

Make:

Encyclopedia of Electronic Components Vol.3

电子元器件 实用手册



[美] Charles Platt, Fredrik Jansson 著 赵正译



传感器介质与类型:

定位 · 距离 · 方向 · 振荡 · 负载 · 人机交互 ·
液体和气体 · 光 · 热 · 声 · 电 · 力

传感器篇

电子元器件 实用手册

Encyclopedia of Electronic Components Vol.3

[美] **Charles Platt, Fredrik Jansson** 著

赵正 译

人民邮电出版社

北京

前言

本书为**电子元器件百宝箱**丛书的第三卷，主要介绍各种传感器的知识。

20 世纪 80 年代以来，传感器技术出现了两次大的飞跃，第一次飞跃起源于 MEMS（微机电系统）工艺的出现，低成本传感器在防抱死系统、安全气囊、排放控制等汽车应用中大量普及。第二次则起源于 2007 年 MEMS 设备在 iPhone 中的广泛应用。目前市面上的手机内部通常都含有多达十几种不同的传感器，这些传感器的个头儿之小、成本之低，在 20 年前是不可想象的。

如今市面上很多 MEMS 传感器已经降到了和稳压芯片、逻辑芯片等基本半导体器件差不多的价格，而且可以很方便地与微控制器连接。本书将主要向大家介绍未来十年仍可能有市场前景的新式传感器。

同时作者也留出了一部分篇幅给市场应用一直很广泛的经典元器件。

0.1 用途

本书中的内容大多可以在制造商的数据手册、宣传文档、互联网网页中找到，但是经过本书的汇集和讲解后，这些知识会更容易被消化和理解。

本书的另一个优势是将令人眼花缭乱的各种传感器做了详细分类。例如对**距离传感器**和**物体传感器**的分类，很多厂商的意见并不统一。在选择和使用传感器时，本书将帮助大家搞清楚各种传感器的异同。

传感器的名称有时也不太容易理解，例如**光遮断器**、**反射对象传感器**、**反射型光传感器**、**反射型光电传感器**、**光透传感器**，这些传感器究竟有什么区别呢？其实这些术语在不同的数据手册中通常都表示为**反射传感器**。了解这些不同的术语将有助于大家准确地在产品列表中找到需要的器件。

0.2 内容组织

与前两卷一样，本书以主题划分章节，例如有的读者需要测量温度，那么在他阅读完热敏电阻部分的内容后，紧接着就可以阅读热电偶部分内容，因为本书中所有热传感器的章节都是连续的。这种编排方式有助于读者方便地比较和选择所需传感器。每章第一页上方都有主题信息。例如气体流速一章上方的主题信息为：

流体 > 气体 > 流速

注意，气体和液体都可以称为“流体”。

0.2.0 特殊情况

有些特殊传感器实在难以归类。关于这些传感器一般会遇到以下 4 种问题。

1. 传感器的采集信号是什么？

GPS 芯片是一种射频接收器，可以接收卫星发射出的无线电波。但仅仅因为这个原因就应该将其归类为电磁波传感器吗？答案是否定的，因为 GPS 的主要功能是定位。这里引出了我们的第一个原则：传感器依靠其主要用途来分类。

2. 传感器中有多少个子传感器？

很多表面贴片封装的传感器芯片内部集成了很多子传感器。例如惯性测量单元（缩写为 IMU）内部一般包含 3 个陀螺仪和 3 个加速度传感器——有些还包含 3 个磁力计。这种传感器又该如何分类呢？

考虑到这种传感器的功能复杂度，本书的做法是将 IMU 器件分到不同章节共同讨论，并不对其开辟单独章节。本书每章都只围绕一种主要的传感器功能展开讨论。

3. 一种传感器可以采集多少种信息？

一种传感原理可以用在多种传感器中。最常见的是霍尔传感器，磁力计、物体感知传感器、速度传感器、电流传感器等类似器件中都用到了霍尔传感器。现在汽车上更是到处都有霍尔传感器的身影，例如点火传感器和后备箱锁传感器。如果你的电脑中有机械硬盘，那么硬盘里一般就有用来检测转速的霍尔传感器。如果你的电脑带有键盘，那么每个按键里都可能带有一个霍尔传感器。

请读者思考一下，霍尔传感器应该如何分类呢？将霍尔传感器的工作原理放在哪部分讲解更符合大家的阅读习惯呢？

本书的做法是只在书中一个位置详细解释一种传感器，其他涉及的章节添加交叉参照，引导读者查阅这个位置。

具体的位置根据关联度选择，因此霍尔传感器在物体检测传感器一章详述，因为这是它的主要功能。虽然霍尔传感器也可以用来测量磁场，但这并不是它的主要功能。

4. 海量传感器！

维基百科中的传感器种类已经超过了 100 类，而且这个数字还在增长中。因此本书必须对传感器分类做大幅精简。有些决定看似随意，其实是作者基于实用性精心规划的结果。本书对传感器的分类以及取舍基于以下 3 个原则。

(1) 是独立器件吗？相比功能复杂的集成器件，我们更倾向于关注板级独立封装传感器。例如市面上的热电偶通常是密闭的钢管探针，其导线通常直接连进显示温度的仪表中。而本书关注的目标则是导线内部的东西。

(2) 成本如何？用于工厂检测传送带的工业防水密封屏蔽超声波传感器性能卓越——但是价格也不菲。本书更倾向于向大家介绍更便宜的普通板级传感器。

(3) 受众是否广泛？供应商网站上一般会有每种传感器的库存信息。如果一个传感器库存长期不足，那很可能表示这种传感器用途不是很广泛。例如法拉加速度传感器可以通过检测旋转电动机轴上的涡流来确定电动机轴的振动幅度。这个原理非常有趣，但是对普通用户没有什么实用价值，因此本书并不对其做详细介绍。

0.3 丛书目录

以上介绍了本书内容的筛选和编排，下面是本丛书所有内容的汇总。

第一卷

电源，电磁设备，分立半导体器件。

电源类目中包含了可以产生、分发、储存、开关、转换电能的设备。电磁设备类目主要讲述可以对外产生平动或转动效果的电驱动设备。分立半导体部分则涵盖了常见的二极管、三极管。本丛书第一卷的目录见图 0-1。

主类目	次级类目	器件类型
功率器件	电源	电池
		连接器
	连接器	跳线
		保险丝
		按钮
		开关
		旋转开关
		旋转编码器
	调整	继电器
		电阻
		变阻器
		电容
		可调电容
		变换
	交流 - 交流变压器	
	交流 - 直流电源	
	直流 - 直流变换器	
	变换	直流 - 交流逆变器
		管理
线性输出		
	线性输出	螺线管
旋转输出		直流电动机
	交流电动机	
	伺服电动机	
	步进电动机	
分立半导体	单结	二极管
		单结晶体管
	多结	双极型晶体管
		场效应管

图 0-1 本丛书第一卷的主题分类。

第二卷

晶闸管（SCR、双向触发二极管和三端 SCR）；集成电路；光源，指示灯和显示器；声源器件。

集成电路分为模拟器件和数字器件两大类。光源、指示灯和显示器可以分为被动显示、单光源、自发光显示三部分。声源器件又分产生声音和回放声音两种。本丛书第二卷的目录见图 0-2。

主类目	次级类目	器件类型	
分立半导体	晶闸管	SCR	
		双端触发二极管	
		三端 SCR	
集成电路	模拟	固态继电器	
		光耦合器	
		比较器	
		运算放大器	
		数字分压器	
		定时器	
		数字	逻辑门
	触发器		
	移位寄存器		
	计数器		
	编码器		
	解码器		
	乘法器		
	光源、指示灯或显示设备	反射光源	LCD
		单一光源	白炽灯
霓虹灯			
荧光灯			
激光			
LED 指示灯			
LED 区域光源			
多光源或面板光源			LED 显示屏
真空荧光显示屏			
电发光			
声源	音频报警器	变频器	
		音频指示器	
	扩音器	耳机	
		扬声器	

图 0-2 丛书第二卷的主题分类。

第三卷

第三卷中包含了常见的传感器设备，包括检测位置、存在、距离、指向、振动、力、载荷、人机输入、液体特性、气体类型、浓度、压力、流速、光、热、声、

电等物理量的传感器。本丛书第三卷的目录见图 0-3。

主类目	感应量	传感器类型
空间	位置	GPS
		磁力计
	存在	物体检测
		被动红外
	距离	物体距离
		线性位置
	方向	旋转位置
倾斜		
陀螺仪		
		加速度
机械	振荡	振动
	力度	力度
	人机输入	单点触摸
触摸屏		
流体	液体	液体高度
		液体流速
	气体 / 液体	压力
	气体	气体压力
		气体流速
辐射	光	光敏电阻
		光敏二极管
		光敏三极管
	热	负温度系数热敏电阻
		正温度系数热敏电阻
		热电偶
		电阻式温度检测器
		半导体
		红外温度
	声	话筒
电量	测量	电流
		电压

图 0-3 丛书第三卷的主题分类。

0.4 方法

0.4.1 参考书与教材

从书名即可看出本书属于参考书类别，而不是教材。教材（例如作者的另一本书 *Make: Electronics*）

会从基础知识讲起，由浅入深向读者介绍各种知识。而参考书则不要求读者有严格的阅读顺序，读者可以随便翻到一个章节，对感兴趣的内容进行学习，并且随时可以脱离书本。由于参考书的每一章都必须自成一体，尽量相互独立，因此如果读者坚持从头到尾阅读参考书，那么会发现书中有很多重复的知识。

0.4.2 理论与实践

本书主要侧重于实践。令目标读者感兴趣的应该是电子元器件如何使用，而不是研究其工作原理。因此本书中的基础理论公式并不多。

0.4.3 传感器输出

在本丛书的第一卷和第二卷中，每章都会有关于器件使用方法的介绍。由于各种传感器的使用方法很相似，为了避免重复，作者将常见的9种传感器用法统一汇集在了本书附录A中。

举个例子，很多传感器输出与采集成比例的模拟电压信号。在附录A中，读者可以查到如何放大模拟输出信号和如何使用A/D转换器将模拟信号转换成数字信号等知识。

SPI、I²C等串行接口也是常见的传感器输出接口，这种接口很容易与微控制器总线对接。

0.4.4 术语表

传感器领域有很多反复出现的名词，例如**滞回**和**MEMS**。为避免反复定义这些术语，本书将其汇集到术语表中。读者在阅读时遇到不熟悉的术语可以随时翻阅术语表。

本书用**斜体字**标识的术语多数都能在术语表中找到解释。

0.4.5 排版约定

在每章里，具有独立条目的器件第一次出现时，统一以**黑体字**标示。其他重要电子术语或器件名称用**斜体字**标示。

器件的英文名称和所属分类用小写字母表示（缩写、商标或人名除外）。由于GPS是由3个单词缩写组成的，因此3个字母均大写。psi（磅每平方英寸）是一个例外，因为其小写表示更为常见。

为纪念电子先驱，有些单位是以人名命名的。这时一般用名称表示，例如在国际单位制中，力的单位为“牛顿”。而当人名用缩写表示时，首字母一般大写，例如

牛顿简写为N，赫兹简写为Hz，帕斯卡简写为Pa，安培简写为A等。

0.4.6 数学符号

在表示数学公式时，作者采用与编程语言类似的书写规范。“×”表示乘法符号，/（正斜杠）表示除法符号。公式中圆括号中的计算应该优先进行。有括号嵌套时，最内层括号中的计算最优先进行。因此在下式中：

$$A = 30 / (7 + (4 \times 2))$$

最先计算的应该是4乘以2，得到8，然后再加7，得到15，最后再与30进行除法运算，最终得到A的值2。

0.4.7 绘图风格

图0-4所示为本书采用的原理图绘制风格。黑点表示连接，为了避免混淆，十字连接时本书不采用右上图中的绘制方式，而是采用左上图的方式。导线相交处没有黑点时表示没有电气连接。本书不采用右下角的绘制方式。

所有的原理图都以淡蓝色作为背景，这样在需要高亮开关、三极管、LED灯时，可以使用白色。请读者仔细分辨元器件的边框，白色区域没有其他意义。

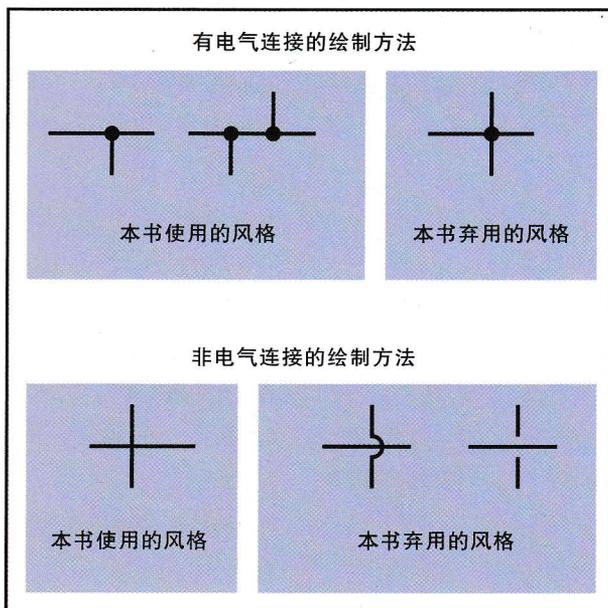


图0-4 本书使用的原理图绘制风格。

0.4.8 单位与背景

由于美国国内一直有使用英制单位的习惯，为方便美国读者的阅读，本丛书第一卷和第二卷都没有采用公制单位。但随着时间的推移，本丛书被翻译成各种语言

并在世界范围内销售，因此继续使用英制单位就显得不合时宜了。

为了照顾全球的读者，除极少数场合（例如提到美国 3/4 英寸厨卫管道的部分），本书第三卷中的大部分内容都改用了大家更熟悉的国际单位制单位。下面是国际单位制单位中常见的缩写和转换关系：

- 1nm（纳米）
- $1\mu\text{m}$ （微米）= 1000nm
- 1mm（毫米）= 1000 μm
- 1cm（厘米）= 10mm
- 1m（米）= 1000mm

微米尺也称为千分尺。

米与英寸的比例关系是 1:0.0254，即：

- 1 英寸 = 2.54cm = 25.4mm
- 1/1000 英寸 = 25.4 μm

1/1000 英寸有一个单独的名称叫作密尔。

书中元器件照片多数以网格为背景，网格表示的实际尺寸为 1mm。

本书很多图片都与作者的另一本书 *Make: Electronics* 相同，但是两本书中网格的尺寸不同。请大家注意区分。

本书图片背景颜色的选取以突出元器件或保证清晰度为标准，背景颜色本身并没有其他含义。

0.4.9 元器件生命周期

传感器的发展速度很快，作者很难预测各种传感器还能流行多久。因此建议读者选取传感器时，结合以下供应商网站来判断：

- <http://www.mouser.com>
- <http://www.jameco.com>
- <http://www.sparkfun.com>
- <http://www.adafruit.com>

寻找过时淘汰的元器件可以去淘宝或 eBay 等网上商城，也可以去 <http://www.mouser.com> 网站寻找替代品。

0.5 问题与勘误

读者可以通过以下 3 种渠道与作者取得联系：

- [us-informing-you](#) 是作者向大家更新勘误信息的渠道。
- [you-informing-us](#) 是读者向作者反馈勘误信息的渠道。
- [you-asking-us](#) 是读者与作者讨论问题的渠道。

以下是这些渠道的详细用法。

0.5.1 Us Informing You

如果读者已经有 *Make: Electronics*（第二版）或 *Make: More Electronics* 的订阅账号，那么可以直接用于本书。新用户首次使用需要邮箱订阅。

只有正确提交了自己的邮箱信息，才能保证及时收到本书的推送信息，包括：

- 本书重大勘误信息。
- 本书或作者其他著作的最新版本信息。

除此以外作者不会泄露您的个人信息。

订阅方法是发送主题为“REGISTER”的任何内容的邮件（包括空白邮件）到：

make.electronics@gmail.com。

0.5.2 You Informing Us

如果您确认找到了本书的勘误信息，可以打开以下网页，根据网页提示完成提交。

http://bit.ly/encyclopedia_electronic_components_v3

0.5.3 You Asking Us

由于时间关系，作者不能与所有读者一对一沟通。读者可以发送主题为 HELP 的邮件到 make.electronics@gmail.com，获取 QA 信息。

0.5.4 在线论坛

网上有很多知名电子论坛，大家可以去论坛讨论本书相关知识，但是作者恳请大家慎重公正地行使这份权利。负面评价产生的影响通常比您想象的要严重得多，一个负面评价甚至可以抵消好多个正面评价。

很多读者抱怨一些小问题，例如不知道如何上网搜索器件，读者可以直接将这些问题发送至 make.electronics@gmail.com，作者会尽力解答。

0.6 Safari Books Online



Safari Books Online 是可定制的专业数字图书馆，其中汇集了全球很多优秀作者的图书和视频。

很多技术专家、程序员、商务人士和发明家都将 Safari Books Online 作为首选的知识库。

Safari Books Online 可以为**企业、政府、教育界和个人**提供全套**知识解决方案**。

Safari Books Online 的成员可以在数据库中搜索获取成千上万个文献、培训视频、未出版手稿等正规信息。为 Safari Books Online 提供内容的出版商包括 O'Reilly Media, Prentice Hall Professional, Addison-Wesley Professional, Microsoft Press, Sams, Que, Peachpit Press, Focal Press, Cisco Press, John Wiley & Sons, Syngress, Morgan Kaufmann, IBM Redbooks, Packt, Adobe Press, FT Press, Apress, Manning, New Riders, McGraw-Hill, Jones & Bartlett, Course Technology 等。

本书勘误的链接为 <http://bit.ly/encyclopedia-electronic-components-v3>。

“爱上制作”丛书的宗旨是激励和团结各种兴趣爱好者，帮助大家在任何地方实现各种电子小发明。目前号称 Make 运动的文化社区已经在全世界火热传播中，欢迎大家加入。

关于 Make 运动更多的信息，大家可以参阅以下网址：

Make: magazine: <http://makezine.com/magazine>

Maker Faire: <http://makerfaire.com>

Makezine.com: <http://makezine.com>

Maker Shed: <http://makershed.com>

如果读者有与本书相关的技术问题需要讨论，可以发送邮件至：

bookquestion@oreilly.com。

0.7 鸣谢

本书在创作中大量借鉴了供应商提供的在线器件手册和使用说明。作者从元器件分销商、院校文献、各种参考书和业余网站也汲取了很多珍贵的写作素材。除此以外，以下图书也提供了有益信息：

Boylestad, Robert L. and Nashelsky, Louis:

Electronic Devices and Circuit Theory, 9th edition. Pearson Education, 2006.

Braga, Newton C.: *CMOS Sourcebook*. Sams Technical Publishing, 2001.

Hoening, Stuart A.: *How to Build and Use Electronic Devices Without Frustration, Panic, Mountains of Money, or an Engineering Degree*, 2nd edition. Little, Brown, 1980.

Horn, Delton T.: *Electronic Components*. Tab Books, 1992.

Horn, Delton T.: *Electronics Theory*, 4th edition. Tab Books, 1994.

Horowitz, Paul and Hill, Winfield: *The Art of Electronics*, 2nd edition. Cambridge University Press, 1989.

Ibrahim, Dogan: *Using LEDs, LCDs, and GLCDs in Microcontroller Projects*. John Wiley & Sons, 2012.

Kumar, A. Anand: *Fundamentals of Digital Circuits*, 2nd edition. PHI Learning, 2009.

Lancaster, Don: *TTL Cookbook*. Howard W. Sams & Co, 1974.

Lenk, Ron and Lenk, Carol: *Practical Lighting Design with LEDs*. John Wiley & Sons, 2011.

Lowe, Doug: *Electronics All-in-One for Dummies*. John Wiley & Sons, 2012.

Mims III, Forrest M.: *Getting Started in Electronics*. Master Publishing, 2000.

Mims III, Forrest M.: *Electronic Sensor Circuits & Projects*. Master Publishing, 2007.

Mims III, Forrest M.: *Timer, Op Amp, & Optoelectronic Circuits and Projects*. Master Publishing, 2007.

Predko, Mike: *123 Robotics Experiments for the Evil Genius*. McGraw-Hill, 2004.

Scherz, Paul: *Practical Electronics for Inventors*, 2nd edition. McGraw-Hill, 2007.

Williams, Tim: *The Circuit Designer's Companion*, 2nd edition. Newnes, 2005.

作者还要感谢为本书出版提供大力帮助的编辑 Brian Jepson，审核本书的 Philipp Marek 以及负责照片处理的 Erico Narita。

目录

1	GPS	1
1.1	它可以做什么	1
1.1.1	原理图符号	1
1.1.2	GPS 子模块	1
1.2	它如何工作	1
1.3	演变	2
1.4	参数	2
1.5	如何使用它	2
1.5.0	每秒脉冲输出数	3
1.6	禁止事项	3
1.6.1	静电放电	3
1.6.2	接地不良	3
1.6.3	虚焊	3
1.6.4	许可限制	3
1.6.5	搜星失败	3
1.6.6	速度或高度超出限定值	3
2	磁力计	5
2.1	它可以做什么	5
2.1.1	原理图符号	5
2.1.2	IMU	5
2.1.3	应用	5
2.2	它如何工作	6
2.2.1	磁场	6
2.2.2	地轴	6
2.2.3	线圈磁力计	7
2.2.4	霍尔效应和磁阻	7
2.3	演变	7
2.4	如何使用它	8
2.5	禁止事项	8

2.5.1	磁干扰.....	8
2.5.2	安装不当.....	8
3	物体检测传感器	9
3.1	它可以做什么.....	9
3.1.0	原理图符号.....	9
3.2	演变.....	10
3.3	光检测.....	10
3.3.1	透射型光传感器.....	11
3.3.2	对射型光传感器.....	12
3.4	磁传感器.....	13
3.5	簧片开关.....	13
3.5.1	簧片开关种类.....	14
3.5.2	簧片开关参数.....	14
3.5.3	如何使用簧片开关.....	14
3.6	霍尔效应传感器.....	14
3.6.1	霍尔效应传感器的工作原理.....	15
3.6.2	霍尔效应传感器的种类.....	15
3.7	参数.....	15
3.8	如何使用霍尔效应传感器.....	15
3.9	如何使用物体检测传感器.....	15
3.9.1	线性移动检测.....	15
3.9.2	中断检测.....	16
3.9.3	角度检测.....	16
3.10	不同传感器的优缺点汇总.....	16
3.10.1	光学物体检测传感器的优点.....	16
3.10.2	光学物体检测传感器的缺点.....	16
3.10.3	簧片开关的优点.....	16
3.10.4	簧片开关的缺点.....	16
3.10.5	霍尔效应传感器的优点.....	17
3.10.6	霍尔效应传感器的缺点.....	17
3.11	禁止事项.....	17
3.11.1	光传感器.....	17
3.11.2	簧片开关.....	17
4	被动式红外传感器	19
4.1	它可以做什么.....	19
4.1.1	原理图符号.....	19
4.1.2	应用.....	19
4.2	它如何工作.....	19
4.2.1	热释电传感器.....	20
4.2.2	检测单元.....	20
4.2.3	镜头组.....	20
4.3	演变.....	22
4.4	禁止事项.....	23
4.4.1	高温灵敏度衰减.....	23
4.4.2	检测窗口损坏.....	23
4.4.3	受潮.....	23

5	距离传感器	25
5.1	它可以做什么	25
5.1.1	原理图符号	25
5.1.2	应用	25
5.2	演变	25
5.2.1	超声波	25
5.2.2	红外线	26
5.2.3	相对优势	26
5.3	常见的超声波传感器	26
5.3.1	进口产品	27
5.3.2	独立元器件	27
5.4	红外线传感器常见型号	27
5.4.0	红外线距离传感器的发展趋势	28
5.5	电容位移传感器	28
5.5.0	应用	29
5.6	它如何工作	29
5.6.1	误差来源	29
5.6.2	参数	29
5.7	光或超声波距离传感器的注意事项	29
5.7.1	待测物体距离太近	29
5.7.2	信号源混杂	30
5.7.3	反射面选取不当	30
5.7.4	环境因素	30
5.7.5	LED 老化	30
6	线性位置传感器	31
6.1	它可以做什么	31
6.1.1	应用	31
6.1.2	原理图符号	31
6.2	它如何工作	31
6.2.1	线性电位计	31
6.2.2	磁性线性编码器	32
6.2.3	光学线性编码器	33
6.2.4	线性编码器的应用	33
6.2.5	线性可变差动变压器	33
6.3	注意事项	34
6.3.1	机械故障	34
6.3.2	LED 老化	34
7	旋转位置传感器	35
7.1	它可以做什么	35
7.1.1	应用	35
7.1.2	原理图符号	35
7.2	电位计	35
7.2.1	弧形旋转电位计	35
7.2.2	限位柱	36
7.2.3	多匝旋转电位计	36
7.2.4	磁旋转位置传感器	36

GPS

1

GPS 是全球定位系统的缩写，是由很多卫星和地面控制单元组成的系统。而 GPS 传感器则是可以接收并解析 GPS 卫星信号的表面贴片封装芯片，一般带有方形天线，天线安装在 GPS 芯片上。

GPS 模块是装有 GPS 传感器的小型半成品电路板。GPS 接收器是带有显示屏、存储器和 GPS 模块的成品设备。日常生活中人们通常将 GPS 接收器简称为“GPS”。

GPS 一般固定用大写字母。

其他相关元器件

· 磁力计（见第 2 章）

1.1 它可以做什么

全球定位系统是由美国能源部和国防部共同赞助、由美国空军维护的联合救助导航系统。大到飞行器，小到电子表，各种内嵌 GPS 模块的设备都可以接收并解析 GPS 卫星信号，并从 GPS 卫星信号中解析出位置信息和精确的时间信息。

1.1.1 原理图符号

GPS 芯片并没有统一的原理图符号。GPS 在电路图中的画法与集成电路芯片类似，即带有解释文字和引脚信息的方块。

1.1.2 GPS 子模块

全球定位系统由 3 大部分构成。

空间部分

空间部分最初由 24 颗卫星组成，为实现更好的信号覆盖，2011 年经过系统修订，卫星数量增加到了 27 颗。截至 2015 年 8 月，正在运行的 GPS 卫星数量为 31 颗，还有必要时可激活的冗余“应急”卫星。GPS 卫星运行在距地面 12500 英里（约 20116 千米）高的轨道上，每 24 小时绕地球两圈。其运行规则在网上向大众开放。

控制部分

控制部分包含一个主地面控制站和一个替换主控制站，12 个指挥控制天线、16 个监测站点。控制部分全部由美国空军负责维护。

用户部分

用户部分由各种军用、民用接收设备组成。

1.2 它如何工作

每个 GPS 卫星都装载有若干用于计时的原子钟和用线性反馈移位寄存器构成的伪随机码生成器（见本丛书第二卷）。

根据接收到的伪随机码的不同，GPS 接收机可以同时接收 4 路以上的卫星信号，并根据不同信号的时间延时，分别得到与这些卫星之间的距离。

当卫星从地平线上升起时，它与接收机的距离会逐渐减小。在越过头顶后，又逐渐增加。根据多普勒频移原理，这种距离上的动态改变会导致接收机接收到的频率也跟着变化，这是接收机电路需要考虑的问题。

GPS 卫星同时在几个频率对外发射信号。民用频率为 1575.42MHz，代号 L1。军用频率为 1227.6MHz，代号 L2。

1.3 演变

GPS 芯片的输入路径为天线，输出路径为电路引脚。天线一般是正方形或长方形的陶瓷介质，安装在芯片的正上方，也有很多芯片支持外接天线。图 1-1 是一种外接天线的 GPS 芯片，其方形金属屏蔽罩很容易被误认成天线。图 1-2 是一种表面集成陶瓷天线的 GPS 传感器。

某些 GPS 芯片内部集成闪存，可以存储历史数据，但闪存并不是标配。

Adafruit 和 Sparkfun 公司都有直接将 GPS 模块集成在小 PCB 上的半成品销售，如图 1-2 所示。有些甚至还集成了备用纽扣电池。



图 1-1 一种带有金属屏蔽罩的 GPS 传感器模块，屏蔽罩下方是 PCB。

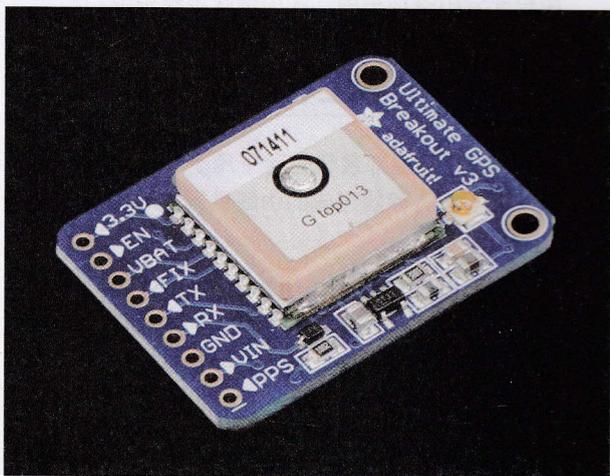


图 1-2 Adafruit 公司出品的 GPS 传感器模块。

如今所有的智能手机和平板电脑几乎都配备了 GPS 功能。借助于这些手持或车载设备，用户可以很方便地享受实时导航功能。

GPS 追踪器的工作模式比较简单，一般只是不停地往内存中记录位置数据，其本身并不带显示设备，

用户可以通过电脑下载记录的数据。很多（老式）手持 GPS 接收器都自带串口或 USB 接口，可以向外界发送 NMEA 格式的数据，NMEA 格式见下文。

随着全球定位系统的流行，其他系统也如雨后春笋般问世。其中包括欧洲伽利略（Galileo）、俄罗斯 GLONASS（全球导航卫星系统缩写）、中国北斗等。截至 2015 年，GLONASS 系统已经完全运行正常。很多 GPS 接收器都可以同时接收 GPS 和 GLONASS 卫星信号，以提高定位精度。

1.4 参数

灵敏度的单位为 dBm，表示以 1mW 为参考功率的功率比分贝数。

首次定位时间（TTFF）表示根据卫星完成首次定位的时间。

频道数是 GPS 接收器可以同时接收的卫星信号数量。老式 GPS 接收器只能同时采集 4 个频道。现在的接收器可以同时采集多达 22 个频道的数据。

功耗的单位一般是 mW（毫瓦）。例如 G.top 公司宣称其 FGPMOPA6H 型 GPS 独立模块搜星阶段和追踪阶段的功耗分别为 82mW 和 66mW。若供电电压为 4V（直流），那么对应的电流值分别为 20mA 和 17mA。

尺寸。即芯片本身的物理尺寸，通常由顶部的陶瓷天线决定。常见尺寸为 15mm × 15mm 或更大。

更新速率。表示每秒钟能检测多少次位置信息。一般更新速率为 1 即可以满足普通应用要求，很多 GPS 芯片更新速率会更高。更新速率的单位为 Hz。

输出类型。GPS 芯片通常输出基于 TTL 电平的 NMEA 数据，一般比特率可调。

供电电压。通常小于 5V（直流）。

电流消耗。一般搜星时电流较高。

1.5 如何使用它

GPS 模块只需直流电源即可工作，并且在搜索到卫星后立即通过串口输出数据。

GPS 模块输出基于纯 ASCII 码的 NMEA 协议数据，这种协议是由美国国家海事电子协会（National Marine Electronics Association）发明的。每一段数据称为一段**报文**，每段报文可以独立被解析，不依赖上下文。默认的报文传输比特率为 4800bit/s，串口格式为 8 位数据位，1 位停止位，无奇偶校验。也有很多

GPS 模块的比特率为 9600bit/s 甚至更高。

报文的前两个字节表示发送者身份，对于 GPS 设备来说，前两个字符为 GP，后 3 个或多个字节为数据类型前缀，供数据解析时使用。

剩下的数据为纯 ASCII 信息。数据之间用逗号分隔。每个报文内容不超过 80 字节。每段报文内包含了从 GPS 信号中解析出的当前位置信息，包括经度、纬度、高度信息。制造商添加的私有信息以字母 P 开头。

为突破 80 字节限制，很多 GPS 设备都定义了多种可续传报文类型。每种报文带有不同前缀，详见制造商数据手册。

GPS 的芯片输出信号不一定兼容微控制器输入，但是装在 PCB 上的 GPS 产品一般都带有稳压器，并可以直接和单片机通信。微控制器可以读取 GPS 芯片的输出信息，通过使能引脚控制 GPS 芯片工作，或者控制 GPS 模块记录日志。互联网上有很多用来控制 GPS 模块的成熟代码可供参考。

1.5.0 每秒脉冲输出数

GPS 的工作原理是根据无线信号的传播时间推算出距离，进而完成定位，因此精准的计时能力必不可少。当 GPS 定位到当前位置时，同时也就精确获得了当前时间。因此 GPS 接收器不但能够定位，还能提供时间和频率基准。很多 GPS 接收器都同时输出定位和时间信息，还有的接收器可以输出 PPS 信号，即频率为 1Hz 的脉冲信号。

GPS 接收器输出的时间还可以用来校准石英晶体振荡器，根据 GPS 的时间基准不断调整晶体频率，使之稳定。

1.6 禁止事项

GPS 芯片或模块的抗干扰性一般比不上完整设备。

1.6.1 静电放电

GPS 天线直接连接到芯片的输入引脚。因此如果

天线受到静电干扰，很容易使芯片损坏。同样，RF 输入引脚直接受到烙铁头的静电影响，也会导致芯片损坏。在围绕 RF 输入引脚进行焊接操作时，芯片或烙铁必须良好接地。

1.6.2 接地不良

在上电使用前，GPS 模块或芯片的 GND 引脚必须提前接地。

1.6.3 虚焊

GPS 芯片的天线回路相当于一个大散热器，因此在焊接安装芯片时，必须特别注意天线引脚，防止温度不足导致虚焊。

1.6.4 许可限制

美国法规对 GPS 设备做了某些限制，例如部分出口 GPS 设备的定位刷新速率不能超过限定值，以防止这些设备被用在军用飞机或导弹中。同时美国法规对美国以外的供应商也做了不同程度的限购措施。

1.6.5 搜星失败

在非空旷环境下，大部分 GPS 设备都接收不到卫星信号，除玻璃以外，GPS 信号很难穿过障碍物，例如墙壁、屋顶、厚厚的木材或其他障碍物。

1.6.6 速度或高度超出限定值

安全法规规定，GPS 设备正常工作的最高高度为 6000 英尺（1 英尺 = 0.3048 米），最大速度为 1200 英里 / 小时（1931.2km/h），否则 GPS 设备将停止工作。因此在业余火箭或热气球上应用 GPS 导航时需要特别注意。

磁力计

2

本章所说的磁力计是指专门用于检测地球磁场的磁传感器。除此以外还有很多用作其他用途的小型磁传感器，例如可以用来检测机械元器件转速的霍尔传感器。霍尔传感器有物体感知功能，本书将在第3章**物体检测传感器**中的“霍尔效应传感器”部分对其做详细描述。

老式的**磁力计**带有旋钮、控制杆和显示器，外形非常笨重。本书提到的磁力计专指基于芯片的先进磁传感器。

其他相关元器件

- 加速度计（见第10章）
- 陀螺仪（见第9章）
- GPS（见第1章）

2.1 它可以做什么

传统指南针是一条可以自由旋转的细长磁化金属条，其指向由地球磁场决定。

标量磁力计可以测量磁场的强度值。而**矢量磁力计**则可以测量每个方向上的磁场强度，同时可以测出测量设备当前指向与地球磁场之间的夹角。

基于芯片的磁力计一般是**矢量磁力计**，内含3个方向互相垂直的独立磁传感器。与配套的解析软件配合使用，即可读取磁北极和磁南极的方向，而且测量设备本身并不需要水平放置。

2.1.1 原理图符号

磁力计并没有统一的原理图符号。

2.1.2 IMU

陀螺仪可以测量其附着设备的旋转速率（**角速度**）。同时陀螺仪也可以测量转速的变化，但不能测量物体的平动速度或水平倾角。

加速度计可以测量物体平动速度的变化量和与重力间的夹角，但无法测量以自身为轴旋转时的角速度。

将加速度计和陀螺仪封装在一起（也可以集成磁力

计），就变成了**IMU**（惯性测量单元）。IMU可以为飞机、航天器、船舶提供非常有帮助的位置信息，在GPS定位不可用的情况下，IMU尤为重要。

2.1.3 应用

电子指南针、摄像头、手机等手持电子设备内一般都有磁力计。小体积表面贴片封装的磁力计销量最大，通常可以直接兼容微控制器接口。市面上也有集成在PCB上的半成品模块销售，适合业余爱好者或产品原型测试阶段使用。图2-1是Honeywell公司的HMC5883L型磁力计模块。

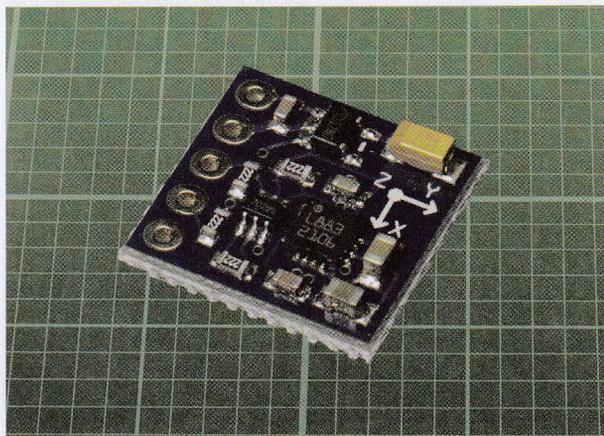


图2-1 Honeywell公司型号为HMC5883L的3轴磁力计模块。图中背景网格的最小边长为1mm。

2.2 它如何工作

要理解磁力计的工作原理，必须先了解磁场的基本概念。

2.2.1 磁场

人们用表示磁场强度和方向的**磁力线**来绘制磁场。图 2-2 是最简单的磁场绘制图，空间上任何一点的磁力线密度与此处的**磁通密度**成正比，而磁力线的切线方向即为此处的磁场方向。（关于磁场更详细的解释见本书第一卷中的“**磁场**”章节。）

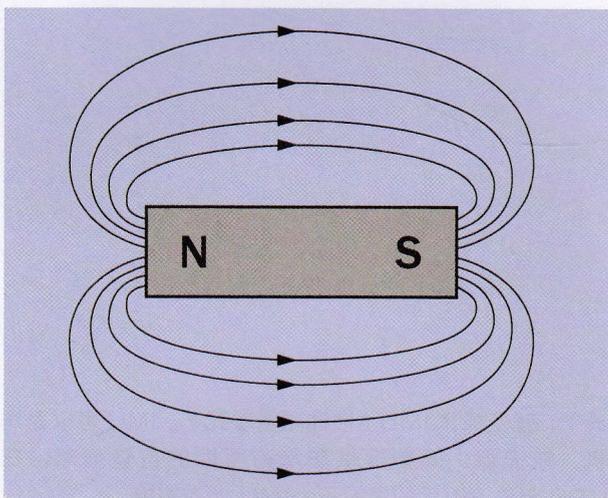


图 2-2 条形磁铁产生的磁场图。磁力线之间的密度与磁场强度成正比。真实的磁场是三维的，三维空间中的磁场线绕磁铁旋转，为轴对称图形。

磁通密度通常用字母 B 表示，单位为**牛·米/安培**，也叫**特斯拉**（ T ）。过去人们习惯用**高斯**（ G ）单位衡量磁通密度， $1T$ 等于 $10000G$ 。现在市面上依然有一些文档使用老旧的高斯单位。

人们认为地球磁场源于地球内核外部液体的对流。地球表面的磁场强度大约在 $25 \sim 65mT$ （ $0.25 \sim 0.65G$ ）。从磁场角度看，地球就像是一个两端在地磁南极和地磁北极的大磁棒，如图 2-3 所示。

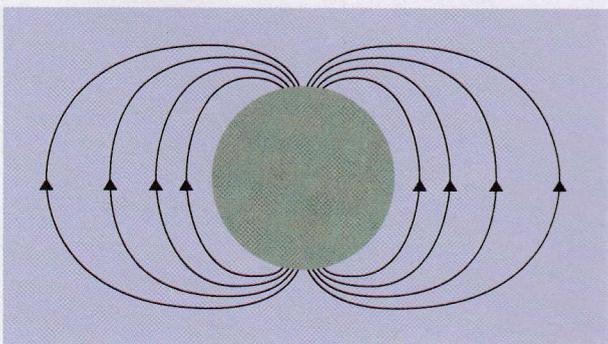


图 2-3 地球的磁场与磁棒相似。

在南北两极，磁场方向与地面垂直；而在赤道附近，磁场方向则与地面平行。因此赤道附近测量到的水平磁场强度要大于在两极测量到的水平磁场强度。

磁场与地面的夹角称为**仰角**，根据某点的仰角和磁场强度可以大致推断出当地的经纬度，当然要进行精准的位置定位还要依靠采用卫星的**GPS**（全球定位系统）。

由于地理南极对应地磁北极，而地理北极对应地磁南极，因此当用旋转永磁铁测量地磁场时，其北极应该指向所谓的**地磁北极**。

2.2.2 地轴

地球围绕着一根虚拟的轴不停自转，这个轴称为**地轴**。地轴与连接地磁南极和地磁北极的**磁轴**接近但并不重合，如图 2-4 所示。

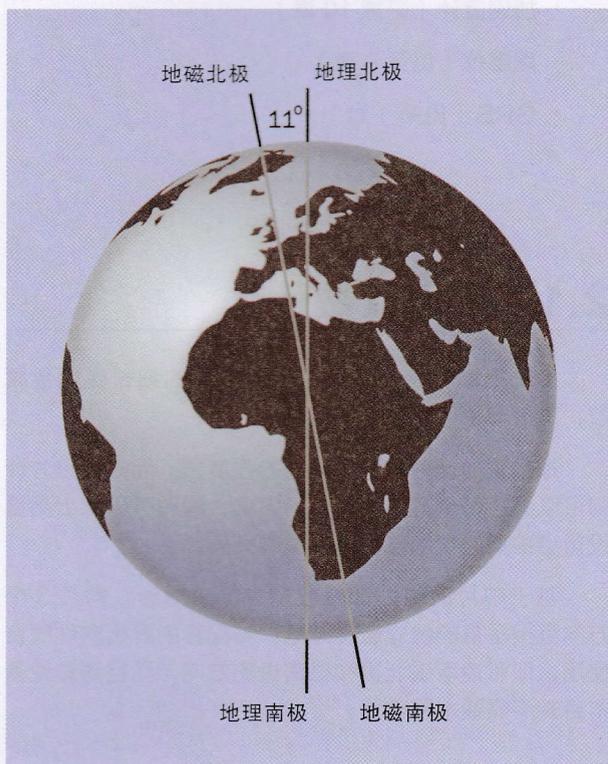


图 2-4 磁轴和地轴之间的夹角约为 11° 。

地球磁倾角是从地球表面观察到的地磁北极和地理北极之间的夹角。这个角度随观察者的位置变化而变化。

由于磁倾角的存在，地球表面的磁场方向会随经纬度的变化而变化，如图 2-5 所示。图中磁子午线用红色表示，地理子午线用绿色表示。磁子午线表示地球磁场的走向，而地理子午线则以地轴为基准绘制，从图中可以看出，地球表面某些区域的红线和绿线接近重合，而有些区域红线和绿线的夹角超过 40° 。



图 2-5 红线表示地表指南针的指向。绿线表示地表朝两极轴的方向（图片来自维基百科）。

人们总结出了汇集地球表面的标准磁仰角表，将指南针或磁力计测量到的数据加上或减去表中的数据，即可获得地理北极的精确方向。车辆和船舶导航系统输出的指向通常是校准后的地理北极指向，如图 2-6 所示。

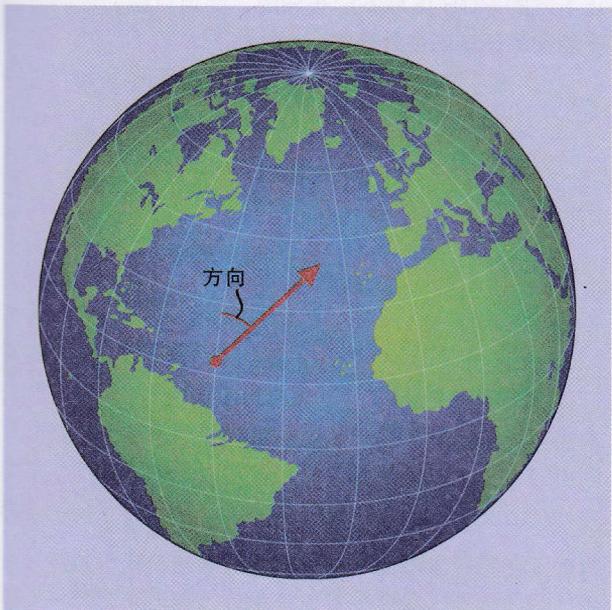


图 2-6 图中“方向”指当前方向与地理北极的夹角。

2.2.3 线圈磁力计

线圈中导通电流时，其周边会产生磁通密度与电流大小成正比的磁场。相反，变化的磁场也会在导线中产生电流。这就是线圈磁力计的工作原理。通过将线圈磁力计的线圈在土地上方不断移动，即可检测到下面埋藏磁性物体。旋转线圈磁力计还可以检测固定磁场。但

是这种设备的缺点是测量线圈的体积比较大。

2.2.4 霍尔效应和磁阻

现代手持设备中的磁力计原理一般为霍尔效应（见“霍尔效应传感器”一节）和磁阻两种。

磁阻现象是指材料的电阻随周边磁场的变化而变化的现象。依照这种现象制造的磁力计要比霍尔效应磁力计更为精准，但是成本也更高。

常见的表面贴片封装磁力计有 X、Y 和 Z 三个相互正交的轴。模拟磁传感器对外输出模拟信号，因此使用时需要搭配模拟数字传感器（ADC）。数字磁传感器则能够将采集到的数据存储在寄存器中，其他设备可以通过 I²C 等协议读取寄存器中的数据。

数字磁力计每轴对应 2 个 8 位传感器，用来存储采集到的数据。实际应用中一般只有 10 ~ 13 位为有效数据，剩下的 3 ~ 6 位没有意义。

2.3 演变

Freescale 公司的 FXMS3110 是一种低成本三轴磁传感器。此外还有很多将磁传感器和加速度传感器集成在一起的产品，例如 STMicroelectronics 公司的 LSM303 芯片，Adafruit 公司将其进一步封装成了半成品模块，如图 2-7 所示。

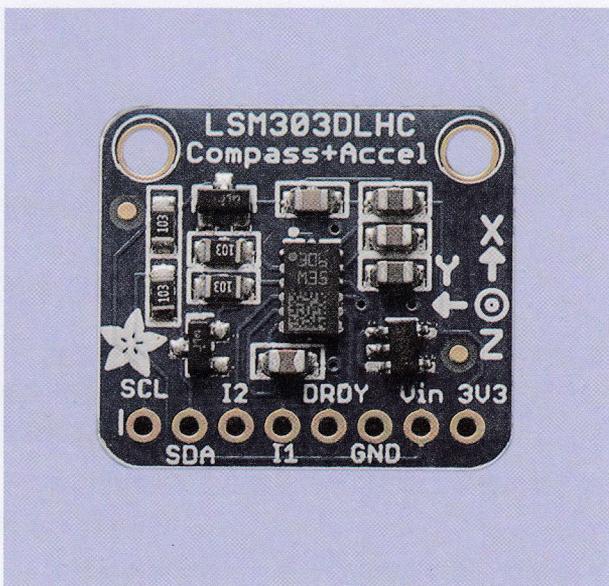


图 2-7 LSM303 是 STMicroelectronics 公司的传感器芯片，Adafruit 公司基于这种芯片开发了图中的半成品模块。

关于加速度传感器的原理见本书第 10 章。

InvenSense 公司的 MPU-9250 是一颗高精度 IMU 芯片，内含三轴陀螺仪、三轴磁传感器和三轴加

速度传感器。

MPU-9250 的内部处理器可以同时采集和转换 9 路变量，并将其通过 I²C 或 SPI 总线以高达 1MHz 的速率输出到其他设备。而其芯片大小仅为 3cm²。

关于陀螺仪传感器的原理见本书第 9 章。

2.4 如何使用它

对于简单的三轴数字磁力计来说，使用微控制器就可以直接通过 I²C 接口读取其测量数据，例如 HMC5883L。使用 Arduino 平台尤为简单。

市面上有很多基于 HMC5883L 的现成模块。一般模块中都有 2.5V 稳压源，因此外部可以直接用 5VDC 电源供电。

除电源以外，模块只需要接出 SCL（串行时钟输入）和 SDA（串行数据输入 / 输出）两根引脚线即可通过 I²C 协议与外界通信。微控制器可以通过 I²C 驱动来读取磁力计的寄存器数据。配合更高级的软件，微控制器还可以将原始寄存器数据转换成磁力计 X 轴、Y 轴和 Z 轴的磁场值（特斯拉），网络上有很多这方面的开源软件可供选用。

MPU-9250 的用法与之类似，只是需要处理的数据更多而已。网络上同样有现成的 IMU 代码可供使用。Sparkfun 公司对老款的 MPU-9150 模块提供代码支

持，为用户免去了很多编码工作。

2.5 禁止事项

2.5.1 磁干扰

磁力计受环境磁场影响很大，常见的**磁干扰**有两种。

硬磁干扰是指磁力计所属设备本身的磁性物质带来的干扰。设备内部的磁性物质一般是固定的，因此对应的补偿工作较为简单。

软磁干扰是指地球磁场的变化和磁力计周边的可磁化材料带来的干扰。

常见的软磁干扰是电力线，电力线周边会产生磁场，这种磁场会干扰使用磁力计导航的模型飞机、无人驾驶飞机的正常飞行。

2.5.2 安装不当

磁力计芯片在电路板上的安装位置很有讲究。电路板上的变压器、继电器，甚至低电压、低电流导线都会产生足以干扰磁力计测量的磁场。一般规定磁力计芯片正下方的 PCB 区域不能布导线，而且有磁力计的产品不能安装在铁磁性外壳内。

物体检测传感器

3

物体检测传感器也叫物体检测器或检测传感器，有时人们也称之为**距离传感器**。

本书将距离传感器定义为可以测量目标距离的传感器，并将其放在第 5 章介绍。物体检测传感器仅仅检测预定范围内是否有物体存在，除此以外并不提供其他信息。

本章将对比介绍光学或电磁物体检测传感器的特性。本书将超声波传感器归为距离传感器。电容、多普勒、电感、雷达、声纳等特殊物体检测传感器不在本书介绍范围内。

通过检测反射光来确定物体存在的传感器称为反射传感器，本章一并介绍。（自带光源和光传感器的器件也叫对射式传感器。）

本章内容还包括穿透式传感器，这种传感器依靠光线的通断来感知物体存在，又叫光开关。

检测物体移动时辐射出的红外线的设备称为**被动红外移动传感器**，简称 PIR，有时也简称为移动传感器。关于这种传感器的知识见本书第 4 章。

光敏三极管和光敏二极管一般是物体传感器里的传感单元，详见第 21 章和第 22 章的光传感器部分。

其他相关元器件

- 距离传感器（见第 5 章）
- 被动红外传感器（见第 4 章）

3.1 它可以做什么

物体检测传感器可以在预定范围内判断是否有物体存在，但不能检测物体的精确位置和移动速度。被检测物体也叫**目标**。

物体检测传感器通常用来监督自动化系统的工作状态——例如传送带上有没有放置好物体，或者对经过传感器的物体计数。

有些安检系统使用物体传感器来防盗，当有入侵者挡住光束时，传感器就发出报警声。物体传感器还可以用来核实门窗是否关闭，或者作为限位开关使用，限制

电动机的工作范围。

3.1.0 原理图符号

在原理图中，光学物体传感器的符号是中间用波浪箭头相连的 LED 和**光敏三极管**，如图 3-1 左上所示。波浪箭头表示红外线链路。

有时也将光敏三极管的符号用**光敏二极管**代替，如图 3-2 右上所示。

磁传感器的符号与**霍尔效应传感器**相同，如图 3-1 下方所示。

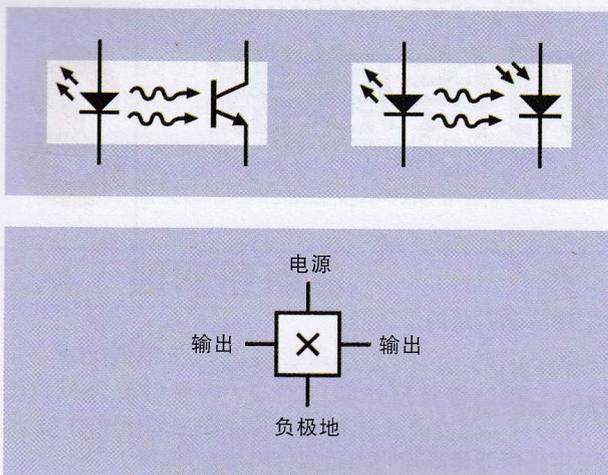


图3-1 图上方：光学物体传感器分别使用光敏三极管（左侧）和光敏二极管（右侧）的两种原理图表示。下方：霍尔效应传感器和磁传感器的原理图表示。

3.2 演变

为了帮助读者比较各种物体检测传感器的不同，本章将详细介绍两种常见检测方案：**光**和**磁**。

光传感器又分为**透射型**和**反射型**（包含**对射型**）两大类。磁传感器则分为**簧片开关**和**霍尔效应传感器**两种。图3-2是详细分类图。

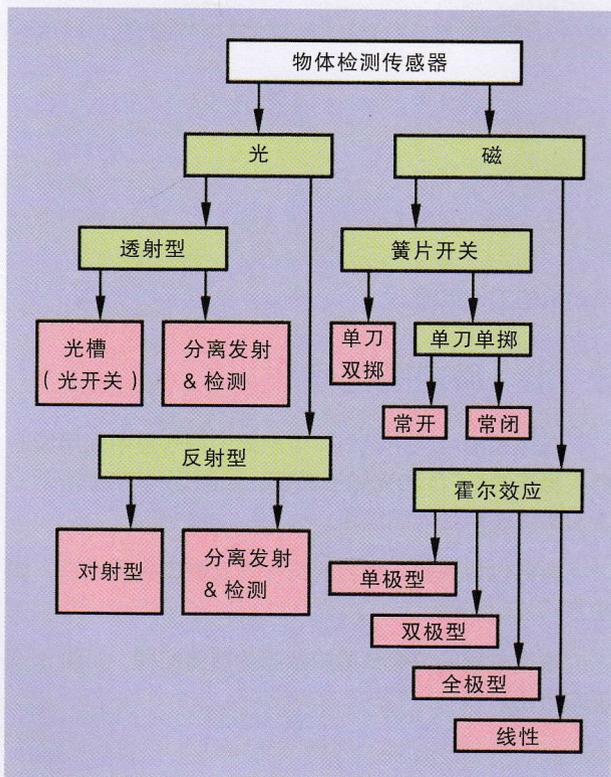


图3-2 本章描述的物体检测传感器详细分类图。其他不常见的传感器并没有画出。

3.3 光检测

透射型光传感器也称为**穿透式传感器**，由一对发射器和接收器组成。当物体进入待测区域时，传感器会检测到光路的通断变化，如图3-3所示。

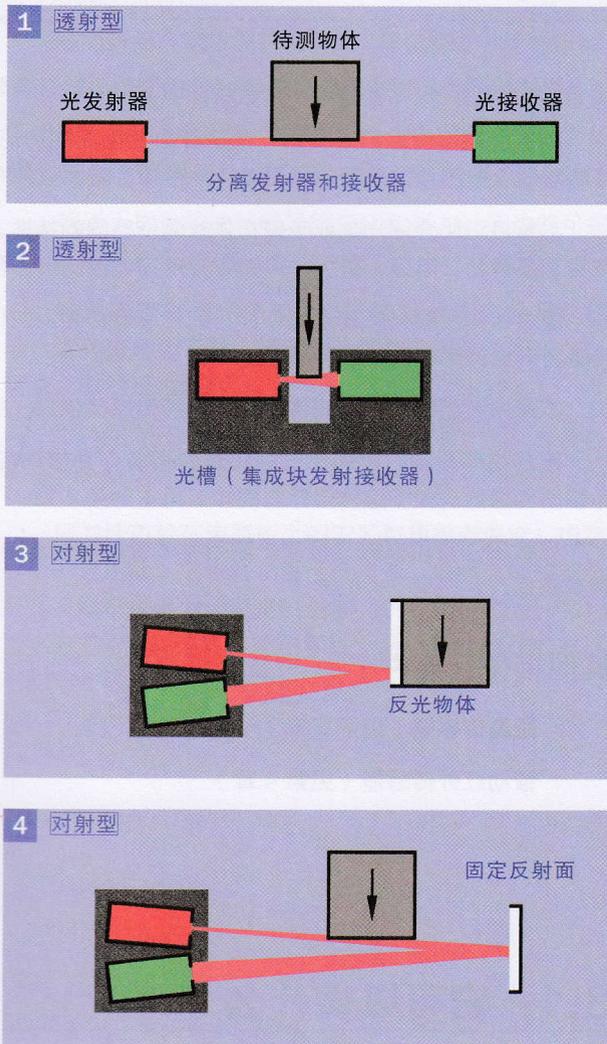


图3-3 光学物体检测传感器的不同使用方法。

如图3-3中第2幅图所示，如果将光发射器和光接收器面对面安装在一个凹槽的两端，就形成了**单体模块**（表面带有一个凹槽）。这种器件一般称为**光开关**（不要与通信行业的固体开关混淆），有时也称为**光斩波器**。

反射型光传感器也是由光发射部分和光接收部分组成，只是位置变成了并排放置，朝向从相对变成了同一个方向。如果将发射部分和接收部分集成在同一个外壳中，则称为**对射型传感器**。其工作原理分以下两种：

- 待测物体为**反光物体**（例如传送带上的玻璃罐子或白色盒子），当待测物体经过传感器发出的光束时，会将光束反射回传感器接收部分，若待测物体反射面不够光滑或者反射程度不够，需要适

度增加光照强度，如图 3-3 中的第 3 幅图所示。

- 光发射器对面装有固定反射板，当待测物体将光路遮断时，接收器将检测不到光线，如图 3-3 中的第 4 幅图所示。

3.3.1 透射型光传感器

图 3-4 是 Vishay 公司出品的 TCZT8020 型透射型光传感器，这种光传感器发射部分和接收部分是分离的。其检测目标不能超过 $5\text{mm} \times 3\text{mm}$ 。使用时接收器和发射器之间的距离在数毫米之间。发射器其实是一个红外线 LED，而接收器则是一只光敏三极管（关于光敏三极管的信息见本书第 22 章）。

发射器和接收器的额定电压都是 5VDC。光敏三极管的输出形式为开漏输出。集电极最大电流为 50mA，使用时必须搭配 $100\ \Omega$ 以上的上拉电阻。源极电流不能超过 60mA，使用时需要串联合适的限流电阻。

关于集电极开路输出的相关知识见本书附录部分，如图 A-4 所示。

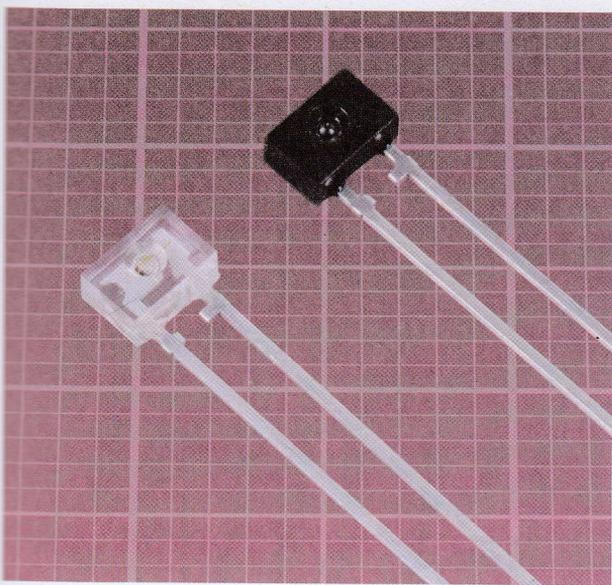


图 3-4 由一对光发射器和光接收器组成的透射型光传感器。背景中最小网格的尺寸为 1mm。

Omron 公司的 EE-SX 系列传感器包括各种单模块槽式光电传感器模块。其光源为红外 LED，接收器为光敏三极管。

Omron 产品的供电范围非常宽，兼容 5VDC 到 24VDC 电源，而且发射器 LED 不需要外接限流电阻。根据具体型号不同，光敏三极管集电极开路时的电流输出能力为 50mA ~ 100mA。红色指示灯发光表示传感器检测到凹槽中有物体。某些具体型号的器件在检测

到凹槽中有物体时还会有高电平输出。这种传感器功能比较齐全，但价格也偏高。

图 3-5 是 Everlight 公司出品的 ITR9606 型传感器，这是一种比较廉价的光开关（官方名称是“opto interrupter”），这是一种 5V 输入，集电极开路输出的设备。使用时发射器 LED 端需要外接串联电路，输出端需要外接上拉电阻。此传感器在市面上非常常见。

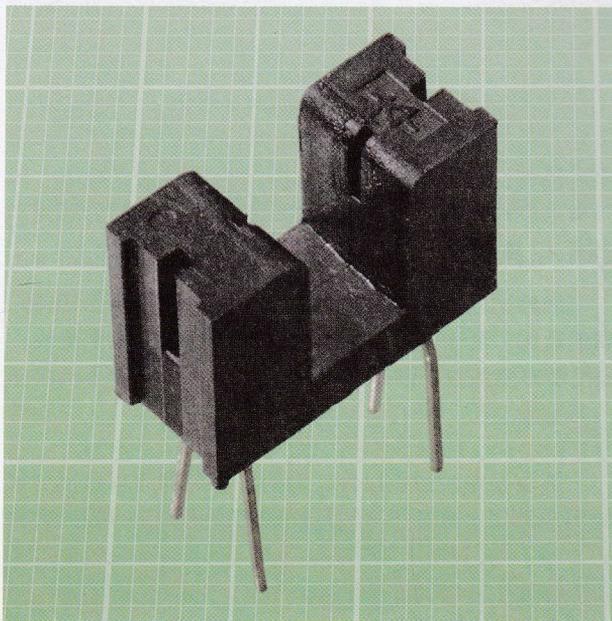


图 3-5 一种低成本透射式光传感器，也称为光开关。图中背景小网格的边长为 1mm。传感器中凹槽的宽度为 5mm。

长距离物体检测需要采用红外线 LED 发射器和红外线接收器分离的传感器产品。例如 Vishay 公司的 TSSP77038 传感器，它的有效测量距离高达 50cm，当检测到物体时，接收器集电极对外输出低电平。使用时必须将发射极光线频率调整到 38kHz。

图 3-6 是 Polulo Robotics and Electronics 公司基于 TSSP77038 的低成本模块照片，内含 TSSP77038 芯片、红外线 LED 和 555 定时器等元器件。整个模块相当于一个对射型传感器。

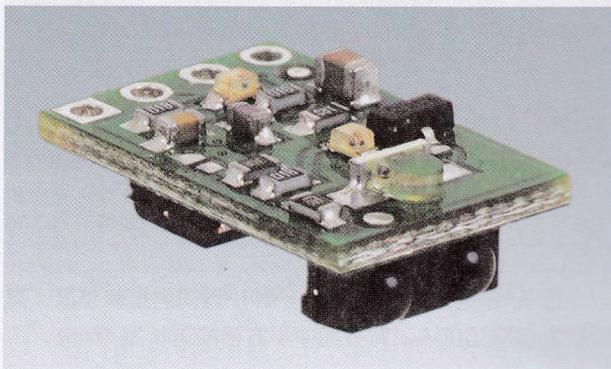


图 3-6 Polulo Robotics and Electronics 公司推出的基于 TSSP77038 的传感器模块。

当测量距离超过1m时,为了保证传感器正常工作,需要将可见光屏蔽,换用激光耦合光敏三极管。

3.3.2 对射型光传感器

作为透射型物体检测器的一种,对射型检测器最常用的名称为**光开关**,其他常见名称包括**反射型中断器**、**反射型物体传感器**、**反射型光传感器**、**反射型光中断器**等。由于名称太多,人们往往要反复更换关键词才能搜索到这种器件。

大部分对射型物体检测传感器的尺寸都在5mm×5mm到10mm×10mm之间,而且几乎都是模拟器件,内部由LED和光敏三极管组成,输出一般为集电极开路形式(关于光敏三极管的更详细信息见本书第22章)。

当输出端上拉电阻取值合适时,输出电压与物体距离成反比。若 V 代表输出电压, d 代表被测物理距离, k 代表转换系数,则有如下公式:

$$V = k \times (1/d)$$

除表面贴片封装以外,对射型传感器还有直插封装供用户选择,如图3-7所示。这种小型传感器的最大劣势在于其测量距离通常不超过5mm,一般只能用于待测物体位置相对固定的生产线上。

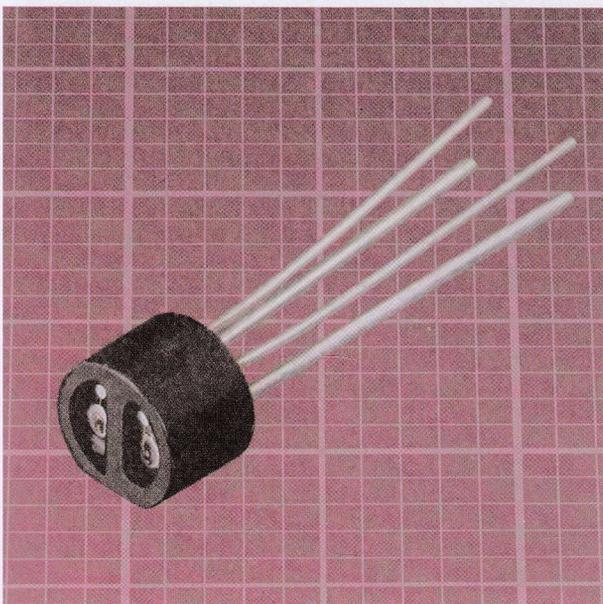


图3-7 图中为Rodan公司型号为RT-530的对射型小型物体检测传感器。其测量距离非常有限。背景图中小方格的边长为1mm。

图3-8是Optek公司的一种小型对射型传感器,其型号为OPB606A。背景图中小方格的边长为1mm。

图3-9是Vishay公司生产的TCRT5000型对射传感器,其特点是发射端和接收端都带有聚光透镜。

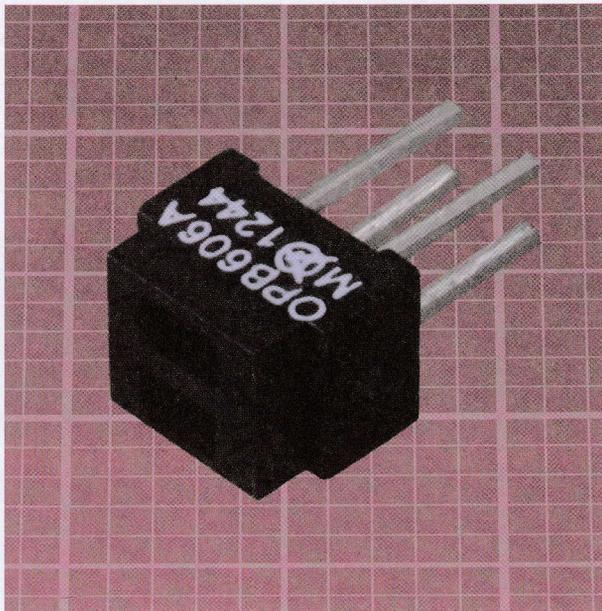


图3-8 Optek公司生产的OPB606A型对射传感器照片。背景图中小方格的边长为1mm。

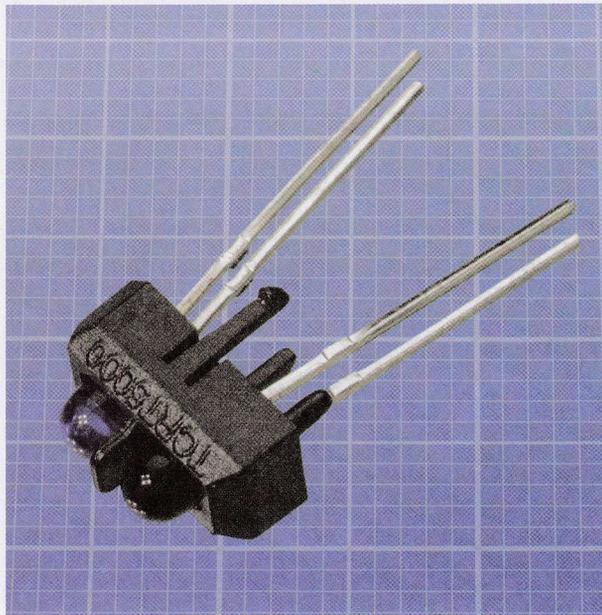


图3-9 Vishay公司生产的TCRT5000型对射传感器。背景图中小方格的边长为1mm。

大型对射传感器并不常见,其检测距离通常较远,价格也较为昂贵。其中最著名的当属Sharp公司出品的大型对射传感器系列,例如GP2Y0D805Z0F(测量距离为5mm~5cm),GP2Y0D810Z0F(测量距离为2cm~10cm),GP2Y0D815Z0F(测量距离为5mm~15cm)。图3-10是Polulo Robotics and Electronics公司出品的基于GP2Y0D810Z0F的模块,GP2Y0D810Z0F传感器本身的引脚间距只有1.5mm,而模块的尺寸为8mm×20mm,因此业余爱好者直接使用模块更为简单。

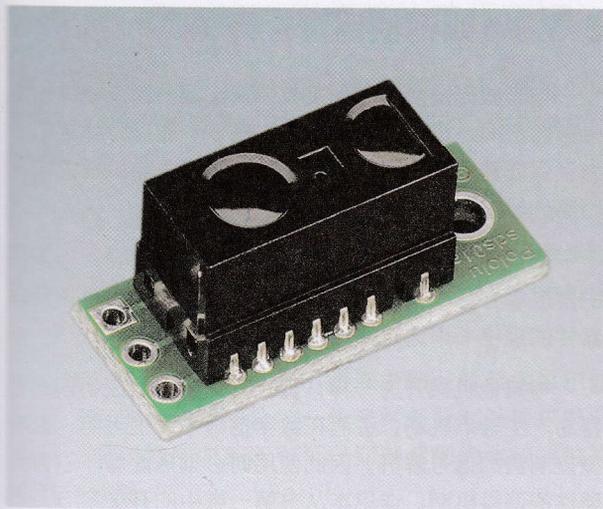


图 3-10 Pololu Robotics and Electronics 公司推出的基于 GP2Y0D810Z0F 的传感器模块。照片由 Adafruit Industries 提供。

Sharp 公司官方数据手册上统一将物体检测传感器称为“Distance Measuring Sensor Unit”（距离测量传感器单元），但事实上很多传感器并不能测量距离。其输出通常为高低电平，当待测区域出现物体时，输出信号由高电平变为低电平。这种 Sharp 公司称之为“数字信号”的输出实际上只是二进制输出，请大家不要与带有模数转换器的复杂数字传感器混淆。

请读者注意区分本章提到的 Sharp 物体检测传感器和第 5 章提到的 Sharp 距离传感器。距离传感器通常体积较大，可以输出与待测物体距离成正比的模拟信号。

3.4 磁传感器

市面上有很多军用和民用的集成磁传感器单元。虽然名称也叫“磁传感器”，但这种器件不属于板级基本元器件，因此超出了本书关注的范畴。这些集成器件内部的传感单元一般也是簧片或霍尔效应传感器。

3.5 簧片开关

簧片开关属于磁驱动开关。其内部由两片磁性金属簧片组成，外面通常用玻璃壳封装。簧片的形状会随磁场变化，当外部有某种恒定磁场时，簧片开关使能。图 3-11 是簧片开关的照片。

由于克服簧片机械阻力使之闭合所需要的磁场强度大于维持开关闭合所需的磁场强度，因此簧片开关对外表现出一定的磁滞特性。

很多小型低电流电磁继电器内部控制部分其实都是一个簧片开关。但是由于用途不同，因此本丛书将簧片式继电器的知识放在了第一卷中的继电器部分。

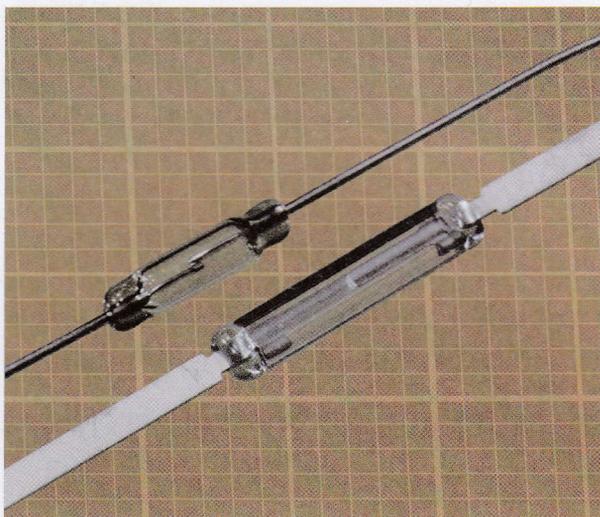


图 3-11 两种 SPST 簧片开关的照片。图片中的簧片虽然距离很近，但事实上是断开状态。这两种开关都为常开开关。图中背景小网格的最小边长为 1mm。

簧片开关最常见的应用当属大楼报警系统。这种系统由两个塑料部件组成，一个部件内含电磁铁，装在窗户或门上，另外一个部件内含簧片开关，装在窗框或门框上，如图 3-12 所示，其工作原理如图 3-13 所示。

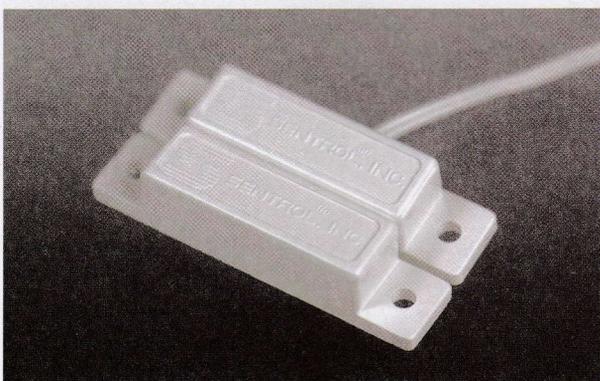


图 3-12 典型的门禁报警传感器模块。左下方的模块内部含有磁铁，右上方的模块内部含有簧片开关。

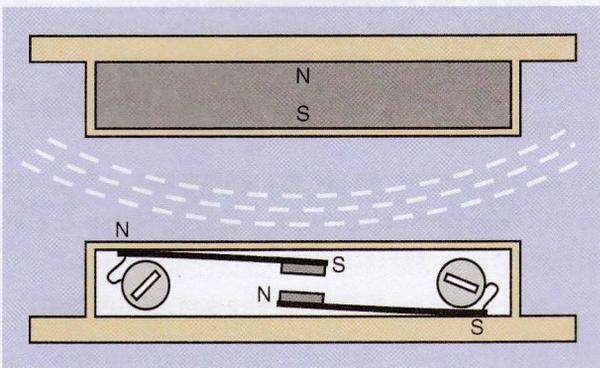


图 3-13 图中白色虚线表示可以驱动簧片开关的磁场。

当门窗保持关闭状态时，簧片开关始终受磁场驱动。一旦门窗打开，磁场远离簧片开关，开关状态从闭合变为打开。为方便多个开关串联使用，通常簧片开关

都是常开型，在磁场驱动下可以变为闭合状态。在串联开关中，只要有一个开关打开，整个电路将断开，为报警器提供报警信号。

3.5.1 簧片开关种类

大部分簧片开关属于 SPST 开关，其中常开型更为常见。少部分簧片开关属于 SPDT 型。除此以外其他类型的开关则非常少见。图 3-14 是一种 SPDT 型簧片开关的照片。

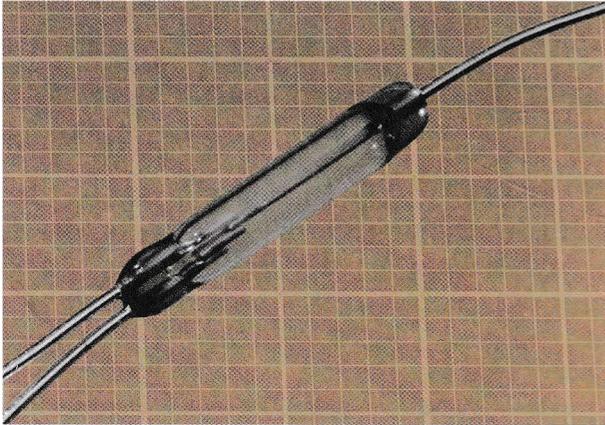


图 3-14 一种 SPDT 型簧片开关。背景中最小网格的边长为 1mm。

簧片开关的物理尺寸与电流切换能力大致成正比关系。

大部分簧片开关的引脚都是同轴引线封装，少部分为表面贴片封装。

为保护玻璃外壳，有些簧片开关外部额外包了一层塑料外壳。

3.5.2 簧片开关参数

簧片开关规格书中常见的参数如下：

吸合值：触发簧片开关触点的最小磁场强度，单位通常为安培匝。

断开值：使簧片开关触点释放的最大磁场强度，单位通常为安培匝。通常比吸合值小。

最大切换电流：只有少数价格昂贵的工业用簧片开关可以控制 100A 以上的电流。长度在 15mm 左右的常见簧片开关一般只能控制 500mA 电流。

最大承载电流：一般比最大切换电流稍大。

最大切换功率：簧片开关可以用在交流电路中，人们用最大切换功率来表示其控制交流电的能力，最大切换功率的单位为 VA 或瓦特。典型值为 10VA 左右。

最大耐压：簧片开关常用于低压场合，但是其耐压一般可以达到 200V。

3.5.3 如何使用簧片开关

与某些光发射端和光接收端集成在一起的物体检测传感器不同，簧片开关与配对的磁铁一般是分体式的。为了保证簧片开关工作可靠，触发时开关与磁铁的最大距离一般限制在数毫米以内。

簧片开关所搭配磁铁的极性指向并不重要，但不同的摆放却会影响簧片开关的灵敏度。用户需要根据具体器件的规格书来选定最佳磁铁摆放位置。

与其他机械开关一样，簧片开关的触点在切换时很容易产生**触点抖动**，进而在数字信号中产生毛刺，影响微控制器的信号解析。因此使用时必须搭配基于软件或硬件的**消抖**机制。详见本丛书第一卷中的**开关**章节。

3.6 霍尔效应传感器

霍尔效应传感器可以将周边磁场转换为弱电压信号，通常霍尔效应传感器内部都含有电压放大电路。

当霍尔效应传感器处于“关闭”状态时（外部没有磁场），其内部 NPN 晶体管集电极和 GND 之间为高阻态。如果集电极外接上拉电阻，那么此时集电极的电压为高电平。

当霍尔效应传感器处于“打开”状态时，集电极和 GND 之间的等效电阻下降，此时集电极电压为低电平。以上规律可以总结如下：

- 霍尔传感器使能时，对外输出低电平。
- 霍尔传感器未使能时，对外输出高电平。

关于处理集电极开路输出信号的技巧见本书附录部分的图 A-4。

霍尔传感器有输出逻辑简单，可靠性高，尺寸小，价格低廉的优点，因此被广泛用于硬盘、照像机、键盘和汽车中。几乎在任何检测封闭机械运动的场合中都可以使用霍尔传感器。图 3-15 是三引脚霍尔传感器的照片。相比之下表面贴片封装的霍尔传感器尺寸更小。

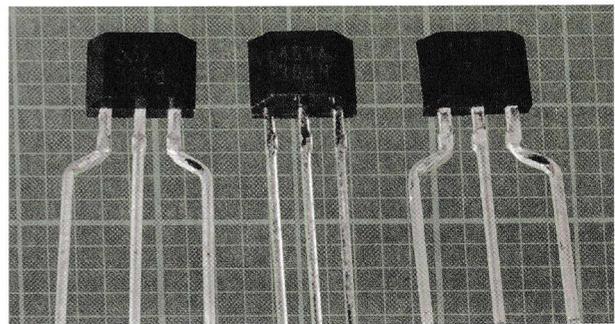


图 3-15 三引脚直插封装霍尔传感器的照片。背景图中最小网格的边长为 1mm。

3.6.1 霍尔效应传感器的工作原理

当导体中流过电流，并且横向有磁场时，磁场会使导体中的电子和电子穴向相反的方向移动，这就是**霍尔效应**。

电子与电子穴之间的电压称为**霍尔电压**。其大小与横向磁场强度成正比，与金属导体中的自由电子数量成反比。因此霍尔效应在电子和电子穴密度较低的半导体上体现得更为明显。

除霍尔传感器外，霍尔器件内部一般包含霍尔效应部分和放大电路部分。一般电路部分对外提供开漏输出，某些器件内部还有可以抑制毛刺的比较器或施密特触发器。

3.6.2 霍尔效应传感器的种类

常见的霍尔效应传感器分为以下四大类。

单极型霍尔传感器

当外部磁场超过触发门限时，单极型霍尔传感器被触发导通。当磁场消失时恢复关闭状态。单极型传感器分为磁北极触发和磁南极触发两种类型。

双极型霍尔传感器

双极型霍尔传感器在某极磁场下导通，在另一极磁场下关闭。当外部没有磁场时，双极型霍尔传感器保持状态不变（保持导通或关闭）。

全极型霍尔传感器

当外部有强磁场时，全极型霍尔传感器导通。当磁场消失后恢复关闭状态。全极型霍尔传感器可以看成是由两个单极型传感器反向并联组成。其功能与簧片开关类似，区别在于这种霍尔传感器需要外接电源才可以工作。

线性霍尔传感器

线性霍尔传感器又称为**模拟**霍尔传感器，其输出电压与外部横向磁场强度成正比。当外部磁场强度为零时，其输出电压等于供电电压的 1/2。当外部磁场强度为某一特定值时，其输出电压可以跌落到接近 0V。当磁场变为强度不变的相反极性时，其输出电压接近供电电压。

线性霍尔传感器通常将内部 NPN 晶体管的发射极作为输出信号。使用时必须在输出引脚和 GND 之间并联至少 2.2k Ω 电阻。

根据线性霍尔传感器的输出电压大小，可以大致估算出传感器和磁铁之间的距离，这时其功能相当于**距离传感器**。但是线性霍尔传感器的有效测量距离一般小于 10mm。

其他应用

霍尔传感器通常作为子器件集成在其他器件中，例如很多磁力计内部就包含霍尔传感器。关于霍尔传感器及其相关电路的知识可以参考 *Make: More Electronics* 一书。

3.7 参数

触发磁场为使霍尔传感器输出端导通的最小磁场。单位通常为特斯拉或高斯，缩写为 BOP。

释放磁场为使霍尔传感器输出端保持关闭的最大磁场。单位通常为特斯拉或高斯，缩写为 BRP。

磁场范围是线性（模拟）霍尔传感器特有的参数。

霍尔传感器的**供电电压**通常在 3VDC ~ 20VDC 或 3VDC ~ 5.5VDC，详见具体数据手册。

集电极开路输出型霍尔传感器输出端的**拉灌电流**能力通常在 20mA 左右。

3.8 如何使用霍尔效应传感器

霍尔传感器通常有三个引脚。直插封装霍尔传感器的外形与 TO-92 晶体管相似，但尺寸略小。

表面贴片封装的霍尔传感器最为常见。

直插型霍尔传感器通常一面为平面，另一面为球面。规格书中通常将球面定义为“前”面。使用霍尔传感器时应该在球面施加相应**磁场**。

霍尔传感器的具体型号通常以三位数字表示，一般刻在其球面上。型号下方的编码一般表示生产日期。

霍尔效应的典型应用电路与光敏晶体管电路类似。其中两个引脚接 GND 和电源。对于集电极开路输出型霍尔传感器（除上文提到的线性霍尔传感器以外）来说，第三个引脚在使用时必须外接上拉电阻。这时第三个引脚上的电压即为传感器的输出电压，需要注意的是传感器输出端的最大输出电流不能超过 20mA。

3.9 如何使用物体检测传感器

虽然下文中的大部分知识都与霍尔传感器有关，但其中的基本原理也适用于光传感器。

3.9.1 线性移动检测

传感器感知从正面靠近的触发源（光或磁铁）的模式称为**正面模式**。而感知从侧面经过的触发源的模式称

为侧面模式，如图 3-16 所示。

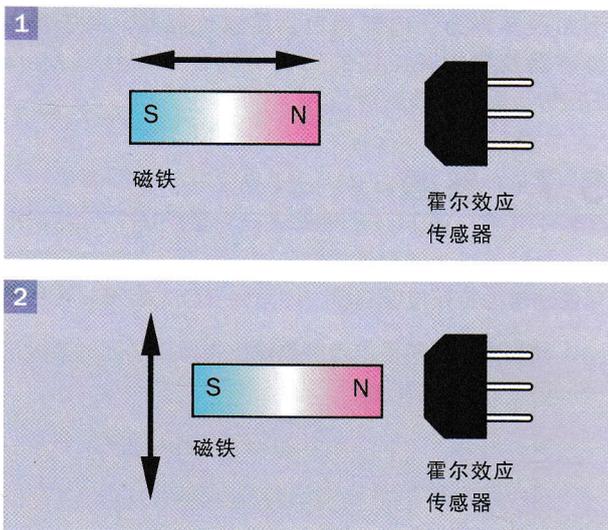


图 3-16 1号图是物体检测传感器的正面模式用法，2号图是侧面模式用法。

正面模式下，失控的被测物体容易对传感器本身造成损坏，因此侧面模式比正面模式更为安全。

在使用双极型霍尔效应传感器进行侧面模式检测时，如果待测物体包含两个极性相反的磁铁，由于其产生的磁场曲线比较陡峭，因此传感器的检测精度会大大增加。若磁铁为钕磁铁，检测精度甚至可以高达 0.01mm，如图 3-17 所示。

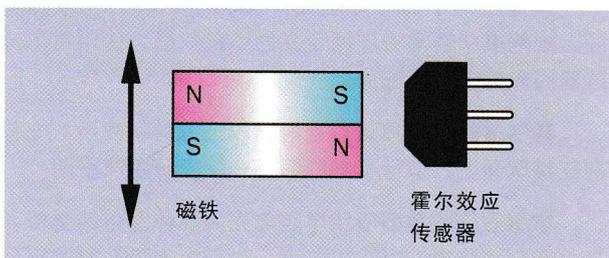


图 3-17 在侧面模式下，使用两个极性相反的并联磁铁做被测检测物质可以大大提升霍尔效应传感器的检测精度。

3.9.2 中断检测

光遮断器可以检测从其发射端和接收端穿过的物体。使用霍尔传感器或簧片开关也可以做类似检测，但要求被测物体厚度适当，并且为含铁材质。这种传感器一般称为铁片遮断器。

由于待测铁质物体和传感器内的磁铁之间存在引力，因此在机械强度不大的场合（例如复印机中的纸片传感电路）使用铁片遮断器时必须特别注意。

关于移动物体检测的更详细内容见本书第 6 章线性位置传感器部分。

3.9.3 角度检测

使用一个或多个磁铁配合霍尔效应传感器可以进行相对角度、绝对角度等检测，进而实现物体角速度的采集。详见本书第 7 章旋转位置传感器部分。

3.10 不同传感器的优缺点汇总

3.10.1 光学物体检测传感器的优点

- 与霍尔效应传感器和簧片传感器相比，光学传感器不易受外部磁场的影响。
- 封装更小，集成度更高。
- 某些型号的有效检测距离超过 50cm。
- 适合检测不透光物体（用作光遮断器）。

3.10.2 光学物体检测传感器的缺点

- 传感器、待检测物体、反光板之间必须有良好的视野。
- 在粉尘环境下检测精度会下降。
- 其内部元器件 LED 光源的使用寿命有限。
- 容易被环境光线干扰。
- 通常需要额外搭配 LED 串联限流电阻和输出端上拉电阻。
- 供电电压范围较窄。

3.10.3 簧片开关的优点

- 无极性。
- 除磁铁以外，不需要其他配件即可工作。
- 兼容直流和交流信号。
- 可以控制高达 200V 的电压信号。
- 其开关状态仅由磁铁控制。不额外消耗电能。
- 控制电流一般超过 500mA。
- 控制链路上可以穿透非磁性物质（例如纸片、塑料壳）。
- 在粉尘环境下依然可以稳定工作。

3.10.4 簧片开关的缺点

- 使用时需要额外搭配控制磁铁（控制磁铁很容易影响周边其他器件）。

- 尺寸较大，很难做成表面贴片封装。
- 玻璃外壳容易破碎。
- 触点间容易产生电弧。
- 与磁铁间的最大有效控制距离仅为数毫米。
- 容易被其他磁铁误触发。
- 当用作遮断器时，仅能检测含铁物质。
- 与逻辑芯片或微控制器一起使用时必须进行消抖。

3.10.5 霍尔效应传感器的优点

- 作为固态器件，可靠性非常高。
- 外形较小，有表面贴片封装形式。
- 成本极低。
- 响应快。
- 无触点抖动。
- 寿命极长，甚至接近永久。
- 不受粉尘、光照等影响。

3.10.6 霍尔效应传感器的缺点

- 使用时需要额外搭配控制磁铁（控制磁铁很容易影响周边其他器件）。
- 其集电极开路形式输出通常只能对外提供不到 20mA 的电流。
- 对外界磁场比较敏感。
- 当用作遮断器时，仅能检测含铁物质。

3.11 禁止事项

3.11.1 光传感器

LED 性能老化

多数物体传感器都使用红外 LED 作为光源。LED

有很多优点（详见本丛书第二卷）。但是在使用一段时间后（一般为数年），亮度会显著降低。像复印机等内含 LED 的长寿命设备中，一般都含有“睡眠”或“经济”模式，目的是尽可能缩减 LED 的工作时间。某些设备中的 LED 需要长期工作，一般使用三到五年，其内部 LED 的亮度就会显著降低。因此在选用光传感器时，需要在参数上留有足够大的空间，确保待测光线衰减时也能正常工作。

待测物体距离太近

很多光学或超声波检测器的发射接收检测回路是三角形（如图 3-3 中的第 3、4 幅图所示）。当待测物体处在接收器和发射器光路交汇点时，传感器的输出电压最高。如果物体距离检测器太近，那么输出电压会降低，导致使用者误认为待测物体距离太远。因此使用时需要确保待测物体与传感器的距离大于规定距离。

3.11.2 簧片开关

机械损坏

簧片开关的引脚如果受到过度弯折，很容易导致其玻璃外壳损坏。因此焊接和操作时必须特别注意。

触点抖动

如果将簧片开关的输出信号直接输入给逻辑芯片或微控制器，那么一次开关切换产生的触点抖动很容易被误认为多次切换。使用时需要注意在硬件或软件中加入消抖机制。

电弧

使用簧片开关控制大电压或大电流信号时，簧片开关的机械触点间容易产生电弧，尤其是在触点打开过程中。电弧会腐蚀簧片触点。在外接感性负载时，电弧会更加严重。因此尽量不要用簧片开关控制超过 5V 的信号，以延长其使用寿命。

被动式红外传感器

4

在非正式场合，人们一般称**被动式红外传感器**为**移动传感器**。

PIR 是被动式红外传感器的英文缩写。

物体检测传感器和**距离传感器**都需要借助触发源来进行检测，如磁场、超声波、红外线等。**被动式红外传感器**则不需要触发源，它可以采集物体本身发出的热辐射信息。

其他相关元器件

- 物体检测传感器（见第 3 章）
- 距离传感器（见第 5 章）

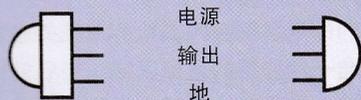
4.1 它可以做什么

被动式红外传感器（PIR）可以检测物体的**黑体辐射**，即一切温度在绝对零度以上的物体发出的辐射。这种传感器主要采集波长 $10\ \mu\text{m}$ （10 微米）左右的红外线。这也是人和动物体温所对应的波长。

“被动式红外”中的“被动”表示传感器工作时只接收外界的红外线，本书第 5 章介绍的**距离传感器**工作时则需要对外辐射红外线。

4.1.1 原理图符号

被动式红外传感器常见的原理图符号如图 4-1 所示。



电源
输出
地

图 4-1 被动式红外移动传感器的原理图符号。其引脚指向和引脚顺序并没有特殊意义。

4.1.2 应用

大部分户外照明设备使用的移动传感器都是 PIR

传感器。可以报警或录像的门禁设备一般也使用 PIR 传感器。

借助于 PIR 传感器来触发摄像头，可以使野外监测系统长期工作在休眠状态下。

很多汽车预警系统也使用 PIR 传感器来检测车尾障碍。

工业照明系统可以使用 PIR 来实现节能自动开关，当人们进入室内时，自动打开照明，当人们离开室内时，自动关闭照明（经过一段时间的延时）。

4.2 它如何工作

PIR 模块内部包含多个组件。从外观上看最显著的当属由至少 15 片透镜组成的阵列，它的用途是将外部的红外线聚焦到**热电探测器**（或称为**热电传感器**）元器件上。热电传感器输出的信号由放大器放大后，用于驱动电磁机械开关或固态继电器（固态继电器见本丛书第二卷）。

PIR 模块内部一般还含有用于调节灵敏度和继电器延时电路。用户也可以自行设置 PIR 的启动时间，有些 PIR 模块内部还含有**光敏三极管**，可以控制 PIR 模块只在夜间启动。关于光敏三极管的更详细知识见本书第 22 章。

4.2.1 热释电传感器

热释电传感器属于压电设备的一种。其材料为铌钽酸盐晶片，这种晶片在热辐射下会产生微小的电压。但是与其他压电设备一样，它只响应外界的变化量，而不响应恒定量，因此采集数据时必须依靠激励源。这一点与其他光敏传感器不同，例如**光敏二极管**，光敏二极管的输出与输入温度系数始终成正比。热释电传感器的输入输出特性如图 4-2 所示。

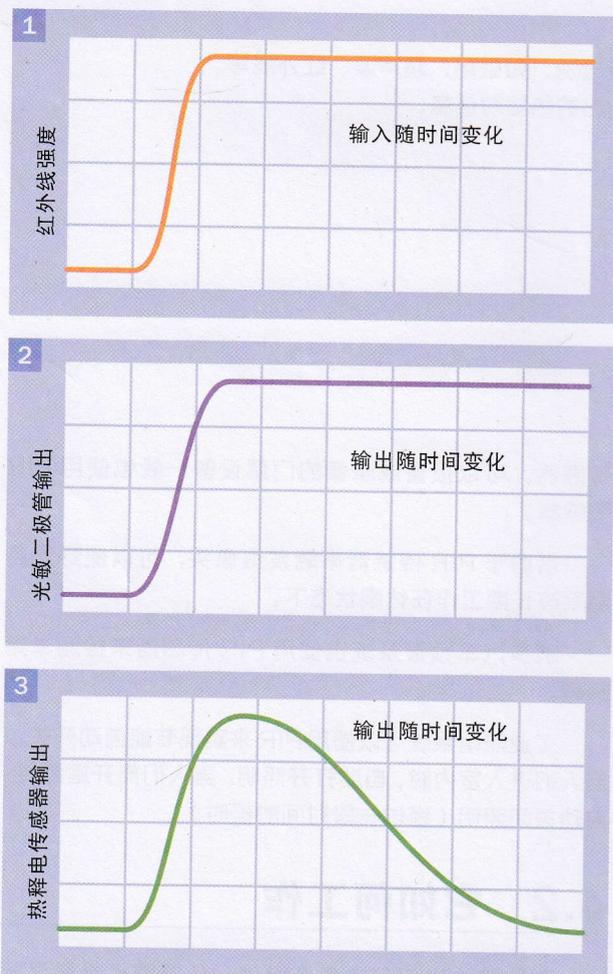


图 4-2 上图：入射红外线强度曲线。中图：光敏二极管电压输出曲线。下图：热释电传感器电压输出曲线。

PIR 模块中的热释电传感器一般封装在密闭的金属外壳中，如图 4-3 所示。传感器表面的矩形材质通常为硅，这种材料对可见光不透明，对长波红外线透明。

4.2.2 检测单元

PIR 中的热释电传感器通常由两个极性相反的检测单元串联而成，在无红外线辐射时，其输出相互抵消，因此可以过滤掉外界温度的变化。如果两个单元先后受到目标波长的红外线辐射，那么输出信号中将出现两次脉冲，如图 4-4 所示。

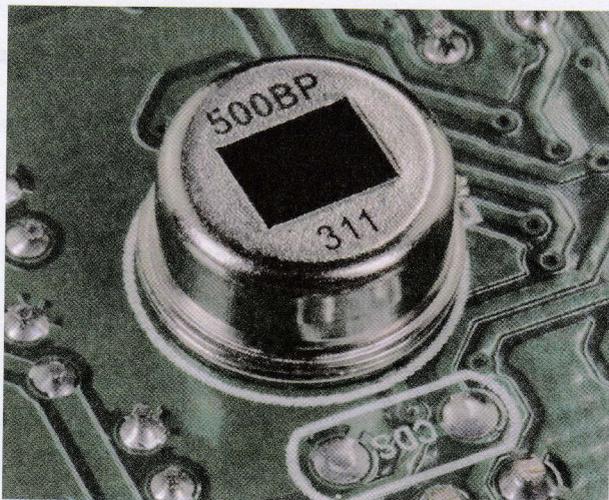


图 4-3 一种被动红外传感器内部的照片，从图中可以看出安装在 PCB 上的热释电检测元器件。

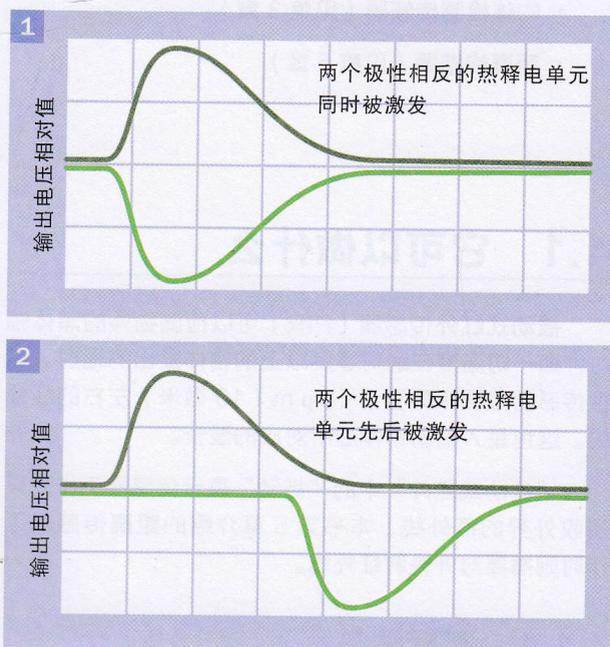


图 4-4 上图：在热释电检测器中，受环境温度激发，内部两个极性相反的检测单元会同时输出相互抵消的脉冲。下图：当两个检测单元先后被激发时，检测器对外输出差分信号。

4.2.3 镜头组

镜头组的作用是确保内部检测单元的激发顺序。每个镜头都对准一片独特的目标区域。当红外信号在目标区域内移动时，热释电检测器内部的检测单元就会依次被激发，最终输出检测信号。

某些 PIR 为了实现更大的覆盖范围，内部使用了多达 4 个串联或并联的热释电检测器，但是其工作原理并没有本质变化。

镜头通常由白色聚乙烯材料制成，呈半圆形覆盖在热释电探测器上。从外面看圆润光滑，但是内部有很多细细的同轴脊。这种透镜属于**菲涅尔透镜**，它比传统光

学透镜更便宜、更小、更轻、更容易生产。但缺点是失真和畸变比较严重，不过这不影响 PIR 的性能。

图 4-5 是简单的菲涅尔透镜原理。第一幅图中是传统单面弧形光学透镜，它可以将远处光源发出的近似平行的红外线聚焦到一点。第二幅图是将光学透镜水平切割成小块但各部分位置保持不变后的样子。其作用与未切割时一样。第三幅图将切割后的光学透镜又进行了裁剪，由于其几何面并未发生改变，因此除裁剪导致焦点稍微靠近镜头以外，其聚光效果依然不变。这就是菲涅尔透镜的样子。这种透镜可以在保持聚光的同时大幅度减少玻璃镜片的重量，这种技术最早被用在灯塔上。

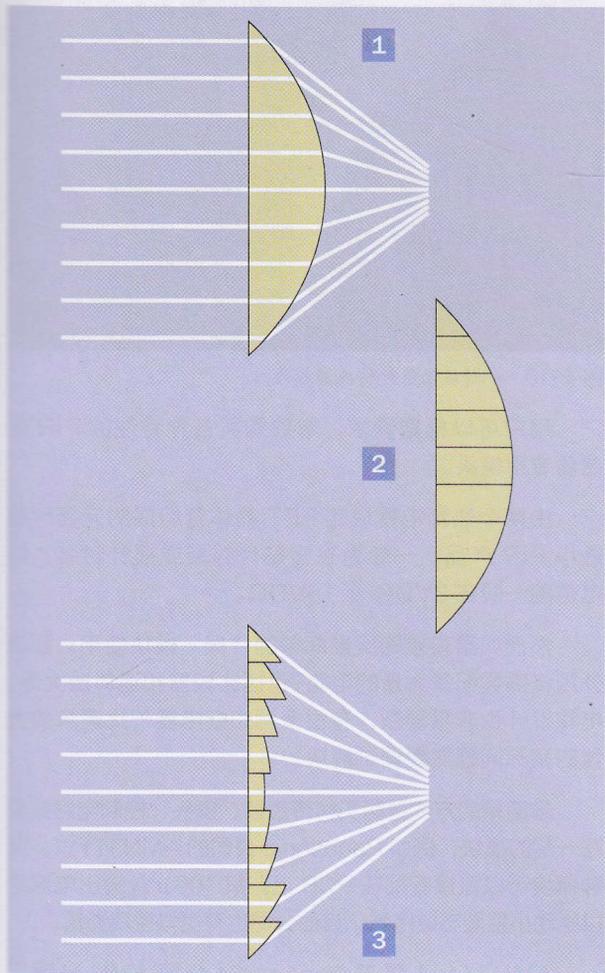


图 4-5 菲涅尔透镜的基本原理，详见正文部分。

同样的原理也可以用在双曲面透镜上，如图 4-6 所示。实际应用中，虽然经过各种补偿，但是这种切分镜头依然会导致一定幅度的图像扭曲。

图 4-7 是三个曲面菲涅尔透镜组合在一起的样子。第一幅图表示远处一束平行红外线通过透镜照射到右边热释电传感器。第二幅图表示随着光源的移动，红外线慢慢聚焦到了左侧热释电传感器。第三幅图表示光源移动到了镜头正上方，红外线再一次聚焦到了右侧热释电传感器。这些变化会触发传感器对外输出相应的信号。

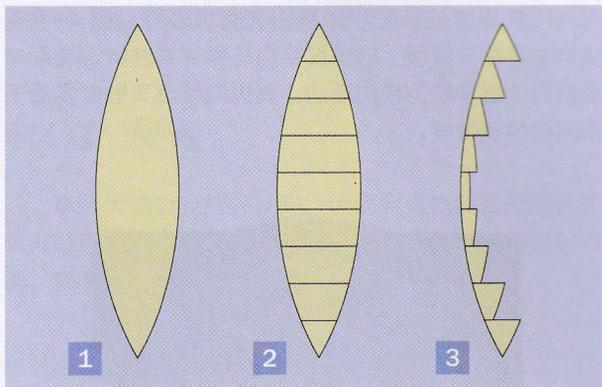


图 4-6 从传统双曲面透镜到菲涅尔透镜的演变。

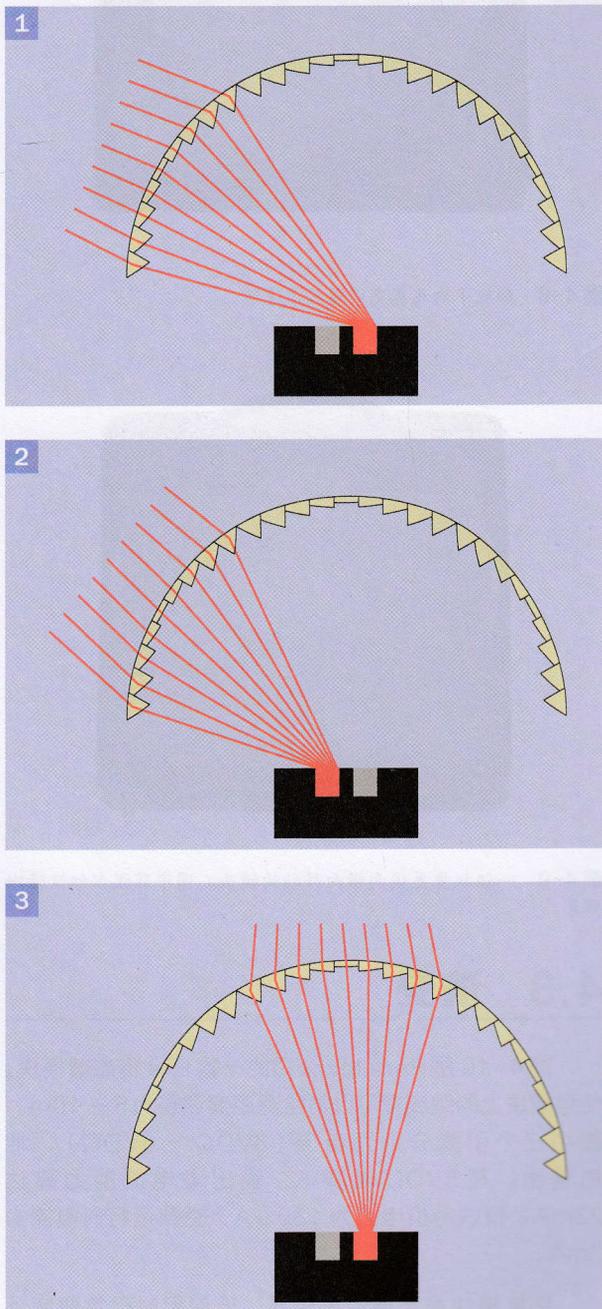


图 4-7 图 1、2、3 表示菲涅尔透镜将外界红外线辐射聚焦到热释电传感器中各个传感单元的过程。