

文章编号:1001-9014(2005)06-0455-04

# 长波及中波红外鱼眼镜头的计算机设计

王永仲

(军械工程学院 光学与电子工程系,河北 石家庄 050003)

**摘要:**按 Tchebycheff 积分方法计算垂轴像差曲线面积,进而建立基于这种面积的像质指标,以模拟阻尼最小二乘法中评价函数的构思,并将其融合于适应法光学设计程序中,实现两种优化思想的“复合”;借助这种复合优化能迅速改善初始结构,促成鱼眼镜头自动设计过程快速收敛;提出光学自动设计中的虚拟现实技术和多链节——可循环的“病态”处理方法;其中虚拟透镜技术可克服久禁不止的光线“溢出”、摆脱“病态”和求得最简光学结构,虚拟变光阑技术和“病态”处理方法可克服优化过程中的慢收敛、发散、震荡或无优化解的困难,促成快速而稳定地收敛;最后列举了实例。

**关键词:**长波及中波红外鱼眼镜头;计算机光学设计;复合优化;虚拟现实;病态处理  
**中图分类号:**0435 **文献标识码:**A

## CAD OF LWIR AND MWIR FISH-EYE LENS

WANG Yong-Zhong

(Dept. of Opto-electronics, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

**Abstract:** By calculating the areas of the lateral aberration curves according to Tchebycheff numerical integration method, an image-quality index based on these areas was set up in order to simulate the image-quality merit function that always is used in damped least square (DLS). And then, it is used in the adaptive optical automatic design program as an optimization index, thus realize the composite of these two optimization ideas. This composite can improve fish-eye lens' initial structure rapidly and procure the auto-design process of fish eye lens convergence quickly. Added to this, the virtual reality technique, successive multi-link-circular “morbidity” process method is also put forward in this paper. Here, virtual lens can conquer “ray-overflow”, break away from “morbidity” and seek the simplest optical structure; And virtual variable stops and the “morbidity” process method can conquer the difficulties during optimization of IR fish-eye lens, such as slowly convergence, divergence, oscillation or no optimization solution, etc, and make convergence procedure quickly and stably. A example is given in the end.

**Key words:** LW/MW IR fish-eye lens; optical CAD; composite optimization; virtual reality; “morbidity” processing

### 引言

计算机光学设计(或称光学自动设计)技术进入实用已有45年,而关于鱼眼镜头的计算机设计却很少有文献讨论.至于长波及中波红外鱼眼镜头的计算机设计,迄今未见文字资料的报道.除了保密因素之外,技术上的困难无疑是重要原因.别的姑且不说,单就长波及中波红外区域可用的光学材料稀少就是一大障碍<sup>[1,2]</sup>——它使我们失去了选择光学材料参数的自由,给光学自动设计过程增加了强硬的边界约束,造成结构优化的有效空间狭小,明显增大了设计难度.

长波及中波红外鱼眼镜头在工业、医学、公安、国防及军事上有不可替代的作用<sup>[1]</sup>,但只有解决了其计算机设计的难题,它们才能迅速发展.本文论述其中几个关键技术,希望对此有所推进.

### 1 新型像质指标与“复合优化”

首先建立一个基于垂轴像差曲线面积的像质指标<sup>[3]</sup>,按 Tchebycheff 积分公式有

$$\int_{-1}^1 F(t) dt = \frac{2}{n} \sum_{j=1}^n F(t_j) \quad (1)$$

取  $n = 9$ , 则

$$-t_1 = t_9 = 0.9116,$$

收稿日期:2004-11-01,修回日期:2005-06-01

基金项目:国家863计划支持项目(02AA776031)

作者简介:王永仲(1944-),男,湖南澧县人,教授,主要研究成像科学与光电对抗技术.

Received date: 2004-11-01, revised date: 2005-06-01

$$\begin{aligned} -t_2 &= t_8 = 0.6010, \\ -t_3 &= t_7 = 0.5288, \\ -t_4 &= t_6 = 0.1679, \\ t_5 &= 0. \end{aligned}$$

这是一组新的取样系数:当其用于视场角取样时, $t_5$ 对应轴上物点,其余对应着不同的轴外物点;用于光束取样时, $t_5$ 对应于主光线,其余对应于不同高度的光线。

对轴上物点,按  $t_1 \sim t_4$  抽取样品光线,计算各自的垂轴像差,由式(1)得到综合表现轴上点像质的垂轴像差曲线面积  $A_0$ 。为便于在优化过程引用,将其优化值  $A'_0$  用起始值进行规范化处理,即成一个代表轴上点像质优化程度的指标

$$\overline{A_0} = A'_0 / A_0 \quad (2)$$

同样,对由  $t_1 \sim t_4$  所代表的轴外物点,则分别得到其子午垂轴像差曲线面积  $A_{s1} \sim A_{s4}$  和弧矢垂轴像差曲线面积  $A_{s1} \sim A_{s4}$ ,取

$$A_s = A_{s1} + \sqrt{2}A_{s2} + \sqrt{2}A_{s3} + 2A_{s4} \quad (3)$$

则  $A_s$  综合表现轴外子午光束的成像质量。

同样以其起始值实行规范化,得一个代表轴外子午光束像质优化程度的指标

$$\overline{A_s} = A'_s / A_s \quad (4)$$

对弧矢光束做类似处理,得

$$A_s = A_{s1} + \sqrt{2}A_{s2} + \sqrt{2}A_{s3} + 2A_{s4} \quad (5)$$

$$\overline{A_s} = A'_s / A_s \quad (6)$$

令主波长的相应像质函数为

$$A_d = 0.25(2\overline{A_0} + \overline{A_s} + \overline{A_s}),$$

类似地计算两辅助波长对应的此函数  $A_{d1}$ 、 $A_{d2}$ ,取

$$A = (\sqrt{2}A_d + A_{d1} + A_{d2}) / (2 + \sqrt{2}) \quad (7)$$

即成一个综合代表系统成像质量的新型像质指标,被称为切氏指标。它模仿了阻尼最小二乘法(DLS)中评价函数的构思。将其投入到适应法光学设计程序控制鱼眼系统的优化过程,则使两种优化思想交融,是“复合优化”思想在鱼眼镜头设计中的体现。由于只想简单地把 DSL 中“间接诱导型”优化思想“嫁接”到适应法的主干上,故  $A$  不必非常完备。它的建立采用的取样系数与流行方法不同,意在最大限度地避免其与传统像差的相关性。

实践证明,它对长波及中波红外鱼眼系统的计算机设计有十分重要的作用。例如:

① 用于预优化过程,快速改善初始结构;② 用于确定自变数增量;③ 用于自动求解光学公差;④ 引导优化过程摆脱“病态”(慢收敛、发散、震荡或无

优化解,下同)。

## 2 虚拟透镜技术

鱼眼镜头优化中频繁出现的光线“溢出”(光线在折射面上全反射或与之无交点,下同)常使自动优化夭折。因为计算机优化是个动态过程,故须自动处理。我们用虚拟透镜技术结合虚拟光线解决此难题,作法是:

先用插值方法填补溢出光线在像面的落点,以维持继续优化;若经连续两次中循环仍不能遏制溢出,则在发生溢出处自动虚设一透镜,并令其结构参数参与优化。为保证虚设透镜适应光束走向,我们设计了备选透镜数据库和相应的调用规则。

随着优化的进展,光束结构与系统参数逐渐适应,成像质量不断改善,光线溢出将逐渐被清除。待受控指标都进入容差范围时,再用光焦度转移和像差收缩方法渐渐清退多余的透镜,使系统结构尽量简单。

例如我们设计的长波红外鱼眼镜头,其初始结构只有3片透镜,优化中最困难时曾用这种虚拟技术增至9片,接着逐渐清退可以不用者,最后定型为现有最简结构,成为一项发明专利。

这种方法也用于处理优化中的病态。例如,在远离光阑处虚拟一透镜,可明显改变轴外像差,从而调整优化方向,摆脱病态。

值得说明,这种“虚拟透镜”的光焦度符号未必与发生“溢出”的透镜一样,因而不是传统方法的“分裂透镜”。

## 3 虚拟可变光阑技术

在红外鱼眼镜头优化中,我们假定视场光阑大小可变;而孔径光阑则大小和位置均可变,其大小改变意味着成像光束口径变化,位置(跨区间)变化旨在全域寻优<sup>[4]</sup>。这种虚拟技术在以下场合自动实施:① 采用光线虚拟和透镜虚拟技术均不能克服光线溢出时;② 优化过程反复陷入病态而用其它方法均不奏效时。实施时先逐步缩小孔径光阑口径,待小口径情况的优化完成时再自动扩大光束口径,继续优化;若口径缩至一半时还无明显进展,则逐渐减小视场;待小视场的优化完成时即自动扩大视场,进一步优化。

上述处理的理论依据是:对同一镜头而言,小视场、小口径条件下的优良像质是大视场、大口径情况成像优良的必要条件。

#### 4 多链节——可循环的“病态”处理技术

鱼眼镜头自动优化中反复发作的病态是一大难关,它使优化过程辗转不前.对此,我们采用由以下多链节组成的闭合循环处理技术.

##### ① 提高线性检查标准

适应法、阻尼最小二乘法均基于线性假设而求解方程组

$$\vec{M} \cdot \vec{\Delta X} = \vec{\Delta F} \quad (8)$$

式中  $\vec{M}$  是由质量函数差分组成的系数矩阵,  $\vec{\Delta F}$  是预期的质量函数变化量列矩阵,  $\vec{\Delta X}$  是解出的自变数变化量.

有些病态是由于在当前条件下,上述线性假设与实际情况出入较大.此时若提高线性检查标准,把结构参数的实际修改量维持在线性假设有效的范围内,便可以摆脱病态.

##### ② 调整结构参数增量的比例

结构参数增量比例的调整使式(8)中矩阵  $\vec{M}$  之诸元素间的比例变化.在  $\vec{\Delta F}$  不变时,解向量  $\vec{\Delta X}$  必定变化,即优化方向改变.为使这种调整有较大的动态范围,我们使某些增量减小,同时使别的增量加大(例如,原增量各为  $\delta_1, \delta_2$ ,现改为  $0.707\delta_1$  和  $1.414\delta_2$ );若不奏效,则反过来——将上例中增量改为  $1.414\delta_1$  和  $0.707\delta_2$ .这样,增量本身变化幅度较小,而相互间比例变化范围较大,使优化方向的调整力度较强,有利于迅速摆脱病态.

##### ③ 实行分阶段优化

在出现病态时,软件自动把式(8)中的  $\vec{\Delta F}$  截取一段  $\vec{\Delta F}$  来实施优化.待此优化完成后再逐步向最终目标靠拢.这里利用了  $\vec{\Delta F}$  与  $\vec{\Delta X}$  间的实际非线性关系,使求解方向改变.

##### ④ 运用复合优化思想

用上述切氏指标 A 实施复合优化是摆脱病态的得力手段(后有实例).

##### ⑤ 减少受控指标数量

减少一个受控指标即使式(8)的线性方程组少一个方程式,从而改变求解方向.

##### ⑥ 切换像质指标

除传统的几何像差外,软件还建立了 MTF 函数列和波像差函数列.在使用几何像差优化而出现病态时,可以自动切换成用 MTF 或波像差实施优化,经过 2 个中循环后又自动切换回去.

##### ⑦ 缩小入瞳口径

缩小入瞳口径降低了像质要求,使式(8)中  $\vec{M}, \vec{\Delta F}$  同时变化,优化方向随即有大幅度更迭.待小口径情况优化完成后再逐步扩大入瞳,直至符合预定要求.

##### ⑧ 减小视场

若入瞳口径小至一半时仍不奏效,则软件自动减小视场开展优化,待小视场、小口径的情况优化完成时,再依次逐步扩大口径和视场.

##### ⑨ 虚拟透镜

虚拟透镜不仅可以减小像差,还使结构参数自变量数目增加,有利于摆脱病态.

以上多个链节组成有序的闭环.病态处理以①为入口;当它无效时才进入②,依此类推.这使得大多数病态都在前面链节被清除,促成快速优化.

国际上通用的处理方法就是上述⑤.但在红外鱼眼镜头优化中,这种单一处理方式实不可取,它常使优化过程裹步不前或导致“死循环”.我们增加了 8 种处理方法,且依序实施和自行循环,使自动摆脱病态的能力大大增强,成为其自动设计的一个关键技术.

#### 5 自动优化实例

我们以文献[5]中 03-02-095 号镜头( $f' = 9.75, \omega = \pm 110^\circ, D/f' = 1/5.6$ )的自动优化作实例,因为公开文献有其原结构,便于对照;且此一例就能表现多种病态处理方式.

本例优化旨在改善球差  $\delta L'_m$ 、彗差  $K'_{7m}$ 、细光束子午场曲  $x'_{1m}$  及像散  $x'_{1sm}$ 、轴向色差  $\Delta L'_{FC,707}$ 、放大率色差  $\Delta Y'_{FCm}$ ,自变量是曲率  $c_1 \sim c_7, c_{11} \sim c_{18}$ 、间隔  $d_2, d_4, d_{12}, d_{15}, d_{17}$ ;取曲率增量  $\delta c = 0.0002$ ,间隔增量  $\delta d = 0.0025$ .由于自变量个数充裕,而系统第 1 透镜光焦度又不宜再增强,故单独把  $c_1, c_2$  的增量减为  $\delta c_1 = \delta c_2 = 0.0001$ ,且当试运行发现其光焦度一直增强时便自动将其“冻结”.表 1 记录了优化过程.

|                        |       |        |          |          |         |        |     |
|------------------------|-------|--------|----------|----------|---------|--------|-----|
| 经 4 次中循环完成优化,输出优化结构依次为 |       |        |          |          |         |        |     |
| r                      | 86.95 | 29.73  | -202.86  | 12.74    | -171.48 |        |     |
|                        | 18.93 | 74.34  | $\infty$ | $\infty$ | (stop)  | 416.11 |     |
|                        | 14.63 | -57.05 | 435.71   | -58.51   | 43.37   |        |     |
|                        | 21.34 | -60.56 |          |          |         |        |     |
| d                      | 4.4   | 21.35  | 3.8      | 13.5     | 1.25    | 5.7    | 3.1 |
|                        | 1.85  | 3      | 3.15     | 5.5      | 10.2    | 0.2    | 4.7 |
|                        | 2.5   | 17.8   |          |          |         |        |     |

优化前后的像差和剩余像差对比分别如表 2 和表 3 所列.由表可见,像质已有明显改善.

**表 1 一个鱼眼镜头的优化过程**  
**Table 1 The optimization of a fish-eye lens**

| 中循环序号 | 首次最大因子数值 | 最大因子对应的自变量 | 内循环次数 | 末次最大因子数值 |
|-------|----------|------------|-------|----------|
| 1     | 58.68    | $c_{15}$   | 26    | 22.56    |
| 2     | 37.86    | $c_{15}$   | 18    | 12.48    |
| 3     | 18.85    | $c_3$      | 10    | 7.36     |
| 4     | 12.16    | $c_3$      | 8     | 0.28     |

**表 2 优化前后的像差对比**  
**Table 2 Comparison of the aberrations**

| $h, \omega$ | 像差  | $\delta L'$ | $\Delta L'_{FC}$ | $x'_t$ | $x'_s$ | $K'_{Tmh}$ | $K'_{smh}$ | $X'_T$ | $X'_S$ | $\Delta Y'_{FC}$ |
|-------------|-----|-------------|------------------|--------|--------|------------|------------|--------|--------|------------------|
| 1           | 优化后 | -0.098      | 0.018            | -0.482 | -0.049 | -0.041     | -0.009     | -0.080 | -0.050 | -0.001           |
|             | 优化前 | -0.579      | -0.130           | -1.393 | 0.013  | 0.103      | -0.013     | -0.554 | -0.481 | 0.002            |
| 0.707       | 优化后 | -0.050      | 0                | -0.899 | 0.129  | 0.001      | -0.010     | -0.630 | 0.100  | -0.024           |
|             | 优化前 | -0.289      | -0.136           | -0.408 | 0.216  | -0.018     | -0.016     | -0.826 | -0.333 | -0.043           |

**表 3 剩余像差**  
**Table 3 The surplus aberrations**

| 像差  | $\delta L'$ | $K'_{TSnh}$ | $K'_{TSny}$ | $x'_{tsn}$ | $x'_{ssn}$ | $\delta L'_{Tym}$ | $\delta L'_{FC}$ | $\Delta Y'_{FCsn}$ |
|-----|-------------|-------------|-------------|------------|------------|-------------------|------------------|--------------------|
| 优化后 | -0.001      | -0.005      | -0.028      | -0.658     | 0.154      | 0.502             | 0.036            | -0.024             |
| 优化前 | 0           | -0.012      | -0.091      | 0.289      | 0.210      | 1.418             | 0.038            | -0.042             |

说明:①上述优化前曾以式(7)的切氏指标做预优化,其目标是使 A 减小一半.经一个中循环共 5 次迭代即顺利达标,接着自行转入上述优化过程.

若不这样,则上述优化一开始就反复陷入病态.②表 1 中首次中循环过程曾 4 次出现病态,软件分别用上述前 3 个病态处理环节予以摆脱.在第 2 次中循环过程曾 3 次出现病态,其中一次用尽了前述 9 个处理环节才得以摆脱,其余 2 次都较快奏效.

此优化结构经过标准化,制出的镜头像质优良,证明优化是成功的.

**REFERENCES**

[1] WANG Yong-Zhong. *Modern Military Optics Technology* [M]. Beijing: Science Press (王永仲.现代军用光学技术.北京:科学出版社),2003;387-389.

[2] SHEN Wei-Min, XUE Ming-Qin, YU Jian-Jun. LWIR fast objective with wide field of view [J]. *Acta photonica Sinica* (沈为民,薛鸣球,余建军.大视场大相对孔径长波红外物镜.光子学报),2004,33(4):460-463.

[3] WANG Yong-Zhong. *CAD of Special Optical Systems* [M]. Beijing: Science Press (王永仲.新光学系统的计算机设计.北京:科学出版社),1993,284-287.

[4] WANG Yong-Zhong. *Optical Design and Micro-Computer* [M]. Press of National University of Defense Technology (王永仲.光学设计与微型计算机.长沙:国防科技大学出版社),1986,208-209.

[5] The Inst. of Optics, Fujian. *Handbook of Lenses, No. 3* [M]. Beijing: Press of National Defence Technology (福建光学技术研究所.光学镜头手册.第 3 册.北京:国防工业出版社),1981,94.