

# 调制传递函数面积值和特征频率

沙定国 张炳勋  
(北京工业学院)

## 提 要

本文论述了用调制传递函数面积值(简称MTFA)评价望远系统象质的适用性;着重探讨了MTFA的简化方法,提出采用线性回归法选取特征频率;并对 $8\times 30$ 望远系统的MTF实测曲线进行了回归统计,认为特征频率可在极限频率之半的一个颇大范围内选取。文中还提出了对其它测试参数:波长、视场、方位和视度等的简化规定。

目前,在成象光学领域内对光学系统产品的象质评价,仍沿用星点检验和测定分辨率这两种相当古典的方法。光学传递函数(OTF)理论和技术的发展,为光学系统的设计与检验开拓了新的途径。OTF是优于各种传统的象质判据的一种好方法,这已被人们广泛承认。但由于它是二维复函数,还与多种参量有关,因此,要使OTF简单有效地用于象质评价,压缩测试参数、简化评价方法以及制定合理的评价指标是一个急待解决的问题。

本文试图为评价光学系统的象质提供一种简便而又可靠的定量方法。这里讨论的对象虽限于普通望远系统,并侧重于象质的检验方面,但其基本的研究方法,原则上无论对评价摄影系统,还是对光学设计中采用传递函数指标的评价均可套用。

## 一、调制传递函数面积值概述

调制传递函数面积值(MTFA)由Charman和Olin在六十年代首先提出<sup>[1]</sup>。他们作了照片判读实验,证实MTFA(当初命名为TQF,即,Threshold Quality Factor的缩写)与摄影象质的主观评价是高度线性相关的<sup>[2]</sup>。不久,MTFA就作为度量诸如摄影、电视摄像等系统象质的一种方法。

### 1. 定义

MTFA是指自零频起成象系统的象方调制度曲线与整个接收系统(包括人眼)的调制度察觉阈曲线二者所包围的面积值,如图1中的阴影部分的面积。其数学表示式为

$$MTFA = \int_0^{r_i} [C_0 \cdot MTF(r) - DT(r)] dr, \quad (1)$$

其中,  $DT(r)$  为接收系统的调制度察觉阈曲线,  $C_0$  为目标物的对比度,  $r_i$  为极限频率。

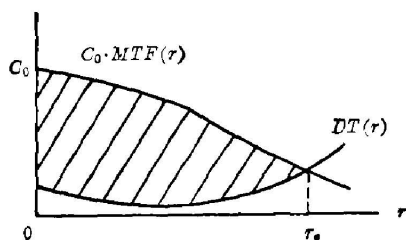


图1 MTFA的图形表示  
Fig. 1 Graphic representation  
of MTFA

## 2. MTFA 对目视系统的适用性

对目视仪器而言,其接收系统直接是人的视觉系统(它包括眼球、视网膜、视神经中枢直至大脑信息加工过程),评价其象质必须考虑视觉系统的接收性能,这里主要指人眼的调制度的频率响应特性。我们立足于中国人眼的特点,采纳中国科学院生物物理所于 1980 年公布的适用于矩形光栅目标的中国标准人眼调制度察觉阈曲线<sup>[3]</sup>,并参照 Campbell 的实验结果<sup>[4]</sup>,换算得一条适用于余弦光栅目标物、白昼视场亮度  $10^3 \text{ nit}$ 、白光的国家标准人眼调制度察觉阈曲线,如图 2 所示。在曲线的高频部分,阈值迅速升高,直至达到全调制度的某频率后开始截止,这表明人眼察觉目标细节的能力是有限度的,该截止频率约为  $55 \text{ cyc} \cdot \text{deg}^{-1}$ 。在甚低频处阈值曲线也有明显上翘现象,这表明了人眼视神经具有侧抑制的功能。而光学仪器属于低通空间滤波器,它的低频调制传递值高,高频部分传递性能会很快下降。由此可见,仪器不能传递高于象方调制度的信号,人眼无法感知低于察觉阈的刺激,只有自零频至极限频率的这两条曲线之间才是整个接收系统所能接收的信息。两条曲线的交点所对应的就是系统的极限分辨率。

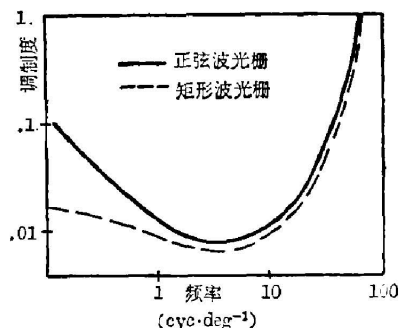


图 2 中国标准人眼察觉阈曲线  
Fig. 2 Threshold contrast sensitivity curves for Chinese typical human eye

上述 MTFA 不仅考虑了仪器本身的调制度传递性能,而且是将目标对比度和人的视觉系统主观接收性能等因素综合在一起,从信息量的角度归纳出来的一个单值指标。因此,它是一种合理的单值象质评价指标,可以用来较完善地表征目视仪器成像清晰程度的性能,即仪器分辨目标成像细节的能力。当然,MTFA 同目视仪器的主观评价是否会象前述摄影系统一样保持良好的线性相关性,还有待于实验和统计的最后证实。

## 二、特征频率

### 1. 定义

尽管 MTFA 是一种合理的单值指标,但为了获得它,需要测得完整的  $\text{MTF}(r)$  曲线再作求根与积分运算的处理,这显然并不简便。对其简化的一个办法是,从中抽取单一频率处的 MTF 值,以足够的精度表示 MTFA (或者说代表仪器的成像清晰度的性能),把具有这种特征的空间频率称之为特征频率,记作  $r_{ch}$ ,其相应的 MTF 指标记为  $\text{MTF}(r_{ch})$ 。

### 2. 选取准则

在选取  $r_{ch}$  时,我们主要采用了如下两条准则:

(1) 被测系统在该频率处的 MTF 值与其相应的 MTFA 值,两者应呈尽可能好的线性相关性。如果考虑按 95% 的置信度,MTFA 的线性回归值与其真值的相对置信区间小于 5% 的要求,应控制线性回归的剩余标准差  $s \leq 0.025\bar{y}$ , 其中,  $\bar{y}$  为 MTFA 的均值。

(2) 被测系统在该频率处的 MTF 实测值的标准差要尽可能大,才能灵敏地反映出它们的象质差异。考虑到 MTF 测定装置本身的测量精度,这个标准差值至少要大于测试精度的 2 倍,即大致为 4%。

### 3. 实例: $8 \times 30$ 望远系统

在简化对望远系统的 MTF 测试中,曾有人提出在  $5 \sim 10 \text{ cyc} \cdot \text{deg}^{-1}$  内选取特征频率<sup>[5]</sup>。我们根据上述两条准则对望远系统统计调查后得出的结论是:可供选择的特征频率在  $10 \sim 21 \text{ cyc} \cdot \text{deg}^{-1}$  范围,取极限频率之半附近为最佳。国内有人曾采用 Gauss 积分的四节点近似公式,再作简化近似后导得特征频率在极限频率之半的重要结论<sup>[6]</sup>。这里采用回归统计法证实了该结论的实用性。

以上结论是对  $8 \times 30$  望远系统抽取了 24 台产品,在 GCH-1 型 OTF 测定仪上实测了  $0 \sim 35.2 \text{ cyc} \cdot \text{deg}^{-1}$  范围内的轴上 MTF 曲线,取  $10^2 \text{ nit}$  视场亮度的中国标准人眼察觉阈曲线,算得不同目标物对比度下的 MTFA,最后在  $2 \sim 22 \text{ cyc} \cdot \text{deg}^{-1}$  的范围内作统计运算后所得。其有关的统计结果如图 3(a)、(b)、(c) 所示。统计结果表明:

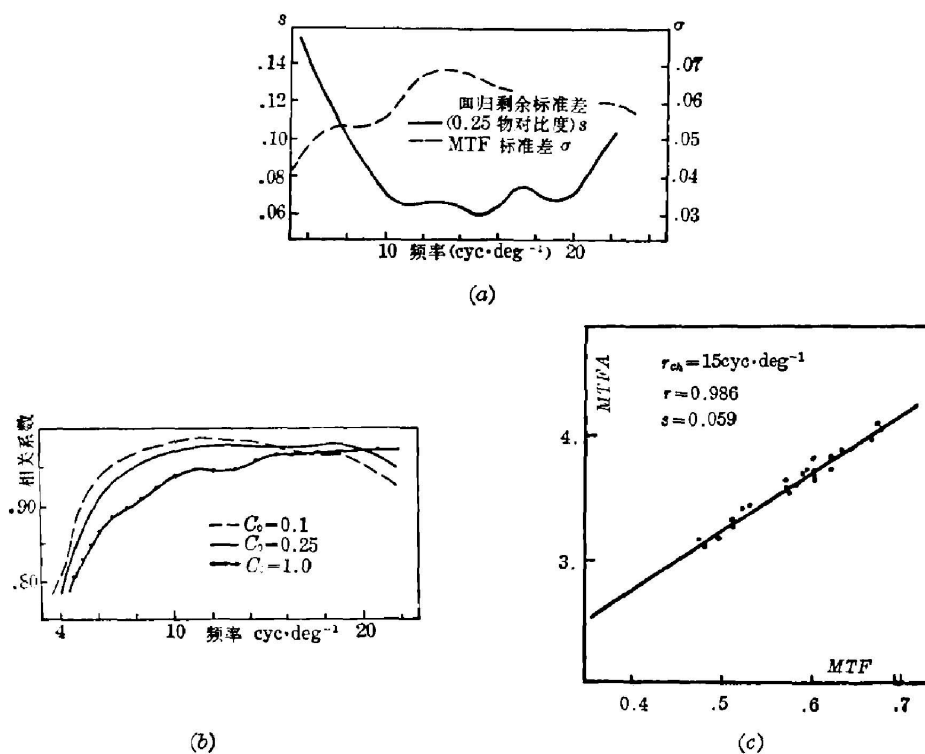


图 3

- (a) 轴上 MTF 标准差  $\sigma$  与 MTFA 回归剩余标准差  $S$  随选取空间频率变化曲线;  
 (b) 几种物方对比度下, MTF 与 MTFA 的相关系数  $\gamma$  随选取空间频率变化曲线;  
 (c)  $r_{ch}=15 \text{ cyc} \cdot \text{deg}^{-1}$  处 MTF 与 MTFA 的相关统计图

Fig. 3

- (a) standard deviations  $\sigma$  of axial MTF and regression surplus standard deviations  $S$  of axial MTFA vs. spatial frequency;  
 (b) correlation coefficients  $\gamma$  of MTF and MTFA on different object contrast vs. spatial frequency;  
 (c) correlation statistic figure of MTF and MTFA at  $r_{ch}=15 \text{ cyc} \cdot \text{deg}^{-1}$

(1) 按 95% 的置信度估计,在频率  $r_{ch}=15 \text{ cyc} \cdot \text{deg}^{-1}$  处,置信区间落在 MTFA 回归值的  $\pm 3.3\%$  内。就该 24 条曲线统计得到相对均方差为 1.6%,最大误差为 2.8%。据

Willimas 报导<sup>[5]</sup>, 当 MTFA 的差异超过 20% 时, 人眼才能明显察觉象质的差异。由此可见, 一元线性回归的精度足以令人满意。

(2) 按 95% 的置信度以及置信区间  $\pm 5\%$  的精度统计, 获得  $10 \sim 19 \text{ cyc} \cdot \text{deg}^{-1}$  的一个相当宽的特征频率范围, 说明对特征频率的选取并不苛刻。权衡选择的余地很大。考虑到测试装置对频率的实际可测范围与其精度, 一般宜偏低选取。

(3) 改变物方目标对比度, 其规律是随物方对比度的降低, 特征频率范围向低端偏移。

我们也对 0.5 视场的 MTF( $r$ ) 实测曲线作了统计, 所得的结论是, 轴外特征频率可在  $8 \text{ cyc} \cdot \text{deg}^{-1}$  以下的一个频率范围内选取, 大致以轴外极限频率 ( $14.3 \text{ cyc} \cdot \text{deg}^{-1}$ ) 之半的偏好处, 即  $5 \text{ cyc} \cdot \text{deg}^{-1}$  附近为最好。

从以上分析表明, 由于一元线性回归法是采用最小二乘的意义下获得的最佳一元线性近似公式, 因此它必然比其它诸如 Gauss 单项近似公式的精度高。尤其是它可供选择的特征频率范围宽的特点, 为今后统一不同类型望远系统的特征频率及其评价指标, 提供了很大的可能性。即使在采用不同特征频率进行象质评价时, 也可以根据统计所得的一组回归直线, 方便地查得 MTFA 或者统一的 MTF( $r_{ch}$ ), 再加比较。

原则上, 对于摄影系统等, 则可采用二元线性回归方法, 同时选用两个特征频率, 统计得出 MTFA 的近似公式及其一对最佳特征频率。

### 三、其它测试参数的简化

对光学系统进行 MTF 测量时, 除要变更空间频率之外, 还要规定其它一些测量参数, 如波长、视场、方位和调焦状态等。因此, 对一台仪器的测量, 往往不是只测少数曲线, 而是需测的曲线数目相当可观, 从而又带来了数据处理的复杂性。这正是造成至今 MTF 方法未能在许多光学工厂获得广泛应用的重要原因之一。为使 MTF 测试量减至最小限度, 除了上述采用简化的特征频率之外, 还应考虑对上述参数的简化。

在对  $8 \times 30$  望远系统作了大量测试和分析的基础上, 我们认为可提出如表 1 所示的简化测试规范。

表 1 简化 MTF 测试规范  
Table 1 Simplified MTF measuring specification

目 标 距 离	无 穷 远	
空 间 频 率	0 视 场	$14 \text{ cyc} \cdot \text{deg}^{-1}$ 或其附近
	半 视 场	$5 \text{ cyc} \cdot \text{deg}^{-1}$ 或其附近
波 长	校正白光 (2859 K, 卤钨灯)	
视 场 与 方 位	0 视 场 半 视 场	水平与垂直方位取低者 子午方位
视 度	最 佳 状 态	

表中空间频率是按选取特征频率的准则确定的, 视度的最佳状态是指规定波长、视场与方位下调节视度至特征频率处 MTF 值为最高, 校正白光是指光电接收器件要配上适当的

校正滤光片,使其在标准的白光光源下与人眼的光谱响应特性相匹配。关于方位问题,最好作全方位扫描取最低值。

## 四、结 论

除上述 MTF<sub>A</sub> 的适用性以及回归选取特征频率的优点之外,我们认为采用这种评价方法还有如下一些特点:

(1) MTF<sub>A</sub> 与接收器的性能有关,但又不交织在一起,这正是比用 MTF 加权积分等方法的优越之处。

(2) 它可使测试与设计有了共同的评价语言。虽然目前尚未见到将 MTF<sub>A</sub> 用于光学设计阶段,其原因可能是光学设计工作者还不甚习惯这种评价方法,或是还难以选取合适的接收器察觉阈曲线。我们相信,随着合理选择特征频率问题的解决,将为测试与设计的关联开辟方便的途径。

(3) MTF<sub>A</sub> 表征了成象系统的实际性能,也可采用它与理想 MTF<sub>A</sub> 的比值,称之为相对 MTF<sub>A</sub>,作为衡量成象系统的相对性能,它反映设计与工艺尚存在着象差的多寡,乃至影响象质的程度。光学工厂和科研部门可采用相对 MTF<sub>A</sub> 来确定产品的设计水平和质量。

(4) 采用特征频率处的调制传递因子作为评价指标,便于工厂对产品实行快速、定量的检验。

当然,MTF<sub>A</sub> 评价光学系统质量的方法并不是完美无缺的,对于光学系统尚存在较严重的非对称象差的情形,除了 MTF<sub>A</sub> 指标之外,尚需添加位相传递函数(PTF)或畸变指标。但是,对 8×30 等普通望远系统的 PTF 曲线实测与调查分析,我们认为,PTF 可以忽略不计。因此,对普通望远系统而言,除通光性能与色度性能外,MTF<sub>A</sub> 或 MTF( $r_{ch}$ )便是一种较完善的评价指标。

## 参 考 文 献

- [1] W. N. Charman, A. Olin: *Photo. Sci. Engng*, 1965, **9**, No. 6 (Nov-Dec), 385.
- [2] H. L. Snyder; *«Perception of Displayed Information»*, (Plenum press New York, 1973), Chap. 3, 103.
- [3] 邓述移等; *«兵工学报»*, 1982, No. 2, 27.
- [4] F. W. Campbell, J. G. Robson; *J. Physiol.*, 1968, **197**, No. 3 (Aug), 551.
- [5] T. L. Willimas; *«Lionel B. Baker Ed.; Quality Assurance in Optical and Electro-Optical Engineering (Proc. SPIE, Vol. 73)»*, (SPIE Seminar Procs., 1975), 112.
- [6] Zhang Big-xun, Cao Gen-rui: *«Assessment of Image Systems: Visible and Infrared (Proc. SPIE, Vol. 274)»*, (SPIE Seminar Procs., 1981), 66.

## MTFA and characteristics frequency

SHA DINGGUO AND ZHANG BINGXUN

*(Beijing Institute of Technology)*

(Received 11 May 1982)

### Abstract

The feasibility of MTFA (modulation transfer function area) for assessing imaging quality of visual telescopic systems is described. A method for simplifying the MTFA has been discussed briefly. The way for characteristics frequency selection by using linear regression analysis is presented. Through the MTF measurements of several  $8 \times 30$  telescopic systems the regression statistics have been obtained from the measured curves. We found that the characteristics spatial frequency may be chosen in a wider range. The optimum frequency is close to the half limit frequency. A simplifying scheme for the parameters used in MTF measurement, i. e. wavelength, field angle, azimuth and dioptric, is also presented.