

光学系统价值工程综合评判及公差确定

吴梦初

摘 要

本文从价值工程原理和模糊论方法出发,首次提出对成象光学系统进行价值工程综合评判,详细分析了影响光学系统的各种因素,基本建立了综合评判的数学模型,并提出了一种基于综合评判的确定透镜中心偏公差和配合公差的新方法。

【关键词】 成象光学系统; 价值工程; 模糊综合评判; 公差; 正交试验

1 前 言

在光学系统的设计和加工生产过程中,结构参数公差是一个非常重要而又非常活跃的因素,它对光学系统的象质、加工生产成本,加工工艺性以及光学技术参数和产品质量的稳定性等都有直接影响,更进一步,以产品角度看,结构参数公差与设计者、生产者和产品使用者(即用户)都有关系,因此,合理确定参数公差是一个非常关键而又实际的问题。目前我国光学仪器生产企业的典型做法是,在完成光学设计计算以后,凭一般经验,从有关设计手册直接选定公差值。这样既不太严密也不科学,往往造成公差偏严或偏松(即所选定的公差值并非保证某些技术经济指标所必需的)^[1]。究其原因,主要是没有考虑具体的光学系统的特点,借用一般经验确定公差值;其次,忽略了一个光学系统的整体效应,往往从单因素出发制定公差标准;另外,光学系统从设计到产品全过程中,各个环节的评价单独进行,没有统一的基准,且对同一个指标在不同阶段可能有不同的评价方法和标准,如小象差系统以瑞利判据为象质评价指标,而在产品象质检验时却不能直接应用这个评价指标,这种现象经常碰到;最后,应特别指出的是,没有充分考虑各种因素客观存在的模糊性以及人类思维判断的模糊特点。本文正是针对这些问题和不足,试图从价值工程原理和模糊论方法出发,对成象光学系统进行价值工程综合评判,并在此基础上提出了一种新的确定透镜冷加工中心偏公差和透镜口径配合公差的方法。

收稿日期:1991-08-21

* 本文为硕士论文的一部分,指导教师为沈邦兴副教授,何对燕讲师。

2 光学系统价值工程综合评判

2.1 基本原理

价值工程作为一种技术经济方法，在光学仪器生产行业早有应用的例子^[2]。其基本原理可由式（1）表示。

$$V(\text{价值}) = \frac{F(\text{功能})}{C(\text{成本})} \quad (1)$$

它反映了对对象的技术经济匹配关系。价值工程的理论、方法和步骤可见参考文献^[3]。

模糊综合评判是指对多种因素所影响的事物或现象进行总的评价，得出定量评价结果，详细的论述可参考文献^[4]。其突出特点是能消除数量级和量纲的影响，从而能在不同因素指标之间进行比较并做出定量评价。鉴于价值工程在实际运用中，式（1）中的功能F和成本C往往难以定量表示，因此，把价值工程和模糊综合评判结合起来，用来对光学系统进行分析 and 评价。

2.2 光学系统综合评判层次模型及特征因素评价

把光学系统象质，光学系统加工成本（主要指光学加工成本和材料成本），加工工艺性以及光学技术性能提取为影响光学系统的四类特征因素，并构造图1所示的层次模型。

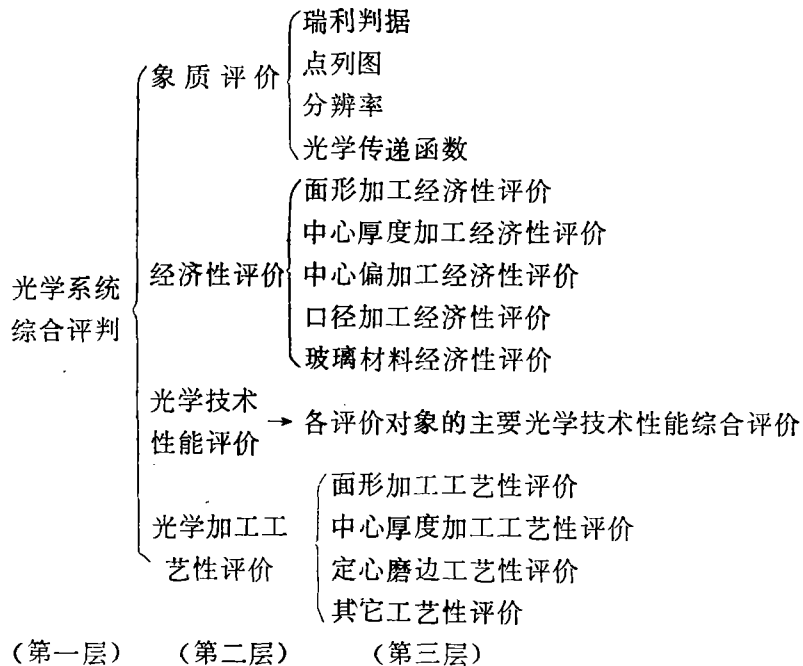


图1 综合评判层次模型

该层次模型涉及到光学系统的主要因素的评价，是一个多层次评判模型。

对四类特征因素的评价，这里只能简单介绍。象质综合评价的基本思路是：第一，将目前最常用的三种象质评价指标（瑞利准则，点列图和分辨率）等效视为影响象质的三个因

素，即认为三者各自从不同侧面反映某一具体光学系统的实际象质，通过综合评价这三个因素指标来全面衡量光学系统象质；第二，鉴于目前光学传递函数具体应用中存在的问题，即还未找到一个能比较全面地反映光学系统空间频率传递特性的评价指标，为了充分利用传递函数的先进性和它反映的丰富信息，首先把传函分解成几个具体评价指标，如极限频率，能量集中度，特征频率下的对比度和指定对比度下的特征频率等，然后，综合这些指标来反映传递函数并用来评价光学系统象质。基于以上思路的光学系统象质综合评价的意义和方法在^[5]中有较详细阐述。

经济性评价，首先经过统计分析确定公差与加工生产成本的函数模型，由加工成本构成评价函数参与综合评价。光学加工工艺性评价则直接以参数公差构成评价函数并参与系统综合评价，这与由参数公差编制工艺流程是相对应的。光学技术特征指标一般能以定量方式表示（如光学系统放大倍率），可针对具体系统选择几个主要参数参与综合评价。

2.3 综合评价中的因素分析

把对光学系统设计或生产中产生直接的或较大影响的因素称为综合评判的直接因素，如参数及其公差。将与直接因素有某种联系且对光学系统设计或生产过程产生较小影响的因素称为关联因素。直接因素构成综合评判的因素集，关联因素指标用于修正与之相关的直接因素在综合评判时的权重系数，这样，所有因素的作用都得到体现，主次关系分明，评判结果更全面准确。

直接因素和关联因素分列于图 2 和图 3。

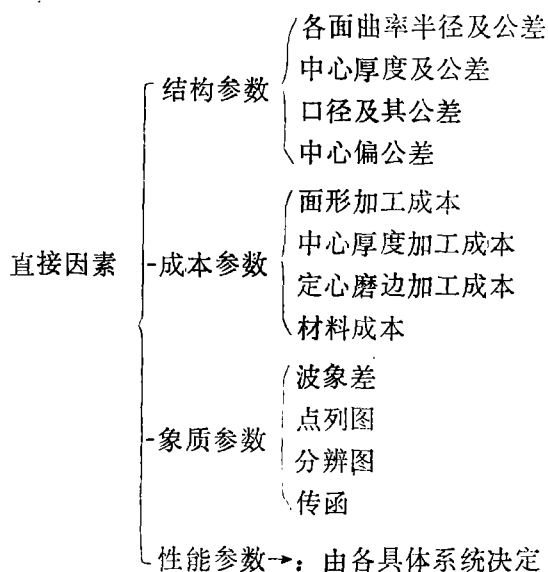


图 2 直接因素分类

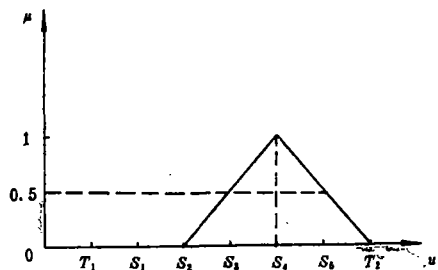
关联因素

- 面相对口径 R/D
- 口径厚度比 D/d
- 机械定心磨边的定心系数
- 表面疵病等级
- 透镜成盘加工能力
- 玻璃材料级别
- 参数标准化与系列化
- 模具及对样板的继承性
- 零件重复使用率
- 其它

图3 关联因素

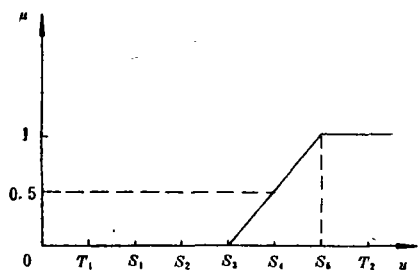
2.4 评价函数

评价函数用于描述因素指标对光学系统整体评判的影响，也称为隶属度函数。为了构造隶属函数，引入统计向量 S 。设某类因素取值范围为 $[T_{i0}, T_{i1}]$ ，当因素指标取值为 S_k ，若能使评判对象对备择元素 V_k 的隶属度（单因素评价）为 1，则称 S_k 为该类因素关于 V_k 的统计值。若备择集记为 $V = (v_1, v_2, v_3, v_4, v_5)$ ，而统计向量可记为 $S = (s_1, s_2, s_3, s_4, s_5)$ 。统计值可在生产力水平相当的生产行业中进行调查后进行数据统计确定。



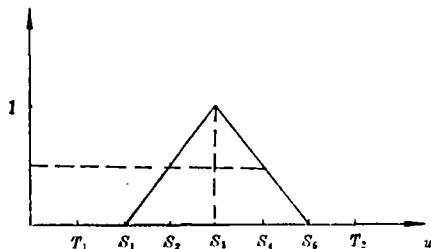
对于 v_1 :

$$\mu_1 = \begin{cases} 0 & u \leq s_3 \\ \frac{u - s_3}{s_5 - s_3} & s_3 < u < s_5 \\ 1 & u \geq s_5 \end{cases}$$



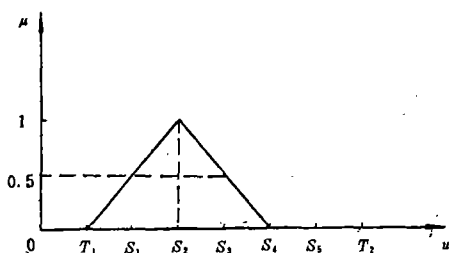
对于 v_2 :

$$\mu_2 = \begin{cases} 0 & u \leq s_2 \text{ 或 } u \geq T_2 \\ \frac{u - s_2}{s_4 - s_2} & s_2 \leq u \leq s_4 \\ 1 - \frac{u - s_4}{2(T_2 - s_4)} & s_4 < u < T_2 \end{cases}$$



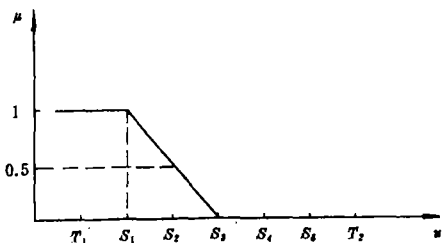
对于 v_3 :

$$\mu_3 = \begin{cases} 0 & u \leq s_1 \text{ 或 } u \geq s_5 \\ \frac{u - s_1}{s_3 - s_1} & s_1 < u < s_3 \\ 1 - \frac{u - s_1}{s_5 - s_1} & s_3 < u < s_5 \end{cases}$$



对于 ν_4 :

$$\mu_4 = \begin{cases} 0 & u \geq s_4 \text{ 或 } u \leq T_1 \\ \frac{u - s_1}{2(s_2 - s_1)} + 0.5 & T_1 < u < s_2 \\ 1 - \frac{u - s_2}{s_4 - s_2} & s_2 < u < s_4 \end{cases}$$



对于 ν_5 :

$$\mu_5 = \begin{cases} 0 & u \geq s_3 \\ \frac{s_3 - u}{s_3 - s_1} & s_1 \leq u \leq s_3 \\ 1 & u \leq s_1 \end{cases}$$

图 4 隶属函数及分布曲线

本文参考文献[6, 7, 8]的应用经验,构造了图4中对应的隶属度函数。

注意,以上各图中横坐标并不一定是等间隔分布,而且,一般情况下, s_1 和 s_5 可分别取为 T_1 和 T_2 。有了评价函数,即可按照图1所示的层次模型由低层次向高层次依次评价。

3 综合评判中的权重向量

同类因素指标(最低层)的权重可由指标取值决定。不同性质因素之间的权重分配也有多种成熟方法,如层次分析法^[9]和模糊层次分析法^[10],这里不作详细介绍。

对同类因素指标而言,其关联因素对它们的影响程度是不同的,如就中心厚度公差而言,其加工难易程度并不完全取决于厚度公差,而与口径厚度比也有关系。对指标权重的修正,就是要反映关联因素指标之间的差别,从而使评价更全面和准确。系联因素指标之间相互比较,确定一个修正向量,再去修正直接因素指标权向量。

4 评判指标处理与价值分析

对光学系统进行综合评判,最后得到的模糊向量称为评判指标,记为 $B = (b_1 \ b_2 \ b_3 \ b_4 \ b_5)$ 。直接由向量 B 不太容易做出评价结论,而且也不便于分析问题。为此,首先对向量 B 进行二次加权处理,即引入等级权向量 P ,则评判指标的二次加权值记为 BP ,则:

$$BP = \sum_{i=1}^5 b_i p_i \quad (2)$$

记经济性综合评判二次加权值为 BP_1 ,光学系统象质,光学系统技术性能及系统综合评判二次加权值分别为 BP_2 、 BP_3 和 BP_4 ,则定义以下三个价值函数:

$$V_{IM} = \frac{\text{象质}}{\text{成本}} = \frac{BP_2}{BP_1} \quad (3)$$

$$V_{TE} = \frac{\text{性能}}{\text{成本}} = \frac{BP_3}{BP_1} \quad (4)$$

$$V_{SS} = \frac{\text{系统综合}}{\text{成本}} = \frac{BP_4}{BP_1} \quad (5)$$

根据价值工程分析方法，由（3）、（4）、（5）求得的价值函数值，可以分析分子与分母的匹配合理性，并能分析出应该调整的因素及因素指标调整的幅度。

5 正交试验与公差确定

正交试验设计是一种优化设计方法，可用来模拟和分析图 5 所示的光学系统^[11]的偏心分布以及偏心对系统的象质，加工成本及工艺性等的影响，在其它因素不变的情况下，综合评判各种模拟条件下的偏心引起的象质变化、加工成本变化及工艺性变化，并根据价值函数值挑选公差值。

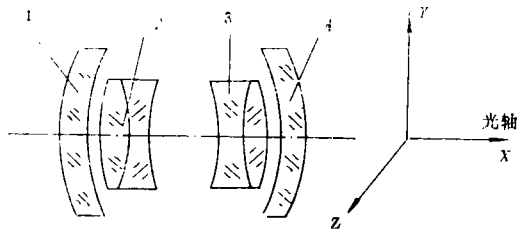


图 5 光学系统示意图

5.1 实验因素与因素水平

在图 5 所示坐标系下，考虑沿 Y 轴和 Z 轴的平移 ΔY 和 ΔZ 以及绕 Y 轴和 Z 轴的旋转 θ_Y 和 θ_Z ，另外，把可能发生中心偏的透镜序号也作为一个实验因素，因此，选取 5 个因素参与正交试验设计。

因素水平的确定对正交实验设计结果有直接影响，水平值的确定涉及到许多具体问题的分析，在此不做具体阐述。以下给出一组五因素四水平的水平值（负号表示偏心方向）：

θ_Y :	-0.04°	0.082°	0.162°	-0.065°
θ_Z :	-0.082°	0.065°	-0.162°	0.04°
ΔY :	0.041	-0.064	0.087	-0.101
ΔZ :	-0.067	0.041	-0.101	0.061
序号:	1	2	3	4

5.2 正交实验与公差确定

选用正交表 $L_{16}(4^5)$ ，并把各因素水平对应地填入正交表得表 1。

表 1 正交实验

实验因素 实验条件	θ_y	θ_z	$\Delta y(\text{mm})$	$\Delta z(\text{mm})$	序 号
1	0.04°	-0.082°	0.04	-0.08	1
2	0.04°	0.065°	-0.06	0.04	2
3	0.04°	-0.162°	0.08	-0.10	3
4	0.04°	0.04°	-0.10	0.06	4
5	-0.082°	-0.082°	-0.06	-0.10	4
6	-0.082°	0.065°	0.04	0.06	3
7	-0.082°	-0.162°	0.08	-0.08	2
8	-0.082°	0.04°	-0.10	0.04	1
9	0.162°	-0.082°	0.08	0.06	2
10	0.162°	0.065°	-0.10	-0.10	1
11	0.162°	-0.162°	0.04	0.04	4
12	0.162°	0.04°	-0.06	-0.08	3
13	-0.065°	-0.082°	-0.10	0.04	3
14	-0.065°	0.065°	0.08	-0.08	4
15	-0.065°	-0.162°	-0.06	0.06	1
16	-0.065°	0.04°	0.04	-0.10	2

按表 1 实验条件每次求出光学系统的弥散斑半径（三视场）并做综合评判，求出价值函数如表 2 所示。

根据价值工程原理，只要从表 2 中的 V_{SS} 中找出与价值函数理想值 1 最接近者，其对应的实验条件即为最佳实验条件（编号 13），进行一定变换以后，确定图 5 所示系统中的各透镜冷加工偏心公差为：

$$C_1 = 0.02\text{mm}, \quad C_2 = 0.01\text{mm}, \quad C_3 = 0.008\text{mm}, \quad C_4 = 0.009\text{mm}, \quad C_5 = 0.01\text{mm}, \\ C_6 = 0.03\text{mm}.$$

外径配合公差代号为 $H7/h6$ 。他们都在光学手册所提供的参考值范围内。

另一方面，如果只从象质评价最优单因素出发，则只需考察 V_{1M} ，类似地可以确定此时的偏心公差为：

$$C_1' = 0.01\text{mm}, \quad C_2' = 0.008\text{mm}, \quad C_3' = 0.005\text{mm}, \quad C_4' = 0.006\text{mm},$$

表 2 弥散半径和价值评价

实验序号	弥 散 斑 半 径			价 值 评 价		
	0 视场	0.707视场	1 视场	V_{IM}	V_{TB}	V_{SS}
1	0.28714	0.27127	0.33426	0.9982	0.9593	0.9486
2	0.28708	0.27043	0.33063	1.0006	0.9593	0.9493
3	0.28718	0.27279	0.32962	0.9301	0.8943	0.9034
4	0.28734	0.27055	0.33161	0.9528	0.9142	0.9178
5	0.28734	0.27023	0.33224	0.9407	0.9023	0.9219
6	0.28709	0.27089	0.33338	0.9908	0.9514	0.9512
7	0.28709	0.26709	0.33260	0.9213	0.8829	0.9084
8	0.28716	0.27029	0.33371	0.9997	0.9593	0.9491
9	0.28708	0.27124	0.33693	0.9382	0.9023	0.9212
10	0.28732	0.27279	0.33813	0.9048	0.8726	0.8947
11	0.28742	0.27176	0.33396	0.9973	0.9593	0.9484
12	0.28713	0.27041	0.33479	0.9526	0.9142	0.9178
13	0.28712	0.26938	0.33335	0.9928	0.9514	0.9517
14	0.28728	0.26978	0.33291	0.9255	0.8874	0.9066
15	0.28723	0.26074	0.33526	0.9440	0.9070	0.9199
16	0.28705	0.26965	0.33414	1.0005	0.9593	0.9493

$C_5' = 0.008\text{mm}$, $C_6' = 0.02\text{mm}$ 。

配合代号H7/h6。

5.3 简单说明

以上分析和实例所得到的公差表明,对光学系统进行价值工程综合评判并据此确定参数公差值是可行的。两组公差数据表明,从光学系统总体评价出发可以放宽单从象质出发对公差的要求,这不仅说明了该方法的科学性,避免了盲目性,也使所确定的公差更切合实际。但是,由于首次提出光学系统价值工程综合评判,不免存在欠缺之外,如评价函数的确定,机械结构对光学系统的影响等等,都有待进一步研究,使该方法日臻完善。

参 考 文 献

[1] 姜会林. 光学系统设计经济效益问题. 长春光学精密机械研究所博士学位论文,

1986

- [2] 吴 澄. JWS×40望远镜价值工程. 云光技术, No. 2, 1983.
- [3] 胡树华. 价值工程. 武汉地质学院出版社, 1984.
- [4] 王彩华, 宋连天. 模糊论方法学. 北京: 中国建筑工业出版社, 1988.
- [5] 阎 骏. 水体质量评价与富营养化评价中的模糊数学方法. 系统工程理论与实践, No. 4, 1990.
- [6] 徐晓东等. Fuzzy数学在化纤工艺综合评价中的应用. 模糊数学, No. 1, 1983.
- [7] 谢华平. 物元分析在产品评价中的应用. 系统工程理论与实践, No. 1, 1990.
- [8] 赵焕臣等. 层次分析法. 科学出版社, 1986.
- [9] 姚 敏. 一种实用的模糊层次分析法. 软科学, No. 1, 1990.
- [10] 张以模. 应用光学(下册). 北京机械工业出版社, 1982.

Optical System Value Engineering Multifactorial Evaluation and Tolerance Determination

Wu Mengchu

Abstract

This paper first discusses value engineering multifactorial evaluation to optical system based on Value Engineering and Fuzzy Mathematics Method. Many kinds of factors are analyzed, and an evaluation model is set up in this paper. Further more, a method to determine tolerance of bias centre of a lens is explained at the end of this paper.

[Key words] optical image system; value engineering; fuzzy multifactorial evaluation; tolerance; crossexperimentation