

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2107370

# 基于FPGA的高性能激光雷达测距系统设计

李欢 余红英

(中北大学电气与控制工程学院 太原 030051)

**摘要:**针对低功耗激光测距雷达量程和精度难以兼顾的问题,设计了一套基于FPGA的高性能激光雷达测距系统。该系统首先利用14阶M序列伪随机码以100 MHz频率调制发射激光,并使用双口BRAM乒乓读写实现回波光子累计,还原回波信号。其次通过相关性计算获取测距信息来建立回波概率模型,并利用质心算法提高测距精度。最后搭建了雷达系统原理样机,在空间环境百米测距时,距离误差稳定在 $\pm 2$  cm;利用光纤延时法在14.8 km等效目标测距时,测距精度优于0.1 m。实验结果表明该系统能够在较低激光调制频率时提高测距精度,有效降低了数据处理难度,最终实现远距离高精度的激光雷达测距。

**关键词:**激光测距;伪随机码调制;光子累计;质心算法;FPGA

**中图分类号:** TP302 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4030

## Design of high performance lidar ranging system based on FPGA

Li Huan Yu Hongying

(College of Electrical and Control Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that the range and accuracy of low-power laser ranging radar are difficult to balance, a high-performance laser radar ranging system based on FPGA is designed. The system first uses the 14-order M-sequence pseudo-random code to modulate the emission laser at a frequency of 100 MHz, and uses dual-port BRAM ping-pong read and write to realize the accumulation of echo photons and restore the echo signal. Then the distance measurement information is obtained through correlation calculation to establish the echo probability model, and the centroid algorithm is used to improve the accuracy of the distance measurement. Finally, a prototype of the radar system is built. The range error is stable at  $\pm 2$  cm when the distance is measured in a 100-meter space environment; when the optical fiber delay method is used to measure the equivalent target of 14.8 km, the range accuracy is better than 0.1 m. The experimental results show that the system can improve the ranging accuracy when the laser modulation frequency is lower, effectively reduce the difficulty of data processing, and finally realize long-distance high-precision lidar ranging.

**Keywords:** laser ranging; pseudo-random code modulation; photon accumulation; centroid algorithm; FPGA

## 0 引言

传统激光测距雷达一般使用脉冲测距法,即通过获取发射脉冲与回波脉冲的时间间隔来计算目标的距离<sup>[1]</sup>。该方法在远程测距时,为保证回波脉冲的可探测性,发射脉冲需要极大的峰值功率,使得雷达功耗高、体积大、设计难度大。而对于小体积、低功耗的传统激光测距雷达,又难以实现远距离测量的要求<sup>[2]</sup>。

与脉冲测距法相比,本文使用的伪随机码调制激光测距技术对发射脉冲峰值功率要求低,能够有效降低雷达系统的设计难度<sup>[3]</sup>。当伪随机码阶数选定后,激光调制频率越高,理论测距精度越高,量程反而越小,因此伪随机码调

制激光测距一般难以兼顾测距量程和精度。徐恒等<sup>[4]</sup>提出利用伪随机码以1 GHz频率调制激光,保证了测距精度,并利用串并转换结合RAM操作存储返回信号,验证实现了千米内精度为0.15 m的激光测距,但过高的调制频率增加了返回数据处理难度,难以通过增加伪随机码阶数来提高测距量程。杨馥等<sup>[5]</sup>则提出伪随机码以100 MHz低频调制激光后,结合相位调制和外差探测技术进行优化,在保证测距量程的前提下提高测距精度,但该光学调制平台搭建较为复杂,对接收系统采样频率要求较为苛刻,1 GHz采样频率时精度仅为0.138 m,进一步优化测距精度较难实现。

针对上述缺点,本文采用100 MHz较低频率调制激

收稿日期:2021-07-23

光,设计了一套更易兼顾量程和精度的高性能激光雷达测距系统。系统首先利用更高阶数的伪随机码调制激光,通过增加码数来提高测距量程;然后使用FPGA双口BRAM乒乓读写操作,高效累计光子信号还原回波信号,提高系统信噪比;最后根据测距信息建立回波概率模型,利用质心算法精确模型峰值真实位置,在较低调制频率下提高了系统测距精度。利用本方案能够有效降低系统数据处理难度,更易实现大量程、高精度的激光雷达测距。

## 1 系统设计方案

系统设计方案如图1所示,系统采用Xilinx公司的Artix-7系列FPGA芯片作为主控,开始测距时以100 MHz频率生成伪随机码调制1500 nm发射激光,同时利用灵敏度高的光子探测器接收返回激光,输出回波脉冲。

数据处理过程中,FPGA先将回波脉冲整形为回波码元,再利用双口BRAM累计回波码元;完成累计后,将累计结果阈值判别重构回波信号。回波信号与调制信号进行相关性运算,提取出相关性峰值等测距信息,并通过串口传输至上位机。上位机利用测距信息建立回波概率模型,使用质心算法精确测距值。

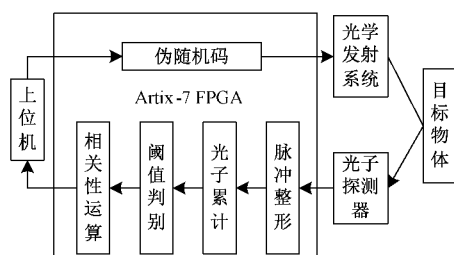


图1 系统设计方案

### 1.1 伪随机码选取与生成

相同测距条件下,M序列比其他伪随机序列调制激光拥有更佳信噪比,能够增加系统稳定性<sup>[6]</sup>。采用n阶M序列伪随机码作为调制信号理论量程为:

$$D = \frac{(2^n - 1)c}{2f} \quad (1)$$

其中,f为调制频率,c为光速,取 $c = 299\,792\,458\text{ m/s}$ 。为了避免出现距离模糊现象<sup>[7]</sup>,确保测距结果的真实性,使M序列理论量程D大于最大目标距离20 km,系统选定14阶M序列伪随机码,一周码数为16383个,以100 MHz频率调制时,理论量程D约为24.57 km。

14阶M序列直接根据反馈多项式及14位移位寄存器初值确定<sup>[8]</sup>,14阶反馈多项式为:

$$f(x) = x^{14} + x^{10} + x^6 + x + 1 \quad (2)$$

其中,反馈系数表明了移位寄存器中第14、10、6、1位数值参与反馈进行模2运算。FPGA根据M序列生成原理,确定移位寄存器初值后,将移位寄存器向左移位,以模2运算结果补齐最低位数值,并溢出最高位数值输出M序列。

### 1.2 回波脉冲整形

100 MHz调制频率时,M序列一个码元宽度为10 ns。光子探测器响应任意一个码元宽度的调制激光为概率事件;在探测概率下,光电转化产生的回波脉冲可能位于该码元宽度的任意位置<sup>[9]</sup>。脉冲整形时,以一个码元宽度为单位等分回波脉冲,利用倍频的600 MHz时钟对各单位内采样。若对应单位内任意位置存在脉冲信号,则输出一段10 ns宽度的“1”信号,否则输出一段10 ns宽度“0”信号,使得回波脉冲经过整形后与调制码元宽度一致,有效还原回波码元,回波脉冲整形过程如图2所示。

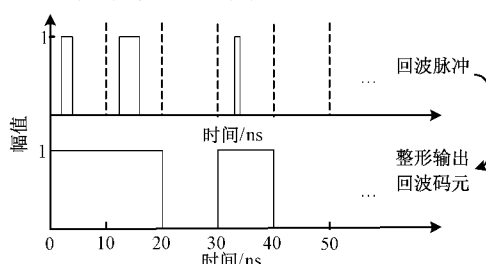


图2 回波脉冲整形过程

### 1.3 光子累计与阈值判别

光子累计的数据就是回波码元,“1”的码元个数包含调制激光的回波信号和空间光、热噪声引起光子探测器的暗计数<sup>[10]</sup>。暗计数为随机分布,而回波光子的数量与激光器发射功率为线性关系,利用光子累计与阈值判别重构回波信号,能够有效减小暗计数带来的干扰<sup>[11]</sup>。

调制激光为持续发射,回波码元数据频率为100 MHz,以16383个回波码元数为一周循环累计,数据存储地址为1-16383的双口BRAM作为存储单元,写入宽度为9 bit,最高可累计512个周期。循环累计刷新BRAM某地址的结果时,先读出该地址存储的上周期累计结果,再将此时回波码元与该累计结果叠加,叠加结果作为新的累计结果重新写入该地址。以上操作BRAM单口共计2个时钟完成,处理100 MHz频率数据时BRAM操作频率需要200 MHz。

双口BRAM有两个独立的控制端口A、B,能实现对同一块BRAM不同地址同时读写,因此可使用BRAM两个端口乒乓读写操作实现高效存储和累计<sup>[12]</sup>。刷新BRAM指定地址累计结果的乒乓操作为:第C个时钟,端口A将叠加结果重新写入BRAM第k个地址,同时端口B读出第k+1个地址内上周期累计结果;第C+1个时钟,端口A读出第k+2个地址内上周期累计结果,同时端口B将叠加结果重新写入BRAM第k+1个地址,由此两个端口每个时钟依次按顺序完成一个地址数据的刷新,双口BRAM乒乓读写操作工作过程如图3所示。

上述过程不断循环进行,当BRAM实现第16383个地址累计结果的刷新时,即完成了一个累计周期,回到第1个地址重新开始乒乓读写操作,直至完成预设的所有累计周期。

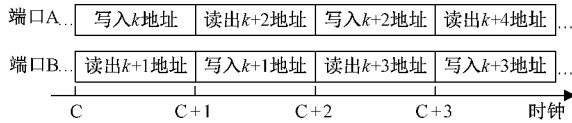


图 3 双口 BRAM 乒乓读写操作

阈值判别过程也是在双口 BRAM 乒乓操作下完成。

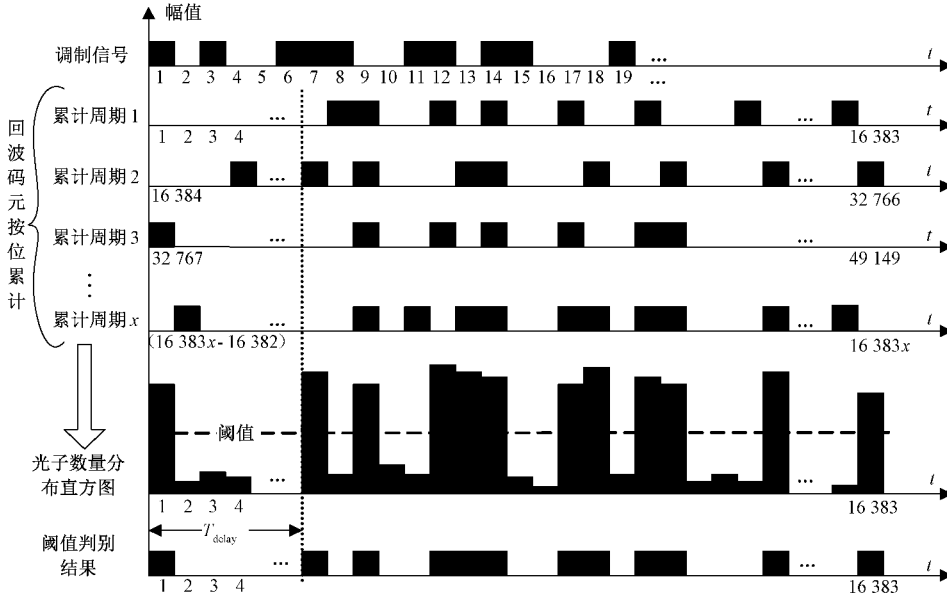


图 4 光子累计与阈值判别过程

与 FIFO 等传统存储方式相比,利用双口 BRAM 乒乓读写操作,能对持续发射的激光数据高效处理。同一时间端口 A、B 分别对相邻地址的读出和写入,有效避免了对同一地址的错误操作。双口 BRAM 乒乓操作完成一个累计结果的刷新平均需要一个时钟,和单口操作相比,有效的将 BRAM 操作频率降低至 100 MHz,增加了时序裕度和逻辑稳定性。

1.4 相关性计算

对于 M 序列伪随机码,其自相关函数为<sup>[14]</sup>:

$$R(\tau) = \frac{A - D}{A + D} \quad (3)$$

其中, A 为回波信号与调制信号按位比较码元一致的总数, D 为回波信号与调制信号按位比较码元不一致的总数。回波信号按左循环移位,当 R(τ) 出现尖锐峰值时,回波信号与调制信号相位一致,此时移位次数为回波信号的延迟时间<sup>[15]</sup>。

为简化 FPGA 的相关性计算,以式(3)中 A 值作为相关性强度。采用的伪随机码码数为 16 383,因此利用 16 383 个并行同或运算逻辑单元,将回波信号和调制信号按位同或。首次运算回波信号移位次数 s = 0,同或结果中“1”的总数为 0 位置的相关性强度 A<sub>0</sub>,并以 A<sub>0</sub> 作为当前峰值强度 A<sub>m</sub> 初始值,并保留 0 位置信息。完成一个位置的相关性强度计算后,将回波信号按左循环移位 1 次,回

为了增加阈值的鲁棒性<sup>[16]</sup>,光子累计时统计所有回波码元中“1”的个数,完成累计时取 16 383 个累计结果的平均值作为阈值,使得阈值能够跟随探测光子数动态变化。阈值判别时,将 BRAM 存储的累计结果按地址顺序读出,并与阈值比较,累计结果大于阈值输出“1”,否则输出“0”,实现回波信号的重构。光子累计与阈值判别整体过程如图 4 所示。

波信号移位次数 s = 1,重新同或运算得到 1 位置的相关性强度 A<sub>1</sub>,并与当前峰值强度 A<sub>m</sub> 比较大小,保留较大值刷新 A<sub>m</sub>。由此循环计算,当 s = 16 382 时完成了 16 383 个位置的相关性强度计算,得到最终计算的峰值位置 S<sub>m</sub>、峰值强度 A<sub>m</sub>、峰值前位置强度 A<sub>m-</sub>、峰值后位置强度 A<sub>m+</sub> 等测距信息,并通过串口发送至上位机。相关性计算流程如图 5 所示。

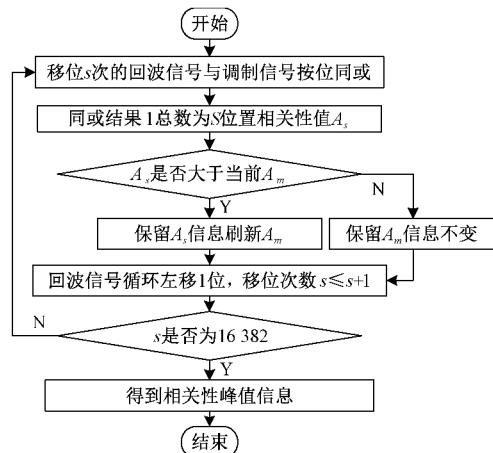


图 5 相关性计算流程

1.5 回波质心位置计算

根据激光测距精度与伪随机码调制频率的关系 Δd =

$c/2f$ ,若直接根据峰值位置得到的测距精度仅为  $\Delta d = 1.5 \text{ m}$ 。当前实现高精度测距的方法基本为提高伪随机码调制频率,但调制频率的提高不仅会减小理论量程,而且会增加数据处理的难度<sup>[16]</sup>。测距结果与实际距离存在误差的主要原因在于,对光子探测器输出的回波脉冲整形时,每个返回激光单位与对应采样时间单位不是完全对齐,造成计算的相关性值峰值位置与真实峰值位置存在一定偏差,因此系统选择利用算法精确回波质心位置,提高测距精度。

调制激光到达光子探测器为光子量级时,回波信号各位置相关性强度符合高斯分布<sup>[17]</sup>。上位机利用FPGA的测距信息建立回波概率模型如图6所示,  $A_x$  点为真实峰值位置  $S_x$  对应的最大相关性强度,越靠近该点强度越大。取强度  $A_m$  与  $A_{m+1}$  较大值对应的位置  $S_L$ ,结合强度分布规律可推断  $S_x$  位置介于  $S_L$  与峰值位置  $S_m$  之间,且接近位置  $S_m$ 。

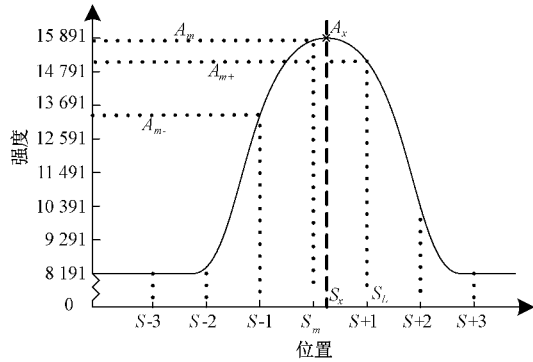


图6 回波概率模型

将高斯分布的相关性强度数据中真实峰值位置  $S_x$  作为质心点,利用质心算法根据  $S_L$  与  $S_m$  位置的相关性强度精确该点位置<sup>[18]</sup>,减小峰值偏差带来的误差影响。使用质心算法拟合曲线,推算质心位置  $S_x$  的公式为:

$$S_x = \frac{\sum S * (A - N)}{\sum (A - N)} \quad (4)$$

其中,  $A$  为  $S$  位置的相关性强度,  $N$  为回波信号与调制信号有相位差时相关性强度。对于  $n$  阶序列伪随机码而言:

$$N = 2^{n-1} - 1 \quad (5)$$

结合测距信息的具体参数,回波质心位置  $S_x$  的最终分段函数为:

$$S_x = \begin{cases} \frac{S_m(A_m - N) + (S_m - 1)(A_m - N)}{(A_m - N) + (A_{m-1} - N)}; (A_m > A_{m+1}) \\ S_m; (A_m = A_{m+1}) \\ \frac{S_m(A_m - N) + (S_m + 1)(A_{m+1} - N)}{(A_m - N) + (A_{m+1} - N)}; (A_m < A_{m+1}) \end{cases} \quad (6)$$

确定质心位置后,结合光速  $c$  得到测量距离为:

$$d = \frac{tc}{2} = \frac{S_x c}{2 \times 10^8} \quad (7)$$

## 2 实验结果及分析

搭建雷达系统原理样机后,在空间环境中测试雷达性能。在雷达激光发射端接入可调光强衰减器,激光发射后经目标反射与噪声光一同进入接收镜头,调整衰减器使接收的信号光功率为光子量级。目标到镜头真实距离为 100 m,上位机连续输出 160 组雷达测距结果如图7所示。

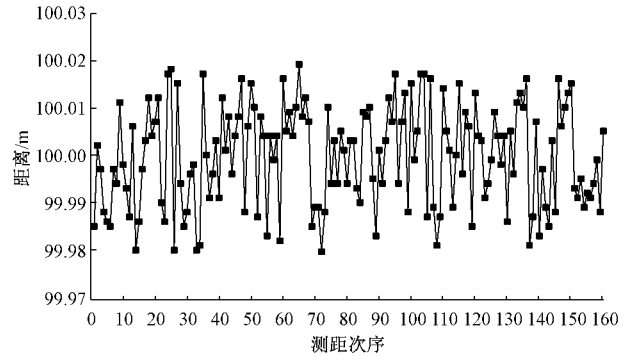


图7 100 m 目标测距结果

从图7可以看出雷达在外界噪声引入的情况下,测距结果波动范围在 99.98~100.02 m 之间,与真实距离对比测距误差为  $\pm 2 \text{ cm}$ 。根据实验结果可以得到,该雷达能有效抵抗噪声的干扰,空间环境中测距效果准确且稳定。

为测试雷达远距测量的精度,在发射端接入长度为 20.141 km 的光纤进行延时,光纤折射率约为 1.472,等效光程约为 29 647.552 m,等效距离约为 14 823.776 m。将目标放置到镜头前 10 m 处,加上光纤延时效果后等效距离约为 14 833.776 m。测试时连续 4 次以 10 cm 为步长向镜头靠近移动目标,上位机输出距离变化结果如图8所示。

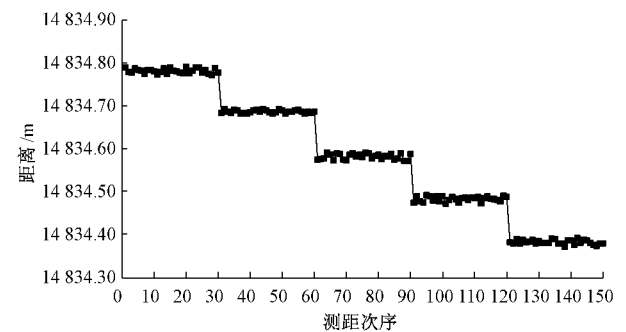


图8 接入光纤移动目标测距结果

根据图8测量数据,加入光纤延时后测量距离均值为 14 834.78 m,与真实等效距离基本相同。测距结果在移动目标时以 0.1 m 为步长可分辨地缩减,在目标静止时波动较小。根据实验结果可以得到,该雷达远距测量依旧稳定,测距精度优于 0.1 m,与直接采用峰值位置计算的

1.5 m 测距精度相比,回波概率模型中结合质心算法能够有效提高测距精度。测量的初始距离与光纤延时等效距离存在误差,可能是光纤折射率精度不够所导致。

### 3 结 论

针对低功耗激光测距雷达的发展现状,设计了一套基于 FPGA 的高性能激光雷达测距系统。系统采用了 14 阶 M 序列伪随机码以 100 MHz 频率调制激光,并使用双口 BRAM 乒乓操作处理数据,最后利用质心算法提高测距精度。雷达系统原理样机在空间环境中的测试结果表明,该雷达百米测距时误差为 $\pm 2$  cm,对外界噪声有一定抗干扰能力,测距准确且稳定;雷达理论量程为 24.57 km,并在 14.8 km 等效目标测距实验中,测距精度优于 0.1 m,能与高功耗的传统激光雷达相比。该系统在回波概率模型中通过质心算法精确峰值位置,能够在较低激光调制频率时提高测距精度,有效的降低了系统数据处理的难度,使得伪随机码调制激光测距雷达能够兼顾测距量程和精度,为激光雷达测距技术的优化提供了一定参考。

### 参考文献

- [1] 杨芳,张鑫,贺岩,等.采用高速伪随机码调制和光子计数技术的光纤激光测距系统[J].红外与激光工程,2013(12):3234-3238.
- [2] 胡伟伟,李永亮,顾小琨,等.远程激光测距技术及其进展[J].激光与红外,2019,49(3):19-27.
- [3] YU Y, LIU B, CHEN Z. Improving the performance of pseudo-random single-photon counting ranging lidar[J]. Sensors, 2019, 19(16), 3620.
- [4] 徐恒,刘金涛,贺岩.高速伪随机码调制激光测距雷达电子学系统设计[J].电子设计工程,2016(1):149-151.
- [5] 杨馥,邱子胜,李姝欣,等.基于伪随机码相位调制和外差探测的高精度激光测速测距系统研究[J].飞控与探测,2019,2(1):47-52.
- [6] 杨健,季云飞,王誉鹏,等.基于不同伪随机码调制的半导体激光测距系统[J].激光与红外,2017,47(8):953-956.
- [7] 吴兴国,羊毅,郝培育.消除距离模糊的扩展伪随机码调制激光测距技术[J].中国激光,2016,472(4):167-174.
- [8] 张松,张亚.基于 m 序列的无串扰超声波测距系统[J].电子测量技术,2015,38(9):19-24.
- [9] 刘云,李源,徐焕银,等. InGaAs/InP 单光子探测器的研制[J].激光与红外,2020,50(5):573-577.
- [10] 刘岩鑫,范青,李翔艳,等.超低暗计数率硅单光子探测器的实现[J].光学学报,2020,463(10):14-19.
- [11] CHEN Y, LE Y, ZHANG D, et al. A photon-counting LiDAR bathymetric method based on adaptive variable ellipse filtering[J]. Remote Sensing of Environment, 2021, 256(5):112326.
- [12] 邢凯,李彬华,陶勇,等.基于 FPGA 的运动目标实时检测跟踪算法及其实现技术[J].光学技术,2020,262(2):32-40.
- [13] 吴培鹏,蔡文郁,唐国栋,等.激光测距动态多阈值误差修正技术研究[J].电子测量与仪器学报,2021,35(7):170-177.
- [14] 马旭炯,于加武,杨飞飞,等.基于高维混沌系统的伪随机序列生成器[J].大连工业大学学报,2020,39(2):143-149.
- [15] 张宇飞,贺岩,刘梦庚,等.基于伪随机码调制的测距通信一体化激光雷达[J].红外与激光工程,2018,287(9):100-105.
- [16] 邱佳月,赖际舟,李志敏,等.面向复杂场景的激光雷达地面分割算法[J].仪器仪表学报,2020,41(11):244-251.
- [17] 申浩,赵冬娥,张斌,等.激光光幕中心位置检测系统[J].国外电子测量技术,2020,39(1):1-5.
- [18] 王福斌,刘梦竹,刘金旺.基于多元正态分布的飞秒激光烧蚀光斑质心提取[J].激光与红外,2020,503(8):41-46.

### 作者简介

李欢,硕士研究生,主要研究方向为电力电子技术、嵌入式技术。

E-mail:1544841519@qq.com

余红英,教授,主要研究方向为电气传动与控制,系统监测与控制。

E-mail:yuhy69@163.com