doi:10.3969/j.issn.1671-637X.2015.12.017

温度对车载瞄准镜成像质量影响的仿真研究

姜文韬[1]， 李国璋[1]， 任国全[1]， 李冬伟[1]， 陈 诚[2]
（1.军械工程学院,石家庄 050003； 2.中国人民解放军78638部队,四川 什邡 618408）

摘 要：为了研究温度对车载瞄准镜成像质量的影响,在分析温度变化对光学系统结构参数影响的基础上,以某火炮瞄准镜为研究对象,建立其光学系统模型,通过设置不同的环境温度对系统模型进行了仿真分析。利用弥散斑的均方根值来表征光学系统的成像质量,得到了不同温度下该瞄准镜成像质量的变化规律。仿真结果表明:该瞄准镜在低温环境下的成像质量总体优于高温环境,并且在-20 ℃左右达到最优。此研究为进一步评估温度对车载光电系统成像性能的影响打下了良好基础,为新型车载瞄准镜的环境适应性设计提供了重要的参考。

关键词：车载瞄准镜；光学系统；温度；成像质量；仿真
中图分类号：TH745 **文献标志码**：A **文章编号**：1671-637X(2015)12-0080-04

Simulation of Temperature Influence on Imaging Quality of Vehicle-Mounted Sight

JIANG Wen-tao[1], LI Guo-zhang[1], REN Guo-quan[1], LI Dong-wei[1], CHEN Cheng[2]
(1. Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China; 2. No. 78638 Unit of PLA, Shifang 618408, China)

Abstract: In order to study the influence of temperature on imaging quality of vehicle-mounted sight, the influence of temperature variation on structure parameters of the optical system was analyzed. Based on which, and with some wheeled artillery sight as the study object, the optical system model was established, and simulation analysis was made to the system model by setting different ambient temperatures. The root-mean-square value of diffused spots was used to represent the imaging quality of optical system, and the change law of imaging quality for this sight at different temperatures was obtained. Simulation results show that the imaging quality of this sight at low temperature is better than it at high temperature as a whole, with the best quality at about -20 ℃. This study lays a foundation for further evaluating the influence of temperature on the imaging performance of vehicle-mounted photoelectric system, and is of great reference value to the environmental adaptability design of new vehicle-mounted sight.

Key words: vehicle-mounted sight; optical system; temperature; imaging quality; simulation

0 引言

坦克装甲车辆观察、搜索、识别、跟踪和瞄准目标的任务,基本上都是靠直接观察的光学瞄准镜完成[1]。瞄准镜如同坦克装甲车辆的眼睛,为指挥员提供战场态势信息,为射手提供观察、搜索和瞄准目标的通道,其性能的优劣直接影响了坦克装甲车辆战斗力的强弱[2]。为了提高搜索、识别、跟踪和瞄准目标的能力,炮长主瞄准镜通常采用变倍光学系统。当系统工作于低倍通道时,视场较大,主要用于战场监视和目标搜索。当系统在高倍通道工作时,视场较小,主要用于目标瞄准、跟踪和射击。然而,随着战场环境的复杂化,特别是高海拔环境下的光学系统,它们所承受的温度、压力及太阳辐射与平原地区相差较大,使得其结构参数发生变化,从而引起成像质量的变化,而在以上诸多影响因素中,温度是最主要的。因此,研究温度对车载瞄准镜成像质量的影响对于车载瞄准镜环境适应性设计具有重要的意义。

目前的研究大都是对航天领域光学系统的成像质量进行仿真分析,如文献[3]分析了温度对三线阵测绘相机传递函数的影响;文献[4]利用有限元分析计算了轴向温差对空间遥感器光学系统成像质量的影响;文献

收稿日期:2015-02-04 **修回日期**:2015-03-04
作者简介:姜文韬(1990—),男,四川德阳人,硕士生,研究方向为光电系统环境适应性设计。

[5]根据矩阵光学理论和温度的变化对一个特定的星敏感器光学系统的像面位移进行了计算，而关于温度影响地面坦克装甲车辆瞄准镜成像质量的研究较为少见。因此，本文以某火炮瞄准镜为研究对象，通过建立其光学系统模型，从定性和定量分析的角度，得到不同温度对瞄准镜光学系统成像质量的影响。

1　温度变化对光学系统的影响

一般设计的光学系统，通常只需满足在常温、常压条件下能正常使用即可。而在高海拔环境下，温度变化的典型范围为 -40 ~ 60 ℃，环境温度的变化影响着光学系统的结构参数，进而影响着系统的成像质量。

温度变化对光学系统的影响主要表现在以下 3 个方面[6]：

1）温度变化使光学元件折射率和空气折射率发生变化；

2）温度变化使光学元件厚度和曲率半径发生变化；

3）温度变化使光学元件之间的空气间隔发生变化。

正因为光学系统产生了以上变化，对透过光学系统的光束来说，光程也随之改变，系统的焦距亦因此而改变。温度均匀变化所引起的单个透镜焦距的变化为[7]

$$\Delta f = \left(X_g - \frac{\beta_g - n_g \cdot \beta_a}{n_g - n_a} \right) \cdot f \cdot \Delta T \qquad (1)$$

式中：f 为透镜的焦距；Δf 为焦距的变化量；ΔT 为温度的变化值；n_g 为透镜折射率；n_a 为空气折射率；β_g 和 β_a 分别为透镜折射率温度系数和空气折射率温度系数；X_g 为透镜热膨胀系数。

光学系统焦距的变化使得理想成像面偏离了像接收器的光敏面，造成系统离焦，使像点在像接收面上形成弥散斑，直接导致成像质量下降[8]，如图 1 所示。

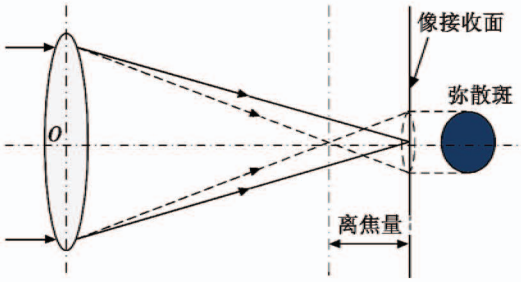

图 1　系统离焦示意图

Fig. 1　Diagram of system defocus

2　系统仿真分析

2.1　光学系统建模

火炮瞄准镜一般安装于炮塔顶部，其光学系统主要由大物镜、变倍物镜组、棱镜和目镜等组成。正是由于变倍物镜组可以轴向移动调节，其可分为低倍和高倍光学系统。光学系统在工作时，目标光线由无穷远处入射，经大物镜和变倍物镜会聚到焦面上，再经棱镜转折 90° 平行出射，最后成像在系统的目镜上。本文研究的某车载瞄准镜采用图 2 和图 3 所示的光学系统。

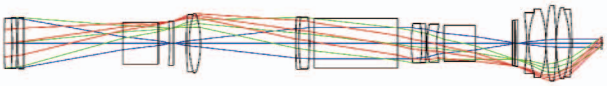

图 2　低倍光学系统结构图

Fig. 2　The structure diagram of low power optical system

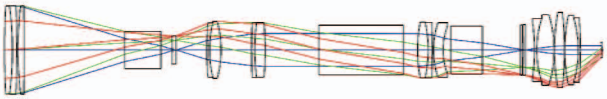

图 3　高倍光学系统结构图

Fig. 3　The structure diagram of high power optical system

一个物点发出的所有光线经光学系统后，由于像差的存在，像面上不再是一个集合点，而是一个弥散斑，称之为点列图[9]。点列图中点的分布可以近似地代表像点的能量分布，利用这些弥散点的密集程度能够衡量系统成像质量的好坏，密集程度越高，成像质量越好。原始的光学系统点列图如图 4 和图 5 所示。

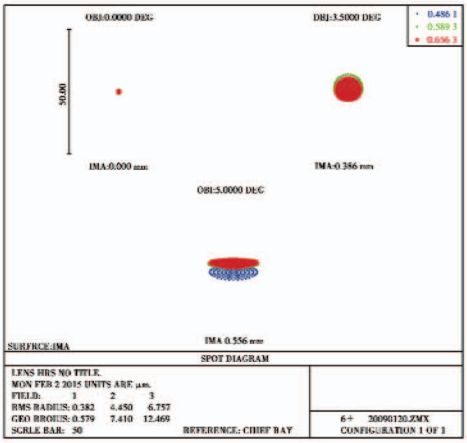

图 4　低倍光学系统点列图

Fig. 4　The spot diagram of low power optical system

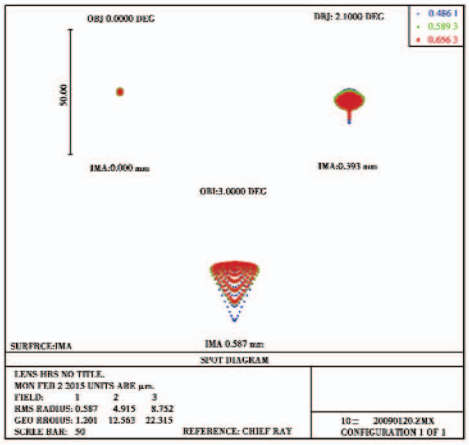

图 5　高倍光学系统点列图

Fig. 5　The spot diagram of high power optical system

从系统的点列图可以看出，在设计环境条件（设计温度为20 ℃）下，瞄准镜光学系统均存在一定的像差，并且视场中央目标的成像质量优于视场边缘目标，低倍系统的成像质量优于高倍系统。

2.2 温度均匀变化系统性能分析

保持其他环境因素不变，对瞄准镜光学系统在温度均匀变化下成像质量的变化进行分析。在ZEMAX光学设计软件里，通过多重数据结构定义不同的温度环境，最后使用点列图来对系统进行像质评价。图6和图7是瞄准镜光学系统在不同温度下的弥散斑。

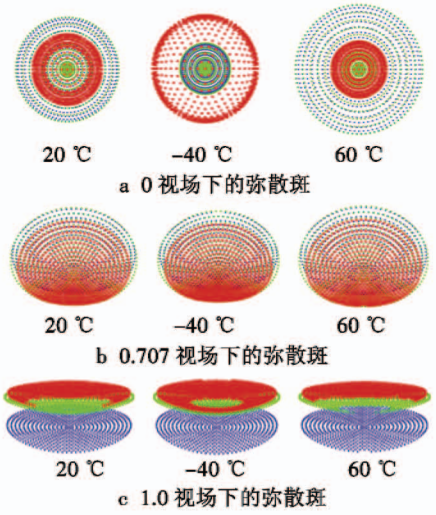

图6 低倍系统不同温度下的弥散斑

Fig. 6 The dispersed spots of low power system at different temperature

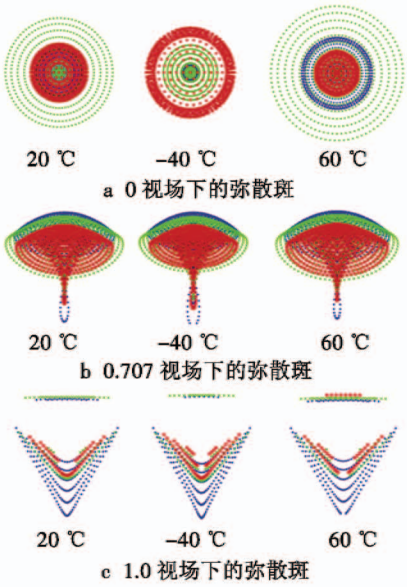

图7 高倍系统不同温度下的弥散斑

Fig. 7 The dispersed spots of high power system at different temperature

根据图6和图7可以看出，温度均匀变化会造成瞄准镜光学系统的成像质量发生变化。对0视场下的系统弥散斑进一步分析发现，当温度为-40 ℃时，低倍系统和高倍系统的弥散点最密集，能量最集中；当温度为60 ℃时，低倍系统和高倍系统的弥散点密集程度最差，能量最分散，说明瞄准镜光学系统视场中央目标的成像质量在-40 ℃时最好，在60 ℃时最差。

点列图中弥散斑的密集程度可以用两个量来评价，一个是几何最大值（GEO），另一个是均方根值（RMS）。几何最大值是以参考光线点为中心，包含所有光线的最大圆的半径，反映了像差的最大值。均方根值则是每条光线交点与参考光线点的距离的均方根，反映了光能的集中程度，与几何最大值相比，更能反映系统的成像质量[10]。均方根值越小，则弥散点越密集，成像质量就越好。为了更清晰地观察和对比瞄准镜光学系统成像质量随温度的变化规律，每隔10 ℃建立一个温度环境结构，得到其成像的点列图，进而使用均方根值来评价不同温度下系统的成像质量，仿真结果如表1、图8和图9所示。

表1 系统不同温度下的均方根值

Table 1 System RMS at different temperature

温度/	低倍光学系统/μm			高倍光学系统/μm		
°C	0视场	0.707视场	1.0视场	0视场	0.707视场	1.0视场
-40	0.347	4.214	6.775	0.546	4.690	13.844
-30	0.343	4.261	6.806	0.524	4.723	13.906
-20	0.344	4.305	6.878	0.517	4.755	13.719
-10	0.350	4.345	6.908	0.523	4.787	13.569
0	0.359	4.385	6.916	0.538	4.817	13.617
10	0.370	4.417	6.942	0.560	4.846	13.598
20	0.382	4.450	7.000	0.587	4.915	13.495
30	0.396	4.483	7.066	0.616	4.906	13.283
40	0.410	4.512	7.137	0.647	4.932	12.982
50	0.424	4.538	7.172	0.679	4.957	12.915
60	0.439	4.563	7.188	0.711	4.981	12.907

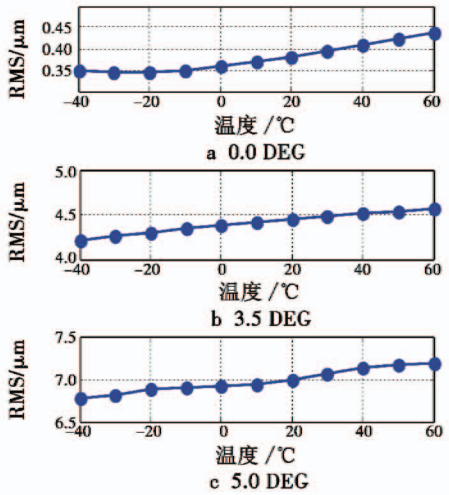

图8 低倍系统成像质量的变化曲线

Fig. 8 Change curve of imaging quality of low power system

根据表1中的仿真结果并结合图8和图9可以明

显看出，高倍系统各视场的弥散斑均方根值基本上都比低倍系统的仿真值大，说明高倍系统的成像质量更差一些。无论是何种系统，何种温度，瞄准镜光学系统视场边缘的弥散斑均方根值相比视场中央的弥散斑均方根半径值总体上都要大，说明瞄准镜成像过程中视场中央目标的成像质量最好。对仿真结果进一步分析发现，随着温度的增大，对于视场中央的目标，低倍和高倍系统的成像质量均是先逐渐变好而后又逐渐变差，并且在 -20 ℃左右达到最好，说明在低温环境下瞄准镜光学系统视场中央目标的成像质量比高温环境要好；对于视场边缘的目标，低倍系统的成像质量逐渐变差，而高倍系统的成像质量却逐渐变好，说明在低温环境下，低倍系统视场边缘目标的成像质量要比高温环境好，而高倍系统视场边缘目标的成像质量比高温环境要差。为了使车载瞄准镜能够适应各种极端环境，一方面可以在光学系统设计初始阶段，将温度等环境因素考虑进去，采用光学被动消热差方法来合理选择材料和设计结构，另一方面可以在光学结构中增加自动调焦机构，从而保证该光学系统能够在不同环境中正常使用。

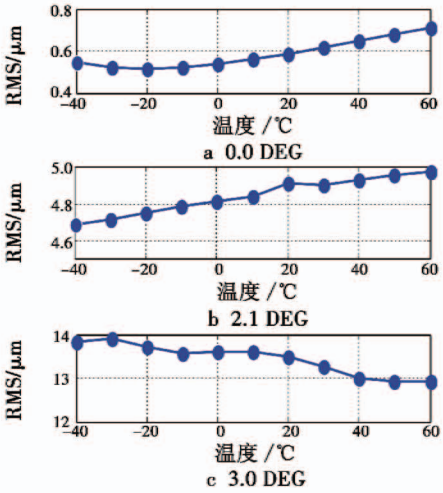

图 9　高倍系统成像质量的变化曲线

Fig. 9　Change curve of imaging quality of high power system

3　结论

本文在分析温度变化对光学系统结构参数影响的基础上，建立了某火炮瞄准镜光学系统模型并进行了仿真分析，得到了不同温度下该瞄准镜成像质量的变化规律。仿真结果表明：该瞄准镜低倍系统的成像质量优于高倍系统，视场中央目标的成像质量优于视场边缘目标，在低温环境下的成像质量总体优于高温环境并且在 -20 ℃左右达到最好。本文的研究成果对进一步分析评估温度对车载光电系统成像性能的影响打下了良好基础，并对新型车载瞄准镜的环境适应性设计具有重要的参考价值。

参考文献

[1]　朱竞夫，赵碧君，王钦钊. 现代坦克火控系统[M]. 北京：国防工业出版社，2003. (ZHU J F, ZHAO B J, WANG Q Z. Modern tank fire control system[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2003.)

[2]　秦叔敏，曹晖. 坦克装甲车辆火控观瞄系统发展趋势分析[J]. 火力与指挥控制，2009, 34(9): 6-9. (QIN S M, CAO H. Development trend analysis of tank and armored vehicle fire control observing and aiming system [J]. Fire Control & Command Control, 2009, 34(9): 6-9.)

[3]　韩旭，马军，黎明，等. 测绘相机的温度适应性[J]. 光学精密工程，2012, 20(6): 1175-1181. (HAN X, MA J, LI M, et al. Temperature adaptation of mapping camera[J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(6): 1175-1181.)

[4]　王红，田铁印. 轴向温差对空间遥感器光学系统成像质量的影响[J]. 光学精密工程，2007, 15(10): 1489-1494. (WANG H, TIAN T Y. Effect of axial temperature difference on imaging quality of space remote sensor optical system[J]. Optics and Precision Engineering, 2007, 15(10): 1489-1494.)

[5]　谭威，罗剑峰，郝云彩，等. 温度对星敏感器光学系统像面位移的影响研究[J]. 光学技术，2009, 35(2): 186-189. (TAN W, LUO J F, HAO Y C, et al. Study of effect of temperature change on the image shifting of the optical system in star sensor[J]. Optical Technique, 2009, 35(2): 186-189.)

[6]　刘小波，杨洪波，孙强. 非制冷焦平面红外热像仪光机热分析[J]. 电光与控制，2009, 16(5): 63-64. (LIU X B, YANG H B, SUN Q. Optical-structure-thermal analysis for UIRFPA thermal imaging system[J]. Electronics Optics & Control, 2009, 16(5): 63-64.)

[7]　OLIVIERI M, PIERI S, ROMOLI A. Analysis of defocusing thermal effects in optical systems[J]. Proceedings of SPIE, 1996, 2774: 283-292.

[8]　许兆林，赵育良，张国栋. 新型航空相机自动调焦系统的设计[J]. 电光与控制，2011, 18(4): 77-80. (XU Z L, ZHAO Y L, ZHANG G D. Design of an auto-focusing system for a new type of aerial camera[J]. Electronics Optics & Control, 2011, 18(4): 77-80.)

[9]　黄振永，卢春莲，俞建杰. 基于 ZEMAX 的光学设计教程[M]. 哈尔滨：哈尔滨工程大学出版社，2013. (HUANG Z Y, LU C L, YU J J. Optical design tutorials based on ZEMAX software[M]. Harbin: Harbin Engineering University Press, 2013.)

[10]　李林. 现代光学设计方法[M]. 北京：北京理工大学出版社，2009. (LI L. Modern optical design method[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2009.)