

电动 6-SPU 型并联机器人的整体动力学模型

孟 强, 何景峰, 韩俊伟

(哈尔滨工业大学 电液伺服仿真及试验系统研究所 哈尔滨 150001, mengqiang_85@yahoo.com.cn)

摘 要: 为了对电动并联机器人进行特性分析和性能预测, 以永磁同步电机(PMSM)驱动 6-SPU 型并联机器人为例, 提出一种精确整体动力学建模思想. 电动并联机器人电机系统除存在随支腿的转动, 转子及丝杆还存在绕自身轴线的旋转. 针对这两部分运动很难单纯通过多刚体动力学或 PMSM 动力学来分析的问题, 采用多刚体动力学来考虑第一种运动, PMSM 动力学来考虑第二种运动, 并建立电动并联机器人的精确整体动力学模型. 该模型避免了负载折算到电机端时变等效惯量的计算, 并将电机系统反电动势、粘性摩擦力考虑在内. 以 1 Hz 正弦位姿指令对并联机器人进行仿真分析, 验证了模型的正确性.

关键词: 整体动力学; 6-DOF 并联机器人; 永磁同步电机; 矢量控制

中图分类号: TP242.2

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2010)01-0083-04

Integrated dynamics model of electrical 6-SPU parallel robot

MENG Qiang, HE Jing-feng, HAN Jun-wei

(Institute of Electro hydraulic Servo Simulation & Test System, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China, mengqiang_85@yahoo.com.cn)

Abstract: A precise integrated dynamics modeling idea is presented to carry out the characteristics analysis and performance prediction of electrical parallel robots using a 6-SPU parallel robot driven by permanent magnet synchronous motor (PMSM) as an example. Motor systems in the electrical parallel robot move with legs, and meanwhile rotors and snails go around the axis of themselves. The first kind of movement is analyzed through multi-body dynamics and the second is analyzed through PMSM dynamics, and then an integrated dynamics model is established. The model avoids the calculation of time-varying equivalent inertia of each motor, and takes the influence of counter EMF and the motor friction into account. Finally, the simulation analysis is performed on a parallel robot using 1 Hz sinusoidal signal, and results verify the feasibility of the model, which can settle the foundation for further physical realization.

Key words: integrated dynamics; 6-DOF parallel robot; PMSM; vector control

目前, 并联机构以其高刚度、高负载能力和无误差积累等特点, 被广泛应用于运动模拟、微动机构、并联机床等领域^[1-5]. 并联机器人的研究工作主要集中在运动学、动力学分析^[6], 而对包含驱动系统和控制系统在内的整体动力学模型, 特别是采用 PMSM 驱动的 6-DOF 并联机器人的整体动力学模型研究不够深入. 电动并联机器人, 其负载折算到电机端等效惯量是时变的, 有人曾尝试通过参数辨识来计算^[7], 但其实时性及准确性有待验证.

本文则通过分析电机系统所存在的运动形式, 巧妙地解决了等效惯量时变的难题, 建立了电动并联机器人的精确整体动力学模型.

1 6-DOF 并联机器人多刚体模型

6-DOF 并联机器人可分两个部分: 机械部分和驱动系统部分. 机械部分为典型的多刚体系统, 主要包括 1 个可移动的上平台、1 个固定基座、6 个支腿及上下铰链.

应用 ADAMS^[8] 建立 6-DOF 并联机器人的虚拟样机模型见图 1. 每个支腿均通过球铰、虎克铰与动平台、固定平台连接; 伸出杆与缸筒间加移动

收稿日期: 2008-05-23.

作者简介: 孟 强(1985—), 男, 硕士;

韩俊伟(1964—), 男, 博士生导师, 教授.

副;各个刚体的转动惯量及质量均可通过修改参数进行重新设定.

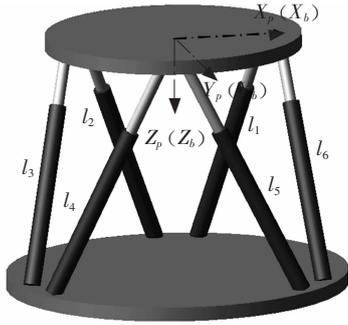


图 1 6-DOF 并联机器人模型(中位时)

为清楚地表示动平台的空间运动,定义两个坐标系,动坐标系 $O_p - X_p Y_p Z_p$ 和静坐标系 $O_b - X_b Y_b Z_b$,静坐标系固定在大地上,动坐标系固定在动平台与负载质心上,中位时,两者重合;动平台的位姿由 $\mathbf{q} = [\phi, \theta, \psi, x, y, z]^T$ 表示;支腿长度由 $\mathbf{l} = [l_1, l_2, l_3, l_4, l_5, l_6]^T$ 表示.

2 PMSM 系统建模

为了建立较为精确的 PMSM 系统模型,首先,需要得到各物理量之间的关系;然后在保证整体系统特性的条件下进行一定地简化;最后,建立了考虑反电动势、粘性摩擦、及时变惯量的 PMSM 系统模型.

典型的正弦波永磁同步电机^[9-13]在采用转子磁链定向控制以及功率不变的坐标变换后, dq

坐标上的动态方程^[12]可以表示为

$$\begin{aligned} u_{ds} &= R_s i_{ds} + L_d p i_{ds} - \omega_r L_q i_{qs}, \\ u_{qs} &= R_s i_{qs} + L_q p i_{qs} + \omega_r L_d i_{ds} + \omega_r \psi_r, \\ T_e &= P[\psi_r i_{qs} + (L_d - L_q) i_{ds} i_{qs}]. \end{aligned}$$

式中: T_e 为电磁力矩; u_{ds} 、 u_{qs} 为 dq 轴向定子电压; i_{ds} 、 i_{qs} 为 dq 轴向定子电流; L_d 、 L_q 为定子绕组 dq 轴向电感; ψ_r 为转子磁链; R_s 为定子电阻; ω_r 为转子电角速度; p 为微分算子, P 为极对数.

考虑到该机构运行中,电机参数时变特性, PMSM 的转矩平衡方程式可表示为

$$\begin{aligned} \tilde{J}_m (d\omega_m/dt) + B_m \omega_m &= T_e - T_l, \\ \omega_r &= P\omega_m. \end{aligned} \quad (1)$$

式中: T_l 为负载力矩, \tilde{J}_m 为折算到电机主轴上的具有时变特性的惯量, B_m 为粘性摩擦系数, ω_m 为电机机械角速度.

如果控制定子电流矢量使之落在 q 轴上,即令 $i_{ds} = 0$, 可得到如下的电压及转矩方程:

$$\begin{aligned} u_{ds} &= -\omega_r L_q i_{qs}, \quad u_{qs} = R_s i_{qs} + L_q p i_{qs} + e_0, \\ e_0 &= \omega_r \psi_r, \quad T_e = P\psi_r i_{qs} = K_m i_{qs}. \end{aligned}$$

式中: e_0 为每相空载反电动势, $K_m = P\psi_r$.

采用转子磁链定向并使 $i_{ds} = 0$ 控制的永磁同步电机方框图见图 2. θ_r^* 为给定转子位置, θ_r 为实际转子位置, ω_r^* 为给定转子转速, ω_r 为实际转子转速, i_a^* 、 i_b^* 、 i_c^* 为给定定子三相电流, i_a 、 i_b 、 i_c 为实际定子三相电流, e_ω 为转子转速误差, 应用 e_ω 产生控制电流 i_{qs}^* , θ 为实际转子机械转角.

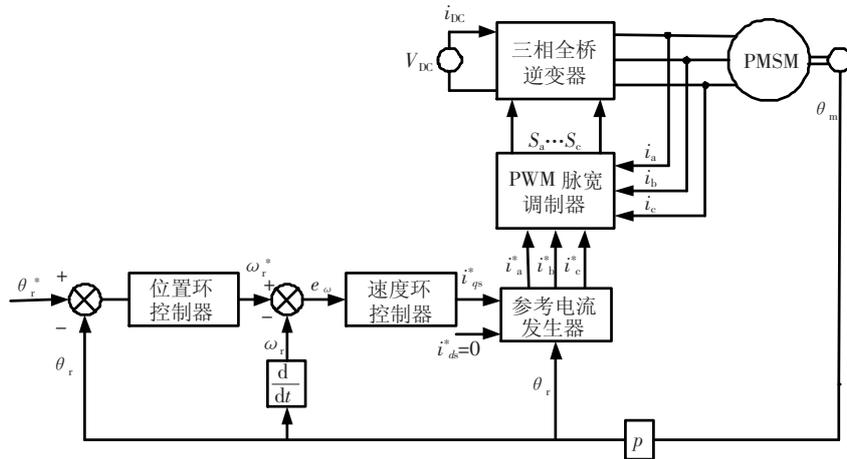


图 2 同步电机位置控制方框图

永磁同步电机在 q 轴方向上的伺服系统动态结构图见图 3(未画滤波环节). 其中, G_{APR} 、 G_{ASR} 、 G_{ACR} 分别表示位置环、速度环、电流环控制器; $K_v/(\tau_v S + 1)$ 表示简化后的 PWM 逆变器传递函数^[13], K_v 为逆变器放大倍数, τ_v 为逆变器滞后时间常数; α 、 β 分别表示转速环、电流环反馈系数.

图 3 即为最终建立的 PMSM 系统框图,其可以作为理论分析和实验的依据,并且可以更加准

确地反应实际系统.

3 整体模型建立及控制系统设计

3.1 整体动力学模型建立

整体动力学模型的建立需要解决以下两个难点:

1) 电机带载分析时, \tilde{J}_m 的时变特性很难通过折算得到.

从转矩平衡式的本质出发,将 \tilde{J}_m 项与 T_l 巧

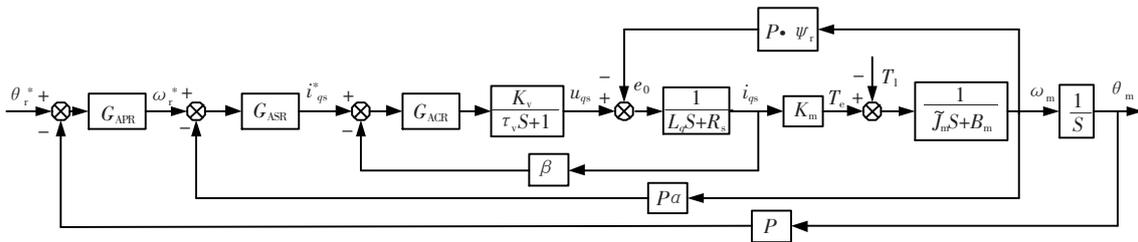


图 3 永磁同步电机位置控制动态结构图

妙的重新分配, 可表示为

$$\tilde{J}_m(d\omega_m/dt) + T_1 = J_{m1}(d\omega_m/dt) + T_a, \quad (2)$$

式中: J_{m1} 表示仅考虑电机转子及丝杆绕自身轴线转动时, 折算到电机主轴上惯量, 此时, J_{m1} 恒定; T_a 表示不考虑电机转子及丝杆绕自身轴线转动, 并联机器人运动所需力矩, 此部分通过多刚体动力学计算得到。

2) 粘性摩擦力与反电动势均正比于 ω_m , 通

过动力学分析可得到 ω_m 。

由式(1)、(2)可将电机的转矩平衡方程写为

$$T_e = J_{m1}(d\omega_m/dt) + B_m\omega_m + T_a. \quad (3)$$

应用该方法, 建立整体动力学模型见图 4。

其中 K_1 为由电机电磁力矩到支腿沿轴线出力的折算系数, K_2 为由支腿伸长速度到电机转速的传动比, f_a 为 6 个支腿沿轴线驱动力, l 为实际支腿伸长速度。

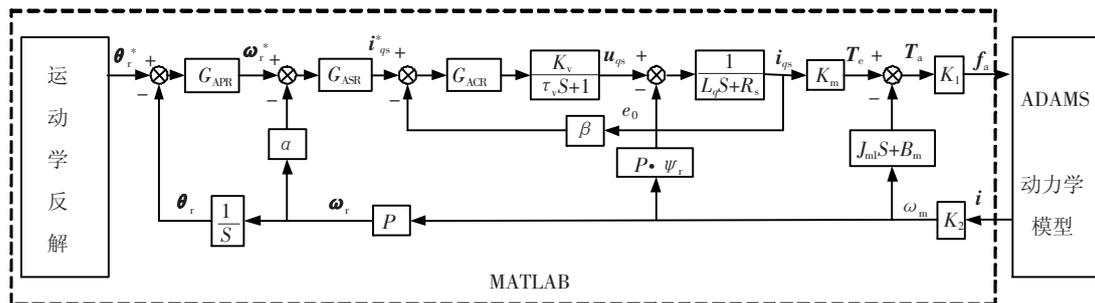


图 4 电动 6-DOF 并联机器人整体动力学模型

在 ADAMS 中设定状态变量: 首先, 应用 VARVAL 函数设定 6 个支腿的出力为输入变量; 然后, 应用函数 DZ、VZ 设定各个支腿的伸长量、伸长速度为输出变量; 最后, 应用 ROLL、PITCH、YAW、DX、DY、DZ^[8] 函数定义动平台的实际位姿。

3.2 多刚体动力学参数修正

电机转子、丝杆绕自身轴线的旋转已由式(3)加以分析, 但是电机系统(包括转子、丝杆)还存在随支腿的转动, 此部分的影响, 可通过修改缸筒的转动惯量及质量来考虑。这样, 即可建立电动并联机器人的精确整体动力学模型。

3.3 控制系统设计

在模拟控制系统中, 最常用的控制器就是 PID 控制。PID 控制器为线性控制器, 根据给定值 $rin(t)$ 与实际输出值 $yout(t)$ 构成控制偏差

$$error(t) = rin(t) - yout(t).$$

PID 控制控制规律为

$$u(t) = K_p error(t) + K_I \int error(t) dt + K_D \frac{derror(t)}{dt}.$$

图 4 中控制器 G_{APR} 、 G_{ASR} 、 G_{ACR} 用三环 PID 控制, K_p 、 K_I 、 K_D 分别为比例、积分、微分系数。按照工程设计方法设计控制器参数^[12], 然后对其进行微调处理。

4 仿真及结果分析

并联机器人的主要结构参数见表 1。由于 6-DOF 并联机器人各个自由度方向的特性不尽相同, 以下仅以两个自由度方向为例, 进行仿真分析, 结果见图 5。

表 1 机器人主要结构尺寸参数 m

上铰分布 圆半径	下铰分布 圆半径	上铰 间距	下铰 间距	平台 中位长
0.8	1.1	0.2	0.3	1.86

给定的位姿指令信号为

$$q_1 = 5^\circ \sin(2\pi t),$$

$$q_4 = 0.01 \sin(2\pi t) m.$$

以上仿真结果表明:

1) 当给定平台 q_1 、 q_4 方向正弦指令时, 系统能够很好地跟踪位姿指令。

2) 当给定平台 q_1 、 q_4 方向正弦指令时, 支腿出力初始状态时有一定的震荡与超调, 但能够较快的稳定。

由该模型, 还可得到支腿位移、速度, PMSM 系统电流、转速、转角跟踪等一系列曲线, 可以作为系统分析与设计的依据。

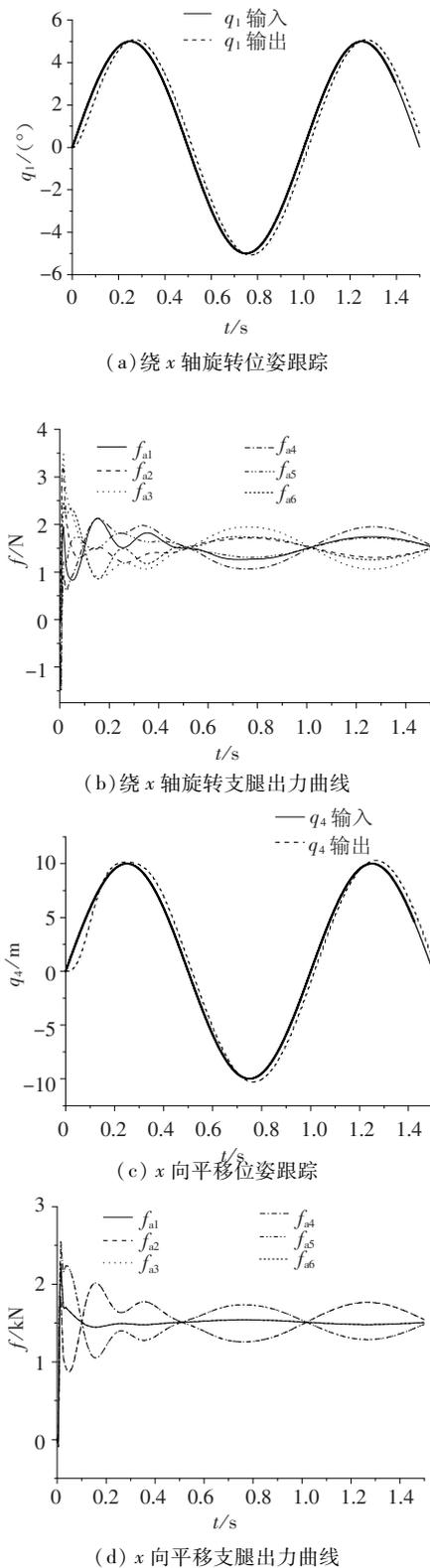


图5 位姿跟踪以及支腿出力曲线

5 结 论

本文采用 ADAMS 多体动力学软件建立了 6 自由度并联机器人的多刚体动力学模型,在 Matlab/Simulink 中建立了永磁同步电机驱动系统及

其控制模型,利用 ADAMS/Control 模块将这两部分结合起来,从而形成了电动 6-DOF 并联机器人完整动力学模型。

参考文献:

- [1] PREUMONT A, HORODINCA M, ROMANESCU I, *et al.* A six-axis single-stage active vibration isolator based on stewart platform[J]. Journal of Sound and Vibration, 2007, 300(3-5): 644-661.
- [2] STEWART D. A platform with six degrees of freedom[J]. Journal of Power and Energy, 1965, 180(15): 371-386.
- [3] KOEKEBAKKER S H. Model Based Control of a Flight Simulator Motion System[D]. [S. L.]: Delft University of Technology, 2001.
- [4] TING Y, CHEN Y S, JAR H C. Modeling and control for a Gough-Stewart platform CNC machine[J]. Journal of Robotic Systems, 2004, 21(11): 609-623.
- [5] KANG C G. Closed-form force sensing of a 6-axis force transducer based on the Stewart platform[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2001, 90(1-2): 31-37.
- [6] 游世明, 陈思忠, 梁贺明. 基于 ADAMS 的并联机器人运动学和动力学仿真[J]. 计算机仿真, 2005, 22(8): 181-185.
- [7] 傅绍文, 姚郁, 王晓晨. 电动 Stewart 仿真平台动力学建模与惯性参数辨识[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(9): 1909-1921.
- [8] 郑建荣. ADAMS-虚拟样机技术入门与提高[M]. 北京:机械工业出版社, 2002: 35-205.
- [9] JAN R M, TSENG C H, LIU R J. Robust PID control design for permanent magnet synchronous motor: A genetic approach[J]. Electric Power Systems Research, 2008, 78(7): 1162-1168.
- [10] ELMAS C, USTUN O. A hybrid controller for the speed control of a permanent magnet synchronous motor drive[J]. Control Engineering Practice, 2008, 16(3): 260-270.
- [11] RONG J W. Total Sliding-Mode Controller for PM Synchronous Servo Motor Drive Using Recurrent Fuzzy Neural Network[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2001, 48(5): 926-944.
- [12] 陈伯时. 电力拖动自动控制系统[M]. 北京:机械工业出版社, 2006: 53-254.
- [13] 陈荣, 邓智泉, 严仰光. 永磁同步伺服系统电流环的设计[J]. 南京航空航天大学学报, 2004, 36(2): 220-225.

(编辑 杨波)