

# 白光观瞄装备高原雪地环境适应性改进

唐钦, 刘卫军, 李璀, 许红, 杨壮, 叶洪伟, 邢程

(驻重庆地区军事代表局, 云南 昆明 650032)

**摘要:** 为解决白光观瞄装备在高原雪地、逆光等环境条件下观察瞄准效果不佳等问题, 运用外置滤光镜、偏振光镜和遮光筒等技术, 对白光观瞄装备开展适应性改进, 充分考虑高原任务特点, 合理进行人机工效设计, 方便操作和携行, 满足白光观瞄装备在高原地区各种环境条件下的使用需求。

**关键词:** 白光观瞄装备; 高原雪地; 逆光环境; 适应性改进

中图分类号: E917 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2023)04-0371-07

## Adaptability Improvement of White Light Observation and Sighting Equipments in Plateau Snow Environment

TANG Qin, LIU Weijun, LI Cui, XU Hong, YANG Zhuang, YE Hongwei, XING Cheng

(The Military Representative Bureau of Chongqing Regional, Kunming 650032, China)

**Abstract:** White light observation and sighting equipment exhibit a poor performance in regards to observing snow and backlighting conditions on plateaus. To address this, external filters, polarizing lenses, and shading tubes are used to improve the adaptability of the white light observation and sighting equipment by fully considering the characteristics of plateau tasks. Reasonable man-machine ergonomics designs, convenient operation, and portability allow meeting the needs of white light observation and sighting equipment under various environmental conditions in plateau areas.

**Key words:** the white light observation and sighting equipment, plateau snowfield, backlighting, adaptive improvement

## 0 引言

近年来, 随着用户任务区域的不断拓展, 各型白光观瞄装备<sup>[1-3]</sup>在高原环境条件<sup>[4]</sup>下的使用频次激增, 复杂多变的环境条件对装备性能的考验更加严酷, 用户在使用过程中发现由于设计论证不充分, 未能充分考虑高原雪地、逆光<sup>[5]</sup>等环境条件, 逆光环境下会减弱观察目标的显著性以及增强背景的干扰性, 使得对观察目标的精准识别和探测会变得更加困难, 造成在使用时影响操作者观察、射击瞄准<sup>[6]</sup>。经调研分析, 由于用户使用的白光观瞄装备存在品种杂、数量多、年代不一、生产单位不同等情况, 原有解决方案是由各装备生产单位分别为其生产的装备重新设计生产防眩光、逆光装置, 难以在用户所有装备上施行, 如何采取统一、快捷的方式解决是一个难题。据此, 项目组开展了白光观瞄装备高原适应性<sup>[7]</sup>改进研究, 研究出通用的防高原雪地眩、逆光解决方案, 以期尽快解决该难题, 满足用户需求。

## 1 高原环境对白光观瞄装备的影响分析

青藏高原属高寒地区, 具有光照强、雪地多、温湿度低、温差大等特点, 会对白光观瞄装备的使用造成一定影响。

### 1.1 高原光照环境对白光观瞄装备使用的影响

高原寒区由于光照强烈, 加之雪地环境多, 会产生较强烈的眩光, 致使分辨物体细节能力降低; 在雪地环境或逆光时, 使用白光观瞄装备观察、瞄准, 还会对装备使用造成一定影响。

#### 1.1.1 雪地眩光成因分析

眩光<sup>[8]</sup> (Glare) 是一种环境状况描述, 通常被用于形容明亮的阳光海滩或是积雪山顶等这样的环境情况, 国际照明委员会 CIE (international commission on illumination) 提出<sup>[8]</sup>: 眩光是指由于高亮度对比度和光源分布不当等因素而影响或削弱用户区分物体细节能力的现象。

出现眩光通常是由视觉光环境和生理两方面原因

收稿日期: 2022-11-28; 修订日期: 2023-02-20。

作者简介: 唐钦 (1973-), 男, 四川遂宁人, 高级工程师, 主要从事光电装备质量监督工作。E-mail: 2302289947@qq.com。

所导致。导致眩光主要由主动光源如太阳光、强灯光等；被动光源如反射率较高的物体表面（水面或平滑的路面等）引起的反光。典型的视觉光环境因素引起的眩光有以下两种情形：

1) 雪地眩光：雪地眩光主要由太阳光直射雪地表面，因雪花为特殊形状的晶体（如图1和图2），光线经大面积雪地表面散射后在一定角度上会产生大面积反射光或较大强度的偏振光。观察人员使用白光观瞄装备等直接观察时，如无滤光措施，易引起“晃眼”、“刺眼”等感受，以致无法看清目标区域。

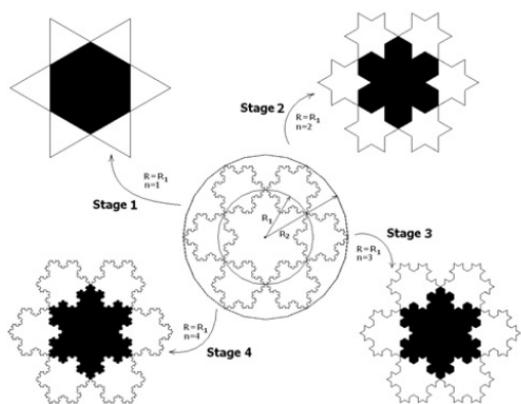


图1 雪花的N面体形状展开

Fig.1 N-facet shape expansion of snowflakes



图2 高原雪地环境

Fig.2 Snow environment in plateau

2) 不适型眩光：在某种情况下，人眼需要在亮度或对比度相差很大的环境中进行相互转换，这种转换会使人感到不适，即为不适型眩光，如在较强的太阳光下看书写字，或在亮度较暗的卧室里看亮度较强的电子设备屏幕，这种不适还会使得眼睛产生选择性逃避行为，进而会导致视力下降。

从生理方面分析，除去视觉光环境引起的眩光，还应从眼睛的生理结构方面考虑。从眼睛的生理结构方面来说，瞳孔受到高亮度的刺激时会自动进行缩小来适应环境，而长期的刺激和应激反应可能会对视网

膜有所损伤。这是因为人眼的亮度阈值是有限的，其所能承受的光亮度最大值约为  $10^6 \text{ cd/m}^2$ <sup>[9]</sup>，超过此最大值则会损伤人的视网膜。另一方面，当接收到较强的光亮度时，眼角膜和以及人眼的晶状体还会出现光散射形成光幕现象，影响人眼的正常观察。

当产生的眩光是从反射率较高的物体表面引起的特殊反光时，那么很大一部分光线被界定在同一平面内振动，也就形成了偏振光。偏振光现象利用普通的滤光镜并不能有效消除，此时需要利用偏振光镜才能削弱这种眩光现象。

综上所述，雪地眩光主要由自然光经雪地反射引起的偏振光经白光观瞄装备传递至人眼，达到人眼视觉感受阈值引起。

### 1.1.2 高原逆光对观察的影响

由于用户任务的特殊性，其观察对象主要集中于西面，因此中午过后逆光环境会造成设备的成像画面发黑并且分辨不清实物的具体细节，严重影响观瞄效果。再加上白光观瞄装备的聚光作用，长时间在逆光条件下观察，还可能对装备操作人员眼睛造成伤害。

### 1.2 高原温湿度对白光观瞄装备的影响

高原环境温湿度低、温差大，在低温条件下，白光观瞄装备活动部位的调节会受影响，出现因冻死而转不动、卡死等情况，温差过大可能会引起部分装配质量不好的观瞄装备出现玻璃裂、脱胶等情况。所以在设计时要考虑尽量采用固定焦距、视度，避免采用活动机构，防止出现活动机构转不动、卡死等情况。从用户反馈情况来看，目前还未发现此类问题，因此，暂不考虑高原温湿度环境对白光观瞄装备的影响，但在设计解决方案时应考虑高原低温的使用要求。

## 2 当前白光观瞄装备对外界杂散光的解决方案

### 2.1 常用白光观瞄装备镀膜情况分析

为提高使用舒适性，部分白光观瞄装备会镀“蓝膜”或“绿膜”。“蓝膜”<sup>[10]</sup>指白光观瞄装备中的光学零件（玻璃）镀制蓝光截止膜以保护人眼，减少紫外线对人眼的伤害；“绿膜”<sup>[11]</sup>指白光观瞄装备中的光学零件镀制绿光截止膜，以降低蓝绿色激光和部分紫外光线对人眼的伤害。使用镀制“蓝膜”的白光观瞄装备时，观察到的物体色彩与实际物体肉眼观察色彩接近；使用镀制“绿膜”的白光观瞄装备时，观察到的物体色彩与实际物体肉眼观察色彩偏差较大，物体色彩接近粉色。图3所示为白光观瞄装备物镜镀膜情况。

一般情况下，白光观瞄装备的备附件中均包含一片黄色滤光片（滤色镜），此滤光片与夜间开车使用



图3 蓝膜(左), 绿膜(右) 外观图  
Fig.3 Appearance of blue film(left) and green film(right)

的防强光眼镜镜片颜色基本一致。当在强光照射, 或有淡薄烟雾的情况下进行观察时, 可将滤光片套在目镜上, 以减少强光对人眼的刺激或增加烟雾中景物的反衬度。无论“蓝膜”、“绿膜”还是自带的黄色滤光片, 均无法解决主要由偏振光引起的雪地眩光问题。

## 2.2 滤光镜对光学系统的影响

从原理上来说, 所有滤光镜都会过滤掉一部分目标光线, 造成观察目标的能量损耗, 所以在设计光学系统时, 一般都会根据常规光照环境设计, 不在光学系统中增加滤光器件, 从而达到最佳设计效果, 满足通常使用要求。当在特殊光照条件下时, 才增加滤光镜来满足特殊使用要求。

常规白光滤光镜或单色滤光镜可以根据使用要求随意确定透过率。偏振光镜根据偏振原理, 当光线经过偏振片后, 大幅降低了其中一个相位的光线, 从而导致经过偏振片的光能量降低, 从理论分析, 采用偏振光镜, 透过率至少降低 50%。

雪地反射偏振光引起的眩光问题因白昼雪山地区光强较大, 附加偏振光镜后, 白光观瞄装备最大视距指标在当时不会受到太大影响; 但是, 在非雪地环境、日出、日落等光照环境下, 由于环境光强较低, 滤光镜会对白光观瞄装备视距产生较大影响。

## 2.3 小结

结合改进研究任务, 形成以下建议:

1) 目前影响用户白光观瞄装备观察瞄准的主要因素是高原雪地眩光及逆光。温湿度不是主要因素, 但在设计时要考虑低温环境影响, 减少使用活动调节机构。

2) 镀在白光观瞄装备物镜表面的各种截止膜主要目的是过滤掉一部分波段的光, 不能解决目前用户使用白光观瞄装备面临的问题。

3) 增加滤光镜或偏振光镜, 都会过滤掉一部分目标能量, 可能会影响观察效果(如视距等)。

## 3 解决方案论证

为解决用户在高原环境下面临的眩光和逆光问题, 需要对白光观瞄装备进行适应性改进, 要解决雪地眩光问题, 采用偏振光镜是最有效的方法。而逆光问题通过滤光镜是无法解决的, 因为逆光的光强通常要强于目标光强, 用滤光镜在过滤掉逆光的同时会过滤掉目标光照, 造成丢掉目标的情况, 通常的解决方法是在物镜方向加遮光器, 将逆光遮掉, 且遮光器是可以与滤光镜设计在一起的。需要注意的是, 由于滤光镜和偏振光镜, 都会过滤掉一部分目标能量, 可能会影响观察效果, 故对其使用只能是出现眩光时, 而其他情况下就不能用滤光镜。基于以上分析, 经充分调研和讨论, 考虑采取以下 4 种解决方案。

### 3.1 外置滤光镜、偏振光镜方案

针对不同的白光观瞄装备, 在其物镜或目镜上加装滤光镜或偏振光镜(对于有眼罩的装备, 一般采用在物镜方向加装), 并根据需要制作相应尺寸的遮光筒或“帽檐”, 以解决眩光和逆光问题。

采用外置滤光镜、偏振光镜方案, 可以根据需要配置多种型号规格的滤光镜, 方便实现偏振光镜旋转功能, 达到有效滤光的效果。还可将滤光镜和遮光筒集成到一体制作, 同时解决逆光和眩光问题。

该方案可以根据不同应用场景采用不同滤光镜, 有效解决问题, 其优点是易于设计、制造和操作, 是白光观瞄装备在国际上的常用方法。同时在民用领域如高端照相机领域, 为达到各种光照条件下的最佳照相效果, 也是采用外置滤光镜的方案, 由操作者根据当时光照条件选用。该方案缺点是外置滤光镜携带不方便, 同时如果配制的滤光镜制作精度不高, 会产生像差, 对像质(特别是边缘像质)造成一定影响。

### 3.2 更换装备零部件方案

在现有装备基础上, 通过更换个别部件, 以解决

眩光问题，逆光问题通过制作遮光筒解决。

考虑到雪地眩光主要由强光照射下雪花表面反射光（主要为偏振光），故需针对雪地情况削减此角度的偏振光。如直接在白光观瞄装备光学零件上镀制偏振光衰减膜，存在实际使用时偏振光方向可能与镀制的方向不一致问题，可能无法减轻眩光感受。如直接在白光观瞄装备光学零件上镀制偏振光衰减膜，将极大降低白光观瞄装备光学透过率（至少降低50%），降低白光观瞄装备其他环境使用时的视距、分辨能力等指标。经查，相关机构正开展电致滤光片<sup>[12]</sup>等技术开发，通过改变电压、压力等参数，改变滤光片光学透过能力和偏振状态，但是，目前该项技术因可靠性等因素暂未推广应用。

通过分析可知：如不增加附件，在不改变技术指标的前提下，现阶段无可靠的解决方法，经查询也无同类装备交付使用。

### 3.3 改进目镜设计方案

根据用户使用的主要光照环境条件，重新设计白光观瞄装备，如图4所示，在目镜后方，眼点前方设计旋转机构，配置3片不同的滤光片（filter 1、filter 2及filter 3），可根据使用环境切换滤光片，解决眩光问题和常见环境的适用性等问题。

采用该方案，需要考虑不同滤光片材料、工艺差异，以及常用望远镜和枪瞄镜的结构差异、对望远镜光学系统像差的影响、隐蔽性等，滤光片设计在目镜后方、眼点前方为最佳，其具有结构简单，易工程化

的特点。但目镜部分存在突出机构，携带不便，易损坏，可靠性差，人机工效差。

通过分析可知，该方案是可以解决用户的问题，但亦带来尺寸包络变大，可靠性降低、人机工效降低等问题，由于上述原因该方案在国内外还未见使用过，仅在实验室等固定使用环境下有采用。

### 3.4 头戴式护目镜方案

按照普通头戴式雪地护目镜的模式，对护目镜进行适当改进，将镜片安装方式改为可插入式，以解决眩光、逆光等问题。

采用该方案，由于是单独的头戴式护目镜，方便设计、生产和使用。但可能由于装备出瞳短而无法观察的情况，还存在需要携带护目镜，且在高原高寒条件下穿戴厚手套时存在不方便更换镜片的情况。

通过分析可知，该方案可以解决眩光和逆光问题，但对于有眼罩的白光观瞄装备，存在出瞳不够，无法看到目标问题。

通过分析论证，上述4种解决方案达到的效果和操作难度各异，结合用户现有实际装备和装备使用环境特点，要同时解决逆光和眩光等问题，通过重新设计光学系统来满足用户需求，目前还不具备操作条件。考虑用户用装实际情况，经与用户协商决定采取外置滤光镜、偏振光镜方案。

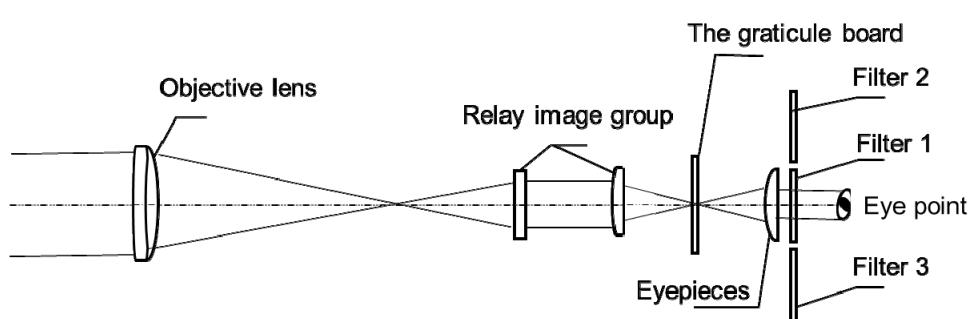


图4 增加旋转机构更换滤光片方案示意图

Fig.4 Schematic diagram of replacing optical filters with a rotating mechanism

## 4 适应性改进实施

### 4.1 具体设计方案

考虑到具体装备的使用环境和接口情况，滤光镜采用无色和黄色两种，偏振光镜采用两片组合式结构，同时将遮光罩作为可拆卸部件分别配装在滤光镜和偏振光镜上。用于瞄准装备时考虑连接牢固需要，设计

了楔形多头螺纹锁紧机构；而用于观察装备时则采用套筒方式连接；考虑高原高寒条件下用户需穿戴厚手套，旋转部分进行了人机工效设计，采用加粗加长滚花设计。以偏振光镜为例，结构设计由锁紧机构、偏振组和遮光罩成，见图5。其他滤光镜采用类似结构进行设计。

光学参数的设计，经论证确定双片偏振片组合透

过率: 连续可调; 调节范围: 最大值 $\geq 35\%$ , 最小值 $\leq 2\%$ ; 单片滤光片透过率 $\geq 60\%$ 。

在使用性能方面, 经论证确定持续观察时间:  $\geq 30\text{ min}$  (逆光、眩光或强光环境下); 维修性: 安装/拆卸时间不大于 1 min; 环境适应性满足用户使用要求。

#### 4.2 误差分析

为了确定外置滤光镜和偏振光镜对瞄准镜光轴<sup>[13]</sup>的影响, 对其进行误差分析, 由于两者均可等同一定厚度的平面玻璃, 采用平面玻璃来进行分析, 图 6 所示为外置滤光镜倾斜对瞄准轴线的影响, 由其可知, 对于无穷远目标, 外置滤光镜倾斜只影响光线的相位, 不影响轴线及瞄准精度。

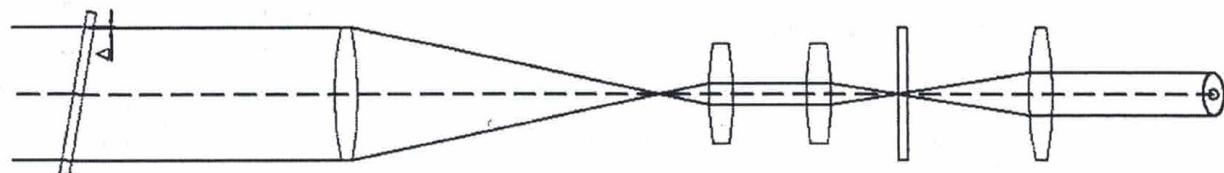


图 6 平行光路中滤光镜倾斜对瞄准轴线影响示意图

Fig.6 Effect of filter tilt on aiming axis in parallel optical path

图 7 所示为近平行光路中的平面玻璃倾斜对瞄准轴线的影响。

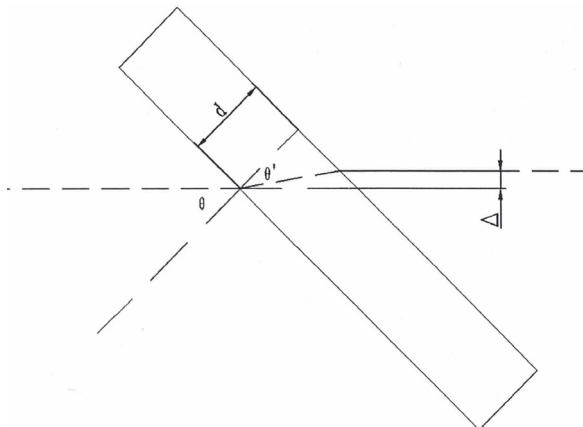


图 7 近平行光路中滤光镜倾斜对瞄准轴线影响示意图

Fig.7 Schematic diagram of the influence of filter tilt on aiming axis in near parallel optical path

由图 7 可知:

$$\Delta = \frac{d \cdot \sin(\theta - \theta')}{\cos \theta'} \quad (1)$$

式中:  $\theta$  为光线入射角;  $\theta'$  为折射角。

如目标为有限远距离目标, 设距离为  $L$ , 则对瞄

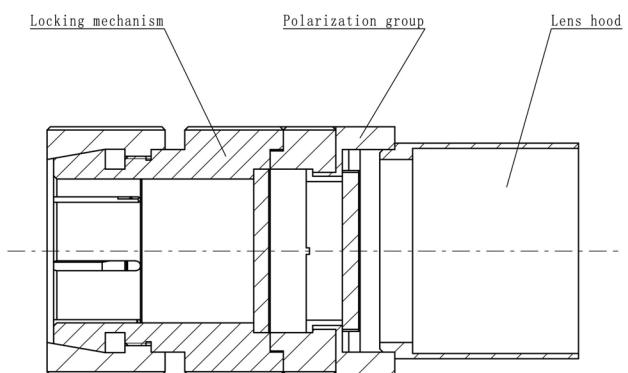
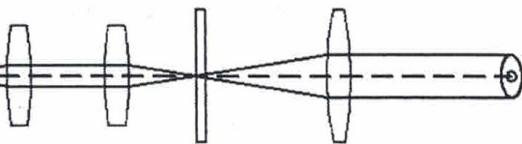


图 5 白光瞄准镜用滤光镜偏振光组件组成

Fig.5 Composition diagram of polarizing components of filter for white light sight



准轴线的影响为:

$$\text{轴线误差} \approx \Delta/L(\text{rad}) \quad (2)$$

假设滤光片相对瞄准镜光轴倾斜  $10^\circ$ , 滤光片折射率约为 1.5、厚度为 3 mm, 则可计算出:

$$\theta' = \arcsin\left(\frac{\sin(\theta)}{n}\right) \approx 6.65^\circ;$$

$$\text{由此: } \Delta = \frac{d \cdot \sin(\theta - \theta')}{\cos \theta'} \approx 0.176 \text{ mm; 故在目标距}$$

离 20 m 时, 轴线误差  $\approx 0.176/20 = 8.8 \times 10^{-3}$  (mrad), 即约 0.008 密位, 不会影响射击精度。

由式(2)可知, 距离越远, 滤光片的倾斜角度误差对轴线精度的影响越小, 故针对普通瞄准镜, 滤光片安装倾斜误差不会对射击精度产生较大影响。

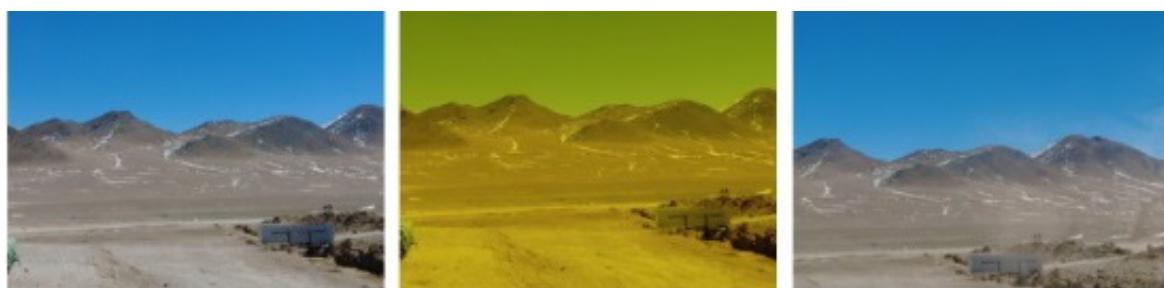
#### 4.3 试验验证

为验证适应性改进的效果, 分别进行了内场试验和到阿里地区进行实地观察试用。内场试验完成了性能试验和环境试验<sup>[14]</sup>, 包括外形尺寸、重量、运输振动、高温工作、低温工作等项目, 结果均满足设计要求。外场试验进行了维修性、互换性、目标识别试验、雪地持续观察试验等项目, 均能满足用户使用要求, 部分试验结果见表 1。

现场部分观察效果见图 8。

表1 滤光镜部分试验结果  
Table 1 Partial test results of filter

The test project	Test results
Maintainability	The installation and removal time is 30 s
Interchangeability	The polarizing lens, the shading cylinder and the structure can be interchanged, and the function is normal
Continuous observation test in snow	Greater than 30 minutes
The angle at which the sun's rays can be shielded after the hood is installed	18°
Backlighting observation window time test	72 min
Target identification test	<p>①When adding a polarizer on the sighting mirror, the angle of the polarizing can be adjusted to filter out the “glare” and the light intensity through the aim can be adjusted to achieve the comfortable effect of human eyes, and is suitable for long-term observation and aim under various lighting conditions</p> <p>②Adding a yellow filter on sight can increase the contrast of the target and distinguish the personnel and equipment more clearly, especially suitable for use in the low light conditions such as mist</p> <p>③The light-shading tube installed in front of the filter can effectively block the backlighting. With the filter, it is suitable for all kinds of intensity backlighting environment</p>
High temperature operation	Proper operation
Low temperature operation	Proper operation



(a) Without filter

(b) With a yellow filter

(c) By using polarizers

图8 现场观察效果

Fig.8 Images of the same scene on site

## 5 结语

此次白光观瞄装备适应性改进，创新应用设计方案、产品图样、样机试制同步实施及多轮迭代验证的研制方式，有效缩减了研制周期，及时响应了用户需求。从用户试用效果来看，根据不同环境条件选用不

同滤光镜组合，能有效解决高原雪地条件下的眩光、逆光问题，在同等环境条件下增加了观瞄距离、延长了观瞄时间，极大地改善了使用体验。从原理分析，该方案不仅适用于高原雪地、逆光条件，还适用于丛林、沙漠、海岛等各种地理条件，同时外置滤光镜还具有体积小、重量轻、操作方便、携行方便、价格便

宜、不改变装备技术状态等特点，具有很高的推广价值和应用前景。

### 参考文献:

- [1] 付小倩. 地面观瞄指示器光轴测试装置的研制[D]. 南京: 南京理工大学, 2004.  
FU Xiaoqian. Development of Optical Axe Test Device for Ground Sight Indicator[D]. Nanjing: Nanjing University of Technology, 2004.
- [2] 陆智, 沈卫东, 王盛春. 高原环境对车辆红外隐身效能的影响及对策[J]. 移动电源与车辆, 2016(1): 48-50.  
LU Zhi, SHEN Weidong, WANG Shengchun. Influence of plateau environment on vehicle infrared stealth efficiency and countermeasures[J]. *Movable Power Station & Vehicle*, 2016(1): 48-50.
- [3] 王国力. 车载昼夜周视观察镜光学系统的研究与设计[D]. 南京: 南京理工大学, 2008.  
WANG Guoli. Research and Design of Optical System for Circumspecting Mirror on Vehicle[D]. Nanjing: Nanjing University of Technology, 2008.
- [4] 陈姣, 腾国奇, 胡博, 等. 电视观瞄/可见光直视观瞄光学系统设计[J]. 应用光学, 2017, 38(4): 538-542.  
CHEN Jiao, TEN Guoqi, HU Bo, et al. TV viewing sight/design of optical system for visible light direct view[J]. *Journal of Applied Optics*, 2017, 38(4): 538-542.
- [5] 马冬冬. 逆光环境下海上红外目标检测研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2020.  
MA Dongdong. Research on Infrared Target Detection at Sea in Backlighting Environment[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2020.
- [6] 尚利民, 曹金荣, 范文奇. 瞄准具固定位置对镜内分划及对射击精度的影响[J]. 火炮发射与控制学报, 2008(1): 27-29, 34.  
SHANG Limin, CAO Jinrong, FAN Wenqi. Effect of fixed position of sight on in-mirror scribe and shooting accuracy[J]. *Journal of Gun Launch & Control*, 2008(1): 27-29, 34.
- [7] 谢章用, 闫杰, 陆家乐. 高原环境下电子装备环境适应性问题研究[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2022, 40(S2): 94-96.  
XIE Zhangyong, YAN Jie, LU Jiale. Research on the environmental adaptability of electronic equipment in plateau environment[J]. *Electronic Product Reliability and Environmental Testing*, 2022, 40(S2): 94-96.
- [8] 刘彦汝. 天然采光条件下高校体育馆典型模型场地眩光分析及优化[D]. 天津: 天津大学, 2020.  
LIU Yanru. Analysis and Optimization of Glare of Typical Model Site of University Gymnasium under Natural Lighting[D]. Tianjin: Tianjin University, 2020.
- [9] 王萍. 感知亮度的模型化研究[D]. 南京: 东南大学, 2020.  
WANG Ping. Modeling of Perceived Luminance[D]. Nanjing: Southeast University, 2020.
- [10] 刘旭, 赵青南, 罗乐平, 等. 截止蓝光镀膜玻璃的溅射法制备与性能研究[C]//2015年全国玻璃科学技术年会论文专集, 2015: 128-134.  
LIU Xu, ZHAO Qingnan, LUO Leping, et al. Preparation and properties of blue-cut-off coated glass by sputtering[C]//*Special Collection of Papers of 2015 National Annual Conference on Glass Science and Technology*, 2015: 128-134.
- [11] 于志强, 费书国, 赵帅峰, 等. 面向多光谱掌纹图像采集系统的光学薄膜滤光片设计[J]. 光学学报, 2021, 41(23): 261-268.  
YU Zhiqiang, FEI Shuguo, ZHAO Shuaifeng, et al. Design of optical thin film filter for multispectral palmprint image acquisition system[J]. *Journal of Optics*, 2021, 41(23): 261-268.
- [12] 李鹏飞, 陈泽祥, 任俊, 等. 透过率实时可调的PDP屏滤光膜[J]. 电子器件, 2012, 35(1): 18-21.  
LI Pengfei, CHEN Zexiang, REN Jun, et al. PDP screen filter film with real-time adjustable transmittance[J]. *Chinese Journal of Electronic Devices*, 2012, 35(1): 18-21.
- [13] 李士贤, 李林, 袁旭沧. 光学设计手册[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1996.  
LI Shixian, LI Lin, YUAN Xucang. *Optical Design Manual*[M]. Beijing Institute of Technology Press, 1996.
- [14] 施荣明, 朱广荣, 吴飒. 军用装备实验室环境试验方法第16部分: 振动试验: GJB150.16A[S]. [2009].  
SHI Rongmin, ZHU Guangrong, WU Sa. Laboratory Environmental Test Methods for Military Materiel-Part 16: Vibration Test: GJB150.16A[S]. [2009].