

气象传感器教程

李家瑞 编著

气象出版社

气象传感器教程

李家瑞 编著

气象出版社

(京) 新登字046号

内 容 提 要

本书系统地介绍了传感器静态、动态特征,各种气象传感器的结构、原理、误差和应用。本书侧重实际应用,反映了国内最新成果与技术发展状况。主要包括传感器基本特性,测量误差,在大气探测中的应用以及气象传感器的标定。

本书是大气探测和气象仪器专业的本科生教材,还可供民航、海军、水文、环保等部门以及基层气象台站技术人员参考。

气象传感器教程

李家瑞 编著

责任编辑:吴向东 终审:周诗健

封面设计:牛涛 责任技编:席大光 责任校对:白璐

*

气象出版社出版

(北京西郊白石桥路46号 邮编100081)

*

北京昌平环球印刷厂印刷

新华书店总店科技发行所发行 全国各地新华书店经销

*

开本: 850×1168 1/32 印张: 10.125 字数: 260千字

1994年11月第1版 1994年11月第一次印刷

印数: 1—800

ISBN 7-5029-1653-9/P·0670(课)

定价: 7.10元

前 言

当今的社会被认为是信息时代，信息技术的核心是信息处理（电子计算机），信息传输（通信技术）和信息获取（传感器技术）。与人类的大脑一样，电子计算机也必须首先接收外界信息的刺激才能作出相应的反应，在信息系统中，传感器就相当于人类的感覺器官。与通用性很强的信息处理和信息传输技术相比，传感器技术是一门因检测对象、运用效应不同而技术各异的独立的专门技术，目前属于薄弱环节，80年代以来许多国家已开始注意到这一点，开始出现“传感器热”。我国在1987年，国务院发布的信息技术政策中，明确将传感器列为重点发展的新技术之一。

气象传感器是应用于大气探测领域的传感器。在16世纪发明的液体温度表可以说是最古老的传感器。当代大气探测技术的标志是气象遥测和大气遥感，气象传感器正是它们直接从信号源大气中获取信息的前沿装置，是决定遥测和遥感精确度的关键环节。所以气象传感器的发展水平是大气探测和整个气象事业现代化的一个重要标志。

本书由高等学校气象类教材编审领导小组推荐列入“八五”出版规划。主要根据编者在成都气象学院大气探测专业多年的教学经验，并收集了近年来国内外最新的气象传感器科技成果编写而成。

本书第一章传感器基础，重点叙述了传感器的静态和动态特性，第二章测量误差则介绍了误差的基本概念和原理，第三章至第十章则分别为温、湿、压、风、降水、辐射、云高、能见度传感器，侧重于各种自动气象站所用的传感器，较为深入地介绍其结

构原理、误差以及部分信号调理电路。第十一章则简明介绍气象传感器的标定。

中山大学邹长庚、南京大学刘长盛、兰州大学陈长和以及中国科技大学姚克亚同志审阅了书稿，在此表示深切的谢意。由于教材涉及内容广泛。本人水平有限、编写时间仓促，不可避免会存在缺点和错误，恳请各位专家和读者不吝赐教。

李家瑞

1994年10月

目 录

前言

第一章	传感器基础	(1)
§1.1	传感器的定义、组成与分类.....	(1)
§1.2	传感器的静态特性.....	(10)
§1.3	传感器的动态特性.....	(18)
第二章	测量误差	(38)
§2.1	误差及其分类.....	(38)
§2.2	随机误差的分析与处理.....	(42)
§2.3	粗大误差的判别.....	(49)
§2.4	系统误差的分析与处理.....	(50)
§2.5	误差的传递.....	(54)
§2.6	误差的合成.....	(57)
第三章	温度的测量	(61)
§3.1	温度传感器.....	(61)
§3.2	热电阻及其测量电路.....	(63)
§3.3	热敏电阻及其线性化.....	(70)
§3.4	PN结与IC温度传感器	(77)
§3.5	石英晶体温度传感器.....	(80)
§3.6	热电偶.....	(82)
§3.7	热敏电容.....	(86)
§3.8	热惯性误差.....	(87)
§3.9	辐射误差及防辐射措施.....	(94)
第四章	湿度的测量	(96)
§4.1	湿度传感器.....	(96)
§4.2	干湿度.....	(100)

§4.3	冷却式露点传感器	(105)
§4.4	湿敏电容	(110)
§4.5	湿敏电阻	(118)
§4.6	其它湿度传感器介绍	(131)
第五章	大气压力的测量	(134)
§5.1	气压传感器	(134)
§5.2	膜片与空盒	(135)
§5.3	空盒气压传感器	(138)
§5.4	固态压阻传感器	(147)
§5.5	振动筒式压力传感器	(157)
第六章	风的测量	(165)
§6.1	风向风速传感器	(165)
§6.2	风向标及转换元件	(167)
§6.3	风杯及转换元件	(178)
§6.4	螺旋桨	(189)
§6.5	涡旋风速表	(193)
§6.6	热线	(195)
§6.7	声学测风	(200)
§6.8	双向风标和三轴风速表	(204)
第七章	降水、积雪、蒸发的测量和现在	
	天气的识别	(207)
§7.1	翻斗雨量传感器	(208)
§7.2	双浮筒雨雪量传感器	(212)
§7.3	其它雨(雪)量传感器	(215)
§7.4	超声波雪深传感器	(219)
§7.5	超声波蒸发传感器	(221)
§7.6	发光二极管天气识别器(LEDWI)	(222)
第八章	辐射和日照的测量	(234)
§8.1	直接辐射表	(236)

§8.2	总辐射表	(239)
§8.3	净辐射表	(241)
§8.4	分光辐射和紫外辐射表	(243)
§8.5	光电日照计	(246)
第九章	云高的测量	(249)
§9.1	激光式传感器与云高的测量	(249)
§9.2	国产77式红宝石激光测云仪	(257)
§9.3	芬兰CT12K型砷化镓激光测云仪	(264)
第十章	能见度的测量	(270)
§10.1	基本理论	(270)
§10.2	透射型能见度仪	(274)
§10.3	芬兰MITRAS透射仪	(276)
§10.4	散射型能见度仪	(281)
§10.5	美国8344型后向散射能见度传感器	(284)
第十一章	气象传感器的标定	(287)
§11.1	标定设备及标准器	(287)
§11.2	静态标定数据处理	(298)
§11.3	动态标定及数据处理	(303)
§11.4	气象要素量的检定系统	(307)
参考文献		(314)

第一章 传感器基础

§1.1 传感器的定义、组成与分类

1.1.1 传感器的定义

根据中华人民共和国国家标准(GB7665-87), 传感器(transducer/sensor) 被定义为: “能感受规定的被测量并按照一定的规律转换成可用输出信号的器件或装置, 通常由敏感元件和转换元件组成。”

由于电信号便于测量、传输、变换、储存和处理, 所以狭义地说传感器是指具有电信号输出的敏感元器件。

表1.1 被测量及被测对象分类

类 别		被 测 量 及 被 测 对 象	
物 理 量	机 械 量	几何学量 运动学量 力学量	长度、位移、厚度、角度、角位移 速度、角速度、加速度、角加速度、振动、频率、时间 力、力矩、应力、质量、荷重
		流 体 量	压力、真空度、液位、粘度、流速、流量
		固 体 量	金属探伤、介质材料探伤、裂纹、缺陷
	热 学 量	温度、热量、比热、热流、热分布	
	电 学 量	电流、电压、电场、电荷、电功率、电阻、电感、电容、电磁波	
	磁 场	磁通、磁场强度、磁感应强度	
	光	光度、照度、色、紫外、红外、可见光、光谱图象	
	放 射 线	X, α , β , γ 射线	
	湿 度	湿度、露点、水分	
	化 学 量		气体、液体、固体分析、pH值、浓度
生 物 量		酶、微生物、免疫抗原、抗体	

人类的生存和发展是通过感觉器官获取外界信息的，传感器正是人类感觉器官的延伸和扩展，目前它不但已能代替人类感官的大部分功能，而且在感知的领域、量程、灵敏度和精确度方面已大为超过。能感受的被测量已从各种物理量扩展到化学量和生物量。表1.1为目前能够检测的被测量分类表。

1.1.2 传感器的组成

传感器一般由敏感元件、转换元件组成，有时将信号调理电路也作为传感器的一部分(图1.1)。

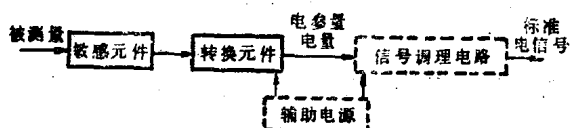


图1.1 传感器的组成

敏感元件 (sensing element)：直接感受（响应）被测量，并输出与被测量成确定关系的电的或非电的信号元件。

转换元件 (transduction element)：接受敏感元件输出的非电信号，且转换为电信号输出的元件。

例如空盒（弹性敏感元件）将大气压力转换成位移输出，差动变压器（转换元件）将此位移转换成电势差输出。

并非所有传感器都包括敏感元件和转换元件两部分，例如热敏电阻、热电偶时将被测量温度直接转换成电阻、热电势输出，此敏感元件同时兼任转换元件的功能。又如固态压阻传感器，它的硅膜片（敏感元件）和扩散电阻（转换元件）已经合为一体。

信号调理电路 (conditioner)：又称变换器 (convertor)、变送器 (transmitter)，其任务是将转换元件输出的电信号进一步调节成便于显示、记录、控制和处理的标准电信号。其类型视转换元件而定，常用的有电桥、放大器、振荡器、补偿电路等。

传统的传感器，信号调理电路是单独的一部分，而新型固态电路传感器，常将信号调理电路与敏感元件集成在一块半导体芯

片上。

图 1.2 为能量激发型传感器，传感器由激发信号的发射器和接收两部分组成，发射器向被测对象发射激发信号（如超声波、激光、红外光、微波、X 射线等），接收器接收被测对象对它的反射、折射、透射或散射信号，通过对信号的处理，可获得被测对象的某些性质或状态参数。

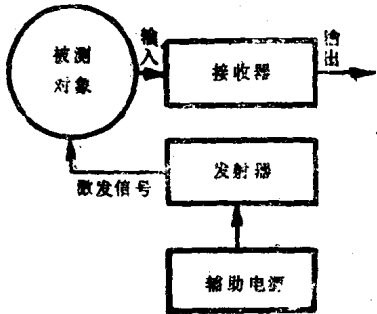


图 1.2 能量激发器

1.1.3 传感器的分类

传感器的种类繁多，目前没有统一的分类方法，表 1.2 列举了各种分类方法。

表 1.2 传感器的分类

分类方法	传感器的种类	说 明
按输入量分类	温度、压力、速度等	以被测量命名，便于使用者选择
按工作原理分类	电阻式、电容式、热电式、光电式等	有利于对传感器的系统了解和研究
按检测机理分类	结构型（如空盒、差动变压器等）	被测量引起传感器的结构尺寸、形状发生变化
	物性型（如光敏电阻、湿敏电容、霍尔元件等）	被测量促使传感器功能材料（半导体、电介质、铁电体）的物理、化学性质发生变化
按能量传递关系分类	能量转换型（如热电偶、光敏电池、测速发电机等）	传感器输出信号的能量完全取自被测对象、又称发电型
	能量控制型（如电阻、电感、电容式等）	传感器输出信号的能量取自辅助电源，被测量只起控制作用，又称参量型
	能量激发型（如超声波、激光、红外、微波传感器等）	传感器包括发射和接收两部分、向被测对象发射激发信号（声、光、电磁波）的同时，接收被测对象对它的反射、折射、透射或散射，来检测被测量参数

(续表)

分类方法	传感器的种类	说 明
按输出量分类	模拟量传感器	输出量为模拟电压、电流等、便于连续记录
	数字量传感器	输出量为数字编码、便于与计算机接口
	频率量传感器	通过计数器对频率脉冲计数, 可转换为数字量
按与被测对象的关系分类	非接触型(检测声、光、磁、电磁波、同位素、放射线的传感器)	负荷效应小, 能实现二维、三维的扫描检测和无损探测、但标定困难
	接触型	标定容易、精确度较高, 但负荷效应大、二维、三维检测难度大

在大气探测中采用了许多品种的传感器,表1.3列举了传感器在大气探测中的一些典型应用。

表1.3 传感器在大气探测中的典型应用

分 类	工作原理	传感器名称	在大气探测中的典型应用
能 量 控 制 型	电阻式 触点的线位移 触点的角位移 热阻效应 压阻效应 电阻随湿度变化	电位器 热电阻、热敏电阻、热线、热膜 压阻传感器 湿敏电阻	气压(空盒位移) 风向(风标角位移) 温度 风速、湿度(散热) 气压 湿度
	电容式 变极距 变介电常数	空盒电容 液位电容 热敏电容、湿敏电容	气压 雨量 温度、湿度
	电感式 变磁阻 变互感	电感、传感器 电涡流、传感器 差动变压器	气压(空盒位移) 气压(空盒位移)
	频率式 变振动元件的固有频率 变晶体的固有频率	振动筒 石英晶体谐振器	气压、空气密度、风速(动压)温度、压力、湿度、露点(冷却结露)
	数字式 通 断 角度编码	干簧、继电器 光敏、磁敏开关 Gray 码盘	雨量(翻斗计数) 风速(风杯计数)、昼夜 风标、经纬仪、雷达天线测角

(续表)

分 类	工作原理	传感器名称	在大气探测中的典型应用	
能量转换型	电势式	热电效应 热释电效应 电磁感应 光伏效应	热电偶 热电堆 热释电检测器 测速发电机 光管 电池、光敏二极管	温度、温差、风速（旁热式热线） 辐射 辐射、日照 风速（风杯转速） 近紫外、可见光、近红外辐射
	声	声波传播速度	超声波传感器	风速、温度、雪深、蒸发
	光	光在大气中的衰减、散射、闪烁	透射表、前向、后向散射仪，云高仪 横风向测风仪 LE-DWI 红外湿度仪	能见度、云高 风速、降水天气识别 湿度
	微波	变折射指数	微波折射仪	湿度

1.1.4 传感器的信号调理电路

为了使传感器输出的各种电信号能适合显示记录设备的规格或者与计算机接口电路相连,必须对传感器的输出信号进行恰当

表1.4 传感器输出信号分类

模 拟 量	连 续 式	电阻 (R) 电容 (C) 电感 (L) 电压 (V) 电流 (I) 电荷 (Q)
	脉 冲 式	脉冲峰值 (P _P) 脉冲宽度 (P _W) 脉冲间隔 (P _d)
频 率 量		正弦波频率 (F) 方波频率 (F) 脉冲频率 (P _f)
数 字 量		数字编码 (D) 开/关状态 (ON/OFF)

的变换和调理，这就需要用信号调理电路来实现这个功能。采用何种信号调理电路主要取决于传感器输出信号的型式，表1.4为各种传感器输出信号的分类。

为使各种不同型式的输出信号转化成为计算机接受的数字信号，需采用不同的信号调理电路，其框图如图1.3所示。

1.1.4.1 模拟量传感器

模拟量传感器的信号调理电路可分两大类。

(1) 将各种模拟量信号转换为模拟电压，再经放大、滤波、隔离和线性化后送模-数转换器（ADC）转化为数字信号。其中

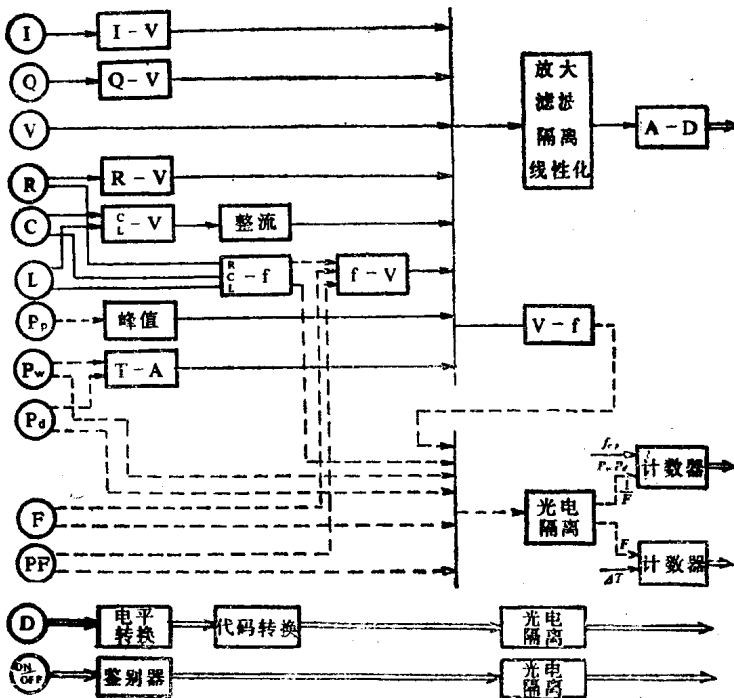


图1.3 信号调理电路框图
→模拟信号，→频率信号，⇒数字信号

放大是为了提高灵敏度(通常传感器输出信号幅度很小)，同时使模拟电压的变化范围适合于所用ADC的输入电压量程，由于运算

放大器具有高增益、高输入阻抗和低输出阻抗、便于用反馈来控制其响应特性等优点，所以放大电路通常由运算放大器组成。滤波是抑制来自传感器与电路的噪声和来自外界的干扰，使信号中被测量的有用频率成分通过，滤波采用无源或有源的滤波电路。隔离是将输入、输出和电源三部分电路分隔开，以抑制共模电压干扰，目前已有多种型号的带有高频载波变压器的专用隔离放大器供选用。线性化是对传感器的非线性特性进行补偿，使最终输出量与被测量呈线性关系，模拟信号线性化分无源和有源两种，较为复杂的非线性修正通常采用二极管电阻网络与运算放大器的恰当组合来实现。

各种模拟量转换成模拟电压的转换电路，这里只作简单的介绍。

① $I-V$ 转换。对电流型传感器输出的电流转换成电压，可采用电流-电压变换器。对于特别微弱的电流，可在通用型运放前加一级场效应管前置级。

② $Q-V$ 转换。对于输出电荷信号的压电型传感器，由于其内阻抗相当高，所以必须采用输入阻抗极高的前置放大器才能将输出电荷转换成电压。

③ $R-V$ 转换。将电阻式传感器输出的电阻转换成电压的电路有多种型式，常用的有直接流不平衡电桥和恒流源电路。为消除传感器引线电阻的影响，可采用三线或四线连接法。

④ $C, L-V$ 转换。将电容式或电感式传感器输出的电容量或电感量转换成电压，主要采用交流不平衡电桥（用幅值和频率都固定的交流电源激励）。电容式传感器还可以采用运算放大器电路。注意上述两种转换电路得到的均为交流电压，在模数转换前需先进行整流滤波。

⑤ 峰值保持。对于测量光脉冲或冲击力这一类传感器，为了检测其输出的最大值，就需要采用峰值保持电路，其输出信号幅度跟随输入信号的变化直到峰值后便保持不变。

⑥ T - A 转换, 脉冲宽度(P_w)或脉冲间隔(P_d)式传感器其输出是一段时间(T), 而时间-幅度转换器(time to amplitude converter)的基本原理是利用“运放”构成的积分器, 给以固定的输入电平, 则其输出电压将与积分时段(T)成正比。这种转换适合于输出时段较短的 P_w 或 P_d 传感器。

(2) 将各种模拟信号转换为频率信号, 然后通过计数器在一定时段(T)内进行计数转换成为数字信号。图1.3中采用光电耦合器件进行隔离, 不仅具有共模抑制比大、抗干扰能力强的特点, 且光电耦合器初级为电流驱动方式, 在驱动电流足够大时, 可使信号的传送距离达数百米以远。

将模拟信号转换为频率信号有以下三种方式。

① V - f 转换。电压-频率转换电路可以由分立元件组装, 也可采用集成的电压/频率转换器。

② L, C, R - f 转换。对于参量型传感器可以采用各种振荡器将电参量转换为频率信号。对于电感量宜采用电容反馈式振荡电路, 对于电容量宜采用电感反馈式振荡电路。电容和电阻还可以采用多谐振荡器及脉宽调制电路转换为矩形波频率信号。

③ 对于脉冲宽度或脉冲间隔式传感器, 可利用其输出的时段信号(T)去控制计数器的开闭, 用标准时钟脉冲信号(f_{cp})作为计数器的计数输入信号。这种方式适合输出时段较长的 P_w 或 P_d 式传感器。

1.1.4.2 频率量传感器

频率量传感器的信号调理电路也可以分成两类

(1) 将频率信号经光电隔离后作为计数脉冲送入计数器, 通过一定时段(T)的计数转换为数字信号。若信号频率较低, 为提高分辨率, 可用周期(或若干个周期)作为时段信号去控制计数器的开闭, 而选用较高频率的时钟脉冲进行计数。

(2) 将频率信号通过 f - V 转换变成直流电压, 然后再通过 A/D 转换变成数字信号。这种方式的优点是可以和模拟量传感器

合用一个模数转换器，无须采用计数器。

① 对于正弦波频率式传感器， f - V 转换器就是鉴频器，它是频率调制(FM)的逆过程，用它将频率的变化转换成电压的变化。

② 对于矩形波频率式传感器， f - V 转换有专用的集成频率/电压转换器，其输出电压与频率成正比。

1.1.4.3 数字量传感器

① 数字编码式传感器，其输出已经是数字信号，图1.3中的电平转换是将数字信号转换成为计算机接受的TTL电平，代码转换是将通常为格雷码变换成二进制码。

② 开关量传感器输出为电平0或1的一位数字信号，图1.3中的鉴别器是用来提高抗干扰能力，鉴别器常采用施密特(Schmitt)触发器，利用其电压回差来消除干扰。

信号调理电路的实用电路多种多样，可以参阅有关文献资料。我们将在第三章结合气象传感器信号调理电路的实例再作具体分析。

通过以上介绍，我们可以了解到信号调理电路就是将信号的形式、电平、阻抗、频带等进行各种变换的电路，目的是为了传感器的输出适应显示记录仪器和计算机信号处理的需要。

1.1.5 传感器的发展趋势

1.1.5.1 新效应

利用新发现的物理效应、化学反应和生物功能，开发新型的传感器。例如利用超导体的约瑟夫逊(Josephson)效应开发出的超导体量子干涉元件(SQUID)能够检测极微弱的脑磁场。

1.1.5.2 新材料

半导体、陶瓷、高分子、光导纤维等是研制物性型传感器的基础。利用传输光信号的光导纤维开发新型传感器，十多年来获得迅猛的发展，已经研制出70多种物理量的传感器；近年来有机材料的开发为生物传感器的研制提供了广阔的前景。

1.1.5.3 集成化