文章编号:1671-6833(2026)05-0017-09

主-被动混合控制的火电厂翻车机摘钩机器人系统设计

邱 益,郭柳冰,梁 杰

(郑州大学 机械与动力工程学院,河南 郑州 450001)

摘 要:为解决火电厂翻车机卸煤系统中人工摘钩作业存在的环境恶劣、劳动强度大及安全隐患等问题,提出了一种主-被动混合控制构型的翻车机摘钩机器人。首先,对机器人机械结构进行设计,其本体由 3 个主动移动副、1 个主动旋转副、1 个被动移动副和 1 个被动旋转副组成。随后,通过图解法分析被动结构的运动适应性,并采用 D-H 方法建立了整机的正、逆运动学模型,为运动控制奠定理论基础。在控制系统方面,设计了硬件架构,并结合线激光位移传感器的测量数据,提出一种车钩手柄识别算法,可获取末端夹爪与车钩手柄之间的位置信息 $P_g(x_g,z_g)$,实现手柄的精确定位与夹取。为验证方案的有效性,开展了中试实验。结果表明:在 50 次摘钩操作中,机器人摘钩成功率达到 100%,且所有关节力矩均未超过额定值。摘取高位车钩平均用时 25 s,摘取低位车钩平均用时为 30 s,均满足生产要求。各关节最大瞬时力矩为 62.1 N·m,仅占系统极限的 43.7%,显示出充足的安全裕度。实验结果体现出所设计的机器人对车钩轨迹不确定性的自适应能力,能够适配不同车型或同车型的路径偏差,同时证明了所提识别算法的精确性。

关键词:摘钩机器人; 主被动构型; D-H 法; 线激光

中图分类号:TP242.2;TP273 **文献标志码**:A **doi**:10.13705/j.issn.1671-6833.2026.02.010

2023 年,中国火电发电量达 62 318 亿 kW·h,占全国发电总量的 70.0%,其中燃煤发电占火电发电量的 85%以上,且煤炭运输主要依赖铁路[1]。随着制造业高质量发展和煤炭企业现代化进程加速,大型热电厂纷纷引入自动化综合系统,生产环节的机械化和自动化水平不断提高[2]。尽管翻车机在煤炭快速翻卸中已实现高度自动化,但敞车解列环节仍需人工摘钩,导致劳动强度大、粉尘污染严重且安全风险高[3]。因此,研发能够替代人工摘钩的机器人,既可进一步提升自动化水平,又能有效降低风险、提高效率并节约能耗。

在铁路自动化技术领域,国际研究机构较早开展车钩分离装置探索,如德国 Aachen 技术学院研发的地面轨道移动式摘钩系统采用机器视觉实现车钩位姿检测。亚琛工业大学研发的列车车厢自动化摘钩系统采用三维空间运动控制分解方法,通过 X、Y、Z 坐标系下的三轴独立电机控制实现精准操作,在欧洲 Knorr 标准车钩场景中取得显著成效。然而受限于国内外铁路车辆联挂方式与 AAR/UIC 车钩标准的差异性[4],该系统的直接参考价值有限。国内研究领域自 20 世纪以来持续进行技术攻关,徐维民[5]研制的 TGS1 型提钩机器人采用三自由度并联机械臂分序作业机制,通过空间位姿解耦控制实现上、下车钩分离与手柄同步操作。针对车钩结构适配性难题,冯宇[6]构建了直角坐标机械臂-移动平台复合系统,基于 ADAMS 虚拟样机完成多物理场耦合仿真,验证了末端执行器位姿精度可达 ±1.5 mm。研究深化阶段,李继东[7]提出基于 ROS 的移动机械臂分层控制架构。在智能控制层面,孙程[8]建立剪叉机构非线性能量成型模型,依托 Simulink 实现扰动抑制率>92%的动态仿真;郭仁杰[9]针对自动摘钩过程中的摘钩提杆识别、机械臂轨迹

收稿日期:2026-03-05;**修订日期**:2026-05-24

基金项目:国家重点研发计划(2023YFB3306600)

作者简介:邱益(1968—),男,河南郑州人,郑州大学副教授,博士,主要从事构型设计优化研究,E-mail:qiuyi@zzu.edu.cn。

通信作者:梁杰(1981—),男,河南郑州人,郑州大学副教授,博士,主要从事机器人柔性制造研究,E-mail:liangjie812@163.com。

引用本文:邱益,郭柳冰,梁杰. 主-被动混合控制的火电厂翻车机摘钩机器人系统设计[J]. 郑州大学学报(工学版),2026,47(5):17-25. [Qiu Yi, Guo Liubing, Liang Jie. Design of a hybrid active-passive control robotic system for coupler unhooking in thermal power plant wagon tippers[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science),2026,47(5):17-25.]

规划等问题,提出复杂动态环境下摘钩提杆检测与位姿匹配、摘钩机器人作业轨迹规划等方法,设计搭建了面向铁路编组站的自动摘钩机器人系统。

目前,国内对摘钩机器人的研究主要集中在方案设计和仿真阶段,尚未充分验证其在复杂工况中的实际性能。因车钩制造误差、长期使用及变形等因素,机器人在抓取车钩和执行摘钩时难以精准规划操作轨迹[10]。此外,工业机器人和协作机器人在执行路径时多依赖编程或示教模式,其运行轨迹对环境干扰的适应性相对较弱[11]。而货车车钩的摘钩路径会因加工精度、装配偏差及磨损情况发生变化,导致每次作业路径均有所不同[12],进一步增加了机器人执行任务的难度。

针对动态工况下摘钩机器人轨迹适应性不足的问题,本研究提出基于主-被动混合控制架构的解决方案,通过多自由度机械臂与轨迹自适应机构相结合,在确保基本路径精度的前提下,实现轨迹的自适应调整。该设计提升了机器人对车钩手柄运动轨迹变化的适应性,增强了摘钩机器人系统对非结构化动态环境的适应能力。

1 摘钩空间分析和机械构型设计

1.1 摘钩空间分析

铁路货车车钩根据作动方向可分为上作用式与下作用式两种典型结构,示意图如图1所示。上作用式车钩的解锁作动机构由车体侧部手柄驱动,通过连杆机构传递提升力矩,使钩提销沿垂直轨道方向运动实现钩锁解锁[13];下作用式车钩则设有防误提装置(含限位槽结构),其解锁作动需克服防误提装置的约束,通过提钩链施加垂直牵引力使钩提销脱离限位槽,方可实现钩锁机构解锁[14]。

(a) 上作用式车钩 (b) 下作用式车钩

图1 上作用式车钩和下作用式车钩示意图

Figure 1 Schematic diagram top-acting hooks and down-acting hooks

现有的铁路敞车采用对撞式车钩连接,对撞式车钩的钩体、舌销孔、钩舌、提销等特有操控机构是基于人工操作进行设计的[15],因此,当前仍依赖人工摘钩操作完成敞车解列,摘钩解列环节没有成熟、可靠的自动化解决方案,自动化水平较低[16]。

1.2 摘钩机器人机械构型设计

摘钩机器人采用主-被动复合机械架构,包含主动定位系统和被动柔顺系统,其虚拟样机如图2所示。主动定位系统基于笛卡尔坐标系构建 $X/Y/Z$ 三轴精密移动平台,耦合 R 轴旋转关节,形成四自由度基准运动链,确保末端执行器的精确运动;被动柔顺系统集成被动旋转机构与被动移动机构,借助非线性刚度特性吸收外部冲击,减少轨迹波动,在保证末端执行器抓取过程定位精度的同时,可自适应补偿作业过程中的动态轨迹偏差。

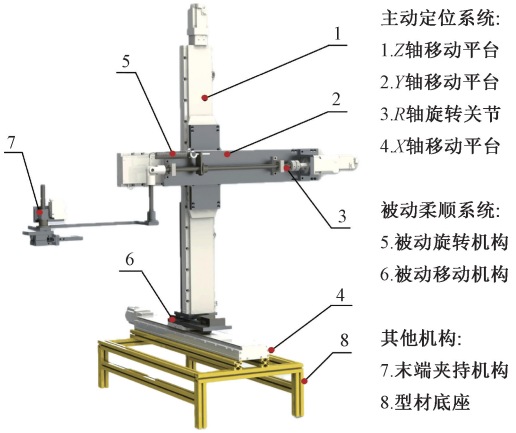

图2 摘钩机器人虚拟样机

Figure 2 Virtual prototype of hook lifting robot

1.3 被动结构运动学分析

在摘钩过程中,下作用式车钩解锁时需先沿垂直方向提升钩体,脱离误操作环,随后实施旋转解锁动作[17]。

图3为手柄产生径向偏差示意图。如图3所示,上提运动中,其操作手柄在 Y-Z 平面会产生约15~20 mm的径向偏移。经运动学分析发现,传统直角坐标型机械手因受限于三轴线性运动特性,难以有效适应此附加自由度[18]。为此,此处设计了具有非线性刚度特性的自复位弹簧机构,利用弹性形变在 Y-Z 平面补偿径向位移偏差,同时提供稳定的复位力:

$$F = k\Delta x + \varepsilon。 \tag{1}$$

式中:k 为刚度系数;ε 为非线性修正项。

在铁路车厢自动摘钩作业中,如图3所示,末端执行器夹爪中心与机器人 R 轴旋转中心的垂直距离为 J=285 mm。尽管上下作用式车钩均按标准化工艺制造,但在摘钩时仍需将车钩手柄旋转85°~90°以实现可靠解锁。

由于现场工况差异，车钩轴心的空间位姿可能存在以下两种工况：其一为车厢车钩的旋转轴心 O 点高于机器人 R 轴的旋转轴心；其二为车厢车钩的旋转轴心 O 点低于机器人 R 轴的旋转轴心。该两种情况需设计一套被动横向移动机构来补偿 R 轴旋转时其轴心的横向移动。

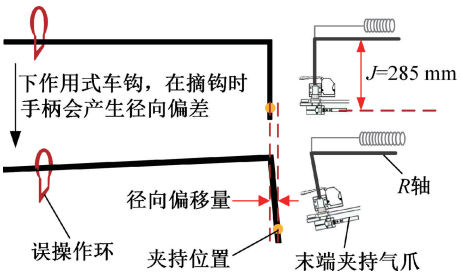

图 3　手柄产生径向偏差示意图

Figure 3　Schematic diagram radial deviation of the handle

图 4 为车钩轴心高于旋转轴心示意图。车厢车钩的旋转轴心 O 点高于机器人 R 轴的旋转轴心，差值为 x_a，经现场实测统计 $x_a \leqslant 50$ mm，现反转假设以 R 轴的轴心为原点进行旋转，车厢车钩的轴心发生偏移，当车厢车钩转动 90°时，机器人 R 轴轴心横向偏移最大，在极限位置时，可得到

$$\cos(180 - \theta_1) = x_1/J。\tag{2}$$

现场实测，$\theta_1 = 100.10°$ 可得车钩轴心横向偏移最大值 $x_1 = 49.22$ mm，即 R 轴至少需设计 49.22 mm 的被动机构来吸收该偏差。

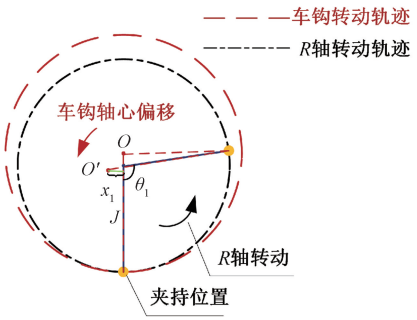

图 4　车钩轴心高于旋转轴心示意图

Figure 4　Schematic diagram of hook axis being higher than the axis of rotation

图 5 为车钩轴心低于旋转轴心示意图。如图 5 所示，车厢车钩的旋转轴心 O 点低于机器人 R 轴的旋转轴心，差值为 x_b，经现场实测统计 $x_b \leqslant 50$ mm，当车厢车钩转动 90°时，轴心横向偏移 x_2 最大，$x_2 = 50$ mm。

根据 $x_2 = 50$ mm 的极限偏移量，设置安全系数为 1.5～2.0，确定被动行程为 100 mm，故在机器人 X 轴上设计行程 100 mm 的被动移动机构来平衡提钩过程中机器人 R 轴轴心横向位移偏差。

1.4　正向运动学分析

运动学分析是机械臂结构优化以及运动控制的

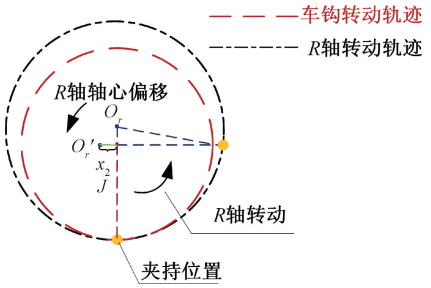

图 5　车钩轴心低于旋转轴心示意图

Figure 5　Schematic diagram of hook axis being lower than rotation axis

基础[19]，本文采用 D-H 方法对所设计机械臂进行运动学分析。由于在提钩工作时，X 轴固定，故可认为该机器人由 3 平移-2 旋转(3P2R)串联机构组成，包含 2P1R 的主动部分和 1P1R 的被动部分，因而采用 D-H 法建立机械臂的抽象连杆坐标系，如图 6 所示。基坐标系 $O_{0,1}$ 固定在 X 轴和 Z 轴连接处。

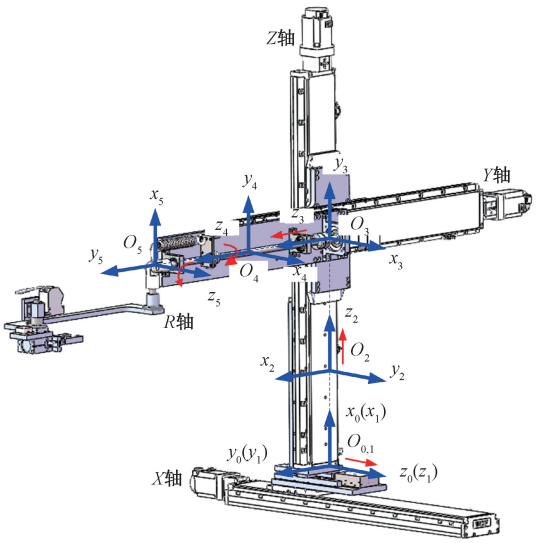

图 6　机器人连杆坐标系

Figure 6　Robot linkage coordinate system

根据 D-H 法中连杆参数的定义，可得摘钩机器人 D-H 参数如表 1 所示。其中，θ_i 为关节角，d_i 为连杆偏距，a_{i-1} 为连杆长度，α_{i-1} 为连杆扭转角[20]。关节 1 为被动移动机构的移动，关节 2 为 Z 轴的平移，关节 3 为 Y 轴的平移，关节 4 为 R 轴的旋转，关节 5 为被动旋转机构的转动。

表 1　摘钩机器人 D-H 参数

Table 1　Parameters of the hook lifting robot D-H

关节	θ_i/(°)	d_i/mm	a_{i-1}/mm	α_{i-1}/(°)	变量范围
1	0	d_1	0	90	0～800 mm
2	0	d_2	0	90	0～750 mm
3	0	d_3	0	90	0～800 mm
4	θ_4	0	0	0	−180°～180°
5	θ_5	0	0	90	−90°～90°

根据表 1 给出的杆件参数,关节 1,5 为被动关节,关节 2,3,4 为主动关节。${}^{i-1}_{i}\boldsymbol{T}$ 来表示坐标系 $\{i\}$ 相对于坐标系 $\{i-1\}$ 的变换,根据 D-H 法,相邻两个坐标系之间的齐次变换矩阵为

$$ {}^{i-1}_{i}\boldsymbol{T}=\begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i c\alpha_{i-1} & -s\theta_i s\alpha_{i-1} & \alpha_{i-1}c\theta_i \\ s\theta_i & c\theta_i c\alpha_{i-1} & -c\theta_i s\alpha_{i-1} & \alpha_{i-1}s\theta_i \\ 0 & s\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1} & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}。 \tag{3} $$

式中:$c\theta_i=\cos\theta_i$;$s\theta_i=\sin\theta_i$;$c\alpha_{i-1}=\cos\alpha_{i-1}$;$s\alpha_{i-1}=\sin\alpha_{i-1}$。

通过式(3)可得出机械臂末端相对于基座的齐次变换矩阵:

$$ \boldsymbol{T}={}^{0}_{1}\boldsymbol{T}\cdot{}^{1}_{2}\boldsymbol{T}\cdot{}^{2}_{3}\boldsymbol{T}\cdot{}^{3}_{4}\boldsymbol{T}\cdot{}^{4}_{5}\boldsymbol{T}= \begin{bmatrix} \cos(\theta_4+\theta_5) & 0 & \sin(\theta_4+\theta_5) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -d_2 \\ -\sin(\theta_4+\theta_5) & 0 & \cos(\theta_4+\theta_5) & d_1-d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}。 \tag{4} $$

其中末端位置 $\boldsymbol{P}$ 为

$$ \boldsymbol{P}(x_e,y_e,z_e)=\begin{bmatrix} 0 \\ -d_2 \\ d_1-d_3 \end{bmatrix}。 \tag{5} $$

末端坐标系相对基坐标系仅存在绕 Y 轴的旋转运动,该旋转关系由旋转矩阵 $\boldsymbol{R}$ 表示:

$$ \boldsymbol{R}=\begin{bmatrix} \cos\varphi & 0 & \sin\varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\varphi & 0 & \cos\varphi \end{bmatrix}。 \tag{6} $$

1.5 逆向运动学分析

设目标末端位姿:

$$ \boldsymbol{T}_e=\begin{bmatrix} \boldsymbol{R}_e & \boldsymbol{P}_e \\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{1} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & p_x^d \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & p_y^d \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & p_z^d \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}。 \tag{7} $$

已知被动关节 (d_1,θ_5),求主动关节 (d_2,d_3,θ_4)。将式(5)与式(7)比较可得

$$ \begin{cases} d_2=-p_y^d; \\ d_3=d_1-p_z^d。 \end{cases} \tag{8} $$

由于机构仅能实现绕 Y 轴合成角 $\varphi(\varphi=\theta_4+\theta_5)$ 的旋转[21],必须满足:

$$ \begin{cases} r_{12}=r_{21}=r_{23}=r_{32}=0; \\ r_{22}=1。 \end{cases} \tag{9} $$

从式(6)中旋转矩阵项对应关系:

$$ \begin{cases} r_{11}=\cos(\theta_4+\theta_5); \\ r_{13}=\sin(\theta_4+\theta_5)。 \end{cases} \tag{10} $$

可得

$$ \theta_4=\arctan 2(r_{13},r_{11})-\theta_5。 \tag{11} $$

即可求得机器人各关节变量 d_2、d_3、θ_4 的值:

$$ \begin{cases} d_2=-p_y^d; \\ d_3=d_1-p_z^d; \\ \theta_4=\arctan 2(r_{13},r_{11})-\theta_5。 \end{cases} \tag{12} $$

2 摘钩机器人控制系统设计

2.1 控制系统架构设计

摘钩机器人系统硬件架构采用模块化设计[22],包含运动执行单元、感知反馈单元及气驱控制单元。运动执行单元由四自由度机械臂搭载雷赛伺服电机组成,确保末端执行器的精确运动,实现高效的运动执行。控制系统硬件架构如图 7 所示。

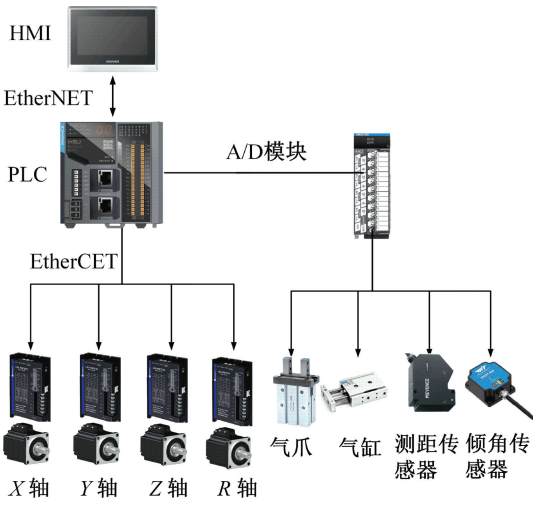

图 7 控制系统硬件架构

Figure 7 Control system hardware architecture

感知反馈单元包含多种传感器,使用基恩士 LJ-G080 线激光传感器进行高精度的表面轮廓测量,该传感器分辨率达到微米级别,采样频率满足动态测量需求。SINAT-485 倾角传感器用于实时监测物体的倾斜角度,其精度为 0.1°,并通过 RS-485 接口与数据采集系统通信。上述传感器可为系统提供精确的测量与控制依据,提升机器人定位精度与运行稳定性。在气驱控制单元中,夹取气爪作为末端执行器,主要用于执行夹持动作,确保车钩手柄的稳定抓取;气缸用于驱动 Z 轴的自动复位,保证系统在每次操作后能够快速恢复到初始状态,提高作业效率和精度。摘钩机器人控制系统软件架构如图 8 所示。

2.2 车钩测量原理

图 9 为车钩测量原理图。车钩手柄为 25 mm 的圆柱,使用激光传感器来测量车钩手柄的位置和

高度,如图 9 所示,该传感器主要基于激光三角测量原理[23],结合几何拟合算法实现。

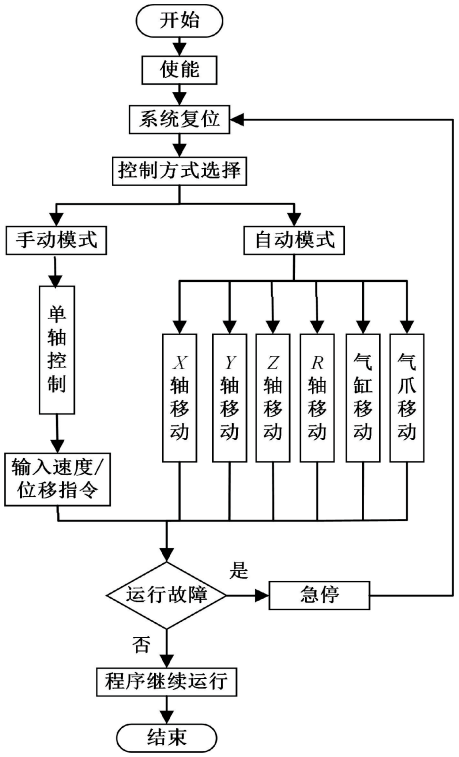

图 8　控制系统软件架构图

Figure 8　Control system software architecture diagram

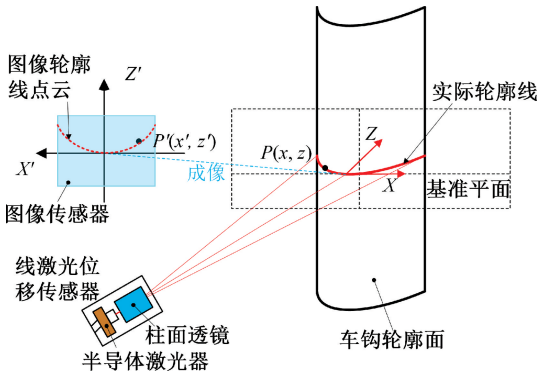

图 9　车钩轮廓测量原理图

Figure 9　Schematic diagram of coupler profile measurement

激光通过圆柱形透镜以水平线投射,漫反射到目标物体上。反射光聚焦在图像传感器上得到测量目标的轮廓线点云[24]。剖面数据由相对于传感器参考平面的离散二维 $P(x,z)$ 位置信息组成。

车钩手柄参数的拟合过程包括点云数据的采集和几何模型的拟合。首先,传感器通过扫描或使用线激光技术获取圆柱表面多个点的坐标数据。随后,利用最小二乘法等算法对这些点云数据进行拟合,生成圆柱模型,并根据该模型解算手柄的直径以及中心位置[25]。

设传感器测得圆柱表面 n 个点的坐标为(x_i,z_i),需拟合圆心(x_C,z_C)和半径 r。圆的方程为

$$(x_i - x_C)^2 + (z_i - z_C)^2 = r^2。\tag{13}$$

式中:$i=1,2,\cdots,n$。构造误差函数为

$$S = \sum_{k=0}^{n} [(x_i - x_C)^2 + (z_i - z_C)^2 - r^2]^2。\tag{14}$$

对 x_C,y_C,r 求偏导并令其为零,解得

$$\begin{cases} x_C = \dfrac{\sum (x_i^3 - x_i z_i^2)}{2\sum (x_i^2 + z_i^2)}; \\ z_C = \dfrac{\sum y_i}{n} = \dfrac{\sum (z_i^3 + z_i x_i^2)}{2\sum (x_i^2 + z_i^2)}; \\ r = \sqrt{\dfrac{\sum (x_i - x_C)^2 + (z_i - z_C)^2}{n}}。 \end{cases}\tag{15}$$

为了精确测量夹爪与车钩手柄之间的距离,选用了基恩士 LJ-G080 线激光传感器。其工作原理如图 10 所示。基恩士 LJ-G080 线激光传感器的参考距离为 80 mm,测量范围包括 X 轴(宽度)为 32 mm,Z 轴(高度)为±23 mm。

在实际测量中,传感器首先测量 X 轴零点到车钩手柄外轮廓中线的最大距离位置 x_{max},以及 Z 轴零点到车钩手柄外轮廓的最大高度位置 z_{max}。如图 10 所示,$P_g(x_g,z_g)$ 表示夹爪与车钩手柄之间的位置。由于传感器与夹爪为机械固定并且位于同一竖直位置,因此可以得出 $x_g = x_{max}$,$z_g = 80 - z_{max}$。

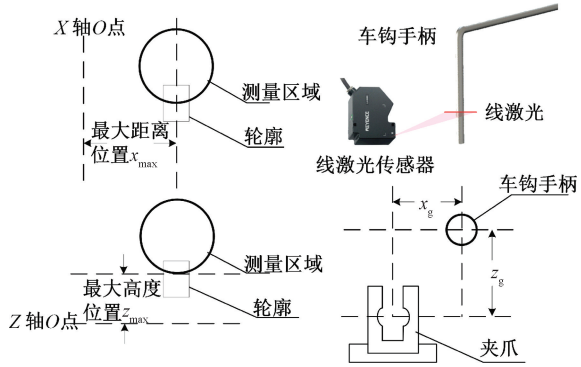

图 10　传感器测量车钩手柄原理图

Figure 10　Principle diagram of sensor-based measurement for the coupler handle

2.3　激光位移传感器车钩手柄识别算法

为了实现车钩手柄的精确抓取,控制系统采用了基于激光位移传感器的车钩手柄识别算法。该算法通过动态调整激光传感器的位置[26],确保车钩手柄始终处于传感器的有效测量范围内,从而实现高精度的识别。该算法通过实时获取传感器位置变化,能够适应不同的工作环境和车钩姿态,进一步提高识别精度。该算法的伪代码如下。

算法 1 激光位移传感器车钩手柄识别算法。

输入:传感器 X 轴测量数据 $x \in (-16,16)$、传感器 Z 轴测量数据 $z \in (-23,23)$、传感器点云数据 $D=\{(x_1,z_1),(x_2,z_2),\cdots(x_n,z_n)\}$;

输出:夹爪距离车钩手柄的位置 $\boldsymbol{P}_g(x_g,z_g)$。

① 将传感器移动至车钩待测位置 $\boldsymbol{P}=(a_0,b_0)$;

② 获取传感器的点云信息 D;

③ 在 D 中提取手柄最大高度位置 x_{max}(见图 10);

④ if $x_{max} \in X$, 执行位置识别;

⑤ else

⑥ 将 a_0 左移 25 mm;

⑦ 获取新的传感器点云数据 D';

⑧ 在 D'中重新提取最大高度位置 x'_{max};

⑨ if $x'_{max} \in X$, 执行位置识别;

⑩ else

⑪ 将 a_0 右移 50 mm;

⑫ 获取新的传感器点云数据 D'';

⑬ 在 D''中重新提取最大高度位置 x''_{max};

⑭ if $x''_{max} \in X$, 执行位置识别;

⑮ else

报警:无法找到合适位置;

⑯ 使用最小二乘法拟合圆柱模型,最小化误差 S;

⑰ $S=\sum[(x_i-x_C)^2+(z_i-z_C)^2-r^2]^2$;

⑱ 计算误差函数的偏导数并求解最优解:

$\partial S/\partial(x_C,z_C,r)=0$;

⑲ 拟合出圆心 (x_C,z_C) 和半径 r;

⑳ 根据位置识别得到(x_{max},z_{max}),可得出 $P_g(x_g,z_g)$。

通过该算法,系统能够准确获取末端夹爪与车钩手柄之间的位置信息 $P_g(x_g,z_g)$,实现手柄的精确夹取,从而顺利完成后续的摘钩任务。

3 实验结果与分析

3.1 实验设备

为验证摘钩机器人实地摘钩效果,以及解决动态工况下摘钩机器人轨迹适应性不足的问题,故搭建摘钩机器人物理样机,并在中铝(郑州)铝业有限公司某车间进行中试调试,试验场地与敞车解列的情况基本相同。

摘钩机器人参数如表 2 所示。该机器人的控制系统采用汇川 Easy521-PLC 作为核心控制单元,通过 EtherCAT 总线与雷赛 L7N 交流伺服驱动器及 ACM2H-0808T 伺服电机进行通信与控制,实现机器人运动执行。电机经减速器输出后的最大扭矩为 142.2 N·m,满足翻车机摘钩作业所需的驱动力。PLC 配置了 4AD 模拟量输入模块,用于采集激光位移传感器信号,完成车钩位置数据的采集。

表 2 摘钩机器人参数

Table 2 Hook removal robot parameters

参数	取值
整机质量/kg	600
功率/kW	3
摘低钩时间/s	30
摘高钩时间/s	25
能承受的最大摘钩力矩/(N·m)	142.2
末端气爪的旋转线速度/(m·s^{-1})	1.047
主动行程(X 轴)/mm	0~800
主动行程(Y 轴)/mm	0~750
主动行程(Z 轴)/mm	0~800
主动行程(R 轴)/rad	$-\pi$~π
被动行程(移动)/mm	100
被动行程(转动)/rad	$-\pi/2$~$\pi/2$

PLC 程序使用 AutoShopV4.10.0.0 编写,主要采用梯形图和功能块实现逻辑与运动控制。伺服驱动器作为 EtherCAT 从站与主站(PLC)进行数据交互,保证执行动作的准确性。触摸屏界面使用 InoTouchPad 开发,通过 EtherNET 与 PLC 连接,提供设备状态监控、参数调整及故障报警功能。

试验车厢为 C60 车厢和 C70 车厢,其中,C60 车厢是上作用式车厢(即高钩),如图 11 所示;C70 车厢是下作用式车厢(即低钩),如图 12 所示。中试调试设备及实验对象如图 11 所示。其中,D_i 为车钩手柄到车厢侧面的水平距离,L_i 为车钩旋转轴心到地面的垂直距离。经实际测量:$D_1=70$ mm,$L_1=990$ mm,$D_2=88$ mm,$L_1=480$ mm。

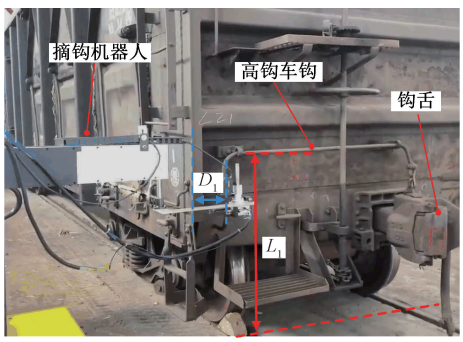

图 11 摘高钩调试图

Figure 11 Diagram of extract high hook debugging

3.2 实验结果与分析

在火电厂车厢解列时,传统做法是人工摘钩后由牵车机牵引车厢,若车钩舌打开且车厢顺利牵走,则判定摘钩成功。但在中试调试阶段,因牵车机调度不便,试验改为让摘钩机器人完成摘钩动作后,由人工直接检查车钩舌的开合情况,以判断摘钩是否成功。

在中试调试过程中,分别对高钩和低钩车厢进

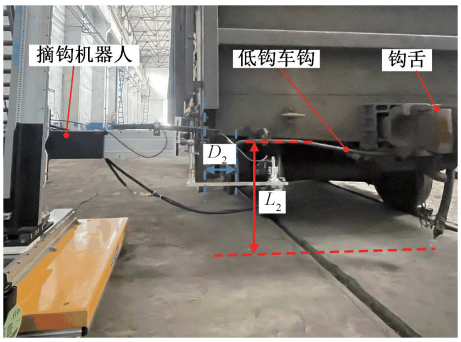

图 12　摘低钩调试图

Figure 12　Diagram of extract low hook debugging

行了 50 次及以上的模拟试验,成功率达到 100%。考虑到实际工作环境中的翻车机作业时间、牵引机作业时间以及空运行时间,摘钩机器人需要在 60 s 内完成摘钩任务,以满足生产要求。实验结果显示,摘高钩的平均用时为 25 s,而摘低钩的平均用时为 30 s。同时,触摸屏与 PLC 系统实现了实时连接,用于监控各轴的扭矩值,并记录相应的数据。对各组数据进行了处理,计算得出了均值和标准差,并绘制了误差带图,结果如图 13 和图 14 所示。

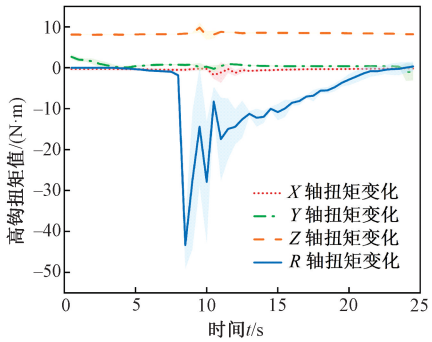

图 13　高钩各轴扭矩变化

Figure 13　Variation of torque of each axis of high hook

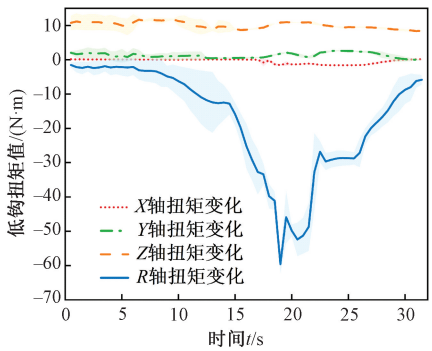

图 14　低钩各轴扭矩变化

Figure 14　Variation of moments in each axis of low hook

在摘钩作业过程中,各运动关节的实测最大扭矩值如表 3 所示。

理论计算表明,所匹配的伺服电机-减速器系统的额定最大扭矩为 142.2 N·m。经动态载荷测试,机器人各轴最大实测扭矩为 62.1 N·m(仅占系统承载极限的 43.7%),验证了驱动单元选型具有充分的安全裕度。

表 3　摘钩机器人运行时的各轴最大扭矩值

Table 3　Maximum torque values for each axis during operation of the hook lifting robot　N·m

最大扭矩值	低钩力矩				高钩力矩			
	X 轴	*Y* 轴	*Z* 轴	*R* 轴	*X* 轴	*Y* 轴	*Z* 轴	*R* 轴
C	6.9	3.6	12.8	62.1	4.1	3.6	10.6	47.5

针对摘钩机器人在动态工况下轨迹适应性不足的问题,所设计的主-被动混合控制结构经扭矩分析验证:在保证路径精度的前提下,各轴无过载或卡滞,能够有效吸收动态误差并自适应调整轨迹。

4　结论

(1)为解决火电厂铁路敞车卸煤过程中人工摘钩环境恶劣、强度大且存在安全隐患的问题,设计并实现了一种主-被动混合控制的翻车机摘钩机器人。该系统将多自由度机械臂与轨迹自适应机构相结合,实现了车钩解列的全自动智能化操作。

(2)在中试试验中,分别对高钩和低钩车厢各开展 50 次以上模拟试验,摘钩成功率均达 100%,高钩平均用时 25 s,低钩平均用时 30 s。实测各关节最大瞬时扭矩为 62.1 N·m(占系统承载极限的 43.7%),在保证路径精度的前提下无过载或卡滞,能有效吸收动态误差并自适应调整运动轨迹。

该机器人具备显著的铁路运输应用潜力:面对不断扩大的运输规模,其多车型适应性可大幅提升作业效率与安全性;所提主-被动混合控制架构为运输装备的智能化升级提供了核心技术支撑。未来可通过算法优化与结构改进,增强系统的智能协同能力,加速铁路运输智能化生态的构建。

参考文献:

[1]　中能传媒研究院. 中国能源大数据报告 [EB/OL]. (2023-06-20)[2025-12-20]. https://news.bjx.com.cn/html/20230620/1313822.shtml.

[2]　Sun Wenqiao, Ye Fei, Xin Shuli. Connotations and paths of intelligent transformation of railway marshalling stations [J]. Railway Transport and Economy, 2023, 45(8): 75-80. [孙文桥, 叶飞, 辛姝丽. 铁路编组站智能化转型发展内涵及路径探讨[J]. 铁道运输与经济, 2023, 45(8): 75-80.]

[3]　Zhang Yuanbo. Design of railway automatic unhook robot and visual inspection of couplers[D]. Shenyang: Shen-

yang University of Technology, 2020. [张渊博. 铁路自动摘钩机器人设计及车钩视觉检测[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2020.]

[4] Nold M, Corman F. Dynamic train unit coupling and decoupling at cruising speed: systematic classification, operational potentials, and research agenda[J]. Journal of Rail Transport Planning & Management, 2021, 18: 100241.

[5] Xu Weimin. Research on the technique of railway release-coupler robot[J]. Journal of the China Railway Society, 1992, 14(1): 32-37. [徐维民. 铁路提钩机器人技术的研究[J]. 铁道学报, 1992, 14(1): 32-37.]

[6] Feng Yu. Research on automatic train disassemble system of hump marshalling station[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2020. [冯宇. 驼峰编组站列车自动分解系统研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2020.]

[7] Li Jidong. Key technologies research on automatic uncoupling system of hump pushing[D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2022. [李继东. 驼峰推峰自动摘钩系统关键技术研究[D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2022.]

[8] Sun Cheng. The visual tracking and control for a train uncoupling robot[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2018. [孙程. 火车摘钩机器人的视觉跟踪及控制[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2018.]

[9] Guo Renjie. System design and key technology research of train uncoupling robot [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2023. [郭仁杰. 火车摘钩机器人系统设计与关键技术研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2023.]

[10] Laroca R, Boslooper A C, Menotti D. Automatic counting and identification of train wagons based on computer vision and deep learning[PP/OL]. V1. arXiv (2020-10-30) [2025-12-20]. https://doi.org/10.48550/arXiv.2010.16307.

[11] Wu Jinhui, Tao Yourui. Review on research status of positioning accuracy reliability of industrial robots[J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31(18): 2180-2188. [吴锦辉, 陶友瑞. 工业机器人定位精度可靠性研究现状综述[J]. 中国机械工程, 2020, 31(18): 2180-2188.]

[12] Cao Wenwei. Research on the application of automatic unhooking manipulator for railway train marshalling hump station based on ROS[D]. Shenyang: Northeastern University, 2021. [曹文伟. 基于ROS的铁路列车编组驼峰工位自动摘钩机器人应用研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2021.]

[13] Luan Dejie, Feng Jun, Yang Huachang, et al. Path planning algorithm for automatic hump uncoupling robot based on improved RRT[J]. Railway Transport and Economy, 2023, 45(1): 30-38. [栾德杰, 冯军, 杨华昌, 等. 基于改进RRT的驼峰自动摘钩机器人路径规划算法[J]. 铁道运输与经济, 2023, 45(1): 30-38.]

[14] Liu Zhiquan, Wei Leilei, Ni Wenbo, et al. Design and experiment of train uncoupling robot[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2024, 52(21): 14-19. [刘治权, 韦蕾蕾, 倪文波, 等. 列车摘钩机器人的设计与试验[J]. 机床与液压, 2024, 52(21): 14-19.]

[15] Yuan Quan, Ma Dong, Liang Jianquan. Scheme design and device research on automatic decoupling of railway freight cars[J]. China Plant Engineering, 2023(19): 131-133. [袁泉, 马冬, 梁建全. 铁路货车自动脱钩方案设计及装置研究[J]. 中国设备工程, 2023(19): 131-133.]

[16] Jiang Yuanhua, Shao Zezhan, Xu Zhanying, et al. General framework design and key technologies of intelligent marshalling station[J]. China Railway, 2024(11): 118-127. [蒋元华, 邵泽展, 许展瑛, 等. 智能编组站总体框架设计及关键技术[J]. 中国铁路, 2024(11): 118-127.]

[17] Liu Lei, Wang Ye, Tian Changhe, et al. Train connection handle recognition method based on YOLOv5 and its application in automatic unhook machine[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(4): 1563-1572. [刘雷, 王野, 田长河, 等. 基于YOLOv5的火车连接手柄识别方法及在自动摘钩机器的应用[J]. 科学技术与工程, 2025, 25(4): 1563-1572.]

[18] Liao Zixuan, Wu Jianhua, Zhou Tieliang, et al. Compliance control in automatic uncoupling robot system[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(18): 7838-7843. [廖梓轩, 吴建华, 周铁梁, 等. 机器人自动摘钩系统中柔顺控制方法研究[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(18): 7838-7843.]

[19] Tu Qing, Liu Qingyou, Ren Tao, et al. Obstacle crossing and traction performance of active and passive screw pipeline robots[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2019, 33(5): 2417-2427.

[20] Yan Daliang. Research on dynamic parameter identification and trajectory tracking control of heavy-duty robot [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2021. [严大亮. 重载机器人动力学参数辨识与轨迹跟踪控制研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2021.]

[21] Peng Jinzhu, Zhang Jianxin, Zeng Qingshan. Inverse kinematic parameters calibration of 3-RPS parallel robot based on modified differential evolution[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2022, 43(5): 1-7. [彭金柱, 张建新, 曾庆山. 基于改进差分进化的3-RPS机器人逆运动学参数标定[J]. 郑州大学学报(工学版), 2022, 43(5): 1-7.]

[22] Yang Sibo, Luo Lincong , Law W C, et al. Design and evaluation of a compact 3D end-effector assistive robot for

adaptive arm support[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2024, 40(3): 123-135.

[23] Yuan Peixin, Cai Da, Cao Wenwei, et al. Train target recognition and ranging technology based on binocular stereoscopic vision[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2022, 43(3): 335-343. [原培新, 蔡炟, 曹文伟, 等. 基于双目立体视觉的列车目标识别和测距技术[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2022, 43(3): 335-343.]

[24] Zhao Hongnan, Jiang Wensong, Yang Li, et al. Correction method for edge deviation of line laser sensor[J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51(4): 324-330. [赵洪楠, 江文松, 杨力, 等. 线激光传感器的边缘偏差修正方法[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(4): 324-330.]

[25] Luo Fuwen, Wang Xuemei, Ni Wenbo, et al. Visual detection system of uncoupling manipulator in hump marshalling yards[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2025, 22(9): 4145-4159. [罗涪文, 王雪梅, 倪文波, 等. 驼峰编组站摘钩机械臂视觉检测系统研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2025, 22(9): 4145-4159.]

[26] Cao Jinqi, Han Xuesong. Review of research methods for industrial robot trajectory planning[J]. Information and Control, 2024, 53(4): 471-486. [曹锦旗, 韩雪松. 工业机器人轨迹规划的研究方法综述[J]. 信息与控制, 2024, 53(4): 471-486.]

Design of a Hybrid Active-Passive Control Robotic System for Coupler Unhooking in Thermal Power Plant Wagon Tippers

QIU Yi, GUO Liubing, LIANG Jie

(School of Mechanical and Power Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: To address the issues of harsh environmental conditions, high labor intensity, and safety risks in manual hook removal operations in thermal power plant tipper unloading systems, in this study a tipping machine hook removal robot with a hybrid active-passive control configuration was proposed. Firstly, the mechanical structure of the robot was designed, with three active moving joints, one active rotating joint, one passive moving joint, and one passive rotating joint. The movement adaptability of the passive structure was analyzed using a graphical method, and the forward and inverse kinematic models of the entire system were established using the D-H method, providing a theoretical foundation for motion control. In terms of the control system, a hardware architecture was designed, and a hook handle recognition algorithm was proposed, based on measurement data from a linear laser displacement sensor. This algorithm was used to obtain the position information $P_g(x_g, z_g)$ between the end effector and the hook handle, enabling precise positioning and gripping of the hook handle. A pilot test was conducted to verify the effectiveness of the proposed solution. The results showed that out of 50 hook removal operations, the robot achieved a 100% success rate, with all joint torques within the rated limits. The average time for high-position hook removal was 25 seconds, and 30 seconds for low-position hooks, both meeting the production requirements. The maximum instantaneous torque at each joint was 62.1 N·m, only 43.7% of the system′s limit, demonstrating sufficient safety margin. The experimental results reflected the robot′s adaptive ability to handle trajectory uncertainties of hooks, allowing it to accommodate deviations in the path of different models or variations of the same model. Furthermore, the precision of the proposed recognition algorithm was validated.

Keywords: hook-unloading robot; active-passive hybrid configuration; D-H method; line laser