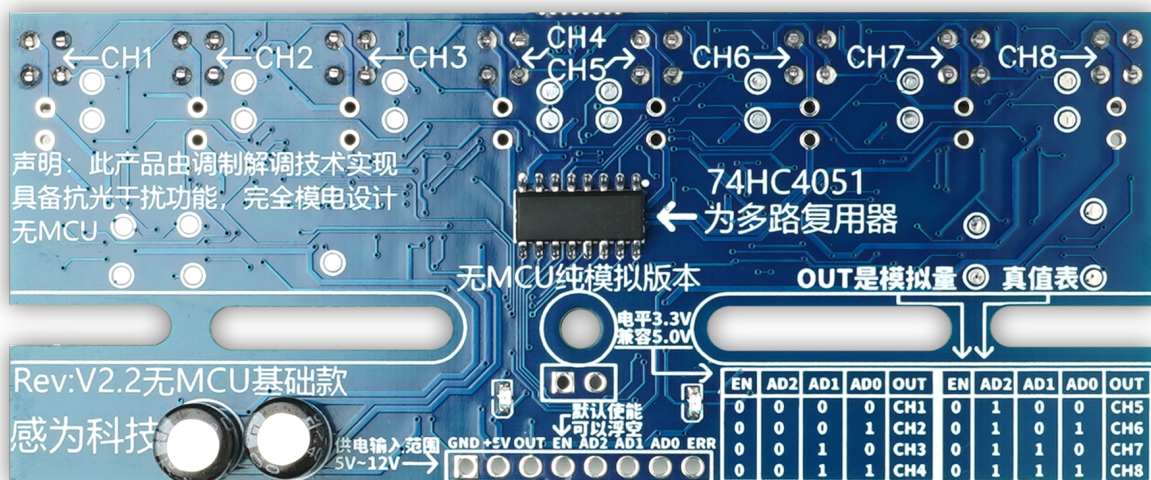


无 MCU 八路灰度传感器数据手册

Powered by L^AT_EX

北京感为科技有限公司

修订于：2025 年 4 月 27 日





开篇语

首先感谢您对感为的支持！

2019 年我前前后后花了半年时间，推出了第一款灰度传感器，它的设计初衷是解决：校准繁琐、易受光干扰的问题。

我还依然记得，大二那年，我们信心满满的去打比赛，出发前我信誓旦旦的说“程序已经很完美了，又快又稳，一定没问题的！”就这样，本以为完美无缺的小车封上了封条，带到了比赛现场。

让我意想不到的，比赛现场正巧一束阳光照在我们的跑道上。每次经过小车都会跑出轨道。站在一旁的我们急的我们满头大汗，每次重来都要跪在赛道上调灰度传感器，最终也没能挽救回比赛的败局。

后来，我毕业了，有了研发能力，于是做出了智能灰度传感器。感谢大家的支持，使感为灰度快速被大家认可，快速推向了市场，所以感为科技向广大衣食父母致敬。

但是，随着时代的发展，限制单片机已经成为比赛的主流，让我也深刻的理解了比赛。所以我做了一款纯模电设计的灰度传感器，机身无任何 MCU，用 44 个运算放大器设计而成。

它借鉴了激光制导的原理，先将光信号先调制再解调，在此过程中实现了对于环境光的删除，从而实现抗光干扰的特性。此外我们还做了过曝报错机制（青春款没有此功能），及时反馈传感器故障，可以增加产品稳定性。

有同学建议我做开关量输出的，不是设计上有困难。而是滞回比较器，每路要调整两个阈值，所以您需要调节 16 个电位器，可以说十分的难用。

我绞尽了脑汁，很努力的思考产品，就只想到把滞回比较器的代码思路给您，请您自己写您的单片机上，这一点对有能力的朋友实际上很简单，只对基础薄弱的朋友有困难。但话说回来，能把有能力的人筛出来，这何尝不是一种对于比赛公平的体现呢。

于是我放弃了精神内耗，积极拥抱比赛新规则，帮助有能力的您更上一层楼。ㄟ~ㄟ

重要事项

- 尽管传感器有滤光膜防止过曝，但是感光元件具有物理上限，请尽量避免在强烈日照条件下使用。当到达感光上限后，传感器误指示灯会亮起（青春款无此功能），这种情况下传感器可能进入了饱和区，此时就会出现白色值小而黑色值大的情况（正常情况下，白大黑小）。此时只需对传感器进行简单的遮挡，例如手持一把遮阳伞，使之至于阴影下，避免阳光直射即可。
- 如果在同一个距离的白纸下，发现 8 个探头的数据不相同，这属于正常现象，这是由于每个探头的天生灵敏度不同造成的，此外，电容电阻的值也是有波动的，也会造成信号放大倍数不同，这个无法避免。但是可以通过代码去统一，这一点可以看例程。
- 利用例程给传感器校准后，请勿改变安装位置，传感器对于距离十分敏感，检测距离的变化会引发滞回比较器代码的误判。如果重新安装了高度，请重新校准您的代码。
- 如果赛道中有上下坡场景，请适当提高一些安装高度，以降低检测距离的波动对检测精度的影响，详情请看：章节3.3。
- 传感器的电压务必准确且稳定。尤其是有电机应用的场景，务必选用优质的电机驱动器，以防电机在启停机时产生电压尖峰冲击传感器。

目录

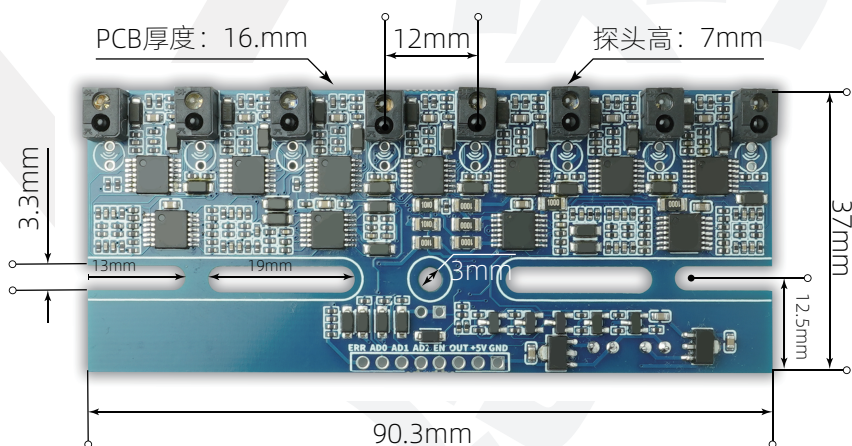
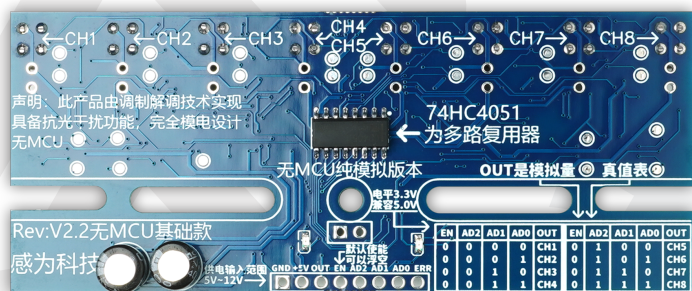
1	产品参数	5
1.1	产品参数	5
1.2	传感器尺寸	5
1.3	名称与功能	6
1.4	真值表	7
2	设备的安装	8
2.1	试机教程	8
2.2	例程的用法	10
2.3	强弱电隔离知识点	11
3	灰度测量理论	12
3.1	灰度测量的原理	12
3.2	传感器的颜色理论	13
3.2.1	色相环理论	13
3.2.2	灰色的色相环	15
3.3	检测距离对检测值的影响	17
3.3.1	理想模型	17
3.3.2	实际模型	19
3.3.3	结论	21
3.4	* 滞回比较器 (拓展)	22
3.4.1	单限比较器	22
3.4.2	滞回比较器	23
3.4.3	灰度传感器中的滞回比较器	23

1 产品参数

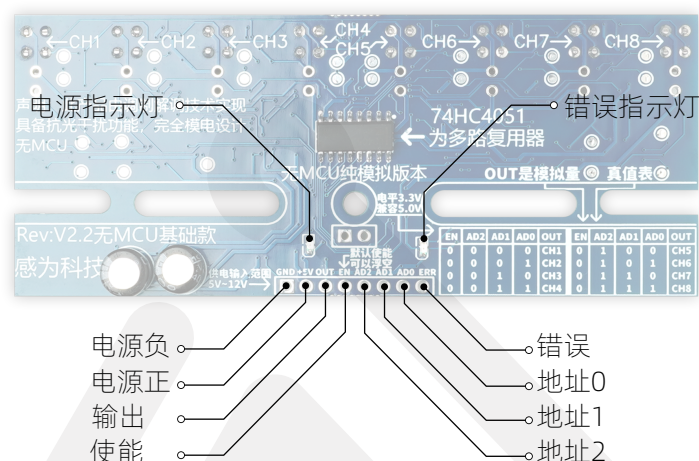
1.1 产品参数

性能参数						
	符号	最小值	典型值	最大值	单位	测试条件
工作电压	U	5	5	12	V	——
工作电流	I	117	120	130	mA	$U = 5V$
检测高度	h	4	20	100	mm	$U = 5V$
基础款响应速度	t	0.9	1	1.5	ms	$U = 5V$
青春款响应速度	t	8	10	12	ms	$U = 5V$
工作温度	T	-25	——	85	$^{\circ}C$	——
安装孔尺寸	——	3.3			mm	——
重量	G	15.3			g	——
通讯技术	通过 74HC4051 读取每一路的模拟量					

1.2 传感器尺寸



1.3 名称与功能



指示灯名称及功能：

- 电源指示灯：用于指示供电，绿色。
- 错误指示灯：用于指示故障，红色。

端口名称及功能：

- 电源正、电源负端口：用于接 5V 电源。
- 输出端口：用于输出模拟量信号，与 74HC4051 的 OUT 相连。
- 使能端口：禁止时关闭全电路电源，所有灯将全部熄灭。低电平使能，高电平禁止。该引脚内部与 GND 连接有 10K 电阻，所以引脚可以悬空，默认使能。
- 错误端口：用于向外输出报错信号，该端口与错误指示灯相连，可以悬空不用。
- 地址 0、地址 1、地址 2：用于选择输出通道，具体请参考下面的真值表。

1.4 真值表

此表结合 CD4051 手册制成，具体详情请下载：<https://www.ganv.com.cn/downloads/CD4051.pdf>

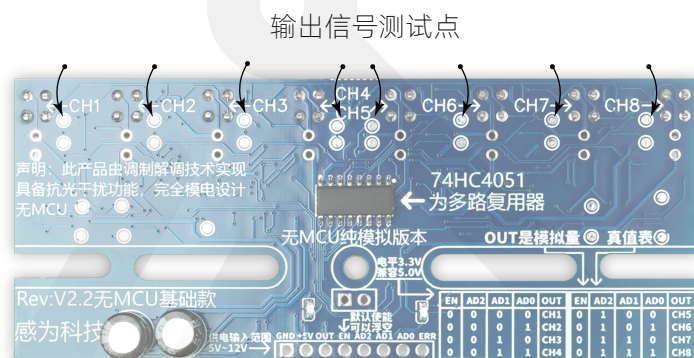
真值表				
输入				输出
EN	AD2	AD1	AD0	接通的路数
0	0	0	0	第一路
0	0	0	1	第二路
0	0	1	0	第三路
0	0	1	1	第四路
0	1	0	0	第五路
0	1	0	1	第六路
0	1	1	0	第七路
0	1	1	1	第八路
1	×	×	×	断电

注意：

- 当 EN=1 时，会切断整个传感器的供电，而非仅断 CD4051 的使能，所以您将观察到灰度处于全断电状态。
- 输出是模拟信号，需要您用 ADC 去读取，记着把 GPIO 设置成悬浮输入哦，不要设置成输出哦。
- EN AD0 AD1 AD2 是高低电平，可以兼容 3.3V 和 5V。记着把 GPIO 设置为输出哦。
- 如果在同一个距离的白纸下，发现 8 个探头的数据不相同，这属于正常现象，这是由于每个探头的天生灵敏度不同造成的，此外，电容电阻的值也是有波动的，也会造成信号放大倍数不同，这个无法避免。但是可以通过代码去统一，这一点可以看例程。

2 设备的安装

2.1 试机教程



新手朋友一定要阅读以下文字，切勿擅自安装、上电，以免造成不必要的麻烦。安装事项：

- 请务必确保 5V 供电的稳定，请勿与舵机、电机、喇叭等感性负载（有电感属性的负载）共用一个 5V 电源，由于感性负载在电流发生突变时会产生非常高的电压，可以轻松烧毁大多数设备。具体方法请看章节：2.3（章节号可直接点击）。这一点不是在说我们传感器娇气，我们传感器很皮实。我只是给大家提个醒，因为很多人不重视供电，很多人也吃亏在这里。
- 传感器精密，请勿对电路板、元器件破坏。您放心我们会在发货前是充分质检的，不会交给您坏的产品。
- 试机需要准备焊接用具、电源、万用表，有能力的朋友可以用示波器代替万用表。
- 第一步：焊接传感器与排针，如果您发现排针过长，请按照孔个数，自行掰开使用。如果您不懂焊接，请尝试在网上查找相关视频，自学焊接技术。焊接是电子工程师的基本功，这里我默认您是会焊接的。
- 第二步：请您用万用表检查您的电源的电压是否能在 5-12V 范围内，检查电源驱动能力是否能大于 150mA，如果任意一个条件不符合请您更换一个。
- 第三步：将电源正负极插在传感器的 +5V 和 GND 上，插反也没关系，内部设计有防反插电路，拔掉重新插正确即可，其余线路不要接。
- 第四步：观察电源指示灯的亮灭，如果不亮，可能是您此时 EN 端口插着电，拔掉 EN 线您再观察一下。如果还不亮，请您检查一下排针焊点有无虚焊，重新焊牢即可。如果还不亮，请用万用表测量 +5V 和 GND 电压是否正常，有些标着 +5V 的电压，输出未必真的是 5V，还需要用万用表去测量落实。如果测试有问题，您别着急，您可以联系淘宝客服帮您看看。
- 第五步：观察探头是否正常亮起，注意，红外款由于探头波长是不可见光，您无法通过肉眼看到他亮起，您可以尝试用手机摄像头、电脑摄像头或者红外监控观察。注意：有些型号的手机摄像头不

可见红外波段，如果发现手机不行，请换个手机，或者换台电脑看看。如果不亮，可能是您此时 EN 端口插着电，拔掉 EN 线您再观察一下。如果还不亮，请您检查一下排针焊点有无虚焊，重新焊牢即可。如果还不亮，请用万用表测量 +5V 和 GND 电压是否正常，有些标着 +5V 的电压，输出未必真的是 5V，还需要用万用表去测量落实。如果测试还有问题，您别着急，您可以联系淘宝客服帮您看看。

- 第六步：探头下放一张白纸，将万用表的黑色表笔连接到 GND，将红色表笔分别戳到输出信号测试点上，测试点的位置在上图展示。测试点可以跳过 74HC4051 数据选择器，来测量每一路的输出电压。我们看看万用表显示的电压是否跟随传感器上下起伏而高低波动。如果不跟随波动，请检查您的万用表是否测量良好。确定无误后，您看看 OUT 端口是不是插着线呢，您 GPIO 是会影响正常输出的哦，请拔掉再测量。如果测试有问题，您别着急，您可以联系淘宝客服帮您看看，精密传感器运输过程可能会造成损坏，我们会为您提供售后。
- 如果在同一个距离的白纸下，发现 8 个探头的数据不相同，这属于正常现象，这是由于每个探头的天生灵敏度不同造成的，此外，电容电阻的值也是有波动的，也会造成信号放大倍数不同，这个无法避免。但是可以通过代码去统一，这一点可以看例程。
- 测试没问题后，就可以将传感器安装到车上，传感器设有一排安装槽孔，可以安装上铜柱（铜柱自备不附送哦），以便调试高度。
- 请确保安装稳定牢固，灰度传感器是对安装距离敏感的设备，如果安装不稳定会影响输出质量。
- 安装高度请根据实际情况自由调整，调整高度的相关知识请参考章节3.3（章节号可直接点击）

2.2 例程的用法

请您先在官网下载例程，安装传感器到车上，然后接好线，至于怎么接线，应该您可以通过例程看出来，这我就不过多聊了。

我们先取出一个白纸出来，放到传感器下方，运行例程，看打印的值，我们将打印的 Anolog 值复制。打开例程，找到全局变量里面的 white[8]，把刚刚复制的值，逐一填进去。

```
54
55  /* USER CODE BEGIN PV */
56  unsigned char rx_buff[256]={0};
57  unsigned short Anolog[8]={0};
58  unsigned short white[8]={1600,1600,1600,1600,1600,1600,1600,1600};
59  unsigned short black[8]={100,100,100,100,100,100,100,100};
60  unsigned short Normal[8];
61  unsigned char Digital;
62  /* USER CODE END PV */
63
```

我们再取出一个黑纸出来，放到传感器下方，运行例程，看打印的值，我们将打印的 Anolog 值复制。打开例程，找到全局变量里面的 black[8]，把刚刚复制的值，逐一填进去。

```
54
55  /* USER CODE BEGIN PV */
56  unsigned char rx_buff[256]={0};
57  unsigned short Anolog[8]={0};
58  unsigned short white[8]={1600,1600,1600,1600,1600,1600,1600,1600};
59  unsigned short black[8]={100,100,100,100,100,100,100,100};
60  unsigned short Normal[8];
61  unsigned char Digital;
62  /* USER CODE END PV */
63
```

这样就完成了一次传感器的校准，刚您的过程就是在采样，告诉传感器白是什么样，黑是什么样。这样例程中的滞回比较器和归一化程序，就有了计算参数。如果您改变安装高度了，记着再走一遍这个流程哦。

如果在同一个距离的白纸下，发现 8 个探头打印的 Anolog 值都不相同，这属于正常现象，这是由于每个探头的天生灵敏度不同造成的，此外，电容电阻的值也是有波动的，也会造成信号放大倍数不同，这个无法避免。

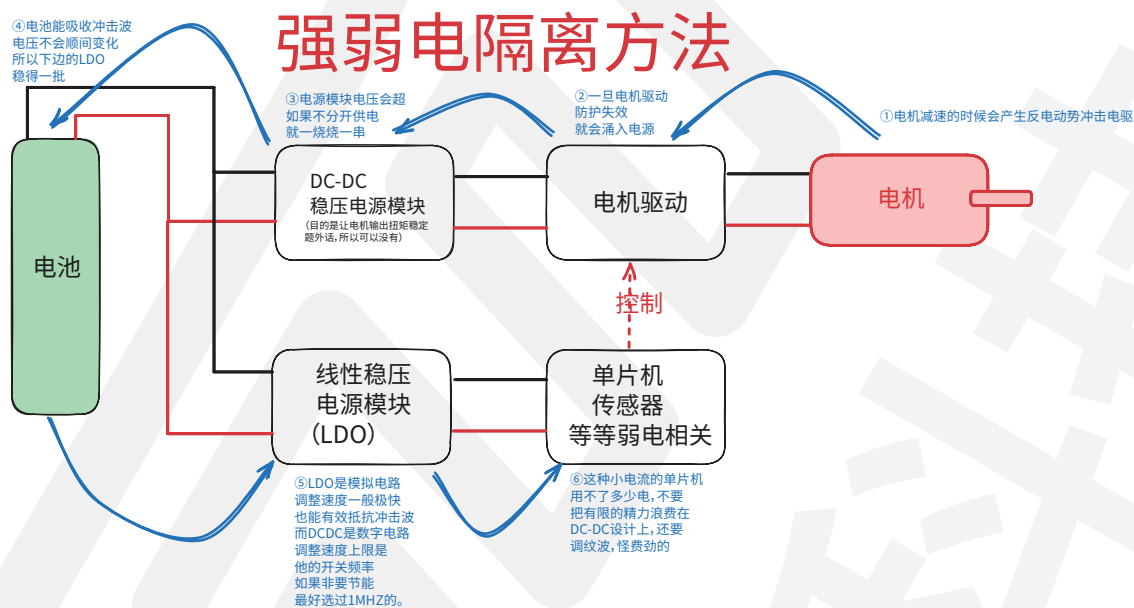
您只需要把两个值采样，填写进去以后，您会看到，白纸下，打印出来的 Normalize（归一化），所有探头都是一个统一的数值了。并且，Digital 打印也正常了，此时您就可以通过 Digital 这个变量判断黑白线了。

上述过程是黑白色的校准过程，例如您用的是白底红线，您就用赛道的红线去代替黑纸就可以了，记着要把所有探头置于红线正上方，去完成上述过程。其他颜色的同理。

2.3 强弱电隔离知识点

避免您误会，我强调一下，这不是因为感为传感器娇气，而是强弱电隔离可以有效避免联动式烧毁，很多新手朋友都出现过“串串香”的情况，一般是由于强弱电不隔离导致的。本着对您负责的态度，我将隔离供电的相关原理放到了下面一页，希望新手朋友阅读。

用电池供电，怕电压太高？别误会，只要在 5V-12V 范围内都可以，因为传感器内部设计了多种电压的 LDO（线性稳压器）以供运放稳定工作。所以您只要在正确范围内供电，输入输出端口都将电压稳定，不会随着您的供电电压上升而上升的。



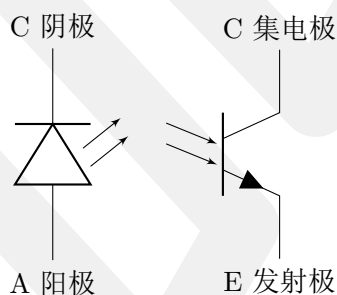
3 灰度测量理论

3.1 灰度测量的原理

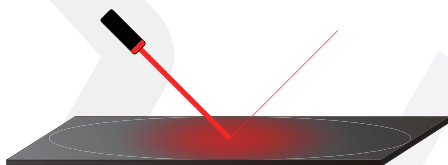
说起灰度传感器不得不提及光电对管，因为它是灰度传感器的重要部件，没有一个稳定的光电对管，无论算法有多先进都是不能实现的。



这是一个光电对管的简易示意图，LED 发出一束光，被检测面反射后，照射到光电三极管中。光电三极管是一个对光线敏感的器件，进光量越多，经过它的电流也就越大。当一束光照射到检测面后，一部分被检测面吸收，一部分反射到光电三极管中，于是产生了电流值。



检测面的灰度越深对于光的吸收越强，而反射的光线也会更弱，能被三极管捕捉的光先也就更少了。于是我们可以得出结论：不同的检测面灰度，产生了不同的电流值。



在检测过程中，能被三极管检测到的不是只有 LED 发出的光线，还有环境当中的复杂光线等很多种干扰，所以我们还要对电流信号进行信号处理。

处理方式暂时不公开，但是能很稳定的删除环境光的干扰，具体实现方法请看我们的专利。

3.2 传感器的颜色理论

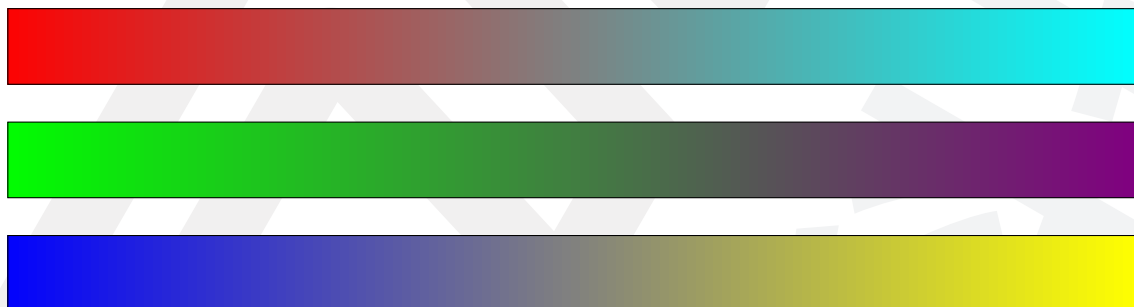
我们通常理解上讲，灰度是一个在白黑之间的数据，是一种不包含色彩的灰度信息。但实际上在灰度传感器当中，灰度只是一个电信号，可以是任意颜色，究竟是怎么回事呢？



灰度传感器中，能感受到的只是电压信号值，这个电压信号仅与三极管接收光线多少有关。

在章节3.1的理论中最关键的是检测面对 LED 光的吸收，如果想检测到某一种颜色，只需要保证检测面的颜色与 LED 光线的颜色匹配，即可将大多数光线反射到光电三极管中，从而形成与白色相同的电信号。

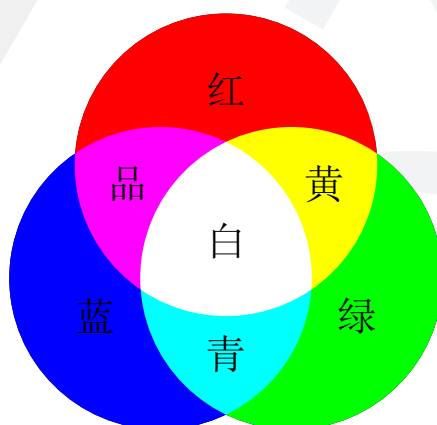
蓝色的补色是黄色，被蓝色的 LED 光照射后，所产生的电信号和黑色一样，因为补色 = 白色 - 正色，也就是说除了正色之外的所有颜色的集合。例如红色的补色是青色，青色的 RGB 数值是 (0%,100%,100%)，红色的 RGB 数值是 (100%,0%,0%)，两种颜色互为相反。如果用红光的 LED 照射两种颜色的话，青色因为不包含红色，所以红光被吸收，电信号就为黑色；而红色因为可以反射大部分红光，所以电信号显示为白色。不难发现，我们利用原色和补色的对立性，顺利的将灰度与色彩产生了联系，仅需要改变 LED 的颜色，即可对彩色识别。



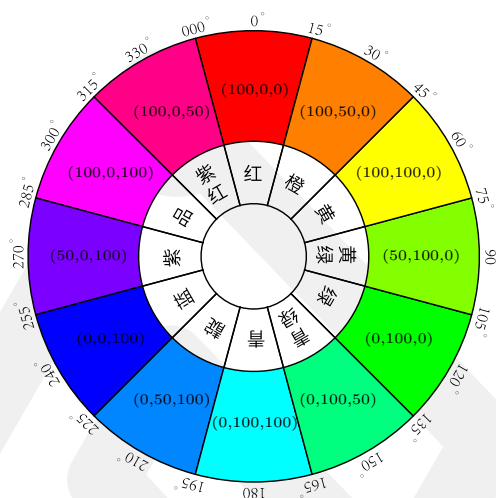
上图为红绿蓝三色与补色的渐变图，实际上这种表示方式是不够准确的一维的图像不足以覆盖更多的颜色，仅因为它与黑白表达类似，能方便理解从而被采用。实际使用中，色彩的灰度远比图中的色彩丰富的多。我们必须引入更加丰富的二维图像——色相环。

3.2.1 色相环理论

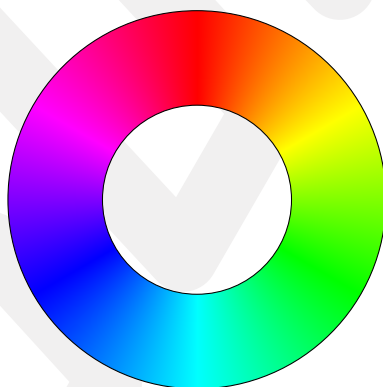
色相环是由红、绿、蓝三原色经过多次融合而形成的环状色相图。首先红 (100,0,0)、绿 (0,100,0)、蓝 (0,0,100) 三原色相互融合生成黄 (100,100,0)、青 (0,100,100)、品 (100,0,100)，这三种颜色称之为三间色。



再将三原色与三间色相邻相容，形成二次间色，橙 (100,50,0)、黄绿 (50,100,0)、青绿 (0,100,50)、靛 (0,50,100)、紫 (50,0,100)、紫红 (100,0,50)。例如红 (100,0,0) 与黄 (100,100,0) 相容成为橙 (100,50,0)；青 (0,100,100) 与蓝 (0,0,100) 相容成为靛 (0,50,100)。



以此类推相邻相容，无限细分，就形成了标准的 RGB 色相环，但通常上，12 个色相就足够满足工程上的需要，无需再度细分。



在 RGB 三原色的体系下，色相环中每一种颜色都能由三原色混合而成，就像此时你看的屏幕一样，是由无数的红绿蓝发光单元组合而成。每一种原色都可以认为是一个通道，分别有红、绿、蓝三种，例如橙色 (100,50,0)，意义是红色通道透明度 100%；绿色通道透明度 50%；蓝色通道透明度 0%。将三个原色叠加一起，就得到了橙色。

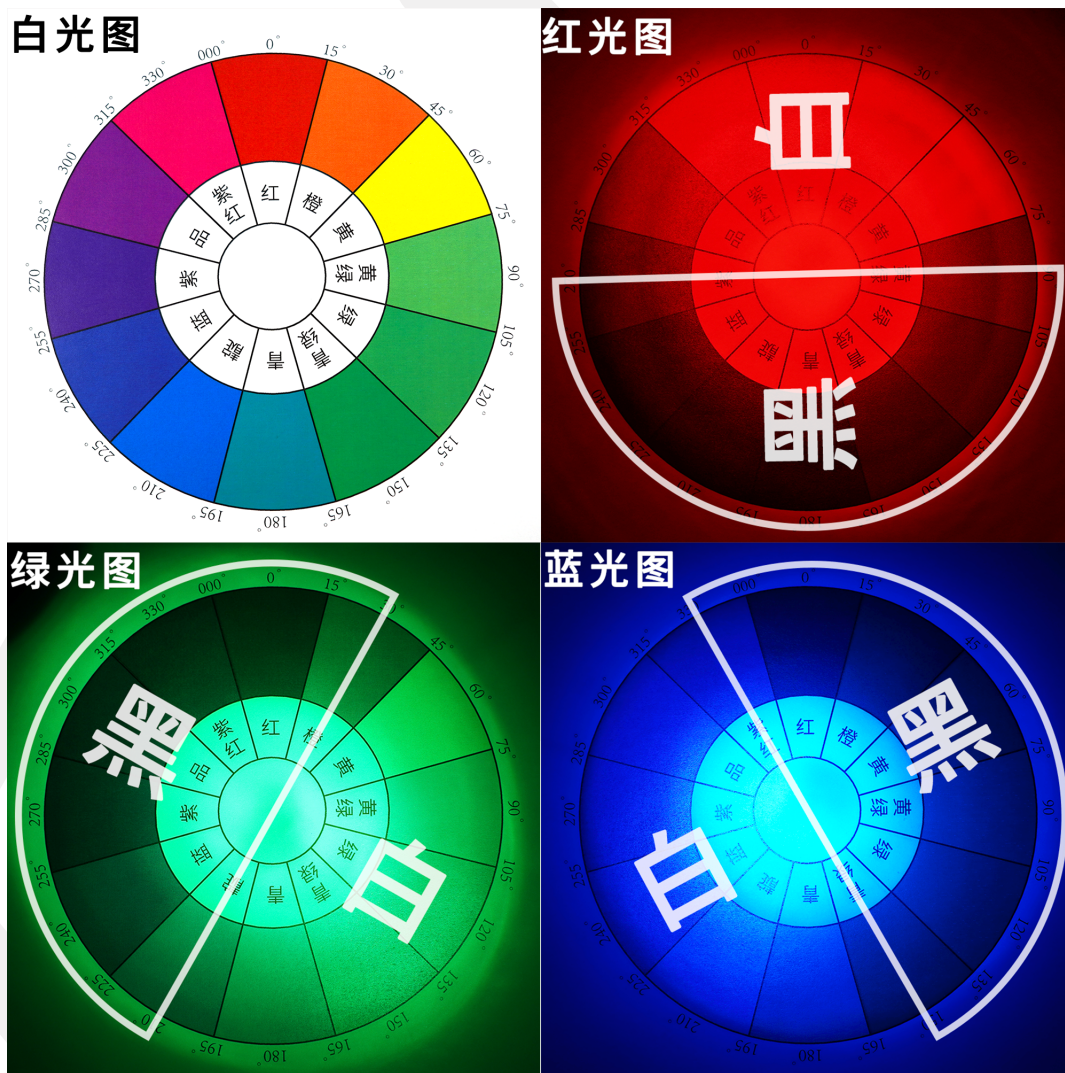
此时如果我们将色相环的通道分别单独提取出来，由于丢失部分通道数据，失去了作为色彩的意义，就成为了黑白图像，而这个图像就是我们熟悉的灰度图像。



3.2.2 灰色的色相环

为什么要介绍色环与通道呢？因为我们真的能实现检测面的通道提取。其要点是在于光电对管的 LED 发光颜色，假如 LED 发射红光，那么经检测面反射的只有红光，于是绿色或者蓝色的检测面则会吸收红光，所以呈现黑色。

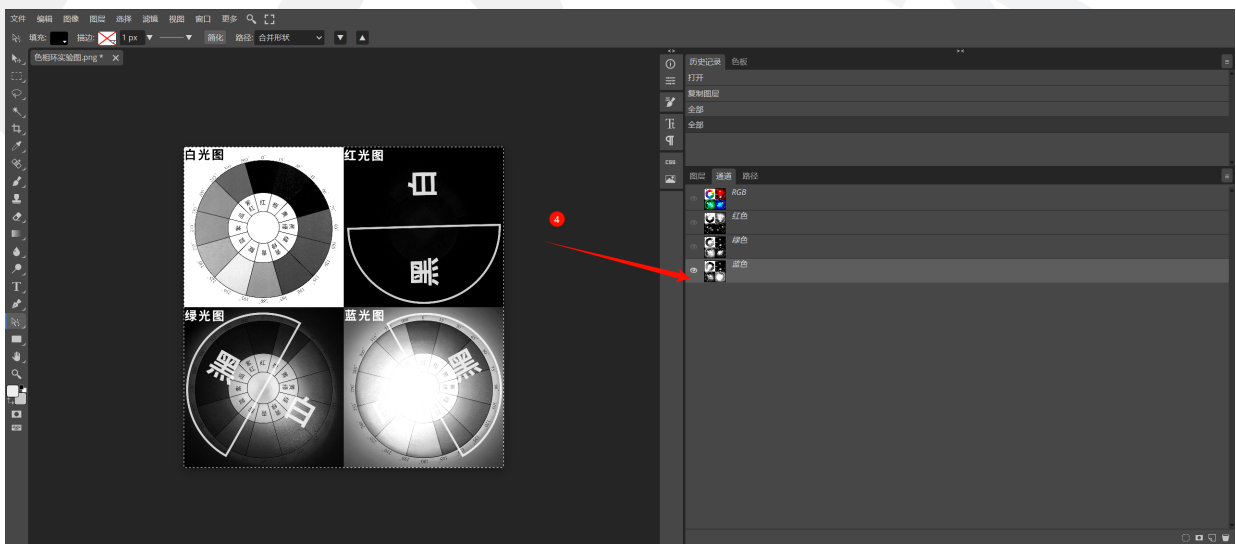
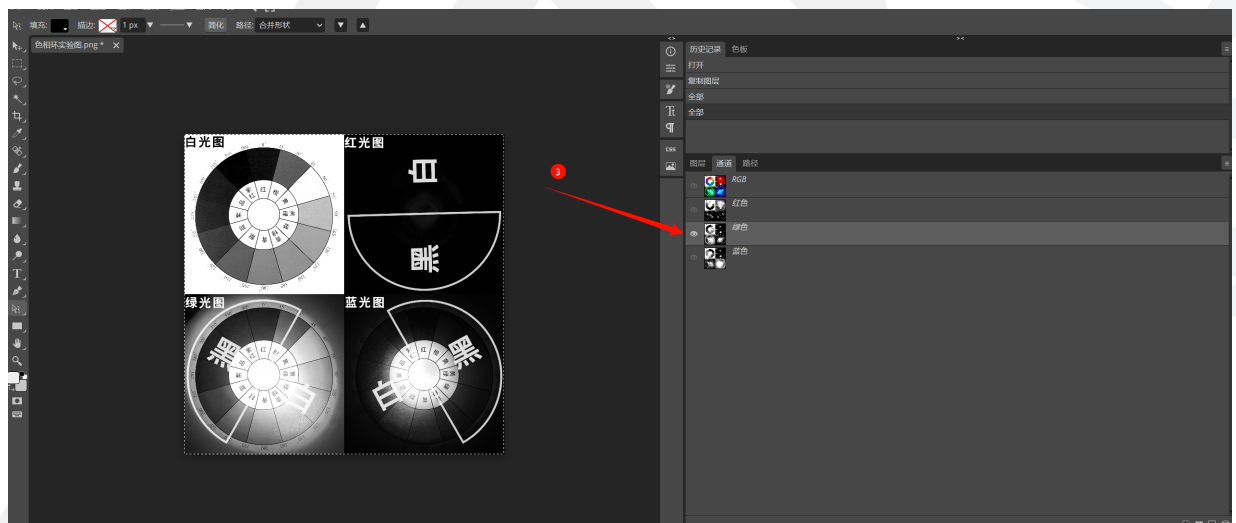
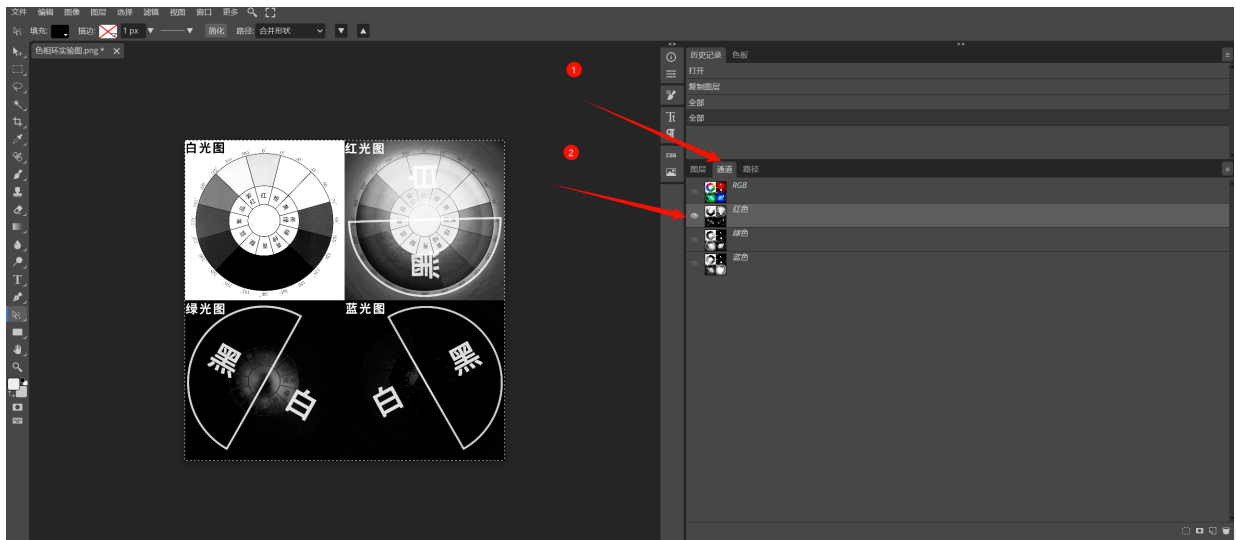
用这种方法，我们可以将所有红色通道提取出来，转成数字信号后进行分析，于是就得到了单通道的灰度，我们在实验中也印证了此结论。



可以看出，青色与红色这对补色，在图中的角度为 180° 。在色相环理论中，凡是两种颜色在图中成 180° ，这两种颜色互为补色，也就是对比最为强烈。

值得注意的是，如果您碰到白色和黑色，不要担心，灰度传感器最终都是要将颜色转变为黑白色的，那您可以认为白事永恒的白，任何光色 LED 都能反射最强亮度，黑也是同理。

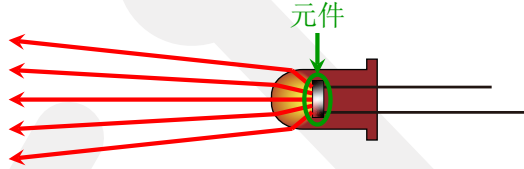
如果您无法确认自己的赛道适用于哪一款，建议您尝试一下使用在线 PS 网站，拍个赛道照片。丢到网站里。在最下角点击通道，在点击相应的通道就可以看到每种光款下的视觉效果了。



3.3 检测距离对检测值的影响

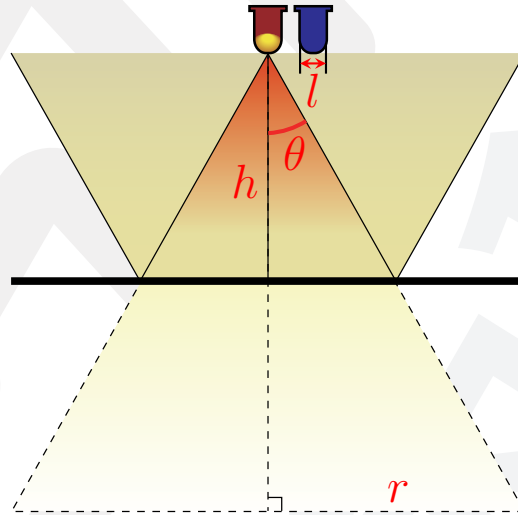
3.3.1 理想模型

要想研究检测距离对检测值的影响，必须了解光电对管的内部构成。其实不管是光电对管的发射管还是接收管，他们内部的发光或受光元件体积很小，且光路都是向外发散的。它们必须经过一个透镜，才使用。经过透镜后，光路被束缚在一个较小的范围内，这个范围角度我们称之为光角。



加上透镜后，发射管能“照”的更远、“照”的更亮；接收管则在沿光路的方向上受光面积增大，而超出光角范围受光面积减小，从而能在特定的方向上捕捉更多的光线。这就像戴着老花镜的老奶奶，戴上老花眼镜后眼睛会变大一样。

为了进一步研究光在反射后的效果，我们假设检测面是光滑且能全反射的镜面。我们可以把光路的图像¹绘制为如下所示。其中虚线部分为镜子反射的虚像，实线部分为实像， h 为对管距检测面的高度； r 为光路到达接收管时，光角扫过长度的一半； θ 为光角的一半， l 为接收元件经过透镜放大后的最大直径，即为透镜的直径。



假设反射的光线是均匀的，如图可知，如果 2 倍的 r 是发射光线的总和，则 l 可代表接收光线的总和。将 $\frac{l}{2r}$ 称之为相对进光量，即接收光/发射光，为一个百分数，比值接近 100% 时，证明发射的光线被全部接收。

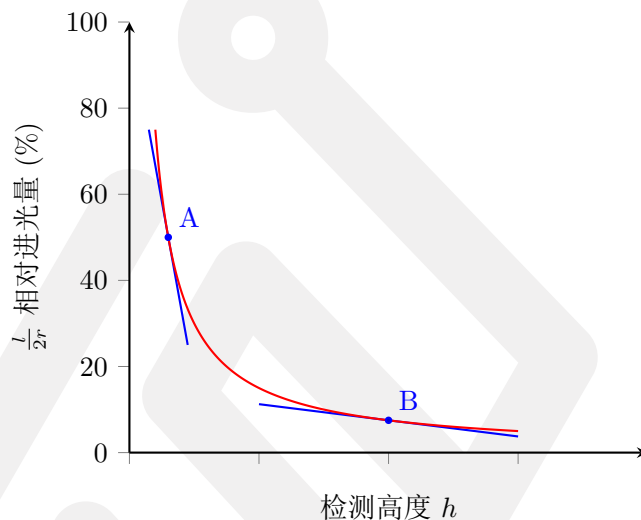
$$\begin{aligned}\frac{l}{2r} &= \frac{l}{2 \times (2 \times h \times \tan \theta)} \\ &= \frac{l}{4h \tan \theta} \\ &= \frac{l}{4 \tan \theta} \times \frac{1}{h}\end{aligned}$$

¹这是在二维平面上的推导过程，在三维空间中，光角扫过的是一个圆锥体，在检测面上的投影是一个圆形，但这并不影响推导结果，差异被常数 c 吸收，趋势未发生变化，有兴趣的朋友可以自行推导。

其中 $\frac{l}{4 \tan \theta}$ 中的 l 、 θ 为已知常量，可以将整体看做一个常数 c ，则：

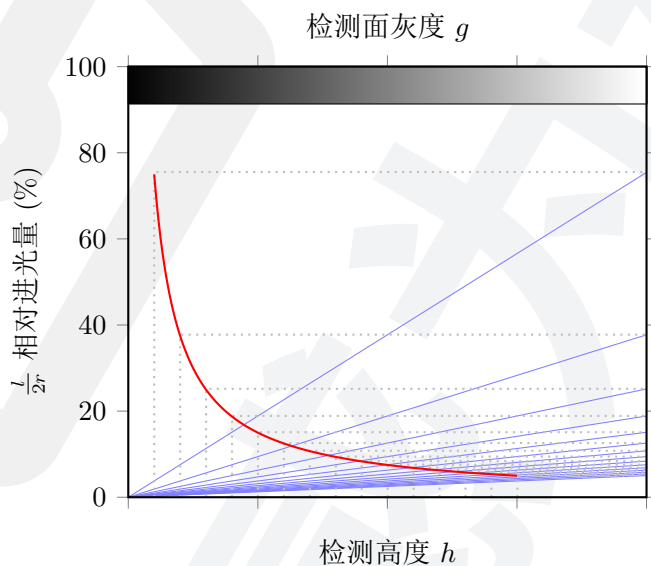
$$\frac{l}{2r} = \frac{c}{h}$$

相对进光量 $\frac{l}{2r}$ 与距检测面高度 h 成反比例，其图像为：



图中标记了在不同检测高度 h 下的斜率。可以看到，在不同高度下，曲线的切线斜率不同的。这意味着在不同的检测高度下，测量稳定性有所差异。

例如检测高度 h 置于 A 点，当检测高度 h 发生了微小的波动，由于 A 点的切线斜率过大，相当于给波动乘以一个十分大的系数，使得相对进光量波动巨大，从而造成灰度值的检测错误。当检测高度 h 置于 B 点，即使检测高度发生了一些波动，由于切线斜率较小，使得波动被削弱，从而减小了相对进光量的波动，增加了灰度传感器的稳定性。

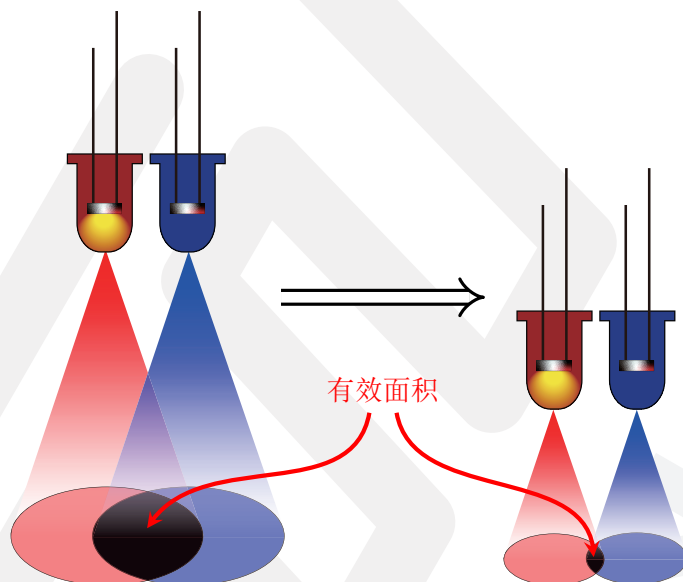


上面的图像中，有 3 个坐标轴，分别为检测高度 h 、检测面灰度 g 、相对进光量 $\frac{l}{2r}$ 。红色代表着相对进光量 $\frac{l}{2r}$ 与检测高度 h 的曲线，而蓝色则代表着在不同检测高度 h 下的，相对进光量 $\frac{l}{2r}$ 与检测面灰度 g 的曲线。

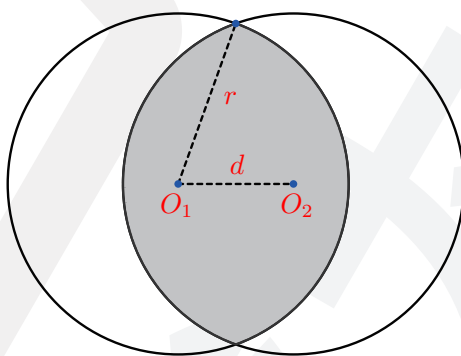
由图中可以看出，随着检测高度 h 的增高，传感器对检测面灰度 g 的灵敏度相应降低，灵敏度体现在蓝色直线的斜率上，在同一检测面灰度 g 的变化下，斜率越大，进光量 $\frac{I}{2r}$ 的变化越大。故检测高度 h 越低，传感器的灵敏度越高。

3.3.2 实际模型

实际上当检测高度 h 低到一个阈值时，灰度的灵敏度、稳定性反而会双双降低，其原因如图所示，红色是发射管，蓝色是接收管。由于光路可逆原理，我们将接收管也表达为发射光束，以便分析。



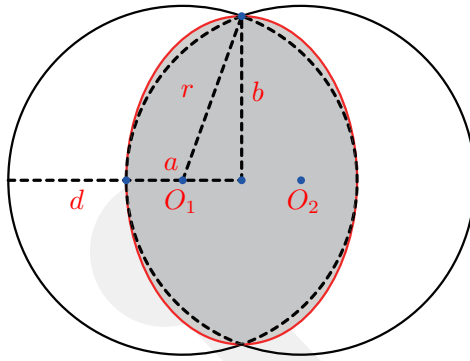
当光电对管距检测面的距离降低时，其有效面积实际上是减小的，因为接收管与发射管在水平方向上有一些距离，当检测距离拉近的时候，投影的半径会减小，但管间距不变，从上图可以看出，有效面积实际上是减小的。究竟有效面积是如何变化的呢，我们可以通过几何运算得出，其示意图如图所示：



其中， d 为发射管与接收管的水平距离，该参数不会发生任何变化； r 为投影圆的半径，该参数为变量，随着检测高度 h 变化而产生变化。

要想计算出阴影面积，有很多种方法可以精确计算出，但演算过程较为复杂。如果我们的目的仅为分析趋势，可以采用一种近似法，简单的求出一个近似解。

我们可以将阴影部分的面积看似一个椭圆形，椭圆形的面积公式为 $s = \pi ab$ ，其中 a 、 b 分别为椭圆的短半轴与长半轴。这样我们就可以将两个弓形面积简化为一个椭圆的面积。



可以看到在该图中， d 的位置发生了变化，这是由于两个半径相等的圆，在水平方向上，两边缘的距离与圆心的距离相等。如果我们将圆的直径 $2r$ 减去 d ，就可以得到短轴的长度。则短半轴长度 a 的公式为：

$$a = \frac{2r - d}{2}$$

又由于 O_1 至 O_2 的长度为 d ，已知半径为 r ， b 可以用勾股定理计算。则长半轴长度 b 的公式：

$$b = \sqrt{r^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2}$$

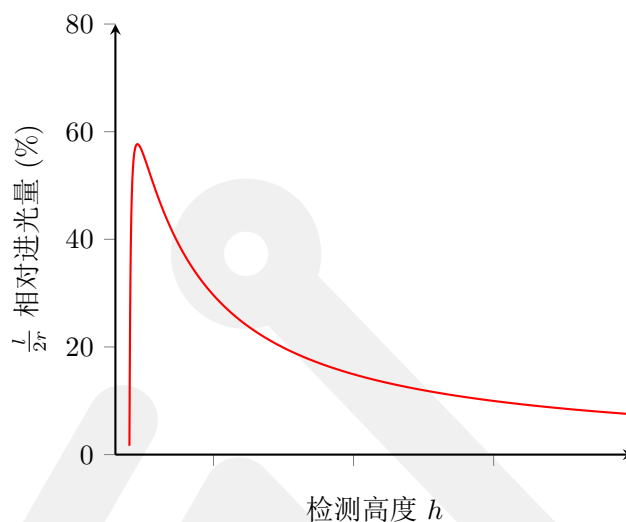
分析这个问题仅计算阴影面积是没有意义的，我们必须得到一个参数—有效面积率 ρ ，即计算出阴影面积占圆面积的比值，这样我们用这个比值乘以理想模型中的函数，就可以直观看到实际模型的曲线。有效面积率 ρ 为：

$$\begin{aligned} \rho &= \frac{S}{S_O} = \frac{\pi ab}{\pi r^2} \\ &= \frac{\frac{2r-d}{2} \sqrt{r^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2}}{r^2} \\ &= \frac{(2r-d) \sqrt{r^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2}}{2r^2} \end{aligned}$$

由理想模型可知， $r = 2h \tan \theta$ ，则有：

$$\begin{aligned} \rho &= \frac{(2r-d) \sqrt{r^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2}}{2r^2} \\ &= \frac{(2(2h \tan \theta) - d) \sqrt{(2h \tan \theta)^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2}}{2(2 \tan \theta h)^2} \\ &= \frac{(4 \tan \theta h - d) \sqrt{4 \tan^2 \theta h^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2}}{4 \tan^2 \theta h^2} \end{aligned}$$

最终将理想模型乘上有效面积率 ρ ，即可得到实际中的模型，其图像为：



可以看到，当检测距离较近时，曲线斜率很大，测量十分不稳定，且灵敏度也会随着距离的拉近变得更差。所以说尽管降低检测距离能带来高的敏感度，我们也不应该让传感器运行在该工况下。

3.3.3 结论

综上所述，检测高度对检测值影响的结论为：

- 检测高度 h 越低，对于灰度的检测越敏感，但是如果传感器使用工况存在颠簸的情况，那么传感器极易受路面影响而发生误判。
- 检测高度 h 越高，对于灰度检测越稳定，但是如果距离太远，由于传感器灵敏度过低，极易出现判别不清，从而失灵的状况。
- 检测高度 h 过低，对于灰度检测是破坏性的，检测极不稳定且灵敏度会变低，我们应该极力避免传感器运行在该工况下。
- 检测高度 h 应当设置在一个合理的点上，做到既稳定又敏感。可以参考章节1.1
- 示例中是以镜面为检测面，在实际使用中，检测面的类别、材质、颜色各不相同，远比镜面复杂的多，但趋势不会发生变化。

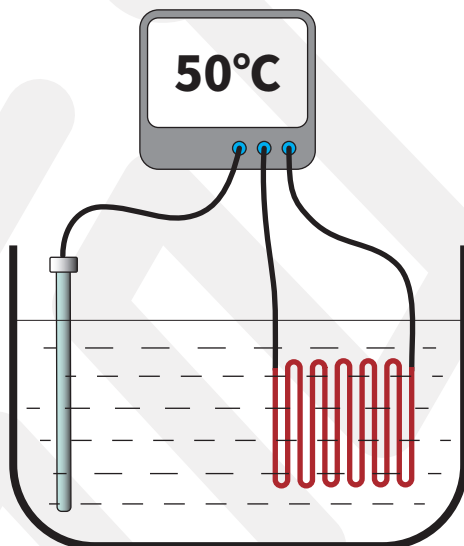
我们在使用传感器时，如果出现问题应该按照以上结论自行判断。

3.4 * 滞回比较器 (拓展)

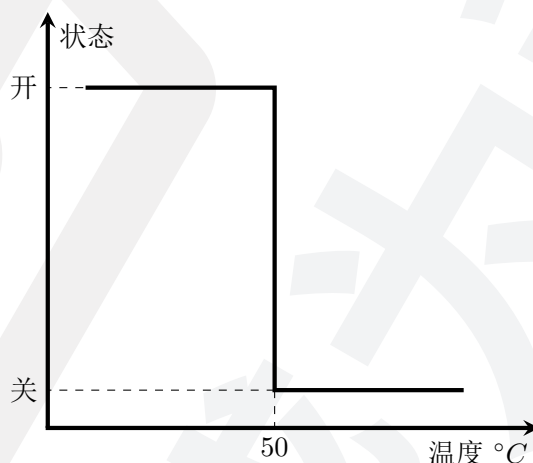
要想由浅入深的了解滞回比较器，我们不得不提及单限比较器，单限比较器一般只有一个阈值²，在阈值左右有两种不同的状态。

3.4.1 单限比较器

为了解释单限比较器，我们以水温控制器为例说明。



如果我们将水温用单限比较器控制在 50°C 左右，那么如果测温棒测得水温低于 50°C 水时，控制器就打开加热器给水加温，如果高于 50°C 则关闭加热器停止加温，这样最终温度会稳定在 50°C 左右。这是单限比较器一个典型的例子，其对应的特性为：

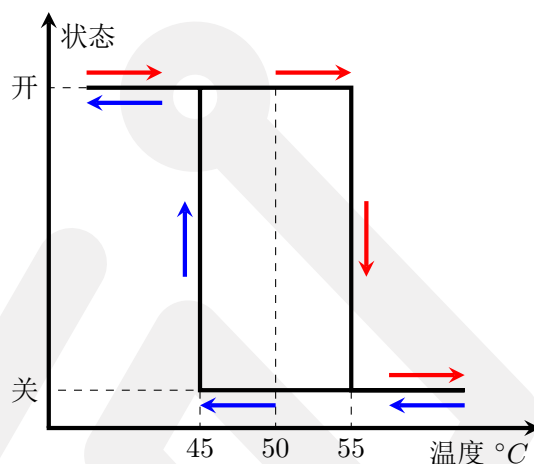


单限比较器比较灵敏、使用简单，但其抗干扰能力差，当温度在 50°C 附近时，任何的微小变化，都将引起开关状态的跃变，不论是水温变化还是外部干扰。具体表现为：控制器将不停的在开、关两种状态间跳跃，导致设备的寿命降低。

² 阈值：又称临界值，事物在两种不同状态之间的临界点，是事物状态发生跳变的分水岭

3.4.2 滞回比较器

滞回比较器因此应运而生，解决了这个问题，因为滞回比较器具有滞回特性，即具有惯性，因而具有一定的抗干扰能力。滞回比较器如下图所示：



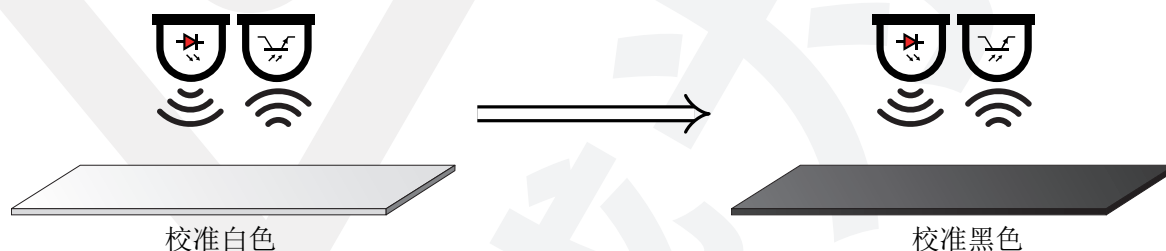
当水温低于 45°C 时，打开加热器，提高水温，直至温度高于 55°C 时，关闭加热器，停止加热，如红色箭头所示；当水温高于 55°C 时，关闭加热器，降低水温，直至温度低于 45°C 时，打开加热器，开始加热，如蓝色箭头所示。

换言之，由于滞回比较器的惯性特征，当水温加热至 45°C 阈值时，滞回比较器会让水温再加热到 55°C 后才停止通电。同理，当水温降至 55°C 后，由于惯性特征，滞回比较器会等待水温低于 45°C 才打开加热器。

这样一个循环，可以将水温保持在 45 ~ 55°C 之间，滞回比较器在任何温度下均不会发生抖动，可以说滞回比较器具有了抗干扰特性。

3.4.3 灰度传感器中的滞回比较器

在以上例子中，我们有两个阈值参数，一个是 45°C 阈值，一个是 55°C 阈值。在您写的代码中也应该有两个阈值参数，分别为灰黑阈值 (GrayB) 与灰白阈值 (GrayW)，通过该参数实现模拟量向数字量的转化。



校准完成后，设备会得到两个值：白色采样值与黑色采样值。它会根据这两个值计算出灰黑值 (GrayB) 与灰白值 (GrayW)，它们分别在黑白之间的 $\frac{1}{3}$ 处、 $\frac{2}{3}$ ，其计算公式为：

$$U_{GrayW} = \frac{U_{black} + 2U_{white}}{3}$$

$$U_{GrayB} = \frac{2U_{black} + U_{white}}{3}$$