

文章编号 1004-924X(2011)08-1723-07

# 机载激光对埋地管道的自主定位

刘海芳<sup>1,2\*</sup>, 王 瑞<sup>2</sup>, 钟诗胜<sup>1</sup>, 刘克强<sup>2</sup>

(1. 哈尔滨工业大学 机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 哈尔滨工业大学(威海) 船舶学院, 山东 威海 264209)

**摘要:**为实现用机载激光对埋地天然气管道泄漏进行遥感检测,提出了机载激光自主定位管道的定位测量方法,利用机载 GPS 和惯性姿态测量系统得到载机的位置和姿态,结合已知的埋地管道地理位置信息,采用解析几何中的点法式求出激光对管道的自主定位点;然后利用坐标转换求出激光束在载机坐标系中的方位角和俯仰角,通过机械机构驱动激光完成对管道的引导定位。利用自行研制的激光夹持对准机构进行了地面定点实验,结果显示,地面定位最大误差为 8.4 m,平均定位误差 $<6.9$  m;若进一步提高载机姿态、位置传感器精度及执行机构精度,激光对管道的引导定位误差会更小。结果表明本文所阐述的激光对埋地管道自主定位算法可用于机载激光对埋地天然气管道的遥感检测。

**关键词:**机载激光;埋地管道;遥感检测;自主定位;坐标转换

**中图分类号:** TN249; V243.5 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111908.1723

## Helicopter-borne laser autonomous positioning of buried pipeline

LIU Hai-fang<sup>1,2\*</sup>, WANG Rui<sup>2</sup>, ZHONG Shi-sheng<sup>1</sup>, LIU Ke-qiang<sup>2</sup>

(1. School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. School of Naval Architecture, Harbin Institute of Technology(Weihai), Weihai 264209, China)

\* Corresponding author, E-mail: moyuzharen@163.com

**Abstract:** To realize the remote detection of the leak of a buried natural gas pipeline by an airborne laser, a helicopter-borne laser autonomous positioning method for the buried natural gas pipeline was presented. Based on the position and attitude of the carrier aircraft obtained by an airborne GPS and an inertial attitude measurement system, the laser autonomous positioning point of the pipeline was obtained based on the known location information and by the space vector method. Furthermore, the azimuth and pitch angles of the airborne laser were solved through the coordinate transformation. Finally, driven by the mechanism, the laser-guiding positioning of the pipeline was fulfilled. With application of the laser clamping alignment mechanism independently developed by ourselves, the ground point-fixed experiment proves that the proposed algorithm can offer the accuracy of the ground positioning by 6.9 m, and it will be more accurate when the precision of the carrier aircraft attitude and the position sensor is further improved. Experiments demonstrate that the algorithm is suitable for the remote detection of the buried natural gas pipeline by airborne lasers.

收稿日期: 2010-12-13; 修订日期: 2011-01-15.

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (No. 2008AA06Z208)

**Key words:** airborne laser; buried pipeline; remote detection; autonomous positioning; coordinate transformation

## 1 引言

针对传统的长距离、高压、大管径天然气输送管道泄漏检测方法效率低、定位精度不高、易误报的缺点,提出利用直升机搭载激光检测装置对管道泄漏进行空中遥感检测。机载激光对天然气输送管道泄漏检测技术是将基于可调谐半导体激光吸收光谱技术(TDLAS技术)的管道泄漏气体检测仪安装于低空飞行的直升机上,气体泄漏检测是通过对探测器捕捉到的地面扩散气体进行激光辐射光谱分析实现的。通过控制系统将检测激光实时指向待检测管道,如果存在甲烷泄漏,泄漏的甲烷会在泄漏点附近形成一泄漏气团,激光束通过泄漏气团会部分被吸收,透过泄漏气团的激光被气团后的物体反射回来,由探测器接收并解调出光谱信号,从而确定检测点和探测器之间的甲烷积分浓度,由此判断输气管道是否发生泄漏<sup>[1-2]</sup>。可见检测激光是否对准待检测管道是实现可靠泄漏检测的前提。目前,用于西气东输、南气北送的长距离、大管径、高压输气管道大都深埋地下1 m,检测激光为不可见光,无法通过常规的反馈式探测器确定激光是否指向待检管道,因此研究在此特殊应用背景下机载激光对管道的对准算法具有特殊意义。在此特殊应用背景下,本文基于已知机载平台的位姿信息及待检测管道铺设的地理信息研究了机载激光对管道的自主定位。

## 2 机载激光对管道的自主定位方法

### 2.1 自主定位系统的组成

机载激光对管道定位的实验系统如图1所示。

其中由机载GPS定位系统提供载机的位置,航空姿态测量系统输出载机当前的姿态,根据待检测管道的地理信息,通过工控机借助算法首先获取载机与管道扫描点之间的相对位置信息,然

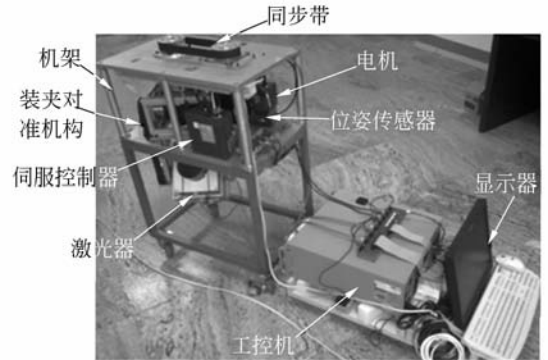


图1 机载天然气泄漏检测实验系统

Fig. 1 Remote helicopter-borne laser detector

后利用载机的姿态信息获取激光束的方向角及俯仰角,最后由二自由度驱动机构实现激光束的对准工作。由此可见,在此特殊应用背景下,机载激光对管道的自主定位实际上是先定位后引导两个过程。

### 2.2 激光对管道检测点的定位<sup>[3]</sup>

地面目标区别于空中目标的突出特点是:目标往往受到管道网和变化的地形条件等外部因素的制约,这些因素往往是可以预先获知的,因此可以利用这些信息特别是管道信息提高定位的精度。管道网可用一系列点和连接这些点的管段来表示,每个管段可以由它的两个端点及管道的宽度来定义。设管段的两个端点分别为  $A = (x_1, y_1, z_1)$  和  $B = (x_2, y_2, z_2)$ , 其宽度为  $W$ 。GPS测得的载机位置为  $P = (x_0, y_0, z_0)$ 。由激光器对管道的最小距离确定定位点  $T = (x_t, y_t, z_t)$ , 如图2所示。

点  $T$  的位置可用解析几何中的点法式求解,具体过程如下:

$$(1) \text{ 过 } P \text{ 点, 以 } \overline{AB} \text{ 为法向量的平面方程为 } (x-x_0)(x_2-x_1) + (y-y_0)(y_2-y_1) + (z-z_0)(z_2-z_1) = 0, \quad (1)$$

(2) 管段所代表的直线  $AB$  方程为

$$\frac{x-x_1}{x_2-x_1} = \frac{y-y_1}{y_2-y_1} = \frac{z-z_1}{z_2-z_1}, \quad (2)$$

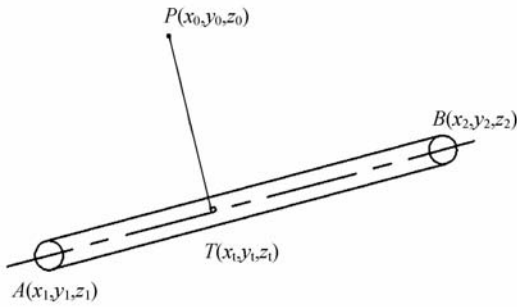


图 2 管道上激光扫描点求解图

Fig. 2 Diagram of orientation point

令式(2)等于  $t$ , 将式(2)带入式(1), 解得

$$t = \frac{(x_2 - x_1)(x_0 - x_1) + (y_2 - y_1)(y_0 - y_1) + (z_2 - z_1)(z_0 - z_1)}{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}$$

将  $t$  带入式(2), 得到  $T$  点在大地坐标系里的位置

$$\begin{cases} x_t = x_1 + t(x_2 - x_1) \\ y_t = y_1 + t(y_2 - y_1) \\ z_t = z_1 + t(z_2 - z_1) \end{cases} \quad (3)$$

据此, 即可以根据实时测得的载机位置  $P = (x_0, y_0, z_0)$  获得已知检测管道上激光的扫描点  $T$  点的空间位置  $(x_t, y_t, z_t)$ 。矢量  $PT$  即要调整的激光束的方向。

### 2.3 引导激光束的计算

#### 2.3.1 坐标系定义<sup>[4]</sup>

由于 GPS、激光检测装置、航空姿态测量系统所输出的数据分别位于不同的坐标系, 因此在进行机载激光的引导定位中需要进行坐标转换。本文首先按不同的传感器采样时所对应的基准不同定义不同的坐标系: WGS-84 坐标系、东北天坐标系、载体坐标系, 然后采用坐标转换法来处理引导过程的不同坐标系的转换。

##### (1) WGS-84 坐标系 $(e) oxyz$ :

WGS-84 世界大地坐标系即美国国防部 1984 年世界大地坐标系。其坐标原点是地球中心,  $x$  轴是格林威治子午面与地球赤道平面的交线,  $y$  轴是东经  $90^\circ$  子午面和地球赤道平面的交线,  $z$  轴和  $x$  轴  $y$  轴构成右手坐标系。

##### (2) 东北天坐标系 $(n) o'-x'y'z'$ :

其原点设在载体中心, 其中  $o'$  沿  $oo'$  方向向外,  $o'x'$  沿  $o'$  所在纬度圈的切线方向,  $o'y'$  沿  $o'$  所在经度圈切线方向。( $\lambda$  表示  $o'$  所在处的经度值,

$\varphi$  表示  $o'$  所在处的纬度值)。WGS-84 坐标系和东北天坐标如图 3 所示。

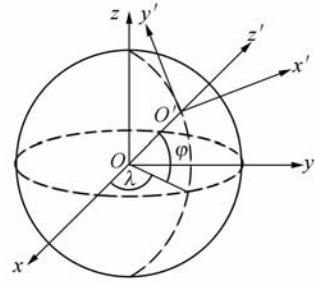


图 3 WGS-84 坐标系和东北天坐标系示意图

Fig. 3 Sketch map of coordinate "WGS-84" and "East-North-Sky"

##### (3) 载体坐标系 $(b)$ :

原点在载机中心,  $x$  轴沿飞机横轴向右(即指向前进路线的右方),  $y$  轴沿飞行器纵轴向前(即指向前进方向),  $z$  轴垂直于  $x$  轴和  $y$  轴, 并构成右手坐标系(指向天)。当载体运动时, 其原点及坐标轴方向相对于地平直角坐标系随之改变。

机载管道泄漏激光检测装置固连在载体上, 采用方位、俯仰式结构, 规定激光束方位角以机头方向为零点, 向右顺时针转为正, 逆时针为负, 激光束俯仰角以飞机  $x$  轴和  $y$  轴所确定的平面为零点, 向上为负, 向下为正。

#### 2.3.2 坐标转换<sup>[5]</sup>

管道泄漏激光检测装置一旦接收到系统传来的载机位置、姿态信息和管道信息数据库中的管道信息便可通过如下坐标转换过程实现激光束旋转方位角和俯仰角的解算, 见图 4。

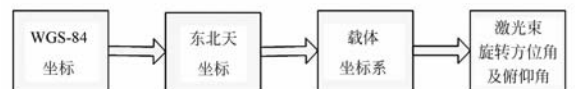


图 4 坐标系转换过程

Fig. 4 Process of coordinate transformation

##### (1) GPS 坐标与 WGS-84 坐标系转换

这项转换需将 GPS 模块获得的吊舱以及待检管道的经纬度和高度值转换为 WGS-84 坐标系坐标值, 转换公式如下:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (N+H) \cos \varphi \cos \lambda \\ (N+H) \cos \varphi \sin \lambda \\ (N(1-e^2)+H) \sin \varphi \end{pmatrix}, \quad (4)$$

式中,  $N = \frac{a}{\sqrt{1-e^2(\sin \lambda)^2}}$ ;  $a = 6\,378\,137$  m 为地球长半径,  $e^2 = 0.006\,694\,379\,995$  为第一偏心率的平方,  $\lambda, \varphi, H$  为 GPS 测得的载机和待检测的管道段起点和终点的经纬度和高度值。

(2) WGS-84 坐标转换到东北天坐标

WGS-84 坐标转换到东北天坐标, 转换过程

$$\mathbf{T}_n' = \begin{bmatrix} \cos \theta_H \cos \theta_R - \sin \theta_H \sin \theta_P \sin \theta_R & -\sin \theta_H \cos \theta_P & \cos \theta_H \sin \theta_R + \sin \theta_H \sin \theta_P \cos \theta_R \\ \sin \theta_H \cos \theta_R + \cos \theta_H \sin \theta_P \sin \theta_P \sin \theta_R & \cos \theta_H \cos \theta_P & \sin \theta_H \sin \theta_R - \cos \theta_H \sin \theta_P \cos \theta_R \\ -\cos \theta_P \sin \theta_R & \sin \theta_P & \cos \theta_P \cos \theta_R \end{bmatrix}. \quad (6)$$

### 2.3.3 激光束角度的计算

由图 2 可知, 矢量  $\mathbf{PT}$  是在大地坐标系中要调整的激光束的方向, 而激光束调整机构位于载体坐标系中, 因此要利用上述坐标转换矩阵, 计算出

$$\begin{bmatrix} \mathbf{m} \\ \mathbf{n} \\ \mathbf{k} \end{bmatrix} = (\mathbf{T}_e^n \mathbf{T}_n^b)^{-1} \begin{bmatrix} x_t - x_0 \\ y_t - y_0 \\ z_t - z_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11}(x_t - X_0) + T_{12}(y_t - y_0) + T_{13}(z_t - z_0) \\ T_{21}(x_t - X_0) + T_{22}(y_t - y_0) + T_{23}(z_t - z_0) \\ T_{31}(x_t - X_0) + T_{32}(y_t - y_0) + T_{33}(z_t - z_0) \end{bmatrix}, \quad (7)$$

利用该向量的 3 个分量即可完成激光束旋转方位角  $\alpha$ 、俯仰角  $\beta$  的解算 ( $\alpha, \beta$  的单位为  $^\circ$ ), 即:

$$\alpha = 180 \times \arctan(\mathbf{m}/\mathbf{n}) / \pi, \quad (8)$$

$$\beta = 180 \times \arctan(\mathbf{k}/\sqrt{\mathbf{m}^2 + \mathbf{n}^2}) / \pi. \quad (9)$$

文中规定: 方位角  $\alpha$  向右顺时针为正, 逆时针为负; 俯仰角  $\beta$  向下为正, 向上为负。在此特殊应用背景下,  $\mathbf{k} < 0$ , 具体旋转方向及角度大小见表 1。

表 1 旋转角大小和方向

Tab. 1 Values and directions of rotation angles

象限	方位角/ $^\circ$	俯仰角/ $^\circ$
$m > 0; n > 0; k < 0$	$\alpha$	$\beta$
$m < 0; n < 0; k < 0$	$180 + \alpha$	$\beta$
$m > 0; n < 0; k < 0$	$180 + \alpha$	$\beta$
$m < 0; n > 0; k < 0$	$\alpha$	$\beta$
$m = 0; n = 0; k < 0$	$\alpha$ 任意	$90$
$m = 0; n < 0; k < 0$	$180$	$\beta$
$m = 0; n > 0; k < 0$	$0$	$\beta$
$m > 0; n = 0; k < 0$	$90$	$\beta$
$m < 0; n = 0; k < 0$	$270$	$\beta$

需要使用通过 GPS 测出的经纬度值, ( $\lambda$  表示载机所在处的经度值,  $\varphi$  表示载机所在处的纬度值), 其转换矩阵为:

$$\mathbf{T}_e^n = \begin{bmatrix} -\sin \varphi & -\sin \lambda \cos \varphi & \cos \lambda \cos \varphi \\ \cos \varphi & -\sin \lambda \sin \varphi & \cos \lambda \sin \varphi \\ 0 & \cos \lambda & \sin \lambda \end{bmatrix}. \quad (5)$$

(3) 东北天坐标转换到载体坐标

将东北天坐标系绕  $z$  轴旋转方位角  $\theta_H$ , 绕旋转后的  $y$  轴旋转俯仰角  $\theta_P$ , 再绕旋转后的  $x$  轴旋转横滚角  $\theta_R$  即可实现转换, 转换矩阵如式(6)所示:

激光束矢量  $\mathbf{PT}$  在载体坐标系下的向量。这里, 令激光束  $x$  方向的向量用  $\mathbf{m}$  表示,  $y$  方向的向量用  $\mathbf{n}$  表示,  $z$  方向的向量用  $\mathbf{k}$  表示, 则

程序中设定: 当  $\alpha$  为任意角时, 即当载机刚好处于待检测管道点正上方时, 方位电机不动, 俯仰电机转过相应角度即可。

## 3 实验设计

通过具体实验对机载激光对管道定位和引导过程进行模拟, 检验激光对管道的定位算法及坐标转换方法在机载激光对管道引导定位中应用的实用性和精度, 以及应用机载平台对埋地天然气管道进行泄漏检测的可行性。

### 3.1 实验方案

采用定点实验方法, 选取学校内一栋 26 层家属楼, 将图 1 所示的实验设备放置在 26 层楼顶上, 楼前一条马路用于模拟铺设的天然气管道。实验准备阶段, 机构复位, 先用 GPS 记录楼顶检测装置位置数据, 此点模拟载机位置, 罗盘北向与载机机头方向平行, 用罗盘记录此时载机的 3 个姿态角; 同时记录模拟管道的那条道路位置信息。

在此观测点对马路进行定位,通过解算得到此刻激光在管道上的定位点及此时激光束的方位角和俯仰角。将得到的定位点用 GPS 在马路上标示,然后在检测装置前加一可见光,检测装置复位,保持测量平台位姿不变,电机驱动激光器转过刚才计算得到的方位角和俯仰角,将可见光照在马路上的位置标示,通过数据处理,比较激光实际在地面的定位点与已标示的计算点之间的距离,得到用此计算方法和设备得到的激光束的定位引导精度,从而验证算法的正确性及方案的可实施性。

3.2 实验主要仪器及说明

实验系统采用 Garmin 的 GPS25 模块,该 GPS 模块具有定位快,授时精度高,重捕获能力强,体积小,使用简单方便等一系列优点。Garmin25 OEM 板提供定位数据, Garmin25 OEM 板天线位置与激光器位置重合。采用 XW LP3300 三维固态电子罗盘测得载机的姿态信息,实际工作中,应该选用精度较高的惯导平台测得载机的姿态信息,利用自行研制的如图 1 所示的装夹机构实现激光束对管道的引导定位。本次实验所使用的 Garmin25 OEM 板采用差分定位,误差为 5 m, XW LP3300 三维固态电子罗盘方位角精度为  $\pm 0.50^\circ$ , 俯仰角和滚转角精度为  $\pm 0.10^\circ$ 。

4 实验数据分析

4.1 实验数据

取多次定点实验中的一次数据进行分析,激光器姿态信息和位置数据如表 2 所示,要检测的模拟管道的位置数据如表 3 所示。表中经纬度数值为 GPS 直接测得的格式。

表 2 激光器所在位置及姿态信息

Tab. 2 Locations and attitudes of device

测量次数	纬度	经度	海拔高度/m	姿态角/(°)		
				偏航	俯仰	滚转
1	3731.93091	12204.29758	81.1	15.2	5.3	0.3
2	3731.93091	12204.29758	81.1	96.3	5.8	3.3
3	3731.94082	12204.27654	81.1	94.3	5.0	2.3
4	3731.95056	12204.29604	81.1	246.0	15.5	6.3

表 3 模拟管道位置信息

Tab. 3 Locations of observation pipes

	纬度	经度	海拔高度/m
起点	3731.87031	12204.27616	5.6
终点	3731.90049	12204.33698	5.6

4.2 实验数据处理

采用 VC++ 编写的数据处理软件对数据进行处理。在引导定位过程中,把表 2,表 3 的数据带入调试程序,可得到定位点的大地坐标和此时激光束的偏转角度,如表 4 所示。将表 4 中得到的定位点用 GPS 在地面标出。然后启动实验装置,装置复位后,将得到的激光束偏转角度直接输入调试程序中,控制电机带动可见光转过该角度,将可见光照射在地面的位置与先前得到的定位点位置进行比较,得到的定位误差数据如表 5 所示。

表 4 管道上定位点位置及激光对应的方位角和俯仰角

Tab. 4 Locations on pipes and angles of laser

测量次数	纬度	经度	海拔高度/m	方位角/(°)	俯仰角/(°)
1	3731.89488	12204.32582	5.6	-131.1	39.9
2	3731.89488	12204.32582	5.6	-58.4	44.4
3	3731.89017	12204.31568	5.6	-57.6	35.2
4	3731.89983	12204.33581	5.6	109.3	36.7

表 5 激光束的引导定位误差

Tab. 5 Orientation errors of observation points

测量次数	误差/m
实验 1	7.2
实验 2	6.6
实验 3	8.4
实验 4	5.4

综合实验数据,在引导定位过程中,标示的计算点都在模拟管道附近,激光在地面的定位点与计算点之间最大定位误差为 8.4 m,平均定位误差为 6.9 m,以上数据均为定点实验数据,实验中载机位置固定,忽略实际工作中飞机振动对引导定位的影响。因此,在实际应用中,动态的定位和引导误差要大一些(因篇幅限制,另文介绍引导定位误差的影响因素)。由上述分析的定位引导过

程可见,定位过程主要由载机位置和管道位置决定,引导过程主要根据定位点信息由载机姿态信息算出角度,然后控制系统驱动执行机构完成指定角度的旋转。对激光束引导定位误差进行仿真分析可知<sup>[6-7]</sup>:若忽略机构执行精度和控制精度对激光定位误差的影响,影响激光对地定位精度的主要因素为测得的载机姿态的精度,其次为 GPS 测得的载机位置精度。如文中所述采用的 GPS 和罗盘,其精度还有很大的提升空间<sup>[8-9]</sup>,如果选用更精密的实验仪器(如使用惯导平台和高精度 GPS 提高载机位置、姿态测量精度),激光的引导定位精度会更高。

## 5 结 论

本文提出了机载激光自主定位管道的测量定位方法,在机载平台上应用 GPS 技术和已知的待检测管道的地理信息,利用点法式求解激光自主定位管道位置点,通过坐标转换实现机载激光引

导过程。最后,用自行研制的实验机构对机载激光测量定位方法进行地面定点检验,实验结果表明:载机静止时激光在地面的引导定位平均误差在 6.9 m 以内,具有一定的精度水平。经另文分析,载机姿态、位置的测量精度是影响定位引导精度的最主要因素,若使用更精密的位置姿态测量仪器,可以提高定位引导精度。这些结论表明文中提出的自主定位方法和引导过程原理是正确的,可以用于机载激光对埋地天然气管道的遥感检测。但必须认识到,由于飞行过程中其吊舱位置和姿态是时刻变化的,而且受气流影响,可能存在剧烈晃动,同时,通过 GPS 采集的空中位置信息和罗盘采集的飞机姿态信息存在一定的误差。激光发射装置在空中恶劣的工作环境中,做到光束时刻锁定在很小的一个区域带内,技术难度很高。因此将此原理应用于机载泄漏检测时,为满足实时性与精确性要求,在 GPS 和载机姿态数据处理上,引导定位算法上,机构设计上以及泄漏检测处理算法上还要做大量的工作。

## 参考文献:

- [1] WANG M, ZHANG Y J, LIU J G. Applications of a tunable diode laser absorption spectrometer in monitoring greenhouse gases [J]. *Chinese Optics Letters*, 2006(6):1007-1100.
- [2] 陈东, 刘文清, 张玉钧. 开放光程 TDLAS 系统对北京城区 NH<sub>3</sub> 浓度的连续检测[J]. *光学技术*, 2007(3):310-314.  
CHEN D, LIU W Q, ZHANG Y J. Successive measurement of atmospheric ammonia in urban area of Beijing using open\_path TDLAS system [J]. *Optical Technique*, 2007(3):310-314. (in Chinese)
- [3] 李瑰贤. 空间几何建模及工程应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007.  
LI G X. *Spatial Geometry Modeling and Its Application in Engineering* [M]. Beijing: High Education Press, 2007. (in Chinese)
- [4] 刘晶红, 孙辉. 航空光电成像平台的目标自主定位[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(8):1305-1310.  
LIU J H, SUN H. Target self-determination orientation based on aerial photoelectric platform [J]. *Opt. precision Eng.*, 2007, 15(8):1305-1310. (in Chinese)
- [5] 张葆, 姚俊峰, 高利民. 机载 GPS 测量定位技术研究[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(2):172-178.  
ZHANG B, YAO J F, GAO L M. Measuring orientation technology based on airborne GPS [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(2):172-178. (in Chinese)
- [6] 王家骥, 金光, 颜昌翔. 机载光电跟踪测量设备的目标定位误差分析[J]. *光学精密工程*, 2005, 13(2):105-116.  
WANG J Q, JIN G, YAN CH X. Orientation error analysis of airborne opto-electric tracking and measuring device [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(2):105-116. (in Chinese)
- [7] 毛英泰. 误差理论与精度分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 1982.  
MAO Y T. *Theory of Error and Precision and Analysis* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1982. (in Chinese)
- [8] 朱军. 机载 GPS 的技术现状和发展[J]. *铁路计算机应用*, 2003, 12(2):34-38.  
ZHU J. Technology of GPS for aerial triangulation and its present situation [J]. *Railway Computer Application*, 2003, 12(2):34-38. (in Chinese)
- [9] 杨全显, 袁赣南. 基于 MIMU/GPS 的组合导航设计

及实验[J]. 光学精密工程, 2008, 16(2): 283-294.

YANG J X, YUAN G N. Design and experiment for INS based on MIMU/GPS [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(2): 283-294. (in Chinese)

[10] 朱本仁. 蒙特卡洛方法引论[M]. 济南: 山东大学出

版社, 2006.

ZHU B R. *Introduce of Mont Carlo Method* [M]. Ji-nan: Shandong University Press, 2006. (in Chinese)

#### 作者简介:



**刘海芳**(1971—), 女, 山东威海人, 博士研究生, 副教授, 1995年于江南大学获得硕士学位, 主要从事产品数字化设计与制造, 故障诊断方面的研究。E-mail: moyuzhairen@163.com



**王 瑞**(1978—), 男, 河南桐柏人, 讲师, 2003年、2007年于哈尔滨工业大学获得硕士、博士学位, 主要从事产品数字化设计与制造的研究。E-mail: wrhit@163.com



**钟诗胜**(1964—), 男, 江西龙南人, 教授, 博士生导师, 1990年于华南理工大学获得硕士学位, 1995年于华中理工大学获得博士学位, 现为哈尔滨工业大学(威海)副校长, 主要从事智能及其应用、产品数字化设计与制造、故障诊断等方面的研究。E-mail: zhongss@mail.hitwh.edu.cn



**刘克强**(1986—), 男, 山东青岛人, 硕士研究生, 主要从事产品数字化设计与制造的研究。E-mail: keqiang\_87832813@163.com

#### ●下期预告

## 980 nm 高功率垂直腔面发射激光列阵的单元结构优化

张 星, 宁永强, 曾玉刚, 秦 莉, 刘 云, 王立军

- (1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 激发态物理重点实验室, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

为了提高 980 nm 垂直腔面发射激光器(VCSEL)列阵的整体性能, 对 VCSEL 列阵单元器件的分布布拉格反射镜(DBR)反射率进行了优化设计。分析了 VCSEL 列阵单元器件 DBR 反射率与阈值电流, 输出功率及转换效率之间的关系, 在维持较低阈值电流的前提下适当调节了 N-DBR 的反射率, 使单元器件斜率效率得到了有效提高, 进而改善了 VCSEL 列阵的整体输出特性。优化 DBR 反射率后研制出的包含 64 个单元的 VCSEL 列阵器件在注入电流为 6 A 时连续输出功率为 2.73 W; 在脉宽 100 ns, 重复频率 100 Hz 的 130 A 脉冲电流驱动下输出功率达到 115 W; 包含 300 个单元的列阵器件在注入电流为 18 A 时连续输出功率达到 5.26 W。对 N-DBR 反射率进行优化后, VCSEL 列阵的整体输出特性得到了有效改善。