

文章编号: 0253-2239(2002)08-0983-06

变焦距镜头高斯光学设计的新方法^{*}王 琦¹⁾ 王光宇²⁾ 程雪岷³⁾ 王涌天³⁾

- | |
|---|
| (1), 中国科学院沈阳计算技术研究所, 沈阳 110004
(2), 沈阳青云数码科技有限公司, 沈阳 110004
(3), 北京理工大学光电工程系, 北京 100081 |
|---|

摘要: 突破了对像面漂移量的有理函数计算传统, 考虑到组元运动曲线的间断性, 给出了变焦距镜头高斯光学全新的最优化设计方法, 借助于切比雪夫多项式, 做到了任意组元联合直线运动的光学补偿, 以及实现了简便的和有效的任意组元任意变焦方式的机械补偿。

关键词: 变焦距镜头; 高斯光学; 切比雪夫多项式; 最优化

中图分类号: O435: TN942.2⁺ 文献标识码: A

1 引言

设计变焦距镜头, 从选择变焦方式到确定初始结构参数, 到校正整个系统像差, 直到精确计算和制造凸轮曲线, 都必须优化系统的高斯光学结构参数。然而, 用传统的高斯括号或连分式法^[1~4]生成有理函数使优化设计理想光学系统参数比较复杂, 以至于人们不得不对变焦方式逐个推导公式; 在创立新变焦方式时显得更为困难。因此, 人们希望发展一种对变焦方式较为简便的光学补偿法。

本文以乘加递推算法替代连分式算法计算理想系统像点为基础。为了优化高斯光学结构参数, 用函数构造论的切比雪夫多项式理论深入研究了光学补偿法, 并给出了完整的计算公式; 用约束极值数学方法给出了机械补偿法的通用计算公式, 解决了任意变焦方式的机械补偿问题, 特别是凸轮轨迹曲线的光滑性问题和奇异点问题。这是对工作[1~5]的较大改进。新方法使得设计或改变一个变焦方式都变得十分容易, 能适应当今越来越复杂的变焦方式。本文对文献[4]进行了讨论, 指出其不足。并给出一个具有普遍性的例子, 说明新方法的效果。

2 理想光学系统的像点

变焦镜头的设计是基于理想像点的计算。设光

学系统有 k 个组元, 每个组元的焦距依次为 $f_1, f_2, \dots, f_k$, 组元的主面间隔依次为 $d_1, d_1, \dots, d_k - 1$ 。那么根据高斯光学基本物像关系, 物距为 l 的物点通过焦距为 f 的组元形成像点, 像距为 l' , 则:

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

那么, 当物距 l_1 为有限时, 光线入射角为 u_1 , 令入射高为 $h_1 = l_1 u_1$; 当 $l_1 = \infty$ 时, 令 $u_1 = 0, h_1 = 1$ 。当光线通过光学系统后, 在各组元上产生的入射角 u_j 和入射高 h_j 由下列递推公式算出:

$$u_{j+1} = u_j + \varphi_j h_j, \quad (j = 1, \dots, k) \quad (2)$$

$$h_{j+1} = h_j - d_j u_{j+1}, \quad (3)$$

(3) 式中当 d_k 没定义时 $1 \leq j \leq k-1$, 当 d_k 定义后 $1 \leq j \leq k$ 。其中 $\varphi_j = 1/f_j$ 称为第 j 组元的光焦度。初始通过(2)式、(3)式算得系统的像面位置 $d_k = h_k/u_{k+1}$ 。以后当组元移动或结构参数作微小变化时为算出对像面的漂移, 就令(3)式中的 d_k 为已知, 并对(2)式、(3)式反复计算 k 次, 可算得新像点对原始像点在纵向上偏差 h_{k+1} , 而系统的总倍率为 u_{k+1} 。显然, 当倍率为有界且不为零, 即 $|1/u_{k+1}| \leq C$, C 为常数时, h_{k+1} 与像面漂移量 $\delta l_k = h_k/u_{k+1} - d_k$ 为同阶无穷小量, 所以, 当 $h_{k+1} \rightarrow 0$ 时, 亦有 $\delta l_k \rightarrow 0$ 。然而, h_{k+1} 是结构参数的多项式函数, 而 δl_k 则是有理函数, 即在分母上有结构参数变量。众所周知, 以多项式函数为背景的优化方法远比有理函数要方便简单得多。在求解非线性方程时减少了非线性程度, 迭代法便于收敛; 特别在解决函数逼近问题

^{*} 国家自然科学基金(69978001)资助课题。

E-mail: wangguangyu@hisencyber.com

收稿日期: 2001-06-22; 收到修改稿日期: 2001-10-22

上,多项式最佳逼近有完整经典的理论^[6],我们完全可以借用,而对有理函数却没有完整的理论,可以求解,但相当复杂。在光学补偿法中,我们就用多项式最佳逼近方法解决这一问题,而在机械补偿法中,用解非线性方程 $h_{k+1} = 0$ 方便地求解凸轮轨迹曲线。因为计算方便,才有可能用非线性最小二乘法实现对任意变焦方式高斯结构参数的优化。

以后我们总是以 H 表示 h_{k+1} 数值, $H = h_{k+1}$, 而用 U 表示 u_{k+1} 数值, $U = u_{k+1}$, 显然 H 和 U 都是高斯结构参数, φ_i 和 d_i 记为 $Y = (y_1, y_2, \dots, y_N)^T$ 的函数, 如果间隔有移动量 $X = (x_1, \dots, x_p)^T$, 那么 H 和 U 也是 X 的函数:

$$H = H(Y, X), U = U(Y, X)。$$

3 光学补偿法

变焦距物镜光学补偿法的变焦方式是让一个或两个或三个组元连在一起中间隔着固定组元一起运动,实现一定的变焦比。这种方式容易实现,机械简单,不需要凸轮结构,缺点是结构较庞大,像面只能在少数几点上得到补偿,有时像面漂移量较大,所以只适合于较小的变倍比。

从前,人们都是以高斯括号或连分式(形成有理函数)法推导公式,很繁琐并且问题提得不够规范。这里给出的(2)式、(3)式完全摆脱了连分式的繁琐,计算简洁并为一切高斯光学参数的研究打下了基础。以下给出光学补偿法的普遍求解算法。

设第 $j_1, j_2, \dots, j_n$ 组元联合一起运动,其中组元序号满足:

$$1 \leq j_1 < j_2 < \dots < j_n \leq k, \quad j_i + 2 \leq j_{i+1}$$

这说明运动组元是与固定组元相隔离的。设这些运动组元沿光轴移动距离为 x , 按通常规则,向右为正,向左为负。那么第 j_i 组元与前面组元即第 $j_i - 1$ 组元的间隔由原来的 d_{j_i-1} 变为新的数值 $d_{j_i-1} + x$; 即:

$$d_{j_i-1} := d_{j_i-1} + x, \quad (4a)$$

而第 j_i 组元与下一组元的间隔由原来的 d_{j_i} 变为 $d_{j_i} - x$, 即:

$$d_{j_i} := d_{j_i} - x, \quad (4b)$$

这里符号 $:=$ 表示将右边的新值赋予左边的量。如果 $j_1 = 1, l_1$ 为物距,并且物点在有限距离,在第1组元左边时 l_1 为负,在右边为正。那么,组元移动 x 后,新的物距为 $l_1 - x$, 即 $l_1 := l_1 - x$ 。由此,从(3)

式的乘积项可以看出,由原来物点发出的光线到达像面后,得到的偏离像点的纵向偏离量 h_{k+1} 即 $H(x)$ 是 x 的 $2n$ 次多项式。那么,求最佳光学补偿量的数学问题就成为修改所有可变动的高斯光学参数 $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_k$ 及初始间隔 $d_1, d_2, \dots, d_{k-1}$, 记它们为变量 $Y = (y_1, y_2, \dots, y_N)^T$, 使得在导程 $[t_0, T]$ 内 $H(x)$ 绝对值的最大值关于 Y 达到最小:

$$\max_{t_0 \leq x \leq T} |H(Y; x)| = \min_{Y \in R^N}, \quad (5)$$

其中 t_0 和 T 为设定的常数, R^N 表示 N 维实数空间。

(5)式及相关的数学上的要求,可借助函数逼近论原理^[6]即切比雪夫多项式: $T_n(x) = \cos(n \arccos x)$ 加以解决。 $T_n(x)$ 定义在 $[-1, 1]$ 上,有如下递推公式 $T_0(x) = 1, T_1(x) = x$, 当 $n \geq 2$ 时, $T_n(x) = 2xT_{n-1}(x) - T_{n-2}(x)$ 。极值点在如下 $n+1$ 个点处达到: $\bar{x}_i^{(n)} = \cos(i/n)\pi (i = 0, 1, \dots, n)$ 。那么,光学补偿法可由下列求解非线性超定方程组给出:

$$H(Y; x_i^{(2n)}) = (-1)^i \epsilon |\beta_i|, \quad (i = 0, 1, \dots, 2n) \quad (6a)$$

$$U(Y; x_i^{(2n)}) = \beta_i, \quad (i = 0, 1, \dots, 2n) \quad (6b)$$

$$d_{j_i} \geq \bar{d}_{j_i} > 0, \quad (i = 1, 2, \dots, n-1) \quad (6c)$$

其中 $x_i^{(2n)}$ 是区间 $[t_0, T]$ 中对应于 $T_{2n}(x)$ 在 $[-1, 1]$ 上的极值点 $\bar{x}_i^{(2n)} (i = 0, 1, \dots, 2n)$ 。 ϵ 为一正数,是要限制像面产生的最大漂移量。其中 $\beta_i (i = 0, 1, \dots, 2n)$ 是相应点上的倍率目标值,他们必须是单调递增或单调递减,并且同号即不能通过零点。

(6)式是一个约束极值问题^[7],为了使(6a)式能够精确满足,要限制自变量个数 N 不小于 $2n+1$ 。可先直接对(6a)式求解,当满足一定精度后,再将(6b)式参与(6a)式一起作优化处理。为了保证(6c)式在迭代过程中始终得到满足,应该做变量替换^[8],例如令:

$$d_{j_i} = \bar{d}_{j_i} + \frac{1}{2} y_{j_i}^2 (i = 1, 2, \dots, n-1),$$

用新变量 y_{j_i} 替代旧变量 d_{j_i} , 显然新变量活动区间为 $(-\infty, \infty)$, 稍许增加一点儿非线性不影响求解,作者已有多年经验。这样(6)式就变成无约束极值问题,用非线性最小二乘法求解效果极好。在 $n=1$ 时 $H(x)$ 是一抛物线。 $n=2$ 最为常用,像面也只有4个点得到补偿。 $n=3$ 时结构已显得笨拙,不常用。无论如何,这里给出了任意组元的光学补偿法。由于采用(2)式、(3)式的乘加递推计算高斯光学参数,

避免用连分式,并且在每次修改参数之前都取后工作距 d_k 为常数使得 $H(Y;X)$ 和 $U(Y;X)$ 的线性化程度非常好,非线性最小二乘法的收敛是稳定的。

4 机械补偿法

变焦距镜头机械补偿法的变焦方式是让多个组元同时作非线性移动,在满足像面完全补偿的条件下实现较大的变焦比。变焦方式可以是多种多样的。用高斯括号和连分式法只能一个方式一个方式地进行计算,如参考文献[4],十分繁琐,常会有考虑不到的问题发生。近年提出多组元全动型的变焦方式更增加了问题的难度。在文献[5]中给出了解决这一问题的普遍算法,但算法较为繁琐。从实际出发,这里对前人工作做较大改进,既便于理解,又容易编制计算机程序。它仍适合任意变焦方式。

设第 $j_1, j_2, \dots, j_L$ 组元为变倍组元, $L \geq 1$, 每个变倍组元按单调光滑曲线或直线 $g_i = g_i(t)$ 运动。这里 t 为参数, $t_0 \leq t \leq T$, 通常 $g_i(t)$ 为线性函数,或由若干节点给出的三次自然样条函数。那么将相应组元的主面间隔用新值替代。当 $j_i > 1$ 时,

$$d_{j_i-1} := d_{j_i-1} + g_i(t), \quad (7a)$$

$$d_{j_i} := d_{j_i} - g_i(t), \quad (7b)$$

如果 $j_i = 1$,

$$h_i := h_i - g_i(t)u_i, \quad (7c)$$

其中 $i = 1, 2, \dots, L$ 。再设 n 个连在一起的补偿组元,序号是 $J_1, \dots, J_n$ 。设它们共同的移动量是 $x(t)$,那么在变倍组元移动后且相应间隔变成新值后,仿(7)式,再有:当 $J_i > 1$ 时,

$$d_{J_i-1} := d_{J_i-1} + x(t), \quad (8a)$$

$$d_{J_i} := d_{J_i} - x(t), \quad (8b)$$

当 $J_i = 1$ 时,

$$h_i := h_i - x(t)u_i, \quad (8c)$$

其中 $i = 1, \dots, n$ 。通常,单组变倍单组补偿为 $L = 1$ 和 $n = 1$;双组联动变倍单组补偿为 $L = 2$ 和 $n = 1$,且 $g_i(t) = t$ 。任意的 L 和 n 可给出任意变焦方式。间隔量通过(7)式和(8)式变换后,再利用(2)式和(3)式可算得像点在纵向上的偏移量 $H(x;t) = h_{k+1}$ 。为使像面不动,作为一维变量 x 的函数 H 应该为零:

$$H(x;t) = 0, \quad (9)$$

采用解超越方程的牛顿法或具有更高阶(3阶)收敛

速度的切比雪夫迭代法可迅速求得关于参数 t 的精确解 $x^*(t)$:

$$x_1 = x_0 - \frac{H_0}{H'_0} - \frac{1}{2} \left(\frac{H_0}{H'_0} \right)^2 \frac{H''_0}{H'_0}, \quad (10)$$

其中 $H_0 = H(x_0;t)$, H'_0 表示 H 关于 x 的一阶导数, H''_0 为二阶导数,都是在 x_0 处取值。比较新值 x_1 和 x_0 的误差,只当 $|x_1 - x_0| < \epsilon$, ϵ 为精度时,新值为所求 $x^*(t)$,否则以 x_1 替代 x_0 继续(10)式迭代,直到满足精确度为止。一般将区间 $[t_0, T]$ 分成许多分点

$$t_0 < t_1 < t_2 < \dots < t_m = T, \quad (11)$$

其中 m 为分点个数。从 t_0 出发由 $x(t_0) = 0$ 为初值计算,通过(10)式计算到 t_1 ,我们仍记 $x(t_1) = x^*(t_1)$ 等等,直到 $x(T)$,当 $n = 1$ 时, $H(x)$ 是 x 的二次函数。所以只要 x 不接近 $H(x)$ 的重根点,迭代法(10)式都收敛到精确解。以后我们会看到在 $H(x)$ 的重根处,将使 x 的导数 $x'(t)$ 趋于无穷大,在这一点处补偿组元不应该到达或越过。

设补偿组元运动曲线 $x = x(t)$, $t \in [t_0, T]$, 已经被求出,那么, $x(t)$ 满足如下两个条件才为所求。一是在整个区间 $[t_0, T]$ 上的曲率 $\mu(t)$ 必须足够小:

$$-\delta \leq \mu(t) = \frac{x''(t)}{[1 + x'^2(t)]^{3/2}} \leq \delta \quad (t_0 \leq t \leq T), \quad (12)$$

其中 δ 为一很小的正数。不满足上述条件的曲线使未来的空间凸轮曲线挠度大,手感滞重且易受损。

第二个条件就是总体变焦系统的倍率变化满足要求,即:

$$U[Y; x(t_0), t_0] - MU[Y; x(T), T] = 0, \quad (13)$$

其中 M 为所要求的变焦比,必须 $M > 0$ 。至此满足(12)式和(13)式的高斯结构参数 Y 为所求。

然而,为求解(12)式、(13)式,必须在(11)式中选择足够的节点 t_{j_i} ,

$$t_0 = t_{j_0} < t_{j_1} < t_{j_2} < \dots < t_{j_k} = T,$$

求解如下(超定)非线性方程组:

$$\mu[Y; x(t_{j_i}), t_{j_i}] = 0, \quad (i = 0, 1, \dots, s) \quad (14a)$$

$$U[Y; x(t_{j_i}), t_{j_i}] = \beta_i, \quad (i = 0, 1, \dots, s) \quad (14b)$$

$$d_j \geq \bar{d}_j > 0, \quad (j = 1, \dots, k-1) \quad (14c)$$

其中 $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_s$ 为相应节点处倍率的目标值,它们必须是单调的,且必须同号。 $\bar{d}_j$ 是 d_j 的下界,保障实际组元不相碰。用非线性最小二乘法求解(14)

式。对(14c)式可用变量替换消除不等式约束。在实际求解时,可先只对(14b)式求解,同时考察(12)式是否得到满足。当有节点破坏了(12)式之后,或是让(14a)式与(14b)式一起参与求解,或者重新调整区间 $[t_0, T]$ 使第一个破坏(12)式的节点成为新的边界点,再重新优化,直到稳定。

5 设计实例

这里给出一个典型的双组联动变倍单组补偿的机械补偿法的例子,它与通常的双组联动方式不同,通常是双正组变倍中间负组补偿,或者双负组变倍中间正组补偿,且都有前固定组元。这里的例子是双正组变倍中间正组补偿,而固定组放在它们中间,这是一个很特殊的结构,已得到实际应用。

这个四组元系统,第二组为固定组元;第一和第四组为联动变倍组元,按直线运动;第三组为补偿组元,按曲线运动。初始结构参数见表1。按本文方法(14)式迭代7次以后,即收敛到结果,见表2。表3给出了结果的10个不同位置上的曲线 $x(t)$ 的间隔

量。表中也给出了补偿组元运动曲线的曲率,这个曲率是很小的。

图1给出了各组元移动曲线的示意图,为了看出补偿组元三的运动趋势,让一和四组联动作直线运动,并夸大了组元三的运动趋势,精确数据已在表3中给出。

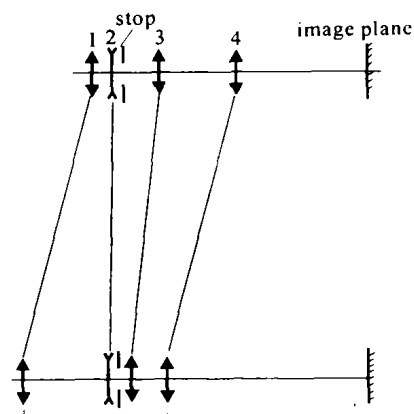


Fig. 1 The cam curves of zoom system of the 4 group elements

从例子看出,问题的求解是简明和迅速的。

Table 1. Input data

number of elements	1	2	3	4
focal length of elements /mm	74.0	-15.0	33.0	43.0
beginning interval /mm	0	7.0	17.0	31.0

Table 2. Calculation results of Gauss optics

number of elements	1	2	3	4
focal length of elements /mm	76.3765000	-15.3864000	41.2534000	53.7653000
beginning interval /mm	0	8.2350000	22.0732000	27.3281000

Table 3. Calculation results in ten points

No.	focal length /mm	1~2 separation /mm	2~3 separation /mm	3~4 separation /mm	4-image plane /mm	curvature
1	28.00000	8.02594	22.22151	27.38885	52.40949	0.014302
2	37.00000	14.48399	18.10282	25.04950	58.86754	0.010854
3	46.00000	19.37836	15.46866	22.78928	63.76191	0.007526
4	55.00000	23.23861	13.57836	20.81932	67.62217	0.004267
5	64.00000	26.38165	12.10591	19.14873	70.76520	0.000845
6	73.00000	29.00424	10.88803	17.74403	73.38779	0.002560
7	82.00000	31.23488	9.83480	16.56662	75.61843	0.006008
8	91.00000	33.16140	8.89299	15.58192	77.54495	0.009498
9	100.00000	34.84614	8.02924	14.76092	79.22969	0.013086
10	109.00000	36.33482	7.22166	14.07982	80.71837	0.016893

值 β 的单调且不变号的限制是非常必要的。否则,实际光学镜头的焦距就会从有限值趋于无穷大,然后再从反向无穷大趋于有限值,造成在无穷点附近

6 结果和讨论

在上述方法(6)式、(14)式中,对所有倍率目标

成像全黑,结果设计完全失败!另一方面,从以下分析中又可得到有益的启发。从(2)式可以得出

$$u_{j+1} = (1 + \varphi_j l_j) u_j,$$

其中 l_j 为第 j 组元的物距,那么,

$$u_{k+1} = (u_1 + \varphi_1 h_1)(1 + \varphi_2 l_2) \cdots (1 + \varphi_k l_k), \quad (15)$$

由 $U(t) = u_{k+1}$ 对 $t_0 \leq t \leq T$ 必须单调和同号,可以得出结论:在 t 的变化区间,每个因子也必须单调且不变号,否则总的 u_{k+1} 就会不单调和变号。这样在构造初值 $\varphi_j = 1/f'_j$ 和 d_j 时,以及在优化过程中都可以用是否满足下式为合理的准则: f'_j 永远大于或永远小于 $l_j(t)$, ($t_0 \leq t \leq T$), 其中 $l_j(t)$ 表示第 j 个组元在 t 时的物距 ($j = 1, 2, \dots, k$)。

对于曲线 $x = x(t)$ 曲率 $\mu(t)$ 的限制, (12) 式是非常必要的。对 $H(x, t) = 0$ 作全微分, 得到 x 关于 t 的导数 $x'(t)$:

$$x'(t) = - \frac{\partial H / \partial t}{\partial H / \partial x}$$

那么,在多项式 $H(x)$ 的重根处, $\partial H / \partial x = 0$, 从而 $x(t)$ 趋于无穷大,二阶导数 $x''(t)$ 必然也趋于无穷大,于是曲率 $\mu(t)$ 趋于无穷大。因此,曲线 $x(t)$ 只能接近这个奇异点 t^* 而不可以越过这点。如此,方程(13)在靠近 t^* 之前总可以被满足,另一方面,破坏了条件(12)式,曲线不能被接受。当 $n = 1$ 时, $H(x)$ 是二次函数,重根点在变倍组元或补偿组元倍率为 -1 时达到。所以,曲线 $x(t)$ 不可以太靠近这个重根点,当然,更不应该越过这点,想通过换根扩大变倍比是不可取的。

从以上分析中看出,机械补偿法对自变量 Y 分量个数 N 的要求远比光学补偿法宽松。从(12)式、(13)式看出,只要初始结构参数给得满足倍率单调和不变号要求,构造性地给出初值是容易的,选择区间 $[t_0, T]$ 也是容易的。当(12)式、(13)式不近人意时,再调整一两个变量就能完全满足要求。机械补偿法能对变焦的所有位置做到像面完全补偿,所以,总体上说,机械补偿法远比光学补偿法优越。

近期文献[4]在国内外较有影响,然而不得不指出其不足之处。在参考文献[4]中所列出的方法没有区分变倍组元和补偿组元,也没有考虑组元联动,更没考虑到变倍组元可以按任意单调光滑曲线运动,因此,那里给出的参数与参数之间的偏导数公式没有普遍意义,尽管那里用高斯括号给出了相当复杂的近乎解析表达式。本文克服了上述缺点,并用数值微分法计算各种导数,既简便又带有普遍性。从

(2)式、(3)式看出,函数 H 是关于参数 φ_j 和 d_j 的多重线性函数,而对参数 t 和移动量 x 都是阶数不高的多项式,所以简便的数值微分有着很好的精度,只要差分步长给得很小,例如 10^{-6} 。文献[4]中研究了移动量的最大值、最小值及鞍点,但却没有深入考察导数不存在或为无穷大的点,这却是运动曲线最重要的可能使运动曲线断裂的奇异点。本文着重考察了这种情况。

另外,在文献[4]中提出四组元的电动调焦方式也是值得探讨的。既然有前固定组元就可以独立地调焦;而第四组元完全可以给出独立轨迹曲线实现对第二组元运动的补偿,用本文方法很容易算出。

最后,文献[4]并没有给出高斯结构参数的比较简明的数学计算方法,实质上仅逐个考察了组元运动曲线的计算。

本文允许变倍组元以任意单调光滑曲线移动是为了扩大变焦方式。一个老的补偿组元运动曲线算出之后,可把该组元按原运动趋势变为增加的新变倍组元,而再选一新补偿组元,再行计算。从而实现从两组元到三组元或四组元变焦等等。另外,恰当地给出变倍组元曲线可以降低补偿组元曲线曲率,使之与直线更接近,增加凸轮曲线光滑性便于加工。总之本文给出的计算方法带有很大的普遍性。

参 考 文 献

- [1] Bergstein L. General theory of optically compensated varifocal systems. *J. Opt. Soc. Am.*, 1958, **48**(3):154 ~ 171
- [2] Pegis R J, Peck W G. First-order design theory for linearly compensated zoom systems. *J. Opt. Soc. Am.*, 1962, **52**(8):905 ~ 911
- [3] Jamieson T H. Thin-lens theory of zoom systems. *Optica Acta*, 1970, **17**(8):565 ~ 584
- [4] Kazuo Tanaka. Recent development of zoom lenses. *Proc. SPIE*, 1997, **3129**:12 ~ 22
- [5] Wang Qi, Zhong Boliang. Gaussian optics of zoom lens with all lens elements movable. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1999, **19**(6):830 ~ 834 (in Chinese)
- [6] HATAHCOH И П. *Theory of Function Structure* (函数构造论). Translated by Xu Jiafu, Zeng Weihang. Beijing: Science Press, 1958. 1 ~ 50 (in Chinese)
- [7] Nanjing University Mathematics Department Numerical Analysis Specialty. *Numerical Method of Optical Automatic Design* (光学系统自动设计中的数值方法). Beijing: National Defence Industry Press, 1976. chapter 8 (in Chinese)
- [8] Wang Qi. Optical systems CAD software package. *Instrument and Meter Journal* (仪器仪表学报), 1994, **15**(1):33 ~ 36 (in Chinese)

Gauss Optics of Zoom Lenses

Wang Qi¹⁾ Wang Guangyu²⁾ Cheng Xuemin³⁾ Wang Yongtian³⁾

- 1), *Shenyang Institute of Computing Technology, Shenyang 110004*
- 2), *Shenyang Qingyun New Technology Company, Shenyang 110004*
- 3), *Department of Optical Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100081*

(Received 22 June 2001; revised 22 October 2001)

Abstract: A novel optimized computation method for designing the Gauss optics parameter of zoom lenses is presented and discussed, including optical compensating method with moving of many groups of lenses by using Chebyshev polynomials and mechanical compensating method with many zoom formations by using nonlinear least square method.

Key words: zoom lenses; Gauss optics; Chebyshev polynomials; optimization