

振动对光电系统成像质量影响的试验研究

矫英祺^{1,2}, 任国全¹, 李冬伟¹, 齐蕴光¹, 柯建新³

(1. 军械工程学院, 石家庄 050003; 2. 中国人民解放军驻127厂军事代表室, 黑龙江 齐齐哈尔 161000;
3. 厦门警备区, 福建 厦门 361009)

摘要: 针对振动影响光电系统成像质量的问题, 利用六自由度隔振系统和图像采集系统组合搭建了相应的模拟光电成像试验系统, 通过振动台试验采集不同振动环境下的图像序列, 对采集到的图像清晰度进行计算来分析振幅和频率等振动的参数对成像质量的影响。试验结果表明, 对于光电成像系统, 振动的振幅相比频率对成像质量的影响更大。对于不同频率的振动, 在各阶频率的振幅相等的情况下, 高频振动对成像质量的影响大于低频振动。试验研究成果对于探索 and 了解振动对光电成像系统成像质量影响的机理研究具有一定的参考和应用价值, 同时对于工程实际中减振方案的设计和减震器的合理选择具有一定的指导意义。

关键词: 光电系统; 像移; 振动; 图像质量评价; 试验

中图分类号: TP753 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2015)06-0047-05

Influence of Vibration on Imaging Quality of Photoelectric System

JIAO Ying-qi^{1,2}, REN Guo-quan¹, LI Dong-wei¹, QI Yun-guang¹, KE Jian-xin³

(1. Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China; 2. Department of Military Representatives in No. 127 Factory, Qiqihar 161000, China; 3. Garrison of Xiamen, Xiamen 361009, China)

Abstract: Considering the effect of vibration on imaging quality of photoelectric system, we established a simulated photoelectric imaging test system based on a 6-FOM vibration isolation system and the image capturing system. Image sequences under different vibration environments were collected through the vibration table tests, and the influence of such vibration parameters as amplitude and frequency on imaging quality were analyzed by calculating the sharpness of the images. Results obtained were studied and discussed in detail, which showed that: 1) Compared with the frequency, the amplitude was even more influential on imaging quality of the photoelectric system; and 2) The effect of the high-frequency vibration was greater than that of the low-frequency vibration under the condition of equal vibration amplitude of different frequencies. The results of the study is useful for the research on the mechanism of influence of vibration to imaging quality of photoelectric system, and can be taken as a reference for the design of vibration isolation and the rational choice of shock absorber.

Key words: photoelectric system; image displacement; vibration; image quality assessment; test

0 引言

振动是影响光电系统成像质量的关键因素。光电成像系统的振动导致感光元件在曝光时间内与目标景物之间产生相对运动, 即像移。像移的存在会导致成像模糊、清晰度下降, 最终严重影响成像质量^[1]。因此,

研究光电系统的振动对其所成图像质量的影响关系, 对光电系统成像性能的提高具有重要意义。

对此问题, 国内外专家学者都做了大量的研究与探索。文献[2]从调制传递函数的角度分析了运动对成像系统性能的影响; 文献[3]分析了机械振动对光学调制传递函数的影响, 量化分析了各种振动形式对图像分辨率的影响; 文献[4]采用IDL语言编程实现了一个仿真原型系统, 对在不同频率和振幅条件下振动所造成的影响进行了图像仿真; 文献[5]建立了一

收稿日期: 2014-07-11

修回日期: 2014-08-01

作者简介: 矫英祺(1990—), 男, 吉林柳河人, 硕士生, 研究方向为车辆振动与冲击防护技术。

套能够模拟产生各种频率和不同量级振幅的地面仿真系统,通过分析和处理采集到的相机图像数据,分析了振动对相机成像质量的影响;文献[6-9]也在这方面做了大量的研究,但以上的研究分析只限于理论上的推导和仿真。

本文通过搭建模拟光电成像试验系统,利用振动台试验来模拟振动环境下光电成像系统所经历的动力学环境,分析研究振动对光电系统成像质量的影响。试验中,利用维视 MV-VEM033SM 工业 CCD 相机和定焦镜头组成模拟光电成像系统,通过分析不同振幅与频率的振动激励下成像系统采集到的图像,研究确定振动的振幅和频率等振动参数对光学成像质量的影响机理,从而为光电成像系统减振装置的优化与改进提供可靠的理论与试验依据。

1 振动产生像移的分析

由于受到光电平台振动的影响,在曝光时间内目标的像呈现在焦面的不同位置,造成了图像的模糊,影响了成像质量。物像和焦平面感光元件之间发生的相对运动即为光学系统振动的具体表现形式。这些相对运动的结果使被拍摄的物点曝光成像在光学系统焦平面的不同位置上,这种光学影像的相对位移使图像质量下降。分析沿光轴(Z轴)的平动、沿垂直光轴平面(X,Y)平动产生的像移的大小,同时,考虑光学镜头固定点振动幅度、相位不一致时角振动产生的像移形式如图1所示。

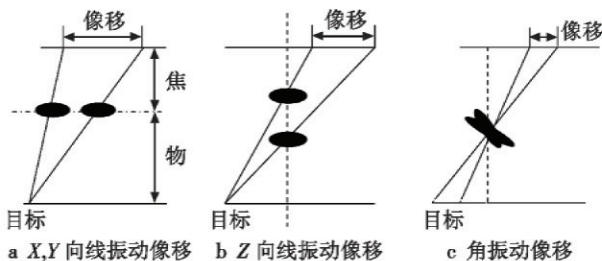


图1 各种振动形式产生的像移

Fig. 1 The images displacements of different vibration forms

根据光学成像理论,图像模糊程度评价^[10]算式为

$$d = \int_0^T V dt \quad (1)$$

式中: d 为像移量, d 越大,图像越模糊; T 为快门反应时间; V 为像移的速度,主要由光电平台的振动所引起的,振动愈激烈, V 愈大,成像愈模糊,图像质量愈差。

2 试验系统的搭建

为了确定振幅和振动频率等振动参数对光学成像质量的影响,本文搭建了相应的模拟光电成像试验系统,主要包括六自由度隔振系统和图像采集系统。试

验中利用水平振动台模拟动载体,用于放置整个试验系统,模拟光电成像系统的左右振动。图像采集系统的正前方10 m处利用十字形靶作为成像目标。搭建的试验系统如图2所示。

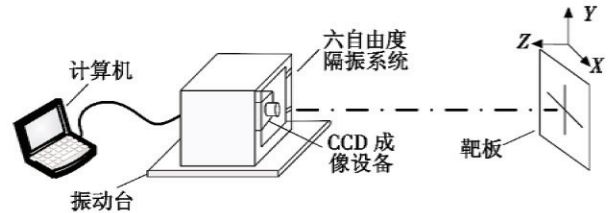


图2 试验系统

Fig. 2 The test system

通过振动台控制计算机设定不同的振动参数,可以实现不同振幅、不同频率的正弦振动。振动台的参数如表1所示。

表1 振动台参数

Table 1 Parameters of the vibration table

名称	数值
最大正位移极限/mm	12.50
最大负位移极限/mm	12.50
最大速度峰值/($m \cdot s^{-1}$)	1.10
最大加速度值/ g 数	15.00
最小驱动频率/Hz	5.00
最大驱动频率/Hz	1500.00
最大驱动电压峰值/V	10.00
振动方向	水平方向

图像采集系统包括 Microvision 公司 MV-VEM033SM 工业 CCD 相机和 H0514 定焦镜头。其中,镜头焦距为 8 mm, CCD 相机采用数字面阵 CCD 逐行扫描的方式,最大分辨率为 640×480 ,像元尺寸为 $5.6 \mu m \times 5.6 \mu m$,最高采样频率为 120 帧/s。

3 试验与分析

3.1 振动台试验方法

按照第2节中所搭建的试验系统光路,通过调整试验环境的光照条件、镜头光圈、相机的曝光时间及帧频等,直至采集到亮度均匀、适中的目标十字靶的像,如图3所示。

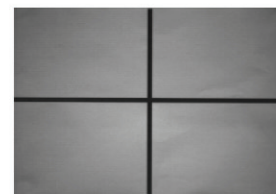


图3 静止状态的十字靶像

Fig. 3 The cross in the stationary state of target image

试验中,通过振动台控制计算机可以根据不同的需求设定不同的振动加速度和振动频率产生不同类型

的振动,通过振动台加载到光电平台上,进而通过平台传递到图像采集系统上。同时,控制计算机可以实时地显示振动激励信号的频谱,以便与采集到的图像进行比较和分析。

在不同的振动激励过程中,分别采集不同振动工况下的十字靶像。通过结合相对应的振动激励,分析每组试验所采集到的图像,研究振动的振幅和频率等振动参数对光学成像质量的影响机理。

3.2 不同振动工况的连续图像采集

根据试验需求及试验器材的实际情况,整个试验共分 3 组,分别设定振动频率为 10 Hz,20 Hz,30 Hz。根据振动台的参数设置,由于正弦振动的位移峰值与振动加速度成正比,所以每组试验中分别设置大小为 0.5g,1g 和 2g 的振动加速度进行试验。开启振动台及图像采集系统,模拟光电成像系统沿水平方向开始做正弦运动,同时 CCD 相机采集的图像通过图像采集卡显示、保存在计算机中。

每组试验中均采集一定时间的图像序列,然后对每组图像进行像移量的计算,从而确定振动工况下图像的运动情况。以振动频率为 30 Hz,振动加速度分别为 0.5g,1.0g 和 2.0g 为例,在相同的曝光时间内,以 120 帧频对图像进行采集。然后,对采集到的各帧图像进行像移量的计算,像移曲线分别如图 4a ~ 图 4c 所示。由于设置振动台是沿水平方向做正弦运动的,Y 方向的像移量接近于零可以忽略不计,试验中不予考虑。

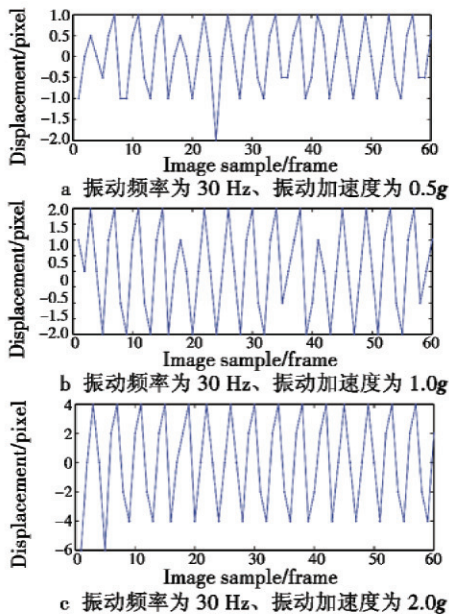


图 4 不同振动条件下的像移曲线

Fig.4 The image displacement curves under different vibration conditions

由于振动试验过程中图像采集初始相位存在随机

性,很难控制采集到正弦振动的峰值点和中值点,如图 4 所示。由于图像采集的初始相位与曲线峰值相位之差不是采样周期(即帧频)的整数倍,采集到的图像序列不能覆盖正弦曲线的峰值位置,虽然不能良好完整地表征曲线幅值特征,但位移曲线总体上符合正弦变化趋势。

3.3 图像清晰度计算

根据图 4 中的位移曲线,并结合正弦运动的特性可知,中值点(即零点)附近的运动速度最快,而峰值点的运动速度最慢,接近于零,这就意味着 2 个对应时刻采集到的图像所对应的式(1)中的 V 不同,即像移量 d 不同,从而导致图像的清晰度也不同。所以,通过提取峰值及中值两个特征点对应的图像进行清晰度的分析计算。图 5 ~ 图 7 所示为振动加速度分别为 0.5g,1.0g 及 2.0g,振动频率分别为 10 Hz,20 Hz 及 30 Hz 时的峰值图像和中值图像。由图可明显看出,振动的峰值图像与中值图像的清晰度区别较大;而在频率相同的情况下,振动加速度越大,对应的图像越模糊;此外,振动加速度相同时,振动的频率越高,CCD 相机曝光时间内的偏移量越大,图像的模糊程度也越大。

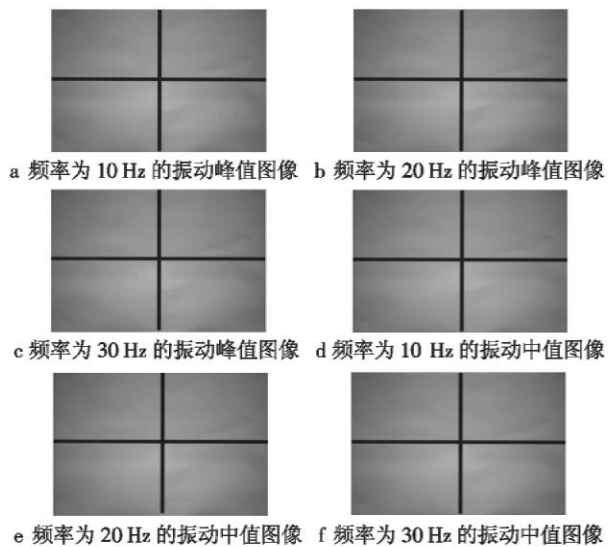
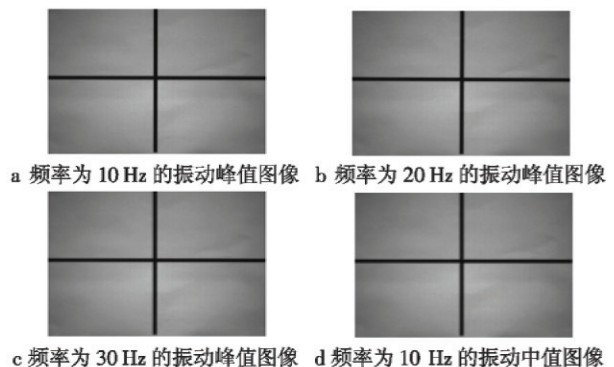
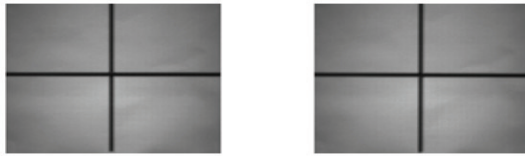


图 5 振动加速度为 0.5g 的图像

Fig.5 The images of vibration with acceleration of 0.5g

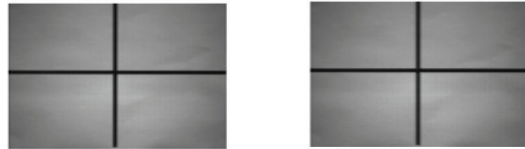




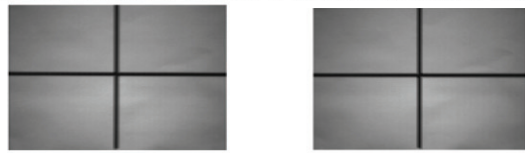
e 频率为 20 Hz 的振动中值图像 f 频率为 30 Hz 的振动中值图像

图 6 振动加速度为 1.0g 的图像

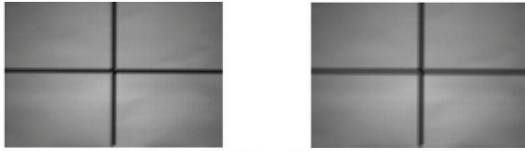
Fig. 6 The images of vibration with acceleration of 1.0g



a 频率为 10 Hz 的振动峰值图像 b 频率为 20 Hz 的振动峰值图像



c 频率为 30 Hz 的振动峰值图像 d 频率为 10 Hz 的振动中值图像



e 频率为 20 Hz 的振动中值图像 f 频率为 30 Hz 的振动中值图像

图 7 振动加速度为 2.0g 的图像

Fig. 7 The images of vibration with acceleration of 2.0g

本文利用两种图像质量评价方法对试验所采集的图像的清晰度进行计算,分别是灰度平均梯度法(GMG)和基于结构相似度(SSIM)的图像质量评价法。

以 GMG 法评价采集图像的清晰度,其定义如下

$$G_{\text{GMG}} = \frac{1}{(M-1)(N-1)} \times \sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=1}^{N-1} \sqrt{\frac{[I(i+1,j) - I(i,j)]^2 + [I(i,j+1) - I(i,j)]^2}{2}} \quad (2)$$

式中, M, N 分别代表图像的长和宽。灰度平均梯度就是对于相同平均灰度的同一目标图像,分别将图像长度和宽度上的相邻像素灰度做差后求平方和再求均方根值,能够有效地反映出图像细微反差的程度,GMG 值越大,图像清晰度越高。

SSIM 的图像质量评价方法是由文献[11]提出的符合 HVS(Human Visual System)特性的图像质量客观评价方法,它将被测图像与参考图像的相似度定义为亮度、对比度和结构的相似度的加权,取值在 0~1 之间,SSIM 的值越大,说明被测图像与参考图像两者越接近。本文将试验系统静止状态下采集的静态目标靶图像作为参考图像,而振动过程中采集到的图像作为被测图像。若两者接近,说明振动图像越清晰;反之,则说明图像越模糊。

针对各组试验采集到的图像分别进行清晰度的求解,结果如表 2 所示。振动图像的 GMG 值、SSIM 值如图 8、图 9 所示。

表 2 图像清晰度

Table 2 Definition of images

振动加速度/g 数	频率/Hz	GMG		SSIM	
		峰值图像	中值图像	峰值图像	中值图像
0.5	10	2.220 6	2.198 6	0.862 6	0.853 0
	20	2.218 8	2.160 1	0.860 5	0.850 1
	30	2.215 3	2.107 6	0.859 6	0.846 1
1.0	10	2.199 5	2.169 9	0.855 3	0.845 6
	20	2.169 0	2.086 5	0.851 2	0.829 7
	30	2.156 9	1.986 5	0.847 5	0.825 5
2.0	10	2.164 6	2.113 7	0.827 3	0.828 1
	20	2.101 5	1.982 6	0.826 6	0.816 6
	30	2.086 8	1.839 9	0.824 2	0.800 9

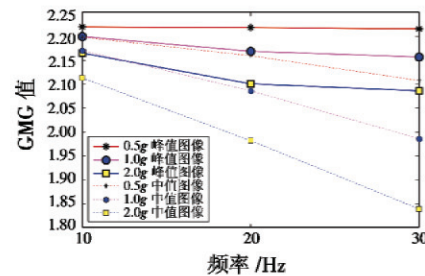


图 8 振动图像的 GMG 值

Fig. 8 GMG of vibration images

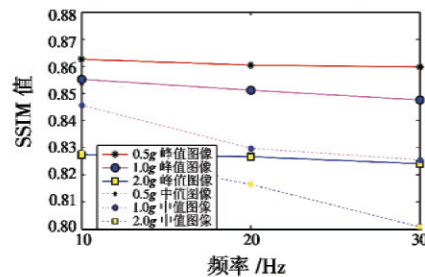


图 9 振动图像的 SSIM 值

Fig. 9 SSIM of vibration images

根据表 2、图 8 和图 9 可发现,振动加速度与振动频率的增大,均会不同程度上导致图像清晰度的下降。对试验结果对比分析表明,在振动加速度一定的情况下,振动频率越大,图像清晰度越低;在振动频率一定的情况下,随着振动加速度的增大,图像的清晰度整体下降,并且比随频率变化的情况更加严重。

结合图 5~图 7 对表 2 中的数据进一步分析发现,在两种试验条件变化的情况下,中值图像清晰度的整体变化情况比峰值图像变化更加显著,下降趋势更加明显。在振动加速度为 0.5g 时,10 Hz,20 Hz 和 30 Hz 3 个振动频率下峰值图像的 GMG 值和 SSIM 值基本都保持在 2.22 和 0.86 左右,变化不明显,正如图 5a~图 5c 所示,三幅图像质量基本一致。三组中值图像的 GMG 值和 SSIM 值分别为 2.1986,2.1601,2.1076 和 0.8530,

0.8501, 0.8461, 随频率的增大均有所下降, 但变化很小, 与图 5d ~ 图 5f 所示情况相符。振动加速度为 1.0g 时, 3 个频率下峰值图像如图 6a ~ 图 6c 所示, 清晰度同 0.5g 时一样, 只发生了细微的变化, 基本都保持在 2.16 和 0.85 左右。而中值图像三者之间的 GMG 值增减幅度大于 0.08, SSIM 值则接近 0.01, 变化情况较 0.5g 加速度时明显增大, 与图 6d ~ 图 6f 所示情况一致, 可以明显看出三幅图像逐渐出现模糊现象。振动加速度为 2.0g 时, 峰值图像的清晰度仍然变化十分缓慢, 但是总体上较 0.5g 和 1.0g 时都有所下降, 中值图像的 GMG 值和 SSIM 值分别为 2.1137, 1.9826, 1.8399 和 0.8281, 0.8166, 0.8009, 图像质量下降较快, 相比 0.5g 和 1.0g 时的变化明显增大。如图 7d ~ 图 7f 所示, 三幅图像质量越来越差, 最后一幅图像模糊程度最严重, 与表 2 中的数据变化情况相符。

根据上述图像效果对比分析可以得到: 受振动影响, 图像清晰度的优劣与振动的振幅、频率均有关。当振动频率大、振幅大时, 图像清晰度下降较明显, 造成图像模糊; 当振动频率小、振幅小时, 图像没有较为明显的变形。关于振幅与频率之间的关系以及共同对图像的影响, 后续工作将进一步探讨。

4 结论

为了研究振幅和振动频率等振动参数对光电系统成像质量的影响, 本文通过搭建模拟光电成像试验系统进行了试验研究。试验中通过调整不同的振动输入, 模拟了不同振幅、不同频率振动工况, 利用图像采集系统采集了不同工况下的图像, 并对图像的清晰度进行了分析计算。试验结果表明: 对于光电成像系统不同振动工况下的图像质量, 在振幅一定的情况下, 高频振动的影响大于低频振动; 在频率一定的情况下, 振幅越大, 所成图像的清晰度越低, 并且相比频率对成像质量的影响作用更大。整体上来说, 振动的振幅和频率越大, 图像越模糊, 因此在设计光学成像系统的减震装置时, 对于高频振动的衰减能力尤为重要。通过本文的试验研究, 对于探索 and 了解振动对光电成像系统成像质量影响的机理研究具有一定的参考和应用价值, 同时可以指导工程实际中减振方案的设计和减震器的合理选择。本文关注点仅仅集中在振幅和频率上, 由于振动模式比较复杂, 主要影响因素不仅只是振幅和频率, 后续工作将进一步考虑其他因素以及平台振动对成像系统产生影响的物理与光学原理研究。

参考文献

[1] 钱义先, 程晓薇, 高晓东, 等. 振动对航空 CCD 相机成

像质量影响分析[J]. 电光与控制, 2008, 15(11): 55-66. (QIAN Y X, CHENG X W, GAO X D, et al. Effect of vibration on imaging quality of airborne CCD camera[J]. Electronics Optics & Control, 2008, 15(11): 55-66.)

- [2] 朱华征, 范大鹏, 马东玺, 等. 载体运动对光电成像系统性能的影响分析[J]. 红外技术, 2008, 30(10): 586-590. (ZHU H Z, FAN D P, MA D X, et al. The effect of the carrier movement on the photoelectric imaging system performance[J]. Infrared Technology, 2008, 30(10): 586-590.)
- [3] 耿文豹, 翟林培, 丁亚林. 振动对光学成像系统传递函数影响的分析[J]. 光学精密工程, 2009, 17(2): 314-320. (GENG W B, ZHAI L P, DING Y L. Analysis of influence of vibration on transfer function in optic imaging system[J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(2): 314-320.)
- [4] 王雅萍, 余涛, 顾行发, 等. 卫星振动对线阵 CCD 推扫图像影响的仿真实验[J]. 昆明理工大学学报: 理工版, 2010, 35(4): 1-14. (WANG Y P, YU T, GU X F, et al. Simulation experiment of linear array CCD push-broom scanning image affected by satellite vibration[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology: Science and Technology, 2010, 35(4): 1-14.)
- [5] 徐鹏, 黄长宁, 王涌天, 等. 卫星振动对成像质量影响的仿真分析[J]. 宇航学报, 2003, 24(3): 259-263. (XU P, HUANG C N, WANG Y T, et al. Modulation transfer function in push-broom camera limits resulting from mechanical vibration[J]. Journal of Astronautics, 2003, 24(3): 259-263.)
- [6] HADAR O, ADAR Z, COTTER A, et al. Restoration of images degraded by mechanical vibrations[C]//The 12th IAPA International Conference on Signal Processing, 1994: 137-139.
- [7] HADAR O, ROBBINS M, NOVOGROZKY Y, et al. Image motion restoration from a sequence of images[J]. Optical Engineering, 1996, 35(10): 2898-2904.
- [8] HADAR O, FISHER M, KOPEIKA N S. Numerical calculation of image motion and vibration modulation transfer function[C]//SPIE, 1991, 1482: 79-91.
- [9] HADAR O, DROR I, KOPEIKA N S. Real-time numerical calculation of optical transfer function for image motion and vibration: Experimental verification[J]. SPIE, 1993, 1971: 412-435.
- [10] 张葆, 贾平, 黄猛. 动载体成像模糊的振动被动控制技术[J]. 光学技术, 2003, 29(3): 281-283. (ZHANG B, JIA P, HUANG M. Passive vibration control of image blur resulting from mechanical vibrations on moving vehicles[J]. Optical Technique, 2003, 29(3): 281-283.)
- [11] WANG Z, BOVIK A C. A universal image quality index[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2002, 9(3): 81-84.