

文章编号: 0253-2239(2006)06-0891-4

应用动态光学理论求解变焦光学系统补偿组凸轮曲线

王春艳 王志坚 周庆才

(长春理工大学光电工程学院, 长春 130022)

摘要: 变焦镜头在校正像差的同时,还要求像面稳定,才能保证成像质量。采用机械补偿的方法,可以保证凸轮的准确性以使像面稳定,从而保证成像质量。首先应用动态光学理论推导出变焦光学系统的像移补偿组公式,从而得到像移补偿组的轨迹曲线。再根据推导得出的补偿曲线加工出凸轮机构,可对光学系统变焦带来的像移实现完全补偿。此外还给出三个变焦系统的设计实例,用来验证该方法的正确性和实用性。

关键词: 光学设计; 变焦镜头; 像移补偿; 动态光学; 光学系统

中图分类号: O43 文献标识码: A

Solving the Cam Curve of the Compensating Group about Zoom Lens Using Dynamic Optical Theory

Wang Chunyan Wang Zhijian Zhou Qingcai

(College of Photo-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022)

Abstract: To ensure the imaging quality of the zoom lens, the image plane stabilization should be maintained, while the aberration is corrected. Mechanical compensation can ensure the accuracy of the cam, accomplish the image plane stabilization and keep the imaging quality. With dynamic optical theory, the image motion compensating group formula of the zoom optical system is derived, and the trace curve of the image motion compensating group is plotted. With the plotted curve the cam is fabricated, and compensates the image motion caused by the zoom of the optical system totally. The design for three zoom systems is presented, Which validates the validity and the practicability.

Key words: optical design; zoom lens; image motion compensation; dynamic optics; optical system

1 引 言

变焦光学系统是一种焦距在一定范围内变化,而像面保持不动的光学系统。变焦光学系统要改变焦距,而每个组元焦距一经设计与加工之后,就是固定不变的。要变焦,只能改变各组元之间的间隔。目前变焦镜头都用改变透镜组之间的间隔来改变整个物镜的焦距。在移动透镜组改变焦距时,总是要伴着像面的移动,因此需要对像面的移动给以补偿。像移补偿的方法主要有光学补偿法和机械补偿法。1960年后,随着机械加工工艺的改进,凸轮加工工艺的提高,机械补偿法得到广泛的应用。

变焦镜头的发展趋势正向着高倍率、大相对孔径、大视场、小型化和高成像质量的方向发展,但实际上这些要求之间是相互矛盾的。为了根据不同的需求,来解决它们之间的矛盾,产生了不同类型的变焦

镜头。变焦镜头设计的最后阶段,即各透镜组的光学结构参量(半径、间隔、玻璃材料)确定之后,还需要计算变焦组与补偿组位移量之间的数值关系,以便用来指导加工凸轮轨道。从动态光学理论^[1~3]上讲,变焦镜头属于一维动态稳像光学系统。本文应用动态光学理论,推导出像移补偿公式,由此公式可准确计算出补偿组的运动曲线,从而设计补偿像移的凸轮机构,代替了一般靠光路计算,逐点描绘补偿组曲线的方法^[4~6]。该方法的特点是像面完全稳定。

2 像移补偿公式

由动态光学理论可知,对于一个二组元稳像系统,其稳像方程^[7,8]为

$$\mathbf{R}_{2m}\mathbf{R}_2(\mathbf{E}-\mathbf{R}_{1m}\mathbf{R}_1)\mathbf{q}_1+(\mathbf{E}-\mathbf{R}_{2m}\mathbf{R}_2)\mathbf{q}_2=0, \quad (1)$$

式中 \mathbf{R}_1 为光学元件1的静态作用矩阵; \mathbf{R}_{1m} 为光学

作者简介:王春艳(1971~),女,吉林双辽人,长春理工大学光电工程学院博士研究生,主要从事光学仪器及技术、现代光学与测试技术等方面的研究。E-mail: zh-qc@263.net

收稿日期: 2005-07-08; 收到修改稿日期: 2005-09-23

元件 1 的动态作用矩阵; \mathbf{R}_2 为光学元件 2 的静态作用矩阵; \mathbf{R}_{2m} 为光学元件 2 的动态作用矩阵; \mathbf{E} 为单位矩阵; \mathbf{q}_1 为光学元件 1 的运动矢量; \mathbf{q}_2 为光学元件 2 的运动矢量。

由于变焦镜头变倍组和补偿组均为沿光轴的一维位移,故(1)式可简化为

$$\beta_{2m}\beta_2(1-\beta_{1m}\beta_1)q_1+(1-\beta_{2m}\beta_2)q_2=0, \quad (2)$$

式中 β_1 为变倍组初始位置的垂轴放大率; β_{1m} 为变倍组运动后的垂轴放大率; β_2 为补偿组初始位置的垂轴放大率; β_{2m} 补偿组元运动后的垂轴放大率; q_1 变倍组沿光轴位移量; q_2 为补偿组沿光轴位移量。其中

$$\beta_{1m}=\frac{\beta_1 f_1'}{f_1'-\beta_1 q_1}, \quad (3)$$

$$\beta_{2m}=\frac{\beta_2 f_2'}{f_2'+(1-\beta_1\beta_{1m})\beta_2 q_2-\beta_2 q_2}. \quad (4)$$

一般情况下, q_1 为线性运动,由(2)式~(4)式可得出 q_2 和 q_1 的运动关系,即

$$Aq_2^2+Bq_2+C=0, \quad (5)$$

式中

$$\begin{aligned} A &= (f_1' - \beta_1 q_1)\beta_2, \\ B &= \beta_1\beta_2 q_1^2 + [f_2'(1-\beta_2^2)\beta_1 - f_1'(1-\beta_1^2)\beta_2]q_1 - f_1'f_2'(1-\beta_2^2), \\ C &= \beta_2^2 f_2'[\beta_1 q_1 - f_1'(1-\beta_1^2)]q_1, \end{aligned} \quad (6)$$

$$C = \beta_2^2 f_2'[\beta_1 q_1 - f_1'(1-\beta_1^2)]q_1,$$

即

$$q_2 = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}, \quad (7)$$

由(7)式可以准确计算出补偿组的运动轨迹。

1) 当 $\beta_1 = \beta_2 = -1$ 时

$$A = f_1' - q_1, \quad B = q_1^2, \quad C = -f_2' q_1^2, \quad (8)$$

2) 当 $\beta_1 = -1, \beta_2 = \infty$ 时

$$q_2 = \frac{f_1'(1-\beta_1^2) - \beta_1 q_1}{f_1' - \beta_1 q_1} q_1 = \frac{q_1^2}{f_1' + q_1}. \quad (9)$$

一般情况下,由(6)式、(7)式可看出,当 $q_1 = 0$ 时,若保证 $q_2 \equiv 0$,根号前应取“+”号;见例 1、例 2;只有当 $|\beta_1| = |\beta_2| = 1$ 时,根号前可取“±”号,此时有换根解,见例 3。

3 设计实例

例 1: 对焦距 $f' = 441.5 \rightarrow 133.85 \text{ mm}$, $2\omega = 42.14^\circ \sim 18.33^\circ$, $F=4, y'=21.6 \text{ mm}$ 的变焦镜头的设计。已知: $f_1' = -40.0012 \text{ mm}, f_2' = 36.6025 \text{ mm}$;当 $f' = 79.54 \text{ mm}$ 时, $\beta_1 = -0.7685, \beta_2 = -0.5040$ 。

将上述数据代入(6)式和(7)式,即可得到不同焦距的 q_2 ,从而求得相应的间隔。进行光路计算,得到

不同位置时的光路结构、像差、点阵图以及传递函数曲线,具体数据见表 1。此系统成像质量较好,而且像面完全稳定。应用 MATLAB 语言编程可以求出补偿组的运动轨迹曲线,如图 1 所示。

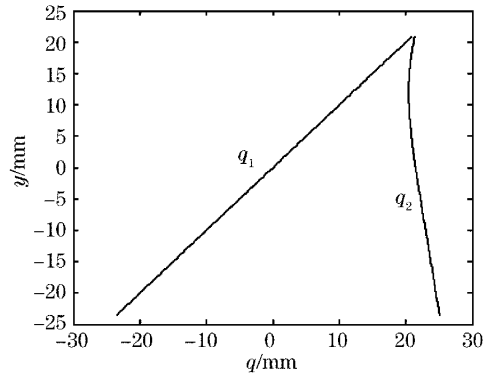


图 1 例 1 中变倍组与补偿组的变化关系曲线

Fig. 1 Vari-double group versus compensating group in example 1

表 1 例 1 中三个位置(长焦、短焦、中焦)的计算结果

Table 1 Results of three positions (long, medium and short focal length) for example 1

Lens group	R /mm	d /mm	Glass mark
Front-fixed group	203.92	2.5	ZF13
	84.003	7.6	ZK9
	-568.29	0.1	ZK9
	56.101	4.5	ZK9
	101.653	1.488~24.988~45.988	
	775.04	1.5	ZK9
Vari-double group	25.991	5.71	
	-370.67	1.4	ZK9
	55.167	5.45	
	43.695	2.5	ZF13
	94.013	48.542~21.456~0.384	
	132.17	2.5	ZK9
Compensating group	-81.723	0.1	
	49.584	4.8	ZK6
	-37.455	1.3	ZF13
	-100.483	2.596~6.182~6.254	
	∞	2.0	
	-56.731	1.3	LZK5
	56.431	1.6	
	111.379	4.6	ZF3
Rear-fixed group	-28.828	1.2	ZK11
	96.187	10.4	
	386.31	1.2	ZF13
	31.132	6.0	ZK9
	-39.285	68.7194~68.7194~68.7196	
		(Rear cut-off range)	

例 2: 对焦距 $f' = 79.1 \rightarrow 200.02$ mm, $2\omega = 19.86^\circ \sim 12.33^\circ$, $F = 4.5$, $y' = 21.6$ mm 的变焦镜头设计。已知 $f'_1 = -42.16427$ mm, $f'_2 = 124.4845$ mm, $\beta_2 = \infty$; 当 $f' = 126.01$ mm 时, $\beta_1 = -1$ 。

将上述数据代入(9)式, 可得出不同位置时的 q_2 值, 从而求得各组之间距离, 进行光路计算。计算出的结果见表 2。该系统成像质量仍然较好, 像面非常稳定。应用 MATLAB 语言编程可以求出补偿组的运动轨迹曲线, 如图 2 所示。

表 2 例 2 中三个位置(长焦、短焦、中焦)的计算结果

Table 2 Results of three positions (long, medium and short focal length) for example 2

Lens group	R /mm	d /mm	Glass mark
	271.89	2.0	ZF3
Front-fixed group	79.277	6.5	ZF3
	-636.94	0.1	
	90.481	5.5	ZK9
	1324.6	1.774~26.774~42.374	
	476.19	2.0	ZK9
	62.5	0.8	
Vari-double group	116.28	2.0	ZK9
	65.79	7.0	
	-82.203	1.58	ZK9
	39.645	3.03	
	45.767	5.0	ZF12
	171.2	41.612~25.918~1.157	
Compensating group	132.28	1.3	ZF1
	54.945	4.0	K9
	-92.605	10.306~1.0~10.161	
	∞	1.0	
	38.648	6.15	K9
	-77.623	2.05	ZBAF21
	240.58	50.65	
Rear-fixed group	77.493	3.9	K9
	-122.15	4.35	
	-34.04	1.95	ZBAF3
	-114.185	56.0969~56.0972~56.0952 (Rear cut-off range)	

应该指出, 在验证公式(8)时, 本系统特意使补偿组(双胶合)和后面双胶合组合, 构成新的补偿组。中焦时, $f'_1 = -42.16427$ mm, $f'_2 = 62.24067$ mm, 当 $f' = 126.01$ mm 时, $\beta_1 = \beta_2 = -1$, 将上述数据代入(8)式可以得到验证。

例 3: 对焦距 $f' = 18.48 \rightarrow 262.86$ mm, $y' =$

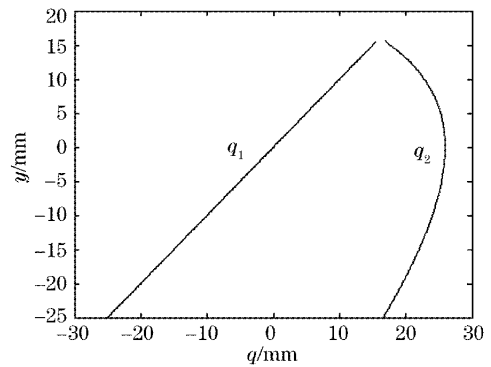


图 2 例 2 中变倍组与补偿组的变化关系曲线
Fig. 2 Vari-double group versus compensating group in example 2

6.4 mm, $F = 3$ 的变焦镜头设计。已知: $f'_1 = -44.87545$ mm, $f'_2 = 69.63405$ mm, $\beta_1 = \beta_2 = -1$, 光学结构参量见表 3。该系统成像质量仍然较好, 像面非常稳定。应用 MATLAB 语言编程可以求出补偿组的运动轨迹曲线, 如图 3 所示。 q_1 及 q_2 曲线是按(8)式计算的。 $\beta_1 = \beta_2 = -1$, 可得到高变倍比。由图 3 可以看出, 在 q_2 两曲线交叉处实现换根。

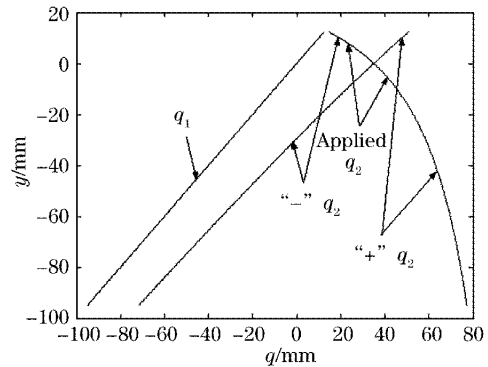


图 3 例 3 中变倍组与补偿组的变化关系曲线
Fig. 3 Vari-double group versus compensating group in example 3

5 结 论

运用动态光学理论推导出二组元变焦光学系统的像移补偿组公式, 从而可计算得到像移补偿组的曲线, 实现像移补偿过程, 保持变焦光学系统像面的相对稳定。根据像移补偿曲线可在数控机床上加工用来进行机械像移补偿的凸轮机构, 既保证像面稳定精度, 又可提高生产效率。文中还给出三个设计实例, 结果充分证明像移补偿公式是完全正确的。同时表明将动态光学理论应用在变焦光学系统镜头的设计中, 具有广泛的实用性和应用前景。

表 3 例 3 中三个位置(短、中、长)焦距的计算结果

Table 3 Results of three positions, long, medium and short focal length for example 3

Lens group	R /mm	d /mm	Glass mark	D /mm
Front-fixed group	625.2	14	ZK9	102
	-190.11	5	ZF6	102
	-2312.00	0.1		102
	274.20	8	ZK9	102
	2208.00	0.1		102
	169.82	8	ZK9	102
	438.50	5~100~102.5		102
Vari-double group	159.22	3	ZK9	42
	61.94	5.15		40
	-138.68	3	ZK9	40
	121.34	6		38
	-46.67	3	ZK9	38
	91.62	6	ZF6	42
	-138.68	172.126~35~1.592		42
Compensating group	-2606.00	5.31	ZK9	42
	-73.11	0.1		42
	54.70	4	ZF6	42
	30.27	9	ZK1	42
	-263.00	2.874~45~65.908		42
Aperture diaphragm	∞	2.5		20.826
Rear-fixed group	-92.26	3	K10	28
	25.64	4	ZF2	30
	52.12	15		27
	42.27	4	ZK9	28
	-657.70	0.1		28
	29.79	4	ZF6	28
	15.959	8	K9	28
	42.27	39.7536~39.7536~39.7534		24

参 考 文 献

- 1 Wang Zhijian, Zheng Jianping. The object-image conjugate theory of optical systems and optical elements in motion [J]. *J. Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics*, 1992, **15**(2): 1~13 (in Chinese)
王志坚,郑建平. 动态光学系统的物象共轭理论[J]. 长春光学精密机械学院学报, 1992, **15**(2): 1~13
- 2 Wang Zhijian, Zheng Jianping. The image-forming properties of optics systems and elements in motion[J]. *J. Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics*, 1992, **15**(2): 14~24 (in Chinese)
王志坚,郑建平. 光学系统及元件动态下成像特性[J]. 长春光学精密机械学院学报, 1992, **15**(2): 14~24
- 3 Wang Zhijian, Zheng Jianping. Optical image-stabilization and generalized optical image-stabilization[J]. *J. Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics*, 1992, **15**(2): 29~37 (in Chinese)
王志坚,郑建平. 光学稳象、广义光学稳象[J]. 长春光学精密机械学院学报, 1992, **15**(2): 29~37
- 4 Wang Zhijian. *Optical Technology Handbook* [M]. Beijing: China Machine Press, 1987. 1119~1166 (in Chinese)
王之江. 光学技术手册(上册)[M]. 北京: 机械工业出版社, 1987. 1119~1166
- 5 Zhang Yimo. *Applied Optics* [M]. recension, Beijing: China Machine Press, 1988. 536~576 (in Chinese)
张以谟. 应用光学[M]. 修订本, 北京: 机械工业出版社, 1988. 536~576
- 6 Tao Chunkan. *Zooming Optical System Design* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1988. 121~163 (in Chinese)
陶纯堪. 变焦光学系统设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 1988. 121~163
- 7 Wang Zhijian, Zheng Jianping. *Optical image-stabilizing system*[J]. *J. Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics*, 1992, **15**(2): 38~51 (in Chinese)
王志坚,郑建平. 光学稳像系统[J]. 长春光学精密机械学院学报, 1992, **15**(2): 38~51
- 8 Zhou Qingcai, Wang Zhijian, Wang Chunyan. The application of the theory about image stabilization in calculating image motion on space remote sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(3): 413~417 (in Chinese)
周庆才,王志坚,王春艳. 基于稳像理论的空间光学遥感像移补偿的分析与计算[J]. 光学学报, 2004, **24**(3): 413~417