

成像光学系统总性能的单一评价指标

姜 会 林

(中国科学院长春光学精密机械研究所)

提 要

本文在论证了用空间信息量表示成像光学系统总体性能的基础上,提出了信息量的计算公式

$$F = K \frac{J^2}{\lambda^2} \cdot \frac{S^2}{S_0^2} \quad \text{或} \quad F = K \frac{J^2}{\lambda^2} \cdot \frac{M^2}{M_0^2} \quad \text{或} \quad F = K \frac{J^2}{\lambda^2} \cdot \frac{P^2}{P_0^2}$$

阐述了它的物理意义,并给出了计算实例。

一、基本思想

成像光学系统的应用范围甚广,功能各异,以往评价其性能,一般是分门别类的,而且常常是多指标的.为便于用经济效益衡量光学系统设计水平的高低和光学系统实用性的优劣,需要用单一的、比较直观的物理量来表示光学系统的总体性能,再把它与单一的可计算的成本指标相结合.那么,用怎样的一个物理量来表示成像光学系统的总体性能呢?又如何进行计算呢?这就是本文要讨论的主要问题。

对于一般的光学系统,其性能主要包括以下三个方面,即光度特性、成像特性、噪音特性^[1].对于成像光学系统来说,主要是成像特性.因此,在近代的一些用于成像的光学仪器中,时常用数字化的方法来检验系统的性能和质量水平,通过将图像分点,然后进行二维扫描,用经系统后可分点数的多少来衡量系统传递能力的强弱.实际上,像面上接收到的可分点数就是所获得的空间信息量。

所以,如果我们能够导出一个计算空间信息量的公式,而且能够证明它确实反映了上面所述的特性,那么我们就找到了成像光学系统总体性能的单一评价指标及其计算公式。

二、计算公式

从上述基本思想出发,并考虑到成像光学系统的应用范围和检测方法,我们提出如下公式来计算空间信息量:

$$F = K \frac{J^2}{\lambda^2} \frac{S^2}{S_0^2} \quad \text{或} \quad F = K \frac{J^2}{\lambda^2} \frac{M^2}{M_0^2} \quad \text{或} \quad F = K \frac{J^2}{\lambda^2} \frac{P^2}{P_0^2} \quad (1)$$

式中 $J = nu\eta$ 为拉格朗日不变量, λ 为波长(一般指中心波长), K 为常系数(按接收面形不同取不同值), S 为实际传函曲线与座标轴所含的面积(若把接收器考虑在内,则其下方边界应为接收器阈值频率对比曲线), S_0 为理想传函曲线与座标轴所含的面积, M 为特征频率对

应的实际对比传函值, M_0 为特征频率对应的理想对比传函值, P 为 MIF 取一定值时的实际空间频率, P_0 为 MIF 取一定值时的理想空间频率。

公式的主要推导过程如下:

1. 理想状态下光学系统的截止分辨率(亦称理论极限分辨率)为:

$$P_0 = \frac{2n \sin U}{\lambda} \doteq \frac{2nu}{\lambda} \quad (2)$$

(1) 如果像面是圆形, 像高 η 即为半径, 则像面面积为 $\pi\eta^2$, 此时像面上能获取的空间信息量为:

$$F_0 = \left(\frac{2nu}{\lambda}\right)^2 \cdot \pi\eta^2 = 4\pi \cdot \frac{J^2}{\lambda^2} \quad (3)$$

(2) 如果像面为方形, 像高 η 即为对角线之半, 则像面面积为 $2\eta^2$, 此时象面上能获取的空间信息量为:

$$F_0 = \left(\frac{2nu}{\lambda}\right)^2 \cdot 2\eta^2 = 8 \frac{J^2}{\lambda^2} \quad (4)$$

把上面两种情况统一记为:

$$F_0 = K \frac{J^2}{\lambda^2} \quad (5)$$

2. 上述的 F_0 仅是理想状态下光学系统传递的空间信息量, 为要确切地计算出光学系统实际传递的空间信息量, 还必须对 F_0 加以修正。

(1) 对于以能量集中度为主要指标的系统, 如显微镜等小像差系统, 一般来说用 S^2/S_0^2 作为质量指标去修正 F_0 值比较合适。因为能量集中度^[2]

$$\begin{aligned} E &= \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} R(s, t) R^*(s, t) ds dt \\ &= \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \text{MIF}^2(s, t) ds \cdot dt. \end{aligned} \quad (6)$$

由于我们把子午、弧矢以及不同颜色、不同视场的传函值综合考虑, 所以 MIF 曲线下的面积的平方即 S^2 , 正好代表了能量集中度, 而 S^2/S_0^2 恰好反映了实际系统能量集中度下降的程度。此时公式为

$$F = K \frac{J^2}{\lambda^2} \frac{S^2}{S_0^2} \quad (7)$$

(2) 对于以某一特征频率的对比度为主要指标的系统, 如电视镜头、投影物镜、照相物镜等, 主要是注意不同尺寸间隔的对比度的传递特性, 因而用 M^2/M_0^2 作为质量指标去修正 F_0 值比较合适。

如图 1 所示, 虽然 I 与 II 的 S^2/S_0^2 相同, 但当所要求的空间频率限制在 N_1 以内时, 系统 II 就比 I 以大的对比度传递物体的细节。虽然 I 比 II 有较大的截止频率, 但此时 II 却比 I 有较好的质量。这样修正的公式为

$$F = K \frac{J^2}{\lambda^2} \frac{M^2}{M_0^2} \quad (8)$$

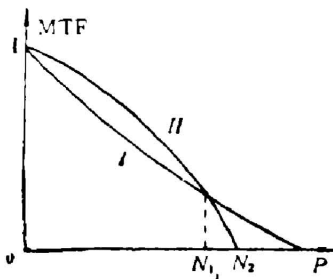


Fig. 1

使用此公式时, 主要根据目标和接收器的空间频率特性和系统的用途确定特征频率。例如, 用于摄像管的电视镜头, 可取 12 pair line/mm 作为特征频率; 而电影摄影物镜, 可用 50 pair line/mm 作为特征频率。

(3) 对于以某一对比度要求下的分辨率为主要指标的系统, 如从事天文学研究, 必须确定位置很靠近的空间两点的极限分辨率, 因而用 P^2/P_0^2 作为质量指标去修正 F_0 值比较合适。

仍如图 1 所示, 系统 I 与 II 的 S^2/S_0^2 相同, 但当要求分辨率比 N_2 大的空间频率时, 系统 II 不再满足使用要求, 而系统 I 却能提供所要求的关于细微结构的信息。因而即使 I 与 II 的 F_0 相同, S^2/S_0^2 也相同, 但其 F 值却不相同。

此时公式变为

$$F = K \frac{J^2}{\lambda^2} \frac{P^2}{P_0^2} \quad (9)$$

使用此公式时, 可根据接收器的对比灵敏度规定一个调制传递函数值(如人眼接收, 可定此值为 0.026), 而与此值相对应的空间频率, 就可作为公式中的 P 与 P_0 了。

3. 公式中所用的传递函数曲线系指复色光的传函曲线, 而且是多视场合一的。

(1) 由各单色光传函曲线合成为复色光传函曲线的方法是^[3]:

根据亮度叠加原理, 复色光的点扩散函数为:

$$I(u, v) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_\lambda I_\lambda(u, v) d\lambda / \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_\lambda d\lambda, \quad (10)$$

式中 E_λ 为权因子, 且 $E_\lambda = g(\lambda)\tau(\lambda)f(\lambda)$, 其中 $g(\lambda)$ 为光源辐射能量光谱分布, $\tau(\lambda)$ 为光学系统的分光透过率, $f(\lambda)$ 为探测器的光谱灵敏度。

因为传递函数是点扩散函数的傅里叶变换, 所以

$$D(\nu_x, \nu_y) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_\lambda \cdot D_\lambda(\nu_x, \nu_y) d\lambda / \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_\lambda d\lambda. \quad (11)$$

此式可由几种单色光传函的数值积分求出。

(2) 多视场合一的方法是把几个视场的传函值加权求和。

根据不同的使用要求, 各视场的传函值要求不同, 由此可以确定各视场的相对权因子 W_i , 然后用公式

$$\text{MTF} = \sum_{i=1}^k W_i \cdot \text{MTF}_i / \sum_{i=1}^k W_i, \quad (12)$$

近似求出合成后的 MTF 值。

对于一般照相物镜, 参照一些国家交换镜头出口检查标准, 零视场和 0.7 视场的 MTF 值分别大于或等于 0.3 和 0.15(空间频率取为 30 pair line/mm), 所以零视场和 0.7 视场的权因子可取为 2:1。

4. 畸变对光学系统总体性能(尤其测试仪器)的影响应予以修正。

由于畸变并不影响光学系统的分辨率和对比度, 所以光学系统传递的总信息量并不因存在畸变而改变。但当被测量的物像超出允许的畸变值之后, 其测量精度已不能被满足, 这部分信息就成为无用的了。因此应去掉超出畸变要求的那部分视场对应的信息量, 剩下的才是有效的信息量。对于这样的系统, 用有效信息量表示总体性能 F 值是符合实际的。

计算有效信息量的方法如下: 设 η^* 是刚好满足畸变要求的像高, 它对应的视场被称为有效视场。用 η^{**}/η^* 乘上原来计算得到的 F 值, 并注意到其中的传函值应取为有效视场的传函值, 这样的结果就是有效的空间信息量了。

另一种方法是把计算传递函数的参考点取为理想像点(主光线), 这样在其位相传递函数中就包含了畸变, 而且不改变对比函数值。当从某一视场 η^* 开始, 位相传函超出允许值后, 即去掉超差部分, 同上处理后即得到有效的 F 值。

5. 渐晕对总体性能 F 值的影响也必须予以修正。

因为渐晕就是为了保证成像质量, 在满足光能要求的前提下拦去一部分视场的边缘孔径的一部分光束, 所以导致这部分视场的孔径角小于轴上孔径角, 它的像方截止频率也小于轴上, 这样就影响了 F 值。

设某光学系统全视场的渐晕系数为 K_1 , 且它是从 w 视场开始有渐晕的(w 对应的像高为 η^{**})。可以近似认为从 w 到全视场的平均渐晕系数为 $(1+K_1)/2$ 。假设弧矢方向无渐晕。这样对原公式中的 w^2 的修正需引入 $(1+K_1)/2$ 这一因子。则 F 变为

$$F^{**} = F \left[\left(\frac{\eta^{**}}{\eta} \right)^2 + \left(\frac{\eta^2 - \eta^{**2}}{\eta^2} \right) \left(\frac{1+K_1}{2} \right) \right]. \quad (13)$$

三、物理意义

从上面推导过程看, F 值表示了光学系统传递的总信息量, 这一意义已经明确。下边再从应用光学和量子光学两个方面做进一步分析:

1. 从应用光学角度看, F 值代表了成像光学系统的“光度特性”、“成像特性”和“噪音特性”。

由像面上接收到的光通量公式

$$f = \pi \tau B \sin^2 U \cdot A. \quad (14)$$

当 U 角较小时, $\sin U \approx u$, 且面积 A 与 η^2 成正比, 所以 $f \propto J^2$; 而总体性能也正比于 J^2 , 因此光通量与总体性能成正比。

由瑞利衍射半径 $R = (0.61\lambda/n \sin U)$ 可知, U 越大, R 就越小, 分辨率就越高。由总体性能的推导过程可知, F 与 w^2 成正比, 所以对于视场确定或相近的系统, 总体性能 F 值越大, 分辨率就越高。

因为传递函数曲线同时反映了分辨率和对比度两个方面的变化情况, 所以在总体性能 F 中引入了 S^2/S_0^2 或 M^2/M_0^2 或 P^2/P_0^2 后, 就反映了实际系统的性能水平, 包括光度特性、成像特性和噪音(对比)特性。

另外, 还应强调指出, 以往所说光学系统分辨率一般是指每毫米(单位长度)内能分辨的线对数; 而我们在公式中引入了 $K \frac{J^2}{\lambda^2}$ 这一物理量, 它的意义是每平方毫米(单位面积)内能分辨的点子数与像面面积的乘积, 其中单位面积内分辨的点子数可称之为面分辨率。面分辨率的概念在图像处理以至整个信息科学领域里都是很有用的, 因为线分辨率的概念在此已不适用, 而面分辨率恰能反映图像或其他信息传递的水平。

2. 从量子光学(侧重于光子学)角度看, F_0 值恰好等于像面上容纳的光子状态数。

依据量子理论^[4], 单个光子的能量 $\varepsilon = h\nu$, 质量 $m = h\nu/c^2$, 动量 $P = \frac{h}{\lambda_0} \mathbf{n}_0$ (式中 \mathbf{n}_0 表示光子行进方向的单位矢量)。光子的行进方向有一弥散范围, 即处于同一状态内的光子沿 X 方向的位置有一不确定的范围 ΔX ; 此时光子的动量在 X 轴上的投影也相应有一不确定的范围 ΔP_x , 两者之间的测不准关系为 $\Delta P_x \cdot \Delta X = h$ 。对于 Y 、 Z 方向也有同样结果。

光学系统是传递光子流的“媒介”, 假设物面上发出的信息属于一个量子态, 由于受到光瞳限制, 它在像面上的位置应由测不准关系来确定。

设出瞳直径为 $2a'$, 则 $\Delta X = 2a'$, 所以

$$\begin{aligned} \Delta P_x \cdot \Delta X &= \frac{h}{\lambda_0} \alpha \cdot \Delta X \\ &= \frac{n'h}{\lambda} \alpha \cdot 2a' = h, \\ \therefore \alpha &= \frac{\lambda}{2n'a'}. \end{aligned}$$

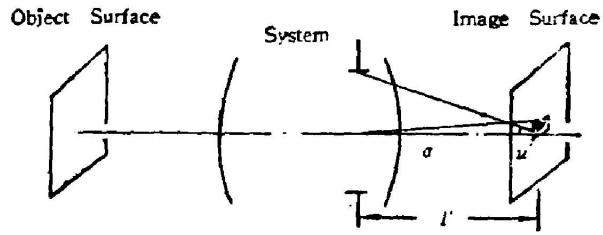


Fig. 2

在像面上一个量子态占据的面积为 $\Delta A = (l\alpha)^2 = \left(\frac{l'\lambda}{2n'a'}\right)^2 = \left(\frac{\lambda'}{2n'u'}\right)^2$ 。

在整个像面上包含的量子态数目为:

$$\begin{aligned} N &= \frac{\pi r^2}{\Delta A} = 4\pi J^2 / \lambda^2 \quad (\text{像面为圆形时}) \\ N &= \frac{2r^2}{\Delta A} = 8J^2 / \lambda^2 \quad (\text{像面为方形时}) \end{aligned}$$

这两个公式与 F_0 完全相同。

由此说明, 像面所接收到的空间信息量(理想状态下)恰好等于它所容纳的光子状态数。

再假设像面上的光子集合是由 m 个状态所组成, 且每个状态内的光子简并度(即平均光子数)为 \bar{n}_j , 则光子集合的总光子数为

$$W = \sum_{j=1}^m \bar{n}_j.$$

所以说, 总光子数将随着空间信息量的增大而增加。

另外, 在通常计算信噪比时, 常以 M_s 表示入射到感光表面的信号光子数, 则信号强度为 $S = K_s \cdot M_s$; 再用 M_b 表示其背景辐射平均光子数, 则均方根噪声可表示为 $N = K_N M_b^{\frac{1}{2}}$, 所以信噪比 $S/N = K \cdot M_s / M_b^{\frac{1}{2}}$ 。

设物体信息以一定的信噪比 S/N 传递到光学系统, 如果光学系统的 MTF 越高, 则像的对比度就越高, 表明接收到的信号光子数就越多, F 值也就越大。由此看出, 用特征频率对应的对比度之比的平方 M^2/M_0^2 去修正 F_0 是很合适的。在实际问题中, $F = K \frac{J^2}{\lambda^2} \frac{M^2}{M_0^2}$ 是最常用的。

由于 F 值代表的真正含义是像面上接收到的物像的可分点数或光子状态数, 所以它的量纲可采用“像元数”。

四、计算举例

1. 反远距型照相物镜 I

结构形式如图 3 所示。焦距: $f' = 35$; 相对孔径: $D/f' = 1/2.8$; 画幅: 24×36 ($\eta' = 21.6$); $J = 3.31$; 渐晕系数: $K_1 = 0.7$; 取 $P = 30$ pair line/mm。计算得到:

$$M_{0\omega} = 0.29, \quad M_{\tau\omega} = 0.05, \quad M = 0.21, \quad M/M_0 = 0.22。$$

$$\therefore F = K \frac{J^2}{\lambda^2} \frac{M^2}{M_0^2} \left[\left(\frac{\eta^{**}}{\eta} \right)^2 + \left(\frac{\eta^2 - \eta^{**2}}{\eta^2} \right) \left(\frac{1 + K_1}{2} \right) \right] \approx 0.11 \times 10^8 \text{ (像元数)}。$$

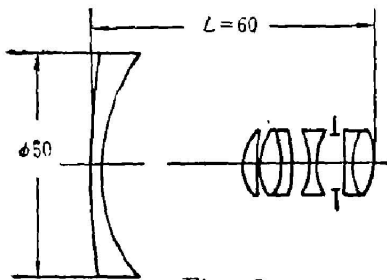


Fig. 3

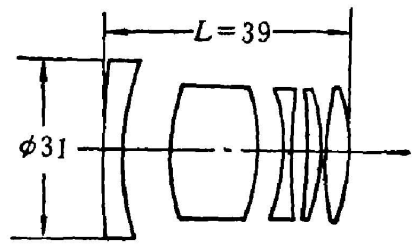


Fig. 4

2. 反远距型照相物镜 II

结构形式如图 4 所示。焦距: $f' = 36$; 相对孔径: $D/f' = 1/2.8$; 画幅: 24×36 ($\eta' = 21.6$); $J = 3.31$; 渐晕系数: $K_1 = 0.8$; 取 $P = 30$ pair line/mm。计算得到:

$$M_{0\omega} = 0.75, \quad M_{\tau\omega} = 0.30, \quad M = 0.60, \quad M/M_0 = 0.63。$$

$$\therefore F = 0.95 \times 10^8 \text{ (像元数)}。$$

3. 长焦距摄影物镜 I

结构形式如图 5 所示, 其中有三块 FK_1 , 两块 TF_3 , 一块 LaK_2 。焦距: $f' = 1500$; 相对孔径: $D/f' = 1/8$; 视场: $2\omega = 12.1^\circ$ (底片宽 320); $J = 9.9$; 渐晕系数: $K_1 = 0.9$; 取 $P = 60$ pair line/mm。计算得到:

$$M_{0\omega} = 0.52, \quad M_{\tau\omega} = 0.28, \quad M = 0.44, \quad M/M_0 = 0.60。$$

$$\therefore F = 8.02 \times 10^8 \text{ (像元数)}。$$

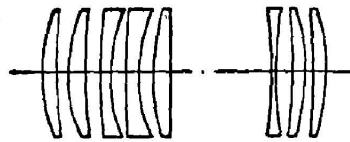


Fig. 5

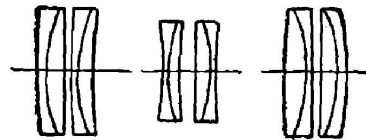


Fig. 6

4. 长焦距摄影物镜 II

结构形式如图 6 所示, 其中全部使用普通玻璃 (K_4 、 ZK_7 、 ZF_2 、 ZF_7)。设计指标及渐晕系数取得与例 3 相同。计算得到:

$$M_{0\omega} = 0.58, \quad M_{\tau\omega} = 0.50, \quad M = 0.55, \quad M/M_0 = 0.74。$$

$$\therefore F = 12.2 \times 10^8 \text{ (像元数)}。$$

若把此系统放大为:

$f' = 1700$; $D/f' = 1/7$; $2\omega = 18^\circ$ (底片宽 540)。 $J = 19.23$; 渐晕系数: $K_1 = 0.9$; 仍取 $P = 60$ pair line/mm。 计算得到: $M_{0\omega} = 0.54$; $M_{r\omega} = 0.38$; $M = 0.49$; $M/M_0 = 0.63$ 。
 $\therefore F = 33.35 \times 10^8$ (像元数)。

对以上几例简单讨论如下:

(1) 例 1 与例 2 相比, 两者的设计指标几乎全同, 由于例 2 采用了鼓形透镜等有利的结构形式, 其总体性能 F 值约为例 1 的八点五倍, 而且体积大为缩小, 轴向长度为例 1 的零点五二, 径向尺寸为例 1 的零点六。可见其重量和成本都会减小, 经济效益会大大提高。

(2) 为了便于比较, 把例 4 的原设计指标降到与例 3 相同。由于例 4 的质量好, 其总体性能 F 值为例 3 的一点五倍, 而镜头材料成本仅为例 3 的八分之一, 可望其经济效益会有较大提高。

例 4 中放大的系统即为原设计结果。由于 f' 、 D/f' 、 ω 都增大, J 值提高了近一倍, 而且质量高于例 3, 所以例 4 的原设计结果的 F 值是例 3 的四点二倍, 而镜头材料成本仅是例 3 的五分之一, 其经济效益同样会有较大提高。

(3) 从以上几例可以看出, 用 F 值评价光学系统的总体性能, 特别是把同类系统进行比较, 不但简捷明了, 使用方便, 而且符合实际, 说明问题, 又容易被人接受。同时可以预见, 把它与成本联系起来, 计算和评价光学系统的经济效益, 也是很直观和实用的。

本文是在导师王大珩和翁志成的指导下完成的, 并得到了中国科学院长春光学精密机械研究所、上海光学精密机械研究所、长春光学精密机械学院、北京工业学院、清华大学等单位许多同志的帮助, 在此一并致谢。

参 考 文 献

- [1] 王之江;《光学设计理论基础》, (科学出版社, 1965), 433。
- [2] 王之江;《光学设计理论基础》, (科学出版社, 1965), 406。
- [3] 庄松林, 钱振邦;《光学传递函数》, (机械工业出版社, 1981), 295。
- [4] 《激光物理学》编写组;《激光物理学》, (上海人民出版社, 1975), 11。

A unitary evaluation merit for the overall performance of an imaging optical system

JIANG HUILIN

(Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

(Received 3 September 1985; revised 26 October 1985)

Abstract

In this paper, the calculation formula $(F = K \frac{J^2}{\lambda^2} \cdot \frac{S}{S_0}, F = K \frac{J^2}{\lambda^2} \cdot \frac{M}{M_0}$ or $F = K \frac{J^2}{\lambda^2} \cdot \frac{P}{P_0})$ of information volume is proposed based on demonstration of the possibility in indicating the overall performance of an imaging optical system by using a special information volume. The physical meaning of the formula is pointed out, and several calculation examples are given.