

LED 的调光原理分析与设计实例

茅于海

作为一种光源，调光是很重要的。不仅是为了在家居中得到一个更舒适的环境，在今天来说，减少不必要的电光线，以进一步实现节能减排的目的是更加重要的一件事。而且对于 LED 光源来说，调光也是比其他荧光灯、节能灯、高压钠灯等更容易实现，所以更应该在各种类型的 LED 灯具中加上调光的功能。

第一部分 采用直流电源 LED 的调光技术

一. 用调正向电流的方法来调亮度

要改变 LED 的亮度，是很容易实现的。首先想到的是改变它的驱动电流，因为 LED 的亮度是几乎和它的驱动电流直接成正比关系。图 1 中显示了 Cree 公司的 XLampXP-G 的输出相对光强和正向电流的关系。

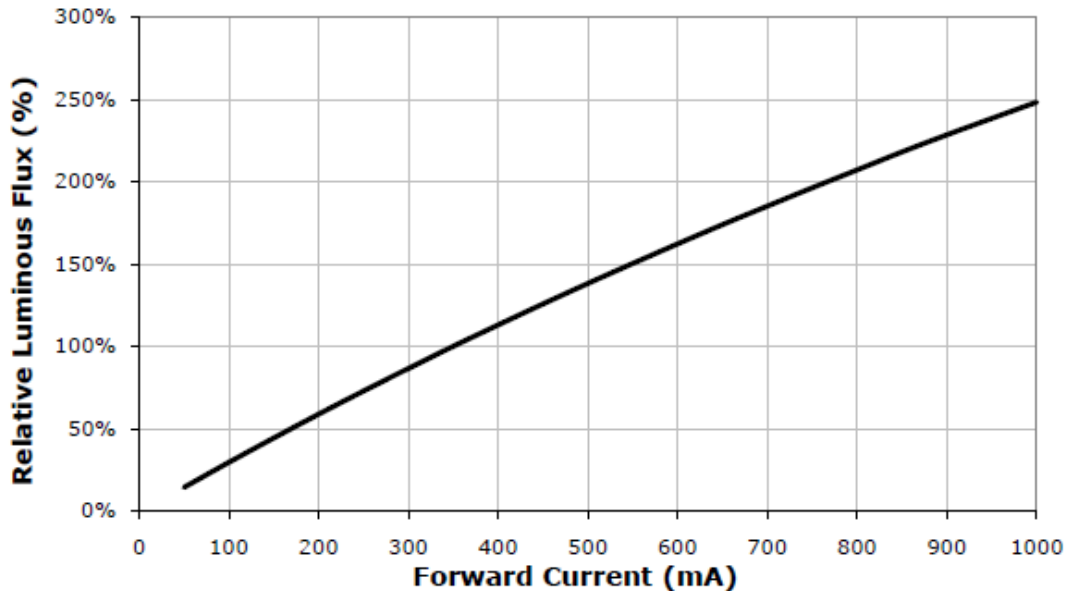


图 1. XLampXP-G 的输出相对光强和正向电流的关系

由图中可知，假如以 350mA 时的光输出作为 100%，那么 200mA 时的光输出就大约是 60%，100mA 时大约是 25%。所以调电流可以很容易实现亮度的调节。

1.1 调节正向电流的方法

调节 LED 的电流最简单的方法就是改变和 LED 负载串联的电流检测电阻（图 2a），几乎所有 DC-DC 恒流芯片都有一个检测电流的接口，是检测到的电压和芯片内部的参考电压比较，来控制电流的恒定。但是这个检测电阻的值通常很小，只有零点几欧，如果要在墙上装一个零点几欧的电位器来调节电流是不大可能的，因为引线电阻也会有零点几欧了。所以有些芯片提供一个控制电压接口，改变输入的控制电压就可以改变其输出恒流值。例如凌特公司的 LT3478（图 2b）只要改变 R1 和 R2 的比值，也可以改变其输出的恒流值。

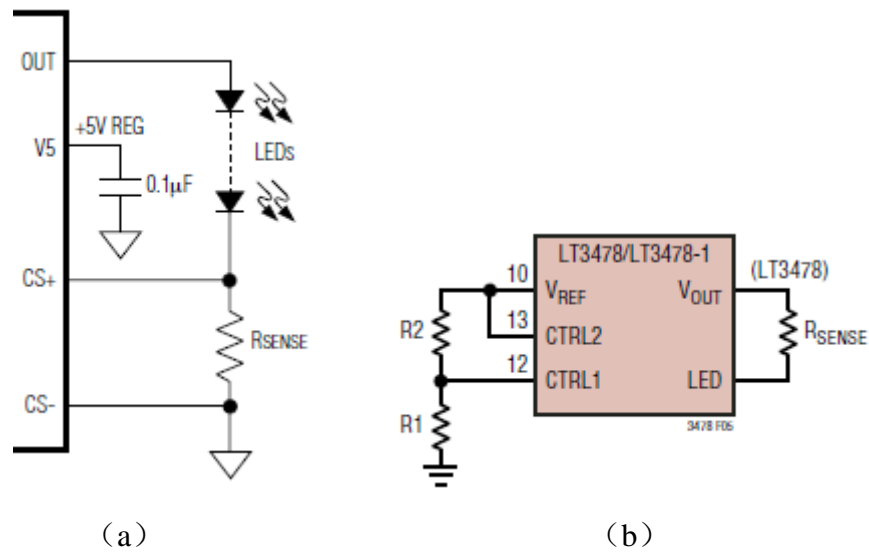


图 2. 输出恒流值的调节

1.2 调正向电流会使色谱偏移

然而用调正向电流的方法来调亮度会产生一个问题，那就是在调亮度的同时也会改变它的光谱和色温。因为目前白光 LED 都是用蓝光 LED 激发黄色荧光粉而产生，当正向电流减小时，蓝光 LED 亮度增加而黄色荧光粉的厚度并没有按比例减薄，从而使其光谱的主波长增长，具体实例如图 3 所示。

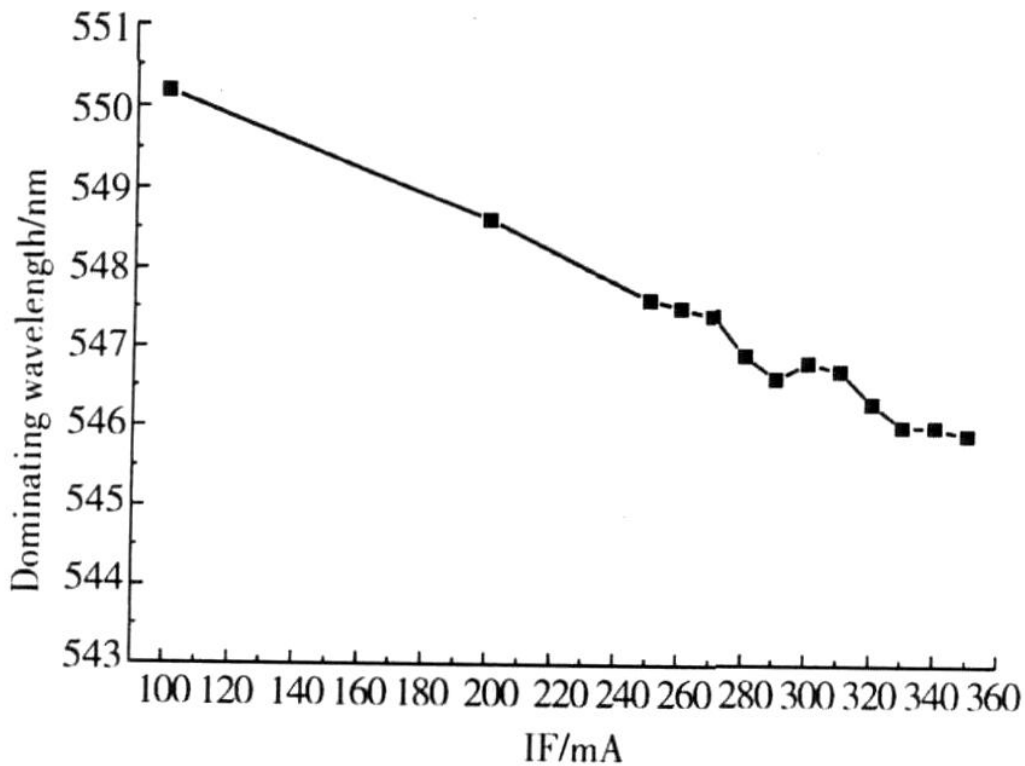


图 3.. 主波长和正向电流的关系

当正向电流为 350mA 时，主波长为 545.8nm；当正向电流减小为 200mA 时，主

波长为 548.6nm；当正向电流减小为 100mA 时，主波长为 550.2nm。正向电流的改变也会引起色温的变化（图 4）。

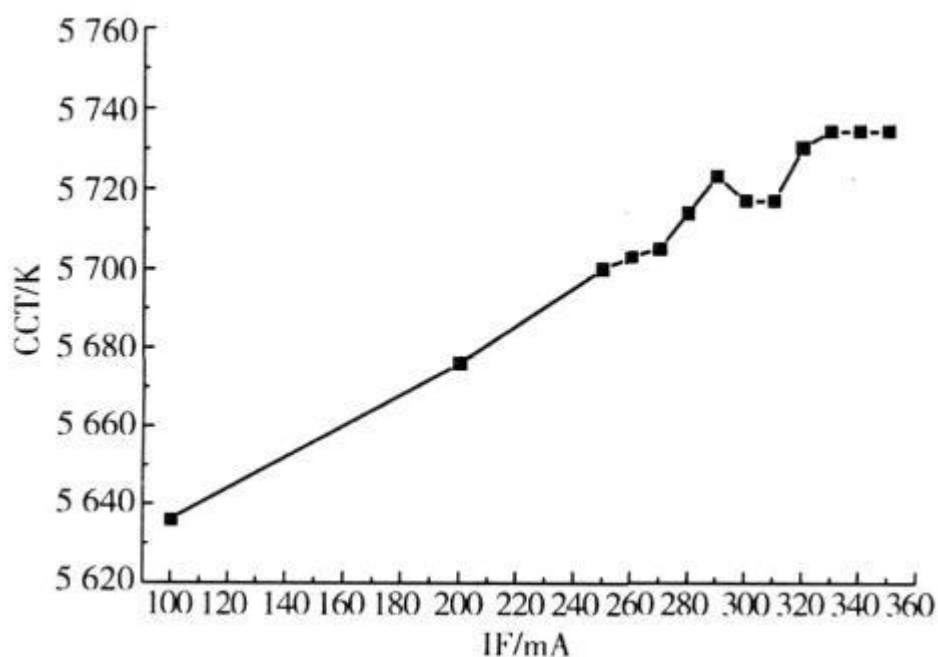


图 4. 白光 LED 的色温和正向电流的关系

由图 4 可知，当正向电流为 350mA 时，色温为 5734K，而正向电流增加到 350mA 时，色温就偏移到了 5636K。电流再进一步减小时，色温会向暖色变化。当然这些问题在一般的实际照明中可能不算是一个大问题。然而在采用 RGB 的 LED 系统中，就会引起彩色的偏移，而人眼对彩色的偏差是十分敏感的，因此也是不能允许的。

1.3 调电流会产生使恒流源无法工作的严重问题

然而在具体实现中，用调正向电流的方法来调光可能会产生一个更为严重的问题。

我们知道 LED 通常是用 DC-DC 的恒流驱动电源来驱动的，而这类恒流驱动源通常分为升压型或降压型两种（当然还有升降压型，但由于效率低、价钱贵而不常用）。究竟采用升压型还是降压型是由电源电压和 LED 负载电压之间的关系决定的。假如电源电压低于负载电压就采用升压型；假如电源电压高于负载电压就采用降压型。而 LED 的正向电压是由其正向电流决定的。从 LED 的伏安特性（图 5）可知，正向电流的变化会引起正向电压的相应变化，确切地说，正向电流的减小也会引起正向电压的减小。所以在把电流调低的时候，LED 的正向电压也就跟着降低。这就会改变电源电压和负载电压之间的关系。

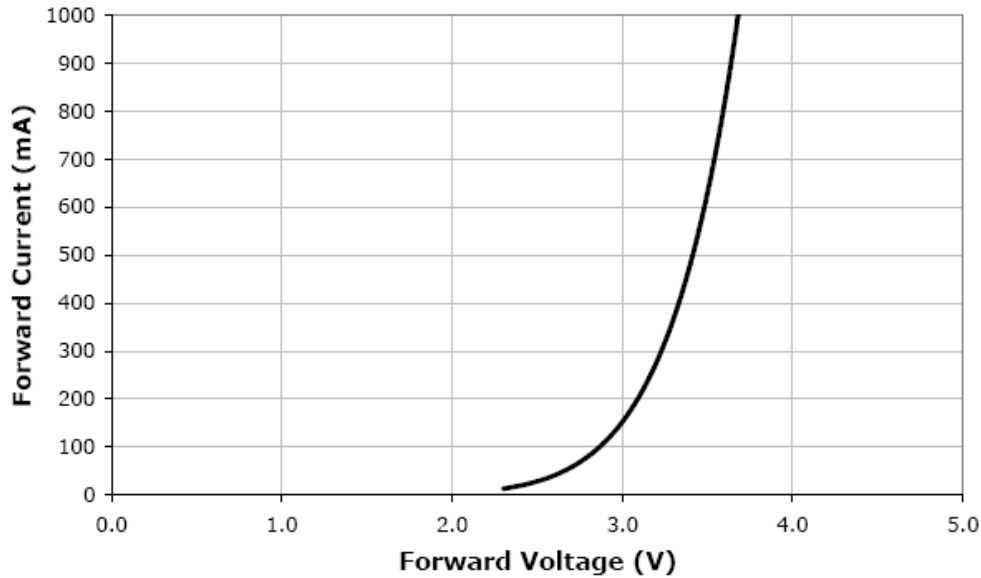


图 5. LED 的伏安特性

例如，在一个输入为 24V 的 LED 灯具中，采用了 8 颗 1W 的大功率 LED 串联起来。在正向电流为 350mA 时，每个 LED 的正向电压是 3.3V。那么 8 颗串联就是 26.4V，比输入电压高。所以应该采用升压型恒流源。但是，为了要调光，把电流降到 100mA，这时候的正向电压只有 2.8V，8 颗串联为 22.4V，负载电压就变成低于电源电压。这样升压型恒流源就根本无法工作，而应该采用降压型。对于一个升压型的恒流源一定要它工作于降压是不行的，最后 LED 就会出现闪烁现象。实际上，只要是采用了升压型恒流源，在用调正向电流调光时，只要调到很低的亮度几乎一定会产生闪烁现象。因为那时候的 LED 负载电压一定是低于电源电压。很多人因为不了解其中的问题，还总要去从调光的电路里去找问题，那是徒劳无益的。

采用降压型恒流源问题会少一些，因为如果本来电源电压高于负载电压，当亮度是往低调，负载电压是降低的，所以还是需要降压型恒流源。但是如果调到非常低的正向电流，LED 的负载电压也变得很低，那时候降压比非常大，也可能超出了这种降压型恒流源的正常工作范围，也会使它无法工作而产生闪烁。

1.4 长时间工作于低亮度有可能会使降压型恒流源效率降低温升增高而无法工作

一般人可能认为向下调光是降低恒流源的输出功率，所以不可能会引起降压型恒流源的功耗加大而温升增高。殊不知当降低正向电流时所引起的正向电压降低会使降压比降低。而降压型恒流源的效率是和降压比有关的，降压比越大，效率越低，损耗在芯片上的功耗越大。图 6 是 SLM2842J 的效率和降压比的关系曲线。

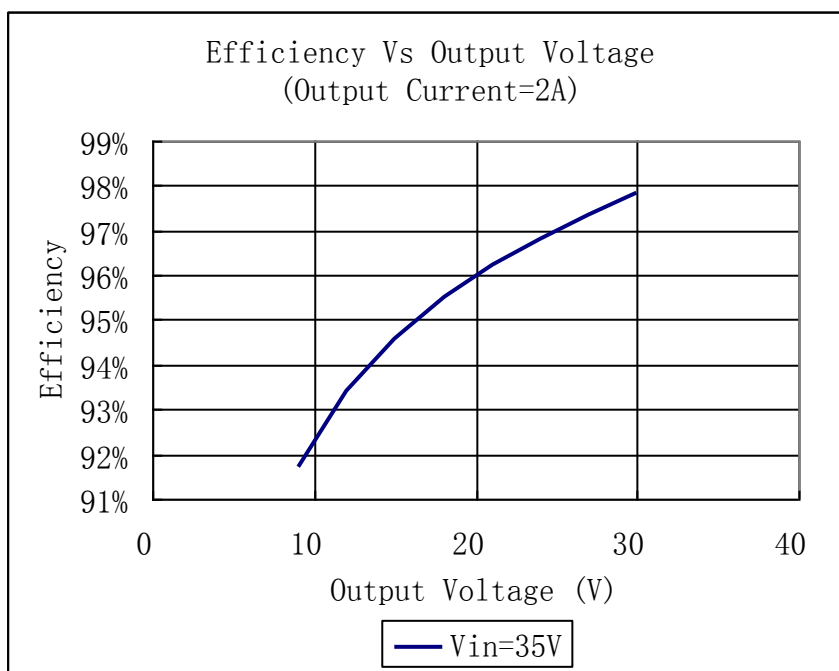


图 6. 降压型恒流源的效率和降压比的关系

图中的输入电压为 35V，输出电流为 2A，当输出电压为 30V 时，效率可以高达 97.8%。但是当输出电压降低到 20V 时，效率就降为 96%；当输出电压降低为 10V 时，效率就降低为 92%。在这三种情况下，尽管其输出功率依次为 60W，40W 和 20W，但是其损耗功率却依次为 1.2W，1.6W，1.6W。后两种情况下功耗增大了 33%。假如恒流模块的散热系统设计得非常临界，增加 33% 的耗散功率就有可能使芯片的结温升高，以致发生过温保护而无法工作，严重时也有可能使芯片烧毁。

1.5 调节正向电流无法得到精确调光

因为正向电流和光输出并不是完全正比关系，而且不同的 LED 会有不同的正向电流和光输出关系曲线。所以用调节正向电流的方法很难实现精确的光输出控制。

二. 采用脉宽调制 (PWM) 来调光

LED 是一个二极管，它可以实现快速开关。它的开关速度可以高达微秒以上。是任何发光器件所无法比拟的。因此，只要把电源改成脉冲恒流源，用改变脉冲宽度的方法，就可以改变其亮度。这种方法称为脉宽调制 (PWM) 调光法。图 7 表示这种脉宽调制的波形。假如脉冲的周期为 t_{pwm} ，脉冲宽度为 t_{on} ，那么其工作比 D (或称为孔度比) 就是 t_{on}/t_{pwm} 。改变恒流源脉冲的工作比就可以改变 LED 的亮度。

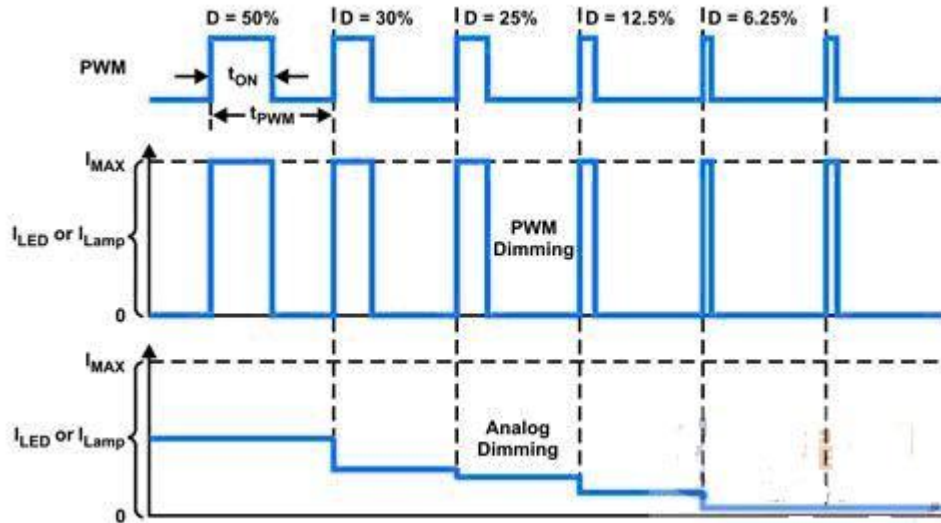


图 7.. 用改变脉冲宽度的方法来改变 LED 的亮度

2.1 如何实现 PWM 调光

具体实现 PWM 调光的方法就是在 LED 的负载中串入一个 MOS 开关管（图 8），这串 LED 的阳极用一个恒流源供电。

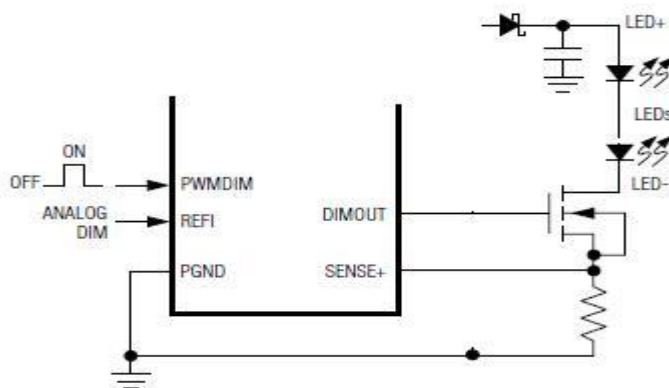


图 8. 用 PWM 信号快速通断 LED 串

然后用一个 PWM 信号加到 MOS 管的栅极，以快速地开关这串 LED。从而实现调光。也有不少恒流芯片本身就带一个 PWM 的接口，可以直接接受 PWM 信号，再输出控制 MOS 开关管。那么这种 PWM 调光方法有那些优缺点呢？

2.2 脉宽调制调光的优点

1. 不会产生任何色谱偏移。因为 LED 始终工作在满幅度电流和 0 之间。
2. 可以有极高的调光精确度。因为脉冲波形完全可以控制到很高的精度，所以很容易实现万分之一的精度。
3. 可以和数字控制技术相结合来进行控制。因为任何数字都可以很容易变换成为一个 PWM 信号。
4. 即使在很大范围内调光，也不会发生闪烁现象。因为不会改变恒流源的工作条件（升压比或降压比），更不可能发生过热等问题。

2.3 脉宽调光要注意的问题

1. 脉冲频率的选择 因为 LED 是处于快速开关状态，假如工作频率很低，人眼就会感到闪烁。为了充分利用人眼的视觉残留现象，它的工作频率应当高于 100Hz，最好为 200Hz。

2. 消除调光引起的啸声：虽然 200Hz 以上人眼无法察觉，可是一直到 20kHz 却都是人耳听觉的范围。这时候就有可能听到丝丝的声音。解决这个问题有两种方法，一是把开关频率提高到 20kHz 以上，跳出人耳听觉的范围。但是频率过高也会引起一些问题，因为各种寄生参数的影响，会使脉冲波形（前后沿）产生畸变。这就降低了调光的精确度。另一种方法是找出发声的器件而加以处理。实际上，主要的发声器件是输出端的陶瓷电容，因为陶瓷电容通常都是由高介电常数的陶瓷所做成，这类陶瓷都具有压电特性。在 200Hz 的脉冲作用下就会产生机械振动而发声。解决的方法是采用钽电容来代替。不过，高耐压的钽电容很难得到，而且价钱很贵，会增加一些成本。

第二部分 采用交流电源的 LED 调光

三. 用可控硅对 LED 调光

普通的白炽灯和卤素灯通常采用可控硅来调光。因为白炽灯和卤素灯是一个纯阻器件，它不要求输入电压一定是正弦波，因为它的电流波形永远和电压波形一样，所以不管电压波形如何偏离正弦波，只要改变输入电压的有效值，就可以调光。采用可控硅就是对交流电的正弦波加以切割而达到改变其有效值的目的。其电原理图如图 9 所示。虚线部分就是安装在墙上的可控硅调光开关。a-b 之间的电阻就是白炽灯负载。所以负载是和可控硅开关串联的。

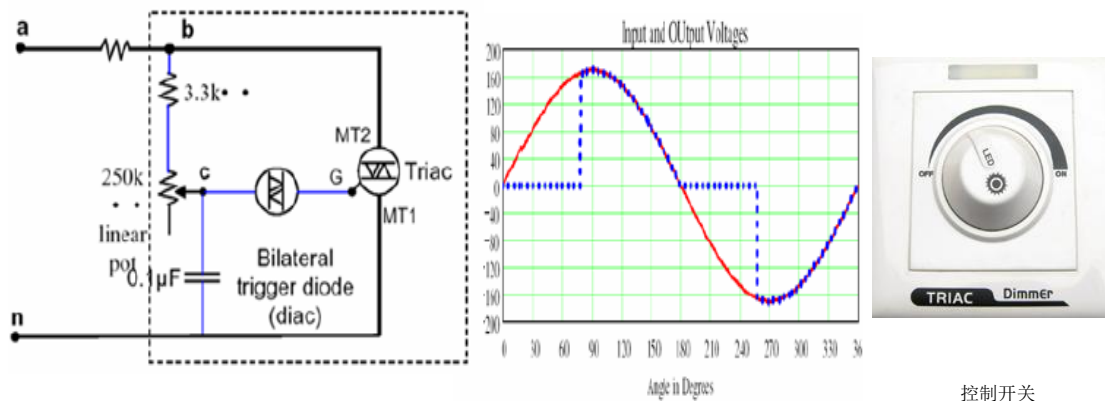


图 9. 可控硅调光的电路图和波形图

改变可变电阻的分压比就可以改变其导通角，从而实现改变其有效值的目的。通常这个电位器带一个开关，接在 n 的输入端，用于开关灯。除了可控硅以外，还有晶体管后沿调光技术等等，因为它们的基本问题是相同的，就不在此介绍了。

3.1 可控硅调光的缺点和问题

然而，可控硅调光存在一系列问题。

1. 可控硅破坏了正弦波的波形，从而降低了功率因素值，通常 PF 低于 0.5，而且导通角越小时功率因素越差（1/4 亮度时只有 0.25）。
2. 同样，非正弦的波形加大了谐波系数。
3. 非正弦的波形会在线路上产生严重的干扰信号（EMI）
4. 在低负载时很容易不稳定，为此还必须加上一个泄流电阻。而这个泄流电阻

至少要消耗 1-2 瓦的功率。

5. 在普通可控硅调光电路输出到 LED 的驱动电源时还会产生意想不到的问题，那就是输入端的 LC 滤波器会使可控硅产生振荡，这种振荡对于白炽灯是无所谓的，因为白炽灯的热惯性使得人眼根本看不出这种振荡。但是对于 LED 的驱动电源就会产生音频噪声和闪烁。

3.2 可控硅调光的优势

可控硅调光虽然有那么多的缺点和问题，但是，它却有着一定的优势，那就是它已经和白炽灯卤素灯结成了联盟，占据了很大的调光市场。如果 LED 想要取代可控硅调光的白炽灯和卤素灯灯具的位置，就也要和可控硅调光兼容。

具体来说，在一些已经安装了可控硅调光的白炽灯或卤素灯的地方，墙上已经安装了可控硅的调光开关和旋钮，墙壁里也已经安装了通向灯具的两根连接线。要更换墙上的可控硅开关和要增加连接线的数目都不是那么容易，最简单的方法就是什么都不变，只要把灯头上的白炽灯拧下，换上带有兼容可控硅调光功能的 LED 灯泡就可以。这种战略就像 LED 日光灯一样，最好做成和现在的 T10、T8 荧光灯尺寸大小完全一样，不需要专业电工，普通老百姓就可以直接更换，那就可以很快普及。因此国外很多生产 LED 驱动 IC 的厂商都开发出了可以兼容现有可控硅调光的 IC 来。

3.3 兼容可控硅调光的 LED 驱动 IC

目前市场上主要有恩智浦的 SSL2101/2，国半的 LM3445，iWatt 的 iW3610 和 OnSemi 的 NCL3000 四种兼容可控硅调光的驱动 IC。其特点如下

	SSL2102	LM3445	iW3610	NCL3000
电路架构	反激式	反激式, 降压式	反激式	反激式
功率 MOS 管	内置 600V, 15W MOSFET	外接 2 颗 MOSFET	外接 2 颗 MOSFET	外接一颗 MOSFET
输出功率	25W	25W	25W	15W
效率	75%	85% (Buck)	75%	>80%
功率因素校正	无源 PFC	无源 PFC		有源 PFC
调光比		100:1	50:1	10:1
泄流电阻损耗	1W	1W	2W	1W

和一般反激式的 IC 不同之处在于它们都可以检测出可控硅的导通角来确定 LED 的电流以进行调光，我们不准备来详细介绍它们的工作原理和性能，因为我们并不认为这是 LED 调光的方向。

3.4 兼容可控硅调光的问题和缺点

尽管多个跨国大芯片公司都推出了兼容现有可控硅调光的芯片和解决方案。但是这类解决方案是不值得推荐的，主要原因如下：

1. 可控硅技术是具有半个多世纪的陈旧技术，它具有很多如前所述的缺点，是一种早该淘汰的技术。它应该和白炽灯、卤素灯同时退出历史舞台。
2. 很多这类芯片自称具有 PFC，可以改善功率因素，实际上，它只改善了

作为可控硅负载的功率因素，使它们看上去接近纯阻的白炽灯和卤素灯，而并没有改善包括可控硅在内的整个系统的功率因素。

3. 所有兼容可控硅的 LED 调光系统的整体效率都十分低下，有些还没有考虑为了稳定工作而需要的泄流电阻的损耗，完全损坏了 LED 的高能效。
4. 所有的可控硅 LED 调光系统也都是调节 LED 的正向电流，存在着前面所述的色谱偏移等缺点。
5. 安装可控硅调光的白炽灯和卤素灯所占的比例不到万分之一，而在墙里安装可控硅开关的比例在可控硅调光的灯具里连万分之一都不到，因为绝大多数安装可控硅调光的都是台灯、床头灯、立灯。更何况市面上有几十种不同规格的可控硅和晶体管调光开关，实际上所开发的 IC 根本不可能兼容所有的可控硅开关，而只能兼容其中的一小部分。
6. LED 是一种全新的创世纪的技术，它有着无可比拟的优越性。完全没有必要为了照顾落后的可控硅而牺牲 LED 的优点。更不应该去新安装墙上的可控硅开关来实现 LED 的调光。

四. 未来的 LED 调光系统

那么 LED 究竟应该采用什么样的调光系统呢？

4.1 PWM 调光：

前面已经说过 LED 调光最好是采用 PWM 调光，采用 PWM 调光时，可以在墙上开关里安装一个简单的 PWM 发生器，然后利用电位器来控制 PWM 的工作从而实现调光。但是如果还要开关灯的亮灭，那么就需要再加一对线。所以无法兼容原来墙里的可控硅开关的引线。原来的可控硅开关的引线只有 2 根，就可以又能调光又能开关。这个优点是很难兼容的。不过实际上真正最常用的调光灯具是台灯或立灯，那些调光开关都是安装在电源线上不是墙里，那也就无所谓要利用墙里的两根引线了。也就是说，PWM 调光是可以直接应用于调光型台灯的。

4.2 分段式开关调光

台湾有一家公司推出了一种称之为 EZ-Dimming 的 GM6182 的四段开关调光不失为一种好方案。它只利用墙上的普通电灯开关就能实现 4 段调光，第一次开为全亮，第二次开为 60%亮度，第三次开为 40%亮度，第四次开为 20%亮度。这种系统的优点是可以利用普通的墙上开关实现调光。而且其功率因素高达 0.92 以上。没有产生干扰信号之虑。缺点是无法连续调光。还有操作麻烦一些。

4.3 遥控式调光

采用红外遥控器对 LED 实现调光。这当然是最理想的解决方案。可以实现开关灯，和用 PWM 连续调光。缺点是成本高，没有统一规格，只能用于高档住宅。

其实我们应当反过来想一想我们要调光的主要目的应当是什么。前面所有提到的调光目的都是为了满足居家的人们在不同场合下需要不同的光强。例如看电视的时候可能要暗一些，看书的时候可能要亮一些。这些大多是在住宅里。很少有办公室、商场、工厂、学校安装调光灯的。而且这些地方绝大多数安装的是荧光灯、节能灯，也不可能进行调光或者很难实现连续调光。

五. 划时代的为节能而调光

自从人类意识到一定要千方百计节能减排，才能解决大气变暖的迫切问题后，如何减少照明用电就作为一个重要的问题提到日程上来。因为照明用电占总能耗的20%。幸好出现了高效节能的LED，LED本身比白炽灯节能5倍以上，比荧光灯、节能灯也要节能一倍左右，还不像荧光灯、节能灯那样含汞。如果还能够利用调光来节能，那么也是非常重要的节能手段。但过去所有光源都很不容易实现调光，而容易调光正是LED的一个很大的优点。因为在很多场合其实不需要开灯或者至少不需要那么亮，可是灯却开得很亮，例如半夜到黎明时段的路灯；地铁车厢从地下开到郊区地面时车厢里的照明灯；更常见的是在阳光明媚时靠近窗口的办公室、学校、工厂等的荧光灯都还开在那里。这些地方每天不知道要浪费多少电能！过去因为高压钠灯、荧光灯、吸顶灯、节能灯根本无法调光，也只能算了。现在改用LED以后，可以自如调光了，这些电能完全可以节省下来！

所以对于灯具调光来说，家庭壁上调光不是主要的应用场合，市场也很小。反而是路灯、办公室、商场、学校、工厂的按需调光才是更重要的场合，不但市场巨大，而且节能可观。这些场合需要的不是手动调光而是自动调光、智能调光！

5.1 路灯的调光

一般来说，路灯到半夜以后就没有什么用处了，所以通常的做法是12点以后关灯或者开一半亮度。但是最合理的做法是根据交通流量来控制路灯的亮度，甚至是完全自适应地控制亮度。图10就是根据当地交通流量的统计值来调节路灯亮度的一个例子。

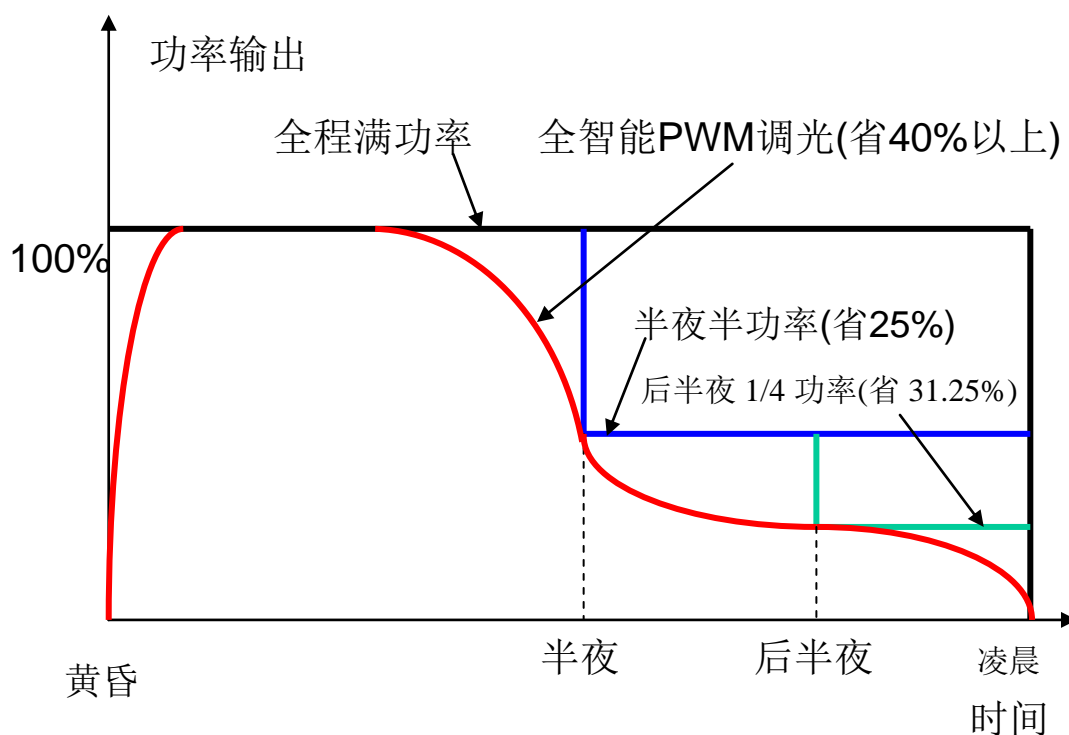


图 10. 根据交通流量的统计值来智能地调节路灯的亮度

而为了实现这种智能调光，实际上也是十分简单的。只要把这个地区的交通流量统计值的曲线输入到一个单片机，根据这个曲线给出PWM的调光信号到恒流驱动源就可以实现。

5.2 光敏自动调光LED灯

为了减小在强日光下不必要的照明，可以采用光敏自动调光 LED 日光灯（或任何其他 LED 灯具）。它的方框图如图 11 所示。

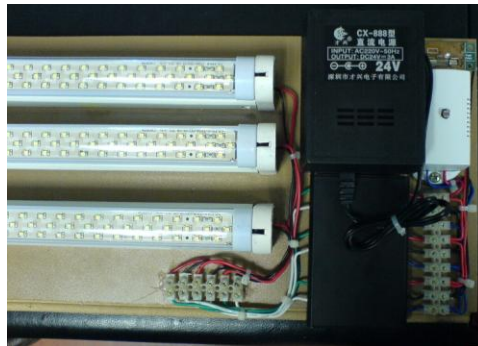
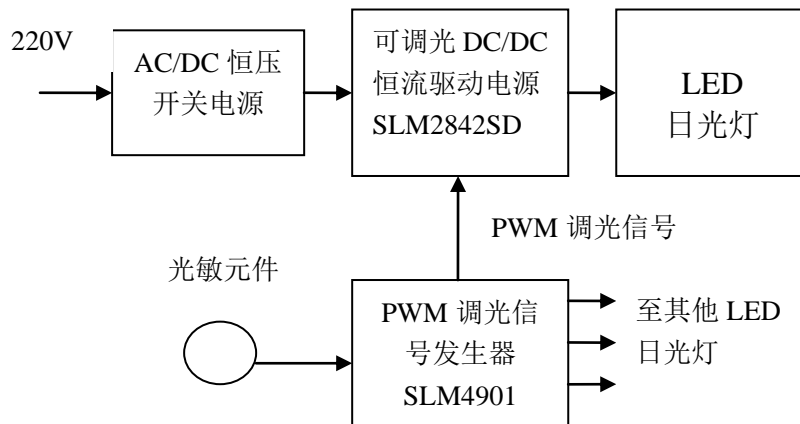


图 11. 光敏自动调光 LED 灯具的方框图和实物图

光敏元件的作用是感受周围的日光，如果日光越强那么就输出一个 PWM 信号到所有靠近日光的 LED 灯具（例如 LED 日光灯），把它们亮度调暗。一个调光信号发生器可以调节很多 LED 灯具，只要这些灯具的恒流驱动源带有 PWM 调光控制接口。这种调光系统本身的效率高达 92% 以上。而且不存在任何和墙上可控硅调光线路的兼容性问题。这种全自动的自适应节能调光是任何荧光灯、节能灯、高压钠灯等气体放电管根本无法实现的，而却是 LED 灯具最擅长的。

结束语

目前全国安装的日光灯和节能灯的数量之大是十分惊人的，据工信部统计，我国 2008 年荧光灯的生产量超过 40 亿支，其中出口就高达 38.6 亿支。而据中国照明协会统计，国内每年消耗荧光灯数量大约为 4 亿支。假定中国荧光灯的实际使用量为 10 亿支（大多数安装在办公室、商场、工厂）。假定每支每天平均开灯 4 小时，每支平均功率 25W（1.2 米 T8 荧光灯额定功率为 36W，功耗为 40W 以上。但国产荧光灯实际功率较低，故假定为 25W），每天耗电 0.1 度，每年耗电 36.5 度。除去节假日为 30 度。10 亿支就是 300 亿度。换成 LED 日光灯以后至少可能节能一半，就是 150 亿度。再采用自动调光可以至少再节能 10% 以上。那就是 15 亿度。按每度电 0.7 元计算，就是节约 10.5 亿元。这是十分可观的数字！这个数字还没有包括即将被 LED 替换的节能灯和白炽灯的节能调光在内。所以大力发展可节能的自适应调光才是 LED 调光的重点方向！