

文章编号: 0255-8297(2002)03-0282-05

RV12L-6R 焊接机器人动力学分析及计算机仿真研究

刘成良, 张凯, 付庄, 曹其新, 殷跃红

(上海交通大学 机器人研究所, 上海 200030)

摘要: 提出用 Lagrangian 方法与递推的 Newton-Euler 方法相结合求解机器人逆动力学问题, 以满足实时控制的要求。结合 MECO 汽车横梁的焊接, 给出了实用的机器人动力学算法, 并对 6 自由度机器人各关节力矩进行了动态仿真, 仿真结果表明不同的关节初始值, 有时会出现关节力矩突变, 引起系统振动。因此, 可以通过计算机仿真的方法在选择关节初始值时避开不稳定的情况。

关键词: 机器人; 逆动力学; 计算机仿真

中图分类号: TP242 **文献标识码:** A

Dynamics Analysis and Computer Simulation of RV12L-6R Welding Robot

LIU Cheng-liang, ZHANG Kai, FU Zhuang, CAO Qi-xin, YIN Yue-hong

(Research Institute of Robotics, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: In order to satisfy the requirement of the real time control, the dynamics equation that combines Lagrangian method and recursion Newton-Euler method to solve inverse dynamics is proposed. The trajectory plan of welding robot is made for the purpose of realizing the predefined track by using the joint space method and Cartesian space method. The real-time simulation is given. The results reveal that the different initial angular of joints may lead to the discontinuity acceleration of joints and cause the system to vibrate. Finally, a practical method to avoid the unstable situation is suggested.

Key words: robotics; inverse dynamics; computer simulation

目前国内外学者对机器人动力学的研究主要集中在动力学的算法上, 但就计算机控制的实时性的研究满足不了高速度、高稳定性、复杂系统的要求^[1,2]。动力学是研究物体运动和作用力之间的关系, 其重要研究目的是为了进行实时控制, 以实现预期的轨迹运动, 达到最优控制指标或更好的动态性能。机器人动力学特性分析常用的有拉格朗日(Lagrange)法^[3]、牛顿-欧拉(Newton-Euler)^[4]法、高斯(Gauss)^[5]法、凯恩(Kane)法、旋量法^[6-8]等。评价各种动力学算法优劣的重要标志是解动力学逆问题所需运算量的大小^[3-7]。一般说来 Lagrange 运算

量最大, 但能以最简单的形式求得非常复杂的系统动力方程, 而且可得递推算法; Newton-Euler 方法运算量小, 可直接导出一种动力学的递推算法, 但不能直接获得动力学方程的解析形式, 不便于获得机器人动力学分析的整体概念。本文提出用 Lagrangian 方法与递推的 Newton-Euler 方法相结合求解机器人逆动力学问题, 用于计算机仿真和实时控制, 在此基础上结合 MECO 汽车横梁的焊接, 给出了机器人实用动力学算法, 并进行了 6 自由度机器人各关节力矩的动态仿真, 为 MECO 汽车横梁的焊接提供依据。

收稿日期: 2001-05-25; 修订日期: 2001-07-27

作者简介: 刘成良(1964-), 男, 山东临沂人, 教授, 博士

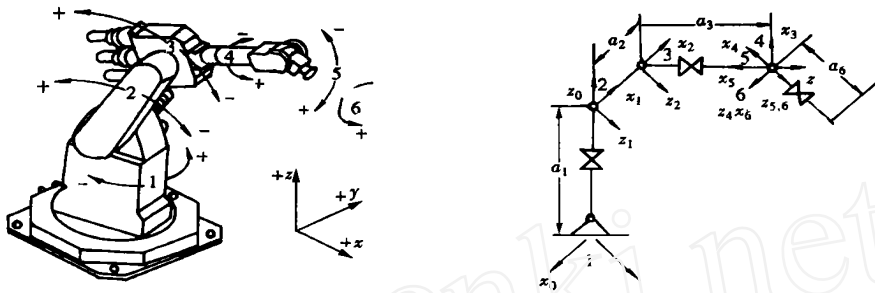


图 1 机器人的关节结构及杆系结构图

1 机器人关节结构

MECO 汽车横梁的焊接, 采用了 RV 12L 焊接机器人, 结构如图 1 所示 RV 12L 共有 6 个关节自由度, 三基轴三手轴结构保证了机器人的手端和焊枪具有良好的可移动性, 从而可以到达工作区间的任意焊接点

2 机器人动力学方程

2.1 动力学方程的 Lagrangian 方法

Lagarange 方法不仅能以最简单的形式求得非常复杂的系统动力方程, 而且可得到递推算法 为了提高计算效率, 就需要将机器人动力学方程写成递推形式, 以获得机器人动力学模型的计算方法 在这里目的是用于计算机仿真

RV 12L 焊接机器人的动力学方程如下

$$M_i = \sum_{j=1}^6 H_{ij} \ddot{q}_j + \sum_{j=1}^6 \sum_{k=1}^6 H_{ijk} \dot{q}_j \dot{q}_k + G_i \quad i = 1, 2, \dots, 6 \quad (1)$$

其中:

$$H_{ij} = \sum_{p=\max(i,j)}^6 \text{Trace} \left[\frac{\partial T_p}{\partial q_i} J_p \left(\frac{\partial T_p}{\partial q_j} \right)^T \right]$$

$$H_{ijk} = \sum_{p=\max(i,j,k)}^6 \text{Trace} \left[\frac{\partial T_p}{\partial q_i} J_p \left(\frac{\partial^2 T_p}{\partial q_j \partial q_k} \right)^T \right]$$

$$G_i = \sum_{p=i}^6 -m_p [g^T \ 0] \frac{\partial T_p}{\partial q_i} [\bar{r}_{ci} \ 1]^T$$

式中 M_i 为 q_i 对应的广义力矩; q_i 、 \dot{q}_i 、 \ddot{q}_i 分别为第 i 个关节的转动角、角速度和角加速度; m_i 为第 i 个臂的质量; \bar{r}_{ci} 为第 i 个臂的质心的位置矢量; J_i 为第 i 个臂的拟惯性矩阵

为便于计算机程序的编写, 这里给出式(1)的矢

量和矩阵表达式

$$M = A(q) \ddot{q} + 2B(q) \dot{q} \dot{q} + C(q) \dot{q}^2 + D(q) \quad (2)$$

式中第一项 $A(q) \ddot{q}$ 为惯性力项, 第二项 $2B(q) \dot{q} \dot{q}$ 为哥氏力项, 第三项 $C(q) \dot{q}^2$ 为向心力项, 第四项为重力项

$$M = [M_1, M_2, \dots, M_6]^T$$

$$\ddot{q} = [\ddot{q}_1, \ddot{q}_2, \dots, \ddot{q}_6]^T$$

$$\dot{q} = [\dot{q}_1, \dot{q}_2, \dots, \dot{q}_6]^T$$

$$A(q) = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} & \dots & H_{16} \\ H_{21} & H_{22} & \dots & H_{26} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ H_{61} & H_{62} & \dots & H_{66} \end{bmatrix}$$

$$B(q) = \begin{bmatrix} H_{1i+1} & H_{1i+2} & \dots & H_{1i6} \\ H_{2i+1} & H_{2i+2} & \dots & H_{2i6} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ H_{i+1} & H_{i+2} & \dots & H_{i6} \\ 0 & H_{i+1i+2} & \dots & H_{i+1i6} \\ -H_{i+1i+2} & 0 & \dots & H_{i+2i6} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ -H_{i+1i6} & -H_{i+2i6} & \dots & 0 \end{bmatrix}$$

$$C(q) = \begin{bmatrix} 0 & H_{122} & \dots & H_{166} \\ -H_{211} & 0 & \dots & H_{266} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ -H_{611} & -H_{622} & \dots & 0 \end{bmatrix}$$

$$D(q) = [G_1, G_2, \dots, G_6]^T$$

2.2 Newton-Euler 方程的迭代法

为便于机器人手部进行实时控制, 这里 RV 12L 控制算法采用 Newton-Euler 迭代法进行求解 在已知手部受到一定的外力 F 、外力矩 N 时, 为了得到一定的关节速度 \dot{q}_i 、关节转动加速度 \ddot{q}_i , 求应施加的关节力矩 M_i

New ton-Euler 方程的迭代递推形式为:

$$M_{i-1,i} = M_{i,i+1} - \bar{r}_{c,ci} \times \bar{f}_{i,i+1} + \bar{r}_{i-1,ci} \times \bar{f}_{i-1,i} + I_i \bar{\omega} + \bar{\omega} \times (I_i \bar{\omega}) \quad (3)$$

当不计关节摩擦力时有 $M_{i,i} = M_{i-1,i}$;

$$\bar{f}_{i-1,i} = \bar{f}_{i,i+1} + m_i \bar{v}_{ci} - m_i g \quad (4)$$

$$\bar{v}_{i+1} = \bar{v}_i + \bar{\omega}_{i+1} \times \bar{r}_{i,i+1} \quad (5)$$

$$\bar{a}_{i+1} = \bar{a}_i + \bar{\omega}_{i+1} \times \bar{r}_{i,i+1} + \bar{\omega}_{i+1} \times (\bar{\omega}_{i+1} \times \bar{r}_{i,i+1}) \quad (6)$$

用式(5)和式(6)计算每个杆件的速度和加速度,从机座部分开始向手部迭代计算。如可根据已知的关节位置 q_1 , 速度 \dot{q}_1 , 加速度 \ddot{q}_1 , 算出杆件 1 的 \bar{v}_{c1} , \bar{a}_1 , 和 $\bar{\omega}_1, \dot{\bar{\omega}}_1$; 再利用已知的关节位置 q_2 , 速度 \dot{q}_2 , 加速度 \ddot{q}_2 和 \bar{v}_{c1}, \bar{a}_1 , 和 $\bar{\omega}_1, \dot{\bar{\omega}}_1$, 算出杆件 2 的 \bar{v}_{c2}, \bar{a}_2 , 和 $\bar{\omega}_2, \dot{\bar{\omega}}_2$, 如此迭代直至求出手部的运动量。反过来从手部开始将上述求出的各参数代入方程(3)和(4)中,可逐一算出所有的 $\bar{f}_{i-1,i}$ 和 $M_{i-1,i}$, 即可求得关节力矩 M_i 。

3 动力学系统仿真

3.1 仿真系统的输入输出

已知机器人动力学参数(如杆件质量 m_i , 杆件质心在杆件坐标系中的矢量 \bar{r}_{ci} , 杆件惯性参数 \bar{I}_i 等)、手部受到的外力和外力矩及机器人手部的速度和加速度(包括平移和旋转),求施加于机器人各个关节驱动力矩

系统输入输出: 机器人手部位姿 T_6 , 手部平移和转动的速度 $\bar{v}, \bar{\omega}$ 以及加速度 $\dot{\bar{v}}, \dot{\bar{\omega}}$ 及外力和外力矩, 计算机将自动利用机器人逆运动学仿真求解出机器人的关节位置 q , 关节转动速度 \dot{q} , 关节转动加速度 \ddot{q} 。利用迭代法逐步迭代出机器人的六个杆件质心处的平移、转动速度和加速度

系统输出: 应该施加于机器六个关节处的驱动力矩

3.2 仿真程序框图

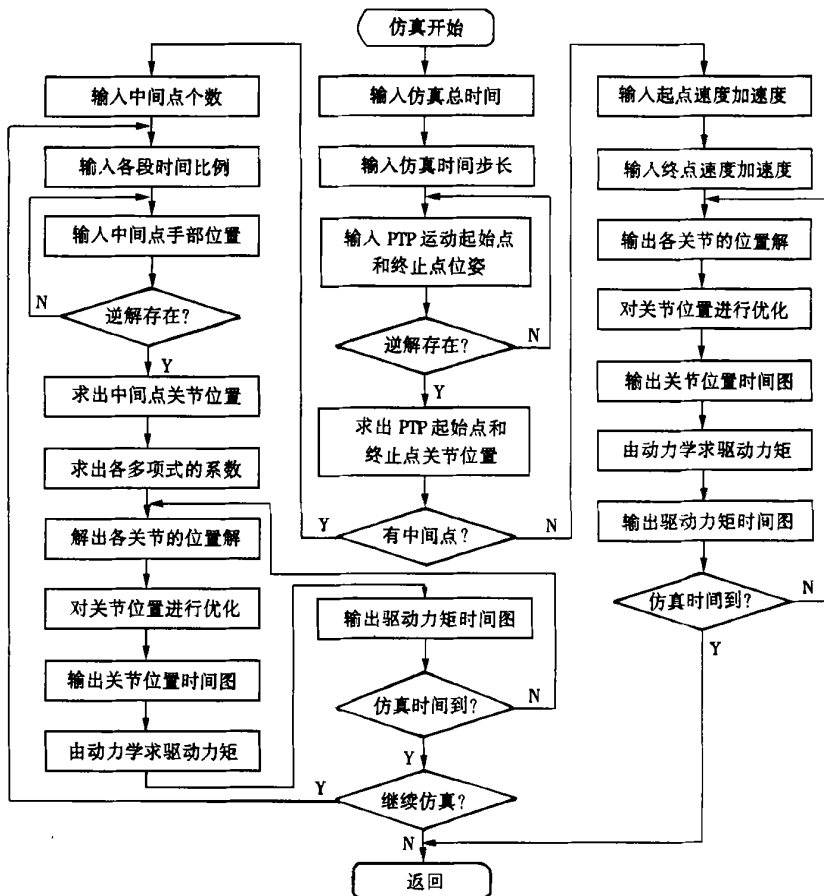


图 2 机器人动力学仿真算法框图

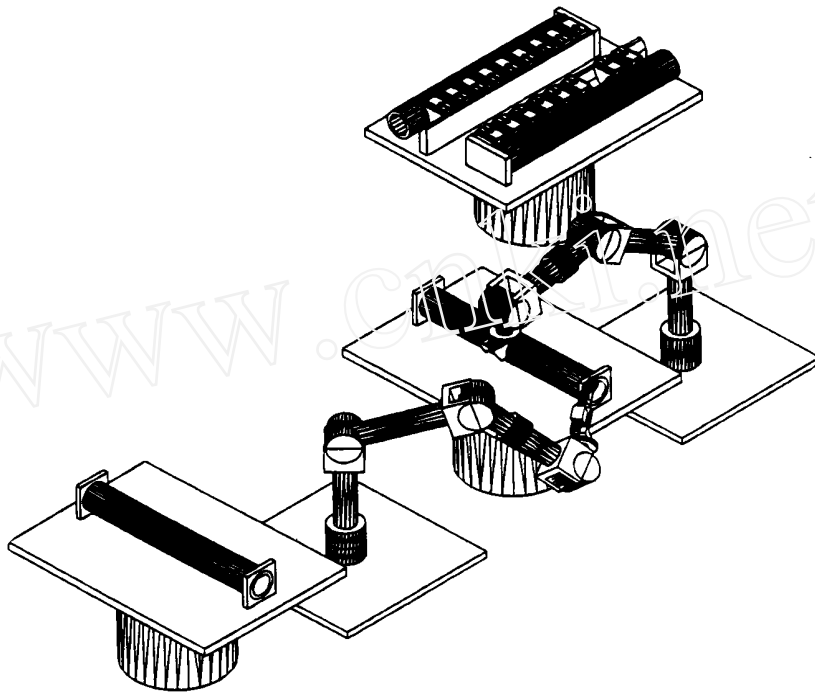


图3 MECO 汽车横梁焊接机器人系统

3.3 仿真实例与分析

利用上述理论, 给出焊接机器人的动力学方程, 便于实现机器人的平稳移动及精确焊接。图3为机器人焊接 MECO 汽车横梁两端外环缝的计算机仿真。

3.3.1 单个点的时序——力矩关系

输入参数: 手部位置 $\bar{p} = (0.3, -0.6, 1.8)^T$, 姿态角 $A = 20^\circ, O = 40^\circ, T = 60^\circ$; 手部平移速度 $(m/s) \bar{v} = (0.34 \quad -0.46 \quad 0.13)^T$, 转动速度 $(\%/s) \bar{\omega} = (34 \quad 76 \quad 25)^T$; 平移加速度 $(m/s^2) \bar{\dot{v}} = (0.12 \quad -0.15 \quad 0.067)^T$, 手部转动加速度 $(\%/s^2) \bar{\dot{\omega}} = (23 \quad 34 \quad 18)^T$ 。机器人手部受到外力 $(N) \bar{F} = (134 \quad -234 \quad 546)^T$, 外力矩 $(N \cdot m) \bar{N} = (2446 \quad 2456 \quad 1757)^T$ 。

各关节驱动力矩的仿真结果为

$$\begin{aligned} N_1 &= (4600.7 \quad 1931.4 \quad 1636.8)^T; \\ N_2 &= (4356.6 \quad 1731.4 \quad 1023)^T; \\ N_3 &= (3873.5 \quad 1783.4 \quad 180.9)^T; \\ N_4 &= (3739.9 \quad 1756.8 \quad 1252)^T; \\ N_5 &= (3472.3 \quad 1854.1 \quad 1396.2)^T; \\ N_6 &= (3450.7 \quad 1838.2 \quad 1394.3)^T. \end{aligned}$$

3.3.2 连续工作过程中的时序——力矩关系

输入参数: 运动总仿真时间 $T = 5s$, 仿真时间步长 $\Delta t = 0.01s$ 。关节初值 $q = (-130.02, -2.95, 70.594, 72.93, -81.23, -68.48)$

起始点: 位置 $P = (0.5, 0.4, 1.7)$, 姿态角 $A = 30^\circ, O = 50^\circ, T = 60^\circ$ 。

终止点: 位置 $P = (0.3, -0.7, 1.9)$, 姿态角 $A = 20^\circ, O = -30^\circ, T = 50^\circ$ 。

仿真结果: 如图4~5所示, 关节运动有突变现象, 相应关节的驱动力矩也发生突变, 这样则引起系统的振动和不稳定现象。

若关节初值: $q = (49.977, 67.675, 70.594, 94.864, 71.475, 32.93)$

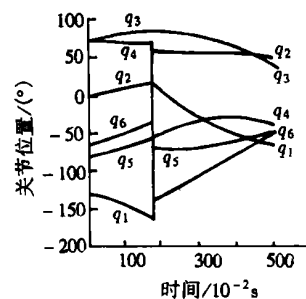


图4 关节位置时序图

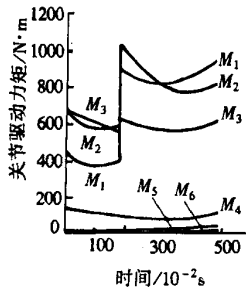


图5 关节驱动力矩时序图

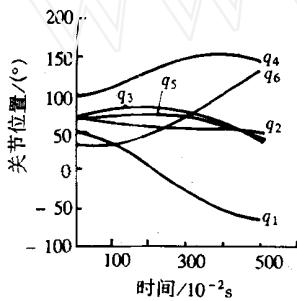


图6 关节位置时序图

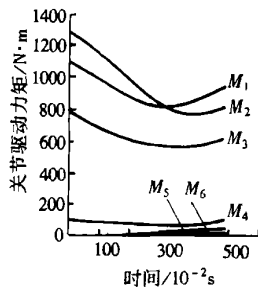


图7 驱动力矩时序图

仿真结果:如图5~6所示,关节运动光滑平稳,相应关节的驱动力矩也没有突变

3.4 仿真工具在工程中的应用

IVECO汽车横梁的焊接包括内环缝、外环缝、支架空间曲线联结缝的焊接。焊接过程中焊缝质量不稳定,并出现在固定点,原因是焊枪抖动造成。用本文提出的仿真方法进行仿真,发现由于关节初始选择不合适,造成关节运动的突变现象。利用该工具可以选择合适的初始值,避免了该现象的发生,同时保证了焊接质量。

4 结论

提出用Lagrangian方法导出机器人的动力学方程,而用递推的Newton-Euler方法求解机器人逆动力学问题。结合IVECO汽车横梁焊接机器人,给出了机器人实用的动力学算法,并进行了6自由度机器人各关节力矩的动态仿真。仿真结果表明,不同的关节初始值,有时会出现关节力矩突变,引起系统振动。因此,可以通过计算机仿真在选择关节初始值时避开不稳定的情况,本系统已成功地应用于IVECO横梁焊接。

参考文献:

- [1] Jiang Zhaohui, Goldenberg Andrew A. Dynamic end-effector trajectory control for flexible micro-macro robots using an ideal manifold [J]. Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Part C JSM E Tokyo Japan, 1997, 63(614): 3558-3564.
- [2] Bremer H. Robot dynamics—a mechatronic discipline [J]. Elektrotechnik und Informationstechnik: E&IE IE IEE, 1996, 113(7~8): 495.
- [3] Pu H J, Muller M, Abdalla E, et al. Parallel computation of the inertia matrix of a tree type robot using one directional recursion of Newton-Euler formulation [J]. Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory & Applications Dordrecht Netherlands, 1996, 15(1): 33-39.
- [4] Lin Ruilin, Jiang Shaoyin, Lin Bi. Application of spinor method to the dynamic analysis of robot [J]. Applied Mathematics and Mechanics (English Edition) Shanghai China, 1996, 17(1): 77-83.
- [5] 熊有伦等. 机器人学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1993. 10: 26-45.
- [6] 陈乐生. 质心坐标系的牛顿—欧拉动力学方程[J]. 机器人, 1993, 15(3): 33-36.
- [7] 王兴贵, 尹朝万, 谈大龙, 等. 机器人逆动力学简化实时快速算法[J]. 机器人, 1995, 17(1): 13-20.
- [8] 张京军, 王志远, 陆佑方. 机械臂逆动力学一种有效的并行算法[J]. 机器人, 1996, 18(2): 91-96.