

## 微光像增强器夜视兼容特性分析

拜晓锋<sup>1,2</sup>, 杨书宁<sup>2</sup>, 侯志鹏<sup>1,2</sup>, 贺英萍<sup>2</sup>

(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:** 微光夜视镜的使用, 给飞行员驾驶飞机执行夜间地形侦查、编航飞行、对地突袭等作战任务提供了有效的手段。微光像增强器将夜间或低照度环境下的目标景物经光谱转换和亮度增强后输出, 可供人眼正常观察。文中结合超二代微光像增强器和三代微光像增强器的光谱响应特性, 分析了上述两种器件的机舱照明夜视兼容特性, 重点研究了其与机舱照明的光谱匹配性能, 并运用微光夜视系统视距计算公式对其使用性能进行了模拟计算。结果表明: 三代微光像增强器的光谱匹配性好、量子效率高, 具有良好的机舱照明兼容特性, 更有利于机舱照明夜视兼容性改造的实施, 同时高信噪比的技术特点, 使其具有更远距离成像观察的使用优势。

**关键词:** 夜视兼容; 微光像增强器; 量子效率; 光谱响应

**中图分类号:** O493      **文献标志码:** A      **DOI:** 10.3788/IRLA201645.S220001

## NVIS compatible characteristic of low light level image intensifier assembly

Bai Xiaofeng<sup>1,2</sup>, Yang Shuning<sup>2</sup>, Hou Zhipeng<sup>1,2</sup>, He Yingping<sup>2</sup>

(1. Science and Technology on Low-Light-Level Night Vision Laboratory, Xi'an 710065, China;  
2. North Night-Vision Science & Technology Group Crop., Ltd, Kunming 650223, China)

**Abstract:** Low light level night vision goggle has been benefit to pilot for carrying out terrain reconnaissance, making up air flight, and air-to-ground attacking at night. Image intensifier assembly can intensify the low light image projected by object at night to bright one fitted to be observed by human. According to the spectral response of image intensifier, NVIS compatible characteristic and spectrum matching performance of super-second and the third generation low light level image intensifier assembly was analyzed. Operational performance of different night vision goggles was derived by calculating formula. It is shown that the third generation low light level image intensifier assembly has better NVIS compatible characteristic than super-second generation by means of good spectrum matching performance and high quantum efficiency, which is benefit to reconstruct the NVIS compatible cockpit lighting. Meanwhile, because of higher signal to noise ratio, night vision system equipped the third generation low light level image intensifier assembly can discover farther object than the second generation.

**Key words:** NVIS compatibility; low light level image intensifier assembly; quantum efficiency; spectral response

收稿日期: 2016-08-07; 修订日期: 2016-09-08

基金项目: 微光夜视技术重点实验室基金(J20141702)

作者简介: 拜晓锋(1982-), 男, 高级工程师, 主要从事微光像增强器测试及应用技术方面的研究。Email: baixiafoeng2001@163.com

## 0 引言

微光夜视镜是微光夜视技术发展的重要产物,其在飞机驾驶领域的运用,给飞行员夜间执行训练、对地侦察、运输以及空袭带来了极大的便利,拥有微光夜视镜的一方将占据夜间独有优势,掌握着战斗的主动权<sup>[1]</sup>;同时,其应用也给飞机座舱照明带来了新的研究课题<sup>[2]</sup>。为了确保微光夜视镜在机舱内能正常使用,技术人员对飞机座舱照明进行了不懈的改造,先后经历了红光照明、兰白光照明以及白光照明体系,但这些照明体系均采用白炽灯作为光源<sup>[2]</sup>,未能完全隔离光源中存在的对微光夜视镜敏感的光谱波段,致使微光夜视镜的使用效果受到了一定的限制。

从广义上讲,夜视兼容技术是机舱照明兼容和夜视镜透过光谱兼容两者的有机结合,离开任何一方,另一方的存在都毫无意义。因此,为了更好地发挥微光夜视镜的夜间使用优势,须对机舱照明进行兼容性改造,同时在解决夜视镜透过光谱兼容的同时,研究其核心部件——微光像增强器的光谱匹配性。基于此,文中将详细介绍当前主流超二代微光像增强器和三代微光像增强器的光谱响应特性,重点分析其与机舱照明的光谱匹配特性,用于指导微光像增强器的选择,以便更好地适应未来机舱照明夜视兼容技术的发展。

## 1 机舱夜视兼容性要求

美国是全球范围内最早使用微光夜视镜的国家。但在早期阶段,飞行员因使用微光夜视镜而出现的飞行事故频繁出现<sup>[3]</sup>,究其原因是机舱照明对微光夜视镜的使用造成了严重的干扰,即机舱照明与夜视镜不兼容。

机舱照明夜视兼容的根本是保证机舱内照明光源的辐射光谱与微光夜视镜的敏感光谱很少重叠甚至是不重叠,同时机舱照明光源的辐射光谱能够较好地与人眼亮视觉函数相匹配,如图 1 所示。

针对飞行员夜间使用直视型微光夜视镜所面临的机舱照明干扰问题,为了更好地发挥飞行员夜间驾驶飞机进行地形观察、周围态势侦察的作战优势,美国制定了普适的军用标准 MIL-STD-3009,通过

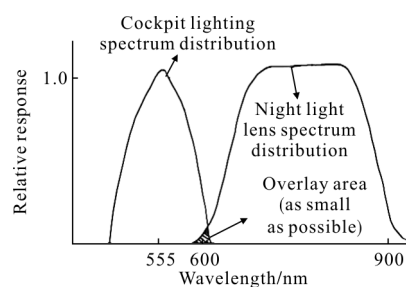


图 1 机舱照明夜视兼容光谱要求

Fig.1 Requirement of NVIS compatible cockpit lighting

标准化手段规定了微光夜视镜的透过光谱。美军标 MIL-STD-3009 将夜视镜的透过光谱共分为了 A 类夜视兼容光谱、B 类夜视兼容光谱和 C 类夜视兼容光谱三种<sup>[3]</sup>,其透过率曲线如图 2 所示。

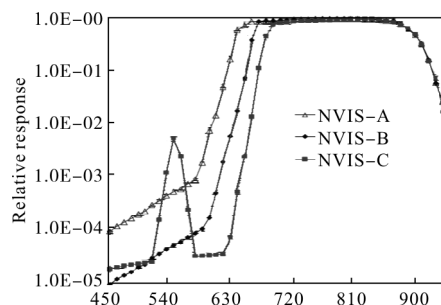


图 2 MIL-STD-3009 规定的夜视镜光谱曲线

Fig.2 NVIS compatible spectrum identified in MIL-STD-3009

在图 2 中,A 类夜视兼容光谱要求抑制 625 nm 以下的光谱,使得微光夜视镜的透过光谱与机舱照明光谱的重叠较少,可达到“减蓝”效果;B 类夜视兼容光谱要求抑制 665 nm 以下的光谱,使得微光夜视镜几乎与机舱照明光谱不重叠,具有更好的“减蓝”效果;C 类夜视兼容光谱在 B 类夜视兼容光谱的基础上,考虑了现代化平视显示器的发展需要,增加了“漏绿”光谱,使其应用更加全面。

对于微光夜视镜而言,机舱夜视兼容光谱设计除直接与物镜镀膜(或滤光片)有关外,为了能够真正发挥微光夜视镜低照度成像观察的技术优势,还必须认真考虑物镜透过光谱与微光像增强器光谱响应的匹配度问题。

## 2 微光像增强器的光谱特性

微光像增强器是微光夜视镜的核心部件<sup>[4-6]</sup>。自 20 世纪 60 年代起,微光像增强器先后形成了一代微

光像增强器、二代微光像增强器、超二代微光像增强器以及三代微光像增强器等阶段产品<sup>[7-9]</sup>。目前,国际上主流的微光像增强器有以美国 ITT Exelis 公司的 F9800、F9810、F9815 系列为代表三代微光像增强器和以法国 Photonis-DEP 公司生产的 SHD-3<sup>TM</sup>、XD-4<sup>TM</sup> XR5<sup>TM</sup> 为代表的超二代微光像增强器两种<sup>[10]</sup>。

1965 年美国 J.J.Schee 和 Van Laar 发现一种新型的高效率的砷化镓 (GaAs) 光电阴极,它采用 III-V 族化合物(即元素周期表中 III 族元素与 V 族元素化合而成的半导体化合物)。GaAs 光电阴极属于负电子亲和势类光电阴极,具有量子效率高、暗发射小、电子能量分布集中等优点<sup>[4,7]</sup>。

20 世纪 70 年代末至 80 年代初,美国人将透射式 GaAs 光阴极和带 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 离子壁垒膜的 MCP 引入近贴微光像增强器中,研制成功三代微光像增强器。20 世纪 90 年代初,美国形成了标准三代微光产业。在海湾战争军事需求及突出效果的推动下,美军通过推行 Omnibus 发展计划使得三代微光技术在短短的 10 年内,迅速由标准三代更新换代为高性能三代,灵敏度为 1 550~2 200 μA/lm,其典型光谱响应曲线如图 3 点线所示。

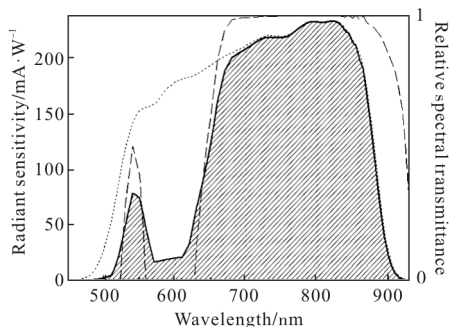


图 3 三代微光像增强器光谱响应曲线

Fig.3 Spectral response of the 3rd generation low light level image intensifier assembly

20 世纪 80 年代,荷兰 DEP 公司与法国 Photonics 公司通过改进,在二代近贴微光像增强器中引入高灵敏度的多碱光电阴极(Na<sub>2</sub>K<sub>2</sub>Sb(Cs)),并借用三代微光像增强器的微通道板、管结构、集成电源以及结晶学机理和工艺研究成果,扩展了光谱响应范围,提高了量子效率,研制出超二代微光像增强器。

超二代微光像增强器的光阴极灵敏度为 600~800 μA/lm,其典型光谱响应曲线如图 4 实线所示。

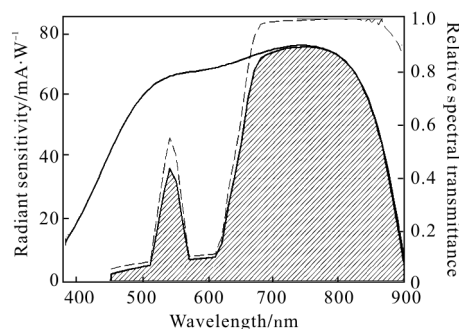


图 4 超二代微光像增强器光谱响应曲线

Fig.4 Spectral response of super 2nd generation low light level image intensifier assembly

### 3 光谱兼容性比较

目前,为了适应未来作战飞机机舱照明的使用需求,越来越多的飞机在进行夜视兼容技术改造时要求使用 C 类夜视兼容光谱,将其分别与超二代微光像增强器、三代微光像增强器的光谱响应曲线进行匹配,可以得到表 1 所列的光谱匹配结果。

表 1 像增强器与 C 类夜视兼容光谱的匹配度

Tab.1 Spectral matching degree of image intensifier and class C NVIS

Type	Super-second generation	The third generation
Spectral range/nm	400-900	450-900
800 nm radiant sensitivity/mA·W <sup>-1</sup>	50	-
800 nm radiant sensitivity/mA·W <sup>-1</sup>	40	120
800 nm radiant sensitivity/mA·W <sup>-1</sup>	-	80
Matching degree	0.60	0.83

表 1 中的光谱匹配度可按照公式(1)进行计算:

$$\alpha = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_{\lambda} G_{\lambda} d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_{\lambda} d\lambda} \quad (1)$$

式中:  $S_{\lambda}$  为微光像增强器的光谱响应;  $G_{\lambda}$  为 B 类兼容性光谱;  $\alpha$  为光谱匹配度。

微光夜视系统视距计算公式如下<sup>[11]</sup>:

$$R_L = \frac{f_o' A_k H_t}{N_e} \quad (2)$$

$$A_k = 0.716 \times 10^3 \frac{C_0 C_d M(A_k) D}{\Phi_{\min} f_o'} \sqrt{\frac{S_A \alpha_\lambda t \varepsilon \rho E_0 \tau_0 \tau_l \tau_d}{F_\phi}} \quad (3)$$

式中： $R$  为微光夜视系统的视距 (m)； $f_o'$  为系统的物镜焦距(mm)； $A_k$  为系统分辨力(lp/mm)； $H_t$  为目标尺寸(m)； $N_e$  为识别目标时对应的系统空间频率(lp/mm)； $C_0$  为景物的初始对比度； $C_d$  为对比度大气衰减系数； $M(A_k)$  为系统在空间频率  $A_k$  下的传递函数； $D$  为系统物镜的通光口径(mm)； $\Phi_{\min}$  为人眼的阈值信噪比； $S_A$  为微光像增强器光阴极灵敏度( $\mu A/lm$ )； $\alpha_\lambda$  为光谱转换系数； $t$  为人眼积分时间 (s)； $\varepsilon$  为目标长宽比； $\rho$  为景物的平均反射率； $E_0$  为夜间环境照度 (lx)； $\tau_0$  为物镜透过率； $\tau_l$  为光谱匹配度； $\tau_d$  为大气透过率； $F_\phi$  为微光像增强器的噪声因子。

分别将超二代微光像增强器、三代微光像增强器的匹配性光谱数据代入公式，可以得到表 2 所列的视距对比数据。

表 2 不同夜视系统的视距对比

Tab.2 Vision range of different night vision goggle equipped

Type	Super-second generations	The third generation
Sensitivity typical value/ $\mu A \cdot lm^{-1}$	600	1800
Sensitivity matching degree/ $\mu A \cdot lm^{-1}$	360	1495
Resolution/lp $\cdot mm^{-1}$	60	60
SNR	20	25
$10^{-3}$ lx vision range	1	1.45
$10^{-4}$ lx vision range	1	1.86

表 1 和表 2 的计算结果表明：三代微光像增强器与飞机夜视兼容光谱的匹配度高出超二代微光像增强器 38% 以上。超二代微光像增强器经夜视兼容光谱滤光后，其最大光谱利用率只剩下 60%，如图 4 阴影部分所示；而三代微光像增强器经夜视兼容光谱滤光后，其光谱利用率还有 83%，如图 3 阴影部分所示。除此之外，由于三代微光像增强器拥有较高的量子效率(灵敏度)和信噪比，使其装配微光夜视镜后在  $1 \times 10^{-3}$  lx 环境下的作用距离较超二代延伸 45%、在  $1 \times 10^{-4}$  lx 环境下的作用距离较超二代延伸 86%。

## 4 结论

微光夜视镜的使用为飞行员夜间驾驶飞机提供了极大的方便，但是机舱照明兼容性对微光夜视镜的核心部件——微光像增强器的选用提出了严格的要求。和超二代微光像增强器相比，三代微光像增强器借助于其光谱匹配性好、量子效率高的技术优势，拥有良好的机舱照明兼容特性，加之高信噪比的特点，使其具有更远距离成像观察的使用优势。

## 参考文献:

- [1] Yuan Weihong. Compatible design with some type helicopter lighting system for the goggles [J]. *Helicopter Technique*, 2008(4): 42-47. (in Chinese)  
袁卫红. 某型直升机照明系统与夜视镜兼容设计[J]. 直升机技术, 2008(4): 42-47.
- [2] Zhong Jun, Bian Jiqing. NVIS compatible lighting improvement of helicopter on duty[C]. Tianjin: The Twenty-First Helicopter Annual Meeting, 2005. (in Chinese)  
钟军, 卞纪庆. 现役直九直升机照明系统夜视兼容改进研究[C]. 天津:第二十一届全国直升机年会, 2005.
- [3] Department of Defense. MIL-STD-3009. Lighting, aircraft, night vision imaging system (NVIS) compatible [S]. US: Department of Defense, 2001.
- [4] Xiang Shiming, Ni Guoqiang. The Principle of Photoelectronic Imaging Devices [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006. (in Chinese)  
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, 2006.
- [5] Bai Xiaofeng, Yin Lei, Hu Wen, et al. Repetitive characteristic of image intensifier's luminance gain [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(2): 495-498. (in Chinese)  
拜晓锋, 尹雷, 胡文, 等. 像增强器亮度增益测试的重复性研究[J]. 红外与激光工程. 2013, 42(2): 495-498.
- [6] Bai Lianfa, Zhang Yi, Gu Guohua, et al. Analysis and fusion methods on low light level image and ultra-violet image [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(1): 113-117. (in Chinese)  
柏连发, 张毅, 顾国华, 等. 微光图像和紫外图像分析与融合方法研究[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(1): 113-117.
- [7] Zhou Liwei. On figure of merit of low light level image

- intensifiers [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2004, 33(4): 331-337. (in Chinese)
- 周立伟. 关于微光像增强器的品质因数[J]. 红外与激光工程, 2004, 33(4): 331-337.
- [8] Jin Weiqi, Liu Guangrong, Wang Xia, et al. Image Intensifier's progress and division of generation [J]. *Optical Technique*. 2004, 30(4): 460-466. (in Chinese)
- 金伟其, 刘广荣, 王霞, 等. 微光像增强器的进展及分代方法 [J]. 光学技术, 2004, 30(4): 460-466.
- [9] Ai Kecong. Development and prospect of low-light-level (LLL) night vision technology [J]. *Journal of Applied Optics*, 2006, 27(4): 303-307. (in Chinese)
- 艾克聪. 微光夜视技术的进展及展望[J]. 应用光学, 2006, 27(4): 303-307.
- [10] Men Jinfeng, Cheng Haifeng, Chen Zhaohui, et al. Development of ANVIS compatible lighting technology [J]. *Journal of Applied Optics*, 2008, 29(3): 354-359. (in Chinese)
- 门金凤, 程海峰, 陈朝辉, 等. 飞机夜视兼容照明技术[J]. 应用光学, 2008, 29(3): 354-359.
- [11] Liu Lei, Chang Benkang. The Revised Formula for Visual Range of Low Light Level Imaging System [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, 23(6): 761-765. (in Chinese)
- 刘磊, 常本康. 微光成像系统视距理论公式的修正 [J]. 光学学报, 2003, 23(6): 761-765.