

965253



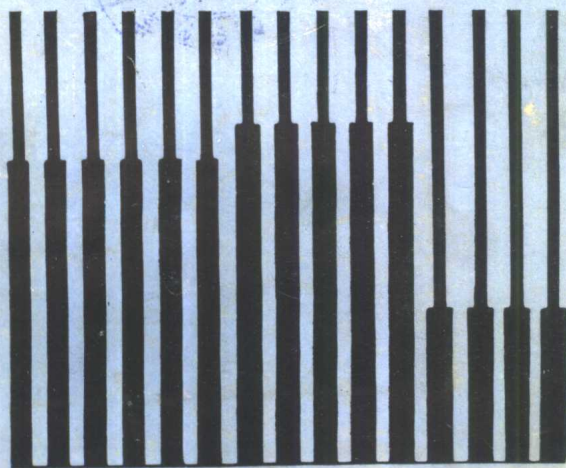
机械故障诊断丛书

IP212

1914

振动传感器

孙玉声



西安交通大学出版社

12

14

机械故障诊断丛书之十四

振 动 传 感 器

西安交通大学出版社

内 容 提 要

本书内容包括:机械谐振系统,振动传感器,扭矩传感器,振动传感器的校准,振动传感器在机械故障诊所中的应用等。其重点在振动传感器一章,详细介绍了各种振动传感器,如电涡流式传感器、电容式传感器、电动式传感器、压电式传感器、应变式加速度传感器、石英挠性伺服加速度计、光纤传感器、石英晶体谐振式传感器等的原理;设计、性能。本书可供工厂企业有关工程技术人员阅读,也可作为大专院校的教学参考书。

(陕)新登字 007 号

振 动 传 感 器

孙玉声

责任编辑 林全

*

西安交通大学出版社出版

(邮政编码:710049)

西安交通大学出版社印刷厂印装

陕西省新华书店经售

*

开本 787×1092 1/32 印张 5.25 字数:108 千字

1991 年 11 月第 1 版 1991 年 11 月第 1 次印刷

印数:1—3000

ISBN7-5605-0231-8/TH·11

定价:3.05 元

机械故障诊断丛书编辑委员会

主 编: 屈梁生

常务编辑: 叶尚思 朱兆雪 潘瑞麟

委 员: (以姓氏笔划为序)

叶尚思	西安交通大学出版社	编 审
刘仲川	机械电子部郑州机械研究所	工程师
朱兆雪	西安交通大学出版社	编 审
朱继洲	西安交通大学核反应堆工作教研室	副教授
何正嘉	西安交通大学机械监测与诊断研究室	副教授
周庆泽	中国建筑工业装备公司	高 工
杨叔子	华中理工大学机械一系	教 授
屈梁生	西安交通大学机械监测与诊断研究室	教 授
周勤之	上海机床厂	高 工
胡荣晋	国家计量局测试技术研究院	高 工
俞培松	镇海石油化工总厂	高 工
高金吉	辽阳石油化工公司	高 工
施维新	能源部热工研究所	工程师
黄 仁	东南大学机械系	教 授
谢华锟	成都工具研究所	工程师
黄昭毅	中国设备管理协会	高 工
雷继尧	重庆大学测试中心	教 授
潘瑞麟	西安交通大学出版社	副教授

“机械故障诊断丛书”总前言

机械故障诊断技术是有关设备运行、维护的一项新兴技术。它的推广应用不但根本改变了原有设备维修制度，而且在保证设备安全运行、消除设备事故方面起着巨大的作用。当前，机械设备运行状态的监测，已经从单凭直觉的耳听、眼看、手摸发展到采用先进的传感技术、计算机和信息处理技术。新的监测手段，诸如超声、声发射；红外等，层出不穷。人工智能、专家系统、模糊数学等新兴学科在机械故障诊断技术中也找到了用武之地。

近年来，在国家计委、中国设备管理协会和有关学会的大力支持下，机械故障诊断技术在各行各业中推广应用。它已经并将继续在实践中获得巨大的经济效益和社会效益。本丛书是为满足广大工程技术人员的迫切需要而编写的；同时，也希望这套丛书能引起高等学校机械类专业广大师生和有关研究人员的兴趣。

在组织编写这套丛书时要求既注意科学性，又注意实用性。内容有一定的理论深度，力求阐明机械故障诊断技术的理论基础，努力避免过多的数学推导，既能为广大实际工作者所接受。对研究人员和高等学校的师生也有参考价值。为了尽量节省读者的精力和时间。每本就一个专题编写，简洁明了，以便于读者阅读和使用。

由于各类产业机械既有各自的特点，又有某些共同点，机械故障诊断技术本身又正处于迅速发展的阶段，本丛书在编

写时着重讨论多个行业中机械设备的共同技术问题，诸如轴承、齿轮、转子、润滑油等的监测与诊断，同时尽量向读者介绍和展示一些诊断方面的新技术、新动向，以开阔视野。丛书也注意总结作者的理论研究成果和实际经验，以促进这些成果和经验在生产中发挥应有的作用。

本丛书和广大读者见面之后，编者和作者衷心希望能得到广大读者的反馈信息，以便改进我们的工作，提高丛书的质量

“机械故障诊断丛书”编辑委员会

1988年2月

目 录

绪 论

第一章 机械谐振系统..... (5)

1.1 机械式振动计 (5)

1.2 振动加速度计 (7)

1.3 振动位移计..... (12)

1.4 振动速度计..... (15)

1.5 几个常见问题..... (16)

第二章 振动传感器 (22)

2.1 电涡流式传感器..... (22)

2.2 电容式传感器..... (35)

2.3 电动式传感器..... (43)

2.4 压电式传感器..... (50)

2.5 应变式加速度传感器..... (66)

2.6 石英挠性伺服加速度计..... (70)

2.7 光纤传感器..... (81)

2.8 石英晶体谐振式传感器..... (89)

第三章 扭矩传感器 (91)

第四章 振动传感器的校准..... (101)

第五章 振动传感器在机械故障诊断中的应用..... (114)

5.1 评定汽轮发电机组振动的标准和振动
报警值 (114)

5.2 各种故障原因与频率的对应关系 (119)

5.3 振动传感器用于汽轮发电机组振动监测
与故障诊断举例 (121)

附录一	校准振动台和标准压电加速度计技术指标 ...	(124)
附录二	各种振动传感器性能指标.....	(127)
参考文献		(159)

绪 论

随着信息技术的高速度发展和计算机技术的广泛应用,从 20 世纪 70 年代中期开始,发达国家就日益重视信息获取手段的同步发展。传感器应用技术是现代测量和控制系统工程的重要基础之一。传感器被称为“电五官”。在航空、航海、宇宙探索、资源探测、海洋开发、公害检测、工业监控、农业工程、医学工程、生物工程等领域中,都得到了广泛的应用,并展现了极其广阔的前景。因此,从某种意义上说,未来的世界是传感器的世界。传感器应用技术的水平,往往可以衡量一个国家科学技术水平和工业发达的程度。世界上科学技术发达的国家都极为重视传感器的研究与应用。美国传感器的研究和生产一直处于世界领先地位,1985 年产值约为 10 亿美元,近 10 年的增长率为 30~40%,有近 300 个企业从事传感器生产。日本科技厅把传感器技术列为应开发重大技术的第一位,并设立了全国性的委员会,1982 年,日本传感器总产值为 1 300 亿日元。苏联于 1983 年成立了“半导体传感器科技协调委员会”,加强研究与生产的组织协调工作。

近年来,我国传感器的研究与应用发展迅猛。据不完全统计,全国从事传感器研究与生产的单位约有 400 多家,研究和生产不同种类、型号的传感器 1 000 多种。从总的水平来说,我国与国外还有相当的差距。

国内目前还未见到关于传感器技术在各个行业中应用情况的调查资料。现以日本《电子技术》杂志的调查材料为例加以说明。从图 1 可知,在日本,情报处理、科学技术测量、设备

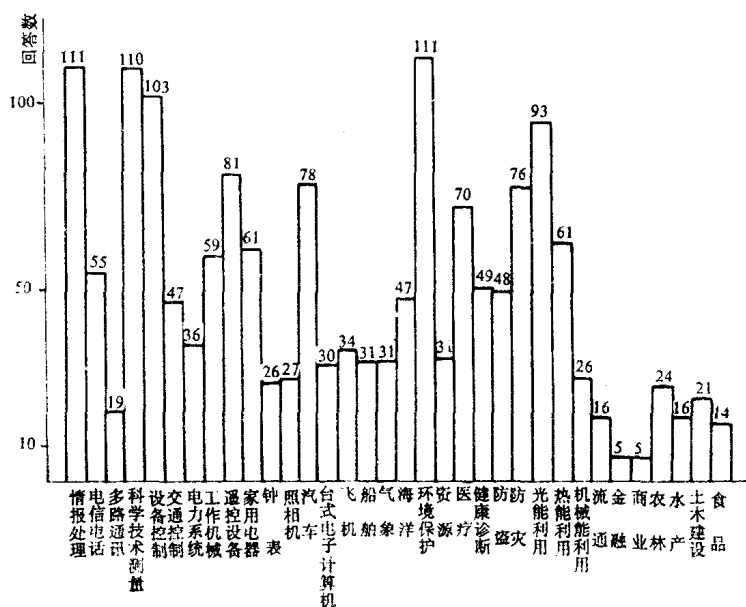


图 1 传感器的应用范围及数量

控制、汽车、环境保护、医疗、防灾、各种能源利用、家用电器等方面,传感器应用普遍,而在金融商业、农林、水产、土木建筑、食品等方面的应用则有待开发。我国的情况与日本当然不完全一样,但各个行业都需要传感器,这一点则是相同的。图 2 所示为各种传感器在各种物理量测量中的应用状况(日本)。从图中可知,各种光敏传感器用量很大,工业过程控制对压力、温度、流量等传感器的需求量也很大。与振动测量有关的位移、速度、加速度传感器应用也很多。

目前国外正在注意传感器的集成化和功能化研究(特别

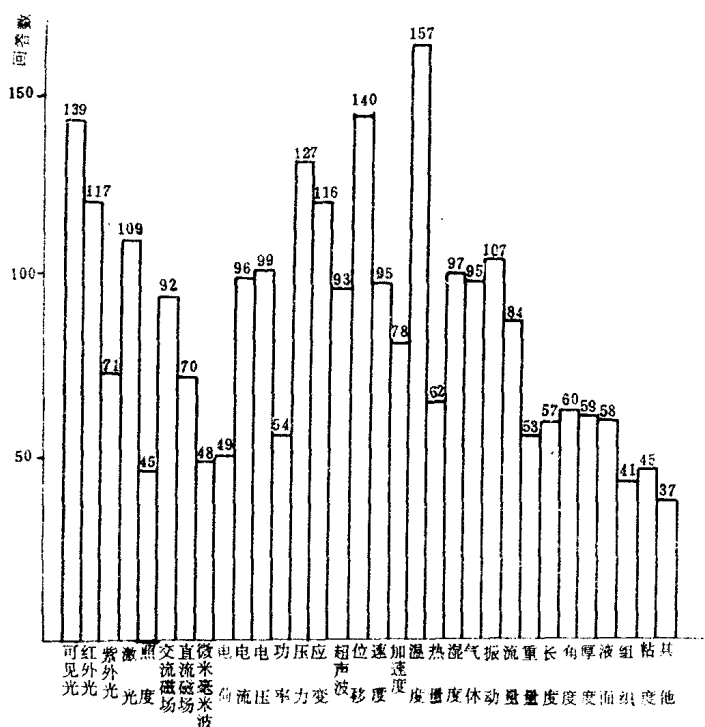


图2 传感器在各种物理量测量中的应用状况

是半导体传感器),当然同时也研制新原理的传感器。我国除上述研究外,目前重点还应放在现有传感器长期稳定性的提高方面,要重视单晶材料、多晶材料、高分子材料、精密陶瓷等传感器材料的研究,加强传感器的性能测试能力与标准化工作,以使我国传感器的研究、生产、适应工农业生产、科学发展的需要。

关于传感器的分类,现在国内外还无统一的规定。我们可粗略地把传感器分为结构型传感器和物性型传感器两大类。

结构型传感器都有一个机械变换部件,例如弹性体、膜片等等,把被测参量先转变为位移、应变等物理量,然后再用敏感元件变换为电信号。物性型传感器则是根据材料物理性能因被测参量的改变而变化进行测量的。例如半导体温度传感器、光敏元件、气敏元件等都属于物性型传感器。下面介绍的各种振动传感器,绝大多数是属于结构型传感器。

第一章 机械谐振系统

1.1 机械式振动计

机械式振动计,如图 1.1 所示。它是在外壳内插入一个弹簧 K (或几个弹簧),在弹簧下面安装一个质量为 m 的质量块。这也就组成了机械谐振系统。通常机械谐振系统是含有阻尼的。

这里的机械谐振系统,国内外有的称为地震系统,有的称为质量弹簧系统,也有的称为弹簧振子。

实际的振动传感器,用外壳作为基座,被固定于被测对象上面,把质量块 m 和外壳之间的相对运动,用机械的、光学的、或电学的方法检测出来。

在理论处理方面,认为这里的机械谐振系统是理想化的单自由度线性系统。当然比理想化的线性系统只是在某一限定的频率范围内成立。

设 K 为弹簧常数, m 为质量, c 为阻尼力系数, y 为固定于

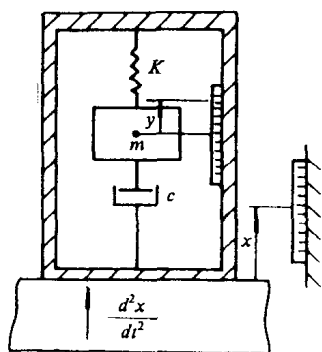


图 1.1 机械谐振系统

外壳上的坐标, x 为固定于地面的坐标。那么, y 是质量和外壳间的相对位移, x 就是被测物相对地面振动的位移。图 1.1 所示机械谐振系统的运动方程可表示为

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} + c \frac{dy}{dt} + Ky = -m \frac{d^2 x}{dt^2} \quad (1.1)$$

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + 2D\omega_0 \frac{dy}{dt} + \omega_0^2 y = -\frac{d^2 x}{dt^2} \quad (1.2)$$

式(1.2)中, $\omega_0^2 = K/m = (2\pi f_0)^2$, $D = c/(2\sqrt{mK})$ 。这里, f_0 是机械谐振系统无阻尼固有频率, D 为阻尼比, $D=1$ 时为临界阻尼比。振动传感器一般取 $D=0.6\sim 0.7$ 。无阻尼固有频率超过 1000Hz 时, 阻尼因素可忽略不计。这是由于随着无阻尼固有频率的提高, 加有效阻尼就变得困难。当无阻尼固有频率为 3000Hz 以上时, 加有效阻尼实际上是不可能的。但是在不考虑阻尼的情况下, 由于机械谐振系统弹性元件的内摩擦等, 至少也有 $D=0.02$ 的阻尼存在。

为了了解机械谐振系统的各种工作状态, 则需解方程(1.2), 其解为

$$y(t) = Ae^{-\alpha}(C_1 \cos \omega_0 t + C_2 \sin \omega_0 t) + \frac{-\frac{d^2 x}{dt^2}}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4e^2 \omega^2}} \sin(\omega t + \varphi) \quad (1.3)$$

因第一项是阻尼自由振动项, 随着时间的增长, 此项会逐渐消失。第二项为强迫振动项, 这是需要讨论的部分。设外界振动为

$$x = x_m \sin \omega t \quad \text{则} \quad \frac{dx}{dt} = x_m \omega \cos \omega t$$

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -\omega^2 x_m \sin \omega t$$

那么
$$y = \frac{x_m \omega^2 / \omega_0^2}{\sqrt{(1-u^2)^2 + 4D^2 u^2}} \sin(\omega t + \varphi) \quad (1.4)$$

所以
$$y = \frac{M_A}{\omega_0^2} x_m \omega^2 \sin(\omega t + \varphi) \quad (1.5)$$

$$M_A = \frac{1}{\sqrt{(1-u^2)^2 + 4D^2 u^2}} \quad (1.6)$$

在上面几个式子中

$$u = \frac{\omega}{\omega_0} = \frac{f}{f_0} \text{ 为频率比}$$

$$\varphi = \operatorname{tg}^{-1} \frac{2Du}{1-u^2} \text{ 为初始相位} \quad (1.7)$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{K}{m}} \text{ 为无阻尼自振角频率} \quad (1.8)$$

$$\varepsilon = \frac{c}{2m} \text{ 为阻尼系数} \quad (1.9)$$

$$D = \frac{\varepsilon}{\omega_0} = \frac{c}{2\sqrt{Km}} \text{ 为阻尼常数(阻尼比)} \quad (1.10)$$

$$\omega_D = \omega_0 \sqrt{1-D^2} \text{ 为阻尼自振角频率} \quad (1.11)$$

ω 为被测振动的角频率。

1.2 振动加速度计

在式(1.5), $y = \frac{M_A}{\omega_0^2} x_m \omega^2 \sin(\omega t + \varphi)$ 中, 若 $u \ll 1$, 则 $M_A \approx 1$, 相位角 φ 大致可以忽略, 质量相对外壳的位移 $y = \frac{1}{\omega_0^2} x_m \omega^2 \sin \omega t$, $1/\omega_0^2$ 表示灵敏度。对于支配加速度振动传感器频

率特性的重要系数 M_A , 称为加速度计动态放大系数。这时的机械谐振系统是处于加速度计工作状态。

对于机械谐振系统的特性, 不仅要注意频率特性, 而且也要注意相位特性, 因为被测量的振动, 多为复合波形, 相位特性不好, 就要产生过大的波形失真。图 1.2 所示, 即为相位移引起复合振动的波形畸变。

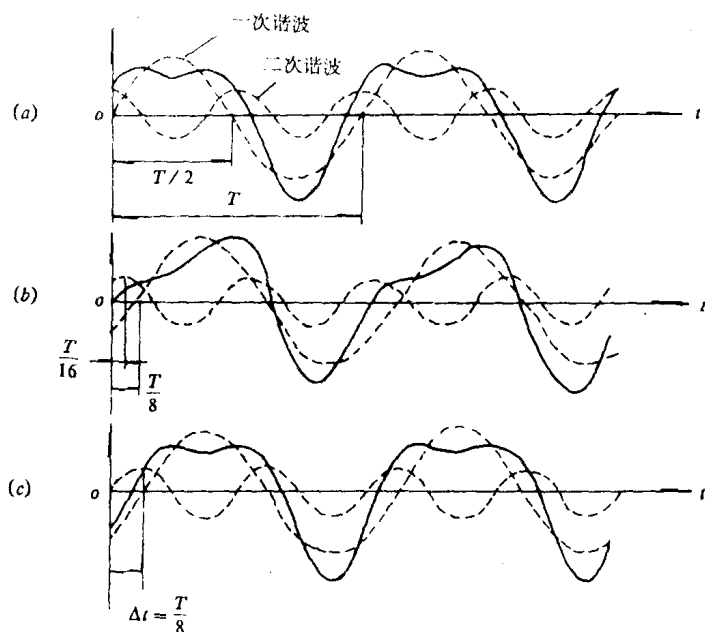


图 1.2 相位移引起复合振动的波形畸变

从图 1.3 可以看出, 频响应和阻尼比关系密切, 适当地调节阻尼比可以得到所需要的频率响应。和基准灵敏度 ($M_A=1$ 时的灵敏度) 相比较, 灵敏度不超过某一规定值的频宽, 称之

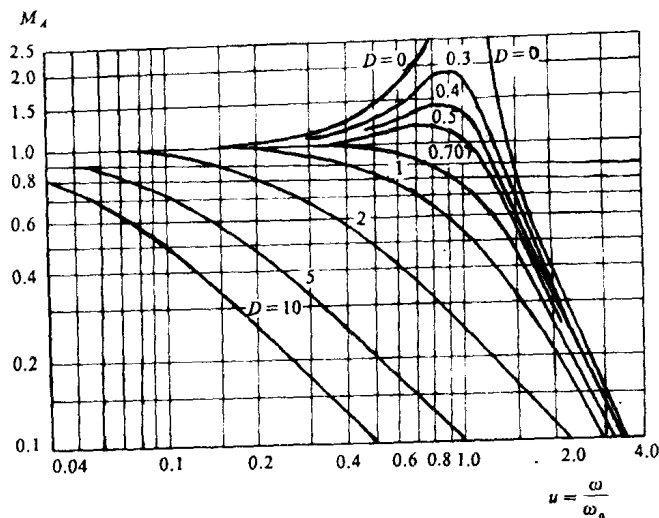


图 1.3 机械谐振系统处于加速度计工作状态时的幅频特性曲线

为工作频率范围。把频率范围的上限和下限分别称为上限频率和下限频率。从图 1.3 可以知道,偏差 $E=(M_A-1)$ 的允许值越小,上限频率则变得越低。另外,灵敏度 $1/\omega_0^2=1/(2\pi f_0)^2$ 随着无阻尼固有频率 f_0 的升高而急剧下降。要想在固有频率尽可能低的机械谐振系统上得到尽可能高的上限频率,这与要求尽可能小的允许偏差 $E=(M_A-1)$ 是相互矛盾的,因此两者必须协调。

振动加速度传感器从其工作原理和结构形式来说,一般无阻尼固有频率 f_0 较高。对于 f_0 超过 1 000Hz 的振动加速度传感器,上限频率 f_H 和允许偏差 E 可用下式表示: