

最低成本的光学公差优化法探讨

唐九华 于维洲

(中国科学院长春光学精密机械研究所)

提 要

本文提出的光学公差优化模型可迅速地计算出结果,而不必象通常那样进行反复调整试算。目标函数是光学系统的最低制造成本。从零件加工成本与公差关系的现有统计数据拟合得到普遍表达式用于本模型。约束条件是表征像质的MTF和畸变。最后给出例子,含两个变量,用网格法解优化值。

一、引 言

批量生产的光学仪器,其光学系统各结构参数的公差分配既要保证系统性能达到指定的水平,又要使总的加工装调成本最低,光学仪器的精度设计,既要保证仪器的总精度(或总误差),又要使各组成环节的误差(制造公差)分配合理,即总的加工装调成本最低。这是两个性质相同的问题。

美国光学界制订公差的典型做法是^[1]:先对需给公差的各结构参数算出其变化对光学系统性能影响的灵敏度,再据以编制公差预算表(Tolerance budget),通过反复重新分配公差和试算,以达到既满足系统性能要求又在生产成本方面合理。

到本世纪七十年代末期,上述依靠设计人员的经验调整试算的办法,已由Optical Research Associates编成自动计算程序^[2]:(1)指定在某频率上的MTF值作为目标。(2)公差的界限为:下限是加工的精度极限,上限是超过此值则加工成本不再明显节省。(3)指明那些在装配时可以调整的结构尺寸。这些程序可给出各结构参数的公差,如半径、厚度、折射率、偏心、面形等。同时可给出光学系统装配成品的MTF值分布概率。该程序在计算MTF值随结构尺寸而变化时,采用将名义尺寸的光学系统的MTF表达式展开成Taylor级数并取用至二次项。

国内近年来也开始研究此类问题。如文献[3]中提出的数学模型是:以仪器的总误差作为目标函数,以各环节的公差为设计变量,并以其公差极限(技术公差、生产公差和经济公差三档)作为约束条件。当优化算出的总误差与仪器的允许总误差有显著差别时,则按各环节加工的难易次序调整公差档次,多次循环后达到合理分配。这思路与国外的基本相同。

二、加工公差与工时(成本)的关系

批量生产的仪器或光学系统的性能要求本来是由使用价值考虑确定的,并不必通过优化改变得更好或更差。在上述的优化法中,都把性能作为目标函数,显然不是最终目标,而

是过渡性目标, 只是为每个循环而设立的。优化的最终目标应是满足性能条件下的最低生产成本。本文认为其所以尚未直接地把最低成本作为优化模型的目标函数, 是由于缺少一批已知条件, 即加工成本与公差允许值的关系。

关于光学加工成本与公差的关系, 前人已有一些统计。Plummer^[3] 给出各种典型加工条件和公差允许值对零件加工成本影响的数据。我们对此分析认为, 零件的某项加工成本 F_i 大致可分为两部分: 一是毛坯制造和粗加工成本, 它是相对不变的, 以 c_i 表示; 另一是精加工成本, 它随公差 x_i 的大小作相反的变化, 当公差紧缩到可能的极限时, 加工工时急剧上升, 而公差放宽到某一程度后, 加工工时不再明显节省, 故考虑此关系不是线性的, 以 $a_i x_i^{-b_i}$ 表示。按这样假设的成本表示式

$$F_i = a_i \Delta x_i^{-b_i} + c_i,$$

对照 Plummer 的统计数据, 发现符合的程度很好, 见表 1。此形式适用于外径、厚度、偏心、和面形误差等加工方式各不相同的情况, 说明用它表达加工成本与难度之间的定量关系具有普遍性。同时它又十分简洁, 便于优化计算之用。

Table 1 Expressions relating cost to tolerance., compared with Plummer's data.
(base cost: 100)

X diameter tolerance (mm)	±0.1	±0.05	±0.025	±0.0125	±0.0075	
Plummer's cost data	100	100	103	115	150	
$F = \frac{1}{1600} X^{-2.8} + 100$	100	101	103	115	148	
X center thickness tolerance (mm)	±0.2	±0.1	±0.05	±0.025	±0.0125	
Plummer's cost data	100	105	115	150	300	
$F = \frac{1}{17} X^{-1.35} + 100$	101	104	115	154	295	
X eccentricity tolerance in light deviation (min)	6	3	2	1	0.5	0.25
Plummer's cost data	100	103	108	115	140	200
$F = 15X^{-1.4} + 100$	101	103	106	115	140	205
X* figure tolerance in λ . ($X=N$ and ΔN)	10-5	5-2	3-1	2-1/2	2-1/4	1-1/8
Plummer's cost data	100	105	120	140	175	300
$F = 200(N)^{-2} + 98$	100	106	120	148		298
$F = 25(\Delta N)^{-1} + 95$	100	108	120	145	195	295

* Two expressions with X represent N and ΔN , respectively. The figure $N=2$ in the fifth column showing irregular increments between neighboring figures results in a statistical cost value of 175, smaller than that calculated from smooth ΔN 's.

三、数学模型

本文提出的数学模型是:

目标函数:

$$\phi = \min \sum F_i,$$

$$F_i = a_i \Delta x_i^{-b_i} + c_i, \quad i = 1, 2, \dots, n_0$$

约束条件:

- (1) $M_j(x) \geq m_j, \quad j=1, 2, \dots, J;$
 (2) $|DT_k(x)| \leq |dt_k|, \quad k=1, 2, \dots, K.$

设计变量为:

$$\Delta x = (\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_n).$$

约束条件(1)中的对比传递函数 m_j , 是由使用要求对光学系统像质提出的设计指标, j 代表不同的频率、视场、方位等情况; $M_j(x)$ 是与之相应的含结构参数公差的光学系统计算所得的对比传递函数值。约束条件(2)中的 $|dt_k|$ 和 $|DT_k(x)|$ 则分别是畸变的设计指标和计算值。

在优化过程中, 为验证是否满足约束条件, 需要反复多次计算传递函数, 计算量很大。但考虑到光学系统的加工公差实际上只在一个较小的范围内变化, 因此可以把函数 $M_j(x)$ 在结构参数的名义尺寸 $x_0 = (x_{10}, x_{20}, \dots, x_{N0})$ 的附近, 展开成级数。为节省计算量和提高优化速度。本文暂且只取零次项和一次项, 得到近似公式:

$$M_j(x) = M_j(x_0) + \sum_{i=1}^N \frac{\partial M_j}{\partial x_i} (x_i - x_{i0}) \quad j=1, 2, \dots, J.$$

公式中 $M_j(x_0)$ 是采用光学方法计算得到的在结构参数为名义尺寸时的传递函数值。

四、解法和例子

对于上述数学模型, 我们采用网格法求解。首先假设可变结构参数 $x = (x_1, x_2, \dots, x_N)$ 中各个变量 x_1, x_2, \dots, x_N 的变化范围为: $\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_N$ 。再将其各细分成若干等份, 并在各节点上计算评价函数和像质约束指标的值, 从中选取既能使评价函数取较小的值, 又满足像质约束条件的区域。在此区域内, 将网格进一步细分再计算, 使优化值逼近其极限。这个循环过程的结束点的判别, 可由工艺上通常使用公差数据的有效位数来确定。然后再推算出使评价函数取极小值时的公差范围。

我们以一个天塞透镜^[2]为例, 计算中只考虑第一片透镜的面形和中心厚度公差。

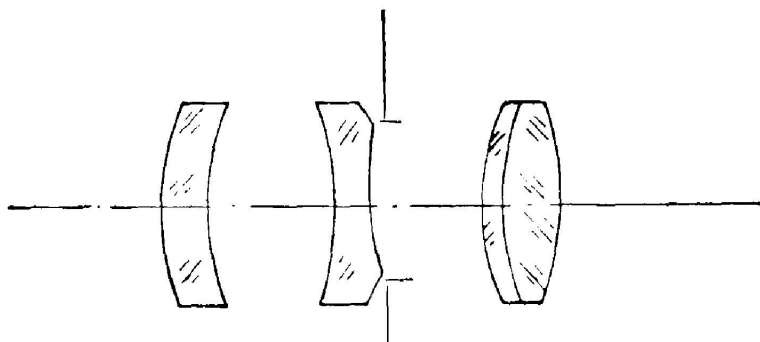


Fig. 1 Tessar lens

设评价函数中的系数为:

面形	$a_1 = 200,$	$b_1 = 2,$	$c_1 = 98.$
中心厚度	$a_2 = \frac{1}{17},$	$b_2 = 1.85,$	$c_2 = 100.$

则名义尺寸时的像质数据和优化计算结果见表 2 (在本例中, 给出的面形公差与厚度公差宜同号, 且当两者均为负时像质最佳)。

Table 2 Image quality data for nominal dimensions and results of optimization

step of optimization	cycle No.	MTF				
		0 field of view	0.707 field of view		1.0 field of view	
			meridional	sagittal	meridional	sagittal
image quality data for nominal dimensions	—	0.45	0.84	0.17	0.73	0.12
results of optimization	1	0.43	0.85	0.15	0.76	0.10
	2	0.43	0.85	0.14	0.76	0.10
	3	0.43	0.85	0.14	0.76	0.10
	4	0.43	0.85	0.14	0.76	0.10

step of optimization	cycle No.	distortion		ΔX_1 figure tolerance (N)	ΔX_2 center thickness tolerance (mm)	cost ΣF_i
		0.707 field of view	1.0 field of view			
		image quality data for nominal dimensions	—	0.00125	0.00271	—
results of optimization	1	0.00127	0.00275	4.86	0.10	210.63
	2	0.00127	0.00275	5.15	0.10	209.70
	3	0.00127	0.00275	5.18	0.10	209.62
	4	0.00127	0.00275	5.19	0.10	209.59

四、讨 论

本文的目的只是企图说明建立一个简洁的最低成本光学公差(或仪器精度分配)优化数学模型是可行的。我们期望它不但可以便于理解和使用, 可以缩短计算时间, 而且由于采用了成本与公差关系的连续函数表达式能更精确地达到目标。文中已提到有一批因素是前人的程序中已包含的, 这里不一一引入。在将来编制一个实用的设计程序时是要逐步考虑进去的, 如:

- (1) 装配时的调整环节(如空气间隔等), 对其它结构参数公差的影响;
- (2) 装配成品的 MTF 分布概率。

成本表示式中系数 a 、 b 、 c 将随不同的零件尺寸、不同的批量和不同的光学加工车间而异, 它们的统计确定是成本计算的基础工作。

姜会林同志参加了本工作初步方案的讨论, 谨致谢意。

参 考 文 献

- [1] R. H. Ginsberg; *Proc. SPIE*, 1979, **181**, 2.
- [2] W. J. Smith; *Proc. SPIE*, 1979, **181**, 154.
- [3] 王尔琪;《仪器仪表学报》, 1985, **6**, No. 1 (Feb), 23.
- [4] J. L. Plummer; *Proc. SPIE*, 1979, **181**, 90.
- [5] Y. Matsui and K. Murata; *Optica Acta*, 1971, **18**, No. 2 (Feb), 149.

An approach to optimization of optical tolerance for minimum cost

TANG JIUHUA AND YU WEIZHOU

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

(Received 31 October 1985; revised 3 January 1986)

Abstract

An optimization model of optical tolerance is proposed to enable straight forward calculation instead of the usual tolerance-budget balancing by trial and error. The objective function is the minimum fabrication cost of the optical system. A general expression relating the cost of component processing to the tolerance is obtained by fitting to existing data. The constraints are image qualities in terms of MTF and distortion. An example is given which has two variables and is solved by network algorithm.