

• 电路与控制 •

供电兼容性试验要求的机载设备电源适配性设计方法

杨 乾, 蔡敬海

(中国电子科技集团公司光电研究院, 天津 300308)

摘 要: 机载设备供电兼容性试验方法的实施, 对用电设备的电源设计提出了更严苛的要求。结合工程实际, 介绍了一种集电子开关/保险、前端稳压、浪涌抑制等功能于一体的设计方法, 将其应用于机载设备中, 机载设备顺利通过了机载设备供电兼容性符合性验证。试验结果证明了设计方法的可行性。

关键词: 机载设备; 供电兼容性试验方法; 前端稳压; 浪涌抑制

中图分类号: TN702

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2016)-06-0053-06

Adaptability Design of Airborne Equipment Power Supply for Power Supply Compatibility Test Requirement

YANG Qian, CAI Jing-hai

(Academy of Opto-Electronics, China Electronics Technology Group Corporation (AOE CETC), Tianjin 300308, China)

Abstract: More critical requirements on the power supply design are put forward due to the implementation of avionics equipment power supply compatibility test method. With the practical engineering, a design integrated with electronic switch and fuse, front-end voltage regulation and transient suppression is introduced and applied in airborne equipments. The equipments pass airborne equipment power supply compatibility compliance verification test. Experimental results show that the design is feasible.

Key words: airborne equipment; power supply compatibility testing method; front-end voltage; transient suppression

随着新一代飞机电源容量和机载用电设备大幅增加, 机载设备与飞机电源的适配性问题越来越重要。机载设备供电兼容性试验方法(以下简称试验方法)中, 对用电设备正常工作时的稳态电流、稳态功率、启动冲击电流、断电时产生的电压尖峰, 以及用电设备在正常/电压瞬变、非正常电压瞬变、供电转换中断等条件下的运行状态都做出了严格规定^[1-2]。以某机载设备为平台, 提出了一种集电子开关/保险、升压、降压、前端稳压和浪涌抑制等功能于一体的电路设计方法, 进行了试验考核, 并给出了试验结果。

1 设计思路及工作原理

设计了电子开关/保险的功能; 为满足试验方法中正常电压瞬变要求, 设计了升压和降压功能电路; 为应对不同电压和时间间隔的供电转换中断、不同电压间的快速切换等试验项目中产生的冲击电流对用电设备和电源造成的损坏, 设计了浪涌抑制功能电路, 而对冲击电流的抑制也是文中的一个设计重点^[3-4]。设计方法原理框图如图1所示。电路原理图如图2所示。

收稿日期: 2016-11-02

作者简介: 杨乾(1984-), 男, 河北省新乐市人, 工学硕士, 工程师, 主要研究方向为光电技术研究; 蔡敬海(1982-), 男, 河北省滦南县人, 工学硕士, 工程师, 主要研究方向为光电技术研究。

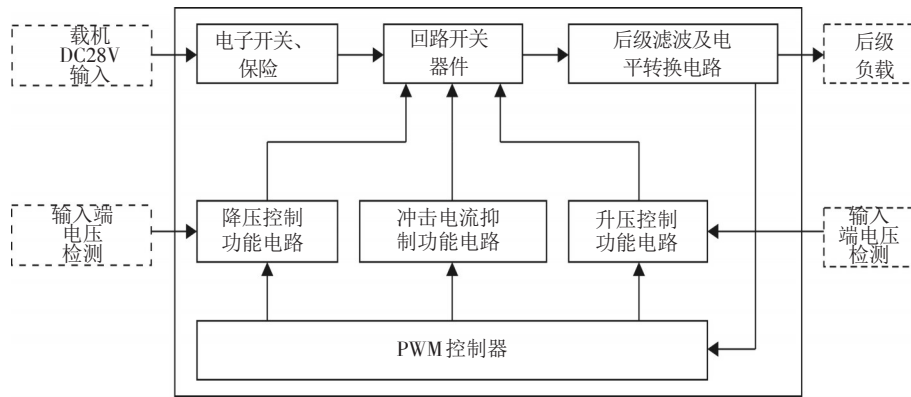


图1 设计方法原理框图

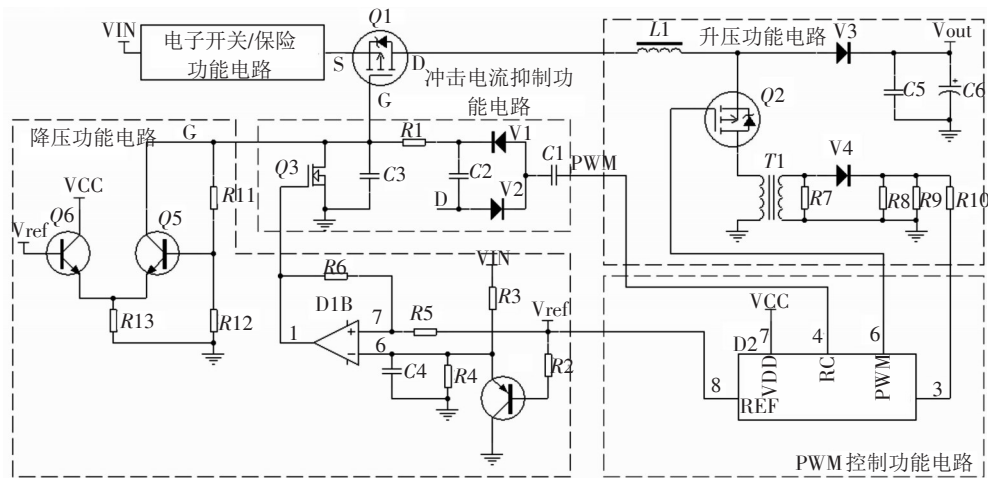


图2 设计方法电路原理图

2 功能电路设计

2.1 电子开关和保险设计

为保护电路安全运行,防止设备发生故障或短路时,过高的电流损坏印制板或元器件,直流电源输入端串入MOS管,并配以辅助控制电路,即起到了电子开关作用,又兼有过流保护功能^[5],工作原理如图3所示。

图中功率场效应管Q1作为电子开关,控制着用电回路的通断。通过电阻R11(阻值很小)将流经用电回路的电流信号转化为电压信号,反馈到Q1的控制电路,电阻R11两端电压随用电回路电流线性增大,当大于设定阈值时,即可触发比较器动作,从而关断MOS管Q1输出,实现过流保护功能。

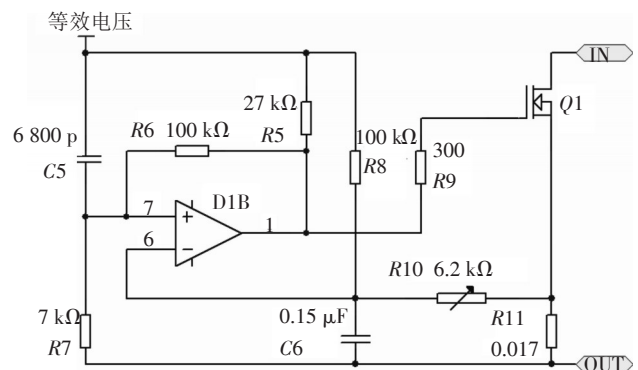


图3 电子保险原理图

同时该功能电路过流保护时将产生自锁效应,浪涌电流消失后,需将控制端电压重置才能恢复运行,为防止浪涌电流造成误保护情况发生,兼顾后级负载特

性,设计了瞬态电流抑制电路(延时保护电路)。

当浪涌电流流经R11时,由于电容C6的存在,电压反馈信号不能立即传递到比较器的输入端,需要对电容C6充电,充电时间被计入延时保护时间。另外,设备初次启动时,电容C5充电结束后,比较器才能起作用。

理论延迟保护时间计算如下:设备正常运行时,比较器输入端A点电压高于B点电压,比较器输出高电平,驱动MOS管Q1栅极正常导通。当产生过流现象时,B点电压高于A点电压,比较器输出低电平而导致Q1关断。为计算其对不同浪涌电流的延时保护时间,作为后续负载产生浪涌电流的限制条件,需要依据一阶电路的三要素法进行计算^[6]

$$f(t) = f(\infty) + [f(0) - f(\infty)]e^{-\frac{t}{\tau}} (t \geq 0) \quad (1)$$

其中, $f(t)$ 为任意时刻值; $f(0)$ 为初始值; $f(\infty)$ 为稳态值; τ 为一阶电路 RC 时间常数。结合图3, 设 $f(t) = V_t$, $f(0) = V_{初}$, $f(\infty) = V_{末}$, $\tau = RC = R_{10}C_6$, 代入式(1)得

$$V_t - V_{末} = (V_{初} - V_{末}) e^{-\frac{t}{\tau}} (t \geq 0) \quad (2)$$

经过取对数计算得到

$$t = \tau \ln[(V_{末} - V_{初}) / (V_{末} - V_t)] \quad (3)$$

假设浪涌电流大小为 I , R_{11} 阻值为 r , 控制端等效电压为 $V_{等效}$, 比较器A两点电压分别为 V_A , 则

$$V_{初} = V_{等效} \times \frac{R_{10}}{R_{10} + R_8}, V_{末} = V_{等效} \times \frac{R_{10}}{R_{10} + R_8} + Ir, V_t = V_A,$$

将图中参数代入式(3)并化简可得

$$t = 0.93 \ln \left[\frac{17I}{17I - 65} \right] \quad (4)$$

通过式(4)计算可以得出,不同浪涌电流 I (典型值)与对应的延时保护时间 t 的关系如表1所示。

表1 不同浪涌电流 I 与对应的延时保护时间 t 关系

序号	浪涌电流/A	延时保护时间/ms
1	8	0.60
2	10	0.44
3	12	0.36
4	14	0.30
5	16	0.26

注:①由式(4)可知电流小于3.8 A,电路不保护;

②初次启动延时保护时间需增加1 ms。

2.2 降压功能设计

降压功能部分采用射极跟随器的方式实现^[7],

如图4所示。

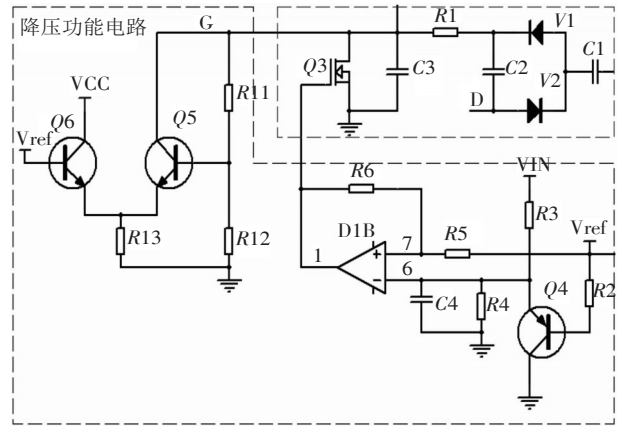


图4 降压功能电路原理图

设计中将最高输入电压设置为80 V,输出不大于37 V。具体实现方式为:Q5和Q6组成电压检测电路, V_{ref} 为参考电压, R_{11} 与 R_{12} 电阻组成分压网络,当G点电压上升到设定值时, Q_5 基极达到基准电压,三极管导通。栅极电压被限制在设定值,受控MOS管进入线性区,降压功能通过限制功率MOS管栅极电压从而实现对输出电压的控制功能。

2.3 升压功能设计

升压电路采用BOOST开关调整电路来实现,原理如图5所示。

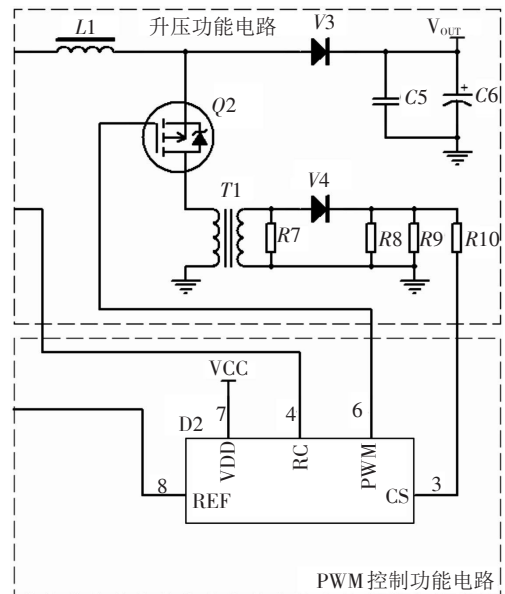


图5 升压功能电路原理图

将较低的未调整的输入电压升为较高的输出电压。升压电路主要由 $L1$ 、 $V3$ 、 $Q2$ 、PWM控制器和二级电容组成, $Q2$ 关断,电感电流不能突变,电感异名端电压相对同名端为正,即电感电压极性颠倒,因此电感经二极管 $V3$ 向负载电容充电,使电容两端电压高于输入电压,从而实现升压功能^[8]。

根据机载设备具体需求,设置了初次启动电压阈值和正常运行的升压阈值。升压功能电路起作用时的输出电压为22 V。实际应用中输入电压为28 V时,负载为0.7 A对应功率为20 W,当输入电压为11 V时对应平均电流为3.5 A左右,升压电路效率高达为95%。

2.4 浪涌抑制功能设计

2.4.1 冲击电流来源

设备进线端一般采用滤波器来减小电源反馈到输入的纹波,滤波器由电容和电感组成 π 形滤波网络,二级功能板卡对地也会产生等效电容。电容器充电瞬态可视为短路,输入电压波动会产生冲击电流,幅度要比稳态工作电流大很多,如不加以限制,可能烧坏设备前端保险或造成保险误动作,还会由于共同输入阻抗而干扰附近的电子设备^[9]。

冲击电流大小由很多因素决定,如输入电压大小和变化速率,输入线路阻抗、设备内部输入电感/电容及等效阻抗等。这些参数随不同电源系统特性而各不相同,可进行粗略估算,最精确的方法是在实际应用中通过相关仪表测量其大小^[10]。

2.4.2 冲击电流抑制方法

(1) 串联电阻法

对小功率用电设备,可采用串联电阻法。电阻大则冲击电流小,功耗大,须选合适电阻值,使冲击电流和电阻上功耗在允许范围,同时该电阻能承受开机瞬间的电压尖峰和大电流。

(2) 热敏电阻法

采用负温度系数热敏电阻(NTC),当用电设备启动时,NTC电阻值很大,可限制冲击电流,随着NTC自身发热,其电阻值变小,使其在工作状态时的功耗减小。

(3) 有源冲击电流限制法(利用MOS管限制冲击电流)

MOS管具有导通阻抗低和驱动简单的特点,辅

以少量元器件即可做成冲击电流限制电路。MOS管有三个工作区域:可变电阻区、恒流区、夹断区,如图6所示。工作在可变电阻区(非饱和区)时,通过改变栅源电压 U_{gs} 的大小来改变导通电阻的阻值,此时MOS管等效为一个可变电阻器, U_{gs} 越小,电阻值越大;工作在线性放大区(饱和区),当栅源电压 U_{gs} 增大时, i_d 仅略有增大,此时MOS管等效为一个电压控制的电流源,当设备正常运行时,MOS管应当工作在该区域^[8]。

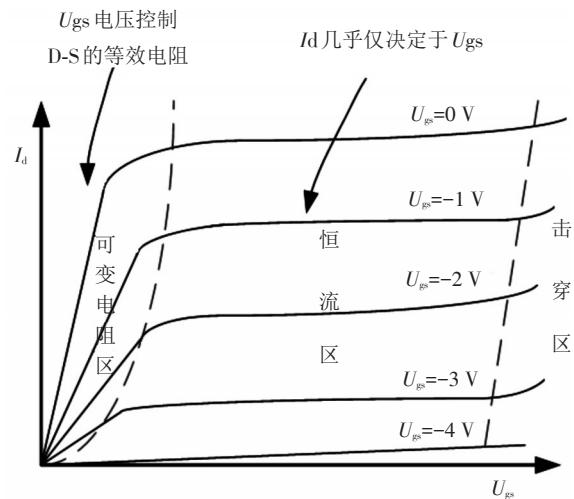


图6 MOS管工作区域划分图

当输入电压波动时,通过外围电路控制串联在主回路的MOS管,工作在可变电阻区来抑制冲击电压的大小,当冲击电流消失后,使其重新工作在饱和区,从而实现冲击电流抑制功能。

2.4.3 冲击电流抑制电路设计

采用有源冲击电流限制法,电路原理如图7所示。

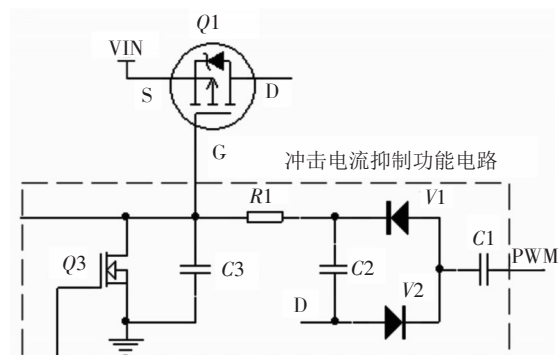


图7 冲击电流抑制电路原理图

$Q1$ 为N沟道MOS管,导通需要一个比G点高的电荷泵电路,组成电荷泵的电路为 $C1$ (470 pF)、 $C2$ (10 nF)、 $V1$ 、 $V2$ 、 $R1$ (15.8 k Ω)和 $C3$ (47 nF),控制电路发出占空比为50%的PWM方波,频率为300 kHz,通过 $C1$ 电容周期性的给 $C2$ 电容充电,然后通过 $R1$ 给 $C3$ 电容充电最终使得MOS管导通。

试验方法中冲击电流产生主要由输入端电压跳变引起,分为两种方式:低于升压点的跳变和高于升压点的跳变。都是通过控制主回路MOS管的线性区上升时间,使其工作在可变电阻区,来实现对冲击电流的抑制^[1]。

(1)低于升压点跳变方式线性启动时间的计算

MOS管 $Q1$ 的线性启动时间主要由两部分组成:电荷泵电路的启动时间和RC延时时间。

电荷泵启动时间计算:电荷泵电路中根据电容分压关系可知: $(V_c - 2V_o) \frac{c1}{c1+c2}$ 约为0.2 ms。

RC延时时间计算:经计算电容 $C1$ 正端等效电压为8 V左右,而G点等效电压为4 V左右,这相当于PWM为电容 $C2$ 恒流充电的效应,因此流经电阻 $R1$ 的电流约0.25 mA,当输入电压由0~28 V跳变时,电荷泵电路将栅极电压升至32 V左右,栅极对地设置有400 k Ω 等效检测电阻,此时检测支路电流约为0.08 mA,因此流经电容 $C3$ 的电流为0.17 mA,由电量守恒定律 $CU=It$ 计算可得,RC延时时间约为8.8 ms。

因此MOS管 $Q1$ 的线性启动时间理论值约为9 ms,并且根据电量守恒可知,线性启动时的电流值小于2 A,远远小于表1中电子保险的保护阈值,与实际测量值接近。

(2)高于升压点跳变方式线性启动时间的计算

MOS管 $Q1$ 的栅极电压钳位之前为开环,电荷泵电路的存在,输入电压上升过程中,以源极为基准升压6 V左右,钳位时属于半闭环控制,所谓半闭环就是只控制栅极电压,源极电压跟随受限,且始终保持有3 V左右的压差。

栅源电压差为5 V左右开始钳位,当电源电压由22 V上升至45 V的过程中(试验方法中正常电压瞬变项目),22~28 V阶段,假设电源上升时间为200 μ s,设备等效容性负载约为470 μ F,由电量守恒定律 $CU=It$ 算出浪涌电流约为11.5 A。28~45 V的上升过程,MOS管 $Q1$ 重新进入线性区,冲击电流被

限制,限制时间同样可由电量守恒公式计算得出。

经计算得出的此阶段冲击电流的幅值和持续时间,小于表1中电子保险的保护阈值,且留有近1倍的余量,与实际测量值接近。

3 试验验证结果及分析

将此方法应用于某机载设备,依据试验方法,经反复摸底和试验验证,功能实现情况如下:

(1)升压功能验证:设备工作后,输入电压低于20 V启动升压电路,且输出保持22 V,输入电压降至11 V以下,升压功能失效,输出关闭;

(2)降压功能验证:输入电压大于37 V时,输出电压被限制在37 V以下;

(3)电子保险和浪涌抑制功能验证:低于升压点跳变时,将冲击电流限定在2 A以内,启动时间约10 ms,而无浪涌抑制功能电路时,冲击电流高达12 A/2 ms,超过了电子保险的保护阈值,引发电子保险误动作,冲击电流抑制电路增加前后的电流测试波形如图8、图9所示。

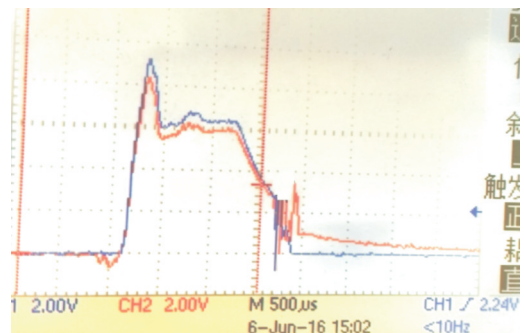


图8 无抑制电路的冲击电流测试波形图

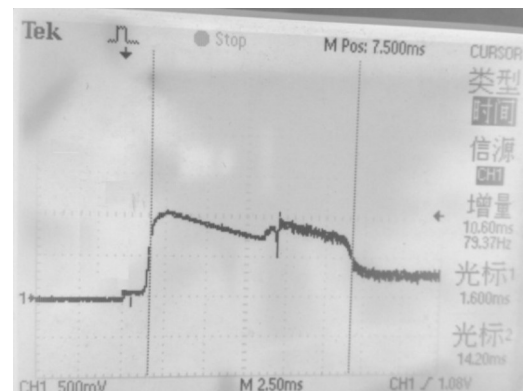


图9 加有抑制电路的冲击电流测试波形图

高于升压点跳变引起的冲击电流如图10所示。小于电子保险的安全保护阈值。

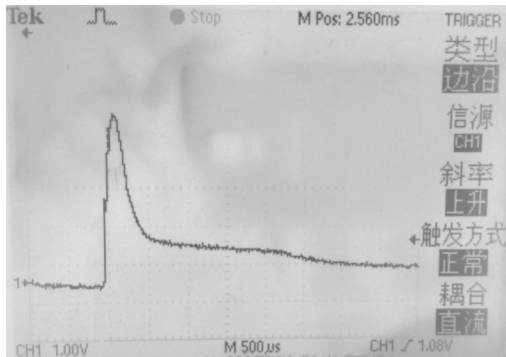


图10 正常电压瞬变条件下(22~45 V)冲击电流测试波形

由试验结果可以看出,本方法能够满足用电设备与飞机供电特性的符合性验证试验。针对不同负载情况,可通过修改相应参数,实现本方法所述功能。

4 结论

机载设备供电兼容性试验方法强化了对机载设备供电兼容性的考核力度,发现了机载设备供电兼容性设计缺陷,促进了机载设备供电兼容性完善设计工作。结合工程实际,提出了一种有效的设计方法,并通过试验验证,较好的解决了机载设备供

电兼容性设计问题。本设计方法具有较好的适用性和推广性,可广泛应用于后续产品设计中。

参考文献

- [1] 任仁良,强喜龙. 航空机载电源标准的发展研究[J]. 航空维修与工程,2011(3):46-49.
- [2] HB20326 机载设备对飞机供电特性适应性试验方法, 2015.
- [3] 孙良,苗壮,王宏霞. 机载用电设备的供电适应性试验系列标准制定与实施[J]. 航空电子技术,2013.
- [4] MIL-HDBK-704 Guidance for Test Procedures for Demonstration of Utilization Equipment Compliance to Aircarical Power Characteristics.
- [5] 黄俊,王兆安. 电力电子交流技术[M]. 北京:机械工业出版社,2004.
- [6] ADS-68-IS Aeronautical design standard Aircraft electrical power characteristics[S]. 2006
- [7] 铃木雅臣. 晶体管电路设计[M]. 北京:科学出版社, 2014.
- [8] 普利斯曼,比利斯,莫瑞. 开关电源设计[M]. 北京:电子工业出版社,2010:19-20.
- [9] 任仁良,余朝霞. 飞机电源系统过压保护要求及实现[J]. 中国民航飞行学院学报,2006,17(5):47-48.
- [10] 吴小华. 飞机供电特性符合性验证试验研究[C]//中国航空协会航空电气工程第七届学术年会论文集,2007.
- [11] 童诗白,华成英. 模拟电子技术基础[M]. 北京:高等教育出版社,2001:78-81.

(上接第52页)

需要知道目标的轮廓,针对不同的具体情况可选择不同的分析方法。

参考文献

- [1] 王宇庆,朱明. 评价彩色图像质量的四元数矩阵最大奇异值方法[J]. 光学·精密工程,2013,21(2):470-471.
- [2] 陈勇,李愿,吕霞付,等. 视觉感知的彩色图像质量积极评价[J]. 光学·精密工程,2013,21(3):742-750.
- [3] 郁梅,孔真真,朱江英. 基于视觉阈值及通道融合的立体图像质量评价[J]. 光学·精密工程,2013,21(6):1605-1612.
- [4] Wang Z. Image quality assessment :from error visibility to-

structural similarity [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2004, 13(4):6-7.

- [5] Wang Z, Simoncelli E P, Bovik A C. Multi-scale structural similarity for image quality assessment[C]//IEEE International Conference Signals, Systems and Computers, USA, 2003, 1-4.
- [6] Chen G H, Yang C L, PO L M, et al. Edge-based structural similarity for image quality assessment[C]//IEEE International Conference Acousstics, Speech and Signal Processing, 2006:933-936.
- [7] Li C, Bovik A C, Three-component weighted structural similarity index[C]//SPIE, 2009, 7242:1-8.