

光电侦察装备高原环境试验研究

李忠升¹, 王佳笑¹, 刘学俊¹, 张德斌², 宋余华²,
王晔², 刘亚飞², 廖彩红¹

(1. 63870 部队, 陕西 渭南 714200; 2. 江苏曙光光电有限公司, 江苏 扬州 225009)

摘要: **目的** 保证光电侦察装备高原环境的使用和长期存放要求, 满足军用光电器材高原环境适应性, 提高光电侦察装备在高原条件下的应用效能, 保障武器系统的作战效能。**方法** 基于光电侦察装备的高原试验需求, 分析高原环境的特点以及对参试人员、测试保障装备和光电侦察装备的影响, 提出光电侦察装备高原试验的保障思路, 设计高原试验的评估方法, 并进行理论分析、高原环境模拟试验和高原实地试验验证。**结果** 5 km 以下海拔高度, 每上升 1 km, 气压下降约 100 kPa; 5000~20 000 m, 随着海拔高度的上升, 气压变化速度变缓, 光电装备内部高压的绝缘强度有随之下降的趋势。**结论** 光电侦察装备高原环境试验通过高原环境模拟试验条件可以提前暴露高原实地应用存在的问题, 高原环境模拟试验结合高原实地实际条件试验, 可以高效解决光电侦察装备的高原环境试验问题。

关键词: 军用器材; 光电侦察; 高原环境模拟试验

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2019.11.009

中图分类号: E92

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2019)11-0045-06

Plateau Environment Test for Photoelectric Reconnaissance Equipment

LI Zhong-sheng¹, WANG Jia-xiao¹, LIU Xue-jun¹, ZHANG De-bin²,
SONG Yu-hua², WANG Ye², LIU Ya-fei², LIAO Cai-hong¹

(1. Unit 63870, PLA, Weinan 714200, China; 2. Jiangsu Shuguang Optoelectronics Co., Ltd., Yangzhou 225009, China)

ABSTRACT: **Objective** To ensure the use and long-term storage requirements of the photoelectric reconnaissance equipment in the plateau environment, meet the environmental adaptability of the military photoelectric equipment, improve the application efficiency of the photoelectric reconnaissance equipment under the conditions of the plateau, and ensure the operational effectiveness of the weapon system. **Methods** Based on the plateau test of the photoelectric reconnaissance equipment, the characteristics of the plateau environment and the impact on the test personnel, test support equipment and photoelectric reconnaissance equipment were analyzed. The guarantee idea of the plateau test of the photoelectric reconnaissance equipment was put forward. The evaluation method of the plateau test was designed and the theoretical analysis, the plateau environment test and plateau field test were carried out. **Results** At altitude higher than 5 km, the air pressure dropped by about 100 kPa for every increase of 1 km. At 5000-20 000 m, the pressure changed slowly with the increase of altitude. The insulation strength of the high voltage inside the optoelectronic equipment decreased accordingly. **Conclusion** The plateau environmental test of the photoelectric reconnaissance equipment can expose the problems of the plateau field application in advance through the conditions of the plateau environment simulation test. The plateau environment simulation test combined with the plateau field actual condition test, can effectively solve the plateau environment test problem of photoelectric reconnaissance equipment.

KEY WORDS: military equipment; photoelectric reconnaissance; plateau environment simulation experiment

我国是一个多高原多山地的国家, 全国陆地总面积的60%以上地区海拔在1 km以上, 33%以上地区的海拔超过2 km, 16%以上地区的海拔超过3 km^[1]。高海拔地区多属于边境地区。由于边境高原地区的地理位置比较特殊, 近年来随着周边形势的变化, 高原军事斗争准备的深入推进, 高原环境适应性已成为各装备定型试验的必考内容。未来战争模式的变化给作战装备提出了更全面的要求, 武器装备不仅需要具备全面的战技指标要求, 同时还需要适应复杂的战场环境条件。因此, 通过环境试验手段尽早地全面评价和鉴定新研制光电装备的实际作战能力, 以及满足战时需求的程度, 将在未来的作战中对战局产生重大影响^[2]。定型试验是在接近实战条件下对新装备进行全面考核, 确定其战技性能和作战使用性能是否达到研制总要求和设计定型试验大纲所进行的试验。光电侦察装备作为武器装备的重要组成部分, 无论是单独使用还是配属于其他武器系统, 其高原环境适应性已成为使用单位关心的重要内容。目前, 承试单位进行的高原环境适应性试验, 基本上都是在高原实地环境下对武器装备的主要技术性能进行考核, 有些指标只能进行简单的功能性试验, 时间短、科目少, 不能充分验证高原环境适应性能, 不能高效揭示存在的设计缺陷。因此, 开展光电侦察装备的高原环境试验研究已成为迫切需要。

1 光电侦察装备对高原环境试验的需求

低气压是高原环境的一个典型特征。研究表明, 随着空气压力或空气密度的降低, 电子产品的外绝缘强度会出现下降。这对于军工电子产品的影响不可小视^[3], 严重时会影响到产品的正常使用。在海拔5 km范围内, 高度每升高1 km, 平均气压会下降7.7~10.5 kPa, 电子产品的外绝缘强度则会下降8%~13%。绝缘强度的降低, 将会导致均匀电场气体间隙间出现电压击穿。1889年, 帕邢根据平行平板电极的间隙击穿试验结果得出了帕邢定律, 表征了均匀电场气体间隙的击穿电压、气体压力和电极距离之间的关系定律。

$$U_0 = \frac{a \times (p \times d)}{\ln(p \times d)} + b \quad (1)$$

式中: U_0 为击穿电压; a 、 b 为常数, 与气体的成分有关, 在标准气压下, $a=43.66$, $b=12.8$; p 为气体的压力; d 为电极的距离。

描述击穿电压、气体压力和电极距离之间的关系曲线如图1所示。

军用光电侦察装备作为军工电子的特殊产品之一, 通常包括白光、CCD、微光、热像等侦察手段。经过多年发展, 随着产品集成度的提高, 现在的光电

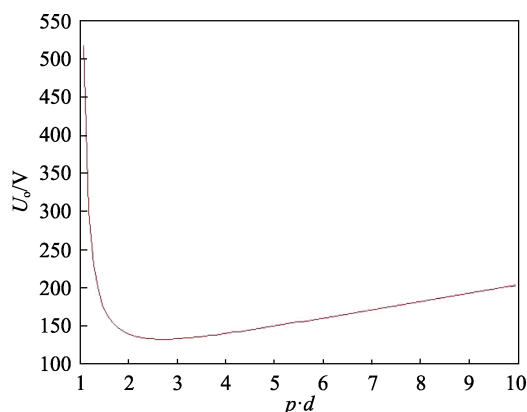


图1 帕邢曲线

侦察装备已经逐渐集成了激光测距以及照射等特殊功能。由于激光产品内部存在几百伏左右的充电电压、近千伏左右的封锁电压以及上万伏左右的打火电压, 多路高压同时并存一方面使得光电产品内部电磁环境复杂, 同时对产品电气绝缘强度也提出了较高要求。尤其是高原环境的低气压条件下, 产品内部电气绝缘强度的下降及密封性能的降低, 将会直接影响到产品的性能。因此需要对该类光电侦察装备在交付用户之前进行充分的性能检测。

军用装备试验室环境试验方法的第2部分低气压(高度)试验规定了通用武器装备高原环境试验需求在于确定装备在常温的环境条件下, 通过高原环境模拟试验条件, 判断被试装备耐受高原实地环境的能力; 检验被试装备在高原环境模拟试验条件下能否正常工作; 验证被试装备在空气压力快速变化的条件下能否耐受^[4]。军用光电测角仪的试验方法中要求光电侦察装备在经历高原环境模拟试验后被试产品仍能正常工作; 被试产品壳体及零部件不能产生变形; 被试产品的气密性能不能受到破坏^[5]而下降。末制导激光测距目标指示器的试验方法中要求光电侦察装备应能够在57 kPa的气压下正常工作; 同时被试产品能经受18.8 kPa的快速减压, 减压试验恢复到正常气压环境条件下, 被试产品仍能工作, 战术性能不能下降; 不得出现产品密封性能遭到破坏、电子元器件性能下降和光学零件膜层损坏、低密度材料发生化学及物理变化而失去其作用^[6]等情况。

根据通用环境试验方法, 结合前期军用光电侦察装备在高原实地试验中暴露的问题, 以及用户关心的高原环境试验科目, 总结军用光电侦察装备高原环境试验的基本需求如下: 在高原低气压试验条件下, 被试产品应能够耐受与实际使用条件对应的高、低温环境温度以及低气压环境, 确保被试产品能够正常工作, 性能不下降; 耐受快速减压的空气压力变化; 产品壳体及零部件不能够产生变形; 产品密封性不能够被破坏; 电子元器件和光学零件不能够损坏; 低密度材料不能够发生物理及化学变化而失去其作用; 产品观瞄及侦察性能不能够有所下降。

光电侦察类产品高原环境模拟试验的目的都是用于考察被试品对高原环境模拟试验条件的环境适应能力,确认被试品能否承受高原实地环境,验证产品能否在使用地理位置耐受快速减压的空气压力变化,仍然能够正常工作,确认被试品在经历过高原环境模拟试验后是否存在器件损伤的情况。研究表明,3 万 m 以上的高空由于空气特别稀薄,因此安装或工作在航天器、特种飞机和导弹上的设备,当飞行高度超过 3 万 m 时,不存在低气压问题^[7],上面总结的试验方法不适用。

2 高原环境特点及对光电侦察装备环境试验的潜在影响

根据军用光电侦察装备高原环境试验需求,从高效完成试验任务、装备快速形成战斗力角度出发,分析了高原环境特点、被试光电侦察装备、试验保障人员、试验保障装备等人机环因素对试验带来的潜在影响。

2.1 高原环境

由于光电侦察装备一般采用密封工艺提高产品的可靠性,低温、低气压的条件对光电侦察装备会带来密封性能下降,导致产品出现漏气、内部高压电路绝缘强度下降等潜在影响使得产品性能下降。高原地区地势崎岖不平坦,周边变化较大,道路路面较窄,条件相对较差,加上上下坡较多,有的坡道又长又陡,而且弯道也比较多还特别急,道路运输条件相对平原条件较为恶劣,会导致被试产品的机动保障装备行驶不安全^[8]。

2.2 试验保障人员

高原环境缺氧是对试验保障人员最大的影响。视觉对缺氧最为敏感,当海拔高度超过 4 km 以上时,人在夜间的视力会明显下降;在海拔 2 km 时,大部分人的记忆力便开始受到影响;海拔 3 km 时,人各方面思维能力将全面下降,其中判断力下降尤为明显;海拔 5 km 左右时,人的记忆会出现薄弱,这个时候很难同时记住两件事情了。在高原环境下,人体通过呼吸和皮肤排出的水分为同一纬度平原地区人体排出水分的 2 倍,表现为口干、唇干。高原环境下人的血压相对于平原的血压会升高,呼吸也从 60、70 次/min 升高到上百次每分钟。因此,在高原实地环境下,人的反应速度会下降,动作会迟缓,耐受性会降低,意识会恍惚,对考核光电装备的某些性能指标时会有一定影响,对评价武器装备的架设和撤收时间、操作性能及人机环特性有一定的影响,尤其是夜间操纵光电侦察装备的情况下,整个试验的准备、实施、撤收时间将明显延长。

2.3 被试光电侦察装备

太阳辐射、紫外线辐射量对一些高分子材料的破坏作用不可忽视,特别是对有机材料的老化效应尤为显著。高原环境下,太阳的辐射愈加强烈,结合昼夜间较大的温差综合作用,对光电侦察装备壳体表面的油漆涂层老化和龟裂会起到加速作用。

高原实地条件下,光电侦察装备光学系统内部密封圈、密封胶等的物理和化学性质会发生变化,增大气体泄漏率,造成装备内部光学谐振腔发生扭曲变形,降低出光效率。密封性能的下降,在电场强度较强的电极附近慢慢会产生局部放电现象,产生炭化形成杂质,恶性循环使绝缘强度越来越低,严重时会发生空气间隙击穿,使得设备不能正常工作。因此,高原实地环境下对光电侦察类产品的电气性能也会产生影响,特别是以空气作为绝缘介质的光电侦察装备,低气压环境对其影响更明显^[9]。

低气压与常压试验条件下,光电侦察装备产品内部各高压部件的绝缘强度对比关系如图 2 所示。

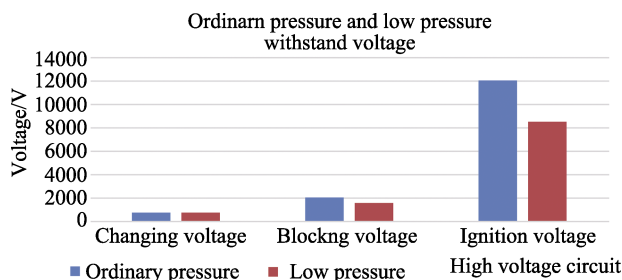


图 2 光电侦察装备产品内部各高压部件的绝缘强度

低温和低气压环境的结合会使光电侦察装备光学系统的镜头曲率发生一定变化,造成成像质量下降,进而影响观瞄效果。高原实地条件下,辐射和强风沙也会使装备使用寿命出现下降^[10]。

高原地区常年保持着零下气温,目标背景温度较平原变化大,热效应较为明显。4500 m 以上的高海拔地区,背景相对单调,光辐射强度较高,车辆在行驶过程中,与背景产生十分明显的温差^[11],运动类车辆目标在高原寒冷气候条件下红外特征会更加明显。高原地区空气稀薄,大气对光的衰减效应比平原地区大幅下降,高原空气稀薄使光电装备侦察距离更远,更利于光电侦察装备对目标的侦察。

2.4 试验保障装备

高原环境下,气压及温度的下降,导致保障车辆发动机起动困难,热负荷增大,排放恶化,造成动力性和经济性降低,需要充分考虑保障的预案。某装备在高原夜间制热时,由于高原大气含氧量低,不充分的燃油燃烧,使得燃油加热器产生大量炭黑,堵塞进气孔,造成多次自动关机^[12]。

高原地区海拔高,地形复杂,多高山陡坡,多低

温,无线通信较为困难,长时间的冻土层加大了有线通信的架设难度。这些气候原因所带来的问题都将直接影响通信装备的稳定性和效能的发挥,给通信联络带来诸多的不稳定性。在发生意外情况时,带来的后果有可能会是致命的^[13],而光电侦察装备的使用通常需要伴随通信保障,对高原环境的通信保障也提出了较高的要求。

3 高原环境试验的考虑

3.1 试验思路

高原环境的特殊性需要光电侦察装备在设计上采取相应的技术和防护措施,保证武器装备不受高原环境的损害正常工作,满足高原环境的长期存放和使用要求,保证可靠性。同时通过必要的模拟高原试验,减轻试验人员高原不适的影响。

第一步:检查装备是否在外观、防静电和雷击、电子产品散热与防击穿、光学系统设计、人员的防护等方面考虑高原环境的影响,是否考虑了高原环境适应性设计。即使产品一时能通过高原实地试验,但因其未进行相应的高原环境防护设计,其在高原长期工作的可靠性是值得怀疑的。

第二步:通过模拟高原环境的平原试验,合理减少高原实地试验的工作时间,减轻试验保障人员高原不适应的压力。

第三步:在高原实地长期存放试验环节,主要考核被试装备处于高原实地环境下的长期适应能力。考虑到高原实地与平原环境之间的主要差异为低气压应力、低温应力、白天夜间的温度冲击应力、太阳辐射应力、雷电应力,因此也可采用低气压贮存试验、低温贮存试验、温度冲击试验、太阳辐射试验、静电荷试验以及外部电磁辐射试验进行高原实地环境的模拟试验。模拟高原试验后对主要检查被试装备的外观有无油漆龟裂、变色,有机材料是否老化,产品的密封性能,被试装备各项电气及其他功能是否正常。若以上检查满足要求,则认为被试装备满足高原实地环境的长期存放要求。

第四步:性能试验环节,主要考核被试装备的各项性能是否满足规定的要求。对于光电侦察装备,性能考核分为光电装备的探测、识别距离性能考核以及输出性能考核。由于高原空气稀薄,背景与目标温差大的原因,光电装备的侦察距离一般要大于平原。若装备有专门的高原性能指标,则严格按照要求考核其在高原实地的性能;若装备没有专门的高原性能指标,可以参照平原指标进行。试验中要严格控制试验条件,尤其是红外性能的考核,要严格控制试验温差条件。对于激光装备,应重点考察激光装备的激光能量、测距能力等主要输出指标是否满足指标要求。

从被试光电侦察装备在高原条件下的性能、不被破坏的能力、环境因素的适应性三方面形成完整的评价体系,能够定量地、有针对性地反映光电侦察装备对高原环境的适应能力,符合现实情况,具有较强的可操作性^[14]。

3.2 试验方法和手段

早期项目研制过程中,由于未明确高原使用条件,没有针对高原环境进行适应性设计,因此一些产品在高原条件下使用出现了问题。近年来,随着周边环境的变化,高原环境的使用需求越来越迫切。

根据高原气候的气候特点,结合人员及陪试装备的承受能力,总结了高原环境试验采取模拟高原试验与高原实地试验测试结果相结合的试验评估方法,可以合理、准确、有效地反映光电装备产品在高原条件的技术性能水平,评估方法及步骤如图3所示。

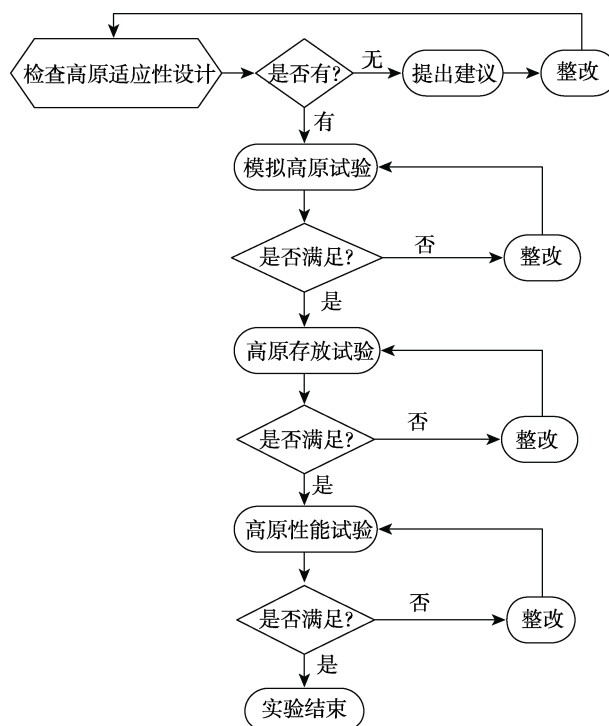


图3 测试评价方法流程

针对高原环境的低温、低气压以及产品实际使用过程中可能存在的运输条件,试验过程可以根据式(2)和式(3)对应的温度-高度关系进行单项试验或与运输条件综合的多项试验,全面考察模拟高原环境产品的适应性,试验之前需先检查产品的密封性能。

3.3 试验结论及分析

某型号光电装备产品在样机研制阶段,考虑了高原环境的设计,采用了气压、温度、运输等条件的模拟高原试验,对产品的电气性能进行了检测。检测过程中发现,低气压条件下,产品内部高压电路爬电、

漏电造成绝缘强度下降,导致工作异常的情况,提前暴露了高原环境可能遇到的问题。进行增加高压线距以及点胶等工艺技术改进后,在模拟高原试验条件下产品工作正常。

针对高压电缆接线柱、电接头等粘接环节在模拟高原条件下的绝缘强度下降问题,经过试验验证,测试比较了几种绝缘胶的电绝缘强度,见表 1。

表 1 绝缘胶粘剂的特性比较

名称	击穿强度/(kV·mm ⁻¹)	表面固化时间/min
SG-14	15	150
南大-704	14	3~30
南大-705	15	3~25

试验证明,SG-14 号高压绝缘胶能够有效解决光电侦察装备类激光产品中高压电路在模拟高原试验条件下爬电漏电等问题。通过高压电路及连接部位的点胶工艺,提高了产品在模拟高原环境条件下的适应性。

针对部分导线在模拟高原试验条件下绝缘强度下降的情况,测试比较了几种硅橡胶绝缘高压安装导线的耐压强度,见表 2。

表 2 绝缘高压安装导体的特性比较

名称	试验直流电压/kV	导体直流电阻/(Ω·km ⁻¹)
AGG-5 1*0.2	5	≤87.24
AGG-10 1*0.3	10	≤68.01
AGG-15 1*0.2	15	≤87.24

试验证明,AGG-15 1*0.2 硅橡胶绝缘高压安装导线能够有效解决光电侦察装备类激光产品中高压打火电路在模拟低气压条件下爬电漏电等问题;AGG-5 1*0.2 硅橡胶绝缘高压安装导线能够有效解决光电侦察装备类激光产品中高压封锁及充电电路在模拟高原试验条件下爬电漏电等问题。通过更换高压绝缘导线,提高了产品在模拟高原环境条件下的适应性。

高原海拔高度与低气压条件之间的关系为:

$$P = e^{[5.25885 \times \ln(288.15 - 0.0065 \times h) - 18.2573]}$$
 (2)

式中: P 为当前高原海拔高度对应的低气压值, kPa; h 为当前高原海拔高度, m。

高原海拔高度与温度之间的关系为:

$$t = 20 - 0.02 \times h \times 0.3$$
 (3)

式中: t 为当前海拔高度下对应的温度, °C。

高原海拔高度与低气压以及高原海拔高度与温度之间的关系如图 4 所示。

通过上述试验方法进行模拟高原试验之后,在设计定型阶段的高原实地试验全面考核中,产品未出现电气性能上的任何质量问题,有效地缩短了高原试验的周期。涉及到产品光学识别及探测能力的高原性能

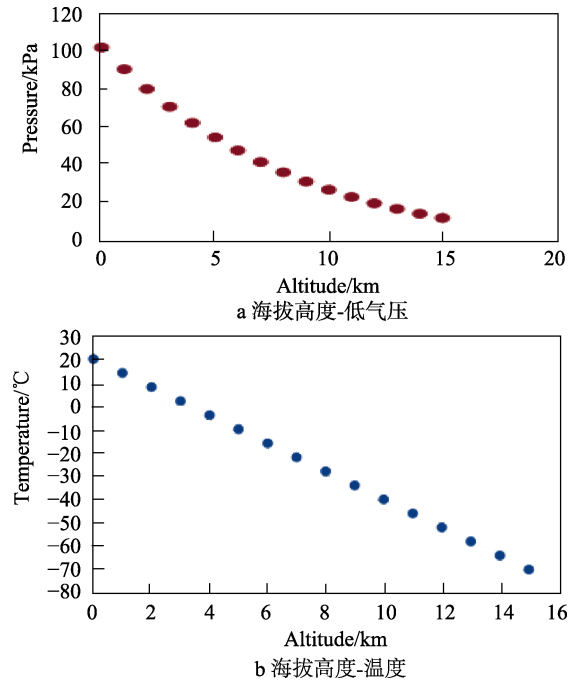


图 4 高原海拔高度与低气压和温度之间之间的关系

检测,由于缺乏模拟测试手段,在高原实地环境条件下进行了测试,通过多人综合评判的方式,未发现与理论设计出现大的出入。

4 研制建议

目前,光电侦察装备普遍按照海拔几千米的高度设计,通过采取一定的设计及工艺技术措施,基本能够满足海拔几千米的高原环境条件的使用要求。考虑到后续可能出现的极端气候环境以及更高海拔条件下的高空环境下进行使用,因此有必要对武器装备采取进一步的应对及改进措施^[15]。

4.1 小型化、轻量化设计

光电侦察装备已经从白光单一观瞄设备逐渐发展为多功能的智能化光电装备,功能强大的同时,对装备的集成化设计也提出了更高的要求,根据作战使命,结合各功能模块的应用环境,合理进行集成化或者积木式设计需要重点考虑。研究报告中称,对于单兵而言,较为理想的负重应该控制在 25~40 kg 之间。要在短时间内达到这个目标有三种方式:尽量少地携带装备和物资、尽可能地减轻装备自重以及采用更先进的携行方案^[16]。根据《超负荷步兵战士》的报告,现代战场上的士兵通常需要携带相当于自身体重 1/2 的装备和物资执行作战任务,这极大地影响了士兵们的战斗力。过高的单兵负重主要从两个方面拖了战斗力的后腿:一是造成大量因疲劳性损伤导致非战斗力减员;二是影响士兵在战斗中的灵活性和机动能力。因此作为配备于前沿阵地的光电侦察装备必须进行小型化轻量化设计。

4.2 可靠性设计

为了保证光电武器装备高原环境长期使用的可靠性,在研制环节应考虑高原环境防护设计,重点考虑以下几个方面。

1) 外观及表面设计。高分子材料建议选用具有较好的耐寒、臭氧、热氧、光、大气老化性能的三元乙丙橡胶,适应高海拔山地地区紫外光线照射。金属表面防护建议选用环氧-聚酰胺底漆和丙烯酸聚氨酯面漆复合涂层,具有优异的防腐、耐候性能,可以适应高原地区日照强、风沙大的环境特点。

2) 电子设备设计。电子元器件选用应重点考虑高原气候特点,选用满足高原环境要求的开关、接插件和电线保护套等军品级器件,并采取灌封设计、密封措施,选用软胶电线、防尘接插件,采用耐低温、防紫外线的电子元材料,使设备能满足高原环境下的工作要求。加大高压、大电流信号的板上线间距,加大爬电距离是提高高压电路板印制线间及板间击穿电压的有效方法,但是必然会增加电路板板面面积,增加设备的体积和质量。也可以采取空间走线的技术手段把平面爬电变为空间的电气间隙,将部分高压印制线通过高压导线加绝缘套管进行在空间进行电气连接,提高击穿电压^[17],适应高原环境。

3) 光学系统设计。针对高原环境对光学系统的影响,针对性解决措施建议:改进完善光学设计,改变非球面光学镜片数目,减小高原环境带来的光学离焦效应;在校正方法上进行工艺保证,对离焦量进行补偿;选用特殊材料的光学材质,降低离焦效应。为了减少高原环境下强光辐射、长时间的风沙对光电侦察装备使用寿命的影响,可以对光学零件镜头膜层镀制工艺进行选择。如镀制金刚膜,既可防止紫外线进入,又可有效保护光学系统不被风沙损坏,同时保证光学性能。

5 结语

随着装备战术技术指标的不断完善,光电侦察装备的高原环境试验已成为基地试验的常态。高原地区由于其使用环境的特殊性,决定了光电侦察被试装备和参试和保障设备在设计、研制过程中必须充分考虑高原环境因素的影响,提高光电侦察装备的高原环境适应性,保证光电侦察装备高原环境的长

期存放和使用要求。

文中总结的绝缘胶以及绝缘导线可以在光电侦察装备早期研制过程或者高原试验出现绝缘强度下降影响产品性能时参考使用。密封性-高度-温度-振动等高原环境单项以及多项综合模拟的试验方法与步骤,模拟高原试验与高原实地试验测试相结合的试验评估方法对光电侦察装备的研制及试验过程具有一定的借鉴意义。

参考文献:

- [1] 孙立军,蔡汝山.高原环境对电工电子产品的影响及防护[J].电子产品可靠性与环境试验,2010,28(4): 15-18.
- [2] 王凯,赵定海,闫耀东,等.武器装备作战试验[M].北京:国防工业出版社,2010: 1-5.
- [3] 赵世宜,胡立成,吴娟,等.低气压环境对军用电工电子产品的影响[J].装备环境工程,2009,6(5): 100-102.
- [4] GJB 150. 2A,低气压(高度)试验[S].
- [5] GJB 5231—2004,军用光电测角仪通用规范[S].
- [6] GJB 5129—2002,末制导激光测距目标指示器规范[S].
- [7] 史光梅,王易君,罗群生,等.浅析我国军工产品低气压(高度)试验方法标准[J].装备环境工程,2013,10(1): 91-97.
- [8] 许翔,周光猛,郑智,等.高原环境对保障装备的影响及适应性研究[J].装备环境工程,2010,7(5): 100-103.
- [9] 赵斌,郭赞洪,唐其环,等.浅析低气压对装备及元器件的影响[J].装备环境工程,2016,13(5): 180-183.
- [10] 刘章龙,赵徐成,胡涛.基于高原环境的保障装备适应性技术研究[J].装备环境工程,2016,13(2): 34-38.
- [11] 陆智,沈卫东,王盛春,等.高原环境对车辆红外隐身效能的影响及对策[J].车辆移动电源,2016(1): 48-50.
- [12] 王坚,王保贵,张晨,等.高原气候环境对装备影响及适应性措施[J].环境适应性与可靠性,2013(6): 25-28.
- [13] 张一品,向阳,张弛.高原和高寒环境对通信装备的影响分析[J].无线互联科技,2015(3): 3-4.
- [14] 赵徐成,马俊伟,朱逸,等.保障装备高原环境适应性研究[J].环境适应性与可靠性,2014(5): 27-30.
- [15] 俞一鸣,赵广彤.高原环境对防空武器装备的影响及改进措施[J].现代防御技术,2011,39(2): 172-175.
- [16] 周立星.单兵负重超额,外军怎么破解[N].中国国防报,2018-05-28(04).
- [17] 李卓成.帕邢击穿特性及在空间高电压设计中的应用[J].空间电子技术,2015(6): 8-13.