

轨道固定螺栓自动化预紧机器人设计与仿真

张赛文, 刘南辉, 叶子轩, 杨启远, 杨 景*

浙江理工大学机械工程学院, 浙江 杭州

收稿日期: 2026年6月29日; 录用日期: 2026年7月22日; 发布日期: 2026年7月29日

摘 要

铁路道钉作为轨道的固定连接件, 其在运行过程中会发生松动的现象, 螺栓松动、预紧力不足等很有可能对列车的运行产生严重的危害, 需定期进行预紧维护。本文以螺栓自动化预紧的功能需求为基础, 设计总体方案, 然后根据轨道的结构, 确定了螺栓拧紧和机器人构型方案。其次, 在完成三维建模后, 对机器人运动学进行了建模, 并通过仿真验证了模型的正确性。最后, 使用Adams进行仿真分析, 对机器人功能进行校验。本文所设计的螺栓预紧机器人系统将为轨道道钉的自动化维护方案提供重要参考。

关键词

螺栓预紧, 自动化, 结构设计, 仿真分析

Design and Simulation of a Robot for Pre-Tightening Track Fixing Bolts

Saiwen Zhang, Nanhui Liu, Zixuan Ye, Qiyuan Yang, Jing Yang*

School of Mechanical Engineering, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou Zhejiang

Received: June 29, 2026; accepted: July 22, 2026; published: July 29, 2026

Abstract

As critical connecting components of tracks, railway bolts may become loose during operation. Issues such as bolt loosening and insufficient pre-tightening force can pose serious risks to train operations, necessitating regular pre-tightening maintenance. Based on the functional requirements for automated bolt pre-tightening, this paper designs an overall solution. According to the structure of the track, the bolt tightening and robot configuration schemes are determined. Subsequently, after completing 3D modelling, the robot kinematics are modelled, and the correctness of the model is verified through simulation. Finally, simulation is conducted using Adams to validate the robot

*通讯作者。

文章引用: 张赛文, 刘南辉, 叶子轩, 杨启远, 杨景. 轨道固定螺栓自动化预紧机器人设计与仿真[J]. 建模与仿真, 2026, 15(7): 112-120. DOI: 10.12677/mos.2026.157112

functionality. The bolt pre-tightening robot system designed in this paper will provide an important reference for automated maintenance solutions of track bolts.

Keywords

Bolt Pre-Tightening, Automation, Structural Design, Dynamics Simulation

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

轨道交通作为重要的出行基础设施，其日常的维护非常耗费人力物力。其中轨道固定螺栓在列车运行一段时间之后，其固定螺栓会发生松动的现象，螺栓松动、预紧力不足等很有可能对列车的运行产生严重的危害[1]。因此需要定期进行预紧以防止轨道的松动，这项工作一直以来都是由人工来完成，然而人工完成不仅效率低下，高强度的工作还会损害工人的身心健康。面对越来越多的交通需要，我国对轨道固定螺栓的维护强度也越来越大。面对铁路运输提速带来的新挑战，为减少我国铁路如此高强度的人工作业，使铁路作业自动化，设计相应的智能机器人代替人工作业尤为重要。

轨道螺栓作为保障铁路线路结构稳定与行车安全的关键连接件，其预紧力的保持至关重要。在长期循环载荷与振动环境下，螺栓易发生松动，导致预紧力衰减，进而可能引发轨道几何形位超限、构件损伤，甚至严重威胁列车运行安全。因此，对轨道螺栓进行定期、高效的预紧维护是铁路工务作业中的一项核心内容。传统的人工拧紧作业存在效率低、劳动强度大、预紧力一致性难以保证等问题，发展自动化、智能化的螺栓预紧技术已成为必然趋势。

目前，机器人集成与自动化技术已在多个工业领域得到广泛研究与应用[2]。在大型结构件方面，尹秋冬等人针对钢箱梁施工，开发了基于机器视觉的螺栓自动拧紧装置[3]，并对其高强度螺栓自动拧紧机进行了深入的结构设计与有限元分析[4]。李鑫等人则面向塔式起重机标准节的安装，设计了专用的自动拧紧装置，提升了装配安全性与效率[5]。这些研究主要面向固定工位或大型构件，装置多采用龙门式或悬臂式结构，难以在轨道线路这类开放、长距离场景中灵活移动作业。在一般工业装配及狭小空间领域，吴连伟等人开发了用于冷盖螺栓的智能拧紧单元[6]，而陈翔宇等人则对狭小空间内的自动拧紧方法进行有益的试验探索[7]。此外，在制造业的自动化产线中，该技术也已成熟应用，如沈阳等人研究了螺栓自动拧紧机在电动汽车电机装配中的工艺[8]，张晓红也探讨了其在变速箱自动化装配中的应用[9]。然而，尽管上述研究取得了显著成果，但现有技术与轨道螺栓预紧的特定工况仍存在适配性挑战。这些技术虽然成熟，但通常为半自动或固定工作站，缺乏对作业环境(如钢轨周边复杂空间)的适应性与自主移动能力。例如，钢轨周边环境复杂、作业空间受限，且对维护设备的移动性与适应性提出了更高要求。现有装置多为针对特定产品的专用设备，缺乏在轨道线路这类开放、长距离场景下的灵活作业能力。因此，现有螺栓拧紧装置多针对特定产品或固定产线，尚未有效解决轨道螺栓在开放线路、长距离、有限作业空间下的自动化预紧问题。在机械结构上采用四自由度集成式机械臂，以滚珠螺杆花键轴组件实现单动力源完成直线进给与旋转拧紧双动作，结构紧凑、空间利用率高；在控制策略上融合机器视觉定位、扭矩实时检测与闭环控制，实现螺栓自主识别、精准对位与力矩可控；在应用模式上采用沿轨自主行走 + 在线预紧作业模式，可在开放线路、长距离、受限空间下全自动完成螺栓预紧，兼具移动性、柔性智能化，填补了现有技术在轨道线路自动化维护领域的空白。

本文基于轨道螺栓预紧的功能需求，旨在设计一款铁路道钉专用的螺栓预紧机器人。在功能需求分析的基础上进行总体方案与构型设计，完成机器人的三维建模与运动学分析，并利用动力学仿真验证其关节驱动能力与作业功能，以期为轨道螺栓的自动化、智能化维护提供一种新的技术解决方案与装备参考。

2. 轨道道钉拧紧机器人系统设计

2.1. 机器人系统组成及工作过程介绍

整个机器装置系统由装置本体机械部分、机器控制系统、扭矩信号检测、图像采集四个部分组成，各组成部分功能如图 1 所示。整个机器工作流程大概为：装置在钢轨上行走，通过装置上的摄像头将拍摄到的图像输送给控制中心，由控制中心进行图像处理进而确定螺栓的位置，通过移动直线滑台与机械臂旋转关节将拧紧套筒移动到螺栓的正上方，完成螺栓的定位。将电磁离合器分离，通过同步带传动滚珠螺杆，将安装在螺杆下端的末端拧紧器送进到拧紧的位置。电磁离合器自动闭合，伺服电机驱动主轴带动同步带使滚珠螺杆与花键螺杆以较小速度转动，摄像头摄像螺帽的位置状态，完成认帽过程。然后转为高速状态，开始拧紧操作，螺母拧紧扭矩达到预设值停止。机械臂回到初始位置。

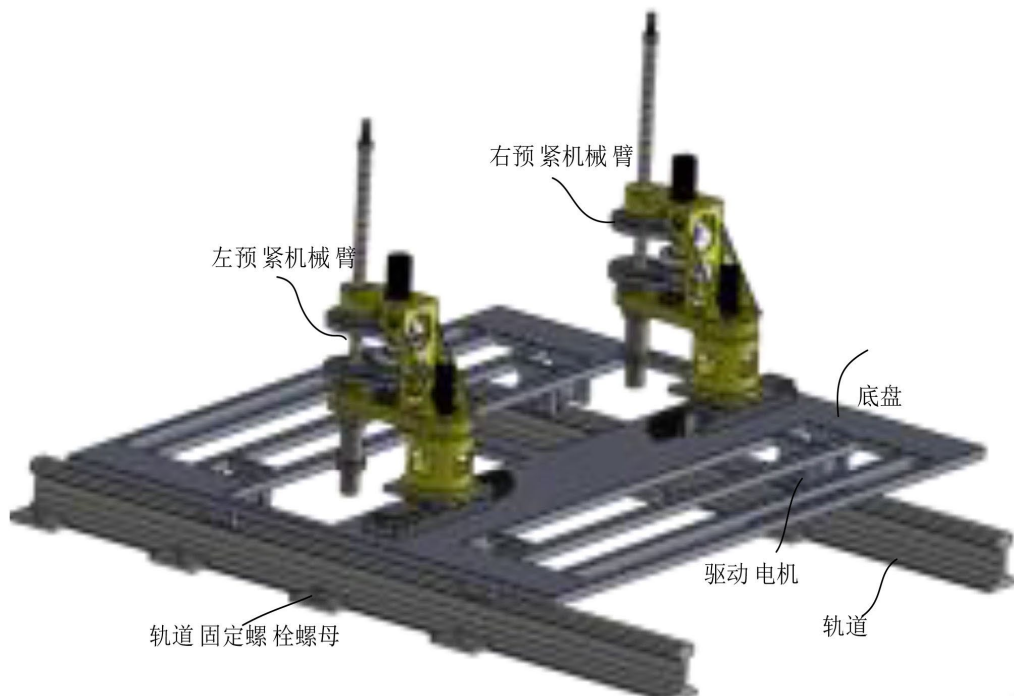


Figure 1. Overall structure of bolt pre-tightening robot system
图 1. 螺栓预紧机器人系统总体结构

机械臂结构如图 2 所示，机械臂总共需要四个自由度，第一自由度为移动自由度，由伺服电机驱动滑台在导轨上移动；第二自由度为旋转关节，由伺服电机通过谐波减速器驱动机械臂旋转；第三自由度为螺杆移动关节，由伺服电机与减速器相互配合驱动同步带轮，使得带轮驱动花键轴移动实现机械臂末端执行器的直线运动。第四自由度为末端执行器旋转关节，由伺服电机与减速器带动同步带轮，通过同步带与螺杆花键轴传动，驱动机械臂末端旋转关节进行旋转运动。

螺栓拧紧的过程包括两个动作，其中一种是行程较大的调整运动，机械臂移动旋转使拧紧套筒移动

到需要紧固的螺栓上方；另外一种是将螺栓进行拧紧的运动，拧紧装置低速旋转将螺母划入套筒，最后高速旋转完成拧紧工作。本次设计的装置机械臂末端执行器将使用滚珠螺杆花键轴组件，通过电机驱动传动带控制滚珠螺母和花键螺母来完成拧紧工作。使花键螺母和滚珠螺母相互配合来使螺杆进行旋转和直线运动，当花键螺母固定，只有滚珠螺母被带动时，机械手末端执行器发生直线运动，螺杆可以上下移动；当花键螺母和滚珠螺母同时被传动带带动运动时，将发生旋转运动，机械手末端执行器进行旋转运动，能够完成螺栓的拧紧任务。这样只用一个动力源就能够实现两个动作，这种结构方式能够确保装置的结构更加紧凑，不仅使得装置效率的提高，还能使机器人，的结构更加便于安装，同时也减少了制作成本。

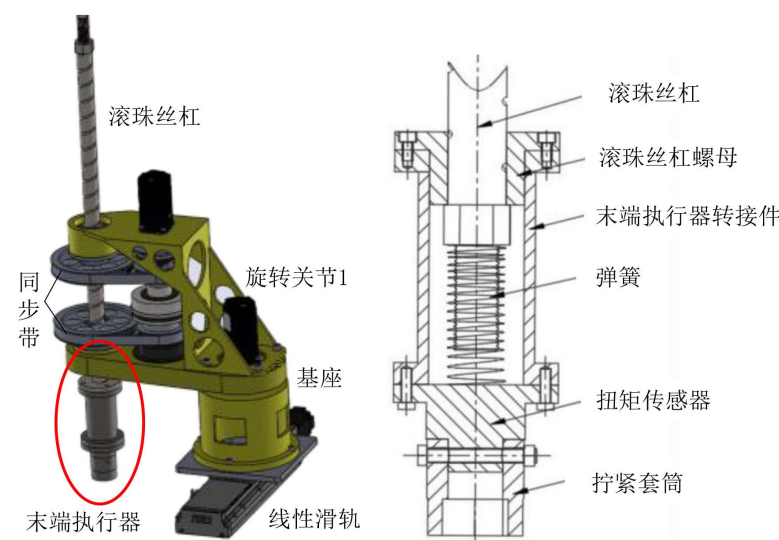


Figure 2. Structure of bolt pre-tightening manipulator
图 2. 螺栓预紧机械臂结构

2.2. 机器人设计参数与性能指标

在铁路 P60 钢轨扣件系统中，钢轨接头连接采用符合 GB/T 5782-1986 标准的高强度螺栓，公称直径为 24 mm，配合 GB/T41 规定的 I 型六角螺母 C 级使用。为保证接头可靠的连接刚度及防松脱性能，需通过合理计算确定螺栓的装配拧紧力矩。

拧紧力矩与螺栓轴向预紧力之间的关系可由下式确定：

$$T = K \cdot F \cdot d \quad (1)$$

其中： d 为螺纹公称直径(mm)； F 为目标预紧力(kN)； K 为拧紧力系数，综合反映了螺纹副与支承面之间的摩擦效应。根据所用高强螺栓的表面处理状态及实际润滑条件，此处 K 取 0.22，公称直径 $d = 24\text{mm}$ 。

结合 P60 钢轨接头的工作荷载及抗疲劳需求，设计预紧力在 $F = 38 \sim 42\text{kN}$ 范围内。将上述参数代入公式计算，得到相应的拧紧力矩：

$$T = 0.22 \times (38 \sim 42) \times 24 \approx 200 \sim 220 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (2)$$

由此 P60 钢轨所用 M24 轨道固定螺栓的装配拧紧力矩宜精确控制在 200~220 N·m 区间内，既保证节点整体性，又避免因力矩过大导致的螺栓或接头损伤。确定的轨道固定螺栓自动化预紧装置技术参数如表 1 所示。

Table 1. Technical specifications of automated pre-tensioning device for track fastening bolts
表 1. 轨道固定螺栓自动化预紧装置技术参数

参数名称	数值范围
工作空间	沿钢轨方向 ± 200 mm，垂轨方向 150 mm
定位精度	± 0.5 mm
单螺栓作业时间	≤ 15 S
最大拧紧力矩	400 N·m
机械臂基座旋转范围	$\pm 120^\circ$
末端回转关节	$\pm 360^\circ$
末端移动关节	400 mm

3. 机器人关键零部件的有限元分析

为评估机器人关键结构在负载工况下的力学性能，本文利用 SolidWorks Simulation 插件对第二关节臂杆进行了有限元强度与刚度分析，有限元模型如图 3 所示。该臂杆作为连接底座与末端执行器的重要传力部件，其结构完整性直接影响整机的运动精度与承载能力。臂杆材料选择合金钢，弹性模量为 211 GPa，泊松比为 0.30，屈服强度 620.4 MPa。采用四面体网格，单元尺寸为 2 mm，节点数为 38,742，单元数为 21,563，网格收敛性已验证。臂杆根部固定约束，末端施加额定负载 500 N·m (及极限工况 700 N·m)的扭矩载荷。

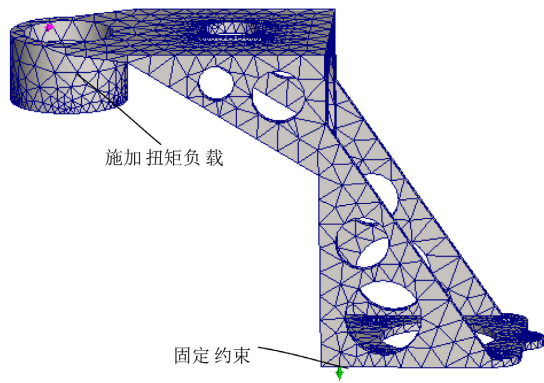


Figure 3. Finite element model of the second joint arm
图 3. 第二关节臂杆有限元模型

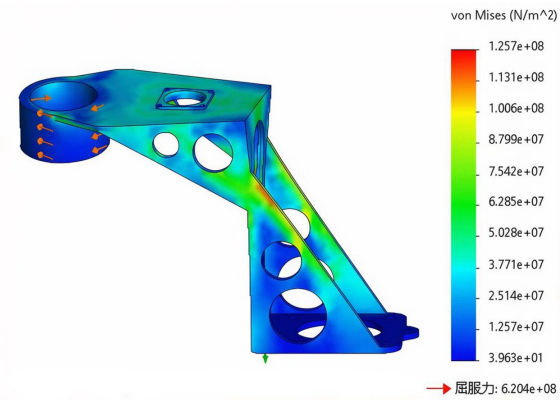


Figure 4. Stress distribution of the arm under 500 N·m load
图 4. 负载 500 N·m 时臂杆的应力分布

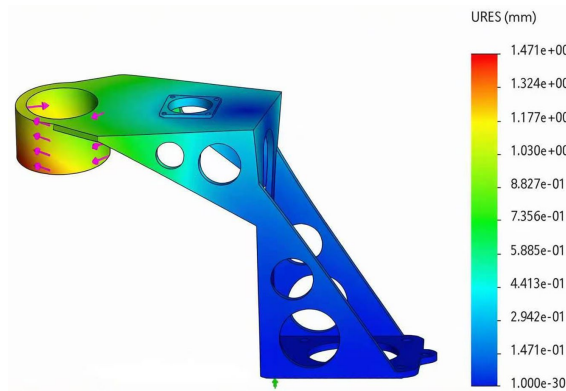


Figure 5. Displacement distribution of the arm under 500 N·m load
图 5. 负载 500 N·m 时臂杆的形变位移分布

在负载为 500 N·m 时, 分析结果显示, 臂杆的最大等效应力为 125.7 MPa (如图 4 所示), 出现在臂杆根部圆角处, 低于合金钢材料屈服强度(620.4 MPa), 满足强度要求。此时臂杆的最大变形量为 1.47 mm (如图 5 所示), 位于末端执行器安装孔附近, 刚度性能良好。

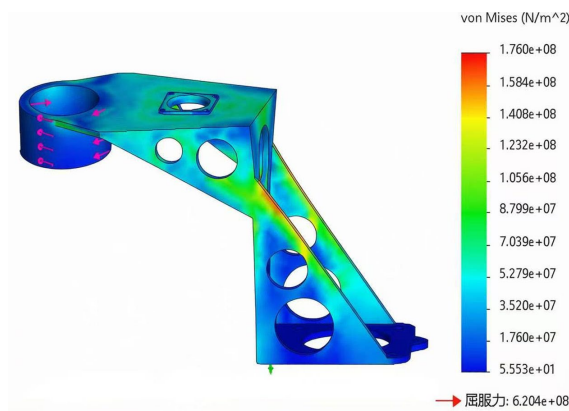


Figure 6. Stress distribution of the arm under 700 N·m load
图 6. 负载 700 N·m 时臂杆的应力分布

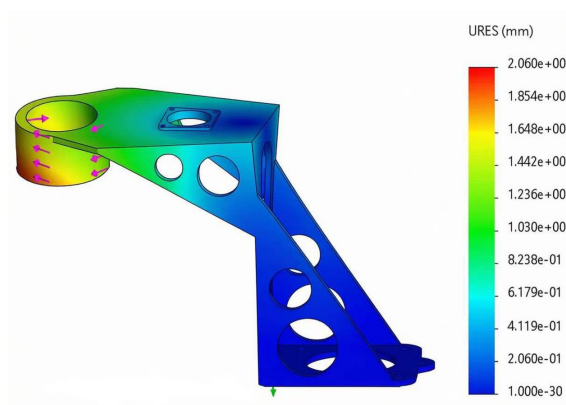


Figure 7. Displacement distribution of the arm under 700 N·m load
图 7. 负载 700 N·m 时臂杆的形变位移分布

当负载提高至 700 N·m 时, 臂杆应力分布趋势基本一致, 最大应力上升至 176 MPa (如图 6 所示),

略高于材料屈服强度，存在局部塑性变形风险。最大变形量也随之增大至 2.06 mm (如图 7 所示)，刚度出现不足的情况。

综合分析表明，该臂杆在额定负载 500 N·m 下具备足够的强度与刚度，但在极端工况 700 N·m 下需进一步优化。本研究为机器人关键部件的结构改进提供了可靠的理论依据与数据支持。

4. 机器人运动学模型

4.1. 机器人运动学模型正解

利用标准的 D-H 运动学建模方法，建立机械臂的运动学坐标系如图 8 所示。将底盘坐标系作为两侧预紧机械臂的基础坐标系，两侧机械臂的运动学坐标系和参数相同。在后续运动学分析中以单侧臂运动学分析进行建模和分析。

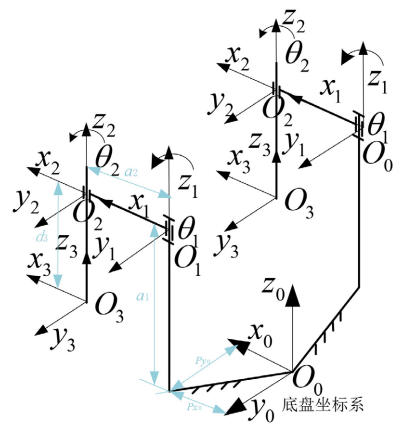


Figure 8. Robot kinematic coordinate system
图 8. 机器人运动学坐标系

Table 2. The kinematic parameters of robot

表 2. 机器人运动学参数

关节 i	a_i	α_i	d_i	θ_i
1	0	0	a_1	θ_1
2	a_2	0	0	θ_2
3	0	0	$-d_3$	0

在此基础上，提取标准 DH 参数，预紧机械臂的运动学参数如表 2 所示。利用式(3)即可得到相邻关节的运动学转换矩阵。

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i \cdot c\alpha_i & s\theta_i \cdot s\alpha_i & a_i \cdot c\theta_i \\ s\theta_i & c\theta_i \cdot c\alpha_i & -c\theta_i \cdot s\alpha_i & a_i \cdot s\theta_i \\ 0 & s\alpha_i & c\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$T = T_1 T_2 T_3 \quad (4)$$

4.2. 机器人逆运动学模型

在求解机器人的运动学逆解模型时，考虑到机器人的第二关节不影响其末端位置，将其忽略，只计

算第一关节和第三关节的运动学逆解解析式。为求出机械手末端位置矢量相对于第一主动关节坐标系的逆解,令末端工具坐标系相对于自身基座坐标系的位姿矩阵为 T ,并设之为:

$$T = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

本文通过限定关节 1 的转角范围得到螺栓预紧机器人的运动学逆解为:

$$\begin{cases} q_1 = a \tan 2(a_x, a_y) \\ d_3 = a_1 - p_z \end{cases}, \begin{cases} q_1 \in (-90^\circ, 90^\circ] \\ d_3 \in [300, 400] \text{ mm} \end{cases} \quad (6)$$

4.3. 管端定位机器人运动过程仿真

在建立的管端定位机器人三维模型的基础上,将三维模型以 parasolid.x_t 格式导入到 Adams 动力学仿真软件中,通过给关节添加对应的约束和驱动,对螺栓预紧机器人的拧紧定位过程进行仿真,建立的机器人虚拟样机模型如图 9 所示。通过仿真对机器人的功能性进行验证。

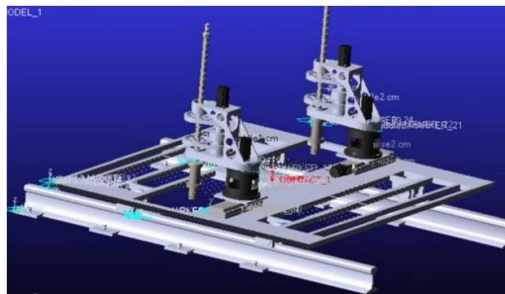


Figure 9. Simulation of robot movement process
图 9. 机器人运动过程仿真

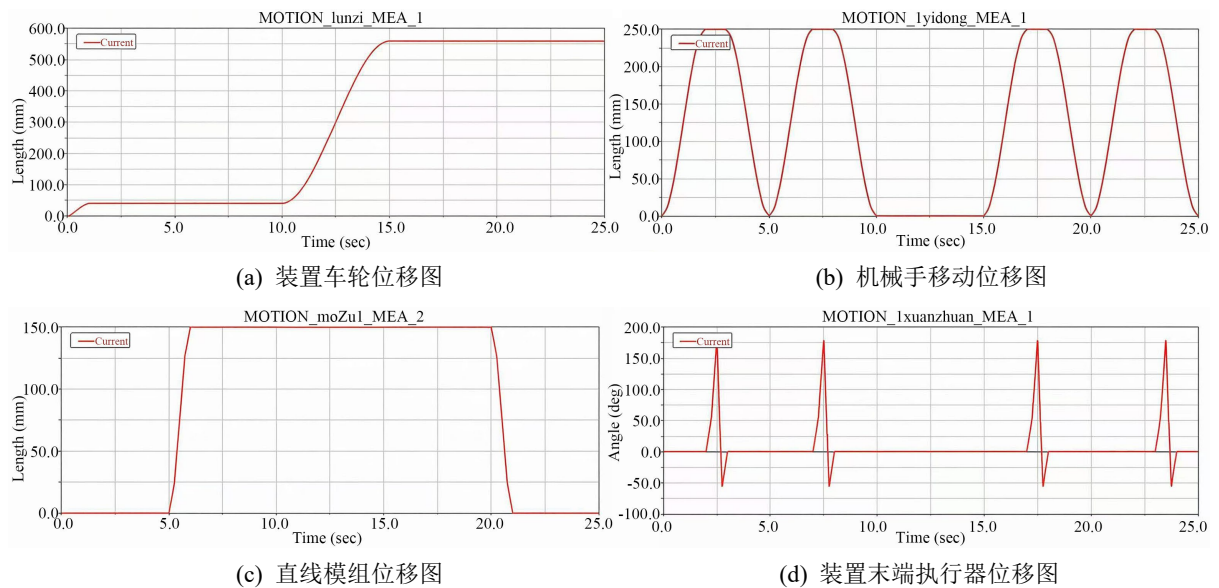


Figure 10. Motion displacement diagram of key parts of the robot
图 10. 机器人关键部位运动位移图

其中装置车轮、机械手、直线模组、末端执行器位移图如图 10 所示。

根据 Adams 软件仿真得出的结果以及仿真动画显示,装置模型能够仿真成功,且设计满足设计要求。

5. 结论

本文针对轨道固定螺栓自动化预紧的维护需求,设计并研究了一款专用的螺栓预紧机器人系统。通过总体方案设计,确定了集移动、旋转、进给与拧紧功能于一体的机械臂构型,完成了机器人的三维建模与运动学分析,建立了其 D-H 运动学模型并求解了逆运动学解析式。其次,对机器人关键零部件进行了有限元分析,分析两种不同载荷条件下机器人的强度和刚度。最后,通过 Adams 动力学仿真软件对机器人的螺栓定位与拧紧作业过程进行了模拟,仿真结果验证了机械结构设计的合理性与运动学模型的正确性,表明该机器人能够按预定轨迹完成预紧任务。本研究为轨道螺栓的自动化、智能化维护提供了一种可行的技术方案与装备参考,具有重要的工程应用价值。

基金项目

浙江省教育厅一般科研项目、站房巡检机器人手眼标定与目标检测技术研究、25240134-F。

参考文献

- [1] 王前选,王锐锋,李虎,等. 轨道车辆螺栓松动量与预紧力视觉检测方法研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(9): 3511-3524.
- [2] 丛淼淼,马浩浩,冯彦伟. 智能制造系统中的机器人集成与自动化技术研究[J]. 装备制造技术, 2024(5): 157-160.
- [3] 尹秋冬,胡文涛,陈海洲,等. 基于机器视觉的钢箱梁螺栓自动拧紧装置设计[J]. 建筑机械化, 2025, 46(2): 35-38.
- [4] 尹秋冬,曾红志,周黎明,等. 钢箱梁高强度螺栓自动拧紧机结构设计 with 有限元分析[J]. 机械, 2025, 52(1): 30-36.
- [5] 李鑫,李昭辰,耿贵军,等. 塔机标准节螺栓自动拧紧装置设计与研究[J]. 建筑机械, 2023(11): 93-95.
- [6] 吴连伟,李文博,栾建伟,等. 交互式冷盖螺栓智能拧紧单元的设计及应用[J]. 设备管理与维修, 2023(7): 144-145.
- [7] 陈翔宇,刘明洋,徐志刚. 狭小空间内螺栓自动拧紧方法试验研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2021(9): 168-171.
- [8] 沈阳,栾会玲. 基于螺栓自动拧紧机的纯电动车电动机装配工艺研究[J]. 汽车工艺与材料, 2021(7): 66-70.
- [9] 张晓红. 机器人自动拧紧螺栓机构在变速器装配方面的优势[J]. 机械管理开发, 2020, 35(10): 88-89.