

航空HID照明控制系统的设计与实现

设计了一种适用于飞机电源特性的, 无须功率因数校正, 且体积小、重量轻和可靠性高的HID照明控制系统, 并对硬件控制回路及软件系统进行详细设计, 最后对HID照明控制系统样机进行了高压点火和恒功率控制试验验证。试验结果表明, 该系统性能稳定、运行可靠。目前该控制系统已应用于某型军用飞机的机载照明系统, 且运行良好。

庞登峰¹ 杨 斌² 芦光荣¹ 王宇翔¹ / 1. 兰州兰石能源装备工程研究院有限公司信息与自动化研究中心 2. 兰州万里航空机电有限责任公司技术中心

0 引言

机外照明是飞机照明系统的一个重要组成部分, 在飞机的起降、航行、驾乘和运行中发挥着至关重要的指示作用, 保证了飞机在运行中的安全性。其设备主要包括活动式与固定式着陆灯、滑航灯、防撞灯、航行灯、舱灯、观察灯和转弯灯等。

随着航空技术的飞速发展, 体积小、功耗低、可靠性高、光强高、无级调光、夜视兼容和维修方便的组合式灯具成为航空照明系统发展的主流^[1-3], 这使得高强度气体放电灯(HID)代替了常规的密封射束灯成为航空照明系统的新一代产品, 且广泛应用于如F-22战机、A380和波音787客机等飞机的大功率照明, 并逐步成为飞机着陆灯、滑行灯和转弯灯等高光强照明的发展方向。

本文设计了一种适用于飞机电源特性的, 无须功率因数校正, 且体积小、重量轻和可靠性高的HID照明控制系统, 并通过测试验证其设计可行性与控制的准确性。目前该控制系统已应用于某型号军用飞机的机载照明系统, 且运行良好。

1 系统硬件设计

HID照明控制系统包括高压变频电路^[5-6]、缓冲电路、电压反馈电路、电流反馈电路、全桥逆变电路以及高压点火电路。以下分项进行设计。

1.1 高频变压器

高频变压器是照明控制系统主要组成部分之一, 其参数选型的优劣直接影响控制系统的整体性能, 在此进行详细设计。

(1) 确定变压器的输出功率

根据控制技术要求, 输出1路5 V/1 A, 1路15 V/0.5 A, 1路-15 V/0.5 A, 1路400 V/0.25 A。总的输出功率100 W, 由于在确定每一路输出功率的时候已经考虑了相应的裕量, 所以高频变压器的输出功率取120 W。

(2) 一次侧绕组流过的一次峰值电流

输出功率等于每一个工作周期的能量乘以工作的频率, 即

$$P_o = \frac{1}{2} L_p I_{ave}^2 f \quad (1)$$

式中, L_p 为一次侧绕组的峰值电感值; I_{ave} 为一次侧绕组的平均电流; f 为开关电源的工作频率。

假如开关电源工作在不连续的模式下, 则在开关导通期间, 一次侧电感内的电流值从0上升到 I_p , 所以

$$U_s = L_p \frac{\Delta i}{\Delta t} = L_p \frac{I_p}{t_{on}} \quad (2)$$

式中, I_p 为一次侧绕组的峰值电流; t_{on} 为开关的导通时间。

$$t_{on} = D_{max} T_s \quad (3)$$



庞登峰/工程师

关键词/Keywords

HID ·
航空照明 ·
控制系统 ·

式中, $D_{\max}$ 为占空比; T_s 为工作周期。

根据式(1)、式(2)和式(3)可得

$$\frac{P_o}{U_s} = \frac{L_p I_{ave}^2 D_{\max}}{2 L_p I_p} \quad (4)$$

为了达到简化的目的,在设计中可以假设 $I_{ave} = I_p$, 本设计要求在直流输入电压20~30 V的前提下,输出规定的电压和电流,假设反激变压器正常工作状态下的最大占空比为0.5,根据式(4)可得

$$I_p = \frac{2 P_o}{U_s D_{\max}} = \frac{2 \times 120 \text{ W}}{20 \text{ V} \times 0.5} = 24 \text{ A} \quad (5)$$

计算一次侧绕组的电感值

$$L_p = \frac{U_{s(\min)} D_{\max} T_s}{I_p} = \frac{20 \text{ V} \times 0.5}{24 \text{ A} \times 200 \times 10^3} = 2.08 \mu\text{H} \quad (6)$$

当输入电压从最大值变化到最小值时,占空比从最小值变化到最大值。它们之间的关系可以表示为

$$D_{\min} = \frac{D_{\max}}{(1 - D_{\max})K + D_{\max}} \quad (7)$$

式中, $K = U_{s(\max)}/U_{s(\min)}$, 为电压的波动范围系数。

所以可得

$$D_{\min} = \frac{0.5}{(1 - 0.5) \frac{30 \text{ V}}{20 \text{ V}} + 0.5} = 0.4$$

(3) 磁心规格的选择

假设一次侧绕组线径为 d_w , 则一次侧绕组所占磁心窗口的面积为

$$AP_p = \frac{6.33 L_p I_p^2 d_w^2 \times 10^8}{\Delta B} \quad (8)$$

式中, ΔB 为工作磁感应强度的变化值,一般取饱和磁感应强度的一半,即 $\Delta B = 1/2 B_s$; d_w 为导线的直径。

导线的电流密度取400 c·m/A, $d_w = 0.105 \text{ mm}$ 。可得

$$AP_p = \frac{6.33 \times 2.08 \times 10^{-6} \times 24 \times 0.105^2 \times 10^8 \text{ cm}^4}{0.5 \times 3900} = 0.179 \text{ cm}^4$$

$$AP = 4 AP_p = 4 \times 0.179 \text{ cm}^4 = 0.716 \text{ cm}^4$$

(4) 计算气隙的长度

由于气隙具有较大的磁阻,且能量是存储在气隙所构成的体积当中。所以有

$$\frac{1}{2} L_p I_p^2 = \left(\frac{1}{2} \Delta B H V_G \right) \times 10^{-8} \quad (9)$$

式中, H 为气隙磁场强度; V_G 为气隙的体积, $V_G = A_e I_g \text{ cm}^3$ 。

可以得到

$$I_g = \frac{0.4 \pi L_p I_p^2}{A_e \Delta B^2} \times 10^8 = \frac{0.4 \pi \times 2.08 \times 10^{-6} \times 24^2}{0.863 \times 1950^2} \times 10^8 \text{ cm} = 0.046 \text{ cm} \quad (10)$$

因此应在磁心中心柱打磨出长度为0.046 cm的气隙,或在磁心外侧磁心柱各打磨0.023 cm的气隙。

(5) 计算一次侧绕组的匝数

一次侧绕组匝数的计算有两个计算公式,通常取一次侧绕组的匝数,用两个计算公式分别计算的一次侧绕组匝数的平均值。

由 $N_p = \Delta B I_g / (0.4 \pi I_p)$ 计算出一次侧绕组的匝数为

$$N_p = \frac{1950 \times 0.046}{0.4 \pi \times 24} = 3 \quad (11)$$

由 $N_p = L_p I_p / (A_e \Delta B) \times 10^8$ 计算出一次侧绕组的匝数为

$$N_p = \frac{2.04 \times 10^{-6} \times 24}{0.863 \times 1950} \times 10^8 = 3$$

因此一次侧绕组的匝数取3匝。

(6) 计算二次侧绕组的匝数

二次侧绕组匝数按输入最小电压,导通的占空比最大进行计算。

$$N_s = \frac{(U_o + U_{VD})(1 - D_{\max})N_p}{U_{s(\min)} D_{\max}} \quad (12)$$

式中, N_s 为二次侧绕组的匝数; U_{VD} 为整流二极管的正向压降,取1 V; U_o 为二次侧绕组的输出电压。

所以当输出电压为400 V时: $N_s = (400 + 1)(1 - 0.5) \times 3 / (20 \times 0.5) = 60.15$ 匝,取 $N_s = 60$ 匝。

当输出电压为15 V时: $N_s = (15 + 1)(1 - 0.5) \times 3 / (20 \times 0.5) = 2.4$ 匝,取 $N_s = 2$ 匝。

当输出电压为5 V时: $N_s = (5 + 1)(1 - 0.5) \times 3 / (20 \times 0.5) = 0.9$ 匝,取 $N_s = 1$ 匝。

(7) 计算二次侧绕组的线径

一般导线的电流密度不超过600 c·m/A,本设计

中考虑一定的裕量,导线的电流密度取 $400 \text{ c}\cdot\text{m}/\text{A}$ 。

当输出电流为 1 A 时,导线的截面积为:
 $400 \text{ c}\cdot\text{m}/\text{A} \times 1 \text{ A} = 400 \text{ c}\cdot\text{m}/\text{A}$,故应选取AWG24[#]。

当输出电流为 0.5 A 时,导线的截面积为:
 $400 \text{ c}\cdot\text{m}/\text{A} \times 0.5 \text{ A} = 200 \text{ c}\cdot\text{m}/\text{A}$,故应选取AWG28[#]。

当输出电流为 0.25 A 时,导线的截面积为:
 $400 \text{ c}\cdot\text{m}/\text{A} \times 0.25 \text{ A} = 100 \text{ c}\cdot\text{m}/\text{A}$,故应选取AWG31[#]。

当输出电流为 0.15 A 时,导线的截面积为:
 $400 \text{ c}\cdot\text{m}/\text{A} \times 0.15 \text{ A} = 60 \text{ c}\cdot\text{m}/\text{A}$,故应选取AWG33[#]。

1.2 缓冲电路

机外照明控制系统采用RCD缓冲电路来进行漏电保护,其原理如图1所示。

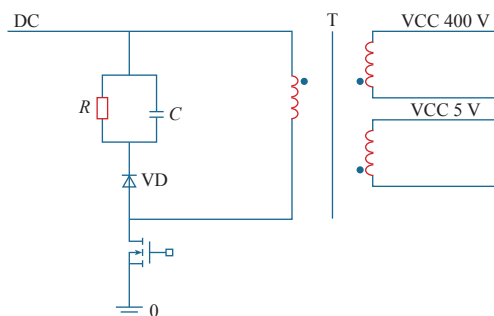


图1 RCD缓冲电路

当开关管关断时,将最大漏极电流取一次侧绕组峰值电流,最大漏源电压取漏源极击穿电压70%,则

$$C = \frac{I_{VD} t_f}{2U_{DS}} = \frac{I_p t_f}{2 \times 0.7 U_{BR(DS)}} = \frac{24 \times 50 \times 10^{-9}}{2 \times 0.7 \times 1500} \text{ F} = 0.57 \times 10^{-9} \text{ F} \approx 1 \mu\text{F} \quad (13)$$

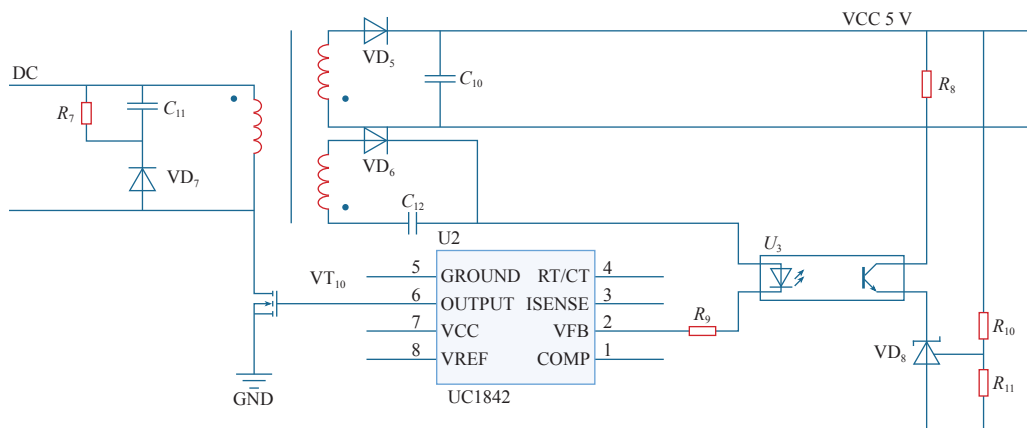


图2 精密光耦反馈电路

式中, I_{VD} 为最大漏极电流; U_{DS} 为最大漏源电压; t_f 为开关管电流的下降时间。

电阻 R 为了使电容在最小导通时间内把充电电荷放完。设放完电的时间是三倍的时间常数,则

$$t_{on(min)} = D_{min} T_s = \frac{0.4}{200 \times 10^3} \text{ s} = 2 \times 10^{-6} \text{ s}$$

$$R = \frac{t_{on(min)}}{4C} = \frac{2 \times 10^{-6}}{4 \times 1 \times 10^{-9}} \Omega = 500 \Omega \quad (14)$$

通过 $I_{dis} = U_{DS}/R < 0.25 I_C$ 验证可知,电阻值满足设计需要。而电阻功率

$$P_R > \frac{1}{2} C U_{DS}^2 = 0.5 \times 1 \times 10^{-9} \times 1500^2 \text{ W} = 0.001125 \text{ W} \quad (15)$$

因此电阻选取 $500 \Omega/0.125 \text{ W}$ 。

1.3 电压反馈回路

考虑到系统对负载调整率和电压调整率要求较高,系统采用配TL431的精密光耦反馈电路。光耦为Motorola公司的MOC8102,其电流传输比(CTR)为73%~117%,反向击穿电压为30 V。而可调精密并联稳压器为TL431M,它属于一种具有电流输出能力的可调基准电压源,具有性能优良、动态阻抗低和输出噪声低的优点,工作温度范围为 $-55 \sim 125 \text{ }^\circ\text{C}$ ^[7-9],其原理如图2所示。

1.4 电流反馈回路

系统采用峰值电流控制反馈电路,它具有固定时钟开启、峰值电流关断的特点,通过峰值电感电流间接控制PWM脉宽。其原理如图3所示。

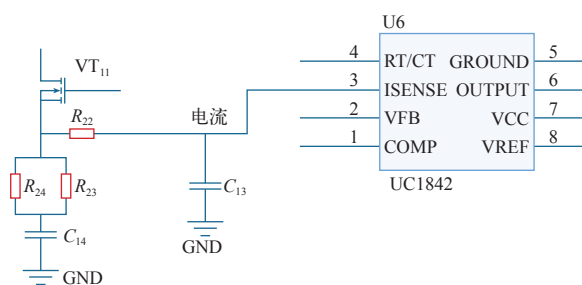


图3 电流反馈电路

1.5 全桥逆变电路的设计

系统选用IRS2453D来设计HID灯的电子镇流器。IRS2453D提供的换向逻辑，保证了在HID灯中交变电流的产生。全桥逆变电路的频率可以通过IRS2453D引脚3上的CT和引脚4上的RT设定计算，如取RT为430 kΩ，CT为5.3 nF，则HID灯的工作频率为

$$f = \frac{1}{1.453 \times RT \times CT} = 300 \text{ Hz} \quad (16)$$

MOS管在选择时，不但要考虑最大开关电流和最大方向电压，还要考虑通态损耗，从而选择

电容大、通态阻抗小的MOSFET功率管。

二极管要根据其最大开关电流和最大反向电压来选择^[10]，当输入功率最低，输出功率最大时二极管即有最大的开关电流，因此选择正向压降小、功耗低和效率高的快速肖特基整流二极管，且其平均电流额定值应大于电路最大输出电压。

1.6 高压点火电路

系统采用脉冲变压器式点火方式，通过在升压变压器一次侧施加一个幅值为几百伏的高压脉冲信号，在脉冲变压器的二次侧，即可获得高达几千伏的高压脉冲信号来起动金属卤化物灯。高压点火电路包含升压变压器、双向二极管、电容、电阻和开关管等。当触发控制电路输出一个脉冲信号驱动开关管导通时，双向二极管击穿导通，通过升压变压器一次侧绕组线圈的电流在二次侧绕组线圈上感生一个23 kV的高压对HID等进行触发电火。灯一旦点亮，控制电路将开关管关断。在灯正常工作时，二次侧绕组线圈起镇流作用。其原理如图4所示。

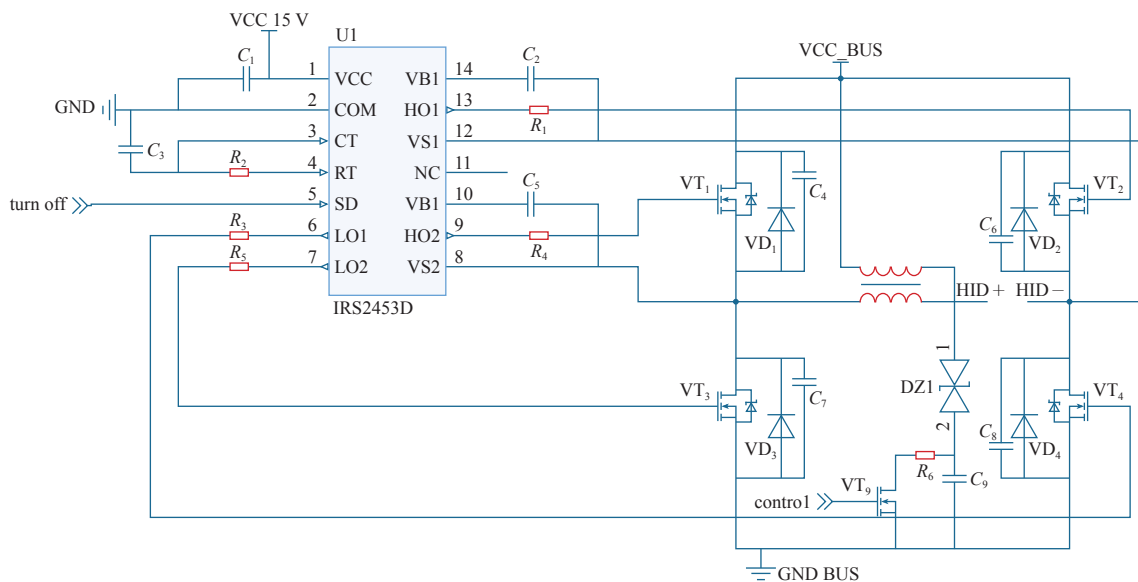


图4 HID灯脉冲变压器式点火电路

2 系统软件设计

本系统控制软件功能主要是通过MICROCHIP公司生产的高性能的RISC CPU (PIC12F675) 为全桥逆变电路提供300 Hz控制信号，并经全桥电路放

大后点亮HID灯。其整体控制功能流程如图5所示。

控制系统通过检测驱动电路部分的电压信号和电流信号实现整体系统的恒功率控制，并实现过电压、欠电压保护、短路保护和驱动控制的功能。

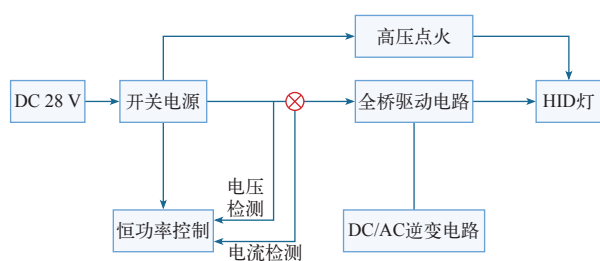


图5 HID照明控制功能流程

能。在程序设计时，通过TMR1定时中断程序实现GP5口电平的改变，启动点火控制回路。软件主程序流程图如图6所示。

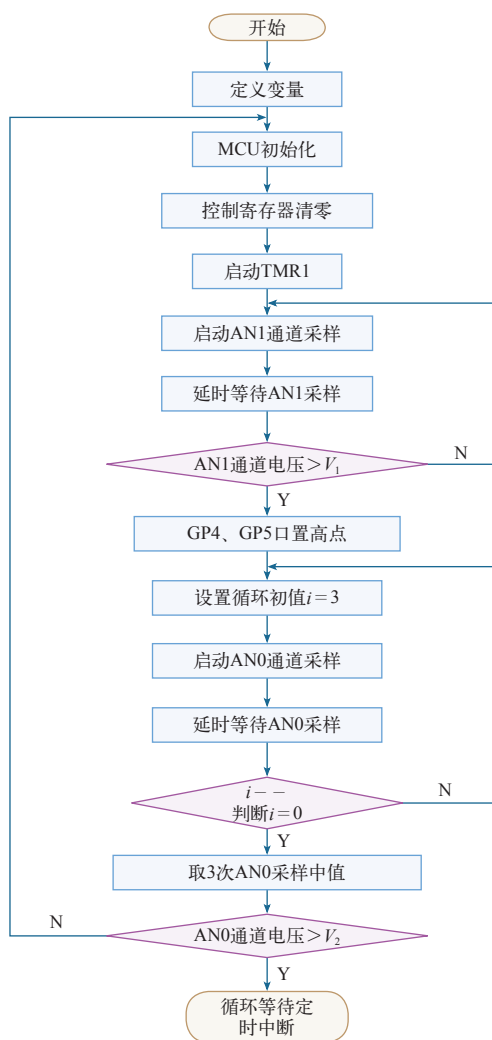


图6 控制流程

在上述程序中，GP4/GP5口是一个6位宽的双向端口，其相应数据方向寄存器为TRISIO，将TRISIO中相应位置1可将相应的GPIO口设置为输

入；将TRISIO中相应位清零可将相应的GPIO口设置为输出。

3 系统测试验证

为了对本文设计的HID照明控制系统进行验证，通过搭建软硬件试验环境，对试验样机进行了高压点火试验和恒功率试验。

3.1 高压点火试验

如图7所示，CH1为负载灯冷起动到正常燃亮过程DCBUS的电压值，CH4为负载灯冷起动到正常燃亮过程负载灯电流值。如图8所示，CH1为负载灯热起动到正常燃亮过程DCBUS的电压值，CH4为负载灯热起动到正常燃亮过程负载灯电流值。如图9所示，CH1负载灯冷起动到正常燃亮后电源掉电的过程DCBUS的电压值，CH4为负载灯冷起动到正常燃亮后，电源掉电的过程负载灯电流值。测试数据和结果表明负载灯起动到正常燃亮过程DCBUS的电压值和电流值均符合预先设计。

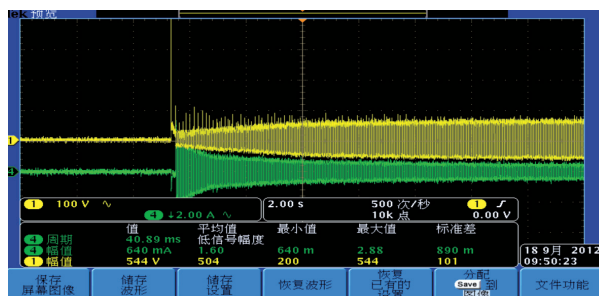


图7 HID灯冷起动到正常燃亮过程的电压值和电流值

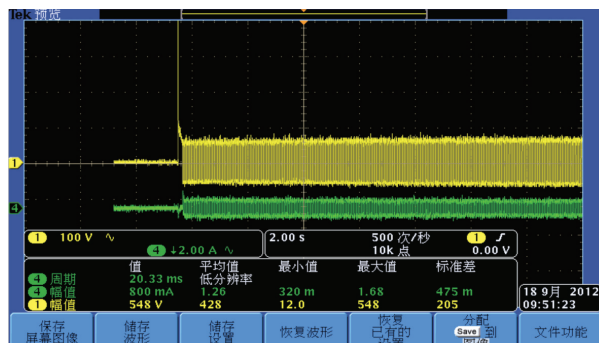


图8 HID灯热起动到正常燃亮过程的电压值和电流值

3.2 恒功率控制试验

恒功率控制试验数据如图10所示。试验结果

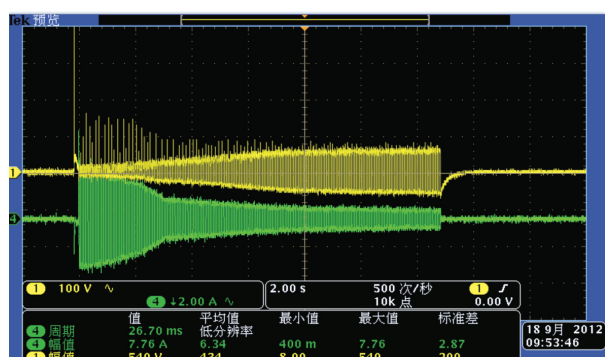


图9 HID灯冷启动到正常燃亮后电源掉电的过程DCBUS的电压值和电流值

表明,当产品设计额定输入功率50 W时,恒功率调节范围满足不大于 $\pm 5\%$ (即47.5~52.5 W)的要求。

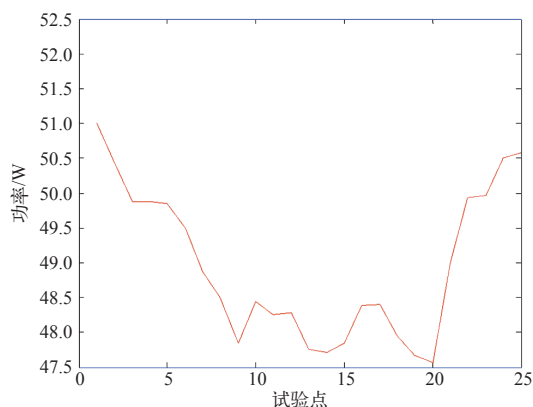


图10 恒功率控制试验数据

4 结束语

飞机的供电系统主要有AC 115 V及DC 28 V,而且对外围配套设备的体积和重量有严格要求。本文设计了一种低压直流供电的HID照明控制系统,该系统是由输出电压控制环和电流控制环组成的双闭环控制系统,消除了对功率因数校正的要求,改善了系统动态性能,有效减小系统响应时间,并具有自动限流的功能。系统抗干扰性

能强,回路稳定性好。样机经高压点火和恒功率试验验证,系统性能稳定。目前该控制系统已应用于某型号军用飞机的机载照明系统,且运行良好。该系统不仅可以应用于航空领域,在工业照明领域也有广泛的应用空间。

参考文献

- [1] 伏乃林. HID灯原理及其镇流器研究 [D]. 镇江: 江苏大学, 2009.
- [2] 路秋生. 电子镇流器的设计与调光控制 [M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [3] 赵友全, 李荣生. 一种新型高亮可控脉冲氙灯光源 [C]. 海峡两岸第十八届照明科技与营销研讨会专题报告暨论文集, 2011.
- [4] 曹箫洪. HID灯和电子镇流器间的接口设计及镇流器可靠性研究 [J]. 照明工程学报, 2010, 21 (6): 74-80.
- [5] 刘跃群, 王强, 刘卓炯. 光源电器原理和应用技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
- [6] 陈亚爱, 薛颖, 周京华. 基于HID灯的电子镇流器控制技术综述 [J]. 照明工程学报, 2012, 23 (4): 112-118.
- [7] 徐运武, 欧阳明星, 李艳. 基于单片机控制的HID车灯控制器研究与设计 [J]. 自动化技术与应用, 2011, 30 (7): 54-58.
- [8] 张相军, 王兴国, 吕志伟. 高频数字化低压钠灯电子镇流器研究 [J]. 电气应用, 2011, 30 (2): 32-34.
- [9] 路秋生. 高强度气体放电灯用电子镇流器控制集成电路与实现 [J]. 光源与照明, 2010 (4): 30-35.
- [10] 杨旭. 电力电子中的数字控制技术专辑特邀主编评述 [J]. 电力电子技术, 2010, 44 (12): 1.

(收稿日期: 2016-11-03) **EA**

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告