

飞行员夜视镜的人机工效分析及效能提升方法

袁有志¹, 宋建华², 董保根¹, 侯志刚¹, 王诗薇², 杨默远², 张 丹²

(1. 北京航空工程技术研究中心, 北京 100076; 2. 云南北方光电仪器有限公司, 云南 昆明 650114)

摘要: 飞行员夜视镜在未来夜间空战中将会发挥越来越重要的作用, 但是佩戴夜视镜飞行也带来诸多安全问题和人机工效问题。为保证飞行员佩戴夜视镜的飞行安全, 同时提高夜视作战效能, 改善和提升飞行员夜视镜的人机工效是重要途径之一。本文分析了飞行员使用夜视镜时存在的典型人机工效问题, 从夜视镜设备性能改进、人员训练以及使用环境与时机3个方面给出了效能提升建议, 为提高飞行员佩戴夜视镜飞行安全性、高效性和舒适性提供适用性的解决方案。

关键词: 飞行员夜视镜; 夜视兼容; 人机工效

中图分类号: R857.13

文献标识码: A

文章编号: 1001-8891(2022)12-1287-06

Ergonomic Analysis of Pilot's Night Vision Goggles in Operational Use and Performance Improvement

YUAN Youzhi¹, SONG Jianhua², DONG Baogen¹, HOU Zhigang¹, WANG Shiwei², YANG Moyuan², ZHANG Dan²

(1. Beijing Aviation Engineering Technology Research Centre, Beijing 100076, China;

2. Yunnan North Optoelectronic Instrument Co. LTD., Kunming 650114, China)

Abstract: Pilots' night vision goggles will play an increasingly important role in future night air combats. However, wearing night vision goggles will also lead to many safety and ergonomic problems. To ensure the flight safety of pilots wearing night vision goggles and to improve night vision combat effectiveness, it is important to enhance the ergonomics of pilots' night vision goggles. This study analyzes the typical ergonomic problems of pilots when they use night vision goggles and provides suggestions for efficiency improvement from three viewpoints: performance enhancement of night vision goggles, personnel training, and use of environment and opportunity. We provide a feasible solution to improve the safety, efficiency, and comfort of pilots wearing night vision goggles.

Key words: pilot's night vision goggles, night vision compatibility, ergonomics

0 引言

近几十年来, 历次局部战争表明, 战争往往都是从夜间空中作战开始, 并且夜战贯穿战争全过程, 所占比重已超过昼间。空中行动不间断进行, 频繁地运用夜间作战, 实现对敌方的持续压制与突击, 已成为现代空军作战的一个基本特征。美国国防预算报告(2008FY, Aviation Life Support Procurement Program Section, 航空生命支持采办程序部分)可知, 美国空、海军 70% 以上的空中行动都在夜间进行。可以说, 夜战能力已成为对现代空军的基本要求, 一旦失去夜战能力, 就基本丧失了制空权。在缺乏夜视能力时, 空中作战任务将会有极大的制约,

例如: 无法观察地形地貌和高大建筑等障碍, 不具备低空/超低空飞行能力; 多机之间只能通过错高度层、增大距离等方式确保安全; 占用大量精力关注飞行安全参数, 影响任务执行; 允许机动过载比白天大幅降低, 空中作战行动的任务规模、灵活性、突防能力、生存力都将显著下降。

随着夜视技术的飞速发展, 飞行员夜视镜成为夜间飞行及作战任务的必备工具之一^[1-2], 通过夜视镜可以获取周围地形与障碍、关键目标场景特征、空中他机位置/航迹及识别点等信息, 能提高空军夜间作战能力, 但受到各种因素的限制, 夜视镜存在显示画面视场小、图像质量不佳等问题^[3], 导致了飞行员获取外围信息能力降低、情景意识下

收稿日期: 2021-03-30; 修订日期: 2021-10-26.

作者简介: 袁有志(1982-), 男, 工程师, 主要研究方向为航空人机工效。E-mail: yuanyouzhi@163.com。

通信作者: 王诗薇(1991-), 女, 博士, 主要研究方向为人工智能及夜视成像技术。E-mail: wangshiwei_124@163.com。

降、容易出现视觉疲劳等,妨碍了飞行员安全执行任务^[4-6],如1987-1993年,美国海军和海军陆战队共发生13起与佩戴夜视镜相关的飞行事故^[7],1980-2000年的美国军事直升机事故调查显示在3179起飞行事故中与佩戴夜视镜有关的事故有382起,占有飞行事故的12%^[8]。

为了减少佩戴夜视镜对夜间飞行带来的影响,提高飞行员夜间飞行及执行任务的安全性,可以通过开展飞行员夜视训练,有效提高飞行员对夜航环境危险的辨识能力和夜间空中作战能力。国外已经有针对性地建立了夜视训练体系,例如北约组织于2007年已建立起夜视训练体系和相关评判标准,并且通过实践应用已获得显著成效^[9-10];美国空军研究实验室的作战人员训练研究部开发了夜视训练系统(night vision training system, NVTs),该系统提供高保真的夜视镜图像、夜视镜模拟器训练和训练结果评估^[11];美国马萨诸塞大学搭建了增加雨、云、雪、灰尘、烟雾等天气模拟技术的夜视镜模拟器训练系统^[12],用于开展飞行员夜视辅助训练。

国内从1984年开始为飞行员开展了包含地面错觉模拟训练在内的航空生理训练^[13],研究飞行错觉模拟训练系统^[14],但一直缺乏基于夜间飞行的夜视训练系统。本文根据夜视镜工效学相关资料以及飞行员佩戴夜视镜试飞后的反馈情况等,整理佩戴夜视镜在夜间飞行过程中存在的人机工效问题,进一步从设备性能提升、夜间飞行训练、夜视镜使用环境和时机3个方面提出夜视镜效能提升的方法。

1 夜视镜在飞行中的人机工效分析

飞行员在飞行任务中使用夜视镜时,由于自身生理心理因素、夜视镜的技术条件,以及作战环境的影响,会产生一系列的人机工效问题^[15]。

1) 驾驶舱照明与夜视镜的夜视兼容性

由于黑底绿字的辨识度低,可降低飞行员的视觉搜索时间,因此驾驶舱显示屏大都是黑底绿字,如图1^[16]所示。在飞机上使用夜视镜时,由于座舱外的夜空微弱照明与座舱内的灯光照明会同时进入夜视镜参与成像,因此必须考虑裸眼从夜视镜和座舱照明接收到的能量平衡和兼容,也就是要做到夜视兼容,否则会严重影响夜视镜观察效果^[17]。

夜视兼容的目的是使裸眼能够正常观察舱内仪表信息,且座舱照明不干扰使用夜视镜对外观察。夜视兼容在技术上可以通过波段分离法实现。其中,座舱照明系统仅使用665 nm波长以下的对于人眼敏感的可见光,不使用对于夜视镜敏感的665 nm波

长以上的红光、近红外辐射;而夜视镜本身增加反蓝滤光膜,阻止665 nm波长以下可见光入射参与成像^[9,18-19]。



图1 夜视兼容的座舱照明^[16]

Fig.1 Night vision compatible cockpit lighting^[16]

2) 视野狭窄

标准型夜视镜视场为圆形的40°,视野受限,距离及深度感降低。周边视野的丧失,妨碍飞行员观察仪表、估计飞机速度、高度以及判断障碍物等,如图2所示的典型场景的夜视镜观察图像。



图2 典型场景的夜视镜观察图像

Fig.2 Night vision goggles observation image of typical scenes

3) 视力下降

夜视镜的光学分辨率较低,视场内亮度较高,会引起人眼不适或视觉功能下降,佩戴夜视镜后视力仅达0.6~1.0,观察效果不如昼视。

4) 视性疲劳

夜视镜增加了飞行员头部的重量,易引起颈部肌肉的疲劳^[20-21]。此外,因视野受限,飞行员还需要频繁转动头部,容易产生视性疲劳。

5) 操作不当造成飞行员受伤

夜视镜的佩戴需要紧贴于飞行员面部,在事故中容易造成面部损伤^[1]。此外,在飞机遭遇紧急状况,飞行员需要弹射跳伞,此时如果手动摘除夜视镜时机把握不当,弹射时容易造成头部、颈部受伤。

6) 焦距转换带来的不便

飞行员佩戴夜视镜执行夜航任务时,其关注点将会在舱外景物和舱内仪表之间来回切换^[21-24],在看舱外景物需要通过夜视镜观察,在看舱内仪表时

则需要用裸眼观察,这样会造成睫状肌调节过频,产生头晕、目涩和眼花等视觉症状,人眼屈光状态转换的时间在佩戴夜视镜后明显变长。

7) 虚假天地线错觉

夜间飞行时,由于光线昏暗,造成目视观察天地线变得困难,自然天地线变得模糊不清或者不明显时,飞行员容易将虚假的天地线当成自然的天地线,产生虚假天地线错觉^[25-27]。当飞行员产生这种错觉后按照虚假天地线去定位操纵飞机,就可能使飞机进入危险状态。

8) 深径觉改变

夜视镜的成像原理导致了立体视觉转变为平面视觉,造成空间位置感差异,引起高度和距离判断困难。

9) 佩戴夜视镜导致的空间定向障碍

夜视镜的横向及纵向视野缩小,导致立体视锐度减退,妨碍观察仪表、估计速度、高度及判断障碍物,增加判断误差,造成空间定向障碍^[22,28-29]。

10) 佩戴夜视镜引起的色觉改变

夜视镜显示的是绿色影像,没有受过训练的人可能会认为地面全是植被。此外,不同亮度或不同光谱特性的物体在夜视镜中呈现的视景为不同亮度的绿色,成像缺乏层次感^[30],而且人们白天往往通过色彩、明暗度判断物体距离及高度,佩戴夜视镜后使用相同的习惯会导致高度及距离的判断出现误差。

11) 佩戴夜视镜飞行的光谱敏感差异

夜视镜对红光的敏感性最大,而蓝紫光敏感性差,所以红光在夜视镜下观察时非常明亮,而蓝紫光较暗^[31]。红光成像会更明亮,光晕更大,会误导飞行员认为红色物体或发光物体更大、距离更近,而蓝色物体或发光物更小、距离更远,甚至不能发现蓝紫色物体。

12) 佩戴夜视镜飞行阴影中细节消失

夜视镜在照度越低的条件下图像质量越差,景物的阴影处照度会更低。因此,阴影下的细节部分不易被看清。例如,山谷等较低地形在夜间会有明显阴影,其中如果有高压电线、建筑物或其他较高物体,佩戴夜视镜后不易看清,会影响正常判断地形及目标。

13) 夜视镜光轴偏斜导致目标距离误判

长期使用夜视镜可能会发生光轴偏斜现象,如果两条光轴均向内偏,形成光线会聚,视网膜感受到的影像位置会比实际距离近,造成对目标距离或大小的过低判断^[29]。

2 夜视镜使用效能提升方法

针对上述人机工效问题,可以从设备、训练、使用环境3个维度来考虑使用效能提升方法。

1) 设备性能提升

目前国际上微光夜视镜采用的主流技术是微光像增强器技术。由于飞行员夜视镜在座舱内的特殊使用环境,夜视镜需要采用夜视兼容处理,增加了反蓝滤光膜,665 nm 波长以下的光谱被截止掉了(蓝、绿光波段用于座舱显示和照明,夜视镜对蓝绿光波段不响应)。图3^[32]所示为微光像增强器的光谱响应曲线,在无月光条件下等低照度环境下($10^{-4} \sim 10^{-3} \text{ lx}$)增强器在700~900 nm 探测效率出色,可以发挥地面性能的70%~80%,具有较好的夜视效果。

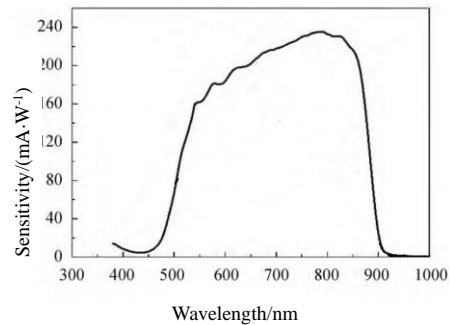


图3 微光像增强器的光谱响应曲线^[32]

Fig.3 Spectral response of low light level image intensifier^[32]

此外,根据美国空军调查,运输机飞行员广泛认为传统微光夜视镜的视场(40°)小于人眼正常观察视场,导致飞行员需频繁旋转头部扫描进行观察,增加了飞行员的疲劳感。针对该需求,美国ITT公司展开了大视场夜视镜的研制工作,将原有双筒结构更改为四筒结构,将视场增加至 $100^\circ \times 40^\circ$ 的环形视场,保证飞行员不需转动头部便可观察较大范围内的景物^[3,9],图4^[33]所示为美国ITT公司研制的大视场夜视镜示意图。



图4 大视场夜视镜^[33]

Fig.4 Panoramic night vision goggles^[33]

2) 人员训练

飞行员夜视镜训练分为地面训练和飞行训练。

飞行员佩戴夜视镜进行飞行前，需要先进行夜视镜地面培训。夜视镜地面培训主要包括夜视理论培训、夜视镜操作培训、沙盘模拟训练、动态场景模拟训练等。

夜视理论培训通过夜视理论及夜视镜知识教学，使飞行员从理论到实践对夜视成像、夜视兼容原理，夜视镜使用、使用安全等有深刻理解。夜视理论培训主要包括：夜视镜的功能和原理、夜视镜及配件安装调试方法、夜视镜地面调校设备使用方法、人体视觉生理、夜视环境中的视觉限制^[28]、夜视镜在应用中的视觉限制、佩戴夜视镜时对错觉/空间定向障碍的感受、飞行中使用夜视镜危险因素对人的影响、夜间视觉保护方法、舱内外视景夜视镜观察方法、夜视镜观察注意力分配、佩戴夜视镜时机组成员工作分配及疲劳管理、佩戴夜视镜时对典型环境/目标识别及认知等。

夜视镜操作培训是训练飞行员的夜视镜实际使用操作、安装解脱、夜视镜调校检测设备使用、体视感等技能，使飞行员熟练掌握夜视镜操作技能和限制条件、综合性能评价、电池电量检测等装备使用、紧急突发事件应急处置技能。

沙盘模拟训练是让飞行员佩戴夜视镜观察不同地貌环境（荒漠、水面、草原、山地、丘陵、峡谷、城市、机场、高压电塔、风力发电机等）在不同光照条件（满月、半月、无月、城市灯光、爆炸物闪光等）、不同角度下的夜视镜成像特点，感受距离变化、速度变化时的夜视效果，使飞行员掌握夜视图像特征、光效影响、夜视环境下危险规避方法，累积夜视感知和危险规避经验。

动态场景模拟训练是让飞行员在相对运动的动态模拟夜视场景感知训练中，体验夜间飞行动态场景的模拟（如超低空飞行、编队飞行、攻击地面目标、起降过程、威胁感知等）^[22]，以及对佩戴夜视镜产生的视野狭窄、视力减低、色觉变化、深度觉变化、运动错觉等人机工效问题进行适应性训练^[34]。

对于飞行训练，北约《STANAG7147 夜视装备训练的航空医学问题》中要求飞行员在接受夜视地面训练后3个月内立刻开展夜视飞行训练。飞行训练先从双座机后舱训练开始，在教官指导下最少飞行2h，熟练之后可以过渡到单座机飞行，而且在飞行训练中要根据飞机和飞行员的实际情况动态调整训练内容^[9]。佩戴夜视镜飞行训练内容包括：飞机调整、盲座舱、离机、基本和高级飞行动作，机组

人员工作管理、夜视镜情况处置以及编队飞行等。因为佩戴夜视镜对判断距离和高度存在较大的偏差，所以在飞行训练中，要求起飞、着陆或空中加油训练时，不能佩戴夜视镜^[9]。

3) 使用环境与时机

在执行夜间飞行任务时，月相以及月亮的相对位置是需要重点考虑的因素。

在夜间有月条件下，月光为最重要的夜天光组成部分。不同的月相对应不同的照度，照度值越高，夜视镜成像细节越清晰、立体感和层次感越好。反之，若照度值较低，夜视镜成像会较模糊，细节信息丢失，只能看清物体的大致轮廓。表1为不同月相的照度对应表。为了保证良好的视觉效果，应尽可能选择在月相比较好的条件下执行飞行任务，以保证佩戴夜视镜后的视觉效果和作战方式与昼间尽量一致。

表1 月相和照度对照

Table 1 Moon phase and illumination comparison table	
Phase of the moon	Illuminance
Full moon	$2 \times 10^{-1} \text{ lx}$
$\frac{3}{4}$ moon	$1 \times 10^{-1} \text{ lx}$
$\frac{1}{2}$ moon	$5 \times 10^{-2} \text{ lx} \sim 1 \times 10^{-1} \text{ lx}$
$\frac{1}{4}$ moon	$1 \times 10^{-2} \text{ lx}$
No moon(starlight)	$1 \times 10^{-3} \text{ lx}$

此外，还应考虑攻击航线与月亮的夹角，尽量使攻击航线顺着月光。例如，当月亮从东方升起时，作战的计划航向应朝向北、南或西方向，应该避开从东北或东南方向发起攻击，因为这样会逆向月光，从而导致夜视镜分辨目标的效果受到影响。

3 结束语

夜视夜战能力是未来战争中大国空军必不可少的基本能力，夜视夜战能力的形成和提升不仅仅依赖于夜视镜本身的性能，也需要从人机结合的角度出发，充分考虑飞行员在使用夜视镜时的人机工效问题，摸清限制条件，扬长避短，在有利的作战环境中充分发挥人和装备的优势，提升综合作战效能。

参考文献：

[1] Radio Technical Commission for Aeronautics. Minimum Operational Performance Standards for Integrated Night Vision Imaging System Equipment: RTCA/DO-275[S]. [2001-12-12].

[2] 王聪, 于飞, 杨明浩, 等. 一种微光夜视成像系统设计[J]. 空军医学杂志, 2021, 37(1): 5-8.

WANG Cong, YU Fei, YANG Minghao, et al Design of a low light level

- night vision imaging system[J]. *Journal of Air Force Medicine*, 2021, **37**(1): 5-8.
- [3] 国防科学技术委员会. 飞行员夜视成像系统通用规范: GJB 2025-1994 [S]. [1994-04-12].
China National Military Standards. General Specification for Night Vision Imaging System for Pilots: GJB 2025-1994[S]. [1994-04-12].
- [4] US-AIR FORCE. Department of Defense Interface Standard, Lighting, Aircraft, Night Vision Imaging System(NVIS) Compatible: MIL-STD-3009 [S]. 2002.
- [5] 王聪, 师国伟, 赵显亮, 等. 飞行错觉模拟器飞行仿真系统设计[J]. *航天医学与医学工程*, 2019, **32**(2): 128-133.
WANG Cong, SHI Guowei, ZHAO Xianliang, et al. Design of flight illusion simulator flight simulation system[J]. *Aerospace Medicine and Medical Engineering*, 2019, **32**(2): 128-133.
- [6] Willen B. Spatial Disorientation Training-Demonstration and Avoidance: RTO-TR-HFM-118[R]. Netherlands: The Research and Technology Organization(RTO)of NATO, 2008: 62-63.
- [7] 国防科学技术委员会. 与夜视成像系统兼容的飞机内容照明: GJB 9314-2018 [S]. [1992-07-18].
National Defense Science and Technology Commission GJB 9314-2018 Aircraft content lighting compatible with night vision imaging system[S]. [1992-07-18].
- [8] 国防科学技术委员会. 飞机内部和外部照明设备通用规范: GJB 2020A-2012[S]. [1994-09-12].
National Defense Science and Technology Commission. GJB 2020A-2012 General specification for aircraft interior and exterior lighting equipment: [S]. [1994-09-12].
- [9] 吴铨, 周晴霖, 秦志峰, 等. 外军飞行人员夜视训练发展[J]. *中华航空航天医学杂志*, 2013, **24**(4): 299-306.
WU Quan, ZHOU Jinglin, QIN Zhifeng, et al. Development of night vision training for foreign military pilots[J]. *Chinese Journal of Aerospace Medicine*, 2013, **24**(4): 299-306.
- [10] 于飞, 贾宏博, 姚钦, 等. 美国空军夜视医学训练与保障概况[J]. *中华航空航天医学杂志*, 2019, **30**(2): 146-151.
YU Fei, JIA Hongbo, YAO Qin, et al. Overview of night vision medical training and support of USAF[J]. *Chinese Journal of Aerospace Medicine*, 2019, **30**(2): 146-151.
- [11] 马月欣, 王志翔. 夜视训练系统[J]. *航空军医*, 2002, **30**(1): 1-1.
MA Yuexin, WANG Zhixiang Night vision training system[J]. *Aviation Medical Officer*, 2002, **30**(1): 1-1.
- [12] Theleman S, Hegarty J, Vollmerhausen R, et al. New weather depiction technology for night vision goggle (NVG) training[C]//*Proceedings of SPIE*, 2006, **6303**: 63030F-1-63030F-11.
- [13] 谢溯江, 徐珀, 贾宏博, 等. 飞行员地面错觉模拟及其反应参考值[J]. *中华航空航天医学杂志*, 2011, **22**(2): 81-85.
- XIE Suojia, XU Po, JIA Hongbo, et al. Pilot ground illusion simulation and its response reference value[J]. *Chinese Journal of Aerospace Medicine*, 2011, **22**(2): 81-85.
- [14] 程洪书, 赵保明, 张福, 等. 飞行错觉模拟训练系统的研究与开发[J]. *火力与指挥控制*, 2012, **37**(9): 201-204.
CHENG Hongshu, ZHAO Baoming, ZHANG Fu, et al. Research and development of flight illusion simulation training system[J]. *Firepower and Command and Control*, 2012, **37**(9): 201-204.
- [15] Radio Technical Commission for Aeronautics. Concept of Operations, Night Vision Imaging System for Civil Operators: RTCA/DO-268[S]. [2001-03-27].
- [16] AB Forces News Collection. Alamy Stock Photo[Z/OL]. [2018-01-24]
<https://s.r.sn.cn/VRkXft>
- [17] 许为. 航空夜视镜的人机工效学问题[J]. *国际航空*, 1991, **42**(12): 52-53.
XU Wei. Ergonomic issues of aviation night vision goggles[J]. *International Aviation*, 1991, **42**(12): 52-53.
- [18] 徐先荣, 张扬, 赵霆, 等. 飞行员严重飞行错觉的临床研究[J]. *临床耳鼻咽喉科杂志*, 2006, **20**(16): 746-749.
XU Xianrong, ZHANG Yang, ZHAO Ting, et al. Clinical study on pilots' severe flight illusion[J]. *Journal of Clinical Otolaryngology*, 2006, **20**(16): 746-749.
- [19] 武强, 张瑞金, 佟于. 海上飞行的环境特点与飞行错觉[J]. *海洋世界*, 1994(8): 27-28.
WU Qiang, ZHANG Ruijin, TONG Yu. Environmental characteristics and flight illusion of maritime flight[J]. *Ocean World*, 1994(8): 27-28.
- [20] Pousette Magnus Wallquist, Lo Maitre Riccardo, Linder Jan, et al. Neck muscle strain in air force pilots wearing night vision goggles[J]. *Aerospace Medicine and Human Performance*, 2016, **87**(11): 928-932.
- [21] 吴铨, 柳松杨, 张霞, 等. 佩戴夜视镜飞行对飞行员颈部的影响及应对措施[J]. *中华航空航天医学杂志*, 2018, **29**(Z1): 161-166.
WU Quan, LIU Songyang, ZHANG Xia, et al. Impact of flying with night vision goggles on pilots' neck and countermeasures[J]. *Chinese Journal of Aerospace Medicine*, 2018, **29**(Z1): 161-166.
- [22] 王聪, 郭大龙, 赵显亮, 等. 基于空间定向感知模型的飞行错觉模拟效果评价[J]. *航天医学与医学工程*, 2020, **33**(6): 471-476.
WANG Cong, GUO Dalong, ZHAO Xianliang, et al. Evaluation of flight illusion simulation effect based on spatial orientation perception model[J]. *Aerospace Medicine and Medical Engineering*, 2020, **33**(6): 471-476.
- [23] 熊端琴, 郭小朝. 航空夜视镜工效学问题及技术策略概述[C]//*人-机-环境系统工程研究进展*, 2005(7): 237-241.
XIONG Duanqin, GUGUO Xiaochao Ergonomic problems and technical strategies of aviation night vision goggles [C]//*Research progress in Man Machine Environment System Engineering*, 2005(7): 237-241.

- [24] 董贵安. 美国军事飞行员模拟夜视镜失灵后的暗适应[J]. *航空军医*, 1997(2): 121.
DONG Gui'an. The dark adaptation of American military pilots after the failure of night vision goggles[J]. *Aviation Military Doctor*, 1997(2): 121.
- [25] 林燕丹, 艾剑良, 杨彪, 等. 民机驾驶舱在恶劣光环境下的飞行员视觉工效研究[J]. *科技资讯*, 2016, **14**(13): 175-176.
LIN Yandan, AI Jianliang, YANG Biao, et al. Research on visual ergonomics of pilots in civil aircraft cockpit under harsh light environment[J]. *Science and Technology Information*, 2016, **14**(13): 175-176.
- [26] 拜晓锋, 杨书宁, 候志鹏, 等. 微光像增强器夜视兼容特性分析[J]. *红外与激光工程*, 2016, **45**(S2): 106-110.
BAI Xiaofeng, YANG Shuning, HOU Zhipeng, et al. Analysis of night vision compatibility characteristics of low light level image intensifier[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, **45**(S2): 106-110.
- [27] Zoltan Szoboszlay, Loran Haworth. A comparison of the AVS-9 and the panoramic night vision goggles during rotorcraft hover and landing[C]//*The American Helicopter Society 57th Annual Forum*, 2001, 1458-1467.
- [28] 徐乐乐, 邢军, 马冬梅, 等. 飞行员注意力分配测试研究[J]. *华南国防医学杂志*, 2013, **27**(11): 822-823.
XU Lele, XING Jun, MA Dongmei, et al. Study on pilot attention distribution test[J]. *South China Journal of National Defense Medicine*, 2013, **27**(11): 822-823.
- [29] 罗晓利. 驾驶舱注意力分散及其管理[J]. *民航经济与技术*, 1998(7): 42-44.
LUO Xiaoli. Cockpit distraction and its management[J]. *Civil Aviation Economy and Technology*, 1998(7): 42-44.
- [30] Radio Technical Commission for Aeronautics. Civil Operators' Training Guidelines for Integrated Night Vision Imaging System Equipment: RTCA/DO-295[S]. [2004-10-19].
- [31] 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.
YUAN Weihong. Design of a helicopter lighting system compatible with night vision goggles [J]. *Helicopter*, 2008(4): 42-47.
- [32] 李晓峰, 李娇娇, 李金沙, 等. 超二代及三代像增强器不同响应波段的参数测量及比较[J]. *光子学报*, 2021, **50**(2): 123-129.
LI Xiaofeng, LI Jiaojiao, LI Jinsha. Measure and comparison between the second-generation and the third-generation image intensifier within the different region of wavelength[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2021, **50**(2): 123-129.
- [33] Stocktrek Images, Inc. Alamy Stock Photo[Z/OL]. <https://www.alamy.com/stock-photo-soldier-wearing-the-an-avs-10-panoramic-night-vision-goggles-105723429.html>.
- [34] Ruffner J W, Antonio J D, Joralmon D Q, et al. Computer-based and web-based applications for night vision goggle training[C]//*Conference on Helmet- and Head-Mounted Displays VI*, 2001: 148-158.