

# 初级球差激光扫描系统的设计分析<sup>\*</sup>

刘 华<sup>\*\*</sup> 胡 渝 刘盛纲<sup>\*\*\*</sup>

(电子科技大学应用物理所 成都 610054)

**【摘要】** 给出了离轴高斯光束通过一个初级球差光学系统后, 其相对光强的分布, 通过数值积分, 可以得到它与系统球差的大小和光束的入射位置的关系曲线。利用这个关系曲线以及瑞利判据, 可以对激光扫描系统的设计进行分析, 并提出合理的建议。

**关键词** 初级球差; 激光扫描系统; 离轴高斯光束; 激光通信

中图分类号 O436.1; TN929.1

在激光器的应用日益广泛的今天, 对高斯光束的像差分析也就变得更加重要。以往的一些文献考虑的都是高斯光束与光学系统共轴的情况<sup>[1-6]</sup>。然而, 现在有许多的光学系统都是激光束与光学系统不共轴的, 且光束也仅能覆盖系统孔径的一部分, 比较典型的系统是各种激光扫描系统。例如, 在自由空间激光通信系统中, 激光束的自动跟踪系统, 它所对应的就是激光束与光学系统不共轴且不能充满系统孔径的情况<sup>[7,8]</sup>。这时, 光束通过光学系统后的光强分布必然与以前所考虑的共轴情况不一样。于是, 有必要对离轴激光束通过一个像差系统后像平面上, 尤其是像平面中心点上的相对光强进行分析, 并根据结果对激光扫描系统的设计进行有益的考虑。本文将主要考虑初级球差系统。

## 1 Strehl 比

一般说来, 光学系统设计者最关心的是光束通过系统后像平面中心点的光强大小, 实际上就是通常用来评价光束质量的因子 Strehl 比。Strehl 比  $SD(\rho_0, \theta_0)$  的表达式为

$$SD(\rho_0, \theta_0) = \frac{\left| \int_0^{2\pi} \int_0^\delta \exp[-(a/w)^2 r^2] \exp[ik\Phi(R, \varphi)] r dr d\varphi \right|^2}{\left| \int_0^{2\pi} \int_0^\delta \exp[-(a/w)^2 r^2] r dr d\varphi \right|^2} \quad (1)$$

式中  $k$  为波数;  $a$  是光学系统出射光瞳半径;  $w$  是入射光束半径;  $\delta$  是有效光束半径。

## 2 初级光束球差

考虑一个初级球差系统, 其像差函数为

$$\Phi(\rho, \theta) = S_1 \rho^4 \quad (2)$$

由于初级球差仅是径向函数, 不失一般性, 可令  $\theta_0 = 0$ 。为了分析系统像差对离轴高斯光束的影响, 可把式 (1) 的坐标变换到原点在入射光束中心的光束坐标系中, 如图 1 所示。

由图 1, 有下列坐标变换式

$$\alpha \rho \cos \theta = \alpha \rho_0 \cos \theta_0 + \alpha_c \cos \varphi$$

1998 年 7 月 6 日收稿

\* 国家科委 863 高科技项目, 基金号: 863.31.5.2

\*\* 男 27 岁 博士

\*\*\* 男 63 岁 教授 校长 中国科学院院士

$$\alpha \rho \sin \theta = \alpha \rho_0 \sin \theta_0 + a_r \sin \varphi \quad (3)$$

这里,  $(\rho_0, \theta_0)$  是入射光束中心在系统坐标系中的极坐标,  $\alpha$  是系统出射光瞳的半径,  $\rho \in (0, 1)$ , 是与  $\alpha$  归一化的极坐标,  $a_r$  是光束半径。

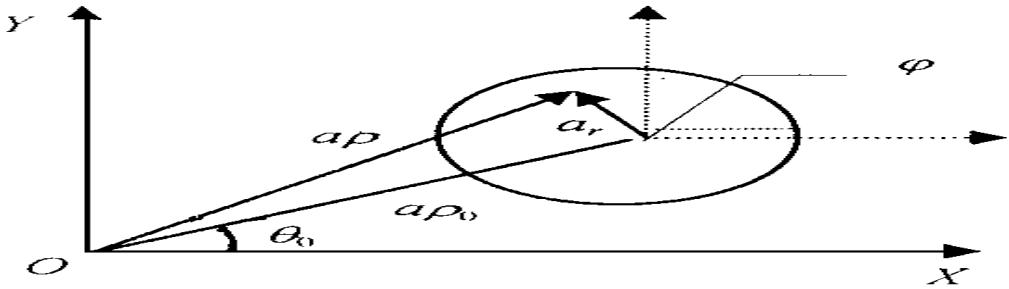


图 1 出瞳上入射光束位置及符号示意图

利用式 (2), 可得初级球差函数在光束坐标系中的表达式为

$$\Phi(r, \varphi) = S_1 \rho_0^4 + 2S_1 \rho_0^2 r^2 + 4S_1 \rho_0^3 r \cos \varphi + S_1 r^4 + 4S_1 \rho_0 r^3 \cos \varphi + 4S_1 \rho_0^2 r^2 \cos^2 \varphi \quad (4)$$

式 (4) 也可称为初级光束球差函数。可以看出, 初级光束球差函数不但与入射光束中心在系统坐标系中的位置  $(\rho_0, \theta_0)$  有关, 而且与观察点在光束坐标系中的位置也很有关系。

将式 (4) 代入式 (1), 并令  $w/a = 0.1$  (即入瞳半径 10 倍于光束半径), 取有效光束半径 (为 3 倍  $w/a (=0.3)$ ), 用计算机进行数值积分, 可得到  $SD(\rho_0, \theta_0)$  与入射光束中心离开系统中心的距离的关系曲线, 如图 2 所示。

从图 2 可看出, 当高斯光束入射位置不超过光学系统中心的 40%, 即  $\rho_0 < 0.4$  时,  $SD$  几乎无变化, 当高斯光束入射位置偏离光学系统中心的 40%, 即  $\rho_0 > 0.4$  时,  $SD$  将急剧下降, 表明成像质量也迅速下降。另外,  $S_1$  越大 (即球差越大),  $SD$  下降趋势越显著。这个结论与我们日常的经验是相吻合的。

在图 2 中, 为了计算方便, 已对一些参数 (如光束半径, 有效光束半径, 初级球差大小等) 作了预先的设定。如果改变有关参数设定, 同样可以得到其他应用情况下的结果。

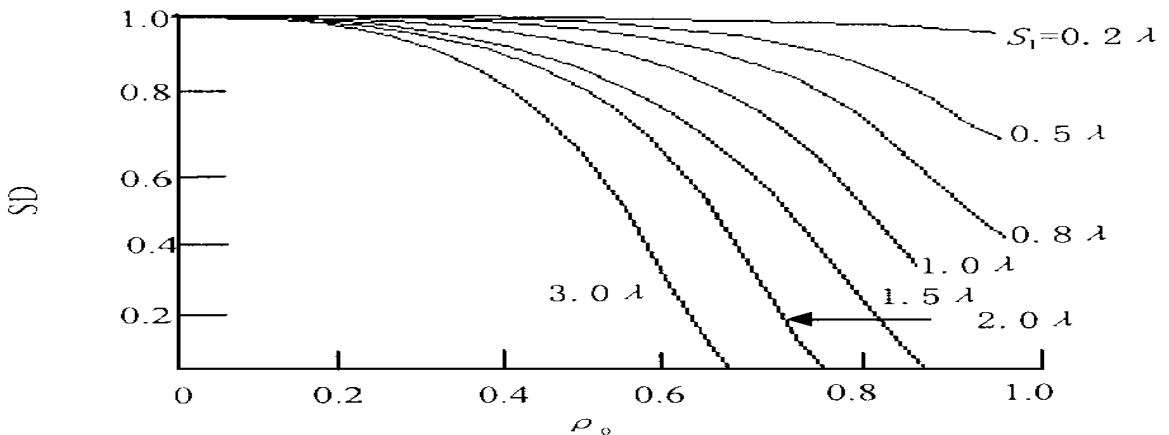


图 2 初级球差系统的 Strehl 比与光束入射位置的关系示意图

综上所述, 离轴高斯光束通过一个初级球差光学系统后, 其像平面中心处的相对光强大小将强烈依赖于系统球差的大小, 以及入射光束的中心偏离系统中心的距离。球差越大, 入射位

置偏离光学系统的中心越远, 则象平面中心处的相对光强越小。

### 3 扫描系统设计考虑

根据瑞利判据, 如果观察点处的相对光强低于 80% 以下时, 则认为该点的成像质量不好。而从上面的讨论可知, 对于一个初级球差系统来说, 像平面中心处的相对光强将随着高斯光束入射位置偏离光学系统中心的距离的增大而减小, 当入射位置的偏离超过某一位置时, 像平面中心点的相对光强将小于 80%, 此时可认为该位置为满足激光束成像质量的最边缘入射位置。所以, 在设计对应于离轴高斯光束应用情况的激光扫描系统时, 必须考虑许多不同的入射位置和像差大小, 并进行优化, 以得到最好的效果。根据这个原理, 可以对激光扫描系统的设计提出一些有用的建议, 例如对一个给定的球差系统确定扫描范围, 或者根据所要求的扫描范围来确定光学系统孔径的大小。值得注意的是, 前面的光强计算以及后面的讨论都只是针对子午面的情况。

图3所示为激光通信系统的扫描子系统示意图。图中,  $2U$  即为高斯光束在子午面内的扫描角度。下面我们便根据传统的 80% 相对光强原则来确定扫描系统的扫描范围  $2U$ 。

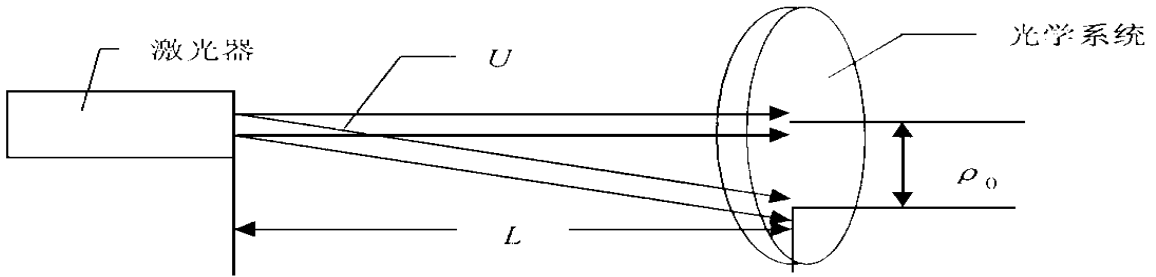


图3 高斯光束扫描系统示意图

首先确定好激光器到光学系统的距离  $L$ , 然后根据图 2, 便可以找到使像平面上的光斑中心相对光强不小于 80% 的光束入射位置。于是, 就可确定扫描系统的扫描范围为

$$\text{并令 } / 2U = \arctan \left[ \frac{\rho_0}{L} \right] \quad (5)$$

我们还可以先定好扫描范围  $U$  和光学系统的口径, 然后再根据前面的结果来确定激光器到系统的距离  $L$ ; 或者, 也可以根据  $L$  和  $U$  来确定光学系统的口径。同样, 我们还可以将研究的系统球差扩展到其他的像差系统中去。

### 4 结论

综上所述, 离轴高斯光束通过初级球差系统后, 像平面中心点上的衍射光强与入射光束的离轴距离和球差大小都很有关系。离轴距离越远, 球差越大, 则像中心点上的光强越小。根据瑞利判据, 可以提出激光光学扫描系统的一些设计考虑。

衷心感谢冯志超教授和吕百达教授对本文工作给予的大力支持。

## 参 考 文 献

- 1 Szapiel S. Aberration balancing technique for radially symmetric amplitude distributions: a generalization of the Marechal approach. *J Opt Soc Am*, 1982, 72: 947 ~ 956
- 2 Barakat R. Optimum balanced wave-front aberrations for radially symmetric amplitude distributions: generalization of Zernike polynomials. *J Opt Soc Am*, 1980, 70 (6): 739 ~ 742
- 3 Yoshida A, Asakura T. Propagation and focusing of Gaussian laser beams beyond conventional diffraction limit. *Opt Comm*, 1996, 123: 694 ~ 701
- 4 Herloski R. Strehl ratio for untruncated aberrated Gaussian beams. *J Opt Soc of Am*, 1985, 2 (7): 1 027 ~ 1 030
- 5 Mahajan V N. Strehl ratio for primary aberrations: some analytical results for circular and annular pupils. *J Opt Soc Of Am*, 1982, 22 (19): 1 258 ~ 1 266
- 6 Mahajan V N. Uniform versus Gaussian beams: a comparison of the efforts of diffraction, obscuration, and aberrations. *J Opt Soc Am*, 1986, 3 (4): 470 ~ 485
- 7 刘 华, 胡 渝, 李岷淳等. 宽带数字光波通信系统光学天线的设计与计算. *中国激光*, 1996, A23 (3): 260 ~ 263
- 8 刘 华, 何 毅, 胡 渝. 自动跟踪 10.6 $\mu$ m 光学天线的设计与调试. *电子科技大学学报*, 1998, 27 (3): 293 ~ 295

## Analysis on Design of Laser Scanning Systems with Primary Spherical Aberrations

Liu Hua Hu Yu Liu Shenggang

(Institute of Applied Physics, UEST of China, Chengdu 610054)

**Abstract** In this paper, the relative intensity distribution of an off-axis Gaussian beam after passing through a primary spherical aberration system is presented. By numerical integration, the relationship curve between the relative intensity and the aberration of the system and the incident position is given. Based on the relations and Rayleigh rule, the analysis and rational proposals for the design of laser scanning systems are also given.

**Key words** primary spherical aberration; laser scanning system; off-axis Gaussian beam; laser communications