

为照明应用增添智能

本文将说明如何在照明电源系统中，使用小体积、低成本单片机（MCU）来实现各种类型的电子控制。本文将将以发光二极管（LED）和荧光照明为例，说明MCU可以如何对闭环监控和通信应用进行控制，提高其效率，并向其增添智能。

电子照明控制是电力电子领域的一种新兴应用。推动该市场不断发展的一贯目标就是提高效率。在照明电源系统中，添加小体积、低成本MCU不仅能够提高效率，还有许多其他益处。

举例来说，LED技术现在已经发展到可提供效率超出白炽灯的持久光源。通过在LED照明系统中添加的MCU，可以高效地控制LED在整个工作范围内的高度。类似地，对于荧光灯（它也是一种效率很高的光源），通过MCU进行电子控制以使灯的高度可以调节到任意水平，从而提高效率。MCU还可以监视灯管的电流，确保它的亮度保持恒定。

使用MCU不仅具有上述的电子照明控制方面的好处，还可带来其他更多好处，例如，可通过有源功率因数校正（PFC）进一步提高效率、可为便携式照明应用的电池充电，以及可集成常用的通信协议（如DALI或DMX512）。

照明用电

通过转换为使用效率更高的光源以及使用电子控制，可以显著节约用电量。加利福尼亚州制定了一些全美最为严格的能源法规，这是有原因的。该州每年的用电量约为265,000 GWh，并且高峰用电需求以每年2.4%的速度在增长。这种需求增长相当于3座500 MW的发电厂。据估计，到目前为止，该州的节能努力已节省了360亿美元，到2013年还可再节省430亿美元。

加利福尼亚州能源委员会进行了一项深入全面的研究，对该州的照明用电进行调查。住宅用电数据从700户家庭获得，商业用电数据从1500座商业建筑获得。商业建筑又进一步分为10类。

该项研究表明，住宅照明用电占该州用电总量的8%。商业照明用电占该州用电总量的14%。

光源的效率（或光效）定义为光输出量与输入电功率的比。光输出以流明为单位进行测量。下面的图1中给出了几种光源类型的光效。

发光效率(lm/W)				
蜡烛 15世纪	白炽灯 19世纪	荧光灯 20世纪20年代	HID 20世纪50年代	LED 21世纪
				
1	10 - 15	70 - 100	80 - 120	80 - 100

图1：各种光源的光效

自爱迪生发明以来，白炽灯几乎没什么改变，至今仍广泛用于住宅照明。加利福尼亚州的数据显示，在全部住宅照明用电中，有59%是白炽光源耗用的。但除了蜡烛之外，白炽灯的光效是所有光源中最低的。

调查数据显示，许多商业机构已采用了效率更高的光源，包括高强度放电（HID）和荧光光源。虽然如此，在商业机构用电总量中，有33%是由室内照明耗用的，有6%是由户外照明耗用的。在商业照明用电总量中，大约13%是由白炽光源耗用的。由于运作时间和使用高效光源的原因，在用电总量中，学校和仓库用电所占的比例

要低得多。杂货店、零售店和旅馆则高得多，因为它们的运作时间较长。旅馆和零售店的照明应用中使用了较高比例的白炽光源，并且餐馆、零售店和旅馆的平均光效最低。零售店建筑在商业照明用电中所占的比例最高——几乎达到18%。零售店建筑几乎1/4的用电量以及旅馆超过一半的用电量都是由白炽光源耗用的。旅馆和零售店的用电量各占该州商业照明用电总量的约4%。办公室的用电比例与零售店几乎相同，但它们主要使用荧光灯光源。

这些数据促成了加利福尼亚州新能源标准的产生，称为Title 24。该州已经发布了针对住宅和商业应用的合规性手册。为了说明Title 24如何影响照明工业，下面总结了对新建筑和建筑改造的要求：

- 高光效照明定义为：对于功率低于15W的灯，光效为40 lm/W；对于功率为15W - 40W的灯，光效为50 lm/W；对于功率大于40W的灯，光效为60 lm/W。
- 厨房光源中，至少有一半必须来自高光效光源。其他光源必须使用独立开关。
- 在车库、浴室、洗衣间和杂物间中安装的照明光源必须是高光效光源，或者通过占用感应器进行控制。
- 其他房间中的照明光源必须是高光效光源，或者通过占用感应器或调光器进行控制。
- 户外照明光源必须是高光效光源，或者通过光电池或移动感应器进行控制。
- 对于功率超出13W的灯，电子镇流器应采用电子类型，且开关频率为20 KHz或更高。

荧光灯

荧光灯是光效极高的光源，光效最高可达100 lm/W。荧光灯的发展史可追溯到19世纪，但Edmund Germer在1926年才将该技术用于实践，从而使其享誉盛名。后来，通用电气购买了Germer的荧光技术专利，并使荧光灯在1938年之前得到广泛使用。

荧光灯的工作原理是将引导电流流过充满汞蒸汽的灯管。汞蒸汽会离子化，并产生紫外光。灯管内具有荧光涂层，它会将输出光转换到可见光谱范围内。

如何驱动荧光灯

由于具有负阻抗工作特性，荧光灯不能直接使用普通电源工作。当流过灯管的电流增加时，内部阻抗会降低。这会产生失控效果。所以需要使用镇流器来进行限流。最简单的镇流器可以是一个限流电阻，但这种方法的效率极低。传统的做法是采用电感镇流器来控制荧光灯的电流。采用电感方案时，还可以实现自动变压器电路，该电路可以将线电压逐步升到灯所需的水平。

启动荧光灯

要启动荧光灯，输入电压必须升到“点火”电压，该电压使电流流过灯管。点火电压会在灯中产生初始电弧。点火之后，灯的电阻会迅速降低。

荧光灯的启动方式有预热启动、快速启动和瞬时启动等。这些类型的不同之处在于在点火产生电弧之前如何加热灯丝。预热启动荧光灯使用一个外部启动开关来瞬间串联灯丝。快速启动荧光灯只使用启动电压来加热灯丝。瞬时启动荧光灯不需要进行灯丝加热，可以通过灯任意一端的单个接线端子来判断是否通电。荧光灯将被施加足够高的电压，不进行加热即点火产生电弧。

快速启动荧光灯的工作特性最佳，特别是对于电子镇流器应用。快速启动荧光灯的效率低于其他类型，因为灯丝受到持续加热。不过，灯丝上的应力也较低，这使灯的工作寿命较长。

电子镇流器

图2中显示的电路是实现电子镇流器的常用配置，它的效率高于电感镇流器。

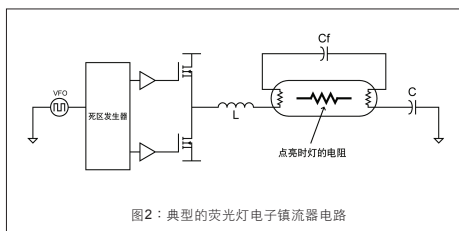


图2：典型的荧光灯电子镇流器电路

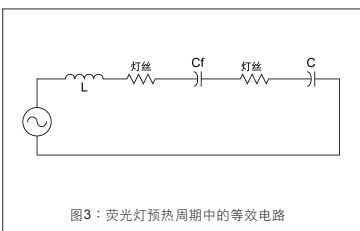


图3：荧光灯预热周期中的等效电路

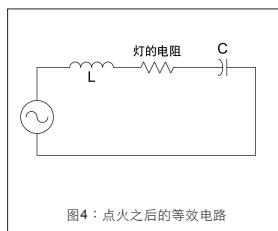


图4：点火之后的等效电路

使用一个电感和一个电容的谐振电路与灯串联。所选的LC电路值应使灯在工作时，LC电路以开关频率进行谐振。典型的电子镇流器使用介于20 KHz—50 KHz范围内的开关频率。灯的两端还跨接有另一个电容，在频率高于谐振频率时，它实际上将两个灯丝串联。典型的启动频率可能为100 kHz。

在灯丝加热周期（高频）中，Cf导通，电路等价于图3。灯丝加热经过一定时间之后，频率会降低，以启动荧光灯。在频率较低时，Cf开路。在荧光灯启动之前，灯的电阻很高，由于电感/电容电路的谐振，电压会迅速升高到点火电压。点火电压通常为交流600V或更高。

点火产生电弧之后，灯的电阻会降低，等价电路类似于图4。灯两端的电压也会显著降低，通常低于交流100V。

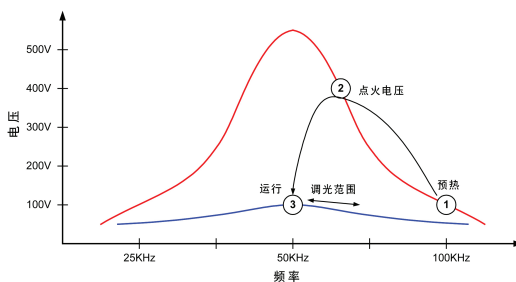


图5：荧光灯电子镇流器工作图示

图5给出了荧光灯电子镇流器的各个工作阶段的图示。

从数字脉宽调制模块产生精确的可变频率

MCU上的典型脉宽调制（PWM）外设可以方便地用于产生镇流器应用所需的VFO。PWM模块特别适合于产生脉宽以固定频率变化的信号，但可能达不到镇流器应用所要求的频率精度。需要进行调光时，尤其如此。荧光灯的调光可以通过将频率升到远高于驱动电路谐振频率来实现。幸运的是，可以使用软件通过一种简单的方式来解决该问题。

图6显示了MCU上的典型数字PWM外设。它提供了数字时基和关联的周期寄存器，用于设置PWM信号的周期。第三个寄存器用于设置PWM信号的占空比。

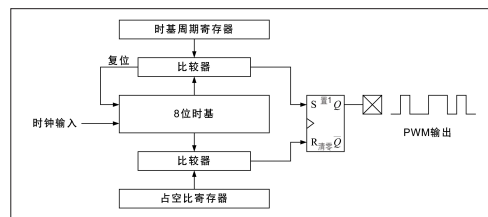


图6：数字PWM外设框图

为了方便计算，假设时基使用10 MHz的时钟源工作。并且，假设镇流器电路所需的中心频率为50 kHz。周期寄存器中将装入值200，用以获得50 kHz的输出信号。为了获得良好的调光效果，需要能够以0.1%的步幅（50 Hz）来改变频率。如果周期寄存器的值更改为199，将产生50,251 Hz的输出频率。所以，需要采取一种方式，以5为因数来提高频率分辨率。

频率分辨率可以通过这种方式提高：强制PWM模块随时间在两个邻近周期之间切换。在每个PWM周期结束时，将某个值加到累加器寄存器。加到寄存器的值代表所需周期的“小数”部分。如果寄存器由于加法操作而溢出，则向PWM模块写入周期值中的较高值，以产生较低的频率。如果寄存器未溢出，则使用较低的周期值。

PWM周期	累加器值	加法有无进位	周期寄存器
第 1	00	无	199
第 2	00 + CC = CC	无	199
第 3	CC + CC = 98	有	200
第 4	98 + CC = 64	有	200
第 5	64 + CC = 30	有	200
第 6	30 + CC = FC	无	199
第 7	FC + CC = C8	有	200
第 8	C8 + CC = 94	有	200
第 9	94 + CC = 60	有	200
第 10	60 + CC = 2C	有	200

表1：使用累加器寄存器来产生较高的频率分辨率

而产生199.8的平均周期。

假设PWM模块具有8位周期寄存器，累加器也是8位，则实际上具有一个16位寄存器，用于设置PWM周期。换句话说就是，您向频率调整分辨率中添加了8个小数位。

要产生50,050 Hz的频率，所需的周期值为199.8。PWM周期寄存器将在80%的时间中设为值200，在20%的时间中设为值199。加到8位累加器寄存器的值将为 $0.8 \times 256 = 204 = 0xCC$ 。表1显示了该算法在几个PWM周期中的工作。PWM模块的周期寄存器随时间在199和200之间切换，从

由于在该示例中使用了8位累加器，实际频率可以围绕中心频率50,000 Hz以10 Hz的步幅进行调整。在电子镇流器应用中，该分辨率

功率LED

LED已在指示灯应用中广泛使用了许多年。指示灯（或“闪烁”型）LED是低电流、低功率器件，不是非常适合于照明应用。在半导体制造、矽结构和荧光涂层领域的最新发展使得高功率LED成为可能。

当今的功率LED具有接近或超过其他高效光源的高光效。此外，LED还具有许多其他优点，包括工作寿命长和可抵抗冲击与振动。这些优点使LED适合于许多应用，例如交通信号、汽车照明、军事应用，以及需要考虑安全性、可靠性或维护成本的任何场合。

功率LED使用金刚砂或蓝宝石基板制造。蓝宝石基板的制造成本低，但热阻较高。金刚砂则更具吸引力，因为它的热阻较低，这对于功率LED应用极为重要。

然后，基板上掺杂AlInGaP，使LED呈现红色、橙色或黄色。或者，也可以在基板上掺杂AlInGaN，使LED产生绿光、蓝光或白光。LED产生的颜色是掺杂材料（LED上的透镜）和透镜下的荧光涂层共同作用的结果。

白光

对于照明应用，使用LED产生白光光源的能力极为重要。产生白光LED有两种常用方式。第一种是使用带有荧光涂层的蓝光LED产生白光。另一种方法是使用发射紫外光的LED。然后，使用红色、绿色和蓝色荧光粉混合物来将紫外光转换为可见白光。

每种方法都有各自的优缺点。蓝光LED+荧光粉的方法可产生光效极高的光源。不利方面是，由于蓝光LED的各种差异，很难控制输出光的准确颜色。紫外光LED + RGB荧光粉这种构造可产生更易于预测的颜色，因为输出光的颜色取决于荧光粉的属性。这种技术的缺点是红色荧光粉的退化速度快于其他荧光粉，导致输出光向冷白光漂移。

使用LED产生白光的另一种方式是使用三个对应于红色、绿色和蓝色的发射器。如果以正确比例驱动LED，即可获得白光。类似于紫外光 + RGB荧光粉类型的LED，由于每个LED的老化速度不同，3-LED解决方案的颜色也会产生漂移。在关键应用中，可以通过有效的检测和控制来随时间修正3-LED白光光源。

LED温度问题

如前面所述，对于功率LED，散热和热阻是很大的问题。功率LED不会辐射热量。这意味着，在靠近功率LED时，不会感受到热量，这一点不同于白炽灯。因此，由LED产生的热量必须通过机械传导方式从结中散走。

只有使用制造功率半导体所用的相同组装技术，功率LED才可用于实际应用。闪烁型LED有一个PN结，它使用绝缘的环氧树脂透镜封装。这样只留下引脚可以将热量从结中传导散走。与之不同，类似于其他半导体器件，功率LED是在一个芯片上制造的。然后，该芯片被固定到穿过封装的散热块上，并通过焊线（bonding wire）连接到外部接线端。然后，散热块使用矽胶封装，并盖上涂有荧光粉的硬塑料透镜。这种封装方法可避免在焊线上产生应力。由于热膨胀的原因，不能使用环氧树脂透镜。

热量是功率LED的最大不利因素。功率LED的主要优点是其工作寿命可超出50,000小时。与之相比，典型荧光灯的工作寿命为8,000小时，典型白炽灯的工作寿命为2,000小时。要实现这么长的工作寿命，LED的结温必须保持很低。实际温度限制是主要LED制造商之间的一个争论主题；但通常，为了实现很长的工作寿命，结温必须保持在摄氏80度或更低。以高于摄氏80度的温度连续工作时，LED会在低于10,000小时的时间内失效。以接近摄氏80度的温度连续工作时，在第一个10,000小时后，光输出会迅速下降。但在之后的很长时间内，LED可以继续产生较低的光输出。以更为适中的温度工作时，LED在整个生命周期中可以产生相对稳定的光输出。

虽然LED已经发展成为非常高效的光源，但每种LED系统设计还是必须在光输出、光效和散热设计之间作出折衷。为了满足温度和散热设计要求，可能需要以较低的功率来驱动功率LED。此外，照明装置的封装要求也可能会限制良好散热的能力。

功率超出3W的功率LED随处可见。但是，使用多个1 – 2 W功率范围内的较小LED可以更容易地满足热设计要求。此外，以较低电流驱动LED时，可以获得更高的光效。随着LED光效的上升，LED系统设计将不断变得更加实用。

如何驱动功率LED

LED需要恒流电源，而不是恒压电源。对于闪烁型和低功率型LED，使用电阻即可发挥作用。对于功率高于1W的LED，使用电阻并不可行。对于这些较高功率的LED，可以使用标准开关电源（SMPS）拓扑和控制器进行驱动，并使用LED电流而不是电压作为控制器的反馈。拓扑的选择取决于系统输入电压、LED正向电压和串联的LED数量。

清洁电源

目前为止，仅仅讨论了可以使用直流母线电压驱动LED或荧光灯的电源转换电路。如何从交流线汲取电流同样重要。典型的带滤波电容的桥式整流器电路仅在交流输入电压达到峰值时，才会消耗交流线路的电流。结果就是电流波形带有高谐波成分，且功率因数很低。

有源PFC电路可以改善交流电源到直流电源的转换。简单来说，有源PFC电路会强制电路所消耗电流的波形跟踪进入的交流线电压的包络。PFC可以帮助满足能效要求，并帮助客户更快地从电子照明控制中获益。

有源PFC最简单的实现方式是使用带有外部电压反馈回路和内部电流控制回路的升压电路。电压反馈控制回路为内部电流控制回路提供电流给定，并决定需要较高还是较低的电流来获得所需的母线电压。然后，使用电流回路的给定值按比例调节正弦参考信号。

正弦参考信号可以通过两种方式产生。第一种方式，可以直接从整流交流输入电压测量获得。另一种更简单的方法是使用在MCU存储器中存储的正弦参考值。可以使用MCU上的PWM通道作为简单的数模转换器，以产生正弦参考信号。PWM输出引脚连接一个RC滤波器，将PWM信号转换为电压。

正弦表中的值根据来自电压控制回路的电流给定按比例升高或降低。运用MCU中断使存储器中存储的正弦参考信号与进入的交流电压的过零点同步。

使用正弦参考表时，将假定进入的交流电压是纯粹的正弦信号，完全没有失真。这种假设对于许多应用来说是可行的。因此，该方法称为间接PFC。图7给出了间接PFC的框图。

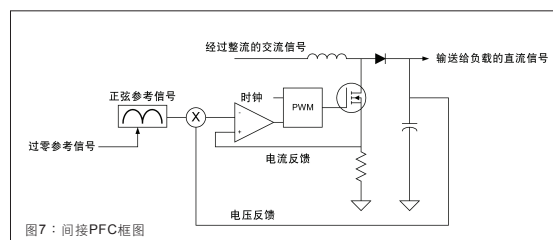


图7：间接PFC框图

通信控制和状态

通过使用MCU，可以将通信集成到照明应用中。对于由于法规和能源价格因素而要求使用日光采集、占用感应器和其他自动控制方法的商业应用，这一点非常重要。

在大规模安装的光源中，最常用的调光方法是模拟0-10 VDC控制。这可以通过使用模数转换器（ADC）通道整合到设计中。

更先进的数字通信解决方案（例如数字可寻址照明接口（DALI）和DMX-512）依赖于基于MCU的设计。DALI是一种双向协议，用于控制2线母线上的多个照明装置。该协议使用1200波特的双相信号，该信号可通过MCU方便地产生。该协议可以单独寻址64个照明装置、16个组，或者向整个网络进行广播。此外，还可以实现一些高级功能，例如渐变、对数剖面 and 场景控制。因为该协议是双向协议，所以可以将故障信息发送给主控制器。

正如名称所暗示的，DMX-512允许在一条线上进行多路复用，传送512个照明通道的调光信号。该协议从影院和娱乐行业中使用的模拟多路复用协议发展而来。DMX-512可使用以250 Kbaud工作的标准UART实现，并使用RS-485差分驱动器来实现长距离传送。DMX-512的一个缺点是它仅支持单向通信。最近，人们对DMX-512进行了新的扩展，称为远程设备管理（RDM），用于支持双向通信。RDM还允许远程设置节点地址。

DALI、0-10V和其他控制方案的一个缺点是需要为每个装置单独配线。通过使用MCU，无需额外配线即可实现其他控制方案。一些系统使用经斩波的交流波形（由标准双向可控硅调光器产生）作为镇流器的调光信号。此外，还可以使用电力线调制解调器通信方案。红外线通信可以用于控制同一空间中的多个装置。

ZigBee®是一种新兴的无线协议，可以为低数据传输速率控制网络提供经济高效的解决方案，具有用于照明控制应用的潜力。该协议提供了网络节点自委派和安全性等特性。

具体的LED驱动器问题

在LED驱动器应用中使用MCU可以促使PWM调光方法的实现。对LED进行调光的最简单方式是调整开关模式或线性驱动器的输出电流。但是，由于两个原因，建议不要使用线性调光方法。首先，LED在整个亮度范围内不是以最佳光效工作。其次，线性调光会使LED的输出光产生颜色漂移。PWM调光通过使用低频PWM信号调制LED输出来解决这两个问题。LED在固定的驱动电流下导通。它的亮度通过改变LED的平均导通时间量来调整。PWM控制和LED驱动功能可以集成到单芯片解决方案中。或者，可以使用只有6个引脚的低成本MCU来为独立的驱动器电路产生PWM调光信号。

具体的荧光灯镇流器问题

如前面所述，荧光灯可以使用精确的可变频率源进行调光。可以通过将驱动频率改变为不同于LC电路谐振频率的频率来降低驱动电流。通过使用MCU监视荧光灯电流，可以进一步提高荧光灯电子镇流器的调光性能。这使得可以将荧光灯电流准确设置为能满足输出要求的合适水平。此外，MCU还可以确定荧光灯是否未能启动。

对于镇流器制造商，基于MCU的解决方案提供了灵活的平台。可以方便地对MCU重新编程，针对不同类型的荧光灯和不同的LC电路值，使用不同的启动配置文件。

总结

最初，您可能并不会考虑在照明应用中使用MCU。但是，MCU可以集成到任意层次的设计中，创建高效的照明应用。MCU可以同时处理通信和功率控制功能。此外，MCU还提供了一个灵活的平台，可方便地进行编程，创造新的特性和功能。

参考资料：

1. Lighting Efficiency Technology Report Volume 1, California Energy Commission, P400-98-004VI, 1999年9月。
2. 2005 Building Energy Efficiency Standards – Residential Compliance Manual, California Energy Commission, CEC-400-2005-005-CMF。
3. 2005 Building Energy Efficiency Standards – Non-Residential Compliance Manual, California Energy Commission, CEC-400-2005-006-CMF。
4. Comparison of White LEDs, John W. Curran, John P. Peck, Dialight Corporation, 2006年6月。
5. Solid State Lighting Market and Applications, Cree Inc., 2006年5月。
6. Wikipedia – The Fluorescent Lamp, http://en.wikipedia.org/wiki/Fluorescent_lamp
7. AN809 – Digitally Addressable DALI Dimming Ballast, DS00809B, Microchip Technology Inc., 2002。
8. AN965 – Microchip ZigBee®协议栈, DS00965C_CN, Microchip Technology Inc., 2006。