

基于微分方程方法的离轴四反光学系统设计

夏春秋^{1,2} 钟 兴² 金 光²

¹中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 随着航空航天遥感相机的分辨率及视场要求的不断提高,离轴四反光学系统受到越来越多的关注。而传统设计方法在离轴系统方面逐渐显示出局限性,因此引入了一种新型的设计方法—微分方程设计方法。首先介绍了微分方程设计方法的原理及设计思路,并加入焦距约束因素,创新性地提出同轴四反光学系统模型;并根据微分方程方法设计了一款焦距为100 mm、弧矢方向视场角为40°,子午方向视场角为10°的大视场离轴四反射镜光学系统,该系统在50 lp/mm处的调制传递函数(MTF)均在0.606以上。经过实验验证,与传统的设计方法相比,微分方程设计方法不但计算简洁、有效,而且在离轴系统的结构参数计算及面型计算方面有广泛的应用前景。

关键词 光学设计;空间相机;离轴四反;微分方程

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0922002

Design of the Off-Axis Four Mirrors System by Differential Equations

Xia Chunqiu^{1,2} Zhong Xing² Jin Guang²

¹Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract With the improvement of requirements in resolution and system's viewing about aerospace remote camera, off-axis four mirrors optical system has attracted more and more attention. Traditional design method in the off-axis system is gradually reaching its limitations. Therefore, a new design method based on differential equations is presented. Firstly, it introduces the principle and design idea of this design method by differential equations, and the restriction factor of the focal length, then an innovative coaxial four mirrors model is put forward. Finally, according to the differential equations method, a large field of view off-axis four mirrors optical system is designed, in which focal length is 100 mm, the field angle in sagittal direction is 40°, the field angle in meridian direction is 10°, the modulation transfer function (MTF) is above 0.606 at the 50 lp/mm. By experimental verification, the design method of differential equations is not only simple and effective in computation, but which also has a wide application prospect in the calculation of structure parameters of off-axis system and surface calculation.

Key words optical design; space camera; off-axis four mirrors design; differential equations

OCIS codes 220.4830; 040.1490

1 引 言

随着航空航天遥感事业的发展,高分辨空间相机的研制已经成为必然趋势。在空间相机设计中大口径折射系统与折反系统等传统折射式系统的分辨率在口径大约为0.5 m时达到极限^[1];同轴反射系统视场小,中心遮拦的存在影响成像的像质;而离轴反射系统不存在中心遮拦而且优化变量增多,既可提高系统视场又可改善成像质量,在对地观测、空间目标探测、天文观测、多光谱热成像、立体测绘等领域应用广泛^[2-4]。

传统离轴三反系统设计往往由赛德尔像差理论求得初始同轴三反结构参数,如曲面半径、间距(厚度)和

收稿日期: 2015-03-02; 收到修改稿日期: 2015-05-17

作者简介: 夏春秋(1991—),女,博士研究生,主要从事光学设计方面的研究。E-mail: chunq.xia@hotmail.com

导师简介: 钟 兴(1982—),男,博士,副研究员,主要从事光学系统设计和光学传感器等方面的研究。

E-mail: ciomper@163.com(通信联系人)

圆锥系数等,然后对此同轴系统采用视场离轴、光阑离轴或者两者结合的方式进行离轴。目前离轴四反系统有两种设计思路,一种是在离轴三反的基础上增加场镜^[5];一种是通过三级像差理论计算同轴四反的基础结构,再对同轴系统进行离轴^[6]。无论是哪种设计方法,其依据仍然是三级相差理论。离轴四反射镜系统比离轴三反射镜系统有更多的优化变量,因此具有更小的系统长度和焦距比,并且视场大、像差小、畸变低、有良好的杂散光抑制能力^[7],更加满足航天应用要求。随着非球面以及离轴系统的加工工艺的日趋成熟,装调技术也不断发展,离轴四反系统设计势必会在将来受到越来越多的关注。

但是随着分辨率及视场需求越来越高,传统的设计方法像差校正能力有限,难以引入更多的自由度优化,对具有非同轴和自由曲面元件的系统无法进行计算,而且在短波、紫外等波段设计面型误差较大,逐渐呈现出局限性^[9]。因此越来越多的研究开始关注矢量波像差理论辅助传统光学系统设计、装调的方案^[8]。但要想得到分辨率及成像质量更高的系统,对设计方法进行创新会更加有效、彻底。

微分方程设计光学系统早在1905年便已有相关文献出现。1905年Schwarzschild论述如何建立微分方程表达消球差两镜望远系统。1992年Shealy等^[10]利用微分方程设计方法(DEDM)设计了一系列相关光学系统。1999年Semin等^[11]通过用微分方程表达光程关系模型模拟了同轴三反光学系统。论文各类设计实例显示基于微分方程的设计方法在高分辨率和短波和紫外范围成像优势明显。而且该方法不但可以设计光学系统,同时也可以对已有的系统进行优化,获取更好的像质。在曲线拟合过程中,无论是非球面还是自由曲面均可以拟合。在自由曲面设计方面优于传统的设计方案。近十年考虑装调难度与成本,同轴三反成为各类空间相机的主流设计。基于赛得尔理论设计的同轴三反能够适应已有的设计、优化软件。而且基于微分方程的方法虽有上述优点,但对初始结构的依赖性较强,因此国内外自1999年^[10]之后尚未有利用该方法设计光学系统的文章发表,在同轴四反及离轴反射系统中的应用还属空白。

但基于微分方程的方法在自由曲面设计方面优势明显,可直接利用坐标数据拟合自由曲面。且基于等光程、阿贝条件设计的系统仍可以在基于赛德像差理论的软件中优化。在大视场与非球面、自由曲面方面优化具有优势。同时,初始结构的限定在后期工作中会继续探讨。因此解决上述问题,探究其在离轴四反光学系统中的应用具有深远的实用意义。

本文通过建立基于光程相等、阿贝条件等理想成像条件创建了同轴四反光学系统的微分方程模型,在其中创新性地加入焦距约束元素,在简化模型的基础上增加了可靠性。通过该模型获取了同轴四反光学系统,并将其离轴,完成一款离轴四反光学系统的设计。证明该新型设计思路在离轴反射系统设计中具有极大的潜力。

2 同轴四反微分方程数学模型

如图1所示光线平行入射同轴四反射光学系统时,分别经过4片反射镜最终交会在焦点位置。假设成像焦点为原点(0,0),为计算方便,成像在原点的四镜坐标为 (z_1, y_1) ,在 z 、 y 坐标轴中4片反射镜的坐标分别表示为: $M_4(z_1, y_1)$ 、 $M_3(z_2, y_2)$ 、 $M_2(z_3, y_3)$ 、 $M_1(z_4, y_4)$ 。其中 z_k 与 y_k 的关系表达式代表了反射镜的面型方程。

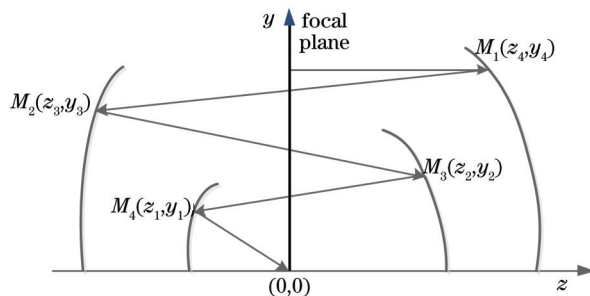


图1 同轴四反结构模型

Fig.1 Model of coaxial four-mirror system

从光程相等、阿贝正弦条件等成像原理与几何光学角度考虑微分方程的表达式如何建立。首先根据4片反射镜的坐标数据,光程总量可以表示为:

$$W = \sum_{k=1}^4 \sqrt{(y_k - y_{k-1})^2 + (z_k - z_{k-1})^2}, \quad (1)$$

(1)式代表了从焦平面位置出发的平行光入射至光学系统,分别经过4片反射镜,汇聚在焦点的总光程。

同时,在一段传播距离中光程的微分可以通过阿贝正弦条件公式转化为表达式^[11]:

$$\frac{z_{(k+1)} - z_k}{y_{(k+1)} - y_k} = \frac{[1 - (dy_k/dz_k)^2][z_k - z_{(k-1)}] + 2[y_k - y_{(k-1)}](dy_k/dz_k)}{2[z_k - z_{(k-1)}](dy_k/dz_k) - [y_k - y_{(k-1)}][1 - (dy_k/dz_k)^2]}, \quad (2)$$

式中 dy_k/dz_k 代表了第 k 面镜子的面型曲率, $\frac{z_{(k+1)} - z_k}{y_{(k+1)} - y_k}$ 代表了从第 k 面镜子入射至第 $k+1$ 面镜子时传播方向与 z 轴的夹角正弦值。(2)式表示的是,光在 $k, k+1$ 两片反射镜之间传播,其方向与第 k 面反射镜的面型及从第 $k-1$ 面镜子入射至第 k 面镜子的入射位置和入射方向的关系式。

由于焦平面出射的光线 $z_5 = 0$; $y_5 = y_4$, 所以 $\frac{z_5 - z_4}{y_5 - y_4} = \frac{[1 - (dy_4/dz_4)^2](z_4 - z_3) + 2(y_4 - y_3)(dy_4/dz_4)}{2(z_4 - z_3)(dy_4/dz_4) - (y_4 - y_3)[1 - (dy_4/dz_4)^2]}$ 可以简化为

$$\frac{z_4 - z_3}{y_4 - y_3} = \frac{1 - (dy_4/dz_4)^2}{2(dy_4/dz_4)}。$$

由(1)式和(2)式可以列出一个同轴四反的微分方程组:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{z_3 - z_2}{y_3 - y_2} = \frac{[1 - (dy_2/dz_2)^2](z_2 - z_1) + 2(y_2 - y_1)(dy_2/dz_2)}{2(z_2 - z_1)(dy_2/dz_2) - (y_2 - y_1)[1 - (dy_2/dz_2)^2]} \\ \frac{z_2 - z_1}{y_2 - y_1} = \frac{[1 - (dy_1/dz_1)^2]z_1 + 2y_1(dy_1/dz_1)}{2z_1(dy_1/dz_1) - y_1[1 - (dy_1/dz_1)^2]} \\ \frac{z_4 - z_3}{y_4 - y_3} = \frac{[1 - (dy_3/dz_3)^2](z_3 - z_2) + 2(y_3 - y_2)(dy_3/dz_3)}{2(z_3 - z_2)(dy_3/dz_3) - (y_3 - y_2)[1 - (dy_3/dz_3)^2]} \\ \frac{z_4 - z_3}{y_4 - y_3} = \frac{1 - (dy_4/dz_4)^2}{2(dy_4/dz_4)} \\ W = \sqrt{y_1^2 + z_1^2} + \sqrt{(y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2} \\ + \sqrt{(y_3 - y_2)^2 + (z_3 - z_2)^2} + \sqrt{(y_4 - y_3)^2 + (z_4 - z_3)^2} + z_4 \\ \frac{y_4}{y_1} \sqrt{(z_1 + y_1)^2} = f \end{array} \right. \quad (3)$$

如果提供足够的已知条件,可以通过该微分方程组求解任意一片反射镜面型。但是由于该方程组中包含了所有镜子的面型数据即微分结构,这些未知量太多,因此需要寻找更简洁和更具有约束性的公式去代替部分微分方程。

通过观察光程总量(1)式,可以看出对于某一变量来说,并不是所有的多项式都有其非零导数。比如说对于 z_k 而言,只有(1)式与其相关的两项有非零导数,因此可以将这两项写为:

$$\sqrt{(y_k - y_{k-1})^2 + (z_k - z_{k-1})^2} + \sqrt{(y_{k+1} - y_k)^2 + (z_{k+1} - z_k)^2} = C(z_k, y_k), \quad (4)$$

(4)式右侧表示从 (z_{k-1}, y_{k-1}) 点到 (z_{k+1}, y_{k+1}) 的路程数值大小。固定 (z_k, y_k) , 光程值对于任何 (z_k, y_k) 都将会有相同可能的大小,包括已知的数值,比如已知初始条件在第四面镜子中有一定点 (z_{0k}, y_{0k}) , 则该方程也可写成:

$$\sqrt{(y_{0k} - y_{k-1})^2 + (z_{0k} - z_{k-1})^2} + \sqrt{(y_{k+1} - y_{0k})^2 + (z_{k+1} - z_{0k})^2} = C(z_k, y_k). \quad (5)$$

由(4)式、(5)式可以推导得到(6)式:

$$\sqrt{(y_k - y_{k-1})^2 + (z_k - z_{k-1})^2} + \sqrt{(y_{k+1} - y_k)^2 + (z_{k+1} - z_k)^2} = \sqrt{(y_{0k} - y_{k-1})^2 + (z_{0k} - z_{k-1})^2} + \sqrt{(y_{k+1} - y_{0k})^2 + (z_{k+1} - z_{0k})^2}. \quad (6)$$

在(3)式中约束焦距的条件只有 $\frac{y_4}{y_1} \sqrt{(z_1 + y_1)^2} = f$ 。而大多数光学设计的初始条件均会首先提出焦距数值。

在多次试验及实际操作中发现,已有的反射系统微分方程设计模型暴露了对焦距约束力较弱的缺点,在实际系统求解中往往出现焦距值与需求不符的情况。因此,为了更好的约束焦距,探讨焦距在同轴四反射镜光学系统中更进一步的表述形式很有必要。如图2所示,给出了在同轴四反结构中焦距与各透镜物象距离的几何关系。

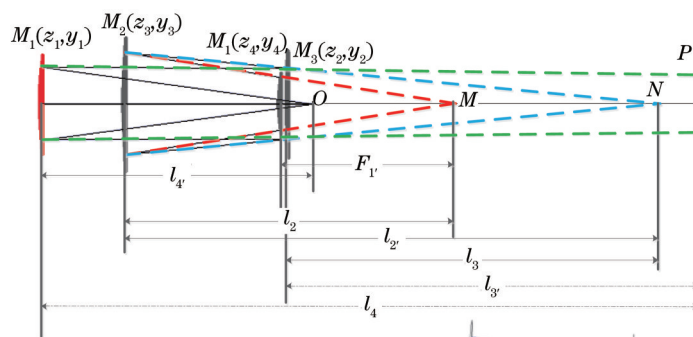


图2 同轴四反结构几何光学模型

Fig.2 Geometrical model of the coaxial four-mirror system

在图2中, $(z_1, y_1), (z_2, y_2), (z_3, y_3), (z_4, y_4)$ 分别是4片反射镜的坐标表示。其中 (z_1, y_1) 是主镜。水平入射至主镜 (z_1, y_1) 的平行光经过多次反射最后经过四镜汇聚于一点。从主镜发出的光入射至次镜 (z_3, y_3) , 将入射光线延长, 红色的延长线汇聚于一点 M 。该点至次镜 (z_3, y_3) 的距离即为 l_2 。从镜子 M_2 反射的光入射至 M_3 , 做光线延长线交光轴于 N , 则 N 至 M_2 的距离为 l'_2 。 N 至 M_3 的距离为 l_3 。同理可以得到 l'_3, l_4, l'_4, f'_1 。

根据上图所示的几何关系, 可以推导同轴四反结构中焦距与各透镜坐标数值表达的关系式:

$$\begin{aligned}
 f' &= f'_1 \beta_2 \beta_3 \beta_4 = f'_1 \frac{l'_2 l'_3 l'_4}{l_2 l_3 l_4} \\
 &= \left[\frac{(z_3 - z_4)}{(y_3 - y_4)} y_3 - d_{3,4} \right] \frac{(z_3 - z_2)(y_3 - y_4)}{(y_3 - y_2)(z_3 - z_4)} \\
 &\quad \frac{(z_3 - z_2)}{(y_3 - y_2)} y_3 - d_{3,2} \quad \frac{z_1(y_1 - y_2)}{(z_1 - z_2)y_1} \\
 &\quad \frac{(z_1 - z_2)}{(y_1 - y_2)} y_1 - d_{2,1}
 \end{aligned} \tag{7}$$

在实际问题中, 如果已知一个面型数据表达, 根据(1)式~(7)式完全可以建立同轴四反光学系统的数学模型。如(8)式所示, 已知面型 m 上的一个定点坐标 (z_{0k}, y_{0k}) 和面型 k 的曲面表达式, 可以将微分方程模型写为:

$$\begin{cases}
 \sqrt{(y_m - y_{m-1})^2 + (z_m - z_{m-1})^2} + \sqrt{(y_{m+1} - y_m)^2 + (z_{m+1} - z_m)^2} = \\
 \sqrt{(y_{0m} - y_{m-1})^2 + (z_{0m} - z_{m-1})^2} + \sqrt{(y_{m+1} - y_{0m})^2 + (z_{m+1} - z_{0m})^2} \\
 \frac{y_4}{y_1} \sqrt{(z_1 + y_1)^2} = f \\
 \frac{z_{(k+1)} - z_k}{y_{(k+1)} - y_k} = \frac{[1 - (dy_k/dz_k)^2](y_k - y_{(k-1)}) + 2(z_k - z_{(k-1)})(dy_k/dz_k)}{2[y_k - y_{(k-1)}](dy_k/dz_k) - (z_k - z_{(k-1)})[1 - (dy_k/dz_k)^2]} \\
 f' = \left[\frac{(z_3 - z_4)}{(y_3 - y_4)} y_3 - d_{3,4} \right] \frac{(z_3 - z_2)(y_3 - y_4)}{(y_3 - y_2)(z_3 - z_4)} \\
 \frac{(z_3 - z_2)}{(y_3 - y_2)} y_3 - d_{3,2} \quad \frac{z_1(y_1 - y_2)}{(z_1 - z_2)y_1} \\
 \frac{(z_1 - z_2)}{(y_1 - y_2)} y_1 - d_{2,1} \\
 W = \sqrt{y_1^2 + z_1^2} + \sqrt{(y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2} + \\
 \sqrt{(y_3 - y_2)^2 + (z_3 - z_2)^2} + \sqrt{(y_4 - y_3)^2 + (z_4 - z_3)^2} + z_4
 \end{cases} \tag{8}$$

该微分方程组即同轴四反光学系统初始结构的数学模型。其满足了等光程、阿贝正弦条件等理想成像光学原理。如若已知一个镜面的参数, 即 x_i, y_i 的表达式, 将其带入利用消球差条件、等光程等约束下的微分方程模型, 经过反复迭代最优化求解, 可计算出其余镜面的镜面坐标数据, 并将坐标数据拟合成球面、二次曲面或者自由曲面。利用光学设计和分析软件如 Zemax 软件, 计算、分析得到同轴四反系统。为了避免中心遮拦, 获取大视场, 对获取的同轴四反光学系统进行光阑离轴或者视场离轴。设计具体流程如下图所示:

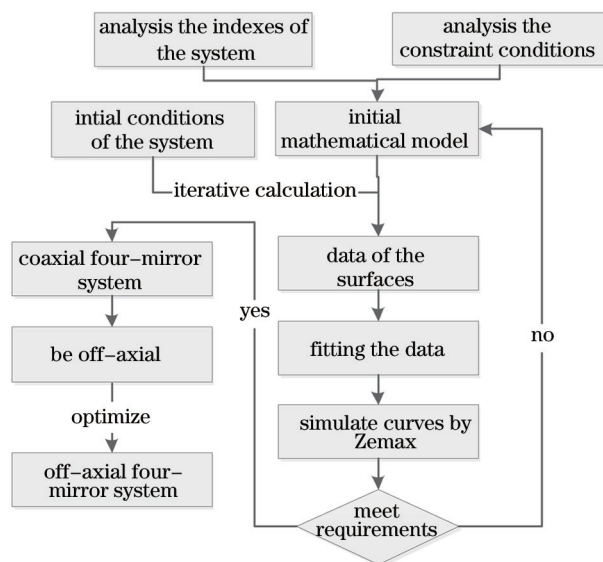


图3 微分方程设计光学系统流程

Fig.3 Flow chart of optical design method by differential equations

3 离轴四反射镜光学系统设计

根据上述方法设计一款离轴四反射镜系统,焦距为 100 mm,总光程设为 500 mm。只提供第 2 片镜子 M_2 的形式为: $(z_3 - 100)^2 + y_3^2 = 200^2$ 。

首先根据总光程和已知镜面位置,预测其他镜子位置(光路总距离为 500 mm)。不同的初始结构位置会带来不同的同轴结构。设第 1 片镜子顶点在 $(-120, 0)$ 处,第 2 片镜子顶点在坐标 $(-10, 0)$ 处,第 4 片镜子顶点在坐标 $(80, 0)$ 。

根据镜子的坐标可以将(8)式写为:

$$\begin{cases}
 \sqrt{y_1^2 + z_1^2} + \sqrt{(y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2} = \sqrt{y_{10}^2 + z_{10}^2} + \sqrt{(y_2 - y_{10})^2 + (z_2 - z_{10})^2} \\
 z_4 + \sqrt{(y_4 - y_3)^2 + (z_4 - z_3)^2} = z_{04} + \sqrt{(y_{04} - y_3)^2 + (z_{04} - z_3)^2} \\
 \frac{y_4}{y_1} \sqrt{(z_1 + y_1)^2} = f \\
 \frac{z_4 - z_3}{y_4 - y_3} = \frac{[1 - (dy_3/dz_3)^2](z_3 - z_2) + 2(y_3 - y_2)(dy_3/dz_3)}{2(z_3 - z_2)(dy_3/dz_3) - (y_3 - y_2)[1 - (dy_3/dz_3)^2]} \\
 f' = \left[\frac{(z_3 - z_4)}{(y_3 - y_4)} y_3 - d_{3,4} \right] \frac{(z_3 - z_2)(y_3 - y_4)}{(y_3 - y_2)(z_3 - z_4)} \\
 \frac{(z_3 - z_2)}{(y_3 - y_2)} y_3 - d_{3,2} \quad \frac{z_1(y_1 - y_2)}{(z_1 - z_2)y_1} \\
 \frac{(z_1 - z_2)}{(y_1 - y_2)} y_1 - d_{2,1} \\
 W = \sqrt{y_1^2 + z_1^2} + \sqrt{(y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2} + \\
 \sqrt{(y_3 - y_2)^2 + (z_3 - z_2)^2} + \sqrt{(y_4 - y_3)^2 + (z_4 - z_3)^2} + z_4
 \end{cases} \quad (9)$$

将 $y_3 = 0.5$, $z_3 = 100 - \sqrt{200^2 - y_3^2}$ 作为初始条件,其中 $(x_{10}, y_{10}), (x_{40}, y_{40})$ 作为已知点可以设为第 1 片镜子及第 4 片镜子的顶点。然后将上述初始条件代入(9)式求得未知量 $x_1, y_1, x_2, y_2, x_4, y_4$ 。将第 1 次求得的数值作为新的初始条件再带入方程, y_3 增加步长,不断循环此过程,迭代优化,求出每次变化之后,所有的未知量跟随 y_3 数值变化后的坐标位置,如表 1 所示。

将上述表格内数值拟合为曲线,并为方便曲线在光学软件中的模拟,根据(10)式可以拟合坐标数值取得相关参数。同时,也可以用 (x, y) 的多项式表达式(11)拟合自由曲面。高阶的多项式对低阶像差作用不大,

表 1 系统坐标参数数值

Table 1 Coordinate parameters of the coaxis system

y_3	x_1	y_1	x_2	y_2	x_4	y_4
0.5	-120.77591	0.13786	-53.64989	0.17251	82.87404	0.11415
0.75	-120.77593	0.27302	-53.64985	0.34163	82.87414	0.22606
1	-120.77591	0.40818	-53.64971	0.51076	82.87429	0.33797
1.25	-120.77585	0.54335	-53.64947	0.67989	82.87447	0.44988
1.5	-120.77575	0.67851	-53.64912	0.84902	82.87470	0.56178
1.75	-120.77560	0.81367	-53.64866	1.01815	82.87497	0.67369
...

同时增加了加工难度,因此一般选取四阶表达即可:

$$z = \frac{cy^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2y^2}}, \quad (10)$$

$$z(x,y) = \frac{c(y^2 + x^2)}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2(y^2 + x^2)}} + A_2y + A_3x^2 + A_5y^2 + A_7x^2y + A_9y^3 + A_{10}x^2y^2 + A_{14}y^4. \quad (11)$$

式中 c 是半径曲率、 k 为 conic 系数, A_i 是 xy 多项式的系数。

将数据在 1Stop1 软件中利用准牛顿法和通用全局优化法进行曲线拟合,主镜 M_1 的拟合结果如图 4 所示。在此设计过程中采用(10)式的曲线拟合方案。用残差平方和代表其误差,则误差数值为 2.789×10^{-6} 。后两片未知镜子 M_3 、 M_4 的误差同样在 10×10^{-6} 数量级。因此可以忽略曲线拟合误差对系统造成的影响。若采用(11)式进行拟合,其拟合结果更加精确,自由曲面拟合结果的误差数量级达到 10×10^{-10} 。

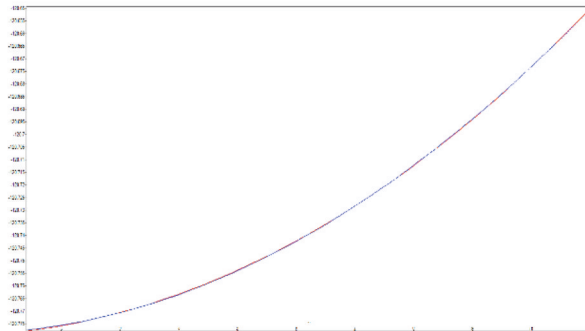


图 4 曲线拟合结果图

Fig.4 Structure of the curve fitting

将各反射镜拟合后的曲线参数带入 Zemax 软件中模拟光学系统。系统参数如表 2 所示。

表 2 同轴四反光学系统结构参数

Table 2 Parameters of the coaxis four-mirror system

Mirror	Radius	Distance	Glass
M_1	128.92	-96.0	Mirror
M_2	200.0	130.0	Mirror
M_3	271.0	-154.0	Mirror
M_4	242.0	120.92	Mirror

对系统进行优化过后得到系统结构如表 3 所示。该初始系统的结构图及调制传递函数(MTF)曲线、点列图如图 5、6 所示。表明该初始结构分辨率极高,像质优良。

表3 优化后系统参数

Table 3 Optimized parameters of the system

Mirror	Radius	Distance	Glass
M_1	130.546	-89.528	Mirror
M_2	201.235	130.382	Mirror
M_3	265.2	-115.861	Mirror
M_4	255.557	147.2432	Mirror

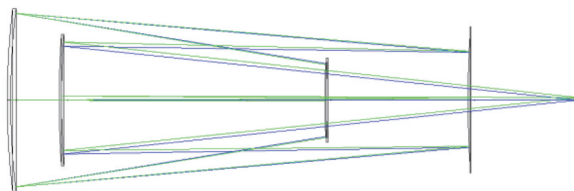


图5 同轴四反结构图

Fig.5 Structure of the coaxis four-mirror system

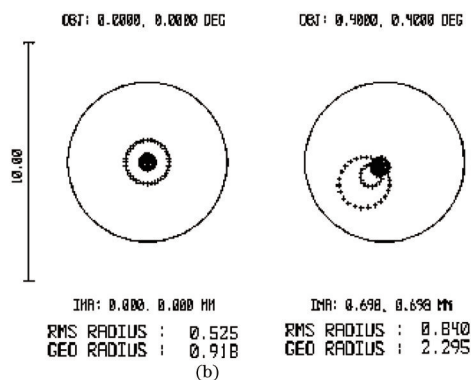
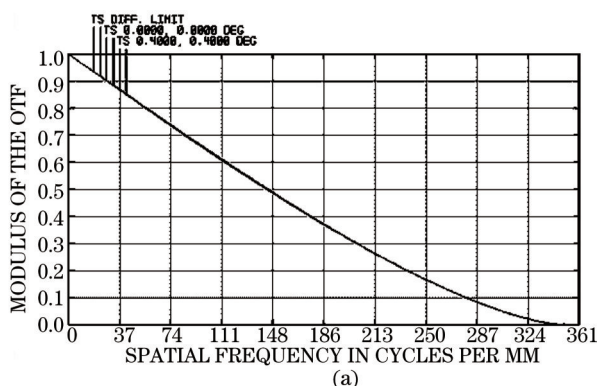


图6 同轴四反系统的 (a) MTF 曲线及 (b) 点列图

Fig.6 (a) MTF curve and (b) spot diagram of the coaxis four-mirror system

对同轴结构进行离轴处理,经过反复优化迭代,得到光阑在次镜上,子午方向的视场范围为 $-20^{\circ}\sim 20^{\circ}$ 弧矢方向的视场范围为 $-5^{\circ}\sim 5^{\circ}$ 的离轴系统。其结构侧视图如图7所示。

图8是离轴四反系统的 MTF 曲线,优化后的系统在 50 lp/mm 处 MTF 值均在 0.606 以上,且系统在各个视场中均接近衍射极限。图9是离轴四反系统的点列图,由图可以看出该系统成像像质优良。

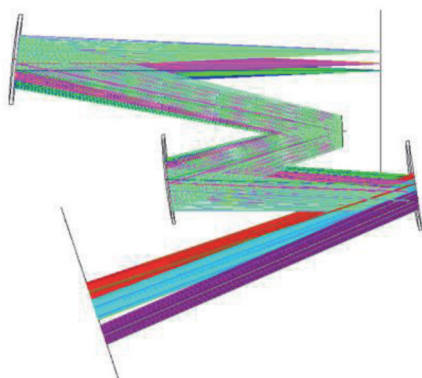


图7 离轴四反系统结构图

Fig.7 Structure of the off-axis four mirrors system

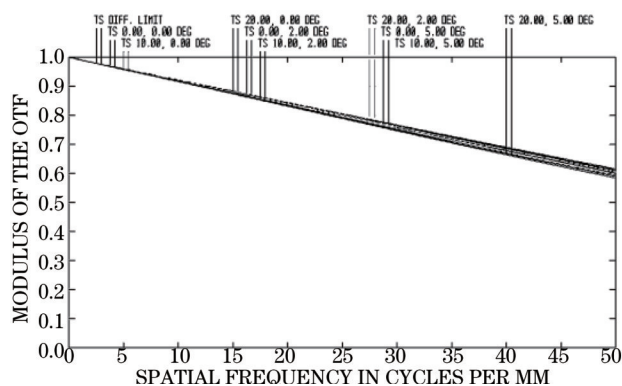


图8 离轴四反结构的 MTF 曲线

Fig.8 MTF of the off-axis four mirrors system

4 结 论

根据微分方程建模思路得到了四反射镜光学系统的设计方法并设计了一个弧矢方向视场角为 40° ,子午方向视场角为 10° 的大视场四反射镜光学系统。该光学系统传递函数接近衍射极限,各视场传递函数值

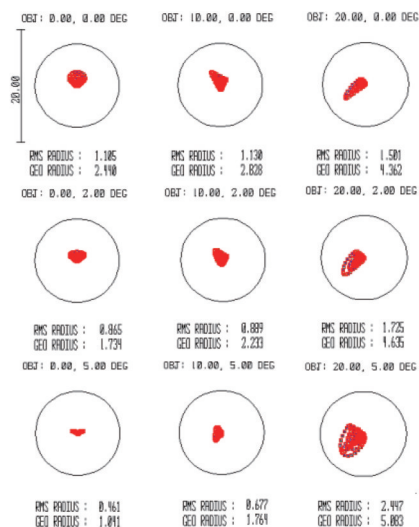


图9 离轴四反光学系统的点列图

Fig.9 Spot diagram of the off-axis four mirrors system

在截止频率 50 lp/mm 处对比度均在 0.606 以上。因此经过实际系统求解与验证可以表明,这一新型设计方法与传统光学设计手法相比计算简单,而且所得的光学系统成像质量优良。该方法的有效实施对于离轴四反的新型空间相机设计具有指导意义。

参 考 文 献

- Zhang Zhiwei, Yu Xin, Yang Bingxin. The application of self-adaptation optics on space optical sensors[J]. Spacecraft Recovery of Remote Sensing, 2000, 10(3): 23-29.
张志伟, 俞 信, 杨秉新. 自适应光学在空间光学遥感器上的应用[J]. 航天返回与遥感, 2000, 10(3): 23-29.
- Liu Hui, Li Xinglong, Pei Yuntian, et al.. Design of off-axis three-mirror optical system[J]. Laser & Optoelectronics Progress. 2008, 10(12): 59-63.
刘 辉, 李兴隆, 裴云天, 等. 离轴三反射光学系统的设计[J]. 激光与光电子进展, 2008, 10(12): 59-63.
- Wu Heyun, Wang Peigang. Designs of reflective off-axis system[J]. Opto-Electronic Engineering 2006, 33(1): 34-37.
伍和云, 王培纲. 离轴反射式光学系统设计[J]. 光电工程. 2006, 33(1): 34-37.
- Guo Yongxiang, Li Yingcai, Liang Tianmei, et al.. Optical design of the uncoaxial three-mirror system with wide field of view[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(9): 2680-2683.
郭永祥, 李英才, 梁天梅, 等. 一种大视场离轴三反射光学系统研究[J]. 光学学报. 2010, 30(9): 2680-2683.
- Ding Xuezhuan, Wang Xin, Lan Weihua, et al.. Design of four-mirror reflective anastigmat optic system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(2): 319-321.
丁学专, 王 欣, 兰卫华, 等. 离轴四反射镜光学系统设计[J]. 红外与激光工程. 2008, 37(2): 319-321.
- M Zou, J Chang, M M Tolha, et al.. Design and analysis of the four-mirror optical system[J]. Opt Int J Light Electron Opt, 2010, 121(20): 1900-1903.
- Liang Shitong, Yang Jianfeng, Xue Bin, et al.. Aberration analysis and design of four-mirror reflective optical system[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(11): 3300-3305.
梁士通, 杨建峰, 薛 彬, 等. 四反射镜光学系统像差分析与设计[J]. 光学学报, 2010, 30(11): 3300-3305.
- Zhong Xing, Jin Guang. Design of extra wide short wave infrared spectral imager's fore-optics[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(10): 1022004.
钟 兴, 金 光. 超广角短波红外成像光谱仪前置光学系统设计[J]. 光学学报, 2012, 32(10): 1022004.
- Cheng Wang, David L Shealy. Differential equation method for design of multi-mirror-ray projection lithography systems[C]. SPIE, 1991, 1547: 111-126.
- D L Shealy, C Wang, W Jiang, et al.. Design and analysis of a fast two-mirror soft-x-ray microscope[C]. SPIE, 1992, 1741: 20-31.
- V A Semin. Calculating aspheric surfaces by modelling an optical system by means of differential equations[J]. J Opt Technol, 1999, 66(3): 247-251.