

高精度的光学传递函数计算

沙定国 赵 瑜

(北京理工大学光电工程系, 北京 100081)

摘 要 直接从基尔霍夫衍射积分理论出发, 在数学模型上考虑了瞳面振幅分布的不均匀性和倾斜因子, 并采取一系列改进数值计算方法的措施, 力求光学传递函数(OTF)计算的高精度。通过对多个同类软件和多个典型镜头进行比对计算和分析的结果表明, 本软件适用于为光学传递函数标准镜头准确定值, 也适用于各种大相对孔径和广角光学系统的设计与计算。

关键词 光学传递函数, 高精度, 计算。

1 引 言

光学传递函数是评价成像光学系统的重要质量判据。自七十年代起, 光学传递函数的测量和计算技术已广泛应用于成像光学系统, 在国际范围内多次进行过光学传递函数的计算和测量的比对^[1, 2]。当今, 随着应用微机辅助设计各种复杂光学镜头的需要, 再次产生了光学传递函数计算和测量的比对问题。九十年代, 正在讨论发起一次新的光学传递函数计算的国际比对, 旨在调查各种软件用于大孔径广角视场设计的适应程度^[3]。以往, 一些公认权威的光学传递函数计算软件, 限于微机的运算速度, 都是在数学模型和算法上作了不同程度的近似, 这些软件不得不以牺牲精度为代价。

为了研制光学传递函数标准镜头、尤其是大相对孔径的标准镜头的需要, 作者在基于586/100微机的基础上, 研制了一个高精度的光学传递函数计算软件, 这个软件也适应了当今计算机辅助设计光学镜头以及光学传递函数测量和计算的比对需要。本文简述光学传递函数的数学模型、算法、比对计算与精度评定和结论。

2 数学模型

在光学系统满足线性与空间不变性的假设下, 光学传递函数定义为

$$OTF(r, s) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} PSF(u, v) \exp[-j2\pi(ru + sv)] dudv \quad (1)$$

式中, $PSF(u, v)$ 为成像系统的点扩散函数, 即光学传递函数是点扩散函数的傅里叶变换。问题的关键是如何提高点扩散函数的计算精度。

从基尔霍夫衍射理论出发, 如图1所示, 物点 P 经成像系统在垂直于光轴的像面上的复

振幅分布, 忽略常数后可表示为

$$U(u, v) = \iint_{\Sigma} [G(y, z) \exp(jkd) \times (1 + \cos \chi)/d] ds \quad (2)$$

式中, $k = 2\pi/\lambda$, $G(y, z)$ 为波面 Σ 上的复振幅分布, d 为 Σ 面上 Q 点至像点 $P(u, v)$ 的距离, χ 为衍射光线 QP' 与光线 QP_z 的夹角。

进而得点扩散函数为

$$PSF(u, v) = |U(u, v)|^2 \quad (3)$$

经数学推导, 将以上关于 $U(u, v)$ 的曲面积分化为如下的二重积分

$$U(u, v) = \iint_D \{A_{Q'} \exp[jk(W_Q + d)] \cos^{\frac{3}{2}} \theta (1 + \cos \chi)/d\} dydz \quad (4)$$

式中 $A_{Q'}$ 为由 P 点发出的光波在出瞳平面 $y_0'z_0'$ 上某点 Q' 的振幅; W_Q 为 Q' 点对应于参考球面上点 Q 的波差; d 为 Q 点至像点 P' 的距离; θ 为光线 QP_z 与主光线 $O'P_z$ 的夹角; χ 为衍射光线 QP' 与光线 QP_z 的夹角; D 为瞳面 $y_0'z_0'$ 上的通光域。

一些软件都把瞳面振幅 $A_{Q'}$ 和倾斜因子 $(1 + \cos \chi)/d$ 视为常数^[4, 5]。经计算分析, 由此造成调制传递函数(MTF)的误差在有的情况下达0.01以上^[6]。因此, 为提高光学传递函数的计算精度, 应计入瞳面振幅分布的不均匀性和倾斜因子的影响。

3 几个主要的计算环节

3.1 积分域的确定

采用加密折线拟合边界的方法。取规范化间隔 $\Delta z = 0.05$, 在 $z > 0$ 的半个瞳面内, 追迹约40个边界点, 估计面积差小于0.001, 经试算调制传递函数误差小于0.001。

3.2 波像差的计算

在一些计算光学传递函数的软件中, 其波像差都是通过各种插值函数近似获得。本软件采用逐条追迹积分光线的方法, 避免了插值误差。其方法是, 由出瞳面上进行高斯积分的各节点处出发, 按逆向光路反求至入瞳面上对应点之间的光程差, 进而得到对应于参考球面的各点波像差。

3.3 瞳面振幅分布的计算

在入瞳平面上振幅均匀的条件下, 导出出瞳平面上的振幅分布

$$A_{Q'} = A'(y, z) = \sqrt{|\alpha(y_0, z_0)/\alpha(y, z)|} \quad (5)$$

式中, 入瞳坐标 (y_0, z_0) 与出瞳坐标 (y, z) 的多项式函数关系是用最小二乘法拟合解得。

3.4 倾斜因子的处理

经数学推导, 倾斜因子 $(1 + \cos \chi)/d$ 中的

$$d = \{R^2 + u^2 + v^2 - 2[uy \cos \alpha + vz - (R - x)u \sin \theta]\}^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

$$\cos \chi = \cos \alpha \cos \alpha' + \cos \beta \cos \beta' + \cos \gamma \cos \gamma' \quad (7)$$

式中

$$\cos \alpha' = (R + u \sin \alpha - x)/d, \quad \cos \beta' = (u \cos \alpha - y)/d, \quad \cos \gamma' = (v - z)/d, \quad (8)$$

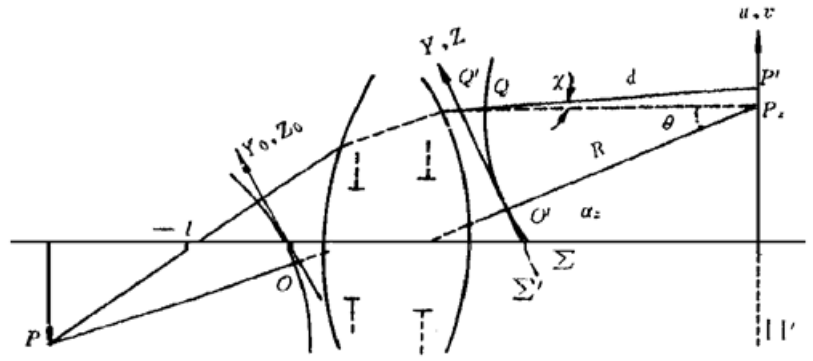


Fig. 1 Ray tracing description of the Kirchhoff diffraction integration

R 为参考球面的半径, α 为主光线与光轴的夹角。

3.5 二重积分的数值计算

选用精度高、省时、省存储的高斯型求积公式计算 $U(u, v)$ 。经计算, 确定取 6×12 个子区间, 6个节点。

3.6 指定频率的调制传递函数计算

一般软件用快速傅里叶变换(FFT)求得 N 个等间隔的调制传递函数值, 再通过插值求得指定频率的调制传递函数值。为了避免插值误差, 本软件改用普通的傅里叶变换法计算指定频率的弧矢调制传递函数和子午调制传递函数。

4 软件的比对计算与精度评定

本软件 HAOTF 与美国 CODE V, 罗彻斯特大学 TA, 俄罗斯 OPAL, 中国 GOSA、SOD88等著名软件在数学模型和数值方法上进行了比较分析, 并用一些典型的光学系统进行了比对计算。这些光学系统包括: 610 mm、F/6镜头, 100 mm、F/4和152 mm、F/5.6广角镜头, 51 mm、F/1.6大孔径镜头, 20 mm、F/1弯月式和150 mm、F/1双分离式红外标准镜头, 视放大率9倍、入瞳直径63 mm 的标准望远镜。比对计算的结果表明: 对小视场和小相对孔径系统, 它们的计算结果符合得较好, 个别软件的调制传递函数差异超出0.01; 随着系统的视场或孔径的增大, 或者系统的像差和拦光复杂, 调制传递函数的曲线陡且变动大, 它们的计算差异也增大, 有的高达0.10以上。

经分析列出影响软件计算精度的主要来源见下表1, 其中也比较列出了其他同类软件的计算误差。表1中的调制传递函数误差值是按典型例子估计的。

Table 1. Evaluation on computation accuracy of OTF

No.	error source	Δ MTF of HAOTF		Δ MTF of other softwares	
1	theory model	no appr.	0	Fresnel appr.	0.001~ 0.01
2	wave difference calculation	direct trace	0.001	inserted value appr.	0.001~ 0.01
3	pupil boundary	polygon approaching	0.001	elliptic appr.	0.001~ 0.01
4	amplitude distribution	no appr.	0	appr. const	0.001~ 0.013
5	inclination factor	considered	0.001	appr. const	0.001~ 0.010
6	image plan treatment	no appr.	0	projection appr.	0.001~ 0.05
7	frequency treatment	calculated at assigned frequency	0.001	inserted value appr.	0.001~ 0.066
composite			< 0.003		0.003~ 0.100

abbreviation: appr. - approximation.

结 论 本文严格采用基尔霍夫衍射积分的模型, 引入了瞳面振幅的不均匀分布和倾斜因子, 确保光学传递函数计算无理论误差; 采用直接追迹光线计算波差, 避免插值误差, 精细处理光瞳积分域, 使调制传递函数的数值计算误差降至最小限度; 直接计算指定频率的调制传递函数, 对提高大视场及调制传递函数曲线变化陡、起伏大的系统的调制传递函数计算精度起到了关键作用; 解决了微机容量和运算速度不足的难点, 注意采取了节省运算时间和节省内存的措施。本软件不仅对小视场、小相对孔径的光学系统具有高的计算精度, 对大视场、大相对孔径的光学系统更是优于其他同类软件。用本软件计算一个像面十个频率的调制传递

函数值, 在586/75微机上约需10分钟, 在586/166微机上只需4分钟, 可满足各种标准镜头和其他特殊光学系统研制的需要。

八五期间, 为建立光学传递函数国防最高标准, 研制的各具三片型照相物镜、标准望远镜和红外照相物镜均是用高精度的光学传递函数计算软件、按精测的光学结构参数计算定值, 它们的计算值与光学传递函数测量仪器的测量值的最大差异, 轴上均在0.03以内, 轴外在0.05~0.06以内。光学传递函数计算软件和标准镜头都已通过鉴定验收。

参 考 文 献

- [1] AD-710633, Lens Test Standardization Study, 1974
- [2] 庄松林, 钱振邦, 光学传递函数. 北京, 机械工业出版社, 1981
- [3] Liond R. Baker, Introduction of Proc. SPIE, 1992, 1781
- [4] 王 琦, 一个更为精确的光学传递函数算式. 光学学报, 1982, 2(4) :301~ 307
- [5] 何志华, 龙夫年, 便于计算离焦光学系统的OTF的较精确算式. 光学学报, 1985, 5(5) :392~ 399
- [6] 赵 瑜, 沙定国, 光学系统的波面不均匀性与MTF理论值的计算精度. 光学技术, 1995, (6) :32~ 35

High Accuracy Computation of OTF

Sha Dingguo Zhau Yu

(Department of Opto-Electron Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081)

(Received 7 March 1997; revised 7 May 1997)

Abstract Directly from the theory of Kirchhoff diffraction, without any approximation about mathematical models, a series of improved digital calculation ways are used to ensure the high accuracy of OTF calculation. Through the comparative computation of several same type of softwares and typical lenses, the result shows that this software is suitable for the accurately setting the value of OTF standard lens, and also suitable for the design and computation of various large relative apertures and wide angle optical systems.

Key words OTF, high accuracy, calculation.