涂胶工业机器人能耗优化与实验研究

华国鹤[1, 2, 3] 朱向前[1, 2] 尹春华[3] 周安全[3] 刘道远[4]
1 山东大学机械工程学院，山东 济南 250061；
2 山东大学金属成形高端装备与先进技术全国重点实验室，山东 济南 250061；
3 奇瑞汽车股份有限公司青岛分公司，山东 青岛 266299；4 杜尔系统工程有限公司，上海 200003

摘要：在现代制造业中，涂胶工业机器人以其高效、精准与自动化优势，广泛应用于汽车、电子、航空等多个领域。随着工业用电成本的上涨及节能减排要求的提升，机器人系统能耗问题愈发突出。本文针对高能耗涂胶工业机器人，提出一种基于动力学建模、遗传算法参数辨识与粒子群智能优化的综合节能方法，实现了机器人能耗的精确建模与运行轨迹的最优调整，并通过实验验证了模型和方法的优越性。

关键词：能耗分析；动力学参数辨识；轨迹优化

Energy Consumption Optimization and Experimental Study of Gluing Industrial Robots

Hua Guohe[1,2,3], Zhu Xiangqian[1,2], Yin Chunhua[3], Zhou Anquan[3], Liu Daoyuan[4]

1School of Mechanical Engineering Shandong University, Jinan, Shandong, 250061, China

2Shandong University State Key Laboratory of High-End Equipment and Advanced Technologies for Metal Forming, Jinan, Shandong, 250061, China

3Qingdao Branch Chery Automobile Co. Ltd., Qingdao, Shandong, 266299, China

4Dürr Systems AG, Shanghai, 200003, China

Abstract: In modern manufacturing, gluing industrial robots are widely used in automotive, electronics, aerospace, and other fields due to their advantages of high efficiency, precision, and automation. With rising industrial electricity costs and increasing demands for energy conservation and emission reduction, the energy consumption of robotic systems has become a prominent issue. This paper proposes an integrated energy-saving method for high-energy-consumption gluing industrial robots based on dynamic modeling, genetic algorithm-based parameter identification, and particle swarm intelligent optimization. This approach achieves precise modeling of robot energy consumption and optimal adjustment of operational trajectories, with experimental results validating the superiority of the model and method.

Keywords: Energy consumption analysis; Dynamic parameter identification; Trajectory optimization

DOI: 10.62639/sspis09.20260301

引言

（一）研究背景与问题提出

随着工业 4.0、绿色制造和智能工厂的快速发展，工业机器人涂胶工艺在提升生产效率和一致性方面发挥着不可替代的作用。传统优化方式无法充分刻画实际控制系统中电气与机械多源耦合导致的真实能耗动态特性。

国外自 20 世纪 60 年代后，欧洲、日本等企业如 KUKA、ABB、FANUC 等在柔性化与系统集成方面形成较完备技术体系。国内自 21 世纪后，受政府政策支持推动，越来越多学者企业聚焦于能耗建模与优化仿真领域，代表性探索包括机械创新设计、智能优化算等。

（二）论文主要内容

本研究以 KUKA KR60-3 涂胶机器人为对象，围绕“如何精准建模并实测能耗、实现运动轨迹节能优化”为主线构建 KR60-3 机器人运动学、动力学正逆解模型，进行遗传算法参数辨识；针对伺服电机与驱动系统复杂能耗，提出线性损耗模型，通过实验激励轨迹与最小二乘法辨识参数，完成功率模型的系统化建模；采用 B 样条曲线联合粒子群算法优化关节空间运动轨迹，实测能耗优化效果。



图 1-1 KUKA 本体的涂胶机器人

（稿件编号：IS-26-1-1H001）

作者简介：华国鹤（1995-），男，汉，黑龙江省巴彦县，本科，中级工程师，研究方向：工业机器人，机器人运动优化。

一、涂胶工业机器人系统建模与参数辨识

涂胶工业机器人是一种典型的机电一体化系统，整机结构由六自由度机械臂、高精度伺服电机与减速器、智能电控柜以及各类外围设备共同组成。

（一）刚体运动学建模与 D-H 参数

机器人本体坐标系建构采用改进 D-H 法定义各个连杆坐标系[1]，参数分别包括连杆长度 a_i，连杆扭转角 α_i，连杆偏距 d_i，关节角 θ_i，齐次变换为：

$$ {}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i & 0 & a_i \\ c\alpha_i s\theta_i & c\alpha_i c\theta_i & -s\alpha_i & -d_i s\alpha_i \\ s\alpha_i s\theta_i & s\alpha_i c\theta_i & c\alpha_i & d_i c\alpha_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-1) $$

多轴串联式机器人正向运动学变换矩阵：

$$ \boldsymbol{T_0^6} = \prod_{i=1}^{6} T_i^{i-1} \quad (2-2) $$

本系统的动力学建模采用牛顿—欧拉法，推导各关节惯性、摩擦、重力及加速度等因素对关节力矩的影响表达式。全面反映机器人运动过程中各种动力学参数对关节受力的作用机理，为后续的精确力控与能耗优化提供了理论基础。

（二）动力学参数辨识与遗传算法优化

由于机器人的实际摩擦、惯量和载荷等参数难以直接获取，为此，本文引入了改进的 Grotjahn 摩擦模型，从而系统性地降低了机器人关节力矩预测的误差，提高了模型在实际工况下的精度和可靠性。

$$ \tau_i = I_i q\ddot{q}_i + C_i(q,\dot{q}) + G_i(q) + F_{fric}(\dot{q}_i) \quad (2-3) $$

式中 I_i 惯性参数，C_i 科氏力与离心力，G_i 重力项，F_{fric} 摩擦力矩项

改进型摩擦模型（Grotjahn 模型）：

$$ \tau_f = F_0 + F_1 sign(\dot{q}) + F_2\dot{q} + F_3\dot{q}^{1/3} \quad (2-4) $$

式中 F_0 静摩擦偏移项，F_1sign($\dot{q}$) 库伦摩擦项与运动方向相关的恒定摩擦力，$F_2\dot{q}$ 线性粘滞摩擦项与速度成正比的阻尼力矩，$F_3\dot{q}^{1/3}$ 用于描述低速时的非线性摩擦特性（如 Stribeck 效应）。

六轴机器人共涉及 60 个动力学与摩擦相关参数[2]，本文采用力矩预测均方根误差（RMSE）作为适应度函数，通过遗传算法对这些参数进行迭代优化，以实现力矩预测误差的最小化。

$$ F = \frac{1}{1+\sum_{k=1}^{n} \Delta\tau_{RMS,k}} \quad (2-5) $$

首先将动力学最小参数集与摩擦参数共 60 个参数作为染色体编码，初始化种群规模为 100，并设定遗传算法的迭代次数为 500 代。其次以关节力矩预测的均方根误差（RMSE）为适应度函数，目标是最小化该误差。算法演化过程中采单点交叉以及小概率基因变异等操作，以保障收敛性和全局寻优能力。下表是优化过程及结果：

表 2-1 关节力矩预测误差均方根

技术指标	关节 1	关节 2	关节 3	关节 4	关节 5	关节 6
预测均方根 /(NM)	38.9282	90.6793	31.3426	7.0150	8.3571	4.0957

优化后，关节力矩预测误差的总均方根值降低了 10.07%，采用遗传算法辅助的动力学参数辨识方法在精度上明显优于传统的最小二乘法。

二、涂胶工业机器人能耗分析与建模

（一）伺服电机与电气系统功耗分析

机器人驱动系统功率损耗模型主要保留铜损（与电流的平方成正比）和铁损（与角速度成正比）两大项，其表达式为：

$$ P_{loss} = \sum_{i=1}^{n} P_{0,i} = k + \sum_{i=1}^{n} \left(k_{i,2}\tau_{m,i} + k_{i,3}\tau_{m,i}^2 + k_{i,4}\left|\dot{q}_{m,i}\right|\right) $$

其中，i 表示电机编号，$\tau_{m,i}$ 为第 i 个电机输出的扭矩 $\dot{q}_{m,i}$ 为其角速度，k 为恒定损耗项，$k_{i,2}$、$k_{i,3}$、$k_{i,4}$ 等为损耗相关的辨识系数。铜损由 i 轴电流与绕组电阻 R 决定。

$$ P_{inv,loss} = P_{inv,const} + k_{sw}i + k_{con}i^2 $$

其中，$P_{inv,loss}$ 表示逆变器的总损耗，$P_{inv,const}$ 为恒定损耗项，k_{sw} 和 k_{con} 分别为逆变器的开关损耗系数和导通损耗系数，i 为流经逆变器的电流。

1. 伺服电机（PMSM）在高效区的满载效率可达 94%，半载工况下效率为 92%。

2. 实测损耗分布中，铜损约占 60%，铁损约占 25%，机械杂散损耗可忽略。

在实验过程中，采用专用功率仪连续采集电机电流与关节角度等数据，并在线进行拟合与计算。数据采集与处理工作通过 Durr 机器人系统自带的 3Donsite 软件平台完成。

（二）关节电机扭矩与能耗损耗参数的系统辨识

1. 激励轨迹设计与实验流程

本文设计了有限项傅里叶级数的关节空间激励轨迹。实验过程中，以 12ms 为采样周期，实时采集功率、电机电流和关节角速度等数据[3]。

关节的运动轨迹可表示为：

$$ q_i(t) = q_{i,0} + \sum_{j=1}^{N} \left(a_{i,j}\cos(2\pi j f_0 t) + b_{i,j}\sin(2\pi j f_0 t)\right) $$

其中，$q_i(t)$ 代表第 i 个关节在时间 t 时的位置，f_0 为基频，N 为傅里叶级数的项数。通过合理调整上述参数，能够精确描述关节在一个周期内的完整运动轨迹，实现对机器人关节真实运动过程的高保真度建模与复现。

2. 验证实验与模型精度

涂胶工业机器人所有关节的损耗见式(3-1)，使用参数辨识结果计算机器人的实时功率，计算结果如下：

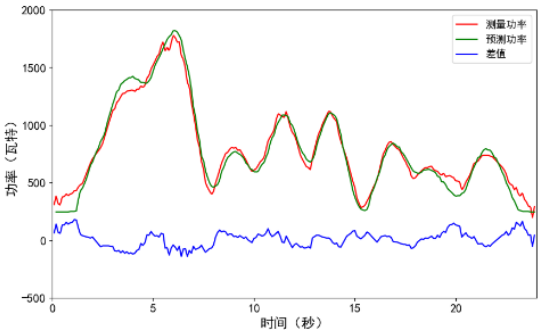


图 3-1 测试轨迹误差结果

理论计算的功率与实际测量值的拟合误差低于 8%，总能耗的相对误差仅为 1% 左右，充分证明了所采用参数辨识与物理建模方法的科学性和有效性。

三、基于 B 样条和粒子群算法的能耗最优轨迹优化

（一）优化思路与方案

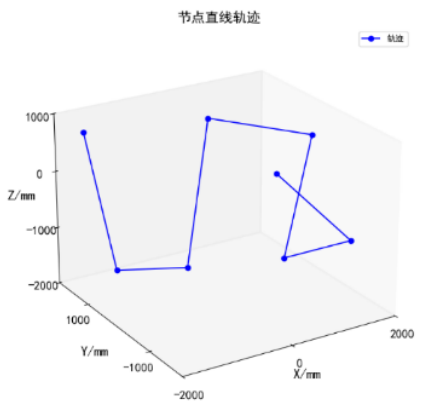
在充分辨识系统功率模型参数的基础上，采用五次 B 样条函数在关节空间内对任意 N 个任务节点进行柔性轨迹规划 [4]。以关节节点间的时间间隔作为优化变量，结合粒子群算法（PSO）进行全局优化。

优化目标包括：最小化机器人运行过程中的能耗，同时满足各项物理约束（如总运动时间固定或可调、多节点位姿准确到达等）。算法流程如下：

初始时，将各节点间的时间间隔均匀分配；基于五次 B 样条函数，结合动力学与功率模型，实时计算预测能耗；采用粒子群算法（PSO），动态更新个体最优解和全局最优解；最后，将优化后的轨迹能耗与传统梯形速度轨迹方案进行对比分析。

（二）优化实验及结果分析

以典型车身涂胶任务的八节点空间工艺轨迹为例，通过对关键段的速度与加速度进行平衡优化，下图是优化前后轨迹对比



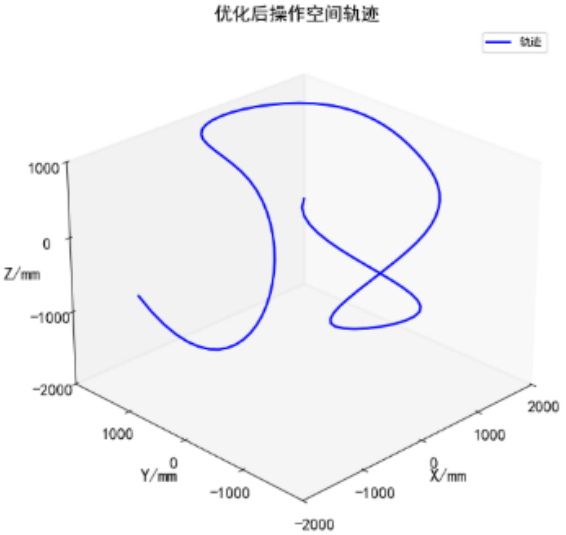


图 4-1 优化前后轨迹对比

表 4-1 能耗结果

优化轨迹能耗	参考轨迹能耗	优化程度
12345 焦耳	13733 焦耳	10.11%

相对于机器人厂家默认轨迹，能耗降低幅度超过 10%，同时各项运动约束与实际工艺需求（时长、末端位置）均得到保证。

四、量化指标与结论

动力学模型预测误差：关节力矩预测 RMSE 下降至原方案的 89.93%（10.07% 优化幅度），单关节最大提升 25.6%（关节 3）功率均方根误差 7.9%（<8%），总能耗拟合误差 1.1%（<2%）；实验轨迹能耗 12345J，梯形参考轨迹 13733J，节能比率 10.1%；

未来，针对更高自由度、多运动协作场景，机器人节能优化还有更广阔的提升空，进一步推动制造业节能减排、智能优化升级。

参考文献：

[1] Denavit J, Hartenberg R S. A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices[J]. Transactions of the ASME Journal of Applied Mechanics, 1955, 22: 215-221.
[2] Reza N. Jazar. 应用机器人学：运动学、动力学与控制技术 [M]. 机械工业出版社，2018:34-378.
[3] 李建雄编著杨国良．永磁同步电机控制技术 [M]. 北京：知识产权出版社，2015:153.
[4] 徐泽宇．基于能耗优化的机械臂轨迹规划研究 [D]. 华东交通大学，2023.