

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2416906

飞行试验中直升机近地飞行安全监控测试技术

蒋红娜 马亚平 程娟

(中国飞行试验研究院 西安 710089)

摘要: 直升机以其卓越的低空性能在通用航空领域广泛应用。作为直升机飞行性能的关键能力,近地面机动飞行是直升机飞行试验的重要科目。为了保证直升机在近地机动飞行试验过程中的安全可控,需要对直升机飞行过程中的一些关键参数进行实时监控。针对直升机飞行试验过程中对旋翼尾桨近距离测量和机体近地高度实时监控与告警的测试需求,开展矩阵式激光测距技术、平台控制算法等关键技术研究,确定直升机近地飞行关键测试技术设计方案,以此为基础研制的直升机近地飞行安全监测与告警系统实现了直升机机动试飞情况下近地百米高度内的高精度测量,精度和时延都满足飞行试验测试要求,对于未来直升机飞行试验测试系统的设计具有重要的借鉴意义。

关键词: 直升机;飞行试验;近距离测量;近地高度;测试技术

中图分类号: V241.01;TN06 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 590.30

Safety monitoring and testing technology for helicopter near ground flight in flight tests

Jiang Hongna Ma Yaping Cheng Juan

(Chinese Flight Test Establishment, Xi'an 710089, China)

Abstract: Helicopters are widely used in the field of general aviation due to their excellent low altitude performance. As a key capability for helicopter flight performance, near ground maneuvering flight is an important subject in helicopter flight testing. In order to ensure the safety and controllability of helicopters during ground maneuvering flight tests, real-time monitoring of some key parameters during helicopter flight is necessary. In response to the testing requirements for close range measurement of rotor tail rotor and real-time monitoring and alarm of aircraft near ground height during helicopter flight tests, key technologies such as matrix laser ranging technology and platform control algorithms were studied to determine the design plan for key testing technologies for helicopter near ground flight. Based on this, a helicopter near ground flight safety monitoring and alarm system was developed to achieve high-precision measurement within a hundred meters of ground height during helicopter maneuvering test flights, with accuracy and time delay meeting the requirements of flight test. This has important reference significance for the design of future helicopter flight test systems.

Keywords: helicopter; flight test; close range measurements; ground altitude; testing techniques

0 引言

直升机以其低空低速性能和可垂直起落、悬停等功能,在国内外军事与民用领域广泛的应用。特别是我国在逐步开放低空空域的背景下,通用航空领域呈现蓬勃发展,这使得直升机在经济发展领域越来越受到重视,直升机运行数量大幅提升。同时,伴随而来的是直升机事故也呈现逐步增长的现象。通过对可查证官方数据源的统计,2011~2019年我国民用直升机数量基本每年都保持着两位数的增长,其中2012年和2014年的年增长率都达到30%以上。

而这期间国内共发生民用直升机事故41起,死亡33人。直升机事故中近地飞行(撞线、撞树等)占23.0%,可控飞行撞地占8.5%。直升机事故频发的原因主要是由其旋转部件多、载荷复杂、旋翼和尾桨的交变载荷易产生振动导致。其中在低空低过载状态中,因为旋翼推力减小,造成桨毂与旋翼主轴碰撞或桨叶碰撞机身,导致旋翼系统传动轴失效是一种常见的造成重大事故的特情。

在直升机飞行试验中,近地机动飞行是直升机试飞的重要科目,目的是考核在近地高度直升机机动能力。近地机动飞行是极具风险的试验,其飞行过程中大部分在飞行

包线边界进行,且要求动作迅速,拉杆速度和拉杆量大,直升机响应变化较为剧烈,导致直升机短暂出现过载超限。快速的拉杆可能使直升机在近地面低高度出现过载超限,甚至可能使旋翼与尾梁碰撞,直接影响直升机的飞行安全。因此实现直升机近地飞行过程中对近地高精度测量和旋翼尾梁近距安全监控与告警显得尤为重要^[1]。

本文通过开展直升机近地飞行过程中对近地高精度测量和旋翼尾梁近距测量关键技术研究,实现直升机飞行试验中近地面机动飞行过程中安全监控,保障直升机飞行任务安全高效完成。

1 测试需求分析

直升机飞行试验过程中,依据 ADS-33E《美国军用直升机飞行品质规范》、ADS-51《美国旋翼机和固定翼航空器适航性验证手册》要求,近地面机动试飞按照危害等级和危害概率分析为高风险,在开展该类科目飞行试验时,需要提供全维度、全链路、可视化的安全监测与风险预警能力,以保障直升机近地面机动试飞的安全。

直升机旋翼与尾梁间距属于近距测量的研究范畴。目前,近距测量的方法主要接触法和非接触法。目前国外在直升机旋翼与尾梁间距预警技术上部分采用了接触法,其主要原理为在直升机尾梁上安装不同高度易碎性复合材料测量片,其内部镶嵌有导电材料。当旋翼打断某一探针时造成电路的开路,即触发相关告警信号。这种方法的优点是可靠性高,稳定性好,但属于一次性测量,并且打碎的金属探针立即进入到旋翼的下旋气流中,对直升机其他系统构成一定的安全隐患,并非长久之计,同时针对直升机旋翼普遍采用复合材料的情况下,测量片的材质选择很难突破。非接触法有超声波测距、红外测距和激光测距等。激光技术由于其单色性、相干性和方向性好的优点被广泛应用于测距领域。但是需要解决旋翼曲率变化、背景强光干涉等关键技术^[2]。

近地高度是直升机近地机动试飞中的关键参数。通常直升机在飞行过程中,其高度信息通常由气压式高度传感器或无线电高度表获取。气压式高度传感器是以气压敏感元件作为传感器感受大气压力,再根据气压与高度的函数关系确定高度值。由于直升机旋翼系统的气流影响效应,使得气压式高度测量的测量误差会因高度的降低而增大。无线电高度测量主要用于小于 2 000 m 高度时的高度信息测量。因此,直升机小于 100 m 的低高度精准测量是一个困扰直升机飞行试验的技术难题。随着激光技术的发展,激光测距逐渐成为一种先进的测量手段,开始应用于直升机低高度测量中。但是在具体实施过程中由于直升机机动飞行姿态变化导致其测量精度降低,同时飞行姿态的剧烈变化会造成激光接收装置超出接收范围,导致无法接收到反射回来的激光信号而导致数据失效。

2 关键技术研究

2.1 旋翼尾梁近距测量与告警技术

旋翼尾梁近距测量与告警技术针对直升机近地面机动飞行中旋翼与尾梁间距监测技术难点,提出了基于激光矩阵的激光脉冲旋翼测距法,以激光脉冲技术为核心构建光学点阵测距模型,设计了旋翼与尾梁间距预警算法,提高了直升机风险科目安全性与数据可靠性^[3]。

基于激光矩阵的旋翼尾梁近距测量与告警技术在直升机的尾梁上安装两台激光测距单元,用矩阵激光测量旋翼与尾梁之间的距离,矩阵式激光测距单元正上方靠近旋翼末端;在机舱内安装一台数据处理单元,用于矩阵式激光测距单元传输数据的处理、信号的收发以及数据的发送等功能;同时,驾驶舱内安装一台报警显示单元,当旋翼与尾梁间距过小时提示飞行员。系统技术实施方案示意图如图 1 所示。

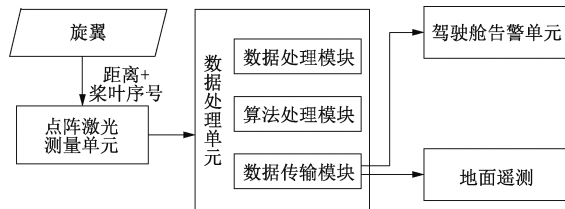


图 1 旋翼尾梁间距测量系统框图

Fig. 1 Schematic diagram of rotor tail boom spacing measurement system

旋翼尾梁间距测量系统由两个矩阵式激光测距单元,一台数据处理单元、一个报警显示单元组成。矩阵式激光测距单元安装在直升机尾梁后端,测量方向朝上,当旋翼经过测距单元上方的时候,测距单元收到反射信号,计算出测量结果,通过串口将测量到的距离发送到数据处理单元。同时,在一个测距单元内安装光电传感器,传感器只能接收特定材料返回的光信号。在其中一个旋翼上粘贴这种特定的反光材料,当旋翼经过传感器上方时,会产生一个触发信号,数据处理单元将这个旋翼的触发信号以及激光测距单元传输的数据标记出来,以此来将旋翼与所测量的结果对应起来^[4]。

1) 矩阵式激光测距技术

激光测距广泛采用测量激光飞行时间的方法来进行测距,也就是测量激光在测线上往返飞行所需要的时间来进行距离值的测量脉冲法通过激光脉冲直接测量飞行时间,激光测距模块主要由激光发射装置、接收装置、时间间隔测量单元、自动功率调节模块、APD 温度补偿模块及处理与控制单元组成,原理如图 2 所示。

单电激光测距在测量高速旋转且表面曲率不定的物体(如直升机桨叶)时存在较大的偏差,本文提出利用多点光学点阵激光测距技术来测量直升机旋翼与尾梁间距,采用一组 5×5 脉冲式激光矩阵来测量旋翼表面距离,最终通过

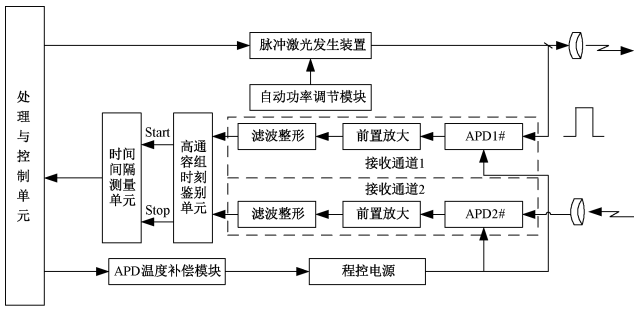


图2 脉冲激光测距原理图

Fig. 2 Schematic diagram of pulse laser ranging principle

数据融合计算旋翼与尾梁安全距离^[5]。工作原理如图3所示。

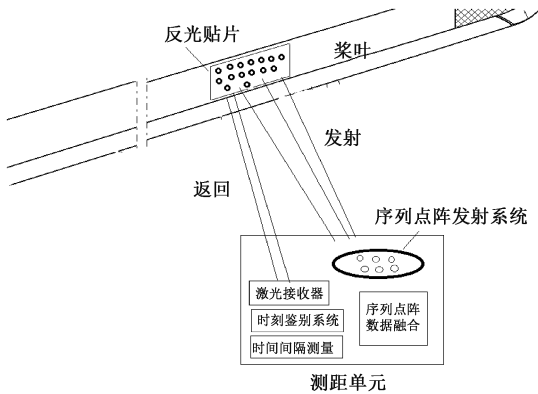


图3 矩阵式激光测距原理

Fig. 3 Matrix-type laser ranging principle

矩阵式激光测距核心在于单点脉冲激光发生装置改为序列点阵激光发射系统,通过顺序控制多路激光脉冲依次发送接收,可获取多个点的测距数据,从而提升测量精度。实际效果使得0~6 m以内测量精度约为2 cm。

通过矩阵式激光发射系统,在主时钟驱动下,在0 ps~1.8 ns内完成发射接收,同时激发第二路激光开始发射,依次循环,直至完成一轮点阵扫描,如图4所示。通过调整第一路激光的脉宽长度识别循环的开始和结束。最后利用数据融合技术将所得数据融合,最终输出数据速率根据桨叶转速选为1.3 kHz^[6]。

2)背景光抑制技术

实际飞行过程中由于直升机姿态角度以及太阳光射时间等原因,测量数据产生了部分跳点,引起报警器误报。

窄带滤波片滤除效果不能达到百分百,只能通过软硬件滤除,由于旋翼与尾桨间距处于高速动态变化的状态,不能通过一般方法简单剔除。小波去噪具有良好的时频特性,在噪声领域中,小波理论具有很好地去噪效果,由数学的角度看,小波去噪问题实际上可以归纳总结为函数逼近的问题,即以衡量准则为基础,在由小波母函数平移和伸缩所形成的函数空间中,寻找原信号的最佳逼近,以完成原信号和噪声信号的区别。从信号处理的角度看,小波去噪又

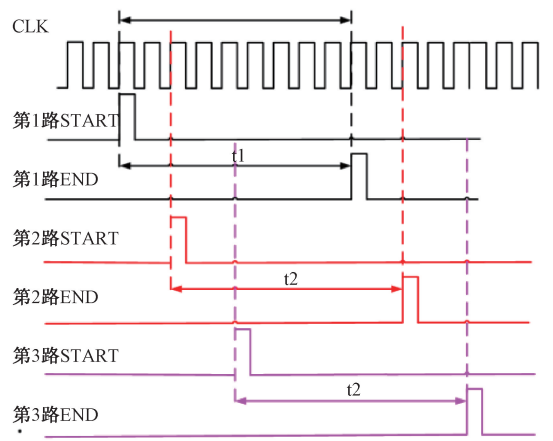


图4 矩阵激光时序

Fig. 4 Matrix laser timing

可以归纳为信号滤波的问题。小波去噪可视为低通滤波,但去噪后能够保留图像特性的特点优于传统的低通滤波器。因此,小波去噪可视为特征提取和低通滤波的综合^[7]。

在本文中,粗大误差的特点为偏差较大,远远高于相邻正常数据测量点,而且数量较小分布稀疏,小波变换在时频都有较好的局部性质,使得小波变换比Fourier变换更适合进行突变信号分析,含有粗大误差的测量数据可以看作是一种突变离散信号。首先对包含粗大误差的离散数据进行小波分解,通过对高频信号的分析可以确定粗大误差数据点的位置,进一步可以根据一定的阈值将其除去^[8]。

异常数据修正算法,当测距仪由于干涉出现部分异常数据,需对其进行异常数据剔除及平滑处理。软件算法流程图如图5所示。

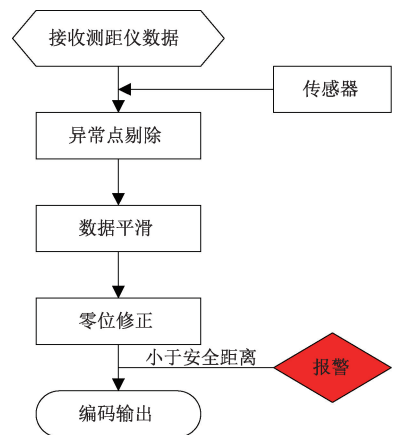


图5 预警算法流程图

Fig. 5 Early warning algorithm flow chart

经过滤除后数据跳点消除,数据平滑有效,无跳点产生。

2.2 近地高度高精度测量技术

直升机的高度信息通常由气压式高度传感器和无线电高度表获取,根据其工作原理,在低高度条件下易受周围电

磁环境、姿态、风速等诸多因素的干扰,难以在低高度下提高精度和可靠性。随着激光技术的发展,激光测距逐渐成为一种先进的测量手段,并开始应用于直升机低高度测量中。但是在具体实施过程中由于直升机机动飞行姿态变化导致激光高度测量的误差增大。采用基于激光测距技术的近地高度高精度测量技术可以实现直升机在机动状态下低高度的准确测量^[9]。

近地面高度高精度测量技术用于直升机飞行试验中近地面高度参数的高精度测量。其原理利用激光测距仪高精度的测量技术,将其安装在俯仰与随动平台上。通过伺服电机使该平台在横滚和俯仰两方向调整,保障激光测距仪激光镜头实时垂直指向地面。该方法是通过伺服电机调整激光测距仪发射器和接收器的对地角度,消除直升机运动过程中姿态偏角导致的误差,实现机动条件下近地面高度的精确测量,原理框图如图 6 所示^[10]。

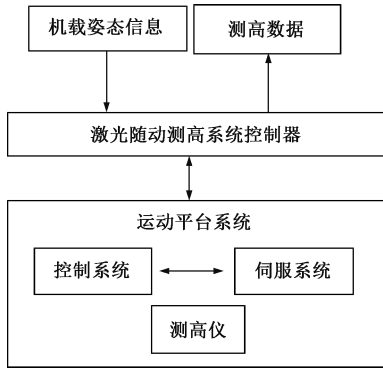


图 6 基于激光近地面高度高精度测量原理框图
Fig. 6 Schematic diagram of high-precision measurement of laser close-to-ground height

1) 系统架构设计技术

控制系统由 EMI 滤波模块、2 个 DC/DC 转换器、CPU 模块、串行接口模块、机上 28 V 供电电源接口、机载航姿系统信号接口和 FTI 信号接口等组成。控制系统工作时对接收来自 IMU 的 RS232 信号进行解析,得到飞机的飞行姿态信息,然后生成运动平台转动所需的信息来控制运动平台与飞机的飞行姿态保持相反的运动,使得激光测高仪发出的测量激光始终保持与地面垂直来实现高度的精确测量。最终将测量到的高度信息以 RS422 信号形式通过 FTI 信号接口传递给机上测量记录系统。控制系统的结构框图如图 7 所示^[11]。

伺服系统可由直流电机、控制器、减速器及 A/D 变换器组成。滚转和俯仰采取一样的结构。对于滚转和俯仰轴稳定能力的技术要求一致,考虑到俯仰为外回路,转动惯量等变量远大于滚转的内回路,系统按俯仰通道的最大需求进行选择^[12]。

2) PID 控制算法研究

为了改善步进电机的启停特性,使步进电机响应速度

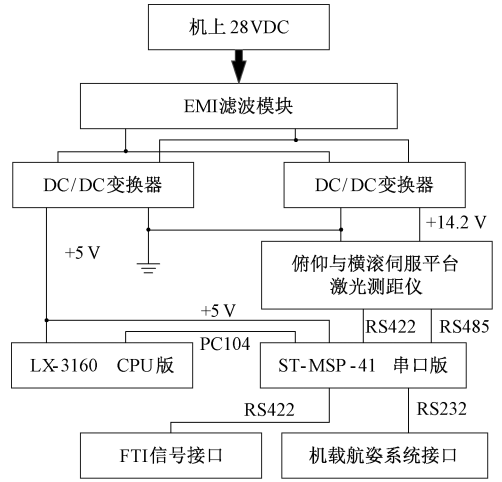


图 7 控制系统框图

Fig. 7 Control system block diagram

加快,同时运行平稳、噪音降低,控制系统采用了 PID 控制算法^[13]。

传递函数为:

$$u(t) = K_p \left[\epsilon(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t \epsilon(\tau) d\tau + T_d \frac{d\epsilon(t)}{dt} \right] \quad (1)$$

将上述传递函数经过离散化,实际应用时采用的传递函数为:

$$u(t) = K_p \left\{ \epsilon(t) + \frac{1}{T_i} \sum_{l=1}^t \epsilon(l) + T_d [\epsilon(t) - \epsilon(t-1)] \right\} \quad (2)$$

式中: K_p 为比例系数; T_i 为积分时间; T_d 为微分时间; $\epsilon(t)$ 为 t 时刻的偏差,数值为:

$$\epsilon(t) = r(t) - y(t) \quad (3)$$

式中: $r(t)$ 为 t 时刻的给定值; $y(t)$ 为 t 时刻的实际值。

根据临界比例法确定控制系统参数。首先,将控制器设置为比例控制器,形成闭环,使系统对阶跃输入的响应达到临界振荡状态时,记录此时的比例系数 K_p 和振荡周期 T ,根据齐格勒-尼柯尔斯经验公式,求得其余的控制参数^[14]。通过控制系统 (proportional integral derivative, PID) 仿真可以确定,平台启动需要耗时 3 s 达到预定的稳定状态^[15]。

3 技术方案应用与验证

直升机近地面飞行安全监控关键技术用于直升机近地面机动飞行中安全监控与预警。本文以直升机安全监控与预警为任务需求,依据旋翼尾梁近距离测量与告警技术和近地面高度高精度测量技术研究成果,研制了面向直升机近地面机动试飞的直升机安全监控与预警系统,满足直升机近地面机动飞行中空地联动安全预警的需求。

旋翼尾梁近距离测量与告警系统突破了恶劣工况下基于多光学测点危险距离探测技术,在大动态范围激光测距精度分析的基础上,解决直升机旋翼尾梁激光测距中背景强

光干涉等关键技术,填补了高精度直升机旋翼尾梁距离测量技术的应用空白,在国内首次实现了直升机在飞行中的旋翼尾梁近距离实时监测与告警。该系统如图8所示。具体指标如下:

- 1)测量范围:0~10 m,范围可设置;
- 2)分辨率:2.5 mm,精度:优于1%;
- 3)时间延迟: ≤ 8.5 ms。

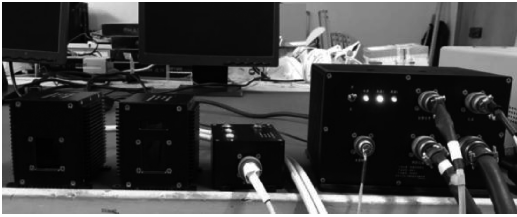


图8 旋翼尾梁近距离测量与告警系统

Fig.8 Rotor tailboom proximity measurement and warning system

近地面高度高精度测量系统通过平台控制算法实时调整激光测距仪的对地角度,消除直升机姿态限制,实现直升机机动试飞情况下近地高度的高精度测量。具体指标如下:

- 1)地面高度测量范围0~100 m;
- 2)测量精度 ± 15 cm;
- 3)实际姿态跟踪精度 $< 1.5^\circ$ 。

4 结 论

近地机动飞行是考核直升机机动能力、衡量直升机性能的关键科目,具有探索性强、危险性大的特点。针对近地机动试飞的高风险性,在开展近地机动飞行试验时,需要提供旋翼尾桨近距离测量和机体近地高度的安全监测与风险告警能力,以保障直升机的飞行安全。本文重点介绍了开展直升机近地面飞行安全监测与告警技术攻关,突破旋翼尾桨近距离测量与告警、机体近地高度精确测量的测试方法和关键技术,研制的直升机近地飞行安全监测与告警系统,保障了直升机近地机动飞行安全、可控,有力推动我国新一代直升机的研制工作;同时为进一步开展直升机飞行安全监控测试技术研究提供了技术储备,对于未来直升机飞行试验测试系统的设计具有重要的借鉴意义。

参考文献

- [1] 张庆新,朱金旭,郝晨乐.基于ESO-LQG-PI的无人直升机悬停姿态角控制研究[J].电子测量技术,2021,44(24):14-19.
ZHANG Q X, ZHU J X, HAO CH L. Research on hover attitude angle control of unmanned helicopter based on ESO-LQG-PI[J]. Electronic Measurement Technology, 2021, 44(24): 14-19.
- [2] 王舜,周惠兴,张中岳,等.基于改进粒子群的正交轴系

三维激光扫描设备的几何参数标定研究[J].电子测量技术,2023,46(1):1-8.

WANG SH, ZHOU H X, ZHANG ZH Y, et al. Research on geometric parameter calibration of orthogonal axis 3D laser scanning equipment based on improved particle swarm optimization[J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(1): 1-8.

- [3] 胡春源,林玉洁,朱简尊,等.单光子激光通信测距一体化系统设计[J].国外电子测量技术,2024,43(6):119-126.

HU CH Y, LIN Y J, ZHU J Z, et al. Design of integrated system for single photon laser communication ranging [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2024, 43(6): 119-126.

- [4] 张家铭,卫星.激光通信网络研究进展[J].光通信技术,2023,47(5):37-44.

ZHANG J M, WEI X. Research progress on satellite and laser communication networks [J]. Optical Communication Technology, 2023, 47(5): 37-44.

- [5] 汪逸群,汪精华,王阔.基于OOK体制空间光非相干测距通信系统设计与实现[J].微电子学与计算机,2023,40(8):64-72.

WANG Y Q, WANG J H, WANG K. Design and implementation of space optical incoherent ranging communication system based on OOK system [J]. Microelectronics and Computer, 2023,40(8): 64-72.

- [6] 李晓亮,刘荣科,王岩,等.基于单光子探测器恢复时间的误码率分析[J].遥测遥控,2023,44(1):15-21.

LI X L, LIU R K, WANG Y, et al. Error rate analysis based on single photon detector recovery time [J]. Telemetry and Remote Control, 2023, 44(1): 15-21.

- [7] 李云辉,修贤超,苗中华,等.基于交叉矢量的视觉-激光测距系统结构参数标定[J].仪器仪表学报,2022,43(10):185-194.

LI Y H, XIU X CH, MIAO ZH H, et al. Structural parameter calibration of vision laser ranging system based on cross vector[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(10): 185-194.

- [8] 汪石农,程志军,任超洋,等.一种双臂激光测距系统设计和误差分析[J].电子测量与仪器学报,2022,36(10):18-25.

WANG SH N, CHENG ZH J, REN CH Y, et al. Design and error analysis of a dual arm laser ranging system[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(10): 18-25.

- [9] 杨敬辉,刘德康,杜万和,等.基于图像特征的双目测距系统的研究[J].系统仿真学报,2022,34(3):624-632.
YANG J H, LIU D K, DU W H, et al. Research on

- binocular ranging system based on image features[J]. Journal of System Simulation, 2022, 34(3): 624-632.
- [10] 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.
- WU P P, CAI W Y, TANG G D, et al. Research on dynamic multi threshold error correction technology for laser ranging[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(7): 170-177.
- [11] KANG Y, CUI Z. Design of tram collision prevention system based on infrared ranging and Kalman filtering[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2019, 1237(3): 032084.
- [12] CHEN X, XU J, CHEN H, et al. High-accuracy ultrasonic rangefinders via pMUTs arrays using multifrequency continuous waves[J]. Journal of Micro Electromechanical Systems, 2019, 28(4): 634-642.
- [13] YANG H, JIN Y, ZHAO X, et al. Extraction of signal frequency in laser ranging of space target based on FPGA[J]. Wuhan University Journal of Natural Sciences, 2021, 26(3): 215-226.
- [14] WU B, HAN S J, XIAO J, et al. Error compensation based on BP neural network for airborne laser ranging[J]. Optik, 2016, 127(8): 4083-4088.
- [15] ZHANG J Y. Generating real random numbers with uncertainty principle [J]. Instrumentation, 2020, 7(3): 43-49.

作者简介

蒋红娜(通信作者), 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为机载测试系统传感器研发及校准技术。

E-mail:jianghongna_2009@163.com

马亚平, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为机载测试技术。

E-mail:19024286@qq.com