

文章编号: 1001-3806(2004)03-0319-04

# 激光器光轴平行度及光斑移出视场问题的研究

冯汝鹏, 钟德平

(哈尔滨工业大学, 哈尔滨 150001)

摘要: 为适应当前航空航天以及国防等领域对某一类型激光器的迫切需求, 结合该方面的专业知识与空间立体几何、空间解析几何知识, 经过详细地分析与推导, 解决了该类型激光器收、发射场光轴方程的建立, 以及两光轴间的平行度问题; 同时也较为详细地分析了发射光斑移出接收视场的问题, 并给出了计算发射光斑不移出接收视场的最大距离的计算公式。该研究结果对实际工程应用设计具有较为重要的参考价值, 并有着理论上的意义。

关键词: 激光器; 光轴方程; 光轴平行度; 发射光斑; 最大距离计算

中图分类号: TN249 文献标识码: A

## Research of parallel degree of optical axis and beaming spot into and out of incepting view field for laser apparatus

FENG Rurpeng, ZHONG Deping

(Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract:** To meet the current urgent requirement for some type of laser apparatus in the areas of aviation, spaceflight and national defence, etc, this paper successfully deals with developing optical axis equations and its parallel degree for this type of laser apparatus with detailed analyzing and reasoning by using spatial and geometry knowledge. At the same time, it also analyzes the problem of beaming spot getting into and out of incepting view field in detail. Then the formula of maximal distance of beaming spot not getting out of incepting view field is given in this paper. The research is valuable to the actual project design and application.

**Key words:** laser apparatus; equation of optical axis; parallel degree of optical axes; beaming spot; computation of maximal distance

### 引 言

因为受激辐射而产生的激光具有单色性好、相干性好、方向性好、高亮度、稳定性好、衰减较小等优良的物理光学特性<sup>[1]</sup>, 由激光作为导引的制导系统<sup>[2]</sup>, 具有精度高、结构简单、对信息处理系统要求比较低以及价格便宜等优点, 所以激光器在航空、航天以及国防各个领域都有着重要的应用, 例如: 导弹末制导<sup>[3]</sup>、激光炸弹<sup>[4]</sup>以及航天器<sup>[5]</sup>的空间交会对接等都是利用激光器作为制导或引信控制的重要部件。本文中所研究的激光器是由一个激光发射器和一个激光接收器组装而成, 在安装使用激光器之前, 必须精确测出其光轴平行度以及发射光斑不移出接收视场的最大距离等重要工程参数。这也是用激光器作制导部件的领域中一个较为棘手的问题。

为了解决这个问题, 经过深入研究后, 笔者在此给出了研究的初步结果。本文中主要给出激光器光轴方程的建立、光轴平行度的求取以及发射光斑不移出接收视场的最大距离的计算公式, 同时作了较为详细的分析。

### 1 视场光轴方程的建立

#### 1.1 建立坐标系

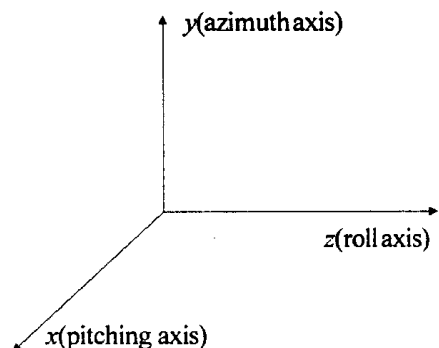


Fig. 1 Reference frame of tumtable

作者简介: 冯汝鹏(1938), 男, 教授, 主要研究方向为导航、制导与控制, 自动控制理论及其应用等。

E-mail: fengrupeng@hit.edu.cn

收稿日期: 2003-06-23; 收到修改稿日期: 2003-09-02

三轴转台处于零位时,建立坐标系。三轴交点作为坐标系原点。水平时,正对光管轴作为  $z$  轴的正方向,方位轴向上为  $y$  轴的正方向,按左手法则: $y$  轴倒向  $z$  轴,拇指为  $x$  轴的正方向,如图 1 所示。

### 1.2 确定发射与接收器件光学中心点初始坐标

根据发射器件和接收器件安装的位置,精确地测出其光学中心点的初始坐标值。设发射器件光学中心点初始坐标  $S_1(x_{A_1}, y_{A_1}, z_{A_1})$ , 接收器件光学中心点初始坐标  $S_2(x_{B_1}, y_{B_1}, z_{B_1})$ 。

### 1.3 确定 $z$ 轴上有限距离且与 $z$ 轴垂直的靶面光斑的中心点坐标

用三轴转台搜索,找到并绘出  $z$  轴上有限距离,且与  $z$  轴垂直的靶面  $z = z_0$  上的发射光斑和接收光斑。并根据记录数据确定光斑的中心点坐标。这里设发射光斑中心点坐标为  $M_1(x_{A_2}, y_{A_2}, z_0)$ , 接收光斑中心点坐标为  $M_2(x_{B_2}, y_{B_2}, z_0)$ 。

### 1.4 建立直线方程

由数学知识可知,通过空间中两点可以确定其直线方程,所以有发射光轴( $S_1, M_1$ )方程:

$$\frac{x - x_{A_1}}{x_{A_2} - x_{A_1}} = \frac{y - y_{A_1}}{y_{A_2} - y_{A_1}} = \frac{z - z_{A_1}}{z_0 - z_{A_1}} \quad (1)$$

接收视场轴( $S_2, M_2$ )方程:

$$\frac{x - x_{B_1}}{x_{B_2} - x_{B_1}} = \frac{y - y_{B_1}}{y_{B_2} - y_{B_1}} = \frac{z - z_{B_1}}{z_0 - z_{B_1}} \quad (2)$$

## 2 光轴平行度的计算

假设发射光轴直线的方向向量为  $\{m_A, n_A, p_A\}$ , 而接收光轴直线的方向向量为  $\{m_B, n_B, p_B\}$ , 则有:  $m_A = x_{A_2} - x_{A_1}, n_A = y_{A_2} - y_{A_1}, p_A = z_0 - z_{A_1}; m_B = x_{B_2} - x_{B_1}, n_B = y_{B_2} - y_{B_1}, p_B = z_0 - z_{B_1}$ 。所以,由空间两直线所成的夹角公式,可以直接得到接收光轴直线和发射光轴直线在空间所成的夹角  $\varphi$  为:

$$\varphi = \arccos \frac{|m_A m_B + n_A n_B + p_A p_B|}{\sqrt{m_A^2 + n_A^2 + p_A^2} \cdot \sqrt{m_B^2 + n_B^2 + p_B^2}} \quad (3)$$

这就是所求的收、发光轴之间的平行度。

## 3 发射光轴与接收光轴与任意距离靶面的交点及其空间距离

设发射光轴和接收光轴与任意距离  $z = L$  的靶面交点分别为  $N_1(x_1, y_1, L), N_2(x_2, y_2, L)$ , 则由(1)式、(2)式,可得:  $x_1 = (x_{A_2} - x_{A_1})L / (z_0 - z_{A_1}) + (z_0 \cdot x_{A_1} - z_{A_1} \cdot x_{A_2}) / (z_0 - z_{A_1})$ 。分别令  $a_x = (x_{A_2} - x_{A_1}) /$

$(z_0 - z_{A_1}), b_x = (z_0 \cdot x_{A_1} - z_{A_1} \cdot x_{A_2}) / (z_0 - z_{A_1})$ , 则有(4)

$$\text{同理,可得: } y_1 = a_y L + b_y \quad (5)$$

$$x_2 = c_x L + d_x \quad (6)$$

$$y_2 = c_y L + d_y \quad (7)$$

式中,  $a_y = (y_{A_2} - y_{A_1}) / (z_0 - z_{A_1}), b_y = (z_0 \cdot y_{A_1} - z_{A_1} \cdot y_{A_2}) / (z_0 - z_{A_1}), c_x = (x_{B_2} - x_{B_1}) / (z_0 - z_{B_1}), d_x = (z_0 \cdot x_{B_1} - z_{B_1} \cdot x_{B_2}) / (z_0 - z_{B_1}), c_y = (y_{B_2} - y_{B_1}) / (z_0 - z_{B_1}), d_y = (z_0 \cdot y_{B_1} - z_{B_1} \cdot y_{B_2}) / (z_0 - z_{B_1})$ 。

所以由空间两点间距离公式,立即可得:

$$|N_1 N_2| = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (L - L)^2} = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \quad (8)$$

## 4 发射光轴和接收光轴与靶面 $z = z_0$ 的夹角

发射光轴的方向向量为  $\{x_{A_2} - x_{A_1}, y_{A_2} - y_{A_1}, z_0 - z_{A_1}\}$ , 而接收光轴的方向向量为  $\{x_{B_2} - x_{B_1}, y_{B_2} - y_{B_1}, z_0 - z_{B_1}\}$ , 平面  $z = z_0$  的法向量为  $\{0, 0, 1\}$ 。所以发射光轴与平面  $z = z_0$  的夹角为:

$$\alpha_1 = \sin^{-1} \frac{|z_0 - z_{A_1}|}{\sqrt{(x_{A_2} - x_{A_1})^2 + (y_{A_2} - y_{A_1})^2 + (z_0 - z_{A_1})^2}} = \sin^{-1} \frac{z_0 - z_{A_1}}{\sqrt{(x_{A_2} - x_{A_1})^2 + (y_{A_2} - y_{A_1})^2 + (z_0 - z_{A_1})^2}} \quad (\text{因为 } z_0 > z_{A_1}) \quad (9)$$

同理,可得接收光轴与平面  $z = z_0$  的夹角为:

$$\alpha_2 = \sin^{-1} \frac{z_0 - z_{B_1}}{\sqrt{(x_{B_2} - x_{B_1})^2 + (y_{B_2} - y_{B_1})^2 + (z_0 - z_{B_1})^2}} \quad (10)$$

## 5 发射光斑不移出接收视场问题的讨论

### 5.1 发射光轴与接收光轴在空间中的相互关系

发射光轴与接收光轴的空间关系有以下 3 种情形。

(1) 两光轴在空间平行,如图 2 所示。此时只有发射视场角  $\theta_1$  小于接收视场角  $\theta_2$  时,发射光斑才可能进入接收视场,而且发射光斑一旦进入接收视场后,则无论距离多远,都不会移出到接收视场之外。

(2) 两光轴在空间相交,有两种情况:其一,在发射光源、接收器件背后相交,如图 3 所示,此时若发射光斑一旦进入接收视场后,则无论距离多远,都不

会移出到接收视场之外;其二,在发射光源、接收器件与反射目标之间相交,如图 4 所示,此时发射光斑在某一距离处进入接收视场,而到达另一距离之后,则发射光斑将移出接收视场之外。

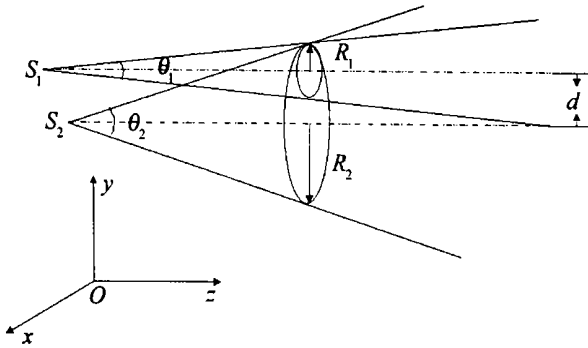


Fig. 2 Parallel sketch of two optical axes

$S_1$ —optical center of laser beaming apparatus  $S_2$ —optical center of laser intercepting apparatus  $\theta_1$ —beaming view angle  $\theta_2$ —intercepting view angle

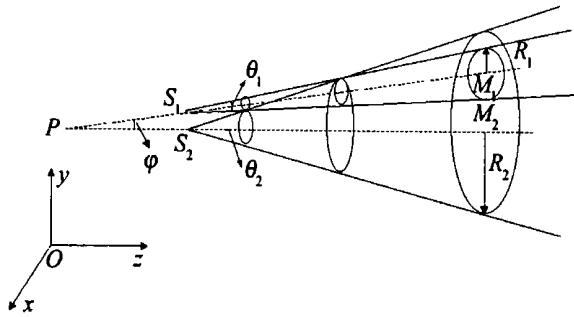


Fig. 3 Intersection sketch of two optical axes behind apparatus

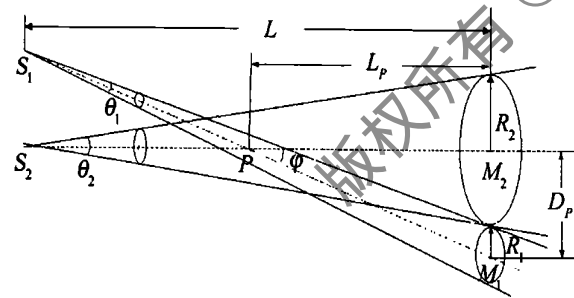


Fig. 4 Intersection sketch of two optical axes before apparatus

$S_1$ —optical center of laser beaming apparatus  $S_2$ —optical center of laser intercepting apparatus  $\theta_1$ —beaming view angle  $\theta_2$ —intercepting view angle

(3) 两光轴在空间异面,这时情况较复杂,随发射视场角与接收视场角大小关系的不同,而有不同的情形。发射光斑可能不会进入接收视场;可能进入接收视场后又在到达一定距离时移出接收视场;也可能发射光斑一旦进入接收视场后永远不会移出接收视场。

### 5.2 发射光斑不移出接收视场的最大距离

设  $L_1 = |S_1N_1|$ ,  $L_2 = |S_2N_2|$ , 则有:

$$L_1 = \frac{L - z_{A_1}}{\sin \alpha_1}, L_2 = \frac{L - z_{B_1}}{\sin \alpha_2} \quad (11)$$

在这里近似认为两视场为圆形,所以也近似地认为两光斑也是圆形,故发射光斑与接收光斑的近似半径  $R_1, R_2$  分别为:

$$R_1 \approx \frac{L_1 \theta_1}{2}, R_2 \approx \frac{L_2 \theta_2}{2} \quad (12)$$

式中,  $\theta_1, \theta_2$  分别为发射视场角与接收视场角。若发射光斑全部在接收视场内,则必须满足:  $|N_1N_2| \leq R_2 - R_1$ 。

将(4)式~(8)式、(11)式、(12)式带入上式,可得:

$$A \cdot L^2 + B \cdot L + C \leq 0 \quad (13)$$

式中,  $A = (a_x - c_x)^2 + (a_y - c_y)^2 - \frac{1}{4} \left[ \frac{\theta_2}{\sin \alpha_2} - \frac{\theta_1}{\sin \alpha_1} \right]^2$ ,  $B = 2(a_x - c_x)(b_x - d_x) + 2(a_y - c_y)(b_y - d_y) + \frac{1}{2} \left[ \frac{\theta_2}{\sin \alpha_2} - \frac{\theta_1}{\sin \alpha_1} \right] \left[ \frac{\theta_2 \cdot z_{B_1}}{\sin \alpha_2} - \frac{\theta_1 \cdot z_{A_1}}{\sin \alpha_1} \right]$ ,  $C = (b_x - d_x)^2 + (b_y - d_y)^2 - \frac{1}{4} \left[ \frac{\theta_2 \cdot z_{B_1}}{\sin \alpha_2} - \frac{\theta_1 \cdot z_{A_1}}{\sin \alpha_1} \right]^2$ 。

注意:在(13)式中,系数  $A$  应大于 0;当  $\theta_1$  的值固定而  $\theta_2$  的值不断增大时,系数  $A$  可能变为负数,此时表示发射光斑一旦进入接收视场后不再移出接收视场。所以求解(13)式,可得:  $(-B - \sqrt{B^2 - 4AC})/2A \leq L \leq (-B + \sqrt{B^2 - 4AC})/2A$ 。

故发射光斑进入接收视场的最小距离为:

$$L_{\min} = (-B - \sqrt{B^2 - 4AC})/2A \quad (14)$$

而发射光斑不移出接收视场的最大距离为:

$$L_{\max} = (-B + \sqrt{B^2 - 4AC})/2A \quad (15)$$

式中,参数  $L_{\min}$  在实际工程应用中没有特殊要求,而参数  $L_{\max}$  却是必须精确测量的重要参数。

### 5.3 讨论

(1) 当(13)式无解时,则表示发射光斑永远不会进入接收视场。

(2) 当  $L_{\min}, L_{\max}$  都大于  $z_{A_1}, z_{B_1}$  时,则表示发射光斑先进入接收视场,到达一定距离后又移出接收视场。

(3) 当  $L_{\min}$  大于  $z_{A_1}, z_{B_1}$ , 而  $L_{\max}$  为负数时,则表示发射光斑进入接收视场后,永远不会移出接收视场。

(4) 当发射光轴与接收光轴在空间平行时,设两平行光轴之间的距离为  $d$ 。若发射光斑能进入接收视场的情形下,则发射光斑进入接收视场的最小距离可作以下简化。若发射光斑全部在视场之内,则

必须满足:  $d \leq R_2 - R_1$ 。

将(11)式、(12)式带入上式,可解得发射光斑进入接收视场的最小距离为:

$$L_{\min} = \frac{2d + \theta_2 \cdot z_{B_1} / \sin \alpha_2 - \theta_1 \cdot z_{A_1} / \sin \alpha_1}{\theta_2 / \sin \alpha_2 - \theta_1 / \sin \alpha_1} \quad (16)$$

(5)在实际工程中,激光发射器和接收器的实际安装,一般都使得发射光轴和接收光轴与 $z$ 轴近似平行,发射视场角与接收视场角一般都很小;而且 $x_{A_1}, y_{A_1}, z_{A_1}, x_{B_1}, y_{B_1}$ 以及 $z_{B_1}$ 相对于所测距离来说很小,可以忽略不计。所以在求发射光斑进入接收视场的最小距离以及移出接收视场的最大距离时,可作以下近似处理,即 $L_1 = L_2 = L$ 。所以有:

$$R_1 \approx L\theta_1/2 \quad (17)$$

$$R_2 \approx L\theta_2/2 \quad (18)$$

若发射光斑全部在视场之内,也必须满足:

$$|N_1 N_2| \leq R_2 - R_1。$$

将(4)式~(8)式,(16)式~(18)式带入上式,可得:

$$A'L^2 + B'L + C' \leq 0 \quad (19)$$

式中,  $A' = (a_x - c_x)^2 + (a_y - c_y)^2 - (\theta_2 - \theta_1)^2/4$ ,  
 $B' = 2(a_x - c_x)(b_x - d_x) + 2(a_y - c_y)(b_y - d_y)$ ,  
 $C' = (b_x - d_x)^2 + (b_y - d_y)^2$ 。

求解上式,可得:

$$-\frac{B' - \sqrt{B'^2 - 4A'C'}}{2A'} \leq L \leq \frac{B' + \sqrt{B'^2 - 4A'C'}}{2A'}$$

所以,此时发射光斑进入接收视场的最小距离近似为:

$$L_{\min} = (-B' - \sqrt{B'^2 - 4A'C'})/2A' \quad (20)$$

而发射光斑不移出接收视场的最大距离近似为:

$$L_{\min} = (-B' + \sqrt{B'^2 - 4A'C'})/2A' \quad (21)$$

当然近似(20)式、(21)式的误差稍微大一些,故若实际工程对精度要求较高,则最好还是用(14)式、(15)式进行计算。

## 6 结 论

若已知激光发射器件及接收器件光学中心点坐标 $(x_{A_1}, y_{A_1}, z_{A_1})$ 、 $(x_{B_1}, y_{B_1}, z_{B_1})$ ,以及 $z$ 轴上有限距离且垂直于 $z$ 轴的靶面上的发射光斑与接收光斑中心点坐标 $(x_{A_2}, y_{A_2}, z_0)$ 、 $(x_{B_2}, y_{B_2}, z_0)$ ,根据(1)式、(2)式可求出两光轴直线方程;由(3)式可以求得两光轴之间的平行度;由(9)式、(10)式,可求得两光轴直线与 $z$ 轴上的靶面所成的夹角;由(4)式~(7)式求得 $z$ 轴上任意有限距离的靶面上两光斑的近似中心点坐标,再由(8)式求得这两点间的空间距离。

当实际工程对精度要求不是很高时,可用(21)式近似求解发射光斑不移出接收视场的最大距离。当实际工程对精度要求较高时,可用(15)式求解发射光斑不移出接收视场的最大距离。当发射光轴与接收光轴在空间平行时,若发射光斑能进入接收视场,则可用(16)式求解发射光斑进入接收视场的最小距离。

## 参 考 文 献

- [1] 吕百达. 激光光学 [M]. 成都: 四川大学出版社, 1992: 9~13.
- [2] 刘隆和. 多模复合寻的制导技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1989: 23~39.
- [3] 杨文华, 王 勇. 激光导引 AGV 系统原理及应用 [J]. 机器人技术与应用, 2000(3): 12~16.
- [4] 袁 正. 激光引信综述 [J]. 航空兵器, 1998(3): 27~29.
- [5] 林来兴. 自主交会对接测量系统和对接敏感器 [J]. 航天控制, 1991(4): 15~19.

• 简 讯 •

## 光子晶体可能成为磁激发器

麻省工学院的研究人员正在探索三维光子晶体(PCs)作为磁材料的可能性,尽管光子晶体是由非磁性材料生产出来的,但它们的结构使其有可能具有磁性。这种光子晶体包含一些缺陷,它们在光学上可能会非常活跃,如果将荧光染料加入光子晶体,这一特性也许还会加强。染料会在缺陷模式的波长上产生发射。如果设计正确,一个缺陷点就可能产生出一个当地场模式,它可以模拟振荡磁性时段。通过分析,麻省工学院的研究人员证明,光子晶体98%的发射能量能变成磁多极辐射。材料的性质允许它在相应的布里渊区域边缘波矢量的频率下运转,最终产生铁磁或反铁磁的光子晶体阵列。晶体中某一个特定层内缺陷的复杂性也会产生铁磁或反铁磁特性。增加晶体的平面尺寸会增加效率,增加垂直面的尺寸会降低效率。

(蒋 锐 曹三松 供稿)