

## 气压对车载光电系统成像质量影响的仿真研究

李国璋<sup>1</sup>, 姜文韬<sup>1,2</sup>, 任国全<sup>1</sup>, 李冬伟<sup>1</sup>, 陈诚<sup>2</sup>

(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:** 为了研究气压对车载光电系统成像质量的影响, 在分析气压变化对光电系统离焦影响的基础上, 建立了气压引起光电系统成像模糊的数学模型。通过建立某轮式火炮瞄准镜的光学系统模型, 并设置不同的环境气压对系统模型进行仿真分析, 最终得到了不同气压下该瞄准镜的成像仿真图像。利用灰度平均梯度法对仿真图像进行评价, 并得出结论: 环境气压越低, 图像越模糊, 该瞄准镜的成像质量越差。此研究对新型车载光电系统的环境适应性设计具有重要的参考价值。

**关键词:** 车载光电系统; 气压; 模糊图像; 成像质量; 仿真

**中图分类号:** TH745 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2016)04-0090-04

## Simulation of Air Pressure Influence on Imaging Quality of Vehicle-Mounted Photoelectric System

LI Guo-zhang<sup>1</sup>, JIANG Wen-tao<sup>1,2</sup>, REN Guo-quan<sup>1</sup>, LI Dong-wei<sup>1</sup>, CHEN Cheng<sup>2</sup>

(1. Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China; 2. No. 78638 Unit of PLA, Shifang 618408, China)

**Abstract:** In order to study air pressure influence on imaging quality of vehicle-mounted photoelectric system, a mathematical model of air pressure leading to image blurring of photoelectric system was established based on the analysis to the influence of air pressure variation on defocusing of photoelectric system. Optical system model of a certain type of wheeled artillery sight was established, the simulation analysis of system model was carried out by setting different ambient air pressure, and simulated images of the sight under different air pressure were obtained finally. Simulated images were evaluated by using gray mean gradient, and the conclusion was summarized: the lower the air pressure, the more blurred the image, and the worse the imaging quality of the sight. The study is of great reference value to environmental adaptability design of new type vehicle-mounted photoelectric system.

**Key words:** vehicle-mounted photoelectric system; air pressure; blurred image; imaging quality; simulation

### 0 引言

随着现代武器系统的迅猛发展, 高精度的光电成像系统因具有良好的机动性和灵活性被广泛应用于机载、车载和舰载侦察观瞄系统, 已成为信息化武器装备中的关键技术之一<sup>[1]</sup>。对于坦克装甲车辆而言, 光电系统如同其眼睛, 主要用来完成对目标的观察与搜索、跟踪与瞄准, 其成像质量的好坏直接影响了坦克装甲车辆战斗能力的强弱<sup>[2]</sup>。然而, 随着战场环境的复杂化, 光电系统实际承受的大气压力和系统最初设计的

大气压力有所不同, 这会使得其光学参数发生变化, 而引起成像质量的变化。因此, 研究气压对光电系统成像质量的影响对于车载光电系统环境适应性设计以及后续的图像恢复具有重要的意义。

关于大气压力对光电系统成像质量的影响, 文献[3-4]都做了相关的研究和试验, 例如文献[3]主要推导了环境压力变化时阿贝数变化对像面移动的影响。其研究的重点大都集中在光学系统的设计和光电系统的调焦两个方面, 没有对大气压力引起光电系统成像质量变化的原因进行深入分析。为此, 本文通过推导建立气压变化引起成像模糊的数学模型, 以某轮式火炮瞄准镜为研究对象, 仿真得到其离焦模糊图像, 从定性和定量分析的角度, 得到不同气压对车载光电系统成像质量的影响。

收稿日期: 2015-04-08

修回日期: 2016-01-04

作者简介: 李国璋(1963—), 男, 河北石家庄人, 教授, 硕士, 研究方向为车辆维修与试验分析。

### 1 气压变化对光电系统的影响

通常设计的光学系统,一般只需考虑在常温、常压条件下能正常使用即可。但是,现代化战争对光学系统的环境适应性要求越来越高。当大气压力变化时,空气密度发生变化,空气的折射率也随之发生变化。空气折射率一旦变化,对通过光学系统传播的光线来说,其光程也发生变化,必然会导致光学系统的像面发生位移,进而影响系统的成像质量。

为了研究方便,光学成像系统可以简化为单个透镜的理想模型。大气压力变化所引起的单一透镜焦距的变化可以表示为<sup>[5]</sup>

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

式中: $f$ 为透镜的焦距; $\Delta f$ 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,大气压力增大将造成焦距变长,焦面向远离透镜的方向移动。

光学系统焦距的变化使得理想成像面与探测器成像面不再重合,造成系统离焦,直接导致探测器成像面上影像模糊,分辨率降低<sup>[6]</sup>,如图1所示。

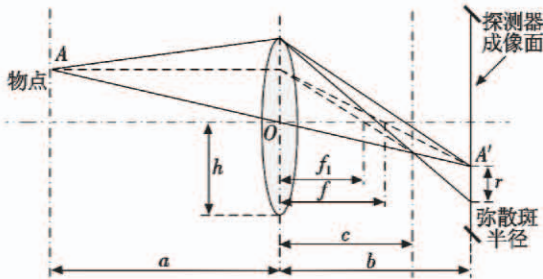


图1 离焦成像示意图

Fig. 1 Diagram of defocused imaging

图1中:A点为物点;a为物点到透镜平面的距离;b为探测器成像面到透镜平面的距离。当气压为 $P_0$ 时,透镜的焦距是 $f$ ,理想像点到透镜平面的距离恰好也是 $b$ ,此时物点的像清晰地聚焦在探测器成像面上;当气压变为 $P$ 时,透镜的焦距变为 $f_1$ ,理想像点到透镜平面的距离是 $c$ ,此时在探测器成像面上,物点将被弥散为一块圆形光斑。设 $h$ 表示透镜的半径, $r$ 表示弥散斑半径,根据高斯公式可以得到

$$P_0: \quad \frac{1}{b} - \frac{1}{a} = \frac{1}{f} \quad (2)$$

$$P: \quad \frac{1}{c} - \frac{1}{a} = \frac{1}{f_1} \quad (3)$$

通过三角形的相似性可得

$$\frac{r}{h} = \frac{b-c}{c} = b \left( \frac{1}{c} - \frac{1}{b} \right) \quad (4)$$

结合式(2)和式(3),可以整理得出弥散斑半径为

$$r = bh \left( \frac{1}{c} - \frac{1}{b} \right) = bh \frac{(f-f_1)}{f \cdot f_1} = \frac{bh \cdot \Delta f}{f \cdot (f - \Delta f)} \quad (5)$$

在实际应用中,由于存在衍射、像差等非理想特性因素,当光电系统发生离焦时,其成像过程中的点扩散函数通常用二维高斯模型来近似<sup>[7]</sup>

$$h(x,y) = \frac{1}{\pi R^2} \exp\left(-\frac{x^2+y^2}{R^2}\right) \quad (6)$$

式中, $R$ 为模糊半径。根据光电探测器成像原理,可以近似得出

$$R = \frac{r}{p} \quad (7)$$

式中, $p$ 为光电探测器的像元尺寸。

对于空间不变线性成像系统,其离焦模糊图像的成像过程可以用数学上的卷积公式来描述

$$g(x,y) = f(x,y) * h(x,y) = f(x,y) * \left[ \frac{p^2}{\pi r^2} \exp\left(-\frac{p^2(x^2+y^2)}{r^2}\right) \right] \quad (8)$$

式中: $f(x,y)$ 为输入图像; $g(x,y)$ 为经成像系统的输出图像。分别用 $F(u,v)$ , $G(u,v)$ , $H(u,v)$ 表示 $f(x,y)$ , $g(x,y)$ , $h(x,y)$ 的傅里叶变换。对式(8)两边做二维傅里叶变换,可得

$$G(u,v) = F(u,v) \cdot H(u,v) = F(u,v) \cdot \exp\left(-\frac{r^2(u^2+v^2)}{4p^2}\right) \quad (9)$$

结合式(1)及式(5)可知,式(8)和式(9)分别表达了在不同大气压力环境下,点目标静止图像与离焦模糊图像之间在时域和频域上的关系,从本质上揭示了光电系统离焦模糊图像的成像机理。

### 2 系统仿真分析

#### 2.1 光学系统建模

火炮瞄准镜通常安装于炮塔顶部,其光学系统主要包括大物镜、变倍物镜组、棱镜和目镜等子系统。系统在工作时,由无穷远处射入的目标光线,通过大物镜、分光棱镜和变倍物镜后,会聚焦在焦面上,再经五角棱镜转折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所示的光学系统。



图2 光学系统图

Fig. 2 The structure of optical system

#### 2.2 大气压力变化下系统性能分析

保持其他环境因素不变,对瞄准镜光学系统在大气压力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大气

压力环境,最后可以通过点列图求得不同大气压力下的系统弥散斑半径。

均方根值(Root Mean Square,RMS)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,所以通常采用均方根值来表示弥散斑的半径<sup>[8]</sup>。为了更清晰地观察和对比瞄准镜光学系统成像质量随大气压力的变化规律,每隔 0.1 atm(1 atm = 101 325 Pa)建立一个气压环境结构,得到不同大气压力下系统的弥散斑半径,仿真结果如表 1 和图 3 所示。

表 1 不同气压下系统的均方根值

Table 1 System RMS under different air pressure

仿真结果	气压/atm	瞄准镜光学系统		
		0 视场	0.707 视场	1.0 视场
均方根值/ μm	0.1	1.012	5.287	7.684
	0.2	0.930	5.193	7.649
	0.3	0.850	5.100	7.585
	0.4	0.771	5.007	7.543
	0.5	0.694	4.914	7.552
	0.6	0.620	4.822	7.441
	0.7	0.550	4.729	7.368
	0.8	0.485	4.637	7.308
	0.9	0.428	4.545	7.161
	1.0	0.382	4.450	7.000
	1.1	0.352	4.358	6.917
	1.2	0.343	4.267	6.809
	1.3	0.354	4.176	6.728
	1.4	0.386	4.085	6.603
	1.5	0.433	3.995	6.499
	1.6	0.491	3.905	6.442
	1.7	0.556	3.815	6.386
	1.8	0.627	3.726	6.329
	1.9	0.701	3.636	6.274
	2.0	0.777	3.548	6.219

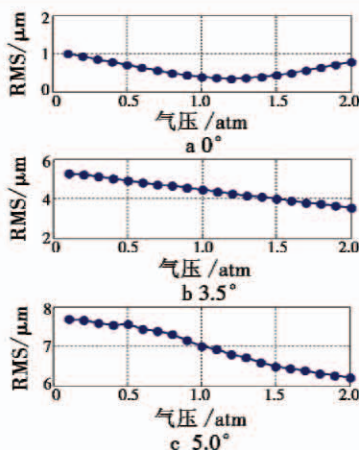


图 3 弥散斑半径的变化曲线

Fig. 3 Curves of radius of dispersed spots

由图 3 可以明显看出,气压变化会造成系统的弥散斑半径发生变化。根据式(8)和式(9)建立的成像模糊的数学模型,利用得到的弥散斑半径,通过 Matlab 软件仿真不同大气压力环境下的离焦模糊图像。通过

对仿真出来的多组图像进行质量评价,可以揭示大气压力变化对成像质量的影响规律。实验仿真的图像如图 4~图 6 所示。



图 4 0 视场下的仿真图像

Fig. 4 The simulated images of 0 field

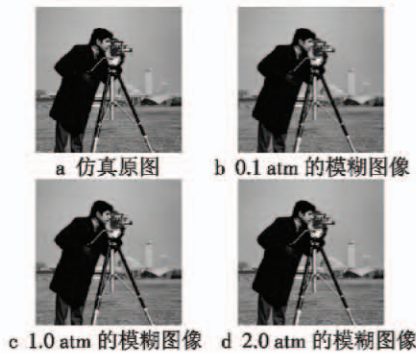


图 5 0.707 视场下的仿真图像

Fig. 5 The simulated images of 0.707 field



图 6 1.0 视场下的仿真图像

Fig. 6 The simulated images of 1.0 field

灰度平均梯度法(Gray Mean Gradient,GMG)是一种无参考图像质量的客观评价方法,是在真实探测环境下判断系统成像质量的潜在手段<sup>[9]</sup>。其定义为

$$G_{GMG} = \frac{1}{(M-1)(N-1)} \times \sum_{x=1}^{M-1} \sum_{y=1}^{N-1} \{ [ [g(x+1,y) - g(x,y)]^2 + [g(x,y+1) - g(x,y)]^2 ] / 2 \}^{1/2} \quad (10)$$

式中, $M$ 和 $N$ 为图像的长和宽。GMG能够较好地反映出图像的细微变化,其值越大表示被测图像越清晰,质量越高。利用灰度平均梯度法对仿真图像进行评价,评价结果如图 7 所示。

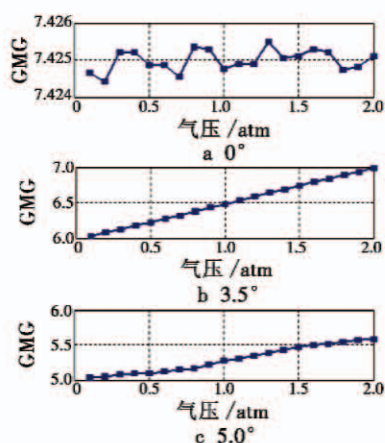


图7 仿真图像的GMG值

Fig. 7 The GMG value of simulated images

由图7可以看出,无论是在何种气压条件下,随着视场角的增大,仿真图像的GMG值会逐渐减小,说明在瞄准镜成像过程中,处于视场中央的目标,其成像质量最好;而处于视场边缘的目标,其成像质量最差。对仿真结果进一步分析发现,随着气压的增大,对于0视场下的仿真图像,其GMG值在7.425上下浮动,且上下浮动不超过0.008%,可以认为其GMG值没有变化,说明气压对处于视场中央的目标的成像质量基本没有影响。对于0.707视场和1.0视场下的仿真图像,随着气压的增大,其GMG值也增大,并且气压每增大0.1 atm,它们的GMG值分别增大0.048和0.027,说明气压越大,处于瞄准镜系统0.707视场至1.0视场之间的目标的成像质量越好,且气压变化对处于0.707视场附近的目标的成像质量影响最大。正常情况下,车载光电系统一般都工作在常压环境下,为了使其能够适应低气压等极端环境,可以在成像系统中增加调焦机构,并且设计图像清晰度评价函数,利用评价函数的反馈结果,实现实时自动调焦,从而保证该光电成像系统能够在不同环境中正常使用。

### 3 结论

本文首先分析了气压变化对光电系统离焦的影响,得出了量化关系式,再结合离焦模糊图像的数学模型,分析表述了气压变化引起图像模糊的成像机理。通过建立某轮式火炮瞄准镜的光学系统模型并进行仿真实验,得到了不同气压下该瞄准镜成像质量的变化规律。仿真结果表明:该瞄准镜视场中央目标的成像质量优于视场边缘目标,并且大气压力越小,图像越模糊,系统的成像质量越差。本文的研究成果对气压变化引起的模糊图像的仿真与恢复具有一定的借鉴意义,也为新型车载光电系统的环境适应性设计提供了重要参考。

### 参考文献

- [1] 矫英祺,任国全,李冬伟. 动载体光电平台图像模糊成像机理研究[J]. 火力与指挥控制, 2015, 40(2): 80-84. (JIAO Y Q, REN G Q, LI D W. Research on imaging mechanism of blurred image on photoelectric platform moving carrier[J]. Fire Control & Command Control, 2015, 40(2): 80-84.)
- [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] 洪新华,杨建峰,陈立武,等. 环境气压对衍折光学系统消二级光谱设计的影响[J]. 激光杂志, 2006, 27(2): 39-41. (HONG X H, YANG J F, CHEN L W, et al. Affect of atmosphere on correction of secondary spectrum by hybrid diffractive-refractive [J]. Laser Journal, 2006, 27(2): 39-41.)
- [4] 杨永彬. 空间光学相机调焦技术研究[J]. 航天器工程, 2011, 20(2): 20-24. (YANG Y B. Study on focusing technique for space optical camera [J]. Spacecraft Engineering, 2011, 20(2): 20-24.)
- [5] 张洪文. 空间相机调焦技术的研究[D]. 长春: 长春光学精密机械与物理研究所, 2003. (ZHANG H W. Research on the auto-focusing technology for space camera [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, 2003.)
- [6] 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]. Electronic Optics & Control, 2011, 18(4): 77-80.)
- [7] 黄德天,吴志勇,刘雪超,等. 一种适用于任意目标的离焦深度快速自动聚焦技术[J]. 光电子·激光, 2013, 24(4): 799-804. (HUANG D T, WU Z Y, LIU X C, et al. A depth from defocus fast auto-focusing technology for any target [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2013, 24(4): 799-804.)
- [8] 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.)
- [9] ZHANG Y, LUO X J, XIA A L, et al. Image quality evaluation and analysis in fourier telescope for laboratory demonstration [J]. Acta Photonica Sinica, 2014, 43(3): 0311001-0311006.