

## 用于飞机照明系统的 LED 驱动电源设计

王若冰, 嵇保健, 安 觅, 虞超群, 孙 柯  
(南京工业大学电气工程与控制科学学院, 南京 211816)

**摘要:** 照明系统是飞机的重要组成部分, LED 照明技术已被广泛应用于飞机照明系统。设计了一款两级式低纹波 LED 驱动电源, 其前级电路采用 L6562 芯片控制功率因数校正(PFC)变换器, 并通过无光耦原边反馈控制调节输出电压, 驱动 DC/DC 恒流电路; 后级恒流驱动电路采用 LM3404HV 作为控制芯片, 并对其典型应用电路进行改进, 使得恒流精度不随输入电压变化而变化, 在宽电压输入范围内仍可以实现恒流输出。实验结果证明该方案可有效降低 LED 电流纹波, 取得了良好的效果。

**关键词:** 飞机照明系统; LED; PFC; 恒流; 无频闪; 无光耦

**中图分类号:** TN86      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1671-637X(2016)10-0100-04

## Design of a LED Power Supply for Aircraft Lighting System

WANG Ruo-bing, JI Bao-jian, AN Mi, YU Chao-qun, SUN Ke

(College of Electrical Engineering and Control Science, Nanjing TECH University, Nanjing 211816, China)

**Abstract:** Lighting system is an important part of the aircraft, and LED technology has been widely used in it. An advanced off-line two-stage LED driver power supply with stable output voltage and constant current is presented in the paper. The power supply has a feedback control scheme with its first stage of Power Factor Correction (PFC) converter implemented by the use of L6562 via primary side feedback only. Unlike the traditional architecture of L6562 based LED driver supply, optocoupler is not required here. The second DC/DC constant current stage is controlled by LM3404HV, and an improved constant drive circuit based on LM3404HV is proposed, thus the constant accuracy does not vary as the input voltage changes, unlike the saturation in the traditional topology. Experimental results show that the scheme can decrease the ripple current of LED effectively.

**Key words:** aircraft lighting system; LED; PFC; constant current; no flicker; photocoupler-less

### 0 引言

飞机照明系统对灯具的性能要求很高, 需要具有高可靠性、长寿命、抗振动等特性。LED 照明系统能够提升效率、降低能耗和延长寿命, 被广泛应用于飞机照明系统。随着 LED 需求不断增大, 照明市场对 LED 驱动电源设计方案的要求也越来越高。然而, 由于 LED 驱动电源输入端直接与交流电相连, LED 驱动电源输出电流会产生两倍工频的纹波闪烁, 即频闪效应<sup>[1-3]</sup>。它会刺激人的视觉系统, 使人感觉不舒服, 即使人眼探测不到频闪, 但它仍会使人感到身体不适、眼睛疲劳或

头痛, 并且会引起其他疾病。目前 LED 照明市场正在呼吁低纹波无频闪 LED 驱动电源, 根据 LED 电压电流的非线性, LED 必须具有恒定输入电流才能正常工作。同时, 为了满足谐波 (THD) 标准, 大功率 LED 驱动电源还必须具备功率因数校正功能<sup>[4]</sup>。

虽然单级反激 PFC 变换器能够达到功率因数校正和输出恒流的目的且结构简单, 但输出端必须使用大容量电解电容进行滤波, 从而降低输出电流纹波<sup>[5-7]</sup>。两级式高功率因数变换器的前级为隔离型 PFC 变换器, 并通过闭环控制稳定输出电压; 后级采用非隔离 DC/DC 变换器恒流驱动 LED。由于后级 DC/DC 变换器允许较大的输入电压纹波和较宽的输入电压范围, 两级中间的母线容量将大大降低, 因此可以降低两级式变换器的体积和成本<sup>[8-11]</sup>。

本文设计了一款两级式 LED 驱动电源, 前级采用隔离式无光耦 PFC 变换器, 使用 L6562 电源管理芯片

收稿日期: 2015-09-29      修回日期: 2016-08-28

基金项目: 江苏省自然科学基金 (BK20140944)

作者简介: 王若冰 (1983—), 男, 江苏徐州人, 硕士生, 研究方向为电力电子技术。

进行控制,实现稳压输出,同时提高功率因数,为下一级恒流驱动电路提供稳定输入电压;后级恒流驱动电路使用 LM3404HV 作为控制芯片,并对其典型应用电路进行改进,以获得低纹波输出电流,驱动混连式 LED 灯串无频闪,最后对整机电源进行制作并实验测试。

## 1 两级电路拓扑与工作原理

### 1.1 电源系统总体结构

驱动电源系统结构如图 1 所示,前级为隔离式无光耦高功率因数变换器,后级为 DC/DC 恒流驱动器。

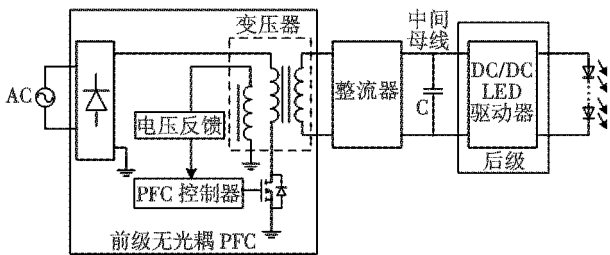


图 1 两级式电源系统架构图

Fig. 1 The two-stage power system architecture

### 1.2 隔离式无光耦高功率因数变换器工作原理

传统隔离式变换器采集变压器副边输出电压并与基准电压进行比较,其差值通过运算放大器后得到误差信号再经过光耦把误差信号反馈到原边控制电路进行闭环调节,实现对输出电压的精准控制。然而,本文设计的两级式 LED 驱动电源后级采用宽电压输入的 DC/DC 恒流驱动电路,允许前级电路输出电压有一定范围波动,因此本文提出了一种无光耦高功率因数驱动方案。该方案省去了光耦、运算放大器等原件,提高了电路的可靠性并降低了成本。

图 2 所示为基于 L6562 芯片的隔离式无光耦 PFC 变换器的基本原理图。

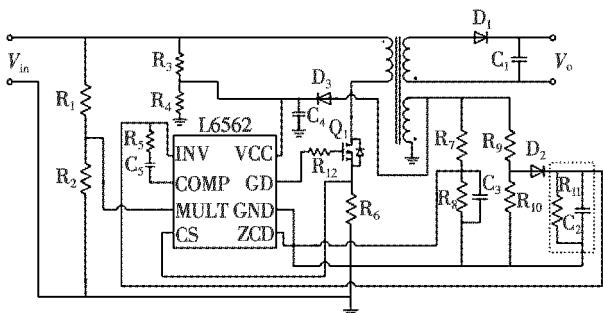


图 2 隔离式无光耦 PFC 变换器基本原理框图

Fig. 2 Basic block diagram of the isolated photocopler-less PFC converter

L6562 芯片 INV 引脚为误差放大器反向输入端,内部参考电压为 2.5 V,通过  $R_9$  和  $R_{10}$  组成的电阻分压

器对辅助绕组的输出电压进行采样,提供电压反馈。利用 RC 放电电路使得 INV 引脚的电压始终保持在 2.5 V 左右,实现对输出电压的采样。设定  $D_2$  导通电压为 0.7 V,通过设计反激变压器匝比,使电源系统稳定工作时,  $R_9$  和  $R_{10}$  分压节点电压接近于 3.2 V,即 INV 引脚电压接近 2.5 V。如果输出电压过高,节点电压将高于 3.2 V,导致 INV 引脚电压高于 2.5 V,误差放大器的负输入端电压高于正输入端电压, MOS 管关断。同理,当开启下一个开关周期时,如果负载增加,节点电压将小于 3.2 V,但此时 INV 电压仍然保持大于等于 2.5 V,此时  $D_2$  不导通;由于  $R_{11}$  对  $C_2$  放电,直到  $R_{11}$  将  $C_2$  电压降到 2.5 V 以下,  $D_2$  才导通, INV 再次对输出电压进行采样。此时,由于 INV 低于 2.5 V,在每一个周期内 MOS 管导通时间均增加,输出电压随之上升。

可将图 2 中 RC 放电回路的放电过程看作零输入响应,电容  $C_2$  上电压衰减的快慢取决于 RC 电路的放电时间常数  $\tau$ ,其值为  $\tau = RC$ 。通过改变  $R_{11}$  及  $C_2$  的取值,可以调节 INV 引脚对输出电压采样的速度及稳定性。释放电阻  $R_{11}$  的取值一般较大,为兆欧级,  $C_2$  的取值一般为纳法级。

### 1.3 DC/DC 恒流驱动电路研究与改进

本文后级采用 LM3404HV 作为控制芯片,实现 LED 的恒流驱动,其典型应用电路如图 3 所示。

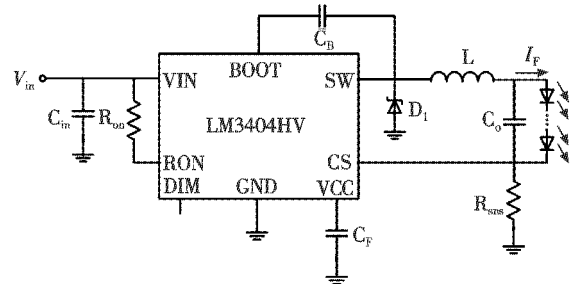


图 3 基于 LM3404HV 的典型应用

Fig. 3 The typical application based on LM3404HV 流过 LED 的电流  $I_F$  为

$$I_F = \frac{0.2}{R_{sns}} - \frac{V_o \times t_{sns}}{L} + 1.34 \times 10^{-10} \times \frac{V_{in} - V_o}{V_{in}} \times \frac{R_{on}}{2L} \quad (1)$$

由式(1)可知,经过 LED 的电流随输入电压增加而增加。在具体的研究分析过程中发现,基于 LM3404HV 的典型应用方案对输入电压变化幅度要求较高,一般不超过  $\pm 10\%$ ,如果输入电压变化幅度超过这个范围,输出电流精度误差将显著增加,所以本文对基于 LM3404HV 芯片的 LED 恒流驱动电路进行了改进,以减小输入电压波动对输出电流的影响。

改进后的LED恒流驱动电路如图4所示。

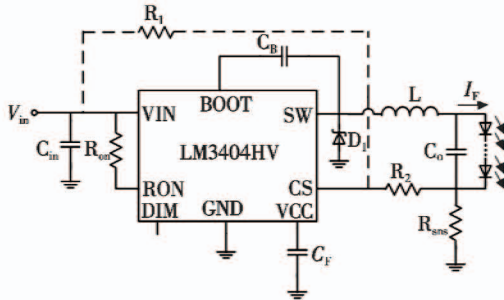


图4 改进后的恒流驱动电路

Fig. 4 The improved constant current drive circuit

比较图3和图4可以看出,改进后的恒流驱动电路在芯片VIN端口与CS端口分别增加了 $R_1$ 和 $R_2$ 电阻,其中 $R_1$ 阻值较大, $R_2$ 阻值较小。

改进之后,反馈到CS端口的反馈电压 $V_{CS}$ 是由采样电阻 $R_{sns}$ 和 $R_2$ 共同决定的,此时流过LED的电流 $I_F$ 为

$$I_F = \frac{0.2 \times (R_1 + R_2) - V_{in} \times R_2}{R_{sns} \times R_1} - \frac{V_o \times t_{sns}}{L} + 1.34 \times 10^{-10} \times \frac{V_{in} - V_o}{V_{in}} \times \frac{R_{on}}{2L} \quad (2)$$

令 $\frac{0.2 \times (R_1 + R_2) - V_{in} \times R_2}{R_{sns} \times R_1}$ 为①式, $\frac{V_o \times t_{sns}}{L}$ 为②式,

$1.34 \times 10^{-10} \times \frac{V_{in} - V_o}{V_{in}} \times \frac{R_{on}}{2L}$ 为③式。由式(2)可知,当 $V_{in}$ 增加时,②式的值一直保持不变,而①式的值随之减小,③式的值随之增加,这将起到抵消输出电流随输入电压增加而增加的作用。只要电阻 $R_1$ 与 $R_2$ 选取合适,那么输出电流 $I_F$ 与输入电压 $V_{in}$ 的关系就变得微乎其微,甚至可以忽略不计,解决了基于LM3404HV的恒流驱动电路输入电压变化幅度只能限制在 $\pm 10\%$ 的问题,使输入电压变化幅度可以达到 $\pm 50\%$ 甚至更多,解决了前级隔离式无光耦PFC变换器输出电压纹波大的问题。

## 2 实验结果与分析

### 2.1 前级PFC波形与分析

实验中电源负载选择3块环形LED灯片并联,其中2块为额定功率7W、嵌有14颗LED灯珠的灯片;另一块为额定功率5W、嵌有10颗LED灯珠的灯片。

电源电压为220V时输入电压及电流的波形如图5所示。从图中可以看出,得到的输入电压波形和输入电流波形同频同相,很好地实现了PFC,获得了高PF和低THD。

如图6所示,在输入电压为220V时,使用电能质量分析仪测得输入功率为22.7W,功率因数为0.98,总谐波失真为12.6%。

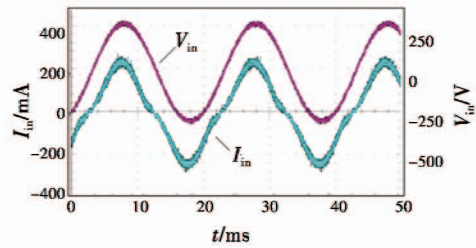


图5 PFC波形图

Fig. 5 PFC waveforms

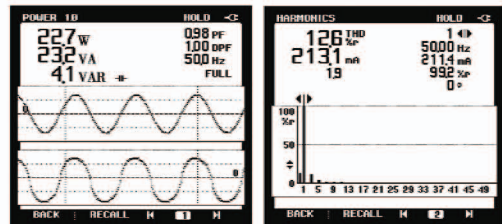


图6 功率及总谐波失真分析图

Fig. 6 Analysis chart of the power and the total harmonic distortion

图7是输入电压为220V时前级隔离式无光耦PFC变换器输出电压波形,可以看出,输出电压、电流波动均较大。说明在未加恒流驱动电路时,如果直接与负载LED相连会使LED灯串出现频闪,对人体伤害很大。且因输出电压存在波动,本文使用改进后的恒流驱动电路。

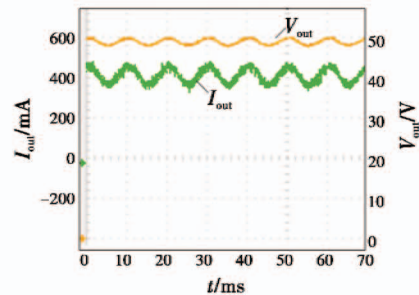


图7 220V输入时前级输出电压、电流波形

Fig. 7 Voltage and current waveform of 220V input

### 2.2 后级恒流驱动波形与分析

图8a和图8b给出了LED恒流驱动电源在输入电压分别为90V和220V时的输出电流波形图。

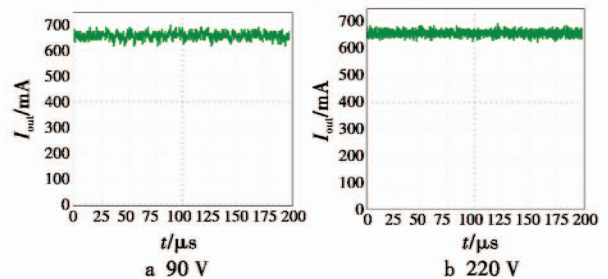


图8 输出电流波形

Fig. 8 Output current waveform

由图 8 可知,LED 驱动电源在满足宽电压输入范围的条件下能达到输出恒流效果,输出电流恒定在 660 mA 左右,大大降低了仅使用隔离式无光耦 PFC 变换器输出电流的纹波值,实现了输出恒流驱动负载 LED 灯串,达到了输出电流低纹波、无频闪的设计效果。

### 2.3 恒流驱动电路实验结果分析

搭建改进后的恒流驱动电路,其中,  $R_1 = 620 \text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = 680 \Omega$ , 负载为 8 个 LED 灯珠串联。测试数据如表 1 所示,其中  $V_{in}$  为输入电压,  $I_F$  为输出电流。当输入电压从 20 V 增加到 40 V 时,传统设计中输出电流从最低 652 mA 增加到最高 702 mA,变化 7.67%。而改进后的恒流驱动方案中,输出电流从最高 659 mA 下降到最低 652 mA,变化幅度仅为 1.06%,验证了在不同输入电压情形下输出电流基本保持不变,达到输出恒流的目的,解决了传统方案中输出电流随输入电压变化而变化的问题。实验表明,当输入电压变化一倍时,输出电流精度误差小于 2%,验证了本设计方案的可行性及优越性。

表 1 输出电流值对比

Table 1 Comparison of the output current value

$V_{in}/V$	传统方案 $I_F/mA$	改进后的方案 $I_F/mA$
20	652	659
25	660	657
27	671	657
30	682	656
32	687	655
35	691	653
40	702	652

## 3 结论

本文给出了一种可应用于飞机照明系统的两级式低纹波、高功率因数 LED 驱动电源,其前级采用隔离式无光耦原边反馈方式,降低了电源成本,并使其体积减小。对基于 LM3404HV 芯片的恒流驱动电路进行改进,减小了输入电压波动对输出电流的影响,实现低纹波恒流驱动。通过实验得到不同输入电压的情况下,电路实际工作时的输入电压、电流波形,并针对恒流驱动电路给出了改进前和改进后输出电流的对比分析结果。在电源稳定工作的条件下,实验结果与理论分析结果相符,验证了理论分析的正确性;同时,实验测试结果也证明了所设计的 LED 驱动电源关键指标均达到了设计要求,能够满足飞机照明系统的技术要求,具有很高的实用价值。

### 参考文献

[1] LI Q, LI L, LYU G Q. Design of single stage LED driver [C]//International Power Electronics and Motion Control

Conference, 2012:199-202.

- [2] 倪建军,张方华,俞忆洁. 无电解电容的高功率因数 AC-DC LED 驱动器[J]. 电工技术学报,2012,27(12):79-93. (NI J J, ZHANG F H, YU Y J. High power factor AC-DC LED drivers without electrolytic capacitors [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(12):79-93.)
- [3] WANG S, RUAN X B, YAO K, et al. A flicker-free electrolytic capacitor-less AC-DC LED driver [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(11):4540-4548.
- [4] 姚云龙,吴建兴. 一种单级原边控制 LED 驱动器设计[J]. 电子器件,2012,35(4):447-452. (YAO Y L, WU J X. Design a single-stage primary side LED driver [J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2012, 35(4):447-452.)
- [5] 廖志凌,阮新波. 半导体照明工程的现状与发展趋势[J]. 电工技术学报,2006,21(9):106-111. (LIAO Z L, RUAN X B. Present status and developing trend of the semiconductor lighting [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21(9):106-111.)
- [6] 柏余,朱忠尼,屈建国,等. 基于 LM3404 实现 LED 低纹波恒流电源研究[J]. 空军雷达学院学报,2012,26(4):280-282. (BAI Y, ZHU Z N, QU J G, et al. Implementation of LED lower ripple constant current source with LM3404 chip [J]. Journal of Air Force Radar Academy, 2012, 26(4):280-282.)
- [7] 陈武,王广江. 一种高功率因数无电解电容 LED 恒流驱动电源[J]. 电工技术学报,2013,28(11):216-222. (CHEN W, WANG G J. An electrolytic capacitor-less LED driver with high input power factor and constant output current [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(11):216-222.)
- [8] 安觅,刘伊莎,夏晨阳. 基于 MP4021 的 LED 照明驱动电压设计[J]. 电力电子技术,2013,47(12):33-35. (AN M, LIU Y S, XIA C Y. Design of LED driver power supply based on MP4021 [J]. Power Electronics, 2013, 47(12):33-35.)
- [9] LIN Y L, CHIU H J, LO Y K, et al. LED backlight driver circuit with dual-mode dimming control and current-balancing design [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(9):4632-4639.
- [10] ZHANG F H, NI J J, YU Y J. High power factor AC-DC LED driver with film capacitors [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(10):4831-4840.
- [11] 王舒,阮新波,姚凯,等. 无电解电容无频闪的 LED 驱动电源[J]. 电工技术学报,2012,27(4):173-178. (WANG S, RUAN X B, YAO K, et al. A novel LED driver without electrolytic capacitor and flicker [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(4):173-178.)