

液压机械臂复合连杆机构优化设计*

李明¹, 罗江涛¹, 雒瑞民², 赵昊宁¹, 荣学文¹

(1 山东大学控制科学与工程学院, 济南 250061;

2 山东优宝特智能机器人有限公司, 济南 250101)

摘要:为实现移动作业液压机械臂的可折叠存放和较大工作空间的作业需求,针对液压机械臂俯仰关节设计了由直线油缸驱动的复合连杆机构,并通过多目标优化设计减小了直线油缸的最大驱动力,同时保证了机构的紧凑性;基于螺旋理论构建了六自由度液压机械臂的正向运动学模型,并推导出解析形式的运动学逆解;在ADAMS软件中建立液压机械臂的虚拟样机模型,并在MATLAB软件中规划了液压机械臂末端的运动轨迹,通过运动学逆解得到关节空间中的轨迹曲线,导入ADAMS软件中作为机械臂各关节的运动驱动,进行机械臂的动力学仿真,得到了关节驱动油缸的输出力曲线,证明了优化后的复合连杆机构可以满足机械臂驱动需求。

关键词: 液压机械臂;复合连杆机构;优化设计;螺旋理论;指数积

中图分类号: TH166 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-3133(2023)11-0129-08

DOI: 10.16731/j.cnki.1671-3133.2023.11.017

Optimal design of combined linkage mechanism of hydraulic manipulator

LI Ming¹, LUO Jiangtao¹, LUO Ruimin², ZHAO Haoning¹, RONG Xuewen¹

(1 School of Control Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;

2 Shandong Youbaote Intelligent Robotics Co., Ltd., Jinan 250101, China)

Abstract: In order to meet the requirements of foldable storage and large working space of mobile hydraulic manipulator, a composite connecting link transmission mechanism driven by a linear cylinder was designed for the pitch joint of the manipulator, and the maximum driving force of the linear cylinder was reduced through multi-objective optimization design, while the compactness of the mechanism was ensured. Based on the screw theory, the forward kinematics model of the 6-DOF hydraulic manipulator was constructed, and the inverse kinematics solution of the analytical form was derived. The virtual prototype model of the manipulator was established in ADAMS software, and the trajectory of the end of the manipulator was planned in MATLAB software. Trajectory curves in the joint space was obtained by inverse kinematic solution, and it was imported into ADAMS software as the motion drive of each joint of the manipulator, the dynamic simulation of the manipulator was carried out, and the output force curve of the joint drive cylinder was obtained, which proved that the optimized composite link transmission mechanism can meet the drive requirements of the manipulator.

Keywords: hydraulic manipulator; combined linkage mechanism; optimal design; screw theory; product of exponentials

0 引言

随着制造业的发展和自动化技术的提高,机器人技术发展迅速,并且在工业^[1]、军事^[2]和自然探索^[3-4]等众多领域得到了广泛的应用,尤其是多关节作业机器人已成为现代化工业生产与智能制造行业的重要组成部分^[5]。近些年来,移动机械臂在排爆、物流以及核废料处理等领域也得到越来越多的应用。液压

机械臂比电驱动机械臂具有更大的负载能力和功率密度,更适用于室外大负荷移动作业。为便于移动机械臂的运输、贮存以及未进行末端作业时的远距离行进,移动机械臂应尽可能折叠起来以减小存储空间。电驱动机械臂具有较大的关节运动空间,易于实现多关节机械臂的折叠,而采用直线油缸驱动的液压机械臂关节运动范围一般小于120°,很难实现机械臂的折叠,以致占用较大的存储空间,且灵活工作空间也比

* 国家重点研发计划课题项目(2022YFB4703604)

电驱动机械臂范围小很多。

本文设计了一款六自由度液压机械臂(以下简称机械臂),其关节1、关节2和关节3均采用直线油缸驱动的复合连杆机构传动,具有180°的关节运动范围,可实现非作业时图1所示的折叠状态和图2所示的水平全展开状态。关节5采用直线油缸直接驱动,具有120°的关节运动范围。关节4和关节6均采用回转油缸驱动,且具有180°的关节运动范围。六自由度液压机械臂末端作业工具水平全展开状态负载能力为20 kg,最大臂展为2 m,可通过具有两通道液压回路和多通道电气通路的快换装置,快速地更换末端作业工具,以完成不同作业任务。

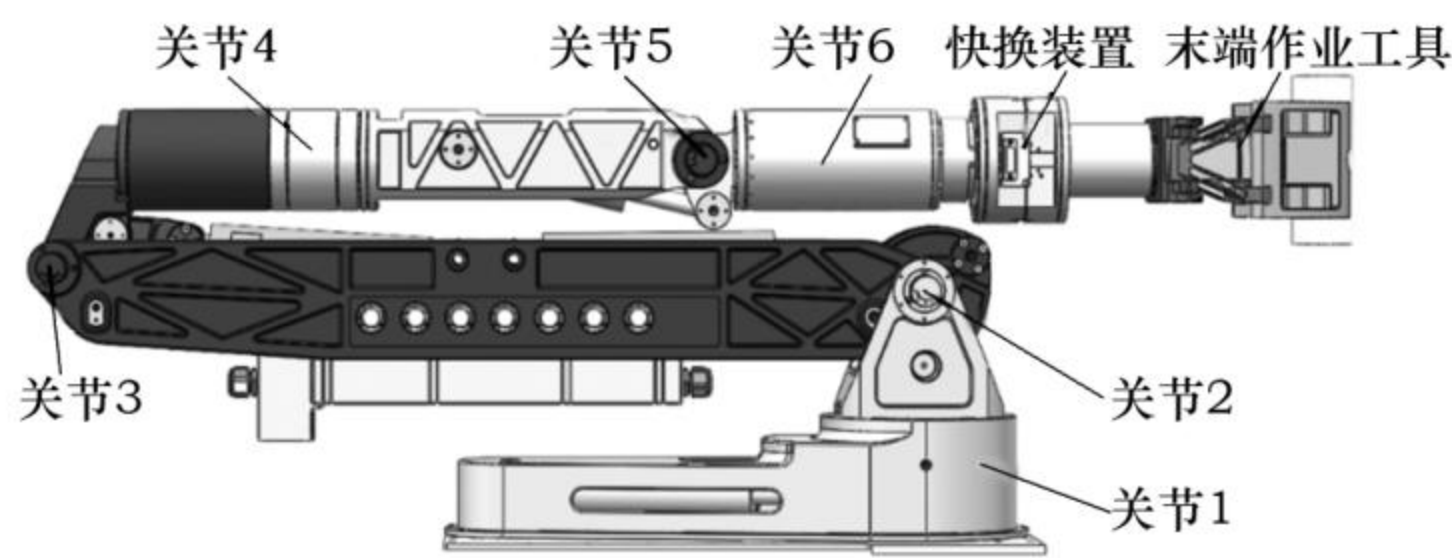


图1 六自由度液压机械臂折叠状态



图2 六自由度液压机械臂水平全展开状态

1 复合连杆机构优化设计^[6-7]

液压机械臂关节1~关节3均采用直线油缸驱动的复合连杆机构传动,在满足关节运动范围要求的前提下使传动机构结构紧凑,减小直线油缸最大输出力,本文以关节2为例介绍复合连杆机构的多目标优化设计方法。

1.1 机构运动参数

关节2处复合连杆机构示意如图3所示,其由2个四杆机构复合而成,节点A、节点B固定于大臂上,节点C固定于支座上,节点D为活动节点。复合连杆机构运动过程示意如图4所示,运动参数如图5所示,图5中, x_i 为传动机构中各连杆结构尺寸($i=1,2,\dots,7$); x_8 为直线油缸行程; α_m 为各连杆间夹角($m=1,2,\dots,12$); f_{c_2} 为液压油缸的输出力; f_5 和 f_6 分别为连杆CD和连杆AD传递的力,且规定压力为正,拉力为负; c_2 为直线油缸长度。

当液压机械臂处于图2所示水平全展开状态时, c_2 取最小值,即 $c_2=S+x_8$,其中 S 为直线油缸结构长

度,此时关节2处所需驱动力矩 τ_2 最大,考虑到末端作业工具的最大负载为20 kg,负载端距支点O最大距离为2 m,液压机械臂自重为40 kg,无负载时重心距支点O最大距离为0.75 m,且均位于支点右侧,经计算 $\tau_2 \approx 700 \text{ N} \cdot \text{m}$,令液压机械臂逆时针转动为正方向;当液压机械臂处于图1所示的折叠状态时, c_2 取最大值,即 $c_2=S+2x_8$,此时仅考虑无负载情况,液压机械臂重心距支点O距离为0.5 m,位于支点左侧,负载扭矩 $\tau_2 \approx -200 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。

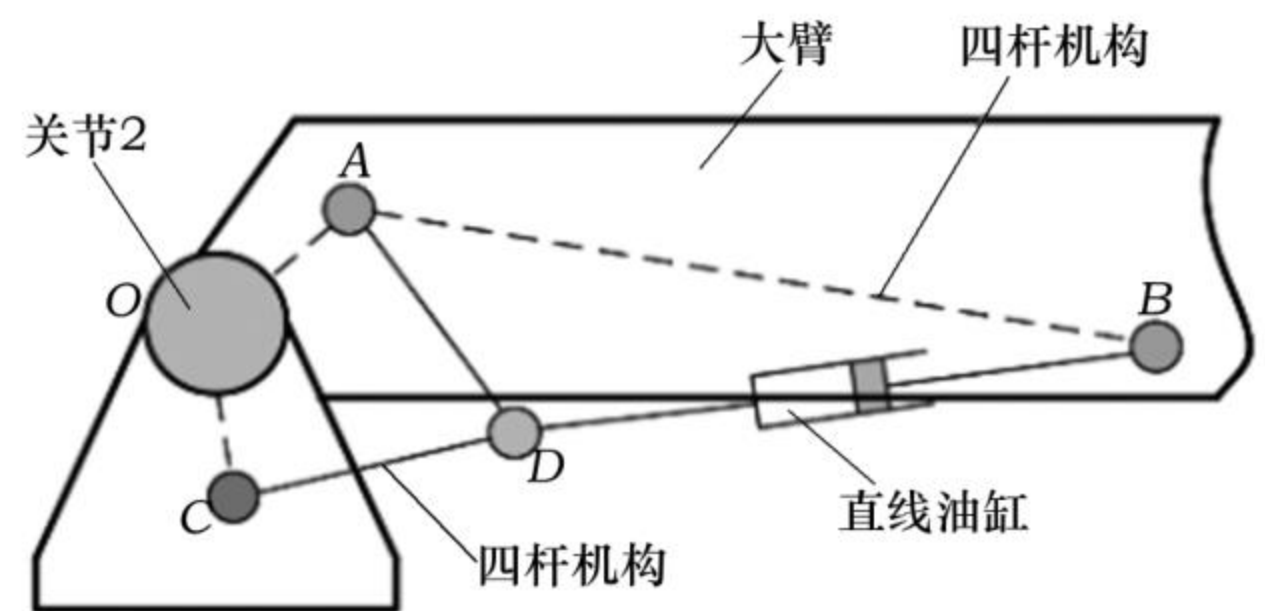


图3 关节2处复合连杆机构示意

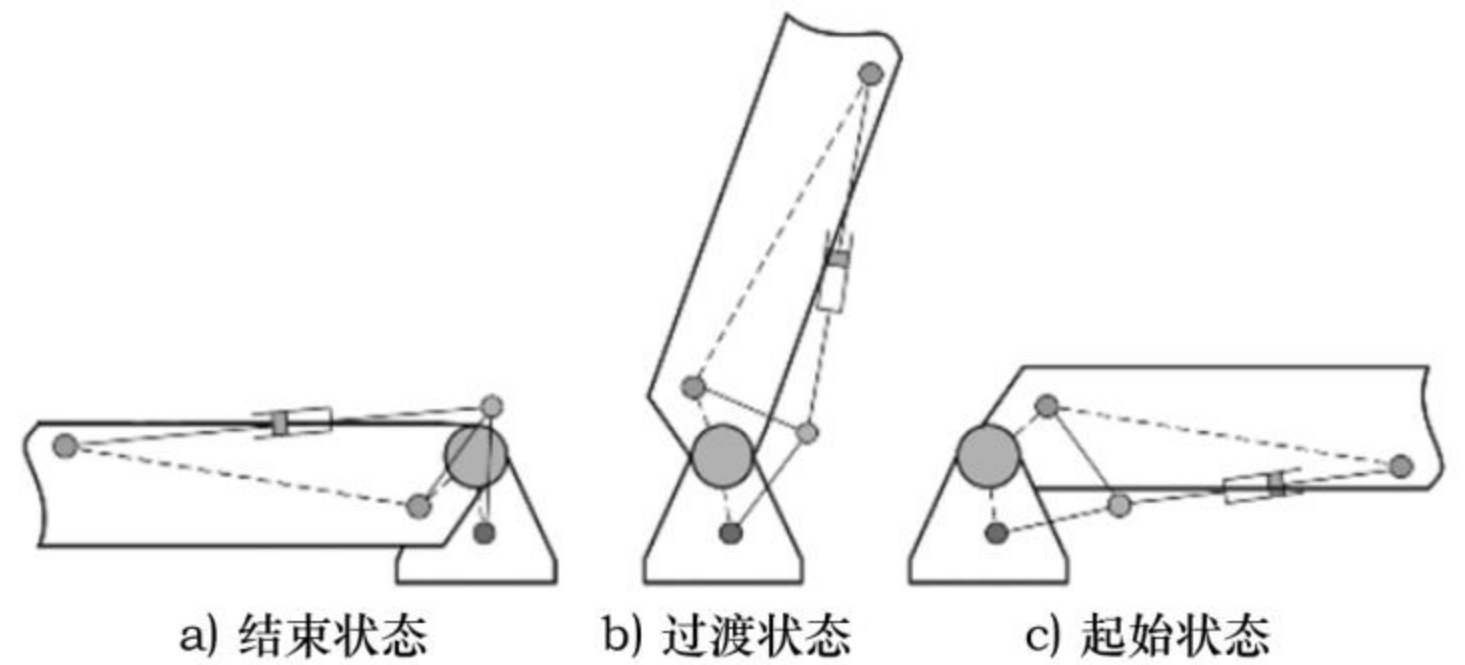


图4 复合连杆机构运动过程示意

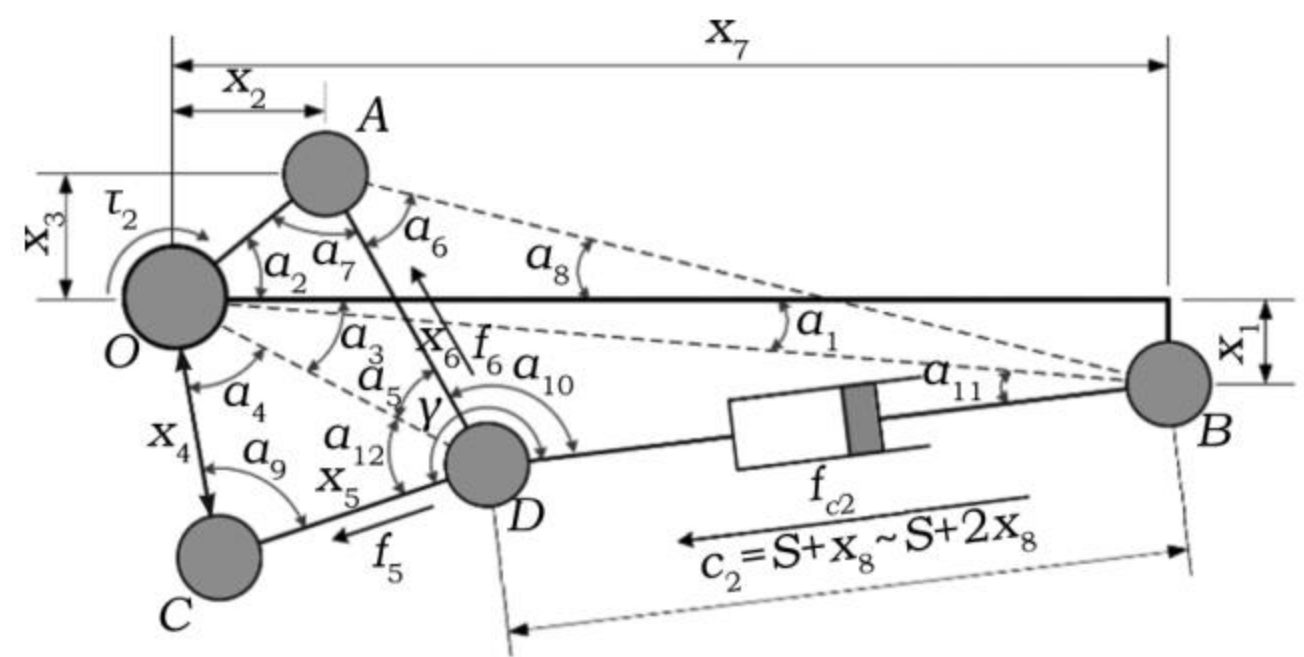


图5 复合连杆机构运动参数

点O、点A、点B、点C和点D为各转动副中心,任意两点间的距离用 l 及对应点表示。其中,点O、点A、点B均位于液压机械臂大臂上,故可得:

$$\alpha_1 = \tan^{-1} \left(\frac{x_1}{x_7} \right) \tag{1}$$

$$\alpha_2 = \tan^{-1} \left(\frac{x_3}{x_2} \right) \tag{2}$$

$$\alpha_8 = \tan^{-1} \left(\frac{x_1+x_3}{x_7-x_2} \right) \tag{3}$$

$$l_{OA} = \sqrt{x_2^2 + x_3^2} \quad (4)$$

$$l_{OB} = \sqrt{x_1^2 + x_7^2} \quad (5)$$

$$l_{AB} = \sqrt{(x_1 + x_3)^2 + (x_7 - x_2)^2} \quad (6)$$

在 $\triangle ADB$ 中,可以得到如下关系,并进一步推出 α_7 为:

$$\alpha_6 = \cos^{-1} \left(\frac{l_{AB}^2 + x_6^2 - c_2^2}{2l_{AB}x_6} \right) \quad (7)$$

$$\alpha_{10} = \cos^{-1} \left(\frac{x_6^2 + c_2^2 - l_{AB}^2}{2x_6c_2} \right) \quad (8)$$

$$\alpha_7 = \pi - \alpha_2 - \alpha_8 - \alpha_6 \quad (9)$$

在 $\triangle OAD$ 中,可以得到:

$$l_{OD} = \sqrt{l_{OA}^2 + x_6^2 - 2\cos\alpha_7 l_{OA}x_6} \quad (10)$$

$$\alpha_3 = \cos^{-1} \left(\frac{l_{OD}^2 + l_{OA}^2 - x_6^2}{2l_{OD}l_{OA}} \right) - \alpha_2 \quad (11)$$

$$\alpha_5 = \pi - \alpha_2 - \alpha_3 - \alpha_7 \quad (12)$$

在 $\triangle OCD$ 中,可以得到:

$$\alpha_4 = \cos^{-1} \left(\frac{x_4^2 + l_{OD}^2 - x_5^2}{2x_4l_{OD}} \right) \quad (13)$$

$$\alpha_9 = \cos^{-1} \left(\frac{x_4^2 + x_5^2 - l_{OD}^2}{2x_4x_5} \right) \quad (14)$$

$$\alpha_{12} = \pi - \alpha_4 - \alpha_9 \quad (15)$$

在 $\triangle ODB$ 中,可以得到:

$$\alpha_{11} = \cos^{-1} \left(\frac{c_2^2 + l_{OB}^2 - l_{OD}^2}{2c_2l_{OB}} \right) \quad (16)$$

令 γ 为 α_{12} 、 α_5 和 α_{10} 这3个夹角的角度之和,即:

$$\gamma = \alpha_{12} + \alpha_5 + \alpha_{10} \quad (17)$$

对点 D 进行受力分析,考虑沿直线油缸活塞杆方向以及垂直于活塞杆方向的分力应平衡,从而得到直线油缸力的表达式为:

$$f_6 = \frac{f_5 \sin(\gamma - \pi)}{\sin\alpha_{10}} \quad (18)$$

$$f_{c2} = f_5 \cos(\gamma - \pi) + f_6 \cos(\pi - \alpha_{10}) \quad (19)$$

式中: f_5 和 f_6 分别为连杆 CD 和连杆 AD 上传递的力; f_{c2} 为直线油缸的输出力。

对点 O 进行力矩平衡分析,直线油缸力和关节力矩之间的映射关系为:

$$\tau_2 = f_6 l_{OD} \sin\alpha_5 + f_{c2} l_{OB} \sin\alpha_{11} \quad (20)$$

式中: τ_2 为关节2的驱动力矩。

1.2 参数优化

根据图2可知,当关节2驱动直线油缸活塞杆全缩回时,机械臂大臂处于水平状态,此时驱动直线油

缸输出力最大;当驱动直线油缸活塞杆全伸出时,机械臂处于图1所示的折叠状态,此时直线油缸的收缩拉力应能将大臂拉起。在保证机械臂末端作业负载、水平全展开的前提下,关节传动机构应尽可能紧凑,直线油缸最大输出力应尽可能小,这主要取决于各连杆结构尺寸 $x_i(i=1,2,\dots,7)$ 、直线油缸结构长度 S 和直线油缸行程 x_8 。本文根据伺服油缸推荐参数固定了 S 的值,并将直线油缸行程 x_8 和各连杆结构尺寸作为设计变量,优化模型的设计变量组合为矢量形式 \mathbf{x} ,即:

$$\mathbf{x} = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8) \quad (21)$$

目标函数由3个部分组成:一是传动机构结构尽可能紧凑;二是使关节的运动范围均满足折叠和水平全展开需求;三是使驱动直线油缸最大输出力尽可能小。则目标函数为:

$$\min[\lambda \cdot \mathbf{x} + \sigma \cdot \text{abs}(\beta) + \kappa \cdot f_{c2}] \quad (22)$$

$$\beta = 180^\circ - \alpha_{3\max} - \alpha_{4\max} + \alpha_{3\min} + \alpha_{4\min}$$

$$\lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5, \lambda_6, \lambda_7, \lambda_8)$$

式中: λ 、 σ 和 κ 分别为3个目标函数的权重系数; λ_i 为各连杆结构尺寸的权重系数; $\alpha_{3\max}$ 、 $\alpha_{3\min}$ 分别为 α_3 的最大值和最小值; $\alpha_{4\max}$ 和 $\alpha_{4\min}$ 分别为 α_4 的最大值和最小值。

权重系数取值如表1所示。

表1 权重系数取值

权重系数	系数值	权重系数	系数值
λ_1	1	λ_6	1
λ_2	1	λ_7	1
λ_3	0	λ_8	1
λ_4	10	σ	50 000
λ_5	1	κ	1

为在优化迭代计算中尽快形成合理的初始传动机构,并保证传动机构在运动过程中始终有较好的力传递性能,设定如下约束条件:

$$\begin{cases} 10^\circ - \alpha_{9\min} \leq 0 \\ \alpha_{9\max} - 170^\circ \leq 0 \\ 10^\circ - \alpha_{10\min} \leq 0 \\ 185^\circ - \gamma_{\max} \leq 0 \\ 5^\circ - \alpha_{7\min} \leq 0 \\ 20 - x_1 \leq 0 \\ 30 - x_2 \leq 0 \\ 20 - x_3 \leq 0 \end{cases} \quad (23)$$

式中: $\alpha_{7\min}$ 、 $\alpha_{9\min}$ 、 $\alpha_{10\min}$ 分别对应机械臂完全折叠状态

时相应角度的值; $\alpha_{9_{\max}}$ 、 γ_{\max} 分别对应机械臂水平全展开状态时相应角度的值。

本文采用复合形法来优化设计变量,这是一种基于非梯度的优化方法,最早由 BOX^[8] 提出。在优化初始阶段随机搜索组成可行复合传动机构的变量值,然后进行迭代优化。在优化设计中很难一次得到理想的优化结果,当约束条件限制较大时,会无法得到可行解,当约束条件限制较小时,无法得到较好的力传递性能,所以需要不断调整约束值,直到得到符合期望的结果。本文根据式(23)给出的最终约束条件,得到一组比较理想的优化结果,表 2 所示为优化设计参数。

表 2 优化设计参数

设计变量	初始值范围/mm	优化值/mm	圆整结果/mm
x_1	20~65	28.73	29
x_2	20~80	47.82	48
x_3	20~40	25.12	25
x_4	50~90	71.48	71
x_5	70~130	113.59	114
x_6	50~130	112.60	113
x_7	360~430	402.99	403
x_8	145~200	165.43	165
S	125	125	125

2 运动学建模

为进行机械臂给定运动轨迹的动力学仿真分析,需进行机械臂的运动学建模。目前常用的运动学建模分析方法主要是基于连杆坐标系和齐次变换的 D-H 法^[9],以及基于指数积运算的螺旋理论法^[10],后者通过几何描述可以更加直观地体现机器人的物理特征,特别是在求解多自由度机器人的逆运动学时,具有极大的便利性。本文采用螺旋理论法建立机械臂的运动学模型。

2.1 正运动学分析

基于 D-H 法建立的六自由度液压机械臂连杆坐标系如图 6 所示,图 6 中, θ_g 为各关节的关节角, $g=1, 2, \dots, 6$; d_1 、 a_2 、 a_3 、 d_4 和 d_6 分别为机械臂对应连杆的尺寸参数; $O_0-x_0z_0$ 为基坐标系; $O_g-x_gy_gz_g$ 分别为各连杆坐标系, $g=1, 2, \dots, 6$ 。

基于螺旋理论仅需建立基坐标系、各关节旋转轴和末端工具坐标系,基于螺旋理论的机械臂旋转轴坐标系如图 7 所示,图 7 中, $O-xyz$ 为基坐标系,点 O 为坐标原点,点 P 为机械臂末端点, $P-noa$ 为工具坐标系。

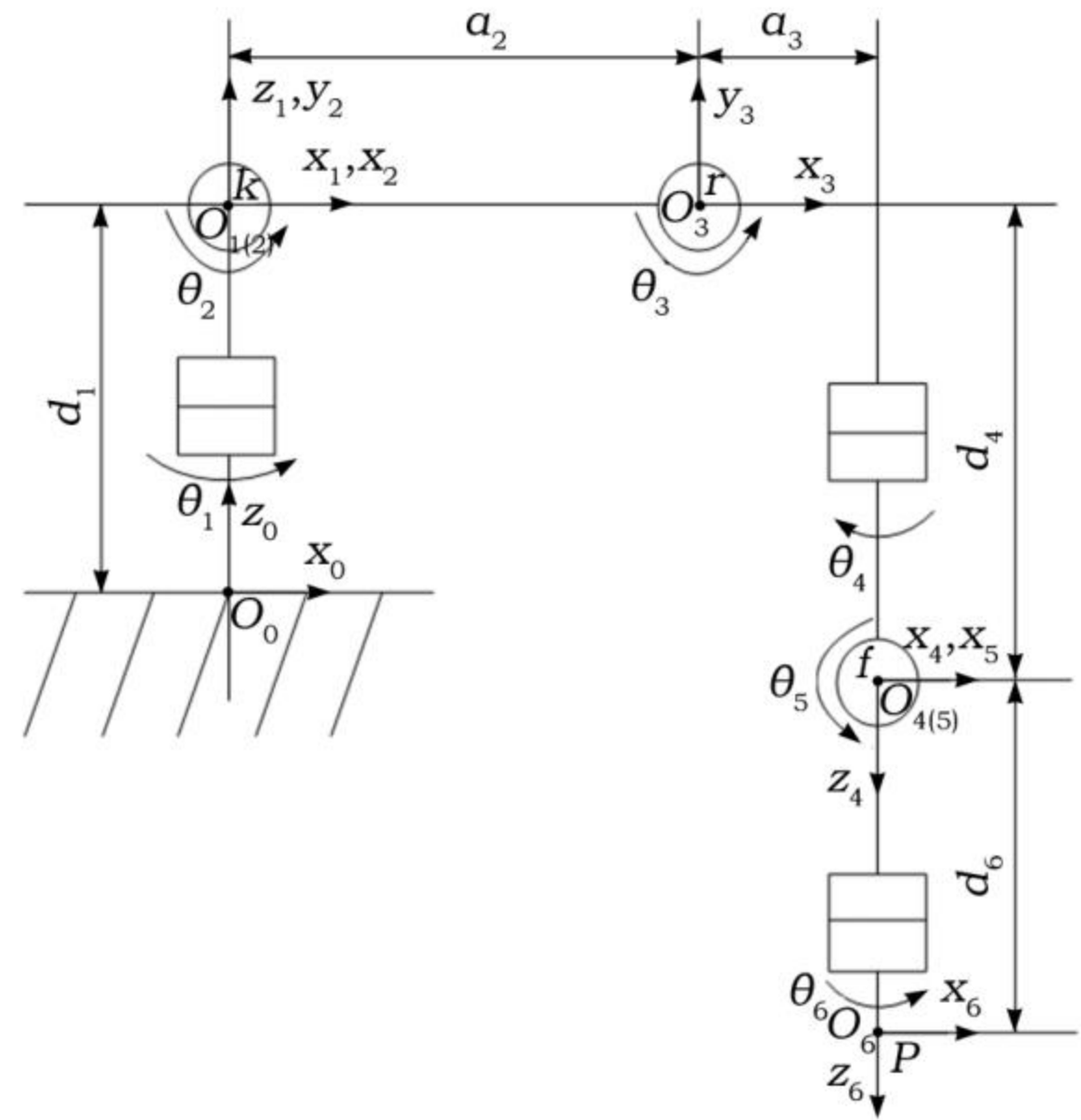


图 6 基于 D-H 法建立的六自由度液压机械臂连杆坐标系

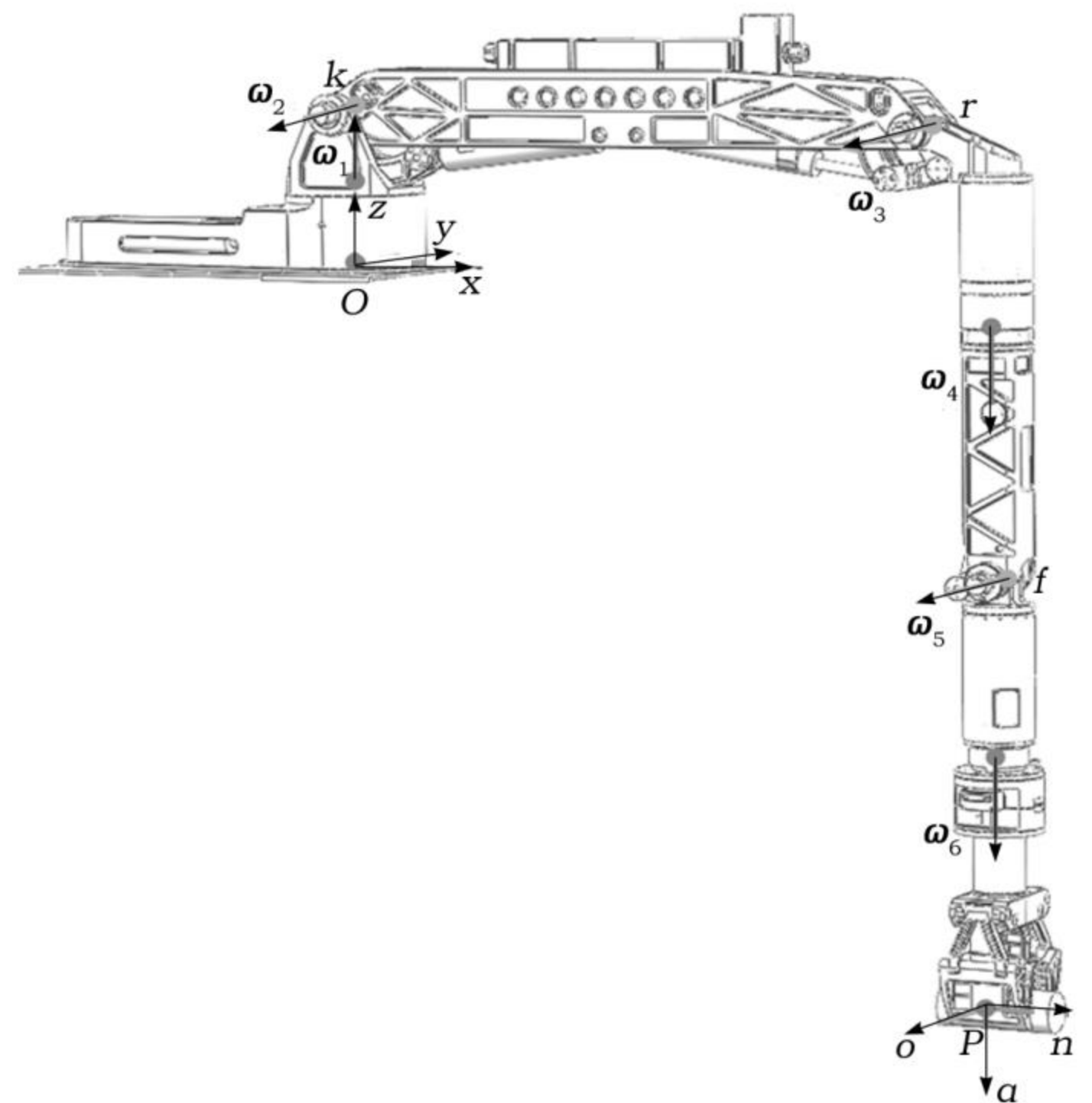


图 7 基于螺旋理论的机械臂旋转轴坐标系

按照图 6 和图 7 的初始位姿参数和各关节的旋转方向,设定各关节旋转轴单位方向矢量分别为:

$$\omega_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\omega_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\omega_3 = \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}\boldsymbol{\omega}_4 &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix} \\ \boldsymbol{\omega}_5 &= \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix} \\ \boldsymbol{\omega}_6 &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix}\end{aligned}\quad (24)$$

选定初始姿态旋转轴上点的位置矢量分别为:

$$\begin{aligned}\boldsymbol{k} &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ d_1 \end{bmatrix} \\ \boldsymbol{r} &= \begin{bmatrix} a_2 \\ 0 \\ d_1 \end{bmatrix} \\ \boldsymbol{f} &= \begin{bmatrix} a_2+a_3 \\ 0 \\ d_1-d_4 \end{bmatrix}\end{aligned}\quad (25)$$

式中: \boldsymbol{k} 为 $\boldsymbol{\omega}_1$ 和 $\boldsymbol{\omega}_2$ 交点的位置矢量; \boldsymbol{r} 为 $\boldsymbol{\omega}_3$ 上点的位置矢量; \boldsymbol{f} 为 $\boldsymbol{\omega}_4$ 、 $\boldsymbol{\omega}_5$ 和 $\boldsymbol{\omega}_6$ 三轴交点的位置矢量。

选定点的运动旋量坐标 $\boldsymbol{\xi}$ 为一6行的列向量,对于旋转关节可根据下式计算:

$$\boldsymbol{\xi}_g = \begin{bmatrix} \boldsymbol{v}_g \\ \boldsymbol{\omega}_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\boldsymbol{\omega}_g \times \boldsymbol{q}_g \\ \boldsymbol{\omega}_g \end{bmatrix}\quad (26)$$

式中: $\boldsymbol{\omega}_g$ 为旋转轴的方向矢量; \boldsymbol{q}_g 为相应旋转轴上选定点的位置矢量; \boldsymbol{v}_g 为以单位角速度绕 $\boldsymbol{\omega}_g$ 旋转时的线速度。

由图7可知, $O-xyz$ 为基坐标系,点 O 为坐标原点,点 P 为机械臂末端点, $P-noa$ 为工具坐标系, P 点坐标为 $(a_2+a_3 \ 0 \ d_1-d_4-d_6)^T$,机械臂末端的初始位姿 $\boldsymbol{H}_{ST}(0)$ 为:

$$\begin{aligned}\boldsymbol{H}_{ST}(0) &= \boldsymbol{T}_{XYZ} \begin{pmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{pmatrix} \\ \boldsymbol{R}_n(\pi) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_2+a_3 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & d_1-d_4-d_6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}\end{aligned}\quad (27)$$

式中: p_x 、 p_y 和 p_z 分别为点 P 在基坐标系中的坐标; \boldsymbol{T}_{XYZ} 为点 P 的位置姿态矩阵; $\boldsymbol{R}_n(\pi)$ 为工具坐标系 $P-noa$ 绕 n 轴旋转 180° 的旋转矩阵。

由Rodrigues公式可得到旋转矩阵的指数表达式,即:

$$\boldsymbol{e}^{\hat{\boldsymbol{\omega}}_g \theta} = \boldsymbol{I}_3 + \hat{\boldsymbol{\omega}}_g \sin \theta + \hat{\boldsymbol{\omega}}_g^2 (1 - \cos \theta)\quad (28)$$

式中: \boldsymbol{I}_3 为单位阵; θ 为旋转角度; $\hat{\boldsymbol{\omega}}_g$ 为 $\boldsymbol{\omega}_g$ 的反对称阵。

根据旋量理论,齐次变换矩阵可以写成等价的运动旋量 $\hat{\boldsymbol{\xi}}$ 的指数积形式,当 $\boldsymbol{\omega}_g \neq 0$ 时的指数积形式为:

$$\boldsymbol{e}^{\hat{\boldsymbol{\xi}}_g \theta} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{e}^{\hat{\boldsymbol{\omega}}_g \theta} & (\boldsymbol{I}_3 - \boldsymbol{e}^{\hat{\boldsymbol{\omega}}_g \theta}) (\boldsymbol{\omega}_g \times \boldsymbol{v}_g) + \boldsymbol{\omega}_g \boldsymbol{\omega}_g^T \boldsymbol{v}_g \theta \\ 0 & 1 \end{bmatrix}\quad (29)$$

对各个关节,由式(26)、式(28)和式(29)可分别计算出相应旋转运动的运动旋量指数积 $\boldsymbol{e}^{\hat{\boldsymbol{\xi}}_g \theta}$,代入式(28)得到如下正运动学方程,即:

$$\boldsymbol{H}_{ST}(\theta) = \prod_{g=1}^6 \boldsymbol{e}^{\hat{\boldsymbol{\xi}}_g \theta} \boldsymbol{H}_{ST}(0)\quad (30)$$

式中: $\boldsymbol{H}_{ST}(\theta)$ 为移动后末端点的位姿。

令:

$$\boldsymbol{H}_{ST}(\theta) = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}\quad (31)$$

其中:

$$\begin{aligned}n_x &= (c_1 c_{23} c_4 c_5 + s_1 s_4 c_5 - c_1 s_{23} s_5) c_6 - (c_1 c_{23} s_4 - s_1 c_4) s_6 \\ o_x &= -(c_1 c_{23} c_4 c_5 + s_1 s_4 c_5 - c_1 s_{23} s_5) s_6 - (c_1 c_{23} s_4 - s_1 c_4) c_6 \\ a_x &= (c_1 c_{23} c_4 + s_1 s_4) s_5 + c_1 s_{23} c_5 \\ p_x &= a_2 c_1 c_2 + a_3 c_1 c_{23} + d_4 c_1 s_{23} + d_6 (c_1 c_{23} c_4 s_5 + s_1 s_4 s_5 + c_1 s_{23} c_5) \\ n_y &= (s_1 c_{23} c_4 c_5 - c_1 s_4 c_5 - s_1 s_{23} s_5) c_6 - (s_1 c_{23} s_4 + c_1 c_4) s_6 \\ o_y &= -(s_1 c_{23} c_4 c_5 - c_1 s_4 c_5 - s_1 s_{23} s_5) s_6 - (s_1 c_{23} s_4 + c_1 c_4) c_6 \\ a_y &= (s_1 c_{23} c_4 - c_1 s_4) s_5 + s_1 s_{23} c_5 \\ p_y &= a_2 s_1 c_2 + a_3 s_1 c_{23} + d_4 s_1 s_{23} + d_6 (s_1 c_{23} c_4 s_5 - c_1 s_4 s_5 + s_1 s_{23} c_5) \\ n_z &= (s_{23} c_4 c_5 + c_{23} s_5) c_6 - s_{23} s_4 s_6 \\ o_z &= -(s_{23} c_4 c_5 + c_{23} s_5) s_6 - s_{23} s_4 c_6 \\ a_z &= s_{23} c_4 s_5 - c_5 \\ p_z &= d_1 + a_2 s_2 + a_3 s_{23} - d_4 c_{23} + d_6 (s_{23} c_4 s_5 - c_{23} c_5)\end{aligned}$$

式中: $s_g = \sin \theta_g$; $c_g = \cos \theta_g$; $s_{gj} = \sin(\theta_g + \theta_j)$; $c_{gj} = \cos(\theta_g + \theta_j)$, $g, j = 1, 2, 3, 4, 5, 6$ 。

2.2 逆运动学分析

Paden-Kahan子问题和Pardos-Gotor子问题是目前求解机械臂逆运动学的主要方法^[11],其主要思想是将复杂的多自由度机器人逆运动学分析分解为若干

个简单的子问题^[12],然后逐步解决。各关节变量设计运动范围如表3所示。

表3 各关节变量设计运动范围

关节变量	关节运动范围	关节变量	关节运动范围
θ_1	$(-90^\circ, 90^\circ)$	θ_4	$(-90^\circ, 90^\circ)$
θ_2	$(0, 180^\circ)$	θ_5	$(-90^\circ, 0)$
θ_3	$(-90^\circ, 90^\circ)$	θ_6	$(-180^\circ, 180^\circ)$

求解机械臂运动学逆解时,已知机械臂末端位姿 $\mathbf{H}_{ST}(\theta)$ 和初始位姿 $\mathbf{H}_{ST}(0)$,根据式(30)可得机械臂末端工具坐标系 $P-noa$ 相对基坐标系 $O-xyz$ 的总变换矩阵,即:

$$\mathbf{g}(\theta) = \prod_{g=1}^6 e^{\hat{\xi}_g \theta_g} = \mathbf{H}_{ST}(\theta) \mathbf{H}_{ST}^{-1}(0) \quad (32)$$

式中: $\mathbf{H}_{ST}(\theta)$ 为末端位姿矩阵; $\mathbf{H}_{ST}^{-1}(0)$ 为 $\mathbf{H}_{ST}(0)$ 的逆矩阵。

由于 f 为 ω_4 、 ω_5 和 ω_6 三轴的交点,可以消除这些轴关节的耦合,从而消掉相应的变换矩阵,故 f 移动后的位姿为:

$$\mathbf{P}_f(\theta) = \prod_{g=1}^3 e^{\hat{\xi}_g \theta_g} \mathbf{f} = \prod_{g=1}^6 e^{\hat{\xi}_g \theta_g} \mathbf{f} = \mathbf{g}(\theta) \mathbf{f} = \begin{bmatrix} p_x - a_x d_6 \\ p_y - a_y d_6 \\ p_z - a_z d_6 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (33)$$

而绕 ω_2 、 ω_3 的转动位于同一平面,可由式(33)直接计算出 θ_1 的值,即:

$$\theta_1 = \text{artan} \left(\frac{p_y - a_y d_6}{p_x - a_x d_6} \right) \quad \theta_1 \in (-90^\circ, 90^\circ) \quad (34)$$

求出 θ_1 后,式(33)可改写为:

$$\prod_{g=2}^6 e^{\hat{\xi}_g \theta_g} \mathbf{f} = e^{-\hat{\xi}_1 \theta_1} \mathbf{H}_{ST}(\theta) \mathbf{H}_{ST}^{-1}(0) \mathbf{f} \quad (35)$$

因 θ_4 、 θ_5 、 θ_6 对 f 位置无影响,故式(35)转化为:

$$e^{\hat{\xi}_2 \theta_2} e^{\hat{\xi}_3 \theta_3} \mathbf{f} = e^{-\hat{\xi}_1 \theta_1} \mathbf{H}_{ST}(\theta) \mathbf{H}_{ST}^{-1}(0) \mathbf{f} \quad (36)$$

其中:

$$e^{\hat{\xi}_2 \theta_2} e^{\hat{\xi}_3 \theta_3} \mathbf{f} = \begin{bmatrix} p_x c_1 + p_y s_1 - a_y d_6 s_1 - a_x d_6 c_1 \\ p_y c_1 - p_x s_1 + a_x d_6 s_1 - a_y d_6 c_1 \\ p_z - a_z d_6 \end{bmatrix}$$

式(36)表示一个绕两平行轴旋转的问题,为 Pados-Gotor 子问题的第四类,即 PG4,其变换示意如图8所示。

令 $\varphi = \text{artan}(d_4/x_3)$,考虑到机械臂的几何结构,则当 $\theta_3 \leq \varphi$ 时有唯一解,即中间点为点 d 时的解;当 $\theta_3 > \varphi$ 时,存在两组解,即中间点为点 d 和点 c 时的解。

根据式(36)可得:

$$\theta_2^{01} = \text{artan}[\boldsymbol{\omega}_2^T(\mathbf{n}_1' \times \mathbf{v}_2'), \mathbf{n}_1'^T \cdot \mathbf{v}_2'] \quad (37)$$

$$\theta_3^{01} = \text{artan}[\boldsymbol{\omega}_3^T(\mathbf{u}_3' \times \mathbf{n}_2'), \mathbf{u}_3'^T \cdot \mathbf{n}_2'] \quad (38)$$

$$\theta_2^{02} = \text{artan}[\boldsymbol{\omega}_2^T(\mathbf{m}_1' \times \mathbf{v}_2'), \mathbf{m}_1'^T \cdot \mathbf{v}_2'] \quad (39)$$

$$\theta_3^{02} = \text{artan}[\boldsymbol{\omega}_3^T(\mathbf{u}_3' \times \mathbf{m}_2'), \mathbf{u}_3'^T \cdot \mathbf{m}_2'] \quad (40)$$

式中: θ_2^{01} 、 θ_3^{01} 与 θ_2^{02} 、 θ_3^{02} 分别对应于中间点为点 d 与点 c 的解,矢量 \mathbf{n}_1' 、 \mathbf{n}_2' 、 \mathbf{v}_2' 、 \mathbf{u}_3' 、 \mathbf{m}_1' 、 \mathbf{m}_2' 分别为矢量 \mathbf{n}_1 、 \mathbf{n}_2 、 \mathbf{v}_1 、 \mathbf{u}_3 、 \mathbf{m}_1 、 \mathbf{m}_2 在垂直于两平行轴的平面上的投影,且 $\mathbf{n}_1 = \mathbf{d} - \mathbf{r}$, $\mathbf{n}_2 = \mathbf{d} - \mathbf{k}$, $\mathbf{v}_2 = \mathbf{k}_2 - \mathbf{r}$, $\mathbf{u}_3 = \mathbf{f} - \mathbf{k}$, $\mathbf{m}_1 = \mathbf{c} - \mathbf{r}$, $\mathbf{m}_2 = \mathbf{c} - \mathbf{k}$ 。

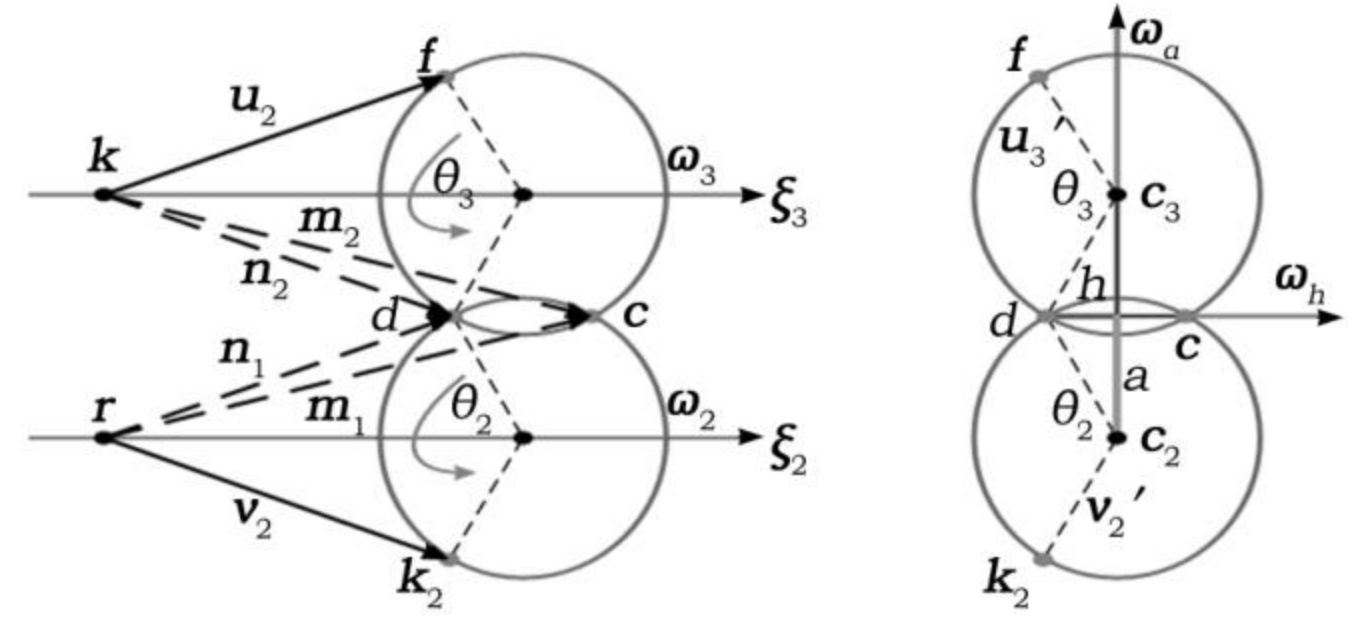


图8 PG4 变换示意

点 d 和点 c 的位置矢量 \mathbf{d} 和 \mathbf{c} 可根据下式计算:

$$\mathbf{d} = \mathbf{c}_2 + a\boldsymbol{\omega}_a - h\boldsymbol{\omega}_h \quad (41)$$

$$\mathbf{c} = \mathbf{c}_2 + a\boldsymbol{\omega}_a + h\boldsymbol{\omega}_h \quad (42)$$

式中: $\mathbf{c}_2 = \mathbf{r} + \boldsymbol{\omega}_2 \boldsymbol{\omega}_2^T \mathbf{v}_2$; $\boldsymbol{\omega}_a$ 为矢量 $\mathbf{c}_3 - \mathbf{c}_2$ 的单位方向矢量,而 $\mathbf{c}_3 = \mathbf{k} + \boldsymbol{\omega}_3 \boldsymbol{\omega}_3^T \mathbf{u}_3$; $\boldsymbol{\omega}_h$ 为矢量 $\mathbf{d} - \mathbf{c}$ 的单位方向矢量,且有 $\boldsymbol{\omega}_h = \boldsymbol{\omega}_2 - \boldsymbol{\omega}_a$, a 、 h 为相应方向上的系数。

$$a = \frac{\|\mathbf{c}_3 - \mathbf{c}_2\|^2 - \|\mathbf{u}_3'\|^2 + \|\mathbf{v}_2'\|^2}{2\|\mathbf{c}_3 - \mathbf{c}_2\|} \quad (43)$$

$$h = \sqrt{\|\mathbf{v}_2'\|^2 - a^2} \quad (44)$$

解出 θ_2 、 θ_3 后,可以得到:

$$\prod_{g=4}^6 e^{\hat{\xi}_g \theta_g} \mathbf{p} = \prod_{g=3}^1 e^{-\hat{\xi}_g \theta_g} \mathbf{H}_{ST}(\theta) \mathbf{H}_{ST}^{-1}(0) \mathbf{p} \quad (45)$$

$$\text{令 } \mathbf{k}_3 = \prod_{g=3}^1 e^{-\hat{\xi}_g \theta_g} \mathbf{H}_{ST}(\theta) \mathbf{H}_{ST}^{-1}(0) \mathbf{p}$$

式中: \mathbf{p} 为点 P 的位置矢量。

由于点 P 位于旋转轴 ω_4 上,故 θ_6 对式(45)无影响,则式(45)可转化为:

$$e^{\hat{\xi}_4 \theta_4} e^{\hat{\xi}_5 \theta_5} \mathbf{p} = \mathbf{k}_3 \quad (46)$$

其中:

$$\mathbf{k}_3 = \begin{bmatrix} a_2 + p_x c_1 c_{23} + p_y s_1 c_{23} + p_z s_{23} - d_1 s_{23} - a_2 c_3 \\ p_y c_1 - p_x s_1 \\ d_1 - p_x c_1 s_{23} - p_y s_1 s_{23} + p_z c_{23} - d_1 c_{23} + a_2 s_3 \end{bmatrix}$$

式(46)表示一个绕两交叉轴旋转的问题,为 Paden-Kahan 子问题的第二类,即 PK2,若记: $\mathbf{k}_3 =$

$[X_3 \ Y_3 \ Z_3]^T$, 由于 $\theta_5 \in (0, 90^\circ)$, 可解得一组唯一解, 即:

$$\theta_4 = \text{artan2}[Y_3, (a_2 + a_3) - X_3] \quad (47)$$

$$\theta_5 = \text{artan2}[\sqrt{d_6^2 - (d_1 - d_4 - Z_3)^2}, Z_3 - (d_1 - d_4)] \quad (48)$$

借助矢量 $\mathbf{o} = [0 \ 0 \ 0 \ 1]^T$, 则有:

$$e^{\hat{\xi}_6 \theta_6} \mathbf{o} = \prod_{g=5}^1 e^{-\hat{\xi}_g \theta_g} \mathbf{H}_{ST}(\theta) \mathbf{H}_{ST}^{-1}(0) \mathbf{o} \quad (49)$$

令 $\mathbf{k}_4 = \prod_{g=5}^1 e^{-\hat{\xi}_g \theta_g} \mathbf{H}_{ST}(\theta) \mathbf{H}_{ST}^{-1}(0) \mathbf{o}$, 则式(49)可改

写为:

$$e^{\hat{\xi}_6 \theta_6} \mathbf{o} = \mathbf{k}_4 \quad (50)$$

式(50)表示一个绕单轴旋转的问题, 为 Paden-Kahan 子问题的第一类, 即 PK1, 若记 $\mathbf{k}_4 = [X_4 \ Y_4 \ Z_4]^T$, 可解得:

$$\theta_6 = \text{artan2}(Y_4, a_1 + a_2 + a_3 - X_4) \quad (51)$$

至此, 求出六自由度液压机械臂全部解析形式关节逆解, 为机械臂的运动学、动力学数值分析和仿真奠定基础。

3 实验仿真与分析

为验证复合连杆机构优化和运动学模型的正确性, 将优化结果作为关节连杆结构尺寸, 在 SolidWorks 软件中建立了液压机械臂的三维模型, 并通过 PARASOLID 数据格式将模型导入多体动力学仿真软件 ADAMS 环境中进行虚拟样机仿真实验。为减少导入后零件的数量, 提高仿真效率, 在 SolidWorks 软件中将同属于一个构件的所有零件进行了合并, 例如机械臂大臂中的液压阀阀块相对于大臂静止, 同属于一个构件, 可以进行合并。机械臂在水平全展开状态负重时第二关节驱动力矩最大, 而在向折叠状态运动时, 直线油缸驱动力逐渐减小并过渡到拉力状态。关节3 连杆结构尺寸参数如图9所示, 图9中, 点 O_3 、点 A_3 、点 B_3 、点 C_3 和点 D_3 为各转动副中心, S_3 为直线油缸结构参数, $y_1 \sim y_7$ 为各连杆结构尺寸, y_8 为直线油缸行程。参数值如表4所示。

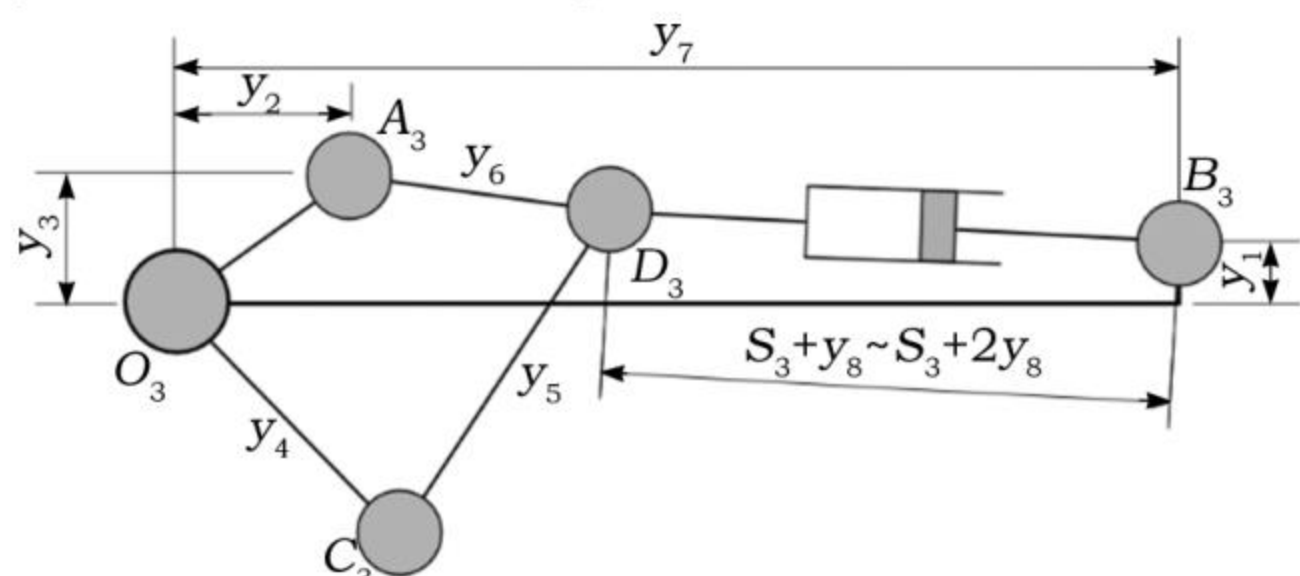


图9 关节3 连杆结构尺寸参数

表4 关节3 连杆结构尺寸参数值

设计变量	初始值/mm	优化值/mm	参数值/mm
y_1	0~30	7.58	8
y_2	40~80	53.87	54
y_3	20~40	30.53	31
y_4	40~80	55.95	56
y_5	70~130	105.78	106
y_6	50~130	74.56	75
y_7	360~430	398.38	398
y_8	145~200	159.63	160
S_3	110	110	110

为获取关节驱动油缸在大范围运动空间中输出力的变化曲线, 在 MATLAB 软件中规划了图10所示的机械臂末端运动轨迹, 并通过运动学逆解获得各关节位移变化曲线, 导入到 ADAMS 环境中作为机械臂关节位移驱动进行动力学仿真。

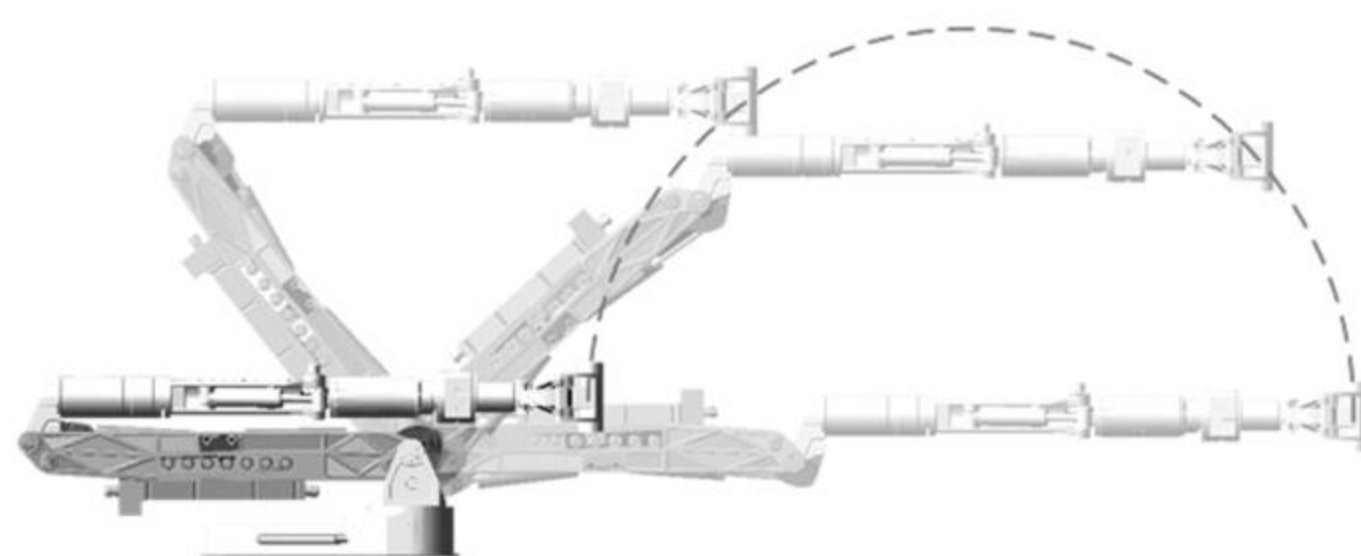


图10 机械臂末端运动轨迹

在动力学仿真中, 机械臂末端接驳了液压夹手, 并夹持了 20 kg 负载, 水平展开后臂展达到 2 m, 根据实际情况, 对机械臂各部件的质量进行赋值, 不考虑关节摩擦, 关节驱动油缸位移和关节驱动油缸输出力分别如图11和图12所示。

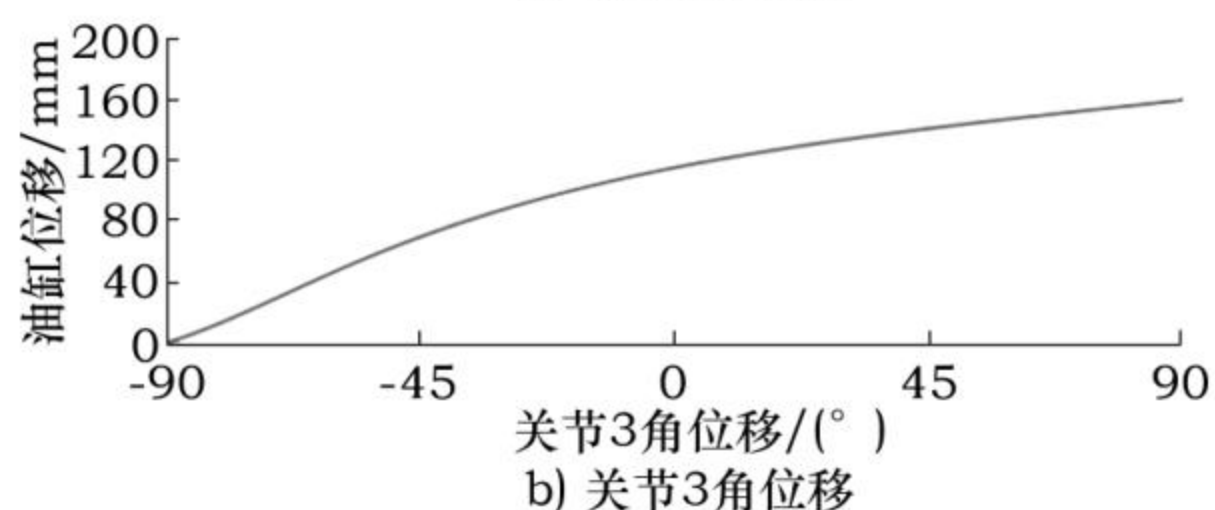
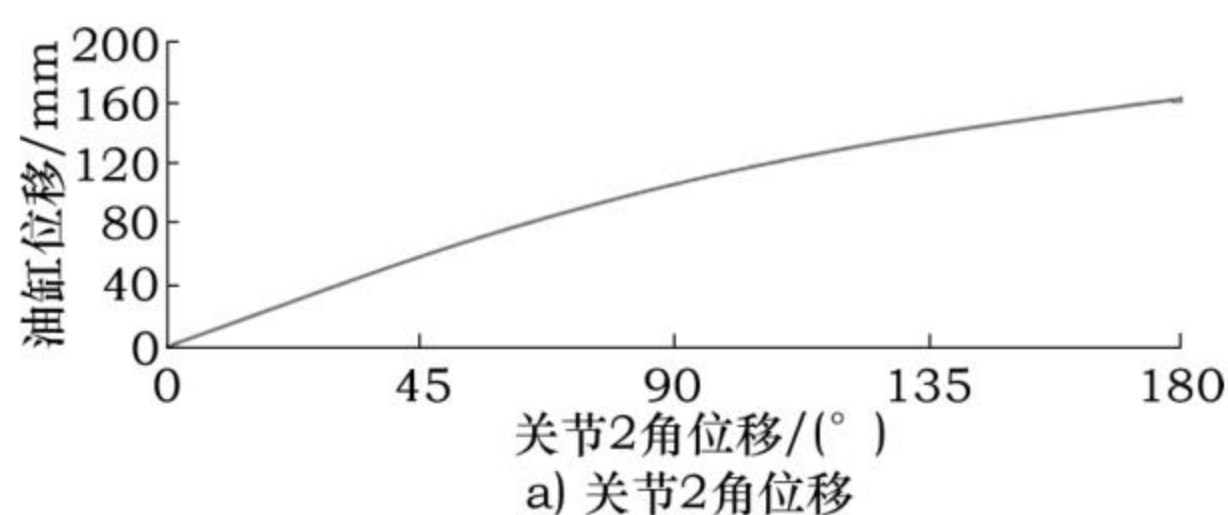


图11 关节驱动油缸位移

由图11可知, 关节2和关节3运动范围均达到了 180° , 机械臂可实现水平全展开和全折叠状态。由图

12可知,机械臂由水平全展开状态运动到全折叠状态过程中,关节2和关节3驱动油缸输出力在5 000~11 000 N范围内平滑变化,仅在关节2的150°~180°运动空间内有较大变化,而在该区间内机械臂基本处于折叠存放状态而非工作状态。仿真结果证明了通过优化设计后的复合连杆传动机构不仅具有良好的力传递性能,而且实现了机械臂的较大工作空间和高度紧凑性要求。

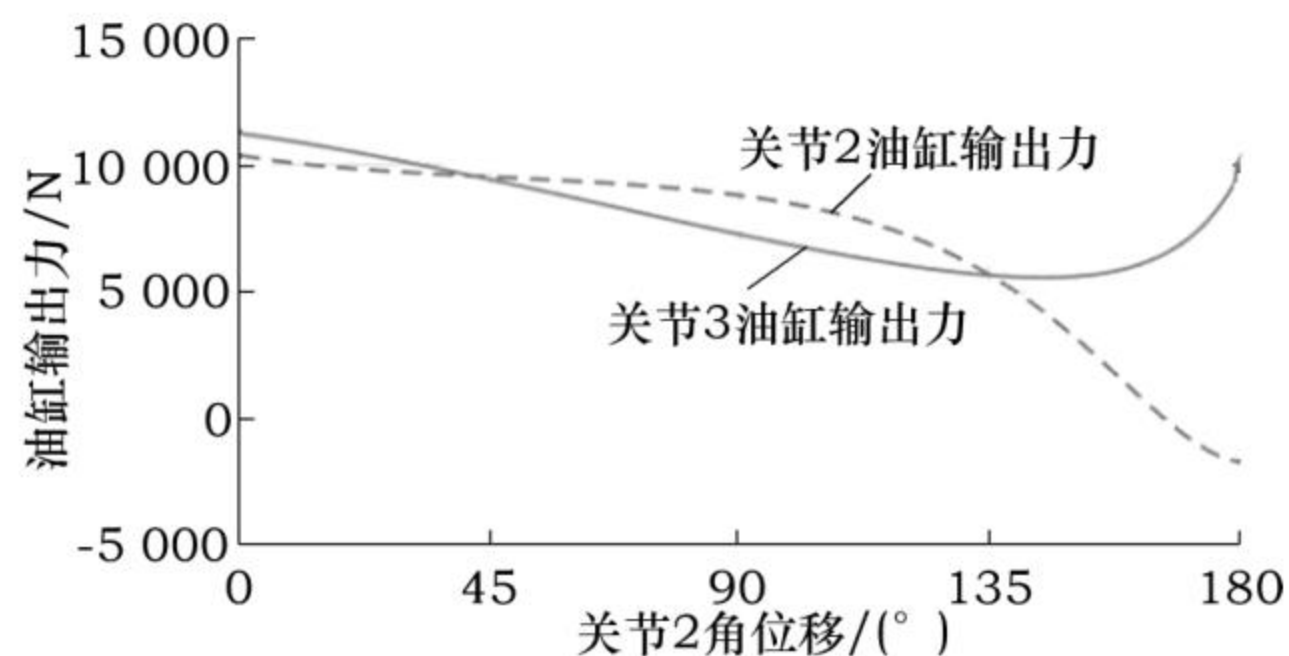


图12 关节驱动油缸输出力

4 结语

本文采用直线油缸驱动的复合连杆传动机构,显著增加了液压机械臂关节的运动范围,实现了机械臂的较大工作空间和全折叠存放要求,并通过多目标优化设计保证了复合连杆机构的良好力传递性能和高度紧凑性。基于螺旋理论的指数积方法建立了六自由度机械臂的正逆运动学模型,将仿真中的机械臂末端轨迹分解为关节空间中的各关节运动轨迹。在ADAMS软件中建立了液压机械臂的虚拟样机仿真模型,对机械臂负重工况下从水平全展开状态到全折叠状态的运动过程进行了动力学仿真,验证了复合连杆传动机构优化设计和运动学模型的正确性。

参考文献:

- [1] 王田苗,陶永.我国工业机器人技术现状与产业化发展战略[J].机械工程学报,2014,50(9):1-13.
- [2] 曹少华,张春晓,王广洲,等.智能水下机器人的发展现状及在军事上的应用[J].船舶工程,2019,41(2):79-84.
- [3] PICARDI G, CHELLAPURATH M, IACOPONI S, et al. Bioinspired underwater legged robot for seabed exploration with low environmental disturbance [J]. Science Robotics, 2020,5(42):1012.
- [4] KATZSCHMANN R K, DELPRETO J, MACCURDY R, et al. Exploration of underwater life with an acoustically controlled soft robotic fish [J]. Science Robotics, 2018, 3(16):3449.

- [5] 王凤祥,张志杰,陈昊泽.六自由度机械臂系统设计与控制方式研究[J].电子测量技术,2021,44(4):1-8.
- [6] 苗登雨,孙玉萍,周新,等.基于刚柔耦合模型的重载搬运机器人动力学仿真分析与结构优化[J].现代制造工程,2017(12):38-42.
- [7] 杨洪涛,程晶晶,杨鹏,等.自驱动关节臂测量机结构设计及仿真分析[J].现代制造工程,2022(1):36-43.
- [8] BOX M J.A New Method of Constrained Optimization and a Comparison With Other Methods[J].Computer J,1965(1):1-8.
- [9] CRAIG J J.Introduction to Robotics: Mechanics and Control [M]. Upper Saddle River, NJ: Pearson Education, Inc, 1986.
- [10] 敖天翔,刘满禄,张华,等.结合旋量和代数方法的工业机械臂逆运动学解法[J].机械科学与技术,2017,36(8):1224-1229.
- [11] PARDOS-GOTOR J M.Screw Theory in Robotics: An Illustrated and Practicable Introduction to Modern Mechanics [M]. Boca Raton, FL: CRC Press, 2021.
- [12] PADEN B E.Kinematics and Control of Robot Manipulators [D]. Berkeley, CA: University of California, Berkeley, 1985.

作者简介:李明,工程师,主要研究方向为工业流程控制。

荣学文,通信作者,教授,博士生导师,主要研究方向为仿生机器人、特种机器人、液压传动与伺服控制。

E-mail: lm650811@163.com

收稿日期:2022-12-08

欢迎订阅 2024 年《现代制造工程》月刊

《现代制造工程》创刊于1979年,是机械制造领域科技-学术期刊,国际标准大16开本,目前是中文核心期刊、中国科技核心期刊、中国科技论文统计源期刊等。

主要栏目有:试验研究,机器人技术,增材制造,新材料及其制备技术,工业工程,企业信息化,数控加工技术,车辆工程制造技术,制造技术/工艺装备,设备设计/诊断维修/再制造。

《现代制造工程》面向国内外公开发行人,全国各地邮局均可订阅,国内邮发代号:2-431,定价15元/期,180元/年(12期)。

联系电话:010-67126028