

提高光学积分器均匀化效果的有关问题

仲 跻 功

摘 要

本文阐述了提高光学积分器均匀化效果的几个有关问题，文中结合实例计算分析了光学积分器投影镜组的离焦并提出了最佳离焦量的经验公式。

在太阳模拟器中光学积分器是一个重要的光学部件。关于它的光学结构和工作原理在其它文章中已有阐述^{[1]、[2]}，本文只简述提高光学积分器成像时均匀化效果的几个有关问题，并较详细地讨论分析积分器投影镜组的离焦效果。

一、提高均匀化效果的有关问题

考虑到像差影响、光学参数匹配、光学元件加工与装调等实际因素，为保证光学积分器的均匀化效果，尚需考虑如下几个问题。

合理选择光学积分器光通道数目使之与场镜组通光口径内的照度分布相匹配^[1]。一般说来，光学积分器并列光通道数目越多，理想均匀度越好。但是，在均匀光照面和光学积分器通光口径的大小为一定的情况下，光通道数目越多，积分器元素透镜的口径则越小，它们被成像的倍率也越大。这将使积分器系统的结构变得复杂，同时对积分器元素透镜的加工与定位精度也提出较高要求。然而，光通道数目少则保证不了理想均匀度，特别是在大型太阳模拟器系统中。因此根据要求合理选定积分器光通道的数目是光学设计中必须考虑的问题。

正确确定积分器元素透镜的“弯曲”状态，以利于提高光学积分器所形成的光照面边缘带的照度，从而提高整个光照面内的照度分布均匀度。根据我们对积分器场镜组和投影镜组元素透镜的像差特性所做的分析^[3]，光学积分器各元素透镜应处于图3中所示的“弯曲”状态。

在光学积分器的结构上我们曾采用了被我们称之为“边缘补偿”的方法，并收到预期的效果^[2]。图1(a)中所示为光学积分器场镜组的通光口径，其内排列着七个正六边形元素，分别表示了七个并列光通道的通光口径；图1(b)中表示出九个通光口径为正方形的积分器元

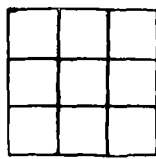
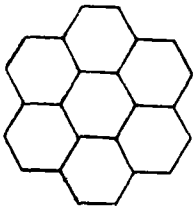


图1 场镜组口径内各元素排列

(a)元素为正六边形 (b)元素为正方形

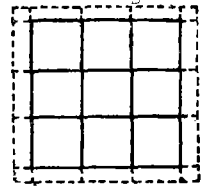
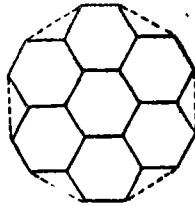


图2 补偿元素的排列

(a)三角形补偿元素 (b)长方形补偿元素

素。图 2 (a) 周围排列的六个等腰三角形及图 2 (b) 中周围排列的十二个长方形和四个小正方形，我们称之为边缘补偿元素。图 2 (a) 中三角形元素的光学尺寸和正六边形元素的六个角的光学尺寸完全相同。根据光学积分器的成像原理，这些三角形口径内的光能将被传递到均匀光照面(积分器场镜元素即图 1 (a) 中的正六边形的共轭像面)的六个角的相应范围内(有部分重叠)。显然补偿元素的作用在于增加均匀光照面边缘带的相对照度，从而提高整个均匀光照面范围内的照度分布均匀度，因此我们称之为“边缘补偿”法。同样道理，可以说明图 2 (b) 中补偿元素的补偿作用。在图 2 (b) 中所表示的情况下为了不增大场镜组通光口径，正方形元素透镜的通光口径应相应地缩小。我们认为采用“边缘补偿”方法比单纯增加光学积分器光通道数目(即光学积分器元素数目)对于提高光照面照度分布均匀度更有效而合理。

为保证光学积分器成像中它的场镜各个元素口径内的照度分布严格对称补偿，对各并列光通道内场镜元素和其相应的投影镜元素同轴度以及并列光通道对光学积分器系统主光轴的轴对称性，均应有较高要求。为此光学积分器元素透镜和补偿元素透镜的光学加工与定位精度，都应严格保证^[2]。

通过光学积分器投影镜组的离焦可以补偿光学积分器相对孔径较大时轴外球差造成的成像光线高度的离散，仍可保证获得相当高的均匀度。下面将详细讨论这一问题。

二、投影镜组离焦

光学积分器各光通道对系统主光轴虽然是对称排列的，但是叠加透镜却是各光通道共用的。所以在各光通道中叠加透镜和投影镜元素透镜的相对位置不严格一致，并且除了中心光通道(其光轴和系统主光轴重合)外，其余光通道中叠加透镜的相应通光口径对所在光通道的光轴也不对称(见图3)。这两点使得在计入像差影响时光学积分器的成像失去严格轴对称性。此外，有时为了缩短太阳模拟器光学系统(使整体结构紧凑)，要求光学积分器有较大的相对孔径。这种情况下光学积分器过大的球差和轴外球差使均匀光照面内成像光线离散很大。受材料和结构限制，光学积分器本身又不能校正这些像差。这些对均匀度显然都是不利的。利用光学积分器的成像特性，缩短其场镜组和投影镜组的空气间隔，即投影镜各元素透镜离焦，可以减小轴外光线成像高度的离散而取得好的效果。

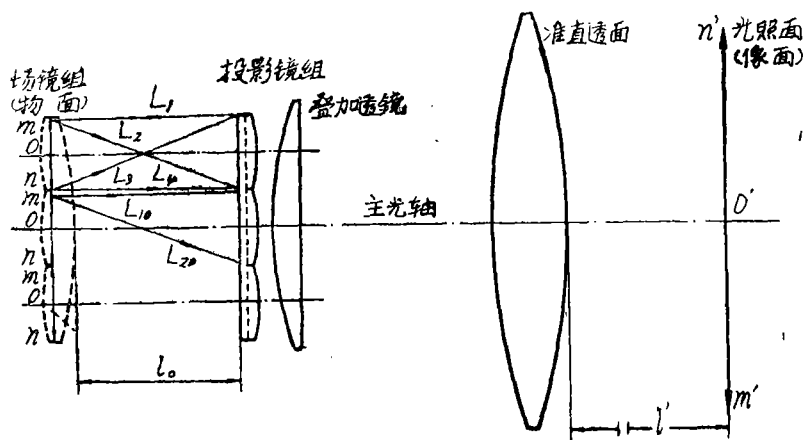


图 3 光照面边缘点光线追迹示意图

下面我们将结合TM—400A太阳模拟器的光学积分器投影镜组离焦的计算结果阐述这一问题。图3和图4示出所追迹的各特征光线，表1至表4则列出各特征光线在均匀光照面上的成像高度 H' 及其离散尺寸 $\Delta H'$ ，特征光线 L 和它对应的 H' 有相同的下角标。图3中还表示出光学积分器、准直透镜、均匀光照面（经准直透镜再成像后）的相对位置示意图。 l_0 为场镜组和投影镜组的空气间隔， y_0 为投影镜元素透镜口径的不同环带， l' 为均匀光照面到准直透镜的距离。表中除 y_0 无量纲外，其他量均以毫米为单位。

表1 $L_1 \sim L_4$ 光线成像高度 H' 及其离散尺寸 $\Delta H'$ 与 l_0 、 l' 的关系

$y_0 = 1.0$

| H' | l_0 | 143.7 | | | 120 | | | | |
|-------------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|------|
| | | 9.7 | 9.2 | 8.6 | 9.7 | 9.2 | 8.6 | 7.5 | 7.0 |
| $-H_1'$ | | 58.8 | 58.8 | 58.8 | 58.4 | 58.4 | 58.4 | 58.4 | 58.4 |
| $-H_2'$ | | 45.7 | 47.9 | 50.5 | 45.7 | 47.9 | 50.6 | 56.0 | 58.5 |
| H_3' | | 44.6 | 46.7 | 49.2 | 46.2 | 48.3 | 50.9 | 55.9 | 58.3 |
| H_4' | | 57.3 | 57.3 | 57.3 | 58.5 | 58.5 | 58.5 | 58.5 | 58.5 |
| $\Delta H'$ | | 14.2 | 12.1 | 9.6 | 12.8 | 10.6 | 7.9 | 2.6 | 0.2 |

表2 $L_1 \sim L_4$ 光线成像高度 H' 及其离散尺寸 $\Delta H'$ 与 l_0 、 y_0 的关系

$l' = 120$

| H' | y_0 | 8.6 | | | 7.5 | | 7.0 | | |
|-------------|-------|------|-------|------|------|-------|------|-------|------|
| | | 1.0 | 0.707 | 0.3 | 1.0 | 0.707 | 1.0 | 0.707 | 0.3 |
| $-H_1'$ | | 58.4 | 54.4 | | 58.4 | 55.4 | 58.4 | 55.9 | |
| $-H_2'$ | | 50.6 | 51.4 | | 56.0 | 56.0 | 58.5 | 58.3 | |
| H_3' | | 50.9 | 51.6 | 51.9 | 55.9 | | 58.3 | 58.1 | 57.2 |
| H_4' | | 58.5 | 54.7 | 52.5 | 58.5 | | 58.5 | 56.1 | 55.6 |
| $\Delta H'$ | | 7.9 | 3.3 | 0.6 | 2.6 | 0.6 | 0.2 | 2.4 | 1.6 |

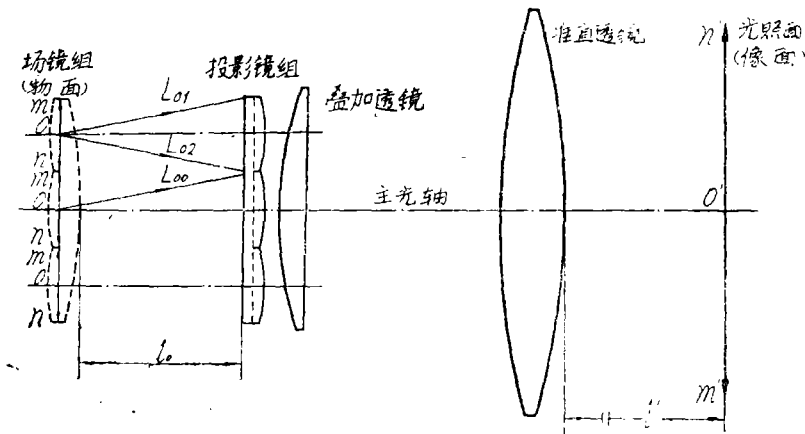


图4 光照面轴上光线追迹示意图

表3 光线 L_{10} 、 L_{20} 成像高度 H' 及其离散尺寸 $\Delta H'$

| H' | y_0 | 7.0 | |
|-------------|-------|------|-------|
| | | 1.0 | 0.707 |
| $-H_{10}'$ | | 58.6 | 56.1 |
| $-H_{20}'$ | | 58.5 | 58.3 |
| $\Delta H'$ | | 0.1 | 2.2 |

$l' = 120$

表4 光照面轴上点光线离散

| H' | y_0 | 光通道 | | | |
|-----------|-------|-----|-------|------|-------|
| | | 中 心 | | 边 缘 | |
| | | 1.0 | 0.707 | 1.0 | 0.707 |
| H_{00}' | | 4.0 | 5.8 | | |
| H_{01}' | | | | 4.7 | 6.5 |
| H_{02}' | | | | -3.3 | 5.0 |

$l' = 120, l_0 = 7.0$

对以上表中所列计算结果我们将做如下分析讨论并由此得出相应结论。

在不计入像差影响的近轴光学范围内 ($l' = 143.7$) 本应有 $|H_1'| = H_4'$, $|H_2'| = H_3'$, 但实际上 $|H_1'| \neq H_4'$, $|H_2'| \neq H_3'$ 。这是由于经投影镜组元素后实际光线 L_1 和 L_4 , L_2 和 L_3 对于系统主光轴失去轴对称性。由表 1 可见当 $l' = 120$ 时便有 $|H_1'| = H_4'$, $|H_2'| = H_3'$, 即通过均匀光照面离焦, 补偿了多光通道系统的积分器成像光线对主光轴的不严格对称性。

由表 1 可知当光学积分器场镜组和投影镜组的空气间隔由近轴光学的 9.7 毫米逐渐减小到 7.5~7.0 毫米时, 光照面边缘成像光线离散尺寸 $\Delta H'$ 由 14 毫米减小到 2.5 毫米左右。这里我们利用了光学积分器成像特性, 通过投影镜组离焦补偿了光学积分器轴外球差过大而造成的相当大的光线离散。由图 3 可见随着 l_0 减小, L_2 和 L_3 光线对投影镜元素透镜的视场角成反比地增加, 而 L_1 和 L_4 光线对投影镜元素透镜的视场角变化不明显。所以当 l_0 减小时 H_2' 、 H_3' 分别接近 H_1' 、 H_4' , 并在 l_0 减小到 7.5~7.0 毫米时趋于相等。在这里应综合考虑经投影镜元素口径的各环带后成像光线离散的总情况。由表 2 可知, 在 $l_0 = 7.0$ 和 7.5 毫米时轴外点成像光线离散尺寸实质上是相同的 (约 2.5 毫米) 并已达到极小值。显然最佳空气间隔 l_0 应在 7.5~7.0 之间, 它对于近轴光学的 9.7 毫米之变化量 Δl 。就是投影镜组各元素透镜的最佳离焦量。TM-400A 系统的

$$\Delta l_0 \approx 9.7 - \frac{7.5 + 7.0}{2} = 2.4 \text{ 毫米。}$$

实际上这个数量是投影镜元素透镜单独对无穷远物面成像时其边缘带球差量 $LA'_m(\infty)$ 的 2.2 倍。我们利用同样方法对 TM-500A 和 TM-3000A 太阳模拟器的光学积分器系统进行了计算, Δl_0 为 $LA'_m(\infty)$ 的 2.1 倍。须知, TM-400A 的积分器包含九个光通道, 投影镜元素的口径为正方形, 其相对孔径为 1/2.5; TM-500A 的积分器也有九个光通道, 投影镜元素口径也为正方形但其相对孔径为 1/4; TM-3000A 的积分器有七个光通道, 投影镜元素口径为正六边形, 其相对孔径为 1/4。积分器光学参数如此不同的三个系统 Δl_0 与 $LA'_m(\infty)$ 的关系却如此一致! 据此我们提出了以下经验公式

$$\Delta l_0 = (2.1 \sim 2.2) LA'_m(\infty)$$

$$\text{或 } \Delta l_0 \approx 2 LA'_m(\infty)$$

表 3 表明在最佳 l_0 时, 积分器中心光通道和边缘光通道对均匀光照面边缘点成像的光线离散尺寸基本相同: 边缘光通道对应的最大离散尺寸 $\Delta H'_{max}$ 约为 2.5 毫米, 中心光通道对应的 $\Delta H'_{max}$ 为 2.2 毫米。

表 4 表明在 l_0 为最佳值时均匀光照面中心 (轴上点) 成像光线最大离散尺寸 $\Delta H'_{max}$ 为 13 毫米。实际上当 l_0 由 9.7 毫米逐渐减小到 7.5~7.0 毫米时, 均匀光照面边缘点成像光线的

离散尺寸 $\Delta H'_{max}$ 随之逐渐减小,而均匀光照面轴上点的成像光线的离散尺寸却随之增大。这种由均匀光照面的中心到边缘成像光线离散尺寸 $\Delta H'_{max}$ 逐渐减小的状况对整个均匀光照面内的照度分布均匀度是有利的。

表2表明在 $l_0 > 7.5$ 毫米,即尚未到达最佳值时 $\Delta H'$ 随投影镜元素的口径 y_0 由全口径的 $y_0 = 1$ 减小到0.707带的 $y_0 = 0.707$ 和0.3带的 $y_0 = 0.3$ 时而逐渐减小。

为保证光学积分器所形成的光照面内有足够好的照度分布均匀度,在光学积分器的实际设计和装调中应同时考虑上述几个有关问题。

参 考 文 献

- [1] 杜温锡、李福田、周秀良,光学机械,1978,4。
- [2] 赵吉林、仲跻功、陈兴,太阳能学报,2卷4期,1981年10月。
- [3] 仲跻功,太阳能学报,4卷2期,1983年4月。