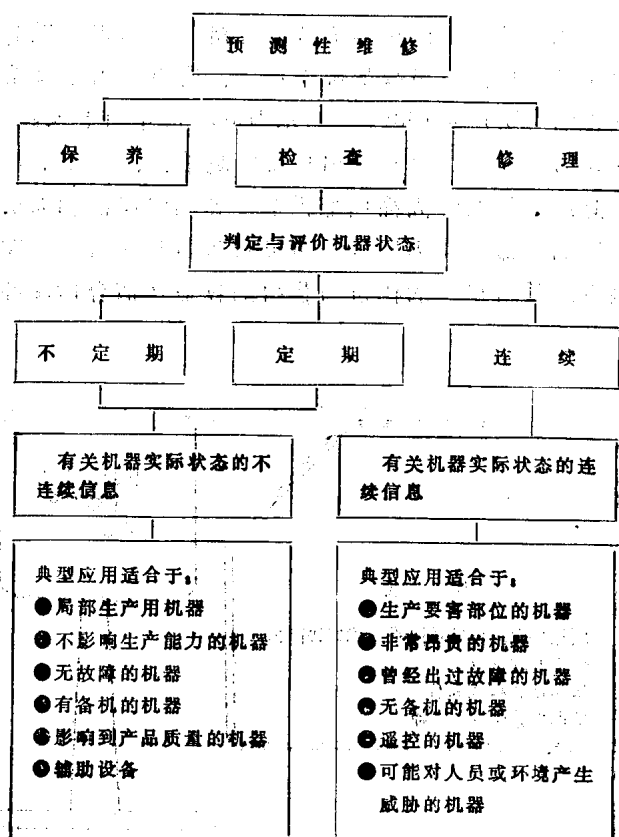


图1-5 预测性维修——检查的顺序和典型应用场合

单纯的定期维修所能达到的。总之，对任何一个企业来说，维修经费都是成本中一个可观的因素。通常，工业装置的维修费用为年销售额的6%~10%，再加上与备件库存有关的成本（包括其资金费用），则总维修费用可达年销售额的25%。

由此可见，维修不足或过剩都将增加停机时间或增加维修费用甚至造成不必要的损失。而状态监测维修则具有以下优点：

1) 能正确监测设备状态，既可控制因过剩维修而造成的费用上升，也可防止因不足维修而导致的故障、事故；

2) 因不搞定期维修，可减少材料消耗和维修工作量，也可避免因修理而出现人为的故障；

3) 增加了设备的安全性，即在机器故障还不严重之前就能检测到，并且加以修正；

4) 定期测量出的结果可用来确定哪些机器需要修理，应该什么时间修理，修理什么部位等。

由此，状态监测维修方式的经济性是值得重视的。据有关资料介绍：运用诊断技术实行预测性维修可减少事故故障率75%，降低设备维修费用25%~50%。以我国目前国营的工交企业总固定资产约10000多亿元为例，每年用于大修、小修与处理故障的费用一般占固定资产的3%~5%，可见采用状态监测维修，一年取得的经济效益可达数百亿元。当然在执行状态监测维修时，尚需增加投资，如购置仪器和人员培训等，但据国外资料：仪器的投资与其产生的效益之比为1:17，可见总效益是显著的。图1-7示出了若在状态监测维修中采用振动测量，其所投入的代价与获得的收益之估算情况即说明了这点。

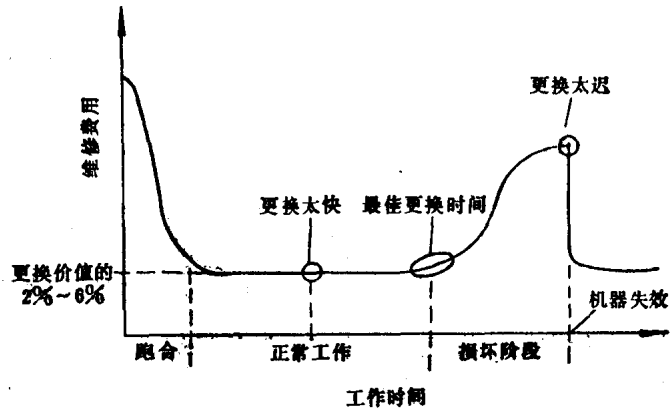


图1-6 机器使用期内维修费用的变化情况

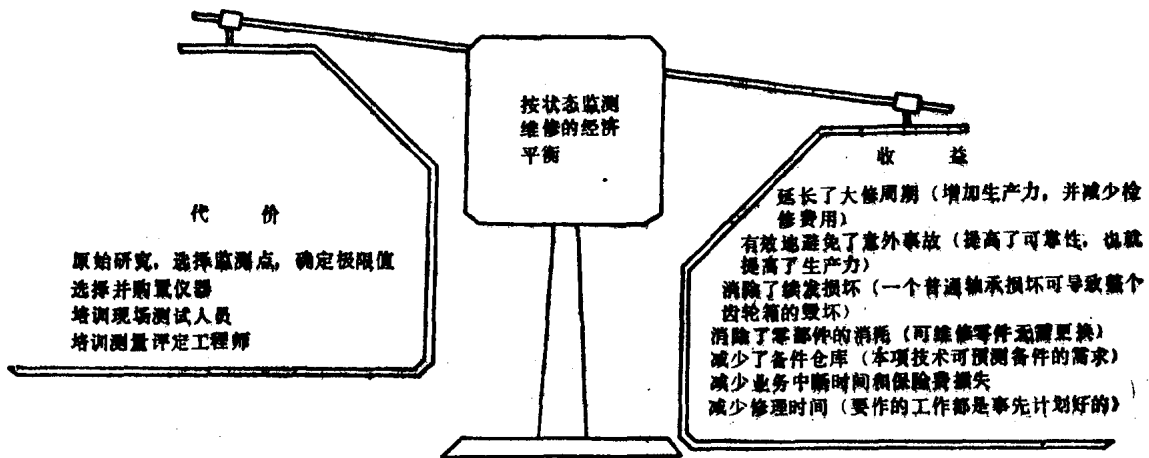


图1-7 按状态监测维修的代价/收益估算

鉴于设备状态监测维修的优点，从70年代起许多先进工业化国家竞相采用，我国近10年来也正在大力推广现代设备诊断技术，从1983年起已正式把开展设备诊断工作的要求纳入《国营工业交通设备管理试行条例》中。条例中明确提出：“要根据生产需要，逐步采用现代故障诊断和状态监测技术，发展以状态监测为基础的预防维修体制”，从而把设备诊断技术工作正式列入企业管理法规。

设备状态监测维修在一些国家的应用中确也收到了可观的效果。如：美国密西西比一家炼油厂，由于采用了连续监测和设备诊断，年维修费降低额达90万美元。再如：我国铁路部门在车辆轴承处使用了红外轴温探测器，开展了红外诊断工作，8年来使车辆燃轴事故大大减少，相当于每年增加车辆运输43万次，从而可增加收入2亿多元。

思考题与习题

- 1-1 研究与发展设备状态监测与故障诊断技术的意义是什么？
- 1-2 什么叫“状态监测维修”体制？它与过去的“事后维修”体制和“定期维修”体制有何区别？
- 1-3 设备状态监测与故障诊断的基本原理是什么？
- 1-4 什么叫简易诊断？什么叫精密诊断？

第二章 机械振动基础

机械振动是自然界广泛存在着的一种物理现象。通常,运转着的机械设备(以后简称设备)都会产生振动。这种振动的变化直接反映设备的工作情况。我们可以通过对设备振动的研究,监测设备的工作状态,诊断设备产生的故障。为此,本章我们将讨论机械振动的基本概念、振动的种类和参数及工程中常见的几种振动现象,为学习后续章节奠定一定的理论基础。

第一节 机械振动及分类

一、机械振动

机械振动是机械构件在其平衡位置附近所做的往复运动。大多数机械设备和构件,由于其自身的运动或受到外界的干扰,都会产生机械振动。在多数情况下,机械振动会造成一定的危害。例如使设备的工作性能降低,无法正常工作;使一些零件因载荷增加而加剧磨损,乃至断裂造成事故;增加设备噪声,污染环境。当然,也有许多设备是利用机械振动原理工作的。例如振动送料机、振动填充机、振动压路机、振动筛料机、振动震压机等。

在生产实际中,往往有两种设备的振动问题需要人们去解决。其一是现场发生的振动,这要求人们对设备的振动进行测量,分析振动的根源和程度,根据需要,调整设备的工作参数、修复设备的损伤机件,以达到降低或消除振动的目的;其二是在设计新产品时,对样机及关键部件进行动态试验和理论分析,找出薄弱环节,以改进结构,提高产品的抗振能力。设备振动诊断属于前者。

二、机械振动的分类

机械振动在研究和应用方面有多种分类方法,目前,主要有如下几种。

1. 按振动产生的原因分

(1) 自由振动 给系统一定能量后,系统所产生的振动,称为自由振动。若系统无阻尼,则系统维持等幅振动;若系统有阻尼,则系统为衰减振动。

(2) 受迫振动 系统在外界激振力持续作用下,系统被迫产生的振动,称为受迫振动。

(3) 自激振动 系统从本身运动中吸取能量,转变成交变力维持的振动,称为自激振动。

2. 按振动规律分

(1) 简谐振动 振动的时间历程能用正弦或余弦函数描述的振动,称为简谐振动。

(2) 周期振动 振动的时间历程按一定规律周期变化的振动,称为周期振动。简谐振动是周期振动的一个特例。

(3) 瞬态振动 振动的时间历程为非周期函数,并且只在某一瞬时存在的振动,称为瞬态振动。

(4) 随机振动 振动的时间历程无法用确定的函数描述, 只能用概率统计的方法进行研究的振动, 称为随机振动。

3. 按振动系统的自由度数分

- (1) 单自由度振动系统的振动。
- (2) 多自由度振动系统的振动。
- (3) 无限多自由度振动系统的振动。

第二节 简谐振动及其基本特征

一、简谐振动

如图 2-1 所示, 由弹簧系数为 k 的螺旋弹簧和质量为 m 的重锤连接成一个系统。由平衡位置将重锤拉下距离 x 后放开, 重锤即作周期性的上、下振动。如果取时间为横轴, 重锤在任意时刻的位置 (称为位移), 便可以从图中所示的正弦波曲线得到。这样, 位移 x 对于时间 t 形成了可用正弦曲线表示的振动。这种振动称为简谐振动。

任意时刻的位移 x 与时间 t 之间的关系, 可用下式表示:

$$x(t) = A_m \sin\left(\frac{2\pi}{T}t + \phi\right) \quad (2-1)$$

式中, A_m 为振幅, 单位为微米

(μm); T 为周期, 单位为秒 (s); ϕ 为相位, 单位为弧度 (rad)。

周期的倒数为频率 f , 它表示一秒钟内完成的振动次数, 单位为赫兹 (Hz)。

$$f = \frac{1}{T} \quad (2-2)$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (2-3)$$

式中, ω 为角频率, 单位为弧度/秒 (rad/s)。

频率与角频率的关系为:

$$\omega = 2\pi f \quad (2-4)$$

将式 (2-3) 代入式 (2-1) 可得简谐振动的基本方程:

$$x(t) = A_m \sin(\omega t + \phi) \quad (2-5)$$

二、振动的位移、速度、加速度

式 (2-5) 表示图 2-1 弹簧质量系统中, 质量块 m 在任一时刻偏离其平衡位置的位移, 同样也可以用相应的速度和加速度表示。由数学知识可知, 位移的一次微分为速度, 速度的一次微分为加速度, 因此, 可以用式 (2-5) 通过微分方法求得简谐振动的速度 $v(t)$ 和加速度 $a(t)$;

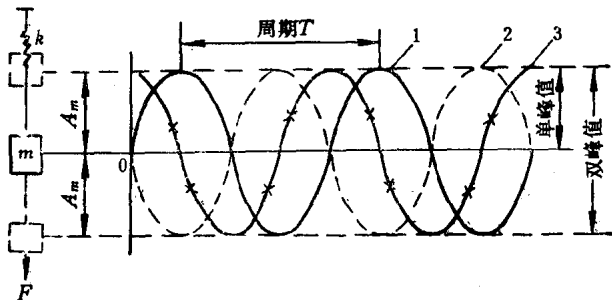


图 2-1 简谐振动的基本规律

1—振动的位移 2—振动的加速度 3—振动的速度

$$v(t) = \frac{dx(t)}{dt} = A_m \omega \cos(\omega t + \phi)$$

$$= V_m \sin\left(\omega t + \phi + \frac{\pi}{2}\right) \quad (2-5)$$

$$a(t) = \frac{dv(t)}{dt} = -A_m \omega^2 \sin(\omega t + \phi)$$

$$= A \sin(\omega t + \phi + \pi) \quad (2-7)$$

由式(2-6)和式(2-7)可看出,简谐振动的速度和加速度的相位分别较位移和速度超前 $\pi/2$ 。在图2-1上可清楚地看出三者之间的相位关系。由式(2-5)、式(2-6)、式(2-7)还可以求得三者之间的幅值关系:

$$V_m = \omega A_m = 2\pi f A_m \quad (2-8)$$

$$A = \omega^2 A_m = (2\pi f)^2 A_m \quad (2-9)$$

在工程测量中,振动加速度 $A(\text{cm/s}^2)$ 常用重力加速度 g ($g = 980\text{cm/s}^2$)的倍数 n 表示:

$$n = \frac{A}{g} \quad (2-10)$$

若某设备振动加速度为 $2g$,则表示其振动加速度为 19600cm/s^2 。

三、振动的三要素

描述机械振动的三个基本要素是振幅、频率和相位,简称振动的三要素。在振动诊断中,常常可以通过测量振动的这三个量值,来分析判断设备的运行状态和故障情况。在此作一简要介绍。

1. 振动的幅值 振动的幅值是描述振体偏离其平衡位置大小的物理量。振动的幅值反映了设备振动的强弱。在振动简易诊断中,常常用振动幅值的大小作为判断设备运行状态的依据。在振动精密诊断中,寻找振动幅值的频率成分,是判断设备故障部位的主要工作。在振动测量中,振动的幅值一般用峰值、有效值或平均值来度量振动的量级。这三个量值将在第七章讨论。

2. 振动的频率 振动频率是单位时间内振动的次数。在机械设备中,每一个运动着的零部件都有其特定的固有频率和振动频率。我们可以通过分析设备的频率特征来判断设备的工作状态。若不了解设备的结构和运动零部件的振动频率,就不能确切地判断设备的故障。因此,设备振动频率的计算和特征频率的检测,是故障诊断工作的重要环节。

3. 振动的相位 振动的相位指在任意时刻,振体所处的位置。在振动的合成中可以看到,相同的振动,若相位不同,能合成为不同的振动。在故障诊断中,设备振动相位的变化,往往反映一些特定的故障。相位的检测和分析,可用于振型测量、谐波分析、以及设备动平衡的测定等。

四、简谐振动的合成

不同相位、不同频率的简谐振动合成以后会形成不同的振动轨迹。在机械设备的故障诊断中,利用简谐振动的合成原理可以监测轴心的轨迹和电动机转子的“拍频”振动。

1. 相互垂直的两个简谐振动的合成 假设有两个相同频率、相互垂直的简谐振动,即: