

(第二版)

汽轮发电机组 振动及事故 处理

● 施维新 石静波 著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

(第二版)

● 施维新 石静波 著

汽轮发电机组 振动及事故 处理



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书是一本实用且有一定理论深度和学术价值的振动技术专业书。全书系统介绍了机组振动测试及振动评价规范、振动故障诊断思维方法、故障诊断技术、转子和轴系平衡技术和经验,以及振动事故分析方法和经验。其中不少内容是第一次发表,有些内容在国内外尚属首次提出,如正向推理诊断故障、扭矩冲击造成毁机事故的机理、莫顿效应、轴系平衡的一次加准法、无转子振型曲线时轴向不对称柔性转子平衡、单元柔性转子的合理平衡、影响系数法平衡柔性转子轴系计算结果不可靠和计算出错误加重的原因及机理等。

本书在总结国内外火电厂近 60 年来振动故障诊断、事故分析、消振、转子和轴系平衡技术及经验的基础上,研究提出了独创的振动故障诊断、振动事故分析和转子及轴系平衡技术,这些技术近 40 年来经不断总结和完善,已在国内广泛应用,成为电力、石化、冶金等企业和厂矿快捷、准确、成功的消振技术。现将其汇集成书,在书中对其关键技术作了系统、全面、认真、负责、无保留的介绍。

本书可供从事汽轮发电机组和其他回转机械设计、研究、制造、运行、维修、安装、调试人员阅读,也可作为从事现场机组振动专业技术人员的工具书,以及高等院校热能动力专业师生的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

汽轮发电机组振动及事故 / 施维新, 石静波著. —2 版. —北京: 中国电力出版社, 2017.6

ISBN 978-7-5123-9371-4

I. ①汽… II. ①施… ②石… III. ①汽轮发电机组—机械振动—故障诊断 IV. ①TM311.014

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 111477 号

出版发行: 中国电力出版社

地 址: 北京市东城区北京站西街 19 号 (邮政编码 100005)

网 址: <http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑: 刘汝青 (63412382)

责任校对: 王开云

装帧设计: 张俊霞

责任印制: 蔺义舟

印 刷: 北京市同江印刷厂

版 次: 2008 年 8 月第一版 2017 年 6 月第二版

印 次: 2017 年 6 月北京第三次印刷

开 本: 787 毫米×1092 毫米 16 开本

印 张: 33.25

字 数: 740 千字

印 数: 4501—6500 册

定 价: 98.00 元

版 权 专 有 侵 权 必 究

本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换

前言



汽轮发电机组振动及事故（第二版）

《汽轮发电机组振动及事故》一书自出版以来，多次印刷。2008 年对该书做了改写和增补，一直深受广大读者喜爱。近些年以来，国内外振动技术又有了新的发展，为了能将国内外最新的振动实用技术和研究成果介绍给广大读者，且使该书更为实用，力求振动技术的有效传承，对原书进行了修订，形成《汽轮发电机组振动及事故（第二版）》。

国内汽轮发电机组振动技术研究从 20 世纪 50 年代初起步，经 60 余年的发展，不论是大机组振动监控、振动分析仪表制造，还是振动故障诊断、柔性转子和轴系平衡、振动事故分析技术水平等，都不同程度地步入了国际先进行列，某些方面甚至超过了国外先进水平。反映实用振动技术水平最重要的两项指标是振动故障诊断准确率和轴系平衡机组启停次数，若采用正向推理诊断，其准确率可达 90% 以上；轴系平衡若采用一次加准法，对于一般的轴系不平衡，成功率已达 80%~90%。

汽轮发电机组的振动故障诊断与处理技术是一门应用工程学科，不仅需要理论和实验室的试验研究，更需要现场长期实践知识和经验的积累，尤其是振动故障诊断和轴系平衡及振动事故分析技术，不但要依靠吸收和引进国外先进技术，而且更多地是要依靠国内广大振动科技工作者，长期艰苦的研究和积累。由于特殊的国情以及国内机组振动的复杂性和广泛性，不仅造就了一批杰出的振动专家，而且推动了国内振动技术的发展和创造，有些专家从事现场消振工作长达 50~60 多年。书中介绍的振动技术，主要是这些专家长期艰苦的理论研究成果和实践经验的积累。

本书内容重在实用，将相关的核心技术作了负责、无保留的具体介绍，这在当今市场经济环境下，实为难得。

本书的主要学术价值在于：提出了正向推理诊断振动故障和振动事故分析方法、查明了机组振动故障范围及机理、分类方法，纠正了传统的对机组振动的诸多误解，对长期以来一直难以说清的机组振动问题建立了系统、清晰的概念，由此才使目前的振动故障诊断准确率提高到 90%；在转子和轴系平衡方面，对柔性转子和轴系平衡技术进行了长期深入的研究，国内推广了真正的柔性转子平衡技术，提出了一次加准法，查明了影响系数法平衡柔性转子轴系出现三大弊病的机理，改进了原有的影响系数法、轴向不对称柔性转子现场平衡方法；在振动事故分析方面，提出了防止转轴碰磨引起弯轴事故的策略和措施、应用瞬态振动响应分析毁机事故，提出了大扭矩冲击下转子产生巨大不平衡的机理，等等。这些振动现象的发现和机理的查明，较国外要早 10~20 年。

在 20 世纪,许多出色的汽轮机、电机专家和工程师,对机组振动不了解;同样,振动专家对机组运行、检修技术不了解,都十分普遍。21 世纪以来,由于对专业知识和技能要求的提高,大量实践证明,这两种工程师和专家不能算是称职的专家和工程师。本书中介绍的内容对这些专家和工程师,具有较强的针对性。

本书不同于一般的机组振动专业书和相关的教科书,在振动故障诊断、消振和事故分析等方面,强调的是思维的严密性。诊断的故障原因和分析的事故原因,不是传统思维方式下诸多原因的综合和可能,而是提出了正向推理诊断振动故障和事故原因分析的思维模式,这是提高故障诊断和事故原因分析正确率最重要的手段。近 20 年实践证明,由此可以将目前的振动故障诊断和事故原因分析的准确率提高 3~4 倍。

振动技术的发展,为机组安全运行提供了十分重要的技术保证,也为现场提供了快捷、准确、有效的消振技术,给现场带来了十分可观的经济和社会效益。

本书不少内容是第一次发表,虽然经十多年的实践和验证,但有些内容尚待充实和完善。为使我国振动技术不断发展和提高,衷心希望国内同行和广大读者提出意见。

作 者

2017 年 4 月

阅 读 方 法

本书篇幅较长,涉及内容较多,振动故障诊断在目录编排上与一般振动专业书不同,不是传统的按常见故障源编排,而是从诊断故障思维方式、故障总目录、振动性质、故障分支目录编排,这也就是本书提出的振动故障诊断通用步骤。对习惯于常见振动故障源分类的读者,遇到振动问题时,如何在本书中尽快地找到相对应的内容,这是大多数读者关心的问题。这里推荐一种能较快进入角色的阅读方法。

对于振动测量和评价、转子和轴系平衡、振动事故分析等问题,按本书章节目录,可方便地找到相关内容和相应实例;振动故障原因诊断及消振,则需要按下列步骤,方可尽快地找到有针对性的相关内容,才能获得相关振动明确的故障原因和合理的消振对策。

(1) 首先阅读第二章的第一节~第四节,对国内目前振动故障诊断技术有大体了解,并对诊断振动故障思维方式、激振力与支撑动刚度的关系、机组振动分类,有一个总体的了解。不论使用何种振动故障诊断方法,这是诊断机组振动故障最基本的常识,由此可以对机组振动建立完整、系统、清晰的概念。

(2) 对发生的振动进行最基本测试,按表 2-1 所列方法进行严密、可靠分类。

(3) 将分类明确的振动,按书中的目录找到相关性质的振动。

(4) 若是不稳定普通强迫振动,如果需要进一步查明不稳定不平衡的具体故障原因,则要依据不稳定不平衡特征,按表 2-4 所列对不稳定不平衡进行分类。

(5) 按不稳定不平衡的类别和特征,查找相关内容,可以方便、准确地找到针对性的内容和实例。

经 30 多年消振实践和国内外消振资料验证,目前运行机组上所发生的各种振动故障原因,本书基本都包含在内,这是采用正向推理诊断振动故障的前提。

目 录



汽轮发电机组振动及事故 (第二版)

前言

阅读方法

第一章 机组振动测试和评价	1
第一节 概述	1
第二节 振动传感器的种类和选择	3
第三节 振动传感器的安装	8
第四节 通频振幅的测量	12
第五节 基频振幅和滤波器	17
第六节 振动相位的测量	21
第七节 机组振动测试	28
第八节 转轴振动的测量	32
第九节 机组振动特性测试	42
第十节 运行机组振动标准及规范	50
第十一节 机组振动报警和跳闸值设置	64
第二章 振动故障诊断	69
第一节 概述	69
第二节 机组振动故障诊断的思维模式	71
第三节 机组振动分类	78
第四节 振幅与激振力和支撑动刚度的关系	81
第五节 稳定普通强迫振动	88
第六节 机组中心不正与不对中	90
第七节 不稳定普通强迫振动	99
第八节 随机变化的不稳定不平衡	106
第九节 随时间变化的不稳定不平衡	118
第十节 随机组运行工况而变的不稳定不平衡	123
第十一节 机组启停中转轴碰磨的诊断	136
第十二节 工作转速下转轴碰磨振动诊断	143
第十三节 浮动和接触式密封对轴系振动的影响	150
第十四节 轴颈碰磨——莫顿效应	162
第十五节 轴承座轴向振动机理及消振对策	171
第十六节 随机振动	177
第十七节 振动频率和转子转速不符合的强迫振动	187

第十八节	自激振动基本特征	193
第十九节	轴瓦自激振动	196
第二十节	参数振动	207
第二十一节	汽流激振	210
第二十二节	振动故障诊断技术的研究与发展	222
第二十三节	振动故障诊断实例	235
第三章	转子平衡	285
第一节	概述	285
第二节	刚性转子测振幅平衡法	288
第三节	刚性转子测相平衡法	294
第四节	柔性转子不平衡特性	298
第五节	柔性转子平衡方法概述	302
第六节	模态平衡法	304
第七节	工作转速下转子振型的分解	309
第八节	如何获得平衡重量与振型的正交	313
第九节	柔性转子影响系数法	319
第十节	试加重量的确定	324
第十一节	单个柔性转子的合理平衡	328
第四章	轴系平衡	335
第一节	轴系平衡的必要性	335
第二节	轴系平衡的特点	337
第三节	柔性转子轴系平衡方法的选择	339
第四节	单转子平衡法	342
第五节	改进型影响系数法	345
第六节	一次加准法	347
第七节	国产 200MW 机组接长轴的平衡	357
第八节	带外伸悬臂转子的轴系平衡	363
第九节	支撑动特性差别时的轴系平衡	369
第十节	汽轮机、发电机转子检修后的质量平衡	374
第十一节	远程操控的轴系平衡	381
第十二节	国内柔性转子轴系平衡技术的发展	383
第十三节	轴系平衡经验	394
第十四节	轴系平衡实例	399
第五章	振动事故原因分析	421
第一节	概述	421
第二节	转轴碰磨引起的弯轴事故	423
第三节	轴系破坏和毁机事故	442

第四节	轴瓦乌金碎裂与碾压	470
第五节	轴瓦紧力丧失	477
第六节	动静部件磨损	480
第七节	动静部件疲劳损坏	483
第八节	保护装置和仪表的误动作	487
第九节	振动事故分析实例	489
参考文献		522

机组振动测试和评价

要掌握机组振动状态和评价机组振动,诊断振动故障,进行转子和轴系平衡,分析振动事故,首先要对机组振动进行测试并搜集振动数据。因此,熟悉和掌握机组振动测试方法,是完成这四项工作的基础。

要获得正确、可靠和具有实际价值的振动测试结果,不仅要熟悉振动测量原理、机组振动测试要求和方法,在熟悉仪表使用方法和功能的前提下,还要具有一定的现场振动测试经验。依据不同的振动测试目的应该测试哪些内容、如何测试,数据才可靠和具有实际价值,这是现场测试的经验。

本章将详细讨论机组振动测量原理、方法、要点和测试经验,最后介绍目前国内外评价机组健康状况的三种尺度的规范和振动报警、跳闸值的整定方法。

第一节 概 述

机组振动测试包含振动测量和振动试验两个方面,只有将振动测量和振动试验紧密地结合,才能深入地了解机组振动特征。在现有的和可能的振动测量手段和试验条件下,如何取得有价值的测量结果,这是本章要介绍的振动测试经验和技巧。

振动测量是一项专门技术,因篇幅所限,本章只对机组振动测量有关的传感器、仪表原理、正确的使用方法作简要的介绍,着重介绍轴承振动、轴振通频、基频、相位、转轴振动、机组振动特性测试方法。

一、振动测量参数的选取

描述机器振动状态的参数有振动位移(振幅)、速度和加速度三个应测物理量。但为了有效地反映机器危安状态,对于工作性质、转速、结构不同的机器,应采用不同的振动物理量描述。例如:对于高频或带有较大冲击的机器,采用加速度描述较合理;相反,对于转速较低、无明显冲击的机器,应采用振动位移描述运转的平稳性。汽轮发电机组工作转速不是很高,也无冲击,采用振动位移或速度较为合理,但长期以来一直沿用振动位移,这是由下列原因所致:

(1) 汽轮发电机组动静间隙很小,特别是汽轮机高压部分,为了避免振动过大发生动静碰磨,采用振动位移限制机组振动,比采用速度、加速度有效。

(2) 支撑刚度一定时,振动位移是转子不平衡力的单值函数,因而采用振动位移作为转子平衡重量计算依据比采用速度有效。

(3) 大量的振动故障诊断经验证明, 采用振动位移描述故障特征和现象比采用振动速度有效和直观。

(4) 早先的振动测量技术测量位移较测量振动速度、加速度容易, 由此使人们对振动位移建立了明确的直观概念。所以, 尽管目前测量振动速度较测量位移容易实现, 但由于上述 (1) ~ (3) 的原因, 在目前机组振动故障诊断、转子和轴系平衡、机组振动状态评价中, 有时虽也有采用振动烈度 (速度均方根值), 但没有采用振动位移那么广泛, 因此不能简单地认为机组振动测试中采用振动位移是一种陈旧的方法。

二、机组振动测量项目

机组振动测试是为了实现某一目的而进行的, 因此从机组测试目的来分, 可分为下列六类。

1. 运行中的振动监测

运行中的振动监测不仅是为了掌握机组振动状态, 而且是将振动作为机组故障的信号。例如转轴裂纹、汽轮机转动部件损坏飞脱、静子部件松动、转轴碰磨等故障, 由振动变化可以对其故障做出明确的诊断。

为了监测振动状态, 采用传统的定期和不定期监测, 不仅劳动强度大, 而且已不能完全满足机组安全运行要求。目前, 国内 100MW 以上机组都安装有振动监控系统。这种系统不仅能连续监测轴系相关轴瓦振动和轴振, 在 CRT 上显示, 而且数据自动储存, 必要时从 DCS 中调出振动变化趋势曲线, 为查找和诊断振动故障提供了方便, 该系统设有报警和跳闸保护功能。目前国内振动监测、控制系统已达到国际先进水平。

20 世纪 70 年代中期, 国外积极研究振动故障在线诊断系统, 或称专家诊断系统, 国内在 80 年代中期已有十多个单位开始研究。设计这种诊断系统的本意, 是对运行机组进行实时 (在线) 粗线条诊断, 为运行人员进行纠正性的操作提供依据, 但是经过 40 余年研究和现场使用证明, 不论是国内还是国外研制的专家系统, 诊断结果的可信度和实用价值都尚待提高。

通过近几年研究已经查明, 这种诊断系统诊断结果之所以不可信, 是因为采用了反向推理诊断故障。如果采用正向推理专家系统, 可以将目前在线振动故障诊断的准确率提高到 90%, 而且可以提出切实有效的纠正性操作的具体建议。

2. 机组振动评价

在新机投运移交生产、机组振动性能考核时, 必须对机组振动水平作出评价, 这是一项具有权威性的振动测试。这种振动测试除对仪表精确度有要求外, 还应依据一定的规范进行, 详见本章第十节。

3. 新机调试中的振动测试

新机启动调试中的振动监测是一项重要的专业性较强的工作, 其主要目的是指导新机启动, 评定机组制造、安装质量, 并为机组以后启停、运行和诊断振动故障提供历史依据; 若振动过大, 还应按振动故障诊断的要求进行测试。

4. 振动故障诊断中的振动测试

这种振动测试的目的是诊断故障, 而这里所说的诊断故障要比上述运行中在线故障

诊断深入和具体得多。由振动现象制订测试方案，到测试结果归纳提炼成振动特征，最后作出诊断并提出消振对策，涉及的内容在诸项振动测试中最为复杂，难度也是最大的。

5. 转子和轴系平衡中的振动测试

转子不平衡是引起机组振动最主要的激振力，因此轴系平衡是一项最重要的消振工作。轴系平衡中振动测试的目的是为计算转子平衡重量提供依据，所以主要测取转子有关轴承或转轴原始和加重后的基频振幅及相位。当轴系不平衡与机组工况有关时，还应测试不同工况下轴瓦、轴振的基频振幅和相位，以便对不同工况下转子平衡给予合理的折中。

6. 振动特性试验研究的振动测试

这是针对机组设计、制造、安装和运行中发生的振动问题，所进行的专项振动研究的测试，如支撑刚度、自振频率的实测，其目的是从结构上查明故障原因和机理，制订改进方案。测试内容和方法与振动故障诊断相似，但涉及的因素较为简单。

第二节 振动传感器的种类和选择

测量振动早期采用机械式振动表，例如 20 世纪 50 年代国内电厂广泛使用的千分表式振动表，国外采用的机械记录式振动表。这种表计由于存在磨损、读数不便、精确度差、振动信号不能远距离传送等缺点，目前已经淘汰。

曾有一段时间国内外采用普通光和激光测量振动，但由于使用不便、造价高、振动信号不便远距离传送等原因，这类表计也未能得到实际使用。

为满足机组集中控制，振动信号的记录、还原和数据处理的需要，振动信号必须远距离传送。电气式振动仪表就具有这一功能，目前这种表计不论是在实验室还是在现场，都得到了广泛的应用。

电气式振动仪表虽有多种结构和型号，但主要都由振动传感器和仪表本体两个部分组成。振动传感器也称拾振器，它的功能是将机械振动转换成电压或电流、电荷等信号，输入仪表本体，进行处理后显示通频振幅、基频振幅、相位、频率、频谱等，或作进一步处理，显示振动变化趋势、波德图等。

一、振动传感器的种类

振动传感器按工作原理分，有电涡流型、速度型、加速度型、电容型、电感型五种，但后两种因受周围介质影响较大，目前已很少使用，本节主要介绍前三种振动传感器的结构、工作原理、现场使用中的注意事项及选用方法。

(一) 电涡流传感器

电涡流传感器的外形如图 1-1 所示，它的形状与普通螺栓十分相似，其头部有扁平的感应线圈，将它固定在不锈钢螺栓一端，感应线圈的引线通过螺栓另一端与高频电缆相连。

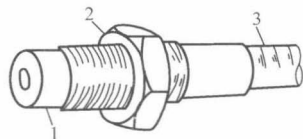


图 1-1 电涡流传感器外形

当头部感应线圈通上高频（1~2MHz）电流时， 1—头部线圈；2—固定螺帽；3—高频电缆

线圈周围就产生了高频电磁场;如其周围有金属导体,便会在金属表面产生感应电流,即电涡流。根据楞次定律,电涡流产生的电磁场与感应线圈的电磁场方向相反,这两个磁场相互叠加,改变了感应线圈的阻抗,感应线圈内阻抗变化可用下式表示,即

$$Z = f(\mu, \gamma, r, \chi, I, \omega)$$

式中 μ ——磁导率;

γ ——电导率;

r ——线圈尺寸因子;

χ ——感应线圈与导体之间的间隙;

I ——励磁电流;

ω ——励磁电流角频率。

当金属导体结构均匀、各向同性且 μ 、 γ 、 r 、 χ 、 I 、 ω 一定时,感应线圈阻抗 Z 的变化是感应线圈与金属导体之间距离的单值函数。

如果 μ 、 γ 、 χ 、 I 、 ω 一定,增大线圈的半径 r ,磁场分布范围将增大,但感应磁场强度的变化幅度减小,反之则相反。因此这种传感器的线性范围随感应线圈直径的增大而加大,而传感器灵敏度(单位间隙的阻抗变化值)随感应线圈直径的增大而减小。

为了使感应线圈获得高频电流,应将感应线圈接入振荡回路,由此在高频振荡回路输出端可以获得与间隙 χ 有关的高频谐波信号。该信号经放大、检波、滤波后,便可得到一个与 χ 值成正比的输出电压,输出电压的直流分量正比于感应线圈与金属导体之间的静态、动态平均间隙。若线圈与金属板之间存在相对振动,则有交流电压输出,该交流电压正比于金属板与感应线圈之间的相对位移。因此,这种传感器又称位移传感器,它不但可作静态测量,例如两个物体之间的距离、金属板的厚度等,而且可以作动态测量,例如振动。

电涡流传感器检测到的交直流信号是叠加在线圈的高频电源上的,如果直接将这种混频信号送到振动仪,即使采用高频电缆,也会使传感器灵敏度显著降低,而且易受干扰。为防止这些不利影响的发生,必须在电涡流传感器附近设置放大器、检波器和滤波器,将振动信号放大,并检出静态的直流电压和相对位移的交流信号后送到振动仪。这一装置称为电涡流传感器的前置器。前置器到电涡流传感器的高频电缆是由制造厂精心调配好的,不同型号或不同系列的传感器不能互换,而且不能延长和截短。有些电涡流传感器为了安装方便,制造厂配制了延长线,目前最长达10m。但凡是配制了延长线的电涡流传感器,使用时必须将延长线接上,否则仪表指示值和零位会与实际不符。

(二) 速度传感器

速度传感器是目前较常见的一种振动传感器,从它的工作原理来看,实际上是一个往复式永磁小发电机。按其支撑系统工作原理分,有绝对式和相对式两种。

绝对式速度传感器的结构如图1-2所示,当传感器的外壳固定在振动物体上时,整个传感器跟着振动物体一起振动,而处在空气间隙内的动线圈是用很软的簧片固定在外壳上的,其自振频率 ω_0 较低。当振动物体的振动频率 $\omega \geq 1.5\omega_0$ 时,动线圈处在相对(相对于传感器外壳)静止状态,线圈与磁钢之间发生相对运动,动线圈切割磁力线而产生

感应电动势 E ，其表达式为

$$E = BLv$$

式中 B ——磁场强度；

L ——感应线圈导线长度；

v ——相对运动速度。

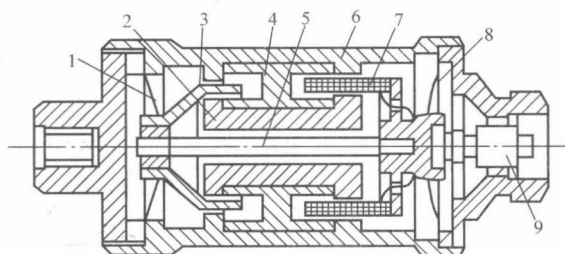


图 1-2 绝对式速度传感器的结构

1、8—黄片；2—永久磁钢；3—阻尼杯；4—导磁体；5—连接杆；6—外壳；7—动线圈；9—引出接头

当 B 、 L 一定时，输出电动势 E 正比于振动速度 v ，所以称它为速度传感器。又因为其振动的相对速度是相对于空间某一静止点而言的，故又称其为绝对式速度传感器，或称地震式速度传感器。

相对式速度传感器工作原理和绝对式速度传感器基本相同，不同的是动线圈采用较硬的簧片和外壳固定，与动线圈直接相连的拾振杆伸出传感器外壳。测量振动时将拾振杆直接压在振动物体上，传感器外壳固定在支架上，测量的振动是表示支架相对于物体的振动，所以称为相对式速度传感器。由于拾振杆与振动物体间存在摩擦，因此这种传感器目前很少采用。

不论是绝对式还是相对式速度传感器，若要取得与振动位移成正比的振动信号，传感器输出的信号必须经积分回路。这种电路一般都设在仪表本体内，但少数振动仪将这一电路单独分离出来，称为速度/位移转换器（VDC），如美国本特利（Bently）的速度传感器附带这种转换器，而仪表本体内还设有积分电路。这种外设积分电路给记录振动位移信号和检查振动仪输入回路是否正常带来方便，但投资会增加（VDC 与速度传感器的价格相当）。

（三）加速度传感器

加速度传感器的结构见图 1-3，它利用压电材料（如石英、陶瓷和酒石酸钾钠等）的压电特性，当有外力作用在这些材料上时便产生电荷。

图 1-3 中，蝶形簧片通过质量块和导电片与压电晶片紧密接触，而且保证在一定的振动值下它们相互不会分离。将这些部件装在不锈钢外壳内，晶体片的电荷通过导线引出。当把这样的装置固定到振动物体上时，该装置会由于物体振动而产生加速度。若振动是简谐振动，则其加速度可表示为：

$$a = \omega^2 A = 4\pi^2 f^2 A$$

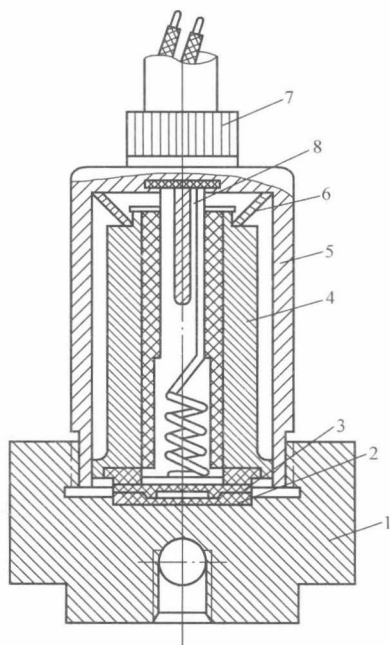


图 1-3 加速度传感器的结构

1—底座；2—压电晶体片；3—导电片；4—质量块；
5—外壳；6—蝶形簧片；7—引出线接头；8—导线

式中 ω 、 f ——振动角频率和频率；

A ——振动幅值（单振幅）。

根据牛顿定律 $F=ma$ ，施加在压电晶体片上的作用力与质量块的质量 m 和振动加速度 a 成正比。而压电晶体片输出电荷与作用在晶体片上的力成正比，故当 m 一定时，传感器输出电荷与振动加速度成正比，所以称它为加速度传感器。

压电晶体片产生的电荷，只有当测量电路具有无限高的输入阻抗时才能存在，这一点实际上是办不到的，因此加速度传感器不能作静态测量，而只能作动态测量。即只有在受到连续交变力作用时，压电晶体片才能连续不断地产生电荷，并在电路中形成电流和电压。

如果加速度传感器的输出信号通过较长的导线输到振动仪，即使输入阻抗很高，也会显著降低传感器的灵敏度，而且仪表的指示值与导线长度、阻抗直接有关。为了克服这些不利影响，所有加速度传感器输出都采用了一定

阻抗而长度较短的高频电缆。为满足远距离传送振动信号的需要，应将其输出信号先送到前置放大器，然后才能输送到振动仪或别处。

采用加速度传感器，要获得振动速度信号，必须经一次积分；要获得振动位移信号，必须经两次积分。由此使原来的振动信号衰减 98% 以上，灵敏度显得不足，而且受外界干扰影响较大，所以加速度传感器虽然结构简单，且特别牢靠，但在汽轮发电机组振动测试中一直没有得到广泛的应用。目前电厂辅机振动测试、汽轮发电机组运行中轴瓦振动监测，较多的采用加速度传感器。配有这种传感器的振动仪，进行转子平衡时，绝大多数还是采用振动速度作为转子平衡重量计算依据，但振动速度或加速度不是激振力的单值函数。

除上述三种传感器外，还有一种组合式传感器，即把电涡流传感器和速度传感器组合成一体，这种传感器的功能和测振原理见本章第八节“五、转轴绝对振动的测量”所述。

二、振动传感器的选择

目前较先进的振动仪分别配有电涡流传感器、速度传感器和加速度传感器。在机组振动测试中合理地选择振动传感器，不但可以获得满意的测量结果、节省劳力和时间，而且对于尽快查明振动故障原因、提高转子平衡精度和减少机组启停次数，都有着重要作用。

合理地选择传感器主要考虑两个方面：一是传感器性能；二是被测对象的条件和要求。只有两者很好地结合，才能获得最佳效果。

对于测量汽轮发电机组振动来说，电涡流传感器和速度传感器都是需要的，但是在一般测试中，由于电涡流传感器安装麻烦，而且又费时，故应尽可能以速度传感器替代。

但在某些振动故障诊断中及当转子质量与静子质量之比小于 $1/10$ 时, 如汽轮机高压部分, 应采用电涡流传感器测量转轴振动; 相反, 当转子质量与静子质量之比值较大时, 如汽轮机低压和发电机部分, 应采用速度传感器测量轴承振动或测量转轴绝对振动。当被测振动物体质量较小时, 不能使用质量较大的速度传感器, 应采用质量较小的电涡流或加速度传感器。

目前国内容量 200MW 以上的机组, 振动监测系统在机组主要轴瓦处都配有涡流传感器, 从接线端子直接可以获得轴振信号, 无须临时安装涡流传感器。一般机组还配有速度或加速度传感器来测量瓦振, 由于传感器安装位置及方向, 极大部分机组与国家标准不符, 因此瓦振信号只能供运行监测, 不能作为评价机组振动的依据, 更不能作为计算轴系平衡重量和振动故障诊断的依据。

为了对上述三种振动传感器的性能有一个简要的了解, 现将这些传感器的主要特性和优缺点归纳如下, 供选用时参考。

(一) 电涡流传感器

(1) 可以直接测量转轴振动, 由于是非接触式测量, 可以避免接触测量中产生的不良影响。

(2) 能作静态和动态测量, 所以它可以测量 2Hz 以下的低频振动, 而且适用于绝大多数机器的环境条件。

(3) 价格比较便宜, 本身价格为速度传感器的 $1/5$, 若考虑前置器的投资, 则与速度传感器本身价格相近。

(4) 输出信号与振动位移成正比, 对于采用振幅描述振动状态的大多数机器来说, 它可以获得较高的输出信号。

(5) 结构简单可靠, 尺寸小, 没有活动部件。

(6) 针对汽轮发电机组的振动, 它具有合适的频率响应范围, 标定较容易。

(7) 除用于测量振动和部件静态位置外, 还可以作为转速测量和振动相位测量的键相信号。

(8) 测量振动物体材料不同, 会影响传感器线性范围和灵敏度, 须重新标定。

(9) 需外加电源, 传感器安装比较麻烦, 必须配前置器。

(二) 速度传感器

(1) 安装简单, 可适用于绝大多数机器的环境条件, 对于汽轮发电机组振动来说, 它具有合适的频率响应范围。

(2) 不需要外加电源, 振动信号可以不经任何处理传送到需要的地方。

(3) 体积大、质量较重, 活动部件易损坏, 低频响应不好, 一般测量 15Hz 以下的振动时, 将产生较大的振幅和相位误差, 必要时须加补偿电路。

(4) 标定较麻烦, 只能作动态测量, 价格较贵。

(三) 加速度传感器

(1) 体积小、质量轻, 适用于受附加质量影响显著的振动系统的测试, 例如汽轮机叶片、发电机静子线包、飞机外壳的振动测试。

(2) 结构紧凑、牢靠, 不易损坏。

(3) 环境噪声、传感器安装方法和导线敷设方式, 对测量结果有较大的影响。对汽轮发电机组来说, 其工作频率范围显得太高。标定困难, 只能作动态测量, 需设前置放大器, 价格较贵。

第三节 振动传感器的安装

振动传感器安装正确与否, 不仅直接关系到能否获得正确和有价值的测量结果, 而且不正确的安装会造成传感器的损坏。在使用携带式振动仪表测量机组振动时, 由于是短时间临时测量, 因此往往不注意振动传感器的正确安装, 引起显著的测试误差, 给振动故障诊断和轴系平衡带来麻烦。为了提高机组振动测试结果的正确性和可靠性, 本节具体讨论振动传感器的正确安装方法及要点。

在本章第二节中已经介绍了三种振动传感器, 加速度传感器由于目前在现场机组振动测试中很少采用, 而且安装方法与速度传感器基本相同, 故这里不作单独介绍。下面具体介绍涡流传感器和速度传感器的安装方法。

一、涡流传感器的安装

涡流传感器的安装是三种传感器中最复杂的一种。在安装中应主要考虑以下几点。

1. 工作温度

一般涡流传感器最高容许温度不超过 180°C , 目前国产涡流传感器最高容许温度大部分是在 120°C 以下, 实际上工作温度超过 70°C , 不仅其灵敏度会显著降低, 还会造成传感器的损坏 (黏结剂失效, 黏结部件分离)。因此测量汽轮机高、中、低压转子转轴振动时, 传感器必须安装在轴瓦内, 只有特制的高温涡流传感器才允许安装在汽封附近。

2. 避免交叉感应和过小的侧向间隙

当两个垂直或平行安装的传感器相互靠近时, 它们之间将产生交叉感应, 使传感器输出灵敏度降低, 如图 1-4 所示。为了避免交叉感应, 两个传感器不能靠得太近。对于不同类型的涡流传感器, 要求两个传感器之间距离 A 的数值是不同的, 例如: 本特利 (Bently) 的 3000 系列传感器规定 $A \geq 25\text{mm}$; 而对 7000 系列传感器, $A \geq 40\text{mm}$ 。

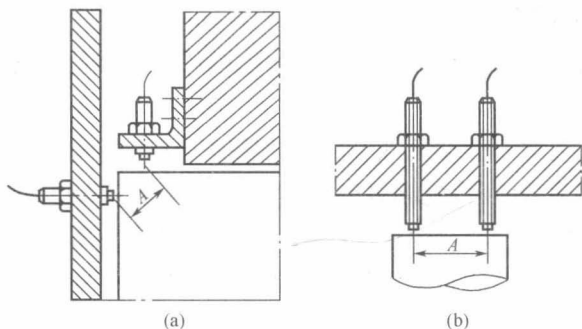


图 1-4 涡流传感器的交叉感应

(a) 垂直交叉; (b) 水平交叉