

温度和气压对车载光学系统成像质量的影响研究

李国璋¹,姜文韬²,任国全¹,李冬伟¹,陈 诚²

(1. 军械工程学院,河北 石家庄 050003;2. 78638 部队,四川 什邡 618408)

摘要:为了研究温度和气压对车载光学系统成像质量的影响,在分析温度和气压变化对光学系统结构参数影响的基础上,以某型履带式装甲侦察车 CCD 摄像机为研究对象,建立其光学系统模型,通过设置不同的温度和气压对系统模型进行了仿真分析。利用光学调制传递函数来表征系统的成像质量,得到了不同温度和气压下系统成像质量的变化规律。仿真结果表明:温度和气压的变化幅度越大,光学系统的成像质量越差,并且气压变化对光学系统成像质量的影响程度大于温度变化。此研究对新型车载光学系统的环境适应性设计提供了重要的参考。

关键词:车载光学系统;温度;气压;成像质量;仿真

中图分类号:TH745 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2016.09.018

Influence of temperature and air pressure on imaging quality of vehicle-mounted optical system

LI Guo-zhang¹,JIANG Wen-tao²,REN Guo-quan¹,LI Dong-wei¹,CHEN Cheng²

(1. Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China;

2. Troops 78638, Shifang 618408, China)

Abstract: In order to study the influence of temperature and air pressure on imaging quality of vehicle-mounted optical system, the influence of temperature variation and air pressure variation on structure parameters of optical system was analyzed. Taking CCD camera of a tracked armoured reconnaissance vehicle as an example, optical system model was established, and the system model was simulated and analyzed by setting different temperatures and air pressures. The imaging quality of optical system was characterized by the optical-modulation transfer function, and the change laws of imaging quality under different temperatures and air pressures were obtained. The simulation results show that the imaging quality of optical system becomes worse when the changes of temperature and air pressure are bigger, and the influence of air pressure changes is bigger than that of the temperature changes. The study has a great reference value for environmental adaptability design of new type vehicle-mounted optical system.

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

1 引言

主战坦克、自行火炮、步兵战车、装甲侦察车等不同类型的军用作战车辆,其装备的光电系统也不同,并且根据不同的功能要求,相同类型的车辆其装备的光电系统也有所不同^[1]。CCD 摄像机作为装甲侦察车中最常用的观瞄光电传感部件,可以完成可见光波段的光学图像到电子图像的转换。它安装在侦

察车平台上,主要用于对目标的昼间观察和瞄准,以及协同其他侦察设备完成夜间和不良天候下的侦察任务。然而,随着战场环境的复杂化,特别是高海拔地区的气候环境表现出温度低、气压低、昼夜温差大、太阳辐射强等特点,使得在此环境下长期工作的光学系统的结构参数发生变化,从而引起成像质量的变化。因此,研究环境因素对车载光学系统成像质量的

影响具有重要的军事意义。本文以某型履带式装甲侦察车 CCD 摄像机为研究对象,通过建立其光学系统模型,从定性和定量分析的角度,得到不同温度和气压对该型 CCD 摄像机成像质量的影响。

2 温度和气压对光学系统的影响分析

2.1 温度对光学系统的影响

温度变化对光学系统的影响主要表现在以下两个方面^[2]:

1) 由于热胀冷缩效应,光学元件的几何结构参数会发生变化。

2) 光学系统的焦距会随光学元件的几何结构参数的变化而发生变化。

温度均匀变化所引起的单一透镜焦距的变化可以由下式给出^[3]:

$$\Delta f = x_f \cdot f \cdot \Delta T \quad (1)$$

式中, f 是透镜的焦距; Δf 是焦距的变化量; ΔT 是温度的变化值; x_f 是透镜的光热膨胀系数。

2.2 气压对光学系统的影响

气压变化主要对空气折射率产生影响。当大气压力变化时,空气密度发生变化,空气折射率也随之改变,进而导致光学元件与空气相对折射率发生变化。

气压均匀变化所引起的单一透镜焦距的变化可以由下式给出^[4]:

$$\Delta f = f \cdot n_g \cdot \left(\frac{n_a - 1}{n_g - 1} \right) \cdot \left(\frac{P - P_0}{P_0} \right) \quad (2)$$

式中, f 为透镜的焦距; Δf 为焦距的变化量; n_g 为透镜折射率; n_a 为空气折射率; P 为周围环境大气压力; P_0 为标准大气压力。由此可见,大气压力减小,焦距随之变小,焦面向透镜方向移动;反之,大气压力增大,焦距随之变大,焦面向远离透镜的方向移动。

2.3 温度和气压对光学系统像面位移的影响

温度和气压的变化将导致光学系统的焦距发生变化,使得理想成像面与探测器成像面不再重合,造成系统像面发生位移,使像点在探测器成像面上形成弥散斑,直接导致探测器成像面上影像模糊,分辨率降低^[5]。

假设光学系统是由 n 组透镜 L_1, L_2, \dots, L_n 组成,各组透镜的焦距分别为 f_1, f_2, \dots, f_n , T_0 为常温, P_0 为常压。因此,先分析温度和气压变化对单个透镜 L_j 的离焦情况,如图 1 所示。

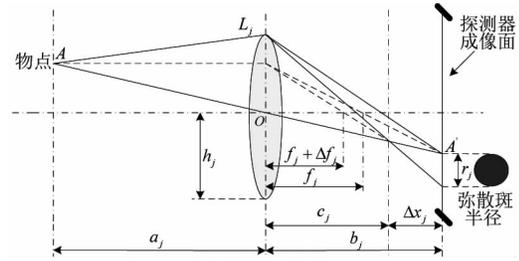


图 1 离焦成像示意图

Fig. 1 Diagram of defocused imaging

图 1 中, A 点为物点; a_j 是物点到透镜平面的距离; b_j 是探测器成像面到透镜平面的距离。当温度为 T_0 , 气压为 P_0 时,透镜的焦距是 f_j ,理想像点到透镜平面的距离恰好也是 b_j ,此时物点的像清晰地聚焦在探测器成像面上;当温度变为 T ,气压变为 P 时,透镜的焦距变为 $f_j + \Delta f_j$,理想像点到透镜平面的距离是 c_j ,此时在探测器成像面上,物点将被弥散为一块圆形光斑。设 h_j 表示透镜的半径, r_j 表示弥散斑半径,根据高斯公式^[6]可以得到:

$$T_0, P_0: \frac{1}{b_j} - \frac{1}{a_j} = \frac{1}{f_j} \quad (3)$$

$$T, P: \frac{1}{c_j} - \frac{1}{a_j} = \frac{1}{f_j + \Delta f_j} \quad (4)$$

式(3)和式(4)相减,可得:

$$\frac{1}{b_j} - \frac{1}{c_j} = \frac{\Delta f_j}{f_j(f_j + \Delta f_j)} \quad (5)$$

透镜 L_j 的垂轴放大率 β_j 为:

$$\beta_j = \frac{f_j}{f_j + a_j} \quad (6)$$

由此可得,透镜 L_j 的像面位移为:

$$\Delta x_j = b_j - c_j = \frac{-\Delta f_j \cdot \beta_j^2 \cdot a_j^2}{f_j(f_j + \beta_j \cdot \Delta f_j)} \quad (7)$$

透镜 L_j 后面的透镜 L_{j+1} 的轴向放大率 α_{j+1} 可表示为:

$$\alpha_{j+1} = \beta_{j+1}^2 \quad (8)$$

式中, β_{j+1} 为透镜 L_{j+1} 的垂轴放大率。那么经过透镜 L_j 后的各组透镜的像面位移为:

$$\begin{aligned} \Delta X_j &= \Delta x_j \cdot \alpha_{j+1,n} \\ &= \frac{-\Delta f_j \cdot \beta_j^2 \cdot a_j^2 \cdot \alpha_{j+1,n}}{f_j(f_j + \beta_j \cdot \Delta f_j)} \end{aligned} \quad (9)$$

式中, $\alpha_{j+1,n}$ 为透镜 L_j 后各组透镜的轴向放大率的乘积,即:

$$\alpha_{j+1,n} = \beta_{j+1}^2 \cdot \beta_{j+2}^2 \cdots \beta_n^2 \quad (10)$$

可以得出整个光学系统的像面位移为:

$$\Delta X = \sum_{j=1}^n \Delta X_j = \sum_{j=1}^n \frac{-\Delta f_j \cdot \beta_j^2 \cdot a_j^2 \cdot \alpha_{j+1,n}}{f_j(f_j + \beta_j \cdot \Delta f_j)} \quad (11)$$

当温度均匀变化时,由式(1)可得,透镜 L_j 的焦距变化量为:

$$\Delta f_j = x_{fj} \cdot f_j \cdot \Delta T \quad (12)$$

式中, ΔT 为温度相对于常温 T_0 的变化量。将式(12)代入式(11),可得温度变化 ΔT 时,整个光学系统的像面位移为:

$$\Delta X_T = \sum_{j=1}^n \frac{-x_{fj} \cdot \Delta T \cdot \beta_j^2 \cdot a_j^2 \cdot \alpha_{j+1,n}}{f_j(1 + x_{fj} \cdot \beta_j \cdot \Delta T)} \quad (13)$$

当气压均匀变化时,由式(2)可得,透镜 L_j 的焦距变化量为:

$$\Delta f_j = f_j \cdot n_{gj} \cdot \left(\frac{n_a - 1}{n_{gj} - 1} \right) \cdot \left(\frac{\Delta P}{P_0} \right) \quad (14)$$

式中, ΔP 为气压相对于常压 P_0 的变化量。将式(14)代入式(13),可得气压变化 ΔP 时,整个光学系统的像面位移为:

$$\Delta X_P = \sum_{j=1}^n \frac{-n_{gj} \cdot \left(\frac{n_a - 1}{n_{gj} - 1} \right) \cdot \left(\frac{\Delta P}{P_0} \right) \cdot \beta_j^2 \cdot a_j^2 \cdot \alpha_{j+1,n}}{f_j \left[1 + \beta_j \cdot n_{gj} \cdot \left(\frac{n_a - 1}{n_{gj} - 1} \right) \cdot \left(\frac{\Delta P}{P_0} \right) \right]} \quad (15)$$

由式(13)和式(15)可得,当温度和气压同时变化时,整个光学系统的像面位移为:

$$\Delta X_{T,P} = \Delta X_T + \Delta X_P \quad (16)$$

3 光学系统建模

本文采用 ZEMAX 光学设计软件^[7]对某型履带式装甲侦察车的 CCD 摄像机光学系统进行建模与仿真分析。如图 2 所示,CCD 摄像机光学系统选用折射系统形式,主要由窗口、单透镜、双胶合透镜和滤光镜组成,其中窗口和滤光镜为平板玻璃,所以曲率半径无限大。光学系统参数为:焦距为 326.184 mm,入瞳直径为 62.5 mm,全视场为 0.9°,波段为可见光 0.48 ~ 0.76 nm,总长度为 342.527 mm。

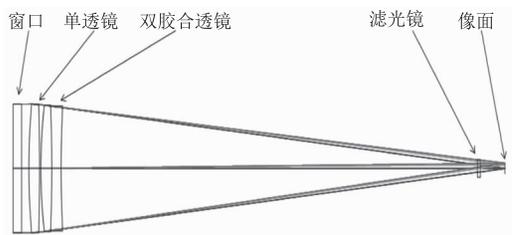


图 2 光学系统 ZEMAX 模型

Fig. 2 ZEMAX model of optical system

在分析光学系统成像性能时,大多数时候都是选用光学调制传递函数 (MTF)。它能全面定量地

反映光学系统衍射和像差所引起的综合效应,是目前被公认的能够评价光学系统实际成像性能的重要指标^[8]。在 ZEMAX 软件中可以仿真得到 CCD 摄像机光学系统在常温常压 (20 °C, 1.0 atm) 下的 MTF 曲线,如图 3 所示。

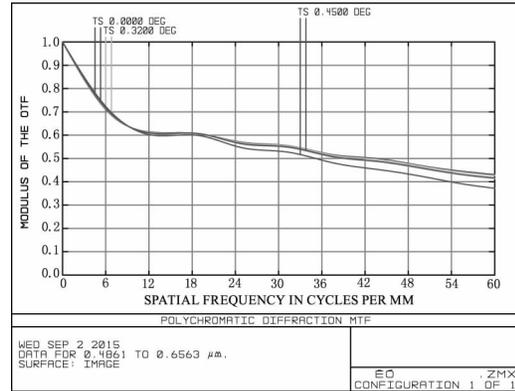


图 3 光学系统 MTF 曲线

Fig. 3 Optical system MTF curve

一般而言,光学系统的 MTF 曲线越高且与坐标轴之间封闭区域的面积越大,则表明光学系统对物体信息的衰减越小,其成像质量越好。由图 3 可以看出,在 60 lp/mm 空间频率处,各个视场的 MTF 值都在 0.4 以上,系统在常温常压下的成像质量良好。

4 系统仿真分析

4.1 温度均匀变化系统成像质量分析

保持大气压力不变,对 CCD 摄像机光学系统在温度均匀变化下的成像质量进行分析。当温度改变时,对原始的光学系统进行多重结构温度特性分析,最后使用 MTF 来对光学系统进行像质评价。为了更清晰的观察和对比光学系统在不同温度下的成像质量,设置最高温度为 60 °C,最低温度为 -40 °C,中间每隔 10 °C 建立一个温度结构。

表 1 列出了空间频率为 60 lp/mm 时,光学系统各个视场在不同温度下的 MTF 值,图 4 给出了对应结果的曲线关系。

根据表 1 中的计算结果并结合图 4 可以看出,无论是哪个视场,哪个方向,随着温度的增大,光学系统的 MTF 值呈抛物线的变化趋势,均是先增大后减小,并且在某一温度处存在最大值。对于 0 视场而言,在温度为 20 °C 时,MTF 值达到最大;而对于 0.707 视场和 1.0 视场来说,MTF 值达到最大所对应的温度并不是常温,这主要是由于光学系统均存在一定的像差。一般情况下,光学系统在成像时,主

要考虑的是系统视场中央区域的成像质量。对于系统视场中央的区域,相对于常温 20 ℃,温度的升高或者降低均会导致其成像质量降低,并且温度变化越大,MTF 值下降越严重,成像质量就越差。对仿真结果进一步分析发现,零下温度比零上温度对光学系统成像质量的影响更大。

表 1 不同温度下的 MTF 值

Tab. 1 MTF values of different temperature

温度/℃	0 视场		0.707 视场		1.0 视场	
	弧矢方向	子午方向	弧矢方向	子午方向	弧矢方向	子午方向
-40	0.214	0.214	0.178	0.138	0.144	0.073
-30	0.258	0.258	0.222	0.181	0.187	0.110
-20	0.305	0.305	0.271	0.230	0.237	0.155
-10	0.351	0.351	0.321	0.283	0.289	0.208
0	0.391	0.391	0.368	0.335	0.341	0.265
10	0.420	0.420	0.405	0.381	0.385	0.322
20	0.431	0.431	0.426	0.414	0.417	0.372
30	0.422	0.422	0.429	0.429	0.430	0.410
40	0.391	0.391	0.409	0.423	0.421	0.428
50	0.341	0.341	0.367	0.393	0.390	0.423
60	0.276	0.276	0.308	0.343	0.337	0.393

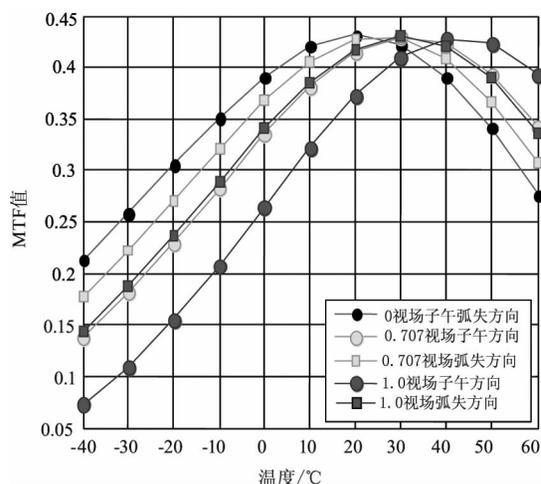


图 4 MTF 值随温度的变化规律

Fig. 4 The change law of MTF values varied with temperature

4.2 气压均匀变化系统成像质量分析

保持温度不变,对 CCD 摄像机光学系统在气压均匀变化下的成像质量进行分析,当气压改变时,对原始的光学系统进行多重结构气压特性分析,最后使用 MTF 来对光学系统进行像质评价。为了更清晰的观察和对比光学系统在不同气压下的成像质量,在多重结构中设置最高气压为 1.0 atm,最低气压为 0.5 atm,中间每隔 0.1 atm 建立一个气压结构。表 2 列出了空间频率为 60 lp/mm 时,光学系统

各个视场在不同气压下的 MTF 值,图 5 给出了对应结果的曲线关系。

表 2 不同气压下的 MTF 值

Tab. 2 MTF values of different atmospheric pressure

气压/ atm	0 视场		0.707 视场		1.0 视场	
	弧矢方向	子午方向	弧矢方向	子午方向	弧矢方向	子午方向
0.5	0.004	0.004	0.016	0.026	0.025	0.033
0.6	0.068	0.068	0.042	0.018	0.021	0.016
0.7	0.177	0.177	0.143	0.105	0.111	0.046
0.8	0.298	0.298	0.263	0.222	0.229	0.148
0.9	0.393	0.393	0.370	0.337	0.343	0.268
1.0	0.431	0.431	0.426	0.414	0.417	0.372

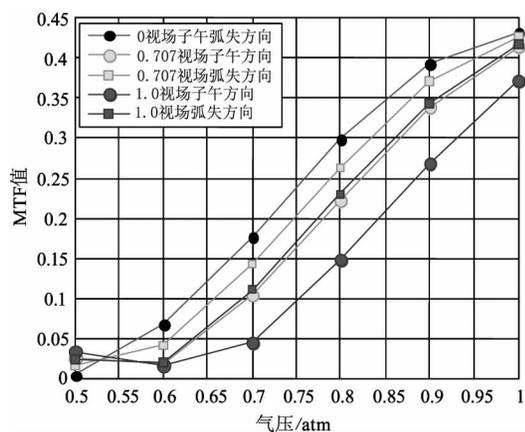


图 5 MTF 值随气压的变化规律

Fig. 5 The change law of MTF values varied with atmospheric pressure

根据表 2 中的计算结果并结合图 5 可以明显看出,当气压降到 0.5 atm 时,无论是子午方向还是弧矢方向,系统各个视场的 MTF 值都接近于零。以常压 1.0 atm 为参考点,随着气压的降低,各个视场的 MTF 值都成单调递减的趋势,由此可以得出结论,气压越低,CCD 摄像机光学系统的成像质量越差。

4.3 温度气压耦合分析

一般而言,随着海拔高度的升高,温度和气压都在同时变化。因此,有必要分析温度和气压均在变化时,CCD 摄像机光学系统成像质量的变化情况。图 6 和图 7 分别给出了系统像面偏移量和系统零视场的 MTF 值(空间频率为 60 lp/mm)随温度和气压的变化规律。(注:像面偏移量为像面位移的绝对值)

由图 6 和图 7 对比分析可以看出,在温度为 -40 ℃,气压为 0.5 atm 下,系统的像面偏移量最大,MTF 值最小;而在温度为 20 ℃,气压为 1.0 atm 环境下,系统的像面偏移量最小,MTF 值最大。由

此可以得出结论, CCD 摄像机光学系统的像面偏移量越小, 成像质量就越好; 反之, 像面偏移量越大, 成像质量就越差, 并且低温低压环境对系统成像质量的影响尤为严重。

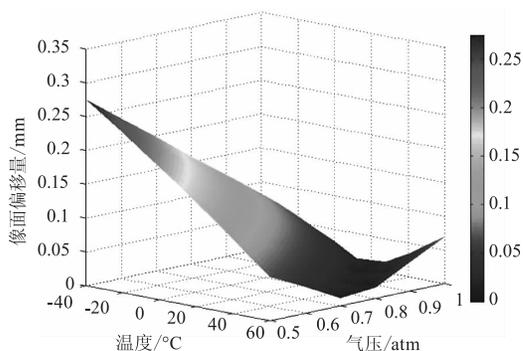


图6 像面偏移量随温度和气压的变化规律

Fig. 6 The change law of image shifting varied with temperature and atmospheric pressure

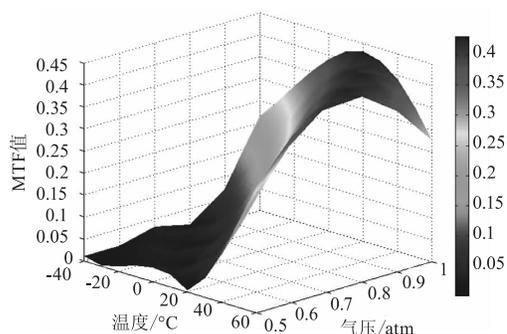


图7 MTF 值随温度和气压的变化规律

Fig. 7 The change law of MTF values varied with temperature and atmospheric pressure

为了进一步地对比分析温度变化和气压变化对光学系统成像质量的影响程度, 针对不同温度和气压下的像面位移, 分别对温度和气压求偏导, 可以得到像面位移对温度、气压的梯度值随温度和气压的变化规律, 如图8和图9所示。

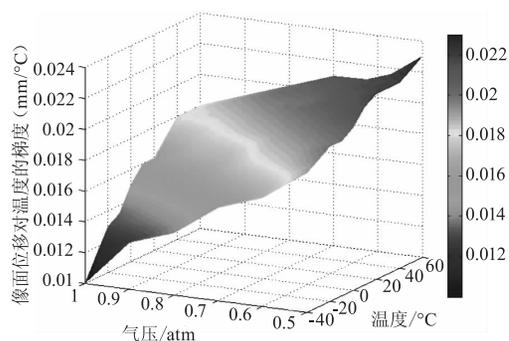


图8 像面位移对温度的梯度值随温度和气压的变化规律

Fig. 8 The change law of gradient of image shifting and temperature varied with temperature and atmospheric pressure

由图8和图9对比分析可以看出, 当像面位移对温度求偏导时, 像面位移对温度的梯度值的最大值不超过0.024; 而当像面位移对气压求偏导时, 像面位移对气压的梯度值的最小值不低于0.026, 说明气压的变化对光学系统像面位移的影响大于温度的变化, 因此可以得出结论, 气压变化对 CCD 摄像机光学系统成像质量的影响程度大于温度变化。

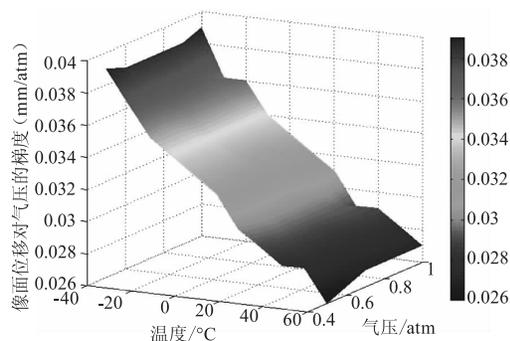


图9 像面位移对气压的梯度值随温度和气压的变化规律

Fig. 9 The change law of gradient of image shifting and atmospheric pressure varied with temperature and atmospheric pressure

5 结论

本文在分析温度和气压对光学系统结构参数影响的基础上, 建立了某型履带式装甲侦察车 CCD 摄像机的光学模型并进行了仿真分析, 以光学调制传递函数为评价指标, 得到了不同温度和气压下该型 CCD 摄像机成像质量的变化规律。仿真结果表明: 温度和气压的变化幅度越大, 光学系统的像面偏移量越大, 成像质量越差, 并且气压变化对光学系统成像质量的影响程度大于温度变化。本文的研究成果对进一步提高车载光学系统的成像性能打下了良好基础, 并对新型车载光学系统的环境适应性设计具有重要的指导意义。

参考文献:

- [1] WANG Xiaopeng, LIANG Yanxi, JI Ming. Military photoelectric technology and system introduction [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011. (in Chinese)
王小鹏, 梁燕熙, 纪明. 军用光电技术与系统概论 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.
- [2] JIANG Wentao, LI Guozhang, REN Guoquan, et al. Influence of temperature variation on imaging blurring of electro-optical system [J]. Laser & Infrared, 2015, 45 (9): 1068 - 1071. (in Chinese)

- 姜文韬,李国璋,任国全,等. 温度变化对光电系统成像模糊的影响研究[J]. 激光与红外,2015,45(9): 1068-1071.
- [3] M Olivieri, S Pieri, A Romoli. Analysis of defocusing thermal effects in optical systems[J]. Proceedings of SPIE. 1996,2774:283-292.
- [4] ZHANG Hongwen. Research on the auto-focusing technology for space camera[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, 2003. (in Chinese)
- 张洪文. 空间相机调焦技术的研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2003.
- [5] XU Zhaolin, ZHAO Yuliang, ZHANG Guodong. Design of an auto-focusing system for a new type of aerial camera [J]. Electronic Optics & Control, 2011, 18(4): 77-80. (in Chinese)
- 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.
- [6] WANG Zhijian, WANG Peng, LIU Zhiying. Optical engineering principle[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010. (in Chinese)
- 王志坚, 王鹏, 刘智颖. 光学工程原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.
- [7] LIN Xiaoyang. Super learning manual of ZEMAX optical design[M]. Beijing: Posts and Telecom Press, 2014. (in Chinese)
- 林晓阳. ZEMAX 光学设计超级学习手册[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2014.
- [8] GU Yingying. The research of image terminal quality assessment for spaceborne optical remote sensor [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, 2013. (in Chinese)
- 顾营迎. 航天光学遥感器图像终端像质评价方法研究[D]. 长春中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2013.