

住建部电气标委会专栏：钟桂生：

消防应急照明和疏散指示系统的开关电源

消防应急照明和疏散指示系统主要包括应急照明控制器、应急照明集中电源、应急照明配电箱、消防应急照明灯具、消防应急标志灯具，是在发生火灾正常照明电源切断后，为人员疏散和消防作业提供照明和疏散指示而设置的。应急照明作为民用建筑及一般工业场所照明设施的一部分，与人身安全和建筑物、设备安全密切相关，当建筑物内发生火灾或其他灾害导致市电电源中断时，应急照明对人员疏散、保证人身安全、防止次生事故，都具有重要作用。随着国家标准 GB 51309 - 2018《消防应急照明和疏散指示系统技术标准》的推出，对消防应急照明和疏散指示系统提出了很多新的要求，本文主要谈谈应急照明系统中所使用的开关电源的设计或选型，供设计师参考。

AC / DC 开关电源的技术现状

我们通常所说的电源大致可以分为两类：发出电能的电源和变换电能的电源，发出电能的电源主要是指发电机、太阳能电池、化学电池等，其将其它形式的能量转化为电能供人们使用，但是这种电源通常需要经过转换才能被人们使用；变换电能的电源是把一种形态的电能变换为另外一种形态的电能，它可以是交流电和直流电之间的变换，也可以是交流电的频率和相位的变换，或者直流电的电压或电流幅值的变换。

根据开关电源输入和输出端是否电气隔离，开关电源可以分为隔离型开关电源和非隔离型开关电源。AC / DC 开关电源即是一种将公共电网的交流电变换为我们需要的直流电的隔离型开关电源，电路通过高频变压器实现电气隔离和电压变换的作用，隔离型开关电源的造价比非隔离型的高不少。根据 GB 51309 - 2018，A 型消防应急灯具应采用额定工作电压不大于 DC 36 V 的特低电压供电。根据开关电源的电路结构形式，隔离型开关电源分为反激型、正激型、半桥型、推挽型和全桥型等几种，每种电路结构形式都有其特定的优势和局限性。

从 20 世纪 50 年代第一台开关电源出现以来，开关电源技术得到飞速发展，到 21 世纪谐振和准谐振开关电源技术逐渐成熟，AC / DC 开关电源进入到了软开关时代。软开关（soft switching）是相对于硬开关（hard switching）而言的，开关电源电路中的半导体开关器件（MOS 管或 IGBT）工作在高频开关状态，对于硬开关技术的开关电源，由于半导体开关器件不是理想器件，每次开通和关断其流过的电流都有一个上升时间和关断时间，在这段时间内开关器件两端的电压乘以流过器件的电流的时间积分，分别称为开关器件的开通损耗和关断损耗，统称为开关损耗。在一定的工作状态下，开关器件的每一次开关过程开关损耗是相对固定的，所以随着开关频率的提高，开关电源总的开关损耗也增大，所以开关损耗的存在限制了开关电源的小型化和效率的进一步提高，而且开关器件在硬开关工作时会产生很高的 di / dt

和 dV/dt ，从而产生很大的电磁干扰 (EMI)，要滤除这些干扰需要额外的滤波电路。

硬开关的开关损耗影响开关电源的小型化和效率的进一步提高，于是人们寻求软开关技术来克服这个问题。上世纪 70 年代，美国学者提出了 LC 谐振变换器的概念，此后又出现了有源嵌位 ZVS、移相全桥 ZVS - PWM 等软开关电源技术，受当时电子技术发展水平的制约，谐振变换器在很长时间内都没有应用到实际产品中。直到 21 世纪，随着电子技术及超大规模集成电路的快速发展，谐振变换器开始被人们所关注。由于电源在效率、体积及电磁干扰等方面的要求不断提高，谐振电源的优势不断凸显，这促进了谐振电源的快速发展。其中又以移相全桥 ZVS 变换器、有限双极性 ZVZCS - PWM 全桥变换器、LLC 变换器最为流行，其中 LLC 变换器电路结构简单、转换效率高、在全负载范围内能实现开关管的零电压开关。

同时，随着高性能数字信号处理器的普及，采用全数字化控制技术的谐振型开关电源将整个电源的信号采样、处理、控制（包括电压电流环等）、通信、均流等均由处理器完成，可以提供更加灵活的控制方式和更加完善的保护机制，减小甚至消除模拟控制技术的器件离散性和温漂，保证每个电源模块均达到最优指标，有效缩小电源体积并降低整机成本，大大提高了电源的可靠性和对用户的适应性，是新一代开关电源的发展方向。目前我国已经量产的 3 kW 通信电源，采用全

数字化控制的三相交错式 LLC 谐振变换技术，峰值转换效率已经达到 97.5%，功率密度达到 2.5 W / cm³。

消防应急照明和疏散指示系统中开关电源的考虑

消防应急照明和疏散指示系统中使用的开关电源的不间断运行非常重要，除了要考虑输出功率、输入电压范围、输出电压调节范围和电压调整率、负载调整率、精度、稳定性和转换效率等技术参数外，还要考虑动态响应、电磁兼容、可靠性方面的技术参数。

GB 51309 - 2018 规定，对于 A 型集中电源，除系统主电源断电时需切换到备电供电，其它所有时间都是由开关电源给系统供电。所以开关电源的稳定性决定了系统的稳定性，开关电源的转换效率直接决定了整个系统的能量利用率，减少开关电源的整体发热量，提高转换效率可以提高开关电源的稳定性。开关电源的转换效率直接决定了整个系统的能量利用率，要提高转换效率，除了使用更加优质的元器件以外，最重要的是使用效率更高的电路拓扑结构和控制方法，如无桥整流、LLC 软开关和同步整流技术，这三者结合可以很容易地将开关电源在 220 VAC 输入时候的转换效率提高到 95% 以上，远高于普通硬开关拓扑开关电源不到 90% 的转换效率，同时软开关技术可以实现开关电源的高频化和小型化，对降低开关电源的整体成本有极大帮助。

动态响应是评定开关电源稳定性的重要指标，当负载出现突变时，所有电源都会有一个响应时间，此时电源的输出电压会出现瞬间的过冲或回落，然后恢复正常输出状态。当开关电源在负载突变时的电压过冲或回落的幅度比较大，恢复的时间会较长甚至出现输出电压振荡现象时，表示该开关电源的稳定性很差，容易出现输出振荡导致损坏电源和负载。

GB 17625.1 - 2012《电磁兼容 限值 谐波电流发射限值（设备每相输入电流 $\leq 16\text{ A}$ ）》规定了每相输入电流 $\leq 16\text{ A}$ 设备的电磁兼容要求，对应急照明系统的开关电源也需满足标准中 C 类设备的电磁兼容要求，对开关电源的输入电流谐波也作出了规定。

开关电源的寿命是指先后经过初期故障及偶发故障期后再到达磨损故障期，当整体故障率高达 63 % 时即已达到了寿命期。开关电源的故障率曲线一般呈现两头高、中间低的特征，符合浴盆曲线的特性。国际上通用的可靠性定义为：在规定条件下和规定的时间内，完成规定功能的能力。此定义适用于一个系统，也适用于一台设备或一个单元。平均无故障时间（MTBF）是开关电源的一个重要指标，用来衡量开关电源的可靠性。可靠性 $R(t)$ 的定义为系统在规定条件下和规定时间内，完成规定功能的概率，比如系统在开始（ $t=0$ ）时有 n_0 个元件在工作，而在 t 时刻仍有 n 个元件在正常工作，则可靠性 $R(t) = n/n_0$ ，故 $0 \leq R(t) \leq 1$ 。通常情况下，失效率是指平均失效率，

为单位时间内失效的元件数与元件总数的比例，以 λ 表示， $\lambda = Nt / (t \times N_0)$ ，其中 Nt 为 t 时刻失效的样品总数， N_0 为开始 ($t = 0$) 时刻的样品总数， t 为试验时间。

当系统中使用多个开关电源模块并联供电时，由于每个开关电源的输出电压不能做到完全一致，在施加负载时，输出电压最高的电源模块首先提供电流，当该电源模块达到最大输出电流开始降低输出电压时，输出电压次高的开关电源才能开始输出电流，其结果是分担电流多的模块热应力大，降低了系统的可靠性。因此，对于使用多个开关电源模块并联供电的系统，要求系统中各个开关电源模块承受的电、热应力基本相当，也就是说，必须采取某种相应的措施，保证系统不致于因各电源个体情况的差异，造成电热不平衡而引起的恶性循环，影响系统特性和可靠性。负载均流技术就是对系统中各并联电源模块的输出电流加以控制，尽可能使各个电源模块能均分系统总输出电流，确保多个电源模块间电流应力和热应力均匀分配，防止一台或多台电源模块运行在电流极限值状态，保证系统可靠运行的一种措施。目前主流的均流方法主要有平均值均流和最大值均流，平均值均流每个并联电源模块的电流放大器输出端接一个相同的电阻到一条公共均流母线上，形成平均值母线，当其中一个电源模块的电压比母线电压高时，输出电压下降，从而限制其输出电流达到所有模块均流的目的；最大值均流法是每个电源模块的电流放大器输出端通过一个二极管接到一条公共均流母线上，输出电流最大的模块自动成为主模块，美国优

尼则公司的 UC3907 集成均流控制芯片就工作在这种方式下。除此之外，还有数字均流技术，各模块之间通过通信线相连，各模块内部的数字控制器通过通信总线交换各自的输出电流，然后控制器协商各自的输出电流达到均流的目的，与模拟均流技术相比由于不需要模拟电平的均流母线，不容易受到干扰，均流可靠性得到提高。

此外，考虑到消防应急照明和疏散指示系统的使用环境的复杂性，其内部开关电源需具备输出长期短路不损坏开关电源且短路消除后能自动恢复的功能。

消防应急照明和疏散指示系统开关电源的可靠性

大量的统计数据表明，设计及元器件（元器件的选型、质量级别的确定、元器件的负荷率）的原因造成的故障，在开关电源故障原因中占 80 % 左右。减少这两方面造成的开关电源故障，具有重要的意义。决定开关电源寿命的元器件主要有如下几种。

电解电容器

电解电容器的封口部位会漏出气化的电解液，这种现象会随着温度的升高而加速，一般认为温度每上升 10 °C，泄漏速度会提高 1 倍，因此可以说电解电容器决定了电源装置的寿命。电解电容的寿命取决于其内部铝箔的温度，参考 RIFA 公司预计电解电容器寿命的公式：

① 损耗 $P_{LOSS} = I_{RMS}^2 \times ESR$ ， I_{RMS} 为纹波电流， ESR 为电容等效串联电阻；

② 铝箔温度 $T_h = T_a + P_{LOSS} \times R_{th}$ ， T_a 为环境温度， R_{th} 为电容器的热阻；

③ 预计寿命 $L = L_0 \times 2^{(T_0 - T_h) / 10^\circ C}$ ， T_0 为电解电容额定使用温度 ($^\circ C$)， L_0 为额定使用温度下的额定寿命。

由以上公式可以看出，环境温度每升高 $10^\circ C$ ，电解电容器的寿命减小一半，同时影响电解电容寿命的因素还有纹波电流 (I_{RMS})、从铝箔传递到周围环境的总的热阻 (R_{th})，因此在设计时要考虑电解电容的耐纹波电流能力和电容的散热情况。

风扇

由于风扇属于机械部件，其轴承润滑油的干枯、轴承的磨损，会导致风扇的失效。风扇失效后开关电源的散热会恶化，导致开关电源内部元器件温度升高加速开关电源的失效，因此对采用风扇作为散热部件的开关电源，风扇的寿命决定了开关电源的寿命。

光耦

光耦通常用于开关电源内部由次级向初级传递反馈信号，光耦内部的红外发光二极管随工作时间的增加其光衰会逐渐增加，导致光耦的电流传输率（CTR）下降，当流过光耦发光二极管的电流上升到最大限制电流时，不能再维持电路工作需要反馈量，会导致系统反馈环路失效，输出电压失控。温度越高，光耦内部红外发光二极管的发光效率越低，需要的电流越大，光耦的 CTR 下降也越快。

半导体器件

研究表明：硅半导体器件随温度的升高失效率呈指数增加，温度每升高 10 °C ，失效率增加 1 倍。对于工作在硬开关模式的开关电源，开关管的发热量很大，如果散热处理不好很容易出现局部温度过高的现象，导致开关管过早失效。

冲击电流保护电阻、防雷器件

为抵抗电源接通时给电解电容充电产生的冲击电流，设计者通常将功率电阻与可控开关并联起来使用。电源接通时的电流峰值高达额定数值的数十倍至数百倍，结果会导致电阻热应力疲劳，引起电阻开路现象。防雷器件加在开关电源的输入端，用于吸收雷击或浪涌电压，一般使用 ZnO 压敏电阻和气体放电管 GDT 的组合，但是压敏电阻和气体放电管的放电次数通常只有几十到几百次。压敏电阻由于本身的老化或承受电压的多次冲击时，会出现漏电流迅速增加从而发热导致过热损坏，表现为短路。气体放电管多次冲击后性能会下降，同时在长

时间使用过程中会有漏气失效这种自然失效的情况，最终失去保护作用。

从以上分析可知，要提高开关电源的可靠性，需要针对以上器件作特别考虑。在选择电解电容时尽量选择额定工作温度高、额定寿命长、耐纹波电流能力大的电解电容，相同额定电压和容量下，满足上述要求的电解电容通常会体积比较大，价格也会高出很多，这需要在成本、体积和寿命上取一个平衡。应该尽量选择谐振型软开关的开关电源拓扑，输出端采用同步整流技术以提高开关电源的转换效率，将发热集中的器件分散布置，防止开关管和整流管的温度和应力过高，减少功率管的发热量不仅提高功率管的可靠性，还可以提高整个开关电源的可靠性。变压器应选用多股线绕制，以避免趋肤效应，减小磁芯气隙处磁力线外漏引起的涡流损耗，降低变压器的发热有助于降低整机温度，提高转换效率。优化散热结构，在条件允许的情况下使用被动散热而不是依靠风扇散热，因为风扇的 MTBF 是开关电源所有元器件中最低的，如果一定需要使用风扇，应设计风扇转速控制电路，使得风扇转速能够随输出电流或内部温度的增加而加快，从而提高风扇的使用寿命。使用不需要光耦反馈的电路结构，比如将控制芯片放在开关电源次级，通过隔离变压器驱动初级开关管从而省去光耦，防止光耦失效导致的输出电压失控。对于冲击电流保护电阻和防雷器件，需要在设计时尽量选择额定功率和额定电流余量比较大的器件，以提高开关电源的开机次数和浪涌吸收次数。

结语

消防应急照明和疏散指示系统与人们的人身安全密切相关，而系统中开关电源的可靠性决定了整个系统的安全性和稳定性，开关电源的转换效率决定了整个照明系统的效率，建议系统中采用的开关电源应符合以下要求：

- a. 功率因数要求：当输入额定电压、输出满载时，开关电源的输入功率因数应不小于 0.98；当输入额定电压、输出 50% 负载时，开关电源的输入功率因数不应小于 0.95。
- b. 谐波要求：当输入额定电压、输出满载时，开关电源的输入谐波电流应满足 GB 17625.1 - 2012 中 7.3 条的要求。
- c. 效率要求：在负载率为 50% 到 100% 情况下，开关电源的效率不应低于 92%。
- d. 冷却方式要求：开关电源冷却方式应为自然冷却或者具备自动随负荷大小调节转速的风扇冷却方式。

本文全文载于《建筑电气》2019 年第 12 期，详文请见杂志。

版权归《建筑电气》所有。

作者：

钟桂生，男，广东拿斯特（国际）照明有限公司，工程师，经理。