

LNG 硬管接车臂自动对接研究及应用

胡旭杰¹ 江 驹¹ 王剑琨²

1. 南京航空航天大学自动化学院, 江苏 南京 210016;
2. 中国石化青岛液化天然气有限责任公司, 山东 青岛 266400

摘 要:针对现有 LNG 装卸场站槽车充装多为手动充装、人工推动接车臂操作困难、劳动强度大、耗时长、效率低等问题,提出一种具备在划定车辆停靠区域情况下自动对接的 LNG 硬管接车臂的控制方法。一是实时采集各执行机构的位移,换算为各旋转关节运动的角度及角速度,为有效抑制干扰,防止信号突变,引入一阶滞后滤波算法,滤波后反馈给控制系统;二是通过 D-H 表示法建立接车臂的运动学模型,进行接车臂的正、逆运动学分析;三是在笛卡尔直角坐标空间规划接车臂末端的实时空间位姿及其对应的速度、加速度;四是建立外环角度控制,内环角速度控制的位置速度双环控制器;五是采用 Matlab 机器人工具验证正运动学解算表达式的正确性及接车臂运动范围仿真,通过阶跃信号仿真双环与单环 PID 控制算法的控制效果,实际测试表明自动对接准确率可达 99%,相比手动对接时间可节约 30%,可有效提高对接效率,减少操作人员数量及劳动强度。LNG 硬管接车臂的自动对接控制方法能较好地应用于 LNG 装卸场站槽车充装自动对接,具有一定的推广和参考价值。

关键词:LNG 硬管接车臂;自动对接;双环控制

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2023.04.003

Research and application of automatic docking of LNG rigid pipe connecting arm

HU Xu-jie¹, JIANG Ju¹, WANG Jiankun²

1. College of Automatic Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu, 210016, China;
2. Sinopec Qingdao LNG Co., Ltd., Qingdao, Shandong, 266400, China

Abstract: The existing LNG loading and unloading station tank car filling has many issues such as manual filling, difficult operation of manually pushing the connecting arm, high labor intensity, long duration, low efficiency, etc. To address these issues, this paper proposes a control method of LNG rigid pipe receiving arm with automatic docking that operates within the boundary of a pre-defined vehicle parking area. The first is to collect the displacement of each actuator in real time, and convert it into the angle and angular velocity of each rotary joint motion. In order to effectively suppress interference, prevent signal from mutation, the 1st-order lag filtering algorithm is introduced, and the filtered signal is fed back to the control system. The second is to establish the kinematics model of the receiving arm through D-H (Denavit-Hartenberg) representation. The forward and inverse kinematics analysis of the connecting arm is then carried out. The third is to plan the position and posture of the receiving arm end in real time and space and its corresponding velocity and acceleration in Cartesian rectangular coordinate space. The fourth

收稿日期:2023-02-15

基金项目:国家重点研发计划“国家石油及天然气储备库安全保障技术与装备研发”(2017YFC0805800);中国石化青岛液化天然气有限责任公司科研课题“LNG 接收站自动化装车撬”(ZC0607-003)

作者简介:胡旭杰(1990-),男,江苏连云港人,工程师,硕士研究生,主要从事自动控制与油气储运研究工作。E-mail:18061952398@163.com

is to establish the position and velocity dual-loop controller of the outer loop angle control and the inner loop angular velocity control. The fifth, the Matlab robot tool is used to verify the correctness of the forward kinematics solution expression and the simulation of the motion range of the connecting arm. The control effect of the double-loop and single-loop PID (Proportional-Integral-Derivative) control algorithms is simulated using a step signal. The actual test shows that the accuracy of automatic docking can reach 99%, which can save 30% docking time as compared with the manual operation, effectively improve the docking efficiency, reduce the number of operators and labor intensity. The new method can be better and widely used in tank car filling automatic docking in LNG loading and unloading stations, and definitely has value as reference and in promoting such application.

Keywords: LNG rigid pipe connecting arm; Automatic docking; Double loop control

0 前言

近年来,中国 LNG 进口及消费量逐年增长^[1-2],拟建和在建的 LNG 接收站达 60 余座。LNG 槽车作为接收站最主要的公路运输工具,由于具有较强的灵活性和经济性,已得到广泛应用。LNG 硬管接车臂作为 LNG 装卸场站最主要装车设备,因其高效便捷,需求也在不断增加。目前,LNG 装卸场站存在人员多、车辆多、操作环节多的现象,且采用倒班模式,操作人员室外连续工作 8 h 以上,冬季高峰期极易出现疲劳。LNG 槽车充装过程多为手动操作,在车辆停靠后,需要人工拉动硬管接车臂接车及归位。

国内 LNG 装卸作业均采用硬管接车臂,分为气相、液相 2 条硬管,每条硬管上共有 5 个 360°旋转节,需要靠人工推拉完成转动,使其末端接口到达指定位置,单条硬管重量超过 600 kg,人工推拉费时费力。

不同于其他车间式的工业生产环境,LNG 硬管接车

臂所处工作环境比较混杂,产生了一系列不能忽视的问题,例如:操作者要对作业过程全程把关,工作劳作强度大^[3];工作场所为天然气防爆场合,具有一定的危险性^[4];作业任务完全靠人工操作,要完成安全可靠的作业需要进行系统的培训。

研究 LNG 硬管接车臂自动对接技术能够简化作业流程、减轻操作者劳动强度、提高作业自动化程度、提高安全性,能给操作者带来很大的便利,有利于改变传统的人工操作模式,这是产业升级趋势下的一种创新尝试^[5-10]。

1 总体设计

LNG 硬管接车臂由臂本体、液压系统、电气控制系统组成。为实现接车臂系统的自动对接功能,LNG 硬管接车臂在原有基础上将常规手动阀门升级为气动控制阀门,同时增加液压驱动机构及位置传感器。LNG 硬管接车臂的连接见图 1。

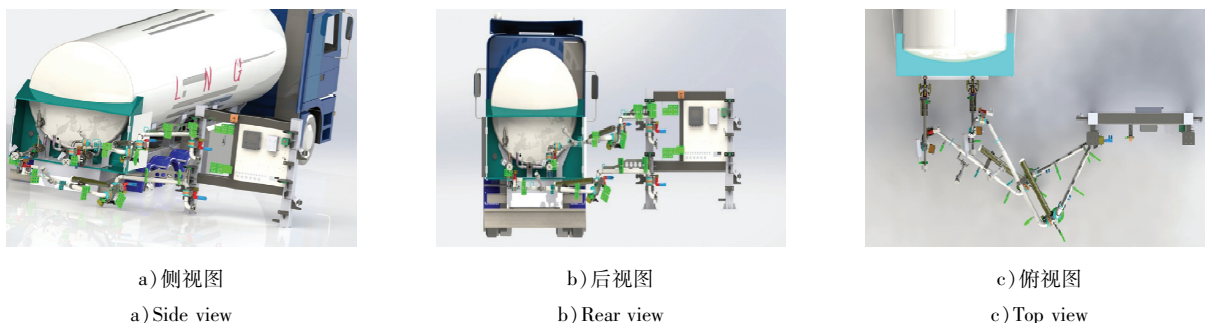


图 1 LNG 硬管接车臂的连接图

Fig. 1 Composition of LNG rigid pipe connecting arm

2 自动对接设计

2.1 位置采集与反馈技术

充分考虑厂区防爆的电气要求,在 LNG 硬管接车臂一、二、三、四旋转关节处采用小型化高精度液压驱动机构,用于控制绕各个旋转关节转动,从而带动硬管接车臂运动至所需位置,见图 2。各液压驱动机构选取 4 ~ 20 mA 位移传感器,实时采集各执行机构的位移,并通过

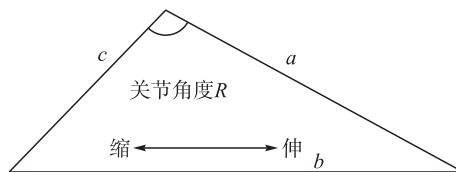


图 2 转动关节的位置测量示意图

Fig. 2 Position measurement of rotating joint

式(1)换算为各旋转关节运动的角度。

$$R = \arccos((b^2 - a^2 - c^2) / (-2 \times a \times c)) \quad (1)$$

式中: R 为关节的角度, $^\circ$; a 、 c 为固定长度,mm; b 为液压缸伸缩位移测量值,mm。

为有效抑制干扰,防止信号突变^[11],引入一阶滞后滤波算法,见式(1)~(2),滤波后反馈给控制系统,角度与输出端形成闭环的控制,各驱动机构可单独动作,也可同时动作,实现自动控制,同时遇到紧急情况时具备人工介入的功能。

$$R_{(n)} = mX_{(n)} + (1 - m)R_{(n-1)} \quad (2)$$

式中: $R_{(n)}$ 为本次滤波结果; $R_{(n-1)}$ 为上次滤波结果; $X_{(n)}$ 为本次采集结果; m 为滤波系数(范围0~1)。

2.2 LNG 硬管接车臂建模及运动学分析

采取目前使用最广泛的方法——D-H (Denavit-Hartenberg)表示法对 LNG 硬管接车臂进行运动学分析^[12-14],为运动学解算提供基础。首先,通过为每个关节设置坐标系,可以将杆件连接转换为坐标变换;然后,将涉及变换的参数按照一定顺序填充到参数表,生成一系列的齐次变换矩阵;最后,在矩阵运算的基础上,将从基座到 LNG 硬管接车臂末端所有的变换相结合,得到 LNG 硬管接车臂运动学模型的数学表示,相邻两轴相对位姿关系见图3。

图3中 θ_i 为绕 Z_i 轴将 X_{i-1} 旋转到与 X_i 同向的旋转角度,这里以右手大拇指指向 Z_i 轴正方向时的四指指向为 θ_i 的正方向,在转动关节中, θ_i 即为关节角; d_i 为沿 Z_i 轴正方向,将 X_{i-1} 平移到 X_i 的距离,即为关节距离; a_i 为沿 X_i 轴将 Z_i 平移到 Z_{i+1} 的距离,即为连杆长度; α_i 为绕 X_i 轴将 Z_i 旋转到与 Z_{i+1} 同向时的旋转角度,即为连杆扭角。

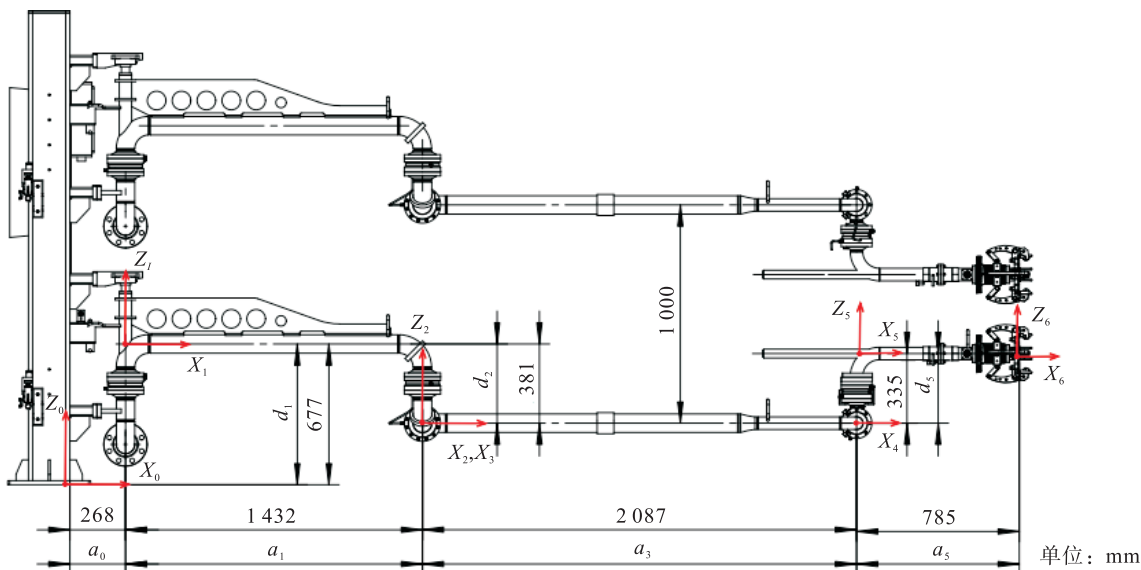


图4 接车臂建立的 D-H 坐标系(主视图)

Fig. 4 D-H coordinate system established by connecting arm (front view)

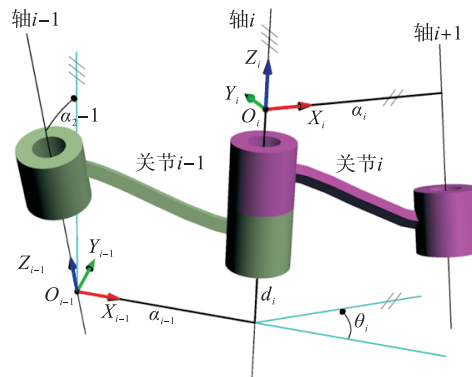


图3 转动关节的位姿示意图

Fig. 3 Position and posture of rotating joint

通过旋转 a_{i-1} →平移 a_{i-1} →平移 d_i →旋转 θ_i 的运动顺序,就可以得到以矩阵相乘的数学形式表示出来的相邻关节的变换关系,见式(1)~(3)。

$${}^{i-1}T_i = Rot(x_i, a_{i-1}) Trans(a_{i-1}, 0, 0) Trans(0, 0, d_i) Rot(z_i, \theta_i)$$

$$= \begin{bmatrix} c_i & -s_i & 0 & a_{i-1} \\ s_i \cos \alpha_{i-1} & c_i \cos \alpha_{i-1} & -\sin \alpha_{i-1} & -\sin \alpha_{i-1} d_i \\ s_i \sin \alpha_{i-1} & c_i \sin \alpha_{i-1} & \cos \alpha_{i-1} & \cos \alpha_{i-1} d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: $Rot(x_i, a_{i-1})$ 为绕 x_i 轴旋转 α_{i-1} ; $Trans(a_{i-1}, 0, 0)$ 为沿 x_i 轴平移 a_{i-1} ; $Trans(0, 0, d_i)$ 为沿 z_i 轴平移 d_i ; $Rot(z_i, \theta_i)$ 为绕 z_i 轴旋转 θ_i ; s_i 为 $\sin \theta_i$; c_i 为 $\cos \theta_i$; s_{ij} 为 $\sin(\theta_i + \theta_j)$; c_{ij} 为 $\cos(\theta_i + \theta_j)$ 。

首先,对 LNG 硬管接车臂进行 D-H 建模,为运动学解算提供基础,坐标系见图4~5,形成的 D-H 参数见表1。

然后,根据 D-H 参数以及关节与连杆间运动链关系求出正运动学解算表达式,见式(4)~(6)。

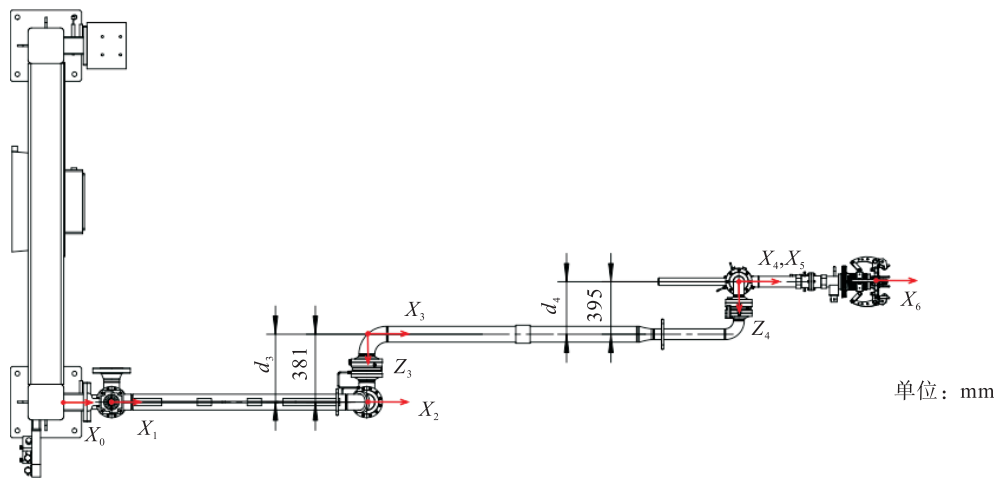


图 5 接车臂建立的 D-H 坐标系(俯视图)

Fig. 5 D-H coordinate system established by connecting arm (top view)

表 1 接车臂 D-H 参数表

Tab. 1 D-H parameters of connecting arm

i	$\alpha_{i-1}/(^{\circ})$	a_{i-1}/mm	d_i/mm	$\theta_i/(^{\circ})$
1	0	a_0	d_1	θ_1
2	0	a_1	$-d_2$	θ_2
3	90	0	$-d_3$	θ_3
4	0	a_3	$-d_4$	θ_4
5	-90	0	d_5	θ_5
6	0	a_5	0	0

$${}^0T_6 = {}^0T_1^1T_2^2T_3^3T_4^4T_5^5T_6^6 = \begin{bmatrix} {}^0R & {}^0P \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$${}^0R = \begin{bmatrix} c_{12}c_{34}c_5 - s_{12}s_5 & -c_{12}c_{34}s_5 - s_{12}c_5 & -c_{12}s_{34} \\ s_{12}c_{34}c_5 + c_{12}s_5 & -s_{12}c_{34}s_5 + c_{12}c_5 & -s_{12}s_{34} \\ s_{34}c_5 & -s_{34}s_5 & c_{34} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$${}^0P = \begin{bmatrix} a_0 + a_5(c_{12}c_{34}c_5 - s_{12}s_5) - (d_3 + d_4)s_{12} - \\ d_5c_{12}s_{34} + a_1c_1 + a_3c_{12}c_3 \\ a_5(s_{12}c_{34}c_5 + c_{12}s_5) + (d_3 + d_4)c_{12} - \\ d_5s_{12}s_{34} + a_1s_1 + a_3s_{12}c_3 \\ d_1 - d_2 + d_5c_{34} + a_3s_3 + a_5s_{34}c_5 \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: 0R 为旋转矩阵,描述了 LNG 硬管接车臂末端的姿态,实际中将转换为欧拉角进行表示; 0P 为 LNG 硬管接车臂末端相对于基坐标系的位置; 0T 为旋转平移转换矩阵。

2.3 路径与轨迹规划

目前最常用的机械臂轨迹规划方法有两种,第一种方法是在笛卡尔直角坐标空间中给定路径约束^[15-20],规划对象为机械臂末端的实时空间位姿及其对应的速度、加速度。通过已知的运动路径,选取合适的函数,对路

径点进行插值计算,再逆解为各关节的运动参数,笛卡尔空间轨迹规划见图 6。



图 6 笛卡尔空间轨迹规划图

Fig. 6 Cartesian space trajectory planning

第二种方法则是在关节空间中给定路径约束,进行轨迹规划,对于选定关节节点上的位姿、速度和加速度给出一组显式约束,然后分别对各关节节点进行函数逼近,拟合出各关节的运动轨迹,并满足约束条件,关节空间轨迹规划见图 7。

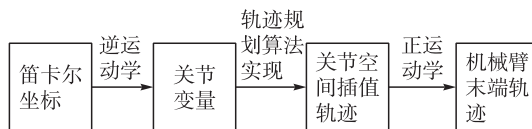


图 7 关节空间轨迹规划图

Fig. 7 Joint space trajectory planning

根据 LNG 硬管接车臂实际运行工况,选取第一种方法进行 LNG 硬管接车臂的路径与规划,主要有以下步骤。

1) 根据 LNG 硬管接车臂实际运行工况,提前在笛卡尔坐标系中合理选择 n 个路径点 $k_1, \dots, k_n$ 。路径点的选取,主要考虑 LNG 硬管接车臂的避障以及到达目标点的快速性。

2) 将路径点通过 D-H 逆运动学转换到关节空间。

3) 对关节空间中相邻两个路径点对应的关节角度,指定插值轨迹类型,并计算得到相应的轨迹规划参数,将其赋值给动态决策模块。

结合工程实际,采用梯形速度规划将减少 LNG 硬管接车臂运行轨迹中受到的冲击,充分发挥驱动单元的能力,保证 LNG 硬管接车臂高效运行。

2.4 位置速度双环控制

常规单环位置 (Proportion Integration Diff, PID) 控制算法作为一个结构简单的线性算法^[21-22], 在 LNG 硬管接车臂这种非线性较强的系统控制上表现并不出色, 且

PID 控制算法的参数受到环境温度的影响, 每当环境温度发生变化时, 参数需要人工进行适应性调节, 而参数的调节受到人员经验、外界干扰等影响, 不可控且低重复性, 双环 PID 控制原理见图 8。

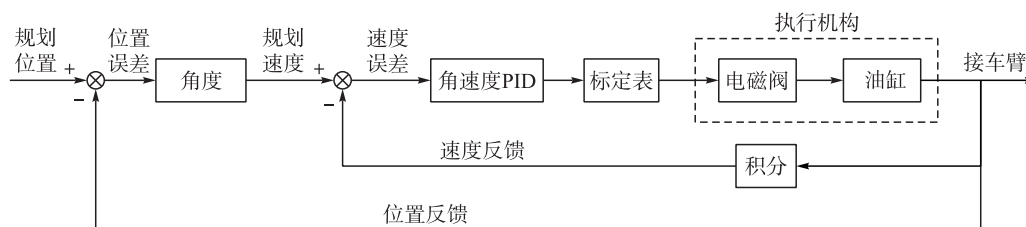


图 8 双环 PID 控制原理图

Fig. 8 Double-loop PID control principle

针对以上问题, 考虑将速度环引入 LNG 硬管接车臂臂关节的控制中, 本文提出基于双环控制理论进行控制, 在轨迹规划中已经得到关节角期望轨迹, 因此对 LNG 硬管接车臂末端位置的控制问题转化为了对 LNG 硬管接车臂的各个关节角度控制问题, 即位置控制器设计转化为角度控制器设计。双闭环控制器由 2 个控制器组成, 分别是角度控制器和角速度控制器, 其中外环为角度控制器, 用于保证关节运动角度与期望角度接近, 实现从角度偏差量到角速度补偿量的转化, 内环为角速度控制器, 用于保证关节运动角速度与期望角速度和角速度补偿量之和接近, 实现从角速度偏差量到液压阀开度的转化。在双闭环控制器整定中, 首先将角速度补偿量置 0 以单独整定内环参数, 在内环参数整定完毕后, 保持内环参数不变整定外环参数, 直至达到角度偏差量接近于 0, 即实际角度与期望角度完美跟踪的效果。在工程实际应用中, 不仅对角度量进行控制, 还对角速度量进行控制, 使 LNG 硬管接车臂运动流畅、平稳。

行示教仿真, 以验证正运动学解算表达式的正确性, 见图 9。

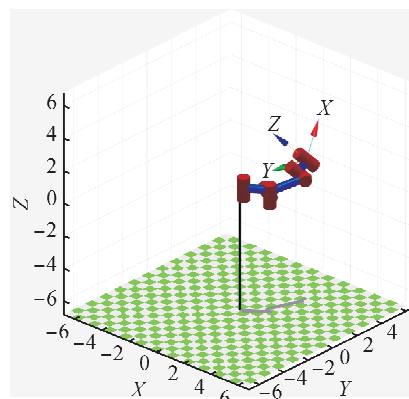


图 9 运动学示教仿真图

Fig. 9 Simulation of kinematics teaching

在验证由 D-H 参数表形成的正运动学解算表达式无误后, 求出逆运动学解算表达式, 见式 (7)。这意味着只要知道 LNG 硬管接车臂末端在空间中的位置和姿态, 就可以代入式 (7) 中求解出 5 个关节角度 $\theta_{i,i=1,2,3,4,5}$ 。

3 仿真验证

3.1 LNG 硬管接车臂运动学模型仿真

在 MATLAB 中利用机器人工具箱和 D-H 参数表进

$$\left\{ \begin{aligned} \theta_1 &= \text{Atan2} \left(\frac{p_x - a_0 - a_5 r_{11} - \frac{(d_3 + d_4)r_{23}}{\sqrt{r_{31}^2 + r_{32}^2}} - d_5 r_{13} + \frac{a_3 r_{13} c_3}{\sqrt{r_{31}^2 + r_{32}^2}}}{a_1}, \frac{p_y - a_5 r_{21} + \frac{(d_3 + d_4)r_{13}}{\sqrt{r_{31}^2 + r_{32}^2}} - d_5 r_{23} + \frac{a_3 r_{23} c_3}{\sqrt{r_{31}^2 + r_{32}^2}}}{a_1} \right) \\ \theta_2 &= \text{Atan2}(-r_{23}, r_{13}) - \\ &\quad \text{Atan2} \left(\frac{p_x - a_0 - a_5 r_{11} - \frac{(d_3 + d_4)r_{23}}{\sqrt{r_{31}^2 + r_{32}^2}} - d_5 r_{13} + \frac{a_3 r_{13} c_3}{\sqrt{r_{31}^2 + r_{32}^2}}}{a_1}, \frac{p_y - a_5 r_{21} + \frac{(d_3 + d_4)r_{13}}{\sqrt{r_{31}^2 + r_{32}^2}} - d_5 r_{23} + \frac{a_3 r_{23} c_3}{\sqrt{r_{31}^2 + r_{32}^2}}}{a_1} \right) \\ \theta_3 &= \arcsin \frac{p_z - d_1 + d_2 - d_5 r_{33} - a_5 r_{31}}{a_3} \\ \theta_4 &= \arctan \frac{\sqrt{r_{31}^2 + r_{32}^2}}{r_{33}} - \arcsin \frac{p_z - d_1 + d_2 - d_5 r_{33} - a_5 r_{31}}{a_3} \\ \theta_5 &= \text{Atan2}(-r_{32}, r_{31}) \end{aligned} \right. \quad (7)$$

最后由机器人工具箱生成 LNG 硬管接车臂末端运行空间和能够实现对接的末端水平工作空间,见图 10。

图 10 中绿色点为末端运动范围,红色点为末端能实现对接时的槽车法兰口的区域范围。

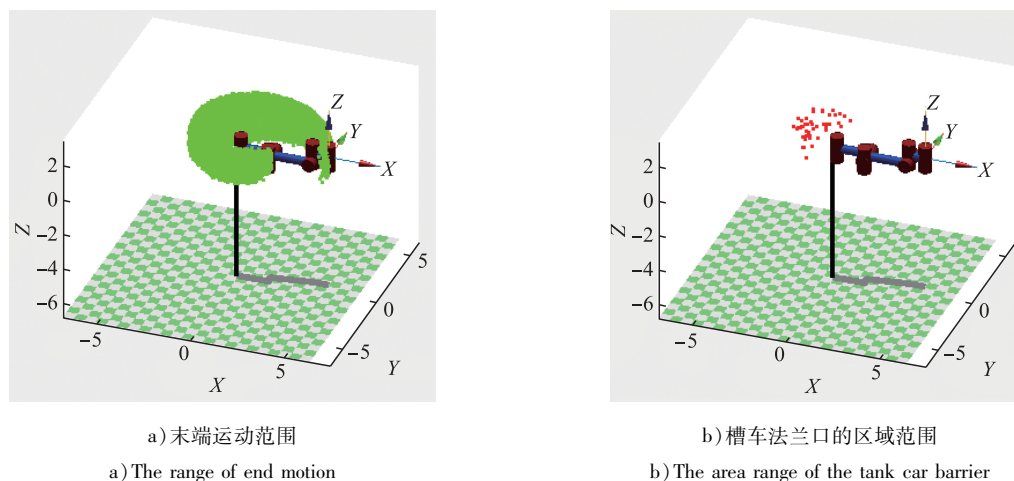


图 10 LNG 硬管接车臂运动范围仿真图

Fig. 10 Simulation of motion range of LNG rigid pipe connecting arm

3.2 双环控制仿真

通过输入 1 个幅值为 2° 的阶跃信号,使关节由静止开始运动,以第二关节为例,得到双环 PID 与单环 PID 控制算法的控制效果仿真对比,见图 11。

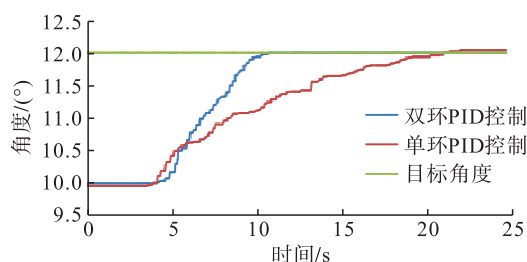


图 11 单关节双环 PID 控制与单环 PID 控制效果对比图

Fig. 11 Comparison diagram of single joint control effect of double-loop PID and single-loop PID

由图 11 可以看出,引入速度环的双环 PID 控制大幅缩短了调节时间,同时克服了液压受环境因素所带来的不稳定性影响,提高了系统的适应性,性能得到了明显提升。

4 结论

试验及实际应用结果表明,采用自动对接控制的 LNG 硬管接车臂,满足在划定车辆停靠区域情况下自动对接的需求,相比手动对接时间 5 min 可节约 30%,提升了 LNG 接车臂的自动化、智能化水平。但针对复杂工况下的智能避障及最优路径规划,仍有待更深入的研究。

参考文献:

[1] 黄献智,杜书成. 全球天然气和 LNG 供需贸易现状及展望

[J]. 油气储运, 2019, 38(1): 12-19.

HUANG Xianzhi, DU Shucheng. Status and prospect supply and demand trading of global natural gas and LNG [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2019, 38(1): 12-19.

[2] 周宇阳. 基于 SVM 的中国地区进口 LNG 需求量预测[J]. 石油化工设计, 2020, 37(1): 59-63.

ZHOU Yuyang. Application of SVM in predicting LNG import demand of China [J]. Petrochemical Design, 2020, 37(1): 59-63.

[3] 周树辉,宋 坤,陈海平,等. LNG 槽车智能化充装系统设计与研究[J]. 天然气与石油, 2021, 39(3): 38-43.

ZHOU Shuhui, SONG Kun, CHEN Haiping, et al. Design and research on smart loading system of LNG road tanker [J]. Natural Gas and Oil, 2021, 39(3): 38-43.

[4] 袁国强. 液化天然气海上运输装卸作业的安全性研究[D]. 大连:大连海事大学, 2007.

YUAN Guoqiang. Study on the safety of stevedoring operation of seaborne liquefied natural gas [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2007.

[5] 刘忠强. 浅析我国 LNG 运输船经济与国家高端装备发展战略如何对接及实施[J]. 中国市场, 2018(34): 57-58.

LIU Zhongqiang. Brief analysis of how to connect and implement China's LNG carrier economy and national high-end equipment development strategy [J]. Chinese Market, 2018(34): 57-58.

[6] 徐建勇,范洪军,吴顺平,等. LNG 燃料的船对船(STS)加注技术研究[J]. 船舶工程, 2015, 37(1): 7-10.

XU Jianyong, FAN Hongjun, WU Shunping, et al. Research on LNG ship to ship (STS) bunkering operations [J]. Ship Engineering, 2015, 37(1): 7-10.

[7] 杨 亮,宋 坤. LNG 卸料臂国内设计制造水平现状分析

- [J]. 石化技术, 2018, 25(7): 19-21.
- YANG Liang, SONG Kun. Analysis of domestic design and manufacturing level of LNG unloading arm [J]. Petrochemical Industry Technology, 2018, 25 (7): 19-21.
- [8] 田小富, 汪世涛, 孙保龙. LNG 卸料臂自动对接方式研究 [J]. 天然气技术与经济, 2017, 11(增刊 1): 75-77.
- TIAN Xiaofu, WANG Shitao, SUN Baolong. Research on automatic docking mode of LNG unloading arm [J]. Natural Gas Technology and Economy, 2017, 11 (Suppl 1): 75-77.
- [9] 朱永国. 飞机大部件自动对接若干关键技术研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
- ZHU Yongguo. Research on some key techniques on aircraft large part automatic joining [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012.
- [10] 邹伟金. 基于双目视觉的刚体自动对接系统的研究 [D]. 南昌: 南昌大学, 2011.
- ZOU Weijin. Research on the key technology of rigid body automatic merging system based on binocular vision [D]. Nanchang: Nanchang University, 2011.
- [11] 王 坚. 一阶滞后滤波在减速机特性曲线绘制中的应用 [J]. 电子测量技术, 2013, 36(1): 101-104.
- WANG Jian. First order lag filter application in curve drawing of gear reducer [J]. Electronic Measurement Technology, 2013, 36 (1): 101-104.
- [12] 项有元, 陈万米, 邹国柱. 基于 D-H 算法的自主机器人机械臂建模方法研究 [J]. 工业控制计算机, 2014, 27 (7): 113-115.
- XIANG Youyuan, CHEN Wanmi, ZOU Guozhu. Research on manipulator modeling based on D-H algorithm for autonomous robot [J]. Industrial Control Computer, 2014, 27 (7): 113-115.
- [13] 丁华锋, 曹 宇, 杨真真, 等. 基于 D-H 法的多连杆正铲挖掘机运动学分析与包络图绘制 [J]. 燕山大学学报, 2014, 38(3): 197-203.
- DING Huafeng, CAO Yu, YANG Zhenzhen, et al. Position kinematics analysis of multi-linkage face-shovel excavator and envelope plotting using D-H method [J]. Journal of Yanshan University, 2014, 38 (3): 197-203.
- [14] 魏丽君, 吴海波, 刘海龙, 等. 基于 D-H 算法的移动机械臂正运动学分析研究 [J]. 计量与测试技术, 2020, 47 (10): 1-5.
- WEI Lijun, WU Haibo, LIU Hailong, et al. Research on trajectory planning of mobile manipulator based on improved gradient projection algorithm [J]. Metrology & Measurement Technique, 2020, 47 (10): 1-5.
- [15] 王英石. 冗余机器人的运动学及轨迹规划的研究 [D]. 天津: 南开大学, 2014.
- WANG Yingshi. Research on the kinematics and trajectory planning of redundant robots [D]. Tianjin: Nankai University, 2014.
- [16] 赵志伟. 工业机器人干涉判断及路径规划研究 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2018.
- ZHAO Zhiwei. A study of interference detection and path planning of industrial robots [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2018.
- [17] 宋少华. 七自由度机械臂动力学建模与轨迹规划研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- SONG Shaohua. Research on dynamics modeling and trajectory planning of 7-DOF redundant manipulators [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.
- [18] 尹 斌. 冗余机械臂运动学及避障路径规划研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- YIN Bin. Research on kinematics and obstacle avoidance path planning for redundant manipulator [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
- [19] 姜 力, 周 扬, 孙 奎, 等. 七自由度冗余机械臂避障控制 [J]. 光学精密工程, 2013, 21(7): 1795-1802.
- JIANG Li, ZHOU Yang, SUN Kui, et al. Obstacle avoidance control for 7-DOF redundant manipulators [J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21 (7): 1795-1802.
- [20] 汪秀忠. 受限条件下移动机械臂的路径规划研究 [D]. 太原: 中北大学, 2019.
- WANG Xiuzhong. Research on path planning of mobile manipulator under limited conditions [D]. Taiyuan: North University of China, 2019.
- [21] 徐俊虎. 冗余度机器人的运动控制与优化 [D]. 上海: 上海交通大学, 2011.
- XU Junhu. Optimizing and control for the motion of redundancy robot [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2011.
- [22] 杨 犇. 一种七自由度机械手的运动控制研究 [D]. 杭州: 中国计量学院, 2012.
- YANG Ben. Research on motion control of a 7-DOF manipulator [D]. Hangzhou: China Jiliang University, 2012.