

基于SimReal平台的六轴机器人建模与运动学仿真

王 衍, 代尧宇, 耿金萍

江苏师范大学文学院电气与智能制造学院, 江苏 徐州

收稿日期: 2026年6月24日; 录用日期: 2026年7月17日; 发布日期: 2026年7月23日

摘 要

为了应对传统工业机器人物理样机制作费用较高、运动学验证耗时较长、不能有效预防奇异点以及碰撞等问题,在SimReal智能制造虚拟仿真环境下,选择六轴串联工业机器人为案例,提出一种“从CAD导入到坐标系标定再到模板匹配最后到标定参数”的全流程数字化建模方法。利用正/逆运动学求解、可到达范围检查、运动平滑度评估等多种方式实现虚拟与实际机械手臂动作的一致性;利用该软件的数据采集功能对关节的速度、时间响应以及路径的一致性等进行分析从而完成运动节拍优化及减震。从实验结果可以看出,所建立虚拟模型运动传递误差明显减小,异常抖动以及动态偏移现象得到缓解,关节动作与实物基本相同,在没有实物情况下可以对机器人本体进行提前测试以及路径规划等,有利于工业机器人教学实验,路径设计以及实际应用。

关键词

工业机器人, 数字化建模, 运动学仿真, 虚拟调试, SimReal平台

Modeling and Kinematics Simulation of Six-Axis Robot Based on SimReal Platform

Yan Wang, Yaoyu Dai, Jinping Geng

School of Electrical and Intelligent Manufacturing, Jiangsu Normal University KeWen College, Xuzhou Jiangsu

Received: June 24, 2026; accepted: July 17, 2026; published: July 23, 2026

Abstract

To address the engineering challenges faced by traditional industrial robots, such as high manufacturing costs of physical prototypes, long cycle times for kinematics verification, and the inability to

effectively prevent singular points and collision risks, this paper selects a six-axis serial industrial robot as the research case and proposes a full-process digital modeling method based on the SimReal intelligent manufacturing virtual simulation platform. The method follows the workflow of “CAD import—coordinate system calibration—template matching—parameter calibration”. Multi-dimensional verifications, including forward/inverse kinematics solution, reachable workspace analysis, and motion smoothness evaluation, are conducted to achieve high-precision motion consistency between the virtual model and the physical manipulator. Combined with the platform’s data acquisition module, key indicators such as joint velocity, time-series response, and trajectory repeatability are quantitatively analyzed to complete motion cycle optimization and impact suppression. The experimental results show that the motion transmission error of the constructed virtual model is significantly reduced, abnormal jitter and dynamic offset are effectively mitigated, and the joint response characteristics are highly consistent with the physical robot. The proposed method enables pre-verification and trajectory optimization of the robot body without a physical prototype, providing strong support for industrial robot teaching experiments, trajectory planning, and engineering applications.

Keywords

Industrial Robot, Digital Modeling, Kinematics Simulation, Virtual Commissioning, SimReal Platform

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

工业机器人是智能制造生产线完成搬运、装配、焊接等工作的重要工具，它的机身是否合理、运动学配合程度以及关节运动速度都会影响生产线正常运作及工作效率，同时也是目前智能制造领域的一个热点问题[1]。传统的开发方式依赖实物样机反复调试，开发周期长、成本高，而且无法在设计之初就发现奇异点或者碰撞等问题，在教育和工作中都存在着实际机器人价格昂贵、维护困难、不能满足大批量实训要求的问题。

虚拟仿真技术为机器人开发、测试及教育提供了一种数字化方式，在无需真实机器人情况下即可进行建模、路径规划以及运动测试等[2]。目前市面上主流仿真平台呈现明显场景分化：RobotStudio、RoboDK等平台侧重于离线编程与工艺仿真，但自定义建模能力较弱；MATLAB 机器人工具箱擅长运动学算法研究，但可视化与实时交互能力不足，工程化应用受限；Visual Components 等产线仿真软件更适合系统级物流规划，无法实现机器人本体级精确标定[3]。当前大多数学者关注生产线布置以及离线编程验证方面工作，针对机器人本体建模精度、运动学虚实一致性的系统性研究较少，导致仿真结果与实际操作偏差较大，难以支撑教学实验与快速原型验证场景。

为此，本文利用 SimReal 智能制造虚拟仿真平台，以六自由度串联工业机器人为研究对象，给出一种“CAD 模型导入 - 坐标系标定 - 模板匹配 - 参数标定”的全流程数字化建模方法，在此基础上使用改进 DH 参数建立统一运动学模型，再通过仿真数据与物理机器人实测数据对比，用均方根误差(RMSE)量化验证模型精度，并完成轨迹优化与运动平稳性分析。为工业机器人教学实验、方案设计及前期工程应用验证提供了低成本、高效率的支撑路径。为清晰呈现本文研究框架，将整体技术路线如图 1 所示。

与现有方法相比，本研究优势体现在：

- 1) 无需复杂编程与动力学推导，普通计算机即可完成高精度本体建模；
- 2) 支持自定义 CAD 导入，可快速匹配任意构型六轴机器人，适配教学与原型验证；
- 3) 运动学解算与控制器规则一致，虚拟 - 实物动作一致性高；
- 4) 内置数据采集与统计分析，可自动完成误差评估、节拍优化与减震设计。

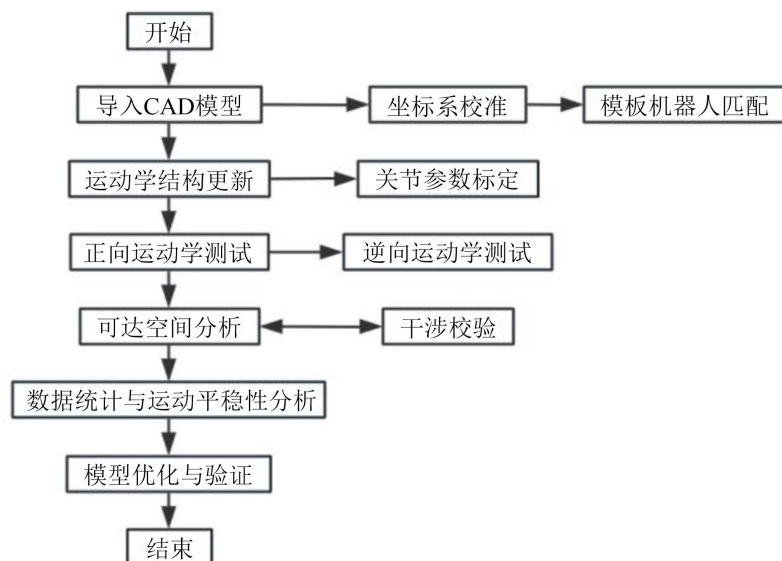


Figure 1. Technical roadmap of robot modeling and simulation

图 1. 机器人建模与仿真技术路线图

2. 机器人结构组成与运动学理论基础

本文所讨论的是在工业上得到大量应用六轴串联工业机器人，是一种开放式运动链结构，由底座、腰、肩、大臂、肘、小臂、手腕依次连接而成，共有六个转动自由度，可以在空间中实现各种位置以及姿态的变化，主要用于上下料、分类、组装等工作。

机器人运动学是仿真实现的基础理论基础，包括正向运动学以及逆向运动学：正向运动学由关节角度计算出末端执行器的位置姿态，用于对机器人的运动情况监控，而逆向运动学是由给定的目标位置姿态求出相应的关节角度，是进行路径规划及示教编程的基础。

本研究采用改进 Denavit-Hartenberg (Modified DH, MDH) 参数法建立相邻连杆间的坐标变换关系，单步坐标变换矩阵定义为：

$${}^{i-1}_iT = \text{Rot}(x, \alpha_{i-1}) \text{Trans}(x, a_{i-1}) \text{Trans}(z, d_i) \text{Rot}(z, \theta_i)$$

其展开为齐次变换矩阵：

$${}^{i-1}_iT = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 & a_{i-1} \\ \sin \theta_i \cos \alpha_{i-1} & \cos \theta_i \cos \alpha_{i-1} & -\sin \alpha_{i-1} & -d_i \sin \alpha_{i-1} \\ \sin \theta_i \sin \alpha_{i-1} & \cos \theta_i \sin \alpha_{i-1} & \cos \alpha_{i-1} & d_i \cos \alpha_{i-1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

机器人末端执行器位姿矩阵为各连杆变换矩阵连乘：

$${}^0_6T = {}^0_1T \cdot {}^1_2T \cdot {}^2_3T \cdot {}^3_4T \cdot {}^4_5T \cdot {}^5_6T$$

在正运动学模型基础上,逆运动学以末端位姿矩阵 0T 为输入,本研究采用解析法求解:先将末端位姿分解为位置与姿态分量,通过几何关系求解前3个关节角;再由姿态矩阵分解求解腕部关节角,得到多组可行解。求解中结合关节限位、运动连续性等约束筛选最优解,为后续路径规划与示教编程提供理论依据。

为了准确表示连杆之间的坐标变换关系,本论文利用 Modified DH 参数法定义相邻关节坐标系,参数定义如下表1所示。

Table 1. Modified DH parameters of six-axis industrial robot

表 1. 六轴工业机器人 Modified DH 参数表

关节 i	α_{i-1}	a_{i-1}	d_i	θ_i
1	90°	0	d_1	θ_1 (变量)
2	0°	a_2	0	θ_2 (变量)
3	90°	0	0	θ_3 (变量)
4	-90°	0	d_4	θ_4 (变量)
5	90°	0	0	θ_5 (变量)
6	0°	0	d_6	θ_6 (变量)

这种方法可以大大提高串联机器人的运动学求解鲁棒性和准确性[3],用连杆长度、扭转角、偏距以及关节转动角度来确定坐标系变换矩阵,使仿真的内部运动学计算规则与实际物理机器人控制规则保持一致,在仿真中设定关节活动范围、速度、加速度以及工作空间等参数都必须与真实的物理设备相符合,从而使得仿真的成果具有实用意义。

3. 工业机器人数字化建模与运动学仿真实现

本论文使用“三维模型导入-组件坐标系校准-模板匹配-关节参数标定”方法对虚拟模型进行建模以使其与物理机器人一致,过程见图2。

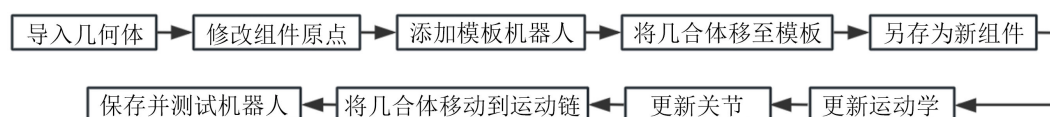


Figure 2. Experimental process of robot modeling

图 2. 机器人建模实验流程

3.1. 三维模型导入与组件坐标系校准

加载机器人 STEP 格式三维模型,在此基础上对其进行几何清理以及特征简化,去除不必要的部分,只保留关节、连杆、底座及末端法兰等对于运动有影响的部分以降低仿真时间从而提高运动响应速度。

导入模型之后,在基座中心处进行组件原点标定使模型坐标系与仿真世界坐标系重合从而消除由于运动偏移、臂展失真以及可达空间偏差等原因造成的误差。而坐标系标定是保证建模准确性的重要步骤,其标定误差直接影响到后续仿真的真实性[2]。

3.2. 运动学结构更新与关节参数标定

完成坐标系标定之后,导入同构型机器人模板,继承该模板运动解算器、关节驱动以及限位等功能,

移除模板中所有几何体，将标定好的 CAD 模型粘贴到相应运动链上层，在不影响原有控制的情况下进行几何体替代，提高建模速度及精度。

完成几何体替换之后，基于物理机器人的实际情况调整各个连杆长度、臂长、关节转动方向以及起始位置，保证虚拟机器人与物理机器人在大小和动作上完全相同。然后进行精确关节标定，在六自由度机器人本体结构参数基础上设定合理的范围约束条件[4]，每个关节都检查其是否可以正常移动，以免由于参数错误造成逆向运动学求解失败、姿态突变或者某些区域无法到达的问题。最后确定这些参数之后把每一段几何体以及对应的关节轴连接起来，形成良好的传动关系，保证关节转动时不会出现错位、抖动、变形等问题，使得仿真运动与实物一致。

3.3. 运动学仿真测试与综合性能验证

为了对模型进行运动可靠性的检验，在仿真环境中进行五个方面的测试，所有的数据均来自平台上的实时获取的信息。

1) 正向运动学测试：逐关节驱动全程运动，检查各关节运动连贯性及流畅度，角度反馈以及模型姿态一致，判断超程报警是否正常工作，计算结果正确。

2) 逆向运动学测试：将末端拖曳到一般工作空间、边缘以及奇异点附近，检查系统的即时反应能力，关节的角度变化小或者几乎没有变化，动作流畅，符合一般路径规划的要求。

3) 可达空间以及臂展测试：在仿真实验台上建立机器人可达包络面，获得机器人三维度工作空间如图3所示，可以清楚地看出机器人工作范围大小。经过实验，臂展误差不超过1%，空间覆盖面积和理论相同，可以准确体现机器人工作能力。

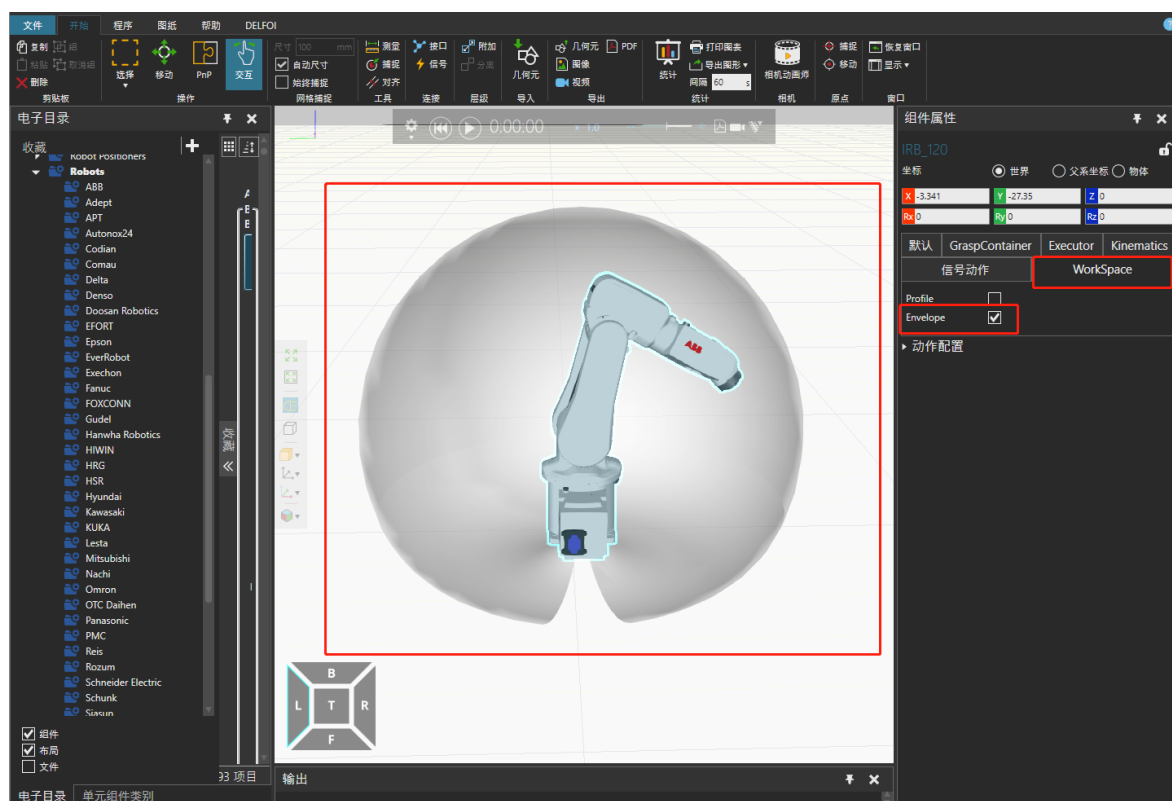


Figure 3. 3D reachable workspace of the robot

图3. 机器人三维可达空间

4) 干涉及稳定性检查：全程拖动检查无自碰撞、无超程、姿态稳定，限位保护可靠，可用于之后仿真调试等操作。

5) 虚拟-实物-致性对比测试：选取物理六轴机器人同一轨迹、同一点位，采用示教器读取关节角+末端 TCP 坐标作为实测真值；在 SimReal 中输入相同关节角，获取仿真末端坐标；通过 RMSE 计算位置偏差，完成动作一致性量化验证。

3.4. 数据统计与运动性能优化

用 SimReal 软件自带的数据采集功能，对关节角度、运动速度以及运行时序等相关参数进行持续地获取，得到运动时序图，从而衡量运动平滑程度、反应一致性及节奏均匀性等，也是数字孪生智能制造的一种实现方法[5]。

通过对数据进行分析找出关节接近极限、姿态奇异、速度变化大等问题，用轨迹点优化、姿态细微调整、速度配比调整等方法进行改善。优化之后机器人的运动冲击明显减小，定位更加稳定可靠，可以用于对精度有较高要求的仿真实验中。

4. 结果分析与讨论

为验证虚拟模型与物理机器人的运动一致性，本文选取工作空间内 20 组典型位姿，以物理机器人示教器读取的 TCP 坐标为真实值，以 SimReal 仿真输出坐标为预测值，采用均方根误差 RMSE 进行定量评价：

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[(x_i - \hat{x}_i)^2 + (y_i - \hat{y}_i)^2 + (z_i - \hat{z}_i)^2 \right]}$$

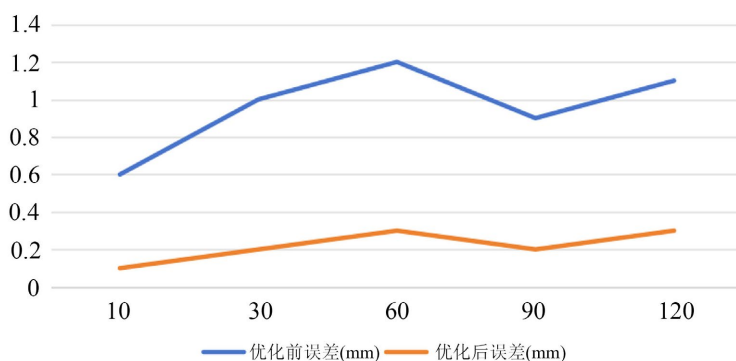


Figure 4. Comparison of end position error curves of the robot before and after optimization

图 4. 优化前后机器人末端位置误差曲线对比图

由图 4 可知，在优化之前末端位置变化较大，最大误差约 1.2 mm；经过轨迹平滑以及参数优化后，末端最大误差降至 0.3 mm，相比之前误差降低约 75%，运动传递精度显著提升。同时，误差曲线整体趋于平稳，没有较大波动及突变，说明异常抖动与动态偏移得到有效抑制。

除位置精度之外，关节运动的平稳性也是衡量模型性能的关键指标。为进一步验证优化效果，本项目对关节运动速度进行统计分析。由图 5 可知，优化之前关节速度波动幅值约 $\pm 150^\circ/\text{s}$ ，存在明显冲击与抖动；优化后关节速度曲线连续平滑，波动幅值降至 $\pm 50^\circ/\text{s}$ ，运动更加流畅。

实验结果显示，改进之后模型末端位置 RMSE 由 1.2 mm 降至 0.3 mm，误差降低约 75%，这已经可以达到教学实训及工业机器人一般作业的精度要求。同时，关节速度波动由 $\pm 150^\circ/\text{s}$ 至 $\pm 50^\circ/\text{s}$ ，运动平稳性显著提升，说明该模型具有良好的动态特性与真实物理机器人一致。由此可见，本文提出的建模方法可

以很好地保证虚拟模型与实际物理机器人运动一致性，可用于代替实物进行动力学仿真和教学等。

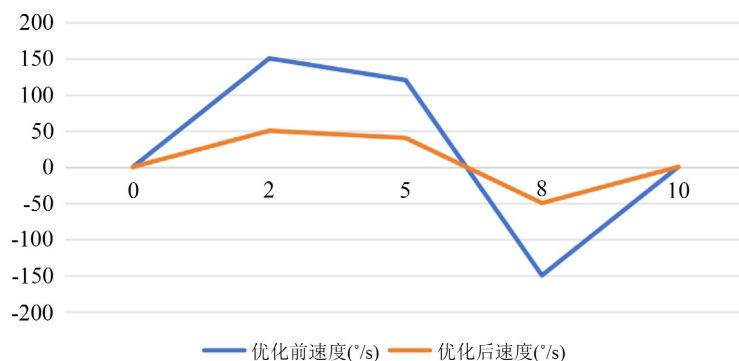


Figure 5. Comparison of joint velocity curves before and after optimization

图 5. 优化前后关节速度曲线对比

本文构建的虚拟建模与校验方法具有良好的可操作性和可重复性。该模型的大小、活动范围、关节反应以及可达到的空间等都和实际的机器人一致，可以准确地模拟出其本体运动特性。这种方法不需要编写烦琐的动力学方程及底层控制代码，在普通电脑上就可以实现整个流程的仿真验证工作，可用于教学实验、方案论证以及前期工程验证等场合，避免了传统仿真的理想化假设以及过分简化的弊端，对机器人的本体进行测试提供了一种低成本、高效的手段。

需要注意的是，本文仅对运动学方面进行研究以及仿真对比，而对于动力学载荷、摩擦以及结构刚度等均未涉及，在高加速度或者大质量情况下仿真结果与实际设备之间存在一定的差距，在此基础上加入动力学参数可以更进一步提高该模型的应用范围[1]。

5. 结论

本论文以 SimReal 虚拟仿真软件为依托，完成了对六轴工业机器人进行数字化建模及运动学仿真的全过程的研究工作，形成了一套科学合理、可重复性和可再现性的虚拟建模方案，在此基础上进行三维模型导入、坐标系校正、模板匹配以及参数标定得到较高精度的模型；通过该模型进行运动学检测、可达到范围分析并统计得出结果来判断其运动准确性和平稳程度；最后利用基于数据分析的方法进行路径优化从而提高运动流畅性和定位精度。

实验结果证明，该方法可以在没有实物样机的情况下对机器人本体进行主要性能评估，节省开发及教学费用，减少调试时间，可用于机器人结构认知、运动学研究、示教、方案设计等方面，具有较好的应用前景和发展潜力，在此基础上可以增加动力学、负载特性和碰撞检测等功能，发展为虚拟现实与物理世界同步、监控以及健康管理等方向的应用，提高其工程实用性。

参考文献

- [1] 谭民, 王硕. 机器人技术研究进展[J]. 自动化学报, 2013, 39(7): 963-972.
- [2] 文国军, 祁靖烨, 赵权, 等. 基于数字孪生的工业机器人虚实联动系统开发[J]. 机床与液压, 2023, 51(15): 9-14.
- [3] 程伟, 屈福康, 肖金. 改进的 D-H 参数下串联机器人建模与运动学分析[J]. 自动化技术与应用, 2022, 41(5): 97-99+124.
- [4] 耿磊. 六自由度工业机器人的建模与仿真研究[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 东北大学, 2013.
- [5] 王法勇, 赵凌燕, 张洁洁, 等. 基于多维模型理论的码垛工作站数字孪生系统[J]. 山东交通学院学报, 2025, 33(1): 74-81.