

航空传感器 实用手册

中国航空工业总公司
航空传感器实用手册

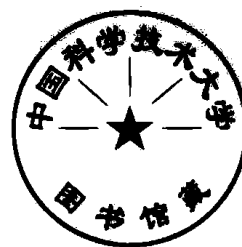
编委会 编

机械工业出版社

航空传感器实用手册

中国航空工业总公司
航空传感器实用手册编委会编

主 编 孙希任
副主编 梁 恺 孙世贵



机械工业出版社

(京)新登字 054 号

本手册共分 3 大部分, 21 章, 3 个附录, 具有突出航空、强调实用两大特点。

第 1 部分为技术基础, 概述了应用变换原理、调理电路及校准技术, 共分 4 章; 第 2 部分, 为航空用各类传感器, 按应用及参数分为 11 章, 是本手册的重点; 第 3 部分介绍传感器发展, 共分 6 章, 分别介绍了国内各种新型传感器及其技术发展和应用价值。

本手册对从事航空传感器研究、设计、生产与使用的工程技术人员, 特别是从事航空科研地面试验与飞行试验的技术人员与科技管理人员具有重要指导作用和参考价值; 对其他研究和工业部门同类专业的技术人员, 高等院校有关专业的师生亦可参考。

图书在版编目(CIP)数据

航空传感器实用手册/中国航空工业总公司航空传感器
实用手册编委会编. —北京: 机械工业出版社, 1995. 3
ISBN 7-111-04602-1

I. 航… I. 中… II. 传感器-航空仪表-手册 IV. V24
1.6-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (94) 第 00831 号

出版人 马九荣 (北京市百万庄南街 1 号 邮政编码 100037)
责任编辑: 严蕊琪 版式设计: 杨丽华 责任校对: 罗利华
封面设计: 郭景云 责任印制: 侯新民
北京昌平精工印刷厂印刷 · 新华书店北京发行所发行
1995 年 6 月第 1 版 · 1995 年 6 月第 1 次印刷
787mm × 1092mm $1/16$ · 50 印张 · 1 500 千字
0 001—1 000 册
定价: 76.00 元

航空传感器实用手册编委会

主任委员 周家骥

副主任委员 周晓青 金德琨 杨育中 陈 华 孙世贵(常务)

委 员 (按姓氏笔画排列)

马恒儒	王为颂	王福荣	刘广玉	乐 文
冯福周	孙世贵	孙希任	齐连普	米永辉
陈 华	陈法善	余瑞芬	李永敏	李逢春
李振铎	成志尧	吴志鹤	吴济华	阴存志
纪 纲	杨 治	杨育中	康学军	金德琨
金慧根	林广仁	林燕珊	周家骥	周晓青
周训文	俞寿鹏	赵荣椿	胡仲生	陶宝祺
高光锋	梁 恺	梁家惠	梁琦华	傅 宽
韩婉琴	武传江			

主 编 孙希任

副主编 梁 恺 孙世贵

主 审 刘广玉

副主审 陶宝祺 齐连普

编写说明

本手册各部分负责人及各章编写人名单如下:

第1部分 孙希任

第1章,孙希任;第2章,林燕珊、周训文;第3章,李永敏;第4章,成志尧

第2部分 王福荣

第5章,金慧根、李振铎、阴存志、齐连普、李逢春、武传江、杨治、浦甲臣、吴济华;第6章,韩婉琴、林广仁、杨治、浦甲臣;第7章,梁琦华;第8章,康学军、纪纲;第9章,俞寿鹏;第10章,李逢春;第11章,李建军;第12章,王为颂、米永辉;第13章,余瑞芬、高光锋、冯福周;第14章,梁家惠;第15章,胡仲生

第3部分 刘广玉

第16章,刘广玉;第17章,吴志鹤;第18章,赵荣椿;第19章,刘广玉;第20章,刘广玉;第21章,余瑞芬、刘广玉、孙希任

附录A 孙希任

附录B 梁恺、周训文

附录C 梁恺、周训文、王福荣、成志尧

·航空传感器实用手册编委会

1994年3月

前 言

传感器技术是当今世界各发达国家普遍重视并大力发展的高新技术之一,美国在《空军 2000 年》报告中列出了 15 项有助于提高 21 世纪空军能力的关键技术,其中传感器被列为第二项。日本科技厅制定的十大科技发展项目中,传感器也排在重要地位。由于各国政府的重视和市场需求,近几年,传感器技术及其产品的市场销售额均以较快速度发展,应用范围日益扩大。

航空工业是应用传感器最为广泛的领域之一,从飞机、发动机、机载各系统到它们的各类地面及空中试验无不使用大量的传感器。航空用传感器不仅品种多,而且技术要求高,无论是精度、稳定性、可靠性,还是使用温度范围和其他环境条件都较一般民用传感器要求严格。

为了满足航空技术发展的需要,一些新型、特殊要求的传感器在航空领域得到了推广和应用,诸如谐振式传感器、光纤传感器、高温振动或高温压力传感器、微型和特薄型传感器、高精度高可靠性传感器等。这些传感器代表着当代传感器的最新发展和最高水平。传感器对飞机工作的可靠性,对航空产品地面试验和飞行试验的准确性、可靠性都起着至关重要的作用。

我国航空传感器技术的发展已有 40 多年历史,历经仿制到自行研制,已初步形成了为航空产品配套、为各种地面和空中试验所需要的传感器的研制和生产规模。在实践中,成长了一批具有较高水平的丰富实践经验的专家,取得了丰硕的成果,并在航空传感器研制、生产、安装、使用、校准及数据处理等方面积累了大量经验。为了把这些成果和经验汇集起来,使之成为航空工业乃至全社会共享的财富和技术资源,原航空航天部科技司、试飞办、研究院、发动机总公司和机载设备总公司联合组织编写了这部大型工具书——《航空传感器实用手册》。

参加手册编写的是来自航空工业各厂、所、院校多年从事传感器技术研制和使用的教授和科技人员,其中不少专家为航空传感器的发展孜孜不倦地奋斗了近 40 年,具有殷实的理论基础和丰富的实践经验,他们本着继往开来的历史责任感和紧迫感,坚持严谨、求实的态度,在手册内容选定、表达形式、文字、图表、数据等方面进行了认真推敲、审核,力求使本手册成为一部技术先进、选材新颖、内容丰富、概念清楚、数据可靠、文字简洁、图文并茂、编排合理、查阅方便的工具书。

本手册突出“航空”和“实用”两大特点。突出“航空”体现在手册对航空产品、空中及地面试验用的各种传感器作了较全面系统的介绍,保持鲜明的航空特色;突出“实用”体现在手册尽可能满足从事航空传感器研制、生产、使用的各类读者的需要,并从使用角度重点介绍了传感器的选择、安装、校准等方面的资料和经验,提供准确可靠的数据、图表、公式,推荐优选传感器产品等。本手册对从事航空传感器设计、研制、生产、使用和从事航空产品试验、测试、检验的工程技术人员有重要的参考价值。对航空院校师生来说也是一部很好的教学参考书。特别是手册的第 2 部分,总结了航空领域使用的各种参数传感器的安装、使用、校准方面的经验,这对贯彻传感器使用、校准的规范化,提高试验测试数据的准确性、可比性具有重要意义。

本手册在编写过程中得到部机关有关司、局和院校、厂、所的大力支持,很多同志无保留地提供宝贵资料,参与编写和评审,在此我代表手册编委会向大家表示衷心感谢,对在手册编写过程中付出辛勤劳动的各位专家表示深切的谢意。

本手册不足和错误之处,欢迎广大读者给予指正。

周家骅

1994 年 3 月

目 录

第 1 部分 技术基础

第 1 章 概 述

1.1 传感器在航空领域中的应用	1
1.1.1 传感器在飞机上的应用	1
1.1.2 传感器在风洞实验中的应用	1
1.1.3 传感器在飞机结构强度试验中的应用	1
1.1.4 传感器在发动机试验中的应用	1
1.1.5 传感器在飞行试验中的应用	1
1.2 测量与传感器	1
1.2.1 量与测量	1
1.2.2 传感器	2
1.3 传感器的特性	4
1.3.1 静态测量与动态测量	4
1.3.2 静态特性与动态特性	4
1.3.3 静态校准	4
1.3.4 动态校准	7
1.4 航空传感器的特点和选用原则	8
1.4.1 航空传感器的特点	8
1.4.2 航空传感器的选用原则	8
参考文献	8

第 2 章 传感器的变换原理

2.1 电位器式传感器	9
2.1.1 电位器的工作原理	9
2.1.2 电位器的类型、结构与材料	9
2.1.3 电位器的主要特点及误差	10
2.1.4 电位器式传感器的应用	11
2.2 电容式传感器	11
2.2.1 电容式传感器的工作原理	11
2.2.2 电容式传感器的主要特点及误差	13
2.2.3 电容式传感器的应用	13
2.3 金属应变式传感器	13
2.3.1 应变效应	14
2.3.2 金属应变式传感器的工作原理	14
2.3.3 金属应变片的类型、结构、材料及特点	14
2.3.4 金属应变式传感器的应用	15
2.4 压阻式传感器	15
2.4.1 压阻效应	15
2.4.2 半导体应变片的类型	15

2.4.3 压阻式传感器的应用	16
2.5 磁阻式传感器	16
2.5.1 电感式传感器	16
2.5.2 变压器式传感器	18
2.5.3 电涡流式传感器	20
2.6 压电式传感器	22
2.6.1 压电效应	22
2.6.2 压电材料	22
2.6.3 压电式传感器的工作原理	23
2.6.4 压电式传感器的主要误差	24
2.7 压磁式传感器	24
2.7.1 压磁效应与磁致伸缩	24
2.7.2 压磁式传感器的工作原理与性能	24
2.7.3 压磁式传感器的应用	25
2.8 谐振式传感器	25
2.8.1 谐振式变换元件的类型及特性	25
2.8.2 谐振式传感器的工作原理	25
2.8.3 谐振式传感器的应用	26
2.9 光电式传感器	26
2.9.1 光电器件与光电效应	26
2.9.2 光电式传感器的工作原理及基本组成	27
2.9.3 光电式传感器的应用	28
2.10 热电式传感器	28
2.10.1 热电式传感器的工作原理	28
2.10.2 热电偶	28
2.10.3 热电阻	30
2.10.4 其他感温元件	31
2.11 辐射式传感器	31
2.11.1 热辐射式传感器	31
2.11.2 核辐射式传感器	32
2.12 陀螺式传感器	32
2.12.1 刚体转子式陀螺仪与陀螺效应	32
2.12.2 陀螺式传感器的应用	33
2.12.3 激光陀螺仪	34
2.13 霍尔式传感器	35
2.13.1 霍尔效应及特性	35
2.13.2 霍尔式传感器的性能与特点	35
2.13.3 霍尔式传感器的应用	35
参考文献	36

第 3 章 传感器中的信号调理电路

3.1 概述	37
3.2 传感器中电信号的基本形式	37

3.3 信号放大与阻抗变换电路	38
3.3.1 反相与同相比例放大器	41
3.3.2 测量(或仪表)放大器	41
3.3.3 电桥放大器	42
3.3.4 光电流放大器	42
3.3.5 调制—解调放大器	43
3.3.6 隔离放大器	43
3.3.7 电荷放大器	44
3.4 信号变换与信号转换电路	44
3.4.1 线性检波器	44
3.4.2 相敏检波器	45
3.4.3 鉴频器	45
3.4.4 脉宽调制(PWM)电路	47
3.4.5 模/数(A/D)转换器	47
3.4.6 数/模(D/A)转换器	49
3.4.7 电压/频率(V/F)转换器	49
3.5 信号滤波电路与相关检测电路	50
3.5.1 信号滤波概述	50
3.5.2 RC滤波电路	51
3.5.3 相关检测电路	51
3.6 信号调整与补偿电路	52
3.6.1 调零与偏置电路	52
3.6.2 温度补偿电路	53
3.6.3 非线性补偿电路	53
3.7 信号输出或发送电路	54
3.7.1 直流电压或电流输出	54
3.7.2 频率(或周期输出)	55
3.7.3 数字输出	56
3.8 无源传感器的激励电路	57
3.8.1 恒压激励	57
3.8.2 恒流激励	57
3.8.3 交流激励	57
3.8.4 脉冲激励	58
3.8.5 其它激励	59
参考文献	59

第4章 航空传感器的检定和校准

4.1 概述	60
4.1.1 校准的重要性	60
4.1.2 定义	60
4.1.3 分类	60
4.1.4 校准系统的组成	60
4.1.5 对校准系统的要求	60
4.1.6 对被校传感器的要求	61
4.2 静态校准	61
4.2.1 力传感器的静态校准	61
4.2.2 压力传感器的静态校准	61
4.2.3 温度传感器的静态校准	64

4.2.4 流量传感器的静态校准	68
4.2.5 位移传感器校准	71
4.2.6 应变计校准	72
4.2.7 湿度传感器校准	72
4.2.8 转速传感器校准	72
4.3 动态校准	74
4.3.1 压力传感器动态校准	75
4.3.2 加速度传感器的校准	78
4.3.3 力传感器的动态校准	81
4.4 航空传感器的特殊校准	82

第2部分 航空用各类传感器

第5章 航空传感器应用概况

5.1 机载传感器	83
5.1.1 概述	83
5.1.2 对机载传感器的一般要求	83
5.1.3 常用机载传感器	84
5.1.4 飞机各系统用的传感器	86
5.1.5 机载传感器的安装和校准	97
5.1.6 机载传感器的发展趋势	98
5.2 飞行试验用传感器	98
5.2.1 概述	98
5.2.2 飞行试验用的传感器	98
5.2.3 飞行试验用传感器修正量的确定	108
5.2.4 飞行试验对传感器的要求	109
5.2.5 飞行试验传感器的校准	112
5.2.6 试飞用传感器的发展趋势	113
5.3 发动机试验用传感器	114
5.3.1 概述	114
5.3.2 发动机试验对传感器的要求	114
5.3.3 航空发动机整机试验用传感器	115
5.3.4 压气机试验用传感器	127
5.3.5 模型涡轮试验用传感器	132
5.3.6 燃烧室试验用传感器	134
5.3.7 其它试验用传感器	134
5.3.8 发动机试验用传感器的发展	135
5.4 风洞实验用传感器	135
5.4.1 概述	135
5.4.2 风洞模型实验用传感器	135
5.4.3 风洞流场测量用传感器	142
5.4.4 风洞控制用传感器	143
5.4.5 风洞实验对传感器的要求	144
5.4.6 风洞实验用传感器的发展	145
5.5 结构强度试验用传感器	145
5.5.1 概述	145

5.5.2 结构强度试验用传感器	146
5.5.3 强度试验对传感器的要求	149
5.5.4 强度试验传感器的特殊标定方法	151
5.5.5 强度试验传感器的发展前景	151
参考文献	152

第6章 压力传感器

6.1 概述	154
6.1.1 基本定义	154
6.1.2 压力传感器,压力扫描阀和压力传感器	154
6.1.3 压力传感器在航空领域中的应用	155
6.2 电阻应变式压力传感器	155
6.2.1 平膜型应变式压力传感器	155
6.2.2 应变管式压力传感器	156
6.2.3 应变梁式压力传感器	157
6.2.4 溅射薄膜式压力传感器	158
6.2.5 航空用国产电阻应变式压力传感器	158
6.2.6 国外产应变式压力传感器	158
6.3 电位器式压力传感器	168
6.3.1 工作原理	168
6.3.2 结构	168
6.3.3 特点	168
6.3.4 常用电位器式压力传感器	169
6.4 压阻式压力传感器	170
6.4.1 工作原理	170
6.4.2 结构	170
6.4.3 特点	171
6.4.4 航空用国产压阻式压力传感器	172
6.4.5 国外生产的压阻式压力传感器	182
6.5 电感式压力传感器	200
6.5.1 工作原理	200
6.5.2 结构	200
6.5.3 特点	200
6.5.4 国产的电感式压力传感器	201
6.5.5 国外产的电感式压力传感器	201
6.6 电容式压力传感器	202
6.6.1 工作原理	202
6.6.2 结构	202
6.6.3 特点	202
6.6.4 国内与国外生产的电容式压力传感器	203
6.7 振筒式压力传感器	203
6.7.1 工作原理	203
6.7.2 结构	203
6.7.3 特点	204
6.7.4 国产的振动筒式压力传感器	204
6.8 压电式压力传感器	205
6.8.1 工作原理	205

6.8.2 结构	205
6.8.3 特点	205
6.8.4 国产压电式压力传感器	206
6.8.5 国外产压电式压力传感器	206
6.9 数字石英式压力传感器	210
6.9.1 工作原理	210
6.9.2 特点	210
6.9.3 国外生产的数字石英式压力传感器	210
6.10 压力传感器的使用技术	210
6.10.1 压力传感器的选用	210
6.10.2 零位补偿	211
6.10.3 激励电源	211
6.10.4 使用压力传感器时的接地和屏蔽	212
6.10.5 压力传感器的安装	212
6.10.6 压力传感器的在线校准	214
6.11 气压高度传感器和空速传感器	214
6.11.1 基本原理	215
6.11.2 气压式高度、空速传感器的性能及安装使用	216
6.12 压力传感器	240
6.12.1 概述	240
6.12.2 空气压力传感器	241
6.12.3 防冰压力信号器	241
6.12.4 总压传感器	241
6.12.5 静压传感器	253
6.12.6 总压方向管	257
6.12.7 5孔探针和7孔探针	258
6.12.8 复合管压力传感器	259
6.13 压力扫描阀(器)	264
6.13.1 机械式压力扫描阀	264
6.13.2 电子压力扫描阀(器)	265
6.13.3 电子扫描压力测量系统简介	266
参考文献	269

第7章 温度传感器

7.1 概述	270
7.2 航空测温的特点	270
7.2.1 气流测量	270
7.2.2 表面测温	271
7.3 电阻式温度传感器	271
7.3.1 工作原理	271
7.3.2 结构	271
7.3.3 特点	271
7.3.4 航空用电阻式温度传感器	271
7.3.5 安装及注意事项	284
7.4 热电偶式温度传感器	286
7.4.1 工作原理	286
7.4.2 结构	286

7.4.3 特点	286
7.4.4 航空用热电偶式温度传感器	286
7.4.5 安装及注意事项	299
7.5 辐射温度计	300
7.5.1 工作原理	300
7.5.2 特点	300
7.5.3 航空用辐射温度计	300
7.6 温包(压力式温度计)	302
7.6.1 工作原理	302
7.6.2 结构	302
7.6.3 特点	302
7.6.4 航空工业中的温包	302
7.7 校准方法	303
7.7.1 温度传感器的静态校准方法	304
7.7.2 温度传感器的动态校准方法	304

第8章 电阻应变计

8.1 概述	311
8.1.1 应变计的工作原理、典型结构、术语及分类	311
8.1.2 应变计的常用材料	312
8.1.3 应变计的工作特性及标定方法	313
8.2 应变计多功能补偿技术	317
8.2.1 温度自补偿应变计	317
8.2.2 弹性模量自补偿应变计	318
8.2.3 蠕变自补偿应变计	318
8.2.4 功能组合	319
8.3 常用应变计的选择和应用	319
8.3.1 常用应变计的主要选择参数	319
8.3.2 常用应变计产品(521厂)	322
8.3.3 常用应变计参数选择时考虑的内容	330
8.4 特殊用途应变计	331
8.4.1 中、高温应变计	331
8.4.2 大应变应变计	336
8.4.3 裂纹扩展计	338
8.4.4 疲劳寿命计	339
8.4.5 表面热膜	340
8.5 粘结剂与粘贴技术	341
8.5.1 粘结剂概述	341
8.5.2 应变粘结剂的种类和特性	341
8.5.3 应变粘结剂的选择	344
8.5.4 应变计的粘贴技术	345
8.5.5 防护处理	347

第9章 振动、冲击和过载传感器

9.1 概述	349
9.2 磁电式振动传感器	350
9.2.1 工作原理	350

9.2.2 工作特点	350
9.2.3 航空领域内的应用	351
9.2.4 航空用磁电式振动传感器典型型号介绍	351
9.3 压电式加速度传感器	356
9.3.1 工作原理	356
9.3.2 典型结构	357
9.3.3 压电式加速度计的选用	360
9.3.4 国内外典型加速度计型号介绍	362
9.4 压阻式加速度传感器	378
9.4.1 工作原理	378
9.4.2 典型结构和工作特点	378
9.4.3 典型型号介绍	380
9.5 变电容式加速度传感器	383
9.5.1 工作原理和应用特点	383
9.5.2 典型型号介绍	384
9.6 过载传感器	385
9.6.1 概述	385
9.6.2 电位器式过载传感器	386
9.6.3 应变式过载传感器	386
9.6.4 磁感应式加速度传感器	388
9.6.5 5T04 系列三轴伺服力平衡式加速度传感器	390
9.6.6 电容式加速度传感器	392
9.6.7 其它类型的加速度传感器	392
9.7 振动传感器的选择和使用	392
9.7.1 振动传感器的选择	392
9.7.2 振动传感器的使用	394
9.8 振动传感器的校准	394
9.8.1 地球重力场校准法	394
9.8.2 测定 1g 的“颤抖”球法	396
9.8.3 比较校准法	396
9.8.4 手持式振动校准器	397
9.8.5 随机激振——传递函数法	398
参考文献	399

第10章 转速传感器

10.1 概述	400
10.2 测速电机	400
10.2.1 测速电机的工作原理	400
10.2.2 测速电机的特点	400
10.2.3 测速电机的校准	400
10.2.4 航空用测速电机典型型号介绍	400
10.3 磁电式转速传感器	407
10.3.1 磁电式转速传感器的工作原理	407
10.3.2 磁电式转速传感器的特点	407
10.3.3 几种典型的航空用磁电式转速传感器	408

10.4 光电式转速传感器	411
10.4.1 光电式转速传感器的工作原理和特点	411
10.4.2 典型光电式转速传感器	411
10.5 电涡流式转速传感器	413
10.5.1 电涡流式转速传感器的工作原理和特点	413
10.5.2 典型的电涡流式转速传感器简介	413

第 11 章 力和扭矩传感器

11.1 力传感器	415
11.1.1 概述	415
11.1.2 航空常用的力传感器	415
11.2 扭矩传感器	430
11.2.1 概述	430
11.2.2 扭矩传感器的变换原理	430
11.2.3 扭矩传感器的电源、信号传输方式	430
11.2.4 扭矩、转矩传感器产品	432
参考文献	432

第 12 章 流量、流速传感器

12.1 概述	433
12.1.1 流量、流速的测定原理	433
12.1.2 流量传感器的特点和选用原则	434
12.2 涡轮式流量传感器	436
12.2.1 概述	436
12.2.2 典型的涡轮式流量传感器	436
12.2.3 涡轮式流量传感器的应用	437
12.3 节流装置	442
12.3.1 概述	442
12.3.2 典型的节流装置	443
12.3.3 标准节流装置的应用	443
12.4 容积式流量传感器	445
12.4.1 概述	445
12.4.2 典型的容积式流量传感器	446
12.4.3 容积式流量传感器的应用	446
12.5 电磁式流量传感器	450
12.5.1 概述	450
12.5.2 典型的电磁式流量传感器	450
12.5.3 电磁式流量传感器的应用	450
12.6 面积式流量传感器	453
12.6.1 概述	453
12.6.2 典型的面积式流量传感器	454
12.6.3 面积式流量传感器的应用	454
12.7 流体振动式流量传感器	458
12.7.1 概述	458
12.7.2 典型的流体振动式流量传感器	459

12.7.3 流体振动式流量传感器的应用	462
12.8 质量式流量传感器	462
12.8.1 概述	462
12.8.2 直接式质量流量传感器	462
12.8.3 间接式质量流量传感器	466
12.9 超声波式流量(流速)传感器	467
12.9.1 概述	467
12.9.2 典型的超声波式流量(流速)传感器	468
12.9.3 超声波式流量(流速)传感器的应用	468
12.10 双扭线型空气流量管	470
12.10.1 概述	470
12.10.2 双扭线型流量管的测量原理	470
12.11 热线式流速传感器	471
12.11.1 概述	471
12.11.2 典型的热线热膜流速传感器	473
12.12 激光流速传感器	475
12.12.1 概述	475
12.12.2 测量方式和光学系统	476
12.12.3 典型的激光流速传感器	476
参考文献	478

第 13 章 位移传感器

13.1 概述	479
13.2 角位移传感器	479
13.2.1 电位器式角位移传感器	479
13.2.2 其它原理角位移传感器	480
13.3 线位移传感器	481
13.3.1 电位器式线位移传感器	481
13.3.2 差动变压器式位移传感器	482
13.3.3 差动电感式位移传感器	484
13.3.4 电涡流式位移传感器	486
13.3.5 应变式位移传感器	487
13.3.6 电容式位移传感器	487
13.3.7 光纤式位移传感器	488
13.3.8 光栅式线性位移传感器	490
13.4 液位传感器	491
13.4.1 液位传感器分类	491
13.4.2 浮子式液位传感器	491
13.4.3 浮子-干簧管液位传感器	495
13.4.4 电容式液位传感器	500
13.4.5 液位传感器在航空领域中的应用	504
13.5 迎角传感器	508
13.5.1 概述	508
13.5.2 风标式迎角传感器	508
13.5.3 压差归零式迎角传感器	509
13.5.4 校准	516
13.5.5 国外迎角传感器产品介绍	516

第14章 声和超声传感器

14.1 概述	517
14.2 噪声测量用传感器	518
14.2.1 传声器的类型和构造	518
14.2.2 传声器产品介绍和使用说明	520
14.2.3 电容传声器的校准	523
14.2.4 航空噪声的测量	525
14.3 声振检测用传感器	526
14.3.1 声阻探头	526
14.3.2 声谐振法探头	527
14.3.3 涡流-声检测探头	530
14.4 超声检测用传感器	531
14.4.1 超声换能器的分类和工作方式	531
14.4.2 超声换能器的结构、性能和产品	532
14.4.3 超声换能器的性能测试和校准	549
14.4.4 航空应用举例	551
14.5 声发射传感器	554
14.5.1 声发现象和声发射传感器的结构	554
14.5.2 声发射传感器的校准	555
14.5.3 声发射传感器产品介绍	558
14.5.4 航空应用举例	562
参考文献	565

第15章 航向姿态角、角速度传感器

15.1 航向角传感器	566
15.1.1 概述	566
15.1.2 TH-5A型偏航角传感器(航向陀螺)	567
15.1.3 LZ-*系列综合罗盘(航向系统)	569
15.1.4 磁航向校准	574
15.2 姿态角传感器	577
15.2.1 JS-3*型重块摆式姿态角传感器	577
15.2.2 TC-3型姿态角传感器	577
15.2.3 I2701姿态角传感器	578
15.2.4 TC-4姿态角传感器	579
15.2.5 TPW-1系列双轴陀螺动力稳定平台	581
15.2.6 姿态角传感器的校准和安装	583
15.3 航向姿态系统	584
15.3.1 HZX-2T航向姿态系统	584
15.3.2 HZX-2B航向姿态系统	386
15.3.3 HZX-5航向姿态系统	386
15.3.4 CV-1536三轴陀螺平台	386
15.3.5 CV550-2航向姿态系统	590
15.3.6 6000T1航向姿态系统	592
15.4 角速度传感器	595
15.4.1 概述	595

15.4.2 I14系列角速度传感器	595
15.4.3 DA4系列角速度传感器	596
15.4.4 GSM24RC角速度传感器	597
15.4.5 GR-H4角速度传感器	598
15.4.6 TSZ-1组合角速度传感器	600
15.4.7 XJS-1角速度信号器	601
15.4.8 角速度传感器的交感误差	602

第3部分 航空用新型传感器

第16章 发展中的传感技术

16.1 概述	604
16.2 敏感材料	605
16.2.1 硅材料	605
16.2.2 化合物半导体	605
16.2.3 石英敏感材料	606
16.2.4 精密陶瓷材料	607
16.2.5 铁电聚合物	607
16.2.6 低温超导材料	608
16.3 微机械加工技术	608
16.3.1 概述	608
16.3.2 硅微机械加工技术	608
16.3.3 X射线深层光刻电铸成型技术	615
16.3.4 微型传感器结构	616
参考文献	617

第17章 光纤传感器

17.1 概述	618
17.2 光纤传光原理	620
17.3 光纤压力传感器	621
17.3.1 结构和工作原理	621
17.3.2 主要性能指标	622
17.3.3 在航空发动机压力测试中的应用	622
17.4 光纤高温传感器	623
17.4.1 光纤辐射高温传感器	623
17.4.2 黑体式光纤高温传感器	625
17.5 光纤振动传感器	626
17.5.1 压气机叶片振动检测的重要性	626
17.5.2 光纤测振原理	626
17.5.3 在测振中的具体应用	627
17.6 光纤涡轮流量传感器及检测系统	627
17.6.1 流量测量原理	627
17.6.2 光纤转速传感器	628
17.6.3 检测系统的组成及功能	628
17.6.4 主要性能指标	628

17.6.5 在航空发动机测试中的应用前景	629
17.7 光纤应变传感器	629
17.8 光纤陀螺	630
17.8.1 工作原理	630
17.8.2 研究动向	630
17.9 分布式光纤应力传感系统	631
17.9.1 工作原理	631
17.9.2 研究动向	631
参考文献	632

第 18 章 图象传感器

18.1 概述	633
18.1.1 图象传感器在航空工程中的应用	633
18.1.2 图象传感器的分类	633
18.1.3 图象传感器的主要性能参数	633
18.1.4 图象传感器在航空领域的发展前景	634
18.2 固体摄像器件	635
18.2.1 电荷耦合器件的工作原理	635
18.2.2 线阵 CCD 摄像器件	636
18.2.3 面阵 CCD 摄像器件	638
18.2.4 其它类型的固体摄像器件	639
18.3 红外摄像器件	642
18.3.1 概述	642
18.3.2 混合式红外摄像器件	643
18.3.3 单片式红外摄像器件	644
18.4 微光摄像器件	645
18.4.1 概述	645
18.4.2 微光固体摄像器件	645
参考文献	646

第 19 章 新型谐振式传感器

19.1 概述	647
19.2 热激励硅谐振压力传感器	647
19.2.1 基本原理	647
19.2.2 电阻分布及加载电压值的考虑	648
19.3 光纤激励	648
19.4 压电薄膜激励	648
19.5 声表面波谐振传感器	649
19.5.1 概述	649
19.5.2 SAW 器件	649
19.5.3 SAW 谐振子	650
19.5.4 SAW 传感器	651
19.6 应用前景	652
19.6.1 高度测量系统	652
19.6.2 控制与导航系统	652
19.6.3 遥测系统	653
19.6.4 结构静力试验	653

19.6.5 航天医学科学工程	653
19.7 石英半球壳谐振式角速度传感器 (陀螺)	653
19.7.1 基本结构	653
19.7.2 测量原理	654
19.7.3 测量方案	655
参考文献	655

第 20 章 半导体场效应化学传感器

20.1 概述	656
20.2 离子敏 MOS 晶体管结构 和工作原理	656
20.3 气敏 MOS 晶体管结构和工作原理	658
20.4 敏感膜	659
20.5 化学敏 MOS 晶体管特性及制造工艺	661
20.6 应用	662
参考文献	663

第 21 章 传感器的智能化

21.1 概述	664
21.2 Smart 传感器	664
21.3 主传感器	665
21.4 Smart 传感器中的软件技术	665
21.4.1 标度转换技术	665
21.4.2 数字调零技术	666
21.4.3 非线性补偿	666
21.4.4 温度补偿	666
21.4.5 数字滤波技术	666
21.5 应用实例	667
21.6 发展前景	669
参考文献	670

附录 A 常用传感器名词术语	671
----------------------	-----

附录 B 有关国标与部标文件选编	680
------------------------	-----

B1 传感器命名法及代号 GB7666—87	680
B2 关于国家标准《传感器通用术语》、 《传感器命名法及代号》的解说	688
B3 压力传感器(静态)检定规范 JJF(航空)005—83	691
B4 线性压力传感器主要静态性能指标计算 方法 JJF(航空)009—83	696

附录 C 传感器选用参考	702
--------------------	-----

C1 中国航空工业总公司有关所厂院校研制

生产的部分传感器简介	702
C1.1 沈阳航空发动机研究所(606 所)	702
C1.2 南方动力机械研究所(608 所)	703
C1.3 中国航空附件研究所(609 所)	704
C1.4 航空救生设备研究所(610 所)	706
C1.5 飞行自动控制研究所(618 所)	707
C1.6 飞机结构强度研究所(623 所)	709
C1.7 中国航空燃气涡轮研究所(624 所)	710
C1.8 北京航空工艺研究所(625 所)	712
C1.9 沈阳空气动力研究所(626 所)	713
C1.10 哈尔滨风洞研究所(627 所)	715
C1.11 上海航空测控技术研究所(633 所)	716
C1.12 北京测控技术研究所(634 所)	717
C1.13 国防科工委第一计量测试中心(304 所)	720
C1.14 中国飞行试验研究院	727
C1.15 成都航空仪表公司(161 厂)	732
C1.16 太行仪表厂(221 厂)	735
C1.17 四川航空仪器仪表厂(291 厂)	736
C1.18 国营中原电测仪器厂(521 厂)	741
C1.19 北京航空航天大学	743
C1.20 南京航空航天大学	744
C1.21 西北工业大学	745

C2 其它部门有关单位研制生产的部分传

感器简介	747
C2.1 北京空气动力研究所(701 所)	747
C2.2 北京遥测技术研究所(704 所)	748
C2.3 中国气动力研究与发展中心测试研究所	754
C2.4 沈阳仪器仪表工艺研究所	756
C2.5 甘肃秦安 749 厂	756
C2.6 陕西宝鸡秦岭电子仪表公司	757

C3 中外合资、国外厂商代理代办和国外有关厂

家部分产品简介	758
C3.1 蚌埠库利特电子有限公司	758
C3.2 康宇测控仪器仪表公司	759
C3.3 MOTOROLA 公司	770
C3.4 共和电业株式会社东工 KOSEN 株式会社	770
C3.5 AMETEK PMT Division 公司	771
C3.6 Kulite Semiconductor Products Inc	771
C3.7 英特兰器件公司(Entran Devices Inc)	772
C3.8 霍尼威尔公司(Honey well)	773
C3.9 俄罗斯 M. M 格罗莫夫飞行研究院	776
C3.10 圣彼得堡《仪表》试验工厂	783
C3.11 莫斯科“曙光”仪表设计局	784
C3.12 俄罗斯测量设备科研生产联合体	784

第1部分 技术基础

第1章 概述

1.1 传感器在航空领域中的应用

传感器已广泛应用于工农业生产和科学实验中。有人说,如果将计算机看成是自动化中的“头脑”,那么,传感器将是收集信息的“五官”。只有感受和反映的信息正确,才能作出正确的分析和判断。由此可见,计算机只有在和性能优良的传感器结合起来,才能充分发挥它在自动控制系统中的作用。因此,传感器愈来愈受到人们的重视,应用也更加广泛。

在航空领域中传感器更是不能缺少的“五官”,而且对它要求高,品种也要多。

除航空工业生产中所用的传感器与一般工农业生产中所用的传感器有许多相同或相似之处外,在航空领域中还有许多特殊的应用场合。

1.1.1 传感器在飞机上的应用

飞机是在空中运动的精密复杂的机器,它要能按预定的航迹安全飞行,并执行规定的任务。飞机上安装的传感器称作机载传感器,它们常被应用于:

- a. 测量飞机的工作状态。例如:测量飞机的飞行速度、升降速度、飞行马赫数、迎角等;
- b. 测量飞机的飞行姿态。例如:测量飞机的俯仰角、倾斜角等;
- c. 测量动力装置的工作状态。例如:测量发动机的转速、进气压力、气缸头温度、排气温度等,以及测量燃油箱油量、燃油流量、燃油压力、滑油压力、滑油温度等;
- d. 测量导航参数。例如:测量航向、飞行高度、飞行距离、飞机方位等;
- e. 测量其他参数。例如:测量起落架位置、襟翼位置、大气温度等。

1.1.2 传感器在风洞实验中的应用

飞机所受空气动力的情况,通常在地面的风洞中试验确定。风洞可模拟气流相对飞机流动的情况,因此可对比例缩小的飞机模型或全尺寸的飞机在气流中的空气动力情况进行测量和研究。风洞试验是航空领域中的一项特殊的和不可缺少的科学试验。

风洞试验中的传感器主要应用于:

- a. 测量飞机所受的气动力;
- b. 测量飞机上的压力分布;
- c. 测量风洞的气流参数,例如:气流速度、压力分布、马赫数、温度等。

1.1.3 传感器在飞机结构强度试验中的应用

飞机结构强度试验也是航空领域中特有的和重要的科学试验之一,强度试验包括:静强度试验、动强度试验和热强度试验。传感器在结构强度试验中,主要用来测量飞机构件的应变、应力、位移和加速度等。

1.1.4 传感器在发动机试验中的应用

航空发动机试验包括:发动机稳态性能试验、发动机动态性能试验和发动机强度试验。在航空发动机试验中,传感器主要应用于:

- a. 测量发动机各项性能参数。例如:测量发动机的推力、扭矩、转速、空气流量、燃油流量等;
- b. 测量流态畸变参数;
- c. 测量发动机起动性能和加、减速性能参数;
- d. 测量失速、喘振和非定型流参数;
- e. 测量压气机级转子性能参数;
- f. 测量发动机强度参数;
- g. 监测和监控发动机运行情况。

1.1.5 传感器在飞行试验中的应用

飞机和安装在飞机中的各种设备除必要的实验室试验研究和验证外,都必须进行空中的飞行试验,以确定飞机、发动机和各种设备在空中飞行时的性能和可靠性。在飞行试验中,传感器主要应用于:

- a. 测量飞机的各种飞行参数;
- b. 测定发动机工作状态和性能参数;
- c. 监控飞机中所安装的各种设备的工作状态和性能参数。

1.2 测量与传感器

1.2.1 量与测量

量是可以定性区别和定量测量的现象或物体、物质的属性。

测量是为确定对象的量值而进行的实验过程。

测量中被确定的对象称被测量。测量所得到的被测量的值称为测量结果。

量的量值可用一个数字和一个合适的计量单位来表示。量值中的纯数字部分称为量的数值。单位则是该量数值为1时的量值。因此,一个量的量值可以用它为其单位值的多少倍来表示。例如,取长度的单位为(m)时,则量值为10.36m的长度,是指该长度是其单位米的10.36倍。

测量一词可以是名词,也可以是动词。当作名词用时,在它前面可加限定词以构成一个新名词,例如温度测量、长度测量。测量也可作限定词使用,例如测量误差,这也是一个名词,意思是属于测量范畴的误差。测量作为动词使用时,通常置于被测量对象的前面,例如测量加速度。

测量分为直接测量和间接测量:能直接获得被测量量值的称为直接测量。例如一般的温度测量、压力测量;需通过另一个与被测量有一定函数关系的量才能确定被测量的量值者称为间接测量。例如,通过测量大气静压才能确定气压高度,通过测量动压才能确定指示空速等。

被测量实际具有的量值称为被测量的真值,通过测量而获得的被测量的量值称为测量结果。由于测量中存在着人为的或设备的种种缺陷,往往使测量结果并不等于真值,测量结果与真值之差称为测量误差,即

$$E = R - T \quad (1-1)$$

式中 E ——测量误差;

R ——测量结果;

T ——被测量的真值。

当测量结果大于真值时,则称为具有正的测量误差;反之,则称为具有负的测量误差。这些误差称为绝对误差,绝对误差除以被测量真值称为相对误差。

测量误差的负值称为修正值,即

$$C = -E \quad (1-2)$$

式中 C ——修正值。

由此可见,测量结果加上修正值就可得到被测量的真值,即

$$T = R + C \quad (1-3)$$

数值和符号都有一定规律的误差称为系统误差。数值和符号都具有随机性的误差称为偶然误差或随机误差。

1.2.2 传感器

测量既然是一组实验,就必须使用各种测量仪器,传感器就是一种测量仪器。。

传感器的功能是进行量的变换,可将被测量变换成后续设备(如执行机构、显示器、记录器、计算机等)所能接受和“理解”的信号。输入量(被测量)和输出量(信号)之间要有一定的规律或函数关系,才能根据输出量(信号)的特征判断输入量(被测量)的量值。

1.2.2.1 传感器的组成

传感器通常由敏感元件、变换元件和必要的调理电路等组成。敏感元件直接感受被测量(在间接测量中则感受某个与被测量有一定关系的量)并变换成另一个量。如果敏感元件的输出量直接表示传感器的输出信号,那么这类传感器仅由敏感元件所组成,例如测量温度的热电偶,它可将被测的冷、热端温度差变换成热生电动势,成为热电式传感器。

当敏感元件的输出量不能直接作为传感器的输出信号时,则就要将该输出量进行变换和处理。一般情况下是将敏感元件的输出量经过一级或数级变换元件变换成符合所需要的传感器的输出信号。例如以膜盒作为敏感元件,它感受压力并转换成膜盒硬中心的位移,然后以差动变压器作为变换元件将膜盒硬中心的位移变换成电压变化,这就是差动变压器式压力传感器。

但是,有些更复杂的传感器,除敏感元件和必要的变换元件外,还需要测量电路、调理电路,甚至还要有解算装置或计算机等。

例如,某些传感器中的电感式变换元件,必需配以合适的电阻、电容构成电桥,加上专用电源后才能将电感式变换器的电感量变化变换成电压输出。类似此处所用的电桥电路称为测量电路。

传感器中某些环节并不起变换量的作用,而只是对某些量进行放大、滤波、模数转换等处理,这类环节称为信号调理环节或调理电路。

在传感器中有些量要进行运算后才能得到合适的输出信号。例如,通过测量大气静压而间接地获得与气压高度成线性关系的输出信号时,就需进行一定的计算。又例如,通过测量大气静压和飞机相对大气运动时的气流总压而获得飞机相对大气的真空速信号时,也需进行解算。解算装置可以是机械式的,也可以是电气或电子式的,统称为解算机构或解算装置。

在大气数据记录仪中,将测得的大气静压和总压,以及迎角和大气总温的信号,经过计算机解算后就可获得高度、大气密度、大气静温、指示空速、真空速、马赫数、升降速度等多种输出信号。

1.2.2.2 传感器的结构形式

如果将传感器中每一个功能件,如敏感元件、变换元件、测量电路、调理器等看成是传感中的各个测量环节,则整个传感器将是这些测量环节按一定方式连接而成的测量链。传感器中测量环节的连接形式称为传感器的结构(不是传感器的具体构造),传感器的结构可用结构框图表示。典型的结构形式有如下几种:

a. 直接串联式

这是最常见也是最简单的结构形式。例如差动变压器式绝压传感器,它工作时由真空膜盒感受压力 p 并变换成膜盒硬中心位移 W ,然后由差动变压器将位移 W 变换成电压 U 输出。其结构框图如图 1-1 所示。

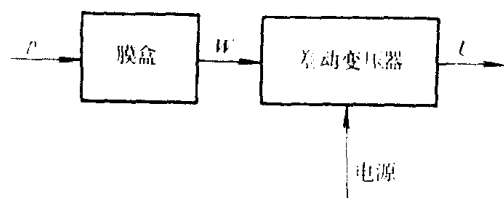


图 1-1 差动变压器式绝压传感器结构框图

b. 串并联式

微动同步器式真空速传感器就是采用串并联式,它分别由真空膜盒和开口膜盒感受静压 p_H 和动压 p_D ,并变换成相应膜盒硬中心的位移 W_H 和 W_D ,然后通过解算机构变换成与真空速成比例的轴的角位移 φ ,最后由微动同步器变换成输出电压 U 。其结构框图如图 1-2 所示。

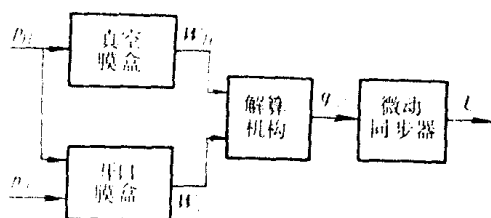


图 1-2 微动同步器式真空速传感器结构框图

c. 反馈式

反馈式传感器经常采用负反馈。例如压力平衡式表压传感器中,当波纹管感受到压力 p 后产生变

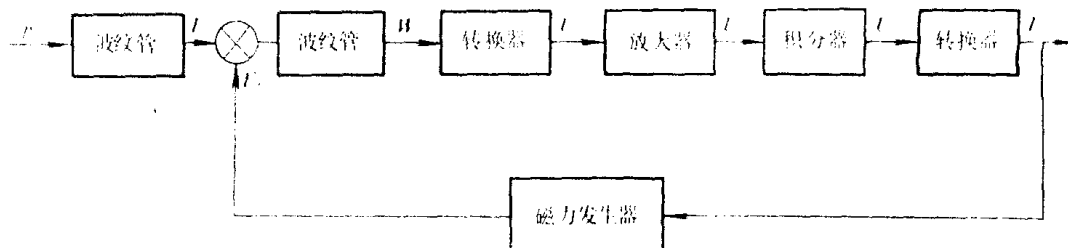


图 1-3 力平衡式表压传感器结构框图

形 W ,该变形经位移变换器变换成电压 U 并经过放大器放大,再通过积分器形成电压 U_i 作用于磁力发生器。该发生器所产生的力与作用于发生器上的电压 U_i 或流过它的电流 I_i 成比例,作为反馈力作用于波纹管上,与波纹管感受压力后所产生的集中力相抵消。当反馈力与所受的压力平衡时,波纹管的位移变成零,电压 U 亦变成零,作用于磁力发生器上作为传感器输出的电压 U 或通过它的电流 I_i 便为一定值,它与反馈力成比例,亦即与被测压力成比例。其结构框图如图 1-3 所示。

1.2.2.3 传感器的命名

国家标准 GB7666—87《传感器命名法及代号》中已对传感器的命名和代号作了明确规定,应作为统一传感器命名及代号的依据。

标准中规定传感器产品的名称应由主题词加四级修饰语构成:

主题词——传感器;

第一级修饰语——被测量,包括修饰被测量的定语;

第二级修饰语——转换原理,一般可后续以“式”字;

第三级修饰语——特征描述,指必须强调的传感器结构、性能、材料特征、敏感元件以及其他必要的特征,一般可后续以“型”字;

第四级修饰语——主要技术指标(量程、精确度、灵敏度等)。

在技术文件、产品样本、学术论文、教材及书刊的陈述句子中,作为产品名称应采用从第四级修饰语至主题词的顺序,例如:50mm 应变式位移传感器;0 至 350kPa 放大〔型〕应变〔计〕式绝压传感器等。

若要简化产品名称,则除第一级修饰语外,其他各级可根据具体情况任选或省略,例如:

“已购进 150 只各种测量范围的半导体压力传感器”;

“附加的测量范围只适用于差压传感器”等。