文章编号:1674-2869(2026)02-0216-06

基于轨迹优化的焊接机器人多领域耦合仿真

赵康康,梅再武*
武汉工程大学机电工程学院,智能焊接装备与软件工程技术湖北省研究中心(武汉工程大学),
湖北 武汉 430205

摘 要:针对焊接机器人单系统建模存在的结果与实际偏差显著、局部优化有限等不足,本文提出一种基于灰狼优化算法(GWO)的焊接机器人轨迹优化与多领域耦合建模方法。首先,基于Modelica语言构建多领域耦合模型,该模型整合了机械、电气及控制系统,并通过连接器和转换器实现各系统间的能量流与信息的双向交互。其次,将轨迹优化模块嵌入多领域耦合模型,构建高保真虚拟环境,以精准模拟焊接机器人的实际运行状态,从而为轨迹优化算法提供高精度测试平台。最后,采用GWO进行仿真实验。实验结果表明:直线轨迹和曲线轨迹的运行时间分别减少71.60%和26.25%,验证了该方法的有效性。相比传统焊接机器人的单系统建模,本文所提出的方法具有高仿真精度、强大的系统优化能力。

关键词:多领域耦合建模;Modelica;轨迹优化;灰狼优化算法
中图分类号:TP242.2 **文献标志码**:A **DOI**:10.19843/j.cnki.CN42-1779/TQ.202505009

Multi-domain coupling simulation of welding robots based on trajectory optimization

ZHAO Kangkang, *MEI Zaiwu* *
School of Mechanical and Electrical Engineering, Wuhan Institute of Technology, Hubei Research Center of Intelligent Welding Equipment and Software Engineering Technology (Wuhan Institute of Technology), Wuhan 430205, China

Abstract: To address limitations of single-system modeling in welding robots such as significant deviations from actual performance and limited local optimization, in this paper we proposed a trajectory optimization and multi-domain coupling modeling method for welding robots based on the grey wolf optimizer (GWO) algorithm. First, a multi-domain coupling model was built using the Modelica language, integrating mechanical, electrical and control systems. Bidirectional energy flow and information exchange among subsystems were achieved via connectors and converters. Second, a trajectory optimization module was embedded into the multi-domain coupling model to construct a high-fidelity virtual environment, which accurately simulated the real-world operation of the welding robot, thereby providing a high-precision test platform for the trajectory optimization algorithm. Finally, simulation experiments were carried out using the GWO algorithm. Results showed that the operation time of the straight trajectory and the curved trajectory are reduced by 71.60% and 26.25% respectively, verifying the effectiveness of the proposed approach. Compared with conventional single-system modeling of welding robots, the method proposed offers high simulation accuracy and enhanced system optimization capabilities.

Keywords: multi-domain coupling modeling; Modelica; trajectory optimization; grey wolf optimizer

收稿日期:2025-05-14
基金项目:武汉东湖高新区"揭牌挂帅"项目(2024KJB325);武汉工程大学研究生教育创新基金(CX2024425)
作者简介:赵康康,硕士研究生。Email:z19806114434@163.com
***通信作者**:梅再武,博士,讲师。Email:meizw@wit.edu.cn
引文格式:赵康康,梅再武. 基于轨迹优化的焊接机器人多领域耦合仿真[J]. 武汉工程大学学报,2026,48(2):216-221.

随着人工智能、大模型为代表的科学技术迅猛发展，制造业正在从传统制造模式向智能化制造模式迈进。工业机器人在制造业中发挥重要作用，如焊接机器人在焊接领域的广泛应用，有效地提高了生产效率。焊接机器人的传统轨迹规划与控制存在效率低、缺乏多领域协同优化等问题。因此，开展轨迹优化与多领域耦合建模仿真研究，旨在提升焊接质量、生产效率及推动工业自动化发展[1-3]。

传统轨迹规划主要包括多项式轨迹插值、圆弧插值、二次规划等方法，具有成本低、低维高效等优点，但存在全局性差、高维低效等问题[4]。为此众多学者提出与智能优化算法结合，不仅可以解决传统方法的不足，还同时保留其结构化优势。例如，许艳涛等[5]采用分段多项式拟合关节空间下的运动轨迹，通过改进麻雀搜索算法对机械臂末端运行轨迹进行时间最短优化，有效减少了机械臂在工作中运行的时间；Li等[6]利用五次多项式函数进行脚部轨迹规划，通过改进的粒子群优化算法实现脚部轨迹优化。然而，大部分轨迹优化研究仅考虑动力学、运动学等机械系统，忽视电气系统与控制系统的耦合作用[7-9]。

单系统建模具有简单高效、计算成本低等优点，但在复杂系统中存在结果与实际偏差显著、局部优化有限等问题。多领域耦合建模考虑跨领域交互以及协同优化，具有高仿真精度、强大的系统优化能力等优点。例如，Fachini等[10]提出一个基于Modelica的开源库，用于在多领域工程系统中表示电力驱动负载；季湛洋等[11]提出一种涉及叶片、主轴、发电机、控制等多领域耦合特性的风电机组快速调频动态建模方法，合理表征其波动特性并服务于调频控制优化；Bao等[12]利用Modelica在系统建模和仿真方面的优势，同时引入非线性自抗扰控制框架进行干扰观测、估计和补偿，解决四旋翼无人机的姿态与轨迹跟踪精度下降问题，并抑制飞行控制的响应延迟。近年来，多领域耦合建模的应用领域越来越广泛，但在轨迹优化领域中的研究相对较少。

针对上述轨迹优化与多领域耦合建模存在的不足，本文考虑机械系统、电气系统以及控制系统，提出一种基于Modelica语言的焊接机器人多领域建模框架。然后，将灰狼优化算法（grey wolf optimizer，GWO）应用于焊接机器人轨迹优化，并结合多领域耦合仿真构建高保真虚拟环境，精准模拟焊接机器人实际运行，为轨迹优化算法提供高精度测试平台。

1　时间最优轨迹规划

1.1　五次多项式轨迹规划模型

为了确保机器人能够平稳地连续运行，本文采用五次多项式轨迹插值函数，不仅能够有效地保证运动轨迹连续，还能降低高阶带来的振荡，其表达式如式(1)-式(3)所示。约束条件如式(4)所示。

$$\theta_j(t) = a_{j5}t^5 + a_{j4}t^4 + a_{j3}t^3 + a_{j2}t^2 + a_{j1}t + a_{j0} \tag{1}$$

$$\dot{\theta}_j(t) = 5a_{j5}t^4 + 4a_{j4}t^3 + 3a_{j3}t^2 + 2a_{j2}t + a_{j1} \tag{2}$$

$$\ddot{\theta}_j(t) = 20a_{j5}t^3 + 12a_{j4}t^2 + 6a_{j3}t + 2a_{j2} \tag{3}$$

$$\begin{cases} \dot{\theta}_j(0) = 0 \\ \dot{\theta}_j(1) = 0 \\ \ddot{\theta}_j(0) = 0 \\ \ddot{\theta}_j(1) = 0 \end{cases} \tag{4}$$

式中：$\theta,\dot{\theta},\ddot{\theta}$分别表示位移、速度、加速度，$t$表示第$j$关节的多项式插值时间，$a$表示待求系数，$\dot{\theta}_j(0)$，$\ddot{\theta}_j(0)$分别表示初始速度、初始加速度，$\dot{\theta}_j(1)$，$\ddot{\theta}_j(1)$分别表示结束速度、结束加速度。

1.2　灰狼优化算法

GWO是通过模拟灰狼种群的社会结构以及狩猎过程的一种群体智能优化算法。在社会结构方面，灰狼种群主要分为领头狼（α狼）、第二领头狼（β狼）、第三领头狼（δ狼）以及其他狼群（ω狼），狩猎过程主要受3只领头狼影响。

狩猎过程主要分为搜寻、包围以及攻击猎物，其中搜寻与包围猎物的更新方式如式(5)-式(9)所示。

$$d = \left| CX_{\mathrm{p}}(t) - X(t) \right| \tag{5}$$

$$X(t+1) = X_{\mathrm{p}}(t) - Ad \tag{6}$$

$$C = 2r_1 \tag{7}$$

$$A = 2br_2 - b \tag{8}$$

$$b = 2 \times (1 - \frac{i}{I}) \tag{9}$$

式中：$X(t)$、$X_{\mathrm{p}}(t)$分别为灰狼个体位置与目标位置，d为灰狼个体与目标之间的距离，C、A为系数变量，$X(t+1)$为灰狼个体更新的位置，r_1、r_2为区间$[0,1]$的随机数，b为收敛因子，i为当前迭代次数，I为最大迭代次数。

攻击猎物过程如式(10)-式(16)所示。

$$d_\alpha = \left| C_1 X_\alpha - X(t) \right| \tag{10}$$

$$d_\beta = \left| C_2 X_\beta - X(t) \right| \tag{11}$$

$$d_\delta = \left| C_3 X_\delta - X(t) \right| \tag{12}$$

$$X_1 = \left| X_\alpha - A_1 d_\alpha \right| \tag{13}$$

$$X_2 = \left| X_\beta - A_2 d_\beta \right| \tag{14}$$

$$X_3 = \left| X_\delta - A_3 d_\delta \right| \tag{15}$$

$$X(t+1) = \frac{X_1 + X_2 + X_3}{3} \tag{16}$$

式中：d_α，d_β，d_δ分别表示α狼、β狼、δ狼与其他个体的距离；X_α、X_β、X_δ分别表示α狼、β狼、δ狼的当前位置；C_1、C_2、C_3、A_1、A_2、A_3为随机数；X_1、X_2、X_3分别表示受α狼、β狼、δ狼影响，ω狼调整后的位置。

1.3 时间最优目标函数与约束条件

时间最优轨迹规划问题是指在满足约束的前提下，寻找一条运行时间最短的路径。本文以ABB IRB 1600-10-1.45型机器人为对象，对其运行时间、最大速度和加速度进行约束，约束条件如式(17)–式(19)所示。

$$f(t) = \min(t_h) \tag{17}$$

$$\left| v_j \right| \leqslant v_{j\max} \tag{18}$$

$$\left| a_j \right| \leqslant a_{j\max} \tag{19}$$

式中：t_h表示总运行时间，v_j表示第j关节的速度，$v_{j\max}$表示第j关节的最大速度，a_j表示第j关节的加速度，$a_{j\max}$表示第j关节的最大加速度。

2 焊接机器人多领域耦合建模

Modelica是一种跨学科的统一建模语言，包含机械、电气、控制等多个领域，采用统一的数学表达和建模方法，具有方程驱动的非因果建模机制、类构复用的面向对象机制、统一耦合的多领域建模机制等特点。Modelica语言的建模机制可以概括为：方程驱动为基，类构复用为架，组件嵌套为形，统一耦合为用。

基于功能模块化原理，焊接机器人系统可以分为：机械系统、电气系统以及控制系统。机械系统主要由臂部、腕部和焊枪等零部件组成；电气系统主要由伺服电机、伺服驱动器和逆变器等零部件构成；控制系统主要由轨迹规划控制器、运动控制器和传感器反馈系统等组成。

基于Modelica语言创建各系统的零部件模型，同一系统的Modelica零部件模型通过连接器连接，不同系统的Modelica零部件通过转换器连接。焊接机器人机理建模的框架图如图1所示。

2.1 机械系统

本文以ABB IRB 1600-10-1.45型机器人为研究对象，其机械本体主要由基座、臂部、腕部、手部构成。几何模型如图2所示。

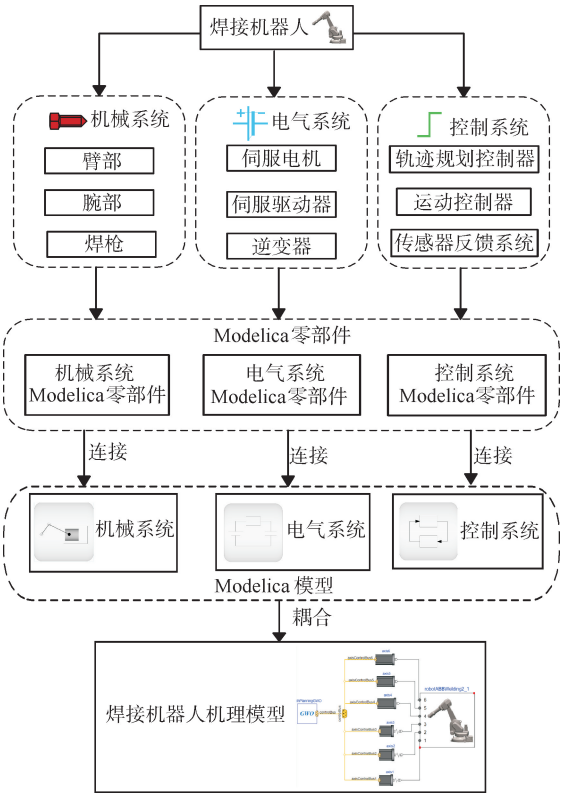

图1 焊接机器人机理建模框架图

Fig. 1 Welding robot mechanism modeling framework

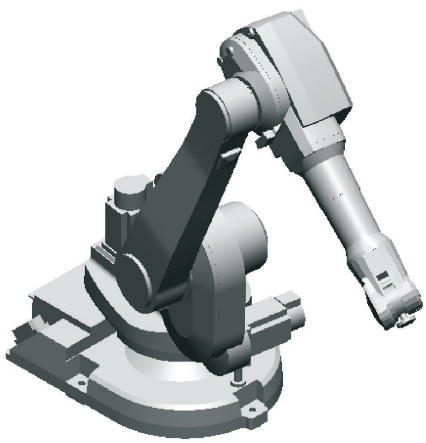

图2 ABB IRB 1600-10-1.45型机器人几何模型

Fig. 2 Geometric model of the ABB IRB 1600-10-1.45 robot

通过将ABB IRB 1600-10-1.45的几何模型转换到Dymola软件中，并利用Bodyshape模型和Revolute模型来搭建运动学模型，如图3所示。

2.2 电气系统

电机是电气系统的重要组成部分，直流永磁电机在机器人系统中具有高性价比、高动态性能、易控制等优点。本文以直流永磁电机为研究对象，采用Resistor模型、IdealOpAmp模型、Gain模型、Inductor模型来搭建焊接机器人的电气系统。直流永磁电机模型如图4所示。

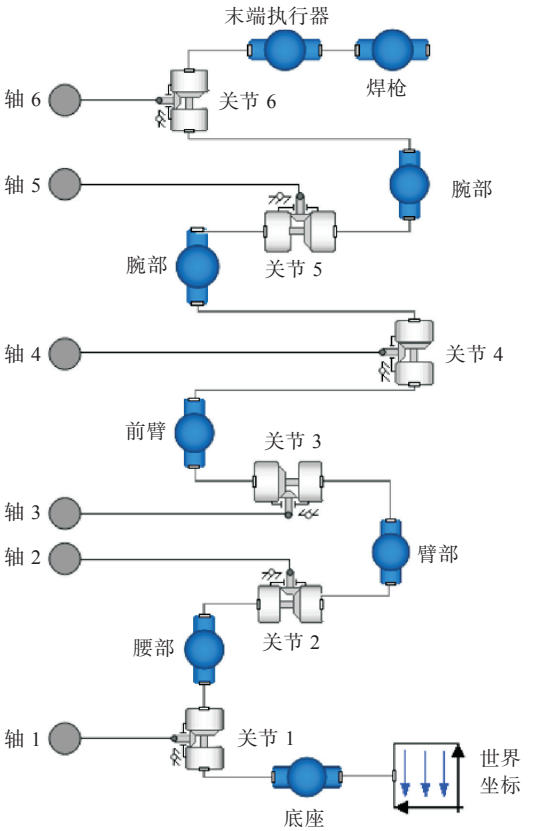

图 3　ABB IRB 1600-10-1.45 型号机器人运动学模型

Fig. 3　Kinematics of the ABB IRB 1600-10-1.45 robot

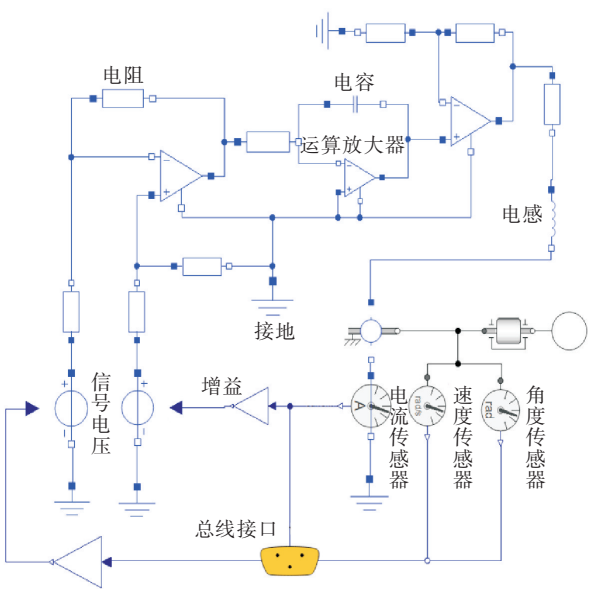

图 4　直流永磁电机模型

Fig. 4　DC permanent magnet motor model

2.3　控制系统

本文采用基于五次多项式与GWO的轨迹规划方法，通过对轨迹规划的组件进行构建、封装与连接，形成了如图5所示的轨迹规划模块。其中，q、$\dot{q}$、$\ddot{q}$、m分别为机器人的角位移、角速度、角加速度和运动状态。

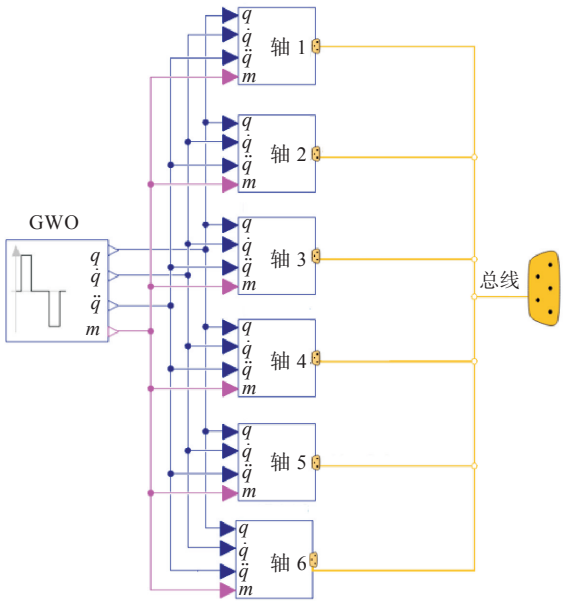

图 5　轨迹规划模块

Fig. 5　Trajectory planning module

利用Gain模型、Feedback模型对直流永磁电机进行控制系统搭建，形成电机控制系统，如图6所示。

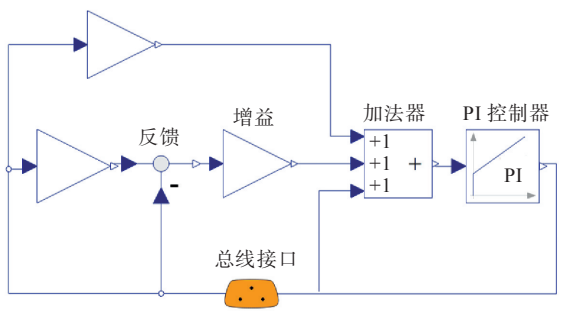

图 6　电机控制模块

Fig. 6　Motor control module

2.4　焊接机器人机、电、控耦合建模

在同一模型下，同领域的组件用连接器连接，而不同领域的组件则需要通过转换器连接。将搭建完整的机械系统、电气系统、控制系统进行耦合建模，多领域模型如图7所示。

3　实验与分析

3.1　仿真实验设计

为了验证本文搭建的焊接机器人多领域耦合模型的有效性，以Dymola2023软件为仿真平台，基于焊接机器人多领域耦合模型，采用五次多项式进行轨迹插值，并利用GWO进行时间优化。通过对直线轨迹和曲线轨迹进行仿真，得到关节的运行时间、位移、速度以及加速度曲线。仿真场景如图8所示。

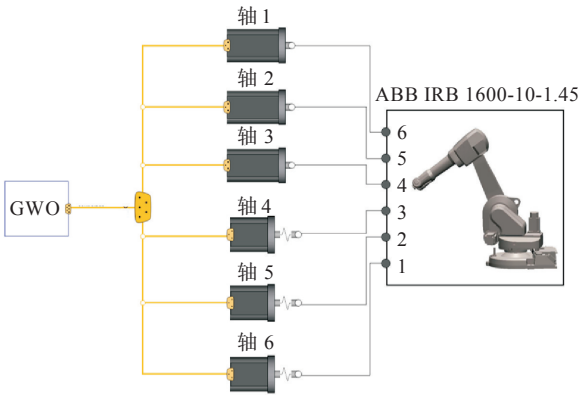

图 7 多领域模型

Fig. 7 The multi-domain model

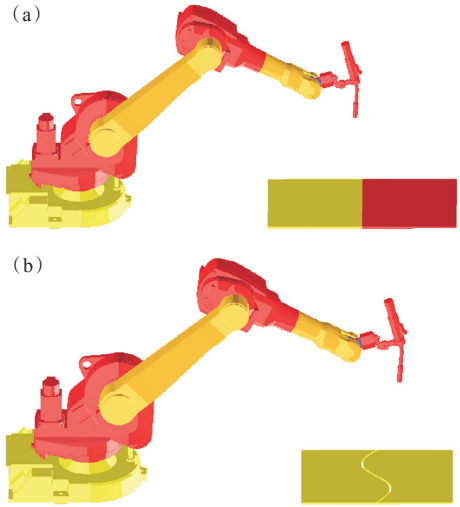

图 8 仿真场景：(a)直线轨迹，(b)曲线轨迹

Fig. 8 Simulation scene: (a) linear trajectory, (b) curved trajectory

3.2 结果比较分析

对于直线轨迹，分别采用五次多项式和GWO进行对比。为保证能够完整运行，运行时间设置为3 s。其中，GWO的迭代次数设置为30次，灰狼种群设置为10个，时间的下界和上界分别为0.1和3.0 s。以关节1为例，对比结果如图9所示。由图9可知，GWO将运行时间优化到0.85 s，优化比例为71.60%。位移、速度以及加速度均无骤增与骤降，有较好的连续性与平滑性。

对于曲线轨迹，同样采取五次多项式和GWO进行对比。GWO的参数设置与直线轨迹相同。以前3个关节为例，对比结果如图10–图12所示。时间设置为24 s，GWO将时间优化到17.7 s左右，优化比例为26.25%。位移、速度以及加速度均无骤降与骤增，体现出较好的连续性与平滑性。

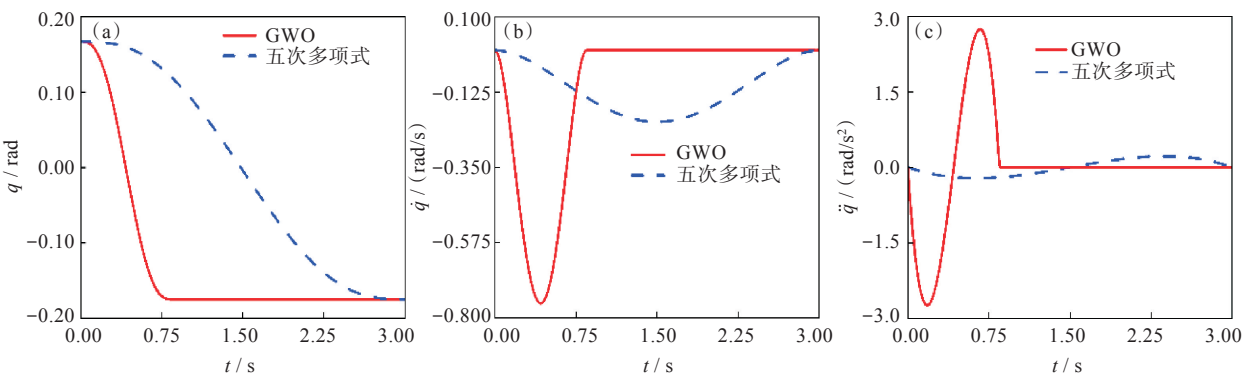

图 9 关节1的直线轨迹结果对比：(a)位移，(b)速度，(c)加速度

Fig. 9 Comparison of the straight-line trajectory outputs for joint 1: (a) displacement, (b) velocity, (c) acceleration

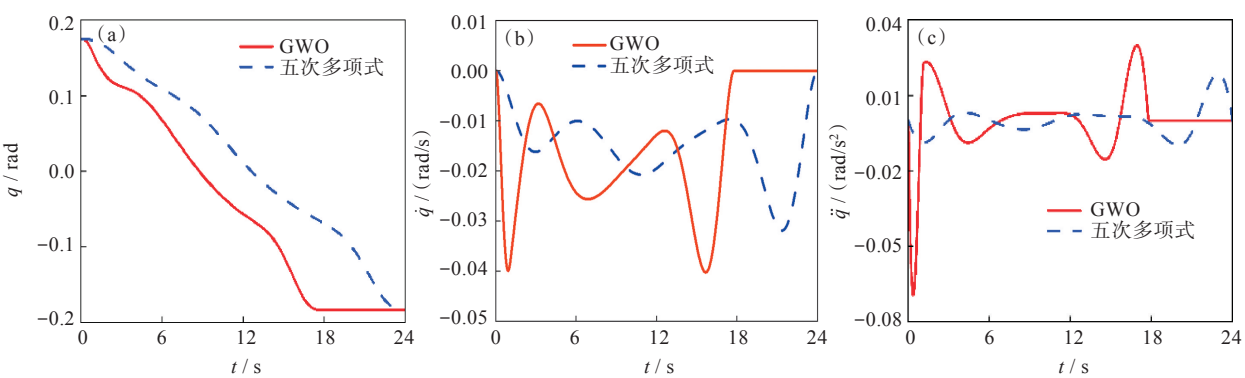

图 10 关节1的曲线轨迹结果对比：(a)位移，(b)速度，(c)加速度

Fig. 10 Comparison of the curve trajectory outputs for joint 1: (a) displacement, (b) velocity, (c) acceleration

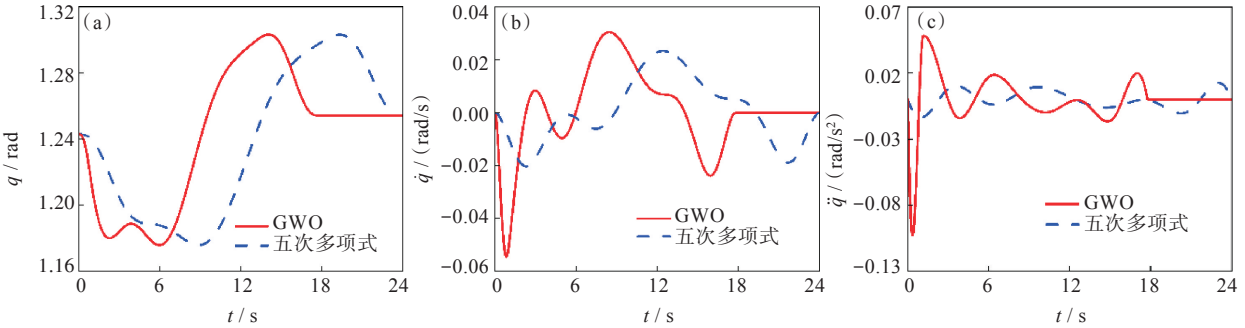

图 11　关节2的曲线轨迹结果对比：(a)位移，(b)速度，(c)加速度

Fig. 11　Comparison of the curve trajectory outputs for joint 2: (a) displacement, (b) velocity, (c) acceleration

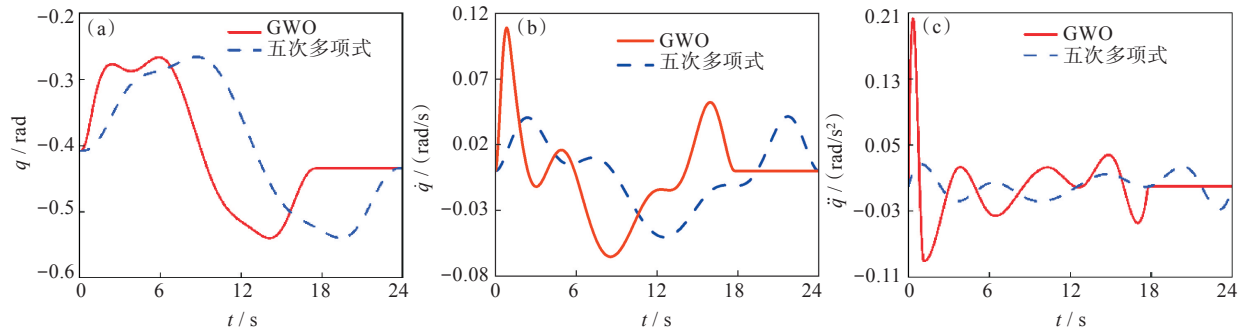

图 12　关节3的曲线轨迹结果对比：(a)位移，(b)速度，(c)加速度

Fig. 12　Comparison of the curve trajectory outputs for joint 3: (a) displacement, (b) velocity, (c) acceleration

4　结　论

针对焊接机器人多领域耦合建模领域的不足，考虑机械系统、电气系统以及控制系统，提出一种基于Modelica的焊接机器人多领域建模框架。然后，将GWO应用于焊接机器人轨迹优化，并结合多领域耦合仿真构建高保真虚拟环境，为轨迹优化算法提供高精度测试平台。通过仿真实验，在高保真虚拟环境中，GWO分别将直线轨迹、曲线轨迹的运行时间缩减到0.85和17.7 s，大幅度提高了运行效率，缩减了运行成本。

本文提出的焊接机器人多领域耦合模型，能够有效缓解单系统建模的偏差显著、局部优化有限等问题。将其用于轨迹优化领域，为轨迹优化提供高保真建模环境，可以更好地精准模拟运行状态。

参考文献

[1] 高辉，胡晓慧，王龙，等. 面向工程现场维修的焊接机器人数字孪生技术[J]. 焊接学报，2024，45(11)：55-60.

[2] 李志刚，杨翔，祝林，等. 基于Stateflow的焊接机器人协同规划策略[J]. 现代制造工程，2024(11)：60-65，79.

[3] 黄灿，叶安源，易浩洋，等. 基于改进YOLOv8算法的核环境水下机器人焊缝识别[J]. 武汉工程大学学报，2025，47(3)：325-330，354.

[4] 王柯，文彩凤. 多项式插值改进的乒乓球拾球机械臂运动控制[J]. 机械设计与制造，2024(6)：348-351，356.

[5] 许艳涛，邹光明，王众玄，等. 基于改进麻雀算法机械臂时间最优轨迹规划[J]. 组合机床与自动化加工技术，2024(9)：86-90，97.

[6] LI J，SHI X L，LIANG P，et al. Research on gait trajectory planning of wall-climbing robot based on improved PSO algorithm [J]. Journal of Bionic Engineering，2024，21(4)：1747-1760.

[7] 阮从好，苏伟. 基于改进鲸鱼优化算法的搬运机器人轨迹优化[J]. 包装与食品机械，2025，43(1)：1-7.

[8] DAI Y，XIANG C F，ZHANG Y，et al. A review of spatial robotic arm trajectory planning [J]. Aerospace，2022，9(7)：361.

[9] 管翔宇，周勇，胡楷雄. 基于改进JAYA算法的机械臂时间最优轨迹规划[J]. 组合机床与自动化加工技术，2025(2)：81-86.

[10] FACHINI F，de CASTRO M，BOGODOROVA T，et al. OpenIMDML：open instance multi-domain motor library utilizing the Modelica modeling language[J]. SoftwareX，2023，24：101591.

[11] 季湛洋，胡阳，孔令行，等. 考虑多领域耦合特性的风电机组一次调频动态建模与仿真[J]. 中国电力，2025，58(4)：56-67.

[12] BAO X P，ZHOU H，TAN S W. Self-immunity study of quadrotor UAV based on Modelica system modeling and disturbance feed-forward compensation [J]. AIP Advances，2024，14(7)：075301.

本文编辑：霍淑利