

## 三维激光雷达共光路液体透镜变焦光学系统设计

李 晶<sup>1,2</sup>, 车 英<sup>1\*</sup>, 宋 暖<sup>2</sup>, 翟艳男<sup>2</sup>, 陈大川<sup>2</sup>, 李 君<sup>2</sup>

(1. 长春理工大学 光电工程学院, 吉林 长春 130033;  
2. 空军航空大学 航空基础学院, 吉林 长春 130022)

**摘要:** 针对动车组空间三维坐标的测量需求, 设计了三维激光雷达共光路变焦光学系统。系统采用发射/接收共光路的结构形式, 以高斯光学为理论基础, 对能量传输进行了详细的分析, 得到扩束透镜链的严格限制关系。为简化系统结构, 利用液体透镜代替传统的机械变焦机构, 以几何光学为理论基础, 计算出光学系统初始结构, 并采用 Zemax 光学设计软件进行仿真, 设计出三维激光雷达发射/接收共光路光学系统。该结构形式不仅提高了系统同轴度、减小外部干扰, 还简化了结构、缩小了仪器体积。采用液体透镜调焦代替机械调焦, 避免了调焦引起的机械振动, 有效提高了激光雷达的定位精度。通过改变液体透镜的光焦度, 实现了在 2~30 m 测量范围内, 发射光学系统在被测物体表面的光斑半径小于 20  $\mu\text{m}/\text{m}$ , 接收光学系统超过 90% 的聚焦能量集中在半径小于 1.6  $\mu\text{m}$  的圆内, 满足用户要求。

**关键词:** 激光雷达; 高斯光学; 发射/接收共光路; 液体透镜

中图分类号: O439 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201948.0418002

## Design of common path zoom optical system with liquid lens for 3D laser radar

Li Jing<sup>1,2</sup>, Che Ying<sup>1\*</sup>, Song Nuan<sup>2</sup>, Zhai Yannan<sup>2</sup>, Chen Dachuan<sup>2</sup>, Li Jun<sup>2</sup>

(1. Photoelectrical Engineering Institute, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130033, China;  
2. Aeronautical Foundation College Aviation University Air Force, Changchun 130022, China)

**Abstract:** In order to meet the need of measuring the train groups' three-dimensional coordinates, a 3D laser radar common path zoom optical system was designed. According to the characteristics of laser beam expander, multistage laser amplifiers were carried out by using lens chain. Based on Gauss optics and geometrical optics, the optical structure of the laser emission system based on liquid lens was fully analyzed, and the key parameters of the initial structure of optical system were calculated. Using Zemax optical design software to optimize the simulation, the 3D laser radar transmitting/receiving optical system was designed. The spot diagrams of the transmitting optical system which used a liquid lens to zoom were all less than 20  $\mu\text{m}/\text{m}$  within the image distance range between 2 m and 30 m, and the spot diagram decreased with the increase of the distance. By minimizing the spot size which was detected by the array detector channel of the receiving system to focus the energy in one point, then the power of

收稿日期: 2018-12-06; 修订日期: 2018-12-27

基金项目: 国家自然科学基金重大仪器专项(D41527809)

作者简介: 李晶(1981-), 女, 讲师, 博士生, 主要从事激光雷达、光学设计等方面的研究。Email: 568026388@qq.com

导师简介: 车英(1964-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事精密测控方面的研究。Email: cheying@cust.edu.cn

liquid lens was the optimal state to make sure the spot diagram in the target was smallest. By optimizing the design, the radius of the 90% energy concentrated area were less than 1.6  $\mu\text{m}$ . The optical structure not only improves the system alignment, reducing the external disturbing, but also simplifies the structure of the instrument volume. Using the liquid lens focusing instead of mechanical focusing to avoid the vibration, and the positioning of the laser radar was proved.

**Key words:** laser radar; Gaussian optics; transmitting/receiving common path; liquid lens

## 0 引言

近年来,随着高速铁路的不断发展,为人们出行缩短了路途中占用的时间。由于高铁的高速度,要求动车组车头设计成水滴形减小阻力。同时出于安全考虑,不仅需要车内设备进行检测,还需要对车头和车身的三维形貌进行检测。

激光雷达的测量原理与毫米波雷达、微波雷达类似,只是工作波段不同。与传统的测量仪器相比,三维激光雷达具有大尺寸、非接触、高精度和高速度等特点<sup>[1-2]</sup>。国外对三维形貌测量研究起步较早,可进行长距离测量的主要有瑞士 LEICA 激光跟踪仪、美国的 FARO 激光跟踪仪和 METRIS 激光跟踪仪。LEICA 激光跟踪仪通过测量投影到被测工件表面的干涉条纹变化量来实现目标的距离测量,最大量程为 50 m,但测量是需要角隅棱镜最为合作目标,测量精度 0.015 mm。FARO 跟踪仪最大量程为 55 mm,测量方式与 LEICA 相同,测量精度达到 0.02 mm。而 METRIS 激光测距仪可以实现非接触、高精度、大量程的测量,但该产品价格非常昂贵。国内大尺寸三维测量技术还处于研制发展阶段,清华大学马少鹏、华中科技大学伏燕军、天津大学李少辉等分别在时域相位解包法、数字投影法和高反射曲测量等领域获得了丰富的研究成果。长春理工大学安志勇课题组在非接触三维形貌测量系统也进行了深入的研究,成功研制出测量设备,已投入实际应用,但该仪器需要机械结构带动镜片移动实现变焦,引起机械振动,影响跟踪转台的稳定性,限制了测量速度<sup>[3]</sup>。

三维激光雷达主要由反射系统、接收系统、反射镜转台系统和信号处理系统几部分组成,接收和发射系统质量直接影响系统的测量精度。多数激光雷

达的反射和接收系统分成两套,不利于仪器结构简单化和小型化。采用发射/接收系统共光路结构,不仅简化系统结构、缩小仪器体积,还可以增加系统同轴度、减小外部干扰。

该三维激光雷达需要在短距离大量程范围内测距,需要变有焦装置,使不同距离情况下激光光斑在扫描物上的光斑能量最集中。同时,反射/接收光学系统需要安装在二维转台上,机械变焦不仅调节速度慢,还会引起重心变化导致转台振动。需要研究新型发射/接收变焦共光路光学系统<sup>[4]</sup>,进一步提高激光雷达测量精度。

## 1 激光雷达能量传输原理

动车组单节车厢长度从 25~27.6 m 不等,所以该三维激光雷达系统要求测量范围为  $L=2\sim 30$  m。根据测量需求,在有效测量范围内,激光雷达在物面的光斑半径小于 0.02 mm/m,激光雷达在目标物体上形成的光斑尺寸要小于 500  $\mu\text{m}$ 。在激光发射系统中,增大作用距离的前提是提高激光准直性。发射系统扩束比越高,准直性越好<sup>[5-6]</sup>。考虑到像差限制,一次扩束的能力有限,需要多组透镜连续扩束准直,称之为透镜链,如图 1 所示。

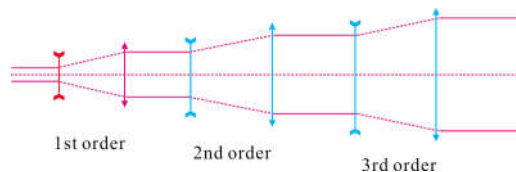


图 1 多级扩束透镜链

Fig.1 Multi-stage beam expander lens chain

图 1 中包括三组透镜单元,每一组都是由一负一正焦距分别为  $f_1$  和  $f_2$ 、间隔为  $d$  的两个薄透镜组成。由 ABCD 法则可知,透镜链中每一个单元的光线变换矩阵为:

$$M = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_2} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_1} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - \frac{d}{f_1} & 2d - \frac{d^2}{f_1} \\ -\frac{1}{f_1} - \frac{1}{f_2} + \frac{d}{f_1 f_2} & -\frac{d}{f_2} + \frac{(f_1 - d)(f_2 - d)}{f_1 f_2} \end{bmatrix} \quad (1)$$

若每一组负透镜焦距和正透镜焦距均为  $f_1$  和  $f_2$ ，当透镜链由  $s$  个透镜组组成时，其变换矩阵为：

$$M_{\text{Total}} = \begin{bmatrix} A_{\text{Total}} & B_{\text{Total}} \\ C_{\text{Total}} & D_{\text{Total}} \end{bmatrix} = M^s \quad (2)$$

根据希尔维斯特定理<sup>[7]</sup>， $M_{\text{Total}}$  的矩阵可表示为：

$$\begin{cases} A_{\text{Total}} = \frac{A \sin(s\theta) - \sin(s\theta - \theta)}{\sin \theta} \\ B_{\text{Total}} = \frac{B \sin(s\theta)}{\sin \theta} \\ C_{\text{Total}} = \frac{C \sin(s\theta)}{\sin \theta} \\ D_{\text{Total}} = \frac{D \sin(s\theta) - \sin(s\theta - \theta)}{\sin \theta} \end{cases} \quad (3)$$

其中：

$$\cos \theta = \frac{A + D}{2} = \frac{2f_1 f_2 - 2d(f_1 + f_2) + d^2}{2f_1 f_2} \quad (4)$$

当复参数为  $q_0$  的光束入射，经过  $s$  各扩束单元组后，其光束复参数  $q_s$  为：

$$q_s = \frac{A_{\text{Total}} q - B_{\text{Total}}}{C_{\text{Total}} q - D_{\text{Total}}} \quad (5)$$

公式(5)中，要使  $q_s$  为有限值，要求  $\theta$  值为实数，所以，根据公式(6)可知：

$$0 \leq \frac{2f_1 f_2 - 2d(f_1 + f_2) + d^2}{2f_1 f_2} \leq 1 \quad (6)$$

对于个数有限的透镜连续变化，公式(6)是一个很严格的限制条件。

## 2 共光路系统设计

发射系统和接收系统共光路设计可以简化光学系统结构，缩小系统体积<sup>[8]</sup>。平行激光光束通过偏振分光棱镜和 1/4 波片，经过发射系统，经物面反射后返回发射系统；再经 1/4 波片和偏振分光棱镜反射，通过接收系统耦合，最后聚焦到光纤<sup>[9]</sup>。

### 2.1 激光雷达测距方程

激光雷达接收能量的计算公式<sup>[10-11]</sup>为：

$$P_r = \frac{P_t G_t}{4\pi R^2} \cdot \frac{\sigma}{4\pi R^2} \cdot \frac{\pi D^2}{4} \eta_A \eta_o \quad (7)$$

式中： $P_r$  为探测器接收功率； $P_t$  为激光发射功率； $\sigma$  为目标散射截面； $D$  为目标口径； $\eta_A$  为大气传输效率； $\eta_o$  为光学系统透过率； $R$  为反射目标半径。

对于扩展目标，由朗伯散射可得：

$$A_r = \pi R^2 \theta_r^2 / 4 \quad (8)$$

$$\sigma = 4\rho A_r \quad (9)$$

式中： $\theta_r$  为目标光源散射角； $\rho$  为物面表面反射率。

公式(7)中的  $G_t$  为发射系统的放大倍率，可以表示为：

$$G_t = \frac{4\pi}{\theta_r^2} \quad (10)$$

将公式(8)~(10)代入公式(7)可得：

$$P_r = \frac{\pi P_t \rho D^2}{16R^2} \eta_A \eta_o \quad (11)$$

动车组车体表面为多为光滑白色表面，表面反射率  $\rho=60\%$ ；发射系统透过率为 90%；接收系统透过率为 45%。对于大尺寸测量来讲，反射目标保守估计为 1 m。当光源发光功率为 10 mW，反射系统口径为 60 mm 时，根据公式(11)可以求出回波功率为 1.7  $\mu\text{W}$ ，满足 PIN 光电二极管的响应能力，设计比较合理。

### 2.2 液体透镜变焦原理

传统透镜由玻璃或光学塑料制成，加工完成后，其光学无法改变。而液体构建是利用液体表面张力，通过控制液体工作层的外部形状或改变折射率分布来改变透镜焦距<sup>[12-13]</sup>。

Optotune 公司的微流体透镜结构如图 2 所示，主要部分为隔膜及其内部液体，隔膜外圈上有线圈，通过改变电流改变给隔膜的压力，使液体流入或流出隔膜中心，改变上表面的曲率半径。该液体透镜具有结构简单，功耗低，调制时间(15 ms)短等优点，适合应用于快速调焦机构。鉴于此，利用液体透镜对发射系统进行调焦，可以提高发射系统的聚焦速度并减少活动部件。

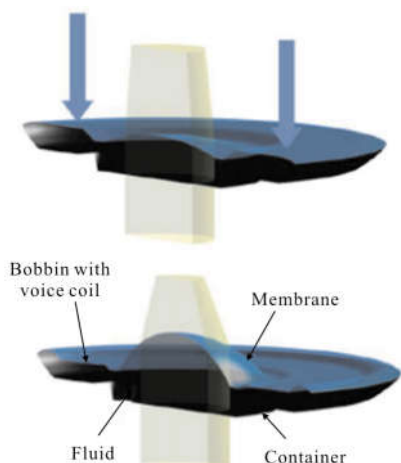


图 2 液体透镜结构图  
Fig.2 Liquid lens structure

由于激光光源发出光束首先耦合到光纤中，从光纤中出射后再经自聚焦透镜准直进入发射系统，所以发射系统可以安装传统的光学系统进行设计。如图 3 所示，该系统由焦距分别为  $f_1$  和  $f_2$  的两个薄透镜  $L1$  和  $L2$  组成。 $l$  和  $l'$  分别为透镜的物距和像距； $L_{12}$  为两薄透镜直径距离； $h_{in}=4\text{ mm}$  为平行光入射半口径， $h_{out}$  为光出射半口径。

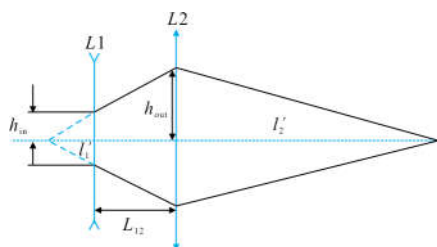


图 3 双透镜光学系统  
Fig.3 Two-lens optical system

发射系统光学结构采用伽利略望远结构，当像距为 30 m 时，图 3 可以近似为简单的扩束系统，所以出射光束口径和入射光束口径比值可以近似表示为：

$$\frac{h_{out}}{h_{in}} \approx \frac{f_2}{f_1} \quad (12)$$

根据三角关系可以求出系统总焦距  $f_{all}$ ：

$$\frac{h_{in}}{h_{out}} \approx \frac{f_{all}}{l_2'} \quad (13)$$

根据薄透镜光焦度公式可知：

$$\frac{1}{f_{all}'} = \frac{1}{f_1'} + \frac{1}{f_2'} - \frac{L_{12}}{f_1' f_2'} \quad (14)$$

根据高斯公式，出射像距可以表示为：

$$\frac{1}{l_2'} + \frac{1}{l_2} = \frac{1}{f_2'} \quad (15)$$

其中：

$$l_2 = L_{12} - f_1' \quad (16)$$

当激光聚焦到 30 m 位置时，发射系统有效出光口径达到最大 60 mm，即  $h_{in}=4\text{ mm}$ ， $h_{out}=30\text{ mm}$ ，根据公式(13)可知：

$$f_{all}' = \frac{l_2' h_{in}}{h_{out}} = \frac{30\ 000 \times 4}{30} = 4\ 000\text{ mm} \quad (17)$$

将公式(12)、(14)~(16)联立可求得  $f_1' = -23.12\text{ mm}$ ， $f_2' = 173.42\text{ mm}$ ， $L_{12} = 151.3\text{ mm}$ 。再根据高斯公式可以求出在  $f_1'$  和  $l_2'$  的关系曲线，如图 4 所示。从图 4 可以看出， $f_2'$  的变焦范围从  $-23.12 \sim -38.58\text{ mm}$ 。而液体透镜的光焦度变化范围为  $10\text{ dpt} \geq D_L \geq -10\text{ dpt}$ ，其焦距变化范围为  $-\infty \sim -100\text{ mm}$  和  $100\text{ mm} \sim \infty$ ，无法满足要求，所以将液体透镜与一片固定透镜联合应用来实现变焦范围在  $-23.12 \sim -38.58\text{ mm}$  范围内变化。

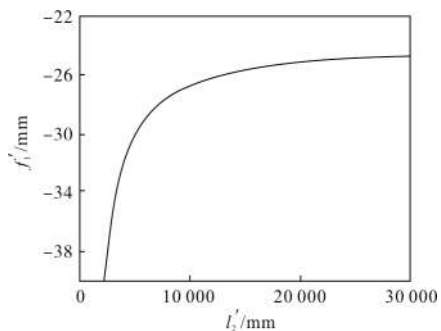


图 4  $f_1'$  和  $l_2'$  的关系曲线图  
Fig.4 Diagram of curve between  $f_1'$  and  $l_2'$

考虑到冗余量，假设当液体透镜焦距为 110 mm 时，液体透镜和固定透镜距离为 5 mm，此时组合透镜的焦距为  $-38.58\text{ mm}$ ，根据光焦度公式可求出固定透镜的焦距为  $-27.26\text{ mm}$ 。当固定透镜焦距为  $-27.26\text{ mm}$  时，焦距  $f_1'$  和液体透镜光焦度  $D_L$  的关系曲线见图 5。在整个液体透镜光焦度变化范围内，其与固定透镜的组合焦距覆盖了  $f_1'$  的整个需要范围。

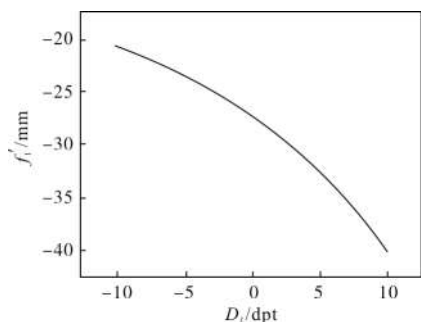


图 5  $f_1$  和  $D_L$  的关系曲线图

Fig.5 Diagram of curve between  $f_1$  and  $D_L$

### 2.3 发射光学系统设计

三维激光测距系统扫频激光波长为  $1.55 \mu\text{m}$ , 其光斑人眼无法看到, 为了便于检测, 发射系统增加  $633 \text{ nm}$  波长激光光源作为指示光, 用于指示测量光的光斑位置。所以发射光学系统的需要消除  $633 \text{ nm}$  和  $1550 \text{ nm}$  的色差。根据上述方法, 利用

Zemax 软件多重结构对反射系统进行优化设计。如图 6 所示, 发射系统为三级扩束系统, 采用 BK7 和 SF8 两种玻璃消色差, 通过调节液体透镜的光焦度实现系统在  $2\sim 30 \text{ m}$  的范围内均能汇聚成最小的光斑。

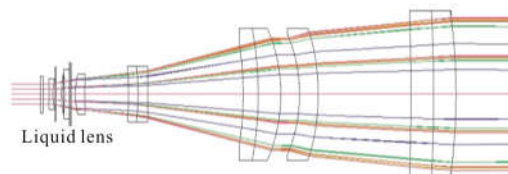


图 6 发射系统光学结构图

Fig.6 Optical structure diagram of launching system

图 7 为不同聚焦距离时发射系统在物面的点列图, 在不同聚焦距离情况下, 物面点列图半径均小于  $20 \mu\text{m}$ , 而且随距离增加点列图半径随之减小, 满足该三维激光雷达测量在物面的光斑半径小于  $0.02 \text{ mm} \times L$  的要求。

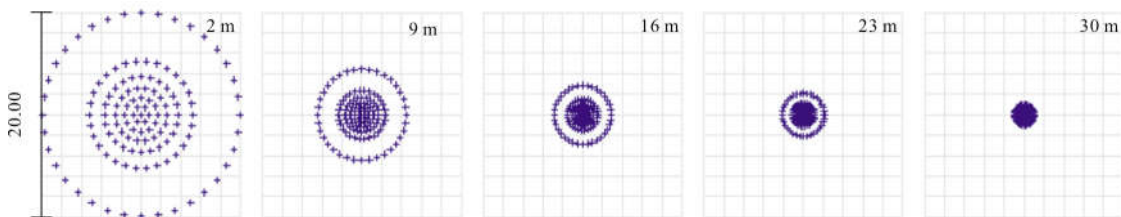


图 7 发射系统点列图

Fig.7 Spot diagram of launching system

采用宏语言 ZPL 进行编程, 对发射系统变焦情况进行仿真。在  $2\sim 30 \text{ m}$  范围内, 给出液体透镜光焦度变化与像距之间的变化曲线, 如图 8 所示。

际关系曲线并与图 4 中的理论曲线进行对比。

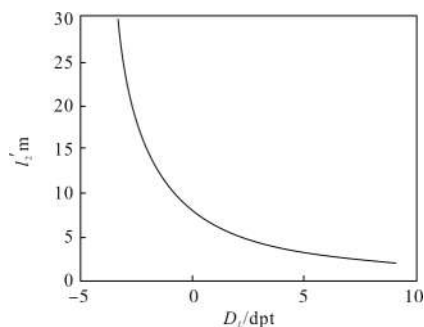


图 8 发射系统变焦曲线

Fig.8 Zoom curve of launching system

利用 Zemax 可以得到与液体透镜前的固定透镜焦距为  $-27.56 \text{ mm}$ , 利用光焦度公式可以求出液体透镜与组合透镜的总焦距  $f_1$ , 可以得到  $f_1$  与像距  $l_2$  的实

际关系曲线并与图 4 中的理论曲线进行对比。图 9 中,  $f_1$  的实际值变化趋势与理论值相同, 但略小于理论值, 并随着光侧距离增加, 实际值与理论值的差距增大, 这是由于液体透镜的边缘厚度固定不变导致的。如图 10 所示, 在不同光焦度情况下固定透镜据液体透镜前表面的距离越来越大, 导致  $f_1$  的实际

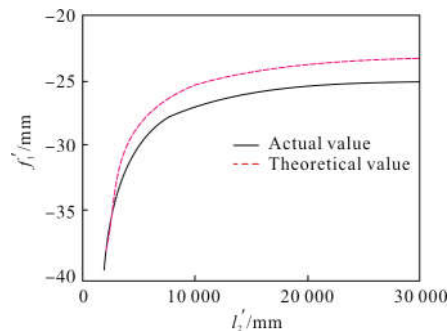


图 9 发射系统变焦曲线  $f_1$  和  $l_2$  的关系曲线图  
Fig.9 Diagram of zoom curve of transmitting system between  $f_1$  and  $l_2$



值与理论值的差距越来越大。

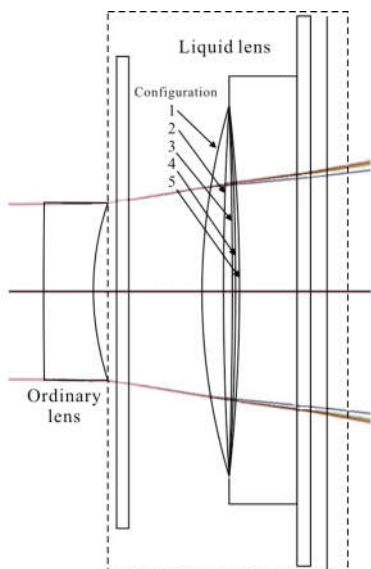


图 10 液体透镜多重结构图

Fig.10 Multi-configuration diagram of liquid lens

### 2.4 接收光学系统设计

接收光学系统物距和发射光学系统的像距相等且同时变化,所以接收光学系统同样需要变焦,为了简化设计,接收光学系统与接收系统共用一套液体透镜。采用与发射系统反向的设计方法对

接收光学系统进行设计,设计结果如图 11 所示。

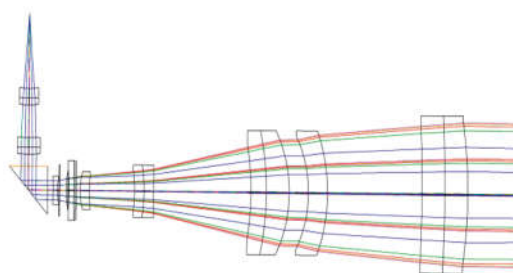


图 11 接收光学系统

Fig.11 Optical layout diagram of receiving system

### 2.5 光学系统合成

接收系统光能量来源于物体散射的聚焦激光,为了模拟实际效果,利用 Zemax 非序列结构在发射系统物面设置散射反射面。发射光经过散射到共光路接收系统,再通过 1/4 波片(适用于 1 550 nm)和偏振分光棱镜(适用于 1 550 nm, 633 nm 激光的偏振度较低)后反射到聚焦系统成像到一点。如图 12 所示,三维测距系统中偏振方向相同的 633 nm 指示激光和 1 550 nm 测量激光分别经过二向分束棱镜的透射和反射合成一束平行混合光束;再经过偏振分光棱镜、1/4 波片和共光路扩束系统照射到物体表面,实

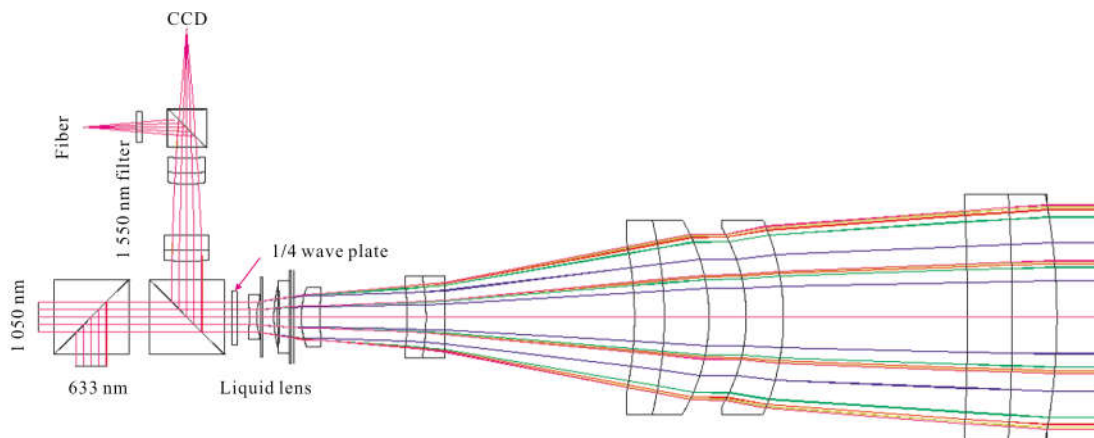


图 12 发射/接收共光路光学系统

Fig.12 Transmitting/receiving common path optical system

现激光指示和发射。激光经过物体表面散射光束进入共光路光学系统,再经过 1/4 波片和偏振分光棱镜反射后进入聚焦系统,再经过消偏振分光棱镜后分为两束,分别照射到面阵探测器上和接收光纤内。面阵探测器的作用是给液体透镜提供反馈信息,保证在探测目标上的光斑达到最小,提高激光

能量利用率。利用 Zemax 软件分析,该光学系统总长为 247 mm,最大发光口径 60 mm,达到了用户需求。图 13 为合并后系统的成像点列图,在不同物距时,接收光学系统 90%以上的能量最集中区域半径均小于 1.6  $\mu\text{m}$ ,小于光纤的半径 4.07  $\mu\text{m}$ ,可有效地耦合到光纤中,满足实际需求。

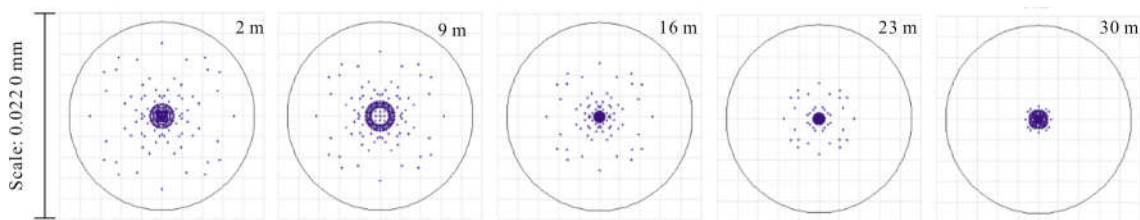


图 13 共光路光学系统点列图

Fig.13 Spot diagram of common path optical system

### 3 误差分析

液体透镜采用电磁驱动器来调节液体透镜焦距,电流和液体透镜的光焦度成线性关系,由于驱动电路控制电流的精度,导致液体透镜的光焦度重复性误差小于 0.01 dpt。液体透镜的光焦度误差会导致发射光路和接收光路能量集中度的同时变化。发射系统的误差直接引起在探测物面激光光斑的尺寸,而接收系统的误差会导致光线耦合的效率,都会降低激光雷达测距的准确性。

液体透镜在调焦过程中位平凹或平凸透镜,其光焦度和曲率半径直接的关系为:

$$D_L = \frac{n-1}{r_L} \quad (18)$$

根据公式(18),可以得到  $D_L$  和  $r_L$  的关系曲线,如图 14 所示。

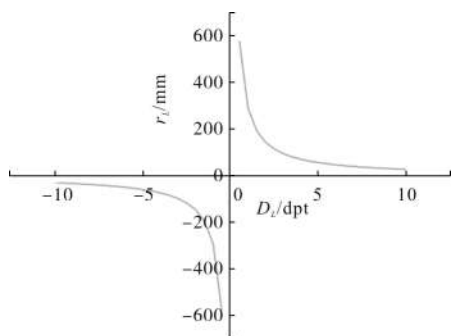


图 14  $D_L$  与  $r_L$  关系曲线

Fig.14 Relationship between  $D_L$  and  $r_L$

当  $D_L$  的变化误差  $\Delta D_L = \pm 0.01$  dpt 时,曲率半径  $\Delta r_L$  的变化情况如图 15 所示。

将对应的曲率半径偏差代入光学系统中,得到探测物面和接收像面的光斑点列图,分别如图 16 和图 17 所示。从图中可以看出,当液体透镜光焦度存在  $\pm 0.01$  dpt 的误差时,发射光学系统点列图半径均

小于  $20 \mu\text{m}$ ,小于应用要求的  $0.02 \text{ mm/m}$ ;接收光学系统像面光斑 90%的能量半径小于  $8 \mu\text{m}$ ,对光纤耦合效率无影响。液体透镜的调节精度满足实际应用的需求。

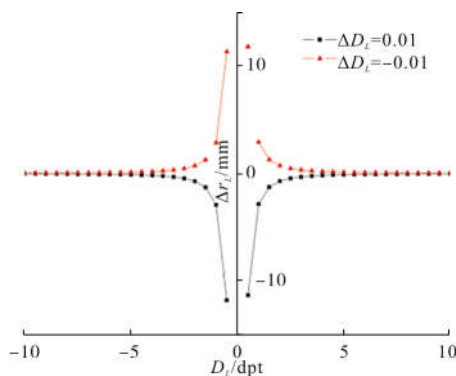


图 15  $D_L$  与  $\Delta r_L$  关系曲线

Fig.15 Relationship curve between  $D_L$  and  $\Delta r_L$

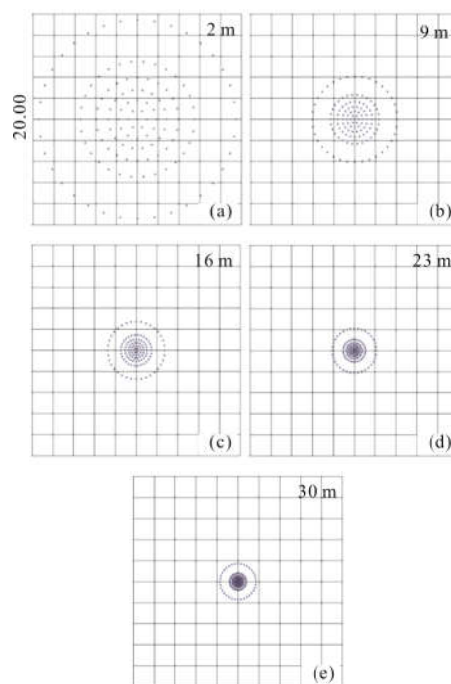


图 16 加入误差后发射系统点列图

Fig.16 Spot diagram of launching system with error

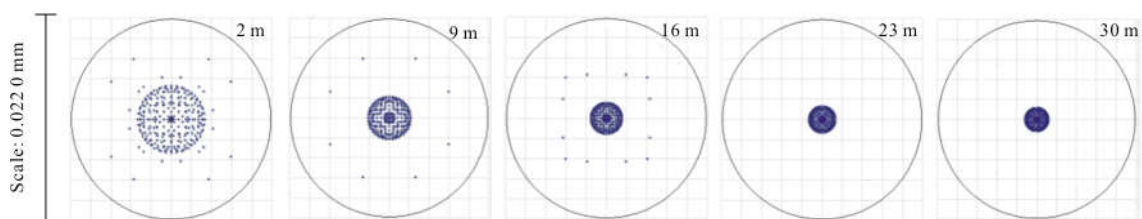


图 17 加入误差后接收系统点列图

Fig.17 Spot diagram of receiving system with error

将液体透镜误差和各透镜加工装调误差(如表 1 所示)代入 Zemax 软件进行公差分析。

表 1 输入公差

Tab.1 Input tolerance

Items	Tolerance
Radius/mm	0.03
Thickness/mm	0.03
Decent/mm	0.03
Tilt/(°)	0.02
S+A irregular	0.2 fringes
Index	0.001
Abbe	1%

经过公差分析, 分别得到在不同测量距离情况下发射光学系统和接收光学系统的公差分析结果, 点列图 RMS 值如表 2 所示。

表 2 公差分析结果

Tab.2 Tolerance analysis results

System	$l_2/m$	RMS spot radius/ $\mu\text{m}$				
		90%<	80%<	50%<	20%<	10%<
Transmitting optical system	2	52.5	48.9	44.8	40.5	38.9
	9	42.2	40.1	37.6	36.5	32.3
	16	38.9	37.0	36.4	35.2	32.7
	23	38.5	36.7	35.5	32.8	29.5
	30	35.5	30.8	29.5	28.4	20.8
Receiving optical system	2	20.1	19.5	18.7	16.2	15.4
	9	18.9	17.6	15.8	10.9	9.5
	16	17.8	16.5	14.3	10.7	9.3
	23	16.8	16.4	13.7	10.6	9.2
	30	15.2	15.8	12.5	9.8	9.1

从表 2 可以看出, 透镜加工公差使得发射系统和接收系统点列斑 RMS 半径均超过要求误差, 聚光

能力受到影响。将液体透镜曲率半径设置为补偿变量再次进行公差分析, 结果如表 3 所示。经过液体透镜补偿后, 共光路系统的加工公差可以达到设计需求, 但当仪器加工装调后需要对探测距离和液体透镜曲率半径的关系进行精确定标。

表 3 补偿后公差分析结果

Tab.3 Results of tolerance analysis after compensation

System	$l_2/m$	RMS spot radius/ $\mu\text{m}$				
		90%<	80%<	50%<	20%<	10%<
Transmitting optical system	2	25.5	24.8	23.9	22.2	21.4
	9	18.6	17.6	16.4	12.5	11.2
	16	10.4	9.9	9.3	9.0	8.7
	23	7.9	7.5	7.1	6.4	6.3
	30	5.7	5.6	4.3	3.9	3.5
Receiving optical system	2	7.9	7.8	7.4	7.2	7.1
	9	6.5	6.3	5.5	4.7	4.5
	16	5.1	4.9	4.5	4.3	4.2
	23	4.2	4.1	4.0	3.8	3.6
	30	3.5	3.4	3.3	3.2	3.1

## 4 实验验证

为了验证三维激光测距仪的原理可行性, 将液体透镜放置于固定焦距平行光管与探测器的转接管内靠近探测器的一侧(图 18), 对有限远靶标板进行成像。

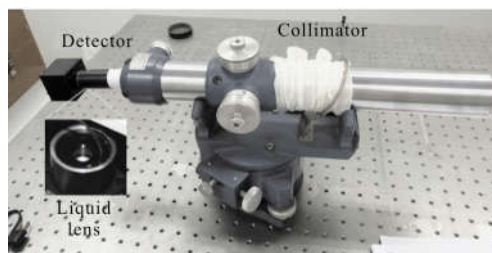


图 18 原理验证实验

Fig.18 Principle of verification experiment



将标靶放置于平行光管前 5 m 处,通过调节液体透镜光焦度,使探测器成像清晰,探测结果如图 19 所示。从图中可以看出,当液体透镜光焦度为 0 时,平行光管成像到无穷远,靶标成像非常模糊,无法分辨;通过调节液体透镜的光焦度,当靶标图像成像清晰时,液体透镜的光焦度为 $-2.677$ 。通过改变液体透镜的光焦度,即改变光学系统的焦距,实现了对近距离物体的清晰成像,验证了液体透镜三维激光测距仪仪器研制的可行性。

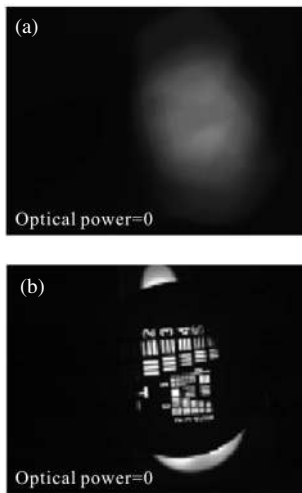


图 19 液体透镜不同光焦度情况下图像

Fig.19 Image with different optical power of liquid lens

## 5 结 论

文中设计了用于动车组三维形貌测量的激光雷达共光路光学系统。采用矩阵理论对透镜链扩束准直系统进行了理论分析。利用激光雷达测距方程计算得到激光雷达光学系统口径和与之对应探测器接收到的光功率。为了达到测量精度,采用液体透镜对发射光学系统进行调焦,实现激光雷达在 2~30 m 范围内的测量。通过几何光学理论分析和光学优化设计,在整个测量范围内,被测物表面光斑尺寸均小于  $20\ \mu\text{m}$ ,在接受系统面阵探测器像面上的图像半径均小于  $8\ \mu\text{m}$ ,能量最集中区域半径小于  $1.6\ \mu\text{m}$ ,满足

用户要求。通过公差分析和实验验证,充分证明了光学方案的可行性。该光学结构形式不仅提高了系统同轴度、减小了外部干扰,而且采用液体透镜代替机械运动部件,即简化了结构、缩小了仪器体积还避免了调焦引起的机械振动。

## 参考文献:

- [1] Han Xiaochun. Laser 3D imaging radar optical system [D]. Nanjing: Nanjing University, 2014. (in Chinese)
- [2] Zheng Shumin, Xia Guofang, Hu Chunmei. Application research of terrestrial Lidar technology in grotto temple elevation precise surveying and mapping [J]. *Laser Journal*, 2016, 37(1): 5–8. (in Chinese)
- [3] Zhang Xinting. Research on the key technology of lidar 3D topography measurement system [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2015. (in Chinese)
- [4] Albert B. Laser Radar System [M]. Boston: Artech House, 1992.
- [5] Yan Jixiang, Wei Guanghui, Ha Liuzhu. Matrix Optics [M]. Beijing: Ordnance Industry Press, 1995. (in Chinese)
- [6] Zhang Xinting, An Zhiyong, Kang Lei. Design of 3D laser radar transmitting/receiving common path optical system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(6): 0618004. (in Chinese)
- [7] Zhang Le. Study on laser radar transmitting and receiving optical system [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2004. (in Chinese)
- [8] Zhang Xinting, Kang Lei, An Zhiyong. Laser radar launching/receiving optical system design for three-dimensional shape measurement [J]. *Applied Optics*, 2015, 36(3): 337–342. (in Chinese)
- [9] Wang Ying. Design of 3D laser radar transmitting/receiving system optical machine structure [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2015. (in Chinese)
- [10] Guo Yulan, Wan Jianwei, Lu Min. Lidar target 3D attitude estimation [J]. *Optical and Precision Engineering*, 2012, 20(4): 843–850. (in Chinese)