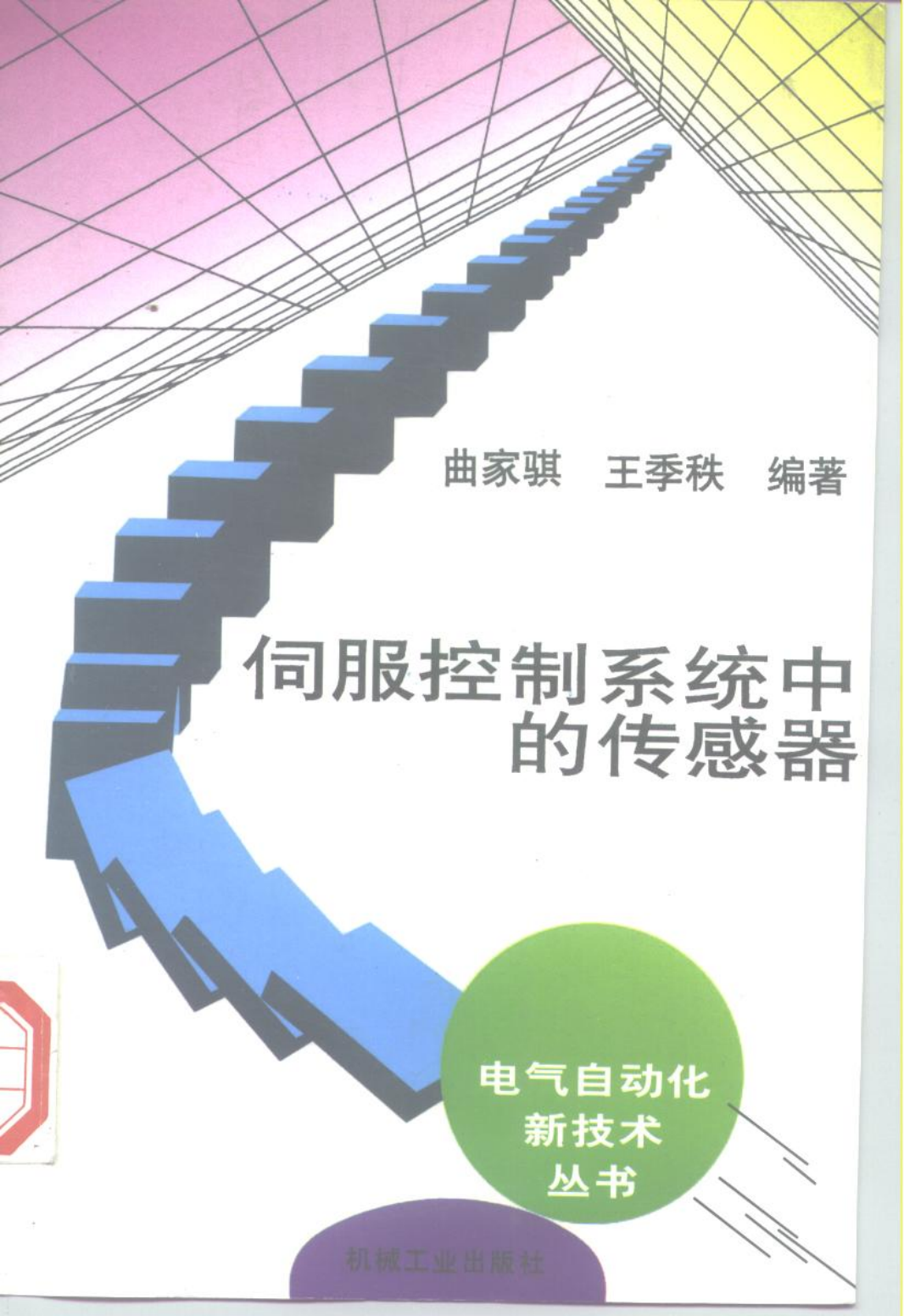




曲家骐 王季秩 编著

伺服控制系统中的 传感器

电气自动化
新技术
丛书

机械工业出版社

7222
6782

电气自动化新技术丛书

伺服控制系统中的传感器

曲家骥 王季秩 编著



机械工业出版社

2022/08
传感技术越来越显示出特殊的意义,传感器的水平往往成为控制系统性能好坏的关键。但是由于传感技术涉及的技术领域很宽,因此往往不易被人们熟悉和掌握。

本书完整、系统地介绍了伺服控制系统中传感器(包括电磁感应的、光电的、磁电的以及利用其他原理的传感器)的原理、性能和使用,内容上着重介绍应用最广泛的传感器,同时注意到近年来极有前途的科技新成果,在原理、性能上给出清楚概念的基础上,用较多篇幅介绍了应用方面的知识,使读者得到实在的收获,并完全可以应用于工作实践。

本书是作者长期从事这方面的科研设计、生产和使用等实践的工作总结,写作中也参阅了大量的文献资料,内容全面、新颖、信息量大。

本书可供从事伺服控制系统方面工作的科技人员和大专院校有关专业师生阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

伺服控制系统中的传感器/曲家骥,王季秩编著. -北京:机械工业出版社,1998.5
(电气自动化新技术丛书)
ISBN 7-111-06114-4

I. 伺… II. ①曲… ②王… III. 伺服系统-传感器-基本知识 IV. TP275

中国版本图书馆CIP数据核字(98)第01038号

出版人:马九荣(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)
责任编辑:孙流芳 版式设计:王颖 责任校对:林去菲
封面设计:姚毅 责任印制:王国光
北京交通印务实业公司印刷·新华书店北京发行所发行
1998年5月第1版第1次印刷
850mm×1168mm $\frac{1}{32}$ ·8.75印张·224千字
0 001-4 000册
定价:17.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

《电气自动化新技术丛书》

序 言

科学技术的发展，对于改变社会的生产面貌，推动人类文明向前发展，具有极其重要的意义。电气自动化技术是多种学科的交叉综合，特别在电力电子、微电子及计算机技术迅速发展的今天，电气自动化技术更是日新月异。毫无疑问，电气自动化技术必将在建设“四化”、提高国民经济水平中发挥重要的作用。

为了帮助在经济建设第一线工作的工程技术人员能够及时熟悉和掌握电气自动化领域中的新技术，中国自动化学会电气自动化专业委员会和中国电工技术学会电控系统与装置专业委员会联合成立了《电气自动化新技术丛书》编辑委员会，负责组织编辑《电气自动化新技术丛书》。丛书将由机械工业出版社出版。

本丛书有如下特色：

一、本丛书是专题论著，选题内容新颖，反映电气自动化新技术的成就和应用经验，适应我国经济建设急需。

二、理论联系实际，重点在于指导如何正确运用理论解决实际问题。

三、内容深入浅出，条理清晰，语言通俗，文笔流畅，便于自学。

本丛书以工程技术人员为主要读者，也可供科研人员及大专院校师生参考。

编写出版《电气自动化新技术丛书》，对于我们是一种尝试，难免存在不少问题和缺点，希广大读者给予支持和帮助，并欢迎大家批评指正。

《电气自动化新技术丛书》

编辑委员会

《电气自动化新技术丛书》

编辑委员会成员

主任委员：陈伯时

副主任委员：喻士林 夏德铃 李永东
委 员：(以姓氏笔划为序)

王 炎	王文瑞	王正元
刘宗富	孙 明	孙武贞
孙流芳	过孝珦	许宏纲
朱稚清	夏德铃	陈伯时
陈敏逊	李永东	李序葆
张 浩	张敬民	周国兴
涂 健	蒋静坪	舒迪前
喻士林	霍勇进	戴先中

《电气自动化新技术丛书》

出版基金资助单位

机械工业部天津电气传动设计研究所

深圳华能电子有限公司

北京电力电子新技术研究中心

天津普辰电子工程有限公司

中国电工技术学会

前 言

控制器、驱动器、执行电动机和传感器是电气伺服控制系统中的主要组成部分。系统的性能、工作状态要依靠传感器来测量、监督、传感、反馈及显示。因此,传感器在系统工作中起着相当重要的作用。它的性能的好坏、指标的优劣,有时会成为决定系统性能、指标的关键。

传感器技术涉及的技术领域很宽,应用了各种原理、效应。例如:电磁感应原理、光电原理、磁电原理、压电原理、磁阻效应、半导体霍尔效应等等。传感器技术还要涉及到材料、工艺、加工等方面,在现代技术中,有时还会自成一个包括软件和硬件的小系统。所以,传感器往往不是一个学科可以完成的,而是一门综合的学科。目前所见到的有关传感器的书籍或资料多是或者泛泛而谈,过于简单,距离实际应用相距还远;或者偏重传感器本身的专业性理论,阅读起来相当吃力。写作本书的目的,是想完整地、系统地介绍伺服控制系统中传感器的原理、性能及使用方面的知识。在内容上力求物理概念清楚,论述简洁,同时注重传感器技术中各个学科的结合点以及应用方面的知识。

本书的第1章简述了传感器的作用、意义、分类、发展及基本特性指标。第2章介绍了大量应用的、而且还在不断改进和提高的、应用电磁感应原理的自整角机及旋转变压器,其中包括单对极和多对极元件。第3章介绍了各种类型、各种原理的速度传感器及加速度传感器。第4章介绍了采用光栅技术、光电原理的传感器,这是目前应用相当广泛,可以达到精度最高的一种传感器。第5章介绍了目前正在发展起来、极有前途的磁性编码器。第6章介绍了一种新型的也是应用电磁感应原理的速度-角度传感器。第7章介绍了半导体霍尔效应在伺服控制系统中的应用,

包括位置传感、接近开关以及电流传感等。

本书的对象主要是以从事伺服控制系统方面工作的科技人员；也可作为高等学校有关专业师生阅读。

本书的第1、2、4~6章及第3章3.1.1节中有关无刷直流测速发电机的内容由曲家骐高级工程师编写，第3章、第7章由王季秩研究员高级工程师编写，第5章5.3节由张耀文高级工程师提供初稿。

本书编写过程中曾得到过高校、研究所及工厂的许多人士的帮助和指导，并热情地提供文献和资料，特别是中国科学院南京天文仪器研制中心的夏立新研究员不仅提供了有关资料，而且仔细审阅了第4章，提出了许多宝贵的意见，在此一并表示深深的感谢。

由于水平所限，书中会有不少错误或不妥之处，衷心希望读者指正。

作者

1997年7月

目 录

《电气自动化新技术丛书》序言

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 传感器的作用和意义	1
1.2 传感器的分类	2
1.2.1 按被测量分类	2
1.2.2 按输出电信号的形式分类	2
1.2.3 按信号转换的原理分类	2
1.3 传感器的发展	3
1.3.1 原有传感器技术的改进和提高	3
1.3.2 新材料、新原理的利用	4
1.3.3 与微处理器的结合	4
1.4 伺服控制系统中传感器的性能指标	4
1.4.1 传感器的静态特性	5
1.4.2 传感器的动态特性	6
第 2 章 自整角机及旋转变压器	8
2.1 自整角机	8
2.1.1 自整角机的基本类型	9
2.1.2 自整角机的结构	14
2.1.3 自整角机的基本工作原理	17
2.1.4 自整角机的基本参数和性能指标	33
2.1.5 自整角机的选择和故障分析	38
2.2 旋转变压器	41
2.2.1 旋转变压器的基本类型	42
2.2.2 旋转变压器的结构特点	44
2.2.3 旋转变压器的基本工作原理	44
2.2.4 旋转变压器的基本参数和性能指标	49

2.3 无刷自整角机和无刷旋转变压器	52
2.3.1 复合磁路的无刷自整角机和旋转变压器	53
2.3.2 变压器耦合的自整角机和旋转变压器	55
2.3.3 无刷旋转变压器和有刷旋转变压器的比较	57
2.4 多极旋转变压器、多极自整角机和多极感应移相器	58
2.4.1 双通道系统的工作原理	59
2.4.2 转换区和偏置电压	62
2.4.3 多极旋转变压器、多极自整角机和多极感应移相 器的若干问题	64
2.5 磁阻式多极旋转变压器	68
2.5.1 磁阻式多极旋转变压器的结构和类型	69
2.5.2 磁阻式旋转变压器的工作原理及电气误差	70
2.5.3 磁阻式多极旋转变压器的参数和特点	75
2.6 感应同步器	76
2.6.1 感应同步器的结构和类型	76
2.6.2 感应同步器的工作原理	80
2.6.3 感应同步器的电气参数和特点	83
2.6.4 感应同步器的安装和调整	86
2.7 应用和有关电路	92
2.7.1 应用	95
2.7.2 有关电路	98
2.7.3 自整角机/旋转变压器-数字转换器	108
2.7.4 数字-自整角机/旋转变换器	113
2.7.5 SSCT 和 SSCDX 电路	114
第 3 章 速度传感器和加速度传感器	118
3.1 速度传感器的工作原理、类型和特点	118
3.1.1 测速发电机的工作原理、类型和特点	118
3.1.2 桥式速度传感器和测速电路	127
3.1.3 数字式速度传感器	129
3.2 速度传感器的功能、特性和应用	132
3.2.1 模拟式速度传感器的功能、特性和应用	132
3.2.2 数字式速度传感器的性能和应用	145
3.3 加速度传感器及其应用	148

3.3.1 压阻式加速度传感器	148
3.3.2 压电式加速度传感器	152
第4章 光栅传感器	155
4.1 光栅传感器的工作原理	156
4.1.1 光栅和光栅光学系统	156
4.1.2 光栅式测量的原理	159
4.1.3 光栅的细分技术	161
4.1.4 零位光栅	167
4.2 光栅传感器的结构、分类和误差	168
4.2.1 光栅传感器的结构	168
4.2.2 光栅传感器的分类	174
4.2.3 影响精度的诸因素	175
4.2.4 参数	178
4.3 若干应用问题	181
4.3.1 循环二进制码向标准二进制码的转换	181
4.3.2 方向数字脉冲电路	183
4.3.3 光栅编码器在永磁交流伺服电动机中的应用	184
4.3.4 光栅测速电路	187
第5章 磁性编码器	195
5.1 强磁金属磁敏电阻磁性编码器	196
5.1.1 强磁金属低饱和磁场特性和磁阻效应	196
5.1.2 强磁金属磁敏电阻磁性编码器的结构和工作原理	202
5.1.3 强磁金属磁敏电阻磁性编码器的基本技术参数	207
5.1.4 强磁金属磁敏电阻磁性编码器的特点	208
5.2 半导体磁敏电阻磁性编码器	209
5.2.1 半导体磁阻效应	210
5.2.2 半导体磁敏电阻磁性编码器的结构和原理	213
5.2.3 半导体磁敏电阻磁性编码器的性能特点	216
5.3 励磁磁环式磁性编码器	217
5.3.1 励磁磁环式磁性编码器的结构和工作原理	217
5.3.2 扫描问题	221
5.3.3 励磁磁环式磁性编码器的性能特点	223
第6章 速度—角度传感器	225

6.1 速度—角度传感器的结构	227
6.1.1 结构的一般介绍	227
6.1.2 电路结构	230
6.2 工作原理和信号处理电路	231
6.2.1 速度—角度传感器的电压方程式	231
6.2.2 信号拾取原理和处理电路	233
6.3 特性和参数	237
6.3.1 角度位置传感信号	237
6.3.2 速度传感信号	238
第 7 章 磁敏元件及其传感器	240
7.1 霍尔元件和霍尔传感器	240
7.1.1 霍尔元件的工作原理和结构	240
7.1.2 霍尔元件的类型和特点	242
7.1.3 霍尔元件的主要性能参数	246
7.1.4 霍尔元件和霍尔传感器的应用	247
7.2 霍尔电流传感器和霍尔功率传感器	259
7.2.1 霍尔电流传感器	259
7.2.2 霍尔功率传感器	263
参考文献	265

第 1 章 绪 论

1.1 传感器的作用和意义

在工农业、科学和国防军事装备中，各种控制系统起着极其重要的作用。可以说，控制系统的发展过程和水平反映了工农业、科学和国防军事装备的发展过程和水平。

通常所说的伺服控制系统，是指反馈控制的随动系统，它的组成如图 1-1 所示。这种系统的输出量是机械位移、速度或加速度，利用这些量实现各种各样的控制目的。近些年来，伺服控制系统中的各个组成部分都有了飞速发展，特别是电子工业的发展，结合控制理论的新成就，使得控制器和驱动器的进步取得了根本性的变化。传感器将系统的输出量反馈给控制器，使之与输入的命令进行比较，控制器根据这些信息，作出决定，发布命令，指示驱动器和执行电动机如何动作。可以看出，传感器的作用十分重要。传感器必须能够准确地测量出反映系统工作的各个物理量，并且迅速地传递给控制器。测量的不精确、不能如实地反映系统工作情况，这将会造成很大误差；信息传递太慢、系统

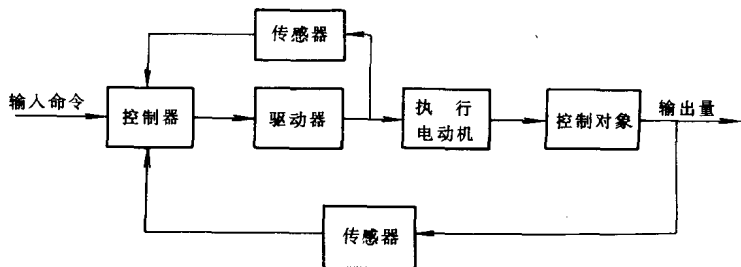


图 1-1 伺服控制系统原理框图

无法快速跟随输入命令，将会延迟太大，甚至无法工作。因此，系统中传感器的作用非常重要，传感器的水平在一定程度上决定了系统的水平，有时甚至成为影响系统工作的关键。例如：在数控机床里，加工的尺寸精度决定于所用位移（直线或圆弧）传感器的精度。雷达可能达到的定位精度，决定于所用的角度传感器的精度。

传感器除了测量反映系统工作状态外，还有另一个十分重要的作用，就是故障检测。故障检测实际上也是工作状态的检测，只是故障检测主要着重于某一阈值的检测，超过这一阈值就会产生故障，必须采取措施，以避免事态进一步发展而造成事故。常见的故障是过热、过速、过电流、过电压和欠电压等。这些故障的检测有许多是通过电路实现的，本书不作介绍。

1.2 传感器的分类

传感器的分类方法很多，从编写本书的目的出发，这样三种分类方法比较合适：①被测量；②输出电信号的形式；③信号转换的原理。

1.2.1 按被测量分类

根据伺服系统的工作状态来看，可以分为四种：位移传感器、速度传感器、加速度传感器、电流传感器。

在位移、速度和加速度传感器中，包括直线的和旋转角度的两种方式。

1.2.2 按输出电信号的形式分类

无论哪种传感器，不论采用哪种原理，传感器最后都是以电的形式输出的。电形式的信号最宜被处理、传送、记录、显示等。

电形式的信号可分为两种：模拟式和数字式。

1.2.3 按信号转换的原理分类

在伺服控制系统中的传感器基本上都是采用物理效应的方式。其中用得最多的是电磁感应原理，例如：自整角机、旋转变

压器及测速发电机等等。其次，还有光电效应、光栅效应、霍尔效应、磁阻效应、压阻效应、压电效应等等。

1.3 传感器的发展

近年来，伺服控制系统中传感器的发展表现在以下几个方面：

- (1) 对原有传感器技术的改进和提高；
- (2) 采用新材料、新原理；
- (3) 与微处理器技术相结合。

1.3.1 原有传感器技术的改进和提高

伺服控制系统中，作为位置和速度信号测量传感的元件用得最多的是电磁感应原理的位移和速度传感器，如本书第2、3章所介绍的。这些元件多年来一直在得到改进、提高，随着新材料、新工艺、新技术的发展，也出现了许多新结构、新形式的电磁感应原理的新的传感元件，其显著的特点是：

1. 高精度 为了提高精度，出现了电的双速位置传感系统（第2章中将详细介绍）。这样使角度的传感精度由角分级提高到角秒级。同时还出现了像感应同步器和磁阻式多极旋转变压器这样的元件。又如：开展研究补偿技术，以使测速发电机能在各种状态下工作，补偿因外界环境变化而使性能变坏和不稳定。

2. 高分辨率 分辨率的提高，对于提高系统性能指标、提高运行平稳性都很重要。在新材料、新工艺、新技术的支持下，高分辨率的传感器已不是十分困难的问题。例如角度位移测量的分辨率可以高达 $0.5''$ ，甚至更高。

3. 高可靠性 传统结构的电磁感应原理的传感器，运动部分的电信号都是通过电刷、集电环（或换向器）引进引出的。目前出现了无刷的无接触式结构。由于取消了电的滑动接触，消除了故障和干扰的根源，使得可靠性大大提高。无刷化的实现，往往是与电子技术结合分不开的，例如无刷直流测速发电机就是一个例子。

4. 数字化 在大多数控制系统中都有电子计算机或者数字式显示器, 因此对具有数字输出的传感器有着迫切的要求。实现数字化的途径有两个: ①将原有的模拟量输出的传感信号进行数字化, 利用现有的电子技术、现成的集成电路, 很容易实现; ②研制具有脉冲数字形式输出的传感器。目前这两种形式都在进行中。

1.3.2 新材料、新原理的利用

新型材料的应用表现在两方面: 一方面是采用新材料后, 使原有结构形式的传感器的性能提高, 例如稀土材料的应用, 可以使得直流测速发电机的灵敏度提高; 另一方面新材料与新原理相结合, 产生新型的传感器。例如利用半导体材料和强磁金属材料的磁阻效应, 出现新型的磁性编码器等。

1.3.3 与微处理器的结合

与微处理器及微电子技术的结合, 使得传感器技术得到突破性的发展, 这样在信息的获取、转换、传输、处理、储存和显示上都变得简单、容易, 并且扩大了传感器功能。例如: 利用微处理器技术, 可以将自整角机和旋转变压器的模拟信号转换成数字信号; 经过对位移量的微分, 可以得到速度信号; 进行适当变换可以产生固态自整角机 (见第 2 章)。利用微处理器技术可以更方便地对光栅编码器和磁性编码器进行细分, 以提高分辨率。

目前还出现智能化的发展, 对传感器进行集成化、功能化, 并且和微处理器结合, 不仅对信号进行测量、转换, 而且用作记忆、存储、运算放大及数据处理。这样使功能扩大, 加快了数据处理的速度, 保证了质量, 扩大了功能。

1.4 伺服控制系统中传感器的性能指标

在伺服控制系统中, 所测量的物理量一般都是以各种形式变化的量。因此, 传感器的输出必须能准确、快速跟随反映这些被测量的变化。这样传感器的性能应该包括两个方面: 静态特性和动态特性。

1.4.1 传感器的静态特性

传感器静态特性是指输入命令是恒定量或者缓慢变化量时，而传感器输出量也达到相应的稳定值时的工作状态。传感量的输出量应是输入量的某一确定的函数。通常输出与输入之间是线性关系，但有时也是某一周期函数，例如正、余弦关系。符合这些函数关系的程度是传感器性能的重要指标。

1. 精度 符合输出与输入之间特定函数关系的程度称作精度。成线性关系的传感器以线性度表示，成某一函数关系的传感器一般都有特殊的误差关系，例如第2章中有电气误差和零位误差等。

2. 分辨率 传感器的输入与输出之间不可能做到绝对连续，有时，输入量开始变化，但变化量太小，输出量并不随之而变，而是输入量变化到某一程度时，输出量才突然产生一个小的阶跃变化，这就是分辨率的问题。

3. 灵敏度 静态工作时单位输入所产生的输出。对于线性的输出、输入关系，各点的灵敏度应该是一样的。但是对于不是线性的输出、输入关系的情况下，如前面所讲的正、余弦情况，有两种方法可以采用：①最大输出电压值（即输出电压的幅值）时的灵敏度；②采用某一点上的灵敏度，例如采用输出为零的那一点的灵敏度。

4. 测量范围和量程 传感器所能传感、测量的最大被测量的数值为测量上限，最小的被测量的数值则被定义为测量下限。这对线性位移测量有意义，而对于旋转运动，输入与输出之间成周期函数关系的，则对上、下限没有要求。

5. 迟滞 对于某一输入量，传感器正行程的输出量与反行程的输出量不一致，称为迟滞。

6. 零漂与温漂 传感器的漂移量是表示其性能的重要指标。零漂是指输出量随时间的变化有微小的变化。温漂是指传感器输出随温度变化而产生的微小变化。