

# 基于 PWC 法的宽波段三胶合转像镜设计

Wide-waveband triplet relay lens design based on PWC method

(1.中国科学院长春光学精密机械与物理研究所;2.中国科学院研究生院) 许杰<sup>1,2</sup> 颜昌翔<sup>1</sup>  
XU Jie YAN Chang-xiang

**摘要:**提出了应用普通光学玻璃,通过折射方式,完成 0.4 到 2.5  $\mu m$  宽波段转像镜设计的方法。推导了基于 PWC 法的三胶合透镜初始解求取公式,并以此为基础合理选择材料,完成了 F 数等于 10,放大倍率-1.5 的转像系统设计,系统传递函数在各自要求的空间频率处接近衍射极限。

**关键词:**宽波段;PWC 法;三胶合;光学设计

**中图分类号:** O435.2 **文献标识码:** A

**Abstract:** In this paper, a new method was proposed to design a relay lens with a refractive structure and proper glasses in a wide spectral region from 0.4 to 2.5  $\mu m$ . The arithmetic of the triplet lens' initial configuration based on the PWC method was deduced. The relay lens with F/10 and magnification of -1.5 was discussed, which composed with the proper materials. The MTF was closed to the diffraction limit.

**Key words:** wide waveband; PWC method; triplet lens; optical design

## 引言

波长范围为 0.4~2.5  $\mu m$  的波段在天文观测和空间光学遥感等领域得到越来越广泛的应用,由于波段较宽,色差不易校正,所以普遍采用非球面反射式,但是存在高成本,装调困难等问题。如果在某些应用中采用价格相对便宜的球面透射系统,且能很好的校正色差,则可以解决上述问题。

目前国内外已有一些透射结构的宽波段光学系统设计实例,如紫金山天文台研制的可见光近红外天文相机中的变焦镜部分,焦距 70mm 左右,采用晶体材料,整个相机光学系统的像面点列图几何半径小于 18.5  $\mu m$ ,成像质量良好。另外一些文章中也介绍了可见光近红外波段的复消色方法,设计出了像质良好的光学系统。在这些研究中,材料选用的均是卤化物光学晶体,而这种晶体不可避免的具有易潮解,硬度低,力学性能差,不易加工等缺点。本文中考虑采用光学玻璃代替光学晶体实现宽波段的色差校正。

消色差的关键在于结构的确定和材料的选择,三胶合结构可以很好的校正位置色差,实现复消色,目前经常用到的是双胶合的初始解计算,本文在此基础上进行了推导,进一步得到三胶合公式,下面首先给出它的推导。

## 1 用于宽波段复消色的三胶合结构初始解公式推导

### 1.1 三胶合中光焦度的分配

对于视场和孔径都比较小的三胶合镜组,初始解在计算时只考虑球差、彗差、位置色差三项,光焦度的分配主要由位置色差决定。

$$C_1 = \sum \frac{\varphi}{v} = \frac{\varphi_1}{v_1} + \frac{\varphi_2}{v_2} + \frac{\varphi_3}{v_3} = 0 \quad (1)$$

其中  $\varphi$  为单透镜的光焦度,  $v$  为色散系数。

另外,要做到复消色差,各单透镜光焦度还应满足下面的公式:

$$(n_{11} - n_{12}) \frac{\varphi_1}{n_{12} - 1} + (n_{21} - n_{22}) \frac{\varphi_2}{n_{22} - 1} + (n_{31} - n_{32}) \frac{\varphi_3}{n_{32} - 1} = 0 \quad (2)$$

其中,  $n_{11}$  为各种材料的短波长折射率,  $n_{12}$  为各种材料的中波长折射率。最后,

$$\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 = 1 \quad (3)$$

联立公式(1)(2)(3)可求出满足复消色差条件的各透镜的光焦度  $\varphi$ 。实际计算时,为保证带孔径的色差为 0,公式(1)的等号右侧可代入一个正值的小量,如 0.0005。

### 1.2 三胶合内部参数的确定

PWC 法求取初始解首先是以 P、W 值表示光学系统初级像差系数, P、W 是各折射面的物方与像方孔径角的函数,而这两个角度又只与折射面的半径及材料折射率有关,因此在材料确定后,就可以建立起各面半径与初级像差的关系式,取阿贝不变量 Q 为中间计算量,得到如下结果。

在  $u=0, n_1=1, u_4'=1, h=1$  的归化条件下,初级球差、彗差与 Q 的关系式可表示为:

$$\begin{aligned} \sum_1^4 S_I &= \sum P = A Q^2 + B Q + C \\ \sum_1^4 S_{II} &= \sum W = K Q + L \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{cases} A = 1 + 2 \frac{\varphi_1}{n_1} + 2 \frac{\varphi_2}{n_2} + 2 \frac{\varphi_3}{n_3} \\ B = \frac{3\varphi_1^2}{n_1-1} - \frac{3\varphi_2^2}{n_2-1} - \frac{3\varphi_3^2}{n_3-1} - 2\varphi_2 - 2\varphi_3 - 2 \frac{2n_2+n_3}{n_3(n_2-1)} \varphi_2 \varphi_3 \\ C = \frac{n_1 \varphi_1^3}{(n_1-1)^2} + \frac{n_2 \varphi_2^3}{(n_2-1)^2} + \frac{n_3 \varphi_3^3}{(n_3-1)^2} + \frac{n_2 \varphi_2^2}{n_2-1} + \frac{n_3 \varphi_3^2}{n_3-1} + 2 \frac{n_2 \varphi_2 \varphi_3}{n_3-1} \\ \quad + \frac{2n_2^2 + n_2 n_3}{n_3(n_2-1)^2} \varphi_2^2 \varphi_3 + \frac{3n_2 \varphi_2^2 \varphi_3}{(n_2-1)(n_3-1)} \\ K = 1 + \frac{\varphi_1}{n_1} + \frac{\varphi_2}{n_2} + \frac{\varphi_3}{n_3} \\ L = \frac{\varphi_1^2}{n_1-1} - \frac{\varphi_2^2}{n_2-1} - \frac{\varphi_3^2}{n_3-1} - \varphi_2 - \varphi_3 - \frac{(n_2+n_3)\varphi_2 \varphi_3}{n_3(n_2-1)} \end{cases} \quad (5)$$

$$(6)$$

将公式(4)中的两式联立解出  $Q$ , 即可求出各半径的值。

## 2 计算实例

三胶合透镜消色差的关键在于材料的选择, 计算时应当保证求出的  $\varphi_1$ 、 $\varphi_2$ 、 $\varphi_3$  都比较小, 相对应各个球面半径就会比较大, 从而有效控制高级像差。

经过大量的选取计算, 选定成都光明光电的 H-FK61、H-F51 以及 TF3 这三种材料, 其  $0.4\mu\text{m}$ 、 $1.0\mu\text{m}$ 、 $2.5\mu\text{m}$  波长的折射率见表(1), 这也是系统复消色差选取的三个波长。

表 1 三胶合材料在用于复消色差的三个波长的折射率及求出的归一化光焦度

材料名称	折射率			归一化光焦度
	$0.4\mu\text{m}$	$1.0\mu\text{m}$	$2.5\mu\text{m}$	
TF3	1.63763	1.59743	1.57338	-0.9192
H-F51	1.67536	1.62070	1.58439	-0.1240
H-FK61	1.50767	1.49021	1.47953	2.0433

根据公式(1)、(2)、(3)可计算出三块透镜的归一化光焦度, 同样列于表(1)。取  $1.0\mu\text{m}$  为主波长, 令公式(4)等于 0, 将  $n$ 、 $\varphi$  值代入计算, 得到结果第一式无实根, 说明此三胶合透镜在物体无穷远的情况下无法消除球差, 取使该二次函数得最小值时的  $Q$  值继续计算。在焦距 500mm, 物体位于无穷远时, 初始解计算结果见表(2)。

表 2 三胶合初始解计算结果

$Q$	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$
4.4614	229.173	134.331	127.49	-2015.72

在像方 F 数等于 6, 半视场 10mm 的条件下, 代入 Zemax 软件得到初级像差系数为

$$\begin{cases} \sum S_i = 0.011389 \\ \sum S_{ii} = -0.001264 \\ \sum C_i = -0.000700 \end{cases} \quad (7)$$

可以看出, 球差系数稍大, 在实际转像镜的设计中可以考虑将第一块透镜与后面两块分离, 增加一个条件以消除球差。又由于其光焦度为负, 可以适当减小场曲。这样的结果也说明公式(4)的推导结果是正确的。

## 3 转像系统设计结果

此光学系统的初始结构为近似对称的两组三胶合, 孔径光阑位于两者之间。这样做的好处是可以有效的减小垂轴像差。系统球差与位置色差由胶合透镜组单独校正, 像散依赖两透镜组间的距离变化得以校正, 由于前后两组透镜均为正光焦度, 因而不能校正场曲, 本系统视场较小, 后两种像差的影响并不大。本文在计算阶段, 采用三胶合的形式, 即可说明原理, 又简化了推导过程。考虑到该种形式在实际加工过程中可能会出现较难控制的离轴、倾斜等情况, 造成成像质量的下降, 作者在得到较好的像质后, 将每组中的三片透镜适当分开, 优化后得到最终结果。光学系统设计要求见表(3)。

表 3 转像镜系统设计要求

系统波段	前工作距离	放大倍率	物方 F 数	物方半视场
$0.4 \sim 2.5\mu\text{m}$	500mm	-1.5	10	10mm

图(1)~图(3)为设计结果, 系统像面点列图几何尺寸小于艾里斑半径, 波像差控制在 0.5 个波长以内, 三波长的轴向像差曲线在 0.707 孔径相交, 色差校正良好, 由于结构有一定的对称

性, 畸变值小于 0.005%, 混合传函在 16lp/mm 处大于 0.8, 接近衍射极限。

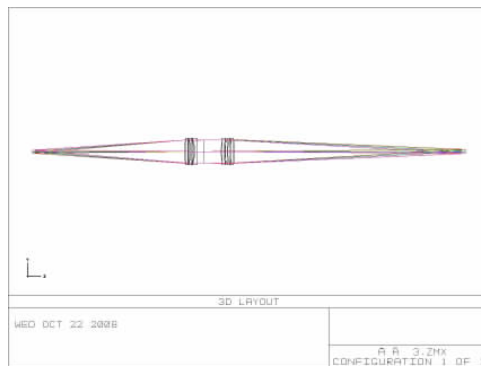


图 1 系统 3 维图

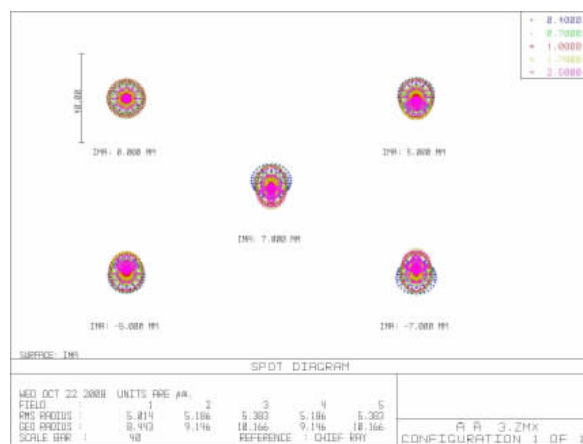


图 2 设计结果点列图

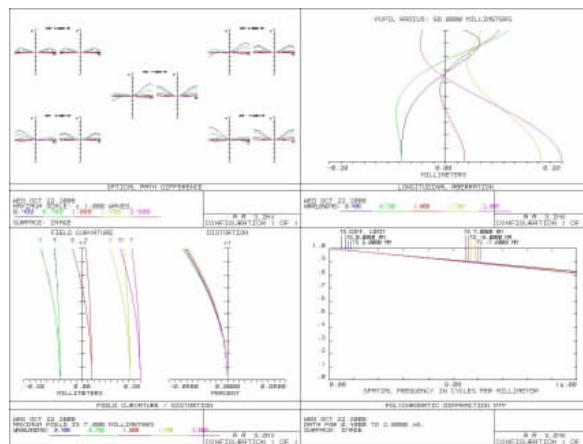


图 3 系统光程差、垂轴像差、场曲畸变以及 16lp/mm 处的各波长混合传函曲线

## 4 小结

本文根据 PWC 法推导出了三胶合透镜的初始解求取方法。在实际使用中, 由于三胶合透镜在光焦度确定后只有一个变量, 很难满足同时校正多种像差的要求。在推导出的公式中, 由方程组解出  $Q$  值就可以求出三胶合透镜组的 4 个半径, 故这个推导更多的是出于简化计算的目的。另外三片透镜胶合在制造工艺上也有很大的困难, 实际使用中, 将三片透镜稍稍分离。

(下转第 216 页)

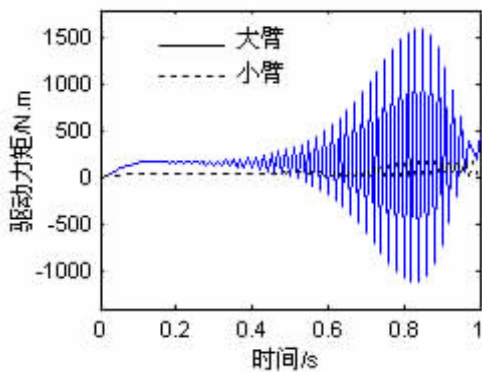


图3 关节驱动力矩

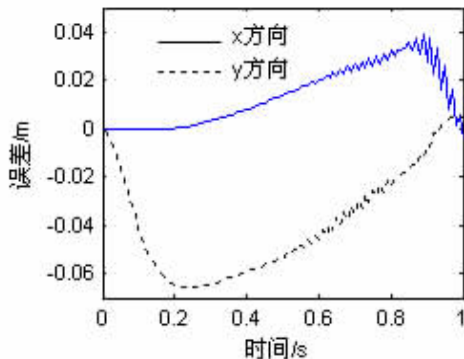


图4 柔性臂末端x、y方向轨迹误差

## 6 结论

由于柔性臂系统的复杂性,传统的控制方法往往得不到理想的控制效果。本文中利用奇异摄动方法,把双连杆柔性臂系统分解为慢变和快变两个独立的子系统,并分别采用遗传算法和最优综合方法设计了慢变和快变子系统的控制器。MATLAB仿真结果表明,在跟踪一段圆弧时,所设计组合控制器取得了比较好的控制效果。

本文创新观点:

1. 将遗传算法应用于柔性臂系统奇异摄动分解后的慢变子系统控制器确定中;
2. 利用最优  $H_2$  综合确定快变子系统控制器;
3. 以上方法的组合。

参考文献

- [1]戴学丰,孙立宁,蔡鹤皋.柔性臂机器人定位过程模糊滑模控制研究[J].哈尔滨工业大学学报,2005,37(2):148-150
- [2]伍筱菁.柔性臂建模与控制方法研究[J].微计算机信息,2005,12-1:41-44.
- [3]戴学丰,孙立宁,刘品宽等.柔性臂机器人控制算法综述[J].电机与控制学报,2002,6(2):158-161
- [4]黄季妮,黄金泉.基于奇异摄动与神经网络的柔性臂控制[J].南京航空航天大学学报,2003,35(4):420-423
- [5]李月娥,李相伟.基于奇异摄动法组合控制柔性机械手臂的研究[J].电子机械工程,2003,19(6):60-62
- [6]张卫东,席裕庚,许晓鸣.具有指定性能的不稳定时滞对象控制器[J].仪器仪表学报,2002,23(3):221-225

作者简介:李善姬(1959-),女(朝鲜族),吉林延吉人,延边大学工学院教授,硕士,主要从事信号与信息处理方面的研究。

**Biography:** LI Shan-ji (1959-), Female (Korean nationality), Jilin Province, College of Engineering, Yanbian University, Professor, Master, Research area: Signal and information manage.

通讯地址:(133002 延吉 吉林延吉延边大学工学院电子系 245 信箱) 李善姬

(收稿日期:2009.06.25)(修稿日期:2009.7.25)

(上接第209页)

基于这种方法,本文给出了转像镜的结果,成像质量良好,说明可以应用普通光学玻璃,实现宽波段的光学系统设计。

创新点:提出了用普通光学材料完成波长范围0.4~2.5宽波段光学系统的设计,成像质量接近衍射极限,并满足工作距离,畸变的成像要求。

参考文献

- [1]张涛,乔彦峰.UDP广播通讯在光电经纬仪组网中的应用[J],微计算机信息,2008,3-1:210-220.
- [2]潘君骅.光学非球面的加工与检验[M],北京:科学出版社,1994.
- [3]季春宏.红外相机CASCAM光学设计[J],天文学报,2003,44(4):390-404.
- [4]Deqing, Ren, Jeremy R. Allington-Smith, 近红外天文仪器的复消色差透镜[J],云光技术,2001,31(1):25-33.
- [5]Thomas H. Jamieson, Decade wide waveband optics [J], SPIE, 1998,3482,306-315.
- [6]陈立武. CE\_1 成像光谱仪工程化光学技术理论研究[D],中科院西安光学精密机械研究所博士学位论文,2006.
- [7]张以谟.应用光学[M],北京:机械工业出版社,1982.

作者简介:许杰(1984-),男(汉族),北京人,硕士研究生,主要从事可见光近红外短波红外宽波段光学系统的设计工作。

**Biography:** XU Jie (1984-), male, Beijing, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Master, major in optical engineering, Research area is visible, near infrared and short-wave infrared wide-waveband optical system design.

(130033 吉林长春 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所空间光学部) 许杰 颜昌翔

(100039 北京 中国科学院研究生院) 许杰

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences Changchun 130033, China) XU Jie YAN Chang-xiang

(Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China) XU Jie

通讯地址:(130033 吉林长春 吉林省长春市经济技术开发区营口路20号长春光机所研究生部研究生公寓D座509室) 许杰

(收稿日期:2009.06.25)(修稿日期:2009.7.25)

## 书 讯

《现场总线技术应用 200 例》  
55 元 / 本 (免邮资) 汇至

《PLC 应用 200 例》  
110 元 / 本 (免邮资) 汇至

地址:北京海淀区皂君庙 14 号院鑫雅苑 6 号楼 601 室  
微计算机信息 邮编:100081  
电话:010-62132436 010-62192616 (T/F)