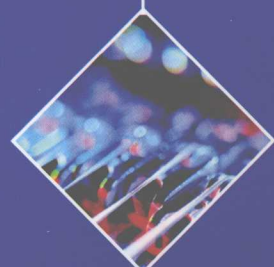
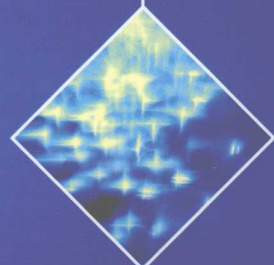


面向21世纪培养自主创新意识及创新人才高等工程教育适用教材

# 传感器设计基础

—— 课程设计与毕业设计指南

单成祥 牛彦文 张春 著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

面向 21 世纪培养自主创新意识及  
创新人才高等工程教育适用教材

# 传感器设计基础

## ——课程设计与毕业设计指南

单成祥 牛彦文 张春 著

国防工业出版社

北京市西城区百万庄南街 23 号 邮政编码 100044

电话 010-68412332

网址 www.gdpress.com.cn

开本 787×1092 1/16 印张 35.5 字数 213 千字

2007 年 9 月第 1 版 40.00 元

(本社如有印装质量问题, 我社负责调换)

· 北京 ·

发行电话: (010)68412332

发行传真: (010)68412332

## 内 容 简 介

本书是国防工业出版社出版发行的《传感器原理与应用》教材的姊妹篇,是专为“科研教学”型专业的“传感器课程设计”而撰写的。

全书共分10章:第0章为传感器的狭义和广义定义、传感器的一般组成与构成方法及发展历程;第1章~第3章为传感器设计的理论基础和传感器性能提高的技术基础、设计传感器的一般原则、设计内容和计算步骤;第4章~第9章为应变电阻式、电容式、电感式、磁电式、电涡流式、压电式经典传感器的一般设计方法及参数计算方法。

本书可作为测控技术及仪器、检测技术及仪器、精密仪器及机械、自动化仪表及自动控制等相关专业的“传感器课程设计”辅导教材,也可作为相关专业工程技术人员的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

传感器设计基础:课程设计与毕业设计指南/单成祥,  
牛彦文,张春著. —北京:国防工业出版社,2007.9

面向21世纪培养自主创新意识及创新人才高等工程  
教育适用教材

ISBN 978-7-118-05148-3

I. 传... II. ①单... ②牛... ③张... III. 传  
感器—高等学校—教材 IV. TP212

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第060557号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号 邮政编码100044)

新艺印刷厂印刷

新华书店经售

\*

开本 787×1092 1/16 印张 22¼ 字数 513千字

2007年9月第1版第1次印刷 印数 1—4000册 定价 40.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

# 前 言

在测控技术及仪器、检测技术及仪器、精密仪器及机械以及自动化仪表等相关专业新的教学计划中,将“传感器原理与设计”课程的作业全部改成在教师指导下由学生独立完成的课程设计。这无疑对学生的学习和将来的工作都起着积极作用,并能提高学生对教材的消化质量,有助于学生创新意识的培养和创新能力提高。

学生在学习基础课和专业基础课中,除接受理论知识外,为了巩固和消化理论内容,通常以课内、课外作业的方式来实现。众所周知,“作业”和“设计”是完全不同的两种内容和形式。由于学生长期以来习惯并熟悉于作业,而对“设计”尚全然无知,当学生着手进行课程设计时,常常无从下手,在选择、计算参数上或在题目的设计中,也常常碰到很多困难。为了解决学生在设计中的这一困难,需要写出特殊的“课程设计”指南,作为学生进行“传感器课程设计”的入门资料,以期引导学生掌握传感器的设计思路、设计内容、设计方法和设计步骤。

应该指出,虽然经典传感器的设计方法已较为成熟,但也并非一成不变,它与完成“作业”一样,每个人都有自己的解题思路和解题方法,因此,本书所述的设计方法,在设计中不一定非采用不可,相反地,希望学生能独立自主地分析课题所能使用的其他设计方法和计算方法,并将其运用到自己的设计中去,也建议采用不同的方法进行计算,加以比较后,来判断所得结果的正确性。

本书是在由本人编著的《传感器原理与应用》一书的基础上,为指导学生“传感器课程设计”而重新写作的,全部内容侧重于传感器的设计思路、设计内容、设计方法及设计步骤。

本书在编写过程中得到了燕山大学有关领导和国防工业出版社的支持。牛彦文(加拿大)、张春也参加了编著工作,王玉田、王珏教授主审了本书,同时参考了许多科研院所的文献资料,在此一并表示感谢。

限于作者学识水平,书中缺点、错误在所难免,敬请广大读者批评指正。

作者

2007年1月

# 目 录

## 第0章 绪 论

|                             |    |
|-----------------------------|----|
| 0.1 传感器的定义与组成 .....         | 1  |
| 0.1.1 传感器的狭义定义 .....        | 1  |
| 0.1.2 传感器的广义定义 .....        | 1  |
| 0.1.3 传感器的组成框图及各环节的作用 ..... | 1  |
| 0.2 传感器的构成方法及发展历程 .....     | 2  |
| 0.2.1 传感器的构成方法 .....        | 2  |
| 0.2.2 传感器的发展历程 .....        | 10 |

## 第1章 传感器设计的理论基础

|                             |    |
|-----------------------------|----|
| 1.1 传感器静态数学模型的建立方法 .....    | 13 |
| 1.2 确定传感器的静态数学模型及判别法则 ..... | 13 |
| 1.3 传感器的静态特性 .....          | 20 |
| 1.4 传感器的动态数学模型 .....        | 22 |
| 1.5 传感器的传递函数 .....          | 22 |
| 1.6 传感器的频率传递函数 .....        | 25 |
| 1.7 传感器的动态特性分析 .....        | 25 |
| 1.8 传递函数的计算步骤 .....         | 26 |
| 1.9 传递函数的应用 .....           | 26 |
| 1.10 常用传感器的频率响应特性 .....     | 26 |

## 第2章 传感器设计的技术基础

|                            |    |
|----------------------------|----|
| 2.1 合理选择传感器的结构、材料和参数 ..... | 30 |
| 2.2 采用差动技术 .....           | 30 |
| 2.3 采用补偿技术 .....           | 31 |
| 2.4 采用平均技术 .....           | 32 |
| 2.5 采用零示法、微差法与闭环技术 .....   | 33 |
| 2.6 采用屏蔽、隔离及抗干扰技术 .....    | 35 |
| 2.7 线性化技术措施 .....          | 36 |
| 2.7.1 线性化的数学原理 .....       | 36 |
| 2.7.2 硬件线性化方法 .....        | 37 |

|      |                                 |    |
|------|---------------------------------|----|
| 02   | 2.7.3 软件线性化方法 .....             | 38 |
| 2.8  | 温度补偿技术 .....                    | 41 |
| 02   | 2.8.1 公式法 .....                 | 41 |
| 10   | 2.8.2 表格法 .....                 | 41 |
| 2.9  | 传感器的标定与校准及互换性技术 .....           | 42 |
| 00   | 2.9.1 传感器的标定方法 .....            | 42 |
| 70   | 2.9.2 定期标准的方法 .....             | 43 |
| 70   | 2.9.3 工程使用的传感器的标定与校准方法 .....    | 43 |
| 07   | 2.9.4 标定、校准使用的基准 .....          | 43 |
| 28   | 2.9.5 标准(基准)量值的等级分级 .....       | 44 |
| 28   | 2.9.6 传感器标定的种类 .....            | 44 |
| 08   | 2.9.7 传感器的静态标定方法 .....          | 44 |
| 08   | 2.9.8 选定标准量的等级 .....            | 45 |
| 08   | 2.9.9 静态标定步骤 .....              | 45 |
| 101  | 2.9.10 传感器的动态标定方法 .....         | 45 |
| 2.10 | 设计动态指标的修正原理 .....               | 49 |
| 401  | 2.10.1 一阶传感器动态指标时间常数的修正原理 ..... | 49 |
| 701  | 2.10.2 二阶传感器动态指标的修正原理 .....     | 50 |

### 第3章 传感器设计的一般原则、内容及步骤

|     |                           |    |
|-----|---------------------------|----|
| 3.1 | 设计任务书及题目给出的已知参数 .....     | 51 |
| 3.2 | 传感器设计的一般内容及步骤 .....       | 51 |
| 211 | 3.2.1 设计方案的选择 .....       | 51 |
| 811 | 3.2.2 工作原理设计 .....        | 52 |
| 051 | 3.2.3 参数的计算与选择 .....      | 52 |
| 151 | 3.2.4 误差分析 .....          | 53 |
| 251 | 3.2.5 结构设计 .....          | 53 |
| 451 | 3.2.6 绘制机械结构图及电气原理图 ..... | 54 |
| 251 | 3.2.7 撰写传感器的设计论文 .....    | 54 |
| 751 | 3.2.8 提交图纸 .....          | 54 |
| 051 | 3.2.9 设计所用参考资料目录 .....    | 54 |
| 081 | 3.2.10 提交一份外译汉资料 .....    | 54 |

### 第4章 电阻应变式传感器的设计

|     |                       |    |
|-----|-----------------------|----|
| 4.1 | 电阻应变式传感器的组成原理框图 ..... | 55 |
| 4.2 | 测量原理设计 .....          | 55 |
| 4.3 | 常用弹性敏感元件的设计与计算 .....  | 56 |

|    |        |                         |     |
|----|--------|-------------------------|-----|
| 82 | 4.3.1  | 等截面梁的设计                 | 56  |
| 14 | 4.3.2  | 环形弹性元件的设计               | 59  |
| 14 | 4.3.3  | 平膜片的设计                  | 59  |
| 14 | 4.3.4  | 圆柱式弹性元件的设计              | 61  |
| 54 | 4.3.5  | 波纹管的设计                  | 64  |
| 54 | 4.3.6  | 扁环弹性元件的设计               | 66  |
| 64 | 4.3.7  | 圆环弹性元件的设计               | 67  |
|    | 4.4    | 设计弹性元件常用参数表             | 67  |
|    | 4.5    | 电阻应变式传感器的传感(转换)元件应变片的设计 | 79  |
|    | 4.6    | 电阻应变式传感器测量电路的设计         | 85  |
| 14 | 4.6.1  | 测量电路的作用                 | 85  |
| 14 | 4.6.2  | 电桥测量电路                  | 86  |
| 24 | 4.6.3  | 直流电桥工作分析                | 86  |
| 24 | 4.6.4  | 多个臂同时工作的电桥输出分析          | 89  |
| 24 | 4.6.5  | 交流电桥                    | 101 |
|    | 4.7    | 电阻应变式传感器设计方法举例          | 103 |
| 94 | 4.7.1  | 电阻应变式称重传感器的设计           | 104 |
| 02 | 4.7.2  | 电阻应变式扭矩传感器的设计           | 107 |
|    | 4.8    | 电阻应变式传感器的结构设计           | 110 |
|    | 4.8.1  | 电阻应变式测力与称重传感器的结构设计      | 111 |
| 12 | 4.8.2  | 柱式(筒式)传感器的结构设计          | 113 |
| 12 | 4.8.3  | 轮辐式弹性元件的结构设计            | 113 |
| 12 | 4.8.4  | 剪切梁式弹性元件的结构设计           | 115 |
| 52 | 4.8.5  | S型双连孔测力传感器弹性元件的结构设计     | 118 |
| 52 | 4.8.6  | 柱环式传感器的结构设计             | 120 |
| 62 | 4.8.7  | 应变薄壁圆筒式压力传感器的结构设计       | 121 |
| 62 | 4.8.8  | 膜片式应变压力传感器的结构设计         | 123 |
| 12 | 4.8.9  | 应变梁式压力传感器的结构设计          | 124 |
| 12 | 4.8.10 | 应变式扭矩传感器的结构设计           | 125 |
| 12 | 4.8.11 | 多个传感器的组合与输出             | 127 |
| 12 | 4.8.12 | 多个传感器组合的误差计算            | 129 |
| 12 | 4.8.13 | 应变式测压传感器动态误差的估算         | 130 |

## 第5章 电容式传感器的设计

|  |     |             |     |
|--|-----|-------------|-----|
|  | 5.1 | 电容式传感器的应用特点 | 131 |
|  | 5.2 | 电容式传感器的应用范围 | 131 |
|  | 5.3 | 电容式传感器的组成框图 | 131 |

|       |                     |     |
|-------|---------------------|-----|
| 5.4   | 电容式传感器的原理设计         | 132 |
| 5.4.1 | 电容式传感器的基础原理         | 132 |
| 5.4.2 | 电容式传感器的工作方式及特性分析    | 132 |
| 5.4.3 | 常用电容式传感器的灵敏度和线性度    | 138 |
| 5.5   | 电容式传感器的结构设计         | 145 |
| 5.5.1 | 电容式传感器的结构设计原则       | 145 |
| 5.5.2 | 电容式传感器的典型结构         | 146 |
| 5.6   | 电容式传感器结构的稳定性设计      | 151 |
| 5.6.1 | 温度对结构尺寸参数的影响及补偿措施   | 151 |
| 5.6.2 | 温度对介电常数的影响及补偿       | 152 |
| 5.6.3 | 结构设计中边缘效应的消除        | 153 |
| 5.6.4 | 结构设计中的绝缘措施          | 154 |
| 5.6.5 | 寄生电容的干扰及消除          | 154 |
| 5.7   | 结构设计实例              | 156 |
| 5.8   | 电容式传感器的参数计算         | 158 |
| 5.8.1 | 电容式传感器初始电容量的计算      | 158 |
| 5.8.2 | 平行板电容器介质厚度(极板间距)的确定 | 159 |
| 5.8.3 | 电容式传感器极板面积的确定       | 160 |
| 5.8.4 | 电容式传感器极板厚度的确定       | 160 |
| 5.8.5 | 电极金属材料选择的原则         | 161 |
| 5.8.6 | 电容式传感器的热计算          | 161 |
| 5.9   | 电容式传感器测量电路的设计       | 165 |
| 5.9.1 | 调幅电路                | 166 |
| 5.9.2 | 调频电路                | 173 |
| 5.9.3 | 脉冲调宽电路              | 173 |
| 5.9.4 | 电容式传感器测量电路参数计算      | 176 |

## 第 6 章 电感式传感器的设计

|       |                         |     |
|-------|-------------------------|-----|
| 6.1   | 电感式传感器可转换非电量的种类及使用特点    | 178 |
| 6.2   | 电感式传感器的分类               | 178 |
| 6.3   | 电感式传感器的组成               | 178 |
| 6.4   | 电感式传感器常用的结构形式           | 179 |
| 6.5   | 电感式传感器的工作原理及各种结构形式的主要特性 | 180 |
| 6.5.1 | 电感式传感器的工作原理             | 180 |
| 6.5.2 | 电感式传感器的数学模型             | 181 |
| 6.5.3 | 电感式传感器的工作方式及特性分析        | 181 |
| 6.5.4 | 变间隙式电感传感器的特性分析          | 182 |

|                      |                     |     |
|----------------------|---------------------|-----|
| 6.5.5                | 变面积式电感传感器的特性分析      | 184 |
| 6.5.6                | 螺线管式电感传感器           | 184 |
| 6.5.7                | 三种工作方式的比较           | 188 |
| 6.5.8                | 差动式电感传感器            | 188 |
| 6.5.9                | 螺管差动式电感传感器的数学模型     | 191 |
| 6.6                  | 互感式电感传感器            | 192 |
| 6.6.1                | 工作原理定性分析            | 193 |
| 6.6.2                | 差动变压器的数学模型及特性分析     | 193 |
| 6.6.3                | 螺管式差动变压器的数学模型及特性分析  | 195 |
| 6.7                  | 电感变换元件的设计           | 200 |
| 6.7.1                | 电感变换元件的等效电路         | 200 |
| 6.7.2                | 电感变换元件的阻抗计算         | 203 |
| 6.7.3                | 计算不同结构时电感值的计算公式     | 204 |
| 6.7.4                | 闭磁路电感式传感器的设计        | 204 |
| 6.8                  | 电感式传感器测量电路的设计       | 208 |
| 6.8.1                | 交流分压电路              | 208 |
| 6.8.2                | 交流电桥测量电路            | 208 |
| 6.8.3                | 振荡电路                | 211 |
| 6.9                  | 电感式传感器的设计           | 213 |
| 6.9.1                | 电感式传感器的设计原则         | 213 |
| 6.9.2                | 线圈的设计与计算            | 214 |
| 6.10                 | 螺管式差动变压器的设计         | 218 |
| 6.10.1               | 简单变压器的工作原理          | 218 |
| 6.10.2               | 差动变压器的工作原理          | 219 |
| 6.10.3               | 螺管型差动变压器的结构设计       | 219 |
| 6.10.4               | 螺管型差动变压器的参数计算       | 220 |
| 6.10.5               | 差动变压器的误差            | 225 |
| 6.11                 | 电感式传感器和差动变压器的工程设计方法 | 228 |
| 6.11.1               | 设计步骤                | 228 |
| 6.11.2               | 设计举例                | 232 |
| 6.11.3               | 测量电路的设计             | 236 |
| <b>第7章 磁电式传感器的设计</b> |                     |     |
| 7.1                  | 磁电式传感器转换的主要非电量      | 239 |
| 7.2                  | 磁电式传感器的工作原理         | 239 |
| 7.3                  | 磁电式传感器的结构设计         | 240 |
| 7.4                  | 磁电式传感器的一般设计原则       | 242 |

|                         |                   |     |
|-------------------------|-------------------|-----|
| 7.4.1                   | 磁电式传感器总的设计原则和出发点  | 242 |
| 7.4.2                   | 磁电式传感器的设计技术指标     | 245 |
| 7.4.3                   | 磁电式传感器的设计、计算内容    | 245 |
| 7.4.4                   | 磁电式传感器的设计步骤       | 246 |
| 7.5                     | 磁电式传感器的误差         | 264 |
| 7.5.1                   | 电流灵敏度和电压灵敏度及其误差   | 264 |
| 7.5.2                   | 温度误差              | 265 |
| 7.5.3                   | 永磁材料的稳定性误差        | 267 |
| 7.5.4                   | 非线性误差             | 267 |
| 7.6                     | 磁电式传感器的测量电路设计     | 268 |
| 7.6.1                   | 测量电路组成框图          | 268 |
| 7.6.2                   | 积分测量电路            | 269 |
| 7.6.3                   | 微分测量电路            | 272 |
| 7.7                     | 磁电式传感器的设计举例       | 273 |
| <b>第 8 章 电涡流式传感器的设计</b> |                   |     |
| 8.1                     | 电涡流式传感器的非电量变换及特点  | 290 |
| 8.1.1                   | 电涡流式传感器变换的非电量     | 290 |
| 8.1.2                   | 电涡流式传感器的性能特点      | 290 |
| 8.2                     | 电涡流式传感器的工作原理      | 290 |
| 8.2.1                   | 一般工作原理            | 290 |
| 8.2.2                   | 等效电路              | 291 |
| 8.3                     | 电涡流式传感器的设计内容      | 294 |
| 8.3.1                   | 单匝线圈在轴线上的磁感应强度    | 294 |
| 8.3.2                   | 工作线圈的设计           | 294 |
| 8.3.3                   | 电涡流的径向形成范围        | 296 |
| 8.3.4                   | 电涡流的贯穿深度          | 297 |
| 8.3.5                   | 线圈阻抗的计算           | 298 |
| 8.3.6                   | 线圈结构的设计           | 300 |
| 8.3.7                   | 电源频率的确定           | 300 |
| 8.3.8                   | 电涡流电阻值的计算         | 301 |
| 8.3.9                   | 电涡流式传感器的典型应用及应用特点 | 302 |
| 8.3.10                  | CZF-1 型传感器的性能     | 302 |
| 8.4                     | 电涡流式传感器的测量电路设计    | 302 |
| 8.4.1                   | 交流电桥电路设计          | 303 |
| 8.4.2                   | 谐振电路设计            | 304 |

## 第9章 压电式传感器的设计

|       |                       |     |
|-------|-----------------------|-----|
| 9.1   | 压电效应                  | 308 |
| 9.1.1 | 正压电效应                 | 308 |
| 9.1.2 | 逆压电效应                 | 308 |
| 9.2   | 压电式传感器的工作原理           | 308 |
| 9.2.1 | 石英晶体表面电荷、晶面电压、晶面电容的计算 | 310 |
| 9.2.2 | 压电陶瓷的压电常数和表面电荷的计算     | 310 |
| 9.2.3 | 常用压电元件的物理性能           | 312 |
| 9.3   | 压电元件结构形式的确定           | 314 |
| 9.3.1 | 并联结构                  | 314 |
| 9.3.2 | 串联结构                  | 314 |
| 9.4   | 压电式传感器的等效电路           | 315 |
| 9.5   | 压电式传感器的测量电路           | 317 |
| 9.5.1 | 压电式传感器对测量电路的要求        | 317 |
| 9.5.2 | 压电式传感器测量电路的类型         | 320 |
| 9.5.3 | 电荷放大器的设计要点            | 326 |
| 9.5.4 | 差动式电荷放大器              | 327 |
| 9.6   | 压电式力传感器的设计            | 328 |
| 9.6.1 | 压电式力传感器压电元件的选择        | 328 |
| 9.6.2 | 压电式力传感器的工作原理设计        | 328 |
| 9.6.3 | 压电式力传感器的分类及结构设计       | 329 |
| 9.6.4 | 压电式力传感器的主要性能指标        | 332 |
| 9.6.5 | 压电式力传感器的设计要点          | 332 |
| 9.7   | 压电式压力传感器的结构形式与技术指标    | 334 |
| 9.7.1 | 压电式压力传感器的结构形式         | 334 |
| 9.7.2 | 压电式压力传感器的主要技术指标       | 337 |
| 9.8   | 压电式压力传感器的设计计算         | 338 |
| 9.8.1 | 机械强度的设计计算             | 338 |
| 9.8.2 | 灵敏度的设计计算              | 339 |
| 9.8.3 | 绝缘电阻的选择               | 340 |
| 9.8.4 | 谐振频率的设计               | 340 |
| 9.8.5 | 压电式压力传感器的非线性          | 341 |
| 9.8.6 | 弹性元件材料的选择             | 343 |
|       | 参考文献                  | 345 |

# 第 0 章 绪 论

## 0.1 传感器的定义与组成

### 0.1.1 传感器的狭义定义

在当今电子时代,传感器的定义是指将被测某种非电量转换成与之有确定关系的电量输出的器件,如图 0-1 所示。

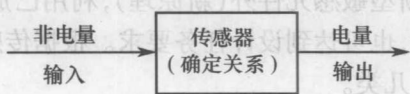


图 0-1 传感器狭义定义

### 0.1.2 传感器的广义定义

随着时代的发展(如光子时代),传感器的定义应该是:从一个系统中接收功率,通常以另一种形式的功率送到另一个系统中去的器件,如图 0-2 所示。

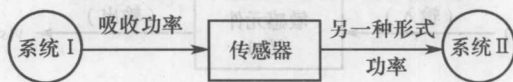


图 0-2 传感器广义定义

### 0.1.3 传感器的组成框图及各环节的作用

根据传感器的定义,它的基本功能是将各种非电量转换为与之有确定关系的电量或功率,传感器的这种转换一般是利用物理的、化学的、生物的某种效应或原理,按照一定自然规律进行转换的。根据转换原理的不同,传感器的组成有所差异,但是传感器一般由敏感元件、传感(转换)元件、测量电路及辅助电源四部分组成。各组成环节(元件)的作用如图 0-3 所示。

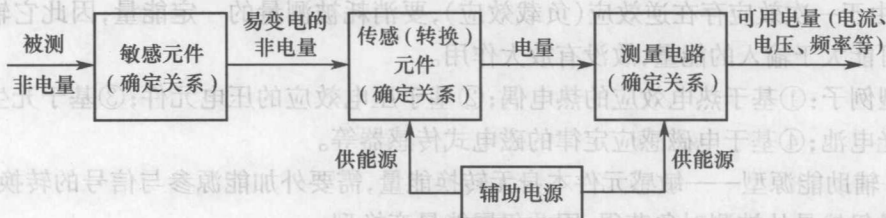


图 0-3 传感器的组成框图

## 0.2 传感器的构成方法及发展历程

### 0.2.1 传感器的构成方法

#### 1. 传感器的构成原则

- (1) 能满足被测非电量的获取和转换的需要,即根据设计任务来确定传感器的结构。
- (2) 能消除被测参数以外的干扰量,即保证一定检测精度要求。
- (3) 保证工作稳定、可靠的简单结构。
- (4) 易于实现。

#### 2. 传感器的构成方法

传感器的基本功能是:①获取所需信息;②转换所需信息。根据被测信号种类不同以及不同精度的要求,除研制新型敏感元件外(新原理),利用已成熟的敏感元件、传感元件及测量电路采用不同的组合,也可达到设计任务要求。根据传感器的各种不同组成,可将传感器的构成方法分为以下几类。

##### 1) 基本型

基本型为只用敏感元件构成的传感器,分为能量变换型、辅助能源型、能量控制型三种。

(1) 能量变换型——只有敏感元件构成的一种简单形式的传感器,输入是被测非电量,输出是电压或电流,如图 0-4 所示。

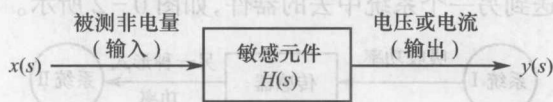


图 0-4 能量变换型传感器

传递函数为

$$H(s) = \frac{y(s)}{x(s)} \quad (0-1)$$

这种传感器的特点:

- ① 传感器从被测对象中获取能量,不需外加电源供给转换能量。
- ② 敏感元件本身就是能量转换元件,故称能量转换型。
- ③ 它的能量转换是利用热平衡或传输现象中的一次效应完成的。
- ④ 由于一次效应存在逆效应(负载效应),要消耗被测量的一定能量,因此它输出的能量不可能大于输入的能量,故没有放大作用。

典型例子:①基于热电效应的热电偶;②基于压电效应的压电元件;③基于光生伏特效应的光电池;④基于电磁感应定律的磁电式传感器等。

(2) 辅助能源型——敏感元件本身无转换能量,需要外加能源参与信号的转换,但输出的能量仍然是从被测对象获得,因此仍属能量变换型。

辅助能源的作用:

- ① 变非电量为电量。
- ② 增强抗干扰能力和工作的稳定性。

辅助能源种类:

- ① 电源:如光敏二极管等。
- ② 磁能:永磁体等,如磁电式、霍耳式等传感器。其构成框图如图 0-5 所示。

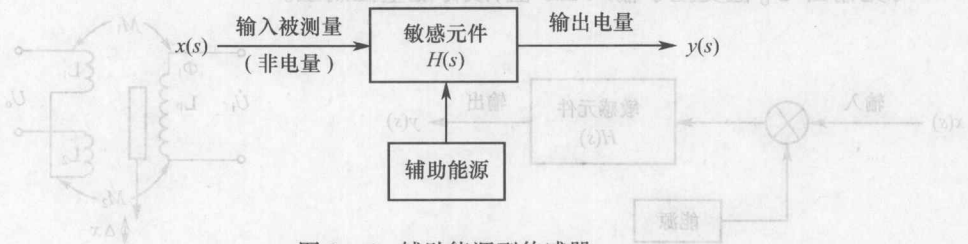


图 0-5 辅助能源型传感器

传递函数为

$$H(s) = \frac{y(s)}{x(s)} \quad (0-2)$$

例如:光敏电阻工作时需外加电源,才能获得光敏电流的输出,其大小受光强度控制。由光敏电阻的光照特性有下式成立:

$$I_{\Phi} = c \cdot U^{\alpha} \cdot \Phi^{\beta} \quad (0-3)$$

式中  $I_{\Phi}$ ——光电流;  
 $U$ ——外加直流电压;  
 $\Phi$ ——入射光通量;  
 $c$ ——系数;

$\alpha, \beta$ ——指数常数,通常  $\beta < 1$ 。

若  $c, U, \alpha, \beta$  已确定,则光电流为入射光通量的单值函数,即

$$I_{\Phi} = f(\Phi) \Big|_{c, U, \alpha, \beta = \text{常数}} \quad (0-4)$$

也就是光电流的大小由光通量决定(输出光电流的大小受输入光强度控制)。

(3) 能量控制型——传感器也只有敏感元件构成,但需加外加能源才能将被测非电量转换为电量输出。

典型例子:变压器式位移传感器、感应同步器、离子敏场效应管等。其构成框图如图 0-6 所示。

传递函数为

$$H(s) = \frac{y(s)}{x(s)} \quad (0-5)$$

例如:差动变压器式螺线管传感器如图 0-7 所示。

工作原理:当有位移  $\Delta x$  变化时,将使互感  $M_1$  和  $M_2$  变化,即  $\Delta M = M_1 - M_2$  发生变化,使输出  $U_o$  变化。即

$$U_o = \frac{\omega(M_1 - M_2)\dot{U}_i}{\sqrt{R_p^2 + (\omega L_p)^2}} = \frac{\omega\Delta M\dot{U}_i}{\sqrt{R_p^2 + (\omega L_p)^2}} = f(\Delta M) = f(\Delta x) \Big|_{\omega, \dot{U}_i, R_p, L_p = \text{常数}} \quad (0-6)$$

可见输出  $U_o$  值受控于输入  $\Delta x$  值,故称能量控制型。

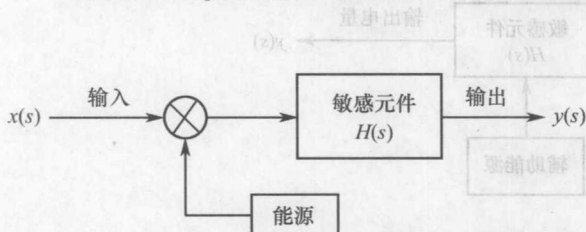


图 0-6 能量控制型传感器

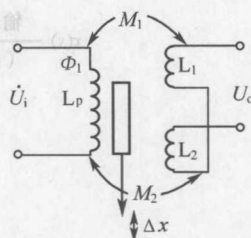


图 0-7 差动变压器式螺线管传感器

## 2) 电路参数型

此类传感器由敏感元件和包括敏感元件在内的转换电路组成。其构成框图如图 0-8 所示。

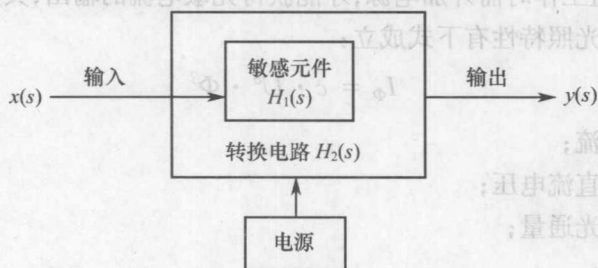


图 0-8 电路参数型传感器

其输出量为

$$y(s) = f[H_1(s), H_2(s)] \cdot x(s) \quad (0-7)$$

特点:

- ① 敏感元件  $H_1(s)$  对输入非电量进行阻抗变换。
- ② 电源向包括敏感元件在内的转换电路供给能源,从而输出电压或电流,因此属能量控制型(调制型)。
- ③ 输出能量大于输入能量,有放大作用。

典型例子:利用热平衡和传输现象的二次效应传感器,如电阻应变式、电涡流式、电感式、电容式、湿敏电阻、光敏电阻、热敏电阻等。

例如:差动电感式传感器,其构成框图如图 0-9 所示。

由理论分析可知,由于

$$H_1(s) = \frac{\Delta L}{\Delta \delta} = \frac{2L_0}{\delta_0}, \quad H_2(s) = \frac{\Delta U}{\Delta L} = \frac{U}{2L_0}$$

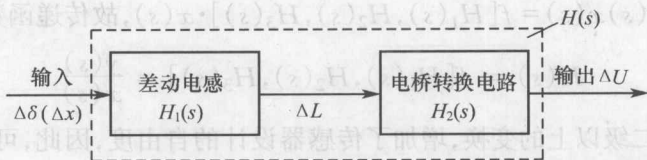


图 0-9 差动电感式传感器

所以

$$H(s) = H_1(s) \cdot H_2(s) = \frac{\dot{U}}{\delta_0} = \frac{\Delta \dot{U}}{\Delta \delta}$$

$$\Delta \dot{U} = \frac{\dot{U}}{\delta_0} \cdot \Delta \delta = f(\Delta \delta) \Big|_{\dot{U}, \delta_0 = \text{常数}} \quad (0-8)$$

故  $\Delta \dot{U} = f(\Delta \delta) = f_1(\Delta x)$  受控于输入量  $\Delta x$ 。

### 3) 多级变换型

此类传感器由敏感元件和转换元件(有时需用转换电路)构成。

(1) 敏感元件:有些非电量不能一次转换成电量,需先通过敏感元件将其转换成容易变成电量的非电量(易变电非量),也称中间变量。

(2) 转换元件:将中间变量转换成电量。

(3) 转换电路(测量电路):将转换元件输出的电量(电参数)转换为可用电量(电压、电流、频率等)。

结构图如图 0-10 和图 0-11 所示。



图 0-10 无转换电路

因  $y(s) = [H(s) = H_1(s) \cdot H_2(s)] \cdot x(s)$ , 故传递函数为

$$H(s) = H_1(s) \cdot H_2(s) = \frac{y(s)}{x(s)}$$

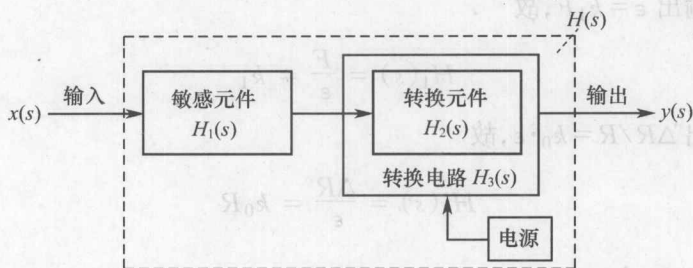


图 0-11 有转换电路

因  $y(s) = H(s)x(s) = f[H_1(s), H_2(s), H_3(s)] \cdot x(s)$ , 故传递函数为

$$H(s) = f[H_1(s), H_2(s), H_3(s)] = \frac{y(s)}{x(s)} \quad (0-9)$$

这种二级和二级以上的变换,增加了传感器设计的自由度,因此,可以设计出适用于各种工作条件的测量各种非电量参数的传感器。

例如:利用弹性元件作为力和压力的敏感元件,先转换为应力和应变,然后通过电桥输出电压信号,就能测量出压电元件所不能测出的小压力(表 0-1)。

表 0-1 可以利用的中间变换物理量

| 中间变换量 | 被测量                      | 转换元件            |
|-------|--------------------------|-----------------|
| 位移    | 力、压力、热、加速度、扭矩、温度、流速、湿度等  | 应变片、电感、电容、霍耳等元件 |
| 光量    | 位移、转数、浓度、气体成分、湿度、射线、维生素等 | 光电器件            |
| 热     | 温度、真空度、流速等               | 热电偶、热敏电阻        |
| 复合物   | 葡萄糖、胆固醇等                 | 电化学器件(如各类电极)    |

多级变换型可分:①能量变换型,如压电式传感器等;②能量控制型,如应变式力传感器、电容式、霍耳式等。

例 1 利用压电效应将力直接转换为电荷量(图 0-12)。

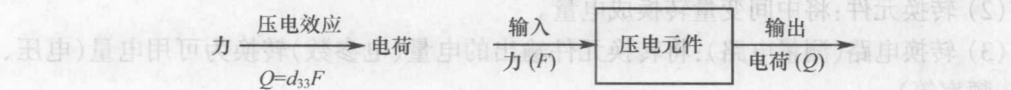


图 0-12 能量变换型

例 2 应变式力传感器如图 0-13 所示。

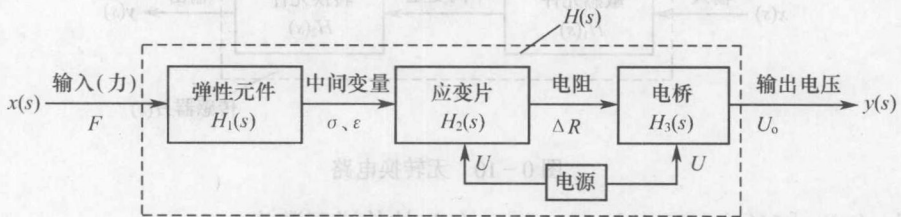


图 0-13 应变式力传感器(能量控制型)

弹性元件输出  $\epsilon = k_1 F$ , 故

$$H_1(s) = \frac{F}{\epsilon} = k_1$$

应变片输出  $\Delta R/R = k_0 \cdot \epsilon$ , 故

$$H_2(s) = \frac{\Delta R}{\epsilon} = k_0 R$$

电桥输出  $U_o = \frac{U \Delta R}{4 R}$ , 故