

激光与光电子学进展

电机转子振动对脉冲激光周向探测系统性能的影响

徐孝彬^{1,2,3,4*}, 陈毅^{1,2}, 李渊炜^{1,2}, 冉莹莹^{1,2}, 谭治英^{1,2}, 骆敏舟^{1,2}¹ 河海大学机电工程学院, 江苏 常州 213022;² 河海大学江苏省特种机器人技术重点实验室, 江苏 常州 213022;³ 南京航空航天大学机电学院, 江苏 南京 210016;⁴ 常州常工电子科技股份有限公司, 江苏 常州 213001

摘要 针对脉冲激光周向探测系统在高速转动条件下转轴形变影响探测性能的问题,通过建立高速转轴的力学模型,推导出转轴弯曲变形的理论公式;结合平面扩展目标的回波功率方程,建立了转轴偏移下目标探测成像模型。通过仿真分析转轴形变对回波信号幅值电压和成像位置的影响,结果表明:当电机转速达到40000 r/min时,转轴在全反平面镜处角位移达到0.013 rad,沿Y轴的形变达到0.88 mm;回波信号幅值电压随着转速的增大而逐渐减小;空间成像点在40000 r/min时有0.004 m的位置抖动。

关键词 激光技术; 周向探测; 转子振动; 扫描成像; 测距精度

中图分类号 TJ43

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0712001

Influence of Motor Rotor Vibration on Detection Performance of Pulsed Laser Circular-Viewing Detection System

Xu Xiaobin^{1,2,3,4*}, Chen Yi^{1,2}, Li Yuanwei^{1,2}, Ran Yingying^{1,2}, Tan Zhiying^{1,2}, Luo Minzhou^{1,2}¹ College of Mechanical & Electrical Engineering, Hohai University, Changzhou, Jiangsu 213022, China;² Jiangsu Key Laboratory of Special Robot Technology, Hohai University, Changzhou, Jiangsu 213022, China;³ College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China;⁴ Changzhou Changong Electronic Technology Co., Ltd., Changzhou, Jiangsu 213001, China

Abstract Aiming at the problem that the detection performance is affected by the deformation of the rotating shaft of the pulsed laser circumferential detection system under the condition of high-speed rotation, the mechanical model of the high-speed shaft is established to derive the theoretical formula of the bending deformation of the shaft. Combined with the echo power equation of the planar expansion target, the imaging model of target detection is established under the rotation axis offset. The influence of the deformation of the shaft on the amplitude voltage of the echo signal and the imaging position is simulated. The results show that when the motor speed reaches 40000 r/min, the angular displacement of the rotating shaft at the total reflection plane mirror reaches 0.013 rad, and the deformation along the Y axis reaches 0.88 mm; the amplitude voltage of the echo signal gradually decreases with the increase of the speed; the spatial imaging point has a position jitter of 0.004 m at 40000 r/min.

Key words laser technology; circular-viewing detection; rotor vibration; scanning imaging; ranging accuracy

收稿日期: 2021-04-15; 修回日期: 2021-05-26; 录用日期: 2021-06-02

基金项目: 国家自然科学基金(51805146)、江苏省重点研发计划项目(BE2018004-1)、中央高校基本科研业务费专项资金(B200202221)

通信作者: *xxbtc@hhu.edu.cn

1 引言

随着激光技术的发展,激光探测在无人驾驶^[1]、遥感测绘^[2-3]和武器装备^[4]等各个领域都有广泛的应用。其中,在军事领域中激光引信发挥着重要的作用^[4],激光器件的快速发展为大探测场激光引信在军事领域的应用提供了保障^[5],利用激光光束设定不同的空间布局方式,采用周向探测技术能解算目标距离和方位^[6],单点脉冲激光成像系统能实现远距离静态物体的 3D 点云成像,反映物体的距离、形状和尺寸等信息^[7]。在测距精度方面, Jiang^[8]、Steinvall^[9]和 Yan 等^[10]研究了不同测距方法对测距精度的影响,张伟等^[11]通过推导周视激光引信超低空对地探测模型,分析了地表反射特性对测距精度的影响,李玉钊等^[12]分析了距离测量精度对激光引信炸点控制精度的影响。在方位测量方面,由于空间尺寸的限制,脉冲激光周向探测系统无法直接使用位置传感器测量目标方位,而是依靠磁电检测子系统完成^[13],磁电检测系统方位检测受回波信号幅值电压和转速变动影响较大^[14],因此,对这两方面同时进行研究对周向探测系统获取精准成像性能具有理论指导意义。

关于电机转速对探测性能的影响,甘霖等^[14-15]采用光-磁(L-M)复合方位探测原理,建立了方位角测量数学模型,并且仿真分析了不同转速下目标方位角检测精度,同时进行了实验验证。然而,其并未直接分析电机转速对测距的影响,同时在仿真分析过程中并未考虑电机转动不平衡以及形变的影响。陈杉杉^[16]和谭亚运等^[17]分别仿真分析了在空中和水中条件下,不同电机转速下脉冲激光周向探测系统目标捕获概率,结果表明电机在高速条件下可以加快目标捕获概率收敛速度,但其忽视了转轴在高速转动下的形变。Li^[18]和 Qu 等^[19]研究了高速旋转扫描程序系统中电机转轴的强度和形变特性,并对电机安装结构进行了优化设计,提高其稳定性,降低其形变,但是并未结合光学分析其探测性能。Glennie 等^[20]对于商用激光探测系统性能进行了分析和标定,但对于旋转扫描式的结果只能对数据实现后处理,并未探究其扫描转速的影响。综上所述,高速旋转造成的转动形变对周向扫描探测性能的影响并未进行深入研究。

本文通过对高速转动下的转轴建模,推导出转轴变形的理论公式;仿真分析转轴变形对周向探测

系统性能的影响,仿真结果表明:转轴转速引起转轴变形,影响脉冲激光回波峰值电压,从而影响激光成像的空间位置。

2 脉冲激光周向探测系统的工作原理

激光引信脉冲激光周向探测系统的工作原理如图 1 所示,激光器发出的激光束经过准直透镜后出射,光束透过狭缝反射镜入射到全反平面镜上。随着反射平面镜高速旋转,反射光束透过光学窗口完成周向扫描,系统激光束照射到被测目标时,部分散射光束经过透光窗口,从接收反射平面镜反射到激光接收聚焦透镜上,光束会聚进入接收模块,获取回波信号,再经过信号处理系统计算目标距离。电机轴上放有磁钢,通过磁阻传感器感应磁场信号,磁电探测模块对其信号进行处理,计算电机转速,并将回波信号输入方位角探测模块中获取目标方位角信息。

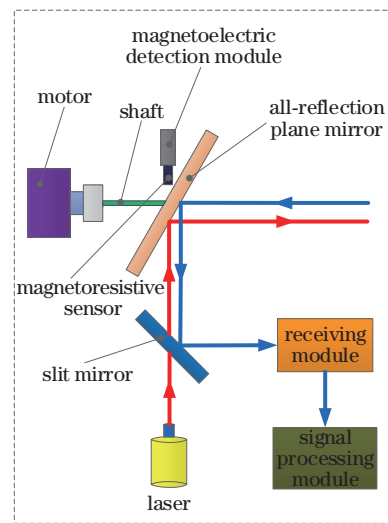


图 1 脉冲激光周向探测系统

Fig. 1 Pulse laser circumferential detection system

3 电机转子振动造成转轴变形的理论分析

3.1 转轴不平衡离心力矩分析

由图 1 系统结构可知,为获得目标方位在电机转轴一侧装有感应磁片,全反平面镜以一定角度固定在转轴下方,形成了质量不均匀、结构不对称的不平衡转子。其中质量不均匀可以通过调整配重解决,但是结构不对称使得转轴在高速旋转时受到空气阻力矩和离心力矩作用。在合力矩的作用下

可能发生弯曲变形,产生振动位移和角度偏转,改变激光的入射角度,影响激光成像位置和探测距离。采用单元积分法对电机高速旋转时转轴的弯曲变形进行分析。

全反平面镜以一定角度固定在转轴下方,形成转子结构不对称,高速旋转时平面镜将对转轴产生离心力矩,建立如图 2 所示的坐标系。

取平面镜单位元体积为

$$d\Omega = h dx dy, \quad (1)$$

式中, h 为平面镜厚度, m 。平面镜单位元质量为

$$dm = \rho d\Omega, \quad (2)$$

式中, ρ 为平面镜密度, kg/m^3 , 即

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m}{\pi R^2 h}, \quad (3)$$

式中, R 为平面镜半径。

平面镜旋转时单位元所受离心力作用为

$$dF = \omega^2 r dm = \frac{m\omega^2}{\pi R^2} \sqrt{x^2 + y^2 \sin^2 \theta} dx dy, \quad (4)$$

式中: ω 为电动机转速, r/min ; r 为单位元到转轴的距离, m ; θ 为转轴与平面镜 y 轴的夹角。

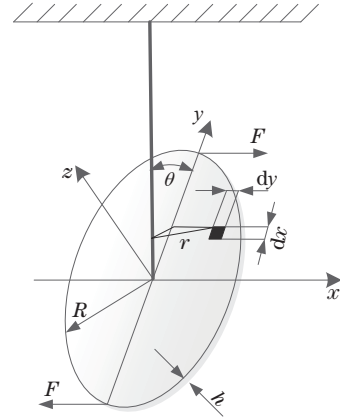


图 2 全反射平面镜力矩示意图

Fig. 2 Schematic diagram of total reflection plane mirror torque

由于镜片 x 轴两侧分别受到大小相同、方向不同的向心力的作用,形成力偶,则平面镜单位元离心力作用对转轴产生的力矩为

$$dM = 2y \left(\cos \frac{\pi}{4} \right) \frac{m\omega^2}{\pi R^2} \sqrt{x^2 + y^2 \sin^2 \theta} dx dy. \quad (5)$$

因此,转轴受到的平面镜离心力矩可描述为

$$M = \frac{\sqrt{2} m \omega^2}{\pi R^2} \iint_S y \sqrt{x^2 + y^2 \sin^2 \theta} dx dy = \frac{4\sqrt{2} m \omega^2}{\pi R^2} \int_0^R \int_0^{\sqrt{R^2 - x^2}} y \sqrt{x^2 + y^2 \sin^2 \theta} dx dy = \frac{8\sqrt{2} m \omega^2}{15\pi} \left(R^3 - \frac{1}{4} R^2 \right). \quad (6)$$

由此可见,当确定平面镜和夹具尺寸与质量之后,那么力矩 M (单位为 $\text{N} \cdot \text{m}$) 随 ω 增大呈二次函数型递增。

3.2 转轴弯曲变形引起的振动分析

转轴在重力和不平衡离心力矩的合力矩作用下,发生弯曲变形,产生振动位移。作用于 X 、 Z 轴方向的力矩,分别使转子发生 X 和 Z 轴方向的弯曲变形,即转子在 XOZ 平面内产生位移;作用于 Y 轴方向的力矩,主要使转子发生扭转变形,对 X 和 Z 轴方向的振动位移不做贡献。因此,在对转轴振动情况进行分析的过程中,可将其简化为弯曲模型。

转轴高速旋转时,转轴自身重力 G_1 、夹具和平面镜重力 G_2 及其离心力矩 M 均会对轴的位移产生影响。建立如图 3 所示的弯曲模型,其中轴的自身重力 G_1 为均布载荷。

将转轴简化为如图 3 所示的悬臂梁,则在 x 处的弯矩方程为

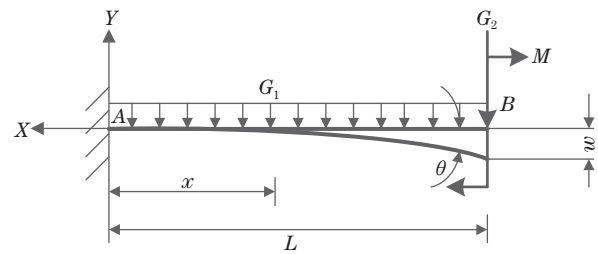


图 3 弯曲模型

Fig. 3 Bending model

$$M(x) = M + G_2 x - \frac{G_1 x^2}{2L} + G_1 x, \quad (7)$$

式中, L 为轴的长度。

挠曲线微分方程为

$$EI w'' = M(x), \quad (8)$$

积分得

$$EI \theta = Mx + \frac{G_2 x^2}{2} - \frac{G_1 x^3}{6L} + \frac{G_1 x^2}{2} + C, \quad (9)$$

$$EI w = \frac{1}{2} Mx^2 + \frac{G_2 x^3}{6} - \frac{G_1 x^4}{24L} + \frac{G_1 x^3}{6} + Cx + D, \quad (10)$$

式中： E 为梁的弹性模量； I 为梁的惯性截面距； w 为角速度。在固定端 A ，转角和挠度均应等于0，即当 $x=0$ 时，有 $\theta_A=0, w_A=0$ ，代入原式得 $C=0, D=0$ ；转角方程和挠曲方程分别为

$$\begin{cases} EI\theta = Mx + \frac{G_2x^2}{2} - \frac{G_1x^3}{6L} + \frac{G_1x^2}{2} \\ EIw = \frac{1}{2}Mx^2 + \frac{G_2x^3}{6} - \frac{G_1x^4}{24L} + \frac{G_1x^3}{6} \end{cases}, \quad (11)$$

将截面 B 横坐标 $x=L$ 代入(11)式，得截面 B 转角和挠度方程为

$$\begin{cases} \theta_B = \frac{1}{EI} \left[ML + \frac{L^2}{2} \left(G_2 + \frac{2}{3}G_1 \right) \right] \\ w_B = \frac{1}{EI} \left[\frac{ML^2}{2} + \frac{L^3}{6} \left(G_2 + \frac{3}{4}G_1 \right) \right] \end{cases}. \quad (12)$$

3.3 转轴偏移下目标探测成像模型

以全反平面镜中心为坐标原点 O ，全反平面镜所在平面为 xy 平面，其法线方向为 z 轴，建立如图4所示的脉冲激光周向探测系统的坐标系，假设激光探测点的距离为 C ，则空间成像点坐标为

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C \cos \gamma \cos \varphi \\ C \cos \gamma \sin \varphi \\ C \sin \gamma \end{bmatrix}, \quad (13)$$

式中： γ 为激光反射角； φ 为成像点在 xy 平面内的投影与 x 轴的夹角。

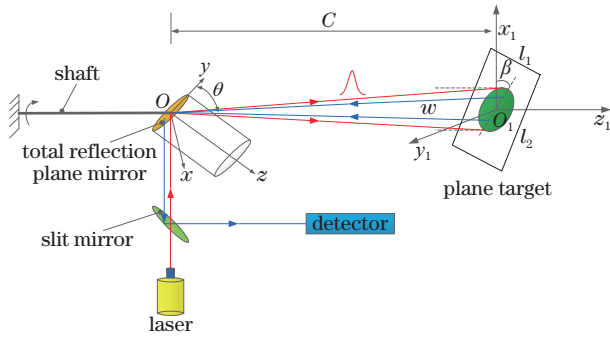


图4 脉冲激光周向探测系统坐标系

Fig. 4 Pulse laser circumferential detection system coordinate system

在脉冲激光周向探测系统中，由于收发间隙较小，可认为是同一点。对于激光周向探测系统，其回波功率方程的一般表达式^[21]为

$$P_r(t) = \frac{P_i(t)G_t}{4\pi R_r^2} \frac{\sigma}{4\pi R_t^2} \frac{\pi D^2}{4} \eta_a^2 \eta_b, \quad (14)$$

式中： $P_r(t)$ 为脉冲激光的回波功率； $P_i(t)$ 为脉冲激光的发射功率； G_t 为发射天线增益； R_t 为激光发射

点与被测目标的距离； σ 为激光散射截面积； R_r 为接收点与被测目标之间的距离； D 为接收系统直径； η_a 为大气透过系数； η_b 为光学透过率； t 为激光发射后的任意时刻。

激光的空间模场分布为 TEM_{00} 模，其空间分布服从高斯分布，则高斯光束照度的表达式为

$$E(x_1, y_1, z_1) = \frac{2P_i(t)}{\pi v^2} \exp \left[-2 \left(\frac{x_1^2 + y_1^2}{v^2} \right) \right], \quad (15)$$

式中， v 为距离 C 处的光斑半径。

激光器的输出为高斯脉冲，则激光发射功率为

$$P_i(t) = P_0 \exp \left(\frac{-t^2}{\tau^2} \right), \quad (16)$$

式中： P_0 为峰值功率； τ 为激光的输出脉宽。

单位面元的雷达散射截面方程为

$$d\sigma = 4\pi f_i(\beta) \cos^2 \beta dS, \quad (17)$$

式中： $f_i(\beta)$ 为单位面元的双向反射分布函数； dS 为激光散射单位面元； β 为激光入射角。

在激光周向近程探测中，光束发散角较小，目标纵深线度同探测距离相比可忽略，可认为横向强度仅是 x_1 和 y_1 的函数，与 z_1 无关，则 $\cos \beta dS = dx_1 dy_1$ 。在平面目标系统中，平面目标的探测模型如图4所示，平面目标的长度为 l_2 、宽度为 l_1 。激光光束与目标平面相交于点 O_1 ，目标平面与 $O_1x_1z_1$ 平面成 β 角，则 $z_1 = x_1 \tan \beta$ ，则激光光束照射平面扩展目标时的回波方程^[22]为

$$P_r(t) = \frac{\pi \tau P_0 D^2 \eta_a^2 \eta_b f_i(\beta) \cos \beta}{4R_r^2 \sqrt{\tau^2 + \frac{2v^2 \tan^2 \beta}{c^2}}} \exp \left[-\frac{\left(\frac{2R_r}{c} - t \right)^2}{\left(\tau^2 + \frac{2v^2 \tan^2 \beta}{c^2} \right)} \right], \quad (18)$$

式中， c 为光速。

当转轴高速旋转时，转轴变形使得回波接收面积变化，导致回波峰值功率变化，则回波方程为

$$P(t) = P_r(t) \cos \alpha, \quad (19)$$

式中， α 为全反平面镜在高速旋转状态下的偏离程度，由于 α 很小，可以近似将 α 等于 θ_B 。

采用峰值检测算法解算目标距离，则转轴高速转动使得空间成像点的坐标变为

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_p \cos(\theta + \theta_B + \theta') \cos \varphi \\ R_p \cos(\theta + \theta_B + \theta') \sin \varphi \\ R_p \sin(\theta + \theta_B + \theta') \end{bmatrix}, \quad (20)$$

式中： θ_B 为转轴的角位移； θ' 为转轴在高速转动过程中存在的随机角位移噪声； R_p 为峰值检测法测量的目标距离，计算公式为

$$R_p = \frac{c(t_r - t_0)}{2}, \quad (21)$$

式中： t_r 为回波峰值时刻； t_0 为主波时刻。

4 仿真分析

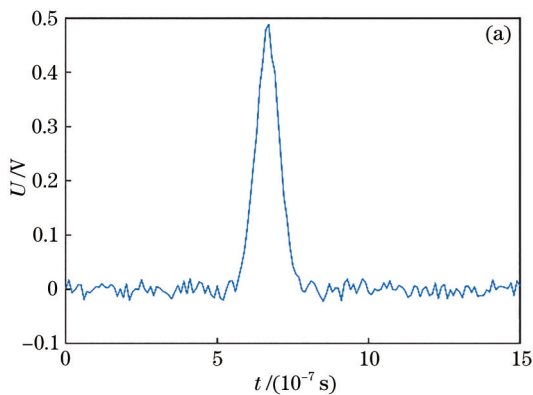
4.1 转轴变形计算与分析

选用平面镜的直径为 25.4 mm，厚度 h 为 2.5 mm，质量 m 为 4 mg，则 $M \approx -3.7 \times 10^{-8} \omega^2$ 。力矩的方向沿 x 轴的负方向，根据 (6) 式，当转轴转速在 10000~40000 r/min 范围内变化时，转轴受到的不平衡离心力矩如表 1 所示。

表 1 不同转速下转轴不平衡离心力矩
Table 1 Unbalanced centrifugal torque of shaft at different rotating speeds

Rotating speed ω (r·min ⁻¹)	Moment of force M / (N·m)
10000	-4.3×10^{-2}
20000	-1.7×10^{-1}
30000	-3.7×10^{-1}
40000	-6.7×10^{-1}

转轴材料选用合金钢，密度为 7.85 g/cm³，弹性模量 E 为 210 GPa，剪切模量 G 为 80 GPa，轴的长度 L 为 8 cm，轴直径 Φ 为 4 mm，则 (12) 式可化简为



$$\begin{cases} \theta_B \approx \frac{3.2 \times 10^{-3} + 0.5M}{8.4\pi} \\ \omega_B \approx \frac{5.9 \times 10^{-4} + 3.2 \times 10^{-2}M}{8.4\pi} \end{cases} \quad (22)$$

转轴速度在 10000~40000 r/min 范围内变化时，代入结果如表 2 所示。

表 2 不同转速对应的最大振动位移
Table 2 Maximum vibration displacement corresponding to different rotating speeds

Rotating speed ω / (r·min ⁻¹)	Corner θ_B / rad	Deflection w_B / mm
10000	9.8×10^{-4}	7.5×10^{-2}
20000	3.5×10^{-3}	2.3×10^{-1}
30000	7.5×10^{-3}	4.9×10^{-1}
40000	1.3×10^{-2}	8.8×10^{-1}

在实际转动过程中，空气阻力矩和轴承的径向游隙对轴变形的影响可以忽略不计^[3]，由表 2 可知，在离心力矩和重力的作用下，轴的变形程度随转速增大而逐渐增加，转速为 40000 r/min 时，轴变形程度达到最大，其中转角为 0.7°，沿 Y 轴的位移为 0.88 mm。

4.2 转轴变形对激光成像性能影响的仿真

脉冲激光周向探测系统的回波波形如图 5(a) 所示，其中噪声均方根为 10 mV；当转轴高速旋转时，转轴变形使得回波接收面积变化，导致回波峰值功率变化，回波峰值功率与转速的关系如图 5(b) 所示。转速在 10000~40000 r/min 范围内，随着转速的增大，转轴变形程度增大，回波峰值功率减小。

假设探测距离 $C = 10$ m，投影与 x 轴的夹角 $\varphi = 0$ ，转轴高速转动角位移随机误差的方根为 2×10^{-5} rad，则不同转速下成像点的空间位置如图 6 所示。10000 r/min 时成像点的 x 坐标在 7.064 m 附

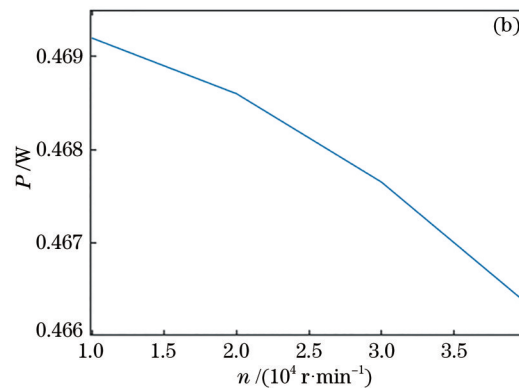


图 5 脉冲激光周向探测系统回波信号。(a) 回波波形；(b) 回波峰值功率与转速的关系

Fig. 5 Echo signal of pulsed laser circumferential detection system: (a) Echo waveform; (b) relationship between echo peak power and rotating speed

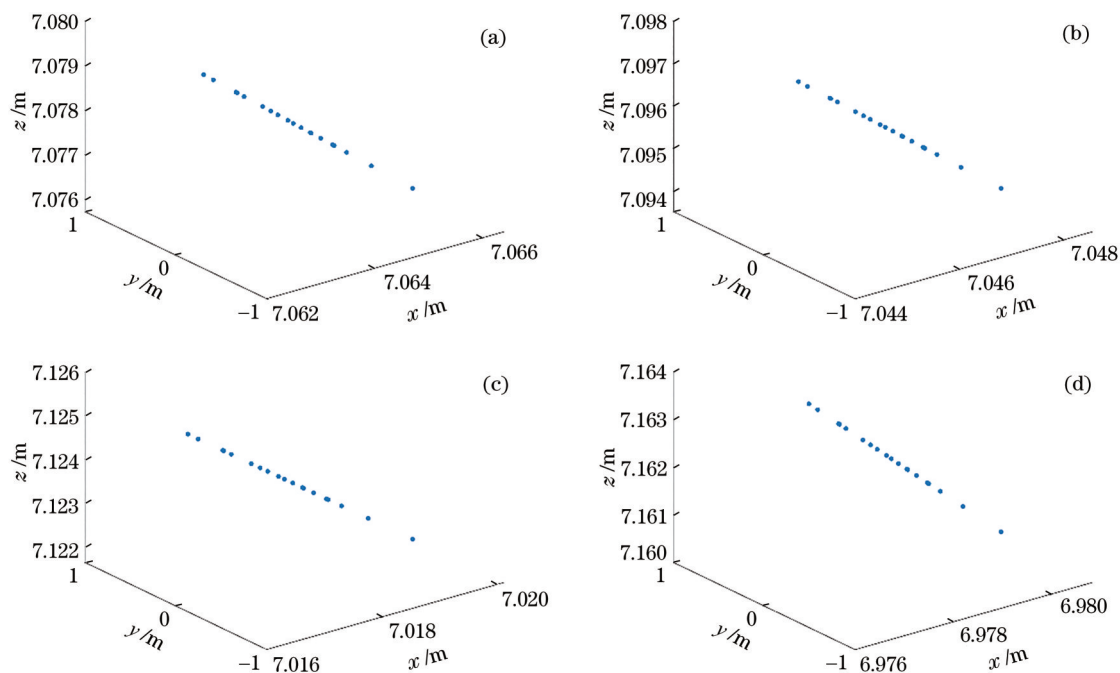


图 6 不同转速下成像点位置。(a) 10000 r/min; (b) 20000 r/min; (c) 30000 r/min; (d) 40000 r/min

Fig. 6 Imaging point positions at different rotating speeds. (a) 10000 r/min; (b) 20000 r/min; (c) 30000 r/min; (d) 40000 r/min

近, z 轴坐标在 7.078 m 附近; 20000 r/min 时成像点的 x 坐标在 7.046 m 附近, z 轴坐标在 7.096 m 附近; 30000 r/min 时成像点的 x 坐标在 7.018 m 附近, z 轴坐标在 7.124 m 附近; 40000 r/min 时成像点的 x 坐标在 6.978 m 附近, z 轴坐标在 7.162 m 附近; 随着转速增大, 转轴变形程度增大, x 轴坐标逐渐减小, z 轴坐标逐渐增大。由于转轴高速转动存在随机误差, 相同转速下的成像点位置坐标也有变化。

脉冲激光周向探测系统的空间成像点在平面镜内的投影如图 7 所示, 随着转速增大, 成像点在平面镜内的投影长度逐渐减小, 减小的量有逐渐增大的趋势, 当电机转速为 40000 r/min 时, 相比转速为 10000 r/min 的测距结果减小幅度超过 0.8 m。同时, 转轴转速产生的形变使得成像点位置变化具有随机性。

5 结 论

通过建立高速转轴的力学模型, 推导出转轴变形的理论公式, 结果表明: 当转速达到 40000 r/min 时, 全反平面镜的角位移达到 0.013 rad、转轴形变达到 0.88 mm; 建立了回波方程的仿真模型, 仿真分析转轴变形对系统性能的影响, 仿真结果表明: 随着转速增大, 目标的回波峰值功率逐渐减小; 不同转速下空间成像点位置不同, 转速越高位置变化范围越大; 同一转速下, 由于存在角位移随机噪声,

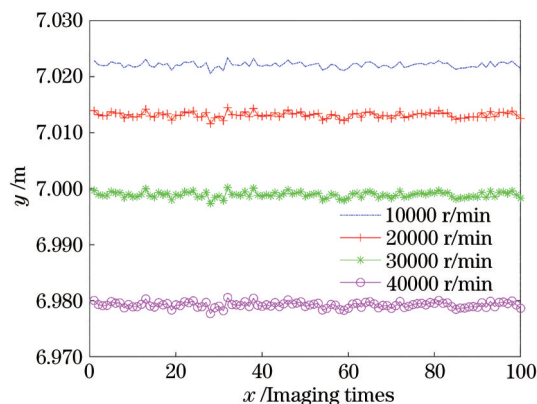


图 7 不同转速下空间成像点在平面镜内的投影结果

Fig. 7 Projection results of space imaging points in plane mirrors at different rotating speeds

成像点位置也出现明显抖动。

参 考 文 献

- [1] Schwarz B. Mapping the world in 3D[J]. Nature Photonics, 2010, 4(7): 429-430.
- [2] Jiang Y S, Karpf S, Jalali B. Time-stretch LiDAR as a spectrally scanned time-of-flight ranging camera [J]. Nature Photonics, 2020, 14(1): 14-18.
- [3] Abed F M, Mills J P, Miller P E. Echo amplitude normalization of full-waveform airborne laser scanning data based on robust incidence angle estimation[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2012, 50(7): 2910-2918.

- [4] Zhang H. Fuze and environment[J]. Journal of Detection & Control, 2019, 41(1): 1-5.
张合. 引信与环境[J]. 探测与控制学报, 2019, 41(1): 1-5.
- [5] Lü H, Yao H B, Chen P. Target identifying of large visual angle to the laser fuze[J]. Infrared and Laser Engineering, 2005, 34(4): 427-429.
吕华, 姚宏宝, 陈平. 大视场激光引信目标识别方法研究[J]. 红外与激光工程, 2005, 34(4): 427-429.
- [6] Tao M, Wang Z, Bai X Y. The choice and analysis of laser fuze beam position[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2007, 27(2): 162-165.
陶敏, 王卓, 白修宇. 激光引信光束布局方式的选择与分析[J]. 弹箭与制导学报, 2007, 27(2): 162-165.
- [7] He Q Y, Huang L H. Imaging technology based on single-point laser scanning[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(6): 0628002.
何巧莹, 黄林海. 基于单点激光测距的扫描成像技术[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(6): 0628002.
- [8] Jiang H J, Lai J C, Yan W, et al. Theoretical distribution of range data obtained by laser radar and its applications[J]. Optics & Laser Technology, 2013, 45: 278-284.
- [9] Grönwall C A, Steinvall O K, Gustafsson F, et al. Influence of laser radar sensor parameters on range-measurement and shape-fitting uncertainties[J]. Optical Engineering, 2007, 46(10): 106201.
- [10] Yan S Y, Yang G H, Li Q Y, et al. Distance-intensity image strategy for pulsed LiDAR based on the double-scale intensity-weighted centroid algorithm [J]. Remote Sensing, 2021, 13(3): 432.
- [11] Zhang W, Li Y Z, Wang Z S, et al. Research on ground echo of ultra-low altitude detection by circumferential laser fuze[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(4): 0413008.
张伟, 李玉钊, 汪哲思, 等. 周视激光引信超低空探测地面回波特性研究[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(4): 0413008.
- [12] Li Y Z, Liu Y, Chen X, et al. Precision analyses of point-of-burst control based on laser fuze[J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(12): 1206004.
李玉钊, 刘岩, 陈曦, 等. 激光引信炸点控制精度分析[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(12): 1206004.
- [13] Xu X B, Zhang H. Pulsed laser detection azimuth magneto-electric detection technology[J]. Acta Photonica Sinica, 2017, 46(1): 0114003.
徐孝彬, 张合. 脉冲激光探测方位角磁电检测技术[J]. 光子学报, 2017, 46(1): 0114003.
- [14] Gan L, Zhang H. Statistical probability density distribution of azimuth dynamic detection based on laser and magnetism[J]. Acta Armamentarii, 2018, 39(12): 2338-2344.
甘霖, 张合. 光-磁复合方位动态探测概率密度统计分布[J]. 兵工学报, 2018, 39(12): 2338-2344.
- [15] Gan L, Zhang H. Short-range azimuth measurement method based on the adaptive filtering mechanism using laser and magnetism[J]. Applied Optics, 2018, 57(20): 5749-5757.
- [16] Chen S S, Zhang H, Xu X B. Modeling and simulation of acquisition for ground target by pulsed laser circular-viewing detection[J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(2): 0206001.
陈杉杉, 张合, 徐孝彬. 脉冲激光周向探测地面目标捕获建模与仿真[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(2): 0206001.
- [17] Tan Y Y, Zhang H, Zha B T. Modeling and simulation of underwater single-beam scanning laser fuze acquisition rate[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2015, 27(11): 111012.
谭亚运, 张合, 查冰婷. 水中单光束扫描激光引信捕获率建模与仿真[J]. 强激光与粒子束, 2015, 27(11): 111012.
- [18] Li C B, Liu M Q, Ruan S C, et al. Strength reliability of rotating mirrors for ultra-high-speed cameras[J]. Optik, 2018, 174: 363-371.
- [19] Qu Y J, Jiang Y R, Feng L J, et al. Lightweight design of multi-objective topology for a large-aperture space mirror[J]. Applied Sciences, 2018, 8(11): 2259.
- [20] Glennie C, Lichti D D. Static calibration and analysis of the Velodyne HDL-64E S2 for high accuracy mobile scanning[J]. Remote Sensing, 2010, 2(6): 1610-1624.
- [21] Jelalian A V. Laser radar systems[M]. Boston: Artech House, 1992.
- [22] Xu X B, Zhang H, Chen S S. Plane target echo characteristics of pulsed laser circular-viewing detection[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(4): 0414003.
徐孝彬, 张合, 陈杉杉. 脉冲激光周向探测平面目标回波特性[J]. 光学学报, 2017, 37(4): 0414003.