

基于自动门控电源的微光像增强器动态范围研究

延 波^{1,2}, 智 强^{1,2}, 李军国², 王 钰², 杨 晔², 姚 泽², 杜木林³, 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 西安微光器件研究中心, 陕西 西安 710065;

3.北方夜视技术股份有限公司昆明分公司, 云南 昆明 650223)

摘要: 像增强器作为微光夜视装备的核心器件, 其动态范围研究具有重要意义。论述了基于自动门控电源的微光像增强器动态范围扩展的意义, 分析讨论了自动门控电源 MCP 电压、阴极脉冲宽度、阴极脉冲频率、阴极开启电压与微光像增强器动态范围的关系, 提出了微光像增强器动态范围估算模型。

关键词: 自动门控电源; 像增强器; 动态范围

中图分类号: TN223 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2013)05-0300-04

Study of Image Intensifier Dynamic Range Based on Auto-gating Power Source

YAN Bo^{1,2}, ZHI Qiang^{1,2}, LI Jun-guo², WANG Yu², YANG Ye², YAO Ze², DU Mu-lin³, DENG Guang-xu^{1,2}

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

2.Xi'an Center of LLL Device, North Night-Vision Science &Technology Group Corp., Ltd. Xi'an 710065, China;

3. Kunming Branch of North Night Vision Technology Co., Ltd. Kunming 650223, China)

Abstract: As image intensifier being the core device of LLL night vision device, its dynamic range has a great significance for study. The thesis discusses the significance of enlarging image intensifier dynamic range based on auto-gating power source, then analyzes the relationships of image intensifier dynamic range with MCP voltage, cathode pulse width, cathode pulse frequency and the cathode turn-on voltage, ultimately the calculation model of image intensifier dynamic range is achieved.

Key words: auto-gating power source, image intensifier, dynamic range

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]。微光像增强器作为各类微光夜视装备的核心器件,被广泛应用于夜视系统中,对提升部队的昼夜作战能力具有重要作用。像增强器是一种弱光器件,主要用于夜间观察,但由于视场环境复杂多变,如巷战中,陆战队员经常会在明亮与黑暗区域快速运动;战场上还会有各种强闪光和致盲武器,这些都要求微光像增强器具有较宽的动态范围^[2]。

像增强器动态范围定义为:像增强器成像时,光阴极面可适应的光照强度的最大值与最小值的比值,其动态范围量级表示为 $\lg(E_{\max}/E_{\min})$, 其中, E_{\max} 为像增强器成像时,阴极面光照强度最大值; E_{\min} 为最小值。

要使微光像增强器的动态范围得到有效扩展,需具备 2 个条件:①像管光阴极在高照度条件下具有承受瞬时强光的能力;②像管需装配自动门控电源,且要求电源具有较宽的自动亮度控制(ABC)范围。本文不考虑条件 1, 只从条件 2——自动门控电源方面论述其对微光像增强器动态范围的影响。

与传统直流高压电源相比,自动门控电源将连续矩形高压脉冲加于像管阴极,如图 1 所示,通过感知光电流,自动调整矩形高压脉冲宽度^[3]。为了进一步扩展像增强器动态范围,在此基础上增加了阴极电压调节,并与 MCP 电压调控和阴极脉冲宽度调整一起实现像管在大动态范围下应用。

本文主要研究自动门控电源 MCP 电压、阴极开启脉冲宽度、阴极脉冲频率及阴极开启电压对微光像增强器动态范围的影响,提出改进自动门控电源自动亮度控制范围的方法,建立微光像增强器动态范围估算模型。

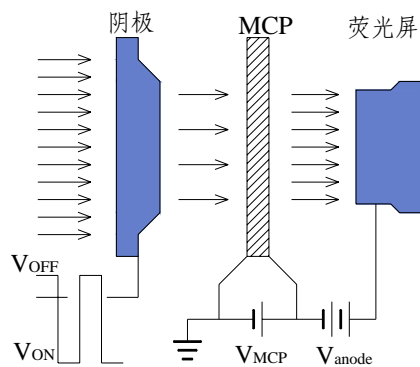


图1 自动门控电源工作原理

Fig.1 Operational principle of auto-gating power source

1 动态范围影响因素分析

1.1 MCP 电压对像增强器动态范围的影响

根据 MCP 电流增益特性方程，其计算公式为

$$G = \left(\frac{V}{C\alpha} \right)^4 \quad (1)$$

式中： G 为 MCP 的电流增益； V 为 MCP 电压； C 为常数，对未经电子清刷的 MCP， $C=8.5$ ，对清刷过的 MCP， $C=9.5\sim 10$ ； α 为 MCP 长径比。由(1)式可知，当 α 与 C 取值固定时，MCP 电流增益只与其电压有关，且 MCP 增益与电压间成指数关系。

如图 2 所示 MCP 增益与其电压并不是在整个过程全部满足指数变化关系，因 MCP 本身的特性，在 MCP 电压过高时，其内部电子达到饱和状态，易造成 MCP 内部细管灼伤^[4]，因此一般选取图 2 中 B 点对应电压为 MCP 电压最大值；当 MCP 电压过低时易造成分辨率下降，图像模糊等现象，故一般选取图 2 中 A 点对应电压值为 MCP 电压最小值，MCP 电压最大值与最小值间对应增益变化为其对像增强器动态范围的有效作用区域。一般高性能像管 MCP 电压调控范围最高可按 3 个数量级考虑。

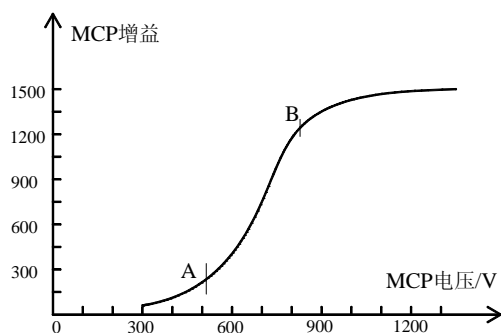


图2 MCP 增益与电压关系

Fig.2 Relationship between MCP Gain and MCP voltage

1.2 阴极开启脉冲宽度和脉冲频率对像增强器动态范围的影响

阴极开启脉冲宽度与其电子发射：在阴极开启电压和脉冲频率一定的情况下，控制阴极开启脉冲宽度相当于控制像管光阴极单位时间内的电子发射量，即阴极开启脉冲宽度与阴极电子发射量成线性对应关系。

阴极脉冲频率、最小开启脉冲宽度与像增强器动态范围的关系分析：阴极脉冲频率与最小开启脉冲宽度两者共同确定了阴极脉冲占空比的调节范围，而占空比调节范围越大，单位时间电子发射数量的控制范围越大，使像增强器的动态范围越宽。

假设自动门控电源阴极脉冲频率 (f)，阴极最小开启脉冲宽度 (TW_{min})，则阴极脉冲占空比精度为 fTW_{min} ，由 fTW_{min} 式可知，在阴极最小开启脉冲宽度 (TW_{min}) 一定时，阴极脉冲频率 (f) 越小，则阴极脉冲宽度的占空比调节范围越大。

根据上述推理，在不考虑其它因素 (MCP 电压、阴极电压等) 对像增强器动态范围影响的前提下，阴极脉冲频率、最小开启脉冲宽度与其有图 3 所示关系。

图 3 中 A 点对应虚线将像增强器动态范围分为 2 部分，上半部分通过电源阴极脉冲宽度调整；下半部分通过其它方式调整。图 3 上半部分曲线可知，①自动门控电源阴极最小开启脉冲宽度越小，则像增强器的动态范围越宽；②在阴极最小开启脉冲宽度固定时，阴极输出脉冲频率越低，则像增强器的动态范围越宽。

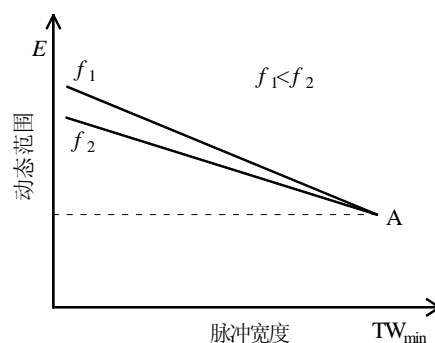


图3 阴极脉冲频率、最小开启脉冲宽度与像增强器动态范围的关系

Fig.3 Relationship of image intensifier dynamic range with cathode pulse frequency ,cathode pulse width

阴极脉冲频率与最小开启脉冲宽度共同确定了阴极脉冲宽度调节对像增强器动态范围的影响程度，两者同时变小可以大幅度提高像管的动态范围，然而在实际应用中频率变小，对应周期变长，尤其是开启脉冲宽度比较小时，阴极电子发射不连续，造成电子发射间隔时间过长，大于荧光屏余辉时间，使荧光屏

亮度无法保持恒定,出现间隙式闪烁现象;对于人眼观察来说也要求阴极频率不能低于 200 Hz^[5]。

自动门控电源内部通常采用荧光屏微电流作为反馈信号,将其放大为电压信号后再进行 A/D 转换,并将 A/D 转换数据送往 PWM 脉冲调制电路处理后驱动高压电子快门,作为阴极可控高压输出脉冲^[6]。上述电路中,动态微电流放大,并转换为低纹波直流电压难度较大,转换后的直流电压直接影响 A/D 转换后数据的稳定性,进一步影响阴极脉冲的边沿抖动。

目前市场中 A/D 转换器有 8 位、10 位、12 位、16 位以及 24 位等多种规格,24 位 A/D 转换器对输入模拟电压要求非常高,微电流动态放大后的直流电压很难满足其纹波电压要求,因此一般最高选取 16 位 A/D 转换器,对 16 位 A/D 转换器可产生的数据最大为 $2^{16}=65536$,对脉冲的控制精度最高可达 $1/65536$;将 A/D 转换数据转换为占空比可调脉冲相对容易,但要求自动门控电源阴极高压电子快门的脉冲宽度与其匹配才能真正实现脉冲调节范围的最大化(假设电源阴极高压电子快门的频率为 1 kHz,能够实现的最小脉冲宽度为 50 ns;对于 16 位的 A/D 转换器,将数据转换为占空比可调脉冲时,脉冲的最小宽度为 15.3 ns,则两者最小脉冲宽度不匹配,不能真正实现 16 位的可调脉冲宽度,只有两者匹配时,或前者小于后者时才能真正实现自动门控电源脉冲宽度调节范围的最大化)。

对于 16 位 A/D 转换器而言,系统要求频率为 200 Hz 时,阴极最小开启脉冲宽度为 76 ns;系统要求频率为 1 kHz 时,阴极最小开启脉冲宽度为 15 ns;系统要求频率为 10 kHz 时,阴极最小开启脉冲宽度为 1.5 ns;对于低压占空比可调脉冲可通过 FPGA 芯片实现 1.5 ns 的脉冲宽度,但对于 1.5 ns 宽度的高压脉冲来说实现相当困难。因此要使阴极脉冲对像增强器动态范围的作用范围最大化,又不影响其性能,自动门控电源阴极脉冲频率应介于 200 Hz~10 kHz 之间;就目前技术状态,阴极脉冲宽度对像增强器动态范围量级的影响一般小于 $\lg(65536)\approx 4.82$ 。

1.3 阴极电压对像增强器动态范围的影响

阴极电压(阴极与 MCP 输入之间的电压)与阴极灵敏度:阴极电流与阴极灵敏度有直接关系,在阴极电压一定值时,阴极电流可通过以下方法计算得到:

$$i_{ca} = S \cdot E \cdot \pi \left(\frac{d}{2} \right)^2 \quad (2)$$

式中: i_{ca} 为阴极电流; S 为阴极灵敏度; E 为阴极面输入照度; d 为阴极面有效直径。从(2)式可以看出,在阴极电压一定的前提下,阴极电流与阴极面照度成

线性关系。通过实际测试得到 1 组典型的阴极电压与阴极灵敏度的关系曲线,如图 4 所示。

从而可以得出以下结论:在阴极面光照强度增加时,为了保持阴极平均电流不变(即阴极到 MCP 输入电子发射量的不变),可通过降低阴极灵敏度,即降低阴极电压来实现。从图 4 曲线可知通过降低阴极电压基本可以将像管灵敏度下降 1~2 个数量级(如图 4 中 A 与 B 点,或 A 点与 C 点间选取合适的范围),并能维持像管的正常工作。就目前技术状态,阴极电压对像增强器动态范围的作用量级不会大于 2 个。

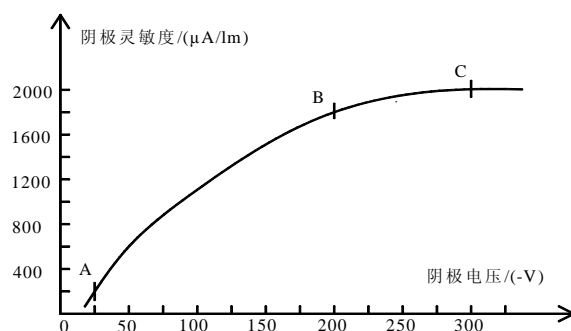


图 4 阴极灵敏度与电压关系

Fig.4 Relationship between cathode sensitivity and cathode voltage

从上述像增强器动态范围影响因素分析可知,在发射电子被阳极全部收集的情况下,阴极电流与照度有关;在照度恒定时,阴极电流与电压有关,且阴极平均电流与阴极脉冲宽度有关;MCP 电子倍增能力与 MCP 电压有关;而自动门控电源就是通过调节 MCP 电压控制 MCP 电子倍增能力、调节阴极脉冲宽度与阴极电压来控制阴极发射电子能力来实现微光像增强器在宽照度环境中的使用,自动门控电源性能的提

2 建模及计算

通过上述 MCP 电压、阴极开启脉冲宽度、阴极脉冲频率及阴极开启电压等对像增强器动态范围的影响分析,可分别确定其对像增强器动态范围作用量级的估算方法,具体方法如下:

根据像管成像时增益最小值 ($G_{MCP-min}$) 与最大值 ($G_{MCP-max}$) 可计算 MCP 电压对像增强器动态范围的作用量级,即为 $\lg(G_{MCP-min}/G_{MCP-max})$,其对应 MCP 电压范围 ($V_{MCP-min} \sim V_{MCP-max}$) 即为自动门控电源提供给像管 MCP 工作所需电压范围。

根据自动门控电源阴极脉冲频率 (f) 与阴极最小开启脉冲宽度 (TW_{min}) 可计算阴极脉冲占空比对像增强器动态范围的作用量级,即为 $\lg[1/(f \cdot TW_{min})]$ 。

在保持像管阴极平均电流不变，且可成像的前提下，测量阴极开启电压从设定值（ V_{ca-typ} ）下降到最小值（ V_{ca-min} ）时，对应阴极面照度的变化范围（ $E_{ca-min} \sim E_{ca-max}$ ）， $\lg(E_{ca-max}/E_{ca-min})$ 即为阴极电压对像增强器动态范围的作用量级，阴极开启电压（ $V_{ca-min} \sim V_{ca-typ}$ ）即为自动门控电源提供给像管工作所需的电压范围。

整合上述方法得到自动门控电源对像增强器动态范围作用量级的估算公式如下：

$$\lg\left(\frac{G_{MCP-max}}{G_{MCP-min}}\right) + \lg\left(\frac{1}{f \cdot TW_{min}}\right) + \lg\left(\frac{E_{ca-max}}{E_{ca-min}}\right) \quad (3)$$

将表 2 中数据代入公式(3)得到其对像增强器动态范围的作用量级为 $\lg(4) + \lg(10) + \lg(1000) \approx 4.6 < 5$ ，故实现表 2 数据所示功能的自动门控电源对像增强器动态范围的作用量级接近 5 个数量级。

3 讨论及结论

对于亮度增益为 10000 cd/m^2 的像管，在理想情况下，自动门控电源可使像增强器荧光屏亮度与阴极面照度有如图 5 所示关系曲线，而实际在阴极面光照发生变化时，自动门控电源很难使荧光屏亮度保持稳定，但其可将荧光屏亮度控制在人眼或夜视设备可接

受的范围内，故该曲线可作为像增强器动态范围扩展研究的参考曲线。

从图 5 荧光屏亮度曲线上看，表 1 数据实现的自动门控电源使像增强器阴极面最高照度扩展到 B 点所对应照度（ 10^2 lx ），其中 MCP 电压调控、阴极电压调节、阴极占空比调节对其动态范围的作用分别为 0.6、1、3 个数量级。

假设通过技术研究使自动门控电源的 MCP 电压调控、阴极电压调节、阴极脉冲占空比调节对像增强器动态范围的作用分别能达到 2、2、4 个数量级，则其对像增强器动态范围的作用可达到 8 个数量级，从图 5 曲线上看，像增强器阴极面最高照度可扩展到 C 点对应照度（ 10^5 lx 左右）。

故对于提升基于自动门控电源的像增强器动态范围可从以下方面进行：①提高 MCP 清刷后的电子增益；②提高阴极脉冲占空比调节范围；

文中通过分析 MCP 电压、阴极电压、脉冲宽度、脉冲频率与像管亮度增益的关系，阐述了其对像增强器动态范围的影响，建立了基于自动门控电源的像增强器动态范围估算模型，对于自动门控电源技术与像增强器动态范围扩展研究具有指导意义。

表 1 采用上述方法测得的一组实验数据

Table 1 A group of experimental data in our lab

MCP 增益与电压对应关系		阴极面照度与电压对应关系		频率、脉宽与占空比对应关系	
$G_{MCP-min} \sim G_{MCP-max}$	50~200	$E_{ca-min} \sim E_{ca-max}$	1~10 lx	$f, TW_{min} \sim TW_{max}$	1 kHz, 1 μs~1000 μs
$V_{MCP-min} \sim V_{MCP-max}$	400~800 V	$V_{ca-typ} \sim V_{ca-min}$	300~100 V	$1/(f \cdot TW_{min}) \sim 1/(f \cdot TW_{max})$	0.1%~100%

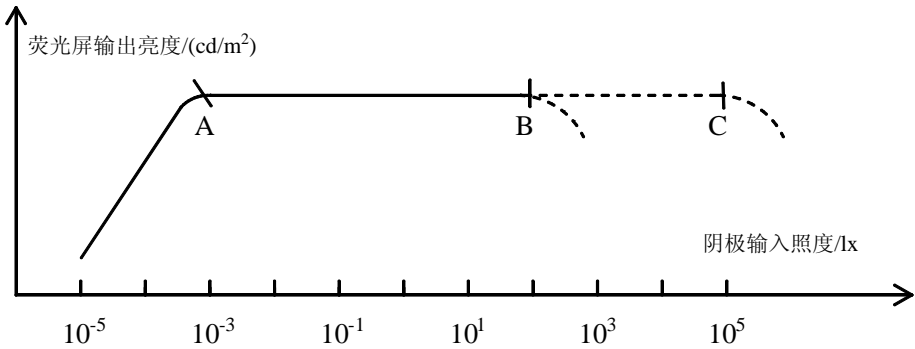


图 5 荧光屏输出亮度与阴极输入照度关系

Fig.5 Relationship between Phosphor Screen output brightness and cathode input illuminance

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: 77-95.

[2] 黄林涛, 赵宝升, 张小秋. 一种带新型自动门控电源的像增强器[J]. 激光与光电子学进展, 2005, 42(4): 29-32.

[3] Estrera J P, Saldana M R. Gated power supply technologies for advanced image intensifiers[J]. SPIE, 2003, 4796: 60-70.

[4] 郑传文. 微光像增强器使用可靠性分析[J]. 云光技术, 2003, 35(1): 13-16.

[5] 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.

[6] 阳范清, 曹剑中, 刘波, 等. 基于 CPLD 的自动门控电源的电路设计[J]. 微计算机信息, 2005, 21(9-2): 142-14.