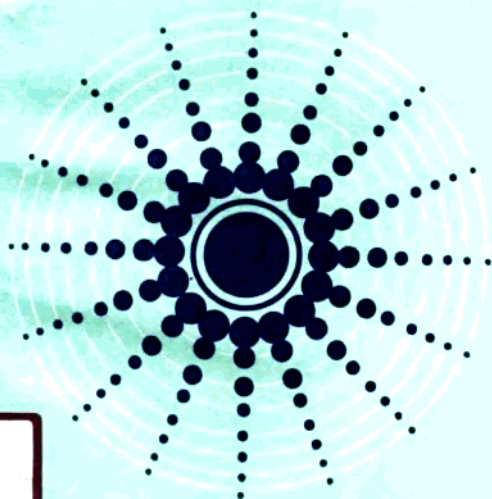


大型火电机组启动调试丛书

汽轮发电机组振动

能源部西安热工研究所 施维新



06

水利电力出版社

内 容 提 要

本书系统地介绍了大机组调试中的振动测试、振动故障诊断和转子平衡方法。为了便于读者尽快地掌握机组振动测试技能，在第一章中除对国内目前使用的各种进口和国产振动仪表的结构、原理和使用方法作了详细的介绍外，还详细地介绍了国内目前评价机组振动的三种尺度。本书第二、三章总结了我国30多年来火力发电厂中机组振动故障诊断和转子平衡方法及其经验；为了便于理解和加深印象，在这两章中还列举了较典型的振动故障诊断和轴系平衡实例。

本书供新机启动调试人员及热力装置技术人员和有关专业的中、高等院校师生阅读。

大型火电机组启动调试丛书

汽轮发电机组振动

能源部西安热工研究所 施维新

*

水利电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号)

各地新华书店经售

水利电力出版社印刷厂印刷

*

850×1168毫米 32开本 8.5印张 226千字

1991年4月第一版 1991年4月北京第一次印刷

印数0001—3390册

ISBN 7-120-01313-0/TK·213

定价7.00元

前 言

机组振动是新机起调调试中一项技术性较强的工作。为了使新机安全地起调，积累有价值的机组振动档案，对起调中发生的振动尽快查明原因、消除振动，编写了本书。全书共分三章。

第一章主要介绍目前国内使用的各种型式振动仪表的结构和原理、使用方法和不同类型机组振动测试要点及其经验。这是新机起调调试中振动测试工作的基础，只有获得可靠的测量结果，才能指导新机起调、诊断振动故障和进行轴系平衡。

第二章针对新机起调中出现振动问题的特点，除系统地介绍了通用的机组振动故障诊断方法外，还详细地介绍了不稳定不平衡振动分类和诊断的推理方法及过程。这一类振动是振动故障中最难诊断和消除的。为了诊断和消除这类振动，机组起停常常达几十甚至几百次，它涉及设计、制造、安装和运行诸种因素。对于初接触此项工作的读者来说，最好首先通读一遍本书，然后根据实际机组振动的特点，查找有关章节和实例，与实际振动进行对比分析，这样就能较快地查明振动故障的原因。

大量的机组振动统计表明，在新机起调调试中，不论是汽轮发电机组、水泵、电动机，还是各类风机，引起振动过大的激振力主要是转子不平衡离心力，因此转子和轴系平衡是新机起调中重要的消振工作，为此在第三章中首先介绍了刚性转子测幅（振幅）和测相平衡法。使用这种简单的平衡法可以有效地解决水泵、电动机、各类风机和汽轮发电机组联轴器的质量不平衡问题。但本章重点是介绍柔性转子平衡的原理、方法和经验。

近十几年来投运的机组，特别是大容量机组，均采用单元制，这样的机组每次起调必须消耗大量的燃油和厂用电，目前容量为100~300MW的机组起停一次，一般大约要花费2~8万元，因

此从经济性和安全性以及投运紧迫性考虑，都不允许多次起停，进行轴系平衡，而要求以较少的机组起停次数，甚至是1~2次的起停，将机组轴系平衡好。这不但要求专业人员具有系统的柔性转子平衡理论基础，还要求掌握较丰富的现场平衡经验，所以第三章除了介绍现场平衡中必须掌握的柔性转子平衡理论和方法外，还介绍了轴系平衡经验。

在编写本书过程中，西北电力建设公司调试研究所的张宗绎高级工程师提供了大力帮助，审稿人丁则诚对本书提出了不少有价值的意见，张游祖、肖振德、黄秀珠、陆颂元、寇胜利、张学延、全军、孙岱霞等一起工作的同志给予了协助，在此表示深切的谢意。

施维新

1990年7月

目 录

前 言

第一章 机组振动测试和评价	1
第一节 机组振动测试内容	2
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	10
第四节 通频和基频振幅及相位的测量	16
第五节 机组振动测试	34
第六节 转轴振动测量	56
第七节 机组振动标准和振动报警值整定	68
第二章 机组振动故障诊断	82
第一节 汽轮发电机组振动分类	83
第二节 振幅、激振力和轴承座动刚度的关系	85
第三节 稳定普通强迫振动	89
第四节 不稳定普通强迫振动	94
第五节 轴承座轴向振动的原因	124
第六节 振动频率和转子转速不符合的强迫振动	130
第七节 自激振动基本特征	136
第八节 轴瓦自激振动	140
第九节 参数振动	154
第十节 机组振动故障诊断实例	157
第三章 转子平衡	172
第一节 刚性转子的平衡	172
第二节 柔性转子的平衡	192
第三节 试加重量的选取	201
第四节 轴系平衡	208
第五节 轴系平衡重量的计算机计算	219
第六节 轴系平衡经验	237

第七节 国产200MW机组接长轴的平衡	250
第八节 轴系平衡实例	253
参考文献	265

第一章 机组振动测试和评价

要掌握机组振动状态、诊断振动故障和进行转子平衡，首先要对机组振动进行测试。因此机组振动测试是评定机组振动状态、诊断振动故障和进行转子平衡的基础。

不论是试验室还是现场的振动测试，要获得正确可靠的测量结果，不仅要熟悉振动测试的基本概念和具体测试方法，而且还要掌握一定的振动测试实践经验。下面详细地讨论发电机组的振动测试原理、方法、要点及其经验，并介绍目前评定机组健康状况的三种尺度。

第一节 机组振动测试内容

机组振动测试包含振动测量和振动试验两方面。只有将振动测量和振动试验密切结合，才能深入了解机组振动特性。在现有的和可能取得的振动测量手段前提下获得有意义的测量结果，是一般所说的机组振动测试技能。

不同的机组振动测试目的，有着不同的测试内容。若从测试目的的划分，机组振动测试可分为下列五类：

1. 运行中振动监测

目前的机组振动监测不仅是为了掌握机组振动状态，而且是为了把振动作为机组故障的信号。通过振动监测，可以对汽轮发电机组转轴裂纹、汽轮机叶片脱落、静子部件松动、转轴套装零件失去紧力、转轴径向摩擦、发电机转子通风孔堵塞等许多故障作出明确的诊断。

为了监测机组健康状况，采用传统的人工定期或不定期监测机组振动的方法已不能满足要求，特别是对于大型机组，应设置连续监测和自动记录装置。不仅如此，目前较先进的振动监测系统采用计算机采集数据，存入数据库，随时可以提取，定时打印

输出，定时显示机组健康状况。当机组振动超过规定值时，对振动故障原因能作自动诊断，指导运行人员采取纠正性操作，防止事故发生或故障扩大。

2. 新机起动调试中的振动测试

新机起动调试中振动测试的主要目的是指导新机初次起停，评定机组制造和安装质量，并为机组以后起停和正常运行提供判断故障的依据，因此它的测试项目比机组运行中的振动监测要多，一般除测取各种工况下轴承和转轴通频和基频振幅及相位外，还要测量机组起停过程中的波德曲线。若振动过大，还应按振动故障诊断中的振动测试要求进行有关测试。

3. 故障诊断中的振动测试

这种振动测试的目的是为了诊断振动故障，而这里所说的振动故障诊断要比上述机组运行中的振动监测和故障诊断要深入，它是为了消除故障源或为机组预知性检修提供确切的依据。一般把运行中振动故障诊断称为在线诊断，而把后者称为离线诊断。

4. 转子平衡中振动测试

转子不平衡是引起机组振动的最重要的因素，因此在现场转子平衡较为普遍，特别是在新机起动调试中，转子平衡较为常见。

转子平衡中的振动测试是为计算平衡重量提供可靠的依据，一般只要正确地测取转子有关轴承或转轴的原始和加重后基频振幅和相位即可；当转子平衡状态与机组运行工况有关时，还应测取不同工况下轴承基频振幅和相位。

5. 转子支承系统动力学特性试验研究的振动测试

这是对机组设计、制造、安装和运行中发生的振动问题所进行的研究性的振动测试，其测试内容和方法与上述第三类测试基本相同，限于篇幅，本书不作讨论。

为了有效地反映机器的危安状态，对于工作性质、转速、结构不同的机器，应采用不同的振动参数表示，例如对于高频或带有较大冲击的机器，采用振动加速度表示较合理。对于汽轮发电机组其转速不是很高又无明显的冲击，应采用振动位移或振动速

度描述较合理，但长期以来，由于下列原因，机组振动一直采用位移描述：

（1）汽轮发电机组动静间隙较小，特别是汽机高压部分，为了避免振动过大而发生动静碰磨，采用振动位移限制机组振动较采用速度或加速度有效。

（2）在支承刚度一定时，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较振动速度有效。

（3）测量振动技术的历史原因。早期的振动测量技术是测量位移较振动速度和加速度容易，而且由此人们对振动位移已建立了明确的直观概念。

基于上述原因，至今虽然测量轴承和转轴振动速度较位移容易实现，但在机组振动故障监测、诊断及评价机组振动状态标准中，仍广泛地应用振动位移。

第二节 振动传感器的种类和选择

测量振动位移早期采用杠杆或齿轮/齿条放大，如50年代较常见的机械记录式振动表和目前在现场有时仍能见到的千分表式振动表。这类表计由于存在磨损、读数不便、精度差、振动信号不能传送等缺点，目前已经淘汰。

还有采用光学和激光的方法测量振动，但由于使用不便、造价高、振动信号不便传送等原因，这类表计也未能广泛应用。

为了集中控制和振动信号的处理，振动信号必须远距传送。电气式振动表（仪）就具有这种功能。因此这种表计目前不论在实验室或现场都得到了广泛的应用。电气式振动表有多种结构和型号，但它主要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，它的功能是把机械振动转换成电的信号，输入仪表本体进行处理后，指示振幅、相位、频率或频谱等。

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，目前已很少采用，因此下面主要介绍前三种传感器的结构、工作原理、现场使用中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，当传感器头部线圈通上高频（ $1\sim 2\text{MHz}$ ）电流时，在线圈周围产生高频电磁场，此交变磁场通过邻近的金属板在其表面产生感应电流，即电涡流。根据楞次定律，电涡流产生的电磁场与原线圈的电磁场方向相反，这两个电磁场相互迭加，改变了原线圈的阻抗，线圈阻抗的变化值与金属材料电导率 σ 、线圈尺寸 r 、磁导率 μ 、线圈与金属板之间距离 d 、流过线圈的电流 I 及其频率 ω 有关。当 σ 、 r 、 μ 、 I 和 ω 一定时，并假定金属导体是均匀的，其性能线性，而且各向同性，则线圈阻抗变化值便是线圈与金属之间距离 d 的单值函数。

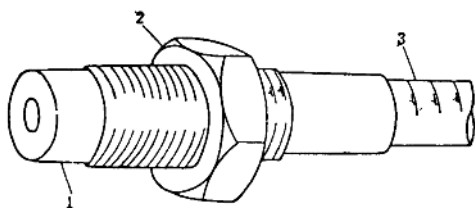


图 1-1 电涡流传感器外形

1—头部线圈；2—固定螺帽；3—高频电缆

将传感器的涡流线圈接入振荡回路，振荡回路输出一个与 d 值有关的高频谐波，经高频放大、检波、滤波后，便可得到一个与 d 值大小成正比的输出电压。输出电压的直流分量表示线圈与金属之间的静态间隙；若线圈与金属板之间存在振动，则有交流电压输出，它表示金属板相对于线圈的位移值，因此这种传感器

又称位移传感器。它不但可作动态测量,而且还可以作静态测量。

电涡流传感器检测到的交直流信号是迭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,不仅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这段高频电缆,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。

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,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

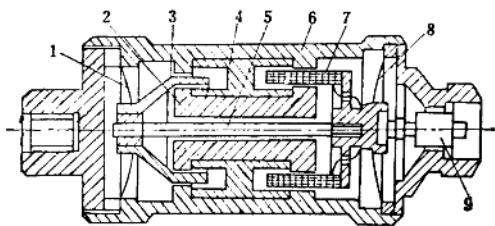


图 1-2 绝对式速度传感器的结构

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

空气间隙内的动线圈7是用很软的簧片1、8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存在磨损，因此这种传感器目前很少采用。

不论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带来方便，但投资也相应增加（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，蝶形弹簧压力通过质量块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分离。将这些部件装在不锈钢外壳5内，晶体片的电荷通过导线8引出。当把这样的装置固定到振动物体上时，由于物体振动而产

生加速度。若振动是简谐振动，其加速度可用下式表示：

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

式中 ω 、 f ——振动圆频率和频率；

A ——振动幅值（单振幅）。

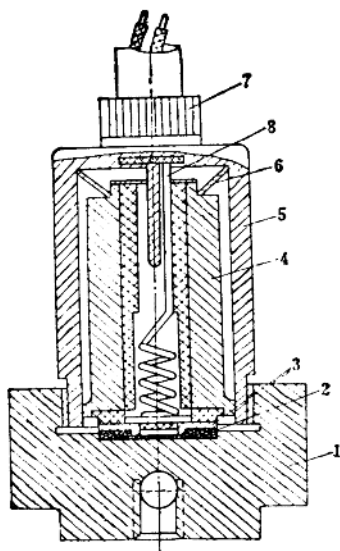


图 1-3 加速度传感器的结构

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

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，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，即只有在连续地受交变力

作用下，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。

即使输入阻抗很高，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，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。为了远距离传送振动信号的需要，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，所以加速度传感器结构虽然简单，而且特别牢靠，但在汽轮发电机组振动测试中一直没有得到广泛的应用。

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，这种传感器功能和测振原理见本章第六节。

四、传感器的选择

目前较先进的振动仪可以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，不但可以获得更满意的测量结果，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起停次数，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。

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）对于汽轮发电机组振动来说，它具有合适的频率响应范围，标定较容易。

（7）除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）当测量振动物体材料不同时，影响传感器线性范围和灵敏度，需重新标定。

（9）需外加电源，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）不需外加电源，振动信号不经任何处理可以传送到需要的地方。

（3）体积、重量较大，活动部件易损坏，低频响应不好，一般速度传感器在15Hz以下，将产生较大的振幅和相位误差。

（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, 重量轻, 可以适用于某些受附加质量影响较大的振动测试系统中。结构紧凑、牢靠。

(2) 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, 价格较贵, 需设前置放大器。

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意义的测量结果, 而且可能会造成传感器的损坏, 因此在机组振动测试中, 对于传感器的安装必须引起足够的重视。

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

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 $\geq 180^{\circ}\text{C}$, 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, 因此测量汽机高、中、低转轴振动时, 传感器必须安装在轴瓦内, 只有特制的高温涡流传感器才容许安装在汽封附近。

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, 对于不同型式涡流传感器, 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

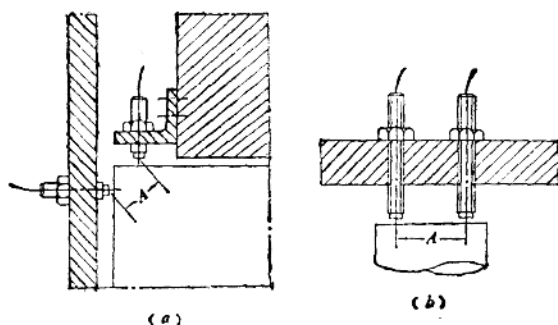


图 1-4 涡流传感器的交叉感应
(a)垂直交叉；(b)水平交叉

器， $A \geq 40\text{mm}$ 。

过小的侧向间隙主要是传感器头部两侧存在导体，由此也将使传感器输出灵敏度显著降低。正确的侧隙 $B \geq d$ （传感器顶部线圈直径）。侧向间隙不仅要考虑冷态，而且还要考虑汽缸和转子受热后膨胀。

传感器头部外露高度 C ，一般没有特别规定，但现场使用证明， C 太小也会使传感器灵敏度显著降低。正确的 $C \geq 2d$ 。

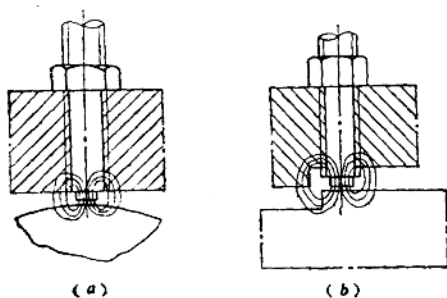


图 1-5 侧隙过小会降低传感器灵敏度