

基于扫描激光雷达的列车速度测量系统

刘常杰¹, 刘洪伟¹, 郭寅¹, 刘邈¹, 张宾², 叶声华¹

- (1. 天津大学 精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072;
2. 天津市航空易思维科技有限公司, 天津 300072)

摘要: 针对传统列车速度测量装置存在量程小、调试复杂等问题, 基于扫描激光雷达技术, 设计了一套适用于高速列车动态限界测量的列车速度测量系统。将扫描激光雷达固定在距列车 10m 左右的位置上, 根据激光脉冲飞行时间测距原理, 沿列车行驶方向对进入扫描范围内的列车车身逐点扫描, 获得由测量点组成的车身轮廓信息; 通过最小二乘拟合车厢测量点, 得到列车行驶轨迹, 确定列车行驶方向; 采用分段线性差值确定相邻两次测量周期内列车行驶的距离, 完成列车速度的测量。结果表明: 该测速系统操作方便, 量程可达 600km/h, 测速误差控制在 $\pm 1.2\%$ 以内, 可以满足高速列车速度测量需求。

关键词: 列车测速; 扫描激光雷达; 最小二乘法; 分段线性插值

中图分类号: TN24 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)01-0285-06

Train speed measurement system based on the scanning laser radar

Liu Changjie¹, Liu Hongwei¹, Guo Yin¹, Liu miao¹, Zhang Bin², Ye Shenghua¹

- (1. State Key Laboratory of Precision Measuring Technology & Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China;
2. Tianjin Aviation Isvision Tech Co., Ltd, Tianjin 300072, China)

Abstract: Concerning the difficulties such as small measuring range and complicated operation in traditional train speed measure device, a new speed measuring system for dynamic clearance limit measurement of high-speed train is designed based on scanning laser radar. The scanning laser radar fixed in the position of 10 meters from the train. According to the principle of pulsed time-of-flight laser ranging, after the train enters the scan range the scanning laser radar scans the train point by point along the direction of train obtains the body contours. Process measurement data of cars with least square method to obtain the track and direction of the train. The travel distance of the train during two adjacent measurement cycle can be measured through piecewise linear interpolation. Complete the train speed measurement through the above work. Field experiments show that the system is easy to operate with capacity of 600 km/h and the system measurement error is less than 1.2% meets the demand of high-speed train velocity measurement.

Key words: train speed measurement; scanning laser radar; least square method; piecewise linear interpolation

收稿日期: 2013-08-15; 修订日期: 2014-06-10

基金项目: 天津市科技型中小企业技术创新专项基金(05ZHCXGX21200)

作者简介: 刘洪伟(1987-), 硕士生, 主要从事激光及光电测试技术方面的研究。Email: mliuhongwei@163.com

导师简介: 刘常杰(1973-), 副教授, 主要从事激光及光电测试技术方面的研究。

0 引言

在高速列车动态限界测量中,为了得到列车在不同时速下的倾摆角和偏移量,需要精确测量出列车的行驶速度。根据现场使用要求,动态限界测量系统^[1]中的速度测量装置通常是放置在列车站台上且与列车保持 10 m 左右的距离。由于铁路系统调度的原因,现场测量前的准备时间通常较为紧张,并且为了保证安全,在测量过程中测量人员不能随意靠近站台调试设备。因此,要求测速装置具有安装简单,便于调试,能够实现两个方向上的速度测量。能够在车外测速的方法主要包括雷达测速、光电开关测速^[2]等。微波测速雷达是根据多普勒效应,通过测量多普勒频移得到列车速度。该方法具有可靠性高,远距离测量等优点,但是市场价格较高,量程一般低于 300 km/h(列车速度可达 400 km/h 以上),且测量前需要确定列车行驶方向与雷达微波发射方向的夹角,现场使用较为不便。光电开关测速是在列车运行方向上布置两个间距一定的光电门,测量列车通过两个光电门的时间来得到列车速度,该方法测量成本较低,由于需要摆放两个具有固定间距的光电门,该测速方法对现场环境要求较高,在夜间测量时设备操作困难,且设备安装时间较长(根据现场要求,测试设备安装时间通常不超过 30 min),测量精度受人员操作影响较大。

为了适应测量现场复杂的测量环境,文中采用扫描激光雷达^[3-4]技术测量列车瞬时速度。该系统操作简单,无需标定,能够大大减少现场设备安装时间,有较高的测量精度,量程可达 600 km/h,实现了两个方向上的速度测量且能够辨别列车行驶方向,满足了当前高速列车的速度测量要求。

1 测量系统

1.1 扫描激光雷达系统结构

扫描激光雷达是基于飞行时间法^[5-7]进行测距,获得被测点在扫描激光雷达坐标系下的坐标值。如图 1 所示,系统主要由脉冲激光发射与接收模块^[8-9]、计时模块^[10]、数据处理模块、电机驱动及光学系统等组成。系统工作时,微处理器同时触发脉冲激光发生电路和计时电路,脉冲激光发生电路驱动半导体激光

器发射脉冲激光,经透镜准直聚焦后出射到被测物体,反射光通过接收光学系统汇聚到雪崩光电二极管(APD)转换为电流信号,脉冲激光接收电路将该电流信号转换为电压信号,再经放大电路和时点鉴别电路产生逻辑电平送到计时电路,计时电路停止计时并将计时结果送到微处理器处理,完成一次测距。如图 2 所示,电机工作后将带动反射镜做旋转运动,此时连续测距即可实现对周围物体的扫描测量,得到周围物体的二维形貌。

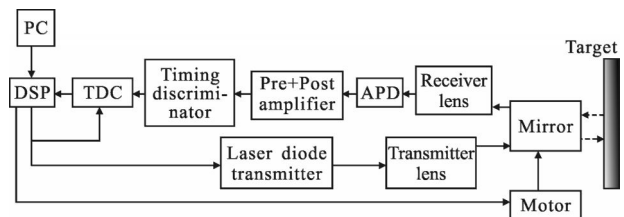


图 1 扫描激光雷达结构框图

Fig.1 Structure block diagram of scanning laser radar

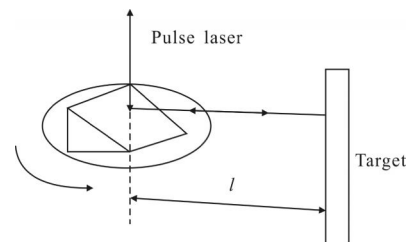


图 2 扫描结构示意图

Fig.2 Diagram of scanning structure

1.2 基本测量原理

列车测速系统主要由扫描激光雷达组成。如图 3 所示,扫描激光雷达固定在三角架上,放置在距列车 10 m 左右的位置上。系统工作时,扫描激光雷达以一定的扫描频率沿列车行驶方向对列车车身进行扫描,得到车身轮廓信息并加以数据处理,完成列车速度的测量,具体测量原理如下:

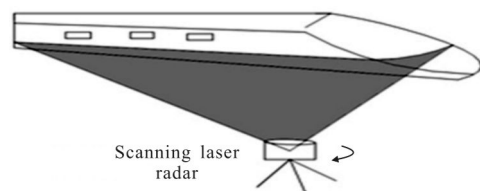


图 3 测量示意图

Fig.3 Diagram of measurement

如图 4 所示,激光扫描雷达的中心点 O 与列车

距离 h , 有效扫描角度为 α , 扫描角度分辨率为 θ 。以点 O 为坐标原点, 建立如图中虚线所示的扫描激光雷达坐标系, 其中 Y' 与 α 的角平分线重合。将扫描激光雷达坐标系旋转 ϕ 角得到图中实线所示的坐标系。当列车行驶到图中 A 位置时, 扫描激光雷达扫描得到 $s_0, s_1, s_2, \dots, s_{n-1}, s_n$ 共 $n+1$ 个距离信息, 此时进入扫描角度范围内的列车车身长度为 L_n , 在不超出扫描激光雷达有效扫描范围的前提下, 经过几个扫描周期, 列车行驶到 B 位置, 扫描激光雷达扫描得到 $s_0, s_1, s_2, \dots, s_{n-1}, s_n, \dots, s_{m-1}, s_m$ 共 $m+1$ 个距离信息, 此时进入扫描角度范围内的列车车身长度为 L_m 。列车从位置 A 行驶到位置 B 的时间 t 由扫描激光雷达的两次扫描时间间隔确定, 求出 L_n 和 L_m 的长度即可测出列车速度。

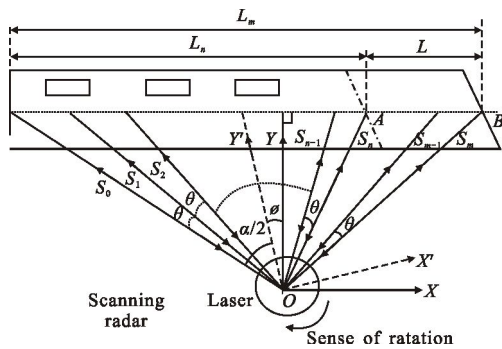


图 4 测量原理图

Fig.4 Measuring principle

由于扫描激光雷达自身存在测距误差, 每组测量点一般不会落在同一条直线上, 通过最小二乘法将每组测量点拟合成一条直线, 将这条直线近似为列车的行驶方向, 求出参数 h 、 ϕ 及列车行驶的距离:

$$s_i = \frac{h}{\cos(\alpha/2 + \phi - i\theta)} =$$

$$\frac{h}{\cos(\alpha/2 + \phi)\cos(i\theta) + \sin(\alpha/2 + \phi)\sin(i\theta)} \quad (i=0, 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

为便于计算将公式(1)作以下变换:

$$y_i = \frac{1}{s_i} = \frac{\cos(\alpha/2 + \phi)\cos(i\theta)}{h} + \frac{\sin(\alpha/2 + \phi)\sin(i\theta)}{h} \quad (i=0, 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

式中: s_i 为扫描激光雷达坐标原点与列车车身被测点的距离的估计量。

令

$$a = \frac{\cos(\alpha/2 + \phi)}{h} \quad (3)$$

$$b = \frac{\sin(\alpha/2 + \phi)}{h} \quad (4)$$

误差方程为:

$$v_i = l_i - y_i = l_i - (a\cos(i\theta) + b\sin(i\theta)) \quad (i=0, 1, 2, \dots, n) \quad (5)$$

式中: l_i 为车身被测点与扫描激光雷达坐标原点之间距离测量值的倒数。

根据误差方程列出正规方程:

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i=0}^n \cos(i\theta)^2 \cdot a + \sum_{i=0}^n \cos(i\theta) \cdot \sin(i\theta) \cdot b &= \sum_{i=0}^n \cos(i\theta) \cdot l_i \\ \sum_{i=0}^n \cos(i\theta) \cdot \sin(i\theta) \cdot a + \sum_{i=0}^n \sin(i\theta)^2 \cdot b &= \sum_{i=0}^n \sin(i\theta) \cdot l_i \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

由公式(3)、(4)和(6)联立求解出未知参数 h 和 ϕ 。

$$L_n = h \cdot \tan(\alpha/2 + \phi) + h \cdot \tan(n\theta - \alpha/2 - \phi) \quad (7)$$

$$L_m = h \cdot \tan(\alpha/2 + \phi) + h \cdot \tan(m\theta - \alpha/2 - \phi) \quad (8)$$

根据公式(7)、(8)求出列车行驶的距离: $L = L_m - L_n$ 。

在实际测量中, 车头形状通常是较为复杂的, 车头部分测量数据随车头与扫描雷达相对位置的变化而变化。为了准确得到两次扫描时间间隔内列车行驶的距离, 需要对两次扫描图像中列车行驶到的位置做出准确判断。

2 测量误差分析

在整个测速系统中, 相邻两次测量周期内列车行驶距离由两次扫描测量得到的列车位置确定, 因此列车高速运动不会产生测量误差。测量误差的主要来源是列车车头最前点坐标判断误差、列车行驶方向的拟合误差和扫描激光雷达的测距误差。列车行驶方向由车厢部分的测量数据通过最小二乘拟合得到, 充分利用了误差平均效应, 拟合出的列车行驶方向误差很小; 在实际测量中, 扫描激光雷达与列车距离 10 m、有效扫描角度为 90° , 测速系统对列车的有效扫描长度可达十几米, 在整个测量范围内扫描激光雷达的测距误差不超过 ± 8 cm, 因此测距误差引起的速度测量误差一般不会超过 $\pm 1.13\%$; 另一个对测量精度影响较大的是测量图像中列车车头位置的判断误差, 通过仿真分析发现, 采用分段线性差值能够有效提高列车车头位置的判断精度。

2.1 车头部分测量误差

如图 5 所示, 曲线 ED 是列车实际的车头轮廓线, 认为点 D 是车头的最前点。图中实线 AE 为激光扫描雷达扫描后得到的轮廓线, 由于扫描激光雷达

有一定的角度分辨率,无法捕获车头轮廓线中的 AD 段。点 A 是单次测量得到的与 D 最近的点, B 和 C 分别是 A, D 在列车运行方向上的投影。可以看到对列车的行驶距离会产生图 5 中的测量误差 BC 。 BC 的大小随列车车头的形状而变化。通过仿真可直观的看到列车车头部分对测量结果的影响。

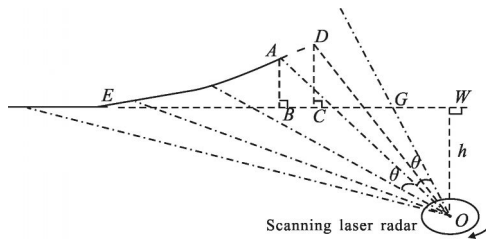


图 5 车头部分测量误差示意图

Fig.5 Measuring error of the train head

2.2 车头部分仿真分析

不同型号的列车,头部外形尺寸有时相差很大,为了适应各种车型的速度测量,需要找到一种有效测量车头位置的方法。测速系统中,扫描激光雷达的两次测距时间间隔为 $0.000\ 04\text{ s}$,扫描角 90° ,扫描频率为 35 Hz 。假设扫描雷达与列车的距离为 10 m ,列车速度 600 km/h ,车头为直径 3 m 的半圆,根据上述参数,不考虑扫描激光雷达的测距误差,用 MATLAB 软件对速度测量进行仿真。

图 6(a)和(b)为列车从不同方向进入扫描范围内,仿真测得的车头部分轮廓图,图 6(c)是对应于

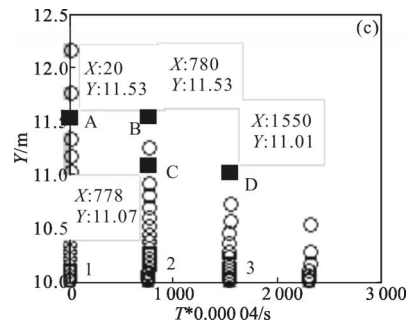
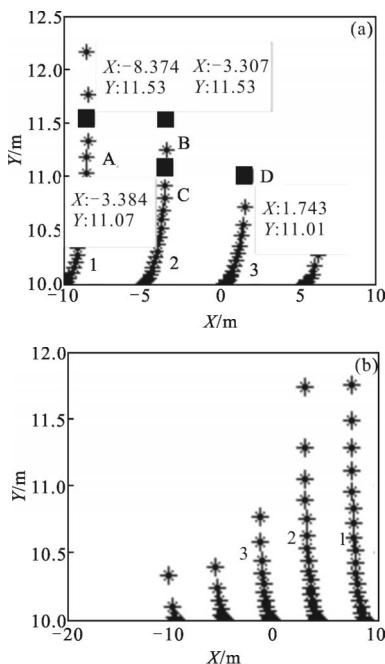


图 6 车头部分仿真测量结果

Fig.6 Simulation results of the train head

图 6(a)中各个测量点的时间信息。图 6(a)中的数据点数从左到右逐渐减少,图 6(b)中的数据点数从左到右逐渐增多。因此从两幅图的数据分布可以判断出列车的行驶方向。

在图 6(a)中, A, B 两点的纵坐标都为 11.53 m ,在不考虑列车摆动的前提下,可以将这两个点近似看作是车头上的同一点在不同图像中的位置。因此 A, B 两点在 X 轴上的差值 $(-3.307+8.374)\text{ m}$ 即为列车行驶的距离,同时在图 6(c)中可以找到列车由 A 行驶到 B 的时间为 $(780-20)\times 0.000\ 04\text{ s}$,可以计算出列车的行驶速度为 600.04 km ,误差为 0.04 km/h 。通常情况下,列车开始进入扫描区域的时刻是不确定的,因此图 6(a)和图 6(b)中车身轮廓线 1 的数据点数也是不确定的(有时可能只有几个点)。为了可靠测量列车速度,可以在图 6(a)中对轮廓线 2、3 中的测量点进行数据处理。例如,轮廓线 3 中,点 D 的纵坐标是 11.01 m ,而在轮廓线 2 中没有纵坐标为 11.01 的测量点,如果用点 C 代替理论上的点,通过计算 C, D 两点在 X 轴上的距离及时间差,可以求出列车的速度为 597.71 km/h ,误差为 2.29 km/h 。显然,这种近似计算可能会产生较大的测量误差,为了提到速度测量的稳定性,可以采用插值方法确定列车行驶位置。

2.3 分段线性插值精度验证

为便于计算,采用分段线性差值,将插值点用折线连接起来逼近原曲线。分段线性差值的基本思想是在每个区间 $[x_i, x_{i+1}]$ 上,用一阶多项式(直线)逼近原曲线 $f(x)$:

$$f(x) \approx p(x) = \frac{x-x_{i+1}}{x_i-x_{i+1}}y_i + \frac{x-x_i}{x_{i+1}-x_i}y_{i+1} \quad x \in [x_i, x_{i+1}] \quad (9)$$

该插值方法计算简单,但失去了原函数的光滑性,因此需要对该差值结果进行精度验证。

将相邻两次测距时间间隔减小为 0.000 002 s,得到测点密度大并且与图 6(a)中的轮廓 1 形状相同的仿真轮廓图 7(a),该仿真数据可以作为各个测点坐标的真实值。图 7(b)是用图 6(a)中轮廓线 1 的仿真数据(取 X 单调递增的数据),以步长 0.001 m 得到的分段线性差值函数曲线图。由于插值步长足够小,基本可以得到车头轮廓线上各个点的坐标值。将仿真得到的测点坐标与插值得到的测点坐标进行对比,验证分段线性差值的精确度,对比结果如表 1 所示。

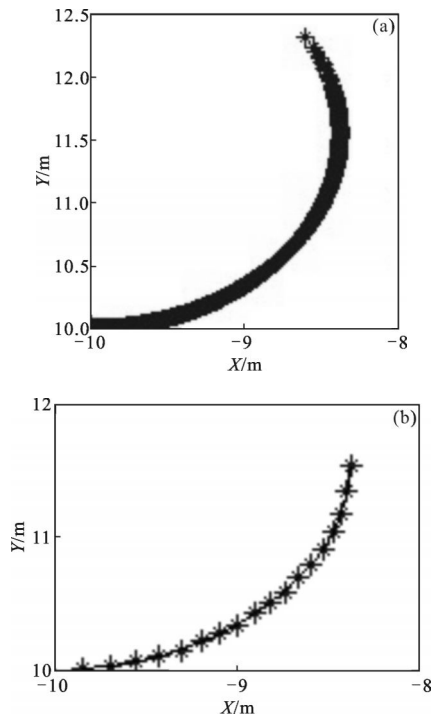


图 7 车头部分仿真测量及插值图像

Fig.7 Interpolated and simulated image of the train head

表 1 分段线性插值精度验证结果

Tab.1 Accuracy verification results of piecewise linear

Measurement points	Simulation data		Interpolation data		Error	
	X/m	Y/m	X/m	Y/m	X/mm	Y/mm
1	10.2	-9.221	10.199 7	-9.218 0	-0.3	-3
2	10.4	-8.926	10.400 2	-8.919 0	0.2	-7
3	10.6	-8.728	10.600 5	-8.721 0	0.5	-7
4	10.8	-8.585	10.799 7	-8.579 0	-0.3	-6
5	11.0	-8.487	10.999 5	-8.481 0	-0.5	-6
6	11.2	-8.423	11.199 4	-8.426 0	-0.6	3
7	11.4	-8.388	11.403 3	-8.384 0	3.3	-4
8	11.5	-8.381	11.504 7	-8.376 0	4.7	-5

由表 1 可以发现,通过分段线性插值得到的车头测量点坐标与由仿真得到的坐标真值的偏差控制在 ± 7 mm 以内。扫描激光雷达对列车的有效扫描长度可达十几米,因此该插值误差对测量结果影响很小。

2.4 仿真实验结果

不考虑扫描激光雷达的测距误差,根据 2.2 节中的仿真条件及 2.3 节中的分段线性差值方法,对列车速度进行仿真测量,仿真结果如表 2 所示。

表 2 列车速度仿真测量结果

Tab.2 Simulation results of train speed

Speed /km · h ⁻¹	Simulation value/km · h ⁻¹			Absolute error/km · h ⁻¹		
	1	2	3	1	2	3
600	599.4	600.02	600.76	-0.6	0.02	0.76
500	500.07	500.4	500.04	0.07	0.40	0.04
400	400.02	400.25	400.32	0.02	0.25	0.32
300	300.28	299.92	300.12	0.28	-0.08	0.12
200	200.14	200.01	200.41	0.14	0.01	0.41
100	99.98	100.43	99.98	-0.02	0.43	-0.02

从表 2 可以看出,测速系统的测量误差控制在 ± 0.8 km/h 左右。说明采用分段线性插值方法处理车头部分的测量数据,能够提高测量结果的稳定性,得到较高的测量精度。

3 测量结果

测量前,将扫描激光雷达固定在三脚架上,放置在距列车 10 m 左右的站台上,调整扫描激光雷达的高度,确保能够扫描到白色的列车车身。为保证测量精度,单次测量过程中测速装置的位置不能移动,并且为避免列车高速行驶过程中产生的震动对测速装置的影响,在三角架的下方挂载重物,测量结果如表 3 所示。

表 3 实验结果

Tab.3 Experimental results

Speed/km · h ⁻¹	Measured value/km · h ⁻¹	Error/%
100	98.8	-1.2
	100.9	0.90
200	197.9	-1.05
	197.7	-1.15
300	302.5	0.83
	298.3	-0.57
350	352.4	0.69
	354.1	1.17

通过测量数据可以发现, 由于扫描激光雷达的测距误差, 该测速系统的测量精度有所下降, 但仍能控制在 $\pm 1.2\%$ 以内。

4 结 论

用扫描激光雷达扫描列车车身, 得到由测量点构成的车身轮廓信息, 通过最小二乘拟合车厢部分的测量点, 得到列车行驶方向。采用分段线性插值能够大大减小车头位置的判断误差, 使由车头位置判断误差引起的速度测量误差低于 $\pm 0.8 \text{ km/h}$ 。扫描激光雷达的测距误差引起的速度测量误差不超过 $\pm 1.13\%$, 整个系统的测速精度高于 $\pm 1.2\%$ 。因此减小车头位置的判断误差和扫描激光雷达的测距误差, 对提高系统的测速精度具有重要意义。

参考文献:

- [1] Huang Jian, Gao Fulai, Liu Changjie, et al. Study on high-speed train dynamic gauge measurement based on binocular vision[J]. *Railway Quality Control*, 2012, 40(5): 16–18. (in Chinese)
- [2] Xie Xiaoling, Wang Li. An experimental unit for measuring the instantaneous speed of a high-speed train passing through tunnel [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2001, 28(3): 45–47. (in Chinese)
- [3] Zhou Na, An Zhiyong, Li Yonghao. Large-sized three-dimensional profile measurement technology based on laser radar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(12): 2466–2468. (in Chinese)
- [4] Zhao Jianhui, Tian Xinling, Li Fan, et al. Analysis and implementation of limited angle swing scanning control system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(3): 358–381. (in Chinese)
- [5] Kilpelä A. Pulsed time-of-flight laser range finder techniques for fast, high precision measurement applications [D]. Finland: University of Oulu, 2004.
- [6] Kurtti, Kostamovaara J. An integrated receiver channel for a laser scanner [C]//Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2012, 1358–1361.
- [7] Li Mi, Song Yingsong, Yu Jing, et al. High precision laser pulse distance measuring technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(8): 1470–1473. (in Chinese)
- [8] Xu Wei, Chen Qian, Gu Guohua, et al. Charge sensitive preamplifier design for APD detection system of laser pulse [J]. *Laser & Infrared*, 2011, 41(1): 28–30. (in Chinese)
- [9] Zhou Zhen, Qi Zhongliang, Qin Yong. Design of driving method for low power semiconductor laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(10): 2690–2693. (in Chinese)
- [10] Zhang Liming, Zhang Yi, Zhao Xin. Study on flight time measurement laser ranging sensor based on TDC [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2011, 30(12): 71–74. (in Chinese)