

基于机械敏感度的光机结构优化

门树东 刘春来 赵阳 王平

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 超精密光学工程研究中心, 吉林 长春 130033

摘要 传统的光机结构设计流程中光学设计和机械结构设计相对独立。光学系统的机械结构设计者很难确定哪种支撑结构比较适合,难以实现机械结构的优化设计。利用机械敏感度直接建立机械结构加工装配误差与光学系统成像质量之间的关系,可以直观地描述机械结构误差对镜片的偏心、倾斜和间隔误差的影响,从而反映了对光学系统的成像质量的影响。结构设计者依据不同机械支撑结构的机械敏感度表来选择适用于该光学系统的最佳支撑结构,从而实现物镜光机结构的优化。

关键词 光学设计; 光机结构; 机械敏感度; 优化设计; 误差

中图分类号 O439 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP52.072201

Method of Optimizing Opto-Mechanical Structure Based on Mechanical Sensitivities

Men Shudong Liu Chunlai Zhao Yang Wang Ping

Engineering Research Center for Extreme Precision Optics, State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

Abstract In traditional design of an optical system, optical design and mechanical design is relatively independent. It's difficult for a mechanical designer to know which structure is suitable for an optical system, and even harder to optimize the mechanical structure. The mechanical sensitivity is utilized to build the relationship between the caused error of the mechanical structure which includes manufacture and assemble and the quality of the optical system, and it's easy to see how the mechanical manufacture and assemble errors affect the displacement, tilt and space errors and then affect the optical system quality. Mechanical designers use the mechanical sensitivity table of different mechanical structure to decide which is the best, and optimize the opto-mechanical structure.

Key words optical design; opto-mechanical structure; mechanical sensitivity; optimization design; tolerance

OCIS codes 220.4880; 220.3620

1 引言

光学系统的传统设计流程是由光学设计者对物镜的光学结构进行设计,并给出光学元件的装配公差,结构设计者根据光学系统设计机械结构,并根据光学元件的装配公差对机械结构进行公差分配。光学设计者和结构设计者的工作相对独立,结构设计者很难了解物镜支撑结构的加工装配误差是如何影响物镜成像质量的,因此很难对物镜的支撑结构进行最优化设计^[1]。

基于以上问题,光机一体化设计目前越来越受到关注^[2-7]。Lin等^[2]给出了通过光学和机械元件的加工装配误差来计算镜片偏心、倾斜和间隔误差的模型,并通过蒙特卡罗方法评估物镜装配后的像质。Frank DeWitt IV等^[3]分析了在三种镜片支撑方式下制造误差所引起的镜片的刚体位移,并通过光学设计软件根据刚体位移预测物镜的成像质量。Simon Magarill^[4]提出了机械敏感度的概念,通过机械敏感度能够快速的选择最优的光机结构。但其敏感度并没有体现基本参数误差如何影响物镜的装配误差并传递到物镜成像质量,同时也忽略了基本参数误差会同时影响多个镜片位置误差的联动现象。

本文计算了光学和机械元件的加工装配误差对镜片位置误差的影响,并将镜片的位置误差代入到光学

收稿日期: 2015-01-09; 收到修改稿日期: 2015-03-06; 网络出版日期: 2015-06-04

基金项目: 国家重大专项基金(2009ZX02205)

作者简介: 门树东(1982—),男,硕士,助理研究员,主要从事结构设计及装调方面的研究。E-mail: msdhit@163.com

设计软件 CODE V 中得到物镜像质的劣化值,从而得到该基本参数误差的机械敏感度表。通过这种方法,机械敏感度表就可以体现基本参数误差与镜片位置误差的关系以及镜片间的联动现象。结构设计者可以直观地通过机械敏感度表了解光学、机械元件的加工装配误差对物镜像质的影响程度,据此从不同的支撑结构中选取适合该物镜的结构,实现对物镜光机结构的优化。本文介绍了光机结构误差的定义,然后以一个双高斯物镜为例进行了光机结构设计和优化。

2 光机结构误差的定义

为了方便对光学和机械元件的加工装配误差进行描述,将影响光学系统性能的光、机零件的特征称为要素,一个零件一般包含至少一个要素。每个要素相对于机械基准轴或其他要素有相应的误差。根据误差的形式可以分为表 1 中的几种类型,仅考虑影响镜片装配误差的误差项。

表 1 不同的误差项类型

Table 1 Different tolerance types

Sign	Error types	Unit	Definition
T	Tilt	1 mrad	Tilt relate to datum axis
E	Displacement	10 μm	Displacement relate to datum axis or mechanical
C	Clearance	10 μm	Clearance between lens and barrel
W	Wedge	10 μm	Lens edge thickness difference
A	Sag	10 μm	Axial distance from basis flat to vertex of optical surface of lens
H	Thickness	10 μm	Axial distance between two vertex of optical surface of lens
R_s	Radius	10 μm	Radius error of lens surface
D	Diameter	10 μm	Diameter error of barrel or spacer

用简易符号表示光、机零件,其中 B(Barrel)表示镜筒,S(Spacer)表示隔圈,L(Lens)表示镜片,并用数字表示同一类零件的序号。例如一个镜筒的一个内圆柱面相对于机械基准轴的偏心误差可以表示为 E_1^{B1} ,其中 E 表示偏心误差,B1 表示第一个镜筒,最后的数字 1 表示该零件的第一个要素即其第一个内圆柱面。

物镜中零件要素的误差最终是通过镜片的偏心、倾斜和轴向误差来影响物镜的性能^[8-9]。镜片的某一个误差一般是多个零件要素误差综合作用的结果。另一方面,某一个零件的要素误差有时也会对多个镜片的位置误差产生影响。零件的要素误差与镜片的位置误差的关系一般是线性的,可以用权重来表示。例如图 1 中的镜片 L1 的偏心误差与镜筒 B1 的第一个要素内圆柱面相对于机械基准轴的偏心误差 (E_1^{B1})、L1 与 B1 的径向配合间隙 (C_{L1}) 以及 L1 的楔角 (W_{L1}) 关系可表示为:

$$E_{L1} = E_1^{B1} + C_{L1} + \frac{W_{L1}}{D} \times R, \quad (1)$$

其中 E_{L1} 为镜片 L1 的偏心误差, D 为镜片 L1 的外圆柱面的直径, R 为镜片 L1 第一个表面的曲率半径。由(1)式可知,零件要素误差 E_1^{B1} 、 C_{L1} 、 W_{L1} 对 L1 偏心误差的权重分别为 1、1 和 R/D 。

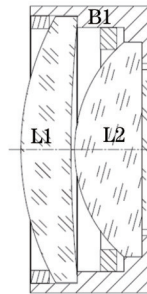


图 1 一个镜头的局部结构

Fig.1 Partial structure of an objective

3 光机结构的优化设计

以一个双高斯照相物镜(US Patent 2532751)为例进行分析,图2为物镜的光学系统图。

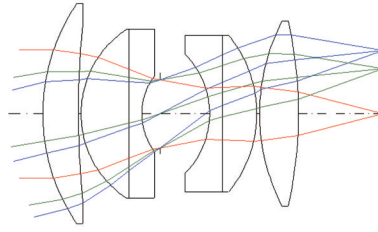


图2 双高斯照相物镜

Fig.2 Double-Gauss objective

下面基于机械敏感度的设计方法对该照相物镜系统进行支撑结构的优化设计。图3(a)和(b)分别是该光学系统的两个不同的机械支撑结构方案。

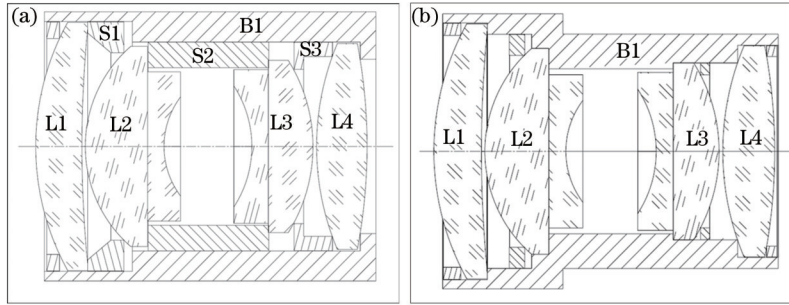


图3 两种光机结构设计方案。(a) 结构 a; (b) 结构 b

Fig.3 Two schematics of opto-mechanical structure. (a) Structure a; (b) structure b

结构 a 主要采用隔圈的形式,结构 b 主要采用压圈的形式。为了统计方便,取 $10\ \mu\text{m}$ 为 1 个长度误差单位,取 $1\ \text{mrad}$ 为 1 个角度误差单位。以物镜边缘视场的传递函数(MTF)值作为评价指标。因此零件的机械敏感度即为零件要素产生 1 个单位误差时 MTF 的劣化值。

为了获取零件的机械敏感度,首先要计算零件要素误差与镜片位置误差的权重值,再由 CODE V 得到物镜在仅产生相应误差的情况下 MTF 的劣化值。例如,图 2 中 L1 的楔角误差(W_{L1})仅引入 L1 的偏心误差,其权重值(R/D)为 1.023。当 L1 偏心 $10.23\ \mu\text{m}$ 时,由 CODE V 得到系统 MTF 劣化 0.022,则 L1 楔角误差的敏感度为 0.022。由于镜片的偏心、倾斜误差与镜片的间隔误差一般情况下相互独立,所以将偏心倾斜误差相关的零件要素误差和间隔误差相关的零件要素误差的敏感度分开进行统计。表 2 为结构 a 的偏心倾斜相关的零件要素误差的敏感度表,表 3 为间隔相关的零件要素误差的敏感度表。

表 2 结构 a 的敏感度表

Table 2 Sensitivities table of structure a

	L1 decenter	L1 tilt	L2 decenter	L2 tilt	L3 decenter	L3 tilt	L4 decenter	L4 tilt	Mechanical sensitivities
E_1^{B1}	1		1						0.005
C_{L1}	1								0.021
W_{L1}	1.023								0.022
T_1^{B1}		1							0.017
T_{S1}		1							0.017
T_{L1}		1							0.017
C_{S1}			1						0.012
D_{S1}			1						0.012
T_2^{B1}				1		1			0.013
T_1^{S2}				1					0.006
T_{L2}				1					0.006
C_{S3}					1		1.348	0.044	0.005
E_2^{S3}					1		1.348	0.044	0.005
T_2^{S2}						1			0.005
T_{L3}						1			0.005
E_2^{B1}							0.348	0.044	0.002
Sum of mechanical sensitivities									0.170

表3 结构a的敏感度表

Table 3 Sensitivities table of structure a

	L1~L2 spacer	L2~L3 spacer	L3~L4 spacer	Mechanical sensitivities
A_{L1}	1			0.019
L_{S1}	1			0.019
D_{S1}	1.01			0.019
S_1^{RL2}	0.42			0.004
H_2^{L2}		1		0.014
H_1^{L3}		1		0.014
L_{S2}		1		0.017
L_{S3}			1	0.002
D_1^{S3}			3.49	0.007
R_2^{S3}			0.94	0.002
S_2^{RL3}			2.63	0.003
S_1^{RL4}			0.37	0.001
Sum of mechanical sensitivities				0.121

同理,结构b的偏心倾斜和间隔相关的零件要素误差的敏感度表分别见表4和表5。

表4 结构b的敏感度表

Table 4 Sensitivities table of structure b

	L1 decenter	L1 tilt	L2 decenter	L2 tilt	L3 decenter	L3 tilt	L4 decenter	L4 tilt	Mechanical Sensitivities
E_1^{B1}	1								0.021
C_{L1}	1								0.021
W_{L1}	1.023								0.022
T_1^{B1}		1							0.017
T_{L1}		1							0.017
E_2^{B1}			1						0.012
C_{L2}			1						0.012
W_{L2}			1.52						0.032
T_2^{B1}				1					0.006
T_{L2}				1					0.006
E_3^{B1}					1		1		0.003
C_{L3}					1				0.002
W_{L3}					1.07				0.002
T_3^{B1}						1			0.005
T_{L3}						1			0.005
C_{L4}							1	0.128	0.007
Sum of mechanical sensitivities									0.190

表5 结构b的敏感度表

Table 5 Sensitivities table of structure b

	L1~L2 spacer	L2~L3 spacer	L3~L4 spacer	Mechanical sensitivities
L_1^{B1}	1			0.019
A_{L1}	1			0.019
H_{L2}	1			0.019
L_2^{B1}		1		0.017
H_2^{L2}		1		0.017
H_1^{L3}		1		0.017
L_3^{B1}			1	0.002
H_2^{L3}			1	0.002
S_1^{RL4}			0.324	0.001
D_3^{B1}			0.868	0.002
Sum of mechanical sensitivities				0.114

从表2和表3可得出结构a偏心倾斜相关的零件要素误差的敏感度合计为0.17,间隔相关的零件要素误差的敏感度合计为0.121。从表4和表5得出结构b偏心倾斜相关的零件要素误差的敏感度合计为0.19,间隔相关的零件要素误差的敏感度合计为0.114。一个好的结构设计方案应该得到较小的MTF损失,即其具有较小的机械敏感度。因此,可以得出结构a偏心倾斜的精度比结构b高,而结构b间隔精度比结构a高。

比较表2和表4的敏感度,可以看出结构a的 E_1^{B1} 误差会同时引入L1和L2的偏心(即联动现象),而L1和L2的偏心误差对MTF具有相互补偿的作用,因而结构a减小了 E_1^{B1} 的敏感度。结构b中L2的楔角误差 W_{L2} 对L2偏心误差的权重较高,因此 W_{L2} 具有较高的敏感度,使得L2的楔角公差更加严格。结构a避开了L2的楔角误差,采用隔圈S1和镜片上表面进行定心,放宽了L2的楔角公差要求。结构b仅通过镜筒的台阶面对镜片的轴向进行定位,减少了间隔误差的误差源个数。

综合结构a和结构b的优缺点,在结构b结构基础上将L1和L2之间的支撑方式修改为结构a的形式,即在镜片L1和L2之间采用隔圈S1进行支撑,如图4所示。

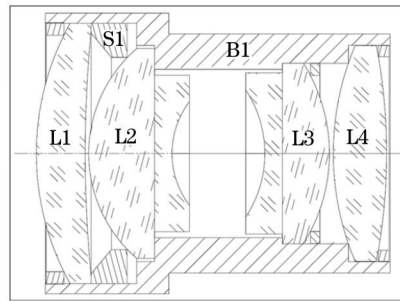


图4 优化后的光机结构方案

Fig.4 Schematic of opto-mechanical structure after optimization

根据优化后的光机结构方案,计算其零件要素的敏感度。表6为优化后的偏心倾斜相关的零件要素误差的敏感度表,表7为间隔相关的零件要素误差的敏感度表。

表6 优化后方案的敏感度表

Table 6 Sensitivities table of optimized structure

	L1 decenter	L1 tilt	L2 decenter	L2 tilt	L3 decenter	L3 tilt	L4 decenter	L4 tilt	Mechanical sensitivities
E_1^{B1}	1		1						0.005
C_{L1}	1								0.021
W_{L1}	1.023								0.022
T_1^{B1}		1							0.017
T_{S1}		1							0.017
T_{L1}		1							0.017
C_{S1}			1						0.012
E_{S1}			1						0.012
T_2^{B1}				1					0.006
T_{L2}				1					0.006
E_3^{B1}					1		1		0.003
C_{L3}					1				0.002
W_{L3}					1.07				0.002
T_3^{B1}						1			0.005
T_{L3}						1			0.005
C_{L4}							1	0.128	0.007
Sum of mechanical sensitivities									0.159

从表6和表7可得出优化后偏心倾斜相关的零件要素误差的敏感度合计为0.159,间隔相关的零件要素误差的敏感度合计为0.119。优化后方案的偏心倾斜和间隔敏感度较结构a和结构b均有减小,证明了所提出方法的正确性。

表7 优化后方案的敏感度表
Table 7 Sensitivities table of optimized structure

	L1~L2 spacer	L2~L3 spacer	L3~L4 spacer	Mechanical sensitivities
A_{L1}	1			0.019
L_{S1}	1			0.019
D_{S1}	1.01			0.019
$S_1^{R1,2}$	0.42			0.004
L_2^{B1}		1		0.017
H_2^{L2}		1		0.017
H_1^{L3}		1		0.017
L_3^{B1}			1	0.002
H_2^{L3}			1	0.002
$S_1^{R1,4}$			0.324	0.001
D_3^{B1}			0.868	0.002
Sum of mechanical sensitivities				0.119

4 结 论

介绍了基于机械敏感度的光机结构设计方法,通过建立机械敏感度表,可以直观地体现光学和机械元件加工装配误差是如何影响镜片的位置误差从而影响镜头成像质量的,同时也能够直观的体现物镜的机械结构所产生的镜片间的联动现象。结构设计者可依靠此灵敏度表来选择更优的镜头的机械支撑结构。实例分析结果证明了该方法的正确性,利用该方法对光学系统的光机结构设计具有一定的指导意义。

参 考 文 献

- 1 Kim Hwee Lee, Youngshik Yoon, Jonathan Maxwell. Creative optomechanical tolerancing in lens systems[C]. SPIE, 1998, 3482: 187-200.
- 2 T Y Lin, C C Cheng. A novel opto-mechanical tolerance analysis method for precision lens systems[J]. Precision Engineering, 2011, 35(3): 447-454.
- 3 Frank DeWitt IV, Georg Nadorff. Rigid body movements of optical elements due to opto-mechanical factors[C]. SPIE, 5867: 58670H.
- 4 Simon Magarill. Optomechanical sensitivity and tolerancing[C]. SPIE, 1999, 3786: 220-228.
- 5 Hui Bin, Li Jingzhen, Pei Yuntian, *et al.*. Integrated analysis of optics and mechanics in larger aperture catadioptric optical system[J]. Acta photonica sinica, 2006, 35(7): 1117-1120.
惠 彬, 李景镇, 裴云天, 等. 大口径折反射式光学系统的光机结合分析[J]. 光子学报, 2006, 35(7): 1117-1120.
- 6 Sun Xiangyang, Zhang Guoyu, Wang Dayi, *et al.*. Opto-mechanical structure design of large-scale and high precision star simulator[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(9): 2121-2126.
孙向阳, 张国玉, 王大轶, 等. 大尺寸高精度星模拟器光机结构设计[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(9): 2121-2126.
- 7 Sun Xiangyang, Zhang Guoyu, Duan Jie. Investigation of controllable axial conformity for opto-mechanical structure[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(1): 0116001.
孙向阳, 张国玉, 段 洁. 光机结构的轴向一致性可控方法研究[J]. 中国激光, 2012, 39(1): 0116001.
- 8 Paul R Yoder, Jr. Opto-Mechanical Systems Design[M]. New York: Taylor Francis Group, 2006, 15-21.
- 9 Liu Lin, Zhang Xingde, He Yiliang. Monte Carlo simulation and its application in the IR optical system[J]. Laser & Infrared, 2010, 40(5): 496-499.
刘 琳, 张兴德, 贺谊亮. 基于蒙特卡洛模拟法的红外光学系统公差分析[J]. 激光与红外, 2010, 40(5): 496-499.

栏目编辑: 韩 峰