

仪 器 传 感 器

——性能和设计入门

[英] H. K. P. 纽伯特 著

科 学 出 版 社

TP212
8

仪器传感器

——性能和设计入门

[英] H. K. P. 纽伯特 著

中国计量科学研究院力学处
清华大学精密仪器系测量教研组 译

科学出版社

1985

7278/3203

内 容 简 介

本书讲述在自控、遥测、工业自动化、实验物理以及计量中广泛应用的各种仪器传感器的物理原理、性能分析、设计与工艺,全书共分五章: 1.绪论; 2.仪器传感器的分类; 3.机械输入特性; 4.电输出特性; 5.力平衡式传感器。

本书可供从事传感器研究、设计、制造、使用、计量等科技人员,以及大专院校有关专业的师生阅读和参考。

Hermann K. P. Neubert

INSTRUMENT TRANSDUCERS

*An introduction to their performance
and design*

CLARENDON PRESS, OXFORD, 1975

仪 器 传 感 器

——性能和设计入门

[英] H. K. P. 纽伯特 著

中国计量科学研究院力学处 译

清华大学精密仪器量测教研组

责任编辑 陈德义

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1985年4月第一版 开本: 787×1092 1/32
1985年4月第一次印刷 印张: 13
印数: 0001—9,600 字数: 294,000

统一书号: 15031·644

本社书号: 3903·15-3

定价: 3.05元

译者的话

各种学科领域中的测试技术、自动化检测、自动控制系统都广泛地应用各种类型的传感器,国内对传感器的设计、研制和生产也日益重视。为了便于广大科技工作者及高等院校师生深入学习有关传感器的性能和设计,我们组织翻译了《仪器传感器》一书,供有关人员参考。

参加本书翻译的有中国计量科学研究院力学处于渤、朱鼎铭、林劲、于仲敏和清华大学精密仪器量测教研组吴正毅、韦文林、杨友堂、夏建弘、靳怀义、毛乐山、王文兰、王伯雄、孙道祥。由清华大学吴正毅、韦文林、周汉安、王哲生、王文兰校订。

由于我们水平有限,加之参加翻译的同志较多,译文中难免有不少错误缺点,欢迎读者批评指正。

一九八一年十一月

前 言

在人们对仪器传感器兴趣日增以及它日趋完善的情况下,《仪器传感器》第二版仍强调:传感器就物理原理、性能分析、设计与制造诸方面而论可以作为一个统一体。针对目前对传感器性能要求准确这一背景,本书与其它现有的书比较起来,更为详尽地讨论了传感器的机械与电学方面的设计方法、一些特殊的材料以及现代的制造技术等方面——而这些内容在为“使用者”写的关于传感器的书中常常很遗憾地被略去了。

第二版是全部重写的,采用了最新内容的正文、插图与参考文献,全书并统一采用了国际单位制(SI)(书末简要地介绍了国际单位制并给出了较全的单位换算表),特别是书中包含了介绍双向传感器的数学模型、半导体及薄膜应变计和六分量探臂式天平的章节,并大大扩充了力平衡式传感器一章的内容,包括一些首创性的工作。为了与新修订的正文相配合,书中其它许多地方加进了新的插图与表格。

第二版的读者对象依然是在迅速扩展的仪器与控制工程领域中从事工作的实验物理学家及电器工程师,这些领域不仅包含有探索与发展的工作,而且涉及近代工业的许多部门。

新版本的写成得到皇家飞行器研究院 Farn 区分院(Farnborough)的老同事的支持,以及工业界许多朋友的帮助。我也希望对 Clarendon 印刷厂的全体工作人员在清样排版中的合作致以真诚的谢意,同时对我夫人的自始至终的耐心

协助表示感谢。

虽然对皇家文书局的管理人员同意复制下列具有神圣版权的插图,已表示了感谢: 即图 2.2, 2.3, 4.1.4~4.1.14, 4.2.13, 4.2.24, 4.3.8, 4.3.18~4.3.20, 4.4.21, 5.2~5.11, 5.21, 5.25。但本书的材料是从很多资料(书文中已注明)中引用的,这里就不可能一一致谢了。

目 录

1. 绪论	(1)
2. 仪器传感器的分类	(4)
2.1 一次量; 输入特性	(4)
2.2 二次量; 输出特性	(6)
2.3 机电耦合特性	(7)
2.3.1 机电模拟	(7)
2.3.2 双向机电传感器的统一理论	(12)
2.3.2.1 基本两通道方程	(13)
2.3.2.2 理想传感器	(15)
2.3.2.3 实际传感器	(16)
2.3.2.4 双向机电传感器的一般性能分析	(20)
2.3.2.5 传感器常数	(23)
2.4 反馈系统	(25)
3. 机械输入特性	(27)
3.1 静态和动态响应	(27)
3.1.1 线性度	(27)
3.1.2 动态响应	(31)
3.2 基本传感器系统的动态响应	(34)
3.2.1 正弦激励	(34)
3.2.2 暂态激励	(37)
3.3 振动系统元件	(46)
3.3.1 振动质量	(46)
3.3.2 弹簧	(49)
3.3.3 阻尼	(58)

3.4 压力敏感元件	(65)
3.4.1 膜片	(65)
3.4.2 薄板	(68)
3.4.3 皱纹膜片和膜盒	(69)
3.4.4 波登管	(70)
3.4.5 波纹管	(71)
3.5 引压进气管效应	(71)
4. 电输出特性	(76)
4.1 电动方式传感器	(76)
4.1.1 电动力原理	(77)
4.1.2 动态特性	(80)
4.1.2.1 传递矩阵	(80)
4.1.2.2 电动力的力敏感元件的机械输入阻抗	(82)
4.1.2.3 电动力的力或压力敏感元件的传递函数	(83)
4.1.2.4 电动方式速度传感器的传递函数	(84)
4.1.2.5 涡流阻尼的作用	(86)
4.1.2.6 二次谐振	(89)
4.1.3 电动方式传感器的设计	(97)
4.1.3.1 磁路设计	(97)
4.1.3.2 永磁材料	(102)
4.1.3.3 线圈单元的设计	(106)
4.1.4 结构	(109)
4.2 可变电阻传感器	(112)
4.2.1 等效电路	(112)
4.2.2 电阻值变化较大的情况; 电位计	(118)
4.2.2.1 分辨率和噪声	(118)
4.2.2.2 灵敏度和线性度	(122)
4.2.2.3 结构设计	(127)
4.2.3 电阻值的微小变化情况	(130)
4.2.3.1 丝式及箔式应变计	(130)

4.2.3.1.1	灵敏度和线性度	(132)
4.2.3.1.2	结构和粘接剂	(135)
4.2.3.1.3	关连电路	(139)
4.2.3.1.4	丝式及箔式应变计的应用	(147)
4.2.3.2	半导体应变计	(148)
4.2.3.2.1	灵敏度	(149)
4.2.3.2.2	线性度	(152)
4.2.3.2.3	温度影响	(153)
4.2.3.2.4	关连电路	(154)
4.2.3.2.5	半导体应变计的应用	(155)
4.2.3.3	薄膜应变计	(156)
4.2.3.4	应变计传感器	(157)
4.2.3.4.1	力和力矩传感器	(158)
4.2.3.4.2	加速度传感器	(164)
4.2.3.4.3	压力传感器	(166)
4.2.3.5	电阻温度计	(171)
4.2.3.5.1	金属电阻器	(171)
4.2.3.5.2	热敏电阻	(174)
4.2.3.6	运动流体温度的测量	(176)
4.2.3.7	热线风速计	(178)
4.3	可变电感传感器	(181)
4.3.1	等效电路	(182)
4.3.1.1	电感 L	(183)
4.3.1.2	铜耗电阻 R_c	(184)
4.3.1.3	涡流损耗电阻 R_e	(184)
4.3.1.4	磁滞损耗	(186)
4.3.1.5	损耗因数 D 和品质因数 Q	(189)
4.3.1.6	具有气隙的铁芯	(190)
4.3.1.7	带磁芯和小气隙的电感线圈参数设计	(194)
4.3.1.8	高次谐波的失真	(195)

4.3.1.9 具有并联电容的电感线圈	(196)
4.3.2 灵敏度和线性度	(197)
4.3.2.1 具有铁芯及小可变气隙电感传感器	(197)
4.3.2.2 具有铁磁性插棒式铁芯的电感传感器	(202)
4.3.2.3 具有短路环或套的电感传感器	(208)
4.3.3 关连电路	(212)
4.3.3.1 交流分压电路中的电感传感器	(212)
4.3.3.2 交流桥式线路中的电感传感器	(215)
4.3.3.3 振荡器的振荡回路中的电感传感器	(225)
4.3.4 变压器式传感器	(227)
4.3.5 电磁传感器	(232)
4.3.6 磁致伸缩传感器	(235)
4.3.6.1 可变导磁率型电感传感器	(237)
4.3.6.2 可变剩磁型电感传感器	(238)
4.3.7 铁芯和线圈的结构	(244)
4.3.7.1 软磁材料	(245)
4.3.7.2 电感线圈	(247)
4.4 可变电容传感器	(248)
4.4.1 等效电路	(250)
4.4.2 灵敏度和线性度	(253)
4.4.2.1 固体电介质和可变空气间隙平行板电容器 ...	(253)
4.4.2.2 两平行板组成的电容传感器, 两平行极板间的 固体电介质的介电常数, 厚度和气隙皆可 变化	(255)
4.4.2.3 齿形极板电容传感器	(258)
4.4.2.4 具有张紧薄膜(膜片)的电容式压力传感器 ...	(260)
4.4.2.5 具有夹紧薄膜的电容压力传感器	(263)
4.4.3 关连电路	(265)
4.4.3.1 交流电桥电路中的电容传感器	(265)
4.4.3.2 直流极化电容传感器(静电传感器)	(274)
4.4.4 可变电容传感器的结构设计	(278)

4.5	压电式传感器	(280)
4.5.1	压电效应	(281)
4.5.2	压电材料	(283)
4.5.2.1	天然晶体	(283)
4.5.2.1.1	石英	(283)
4.5.2.1.2	电石	(288)
4.5.2.1.3	酒石酸钾钠	(289)
4.5.2.1.4	磷酸二氢铵(ADP)	(290)
4.5.2.1.5	硫酸锂(LH)	(290)
4.5.2.2	压电陶瓷	(290)
4.5.3	压电传感器	(297)
4.5.3.1	动态特性概述	(297)
4.5.3.2	灵敏度和频率响应	(299)
4.5.3.3	关连电路	(302)
4.5.3.3.1	电压放大器	(303)
4.5.3.3.2	电荷放大器	(303)
4.5.3.4	环境影响	(304)
4.5.3.4.1	温度和湿度	(304)
4.5.3.4.2	横向灵敏度	(305)
4.5.3.4.3	声压灵敏度	(305)
4.5.3.4.4	电缆噪声	(305)
4.5.4	压电传感器的设计和结构	(306)
4.5.4.1	加速度型	(306)
4.5.4.2	压力型	(311)
4.5.4.3	应变计型	(319)
5.	力平衡式传感器	(321)
5.1	力平衡原理	(321)
5.2	静态特性	(323)
5.2.1	电动力加速度传感器	(323)
5.2.1.1	灵敏度	(324)

5.2.1.2 线性度	(324)
5.2.2 静电压力传感器	(325)
5.2.2.1 灵敏度	(326)
5.2.2.2 线性度	(327)
5.2.2.3 应用范围	(331)
5.3 动态特性	(331)
5.3.1 正弦激励	(332)
5.3.2 瞬变激励	(335)
5.3.2.1 脉冲函数输入	(336)
5.3.2.2 阶跃函数输入	(339)
5.3.2.3 斜坡函数输入	(340)
5.3.3 相位超前网络	(341)
5.3.4 仅有速度反馈的系统	(344)
5.4 力平衡式传感器系统	(347)
5.4.1 具有电动力式伺服执行元件的力平衡式传感器 ...	(348)
5.4.1.1 线加速度输入	(348)
5.4.1.2 压力输入	(350)
5.4.1.3 其它各种输入	(351)
5.4.2 具有静电伺服执行元件的力平衡式传感器	(353)
5.4.2.1 线加速度输入	(353)
5.4.2.2 压力输入	(354)
5.4.2.3 其它各种输入	(356)
附录: 国际单位制(SI)及转换表	(359)
参考文献	(367)
索引	(379)

1. 绪 论

在测量上应用的仪器传感器是将输入物理量转换成电输出信号的装置，其输入-输出关系和输出-时间关系在确定的环境条件下可以达到预期的精确度。本书的目的是打算向读者介绍符合上述定义的传感器的设计和性能、以及对它们的评价。

仪器传感器^[1]这一名称是指我们用于测量类型的传感器。因而就不包括如扬声器、执行元件、振子等发送型传感器 (senden type transducers)。常常遇到的“敏感元件” (senser) 这一概念，指的只是复杂传感器中所采用的灵敏元件，例如在压力传感器中的应变敏感元件，或是在力平衡传感器中的位移敏感元件。

第2章介绍了有关用特定变换原理联系着的仪器传感器输入量和输出量方面的概况。本章讨论了有关仪器传感器的分类问题。同时，对机电模拟的相似性作了评价，并发展了双向机电传感器的统一理论，随后对反馈式的传感器作了简单介绍。

第3章讨论了具有机械输入元件的传感器的性能，这些元件构成一阶和二阶振动系统，这些系统可以由静态的、正弦的或瞬态的输入量来激励，这些系统的三种基本元件：惯性元件，柔度元件和阻尼元件，我们从概念及实现方面对它们进行了探讨。随后讨论了压力敏感元件以及压力进口管嘴对仪器传感器动态响应的影响。

第4章是全书篇幅最长的一章，本章按照电动式、电阻

式、电感式、电容式和压电晶体式传感器,分别就其输出特性方面,研究其性能和设计。文中先介绍所涉及的基本物理原理,然后详细讨论了参数设计和各种传感器的特殊材料问题,并研究它们在结构中所出现的问题。

第5章专门用来研究传感器输出和输入之间具有反馈回路的力平衡传感器。本章阐述了采用电动的或静电的伺服-执行元件的加速度和压力传感器动态和静态性能的统一理论。本章的最后对实际的伺服传感器的设计作了简单的介绍。

近几年来,所使用的或介绍过的传感器其数量之多、种类之繁,达到了甚至不能给使用者对整个领域作一粗略综述的地步。更不待说,象曾设想作为设计者的实用指南的书本了。举例来说,对有一些著名的文献专门论述了热电偶与光电池,为了避免不必要的重复,业已省略。在通讯中使用的微音器及水听器也已省略。这样,本书的范围只限于具有电模拟输出的仪器传感器;目前已有相当多种类的商用模-数转换器了^[2],自1919年以来,人们就知道基于对机械元件加以频率调制的数字式传感器(如振弦式传感器),这种传感器至今还是需要的。随后,在1959年出现了振筒式压力传感器^[3]。从[4]~[9],我们可以了解到一些其它类型的、特别是用于数控机床中的数字式传感器。

一般说来,人们对仪器传感器的了解较十年前更为深入,而且在传感器制造中已有了若干新工艺,用硅基底半导体元件制造的压阻式传感器,以及一些新的压电材料、磁材料已列入传感器设计者的“武库”之中了。与传感器配接的更为有效的电路,如电荷放大器、运算放大器以及复杂的小型集成电路结构,已达到通用的地步了。在新老工业部门中,对大批高度复杂的控制系统的要求在不断地增长,这就使传感器领域保

持了稳定的增长速率,很可能今后还会继续下去。虽然,把传感器当成仪器系统的贵重系列中的小小“新玩意儿”的看法业已过时,但是为了能优先投入力量与资金来研制新型传感器的努力仍在继续之中^[10]。

2. 仪器传感器的分类

在第1章中,作为本书的主题我们对仪器传感器定义为用电的方法来测量物理量的装置,即是说,传感器具有一种在输入和输出之间的标定关系。它们可能是一种纯粹的能量转换器,或者还需要一个辅助能源。由此定义显而易见,仪器传感器的分类或者按照被传感器所测的输入量,或者按照所应用的转换原理而确定的输出量。对大多数仪器传感器来说,它的输入量和输出量之间能容易地加以区分,特别对那些需要一个辅助能源的无源传感器。因此在本章的前两节将讨论按照它们的输入(2.1节)和输出(2.2节)特性来对传感器进行分类。而在本书的第三章和第四章将分别详细讨论主要类型传感器的输入和输出特性。

然而,某些类型传感器,如电动发生器型,它的电参量和机械参量之间具有密切的电-机耦合关系,需要用更为复杂的方法来同时考虑它们的输入和输出特性。2.3.1节将按照电-机模拟方法进行处理,而在2.3.2节中用统一理论而不使用模拟法来处理双向电-机传感器的耦合特性。最后在2.4节将介绍在输入和输出间具有反馈的力平衡式传感器,并在第五章中对它进行详细的研究。

2.1 一次量: 输入特性

对传感器使用者来说,自然希望按被测的一次量来将传感器分类。如要测量风洞模型上的动态压力,使用者就希望

通盘了解各种类型压力传感器的基本特性,以便作出选择来满足其特殊需要。在 Lion^[1]和 Doebelin^[2] 的著作中就是按这种观点给出了对各种仪器传感器的综述;在 Kohlrausch 的实用物理学方法的概要^[3]中涉及的范围更加广泛。在英国和国外现已出版了许多有关传感器方面的著作([4]~[11]),苏联也在开始写一本这方面的著作^[12],此外,还出版了商用传感器的目录表([13]~[15])。

然而,对于关心传感器设计和性能的研究人员来说,这未必是最好的探讨方法,因为它有碍于对诸如耦合特性和动态响应等基本特性进行有效的研究。按输入量进行分类,虽然对使用者来说可能是方便的,但会引起重复,或者肤浅地研究问题。因此,在表 2.1 中列出基本一次量及其某些重要导出量就足够了。尽管这不够全面,但会使读者获得传感器的输入量是多种多样的概念。

按照设计人员的观点,更为重要的是传感器输入部分的静态与动态响应特性,例如所有具有机械输入量的仪器传感

表 2.1 仪器传感器的一些一次(输入)量

基 本 量	导 出 量
线 位 移	长度,宽度,厚度,位置,水平面,腐蚀,磨损,表面质量,应变,振动
角 位 移	姿态,转角,入射角,流动角,角振动
线 速 度	速度,流速,动量,振动
角 速 度	角速度,转动速率(横滚、俯仰、偏航),角动量,角振动
线加速度	振动,力,冲击(跳动),质量,应力
角加速度	角振动,扭矩,角冲击,惯性矩
力	重量,推力,密度,应力,扭矩,压力,高度,流速,声,加速度
温 度	热流,流体流量,气压,气体速度,流动角,湍流,声
光	光通量和光密度,谱分布,长度,应变,力,转矩,频率,数
时 间	频率,数,统计分布