

阴极脉冲占空比与荧光屏电流关系研究

延波^{1,2}, 杨晔^{1,2}, 倪小兵^{1,2}, 智强^{1,2}, 李军国^{1,2}, 邓广绪^{1,2}

(1.微光夜视技术重点实验室, 陕西 西安 710065; 2.北方夜视科技集团有限公司, 云南 昆明 650223)

摘要: 自动门控电源作为微光像增强器的能量来源, 其阴极脉冲占空比与荧光屏电流的关系对完善自动门控电源的自动亮度控制(ABC)电路设计具有重要意义。从自动门控电源与微光像增强器的匹配应用方面分析了阴极脉冲占空比对荧光屏电流的影响, 又从自动门控电源 ABC 电路设计方面分析了阴极脉冲占空比如何跟随荧光屏电流变化, 才能确保微光像增强器荧光屏亮度的基本恒定, 给出了自动门控电源阴极脉冲占空比与荧光屏电流的曲线图。

关键词: 自动门控电源; 像增强器; 自动亮度控制; 阴极脉冲占空比; 荧光屏电流

中图分类号: TN223 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-8891(2017)08-0757-04

Relationship Between Cathode Pulse Duty Cycle and Phosphor Screen Current

YAN Bo^{1,2}, YANG Ye^{1,2}, NI Xiaobing^{1,2}, ZHI Qiang^{1,2}, LI Junguo^{1,2}, DENG Guangxu^{1,2}

(1.Science and Technology on Low-Light-Level Night Vision Laboratory, Xi'an 710065, China;

2.North Night-Vision Science & Technology Group Corp., Ltd., Kunming 650223, China)

Abstract: Investigating the relationship between cathode pulse duty cycle and phosphor screen current is extremely important for improving the automatic brightness control (ABC) circuit design of auto-gated power sources that are used as power supplies for image intensifiers. On one hand, our investigation includes analysis of the influence of cathode pulse duty cycle on phosphor screen current taking into account the matching application of the auto-gated power source and the image intensifier. On the other hand, in order to ensure that the phosphor screen brightness is maintained at a constant level, our investigation also includes the analysis of the change in cathode pulse duty cycle with change in phosphor screen current taking into account the design of the ABC circuit of the auto-gated power source. Finally, the curve diagram showing the relationship between cathode pulse duty cycle and phosphor screen current is presented.

Key words: auto-gating power source, image intensifier, automatic brightness control, cathode pulse duty cycle, phosphor screen current

0 引言

微光像增强器是能将微弱光(如夜天光)照射下的景物,通过光电阴极的光电子转换、电子倍增器增强和荧光屏电-光转换再现可见图像的一类成像器件^[1]。随着微光像增强器应用环境的复杂化、多元化,与其适配的微光电源不仅提供其各电极所需的稳定工作电压,以及具有自动亮度控制(automatic brightness control)功能和强光保护(bright source protection)功能外,还需微光像增强器具有更宽的动态工作范围^[2]。自动门控技术的出现解决了微光像增强器向高照度应用范围扩展的需

求,这一技术将 MCP 电压调控技术和阴极脉冲宽度调制技术相结合,在 MCP 电压调控的基础上,采用阴极脉宽调制技术代替阴极固定电压,从而拓展了微光像增强器动态工作范围^[3-4]。

阴极脉宽调制技术在自动门控电源中的引入,使得自动门控电源电路中的 ABC 技术更加复杂。为了进一步完善自动门控电源的 ABC 电路设计,本文从自动门控电源与微光像增强器的匹配应用方面分析了阴极脉冲占空比对荧光屏电流的影响,又从自动门控电源 ABC 电路设计方面分析了阴极脉冲占空比如何跟随荧光屏电流变化,给出了阴极脉冲占空比随荧光屏电流变化的曲线图。

收稿日期: 2016-09-02; 修订日期: 2016-09-23.

作者简介: 延波(1984-), 男, 陕西绥德人, 高级工程师, 主要从事电子学在微光夜视技术中的应用研究。E-mail: yb840311@126.com。

1 基于自动门控电源的微光像增强器的ABC工作原理

微光像增强器的ABC功能是指当外界光照强度变化时,微光像增强器荧光屏亮度基本保持恒定,即在人眼无法识别的前提下允许荧光屏亮度有微小变化,自动门控电源将此微小变化作为反馈信号,也就是将微光像增强器荧光屏电流的微小变化作为反馈控制信号,一方面自动调控MCP电压控制微光像增强器MCP的电流增益;另一方面自动调整阴极脉冲占空比,控制微光像增强器光电阴极的电子发射量,通过MCP电压调控和阴极脉宽调制共同实现微光像增强器荧光屏亮度的基本恒定^[5-6],ABC电路原理框图如图1所示。

当微光像增强器荧光屏亮度达到设定值,即荧光屏电流 I_A 达到设定值(一般设定为60 nA),也就是自动门控电源阳极电流达到设定值之后,ABC功能起动,此时阳极电流的微小变化 ΔI_A (一般在0~6 nA),通过微电流采样放大电路转换为低压控制信号 V_L ,控制MCP电压升降,如图1中方式①所示,此种控制方式在微光电源中普遍采用,在此不再阐述;另一方面 V_L 转换为占空比随 V_L 自动调整的低压脉冲信号 N_{LV} ,控制阴极高压脉冲占空比 N_{HV} 的变化,如图1中方式②所示, N_{LV} 和 N_{HV} 除电压幅

度不同外, N_{HV} 的频率和占空比跟随 N_{LV} 变化,在任意时刻低压脉冲信号占空比 N_{LV} 与高压脉冲占空比 N_{HV} 相同,即 $N_{LV}=N_{HV}$ 。

2 选通电源阴极脉冲占空比对荧光屏电流的影响分析

利用选通电源^[7]的外部选通特性(N_{HV} 的频率和占空比跟随 N_{LV} 变化),在选通电源阴极电压、MCP电压、阳极电压(荧光屏电压)都固定时,将选通电源与微光像增强器连接,且给微光像增强器光电阴极施加固定光照强度,此时通过调节选通电源外部选通脉冲的占空比来验证微光像增强器荧光屏亮度是否随阴极脉冲占空比线性变化,得到的一组荧光屏亮度随阴极脉冲占空比变化的数据,如表1所示。

从表1可知:微光像增强器荧光屏亮度跟随阴极脉冲占空比线性变化。

根据表1测试结果,再结合微光像增强器荧光屏电流 I_A 与荧光屏亮度 L_A 的推导关系式 $I_A=\pi\cdot L_A\cdot A_A/(\eta\cdot V_A)$ ^[7]可知:在阳极电压 V_A 、荧光屏发光效率 η 和荧光屏面积 A_A 都为固定值时, I_A 和 L_A 有唯一线性对应关系,因此微光像增强器荧光屏电流跟随阴极脉冲占空比线性变化。

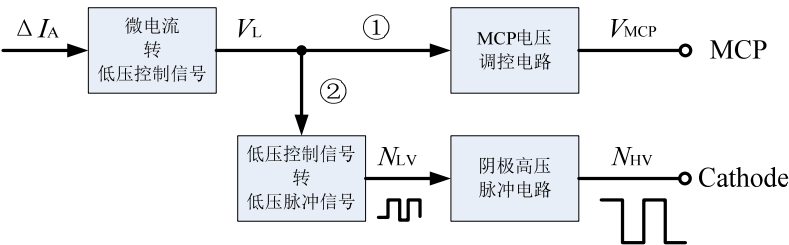


图1 自动门控电源ABC电路原理框图 Fig.1 ABC circuit principle of auto-gating power source

表1 一组荧光屏亮度随阴极脉冲占空比变化的数据

Table 1 A group of experimental data	
阴极脉冲占空比	荧光屏亮度/(cd/m ²)
10%	1.11
20%	2.27
30%	3.42
40%	4.57
50%	5.73
60%	6.90
70%	8.08
80%	9.24
90%	10.40
100%	11.60

在上述测试条件下,MCP电压不变,则MCP电流增益 G 不变,且电流增益 G 未发生饱和现象;阴极电压不变,则光电阴极灵敏度 S_C 不变,且光电阴极面积 A_C 也为固定值。故荧光屏电流^[7]可表示为:

$$I_A=N_{HV}\cdot E\cdot S_C\cdot A_C\cdot G$$
 (1)

式中: E 为光电阴极面照度。

在上述条件下,由于 S_C 、 A_C 、 G 都为定值,设 $\alpha=S_C\cdot A_C\cdot G$,故式(1)可近似表示为:

$$I_A=N_{HV}\cdot E\cdot \alpha$$
 (2)

从式(2)可以看出,微光像增强器荧光屏电流只与阴极脉冲占空比和光电阴极照度有关。当光电阴极面光照强度增加时,若要保持微光像增强器荧光屏电流的基本恒定,只能通过减小阴极脉冲占空比

来实现。

依据式(2), 再利用选通电源可实现阴极脉冲占空比 N_{HV} 为 0.1%~100%可调、MCP 电压可调至较低值和荧光屏电压在正常值保持不变的特性, 在保持荧光屏亮度不变, 即保持荧光屏电流 I_A 不变时, 得到的一组阴极脉冲占空比随阴极面光照强度变化的数据如表 2 所示。

表 2 使用选通型微光像增强器得到的一组数据
Table 2 A group of data obtained using gated LLL image intensifiers

脉冲占空比 N_{HV}	光照强度 E
100%	4.73×10^{-2} lx
10%	4.73×10^{-1} lx
1%	4.75×10^0 lx
0.1%	4.78×10^1 lx

从表 2 数据可知, 阴极脉冲占空比与阴极面光照强度有一一对应关系, 且两者对应数据的乘积都基本相同, 也验证式(2)推导的正确性。

3 自动门控电源阴极脉冲占空比对荧光屏电流的影响分析

从自动门控电源与微光像增强器匹配应用方面, 分析阴极脉冲占空比对荧光屏电流的影响, 通过借鉴关系式(2), 再结合自动门控电源 ABC 电路原理, 得到基于自动门控电源的微光像增强器的阴极脉冲占空比、阴极面照度与荧光屏电流的关系式如下:

$$I_A + \Delta I_A = N_{HV} \cdot E \cdot \alpha \tag{3}$$

在原关系式(2)基础上增加了荧光屏电流变化量 ΔI_A , 因为基于选通电源的微光像增强器的荧光屏亮度需外部进行手动调节 MCP 电压和脉冲占空比, 不需要选通电源内部产生反馈控制信号 ΔI_A , 而基于自动门控电源的微光像增强器的荧光屏是通过电源内部的 ABC 功能自动调节的, 自动门控电源需要荧光屏电流 ΔI_A 作为反馈信号自动调节 MCP 电压和脉冲占空比, 才能确保荧光屏亮度基本恒定, 因此在荧光屏电流 I_A 的基础上增加荧光屏电流变化量 ΔI_A 。

从式(3)可知: 当光电阴极面光照强度增加时, 若要保持微光像增强器荧光屏电流的基本恒定, 只能通过减小阴极脉冲占空比来解决, 而阴极脉冲占空比又与微光像增强器荧光屏电流产生的控制信号有关。随着阴极面光照强度以指数形式增加, 阴极脉冲占空比需随着荧光屏电流变化量 ΔI_A 的增加而基本以指数方式下降。

荧光屏电流变化量 ΔI_A 按照 0~3 nA 考虑, 为了

保证荧光屏亮度的均匀性, 及亮度曲线的平滑, 荧光屏电流变化量 ΔI_A 选取 0 nA、1 nA、2 nA、3 nA 共 4 个数据点, 要求荧光屏电流变化量 ΔI_A 与阴极脉冲占空比 N_{HV} 和阴极面光照强度 E 的对应关系如表 3 所示。

表 3 采用公式(3)得到的一组数据
Table 3 A group of data obtained by Formula 3

脉冲占空比 N_{HV}	光照强度 E	荧光屏电流变化量 ΔI_A
100%	4.73×10^{-2} lx	0 nA
10%	4.80×10^{-1} lx	1 nA
1%	4.88×10^0 lx	2 nA
0.1%	4.96×10^1 lx	3 nA

要求自动门控电源 ABC 电路按表 3 数据进行设计, 即随着荧光屏电流变化量的线性增加, 阴极脉冲占空比基本按照指数方式下降, 才能确保基于自动门控电源的微光像增强器 ABC 功能的实现。

4 荧光屏电流对自动门控电源阴极脉冲占空比的影响分析

在自动门控电源 ABC 电路设计时, 荧光屏电流对阴极脉冲占空比的影响, 主要体现为荧光屏电流对阴极脉冲占空比的控制情况, 可分为荧光屏电流变化量 ΔI_A 与低压控制信号 V_L 的关系分析、低压控制信号 V_L 与低压脉冲占空比 N_{LV} 的关系分析、低压脉冲占空比 N_{LV} 与高压脉冲占空比 N_{HV} 的关系分析共 3 部分, 其中 N_{LV} 与 N_{HV} 的关系上面已经分析。

4.1 V_L 与 ΔI_A 的关系分析

自动门控电源的自动亮度控制功能起动后, 微光像增强器荧光屏电流基本处于恒定状态, 而荧光屏电流的基本恒定就代表荧光屏电流达到设定值后只允许有微小的变化 ΔI_A , ΔI_A 通常为几个纳安。 ΔI_A 被微电流采样放大电路转换为低电压控制信号 V_L , 此采样放大电路通常由低功耗精密运算放大器及 T 型电阻网络构成, V_L 通常为几伏内的电压信号^[8]。 V_L 与 ΔI_A 的关系可表示为:

$$V_L = \Delta I_A \cdot \beta \tag{4}$$

式中: β 为荧光屏电流 ΔI_A 转低压控制信号 V_L 的放大系数, 在电路参数固定时为常数, 一般为 0.1 V/nA~0.5 V/nA; ΔI_A 为荧光屏电流变化量, 在电路参数固定时为常数。

从关系式(4)可知: 低压控制信号 V_L 是与微光像增强器荧光屏电流变化量 ΔI_A 有关的变量, 且 V_L 与 ΔI_A 为线性关系。

4.2 V_L 与 N_{LV} 的关系分析

自动门控电源将微光像增强器荧光屏电流采样

放大后的低压控制信号 V_L 又控制低压脉冲占空比 N_{LV} 的变化, 再结合上述 $N_{HV} = N_{LV}$, 也就是阴极高压脉冲占空比 N_{HV} 根据低压控制信号 V_L 的变化而变化。

将低压控制信号 V_L 转换为低压脉冲占空比 N_{LV} 的方法至少有如下两种:

①将低压控制信号 V_L 与稳定的三角波进行比较, 比较输出即为占空比可调的方波, 方波的占空比根据 V_L 的变化而变化。

②将低压控制信号 V_L 通过 A/D 转换, 再送入 PWM 脉冲调制器, 从而输出占空比可调的方波信号, 方波信号也随 V_L 的变化而变化。

低压控制信号 V_L 转换为低压脉冲占空比 N_{LV} 的实现方法不同, V_L 与 N_{LV} 会有不同的对应关系, 或通过电路设计, 可让 V_L 与 N_{LV} 有特定的对应关系, 可表示为:

$$N_{LV} = V_L \cdot \gamma \quad (5)$$

式中: γ 可通过电路设计具有不同的值, 且可不为常数。

由式(4)与式(5)可推得如下关系式:

$$N_{LV} = \Delta I_A \cdot \beta \cdot \gamma \quad (6)$$

从式(6)可知: 低压脉冲占空比 N_{LV} 是与微光像增强器荧光屏电流变化量 ΔI_A 有关的变量, 而 $N_{HV} = N_{LV}$, 故可得到如下关系式:

$$N_{HV} = \Delta I_A \cdot \beta \cdot \gamma \quad (7)$$

从式(7)可知: 高压脉冲占空比 N_{HV} 是与微光像增强器荧光屏电流变化量 ΔI_A 有关的变量, 且 β 为常数, 根据 γ 变量的不同, N_{HV} 随 ΔI_A 进行线性, 或非线性变化。

通过上述分析, 再结合表 3 自动门控电源 ABC 电路的设计要求, 自动门控电源阴极脉冲占空比需跟随荧光屏电流 ΔI_A 的线性增加而按指数方式下降。

5 讨论及结论

上述分析中荧光屏电流变化量与阴极脉冲占空比对应数据点的选择较少, 在自动门控电源 ABC 电路设计时, 选择更多的数据点将更有利于电路设计, 而且使阴极脉冲占空比随荧光屏电流变化的实际电路曲线与理论设计曲线更加逼近。对荧光屏电流变化量进行细化后形成的阴极脉冲占空比随荧光屏电流变化量的变化曲线如图 2 所示。图 2 中阴极脉冲占空比随荧光屏电流变化量的线性增加而以指数形式由 100% 下降到 0.1%。

本文从匹配应用和设计方面分析了阴极脉冲占

空比与荧光屏电流的关系, 并给出了自动门控电源随荧光屏电流变化量线性增加所对应的阴极脉冲占空比下降曲线, 对于自动门控电源的 ABC 电路设计具有指导意义。

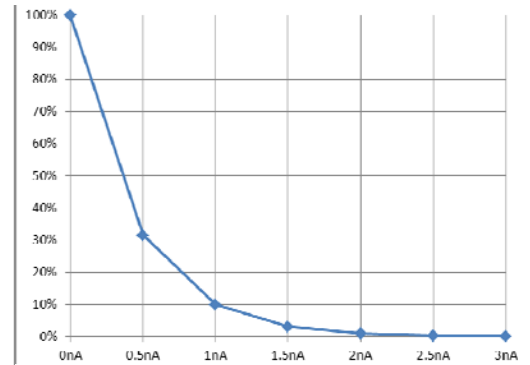


图2 阴极脉冲占空比随荧光屏电流变化量变化曲线

Fig.2 Relationship between cathode pulse duty cycle and phosphor screen current variation

参考文献:

- [1] 向世明, 倪国强. 光电子成像器件原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999.
XIANG Shiming, NI Guoqiang. *The Principle of Photoelectric Imaging Devices*[M]. Beijing: National defense industry press, 1999.
- [2] 王永仲. 现代军用光学技术[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 66-73.
WANG Yongzhong. *Modern Military Optical Technology*[M]. Beijing: Science Publishing House, 2009: 66-73.
- [3] 邓广绪, 延波, 智强, 等. 微光像增强器自动门控电源技术研究[J]. 红外技术, 2012, 34(3): 155-158.
DENG Guangxu, YAN Bo, ZHI Qiang, et al. Study of technology of auto-gating power source in image intensifier[J]. *Infrared Technology*, 2012, 34(3): 157-158.
- [4] 郭晖, 向世明, 田民强. 微光夜视技术发展动态评述[J]. 红外技术, 2013, 35(2): 63-68.
GUO Hui, XIANG Shiming, TIAN Minqiang. A review of the development of low-light night[J]. *Infrared Technology*, 2013, 35(2): 63-68.
- [5] Estrera J P, Saldana M R. Gated power supply technologies for advanced image intensifiers[C]//SPIE, 2003, 4796: 60-70.
- [6] Estrera J P, Saldana M R. High-speed photocathode gating for generation 3 image intensifier applications[C]//SPIE, 2003, 5079: 212-221.
- [7] 白廷柱, 金伟其. 光电成像原理与技术[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2006: 131-199, 227.
BAI Tingzhu, JIN Weiqi. *Photoelectric Imaging Principles and Technology*[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2006: 131-199, 227.
- [8] YANG Ye, YAN Bo. Feedback circuit design of an auto-gating power supply for low-light-level image intensifier[C]//SPIE, 2015, 9795: 97950B-2.