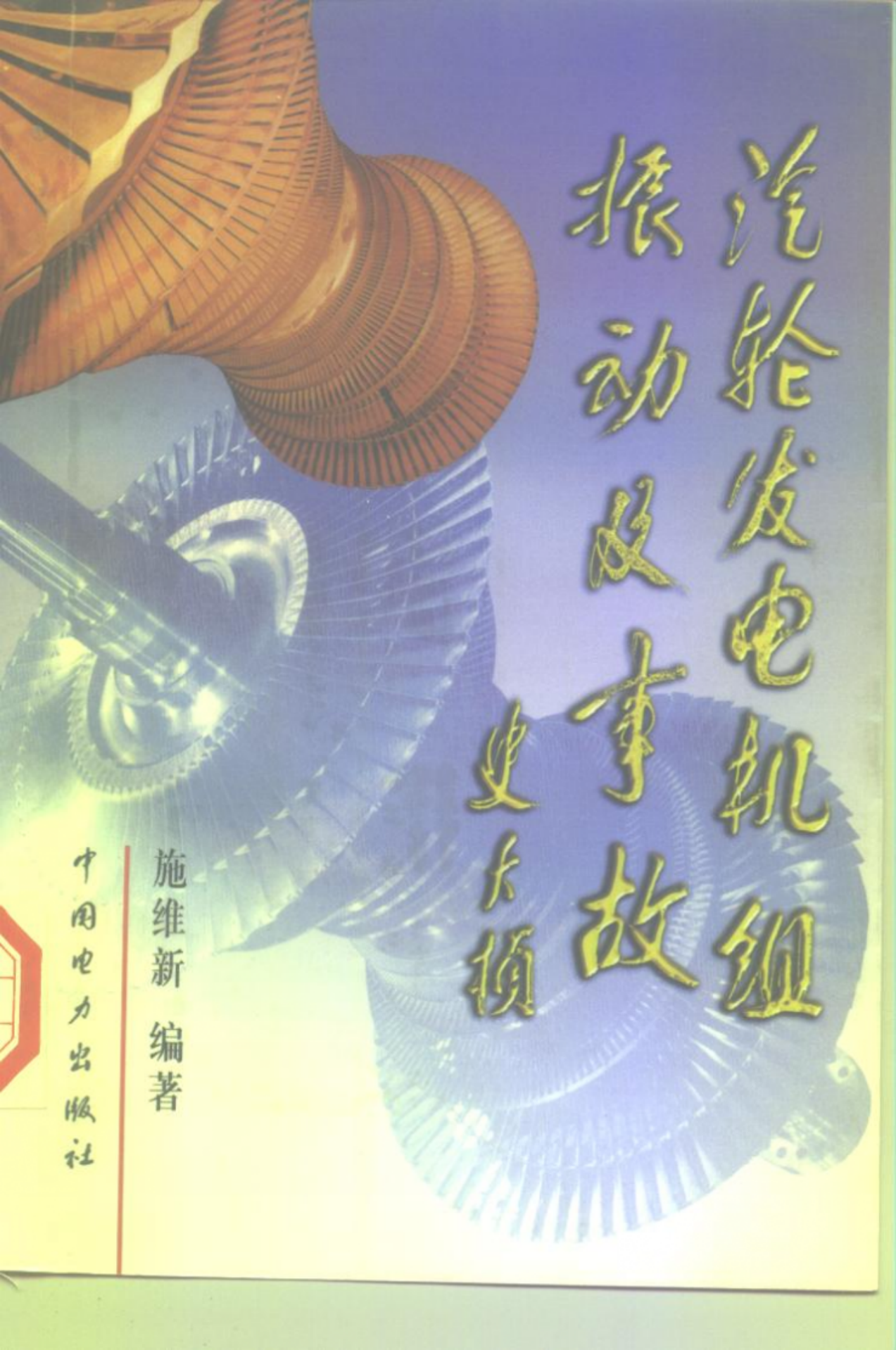




汽轮发电机组 振动及事故

史大损

施维新 编著

中国电力出版社

内 容 提 要

本书系统地介绍了机组振动测试、振动故障诊断、转子及轴系平衡、振动事故分析方法及经验,并对振动故障和事故机理作了详细的阐述。

本书在总结我国火电厂 40 多年来的机组振动故障诊断、转子及轴系平衡方法和经验的基础上,提炼出一套有效的故障诊断、消振和事故分析方法,其中不少内容还是第一次发表。在故障诊断和事故分析方面,本书不是一般的经验总结,或振动现象和可能原因的罗列,而是强调故障的范围、特征及形成机理,具有很强的针对性和实用性。

本书可供热力装置运行、维修、安装人员、振动专业技术人员及有关专业的师生阅读。

图书在版编目 (CIP) 数据

汽轮发电机组振动及事故/施维新编著. - 北京: 中国电力出版社, 1998. 10

ISBN 7-80125-857-6

I. 汽… II. 施… III. ①汽轮发电机组-振动②汽轮发电机组-故障诊断 IV. TM311.14

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (98) 第 20349 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

北京市梨园彩印厂印刷

各地新华书店经售

*

1991 年 4 月第一版

1999 年 1 月第二版 1999 年 1 月北京第二次印刷

787 毫米×1092 毫米 32 开本 17 印张 379 千字

印数 3391—7790 册 定价 20.00 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换)

前 言

振动是汽轮发电机组运行中最常见的主要故障之一，严重时会造成振动事故。目前许多地区的消振和振动事故原因分析，主要还是凭某些人的经验和直觉进行，因而常走不少弯路。为了尽快查明产生振动和事故的原因，防止事故再次发生，制定有效的消振和防治对策，特编写本书。全书共分五章。

第一章介绍了目前国内使用的各种形式测振仪表的结构原理和使用方法，并具体介绍了新机启动、振动故障诊断、轴系平衡时振动测试、机组振动特性测试和转轴振动测量方法。最后还介绍了国内外目前评价机组振动标准的三种尺度，及机组振动报警和跳闸值的整定方法。

第二和第五章全面系统地总结了我国 40 年来和国外的汽轮发电机组振动故障诊断和振动事故分析方法及经验，其中着重介绍故障诊断和事故分析思路、故障特征、故障范围、故障和事故形成机理。为了便于理解和加深印象，在这两章最后列举了几个较典型的故障诊断和事故分析实例，并将故障诊断和事故分析推理的全过程作了介绍。

由振动故障诊断结果统计表明，引起振动过大的激振力中 95% 是转子不平衡力，所以转子和轴系平衡是现场最重要的消振工作，为此在第三章和第四章介绍了刚性、柔性转子平衡原理、方法和经验。

目前投运的大机组均采用单元制，启动机组必须点炉并启动一切有关辅助设备，由此需要消耗大量的燃油和厂用

电。据估算，目前容量 100~300MW 机组启动一次，一般要花费 4~12 万元，因此从经济性、安全性和投运紧迫性来看，都不允许多次启停进行轴系平衡。在保证轴系平衡质量的前提下，以最少的机组启停次数，争取启动 1~2 次就结束轴系平衡，一直是现场平衡追求的主要目标。因此要求专业人员不但要系统地掌握柔性转子平衡理论和方法，还应积累较丰富的平衡经验，为此在第三章和第四章除系统地介绍柔性转子平衡理论、方法外，还着重介绍转子和轴系平衡经验。

经几年来不断总结和完善，轴系平衡一次加准法目前成功率可达 80% 以上，这是柔性转子平衡理论、方法和现场轴系平衡经验完美的结合。第四章对一次加准法的具体步骤和要点作了详细的介绍。另外，为了提高一次加准法的成功率，对目前大机组中出现的，带外伸悬臂转子、支承系统动特性严重差别等一些新的轴系平衡问题作了详细的分析和讨论。

本书是一本针对性和实用性较强的振动专业书，因此对于初接触机组振动和尚未深入的读者来说，最好先通读一遍，然后再依据个人所接触到的振动问题，查找有关章节和实例，作对比分析。其中掌握分析和诊断故障的思路是关键，由此对本书所述内容才能有较深入和全面的了解，在此基础上处理较复杂的机组振动才可以轻车熟路。从认识机组振动现象、掌握振动特征开始，到查明振动故障或事故原因，直至振动消除，一步一个脚印地顺利走完全过程。

本书不少内容是第一次发表，虽经过了近十几年的实践和总结，但因时间仓促、水平所限，尚待充实和完善。为使我国机组消振技术水平能有进一步发展和提高，衷心希望国

内同行提出意见和看法，来信请寄西安市兴庆路热工研究院，
邮编 710032，电话 (029) 2487030，电子信箱 Vibration @
263.net。

在本书编写过程中得到了热工研究院有关同志的大力支持和协助，在此一并表示深切的感谢。

原电力工业部史大桢部长对机组振动一直十分关心，承蒙史大桢部长为本书题写书名，在此深表谢意。

施维新

1998.1

目 录

前言

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	4
第三节 振动传感器的安装	13
第四节 通频振幅和振动滤波器	20
第五节 振动相位的测量	29
第六节 机组振动测试	40
第七节 转轴振动的测量	46
第八节 机组振动特性测试	61
第九节 机组振动标准及规范	76
第十节 机组振动报警和跳闸值整定	93
第二章 振动故障诊断	99
第一节 机组振动故障诊断的思路和方法	100
第二节 机组振动分类	109
第三节 振幅与激振力和支承动刚度的关系	113
第四节 稳定普通强迫振动	123
第五节 不稳定普通强迫振动	131
第六节 随机变化的不稳定不平衡	141
第七节 随时间变化的不稳定不平衡	149
第八节 随机组运行工况而变的不稳定不平衡	158
第九节 机组启停中转轴碰磨的诊断	171
第十节 工作转速下转轴碰磨振动诊断	178

第十一节	轴承座轴向振动机理及原因	191
第十二节	振动频率和转子工作频率不符合的 强迫振动	198
第十三节	自激振动基本特征	206
第十四节	轴瓦自激振动	211
第十五节	参数振动	227
第十六节	汽流激振	231
第十七节	振动故障诊断实例	236
第三章	转子平衡	257
第一节	概述	257
第二节	刚性转子测振幅平衡法	261
第三节	刚性转子测相平衡法	272
第四节	柔性转子不平衡特性	280
第五节	柔性转子平衡概述	287
第六节	模态平衡法	290
第七节	工作转速下转子振型的分解	299
第八节	如何获得平衡重量与振型的正交	305
第九节	影响系数法	315
第十节	试加重量的确定	325
第四章	轴系平衡	338
第一节	轴系平衡的必要性	338
第二节	轴系平衡方法	342
第三节	加重平面的选取	350
第四节	轴系平衡重量计算	356
第五节	国产 200MW 机组接长轴的平衡	388
第六节	带外伸悬臂转子的轴系平衡	395
第七节	支承动特性差别时的轴系平衡	403

第八节	轴系平衡经验	414
第九节	轴系平衡实例	426
第五章	振动事故原因分析	434
第一节	概述	434
第二节	转轴碰磨引起的弯轴事故	436
第三节	轴系破坏和毁机事故	457
第四节	轴瓦乌金碎裂与碾压	485
第五节	轴瓦紧力丧失	495
第六节	动静部件加速磨损和转动部件 不均匀磨损	500
第七节	动静部件疲劳损坏	505
第八节	危急保安器和保护仪表的误动作	512
第九节	振动事故分析实例	513
参考文献		535

机组振动测试和评价

要掌握机组振动状态，诊断振动故障，进行转子平衡，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。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定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，着重介绍轴承通频、基频、相位、转轴振动、机组

振动特性测试方法。

就振动测量目的来说，为了描述机器工作状态，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。当汽轮发电机组工作转速不是很高，也无冲击时，应用振动位移和速度较为合理，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较采用速度、加速度有效。

2) 支承动刚度一定时，振动位移是转子不平衡力的单值函数，因而采用振幅作为转子平衡重量计算依据较采用速度有效。

3) 由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，较采用振动速度容易和直观。

4) 测量振动的历史原因。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，但由于上述前三点的原因，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）的，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。

机组振动测试内容，如果按目的分，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、汽轮机叶片损坏、静子部件松动等。

为了监测振动状态，采用传统的定期和不定期监测已不能完全满足机组安全运行要求，大机组应连续监测和自动记录振动。早在 70 年代初，国内少数机组采用计算机控制的数据采集、贮存、打印图表，目前在大机组中已较为普遍采用。70 年代中期，国外积极研究的振动故障在线诊断，有的称专家系统，国内目前正在研制和开发，这种在线诊断系统从实际使用情况来看，不论是国外还是国内研制的，诊断结果的可信度和实用性尚待研究。

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，这是一项带权威性的振动测试。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，详见本章第九节。

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、运行和判断振动故障提供依据；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。由振动现象制定测试方案，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，涉及内容是诸项振动测试中最为丰

富、难度最大的。

5. 转子和轴系平衡中振动测试

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，当轴系平衡与机组工况有关时，还应测试不同工况下轴承基频振幅和相位，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，如支承刚度、自振频率的实测，其目的是从结构上查明故障原因和机理，制定改进方案。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 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、振动信号不能远距离传送等原因，这类表计也未能得到广泛使用。

为了机组集中控制，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，因此这种表计目前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。

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、电感型等五种，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、现场使用中注意事项及选用方法。

1.2.1 电涡流传感器

电涡流传感器的外形如图 1-1 所示，它的外形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，感应线圈的引线从螺栓另一端与高频电缆相连。

当头部感应线圈通上高频（1~2MHz）电流时，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。

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

式中 μ ——导磁系数；

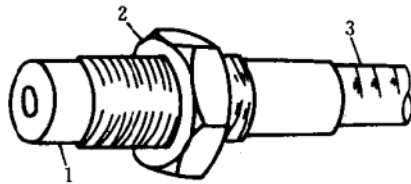


图 1-1 电涡流传感器外形

1—头部线圈；2—固定螺帽；

3—高频电缆

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 ——励磁电流圆频率。

当金属导体结构均匀、各向同性且 μ 、 γ 、 r 、 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。

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

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，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，它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，而且还可以作动态测量。

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，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与实际不符。

1.2.2 速度传感器

速度传感器是目前较常见的一种振动传感器，它的工作原理实际上是一个往复式永磁小发电机。按其支承系统工作原理分，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6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7是用很软的簧片1、8固

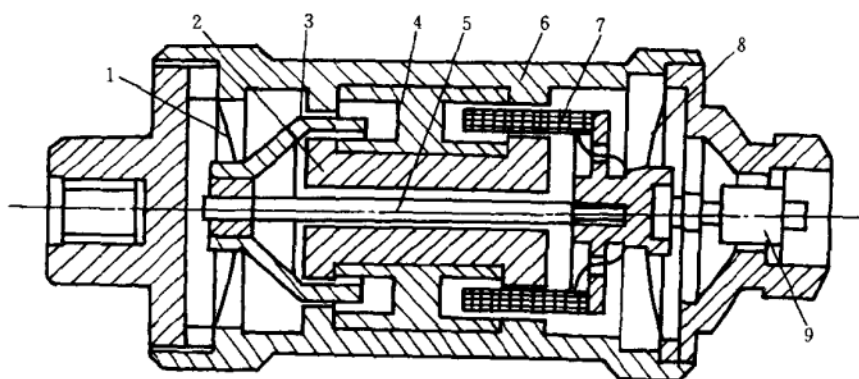


图 1-2 绝对式速度传感器的结构

1、8—簧片；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—引出线接头

定在外壳上的，其自振频率 ω_n 较低。当振动物体的振动频率 $\omega \geq 1.5\omega_n$ 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势 E ：

$$E = BLv$$

式中 B ——磁场强度；
 L ——感应线圈导线长度；
 v ——相对运动速度。

当 B 、 L 一定时，输出电势 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，故又称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，所以称它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，称它为速度/位移转换器（VDC），如美国本特利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，但投资也相应增加（VDC 与速度传感器的价格相当）。

1.2.3 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 4 和导电片 3 与压电晶体片 2 紧密接触,而且保证在一定的振动值下它们相互不会

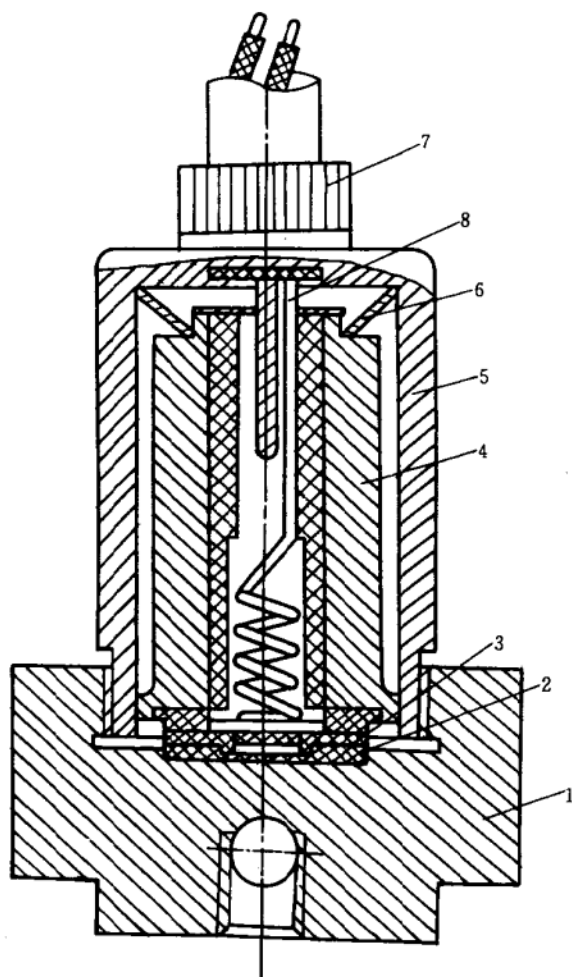


图 1-3 加速度传感器的结构

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