光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2023013003

轻量化双目头戴夜视系统壳体结构可靠性设计

周　斌*，曹安港

（郑州科技学院，郑州 450064）

摘　要： 针对固态成像型头戴夜视系统大视场、轻量化需求，对双目头戴夜视系统进行了物镜和目镜光学系统及机械装配结构设计，选用高强型碳纤维环氧树脂作为夜视系统壳体材料，利用Solid Works仿真软件优化设计了一款夜视系统壳体结构，并对壳体在极寒和高热条件下的热稳定性进行了有限元分析。仿真实验结果表明，在－40和50 ℃两种极端温度情况下夜视系统壳体的热应力均小于材料的屈服强度，最大应变对光学系统成像质量、显示性能和机械结构造成的影响极为有限，从而验证了壳体结构良好的耐温性和可靠性。

关键词： 双目头戴夜视系统；结构设计；热稳定性；有限元法；光学系统

中图分类号： TN22　**文章编号：** 1001－5868(2023)03－0444－06

Reliability Design of Shell Structure for Lightweight Binocular Head-mounted Night Vision System

ZHOU Bin，CAO Angang

（Zhengzhou University of Science and Technology，Zhengzhou 450064，CHN）

Abstract： Aiming at the large field of view and lightweight requirement of solid imaging head-mounted night vision system，the optical system and mechanical assembly structure of binocular head-mounted night vision system were designed. Then，a high-strength carbon fiber epoxy was used for the shell material of the night vision system，and a new shell structure was optimized by Solid Works software. Finally，the thermal stability of the shell under extreme cold and high heat conditions was analyzed by finite element method. The simulation results show that the shell thermal stress of the night vision system is less than the yield strength of the material under the extreme conditions of －40 ℃ and 50 ℃. Moreover，the maximum strain has little effect on the imaging quality，display performance and mechanical structure of the optical system. The conclusion proves that the shell structure has good temperature resistance and reliability.

Key words： binocular head-mounted night vision system；structural design；thermal stability；finite element method；optical system

0　引言

头戴夜视系统可显著提高使用者在低照度条件下的环境感知能力，广泛用于夜间观察监视、场景判断和目标搜寻等任务[1-3]。大视场、大相对孔径头戴夜视系统能够更好地匹配人眼视觉特性，分辨近场物体细节，感知远场及轴外视场物体轮廓和场景态势[4-5]。例如美军的GPNVG-18头戴夜视系统通过四个通道的三代像增强器实现了水平95°、垂直38°的大视场角。然而大视场与系统整机轻量化需求之间的矛盾始终是困扰研究人员的难点。通常情况下，头部及颈部对头戴系统的承重能力不应超过

收稿日期：2023－01－30.

基金项目：河南省科技攻关项目(222102210130).

* **通信作者：**周　斌　**E-mail：**whelmmail@126.com

2.5 kg，否则将对使用者造成较大负担，影响观察、训练、维修等各类任务的执行。因此实现大视场双目立体视觉效果的前提是系统的体积越小越好、重量越轻越好。头戴夜视系统主要有直视型和固态成像型等类型[6-8]，其中固态成像型夜视系统是近年来随着低照度光电成像器件的技术突破而发展起来的新型夜视系统[9-10]，其主要由面阵图像传感器、微型显示屏、信息处理系统、光学系统等部件组成。头戴夜视系统作为一种高度精密的仪器，壳体结构的设计应当尽量避免出现各类设计误差，这需要在充分符合光学性能指标和体积质量要求的前提下，开展壳体结构的热力学分析，以保证在极端温度条件下壳体热应变不会超出机械结构的许用范围[11]。本文基于大视场、大相对孔径和轻量化指标要求，对双目头戴夜视系统的光学系统进行了装配结构设计，在选取新型壳体材料基础上，利用有限元分析软件对壳体三维模型开展在极端温度条件下的热稳定性分析，验证壳体结构的可靠性和耐温性，为头戴夜视系统整机研发提供必要的理论依据。

1　系统设计方案

双目头戴夜视系统主要由物镜光学系统、低照度 CMOS 图像传感器、信息处理模块、OLED 微型显示器、目镜光学系统、主动红外照明组件及外置电源模块等部分组成，结构如图 1 所示。物镜系统接收外界微弱夜天光并将其会聚于低照度 CMOS 图像传感器上，信息处理模块对退化的数字图像进行去噪处理和图像增强后送入微型显示器 OLED 显示，人眼经由目镜系统观察增强后的图像。

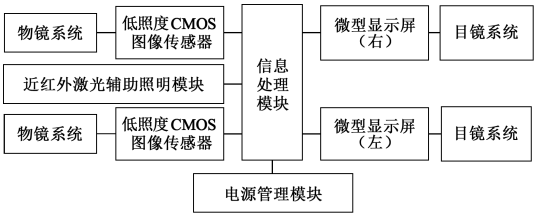


图 1　大视场双目头戴夜视系统结构框图

双目头戴夜视系统基本技术要求：①作用距离在 0.5～100 m 范围内，能够发现 100 m 处直立人@1×10^{-3} lx 照度；②放大倍率为 1×；③视场角大于等于 70°；④出瞳距离大于等于 15 mm；⑤出瞳直径为 7 mm；⑥重量（不含外置电源模块）不超过 1 kg；⑦工作温度在－40～＋50 ℃范围内。经前期光电器件选型，选用 SONY IMX307 LQD-C 星光级 CMOS 图像传感器，其具有高灵敏度、低暗电流、无涂抹效果，可响应 1×10^{-3} lx 照度并实现清晰成像，像素尺寸为 1 920(H)×1 080(V)，对角线长为 6.46 mm，响应波长在 400～1 100 nm 范围内，像元尺寸为 2.9 μm；微型显示屏选择索尼 ECX335SN-6 Si-OLED 屏，其分辨率为 1 920(RGB)×1 080，显示尺寸为 15.8 mm(H)×8.99 mm(V)，自发光。选择该款显示屏可以实现与 CMOS 传感器分辨率匹配，以避免信息处理模块对 CMOS 采集的图像进行窗口裁剪。

2　光学系统结构设计

为合理布局整机结构，首先需要对光学系统部分进行设计。物镜光学系统的性能由工作波长范围、相对孔径（$D/f'_{\circ}$）、视场角（2ω）和有效焦距（$f'_{\circ}$）等基本参数确定[12]，这里 D 为入瞳口径。上述指标应结合系统视觉特性、CMOS 图像传感器及 OLED 屏性能参数等因素综合考虑。夜视系统应在夜间晴朗星空条件下获得良好的光谱响应，光学系统工作波段应在 480～950 nm 范围内，该波段与 CMOS 图像传感器的光谱响应范围相匹配。低照度 CMOS 图像传感器像面的光照度公式为[13]：

$$E=\frac{1}{4}\tau\pi L\left(\frac{D}{f'_{\circ}}\right)^{2} \tag{1}$$

式中，E 为低照度图像在 CMOS 传感器上的照度，L 为物方背景亮度，τ 为物镜透过率，$D/f'_{\circ}$ 为物镜系统相对孔径。由上式可知，若 L，τ 确定，则 $D/f'_{\circ}$ 越大，系统集光能力越强，像面照度 E 越大，夜间观察效果也越好，但由此造成的光学系统设计难度越大，高级像差校正越困难。综合权衡系统体积重量、调校难度等因素，取相对孔径 $D/f'_{\circ}=1/1.2$。

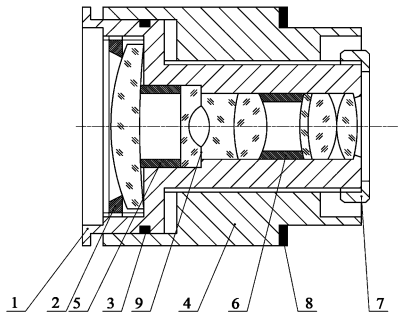
物镜视场角公式为：

$$\begin{cases}\omega_{\mathrm{H}}=2\arctan(H/2f'_{\circ})\\ \omega_{\mathrm{V}}=2\arctan(V/2f'_{\circ})\end{cases} \tag{2}$$

式中，ω_{H}，ω_{V} 分别为物镜系统在水平方向和垂直方向的视场角，H，V 分别为图像传感器在水平方向和垂直方向的有效尺寸。设定 70°对角线视场，可得到系统水平视场角和垂直视场角分别为 $\omega_{\mathrm{H}}\approx58.73°$，$\omega_{\mathrm{V}}\approx45.78°$，由此得到物镜系统的焦距为 $f'_{\circ}=4.62$ mm。

物镜光学系统装配关系如图 2 所示，物镜镜片组采用可见光/近红外波段的复消色差物镜，由 7 片玻璃组成：2 片单透镜和 1 片双胶合透镜组成前透

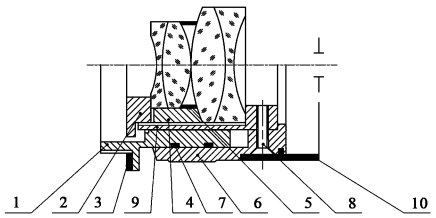
镜组，1 片胶合透镜和 1 片单透镜组成后透镜组胶合片透。物镜系统总长为 42 mm。



1. 物镜框；2. 压圈；3. 密封圈；4. 物镜座隔圈；5. 孔径光阑；6. 隔圈；7. 限位环；8. 调整垫片；9. 孔径光阑

图 2 物镜光学系统装配图

目镜光学系统出瞳距离设为 15 mm，出瞳直径取 7 mm，当视放大率为 1× 时，可求出目镜焦距为 $f'_e=18.14$ mm。综合瞳距及整机系统边缘机械框架尺寸要求，将目镜光学系统直径限制在 30 mm 以下，控制目镜桶形畸变在 8% 以下。以对称式目镜系统为基础进行优化设计，得到目镜系统视场角为 74.46°，系统总长为 78 mm。目镜光学系统装配结构如图 3 所示。从眼部到 OLED 显示屏依次排列第 1 组透镜和第 2 组透镜，均由 1 片正透镜和 1 片负透镜胶合而成。



1. 目镜筒座；2. 压圈；3. 垫片；4. 垫圈；5. 隔圈；6. 密封座；7. 垫圈；8. 螺钉；9. 目镜基座；10. 护目罩

图 3 目镜系统装配图

3 系统主壳体结构设计

系统主壳体是大视场双目头戴夜视系统的主体骨架，支撑着外部的物镜系统和目镜系统，承载着内部的各种光电器件和电路模块。主壳体结构的温度稳定性，对获得清晰稳定的数字图像、保证各光学组件之间的光轴平行性具有重要意义，通过对主壳体重要表面的热应力应变分析，可以预测因温度剧烈变化带给壳体外形上的不稳定性。基于有限元分析方法，利用 SolidWorks Simulation 仿真软件可实现壳体材料的热分析功能，对热传导进行静态和动态评估，降低原型机研制和物理测试成本。

夜视系统壳体材料的选择一方面应充分考虑高结构稳定性和可加工性要求，选择高比强度、高比刚度的材料，另一方面应尽量减轻壳体重量，满足头戴系统的轻量化需求。综合密度、强度、热学特性、制造成本等因素，本文壳体材料选择的是具有高比强度、高比模量、耐高温和腐蚀、可设计性强的碳纤维增强树脂基（Carbon Fiber-Reinforced Polymer，CFRP）复合材料[14]，并与传统的铝合金材料进行热稳定性能对比分析。二者性能如表 1 所示。

表 1 壳体材料性能对比

材料名称	高强型 CFRP	铝合金
密度/(g/cm^3)	1.6	2.8
拉伸强度/GPa	1.8	0.5
比强度/(×10^7/mm)	11.3	1.7
弹性模量/GPa	128	77
比模量/(×10^9/mm)	8.0	2.8
冲击强度/(kg·cm/cm^2)	76	—
线膨胀系数/(×10^{-6}/℃)	0.2	23

由表可知，高强型 CFRP 材料的拉伸强度、弹性模量远高于铝合金材料，其膨胀系数比铝合金材料低 1 个数量级，这样即使在极端温度条件下也有望得到良好的热稳定性。高强型 CFRP 的线膨胀系数与透镜材料（石英材料线膨胀系数约为 0.5×10^{-6}/℃）相近，从而避免了因热膨胀系数不同造成机械结构与光学零件之间的温度梯度问题。CFRP 材料的密度仅为铝合金的 0.6 倍，因此采用该材料将比常用的铝合金材料减轻 40% 的重量，更利于实现夜视系统的轻量化。

三维建模时，主要依据壳体功能、美学因素、人机工程学等方面的要求[15]，建立双目头戴夜视系统的实体模型，为便于系统装配和维修互换，系统采用对分式结构。系统前端两路物镜光学系统对称分布于壳体的外部，低照度 CMOS 传感器、OLED 显示屏、信息处理模块、近红外激光辅助照明模块及连接线缆位于壳体内部，后端两路目镜光学系统对称分

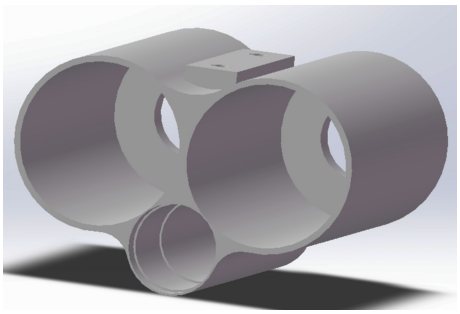


图 4 壳体的三维结构图

布于壳体外部。三维壳体结构如图 4 所示，采用高强型 CFRP 材料后主壳体总质量为 103 g。此外为满足野外使用要求，在外壳设计时还注意了防尘防水防霉密封要求。

4　系统主壳体热稳定性分析

通过主壳体热稳定性分析，可以确定系统中各部件温度状态，为结构热变形提供初始输入条件，进而考察对整个光路系统和机械结构的影响。双目头戴夜视系统应用场景涉及高原、丛林、荒漠、雪地等多种极端工作环境，昼夜温差、地域温差、室内外温差都比较大，因此壳体结构的热应力应变分析，应重点考虑极寒－40 ℃和高温 50 ℃两种工况。

4.1　理论基础

系统外壳主要受重力、内外部温度变化等因素影响。其中静力因素可在假设材料为线性材料基础上，结合有限元方法建立网格化模型，对网格节点进行线性静力分析。在工程上，三维应力状态下各向同性材料的广义胡克定律表示为：

$$\begin{cases}\varepsilon_x=\dfrac{1}{E}[\sigma_x-\mu(\sigma_y+\sigma_z)]\\ \varepsilon_y=\dfrac{1}{E}[\sigma_y-\mu(\sigma_x+\sigma_z)]\\ \varepsilon_z=\dfrac{1}{E}[\sigma_z-\mu(\sigma_x+\sigma_y)]\\ \gamma_{xy}=\dfrac{1}{G}\tau_{xy},\gamma_{yz}=\dfrac{1}{G}\tau_{yz},\gamma_{zx}=\dfrac{1}{G}\tau_{zx}\end{cases}\tag{3}$$

式中，ε_j，σ_i（$i=x,y,z$）分别为应变、应力分量，E 为弹性模量，G 为剪切模量，μ 为泊松比，τ 为纯剪应力。

因光电器件和电路模块正常工作发热造成的壳体内部温度为 36 ℃左右，同时夜视系统应能承受从－40～50 ℃的温度环境，系统主壳体内外表面、壳体各部分都会因温度差异导致热变形的不均匀性，由此产生应变问题。高强型碳纤维环氧树脂的线性膨胀系数α很小，仅为 0.2×10^{-6}/℃，但在壳体内外温度发生变化时，也会由于膨胀而产生应变量，设为 $\alpha\cdot\Delta T(x,y,z)$，其中 $\Delta T(x,y,z)$表示弹性材料体内任意点的温度变化值（系统内部温差）。将线性应变 $\alpha\cdot\Delta T(x,y,z)$代入式(3)，得到热应力应变公式(4)。

$$\begin{cases}\varepsilon_x=\dfrac{1}{E}[\sigma_x-\mu(\sigma_y+\sigma_z)]+\alpha\cdot\Delta T\\ \varepsilon_y=\dfrac{1}{E}[\sigma_y-\mu(\sigma_x+\sigma_z)]+\alpha\cdot\Delta T\\ \varepsilon_z=\dfrac{1}{E}[\sigma_z-\mu(\sigma_x+\sigma_y)]+\alpha\cdot\Delta T\\ \gamma_{xy}=\dfrac{1}{G}\tau_{xy},\gamma_{yz}=\dfrac{1}{G}\tau_{yz},\gamma_{zx}=\dfrac{1}{G}\tau_{zx}\end{cases}\tag{4}$$

依据表 1 提供的材料参数，将三维模型特征导入 Solidworks Simulation 软件。网格化时需要去除倒角、圆角、非必要压槽等零件上的不重要工艺结构，以便对模型进行适当简化，如图 5 所示。

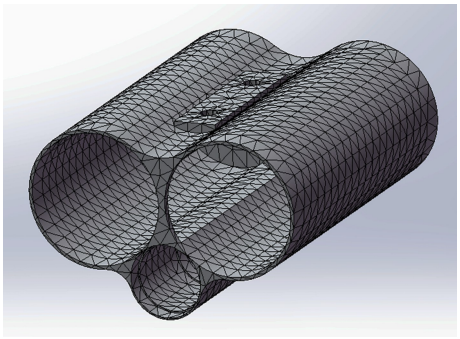


图 5　网格划分

4.2　两种极端温度条件下的热稳定性

主壳体模型的温度不稳定性造成的形变，主要集中在光学系统成像性能、机械结构公差范围等方面，因此热应力应变分析应聚焦于是否超出光学系统和机械结构的许用范围。

在壳体的外表面施加－40 ℃的温度载荷，壳体的内表面施加由光电器件和电路模块导致的温升载荷。外部因温度过低产生收缩，同时内部因发热使壳体膨胀，从而给壳体内外部造成温度梯度。图 6 是该温度变化下主壳体的等效应力应变云图。图中，最大热应力位于壳体内部信息处理电路模块装配部位附近，其值为 2.53 MPa，该值远小于高强型碳纤维环氧树脂材料屈服抗拉强度 2 500 MPa，最大应变为 2.87×10^{-4} mm，这对于光学系统和各机械结构尺寸而言可以忽略不计，即形变对夜视系统性能不会造成影响。

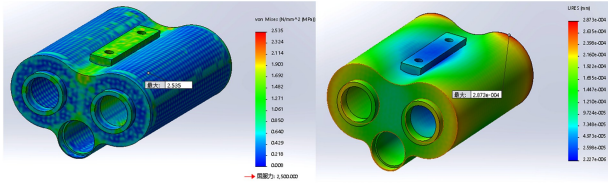


图 6　－40 ℃条件下热应力应变云图

同理，在壳体的外表面施加 50 ℃的温度载荷，壳体的内表面施加由光电器件和电路模块导致的温升

载荷，得到图 7 所示的等效应力应变云图。从图中可以看到，最大热应力为 1.26 MPa，最大形变发生在物镜系统安装框边缘，其值为 1.43×10^{-4} mm，仍远小于系统光学和机械尺寸，可忽略不计。

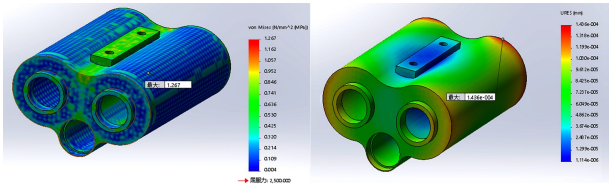


图 7 50 ℃条件下热应力应变云图

上述两种极端温度条件下的热稳定性分析表明，热应力应变既不会对系统光学性能产生影响，也难以对机械结构造成损害，其最大形变均远小于系统的许用范围，从而验证了碳纤维环氧树脂材料是符合设计要求的。

为比较不同材料的热应力应变效果，将壳体材料替换为铝合金材料，同样施加－40 和 50 ℃两种工况，可得到如图 8、9 所示的热应力应变云图。由图 8 可知，壳体承受的最大热应力发生在壳体目镜系统安装框边缘，最大热应力值为 216.14 MPa，较接近于铝合金材料屈服抗拉强度 290 MPa 的临界值，且比高强型碳纤维环氧树脂材料高出 86 倍，最大形变为 3.29×10^{-2} mm，高出碳纤维环氧树脂材料 2 个数量级；从图 9 可以看出，壳体承受的最大热应力发生在壳体中部，最大热应力值为 80.49 MPa，虽然小于铝合金材料的屈服抗拉强度，但与碳纤维环氧树脂材料相比仍高出近 64 倍，该处最大形变为 1.61×10^{-2}mm，也高于后者 2 个数量级。上述分析表明，高强型碳纤维环氧树脂壳体比铝合金壳体有明显的热稳定性优势。

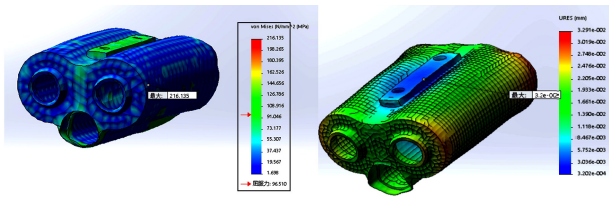


图 8 －40 ℃条件下热应力应变云图

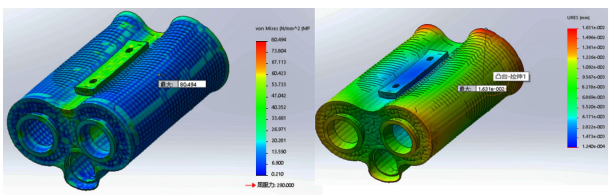


图 9 50 ℃条件下热应力应变云图

5 结论

本文基于双目头戴夜视系统大视场、轻量化需求，在设计了物镜光学系统和目镜光学系统机械装配结构的基础上，依据各元器件尺寸，选用高强型碳纤维环氧树脂作为壳体材料，优化设计了重量仅为 103 g 的夜视系统主壳体结构，利用有限元分析软件仿真了－40 和 50 ℃两种极端温度条件下的热应力应变结果，最大形变分别为 2.87×10^{-4} mm，1.43×10^{-4} mm，该数量级的形变量对系统光学性能和机械结构的影响都可忽略不计，表明主壳体具有良好的热稳定性，这对加快大视场头戴夜视系统整机研发周期、降低研发成本具有重要意义。

参考文献：

[1] 詹启海，常本康，钱芸生，等. 头盔式双目微光夜视仪研制[J]. 红外技术，2005，27(1)：19-22.
Zhan Qihai，Chang Benkang，Qian Yunsheng，et al. Research of night vision imaging system on head-binocular[J]. Infrared Technology，2005，27(1)：19-22.

[2] 孙爱平，胡健钏，安长亮，等. 基于微光头盔观察、悬挂式红外夜视仪光学系统设计[J]. 红外技术，2022，44(12)：1278-1286.
Sun Aiping，Hu Jianchuan，An Changliang，et al. Optical system design of suspended infrared night vision based on low light level helmet observation[J]. Infrared Technology，2022，44(12)：1278-1286.

[3] 洪乙又，周继德，杨 帆，等. 用于头盔式微光夜视仪的轻量化光学系统设计[J]. 光电子技术，2020，40(3)：186-189，194.
Hong Yiyou，Zhou Jide，Yang Fan，et al. Design of lightweight optical system for helmet-mounted low-level-light night vision device[J]. Optoelectronic Technology，2020，40(3)：186-189，194.

[4] 张 勇，马飒飒，李志伟，等. 低照度固体成像夜视头戴系统物镜设计[J]. 光学与光电技术，2022，20(6)：16-22.
Zhang Yong，Ma Sasa，Li Zhiwei，et al. Design of objective lens of night vision head-mounted system for low illumination solid imaging[J]. Optics & Optoelectronic Technology，2022，20(6)：16-22.

[5] 贾世奎，张 轩，杨 凌，等. 主动红外夜视摄像系统的结构设计[J]. 舰船科学技术，2017，39(13)：125-128.
Jia Shikui，Zhang Xuan，Yang Ling，et al. Structural design of an active infrared night vision camera system[J]. Ship Science and Technology，2017，39(13)：125-128.

[6] 郝 芳，张 平，杨海金，等. 浅析光纤倒像器固有误差对应用的影响[J]. 应用光学，2022，43(6)：1153-1157.
Hao Fang，Zhang Ping，Yang Haijin，et al. Influence of inherent error of fiber-optic image inverter on application[J]. J.

of Appl. Opt.，2022，43(6)：1153-1157.

[7] 邱亚峰，钱芸生，刘　磊，等. 夜视环境分析及头盔式微光夜视仪的设计[J]. 红外技术，2005，27(3)：219-222.
Qiu Yafeng，Qian Yunsheng，Liu Lei，et al. Analyse of night-sight surroundings & design of low-light night observing instrument on helmet[J]. Infrared Technology，2005，27(3)：219-222.

[8] 张　勇，马飒飒，李志伟. 美军微光夜视头戴系统技术进展[J]. 红外，2022，43(6)：12-19.
Zhang Yong，Ma Sasa，Li Zhiwei. Technical progress of low-light-level night vision head-mounted system in US military[J]. Infrared，2022，43(6)：12-19.

[9] 张小华. 美国哈里斯公司推出低照度作战功能增强的双筒夜视望远镜[J]. 红外，2016，37(11)：41.
Zhang Xiaohua. Harris company of the United States launched a binocular night vision telescope with enhanced low illumination combat function[J]. Infrared，2016，37(11)：41.

[10] 金伟其，陶　禹，石　峰，等. 微光视频器件及其技术的进展[J]. 红外与激光工程，2015，44(11)：3167-3176.
Jin Weiqi，Tao Yu，Shi Feng，et al. Progress of low level light video technology[J]. Infrared and Laser Engineering，2015，44(11)：3167-3176.

[11] 孟　瑞，邱亚峰. 便携式双传感器夜视镜壳体可靠性分析与设计[J]. 红外技术，2014，36(10)：791-795.
Meng Rui，Qiu Yafeng. Reliability analysis and design of the shell based on portable dual sensor night vision goggles[J]. Infrared Technology，2014，36(10)：791-795.

[12] 任桃桃，邱亚峰. 头盔式单目低照度CMOS夜视仪结构设计与分析[J]. 红外技术，2016，38(8)：653-658，677.
Ren Taotao，Qiu Yafeng. Structure design and analysis of monocular low illumination CMOS night vision device for helmet[J]. Infrared Technology，2016，38(8)：653-658，677.

[13] 党更明，高　明，吕　宏. 双波段共口径连续变焦光学系统设计[J]. 西安工业大学学报，2022，42(6)：578-587.
Dang Gengming，Gao Ming，Lü Hong. Design of a dual-band and common-aperture continuous zoom optical system[J]. J. of Xi'an Technological University，2022，42(6)：578-587.

[14] 金启豪，陈　娟，彭立明，等. 碳纤维增强树脂基复合材料与铝/镁合金连接研究进展[J]. 材料工程，2022，50(1)：15-24.
Jin Qihao，Chen Juan，Peng Liming，et al. Research progress in joining of carbon fiber-reinforced polymer composites and aluminum/magnesium alloys[J]. J. of Materials Engineering，2022，50(1)：15-24.

[15] 李　力，李训牛. 直升机飞行员头盔夜视系统视觉及舒适性优化技术分析[J]. 红外技术，2017，39(10)：890-896.
Li Li，Li Xunniu. Analysis of optimization technology for a night vision system for helicopter pilots with special focus on the visual characteristics and comfort[J]. Infrared Technology，2017，39(10)：890-896.

作者简介：

周　斌(1979—)，男，河南省修武县人，博士，主要研究方向为光电智能系统设计；

曹安港(1988—)，男，河南省商丘市人，博士，主要研究方向为精密仪器结构设计。