

文章编号:1001-9014(2010)03-0196-05

四反射镜红外变焦距系统设计

张庭成, 刘莉萍, 常军, 王涌天
(北京理工大学 光电学院, 北京 100081)

摘要:介绍了一种相对简单的、基于赛德尔像差理论的四反射镜机械补偿红外变焦距系统的光学设计方法. 该方法的实现包括对单个反射镜成像规律的研究、变焦系统机械补偿的概念以及反射变焦系统赛德尔像差系数解析表达式的推导. 该方法的优点在于, 通过求解赛德尔像差方程组可以得到系统的初始结构参数, 如各个镜子的曲率半径和间隔等. 两个设计实例的结果表明, 这种设计方法在设计大变倍比红外反射变焦系统时是可行的.

关键词:机械补偿; 红外反射变焦距系统; 赛德尔像差理论; 结构参数

中图分类号: O43 文献标识码: A

DESIGN OF INFRARED ZOOM SYSTEM WITH 4 REFLECTIVE MIRRORS

ZHANG Ting-Cheng, LIU Li-Ping, CHANG Jun, WANG Yong-Tian
(School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: A relatively simple optical method based on Seidel aberration theory was presented for the design of mechanically compensated infrared reflective zoom systems with 4 mirrors. This research includes the study of image formation rules by a single mirror, the concept of the mechanical compensation method in zoom systems, and the derivation of analytical formulae for the Seidel aberration coefficients. The advantage of this method is that it allows the designer to achieve the initial structure parameters of the optical system (radii of curvature and separations between mirrors, etc.) by solving a set of Seidel aberration coefficient functions. Two design examples of 4-mirror zoom systems were given. The results show that the proposed method is feasible in the design of infrared reflective zoom systems with large zoom ratios.

Key words: mechanical compensation; infrared reflective zoom system; Seidel aberration theory; structure parameter

引言

虽然在先前的研究中, 人们已经设计出了一些典型的透射式红外变焦距系统, 但是为了校正色差, 这些系统往往需要使用多种红外材料和多片镜片, 很难满足轻型化的要求. 而且, 由于可供选择的红外材料极其有限, 透射式红外变焦距系统一般很难拓宽成像谱段. 另外, 大型玻璃镜片不仅难于加工和装调, 而且受自身重力等因素的影响会产生形变, 影响系统的成像质量. 所以透射式红外变焦距系统无法满足如空间应用中所需的大型化的要求.

为了克服上述透射式红外变焦距系统的缺点, 可以考虑用反射镜来代替红外材料, 以设计出符合要求的反射式红外变焦系统. 这是因为反射系统不

存在色差, 可以很容易达到拓宽成像谱段的目的, 并且反射镜相对于加工, 可在背面做轻量化设计和处理, 能够满足系统大型化和轻型化的需要. 反射式红外变焦系统是通过改变某些镜子的相对位置来实现变焦的^[1]. 如果系统能够实现连续变焦, 并且在连续变焦的过程中, 能够始终保持像面的稳定, 那么称这样的反射式红外变焦系统为机械补偿型的变焦系统^[2]. 在这样的系统中, 至少需要有一个镜子是做非线性运动的, 以满足合成共轭距的不变^[3]. 目前, 能够满足机械补偿条件的反射式红外变焦系统的设计实例很少^[4~10], 本文主要研究的是四反射镜机械补偿红外变焦距系统的设计.

本文给出了赛德尔像差系数和四反射镜变焦距系统结构参数之间的关系, 这主要是通过推导反射

收稿日期: 2009-03-31, 修回日期: 2009-11-05

基金项目: 教育部长江学者和创新团队发展计划项目(IRT0606)

作者简介: 张庭成(1982-), 男, 辽宁盘锦人, 博士研究生, 主要从事成像光学系统设计方面的研究. E-mail: tczhang1217@gmail.com.

Received date: 2009-03-31, revised date: 2009-11-05

变焦系统中各个镜子在不同焦距值下的赛德尔像差系数来实现的. 虽然赛德尔像差理论只能得到一个近似的结果,但是在设计的初级阶段,常常会用到它,因为它可以用简单的解析表达式来描述系统的初级像差,如球差、彗差、像散等,以允许我们对光学系统的成像质量有更进一步的认识,这在系统设计的初级阶段是很重要的^[11].

1 四反射系统机械补偿的实现

为了简化模型,将反射镜置于空气中. 在这种情况下,反射镜的共轭方程式可以表示为:

$$\frac{1}{l'} + \frac{1}{l} = \frac{1}{f'} = \varphi, \quad (1)$$

其中, l 为镜子的物距, l' 为像距, f' 为镜子的焦距, φ 为镜子的光焦度. 而反射镜的光焦度 φ 可以表示成^[12]:

$$\varphi = \frac{1}{f'} = \frac{2}{R}, \quad (2)$$

其中, R 为反射镜的曲率半径. 下面给出反射镜的垂轴放大率的计算公式:

$$\beta = -\frac{l'}{l} = \frac{1}{1 - l/\varphi}, \quad (3)$$

以及镜子物距和像距的计算公式:

$$l = f' \left(1 - \frac{1}{\beta}\right), \quad (4)$$

$$l' = f' (1 - \beta). \quad (5)$$

在机械补偿反射变焦距系统中,除了变倍组做线性运动外,为了稳定像面,还需要至少有一个镜子做非线性运动. 对于四反射机械补偿变焦距系统,可以选择次镜作为变倍组(做线性运动),选择三镜作为补偿组(做非线性运动),这就要求在变焦过程中,次镜和三镜的合成共轭距必须始终是一个常数^[10],通过公式(4)、(5)可以得到:

$$L_1 = \left(\frac{1}{\beta_{21}} - \beta_{21}\right) f_2' + \left(\frac{1}{\beta_{31}} - \beta_{31}\right) f_3', \quad (6)$$

$$L_i = \left(\frac{1}{\beta_{2i}} - \beta_{2i}\right) f_2' + \left(\frac{1}{\beta_{3i}} - \beta_{3i}\right) f_3' \\ = L_1, \beta_{21}\beta_{2i} > 0, \beta_{31}\beta_{3i} > 0 (i = 2, \dots, k), \quad (7)$$

其中, k 表示系统一共含有 k 个位置, β_{21} 、 β_{31} 为系统在第 1 个位置时次镜和三镜的垂轴放大率, β_{2i} 、 β_{3i} 为系统在第 i 个位置时次镜和三镜的垂轴放大率. 此外,系统在各个位置的焦距值可以表示为^[13]:

$$F_i = -f_1' \beta_{2i} \beta_{3i} \beta_4, \quad (8)$$

其中 β_4 为四镜的垂轴放大率,在变焦过程中是一个不变量.

2 四反变焦系统的赛德尔像差系数

由于所选结构参数的不同,赛德尔像差系数的解析表达式也不尽相同,不过一般情况下,结构参数包括系统各个镜子的曲率半径和间隔. 将孔径光阑设在主镜上,系统对无限远物体成像,根据下面的一组公式^[14]就可以计算出系统在第 i 个位置时,各个镜子的赛德尔像差系数,其相加的结果就是系统在第 i 个位置的赛德尔像差系数:

$$S_{1i} = \sum_{j=1}^4 h_{ji} P_{ji}, \quad (9)$$

$$S_{2i} = \sum_{j=1}^4 h_{zji} P_{ji} - J_i \sum_{j=1}^4 W_{ji}. \quad (10)$$

$$S_{3i} = \sum_{j=1}^4 \frac{(h_{zji})^2}{h_{ji}} P_{ji} - 2J_i \sum_{j=1}^4 \frac{h_{zji}}{h_{ji}} W_{ji} \\ + J_i^2 \sum_{j=1}^4 \frac{1}{h_{ji}} \Delta \frac{u_{ji}}{n_j}, \quad (11)$$

$$S_{4i} = J_i^2 \sum_{j=1}^4 \frac{\Delta n_j c_j}{n_j n_j'}, \quad (12)$$

下标 j 表示系统的第 j 个镜子,其中,

$$P_{ji} = n_j^2 (h_{ij} c_j - u_{ij})^2 \Delta \frac{u_{ij}}{n_j}, \quad (13)$$

$$W_{ji} = -n_j (h_{ij} c_j - u_{ij}) \Delta \frac{u_{ij}}{n_j}, \quad (14)$$

$$J_i = n_4' u_4' y_1, \quad (15)$$

$$n_1 = 1, n_1' = -1, n_2 = -1, n_2' = 1, \quad (16.1)$$

$$n_3 = 1, n_3' = -1, n_4 = -1, n_4' = 1, \quad (16.2)$$

$$c_j = \frac{1}{R_j} = \frac{1}{2f_j} = \frac{\varphi_j}{2}, \quad (17)$$

$$u_{1i} = 0, h_{1i} = D/2, D \text{ 为入瞳直径}, \quad (18)$$

$$u_{1zi} = \frac{y_1}{F_i} = \frac{y_1}{-f_1' \beta_{2i} \beta_{3i} \beta_4}, h_{z1i} = 0, \quad (19)$$

$$u'_{ji} = \frac{h_{ji}}{f_j} - u_{ji}, u'_{zji} = \frac{h_{zji}}{f_j} - u_{zji} (j = 1, 2, 3, 4), \quad (20)$$

$$h_{ji} = h_{(j-1)i} - u'_{(j-1)i} d_{(j-1,j)i} (j = 2, 3, 4), \quad (21)$$

$$u_{ji} = u'_{(j-1)i} (j = 2, 3, 4), \quad (22)$$

$$h_{zji} = h_{z(j-1)i} - u'_{z(j-1)i} d_{(j-1,j)i} (j = 2, 3, 4), \quad (23)$$

$$u_{zji} = u'_{z(j-1)i} (j = 2, 3, 4). \quad (24)$$

在这里,为了和公式(6)~(8)保持一致,以减小未知量的个数,将式(4)、(5)代入到 $d_{(j-1,i)i} = l'_{(j-1)i} - l_j$ 中,得到:

$$d_{(j-1,j)i} = f'_{(j-1)} (1 - \beta_{(j-1)i}) - f'_j \left(1 - \frac{1}{\beta_{ji}}\right) \\ (i = 1, 2, \dots, k; j = 2, 3, 4), \quad (25)$$

其中, k 表示系统一共含有 k 个位置, j 是系统的面

型序号. 再将式(25)代入到式(21)和式(23)中, 这样系统的结构参数就只包括了各个镜子的曲率半径和垂轴放大率:

$$\begin{cases} S_{1i} = S_{1i}(r_1, r_2, r_3, r_4, \beta_{2i}, \beta_{3i}, \beta_4) = \text{target}_{1i} \\ S_{2i} = S_{2i}(r_1, r_2, r_3, r_4, \beta_{2i}, \beta_{3i}, \beta_4) = \text{target}_{2i} \\ S_{3i} = S_{3i}(r_1, r_2, r_3, r_4, \beta_{2i}, \beta_{3i}, \beta_4) = \text{target}_{3i} \\ S_{4i} = S_{4i}(r_1, r_2, r_3, r_4, \beta_{2i}, \beta_{3i}, \beta_4) = \text{target}_{4i} \end{cases}, (26)$$

target = [target_{1i}, target_{2i}, target_{3i}, target_{4i}]^T 表示系统在第 i 个位置时的残余像差. 在给出系统的各重结构的残余像差后, 并加入式(6)~(8)的限制, 就可以求解出系统的初始结构了.

3 设计实例

在这个章节中, 举例设计两个四反射镜红外变焦系统, 其中第一个系统的入瞳直径为 400mm, 短焦值为 1000mm, 变倍比为 5, 视场角变化范围是 0.30~0.060; 而第二个系统的入瞳直径为 37.5mm, 焦距变化范围是 -150~-300mm, 视场角变化范围是 1.20~0.60. 两个系统在各个焦距值下该系统都能够达到或者接近衍射极限. 在计算系统的初始结构的时候, 对于第一个系统, 考虑 F₁=1000mm、F₂=2236mm 和 F₃=5000mm 三个位置, 得到如下的方程组:

$$\begin{cases} F_1 = 1000 \\ F_2 = 2236 \\ F_3 = 5000 \\ L_3 = L_1 \\ L_2 = L_1 \quad (i = 1, 2, 3) \\ S_{1i} = S_{1i}(r_1, r_2, r_3, r_4, \beta_{2i}, \beta_{3i}, \beta_4) = 0 \\ S_{2i} = S_{2i}(r_1, r_2, r_3, r_4, \beta_{2i}, \beta_{3i}, \beta_4) = 0 \\ S_{3i} = S_{3i}(r_1, r_2, r_3, r_4, \beta_{2i}, \beta_{3i}, \beta_4) = 0 \\ S_{4i} = S_{4i}(r_1, r_2, r_3, r_4, \beta_{2i}, \beta_{3i}, \beta_4) = 0 \end{cases} (27)$$

为了使得求解的结构参数具有物理意义, 还需要加入以下约束:

$$\begin{cases} \frac{-d_{(1,2)1}}{d_{(2,3)1}} = 0.6, \\ \frac{-d_{(3,4)1}}{d_{(2,3)1}} = 0.35 \\ \frac{l'_{21}}{d_{(2,3)1}} = 0.6, d_{(2,3)1} > 0 \end{cases} (28)$$

由于方程组(27)未知数的个数往往小于方程的个数, 所以该方程组一般没有精确解, 需要通过优化的方法来计算, 并得到其中的一组解如表 1 所列.

表 1 求解的系统 1 的结构参数

Table 1 Initial structure parameters of the first system

反射镜	曲率半径 (mm)	二次曲面系数	垂轴放大率	间距 (mm)
M1	-3797.664	0	0	-1079.858
			1.086	-1007.213
			1.305	-968.043
M2	-2834.650	0	1.446	1866.404
			1.305	1815.453
			1.446	1823.757
M3	-442.105	0	-0.979	1823.757
			-1.136	-588.244
			-1.750	-609.939
M4	879.392	0	-1.050	-657.419

通常由求解初级像差得到的初始结构难以直接达到令人满意的成像质量, 需要作进一步的优化. 在优化的过程中, 将所有镜子的半径、二次曲面系数和间隔设置为变量, 并对系统在各个位置的焦距值进行约束, 同时, 应用 CODE V 提供的默认评价函数作为评价标准, 优化后得到如表 2 的结果, 其结构图和各个焦距值下的 MTF 如图 1 所示. 在变焦的过程中, 次镜做线性运动, 移动的距离为 100.747mm, 方向是从左向右; 同时, 为了起到补偿的作用, 三镜需要做相应的非线性运动, 其移动的距离为 77.502mm, 移动的方向与次镜的移动方向相同. 进一步优化得到的最终结构参数(曲率半径、间隔等)与求解初级像差得到的初始参数相差无几, 表明本文提出的方法可以提供较好的初始结构.

与第一个系统的设计方法相同, 对于第二个系统, 也考虑三个位置: F₁ = -150mm、F₂ = -211mm 和 F₃ = -300mm, 并做出如下约束:

表 2 优化后的系统 1 的结果

Table 2 Structure parameters of the first system after optimization

反射镜	曲率半径 (mm)	二次曲面系数	垂轴放大率	间距 (mm)
M1	-3704.077	-0.567	0	-1070.004
			1.148	-1005.223
			1.358	-969.257
M2	-2697.216	-0.669	1.495	1872.735
			1.358	1832.318
			1.495	1849.491
M3	-343.377	-0.045	-0.106	1849.491
			-0.196	-617.921
			-0.733	-642.284
M4	777.581	-0.072	-1.051	-695.423

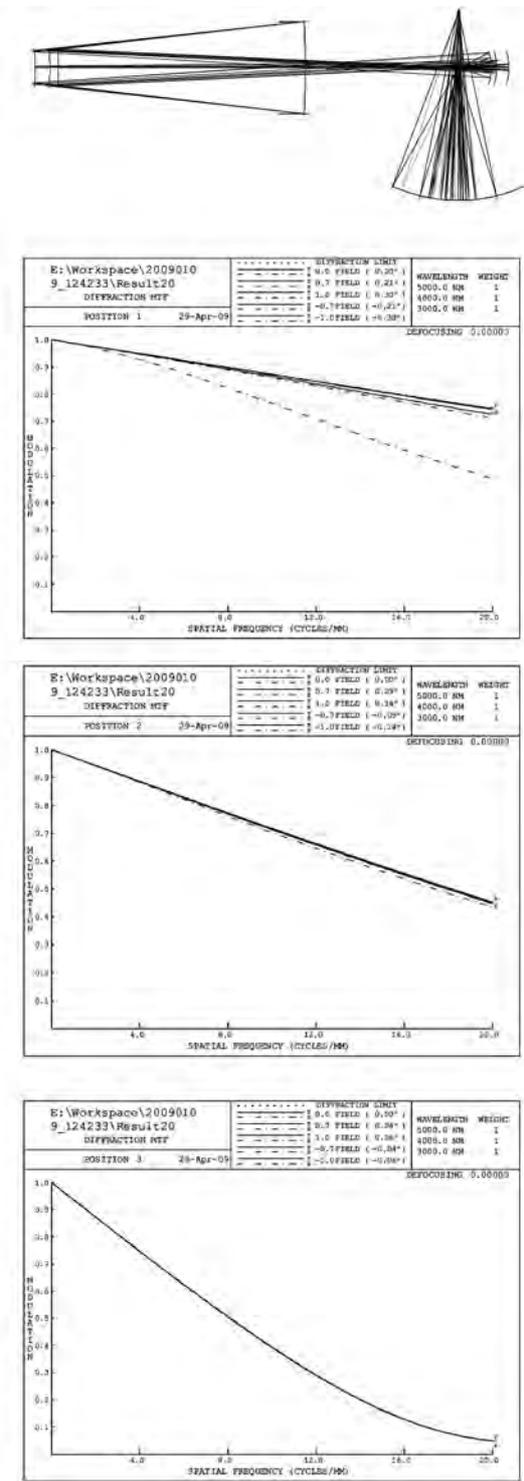


图1 系统1的结构图和各个焦距值下的MTF
Fig.1 Layout and MTF of the first system

$$\begin{cases} \frac{-d_{(1,2)1}}{d_{(2,3)1}} = 0.5 \\ \frac{-d_{(3,4)1}}{d_{(2,3)1}} = 0.45 \\ \frac{l'_{21}}{d_{(2,3)1}} = 0.4, d_{(2,3)1} > 0 \end{cases} \quad (29)$$

表3 求解的系统2的结构参数

Table 3 Initial structure parameters of the second system

反射镜	曲率半径 (mm)	二次曲面系数	垂轴放大率	间距 (mm)
M1	-112.268	0	0	-151.218
			-2.045	-148.444
			-2.869	-146.336
M2	50.781	0	-2.45	258.696
			-2.869	259.622
			-0.245	262.477
M3	-52.030	0	-0.333	-124.348
			-0.452	-128.047
			-1.267	-133.010

表4 优化后的系统2的结果

Table 4 Structure parameters of the second system after optimization

反射镜	曲率半径 (mm)	二次曲面系数	垂轴放大率	间距 (mm)
M1	-214.773	-0.890	0	-151.970
			-2.367	-147.442
			-3.2925	-147.549
M2	95.763	-0.389	-2.825	299.112
			-0.213	300.347
			-0.295	303.472
M3	-101.216	0.257	-0.295	-132.983
			-0.406	-136.745
			-1.183	-141.764

同样,经过优化计算后,得到其中的一组解如表3所示。

将上述系统作为初始结构,用CODE V进行进一步的优化后,结果如表4所示,其结构图和各个焦距值下的MTF如图2所示。在变焦的过程中,次镜和三镜的移动量分别为4.882mm和8.662mm,方向都是从左向右。

4 结论

介绍了一种简单的、易于操作的四反射镜机械补偿红外变焦系统的设计方法。给出了系统能够进行机械补偿的条件,并推导出了在不同位置时,四反射变焦系统各个镜子的赛德尔像差系数的解析表达式。通过等式代换,建立了赛德尔像差系数和系统各个镜子的半径以及垂轴放大率之间的关系。在加入适当的约束条件后,就可以通过求解方程组来得到系统的初始结构。通过上述方法得到的系统可以作为设计起点,通过光学设计软件进行进一步的优化,

以得到最终符合要求的系统。

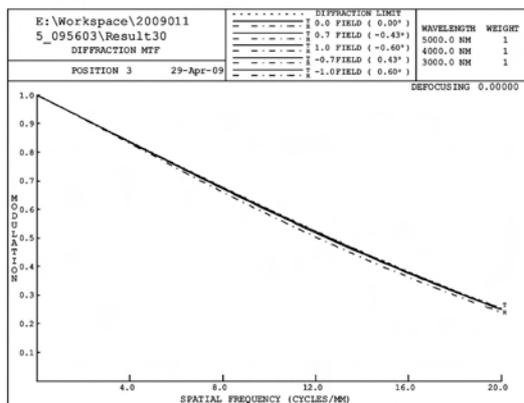
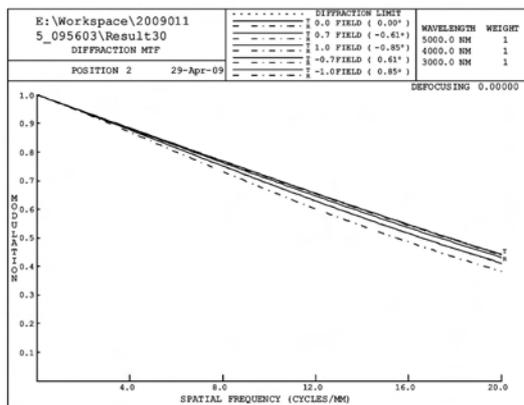
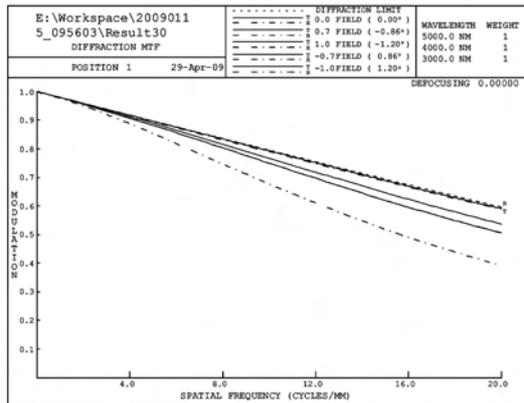
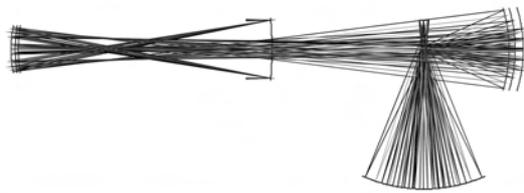


图2 系统2的结构图和各个焦距值下的MTF
Fig.2 Layout and MTF of the second system

REFERENCES

[1] ALAN Dennis Clark. *Zoom lenses* [M]. London: Adam Hilger LTD, 1973.

[2] ROBERT Rennie Shannon. *The art and science of optical design* [M]. Cambridge: Cambridge university press, 1996: 553.

[3] XUE Mingqiu. Gaussian optics of zooming objective [J]. *Movie optics* (薛鸣球. 变焦镜头的高斯光学. 电影光学), 1978, **6**: 1—15.

[4] WALTER E Woehl. An all-reflective zoom optical system for the infrared [J]. *Optical Engineering*, 1981, **20** (3): 450—459.

[5] ALAN A Desrochers. On the analysis of an all-reflective zoom optical system for the infrared [J]. *Optical Engineering*, 1982, **21** (5): 868—871.

[6] RAH Seung Yu, LEE Sang Soo. Four spherical mirror zoom telescope continuously satisfying the aplanatic condition [J]. *Optical Engineering*, 1989, **28** (9): 1014—1018.

[7] BARRY R Johnson, JAMES B Hadaway, TOM Burleson. All reflective four element zoom telescope; design and analysis [J]. *SPIE*, 1990, **1354**: 669—675.

[8] JOHNSON R Barry. Unobscured reflective zoom systems [J]. *SPIE*, 1995, **2539**: 218—225.

[9] BARRY R Johnson. Evolution of a compact, wide field-of-view, unobscured, all-reflective zoom optical system [J]. *SPIE*, 1997, **3061**: 370—376.

[10] JUN Chang, WANG Y T, ZHANG T C, *et al.* All reflective zoom systems for infrared optics [J]. *SPIE-OSA*, 2006, **6342**: 63421Q-1-9.

[11] Slyusarev G G. *Aberration and Optical Design Theory* [M]. Bristol: Adam Hilger Ltd, 1984.

[12] WARREN J S. *Modern optical engineering; the design of optical systems* [M]. New York: McGraw-Hill Inc, 1990: 57—79.

[13] AN Liansheg, LI Lin, LI Jincheng. *Applied optics* [M]. Beijing: Beijing institute of technology press (安连生, 李林, 李金臣. 应用光学. 北京: 北京理工大学出版社), 2002: 202.

[14] YUAN Xucang. *Optical Design* [M]. Beijing: Beijing institute of technology press (袁旭沧. 光学设计. 北京: 北京理工大学出版社), 1988: 84.