MTF对r、d、n、δ、ΔN微分的计算

姜 会 林

摘要：本文推导了传递函数MTF对结构参数r、d、n的微分计算公式，给出了MTF对偏心差δ和局部光圈ΔN的微分表达式，这些对于以MTF为性能指标，优化求解公差和光学自动设计，都是很有用处的。

一、前 言

在优化求解公差[1]的约束条件以及光学自动设计方法中，需要计算性能随结构参数变化而引起的改变。这可通过两种方法求出，一种是通常的做法，即给出参数的微小变化并重新计算传函值；另一种是微分的方法，即先列出微分函数方程式，再求出微分系数。

文献[2]给出了象面坐标Y、Z对r、d、n的微分公式。我们对此作些简化，并在此基础上进一步推导出MTF对r、d、n的微分计算公式。同时，又整理列出MTF对偏心差δ和局部光圈ΔN的微分计算公式。这样，除表面光洁度外的各光学公差与MTF之间的函数关系式，基本上都有了。

二、光线追迹微分公式

记前一面的脚标为“0”，后一面的脚标为“1”，并已知光线在前一面的坐标X_0、Y_0、Z_0及方向余弦XX_0、YY_0、ZZ_0，见图1。

1. 光线追迹方程[2]

(1) 面到面的传播

令 $A=X_0-D_0$

$$B=XX_0-C_1\cdot(A\cdot XX_0+Y_0\cdot YY_0+Z_0\cdot ZZ_0)$$

$$DD=C_1\cdot(A^2+Y_0^2+Z_0^2)-2A$$

$$L_0=DD/[B+(B^2-C_1\cdot DD)^{\frac{1}{2}}]$$

式中C为曲率，D为空气间隔或中心厚度。

由此可得到光线在后一面上的坐标为

$$X_1=A+L_0\cdot XX_0$$

$$Y_1=Y_0+L_0\cdot YY_0$$

$$Z_1=Z_0+L_0\cdot ZZ_0$$

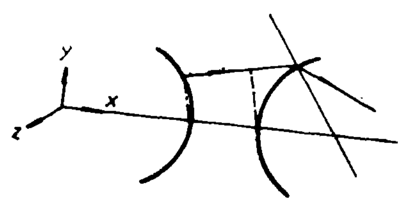

图1

后一面法线单位矢量的三个分量为

$$E_{1X}=1-C_1\cdot X_1$$

$$E_{1Y}=-C_1\cdot Y_1$$

$$E_{1Z}=-C_1\cdot Z_1$$

后一面入射角的余弦为

$$KS_1 = XX_0 \cdot E_{1X} + YY_0 \cdot E_{1Y} + ZZ_0 \cdot E_{1Z} = (B^2 - C_1 \cdot DD)^{\frac{1}{2}}$$

(2) 面的折射

令 $V = N_0/N_1$，可得折射角的余弦为

$$KZ_1 = [1 - V^2 \cdot (1 - KS_1^2)]^{\frac{1}{2}}$$

再令 $G_1 = KZ_1 - V \cdot KS_1$，得到折射后的方向余弦为

$$XX_1 = V \cdot XX_0 + G_1 \cdot E_{1X}$$

$$YY_1 = V \cdot YY_0 + G_1 \cdot E_{1Y}$$

$$ZZ_1 = V \cdot ZZ_0 + G_1 \cdot E_{1Z}$$

(3) 为计算方便，记面的方程为

$$F_1 = C_1/E_{1X}$$

$$u_1 = Y_1^2 + Z_1^2$$

$$LL_1 = E_{1X}$$

$$GG_1 = C_1^3/LL_1^3$$

把入折射角的正弦矢量记为如下符号，且有

$$AX_1 = E_{1Y} \cdot ZZ_0 - E_{1Z} \cdot YY_0$$

$$AY_1 = E_{1Z} \cdot XX_0 - E_{1X} \cdot ZZ_0$$

$$AZ_1 = E_{1X} \cdot YY_0 - E_{1Y} \cdot XX_0$$

$$RX_1 = V \cdot AX_1$$

$$RY_1 = V \cdot AY_1$$

$$RZ_1 = V \cdot AZ_1$$

2. 传递方程式的微分[2]

记$Y_1 = Y_1(Y_0, Z_0, YY_0, ZZ_0, C_0, C_1, D_0)$

其中 $\begin{cases} Y, Z \text{——光束与折射面的交点坐标；} \\ YY_0, ZZ_0 \text{——} Y_0\text{、}Z_0 \text{方向的方向余弦。} \end{cases}$

经推导得

$$dY_1 = \frac{\partial Y_1}{\partial Y_0} dY_0 + \frac{\partial Y_1}{\partial Z_0} dZ_0 + \frac{\partial Y_1}{\partial YY_0} dYY_0 + \frac{\partial Y_1}{\partial ZZ_0} dZZ_0 + \frac{\partial Y_1}{\partial C_0} dC_0 + \frac{\partial Y_1}{\partial C_1} dC_1 + \frac{\partial Y_1}{\partial D_0} dD_0$$

$$= \frac{E_{1X} \cdot KZ_0 - ZZ_0 \cdot (E_{1X} \cdot E_{0Z} - E_{0X} \cdot E_{1Z})}{KS_1 \cdot E_{0X}} dY_0$$

$$+ \frac{YY_0 \cdot (E_{1X} \cdot E_{0Z} - E_{0X} \cdot E_{1Z})}{KS_1 \cdot E_{0X}} dZ_0 + \frac{L_0 \cdot (E_{1X} + ZZ_0 \cdot AX_1)}{KS_1 \cdot XX_0} dYY_0$$

$$- \frac{L_0 \cdot YY_0 \cdot AY_1}{KS_1 \cdot XX_0} dZZ_0 - \frac{E_{1X} \cdot YY_0 \cdot u_0}{KS_1 \cdot LL_0 \cdot (1 + LL_0)} dC_0$$

$$+ \frac{E_{1X} \cdot YY_0 \cdot u_1}{KS_1 \cdot LL_1 \cdot (1 + LL_1)} dC_1 + \frac{E_{1X} \cdot YY_0 \cdot u_1}{KS_1} dD_0$$

同样可得

$$dZ_1=\frac{ZZ_0\cdot(E_{1X}\cdot E_{0Y}-E_{0X}\cdot E_{1Y})}{KS_1\cdot E_{0X}}dY_0$$

$$+\frac{E_{1X}\cdot KZ_0-YY_0\cdot(E_{1X}\cdot E_{0Y}-E_{0X}\cdot E_{1Y})}{KS_1\cdot E_{0X}}dZ_0$$

$$+\frac{L_0\cdot ZZ_0\cdot AZ_1}{KS_1\cdot XX_0}dYY_0+\frac{L_0\cdot(E_{1X}-YY_0\cdot AZ_1)}{KS_1\cdot XX_0}dZZ_0$$

$$+\frac{ZZ_0\cdot E_{1X}\cdot u_0}{KS_1\cdot LL_0\cdot(1+LL_0)}dC_0+\frac{ZZ_0\cdot E_{1X}\cdot u_1}{KS_1\cdot LL_1\cdot(1+LL_1)}dC_1$$

$$+\frac{ZZ_0\cdot E_{1X}}{KS_1}dD_0$$

3. 折射方程式的微分[2]

记$YY_1=YY_1(Y_1,Z_1,YY_0,ZZ_0,N_0,N_1,C_1)$

其中　N——折射率；其余符号意义同上。

经推导可得

$$dYY_1=\frac{\partial YY_1}{\partial Y_1}dY_1+\frac{\partial YY_1}{\partial Z_1}dZ_1+\frac{\partial YY_1}{\partial YY_0}dYY_0+\frac{\partial YY_1}{\partial ZZ_0}dZZ_0+\frac{\partial YY_1}{\partial N_0}dN_0$$

$$+\frac{\partial YY_1}{\partial N_1}dN_1+\frac{\partial YY_1}{\partial C_1}dC_1$$

$$=\frac{G_1\cdot[(F_1^3-GG_1)\cdot E_{1X}^2\cdot XX_1\cdot Y_1^2-F_1\cdot(XX_1-E_{1Z}\cdot RY_1)]}{KZ_1}dY_1$$

$$+\frac{G_1\cdot[(F_1^3-GG_1)\cdot E_{1X}^2\cdot XX_1\cdot Y_1\cdot Z_1-F_1\cdot E_{1Y}\cdot RY_1]}{KZ_1}dZ_1$$

$$+\frac{(V\cdot KS_1\cdot XX_1+G_1\cdot E_{1Z}\cdot RY_1)}{XX_0\cdot KZ_1}dYY_0-\frac{G\cdot E_{1Y}\cdot RY_1}{XX_0\cdot KZ_1}dZZ_0$$

$$+\frac{YY_1\cdot KZ_1-E_{1Y}}{KZ_1\cdot N_0}dN_0-\frac{YY_1\cdot KZ_1-E_{1Y}}{KZ_1\cdot N_1}dN_1-\frac{G_1\cdot E_{1X}^2\cdot XX_1\cdot Y_1}{KZ_1\cdot LL_1^3}dC_1$$

同样可得

$$dZZ_1=\frac{G_1\cdot[(F_1^3-GG_1)\cdot E_{1X}^2\cdot XX_1\cdot Y_1\cdot Z_1+F_1\cdot E_{1Z}\cdot RZ_1]}{KZ_1}dY_1$$

$$+\frac{G_1\cdot[(F_1^3-GG_1)\cdot E_{1X}^2\cdot XX_1\cdot Z_1^2-F_1\cdot(XX_1-E_{1Y}\cdot RZ_1)]}{KZ_1}dZ_1$$

$$+\frac{G_1\cdot E_{1Z}\cdot RZ_1}{XX_0\cdot KZ_0}dYY_0+\frac{V\cdot XX_1\cdot KS_1-G_1\cdot E_{1Y}\cdot RZ_1}{XX_0\cdot KZ_1}dZZ_0$$

$$+\frac{ZZ_1\cdot KZ_1-E_{1Z}}{KZ_1\cdot N_0}dN_0-\frac{ZZ_1\cdot KZ_1-E_{1Z}}{KZ_1\cdot N_1}dN_1-\frac{G_1\cdot XX_1\cdot E_{1X}^2\cdot Z_1}{KZ_1\cdot LL_1^3}dC_1$$

4．微分方程的传递

光线在象面上的坐标及象面前光线的方向余弦对结构参数$C(i)$、$D(i)$、$N(i)$的微分式是

$$\frac{d\overline{R}(M+1)}{dC(i)}=\overline{F}_1(i)\cdot\frac{d\overline{H}(i)}{dC(i)}+\overline{F}_2(i)\cdot\frac{d\overline{O}(i)}{dC(i)}$$

$$\frac{d\overline{R}(M+1)}{dD(i)}=\overline{F}_1(i+1)\cdot\frac{d\overline{H}(i+1)}{dD(i)}$$

$$\frac{d\overline{R}(M+1)}{dN(i)}=\overline{F}_2(i)\cdot\frac{d\overline{O}(i)}{dN(i)}+\overline{F}_2(i+1)\cdot\frac{d\overline{O}(i+1)}{dN(i)}$$

其中

$$\overline{F}_1(i)=\prod_{j=M}^{i}[\overline{T}(j)\cdot\overline{R}(j)]$$

$$\overline{F}_2(i)=\prod_{j=M}^{i}[\overline{T}(j)\cdot\overline{R}(j)]/\overline{R}(i)$$

$$\overline{F}_1(M+1)=I\ （四阶单位阵）$$

M为光学系统总面数。

用$P(i)$代替$C(i)$、$D(i)$、$N(i)$，有

$$\frac{d\overline{R}(M+1)}{dP(i)}=\begin{vmatrix}\frac{dY(M+1)}{dP(i)}\\ \frac{dZ(M+1)}{dP(i)}\\ \frac{dYY(M)}{dP(i)}\\ \frac{dZZ(M)}{dP(i)}\end{vmatrix},\quad \frac{d\overline{H}(i+1)}{dP(i)}=\begin{vmatrix}\frac{\partial Y(i+1)}{\partial P(i)}\\ \frac{\partial Z(i+1)}{\partial P(i)}\\ 0\\ 0\end{vmatrix}$$

$$\frac{d\overline{O}(i+1)}{dP(i)}=\begin{vmatrix}0\\ 0\\ \frac{\partial YY(i+1)}{\partial P(i)}\\ \frac{\partial ZZ(i+1)}{\partial P(i)}\end{vmatrix}$$

$$\overline{T}(i)=\begin{pmatrix}\frac{\partial Y(i+1)}{\partial Y(i)} & \frac{\partial Y(i+1)}{\partial Z(i)} & \frac{\partial Y(i+1)}{\partial YY(i)} & \frac{\partial Y(i+1)}{\partial ZZ(i)}\\ \frac{\partial Z(i+1)}{\partial Y(i)} & \frac{\partial Z(i+1)}{\partial Z(i)} & \frac{\partial Z(i+1)}{\partial YY(i)} & \frac{\partial Z(i+1)}{\partial ZZ(i)}\\ 0 & 0 & 1 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{pmatrix}$$

$$\overline{R}(i+1)=\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \dfrac{\partial YY(i+1)}{\partial Y(i+1)} & \dfrac{\partial YY(i+1)}{\partial Z(i+1)} & \dfrac{\partial YY(i+1)}{\partial YY(i)} & \dfrac{\partial YY(i+1)}{\partial ZZ(i)} \\ \dfrac{\partial ZZ(i+1)}{\partial Y(i+1)} & \dfrac{\partial ZZ(i+1)}{\partial Z(i+1)} & \dfrac{\partial ZZ(i+1)}{\partial YY(i)} & \dfrac{\partial ZZ(i+1)}{\partial ZZ(i)} \end{bmatrix}$$

从上面公式即可求出光线在象面上的坐标对任一结构参数的微分系数。

三、MTF对Y、Z及r、d、n的微分计算

由几何传递函数公式

$$D(\nu_Y,\nu_Z)=\frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N}\{\cos[2\pi(\nu_Y\cdot TA_{Yj}+\nu_Z\cdot TA_{Zj})] - i\ \sin[2\pi(\nu_Y\cdot TA_{Yj}+\nu_Z\cdot TA_{Zj})]\}$$

其中 $\begin{cases} N\text{——所计算的光线条数} \\ j\text{——光线序号} \\ \nu_Y,\nu_Z\text{——空间频率} \end{cases}$

设 $u_j=2\pi(\nu_Y\cdot TA_{Yj}+\nu_Z\cdot TA_{Zj})$

则 $$MTF=\frac{1}{N}\sqrt{\left[\sum_{j=1}^{N}\cos\ u_j\right]^2+\left[\sum_{j=1}^{N}\sin\ u_j\right]^2}$$

所以 $$dMTF=\left\{\sum_{j=1}^{N}\cos u_j\cdot\sum_{j=1}^{N}\left[-\sin u_j\left(\frac{\partial u_j}{\partial TA_{Yj}}dTA_{Yj}+\frac{\partial u_j}{\partial TA_{Zj}}dTA_{Zj}\right)\right]+\sum_{j=1}^{N}\sin u_j\cdot\sum_{j=1}^{N}\left[\cos u_j\left(\frac{\partial u_j}{\partial TA_{Yj}}dTA_{Yj}+\frac{\partial u_j}{\partial TA_{Zj}}dTA_{Zj}\right)\right]\right\}\Big/\left(N\sqrt{\left[\sum_{j=1}^{N}\cos u_j\right]^2+\left[\sum_{j=1}^{N}\sin u_j\right]^2}\right)$$

设 $$\begin{cases} K_0=2\pi\Big/\left(N\cdot\sqrt{\left[\sum_{j=1}^{N}\cos u_j\right]^2+\left[\sum_{j=1}^{N}\sin u_j\right]^2}\right) \\ K_1=\sum_{j=1}^{N}\sin\ u_j \\ K_2=\sum_{j=1}^{N}\cos\ u_j \end{cases}$$

又因 $\begin{cases} TA_{Yj} = Y_j - Y_0 \\ TA_{Zj} = Z_j \end{cases}$

故 $\begin{cases} dTA_{Yj} = dY_j - dY_0 \\ dTA_{Zj} = dZ_j \end{cases}$

式中 $\begin{cases} Y_j\text{——第 } j \text{ 条光线的} Y_{M+1}\text{，记为} Y_{M+1,j} \\ Y_0\text{——主光线的} Y_{M+1}\text{，记为} Y_{M+1,0} \\ Z_j\text{——第 } j \text{ 条光线的} Z_{M+1}\text{，记为} Z_{M+1,j} \end{cases}$

所以 $\frac{\partial u_j}{\partial TA_{Yj}} dTA_{Yj} = 2\pi\nu_Y(dY_{M+1,j} - dY_{M+1,0})$

$$\frac{\partial u_j}{\partial TA_{Zj}} dTA_{Zj} = 2\pi\nu_Z dZ_{M+1,j}$$

$$dMTF = K_0 \cdot \sum_{j=1}^{N}\{(K_1\cos u_j - K_2\sin u_j)[\nu_Y(dY_{M+1,j} - dY_{M+1,0}) + \nu_Z dZ_{M+1,j}]\}$$

可得出

$$\frac{dMTF}{dP(i)} = K_0 \cdot \sum_{j=1}^{N}\left\{(K_1\cos u_j - K_2\sin u_j)\left[\nu_Y \frac{dY_{M+1,j} - dY_{M+1,0}}{dP(i)} + \nu_Z \frac{dZ_{M+1,j}}{dP(i)}\right]\right\}$$

式中$P(i)$代表结构参数，可分别记为

$$\frac{dMTF}{dC(i)} = K_0 \cdot \sum_{j=1}^{N}\left\{(K_1\cos u_j - K_2\sin u_j)\left[\nu_Y \frac{dY_{M+1,j} - dY_{M+1,0}}{dC(i)} + \nu_Z \frac{dZ_{M+1,j}}{dC(i)}\right]\right\}$$

$$\frac{dMTF}{dD(i)} = K_0 \cdot \sum_{j=1}^{N}\left\{(K_1\cos u_j - K_2\sin u_j)\left[\nu_Y \frac{dY_{M+1,j} - dY_{M+1,0}}{dD(i)} + \nu_Z \frac{dZ_{M+1,j}}{dD(i)}\right]\right\}$$

$$\frac{dMTF}{dN(i)} = K_0 \cdot \sum_{j=1}^{N}\left\{(K_1\cos u_j - K_2\sin u_j)\left[\nu_Y \frac{dY_{M+1,j} - dY_{M+1,0}}{dN(i)} + \nu_Z \frac{dZ_{M+1,j}}{dN(i)}\right]\right\}$$

说明：式中 j 的选取是由子午、弧矢孔径系数和视场系数三者的不同排列决定的；而 i 是指所求的参数序号，本文公式中指的是第 i 个曲率或第 i 个间隔或第 i 个折射率。

四、MTF对偏心差δ的微分计算

确定偏心差的公差大小，主要根据中心彗差的允许改变量。而彗差又引起 MTF改变，所以可由此推导出MTF与 δ 之间的关系。

1．偏心差与中心彗差S_{2i}间关系式为[3]

$$S_{2i} = \delta_i \cdot \left[\left(\frac{\sum_{q=i}^{M} S_{\mathrm{I}q}}{Y_i} + \frac{\sum_{q=i}^{M} S_{\mathrm{II}q}}{\eta_i}\right) - \left(\frac{\sum_{q=i+1}^{M} S_{\mathrm{I}q}}{Y_{i+1}} + \frac{\sum_{q=i+1}^{M} S_{\mathrm{II}q}}{\eta_{i+1}}\right)\right]$$

式中 $\begin{cases} Y_i \text{——第 } i \text{ 面上光线的 } Y \text{ 坐标；} \\ \eta_i \text{——第 } i \text{ 面前的象高。} \end{cases}$

2. 传函与波差、波差与S_2的关系式

$$OTF(s,t)=\frac{1}{A}\iint_D \exp\left\{ik\left[W\left(Y+\frac{S}{2},Z+\frac{t}{2}\right)-W\left(Y-\frac{S}{2},Z-\frac{t}{2}\right)\right]\right\}dYdZ$$

$$W=C_0(Y^2+Z^2)+\frac{1}{8}S_1(Y^2+Z^2)^2+\frac{1}{2}S_2\eta Y\ (Y^2+Z^2)+\frac{1}{2}S_3\eta^2Y^2+\cdots\cdots$$

其中初级彗差项为

$$w=\frac{1}{2}S_2\eta Y\ (Y^2+Z^2)\overset{\text{记为}}{=\!=}aY(Y^2+Z^2)$$

式中 $a=\frac{1}{2}S_2\eta$

3. 传函与S_2的关系式[4]

简取一维频率且把上式代入传函中得

$$OTF(s,o)=\frac{1}{A}\iint_D \exp\left\{\left(ika\left\{\left(Y+\frac{S}{2}\right)\left[\left(Y+\frac{S}{2}\right)^2+Z^2\right]\right.\right.\right.$$
$$\left.\left.-\left(Y-\frac{S}{2}\right)\left[\left(Y-\frac{S}{2}\right)^2+Z^2\right]\right\}\right\}dYdZ$$

当用$r=1$的圆的外接方孔代替D时，近似有

$$OTF(s,o)=\frac{1}{4}\exp\left\{ikS_2\eta\left(\frac{S}{2}\right)^3\right\}\int_{-1}^{1}\exp\{ikaS\cdot 3Y^2\}dY\cdot\int_{-1}^{1}\exp\{ikaSZ^2\}dZ$$

$$\overset{\text{记为}}{=\!=}\exp\left\{ikS_2\eta\left(\frac{S}{2}\right)^3\right\}\cdot g_Y(s)\cdot g_Z(s)$$

其中 $\begin{cases} g_Y(s)=\int_0^1 \exp\{ikaS\cdot 3Y^2\}dY \\ g_Z(s)=\int_0^1 \exp\{ikaSZ^2\}dZ \end{cases}$

所以 $$OTF(s,o)=\exp\left\{ikS_2\eta\left(\frac{S}{2}\right)^3\right\}\frac{\pi}{\sqrt{3}KS_2\eta S}[C(\alpha_1)+iS(\alpha_1)][C(\beta_1)+iS(\beta_1)]$$

式中

$$C(\alpha_1)=\int_0^{\alpha_1}\cos\left(\frac{\pi}{2}\alpha^2\right)d\alpha$$

$$S(\alpha_1)=\int_0^{\alpha_1}\sin\left(\frac{\pi}{2}\alpha^2\right)d\alpha$$

$$\alpha=\sqrt{\frac{2}{\pi}kaS}\cdot Z$$

$$\alpha_1=\sqrt{\frac{2}{\pi}kaS}$$

$$\left\{\begin{aligned} C(\beta_1) &= \int_0^{\beta_1}\cos\left(\frac{\pi}{2}\beta^2\right)d\beta \\ S(\beta_1) &= \int_0^{\beta_1}\sin\left(\frac{\pi}{2}\beta^2\right)d\beta \\ \beta &= \sqrt{\frac{6}{\pi}kas}\cdot Y \\ \beta_1 &= \sqrt{\frac{6}{\pi}kas} \end{aligned}\right.$$

（可查菲涅尔积分表算出[5]）

计算中可分别给每面一个δ_i，代入公式求出S_{2i}及相应的$MTF=|OTF(s,o)|$，由此可得MTF对δ的灵敏度系数。

五、MTF对局部光圈ΔN的微分计算

主要是从S_3引起的MTF变化，推导出MTF与局部光圈的关系。

1. 传函与S_3的关系式

因 $u' = \frac{1}{2}S_3\eta^2Y^2$

所以 $$OTF(s,o) = \frac{1}{A}\iint_D \exp\left\{ik\left\{\frac{1}{2}S_3\eta^2\left[\left(Y+\frac{S}{2}\right)^2-\left(Y-\frac{S}{2}\right)^2\right]\right\}\right\}dYdZ$$
$$= \frac{1}{\pi}\int_0^1 rbr\int_0^{2\pi}d\theta\cdot\exp\{ikS_3\eta^2r\rho\cdot\cos\theta\cdot\cos\varphi\}$$ [6]

式中 $Y=r\cos\theta$，$S=\rho\cos\varphi$

在子午面内$\varphi=0$，$\cos\varphi=1$，所以

$$OTF(s,o) = \frac{2}{kS_3\eta^2S}J_1(kS_3\eta^2S)$$

最大视场时$\eta=1$，故

$$OTF(s,o) = \frac{2}{kS_3S}J_1(kS_3S)$$

2. 局部光圈ΔN_i与S_3的关系式

$$\Delta N_i = \phi^2(i)\cdot(x_t'-x_s')\Big/\left[4\sqrt{\bar{M}}\ \frac{h_i}{h_1}(n_i'-n_i)\cdot f'^2_{\text{镜头}}\cdot\lambda\right]$$ [7]

又因为 $x_t'-x_s' = S_3/(n'_M\cdot u'^2_M)$

所以 $$\Delta N_i = \phi^2(i)\cdot S_3\Big/\left[n'_M\cdot u'^2_M 4\sqrt{\overline{M}}\cdot\frac{h_i}{h_1}\cdot(n_i'-n_i)f'^2_{\text{镜头}}\cdot\lambda\right]$$

即 $$S_3 = \left[n'_M\cdot u'^2_M\cdot 4\sqrt{\overline{M}}\cdot\frac{h_i}{h_1}(n_i'-n_i)\cdot f'^2_{\text{镜头}}\cdot\lambda\right]\cdot\Delta N_i/\phi^2(i)$$

因此，可对每面给一个ΔN_i，球出S_3及相应的$MTF=|OTF(s,o)|$，这样就得到了MTF对ΔN_i的灵敏度系数（式中ϕ为通光口径，λ为波长）。

注：本文只推领了共轴球面系统的一些计算公式。

参 考 文 献

[1] 姜会林；光学机械，1986, No. 1

[2] D.P.Feder; J.O.S.A., 1968, 58, No. 11, 1494.

[3] 王之江；《光学设计理论基础》，科学出版社，1965

[4] Handbook of Optics, Sponsored by the Optical Society of America, 2—37

[5] Hecht—ZaJac; 《Optics》381

[6] 徐世昌；各种象差对传函的影响（1985）

[7] 米·德·马尔采夫（苏）；《光学零件的公差计算》国防工业出版社，1974

Calculation of MTF Differentiation to r, d, n, δ, ΔN

Jiang Huilin

Abstract

In this paper calculation expressions of MTF differentiation to structure parameters r,d,n are derived,and that to eccentric error δ and partial figure ΔN are given. These expressions are very useful for calculating tolerances with optimization method and optical automatic design in which the performance target can be MTF.