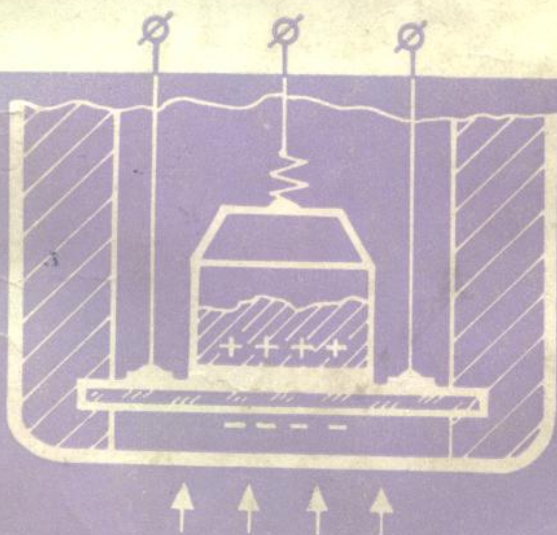


# 物理量传感器

[苏]Л.А. 奥西波维奇 著

刘兴堂 译



国防工业出版社

73.274  
761

# 物理量传感器

〔苏〕Л. А. 奥西波维奇 著

刘兴堂 译

国防工业出版社

D403/26

## 内 容 简 介

本书系统、扼要地讲述了广泛应用于测量技术(包括精密动、静态测量)、自动控制系统、农业物理技术(如土壤压力测量)、医疗卫生(如人体和动物血压测量,食道、肠胃内部温度测量)、航空、航海(如海洋深水温度遥控测量,气流速度头、空气流量、环境温度、振动参数测量等)等方面的小型物理量传感器的工作原理、设计原则、设计计算及结构特点,作者根据自己的工作经验和有关的最新资料为读者提供了上述物理量传感器中某些典型元件的具体制造工艺、典型连接线路及测量误差的补偿方法,并给出了目前生产的传感器和各类敏感元件(如压阻半导体式、热敏电阻式、电容式、压电式、电磁式和弦丝式敏感元件等)尤其是新型弹性敏感元件和霍尔敏感元件的手册性资料。本书还列举了有关特种合金、非金属材料 and 新型整体连接(钎焊、凸焊等)方面的资料,在最后附录中专门阐述了传感器设计、使用中所关心的问题,即传感器的灵敏度和动态特性(频率特性)计算方法。所有这些资料对于传感器的设计、制造及使用都很有借鉴价值。

本书既适用于从事设计原始信息变换装置和各工业部门工艺过程自动化的工程技术人员,也适于中等专科学校和高等院校系统控制及测量技术专业师生参考。

ДАТЧИКИ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Л. А. ОСИПОВИЧ

Москва «Машиностроение» 1979

\*

### 物理量传感器

[苏]Л. А. 奥西波维奇 著

刘兴堂 译

\*

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

\*

787×1092 1/32 印张6 126千字

1984年11月第一版 1984年11月第一次印刷 印数: 0,001— 4,900册

统一书号: 15034·2700 定价: 0.64元

## 译者的话

众所周知，传感器是测量装置和控制系统的主要元件之一，在很大程度上决定着参数的测量精度和整个系统的可靠性。它被广泛地应用在航空航海、生物医学、交通运输、农业科学和工业生产等方面。随着科学技术的发展，系统自动化和科学实验对于各类传感器的依赖性将越来越大。因此，设计和制造各种用途的高性能传感器已成为测量技术和控制技术中的迫切任务，而传感器的小型化更是传感器发展中的重要课题。

虽然传感器应用相当广泛，发展又十分迅速，以致于世界上一些科学先进的国家成批生产了系列化的传感器，但是有关传感器的系统设计，尤其是它的小型化结构设计的专著或文献至今并不多。就此而言，本书确有一定补缺作用。

本书扼要、系统地介绍了各类物理量传感器的设计思想、使用性能、结构特点和计算方法，还介绍了新型弹性敏感元件的特性，推荐了某些典型元件的具体制造工艺和连接线路，列举了有关特种合金、非金属材料 and 新型整体连接（镅合金钎焊、凸焊等）方面的手册性资料。

本书的主要对象虽然是从事传感器设计和制造的工程技术人员，但是对于传感器的使用人员正确选择和应用各类传感器也颇有帮助。本书亦可作为中等专科学校和高等院校系统控制和测量技术专业师生的重要参考书。

在翻译此书过程中，得到了许多同志的热情赞助，尤其

是凌志勤、朱宗传和申庞海同志对本书做了精心审校和其它大量工作，这里顺致衷心感谢。由于本人专业知识浅薄又缺乏翻译经验，译文中难免有错误和不足之处，敬请读者指正。

译者

# 目 录

## 绪论

1. 关于传感器的定义和分类.....1
2. 传感器的通性.....2
3. 对传感器的基本要求.....7
4. 可靠性和小型化问题.....8

## 第一章 传感器的弹性元件.....13

1. 弹性元件的主要特性和结构型式.....13
2. 有边波纹的罩式平膜片计算.....26
3. 应变梁端部与膜片中心的连接.....29
4. 膜片与传感器壳体之间的温度梯度对灵敏度的影响.....32
5. 膜片式弹性元件的压力传递滞后.....38
6. 新型弹性元件的制造工艺问题.....40

## 第二章 传感器的敏感元件.....47

1. 传感器敏感元件的主要型式.....47
2. 半导体应变式敏感元件.....48
3. 电磁式敏感元件.....73
4. 压电式敏感元件.....84
5. 电容式敏感元件.....89
6. 温度敏感元件.....100

## 第三章 压力传感器.....113

1. 半导体应变式传感器.....113
2. 电磁式传感器.....126
3. 电容式传感器.....129

|                                               |            |
|-----------------------------------------------|------------|
| 4. 弦丝式传感器 .....                               | 133        |
| <b>第四章 振动参数传感器 .....</b>                      | <b>139</b> |
| 1. 小型精密压电式振动加速度传感器 .....                      | 139        |
| 2. 减小横向寄生灵敏度的途径及转动灵敏度的测量方法 .....              | 142        |
| <b>第五章 气体流量计传感器 .....</b>                     | <b>147</b> |
| 1. 半导体应变式传感器 .....                            | 147        |
| 2. 半导体电磁式传感器 .....                            | 152        |
| 3. 有线性特性的速度头流量计 .....                         | 153        |
| <b>第六章 温度传感器 .....</b>                        | <b>156</b> |
| 1. 有金属丝敏感元件的温度传感器 .....                       | 156        |
| 2. 单晶锗型温度传感器 .....                            | 157        |
| 3. 温度传感器的新型结构元件——镓合金（金属胶） .....               | 158        |
| 4. 温度传感器的动态特性 .....                           | 162        |
| <b>附录 I 平膜片半导体压力传感器的灵敏度和频率<br/>特性计算 .....</b> | <b>167</b> |
| <b>附录 II 半导体流量传感器的灵敏度计算方法 .....</b>           | <b>177</b> |
| <b>参考资料 .....</b>                             | <b>181</b> |

# 绪 论

## 1. 关于传感器的定义和分类

大多数研究者把这样一种专用装置视为传感器，即将物理过程的一种能量形式转换为另一种能量形式（通常是电能）的专用装置。P. 斯泰西<sup>[90]</sup>，E. B. 巴勃斯基<sup>[7]</sup>认为传感器就是变换器，而且P. 斯泰西把没有中间变换而直接由测量参数转换成电信号的传感器叫做初级变换器。

按照Д. H. 梅尼茨基<sup>[40]</sup>和A. M. 图利钦<sup>[95]</sup>的观点，凡是用来测量非电量的电路部件都属于传感器范畴。

K. 迈申<sup>[45]</sup>把一种形式的量变换为另一种形式等效量的装置叫做传感器。

Ю. И. 约利什<sup>[27]</sup>把电动远距测量装置的传感器划分成两类，即发生器式和参数式传感器。Ч. С. 德列别尔<sup>[21]</sup>认为传感器就是测量系统输入处的变换器（传递环节），且按照能源可分为无源变换器和有源变换器。

无源变换器接受与任何一个系统能量有关的信号，并通过与这个能量（因为变换器内部耗损，该能量会减少）有关的自身输出把输入信号传输给第二个系统。

在英文技术书籍中，把这类变换器称作“换能器”。

有源变换器将获得来自能源系统的补充能量。这种能量又经过接收系统的输出端发送出去，且输出随着输入改变而变化。

按照这种分类，发生器式变换器（传感器）属于无源变

8510197

换器；而参数式变换器（传感器）为有源变换器。

但是，对于测量系统及其器件——传感器，主要的是以最小误差进行信息传递，而能量脉冲仅是信息载波。

如同电子测量仪器和所有传感器一样，物理量传感器的分类有很多困难之处。实际上，要使信息测量系统中名目繁多的物理量传感器具有统一的分类范围也是不可能的。

传感器按其主要标志——用途、使用特性、测量参数类型等进行分类是最合理的<sup>[27]</sup>。

△ 传感器的确切定义如下：直接置于测量对象中并能将被测量（控制）参数变换成便于在通道间传输和进一步变换的一个或多个变换器的结构总体称为信息测量系统（全套系统）的传感器。

## 2. 传感器的通性

将被测参数变换成电信号的物理量传感器应用了 Б. С. 索兹果夫<sup>[89]</sup>，Ч. С. 德列别尔<sup>[21]</sup>，А. М. 图利钦<sup>[85]</sup>，Д. И. 阿盖金<sup>[1]</sup>，Ю. И. 约利希<sup>[27]</sup>，Л. А. 奥斯特洛夫斯基<sup>[78]</sup>等人基础著作中讲述的理论。下面概括性地给出表征物理量传感器通性的某些定义：

各种不同的物理量（压力、温度、振动、核辐射、电磁场等）可能同时作用于传感器，但是传感器应该只感受某一种所谓的自然被测量  $A$ 。

在静态条件下，传感器输出量  $B$  与自然被测量  $A$  的函数关系称为传感器的“静态特性”。它可以用解析式、表格或图形表示。

静态灵敏度是指静态条件下输出量的微小增量与相应输入量的微小增量之比。按照这个定义，静态灵敏度为  $S =$

$\frac{\Delta B}{\Delta A}$ ，或者转换成极限则有，

$$S = \frac{dB}{dA} \quad (1)$$

当输出量（输出信号）是输入量（输入信号）的线性函数时，这个比值为常数。若是非线性函数，则应该指明是灵敏度的哪些点。在某些情况下，灵敏度可以表示成静态非线性特性曲线上两个特征点间的折线斜率形式。

静态灵敏度的概念类似于放大系数、梯度、灵敏度系数的概念。

传感器灵敏度随输入量与输出量性质的不同通常可以是各种量纲的有名量。如，血压传感器灵敏度的量纲为微伏/毫米汞柱等。

灵敏度概念可以推广到动态工作条件下。这时，灵敏度是指输出信号变化速度与相应输入信号变化速度的比值。

$$S_n = \frac{dB/dt}{dA/dt} \quad (2)$$

在周期信号，尤其是正弦信号情况下，灵敏度可表示为输出量与输入量的幅值比。

引起输出信号变化的被测量（输入信号）的最小变化值称为传感器的“灵敏限”。传感器的全量程是传感器品质的最大特性指标，它可以表示为比值

$$D_n = \frac{X_n}{\Delta_0} \quad (3)$$

式中  $X_n$ ——测量的自然极限；

$\Delta_0$ ——传感器的灵敏限。

实际上，每类传感器都存在着比值  $D_n$  实际达到的极限值，它可由传感器工作原理和敏感元件特性来确定。

增大和减小输入量时, 传感器静态特性正反行程的不一致性叫做迟滞。

弹性元件(膜片、波纹管、弹簧等)的迟滞也包含着弹性后效的概念。

一般情况下, 因为迟滞大小不仅取决于输入量大小, 而且还取决于传感器工作的时间特性。因此, 它属于随机误差。迟滞可用百分比表示:

$$\delta_r = \frac{\Delta B_r}{B_{\max} - B_{\min}} 100\% \quad (4)$$

式中  $B_{\max} - B_{\min}$  ——传感器输出量极限值之差。

传感器的迟滞是由于弹性元件的内摩擦, 活动元件之间的摩擦、蠕变(如在粘贴应变式传感器中)、磁滞等产生的。

输出信号的有效值与输入参数实际值相应的输出量之间的最大差值  $\delta_s$  是传感器的主要误差。这个差值按照正常条件下传感器的静态特性来确定, 且通常与输出量极限值之差有关:

$$\delta = \frac{\delta_s}{B_{\max} - B_{\min}} 100\% \quad (5)$$

传感器的正常使用条件是: 环境温度  $+25 \pm 10^\circ\text{C}$ ; 大气压  $10^5 \pm 40000$  帕 ( $750 \pm 30$  毫米汞柱); 周围大气相对湿度  $65 \pm 15\%$ ; 无振动和除万有引力场外的其它物理场。

同上述正常环境条件相比较, 由于外界条件变化而引起的一些误差为传感器的附加误差。它们可分别以非被测参数变化的百分比来表示(如: 每变化  $5^\circ\text{C}$  的温度误差为  $1\%$ , 每变化 5 奥斯特的磁场误差为  $0.5\%$  等)。

传感器参数与计算值之偏差称为传感器的“原始误差”:

$$\delta P_{ij} = P_{ij} - (P_{ij})_0 \quad (6)$$

式中  $\delta P_{ij}$ ——参数  $P_{ij}$  的原始误差；

$(P_{ij})_0$ ——参数  $P_{ij}$  的计算值；

$i$ ——变换器标号；

$j$ ——参数标号。

在输入量  $A_i$  为已知值的情况下，传感器的原始误差  $\delta P_{ij}$  会使输出量  $B_i$  与其计算值产生偏差。这种偏差称为传感器的“局部误差”：

$$\delta B_{ij} = \frac{\partial B_i}{\partial P_{ij}} \delta P_{ij} \quad (7)$$

$$B_i = f_i[A_i, (P_{i1})_0, (P_{i2})_0, \dots, (P_{in})_0] \quad (8)$$

传感器的综合误差由局部误差之和确定。其综合方法取决于原始误差的性质。

在系统原始误差下，传感器的局部误差可按照下式确定：

$$\delta B_i = \delta B_{i1} + \delta B_{i2} + \dots + \delta B_{in} \quad (9)$$

若原始误差是随机的，则传感器误差的极限值可以用局部误差极限值的均方根法确定：

$$\Delta B_i = \pm \sqrt{(\Delta B_{i1})^2 + (\Delta B_{i2})^2 + \dots + (\Delta B_{in})^2} \quad (10)$$

用大量同时作用的独立因素（它们能引起局部误差）往往会使各种物理参数测量误差的实际估算复杂化。血压测量就是其中一例，这里有下列几组引起最大测量误差的主要独立因素：

1) 由于仪器标定条件和实际应用条件（周围介质温度、大气压力、电磁感应等）不同所产生的压力通道幅值特性的非线性引起的误差  $\Delta B_1 = \pm 5\%$ ；

2) 绘制幅频特性时，非线性及不正确性所造成的误差  $\Delta B_2 = 5\%$ ；

3) 由于零漂产生的误差  $\Delta B_3 \approx 3\%$ ;

4) 处理压力记录曲线时造成的误差  $\Delta B_4 \approx 5\%$ 。

所有这些误差均为与给定仪器和给定实验相应的系统性误差极限值。测量误差估算的复杂性在于这些误差数值通常是未知的, 即使它们是已知的, 要用一个数字估算出血压测量的总精度也是很困难的。

若用相同仪器测量不同样件, 则系统性误差可转换为随机误差, 这时便可以利用上述局部误差极限值叠加原理。因此上述式子可得:

$$\Delta_{\text{нзм}} = \pm \sqrt{5^2 + 5^2 + 3^2 + 5^2} \times \% \approx 9\%$$

测量概率误差  $\rho_{\text{нзм}} = \Delta_{\text{нзм}}/4.5$  (此值小于测量误差之半)<sup>[27]</sup>, 这时  $\rho_{\text{нзм}} = 2\%$ 。随着测量变量数目的增加, 试验者得到的总误差值将增大。可见, 极限误差  $\Delta_{\text{нзм}}$  可作为对测量结果的总评价。

局部误差的另一种叠加方法是众所周知的方法。如在著作[40]中阐述了不按照引起误差因素, 而是按照测量装置的仪器单元可能产生的局部误差。

这里将按照合格证数据进行局部误差绝对值的叠加。表1给出了这一叠加的例证。

可见, 这种方法仍然会导致大的极限误差值。

传感器的动态特性可确定输入量快速变化时的输出量参数<sup>①</sup>。

动态特性取决于测量方法和传感器元件的内部性能。它可以由各种关系曲线表示:

1) 过渡过程特性曲线  $B = f(t)$  ( $t$  —— 输入量  $A$  的

● 在仪表制造业中, 通常把  $f_{\text{нх}} > 5 \sim 10$  赫芝的物理过程作为输入量的快速变化。——译者

表 1 血压测量通道单元引起的误差

| 仪 器 单 元           | 按公司合格证数据的<br>局部误差(%) |
|-------------------|----------------------|
| 介质压力引入部件(焊件、测量架等) | ± 3                  |
| 传感器               | ± 5                  |
| 传感器               | ± 2                  |
| 记录和分析装置           | ± 4                  |
| 极限误差              | ± 14                 |

阶跃变化时间);

2) 频率特性曲线  $S_u = F(f_{nx})$ ——传感器灵敏度与输入信号变化频率的关系曲线;

3) 相位特性曲线——输入量与输出量向量间的相位差随正弦输入量变化频率的关系曲线。

### 3. 对传感器的基本要求

总之, 将被测参数变换为输出电信号的物理量传感器应按照全苏国家标准 (ГОСТ) 设计与制造。传感器的结构与型式应满足一系列专门要求, 这些要求在很大程度上取决于传感器工作条件的周围介质。例如, 同人相接触的传感器不应该刺激人的生理器官。

机载工作条件下的传感器应具有耐振能力。在所有情况下应该保证使用人员在触电时的安全。

目前, 不仅整个物理量传感器, 而且各类传感器 (如压力传感器) 在国际上尚无统一术语。这就使得不同商标的传感器难以进行特性比较分析。按照使用条件, 我们可以对物理量传感器提出各种要求如下:

1) 对人体器官功能无影响;

- 2) 有所需要的灵敏度和精度;
- 3) 超载能力 (输入量极限容许值与其额定值之比) 大;
- 4) 被测介质和周围介质具有抗生化作用;
- 5) 具有定向性, 即传感器输出电路中的负载对输入电路状态的影响小;
- 6) 对非被测参数和场分量 (电、磁、万有引力、辐射场等) 很不敏感;
- 7) 具有通用性和互换性;
- 8) 体积小, 重量轻;
- 9) 有良好的经济性和工艺性。

#### 4. 可靠性和小型化问题

传感器的构造通常是复杂的, 它要在有限空间内安置结构紧凑的大量零件。同时, 还要不断提高传感器可靠性和它的寿命。对飞行器、自动控制系统用的传感器, 原子能控制和调节中用的传感器, 生物医学研究用的传感器等提出了特别高的可靠性要求。

近年来, 已经对各种元件和结构的使用寿命的确定方法作了大量试验研究工作。从而, 得到了在相同外界条件和同一时间间隔内的试验比较结果。按照经验可以确定出给定零件或元件经过一定工作时数后仍然可以保持正常工作能力的概率, 且按照各种零件的可靠性特性又能够确定出整个传感器的概率寿命。这时, 我们把首次故障出现前的工作时间称为“使用寿命”。

下面给出了某些传感器及其组件的寿命 (以小时计):

|            |      |
|------------|------|
| 小型变阻式压力传感器 | 1000 |
| 电容式压力传感器   | 3000 |

|        |      |
|--------|------|
| 压电式变换器 | 3500 |
| 振子     | 1500 |
| 速动继电器  | 2000 |
| 步进电机   | 1000 |

试验表明，故障几率随着仪表中零件数目呈指数规律增大。

下面是传感器故障原因分析结果（以%表示）：

|                           |    |
|---------------------------|----|
| 设计不正确（结构不合理，敏感元件和材料等选择不当） | 35 |
| 使用不正确                     | 30 |
| 生产缺陷                      | 25 |
| 材料老化和其它损伤                 | 10 |

---

|    |     |
|----|-----|
| 总计 | 100 |
|----|-----|

---

在研究电子仪器可靠性时，按照零、组件的主要类型确定故障的分布。下表就是各种元件的上述故障情况研究结果（以%表示）：

|        |      |
|--------|------|
| 电阻     | 43.5 |
| 电容器    | 18   |
| 变压器    | 7    |
| 线圈     | 4    |
| 开关     | 6    |
| 晶体管    | 0.5  |
| 插销接头   | 3    |
| 测量仪表   | 1.5  |
| 电机     | 4    |
| 滤波器    | 1.4  |
| 导线     | 1    |
| 其它零、组件 | 10.1 |

---

|    |     |
|----|-----|
| 总计 | 100 |
|----|-----|

---

当温度升高和湿度增大时，在振动和加速度作用下，零件的使用寿命将减短。放射性射线的作用会使半导体仪器和无线电元件寿命显著减短。经能量为  $10^{11} \sim 10^{12}$  中子/厘米<sup>2</sup> 的中子照射后，将使锗和硅晶体三极管完全损坏，即使小的照射影响也会使它的寿命大大减短。在上述情况下，同样会使云母、陶瓷、聚乙烯、塑料、酚醛塑料等绝缘材料制成的零件寿命减短。而且，这些材料寿命的减短情况在很大程度上取决于放射性射线的强度。

零件能够在工厂的公差范围内保持原始特性的工作时数称为它的“工作寿命”。在试制初期会出现零件的制造不正确，通常大量缺陷发生在零件最初的 100 工作小时内。

通常用试验方法确定 1000 小时内所产生的故障零件数量（以 % 表示）。若用符号  $\lambda_a$  表示此值，而  $n$  表示仪器中所有零件数目， $n_a$  表示每类零件数目， $m$  表示所希望的仪器寿命（以千小时计）， $\lambda_r$  表示 1000 小时内发生故障的仪器数（以 % 表示），则

$$\lambda_r = \frac{1}{m} \% = \sum \lambda_a n_a \quad (11)$$

主要装置和器件的  $\lambda_a$  平均值为：

|        |          |
|--------|----------|
| 陀螺马达   | 5        |
| 电子管    | 2.35     |
| 信号装置   | 1        |
| 高压变压器  | 0.8      |
| 固定机械零件 | 0.01~0.1 |
| 活动机械零件 | 0.1~0.5  |
| 电位器    | 0.5      |
| 磁放大器   | 0.5      |