

DOI: 10.3969/j.issn.1001-4551.2017.10.012

五自由度电液伺服机械手运动控制系统研制*

刘湘琪¹, 任 旭¹, 蔡增伟², 应炎鑫³

(1. 杭州电子科技大学 机械工程学院, 浙江 杭州 310018; 2. 上海汽车制动系统有限公司, 上海 201821; 3. 浙江畅尔智能装备股份有限公司, 浙江 缙云 321404)

摘要: 针对电液伺服机械手在实际应用过程中存在运动精度低、运动平稳性差, 控制模型存在非线性的问题, 利用电液伺服机械手具有负载能力强, 能量密度大的优势, 对机械手运动控制系统进行了研制。首先采用闭链矢量法对 TCP 进行了准确的位置矢量表示; 其次, 引入 5 阶 B 样条插值方法和改进型粒子群优化算法, 得到了连续的 TCP 空间位移轨迹, 实现了 TCP 位置的最优轨迹规划; 最后, 引入常规 PID, IL-PID, NDI 等控制策略, 采用分级控制管理方案, 实现了机械手各关节的运动控制, 并利用 5 自由度电液伺服机械手进行了仿真和实际实验。研究结果表明: 该运动控制系统能够准确地控制机械手在高负载, 高精度要求下进行规定运动。

关键词: 电液伺服机械手; 闭链矢量; 轨迹优化; 同步驱动

中图分类号: TH39; TP24

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2017)10-1144-06

Five degrees of freedom electrohydraulic servo manipulator motion control system

LIU Xiang-qi¹, REN Xu¹, CAI Zeng-wei², YING Yan-xin³

(1. School of Mechanical Engineering, Hanzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China;
2. Shanghai Automotive Brake Systems Co., Ltd., Shanghai 201821, China;
3. Zhejiang CHR Intelligent Equipment Co., Ltd., Jinyun 321404, China)

Abstract: Aiming at the problems that the electro-hydraulic servo manipulator poor in motion precision and stability and the control model is nonlinear, the advantages of strong load capacity and large energy density was considered, and the manipulator motion control system was designed. Firstly, the position vector of TCP was showed by the method of closed chain vector; Secondly, five order B-spline interpolation method and improved particle swarm optimization algorithm were introduced to realize the optimal trajectory planning of TCP position; Finally, adopting grading control management solution, with conventional control strategy of PID, IL - PID, NDI, was used to realize the manipulator motion control of each joint. With simulation and experimental done in 5DOF manipulator, the results indicate that the motion control system can realize accurately control of designated movement in requirement of high load and high precision.

Key words: electro-hydraulic servo manipulator; closed-chain vector; trajectory optimization; synchronous drive

0 引 言

由于液压源的能量密度较大, 电液伺服机械手被广泛地应用于各种高负载搬运场合。然而液压驱动机构

带来极大的负载能力的同时, 也导致了运动精度低、平稳性差、轨迹控制较难等问题。在这样的实际需求下, 研究实现电液伺服机械手的高负载, 高精度, 高效率, 高平稳性的运动控制系统, 是具有很强的实际意义的。

收稿日期: 2017-05-17

基金项目: 浙江省公益技术应用研究资助项目 (2017C31017)

作者简介: 刘湘琪 (1975-), 女, 浙江杭州人, 博士研究生, 主要从事机械设计及理论方面的研究。E-mail: lixiangqi@hdu.edu.cn

在机械手运动控制方面,许多国内外学者进行了广泛的研究。如 ALI 等^[1]设计的情绪学习控制器,该控制器通过针对阀控类电液伺服马达的空间定位控制问题,基于生物思考学习的能力,通过递归最小二乘法建立马达运动学模型,通过实验得到参数而设计的;HOSSAM 等^[2]采用 LS-SVM 方法辨识离线阀控液压马达系统,通过仿真得到控制器的实验参数和数据,研制了阀控液压马达系统的速度控制器;AKIRAA 等^[3]利用两连杆串联机构的运动学模型,进行实验仿真,通过实验结果研究了机械手末端机构的轨迹规划问题;周芳等人^[4]以 6 自由度检修机械手为实验平台,通过建立相应的运动学模型,研究了该机械手轨迹规划的安全性。与此同时,对于机械手末端机构轨迹规划的算法不断涌现;GASPARETTO A 等^[5]同时采用了 3 次样条插值函数与 5 阶 B 样条插值函数共同推导一种轨迹算法;TIAN Lian-fang 等^[6]采用基于 Hermite 的 3 次样条插值函数方法对规划机械手轨迹进行了研究。在上述研究中一部分针对液压伺服机械手运动学上的定位问题进行研究,另一部分针对机械手轨迹规划问题进行研究,缺乏统筹两者的控制系统方面的研究,因此开展机械手运动控制系统应用研究是非常必要的。

本研究将针对电液伺服机械手在实际生产应用中高负载,高精度的需求,控制模型的非线性问题,研制运动控制系统。引入闭链矢量模型进行运动学分析,构建机械手的运动学模型,引入 5 阶 B 样条插值方法和粒子群优化方法规划运动轨迹,引入多种控制策略实现驱动机构的运动控制,最后通过仿真计算和实际系统搭建以验证运动控制系统的合理性、可行性和可靠性。

1 系统工作原理与性能指标

1.1 系统工作原理

本研究的 5DOF 液压伺服机械手运动控制系统如图 1 所示。

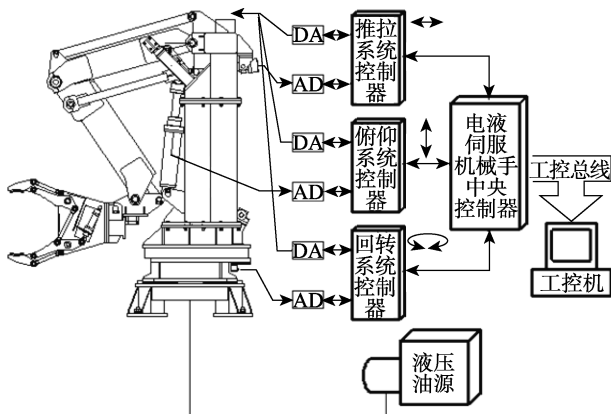


图 1 机械手运动控制系统结构图

液压伺服机械手本体包含 5 个部分:俯仰机构,推拉机构,机身回转机构,夹取机构构成及液压油源等。通过各运动机构的相互配合实现液压伺服机械手的 5 个自由度之间的运转。由于夹取机构的回转与夹爪开合这两个自由度对机械手 TCP 的空间位置影响较小,所以在设计机械手运动运动控制系统时重点考虑其余 3 个自由度。

控制系统采用以电液伺服机械手中央控制器为核心,结合推拉系统控制器,俯仰系统控制器,回转系统控制器,以信号转换模块(AD/DA)和工控总线与工控机相连接。采用以电液伺服机械手中央控制器和 3 个子系统控制器构成的两级控制器的结构模式,合理的数据处理资源的分配使得控制器能够更加快捷高效的对机械手运动进行控制。

1.2 主要性能指标

- (1) 俯仰同步精度 ± 0.5 mm;
- (2) 推拉同步精度 ± 0.3 mm;
- (3) 回转同步精度 ± 0.2 rad;
- (4) 驱动节点速度、行程、加速度、脉动要求。

机械手运动学约束条件具体数值要求如表 1 所示。

表 1 机械手运动学约束条件

约束项	各驱动节点约束值		
	1/mm	2/mm	3/°
行程	60	100	180
速度/s	200	200	378
加速度/s ²	200	200	367
脉动/s ³	467	467	367

1.3 机械手运动学模型

经实物模拟简化,将 5DOF 液压伺服机械手简化为运动模型图,如图 2 所示。

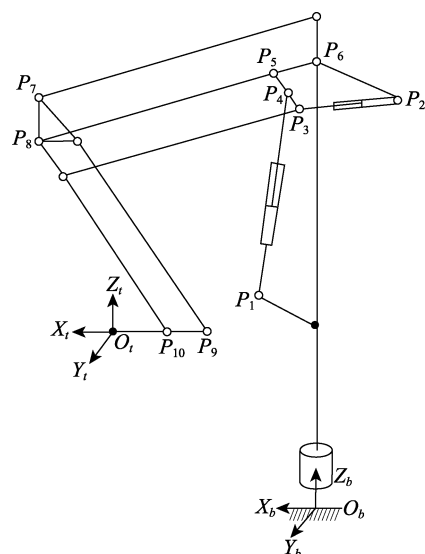


图 2 5DOF 电液伺服机械手简图

同时定义机械手实际工作坐标系 $O-XYZ$, 及各铰链连接点由 P_i 表示 ($i=1,2,\dots,10$)。在图中根据观察机械手的机身回转机构中心点与基坐标系 $O_b-X_bY_bZ_b$ 重合, 机械手夹取装置坐标系近似与机械手工具中心点重合。通过对机械手运行轨迹与机械手运动简图对比, 发现该机械手具有闭式连杆机构特性和非轴系驱动特性。由于这两个特性造成在使用 D-H 矩阵法求解其运动学问题时, 会出现非唯一解的情况, 为避免这一情况的发生。本研究采用闭链矢量法进行运动学问题求解。

根据杆件封闭矢量方程可得:

$$\overline{P_1P_4} + \overline{P_4P_3} = \overline{P_1P_2} + \overline{P_2P_3} \quad (1)$$

$$\overline{P_6P_5} + \overline{P_1P_6} = \overline{P_1P_4} + \overline{P_4P_5} \quad (2)$$

$$\overline{P_1P_{10}} + \overline{P_{10}P_8} = \overline{P_1P_6} + \overline{P_6P_8} \quad (3)$$

同时, 基于矢量平行或共线的特性可得:

$$\overline{P_4P_5} = \frac{[\overline{P_4P_5}]}{[\overline{P_3P_4}]} \overline{P_3P_4}, \overline{P_6P_8} = \frac{[\overline{P_6P_8}]}{[\overline{P_6P_5}, \overline{P_{10}P_8}]} \overline{P_6P_5}, \overline{P_{10}P_8} = \frac{[\overline{P_{10}P_8}]}{[\overline{P_3P_4}]} \overline{P_3P_4} \quad (4)$$

TCP 位置矢量与基座坐标系的矢量关系为:

$$\overline{O_bO_t} = \overline{O_bP_{10}} + \overline{P_{10}O_t} = \overline{O_bP_1} + \overline{P_1P_{10}} + \overline{P_{10}O_t} \quad (5)$$

式 (1~4) 代入式 (5), 并用欧拉公式展开可得:

$$\overline{O_bO_t} = \text{RE} \begin{bmatrix} l_1 \cos \theta_1 + (\lambda_2 + \lambda_1 \lambda_2 - \lambda_3) l_2 \cdot \cos \theta_2 - (\lambda_1 \lambda_2 - \lambda_3) l_3 \cos \theta_3 + (1 - \lambda_2) l_4 \cos \theta_4 - (\lambda_1 \lambda_2 - \lambda_3) l_5 \cos \theta_5 \\ l_1 \sin \theta_1 + (\lambda_2 + \lambda_1 \lambda_2 - \lambda_3) l_2 \cdot \sin \theta_2 - (\lambda_1 \lambda_2 - \lambda_3) l_3 \sin \theta_3 + (1 - \lambda_2) l_4 \sin \theta_4 - (\lambda_1 \lambda_2 - \lambda_3) l_5 \sin \theta_5 \end{bmatrix} + \text{IM} \begin{bmatrix} l_1 \sin \theta_1 + (\lambda_2 + \lambda_1 \lambda_2 - \lambda_3) l_2 \cdot \sin \theta_2 - (\lambda_1 \lambda_2 - \lambda_3) l_3 \sin \theta_3 + (1 - \lambda_2) l_4 \sin \theta_4 - (\lambda_1 \lambda_2 - \lambda_3) l_5 \sin \theta_5 \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中:

$$l_1 = |\overline{O_bP_1}|, l_2 = |\overline{P_1P_4}|, l_3 = |\overline{P_2P_3}|, l_4 = |\overline{P_1P_6}|,$$

$$l_5 = |\overline{P_1P_2}|, \theta_1 = \varphi_{O_bP_1}, \theta_2 = \varphi_{P_1P_4}, \theta_3 = \varphi_{P_2P_3},$$

$$\theta_4 = \varphi_{P_1P_6}, \theta_5 = \varphi_{P_1P_2}, \lambda_1 = \frac{[\overline{P_4P_5}]}{[\overline{P_3P_4}]},$$

$$\lambda_2 = \frac{[\overline{P_6P_8}]}{[\overline{P_6P_5}]}, \lambda_3 = \frac{[\overline{P_{10}P_8}]}{[\overline{P_3P_4}]}.$$

令 $r=[x, y, z]^T$, $x=[x_1, x_2, \theta]^T$, 则 TCP 空间位置 r 可根据式 (6) 表示为:

$$r = H_1 \cdot x + H_2 \quad (7)$$

式中:

$$H_1 = \begin{bmatrix} A \cos \theta_2 & B \cos \theta_3 & C_1 \cos \\ A \cos \theta_2 & B \cos \theta_3 & C_1 \sin \\ A \sin \theta_2 & B \sin \theta_3 & 0 \end{bmatrix};$$

$$H_2 = \begin{bmatrix} (Al_{20} \cos \theta_2 + Bl_{30} \cos \theta_3) \\ (Al_{20} \cos \theta_2 + Bl_{30} \cos \theta_3) \\ C_2 \end{bmatrix};$$

$$A = \lambda_2 + \lambda_1 \lambda_2 - \lambda_3, B = \lambda_1 \lambda_2 - \lambda_3;$$

$$C_1 = l_1 \cos \theta_1 + (1 - \lambda_2) l_4 \cos \theta_4 - B l_5 \cos \theta_5;$$

$$C_2 = l_1 \sin \theta_1 + (1 - \lambda_2) l_4 \sin \theta_4 - B l_5 \sin \theta_5;$$

$l_{20}, l_{30} - l_2, l_3$ 的初始长度。

2 系统搭建

2.1 系统硬件设计

(1) 控制模块的设计与选型: 采用工业 PLC 其 CPU 型号为 313C, 电源模块型号为 PS307 (2A), 位置检测模板 SM 338, 模拟量输出模块 SM332;

(2) 监控模块的设计与选型。采用工控机进行实时监控其型号: IPC-610MB-L;

(3) 通信板块设计与选型。采用型号为 CP5611 的模块进行通讯。

根据系统参数计算, 选型结果如表 2 所示。

表 2 主要元件选型

机构	元件	选型条件	选型结果
回转机构	液压	$T_1=35 \text{ Nm}; p=5 \text{ MPa}; n=300 \text{ r/min}$	A2FM55 $q_v=55 \text{ cm}^3/\text{r}$
手抓机构	马达	$T_2=35 \text{ Nm}; p=5 \text{ MPa}; n=300 \text{ r/min}$	A2FM45 $q_v=45 \text{ cm}^3/\text{r}$
俯仰机构		$F_1=10 \text{ kN}; p=5 \text{ MPa}$	$\Phi 50/36-200 \text{ mm}$
推拉机构	液压缸	$F_2=10 \text{ kN}; p=5 \text{ MPa}$	$\Phi 50/36-200 \text{ mm}$
手抓机构		$F_3=10 \text{ kN}; p=5 \text{ MPa}$	$\Phi 50/36-200 \text{ mm}$
伺服控制	比例阀	$Q_0=34 \text{ L/min}$	4WREE10-75

注: T -马达所需扭矩; p -工作压力; n -马达所需转速; F -液压缸所需推力; Q_0 -比例阀所需流量

考虑到机械手性能指标和工作要求, 液压机械手系统原理如图 3 所示。

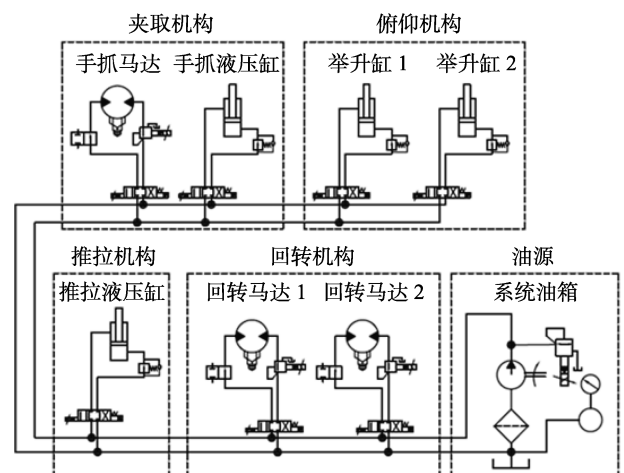


图 3 电液伺服系统原理图

2.2 总体轨迹规划方法

结合一系列离散的 TCP 三维空间位置矢量 r_i 和其对应的时间序列 t_i 得到连续的液压伺服机械手的运动轨迹 S 。其过程如下:

(1) 将前述运动学模型下得到的 TCP 空间位置序列 r_i 经过逆运动学求解转化为驱动节点的位置—时间序列;

(2) 基于机械手运动轨迹的连续性要求, 运用 C^{m-1} 连续的 m 次 ($m+1$ 阶) B 样条曲线对机械手驱动节点轨迹曲线进行描述;

(3) 基于 De Boor 递推关系, 推导相邻时刻处与 B 样条轨迹曲线的 p 阶导数对应的节点速度、加速度、脉动轨迹曲线;

(4) 首先根据驱动节点初始条件确定边界条件, 接着利用矩阵方程求出控制顶点的 4 次 B 样条轨迹曲线矢量, 最后得到驱动节点在对应时刻对应空间位置下的 C^3 连续轨迹;

(5) 本研究采用 B 样条轨迹的通用优化目标函数, 保证满足运动学约束, 轨迹平稳性。

机械手运行效率:

$$\min W = k_T \sum_{i=1}^{v+1} h_i + k_J \sum_{j=0}^2 \int_0^{t_f} \left(\sum_{k=0}^{n-3} Q_{j,i}^{(3)} \cdot N_{1,i}(t) \right)^2 dt \quad (8)$$

式中: k_T —时间权重系数; k_J —脉动权重系数 (当 $k_T=0$, 可得到最平滑的轨迹曲线; 当 $k_J=0$, 可得到执行所需时间最少的轨迹)。

将时间步长 h_i 视作粒子, h_i 表示相邻两个驱动节点之间的步长, $h_i = t_{i+1} - t_i$; t_f 表示机械手运动轨迹总执行时间, 利用权重的不同, 对最优粒子进行查找, 迭代搜索全局最优解。最终实现对路径点时间步长 h_i 的优化, 具体优化过程如图 4 所示^[7-9]。

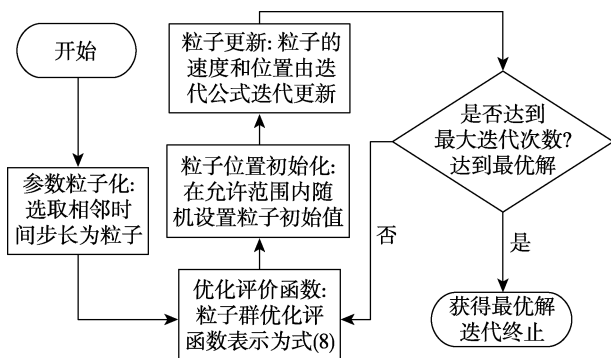


图 4 轨迹优化流程图

2.3 驱动系统控制器设计

(1) 中央控制器设计

中央控制器主要是基于所设定的 TCP 目标位置, 经由 2.2 小节所示的粒子群算法规划及优化其空间运动

轨迹, 再基于 1.3 节中的 TCP 位置空间矢量表达式 (7), 通过约束逆解得到回转, 俯仰, 推拉 3 个驱动位置的唯一节点, 从而实现电液伺服机械手的轨迹控制。

(2) 推拉系统控制器设计

推拉系统采用了常规 PID 控制方法, 基于实时采集的位移误差, 通过调节 K_P , K_I , K_D 参数, 精确控制推拉液压缸的运动位置:

$$u(t) = K_P e(t) + K_I \sum_{n=0}^t e(n) \Delta t + K_D \frac{e(t) - e(t - \Delta t)}{\Delta t} \quad (9)$$

(3) 俯仰系统控制器设计

由于俯仰驱动系统具有较强的非线性耦合特性, 常规控制难以实现多驱动器同步精度要求。受 NDI 在多驱动器系统控制上表现出的良好的效果的启发, 针对该系统的双执行器同步驱动, 笔者结合动态逆姿态控制算法, 构建的 NDI 同步控制策略如图 5 所示。

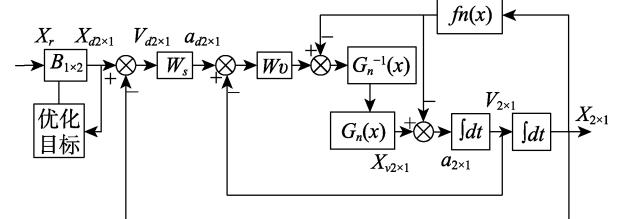


图 5 俯仰系统控制策略

X_r —用户输入指令, $X_r = [x_c \theta]^T$; X_d —控制分配策略的输出, 表示双执行器的期望位移, $X_d = [x_{1d} x_{2d}]^T$; M —位移回路的带宽, $M = \text{diag}(m_1 \ m_2)$; V_d —双执行器的期望速度, $V_d = [v_{1d} \ v_{2d}]^T$; K —速度回路的带宽, $K = \text{diag}(k_1 \ k_2)$; a_d —期望加速度, $a_d = [a_{1d} \ a_{2d}]^T$; X_v —NDI 控制器的输出, 用于控制比例阀, $X_v = [x_{1v} \ x_{2v}]^T$; V —阀控缸模型输出的实际位移, $V = [x_1 \ x_2]^T$; a_d —双执行器的实际输出速度, $a_d = [a_1 \ a_2]^T$

(4) 回转系统控制器设计

通过对文献[10]中同步控制方法的思考, 本研究采用 IL-PID 双马达同步控制策略。提高了具有重复回转特性的回转机构的同步精度。

回转系统控制策略如图 6 所示。

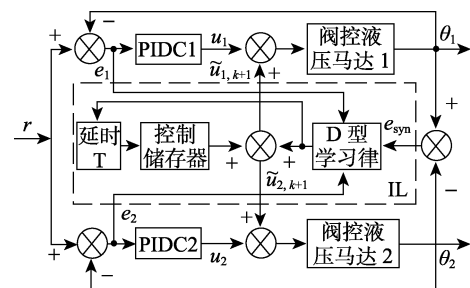


图 6 回转系统控制策略

r —回转系统输入值; e_1 , e_2 —第 1、2 路线的跟随误差量; u_1 —路线 1 的 PID 控制输出; θ_1 , θ_2 —路线 1、2 下液压马达的角位移输出量; e_{syn} —路线 2 下的液压马达与路线 1 下的液压马达的角位移同步误差量; $\tilde{u}_{1,k+1}$, $\tilde{u}_{2,k+1}$ —路线 1、2 下的第 $k+1$ 次 IL 输出值

3 系统仿真与实验研究

3.1 仿真试验

为了验证上述机械手运动控制系统的可行性和有效性,本研究以图 2 所示的机械手模型为基础,利用 Matlab/ SimMechanics 数学模拟软件对该电液伺服机械手的运动进行仿真模拟实验。并对试验数据进行分析,通过逆运动学求解得到电液伺服机械手驱动节点位置序列如表 3 所示。

表 3 空间位置序列及驱动节点位置序列

位置 <i>i</i>	TCP 坐标			驱动节点位置		
	x_i/mm	y_i/mm	z_i/mm	x_1/mm	x_2/mm	$\theta_i/(\text{°})$
0	790	0	425	0	0	0
1	684	395	545	20	0	30
2	654	654	702	40	20	45
3	495	857	755	60	50	60
4	0	1 268	755	60	80	90

笔者利用 2.2 节提到的轨迹优化方法,利用粒子群算法,对上述数据进行迭代优化,最终在 40 次迭代后得到最优解。其中在迭代过程中,第 0 次迭代,第 10 次迭代及第 23 次迭代后,时间步长 h_i 的优化结果如表 4 所示。

表 4 各节点运动时间对比

步长	第 0 次迭代	第 10 次迭代	第 23 次迭代
h_1/s	6.500 0	3.309 7	2.416 0
h_2/s	6.500 0	4.588 2	3.505 2
h_3/s	6.500 0	3.873 5	3.561 2
h_4/s	6.500 0	4.873 5	4.461 9

对于时间步长 h_i 的优化过程如图 7 所示。

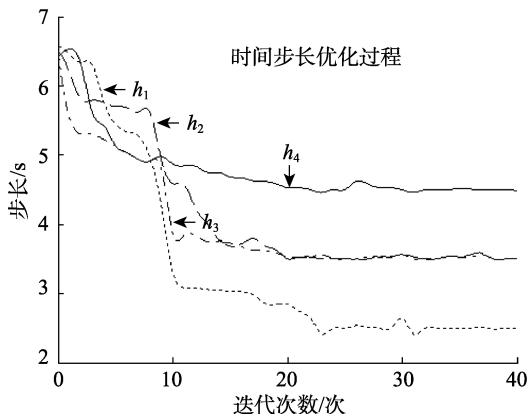


图 7 各时间步长粒子优化过程

在迭代 40 次得到最优解后,机械手各驱动节点的仿真运行结果分别如图 8 所示。

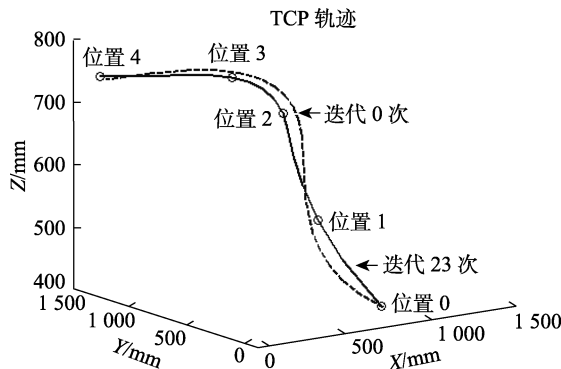


图 8 迭代前后 TCP 轨迹图

其中轨迹曲线表示在各个驱动节点位置控制下,机械手 TCP 的三维空间位移;虚线表示未经迭代的机械手工作中心点的轨迹,实线表示优化后的轨迹曲线。从图中观察可验证该控制系统实现了轨迹的时间最优控制,减小了控制模型中非线性的干扰。

3.2 系统实验

该运动控制系统的研制涉及的实际 5DOF 液压机械手系统实物如图 9 所示。

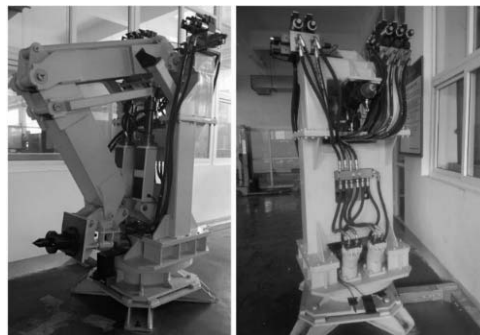


图 9 现场实物图

具体实验步骤如下所示:

(1) 对实验工况进行选取。根据上文表 1,表 2 确定 5DOF 电液伺服机械手系统的运行参数,经过实际实验发现当机械手 TCP 起始空间位置为 $r_0=(790, 0, 425)^T$,目标空间位置为 $r_g=(0, 1 268, 755)^T$ 时会方便对机械手轨迹的观测,遂确定该两点为起始点;

(2) 机械手轨迹规划及优化。利用 B 样条插值曲线轨迹规划方法和粒子群算法优化方法,并以实验中第 23 次迭代后时间步长作为轨迹规划参数,以 2.2 节中轨迹规划步骤,规划实验系统的驱动节点轨迹;

(3) 运行结果分析。

实际运行结果与仿真运行轨迹如图 10 所示。

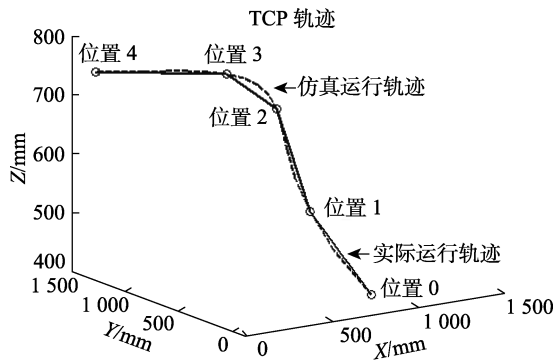


图 10 液压机械手 TCP 运行轨迹

对图 10 进行分析, 可知电液伺服机械手运动控制系统适用于常规位置控制, 且直线运行绝对误差 $< 1.5 \text{ mm}$, 转动运行误差 $< 2.5^\circ$ 。并且本研究发现机械手开始和停止时刻, 其各驱动节点速度、加速度及脉动都为 0。这代表着该运动控制系统可实现机械手的平滑启动和停机。所以该控制系统所控制下的机械手运行轨迹平滑稳定, 定位精准, 非常有利于机械手的运动控制, 该运动控制系统具有很强的实用价值。

4 结束语

(1) 本研究采用 5 阶 B 样条插值曲线进行 5DOF 液压机械手轨迹的规划, 利用粒子群算法对其轨迹进行优化, 提高了机械手轨迹的准确性, 合理地提高运动控制系统的同步精度, 实现了对机械手空间位置轨迹的精确表述, 进而提高了机械手的运行精度, 保证了机械手生产产品的质量;

(2) 基于闭链矢量的电液伺服机械手运动模型, 利用空间矢量与运动时间的对应关系, 巧妙地避免了不确定性解的出现, 提高了电液伺服机械手运动学建模的有效性;

(3) 通过仿真和应用试验表明, 本研究研制的液压伺服机械手运动控制系统, 可以较好地解决具有非关节链式驱动结构的液压机械手系统的运动控制问题, 实

现轨迹的准确控制, 证明了该运动控制系统是切实有效的。同时, 对于重型搬运工业电液伺服机械手运动控制及其轨迹优化等后续研究有着重要参考意义。

参考文献 (References):

- [1] SADEGHIEH A, SAZGAR H, GOODARZI K, et al. Identification and real-time position control of a sero-hydraulic rotary actuator by means of a neurobiologically motivated algorithm[J]. *ISA Transactions*, 2012, 51(1): 208-219.
- [2] KHALIL H M, BARDINI M E. Implementation of speed controller for rotary hydraulic motor basaed on LS-SVM[J]. *Expert Systems with Applications*, 2011, 38(11): 14249-14256.
- [3] ABE A. Trajectory planning for residual vibration suppression of a two-link rigid-flexible manipulator considering large deformation[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2009, 44(9): 1627-1639.
- [4] 周 芳, 朱齐丹, 赵国良. 基于改进快速搜索随机树法的机械手路径优化[J]. *机械工程学报*, 2011, 47(11): 30-35.
- [5] GASPARETTO A, ZANOTTO V. A new method for smooth trajectory planning of robot manipulators[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2007, 42(4): 455-471.
- [6] TIAN Lian-fang, COLLINS C. An effective robot trajectory planning method using a genetic algorithm[J]. *Mechatronics*, 2004, 14(5): 455-470.
- [7] 戈新生, 孙鹏伟. 自由漂浮空间机械臂非完整运动规划的粒子群优化算法[J]. *机械工程学报*, 2007, 43(4): 34-38.
- [8] 倪 敬, 邵 斌, 蒙 臻, 等. 液压拉床双缸 IPSO-PID 伺服同步驱动控制研究[J]. *中国机械工程*, 2013, 24(11): 1494-1500.
- [9] 周惜涌. 交流伺服驱动控制泵组的液压系统应用[J]. *液压气动与密封*, 2015, 35(9): 38-41.
- [10] 于少娟, 齐向东, 吴聚华. 迭代学习控制理论及应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.

[编辑: 李 辉]

本文引用格式:

刘湘琪, 任 旭, 蔡增伟, 等. 五自由度电液伺服机械手运动控制系统研制[J]. *机电工程*, 2017, 34(10): 1144-1149.

LIU Xiang-qi, REN Xu, CAI Zeng-wei, et al. Five degrees of freedom electrohydraulic servo manipulator motion control system[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2017, 34(10): 1144-1149.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>