

传感器原理及其应用

Sensor principle and its application

温殿忠 赵晓锋 编著



科学出版社

传感器原理及其应用

温殿忠 赵晓锋 编著

科学出版

北 京



内 容 简 介

本书系统阐述了磁敏感元器件和磁传感器、压电式传感器、压阻式传感器等物理传感器结构、工作原理和特性,介绍了硅各向异性腐蚀技术、传感器集成化及传感器 CAD 等传感器技术。本书具有较系统的基础理论和实用技术,概念清楚。全书共 15 章,主要内容包括绪论、磁传感器概述、霍尔元件、磁敏电阻、磁敏二极管、磁敏三极管、其他磁传感器、压电效应与压阻效应、弹性元件的力学分析、压电式传感器、压阻式传感器、电容式传感器、硅各向异性腐蚀技术、传感器集成化及传感器 CAD。

书中包括采用 MEMS 技术制造硅磁敏三极管、硅各向异性腐蚀技术和 MOSFETs 压/磁传感器集成化等内容,是作者在国家自然科学基金和黑龙江省科技计划项目支持下取得的科研成果,对研究生和从事传感器 MEMS 研究开发的科技人员具有重要参考价值。

本书可作为电子信息类、电气信息类、仪器仪表类等专业的本科生和研究生教材,也可供相关领域工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

传感器原理及其应用/温殿忠,赵晓锋编著. —北京:科学出版社,2013
ISBN 978-7-03-037449-3

I. ①传… II. ①温…②赵… III. ①传感器 IV. ①TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 096712 号

责任编辑:余 丁 赵鹏利 / 责任校对:桂伟利
责任印制:张 倩 / 封面设计:蓝 正

科 学 出 版 社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

骏杰印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013 年 6 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2013 年 6 月第一次印刷 印张:20 1/4

字数:393 000

定价:68.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

传感器是人类获取各种信息的有利工具，它相当于人的“五官”且是“五官”的延伸。传感器正在向小型化、集成化和智能化方向发展，新技术、新工艺、新材料也使其制造成本不断降低，性能指标不断提高，应用面不断扩大。在我国现代化建设中传感器使用日益广泛，在国民经济各个领域发挥着越来越重要的作用。

传感器的种类繁多，本书系统地叙述了磁敏感元器件与磁传感器领域内主要几种磁敏感元器件与磁传感器的基本结构、工作原理、主要特性及其应用，通过介绍压电效应和压阻效应，在阐述弹性元件的力学分析基础上，详细叙述了压电式传感器、压阻式传感器和电容式传感器的基本结构、工作原理、主要特性及其应用，并详细阐述了硅各向异性腐蚀技术，最后介绍了传感器集成化及传感器CAD。

本书是在编著者原出版的《磁敏感元器件与磁传感器》和《力学量敏感器件原理与应用》的基础上，结合编著者多年在采用MEMS技术制造硅磁敏三极管、硅各向异性腐蚀技术和MOSFETs压/磁传感器集成化等方面的科研成果编著的。本书获得黑龙江大学“十二五”规划教材立项资助。

在本书撰写过程中，作者参阅了很多文献，特向这些文献的作者、译者表示谢意。由于编著者水平有限，书中难免有不妥之处，恳请各位读者指正。

编著者

2012年10月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 传感器的定义和组成	1
1.1.1 传感器的定义	1
1.1.2 传感器的组成	2
1.2 传感器的分类	2
1.2.1 按传感器检测的量分类	3
1.2.2 按传感器输出的信号性质分类	3
1.2.3 按传感器的结构分类	3
1.2.4 按传感器的功能分类	4
1.2.5 按传感器的能源分类	4
1.2.6 按传感器的转换原理分类	4
1.3 传感器的特性与主要性能指标	4
1.3.1 传感器静态特性与主要性能指标	5
1.3.2 传感器动态特性	16
1.4 传感器的发展趋势	18
1.4.1 开发新型传感器	18
1.4.2 开发新材料	19
1.4.3 微型传感器加工工艺的发展	21
1.4.4 传感器多功能集成化发展	22
1.4.5 传感器的智能化和网络化发展	22
参考文献	24
第 2 章 磁传感器概述	25
2.1 磁场概述	25
2.1.1 磁场的定义	25
2.1.2 磁场的分类	26
2.2 磁传感器的定义和分类	26
2.2.1 磁传感器的定义	26

2.2.2 磁传感器的分类	27
2.3 磁传感器的发展动向及展望	29
参考文献	32
第3章 霍尔元件	33
3.1 霍尔效应	33
3.2 霍尔元件及其效率	35
3.3 霍尔元件的设计	38
3.3.1 几何尺寸对霍尔输出电压的影响	39
3.3.2 霍尔输出电极宽度对霍尔输出电压的影响	41
3.3.3 霍尔元件的不等位电势及其影响因素	42
3.4 霍尔元件的电磁特性	43
3.4.1 V_H - B 关系	43
3.4.2 V_H - I 关系	44
3.4.3 R - B 关系	45
3.5 霍尔元件的温度特性	45
3.5.1 一般分析	45
3.5.2 温度补偿	48
3.5.3 最大允许控制电流	50
3.6 霍尔元件的频率特性	51
3.7 霍尔元件参数的测试方法	52
3.7.1 常用参数	52
3.7.2 测试方法	53
3.8 霍尔元件的应用	55
3.8.1 磁钢	56
3.8.2 无刷直流电机	57
参考文献	60
第4章 磁敏电阻	61
4.1 半导体磁阻效应	61
4.1.1 物理磁阻效应	61
4.1.2 几何磁阻效应	62
4.1.3 磁阻比特性	64
4.2 半导体磁敏电阻	65
4.2.1 磁敏电阻的材料	65

4.2.2 圆板型磁敏电阻	66
4.2.3 栅格状磁敏电阻	67
4.2.4 InSb-NiSb 共晶磁敏电阻	69
4.3 半导体磁敏电阻特性及其补偿	71
4.3.1 磁敏电阻的特性参数	71
4.3.2 磁阻比特性	72
4.3.3 温度特性	73
4.4 强磁性金属磁敏电阻的工作原理与特性	74
4.4.1 强磁性金属的磁阻效应	74
4.4.2 强磁性金属磁敏电阻的工作原理	75
4.4.3 磁场强度-输出电压特性	77
4.5 强磁性金属磁敏电阻及其特性	78
4.5.1 元件的构成	78
4.5.2 强磁性金属磁敏电阻的工作特性	79
4.6 巨磁电阻的工作原理及其应用	82
4.6.1 巨磁阻效应	82
4.6.2 巨磁电阻的工作原理	82
4.6.3 Co/Cu/Co 多层膜巨磁电阻	85
4.6.4 巨磁电阻的应用	86
参考文献	87
第5章 磁敏二极管	89
5.1 磁敏二极管工作原理	89
5.2 磁敏二极管的设计原则	94
5.2.1 材料选择	94
5.2.2 尺寸选择	94
5.3 磁敏二极管的制备工艺	96
5.3.1 锗磁敏二极管的制备工艺	96
5.3.2 硅磁敏二极管制备工艺	97
5.4 磁敏二极管特性与测试方法	98
5.4.1 磁灵敏度及其测试方法	98
5.4.2 输出电压随磁场变化的特性	101
5.4.3 温度特性	101
5.4.4 频率特性	103

5.4.5 噪声	103
5.5 温度补偿方法	103
参考文献	108
第6章 磁敏三极管	109
6.1 磁敏三极管的工作原理	109
6.2 磁敏三极管的设计原则	113
6.3 磁敏三极管的制备工艺	115
6.3.1 锗磁敏三极管的制备工艺	115
6.3.2 硅磁敏三极管 3CCM 的制备工艺	116
6.3.3 采用 MEMS 技术制造硅磁敏三极管	116
6.4 磁敏三极管的特性与测试方法	122
6.4.1 磁灵敏度	122
6.4.2 温度特性	123
6.4.3 频率特性	126
6.5 磁敏三极管的温度补偿方法	127
6.5.1 差分补偿方法	127
6.5.2 用三极管做温度补偿的方法	128
参考文献	129
第7章 其他磁传感器	130
7.1 韦根德元件	130
7.1.1 韦根德效应和韦根德元件	130
7.1.2 韦根德元件应用举例	131
7.2 约瑟夫逊超导量子干涉元件	133
7.2.1 正常电子的隧道效应	134
7.2.2 约瑟夫逊效应	134
参考文献	139
第8章 压电效应与压阻效应	140
8.1 压电效应	140
8.1.1 应力的概念	140
8.1.2 应变的概念	140
8.1.3 正应力与正应变的概念	140
8.1.4 切应力与切应变的概念	142
8.1.5 应力张量和应变张量的概念	142

8.1.6 应变分量与位移分量之间的关系	143
8.1.7 石英晶体的介电性质	145
8.1.8 石英晶体的压电效应	148
8.2 压阻效应	153
8.2.1 压阻系数	154
8.2.2 液体静压强作用下的效应	156
8.2.3 单轴拉伸或压缩下的压阻效应	159
8.2.4 压阻效应的应用	161
8.2.5 影响压阻系数大小的因素	163
参考文献	164
第9章 弹性元件的力学分析	165
9.1 梁式弹性元件分析	165
9.1.1 梁式弹性元件正应力	165
9.1.2 弯矩和剪力	167
9.2 对称载荷下的圆板弯曲	167
9.3 圆板应力和位移的确定	172
9.4 矩形板的弯曲	175
9.5 硅弹性膜片形状的选择	176
参考文献	177
第10章 压电式传感器	178
10.1 压电式加速度传感器	178
10.1.1 工作原理	178
10.1.2 灵敏度	178
10.1.3 频响特性	180
10.1.4 结构特点	185
10.1.5 应用	186
10.2 压电式力传感器和压力传感器	187
10.2.1 压电式力传感器	187
10.2.2 压电式压力传感器	188
10.3 压电式传感器的误差	191
10.3.1 环境温度的影响	191
10.3.2 环境湿度的影响	194
10.3.3 横向灵敏度	194

10.3.4 电缆噪声	195
10.3.5 接地回路噪声	196
参考文献	196
第 11 章 压阻式传感器	197
11.1 压阻式压力传感器	197
11.1.1 压阻系数	197
11.1.2 压阻式压力传感器原理	201
11.2 压阻式加速度传感器	207
11.3 压阻式传感器的输出	208
11.3.1 恒压源供电	208
11.3.2 恒流源供电	209
11.4 扩散电阻的阻值与几何尺寸的确定	210
11.5 温度漂移的补偿	212
11.5.1 传感器零位温漂的补偿	212
11.5.2 传感器灵敏度温漂的补偿	213
11.5.3 最佳灵敏度温度补偿原理分析	214
11.5.4 非对称基区梳状晶体管的结构设计	217
参考文献	220
第 12 章 电容式传感器	222
12.1 工作原理及结构类型	222
12.2 主要特性	223
12.2.1 特性曲线、灵敏度、非线性	223
12.2.2 等效电路	227
12.2.3 高阻抗、小功率特性	228
12.2.4 静电引力	229
12.3 电容式压力传感器性能指标简介	230
12.4 电容式加速度传感器性能指标简介	232
12.5 温度误差分析	233
12.5.1 温度变化对结构尺寸的影响	233
12.5.2 温度变化对介质介电常数的影响	234
12.6 绝缘和屏蔽问题	236
12.6.1 绝缘问题	236
12.6.2 屏蔽问题	236

参考文献	238
第 13 章 硅各向异性腐蚀技术	239
13.1 硅各向异性腐蚀技术简介	239
13.2 硅各向异性腐蚀技术工艺规范	240
13.3 EPW 各向异性腐蚀工艺	244
13.3.1 EPW 腐蚀液	244
13.3.2 最佳浓度的确定	246
13.3.3 实验与工艺流程	248
13.4 KOH 各向异性腐蚀工艺	249
13.4.1 腐蚀设备	249
13.4.2 氢氧化钾溶液的实验结果	250
13.5 TMAH 单晶硅各向异性腐蚀技术	253
13.5.1 应用说明	253
13.5.2 TMAH 的性质	253
13.5.3 实验装置	254
13.5.4 实验结果分析	254
13.5.5 结论	255
13.6 硅各向异性腐蚀实验结果的理论解释	255
参考文献	259
第 14 章 传感器集成化	261
14.1 传感器的集成化简介	261
14.2 纳米硅/单晶硅异质结 MOSFETs 压/磁多功能传感器基本结构	261
14.3 纳米硅/单晶硅异质结 MOSFETs 压/磁多功能传感器制作工艺	262
14.4 纳米硅/单晶硅异质结 p-MOSFET 特性	266
14.4.1 纳米硅/单晶硅异质结 p-MOSFET 基本结构	266
14.4.2 纳米硅/单晶硅异质结 p-MOSFET I-V 特性	267
14.5 纳米硅/单晶硅异质结 MOSFETs 压/磁多功能传感器压敏特性研究	267
14.6 纳米硅/单晶硅异质结 MOSFETs 压/磁多功能传感器磁敏特性	269
14.7 纳米硅/单晶硅异质结 MOSFETs 压/磁多功能传感器压/磁特性	271

参考文献	272
第 15 章 传感器 CAD	273
15.1 磁传感器 ATLAS 模拟仿真	273
15.1.1 ATLAS	273
15.1.2 硅磁敏二极管磁特性仿真	275
15.1.3 硅磁敏三极管 ATLAS 模拟仿真	277
15.2 IntelliSuite	281
15.2.1 3D Builder	282
15.2.2 硅各向异性腐蚀模拟	283
15.2.3 MEMS 工艺模拟	285
15.3 压力传感器仿真	286
15.3.1 ANSYS	286
15.3.2 ANSYS 仿真过程	287
15.3.3 压力传感器仿真实例	288
参考文献	293
附录 I 压阻系数	294
附录 II 应力与应变的关系——弹性定律	300
附录 III 国外压力传感器和加速度传感器主要性能指标	307
附录 IV 国际单位制主要单位及换算表	309

第 1 章 绪 论

1.1 传感器的定义和组成

1.1.1 传感器的定义

传感器(transducer/sensor)是一完整的测量装置(或系统),它能把被测物理量转换为与之有确定对应关系的有用电量输出,以满足信息的传输、处理、记录、显示和控制等要求。

现代信息技术的三大基础是信息的获取、传输和处理技术,也就是传感技术、通信技术和计算机技术,它们分别构成了信息技术系统的“感官”、“神经”和“大脑”。

传感器是实现自动检测和自动控制的首要环节。如果没有传感器对原始参数进行精确可靠的测量,那么,无论是信号转换、信息处理,或者数据的显示与控制,都将成为一句空话。可以说,没有精确可靠的传感器,就没有自动检测和控制系统。近代电子技术和电子计算机为信息的转换与处理提供了极其完善的手段,检测与控制系统正经历着重大的变革,需要各种传感器去检测大量原始数据并提供信息,由此可见传感器巨大的作用。美国曾把 20 世纪 80 年代称为传感技术时代,日本则把传感技术列为十大技术之首。

在现代飞行器上,装备着极其多样的显示与控制系统,以保证各种战斗和飞行任务的完成。在这些系统中,传感器首先对反映飞行器的参数和姿态、发动机工作状态的各个物理参数加以检测,提供给驾驶和领航人员去控制和操纵飞行器,或者传输给各种启动控制系统,如自动驾驶仪、自动领航仪和发动机调节器等,进行飞行器的自动驾驶和发动机的自动调节。

同样,在新型飞机或发动机研制过程中,人们为了鉴定新机种是否符合预期设计要求,必须用各种传感器对该机型进行大量的地面测试和空中测试。例如,新研制一台航空发动机,就必须测试该发动机的转速、功率或推力,发动机本身的振动、进气道压力、强度等各个参数,对某些参数还要进行实时测试和监控,以确定是否符合设计的技术性能指标。

在工业产品的生产尤其是自动化生产过程中,也要用各种传感器来监视和控制生产过程中的各个参数,使设备工作在正常状态或最佳状态并使产品达到最好

的质量。传感技术是一种和其他多种现代科学技术密切相关的尖端技术,因此,传感器是非常重要的。

1.1.2 传感器的组成

传感器一般由敏感元件、传感元件和测量电路三部分组成,有时还加上辅助电源,如图 1-1 所示。



图 1-1 传感器的组成

传感器的组成可以很简单,也可以很复杂,可以是带反馈的闭环系统,也可以是不带反馈的开环系统。因此,传感器的组成将依不同情况而有所差异。

敏感元件——直接感受被测量(一般为非电量),并输出与被测量成确定关系的其他量(也可以包括电量)的元件。如应变式压力传感器的弹性膜片就是敏感元件,它的作用是将压力转换为弹性膜片的变形。敏感元件如果直接输出电量(热电偶),它同时兼为传感元件。

传感元件——又称变换器,是传感器的重要组成元件。一般情况下,它不直接感受被测量,而是将敏感元件的输出量转换为电量输出,如应变式压力传感器中的应变片就是传感元件,它的作用是将弹性膜片的变形转换成电阻值的变化。传感元件有时也直接感受被测量而输出与被测量成确定关系的电量,如热电偶和热敏电阻。

敏感元件如果直接输出电量,如热电偶,就同时兼为传感元件。还有一些新型传感器,如压阻式压力传感器和谐振式压力传感器等,它们的敏感元件与传感元件就完全合为一体。

测量电路——能把传感元件输出的电信号转换为便于显示、记录、控制和处理的有用电信号的电路。测量电路视传感元件的类型而定。使用较多的是电桥电路,也使用其他特殊电路,如高阻抗输入电路、脉冲调宽电路和维持振荡的激振电路等。

1.2 传感器的分类

传感器一般是根据物理学、化学、生物学等特性、规律和效应设计而成的。由某一原理设计的传感器可以同时测量多种非电量,而有时一种非电量又可用几种

不同的传感器测量,因此传感器的种类繁多,分类方法有很多,一般可按如下几种方法分类。

1.2.1 按传感器检测的量分类

按传感器检测的量分类,传感器分为物理传感器、化学传感器和生物传感器。

物理传感器是利用某些敏感元件的物理性质或某些功能材料的特殊物理性能制成的传感器。例如,利用金属材料在被测量作用下引起电阻值变化的应变效应制成的应变式传感器;利用半导体材料在被测量作用下引起电阻值变化的压阻效应制成的压阻式传感器;利用电容器在被测量作用下引起电容值变化制成的电容式传感器;利用磁阻随被测量变化制成的简单电感式、差动变压器式传感器;利用压电材料在被测量作用下产生的压电效应制成的压电式传感器等。

化学传感器是利用电化学反应原理,把无机或有机化学的物质成分、浓度等转换为电信号的传感器。最常用的是离子敏传感器,化学传感器的核心部分是离子选择性敏感膜。膜可以分为固体膜和液体膜。固体膜包括玻璃膜、单晶膜和多晶膜;液体膜包括带正、负电荷的载体膜和中性载体膜。化学传感器广泛应用于化学分析、化学工业的在线检测及环保检测中。

生物传感器是近年来发展很快的一类传感器。它是一种利用生物活性物质选择性来识别和测定生物化学物质的传感器。生物活性物质对某种物质具有选择亲和能力,也称为功能识别能力;利用这种单一的识别能力来判定某种物质是否存在,其浓度是多少,进而利用电化学的方法进行电信号的转换。生物传感器主要由两大部分组成。第一部分是功能识别物质,其作用是对被测物质进行特定识别;第二部分是电、光信号转换装置,磁装置的作用是把在功能膜上进行识别被测物所产生的化学反应转换成便于传输的电信号或光信号。

本书将重点讨论物理传感器。

1.2.2 按传感器输出的信号性质分类

按传感器输出的信号性质分为模拟传感器和数字传感器,即传感器的输出量为模拟量或数字量。数字传感器便于与计算机连用,且抗干扰性强,如盘式角压数字传感器和光栅传感器等。

1.2.3 按传感器的结构分类

按传感器的结构,传感器分为结构型传感器、物性型传感器和复合型传感器。

结构型传感器是基于物理学中场的定律构成的,包括动力场的运动定律、电磁场的电磁定律等。物理学中的定律一般以方程式给出。对于传感器来说,这些方程式也就是许多传感器在工作时的数学模型。这类传感器的特点是传感器的工作

原理是以传感器中元件相对位置变化引起场的变化为基础,而不是以材料特性变化为基础。如用金属的伸缩来感知温度等。

物性型传感器是基于物质定律构成的,如胡克定律、欧姆定律等。物质定律是表示物质某种客观性质的法则。这种法则大多数以物质本身的常数形式给出。这些常数的大小决定了传感器的主要性能。因此,物性型传感器的性能随材料的不同而异。例如,光电管就是物性型传感器,它利用了物质法则中的外光电效应。显然,其特性与涂覆在电极上的材料有着密切的关系。又如所有半导体传感器,以及所有利用各种环境变化而引起的金属、半导体、陶瓷、合金等性能变化的传感器,都属于物性型传感器。

1.2.4 按传感器的功能分类

按传感器的功能,传感器分为单功能传感器、多功能传感器和智能传感器(smart sensor)。

1.2.5 按传感器的能源分类

按传感器的能源分类,可将传感器分为有源传感器和无源传感器。

有源传感器将非电能量转换为电能量,称为能量转换型传感器,通常配合有电压测量电路和放大器,如压电式、热电式和电磁式等。无源传感器又称能量控制型传感器,它本身不是一个换能器,被测非电量仅对传感器中能量起控制或调节作用。所以,它们必须有辅助电源,这类传感器有电阻式、电容式、电感式等。

1.2.6 按传感器的转换原理分类

按传感器的转换原理,传感器分为机-电传感器、光-电传感器、热-电传感器、磁-电传感器和电化学传感器。

1.3 传感器的特性与主要性能指标

传感器所测量的物理量经常会发生各样的变动,例如,在测量某一液压系统的压力时,压力值在一段时间内可能十分稳定,而在另一段时间内则可能有缓慢起伏,或者呈周期性的脉动变化,甚至出现突变的尖峰压力。传感器主要通过两个基本特性——静态特性和动态特性来反映被测物理量的这种变动性。当输入量为常量,或变化极慢时,这一关系就称为静态特性;当输入量随时间较快地变化时,这一关系称为动态特性。

一般情况下,传感器输出与输入关系可用对时间的微分方程来描述。理论上,将微分方程中的一阶及以上的微分项取为零时,便可得到静态特性。因此,传感器

的静态特性只是动态特性的一个特例。

传感器除了描述输出-输入关系的特性,还有与使用条件、使用环境、使用要求等有关的特性。

1.3.1 传感器静态特性与主要性能指标

静态特性表示传感器在被测物理量各个值处于稳定状态时的输出-输入关系。一般情况下,输出-输入关系不完全符合所要求的线性(或非线性)关系。衡量传感器的静态特性的重要指标:线性度、迟滞、重复性和灵敏度。

1. 线性度(linearity)

通常为了标定和数据处理方便,要求传感器的输出-输入关系是线性并能正确无误地反映被测量的真实值,但实际上只有在理想情况下,传感器的输出-输入静态特性才呈现直线性。

传感器如果没有迟滞及蠕变效应,其静态特性就可用下列多项式代数方程来表示:

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \cdots + a_nx^n \quad (1-1)$$

式中, x 为输入物理量; y 为输出量; a_0 为零位输出; a_1 为传感器灵敏度,用 k 表示; $a_2, a_3, \cdots, a_n$ 为非线性项的待定系数。这种多项式代数方程可能有 4 种情况,如图 1-2 所示。

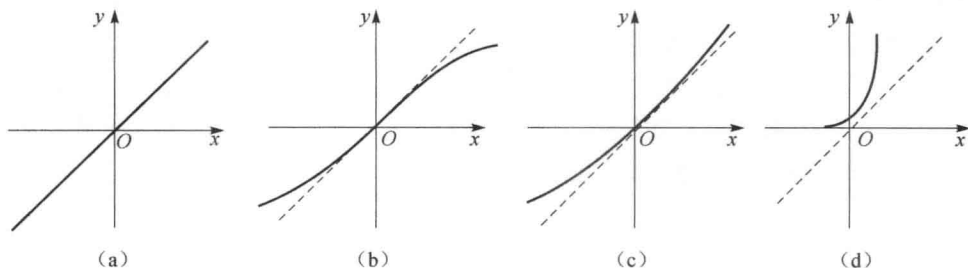


图 1-2 传感器静态特性曲线

(1) 理想线性,如图 1-2(a)所示,在这种情况下,

$$a_0 = a_2 = a_3 = \cdots = a_n = 0$$

因此得

$$y = a_1x \quad (1-2)$$

因为直线上任何点的斜率相等,所以传感器的灵敏度为

$$a_1 = \frac{y}{x} = k = \text{常数} \quad (1-3)$$