文章编号:1671-4598(2026)01-0142-08　DOI:10.16526/j.cnki.11-4762/tp.2026.01.018　中图分类号:TP242.3　文献标识码:A

货物列车摘钩机器人系统设计与实现

韦蕾蕾，王雪梅，倪文波，罗浩文
（西南交通大学 机械工程学院，成都　610031）

摘要： 货物列车在编组站解编时的摘钩作业目前主要由人工完成，存在劳动强度大、危险性高等问题，为此设计了一套摘钩机器人系统以实现自动摘钩；根据摘钩作业的任务需求，确定了摘钩机器人系统的总体设计方案，并对控制系统进行了选型；基于 D-H 参数法建立了机器人的运动学模型，并根据作业空间约束条件，规划了摘钩路径；为避免机器人摘钩过程中，因末端手爪抓握不稳定导致的摘钩失败，设计了基于专家 PID 控制算法的抓握力反馈控制系统；最后在实验室开展了摘钩机器人的自动摘钩试验，试验结果表明：所设计的摘钩机器人系统能够实现稳定、快速地摘钩控制，平均用时约 12.23 s，为编组站摘钩自动化作业提供了一种有效的解决方案。

关键词： 编组站；货物列车；摘钩机器人；系统设计；抓握力控制

Design and Implementation of Uncoupling Robot System for Freight Trains

WEI Leilei，WANG Xuemei，NI Wenbo，LUO Fuwen
(School of Mechanical Engineering，Southwest Jiaotong University，Chengdu　610031，China)

Abstract：Currently，the uncoupling operation of freight trains at marshalling stations is mainly completed manually，which has the characteristics of high labor intensity and high danger. Therefore，an uncoupling robot system was designed to achieve automatic uncoupling operation. Based on its task requirements，the overall design scheme of the uncoupling robot system was determined，and the control system was selected and designed. Based on the D-H parameter method，a kinematic model of the robot was established，and the uncoupling path was planned according to the workspace constraints. To avoid uncoupling failure caused by the unstable grip of the end effector during the robot's uncoupling process，a grip force feedback control system based on an expert-PID control algorithm was designed. Finally，an automatic uncoupling test was conducted in the laboratory. The test results show that the designed uncoupling robot system can achieve stable and fast uncoupling control，with an average time of about 12.23 s，providing an effective solution for automatic uncoupling operation at marshalling stations.

Keywords：marshalling station；freight train；uncoupling robot；system design；grip force control

0　引言

货物列车通过车钩实现车辆之间的连挂和牵引力的传递。我国铁路车辆采用的车钩在两车互相碰撞时就能自动完成连挂动作[1]，但需要解体列车时车钩却不能自行解开，仍需要人工进行摘钩以完成列车解体。编组站是铁路网上办理货物列车解体、编组作业的车站，通常设在铁路干线的交汇点，是铁路货物运输的枢纽，对提高铁路网运输效率起着关键作用[2]。目前解编作业中摘钩操作尚未实现自动化[3]，在室外环境进行的人工摘钩作业，工况复杂、劳动强度大、容易发生安全事故。若出现恶劣天气，会使摘钩难度和危险性增加，操作人员误摘或漏摘的情况时有发生。因此，设计一种摘钩机器人系统实现列车解体作业时的自动摘钩，避免误摘、漏摘和安全事故的发生，对改善劳动条件和保障作业安全，以及提高编组站的解编效率都具有十分积极的作用和意义。

虽然自 20 世纪 70 年代起，国内外学者就开始研究自动摘钩相关技术，但受当时的科技发展水平的限制，实际应用情况并不理想[4-6]。基于机器人的自动摘钩技术是目前的主流发展方向，其中，机器人自动摘钩过程中与车辆之间的移动共速方式、抓握目标的检测定位、

收稿日期：2025-01-03；　**修回日期：**2025-02-19。
基金项目：四川省国际科技创新合作项目(2022YFH0038)。
作者简介：韦蕾蕾(1996-)，男，硕士。
通讯作者：王雪梅(1968-)，女，博士，副教授。
引用格式：韦蕾蕾，王雪梅，倪文波，等.货物列车摘钩机器人系统设计与实现[J].计算机测量与控制，2026，34(1)：142-149.

以及摘钩控制是需要解决的重要关键问题。在摘钩机器人的移动方式上，主要有车轮式和轨道式。文献［7］所设计的自动摘钩机器人采用车轮式的移动方式，将机器人安装在四轮移动平台上，平台可以全向自由移动，但该方式对地形要求较高，难以适应不平坦地面。文献［8］采用轨道引导摘钩机器人移动，铺设了与车辆轨道平行的机器人专用运动导轨，在该方式下机器人运动稳定，便于维护，对场地改造小。在共速方式上，主要有测速调速和挂靠跟随两种方式。文献［9］提出采用测速雷达检测车速，然后实时控制机器人移动以实现与车辆共速，但共速控制的要求增加了控制系统的复杂度，如果速度控制不好，会极大降低摘钩控制的可靠性。文献［10］所设计的摘钩机器人则采用电磁铁手部吸附车体，使整个机器人挂靠在车辆上以实现共速同步运动。该法无需传感器测速和调速控制，实现简单且稳定可靠。在目标检测问题上，早期主要采用单目相机配合结构光[11]或激光雷达[12]等传感器对目标进行检测定位。但不同传感器的采样频率和时间延迟不同，会导致数据无法精确同步从而影响融合算法精度，难以准确确定提钩杆手柄形状和三维位置坐标。随着双目立体视觉技术和深度学习等人工智能技术的发展，为抓取目标的检测识别和精确定位提供了新的技术支持。文献［13］利用模板匹配算法识别提钩杆手柄位置，再通过双目立体视觉原理测量手柄与相机之间的距离，为机器人摘钩提供了目标位置信息。模板匹配算法实现简单，但容易受到目标几何特征变化和光照条件的影响，货物车辆的脚蹬和提钩杆由于长期使用，存在形状和位置的改变，使用模板匹配算法进行检测极易导致误检或漏检。文献［14］使用改进的 YOLO v2 算法对提钩杆进行识别，识别精确度达到 92.6%。可见使用 YOLO 等深度学习算法来检测脚蹬和提钩杆具有更高的准确性。在摘钩控制上，为了解决因提钩杆变形所导致的摘钩失败问题，文献［15］提出了基于导纳的柔顺控制方法，但其只针对翻车机卸货前的摘钩动作进行分析，此时的车辆处于静止状态，而编组站摘钩作业时车辆处于运动状态，车辆振动等因素导致摘钩负载力发生变化，如果抓握力控制不当，极易使摘钩过程中出现抓取目标脱落现象。

综上所述，为了满足我国货物列车运输发展对自动摘钩机器人应用的需求，针对目前摘钩机器人研制中存在的不足，本文拟采用单导轨引导移动的轨旁式布置方式，设计一双机械臂协同工作的摘钩机器人系统，通过控制其中的共速臂挂靠车辆，在机器人系统与车辆共速状态下实施摘钩控制，可更好保证抓握控制的可靠性和准确性；同时利用先进的主动式视觉技术和深度学习技术实现抓握目标的精准识别和定位，可极大减少漏检和误检的概率。本文将首先介绍整个摘钩机器人系统的总体架构和设计选型，然后建立摘钩机器人运动学模型并对机器人的摘钩运动路径和轨迹进行规划，以保证摘钩操作在有限的时间内完成，满足编组站实际作业的需求。最后，通过试验来验证所设计和建立的机器人系统的性能，不仅能实时有效地实现自动摘钩操作，还能在负载力出现扰动时，通过反馈控制实现稳定的抓握力控制，保证摘钩操作的稳定性和可靠性。

1　摘钩机器人系统总体设计

整个系统由机械本体、视觉检测子系统和摘钩控制系统构成。机械本体部分是基础，视觉检测子系统用于检测摘钩目标并对之定位，摘钩控制系统负责控制机器人运动完成摘钩动作。摘钩机器人系统总体结构原理框图如图 1 所示。

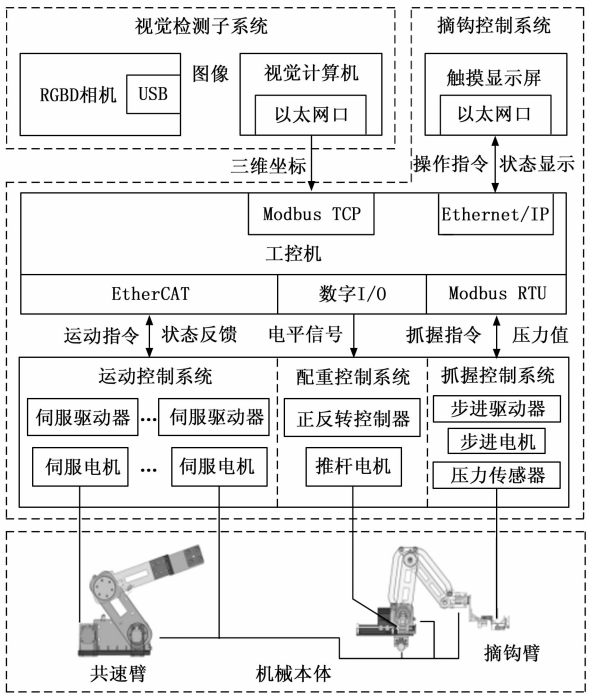

图 1　摘钩机器人系统总体结构原理框图

1.1　摘钩机器人机械本体设计

考虑到我国铁路编组站驼峰平台地面空间较小，因此机器人整体布局和结构设计应充分节省空间。本文设计了采用单导轨引导移动的轨旁式双臂摘钩机器人，摘钩机器人结构布置如图 2 所示。机器人布置在车辆与轨道侧面，其导轨与车辆轨道平行，减小了对地面空间的占用。机器人安装在行走机构上，行走机构可在导轨上移动。机器人采用双臂结构，由共速臂和摘钩臂组成，其中共速臂负责挂靠车辆脚蹬使机器人整体与车辆共速，摘钩臂负责抓握提钩杆以完成摘钩动作。

当列车推峰摘钩时，通过视觉检测子系统检测车辆脚蹬和提钩杆手柄位置，分别作为共速臂的挂靠目标和摘钩臂的摘钩目标。首先控制共速臂挂靠车辆，由车辆

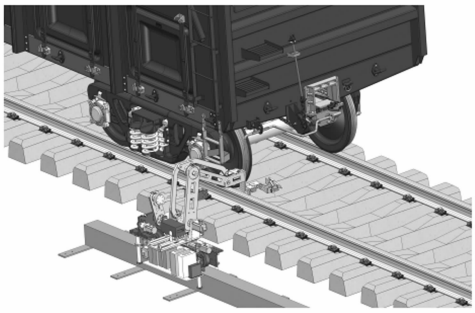

图 2 摘钩机器人结构布置

带动机器人在导轨上移动，使机器人与车辆处于共速状态，然后控制摘钩臂进行摘钩动作。通过双臂配合的方式不仅简化了摘钩控制，而且可以提高摘钩准确率。为顺利完成摘钩动作，机器人摘钩臂至少需要 4 个自由度，其中 3 个平动自由度确保机器人末端手爪能够运动到摘钩点，并将提钩杆从防跳脱槽孔提起一定高度，再通过一个旋转自由度将提钩杆手柄旋转一定角度完成解钩。共速臂只需两个自由度便可实现挂靠车辆。

因摘钩力大约为 30～200 N[16]，所以要求摘钩臂负载能力至少大于 20 kg。根据抓握目标和机器人末端手爪的尺寸（提钩杆手柄直径 25 mm，手爪开口宽度 50 mm），若要准确完成抓握，则对机器人的定位精度要求为±12.5 mm，重复定位精度要求为±0.1 mm。摘钩机器人的主要性能指标如表 1 所示。

表 1 摘钩机器人的主要性能指标

指标	参数
自由度	共速臂:2,摘钩臂:4
负载能力	＞20 kg
定位精度	±12.5 mm
重复定位精度	±0.1 mm
适用车钩类型	上作用式、下作用式

1.2 视觉检测子系统

采用基于机器视觉的提钩杆目标检测方案，检测系统主要由 RGBD 相机和视觉计算机组成，功能结构如图 3 所示。RGBD 相机安装在机器人底座上实时获取图像，通过深度学习算法（YOLO v11）检测识别出待解钩车辆脚蹬和提钩杆手柄位置，并将其三维坐标位置发送给工控机，为控制机器人进行摘钩操作提供必要的目标位置信息。

1.3 摘钩机器人控制系统

货物列车上提钩杆手柄的几何尺寸较小，若机器人要准确运动到目标位置摘钩，则要求各关节具有较高的运动精度，因此机器人采用伺服电机配合谐波减速器和行星减速器作为关节驱动，借助伺服电机的编码反馈功能和减速器的精确传动比，保证机器人的运动定位精

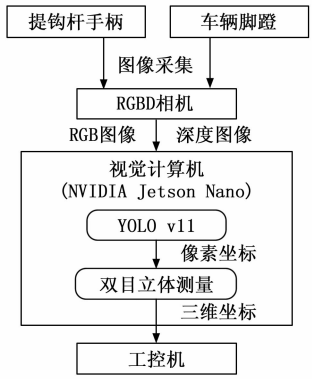

图 3 视觉检测子系统功能结构图

度。考虑到机器人控制对实时性要求较高，本控制系统采用基于 PC＋EtherCAT 总线的架构。以工控机作为主控制器，选用 CODESYS 作为软件开发平台，使用触摸显示屏作为人机交互界面。EtherCAT 现场总线具有高实时性的特点，以其为纽带构建了总线型拓扑结构的控制系统，把整个机器人系统的 7 个伺服电机连接起来以实现对机器人的实时控制。设计了 U 型手爪作为末端执行器以抓握提钩杆，由步进电机驱动推杆实现手爪开合控制，同时在推杆上安装压力传感器检测实际抓握力的大小以实现力反馈控制。

1.4 摘钩机器人系统流程

摘钩机器人系统流程如图 4 所示，其中运动规划子流程首先进行坐标系变换，将目标在相机坐标系下的坐标转换到机器人基坐标系下，然后按照 2.4 节规划的路径进行直线和圆弧插补，得到一条连续的路径，最后经过逆运动学变换得到各关节运动所需的位移量。通过对

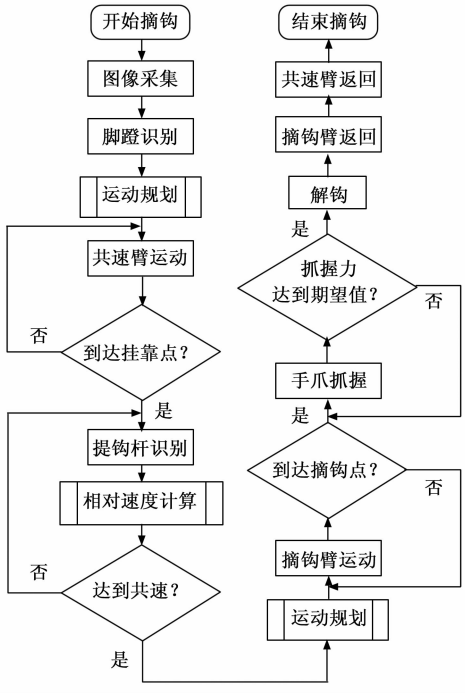

图 4 摘钩机器人系统流程图

视觉检测子系统识别的提钩杆位置坐标进行一阶求导，可得到机器人相对于车辆的运动速度，若计算的相对速度减小到±5 mm/s 之内，且机器人与车辆共同运动时间超过 3 s，则认为两者达到共速状态，可进行后续摘钩动作。

2　机器人运动学分析与摘钩规划

2.1　运动学模型建立

为进行摘钩机器人运动规划和控制，首先需要建立其运动学模型。摘钩机器人的共速臂为二自由度机械臂，其结构和控制相对简单，本文仅对摘钩臂（如图 5（a）所示）进行运动学建模，摘钩臂运动学模型如图 5 所示。采用 D-H 参数法[17]建立的摘钩臂连杆坐标系如图 5（b）所示，由此获得摘钩臂的 D-H 参数如表 2 所示。

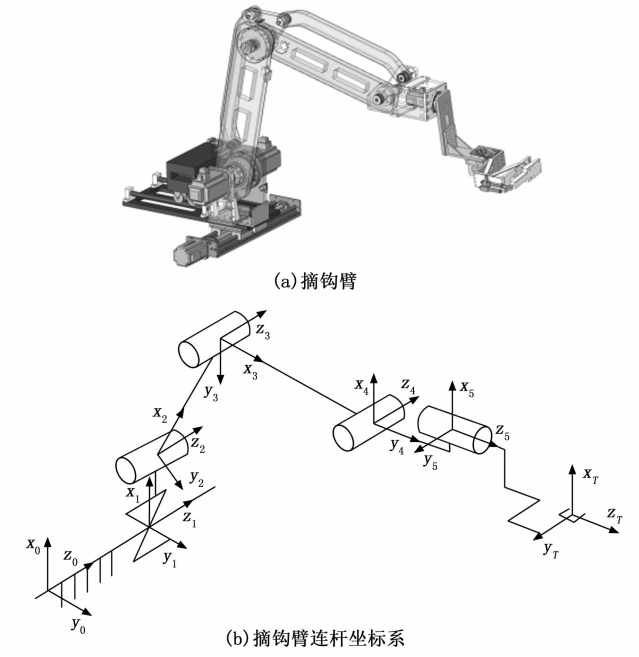

图 5　摘钩臂运动学模型

表 2　摘钩臂的 D-H 参数

关节 i	a_{i-1}/mm	α_{i-1}/(°)	d_i/mm	θ_i/(°)	关节类型
1	0	0	d_1	0	移动
2	246.66	0	20	θ_2	旋转
3	600	0	0	θ_3	旋转
4	600	0	51	θ_4	旋转
5	10	−90	242	θ_5	旋转

注：表中 a_{i-1} 为连杆长度，表示沿 x_{i-1} 轴，从 z_{i-1} 移动到 z_i 的距离；α_{i-1} 为连杆扭转角，表示绕 x_{i-1} 轴，从 z_{i-1} 旋转到 z_i 的角度；d_i 为连杆偏距，表示沿 z_i 轴，从 x_{i-1} 移动到 x_i 的距离；θ_i 为关节转角，表示绕 z_i 轴，从 x_{i-1} 旋转到 x_i 的角度。

其中关节 4 为从动关节，因摘钩臂上的平行四边形连杆作用，其运动状态由关节 2 和 3 共同决定：

$$\theta_4 = -(\theta_2 + \theta_3 + \gamma) \tag{1}$$

其中：γ 为坐标轴 x_1 与竖直平面的夹角。

2.2　正运动学分析

机器人正运动学分析是指在已知所有关节位置和连杆几何参数时，确定机器人末端工具相对于基坐标系的位置和姿态。

根据上文所建立的 D-H 模型，机器人相邻连杆坐标系 $\{i-1\}$ 和 $\{i\}$ 之间的齐次变换矩阵为：

$$ {}^{i-1}_{i}\boldsymbol{T} = \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i & 0 & a_{i-1} \\ s\theta_i c\alpha_{i-1} & c\theta_i c\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1} d_i \\ s\theta_i s\alpha_{i-1} & c\theta_i s\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1} d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{2}$$

其中：c 表示 cos，s 表示 sin。摘钩臂第 5 关节坐标系在基坐标系下的位姿可表示为：

$$ {}^{0}_{5}\boldsymbol{T} = {}^{0}_{1}\boldsymbol{T}\,{}^{1}_{2}\boldsymbol{T}\,{}^{2}_{3}\boldsymbol{T}\,{}^{3}_{4}\boldsymbol{T}\,{}^{4}_{5}\boldsymbol{T} \tag{3}$$

若假设摘钩臂末端手爪工具中心点在第 5 关节坐标系 $\{5\}$ 中的坐标为 $[x_t, y_t, z_t]^T$，由于末端手爪坐标系 $\{T\}$ 相对于坐标系 $\{5\}$ 的位姿固定，所以末端手爪在基坐标系下的位姿可表示为：

$$ {}^{0}_{T}\boldsymbol{T} = {}^{0}_{5}\boldsymbol{T} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x_t \\ 0 & 1 & 0 & y_t \\ 0 & 0 & 1 & z_t \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{4}$$

令 $\theta_{23} = \theta_2 + \theta_3$，则式（4）中：

$$\begin{cases} n_x = \cos\gamma\cos\theta_5, n_y = \sin\gamma\cos\theta_5 \\ n_z = -\sin\theta_5, o_x = -\cos\gamma\sin\theta_5 \\ o_y = -\sin\gamma\sin\theta_5, o_z = -\cos\theta_5 \\ a_x = \sin\gamma, a_y = \cos\gamma, a_z = 0 \\ p_x = a_2\cos\theta_2 + a_3\cos\theta_{23} + \sin\gamma(d_5 + z_t) + \\ \qquad \cos\gamma(a_4 + x_t\cos\theta_5 - y_t\sin\theta_5) + a_1 \\ p_y = a_2\sin\theta_2 + a_3\sin\theta_{23} + \cos\gamma(d_5 + z_t) - \\ \qquad \sin\gamma(a_4 + x_t\cos\theta_5 - y_t\sin\theta_5) \\ p_z = d_1 + d_2 + d_4 - x_t\sin\theta_5 - y_t\cos\theta_5 \end{cases} \tag{5}$$

将伺服电机编码器采集的关节位置信息和摘钩臂连杆参数代入到式（5）中，即可得到摘钩臂末端手爪的位置和姿态。

2.3　逆运动学分析

在检测到提钩杆手柄位置后，需要通过逆运动学分析计算出机器人各关节相应的运动角度，以此控制机器人工具中心点运动到抓握位置进行摘钩操作。即已知摘钩机器人末端手爪在基坐标系下的位姿矩阵 ${}^{0}_{T}\boldsymbol{T}$，求解得到相应的关节变量 d_1、θ_2、θ_3 和 θ_5。

首先根据式（5）可解得 θ_5 和 d_1：

$$\begin{cases} \theta_5 = \arctan\dfrac{n_z}{o_z} \\ d_1 = p_z - d_2 - d_4 + x_t\sin\left(\arctan\dfrac{n_z}{o_z}\right) + y_t\cos\left(\arctan\dfrac{n_z}{o_z}\right) \end{cases} \tag{6}$$

进一步可联立式（5）中 p_x 和 p_y 为方程组求解 θ_2 与 θ_3，θ_2 与 θ_3 有两组解，分别对应提肘型和垂肘型。为了保证摘钩臂结构稳定和行程最短，本文进行运动控制时均采用提肘型逆解，如式（7）所示：

$$\begin{cases}\theta_2 = 2\arctan\dfrac{2a_2k_2 - \sqrt{\begin{matrix}2(a_2^2+a_3^2)(k_1^2+k_2^2)-\\(a_2^2-a_3^2)-(k_1^2+k_2^2)^2\end{matrix}}}{a_2^2-a_3^2+2a_2k_1+k_1^2+k_2^2}\\ \theta_3 = 2\arctan\dfrac{\sqrt{\left[k_1^2+k_2^2-(a_2-a_3)^2\right]}}{\left[(a_2+a_3)^2-k_1^2-k_2^2\right]}\\ k_1^2+k_2^2-(a_2-a_3)^2\end{cases} \tag{7}$$

其中：k_1 和 k_2 为中间变量：

$$\begin{cases}k_1 = p_x - a_1 - \sin\gamma(d_5+z_t) - \\ \quad \cos\gamma\left[a_4 + x_t\cos\left(\arctan\dfrac{n_z}{o_z}\right) - y_t\sin\left(\arctan\dfrac{n_z}{o_z}\right)\right]\\ k_2 = p_y - \cos\gamma(d_5+z_t) + \\ \quad \sin\gamma\left[a_4 + x_t\cos\left(\arctan\dfrac{n_z}{o_z}\right) - y_t\sin\left(\arctan\dfrac{n_z}{o_z}\right)\right]\end{cases} \tag{8}$$

2.4 摘钩路径与轨迹规划

在视觉检测子系统检测到脚蹬挂靠点和提钩杆手柄抓握点位置后，控制系统通过路径规划生成一条从起始点到目标点的连续路径。共速臂首先由直线运动到脚蹬侧面挂靠车辆，在与车辆达到稳定共速后，再控制机器人摘钩臂使末端手爪中心点向目标位置移动。由于机器人工作在两车厢连接处和车厢侧面的空间范围，为避免机器人与车体发生碰撞干涉，根据货物列车和机器人的结构尺寸等约束条件，以具有防跳脱装置的提钩杆为对象进行路径规划，整个摘钩路径分 4 段进行。

摘钩路径如图 6 所示，在抓握到提钩杆之前的路径分为两段。假设摘钩臂初始位姿下末端手爪中心点为 s，首先通过直线运动，由点 s 运动到中间过渡点 m，并确保手爪开口对准点 e 的提钩杆手柄，然后再直线运动至摘钩目标点 e，并抓握住提钩杆手柄。

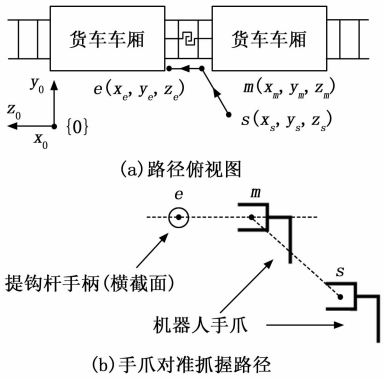

图 6 摘钩路径图

在抓握到提钩杆后，由于提钩杆卡在防跳脱槽孔里，因此需要将提钩杆从槽孔中提起，提起后再旋转 90° 即可解开车钩连接，这两段运动路径为圆弧。解开车钩后，摘钩臂和共速臂由原路径反向运动回到起始点。

经过路径规划生成直线与圆弧路径后，通过逆运动学分析来计算出各关节的期望运动角度，然后经过轨迹规划确定运动速度和加速度，进而控制各关节运动。轨迹规划的目的是使机器人各关节运动平滑稳定。

摘钩机器人为开链式结构，机械刚度较低，且底座安装在导轨上不能完全固定，关节加速度的突变将会影响机器人运行平稳性与定位精度。为保证摘钩过程平稳无冲击，采用 S 型曲线[18]进行关节轨迹规划，以避免加速度突变引起的冲击与晃动。

3 试验研究

为了验证所设计的摘钩机器人系统方案的可行性，检验其工作性能，在实验室搭建了相应的货物列车摘钩试验平台并开展了摘钩控制试验。

3.1 试验平台搭建

为了模拟货物列车在解编组时的运行情况，在实验室设计了可在轨道上运行的试验小车。根据不同车型上脚蹬和提钩杆之间相对位置的不同，调整试验小车上脚蹬和提钩杆的安装位置，便可模拟各种车型的车厢，用以验证机器人能否应对一列货车由不同车型编组而成的情况。

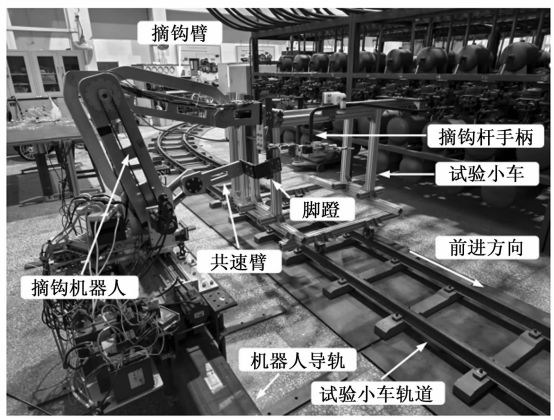

图 7 摘钩试验平台

所搭建的摘钩试验平台如图 7 所示，由轨道（轨距为 478 mm，轨高为 150 mm）、试验小车和摘钩机器人组成。摘钩机器人导轨和试验小车的轨道按照平行布置，相距 1 000 mm。

3.2 抓握力反馈控制阶跃响应试验

摘钩机器人在摘钩过程中，由于提钩杆手柄和末端手爪都处在运动状态，若此时抓握力不足会造成手柄从末端手爪中脱落，从而导致摘钩失败。为此，设计了抓握力反馈控制系统，抓握力反馈控制系统框图如图 8 所示。

抓握力反馈控制系统实物如图 9 所示，抓握力反馈

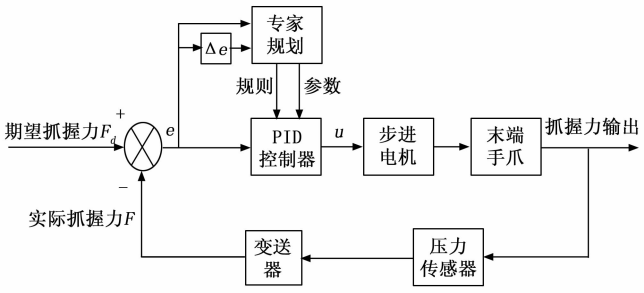

图 8　抓握力反馈控制系统框图

控制系统由步进电机、末端手爪等组成，滚珠丝杠将步进电机的旋转运动转换为滑块的直线运动，通过滑块带动推杆控制手爪的开合角度。压力传感器安装在推杆上，用传感器反馈的压力值反映抓握力的实际大小。

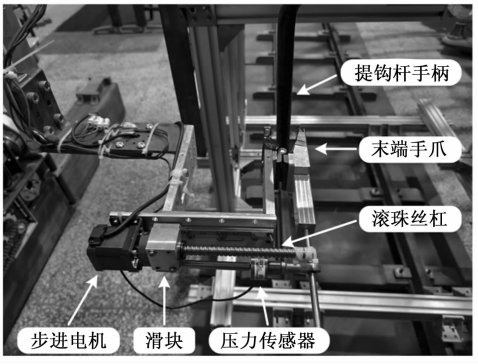

图 9　抓握力反馈控制系统实物图

抓握力反馈控制系统是一个非线性的滞后系统，并且抓握时手爪存在空行程，此时手爪未与手柄接触，抓握力为零。若要求在最短时间内完成抓握，在空行程时可使步进电机以最快速度旋转，尽快接触到手柄后施加抓握力，但受限于步进电机的矩频特性，在高转速时步进电机的输出力矩会急剧下降，若在接触手柄后步进电机仍以高速旋转，将无法输出足够的力矩推动滑块给手爪施加所需的抓握力，因此必须针对该问题设计合理的抓握力控制算法。常规 PID 控制由于参数固定，很难兼顾快速响应和足够大的抓握力。基于此，本文结合专家经验和 PID 控制，设计了抓握力的专家 PID 控制算法[19]。

为确定最有效适用的抓握力控制算法，同时设计了模糊控制[20]算法作为对比。定义误差 e 的模糊集为 {NB、NM、NS、ZO、PS、PM、PB}；误差 e 的论域为 {−200、−130、−70、0、70、130、200}；误差变化量 Δe 的模糊集为 {NB、NM、NS、ZO、PS、PM、PB}；误差变化量 Δe 的论域：{−200、−130、−70、0、70、130、200}；控制量 u 的模糊集：{NB、NM、NS、NZ、PZ、PS、PM、PB}；控制量 u 的论域：{−2 000、−1 400、−800、−300、300、800、1 400、2 000}。对于模糊集中的所有元素，均采用三角形函数作为隶属度函数。由于误差和误差变化量均分成了 7 个等级，因此设计了 49 条模糊控制规则，如表 3 所示。

表 3　模糊控制规则表

u		Δe						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
e	NB	NB	NB	NM	NB	NB	NB	NS
	NM	NM	NS	NS	NM	NM	NS	NS
	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
	ZO	NS	NS	PZ	PZ	PZ	PS	PS
	PS	PS	PS	PM	PS	PS	PS	PM
	PM	PS	PM	PB	PM	PS	PM	PB
	PB	PS	PM	PB	PB	PS	PM	PB

采用 Mamdani 推理法进行模糊推理，采用最大隶属度平均法进行反模糊化，最后得到精确的控制量。

为验证专家 PID 控制算法的实际控制效果，进行了抓握力反馈控制系统的阶跃响应试验，并与 PID 控制和模糊控制算法进行对比。抓握力反馈控制系统的阶跃响应如图 10 所示，设定期望抓握力为 200 N（实验得到的经验值），采用专家 PID 控制时末端手爪能快速度过空行程后接触到提钩杆手柄，此后抓握力迅速上升，经过调整后稳定在 [Fd，$Fd+\varepsilon$] 的许用范围内，满足抓握要求。

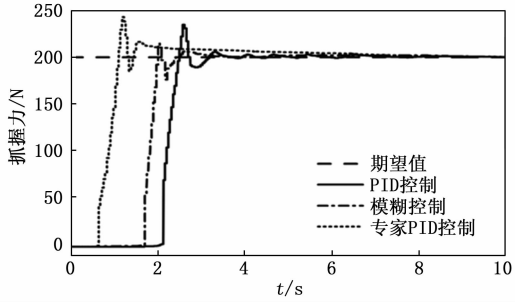

图 10　抓握力反馈控制系统的阶跃响应

抓握力控制算法耗时对比如表 4 所示，根据专家经验所设计的专家 PID 控制算法不仅能够缩短抓握空行程所用时间，而且能够快速调整稳定，在抓握总用时上，相较于 PID 控制和模糊控制分别减少了 1.72 s 和 0.97 s。抓握用时的减少，意味着摘钩速度的加快，在提升摘钩效率的同时也减小了机器人与车辆共速运动所需的导轨长度。

3.3　摘钩试验与结果分析

推动试验小车以 0.3 m/s 左右的速度运行，模拟编组站的摘钩作业场景，进行摘钩试验。

机器人摘钩过程中各关节运动情况如图 11 所示，各关节能够按照轨迹规划的结果运动到预定位置，确保了末端手爪能够达到目标位置进行摘钩。机器人运动过程平稳无冲击，各关节伺服电机转速均未超出最高转速，

表 4 抓握力控制算法耗时对比

控制算法	空行程用时/s	调整用时/s	总用时/s	平均总用时/s
PID 控制	1.70	1.49	3.19	3.19
	1.77	1.41	3.18	
	1.76	1.44	3.20	
模糊控制	1.64	0.63	2.27	2.44
	1.68	0.91	2.59	
	1.71	0.74	2.45	
专家 PID 控制	0.50	0.88	1.38	1.47
	0.64	0.92	1.56	
	0.65	0.82	1.47	

电机力矩均在额定力矩范围内，机器人的机械结构和驱动设计符合摘钩需求。

在识别到脚蹬挂靠点后，共速臂可在 0.5 s 左右运动到预定位置，并在试验小车的带动下实现整个摘钩机器人与试验小车共速。

摘钩过程中抓握力的变化情况如图 12 所示，可见抓握力受物体运动的影响会产生明显的波动下降，但能够较迅速调整到期望值附近，确保手爪稳定地抓握提钩杆手柄，且保证在提起和旋转解钩动作时手柄不会脱落，保障了摘钩的成功率。

机器人摘钩用时如表 5 所示，其中共速用时为共速臂开始运动直到共速所需的时间，摘钩用时为摘钩臂完成摘钩所需的时间。可见摘钩机器人完成摘钩最短用时为 10.26 s，最长用时为 13.60 s，平均用时为 12.23 s。在摘钩时间上，能够满足自动摘钩的需要。若车列推送速度为 1.4 m/s[21]，则需要铺设的摘钩机器人导轨长度约为 17 m。

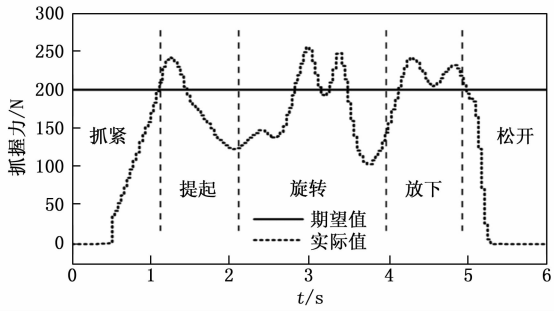

图 12 摘钩过程中抓握力的变化情况

表 5 机器人摘钩用时

试验次数	共速用时/s	摘钩用时/s	总用时/s
1	5.08	7.82	12.90
2	3.88	9.47	13.35
3	3.80	6.46	10.26
4	3.85	7.23	11.08
5	3.88	9.72	13.60
6	3.97	7.33	11.30
7	3.85	9.17	13.02
8	3.80	8.71	12.51
9	3.82	8.33	12.15
10	3.76	8.38	12.14

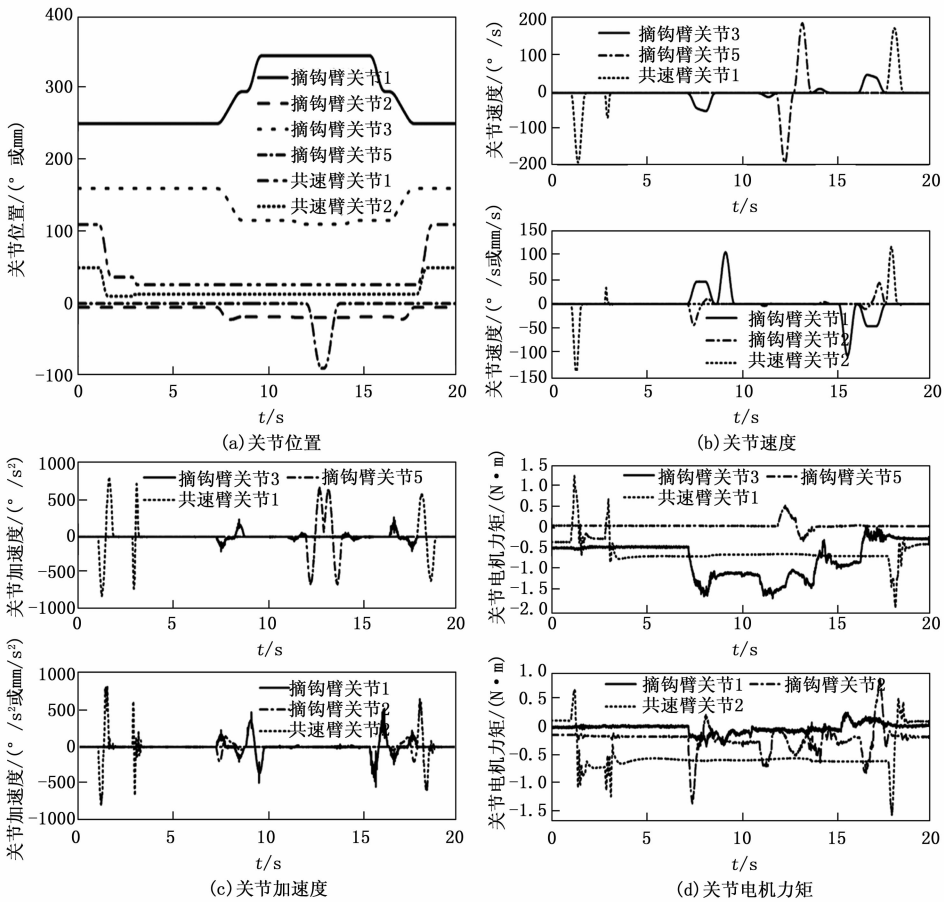

图 11 机器人摘钩过程中各关节运动情况

4 结束语

本文针对目前编组站货物列车解体作业的自动化摘钩需求，设计了一摘钩机器人系统。首先确定了系统总体结构组成和工作流程，对系统进行了设计选型。然后建立了摘钩机器人的运动学模型，并进行了正逆运动学分析；针对实际摘钩场景，规划了机器人摘钩路径和轨迹。最后在搭建的试验平台上开展了摘钩试验，试验结果表明本文设计的机器人系统，通过双臂协同工作，不仅能在

较短的时间内实现车辆运动过程中的摘钩解体操作，而且通过采用有效的专家 PID 控制算法，在负载力出现明显波动的情况下，也能较稳定地控制抓握力大小，保证了摘钩操作的稳定性和可靠性。下一步我们将进一步完善系统的设计和功能，研究更先进的控制算法，通过更多的现场试验来提高其实用性和可靠性，以更好地满足实际应用的需求。

参考文献：

[1] 严隽耄，傅茂海．车辆工程［M］．北京：中国铁道出版社，2017.

[2] 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] 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.

[4] 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.

[5] 库尔兹 E·J，斯洛特 W，杨炜乾．欧洲铁路自动摘钩装置的研制取得进展［J］．中国铁路，1996，(2)：40－50.

[6] 王战中，赵　赛，刘超颖，等．铁路货运悬挂式自动摘钩装置设计与运动仿真［J］．机械设计与制造，2013，(6)：215－217.

[7] 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.

[8] BODDIFORD A，CHHEDA D，HAMMEL C，et al. Autonomous robotic system for pin pulling operation in rail yard［C］// International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. American Society of Mechanical Engineers，2015，57137：V05BT08A022.

[9] 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.

[10] 章雪岩．摘钩机器人的运动模型研究［J］．电子机械工程，1994，10（5）：1－13.

[11] 马　波，裘正定．驼峰摘钩机械手最优控制仿真及机器视觉分析［J］．铁道学报，1998，20（3）：46－51.

[12] 张彦召．基于人工智能技术的翻车机火车摘钩机器人控制系统研究［J］．中国设备工程，2023，(05)：36－37.

[13] 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.

[14] 郭忠峰，张渊博，王赫莹，等．深度学习目标检测算法在货运列车车钩识别中的应用［J］．铁道科学与工程学报，2020，17（10）：2479－2484.

[15] 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.

[16] 周　琪．驼峰解体自动提钩装置设计与关键技术研究［J］．河南科技，2021，40（1）：113－116.

[17] BARHAGHTALAB M H，SEPESTANAKI M A，MOBAYEN S，et al. Design of an adaptive fuzzy-neural inference system-based control approach for robotic manipulators［J］. Applied Soft Computing，2023，149：110970.

[18] 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）：471－486，498.

[19] 刘金琨．智能控制［M］．北京：电子工业出版社，2017.

[20] PRECUP R，NGUYEN A，BLAZIC S. A survey on fuzzy control for mechatronics applications［J］. International Journal of Systems Science，2024，55（4）：771－813.

[21] 中国铁路设计集团有限公司．铁路驼峰及调车场设计规范：TB 10062—2018［S］．北京：中国铁道出版社，2019.

（上接第 141 页）

[14] DEB K. An efficient constraint handling method for genetic algorithms［J］. Computer methods in applied mechanics and engineering，2000，186（2－4）：311－338.

[15] 蒋阳升，韩佳哲，朱娟秀，等．考虑新冠疫情扩散规律的医疗物资动态配送优化［J］．安全与环境学报，2023，23（5）：1579－1587.

[16] 吴　晟，乔　明，史　斌，等．层次分析法和熵权法模糊综合评价水泥混凝土路面结构性能［J］．济南大学学报（自然科学版），2024，38（4）：503－509.

[17] ZITZLLER E，THIELE L. Multiobjective evolutionary algorithms：a comparative case study and the strength pareto approach［J］. IEEE transactions on Evolutionary Computation，1999，3（4）：257－271.

[18] COELLO C A C，SIERRA M R. A study of the parallelization of a coevolutionary multi-objective evolutionary algorithm［C］//MICAI 2004：Advances in Artificial Intelligence：Third Mexican International Conference on Artificial Intelligence，Mexico City，Mexico，April 26－30，2004，Proceedings 3. Springer Berlin Heidelberg，2004：688－697.

[19] VAN VELDHUIZEN D A，LAMONT G B. On measuring multiobjective evolutionary algorithm performance［C］//Proceedings of the 2000 congress on evolutionary computation，CEC00（Cat. No. 00TH8512），IEEE，2000，1：204－211.

[20] BRANDIMARTE P. Routing and scheduling in a flexible job shop by tabu search［J］. Annals of Operations research，1993，41（3）：157－183.

[21] 朱晓霞，王成亮，李泉林．基于改进 NSGA-Ⅱ算法的协同制造任务调度研究［J］．制造技术与机床，2019（4）：155－16.