[研究・设计]

DOI: 10.3969/j. issn. 1005-2895. 2019. 01. 004

六自由度并联机构的误差分布研究

安明云,于大泳,张黎明

(上海理工大学 机电工程学院,上海 200093)

摘 要:针对制造和安装误差对并联机构末端位姿精度的影响问题,以六自由度 Stewart 并联机构为研究对象,在建立运动学正解一阶误差模型的基础上,结合泰勒展开式推导出 Stewart 并联机构末端的位置和方向误差与驱动器不同长度变化之间非线性关系式;并用 MATLAB 软件仿真分析结构参数误差存在的条件下,工作空间中六自由度 Stewart 并联机构末端位姿误差的分布情况。分析结果表明:不同位姿下,位姿误差存在差异;在 x 轴正方向上,位姿体积误差的变化规律具有一致性,均随 x 轴正方向的移动而逐渐增大;同时位置体积误差的变化幅值远大于姿态体积误差的变化幅值,并且最大位姿误差出现在可达工作空间边缘的顶部位置。研究结果为该并联机构后续进行精度综合及误差补偿提供参考依据。

关键词:六自由度并联机构;Stewart平台;运动学;误差建模;MATLAB 仿真;误差分布

中图分类号:TP242 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2019)01-0023-05

Research on Error Distribution of Six-DOF Parallel Mechanism

AN Mingyun, YU Dayong, ZHANG Liming

(School of Mechanical Engineering, University for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: For the influence of manufacturing and installation errors on the accuracy of the end position of the parallel mechanism, with the six-degree-of-freedom Stewart parallel mechanism as the research object, the nonlinear relationship between the position and direction error of the end of the Stewart parallel mechanism and the different length changes of the driver was derived based on the establishment of the kinematics positive solution first-order error model, combining with the Taylor expansion. The Matlab software was used to simulate and analyze the spatial distribution of the position error of the parallel mechanism under the condition of structural parameter error. The analysis results show that there are differences in pose errors under different poses. In the positive direction of the x-axis, the variation of the pose volume error is consistent, and it gradually increases with the positive direction of the x-axis, meanwhile the amplitude of the positional volume error is much larger than the amplitude of the attitude volume error. And the maximum pose error occurs at the top of the edge of the workspace. The research results provide a theoretical basis for the subsequent precision synthesis and error compensation of the parallel mechanism.

Keywords: six-DOF parallel mechanism; Stewart platform; kinematics; error modeling; MATLAB simulation; error distribution

随着并联机构理论的不断发展,并联机器人逐渐受到各领域人士的密切关注,成为现今机构制造、装配等领域的研究热点之一。并联机构因其具有刚度大、精度高、承载能力强、定位精度高和动态性能好等优点^[1-2],在航空航天、医学医疗、微型机构、高仿真训练驾驶模拟器以及精密装配等领域的应用上具有越来越

重要的作用。但是由于并联机构在空间结构中的复杂性非常独特,致使并联机构末端精度受到诸多方面的影响^[3-5],其中并联机构的位置和方向上的误差主要是机构单个连接误差及其交互作用的结果,因此,机构在加工、装配过程中存在的误差自然而然成为了精度研究中不可忽视的问题。为了提高机器的精度,柴保明

等[6]利用微分原理建立 3-PCR 并联机构精度模型,探 究了误差源对机构动平台精度的影响。李建广[7]针 对具有内在不精确性的传统误差模型,提出了基于正 向运动学的概率和确定性方法,并在仿真中分析了综 合姿态误差。Briot^[8]研究了三自由度平面并联机器人 在输入时所产生的局部最大定位误差和位置误差。 Leal-Naranjo^[9]充分考虑工作空间、灵敏度以及驱动器 扭矩 3 个设计目标,采用多目标优化方法,利用遗传算 法实现了机械手的优化。笔者在前人的基础上通过分 析六自由度并联机构的结构特点,建立包含全部加工、 装配误差的一阶位姿误差模型,为提高精确度,结合泰 勒展开式推导出机构末端位置和方向误差与驱动器长 度误差二者之间的二阶非线性关系式,仿真分析出在 结构参数误差存在的条件下,并联机构末端位姿误差 的空间分布情况,为六自由度并联机构在进行精度综 合以及误差补偿等过程中选取最优位姿提供依据。

1 六自由度并联机构的结构组成

如图 1 所示,一个具有六自由度的 Stewart 平台的示意图,主要由运动平台、静平台、驱动器及球铰组成^[10]。工作时,可以通过改变各驱动器的长度来控制运动平台到达预设的位置和方向,进而实现对运动平台位置姿态的控制。

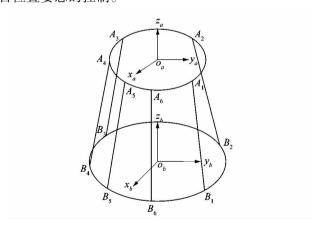


图 1 六自由度 Stewart 平台示意图
Figure 1 Six degrees of freedom Stewart
platform schematic

2 运动学分析

2.1 建立坐标系

为了完美描述平台的运动,建立 2 个坐标系,分别为固定坐标系 o_a - $x_by_bz_b$ 和动坐标系 o_a - $x_ay_az_a$ 。 并将 2 个坐标系安置在同一固定框架上,如图 2 所示。用 o_a - $x_ay_az_a$, o_b - $x_by_bz_b$ 分别来表示运动平台以及固定平台的平台中心及其参考系,铰点 A_i (i = 1,2,3,4,5,6) 和铰

点 B_i (i=1,2,3,4,5,6) 分别为运动平台和固定平台 球形关节角的分布点。 φ_1 是运动平台的球形关节分 布角, φ_2 是固定平台的球形关节分布角。初始位置 时,平台上各个驱动器的长度相等,此时固定坐标系与 运动坐标系的坐标轴方向对应一致,且 z_a 轴与 z_b 轴重 合,均垂直于运动平台平面,方向朝上。

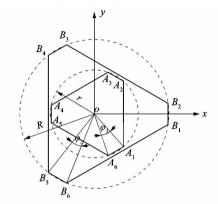


图 2 六自由度并联机构的坐标系示意图 Figure 2 Schematic diagram of coordinate system of six-DOF parallel mechanism

2.2 运动学分析

在运动学分析中, 动坐标系的位置关于固定坐标系的位置可以通过进行齐次变换 $_a^b T^{[11-12]}$ 来描述: θ_x , θ_y 和 θ_z 分别是关于 x, y 和 z 轴的旋转角度, P 为固定坐标系 o_b - $x_b y_b z_b$ 的铰链中心 $\{B_i\}$ 在动坐标系 o_a - $x_a y_a z_a$ 中的位置矢量, c 和 s 分别代表 cos 和 sin。

$${}_{a}^{b}\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{P} \\ \mathbf{0}^{\mathrm{T}} & \mathbf{0} \end{bmatrix}$$
 (1)

其中旋转矩阵 R 为

$$\begin{split} & \boldsymbol{R} = R_{Z\theta_z} \cdot R_{Y\theta_y} \cdot R_{X\theta_x} = \\ & \begin{bmatrix} c\theta_z c\theta_y & c\theta_z s\theta_y s\theta_x - s\theta_z c\theta_x & c\theta_z s\theta_y c\theta_x + s\theta_z s\theta_x \\ s\theta_z c\theta_y & s\theta_z s\theta_y s\theta_x - c\theta_z c\theta_x & s\theta_z s\theta_y c\theta_x - c\theta_z s\theta_x \\ -s\theta_y & c\theta_y s\theta_x & c\theta_y c\theta_x \end{bmatrix} & ... \end{split}$$

基于这种变换, 动坐标系 o_a - $x_ay_az_a$ 中 $\{A_i\}$ 的坐标相对于固定坐标系 o_b - $x_by_bz_b$ 可以确定为:

$$\begin{bmatrix} b_{ix} \\ b_{iy} \\ b_{iz1} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{P} \\ 0^{\mathrm{T}} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{ix} \\ a_{iy} \\ a_{iz1} \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{R} \cdot \mathbf{A}_i + \mathbf{P}, i = 1, 2, 3, 4, 5, 6_{\circ}$$

(2)

由此理论杆长 L_i 为固定平台上的第i个球关节和运动平台上的第i个球关节之间的距离,即驱动这个平台的驱动器的理论长度为:

 $L_i^2 = \| \mathbf{R} \cdot \mathbf{a}_i - \mathbf{b}_i + \mathbf{p}_i \| , i = 1, 2, 3, 4, 5, 6.$ (3) 式中: L_i 表示第 i 条支链的杆长; \mathbf{a}_i , \mathbf{b}_i 分别为铰点 A_i 和铰点 B_i 的矢量; \mathbf{p}_i 为运动坐标系原点在固定坐标系中的矢量。

由式(3)中可以看出,理论杆长 L_i 是由在固定坐标系下的位置函数 $\{X,Y,Z\}$ 和方向 $\{\theta_x,\theta_y,\theta_z\}$ 决定,理论距离也是将平台推向理想位置和方向的必要长度。然而,铰链间隙的存在,会使 a_i,b_i 之间的驱动器长度出现不同程度的变化,而距离误差会导致平台偏离其所期望的位置和方向。

由于理论杆长 L_i 是关于平台的位置和方向变量的函数,则通过对式(3)进行灵敏度分析,就可以确定平台位置和方向的变化如何导致驱动器杆长的变化。灵敏度参数定义为 L_i 关于 X,Y,Z,θ_x,θ_y 和 θ_z 的偏导数,即 $\frac{\partial L_i}{\partial q},q=X,Y,Z,\theta_x,\theta_y,\theta_z$;即一阶微分方程表示驱动器杆长 L_i 的变化为:

$$\Delta L_{i} = \frac{\partial L_{i}}{\partial X} \Delta X + \frac{\partial L_{i}}{\partial Y} \Delta Y + \frac{\partial L_{i}}{\partial Z} \Delta Z + \frac{\partial L_{i}}{\partial \theta_{x}} \Delta \theta_{x} + \frac{\partial L_{i}}{\partial \theta_{y}} \Delta \theta_{y} + \frac{\partial L_{i}}{\partial \theta_{z}} \Delta \theta_{z} \circ \tag{4}$$

基于式(4), Stewart 并联机构的 6 根驱动杆长的 微分变化关系,即运动平台的位置和姿态的偏差可以 被定义为:

$$\begin{bmatrix} \Delta L_1 \\ \Delta L_2 \\ \Delta L_3 \\ \Delta L_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial L_1}{\partial x} & \frac{\partial L_1}{\partial y} & \frac{\partial L_1}{\partial z} & \frac{\partial L_1}{\partial \theta_x} & \frac{\partial L_1}{\partial \theta_y} & \frac{\partial L_1}{\partial \theta_z} \\ \frac{\partial L_2}{\partial x} & \frac{\partial L_2}{\partial y} & \frac{\partial L_2}{\partial z} & \frac{\partial L_2}{\partial \theta_x} & \frac{\partial L_2}{\partial \theta_y} & \frac{\partial L_2}{\partial \theta_z} \\ \frac{\partial L_3}{\partial x} & \frac{\partial L_3}{\partial y} & \frac{\partial L_3}{\partial z} & \frac{\partial L_3}{\partial \theta_x} & \frac{\partial L_3}{\partial \theta_y} & \frac{\partial L_3}{\partial \theta_z} \\ \frac{\partial L_4}{\partial x} & \frac{\partial L_4}{\partial y} & \frac{\partial L_4}{\partial z} & \frac{\partial L_4}{\partial \theta_x} & \frac{\partial L_4}{\partial \theta_y} & \frac{\partial L_4}{\partial \theta_z} \\ \frac{\partial L_5}{\partial x} & \frac{\partial L_5}{\partial y} & \frac{\partial L_5}{\partial z} & \frac{\partial L_5}{\partial \theta_x} & \frac{\partial L_5}{\partial \theta_y} & \frac{\partial L_5}{\partial \theta_z} \\ \frac{\partial L_6}{\partial x} & \frac{\partial L_6}{\partial y} & \frac{\partial L_6}{\partial z} & \frac{\partial L_6}{\partial \theta_x} & \frac{\partial L_6}{\partial \theta_y} & \frac{\partial L_6}{\partial \theta_z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Q \\ \Delta \theta_y \\ \Delta \theta_z \end{bmatrix}.$$

等式右边的第一个矩阵是雅可比矩阵 J,根据式 (5) 可知,当给定 Stewart 平台预期的位置和方向时,可以通过雅可比矩阵 J 转换平台的坐标和方向来确定。反之,如果已知各杆长变化,那么此时的位置和方向偏差可以由各杆长误差 ΔL_i 与雅可比矩阵 J 的逆矩阵 (J^{-1}) 相乘来得到,即得到 Stewart 平台的运动学正解

方程:

$$\begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \\ \Delta \theta_x \\ \Delta \theta_y \\ \Delta \theta_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta L_1 \\ \Delta L_2 \\ \Delta L_3 \\ \Delta L_4 \\ \Delta L_5 \\ \Delta L_6 \end{bmatrix}$$
 (6)

从而得到了 Stewart 并联机构的运动平台的一阶位姿误差模型,其中影响运动平台末端位姿误差的因素主要包括球铰的偏心位置误差、执行器的长度变化在内的结构误差参数。在进行误差仿真分析时发现,当结构参数误差较小时,式(7)所建立的误差模型具有较高的精确度;随着结构参数误差的不断加大,精确度随之减小。考虑到外界环境的动态情况,因此建立更高阶的误差模型以提高精确度显得格外重要。

将式(4)基于泰勒级数展开式,可得到:

忽略高阶项之后,基于一阶和二阶微分执行器长 度误差模型可写成:

$$\left[\Delta L_i \right] = \left[\frac{\partial L_i}{\partial q_j} \right] \left[\Delta q_i \right] + \frac{1}{2} \left[\frac{\partial L_i^2}{\partial q_j \partial q_k} \right] \left[\Delta q_j \Delta q_k \right]_{\circ}$$
 (8)

式中: $\left[\frac{\partial L_i}{\partial q_j}\right]$ 为雅克比矩阵 J, 同式(5); $\left[\frac{\partial L_i^2}{\partial q_j \partial q_k}\right]$ 为二阶 雅克比矩阵; q_j 为 X, Y, Z, θ_x , θ_y 和 θ_z ; q_k 为 X, Y, Z, θ_x , θ_y 和 θ_z ; q_k 为 q_y , q_y q_y

式(8)为平台的位置和方向误差与驱动器不同长度变化之间的关系的非线性方程组,通过用 Newton-Raphson 法进行迭代求解^[13]。

3 仿真分析

(5)

如表 1~2 所示,分别为并联机构的结构参数以及 给定的上下平台各铰点的误差参数。对建立的误差模 型进行计算机仿真模拟计算,便可获得给定结构参数 误差的条件下,并联机构末端的位姿误差在工作空间 中的分布状况。由于篇幅有限,表 3 给出了工作空间 mm

内具有代表性的 25 组位姿体积误差数据。图 4~5 分别为固定姿态角 ($\alpha = \beta = \gamma = 0$)下,六自由度 Stewart 并联机构在其所达到的工作空间内的姿态体积误差散点图以及位置体积误差散点图。

表1 六自由度并联机构的结构参数

Table 1 Structural parameters of six-DOF parallel mechanism

R/mm	r/mm	$arphi_1/{ m rad}$	φ_2/rad	
1 200	560	0.278 7	0.186 1	

表 2 六自由度并联机构的结构参数误差

Table 2 Parameter error of six-DOF parallel mechanism

编	运动平台的铰点位置误差			固定平台的铰点位置误差			各杆长
号	$\Delta a_{\it ix}$	Δa_{iy}	Δa_{iz}	$\Delta b_{\it ix}$	$\Delta b_{\it iy}$	$\Delta b_{\it iz}$	· 初始 误差
1	0.6	0.10	-0.2	-1.0	-2.0	1.0	0.3
2	0.4	0.09	-0.1	-0.8	0.6	-0.9	0.1
3	0.3	0.20	0.5	-0.1	-1.7	2.0	-0.3
4	0.9	0.05	0.7	0.3	0.1	-0.7	-0.1
5	-0.6	0.05	-0.4	-0.3	-1.1	0.3	0.3
6	-0.5	0.05	0.4	-1.1	0.3	1.0	0.2

表3 六自由度并联机构末端位姿误差仿真结果

Table 3 Simulation results of end pose error of six-DOF parallel mechanism

α/rad	β/rad	γ/rad	x/mm	y/mm	z/mm	姿态角体积误	位置体积
						差×10 ⁻⁴ /rad	误差/mm
0	0	0	- 200	0	1 830	7.923 6	0.2227
0	0	0	- 200	0	1 930	7.976 9	0.318 2
0	0	0	- 200	0	2 030	8.907 5	0.3407
0	0	0	- 200	0	2 130	8.941 1	0.4628
0	0	0	- 200	0	2 230	9.8724	0.5878
0	0	0	- 100	0	1 830	7.723 2	0.418 0
0	0	0	- 100	0	1 930	8.675 0	0.5206
0	0	0	- 100	0	2 030	9.6306	0.6327
0	0	0	- 100	0	2 130	9.6512	0.6579
0	0	0	- 100	0	2 230	10.605 0	0.7800
0	0	0	0	0	1 830	8.760 5	0.625 0
0	0	0	0	0	1 930	9.6722	0.728 9
0	0	0	0	0	2 030	9.678 0	0.8397
0	0	0	0	0	2 130	10.602 0	0.8613
0	0	0	0	0	2 230	10.594 0	0.9807
0	0	0	100	0	1 830	10.058 0	0.935 4
0	0	0	100	0	1 930	9.9974	0.943 1
0	0	0	100	0	2 030	10.808 0	1.052 2
0	0	0	100	0	2 130	10.855 0	1.165 2
0	0	0	100	0	2 230	11.699 0	1.188 1
0	0	0	200	0	1 830	11.411 0	1.156 9
0	0	0	200	0	1 930	11.533 0	1.259 3
0	0	0	200	0	2 030	12.102 0	1.271 3
0	0	0	200	0	2 130	12.1940	1.382 0
0	0	0	200	0	2 230	12.939 0	1.402 4

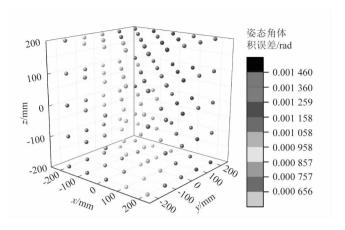


图3 姿态角体积误差散点图

Figure 3 Attitude angle volume error scatter diagram

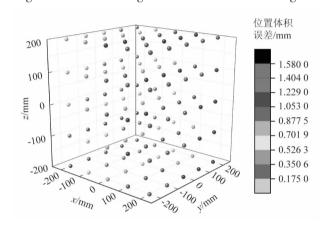


图 4 位置体积误差散点图

Figure 4 Scatter plot of position volume error

由表3以及图3~4可知:

- 1) 在结构参数误差存在的条件下,位姿不同,并 联机构所产生的末端位姿误差也存在差异;且姿态体 积误差和位置体积误差均随 x 轴正方向的移动具有逐 渐增大的趋势。
- 2) 在该并联机构的终端位姿误差中,姿态体积误差与位置体积误差两者从数值上相比较而言,运动平台的姿态体积误差很小,两者相差了近乎3个数量级,进而说明影响并联机构末端位姿精度的主要因素为终端位置误差;
- 3) 在给定的机构可达空间内,姿态体积误差和位置体积误差两者在边缘位置的误差比同等高度下的各点的误差要大,且最大误差出现在工作空间的顶部,充分说明了并联机构最大终端位姿误差存在于可达工作空间边缘的顶部位置。

4 结语

以六自由度 Stewart 平台为研究对象,在一阶正解

误差模型的基础上,结合泰勒展开式推导出 Stewart 平台末端位置和方向误差与驱动器不同长度变化之间函数关系,通过仿真分析可以发现:

- 1) 定量分析出给定结构参数误差的前提下,其末端最大位姿体积误差存在于工作空间边缘的顶部位置,因此后续应取输出最大位姿误差的位姿进行位姿补偿及其精度标定,即通过降低最大位姿误差以达到降低其他误差的目的。
- 2)通过仿真可以看出,在任一位姿下,并联机构 末端位置误差最小时,对应的姿态角误差并不是最小, 因此,为了保证并联机构末端输出位姿精度达到所需 要求,则必须保证在同一位姿下位置误差和姿态误差 二者同时达到最小,这将是后续进行误差综合以及误 差补偿方法研究需要考虑的问题。

参考文献:

- [1] 黄真, 孔令富, 方跃法. 并联机器人机构学理论及控制[M]. 北京: 北京工业出版社,1997;3-10.
- [2] MRELT J P. Parallel Robotss [M]. 2td ed. New York: Springer, 2006: 1-36.
- [3] 张建中.基于倾角测量仪测量位姿的六自由度平台运动学标定研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2007:20.

- [4] 潘光绪, 贾光政, 边颖聪, 等. 步进电机驱动六自由度并联运动平台设计[J]. 机电工程, 2017, 34(10):1117-1121.
- [5] 李刚. 五轴数控研抛机床误差综合建模及补偿技术研究[D]. 长春: 长春工业大学, 2016:2-5.
- [6] 柴保明,陈景礼,王肖肖,等. 3-PCR 并联机构精度分析[J]. 组合 机床与自动化加工技术,2015,1(1):61.
- [7] LI Jianguang, DING Jian, YAO Yingxue, et al. Forward-kinematics-based approaches for pose accuracy of docking mechanism with joint clearance [J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015, 32(4):366-370.
- [8] BRIOT S, BONEY I A. Accuracy analysis of 3-DOF planar parallel robots [J] Mechanism and Machine Theory, 2008, 43(4);448-452.
- [9] LEAL-NARANJO J A, CECCARELLI M, TORRES-SAN-MIGUEL C R, et al. Mult-objective optimization of a parallel manipulator for the design of a prosthetic arm using genetic algorithms [J]. Latin American Journal of Solids and Structures, 2018, 15(3):1-15.
- [10] 谭爽,王小勇,林喆,等. 六自由度并联机构位姿调整灵敏度分析 [J]. 航天返回与遥感, 2016, 36(6):78-85.
- [11] 崔鑫磊,李威. 基于蒙特卡洛模拟的 6-UPS 并联机构的误差分析 [J]. 机械设计与制造,2016,6(6):86-92.
- [12] CRAIG J J. 机器人学导论[M]. 负超,译. 北京: 机械工业出版 社,2018:13-37.
- [13] 杨恒,薛开. 六自由度并联机构变搜索原点迭代正解方法[J]. 应用科技,2016,43(2):54-58.

(上接第22页)

量与挡板发生碰撞,刀头的动能转换为挡板的内力能, 以应力波的形式传播并损耗消散。刀头2个阶段的运动状态即为其摆动特性。

选针器摆动过程的运动特征为挡板定位安装提供了准确数据依据,表明选针器双稳态间跃迁时间一致性与挡板加工及安装尺寸对称性相关;刀头获得的初始动能大小决定摆动频率的高低;根据刀头与挡板碰撞瞬时作用的动态特性,使用压电陶瓷等加速度传感器,对挡板碰撞后的振动波进行检测,可获得碰撞力大小信息,为基于振动测量检验选针器工作稳定性和针织选针提花闭环控制策略提供理论基础和实验依据。因此,针织选针器往返摆动特性研究具有十分广泛的的工程应用价值。

参考文献:

- [1] 吕建飞,傅建中. 数字控制在电脑横机选针中的应用[J]. 针织工业,2005(11):18-21.
- [2] 范建国. 一种基于电流控制的提花机选针器驱动电路的设计与研究[J]. 浙江理工大学学报(自然科学版),2014,31(3):281 282.

- [3] 袁嫣红,马天宇,项宏年. 电磁选针器实时检测系统[J]. 纺织学报,2018,39(3):143-147.
- [4] 王钢飚. 电子提花机传动系统及选针器检测仪研制[D]. 杭州:浙江大学,2010:40-49.
- [5] 李军,朱方明,周炯,等.应用频闪原理的选针器频率检测系统设计[J].纺织学报,2017,38(3):138-142.
- [6] 宋腾,张凤生,任锦霞.直射式激光位移传感器光束入射角对测量精度的影响[J].机械,2017,44(2):37-41.
- [7] 李兵, 孙彬, 陈磊, 等. 激光位移传感器在自由曲面测量中的应用 [J]. 光学精密工程, 2015, 23(7): 1939-1942.
- [8] 李冬冬,王永强,许增朴,等. 激光三角法在屋面倾斜时的测量误差研究[J]. 传感器与微系统,2015(2):28-29.
- [9] 韩维. 斜碰撞振动系统动力学研究[D]. 南京: 南京航空航天大学,2003:2-12.
- [10] 高兆林. 测力称重传感器应变片基底胶膜的制备及性能研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015:1-4.
- [11] 尹福炎. 电阻应变片与测力/称重传感器: 纪念电阻应变片诞生70 周年(1938-2008)[J]. 衡器, 2010, 39(11): 42-51.
- [12] ALLEN M S, SRACIC M W. A new method for processing impact excited continuous-scan laser Doppler vibrometer measurements [J].

 Mechanical Systems and Signal Processing, 2010, 24(3):721-735.
- [13] 刘杰坤,马修水,马勰. 激光多普勒测振仪研究综述[J]. 激光杂志,2014,35(12):1-5.