

DOI: 10.3901/JME.2020.19.210

基于试验与仿真联合分析的喷涂机器人轨迹精度可靠性研究^{*}

潘敬锋¹ 訾斌¹ 王正雨¹ 王道明¹ 郑磊² 游玮³

(1. 合肥工业大学机械工程学院 合肥 230009;

2. 希美埃(芜湖)机器人技术有限公司 芜湖 241060;

3. 埃夫特智能装备股份有限公司 芜湖 241060)

摘要: 采用链驱动的喷涂机器人易于实现本体的轻量化、末端高灵活度与正压防爆系统设计,从而满足家具、钢结构等一般涂装行业对喷涂机器人工作空间与腕部灵活度的要求,深入分析链驱动机器人的运动可靠性对喷涂质量和效率的提高具有重要意义。针对链驱动喷涂机器人的运动可靠性问题,采用一种基于试验与仿真联合分析的机器人末端轨迹精度可靠性分析方法。以旋量法为基础建立了喷涂机器人本体和喷枪的运动学模型,从工业机器人的操作臂性能和运动规律的角度出发,研究了喷涂机器人运动精度的影响因素。分析了链驱动喷涂机器人的优缺点和末端轨迹精度的影响状况,并结合机器人本体的运动学参数,建立了基于随机变量的喷涂机器人运动误差模型。通过试验结果的分析来确定影响喷涂机器人运动误差的随机变量的分布特征,从而对机器人末端轨迹精度的运动可靠性进行更加精确的仿真分析。最后,通过喷涂机器人工作平台对末端轨迹精度的运动误差进行试验验证并与传统的仿真分析方法进行对比,结果显示该分析方法更准确。研究成果为进一步分析喷涂机器人的机构优化、轨迹规划和漆膜质量提供试验基础和理论依据。

关键词: 喷涂机器人; 链驱动; 轨迹精度; 随机变量; 运动可靠性

中图分类号: TP24

Research on Reliability of Spray Robot Trajectory Accuracy Based on Conjoint Analysis of Experiment and Simulation

PAN Jingfeng¹ ZI Bin¹ WANG Zhengyu¹ WANG Daoming¹ ZHENG Lei² YOU Wei³

(1. School of Mechanical Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009;

2. CMA (WUHU) Robotics, Co., Ltd., Wuhu 241060;

3. EFORT Intelligent Equipment, Co., Ltd., Wuhu 241060)

Abstract: The chain-driven spraying robot is easy to realize the light weight of the body, high flexibility of the end and the design of a positive pressure explosion-proof system, in order to meet the requirements of the painting robot working space and wrist flexibility in the general coating industry such as furniture and steel structures, in-depth analysis of the motion reliability of chain-driven robots is of great significance to the improvement of spraying quality and efficiency. Aiming at the motion reliability problem of the chain-driven spraying robot, a method for analyzing the reliability of the robot's end track accuracy based on conjoint analysis of experiment and simulation is employed. The kinematics model of the spraying robot body and spray gun is established based on the method of POE, the influencing factors of motion precision of spraying robot is studied from the perspective of the performance of operating arm and motion law of industrial robot. The advantages and disadvantages of chain-driven spraying robots and the influence of end trajectory accuracy are analyzed, a kinematic error model of spraying robot based on random variables combined with the kinematic parameters of the robot body is established. According to the analysis of experimental results, the distribution characteristics of random variables that affect the motion error of the spraying robot are determined, then more accurate simulation analysis of the motion reliability of the robot's end trajectory accuracy is performed. Finally, the motion error of the end trajectory accuracy is verified using the working platform of spraying robot and compared with the traditional simulation analysis method, the

^{*} 国家重点研发计划(2017YFB1303900)和国家自然科学基金(51925502)
资助项目。20200229 收到初稿, 20200708 收到修改稿

results show that the simulation results of the proposed analysis method are more accurate. The research results provide experimental foundation and theoretical basis for further analysis of robot mechanism optimization, trajectory planning and paint film quality.

Key words: spraying robot; chain-driven; trajectory accuracy; random variables; motion reliability

0 前言

机器人作为一种复杂机电系统,因其环境适应性强、可定位操作性和可重复运动的特性,在工业制造、医疗、航空航天等领域得到越来越广泛的应用。喷涂机器人作为最典型的工业机器人之一,应用范围逐渐由传统的汽车行业逐渐扩展到大型船舶、飞机等重型工业^[1]以及家具、卫浴等一般行业。机器人结构也由传统的串联向并联、混联等新型结构转变^[2-4],目前国内外学者在机器人喷涂的漆膜质量^[5]、喷涂路径规划^[6-9]及喷涂机构性能优化^[10-11]等方面做了大量的研究,但针对喷涂机器人运动可靠性的研究相对较少。

在工业应用中,机器人的运动可靠性与生产质量和效率息息相关。对机器人系统进行运动可靠性评估^[12],能够实现系统特性的定量分析,为改善系统提供系统依据。在实际加工中,由于制造、装配及长时间机械磨损等原因造成机械本体产生误差,加上机器人工作的环境中存在着诸多不确定因素,引起的机器人末端的实际轨迹与理想路径之间的偏差,会加剧关节冲击甚至引起运动失效^[13-14]。在机器人的运动过程中,机器人的实际末端位置满足定位精度要求的概率为机器人的运动可靠性^[15]。

对于机器人运动精度的分析,宋月娥等假设关节间隙随机性满足某种分布,利用概率论知识得到累积分布函数,从而计算机器人的运动可靠性^[16],但没有考虑到连杆尺寸偏差的影响。王伟等采用正交试验法综合机器人机构精度,只需要较少的计算仿真工作量就可分析出机器人定位误差^[17]。王睿等对串联机械臂的误差进行了全面系统的分析,得出在诸多影响机器人的精度因素中,几何误差造成的影响占 80%左右的比例^[18]。近年来,随着计算机技术以及仿真技术等相关技术发展迅速,越来越多的学者们着眼于采用仿真技术进行建模,并结合数学模型对机构的性能进行分析并改进机构设计^[19-20]。

影响机器人末端轨迹精度的因素众多,如热变形、臂杆形变、装配误差和齿轮间隙等,这些因素会进一步影响机器人末端轨迹的运动可靠性。有的学者建立了反映机器人末端精度与参数偏差

间的误差模型^[21],为分析各影响因素对运动可靠性的映射关系提供了研究思路。区间法在分析影响机械结构定位精度的不确定因素上也有一定的应用^[22],但该方法不适合末端轨迹的精度可靠性分析。

传统的可靠性分析方法一般只考虑机器人本体机构的运动误差^[23],往往忽略机器人末端的执行机构,使得仿真分析的结果与机器人实际运行效果有一定的差距,难以应用到工作场合。针对机器人运动精度影响因素的随机变量的处理,大多数文献都是依据经验设计或者大数据统计来确定随机变量的分布类型^[24-25],其仿真分析结果与试验结果存在差异,对研究机器人的运动可靠性有一定的局限性。

本文以 6 自由度链驱动串联喷涂机器人为例,建立机器人的本体和执行机构(喷枪)的运动学模型,分析机器人运动精度的影响因素,确定影响喷涂机器人的运动误差的随机变量,并综合链传动的影响建立喷涂机器人的点的运动误差模型和末端轨迹精度运动误差模型。通过试验测量机器人的定位精度,在试验的基础上确定影响喷涂机器人运动误差的随机变量的分布特征,然后对机器人末端轨迹精度的运动可靠性进行仿真分析,最后通过喷涂机器人工作平台对末端轨迹精度的运动误差进行试验验证。研究成果将为进一步分析机器人的机构优化、路径规划和漆膜质量提供试验基础和理论依据。

1 喷涂机器人运动学建模

本文以芜湖希美埃公司的链驱动喷涂机器人 GR630 为例进行分析研究,其机器人实体和三维模型如图 1、2 所示。为了更加准确全面的分析机器人的运动可靠性,将机器人的喷枪作为一个刚体进行运动学的建模分析。

按图 2 中喷涂机器人三维模型的位形状态构造其初始位形,如图 3 所示,在转动副轴线 R_1 上建立全局坐标系 $Ox_0y_0z_0$,在末端执行器中心建立工具坐标系 $Qx_e y_e z_e$,在机器人的喷枪末端建立喷枪坐标系 $Qx_g y_g z_g$ 。末端执行器在全局坐标系中连续运动的位姿集合可以用群 SE(3) 表示为

$$SE(3) = \left\{ \begin{pmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{q} \\ \mathbf{0} & 1 \end{pmatrix} \middle| \mathbf{R} \in SO(3), \mathbf{q} \in \mathbf{R}^3 \right\} \subset GL(4, \mathbf{R}) \quad (1)$$



图1 喷涂机器人 GR630

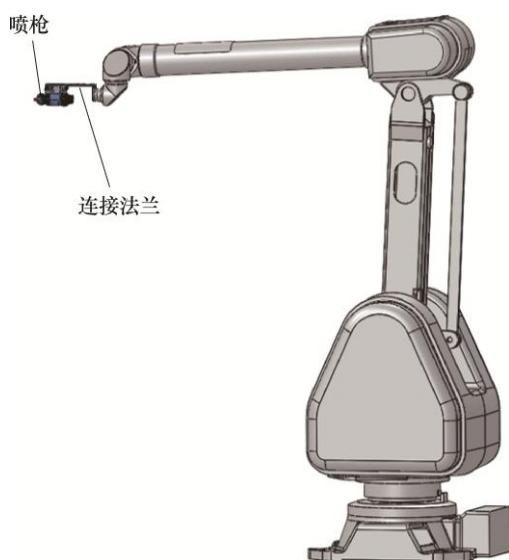


图2 喷涂机器人(含喷枪)三维模型

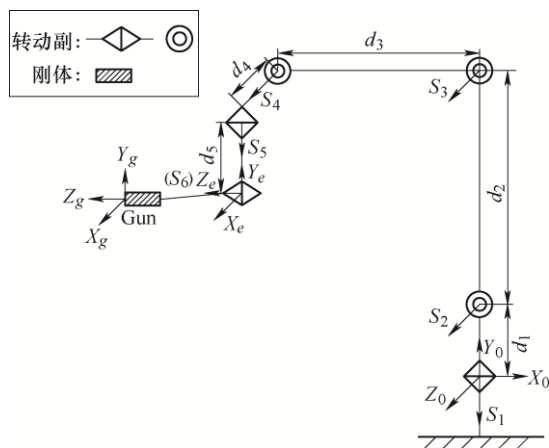


图3 机器人连杆坐标系

式中, $SE(3)$ 的元素 $\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{q} \\ \mathbf{0} & 1 \end{pmatrix}$ 表示某一时刻末端

执行器在全局坐标系中的位姿。令 s_i 为关节 i 轴线方向的单位矢量, s_{oi} 为关节轴线上任一点的位置矢量, 由旋量和李代数理论可得到基于旋量法的机器人操作臂各螺旋轴的方向和位置如表 1 所示。

表1 操作臂螺旋轴的位置和方向

关节	轴线方向 s_i	轴线上的点 s_{oi}
1	$(0 \ -1 \ 0)^T$	$(0 \ 0 \ 0)^T$
2	$(0 \ 0 \ 1)^T$	$(0 \ d_1 \ 0)^T$
3	$(0 \ 0 \ 1)^T$	$(0 \ d_1+d_2 \ 0)^T$
4	$(0 \ 0 \ 1)^T$	$(-d_3 \ d_1+d_2 \ 0)^T$
5	$(0 \ -1 \ 0)^T$	$(-d_3 \ d_1+d_2 \ d_4)^T$
6	$(-1 \ 0 \ 0)^T$	$(-d_3 \ d_1+d_2-d_5 \ d_4)^T$

末端执行器的姿态矩阵及喷枪坐标系中心点的位置矢量的初始值分别为

$$\mathbf{R}_0 = (\mathbf{u}_0 \ \mathbf{v}_0 \ \mathbf{w}_0) = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$\mathbf{q}_0 = (-d_3 \ d_1 + d_2 - d_5 \ d_4)^T \quad (3)$$

机器人的瞬时位姿的变换矩阵为

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{q} \\ \mathbf{0} & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_x & v_x & w_x & q_x \\ u_y & v_y & w_y & q_y \\ u_z & v_z & w_z & q_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

根据表 1 的数据和 POE 建模方法^[26], 可得到各个关节的坐标变换矩阵 \mathbf{A}_i , 其中 \mathbf{A}_0 表示机器人的零点位置坐标:

$$\mathbf{A}_0 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -1 & -d_3 \\ 0 & 1 & 0 & d_1 + d_2 - d_5 \\ 1 & 0 & 0 & d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

机器人末端通过法兰连接机器人的喷枪, 连接部分及机器人的喷枪都视为刚体, 运动坐标系如上图 3 所示。机器人的喷枪末端坐标系 $X_g Y_g Z_g$ 与机器人末端 $X_e Y_e Z_e$ 存在一个平移的变换, 其坐标系之间的变换矩阵为

$$\mathbf{T}_g = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 215 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -20 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

则机器人喷枪末端的坐标变换矩阵为

$$\mathbf{A} = \mathbf{A}_1 \mathbf{A}_2 \mathbf{A}_3 \mathbf{A}_4 \mathbf{A}_5 \mathbf{A}_6 \mathbf{A}_0 \mathbf{T}_g = \begin{pmatrix} u_x & v_x & w_x & q_x \\ u_y & v_y & w_y & q_y \\ u_z & v_z & w_z & q_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (7)$$

2 喷涂机器人运动精度误差分析

串联型工业机器人, 其串联机械臂的精度取决于许多因素的交互影响, 如串联机械臂的机构中构件的尺寸误差、装配误差、运动副中的间隙和轴线的歪斜、构件受力后产生的弹性变形或温度变化后所产生的热变形等, 以及外部环境的变化以及机器人本身内部结构的误差都会对定位精度产生影响, 外界环境变化包括机器人工作环境的温度、湿度的变化, 操作者的人为干预, 相邻仪器设备的震颤, 都可能对串联机械臂造成几何偏差和运动偏差。

基于统计评估技术可将串联机械臂的误差分为系统误差和随机误差^[27]。系统误差是指在机械臂制造和装配过程中产生的误差, 通常以累积误差、反向误差或周期误差的形式出现, 该误差遵循一定的数学模型, 可通过修正的算法进行补偿。随机误差是指无法预测的不确定因素干扰而产生测量误差, 因此无法获取其固定的数学模型, 只能通过对多次测量数据的统计处理进行估算。

在众多影响机器人定位精度的因素中, 其运动学参数的微小偏差所导致的误差占总误差的 80% 左右, 这些运动学误差包括连杆长度误差、关节转角误差以及其他一些参数误差。对于本文中的喷涂机器人, 还要考虑到有机器人喷枪带来的运动误差。由于机器人喷枪是通过法兰盘直接连接于机器人的末端, 具有经常拆装、磨损大、受力冲击大等特点, 所以对喷涂机器人最终的喷枪头的末端运动精度具有不可忽略的影响, 如图 4 所示, 将影响喷涂机器人的运动精度表示出来。

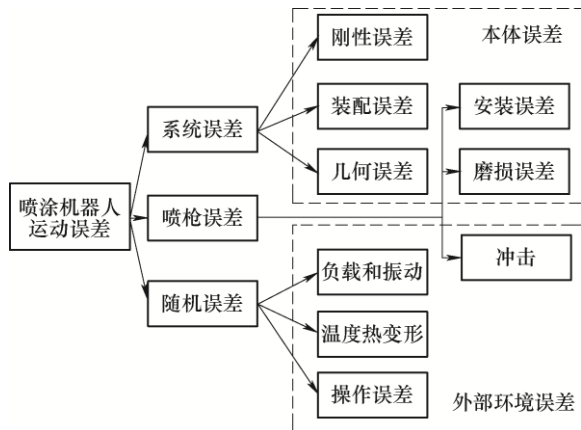


图 4 喷涂机器人运动误差分析

机械臂任一连杆的几何变形都会造成笛卡儿空间的直线定位误差、水平及垂直的三个位移误差, 俯仰度、偏摆度和横转度三个角度误差。因此, 对于 n 关节的串联机械臂, 每个轴的误差会导致 $3n$ 个位移误差和 $3n$ 个角度误差。串联机械臂的结构可描述为由连杆及连接连杆的关节交替连接而成的一个开放的长链, 各个轴分别独立控制, 因此刚性较差, 而且各关节的误差会累积在其末端执行器, 降低其末端的运动精度, 串联的关节个数越多, 累积误差也就越大。

由于引起串联机械臂的位姿误差和运动误差因素众多, 若单独考虑某个因素, 会导致机械臂运动误差分析非常复杂。一种可行的方法是将所有造成机械臂末端执行器位姿误差的因素都归结为由机械臂各连杆的结构参数误差以及运动变量误差引起的误差, 即由连杆的运动学参数偏差引起的。

3 机器人运动精度可靠性模型的建立

3.1 链传动运动误差模型

对于一般行业, 如家具、卫浴的机器人喷涂, 机器人本身并不需要太多的精度, 人们往往在保证一定精度的条件下, 追求喷涂机器人更大的工作空间和低廉的成本。

使用链传动的方式驱动机器人进行喷涂作业, 可以大大降低机器人的生产成本, 并且电动机的安装位置可以远离机器人的末端执行器, 这样机器人的大臂变得相对轻量化, 使得机器人具有更佳的运动灵活性和大工作空间。但链传动机器人也存在一定的缺陷, 相对于齿轮传动来说, 由于存在多边形效应的影响, 链传动的精度及速度的均匀性相对来说没有齿轮传动, 加上链传动还会产生一定的运动载荷导致传动过程中有一定的横向振动及纵向振动, 且喷涂机器人的大臂相对较长, 对机器人的末端运动会产生一定的振动, 导致机器人的末端位置运动有一点的误差。因此, 对链驱动的喷涂机器人的末端轨迹精度的分析显得尤为重要。

对于本文选取的喷涂机器人 GR630 来说, 机器人的轴 2 到轴 6 均使用滚子链传动, 这里以机器人的轴 2 为例来分析链传动对运动精度的影响, 如下图 5 所示为链传动主从动轮的速度传递模型, 图 6 为机器人轴 2 单关节的速度传递模型。

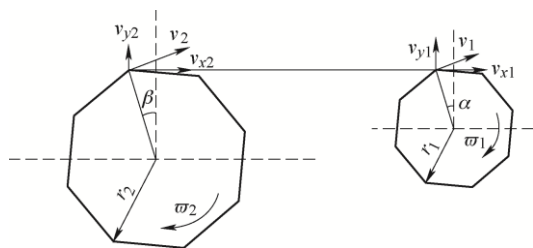


图5 链传动速度模型图

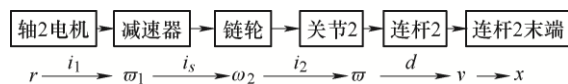


图6 单关节链传动速度传递模型

由于电动机、减速器及齿轮关节的速度传动误差比较小,可以忽略不计,传动误差来源主要为链传动,这里考虑为链传动的多变形效应带来的传动误差。链传动的多边形效应带来的周期性误差是不可避免的,其误差传递到机器人的末端,体现出的是喷枪末端的微小的位移累积的一个周期性变化,这里定义*i*轴链传动造成的周期性最大累积误差为 ε_{mi} 。则有

$$\varepsilon_{mi} = \frac{\pi d}{z_2} \cdot \left(\arccos \left(\frac{z_2 - z_1 k_2}{z_1 k_1} \right) \cdot \frac{2}{\pi} - 1 \right) - \frac{\pi d \cdot k}{z_1 k_1} \int_0^{t_s} \frac{1}{\cos \left[\frac{\pi k}{2 z_2} (t + k) \right] + k_2} dt \quad (8)$$

其中, $k = \frac{n_0 z_1}{30 i_j}$, $k_1 = \frac{\tan(\pi / z_1)}{\sin(\pi / z_2)} - \frac{\sin(\pi / z_1)}{\tan(\pi / z_2)}$, $k_2 = \frac{\tan(\pi / z_1)}{\sin(\pi / z_2)}$, z_1 , z_2 , n_0 , i_j 为*i*轴传动参数。

表2为喷涂机器人轴2的电动机传动比和链传动的设计参数,将参数代入式(8)的误差方程中,模拟出轴2链传动一个周期内的运动状况,如图7所示。可以看出由于多边形效应的影响,运动过程中存在规律性的累积误差,最终会增加喷涂机器人喷涂过程中末端轨迹的运动误差。

表2 机器人轴2链传动参数

参数	数值
电动机型号	TSM3304S7036E700
电动机减速比	59
总减速比	182.619 047 6
链轮中心距/mm	276.5
齿数	主动轮: 21; 从动轮: 65
链条型号	08B-2-90

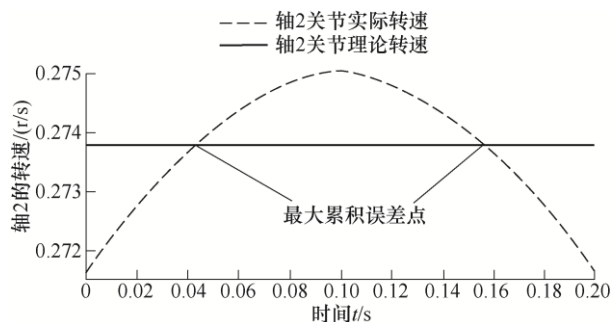


图7 轴2链传动一个周期内的速度模拟

3.2 喷涂机器人运动误差分析

喷涂机器人喷枪末端的运动误差主要是喷涂机器人(包含喷枪)本体造成的误差及外部环境造成的误差,这里将造成机械臂末端运动误差的因素归结于机器人的运动学参数,即旋量法建模的运动学参数 Δd , $\Delta \theta$ 。

$$A = \begin{pmatrix} u_x & v_x & w_x & q_x \\ u_y & v_y & w_y & q_y \\ u_z & v_z & w_z & q_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (9)$$

为机器人喷枪末端的位姿矩阵,这里只考虑机器人的位置误差,机器人末端位置表示为

$$Q = (q_x \quad q_y \quad q_z)^T \quad (10)$$

对位置矩阵进行微分运算得到末端位置误差

$$\Delta Q = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial Q}{\partial \theta_i} \right) \Delta \theta_i + \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial Q}{\partial d_i} \right) \Delta d_i \quad (11)$$

令 $X_i = (\theta_i, d_i)$ 为末端位置误差影响参数,则

$$\Delta Q = J_q \Delta X \quad (12)$$

$$J_q = \frac{\partial Q}{\partial X} = \begin{pmatrix} \frac{\partial q_x}{\partial \theta} & \frac{\partial q_x}{\partial d} \\ \frac{\partial q_y}{\partial \theta} & \frac{\partial q_y}{\partial d} \\ \frac{\partial q_z}{\partial \theta} & \frac{\partial q_z}{\partial d} \end{pmatrix} \quad (13)$$

$P = (q_x \quad q_y \quad q_z)^T$ 为理论上的机器人末端的位置,假设实际的机器人末端位置为

$$P_s = (q_{xs} \quad q_{ys} \quad q_{zs})^T \quad (14)$$

定义机器人末端位置的绝对误差为

$$r = \sqrt{(q_{xs} - q_x)^2 + (q_{ys} - q_y)^2 + (q_{zs} - q_z)^2} \quad (15)$$

令

$$r = g(X) = \sqrt{(q_{xs} - q_x)^2 + (q_{ys} - q_y)^2 + (q_{zs} - q_z)^2} \quad (16)$$

为机器人的误差函数。

3.3 机器人末端点位精度可靠性模型

机器人喷枪末端的位置误差主要有运动学参数误差链传动累积误差, 链传动引起的关节累积误差的变化是近似正弦变化, 其周期随着关节转速的变化不断变化, 其幅值保持不变, 有

$$\varepsilon_i = \varepsilon_{mi} \cdot \sin(\varpi_i t) \quad (17)$$

式中, ϖ_i 为链传动的周期系数。

由于链传动的误差映射到机械臂上为连杆的累积误差, 亦可作为机器人连杆参数的一个变化规律。

假设机器人各关节的旋量参数 $X_1 = (\theta \quad d)^T$ 服从正态分布, 即为 $X_1 \sim (\mu_x, \sigma_x^2)$ 。

$$X_2 = \varepsilon_m \sin(\varpi t) \quad (18)$$

综合累积误差表示为

$$\Delta X = \varepsilon_m \sin(\varpi t) + \sigma_x U, \quad U \in (0, 1^2) \quad (19)$$

则有

$$g(X, t) = J_p \cdot (\varepsilon_m \sin(\varpi t) + \sigma_x U) \quad (20)$$

是一个随着时间变化的随机误差。

设机器人末端位置的允许误差为 δ , 机器人末端执行器在 t 时刻的点位精度可靠性模型为

$$R(t) = \Pr\{|g(X, t)| \leq \delta\} \quad (21)$$

其中, $R(t) = (R_x(t), R_y(t), R_z(t))$ 为某一时刻, 机器人末端位置上的一点的轨迹精度的 x, y, z 三个坐标上的精度可靠度, $\Pr\{\cdot\}$ 表示概率。

由于位置误差的大小没有方向的限定, 为方便计算, 将 X_2 视为区间为 $[0, \varepsilon_m]$ 的均匀分布。则机器人的运动输出误差的均值为

$$\mu_g = E[g(X, t)] = J_p E(\Delta X) = g_\mu(X, t) \quad (22)$$

机器人运动输出误差的标准差为

$$\sigma_g = \sqrt{D[g(X, t)]} = \sqrt{J_p \left(\frac{1}{12} \varepsilon_m^2 + \sigma_x^2 \right)} \quad (23)$$

则定义机器人运动轨迹精度的点的可靠度为

$$R = \Phi\left(\frac{\delta - \mu_g(\Delta X)}{\sigma_g(X)}\right) - \Phi\left(\frac{-\delta - \mu_g(\Delta X)}{\sigma_g(X)}\right) \quad (24)$$

化简为

$$R = 2\Phi\left(\frac{\delta - \mu_g(\Delta X)}{\sigma_g(X)}\right) - 1 \quad (25)$$

式中, $\Phi(\cdot)$ 为标准正态分布函数。

3.4 机器人末端轨迹精度可靠性模型

对于机器人喷枪末端的轨迹位置精度, 如图 8 为末端轨迹位置运动示意图。由上述知机器人的末端位置误差方程为

$$\Delta Q = J_q \Delta X = \begin{bmatrix} \frac{\partial p_x}{\partial X} \\ \frac{\partial p_y}{\partial X} \\ \frac{\partial p_z}{\partial X} \end{bmatrix} \cdot \Delta X = \begin{bmatrix} M_1 \\ M_2 \\ M_3 \end{bmatrix} \cdot \Delta X \quad (26)$$

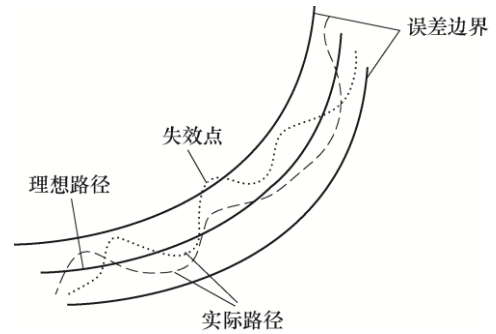


图 8 机器人末端运动路径

则机器人末端的绝对位置轨迹精度的可靠度方程可以表述为

$$R = \Pr\left\{\bigcap_{i=1}^{m \rightarrow \infty} (\|M_1 \Delta X + M_2 \Delta X + M_3 \Delta X\|_i \leq \delta)\right\} = \int_0^\delta (\cdots (\int_0^\delta (\int_0^\delta p(x_1, x_2, \cdots, x_m) dx_1) dx_2 \cdots) dx_m \quad (27)$$

由于上述可靠性模型公式^[28]难以求解, 其中概率密度函数与各轨迹点的位置偏差相关, 同时根据轨迹点的选取数目, 需要对概率密度函数进行多维积分, 当选取轨迹点数目较多时相当繁琐。在此, 引入等效极值原则^[29], 假设 X_1, X_2, \cdots, X_m 是 m 个随机变量, 令 $W_{\max} = \max_{1 \leq i \leq m} (X_i)$, 则有

$$\Pr\left\{\bigcap_{i=1}^{m \rightarrow \infty} (X_i < a)\right\} = \Pr\{W_{\max} < a\} \quad (28)$$

定义变量 γ 表示为所有机器人末端轨迹点中位置误差最大值, 有

$$\gamma = \max(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \cdots, \varepsilon_m) \quad (29)$$

则对应的 $X_{\max}(\Theta) = \max_{1 \leq i \leq m} (X_i(\Theta)) = X_\gamma$ 表示整条轨迹上的机器人末端位置偏差的最大值, 则机器人末端轨迹的运动可靠度模型可以简化为

$$R = P_r \left\{ \bigcap_{i=1}^{m \rightarrow \infty} (X_i(\Theta) \leq \delta) \right\} =$$

$$\Pr \{ X_{\max}(\Theta) < \delta \} = \int_0^\infty p(x_r) dx_r \quad (30)$$

式中, $p(x_r)$ 表示轨迹上机器人末端位置偏差最大值的概率密度函数。

4 喷涂机器人末端点位精度试验

针对本文选用的喷涂机器人, 进行其末端喷枪的定位精度测量试验, 根据 GB/T12642—2013 中的工业机器人性能规范及其试验方法, 选取机器人空间立方体中的 5 点测量法, 循环 30 次, 对机器人的定位精度进行测量。

通过激光标定仪测出机器人循环 30 次的点的位置数据如表 3 所示, 去除最大最小的二组数据, 得到的测量结果如表 4 所示。由图中数据可知, 由于喷涂机器人末端喷枪的存在, 使得机器人的绝对定位误差精度较大, 但其重复定位精度较小, 对于一般喷涂行业, 可以满足其工艺需求。其中机器人末端绝对位置误差为

$$R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (31)$$

表 3 机器人点位精度测量数据

组数	点位	x/mm	y/mm	z/mm
1	1	1 177.4	- 3.0	1 555.3
	2	1 501.7	461.7	1 798.7
	3	855.1	480.6	969.8
	4	855.2	- 732.3	969.8
	5	1 342.6	- 732.3	1 658.3
2	1	1 177.5	- 3.1	1 555.3
	2	1 501.6	461.9	1 798.3
	3	855.3	480.7	969.2
	4	855.4	- 732.5	969.4
	5	1 342.5	- 732.3	1 658.4
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
30	1	1 177.6	- 3.0	1 555.3
	2	1 501.9	461.3	1 798.5
	3	855.0	480.6	969.6
	4	855.3	- 732.4	969.7
	5	1 342.7	- 732.4	1 658.3

表 4 机器人喷枪末端点位误差精度(mm)

	x	y	z	绝对位置 R
绝对精度误差	1.88	5.20	4.26	8.32
重复精度误差	0.40	0.14	0.34	0.59

5 机器人末端轨迹精度可靠性仿真

传统的机器人运动精度可靠性仿真方法忽略了试验验证的重要性, 对于随机变量的分布特征往往依据经验设计及大数据的统计来确定, 这样使得仿真的结果与实际的机器人运行结果有一定的差距, 在机器人的实际应用及可靠性分析上具有一定的局限性。本文提出了一种基于试验与仿真联合分析的喷涂机器人末端轨迹精度的可靠性分析方法, 首先通过试验测量其喷枪末端的定位精度, 在将试验结果带入上文中机器人点位精度的误差模型中, 得到适用于喷涂机器人的特定的随机变量的分布特征, 最后再进行机器人喷涂末端的轨迹精度可靠性仿真, 得到更精确的仿真结果。

通过 Matlab 的 Simulink 模块建立机器人的运动学模型进行仿真, 如图 9 所示。将喷涂机器人 GR630 的连杆参数和链传动参数带入仿真模型中, 给定机器人特定的运动轨迹, 模拟出机器人喷枪末端轨迹各轴向的位置误差, 然后对仿真得到的轨迹点的数据进行曲线拟合, 得到喷涂机器人末端喷枪轨迹的精度误差和可靠度曲线, 使用常规的可靠性仿真方法, 假设机器人的参数变量服从正态分布的特征, $d: N(d_i, 0.5)$, 单位为 mm, $\theta: N(\theta_i, 0.1)$, 单位为 °; 得到的仿真结果如图 10、11 所示。使用实验与仿真联合分析的方法, 将喷涂机器人的点位精度的测量结果代入到机器人的点位可靠性模型中, 计算出适用于本文的喷涂机器人的运动学参数的变量的

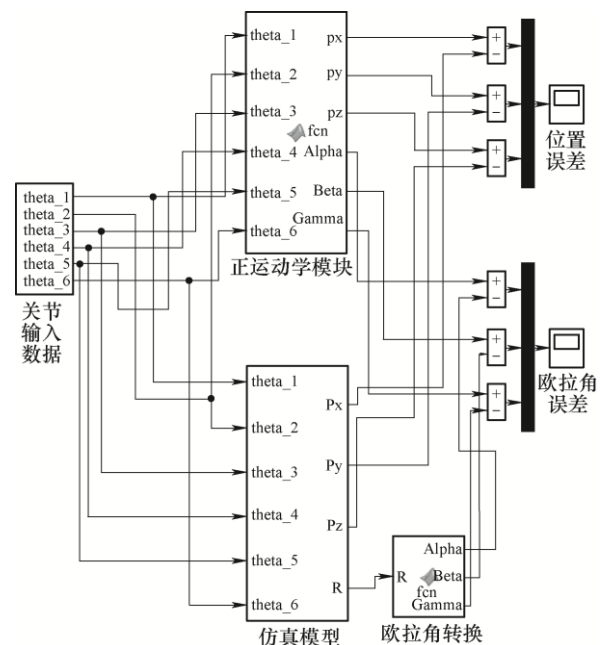


图 9 机器人操作臂正运动学仿真模型

分布特征为 $d: N(d_i, 0.8)$, 单位为 mm, $\theta: N(\theta_i, 0.5)$, 单位为 ($^\circ$), 得到的仿真结果如图 12、13 所示。

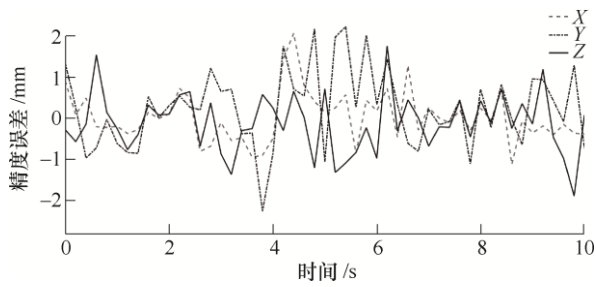


图 10 机器人末端轨迹精度误差仿真结果 a

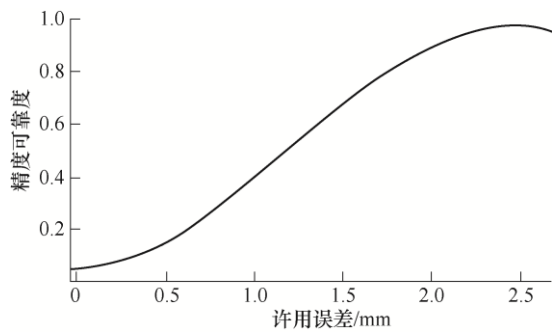


图 11 机器人末端轨迹精度可靠度

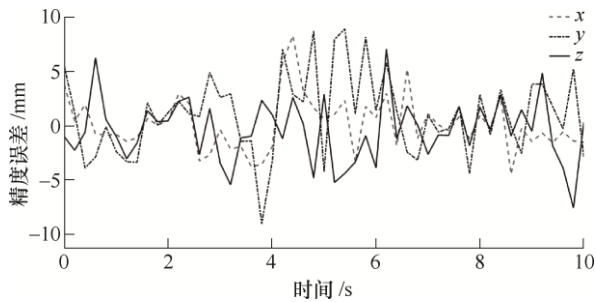


图 12 机器人末端轨迹精度误差仿真结果

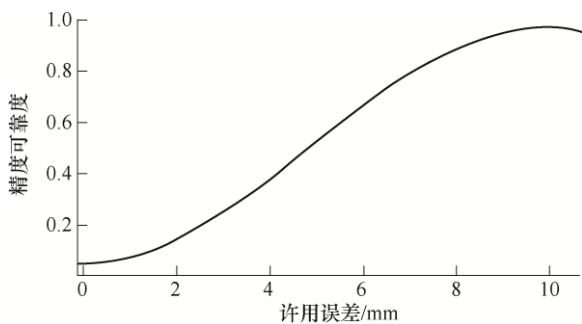


图 13 机器人末端轨迹精度可靠度

由仿真结果可知, 图 10、11 使用传统的方法设定随机变量的分布特征, 得到的机器人末端轨迹精度的拟合误差的理论数值相对较小, 而图 12、13 通过机器人的定位精度来求解随机变量的分布特征, 进行轨迹精度的仿真拟合得到的理论数值相对较大, 但更接近于机器人的定位精度误差。接下来,

使用激光跟踪仪系统对喷涂机器人的喷枪末端的实际运动轨迹进行试验测量, 来验证仿真结果的准确性。

6 喷涂机器人末端轨迹精度试验

为了进一步分析机器人末端喷枪的精度误差, 并验证仿真结果的准确性, 对喷涂机器人的轨迹精度进行试验验证, 如图 14 所示为喷涂机器人轨迹精度测量平台, 其中的试验设备说明如图 15 所示, 整个机器人精度可靠分析试验的流程图如图 16 所示。

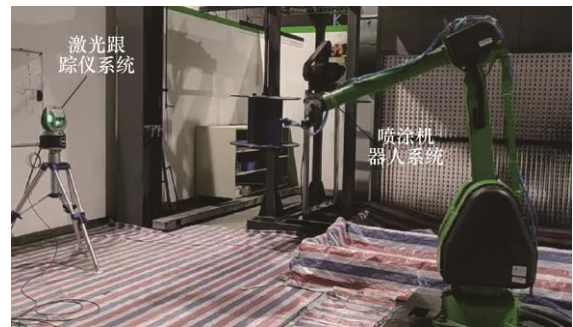


图 14 机器人轨迹精度测量试验平台

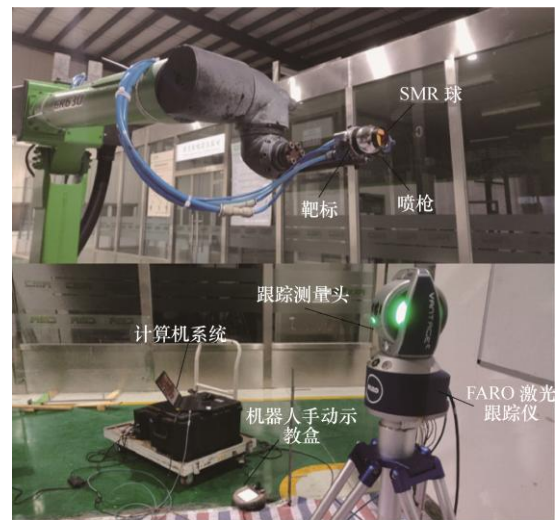


图 15 轨迹精度试验设备

将靶标固定在机器人空气喷枪的末端, SMR 球安置于靶标上, 使得喷涂机器人的标定末端为喷枪的末端, 为了试验效果更加准确, 将激光跟踪仪和喷涂机器人保持特定的距离, 并安置与机器人的正前方。试验开始时, 首先测量头捕捉 SMR 球的位置, 定义开始测量的绝对位置, 然后在计算机系统的辅助下, 给定喷涂机器人不同的轨迹, 如直线、曲线、弧线和样条轨迹等, 连续追踪标定机器人末端喷枪的轨迹点, 获得机器人末端轨迹的连续的绝对位置。

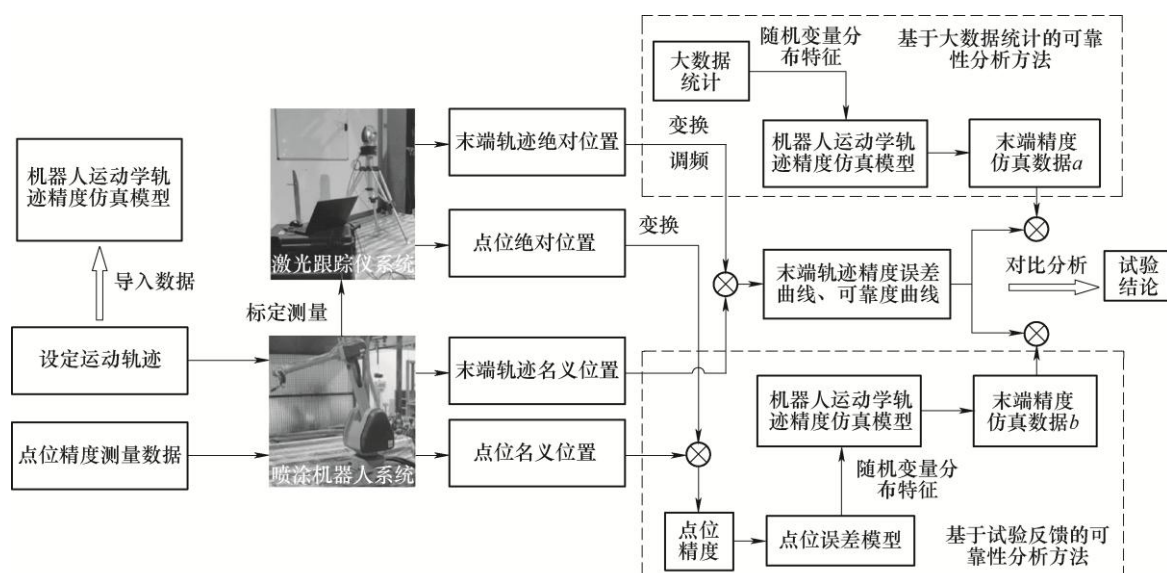


图16 喷涂机器人运动可靠性分析试验流程图

喷涂机器人的数据采样频率为 250 Hz, 激光跟踪仪的采样频率为 500 Hz, 对采集的多组数据进行调频、变换等处理, 得到每组运动轨迹的均值, 拟合出末端三维轨迹和精度误差曲线, 如图 17、18 所示。为了更直观的展示机器人运动轨迹的误差特性, 由于图 17c 圆弧轨迹的运动基本只有 y 、 z 两个方向的运动, 故将其 x 方向的运动比例尺放大, 得

到了轨迹的误差曲线图, 由图中可以明显看出末端轨迹的误差波动。再通过概率统计的方法, 拟合出机器人末端轨迹的可靠度曲线, 如图 19 所示。由于影响机器人末端运动精度的因素众多, 对于不同的轨迹, 链驱动和外部环境等原因造成的振动和偏差具有一定的随机性, 所得到的可靠度曲线也存在一定的差异。

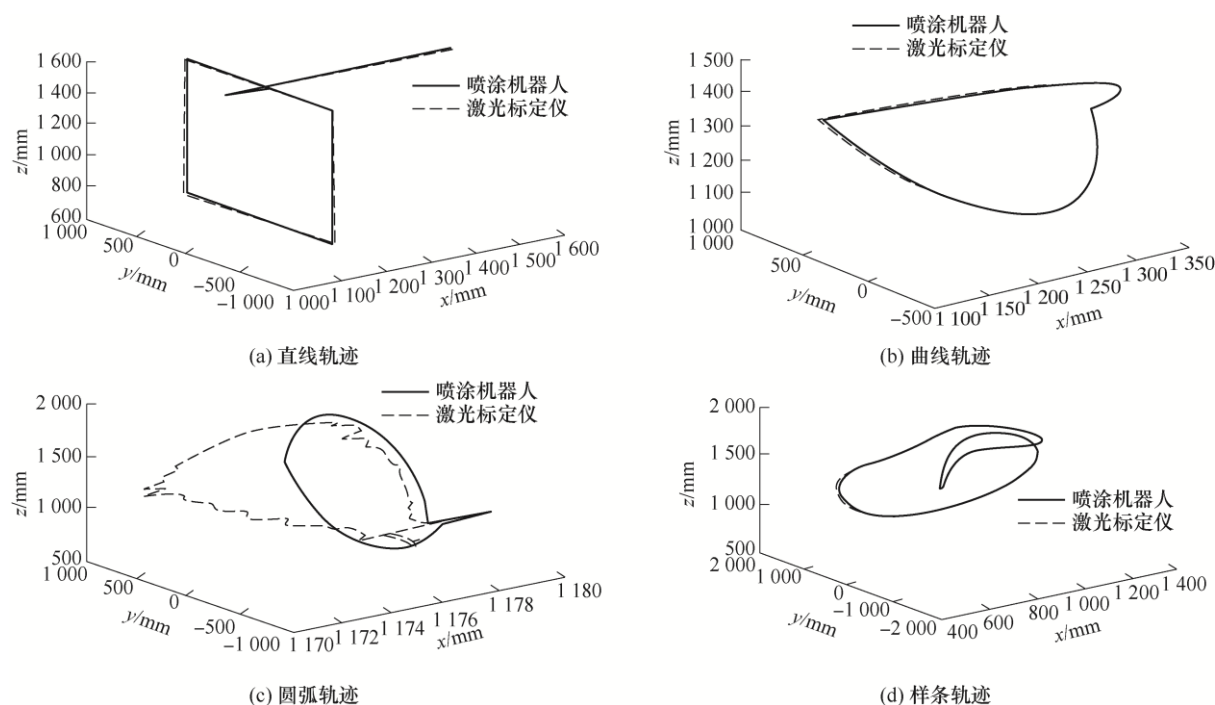


图17 喷涂机器人末端实际轨迹与名义轨迹

对比分析图 10、12、18 的误差曲线, 使用传统的可靠性分析方法, 忽略机器人的点位精度的试验

结果, 依据经验及大数据统计方法确定变量的分布类型, 所仿真的运动误差虽然精度高于基于试验与

仿真联合分析方法的仿真结果, 但与实际的轨迹精度试验结果相差较大, 难以准确对机器人的实际运动可靠性进行分析预测。通过实际测量喷涂机器人的末端轨迹的位置精度, 以图中曲线数据为例, 与仿真时选定的轨迹相似, 对比分析图 11、13、19 可知, 图 19 中, 可靠度为 0.85 时, 不同轨迹的许用误差精度为 8~12 mm, 取本文的试验结果的均值为 10.5 mm。图 11 和 13 的仿真结果, 可靠度为 0.85 时, 其许用误差精度分别为 2 mm 和 8 mm, 相对误差百分比为 80.1%和 23.8%, 且后者的仿真结果对直线轨迹来说, 相对误差百分比低于 5%。由此可见, 本文采用的基于试验与仿真相联合的可靠性分析方法要更加的准确, 对机器人运动可靠性的分析有着重要的作用。

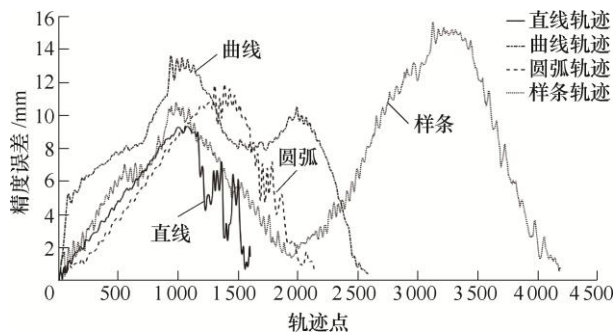


图 18 机器人末端轨迹精度绝对误差

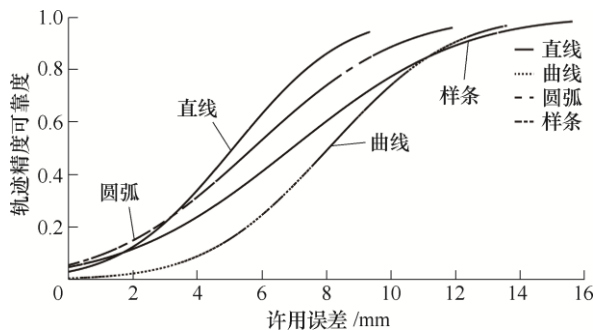


图 19 机器人末端轨迹精度可靠性曲线

7 结论

(1) 在喷涂机器人和执行机构(喷枪)的运动学模型的基础上, 分析了影响喷涂机器人运动精度的影响因素。针对链驱动的喷涂机器人, 分析了链传动的优缺点, 推导出由链传动引起的机器人末端运动误差模型, 结合机器人本体的误差因素, 从而建立基于随机变量的喷涂机器人运动的点位精度可靠性模型和末端轨迹精度的可靠性模型。

(2) 采用一种基于试验与仿真联合分析的机器人轨迹可靠性分析方法, 在喷涂机器人的点位精度测量试验基础上, 根据试验结果和机器人点位误差

模型得出随机变量的分布特征, 然后分别采用大数据统计的随机变量分布特征和由试验得出的分布特征对机器人末端轨迹精度进行可靠性分析仿真, 最后进行机器人轨迹精度可靠性试验。结果表明, 该可靠性分析方法较仿真分析法具有更高的准确度。

(3) 未来研究将考虑机器人喷涂工艺的影响, 进一步提高该分析方法在机器人喷涂作业中的实际应用能力, 此外, 将该分析方法拓展应用于机器人智能柔性喷涂生产线的动态可靠性分析研究中。

参 考 文 献

- [1] ZHANG B B, WU J, LI P W, et al. A method to realize accurate dynamic feedforward control of spray-painting robot for airplane wings[J]. IEEE-ASME Transactions on Mechatronics, 2018, 23(3): 1182-1192.
- [2] LI Y Z, ZHAO D J, ZHAO J S. Structure synthesis and workspace analysis of a telescopic spraying robot[J]. Mechanism and Machine Theory, 2018, 133: 295-310.
- [3] REN S N, XIE Y, YANG X D, et al. A method for optimizing the base position of mobile painting manipulators[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2017, 14(1): 370-375.
- [4] WANG X H, ZHANG D W, ZHAO C, et al. Singularity analysis and treatment for a 7R 6-DOF painting robot with non-spherical wrist[J]. Mechanism and Machine Theory, 2018, 126: 92-107.
- [5] CHEN Y, CHEN W Z, LI B, et al. Paint thickness simulation for painting robot trajectory planning: a review[J]. Industrial Robot: The International Journal of Robotics Research and Application, 2017, 44(5): 629-638.
- [6] CHEN R, WANG G L, ZHAO J G, et al. Fringe pattern based plane-to-plane visual servoing for robotic spray path planning[J]. IEEE-ASME Transactions on Mechatronics, 2015, 14(8): 1-9.
- [7] WEI C, LIU H, TANG Y, et al. Trajectory optimization of electrostatic spray painting robots on curved surface[J]. Coatings, 2017, 7(10): 155.
- [8] TANG Y, WEI C. Surface modeling of workpiece and tool trajectory planning for spray painting robot[J]. Plos One, 2015, 10(5): 1-9.
- [9] MOE S, GRAVDAHL J T, PETTERSEN K Y. Set-based control for autonomous spray painting[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2018, 15(4): 1785-1796.
- [10] WU J, GAO Y, ZHANG B B, et al. Workspace and dynamic performance evaluation of the parallel

- manipulators in a spray-painting equipment[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2016, 44: 199-207.
- [11] LIU Z L, WU J, WANG D. An engineering-oriented motion accuracy fluctuation suppression method of a hybrid spray-painting robot considering dynamics[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2018, 131: 62-74.
- [12] HUANG X, ZHANG Y. Probabilistic approach to system reliability of mechanism with correlated failure models[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2012, 124(3): 465-473.
- [13] LIAN B, SUN T, SONG Y. Parameter sensitivity analysis of a 5-DoF parallel manipulator[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2017, 46(14): 1-14.
- [14] GENG X, WANG X, WANG L, et al. Non-probabilistic time-dependent kinematic reliability assessment for function generation mechanisms with joint clearances[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2016, 104(6): 202-221.
- [15] RAO S S, BHATTI P K. Probabilistic approach to manipulator kinematics dynamics[J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 2001, 72(1): 47-58.
- [16] 宋月娥, 吴林, 戴明. 机器人关节间隙误差分析[J]. *机械工程学报*, 2003, 39(4): 11-14.
- SONG Yuee, WU Lin, DAI Ming. Error analysis of robot joint clearance[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2003, 39(4): 11-14.
- [17] 王伟, 负超. 机器人机构精度综合的正交试验法[J]. *机械工程学报*, 2009, 45(11): 18-24.
- WANG Wei, YUN Chao. Orthogonal experimental design to synthesize the accuracy of robotic mechanism[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2009, 45(11): 18-24.
- [18] 王睿. 工业机械臂精度分析及综合[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2014.
- WANG Rui. Industrial mechanical arm's precision analysis and synthesis[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2014.
- [19] ZHANG Z X, LIU J H, NING R X. Kinematics analysis of mechanisms based on virtual assembly[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 23(6): 748-757.
- [20] HAO He, FENG Y X, TAN J R, et al. Self-organized semantic feature evolution for axiomatic design[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2008, 21(2): 108-113.
- [21] CHEN G, JIA Q X, LI T, et al. Calibration method and experiments of robot kinematics parameters based on error model[J]. *Robot*, 2012, 34(6): 680-688.
- [22] WU W, RAO S S. Uncertainty analysis and allocation of joint tolerances in robot manipulators based on interval analysis[J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 2007, 92(1): 54-64.
- [23] LI T, JIA Q X, CHEN G, et al. Motion reliability assessment of robot for trajectory tracking task[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2014, 36(12): 2556-2561.
- [24] 周炜, 廖文和, 田威. 基于空间插值的工业机器人精度补偿方法理论和实验[J]. *机械工程学报*, 2013, 49(3): 42-48.
- ZHOU W, LIAO W H, TIAN W. Theory and experiment of industrial robot accuracy compensation method based on spatial interpolation[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 49(3): 42-48.
- [25] JIA Q X, LI T, CHEN G, et al. Sensitivity analysis on factors influencing motion reliability of space manipulator based on the multilayer mapping model[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 53(11): 10-19.
- [26] TSAL L W. Robot analysis: The mechanics of serial and parallel manipulators[M]. New York: John Wiley & Sons Inc, 1999.
- [27] 王琨. 提高串联机械臂运动精度的关键技术研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2013.
- WANG Kun. Research on key technology in improvement of motion accuracy of serial manipulator[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2013.
- [28] 李彤, 贾庆轩, 陈钢, 等. 面向轨迹任务的机器人运动可靠性评估[J]. *系统工程与电子技术*, 2014, 36(12): 2556-2561.
- LI Tong, JIA Qingxuan, CHEN Gang, et al. Motion reliability assessment of robot for trajectory tracking task[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2014, 36(12): 2556-2561.
- [29] LI J, CHEN J, FAN W. The equivalent extreme value event and evaluation of the structural system reliability[J]. *Structural Safety*, 2007, 29(2): 112-131.
-
- 作者简介: 潘敬锋, 男, 1995 年出生, 博士研究生。主要研究方向为机器人控制技术及其应用。
E-mail: panjingfeng163@163.com
- 管斌(通信作者), 男, 1975 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为柔性驱动机器人理论、技术与装备, 智能制造系统控制与自动化和机电液装备系统集成技术及应用。
E-mail: zibinhfut@163.com