

一种光机系统结构稳定性评估方法

郭本银 谢耀于 杰 王丽萍 苗亮

中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033

摘要 为了评估光机结构的长期稳定性,提出了一种偏移量解算的稳定性评估方案。首先进行数学建模,通过敏感矩阵建立了光机结构偏移量与系统波像差变化量的关系式,并给出了基于奇异值分解的偏移量求解方法。然后以微缩投影系统为研究对象,建立了敏感矩阵,在奇异值分解的基础上分析了像差奇异值向量与结构参数奇异值向量的对应关系。通过在实际搭建的微缩投影系统中人为引入偏移量,并与理论解算值进行对比,验证了方案的可行性。最后对系统长期稳定性进行了测试,为后续的结构优化提供了指导。

关键词 测量;长期稳定性;敏感矩阵;奇异值分解

中图分类号 O439 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP53.021203

Stability Evaluation of Opto-Mechanical Systems

Guo Benyin Xie Yao Yu Jie Wang Liping Miao Liang

*State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China*

Abstract In order to evaluate the long term stability of opto-mechanical systems, a novel method of long term instability evaluation based on the calculation of misalignment is presented. Firstly, a model has been built to find the relationship between the misalignment of the opto-mechanical systems and the wavefront error with the aid of sensitivity matrix, and a method for the misalignment calculation based on singular value decomposition (SVD) is given. Then, a reduced projection system is illustrated to analyze the relationship between the aberration singular vector and the configuration singular vector base on the SVD of constructed sensitivity matrix. Intended misalignments are added to the actual reduced projection system and the calculated result verifies the availability of the method. Finally, the long term stability is tested and it can orientate the opto-mechanic optimization.

Key words measurement; longterm stability; sensitivity matrix; singular value decomposition

OCIS codes 110.2960; 110.3175; 120.4880

1 引言

高精度的光学系统需要有良好的系统波面长期稳定性以满足系统标定和装调的需求^[1],而系统的波面稳定性依赖于系统光机结构的稳定性。光学系统光机结构的稳定性是在系统设计和制造过程中需要重点考虑的内容之一^[2]。系统机械结构的装配应力释放和所处环境温度的变化均能引起光机系统中元件位置的漂移,可以将上述参数的变化定义为光学系统光机结构的长期稳定性,它们将影响系统装调过程中的迭代速度,甚至导致系统的装调无法收敛。

目前常用的光机结构长期稳定性测试设备有商用的双频激光干涉仪、电容传感器,比如 Renishaw 的 XL80 系统等。但是涉及角度测量时,需要多个干涉仪或传感器配合使用,当光机结构较为复杂或需要实时测量光机结构的稳定性时,这种直接测量的方式可能会遇到空间布置受限等困难。

本文根据系统像差与系统结构的相关性,提供了一种偏移量解算的光机结构长期稳定性评估方案,在数学建模的基础上给出了基于奇异值分解的偏移量求解方法,以实际搭建的微缩投影系统为研究对象,通过敏感矩阵的奇异值分解分析光机结构偏移量与系统波像差的对应关系,最后实验验证了该方案的可行性。

收稿日期: 2015-07-01; 收到修改稿日期: 2015-07-15; 网络出版日期: 2016-01-08

基金项目: 国家重大科技专项(2008ZX02501-008)

作者简介: 郭本银(1985—),男,硕士,研究实习员,主要从事光机结构设计方面的研究。E-mail: guobenyin2007@126.com

2 数学模型

光学系统出瞳面波像差表征了实际波面和理想波面之间的偏差,是一种用以评价光学系统成像质量的常用标准^[3-4]。Zernike多项式可以有效地表征系统出瞳面的波像差,36项Fringe Zernike多项式也是目前最常用的波像差表征方式,其中, Z_2 (倾斜)~ Z_9 (球差)直接反映了光学系统结构参数与系统波像差的关系,在光学系统集成过程中,计算机辅助装调的目的是寻找系统像差与系统结构参数的对应关系,这给系统结构参数稳定性评估提供了一种思路。

光学系统结构与系统波像差的对应关系可以通过函数关系 $z = z(x)$ 描述,其中 z 为光学系统像差, x 为系统结构向量,计算机辅助装调的目的就是找到一个最佳的系统结构,使得 $\|z(x)\|$ 最小。目前最为常用的算法是基于奇异值分解的牛顿迭代法^[5-12],通过解算 $z(x) = 0$ 实现 $\|z(x)\|$ 最小。为了求解方程 $z(x) = 0$,对其在适当的失调量附近进行泰勒展开^[6]:

$$z(x + \delta x) = z(x) + \mathbf{J} \delta x + O(\delta x^2), \quad (1)$$

式中 \mathbf{J} 为系统的敏感度矩阵, δx 为所要求解的光机系统的失调量,使得 $z(x + \delta x) = 0$,并忽略高阶项即非线性项,则^[6]:

$$\mathbf{J} \delta x = -z(x). \quad (2)$$

为了评估光机结构在某一段时间内的长期稳定性,假使初始系统波像差为 $z(x)$,在监测时间段内光机结构发生了偏移 δx ,系统波像差变为 $z(x + \delta x)$,则:

$$\mathbf{J} \delta x = z(x + \delta x) - z(x) = \Delta z(x), \quad (3)$$

式中 $\Delta z(x)$ 为系统波像差变化向量,该方程表征了系统像差变化向量与光机结构变化向量的关系。

系统敏感度矩阵的建立是求解偏移量的关键,敏感度矩阵可以通过如下方式获得^[6]:

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \frac{\Delta z_1}{\Delta x_1} & \dots & \frac{\Delta z_1}{\Delta x_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\Delta z_m}{\Delta x_1} & \dots & \frac{\Delta z_m}{\Delta x_n} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中 Δx_n 为人为引入的第 n 个光机结构参数的偏移量, $\Delta z_m = z_m - z_0$ 为光学系统第 m 个视场引入偏移量前后出瞳面波像差 z_0 与 z_m 之差。

由于像差数与系统结构数不能做到完全的一一对应,不能获得满秩矩阵 \mathbf{J} ,因而也就不能通过求 \mathbf{J} 的逆矩阵的方式求得 δx ,需要对 \mathbf{J} 进行奇异值分解,求出 \mathbf{J} 的广义逆,最终求解出系统的偏移量。 \mathbf{J} 的奇异值分解如下:

$$\mathbf{J} = \mathbf{U} \mathbf{W} \mathbf{V}^T, \quad (5)$$

式中 \mathbf{W} 为含有相应奇异值的对角阵, \mathbf{U} 、 \mathbf{V} 各列向量分别为像差奇异值向量和系统的结构奇异值向量,而且是列正交的,则有:

$$\mathbf{J} v_i = \omega_i u_i, \quad (6)$$

式中 u_i 、 v_i 分别是 \mathbf{U} 、 \mathbf{V} 第 i 列向量,第 i 个奇异值 ω_i 代表了对结构参数作单位调整时波像差的改变量。

结合(3)式和(5)式可以获得偏移量 δx ,其符号代表了结构参数的偏移方向:

$$\delta x = -\mathbf{V} \frac{1}{\mathbf{W}} \mathbf{U}^T \Delta z(x). \quad (7)$$

从(7)式可以看出,偏移量的求解主要依赖于系统敏感度矩阵的建立和系统波像差检测。假如已知两个不同时间段的系统出瞳面波像差以及两者的偏差 $\Delta z(x)$,就可以借助系统的敏感度矩阵推算出引起偏差的光机结构的变化量,以此评估相应的光机结构在该时间段内的稳定性。

为此,搭建了如图1所示的物方数值孔径(NA)0.05的微缩投影系统,其中 M_1 、 M_2 分别为凸、凹非球面反射镜。 M_3 为峰谷值(PV) $\lambda/50$, NA0.65的凹球面反射镜,用以将测试光反射回干涉仪。3个光学元件均由热膨胀系数很低的微晶玻璃加工而成, M_1 和 M_2 的支撑机构以及 M_1 的调整结构均由热膨胀系数很低的钢加工而成, M_3 通过 x/y 调整机构固定在高稳定性压电陶瓷(PZT)上,整个系统通过一个锥形的钢框架固定于

一个大行程的 x/y 调整台上,测试光两次经过光学系统,提高了系统像差对于机械结构的敏感度。

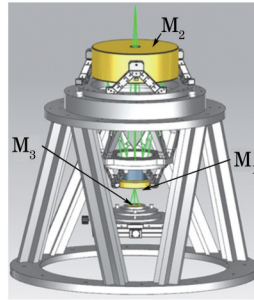


图1 微缩投影系统检测模型示意图

Fig.1 Optical test layout of reduced projection system

3 敏感度矩阵的建立和分析

为了准确评估光机结构的稳定性,利用精密调整设备在实际系统中人为引入微小偏移量来建立系统的敏感度矩阵,微缩投影系统像点姿态的变化可由 M_3 的调整完成。影响系统稳定性的主要因素由三部分组成: M_1 的调整和支撑机构、 M_2 的支撑机构以及 M_3 的调整和支撑机构。其中 M_2 及其支撑机构的稳定性在独立测试中已获得良好的稳定性结果,因此,可以忽略 M_2 支撑稳定性带来的影响。选择的稳定性评估结构参数如表1所示,分别在 M_1 的偏心 x/y 、与 M_2 的距离 z 及倾斜 T_x/T_y , M_3 的偏心 x/y 以及 z 向等自由度上人为引入适量的调整量,测得每次调整后的系统波像差。

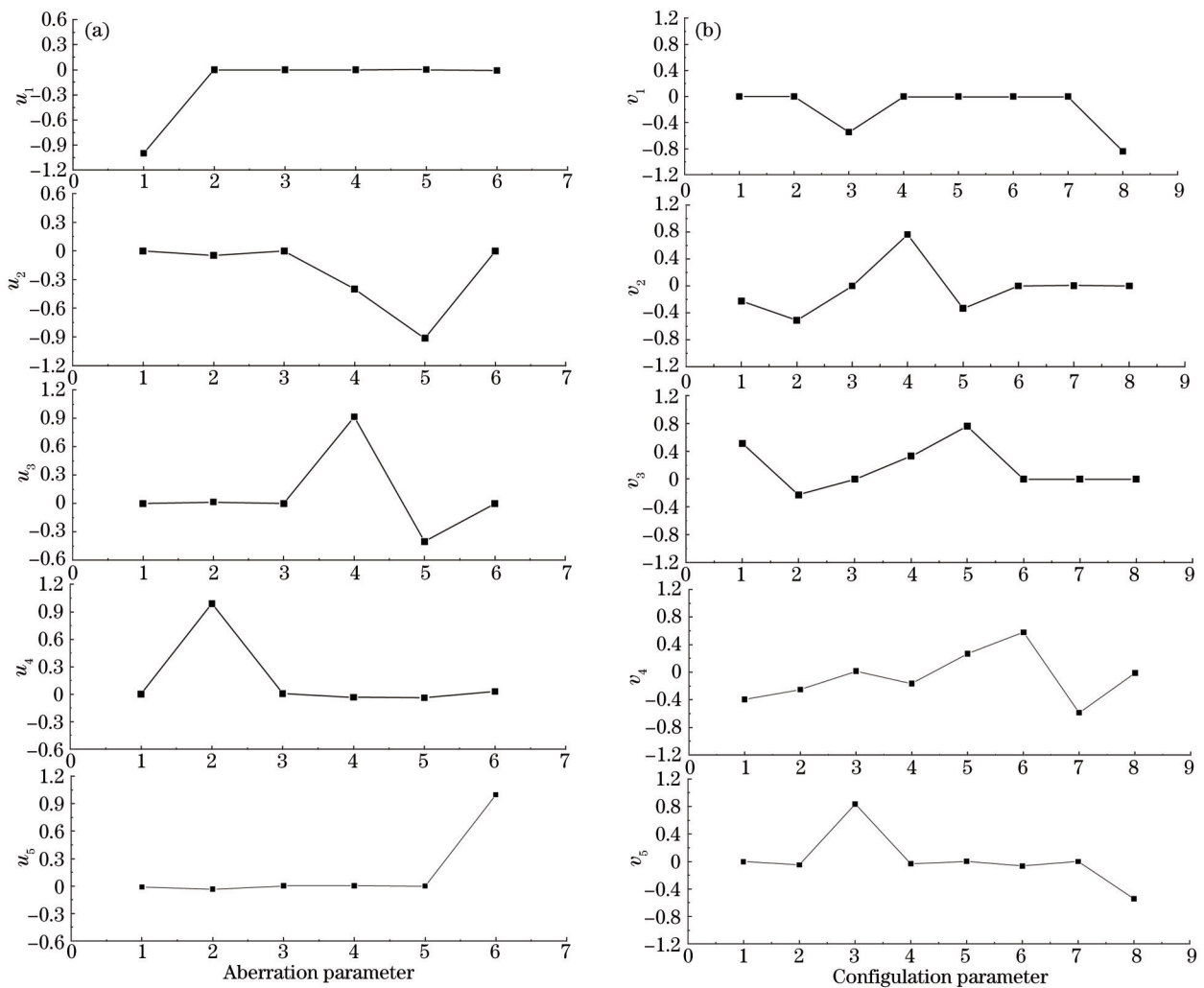


图2 (a)像差奇异值向量及(b)对应的结构参数奇异值向量

Fig.2 Plot of (a) aberration singular vector and (b) corresponding configuration singular vector

表1 待稳定性测试的结构参数

Table 1 Construction configuration to be tested

Number	1	2	3	4	5	6	7	8
Structural parameters	$M_1 - \Delta x$	$M_1 - \Delta y$	$M_1 - \Delta z$	$M_1 - \Delta T_x$	$M_1 - \Delta T_y$	$M_3 - \Delta x$	$M_3 - \Delta y$	$M_3 - \Delta z$

图2为像差奇异值向量与结构奇异值向量,从图中可以看出,对于第一个结构奇异值 v_1 ,对系统有最大的敏感度,影响最大的是系统的离焦(Z_4),主要是 M_3 的 z 方向偏移量造成的。对于结构奇异值 v_2 和 v_3 ,影响最大的是系统的彗差(Z_7 、 Z_8),主要是 M_1 的倾斜偏移量造成的。对于结构奇异值 v_4 , M_3 的 x/y 方向偏移量造成系统的象散(Z_5)。对于结构奇异值 v_5 ,影响最大的是系统的球差(Z_9),主要是 M_1 的 z 方向偏移量造成的。从图中可以看出元件 M_1 和 M_3 的姿态对系统波像差的影响并非完全独立,以 v_1 为例, M_1 和 M_3 的 z 方向调整均能引起离焦的变化。因此,为了获得各元件相对独立的稳定性评估结果,可以采取分组补偿器的方案,通过分析波面偏差中主要的成分,结合敏感矩阵的分析,分步计算 M_1 和 M_3 结构参数的偏移量。

4 实验结果分析

采用上一节中建立的系统敏感度矩阵,分析了光学系统光机结构的稳定性。稳定性评估实验在自主研发的检测波长为632.8 nm的超高精度和超高稳定性的干涉仪装置上进行,如图3所示,整个系统通过一个锥形的钢钢框架固定于一个大行程的 x/y 调整台上,测试光两次经过光学系统,提高了系统像差对于机械结构的敏感度,系统所处环境的温度稳定性优于0.005 °C。

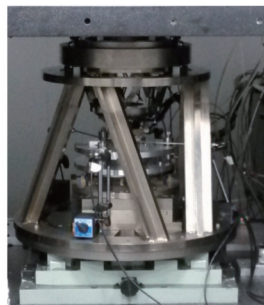


图3 实际搭建的微缩投影系统

Fig.3 Actual reduced projection system

为了验证基于敏感矩阵的光机系统稳定性评估方案的可行性,利用高精度压电驱动原理的PZT对 M_3 人为引入一定的偏移量,通过理论计算得到的结果与之对比。表2为人为引入第一组较小调整量和第二组较大调整量后根据敏感度矩阵计算出的偏移量结果。

表2 M_3 调整后偏移量理论计算结果Table 2 Theoretical computation results of deviation corresponding to the adjustment of M_3

	Type of variable	Adjustment/mm	Misalignment/nm	Error /nm	Noise of PZT/nm
First round	$M_3 - \Delta x$	51	56.0	5.0	2
	$M_3 - \Delta y$	95	96.2	1.2	
	$M_3 - \Delta z$	0	3.2	3.2	
Second round	$M_3 - \Delta x$	500	494	6	
	$M_3 - \Delta y$	500	487	13	
	$M_3 - \Delta z$	500	484	16	

从表2中可以看出,当实际调整量较小时,计算获得的偏移量与实际调整量偏差极小,接近PZT自身的噪声;当实际调整量较大时,3个自由度的偏差均优于20 nm,考虑到偏移量的求解是一个迭代收敛过程,多次迭代获得的偏移量与实际调整量的偏差更小,该精度满足对系统结构长期稳定性的测量,从而验证了该方案的可行性。

在验证了稳定性评估方案可行性的前提下,开展了系统长期稳定性的评估实验。表3为10天内系统波面偏差对应的偏移量。从表中可以看出, M_1 支撑和调整机构的稳定性优于 M_3 相关的支撑和调整机构,存在的原因可能有: M_3 的粗调和支撑机构由铝合金制成,受环境温度变化影响较大,而 M_1 的支撑和调整机构由

热膨胀系数较低的钢制制成,受环境温度变化影响小; M_3 相关的支撑和调整机构存在少约束或过约束,自身刚度较低等原因。所以,在材料和结构设计上需要改进。

表3 系统10天内结构参数偏移量

Table 3 Misalignment of structural parameters in ten days

Structural parameters	$M_1 - \Delta x$	$M_1 - \Delta y$	$M_1 - \Delta z$	$M_1 - \Delta T_x$	$M_1 - \Delta T_y$	$M_3 - \Delta x$	$M_3 - \Delta y$	$M_3 - \Delta z$
Misalignment/nm	73.5	68.6	24.9	31.6	41.9	40.5	407.1	623.4

5 结 论

提供了一种偏移量解算的光学系统光机结构长期稳定性的评估方法,特别是当系统结构复杂,采用普通的测量方式,比如双频激光干涉仪或电容传感器等商用测量设备难以评估其稳定性时,提供一种新的行之有效的解决方案。该方法通过数学建模表达了系统结构偏移量与波像差变化量之间的关系。以实际搭建的微缩投影系统为研究对象,建立敏感矩阵,经奇异值分解后获得像差奇异值向量及结构参数奇异值向量及其对应关系,通过人为引入偏移量,与理论计算值对比后验证了该方案的可行性。该方案可用于结构更加复杂的光学系统光机结构的稳定性评估,对光机结构的优化改进具有实际指导意义。

参 考 文 献

- 1 L C Hale, R M Hudyma, J S Taylor, *et al.*. High-NA camera for an EUVL microstepper[C]. 15th Annual American Society for Precision Engineering, 2000, 521-524.
- 2 R A Paquin. Dimensional stability: an overview[C]. SPIE, 1990, 1335: 2-19.
- 3 D Malacara. Optical Shop Testing[M]. New York: A John Wiler & Sons Inc, 2007.
- 4 Zhang Baodong, Qin Shiqiao, Wang Xingshu. Accurate and fast simulation of Kolmogorov phase screen by combining spectral method with Zernike polynomials method[J]. Chin Opt Lett, 2010, 8(10): 969-971.
- 5 Lin Qiang, Jin Chunshui, Xiang Peng, *et al.*. Computer-aided alignment of Schwarzschild objective with off-axis illumination [J]. Optics and Precision Engineering, 2003, 11(2): 144-150.
林 强, 金春水, 向 鹏, 等. 离轴照明 Schwarzschild 投影物镜的计算机辅助装调方法[J]. 光学 精密工程, 2003, 11(2): 144-150.
- 6 Henry N Chapman, Donald W Sweeney. A rigorous method for compensation selection and alignment of micro lithographic optical systems[C]. SPIE, 1998, 3331: 102-103.
- 7 Brent J Bos, Joseph M Howard, Philip J Young, *et al.*. Global alignment optimization strategies, procedures, and tools for the James Webb space telescope (JWST) integrated science instrument module (ISIM)[C]. SPIE, 2012, 8442, 84423I.
- 8 Zhao Yang, Gong Yan. Computer aided alignment of small scale projected objective[J]. Chinese Optics, 2012, 5(4): 394-400.
赵 阳, 巩 岩. 投影物镜小比率模型的计算机辅助装调[J]. 中国光学, 2012, 5(4): 394-400.
- 9 Sun Jingwei, Chen Tao, Wang Jianli, *et al.*. Computer-aided alignment for primary and secondary mirrors Opt[J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(10): 2156-2163.
孙敬伟, 陈 涛, 王建立, 等. 主次镜系统的计算机辅助装调[J]. 光学 精密工程, 2010, 18(10): 2156-2163.
- 10 Ke Liu, Li Yanqiu, Liu Jingfeng, *et al.*. Computer aided alignment of a 20 X Schwarzschild projection optics[C]. SPIE, 2008, 7130: 713042.
- 11 Jia Yong, Gao Yunguo, Shao Shuai. Opto-mechanical optimization for laser expander system under thermal loads[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(1): 0116003.
贾 勇, 高云国, 邵 帅. 热载荷下激光扩束系统的光机优化设计[J]. 中国激光, 2014, 41(1): 0116003
- 12 Dou Zhenhai, Wang Yajing, Shen Jin, *et al.*. A hybrid non-negative inversion of dynamic light scattering based on truncated singular value decomposition[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(6): 269-274.
窦震海, 王雅静, 申 晋, 等. 动态光散射混合非负截断奇异值反演[J]. 中国激光, 2013, 40(6): 269-274.

栏目编辑: 韩 峰