

双三角钻臂的定位控制及仿真

何清华, 王恒升, 邓春萍

(中南大学 机电工程学院, 湖南 长沙, 410083)

摘要: 推导双三角机械臂的关节变量到支臂油缸长度计算的增量公式, 运用该式提出一种新的钻臂定位的控制系统结构, 即直接以关节变量(而不是油缸长度)为目标的闭环控制系统。在 MATLAB 环境下对以上算式及控制系统结构进行仿真验证。先在 ADAMS 中建立双三角臂的动力学模型, 然后将该模型导出成为 MATLAB.m 计算模型, 最后在 MATLAB 中实现钻臂定位的闭环控制系统仿真。针对某实际钻臂的仿真结果表明, 增量算式尽管是在微变情况下推导的, 在偏差较大的范围内应用时其计算误差对定位过程影响不大, 体现在钻臂轨迹于隧道断面的投影不是直线, 同时不会影响最终的控制精度, 可以用于实际控制。

关键词: 双三角钻臂; 钻臂定位; 仿真; ADAMS; MATLAB; 机器人

中图分类号: TP242.2; TP391.9 文献标识码: A 文章编号: 1672-7207(2006)04-0748-05

Positioning control and simulation of double-triangle boom

HE Qing-hua, WANG Heng-sheng, DENG Chun-ping

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: Incremental equations were derived to calculate the length of hydraulic cylinder actuators from joint variables of double-triangle boom online. A new boom positioning control system structure was proposed based on the incremental equations, which used joint variables, other than the length of actuator cylinders to close the loop. Simulation under MATLAB was performed to verify the correctness of the equations and control system structure proposed above. ADAMS model was built and exported into MATLAB to continue the simulation. Simulation result for an actual boom shows that the incremental equations, derived from infinitesimal increment, can be used widely, and the computational error makes a slightly trajectory deviation from reference straight line, which would not influence the final position, which is important in actual situation.

Key words: double triangle boom; motion control; simulation; ADAMS; MATLAB; robot

1979 年, 瑞典的 E. V. Kimber 等^[1]发明了双三角结构的机械臂, 1982 年, Atlas 公司的两臂全液压凿岩台车 Boomer H130 装备了这种类型的钻臂 BUT30, 此后, Atlas 和 Deilmann-Haniel 公司

生产的多种台车配备了这种臂^[2, 3], 我国的隧道凿岩机器人样机也采用了双三角结构的机械钻臂^[4]。国内外许多研究者对这种臂进行了广泛研究^[4-7]。

双三角机械臂是一个多关节的空间杆件系, 油

收稿日期: 2005-11-12

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目(05JJ30206)

作者简介: 何清华(1946-), 男, 湖南岳阳人, 教授, 博士生导师, 从事机电液一体化研究与应用

通讯作者: 何清华, 男, 教授; 电话: 0731-4020667(O); E-mail: HQH@mail.csu.edu.cn

缸的驱动输入与末端执行器空间位姿输出之间是典型的多输入和多输出关系, 各输入驱动对输出变量的影响又是相互耦合的, 这对末端执行器的空间定位带来很大困难。何清华等^[12, 13, 16]研究了这一耦合关系, 借助空间几何的方法, 得到了近似代数式, 实现了机械臂的位姿驱动; 王恒升等^[5]克服了以上方案中在线计算量大和计算精度不高的不足, 提出增加测量支臂油缸俯仰角的办法, 计算公式得到很大简化。

在文献[5]的基础上, 本文作者进一步推出支臂缸长度的增量算式, 由此直接以空间位姿变量(而不是驱动油缸长度)为目标参数构建闭环控制系统。为了验证其正确性, 在 MATLAB 中建立控制系统的仿真模型。但由于双三角机械臂是一个多输入、多输出、本质非线性的动力学系统, 难以建立其数学模型, 因此, 建立双三角机械臂的 ADAMS 模型, 并将 ADAMS 模型导出成为 MATLAB 的动力学计算模型, 完成在 MATLAB 中的闭环仿真。

1 增量算式

何清华等^[13, 17]将三角臂的“十”字铰简化为球铰, 并将两变幅缸的前端距离简化为零, 得到如下支臂油缸长度的近似算式:

$$d_{13} = [(a_2 \cos \theta_1 \cos \theta_2)^2 + (a_2 \sin \theta_1 \cos \theta_2 - a_{10})^2 + (d_{10} + a_2 \sin \theta_2)^2]^{1/2}; \quad (1)$$

$$d_{23} = [(a_2 \cos \theta_1 \cos \theta_2)^2 + (a_2 \sin \theta_1 \cos \theta_2 + a_{20})^2 + (d_{10} + a_2 \sin \theta_2)^2]^{1/2}。 \quad (2)$$

其中: a_2 为大臂长度; θ_1 为大臂摆角; θ_2 为大臂俯仰角; d_{13} 和 d_{23} 分别为左、右支臂油缸的长度^[6]。

对式(1)和(2)两边求导, 可得:

$$\frac{d}{dt}d_{13} = f_{13}(\theta_1, \theta_2) \frac{d}{dt}\theta_1 + g_{13}(\theta_1, \theta_2) \frac{d}{dt}\theta_2; \quad (3)$$

$$\frac{d}{dt}d_{23} = f_{23}(\theta_1, \theta_2) \frac{d}{dt}\theta_1 + g_{23}(\theta_1, \theta_2) \frac{d}{dt}\theta_2。 \quad (4)$$

式中:

$$f_{13}(\theta_1, \theta_2) = \frac{-a_2 a_{10} \cos \theta_1 \cos \theta_2}{d_{13}}; \quad (5)$$

$$g_{13}(\theta_1, \theta_2) = \frac{a_2(a_{10} \sin \theta_1 \sin \theta_2 + d_{10} \cos \theta_2)}{d_{13}}; \quad (6)$$

$$f_{23}(\theta_1, \theta_2) = \frac{a_2 a_{10} \cos \theta_1 \cos \theta_2}{d_{23}}; \quad (7)$$

$$g_{23}(\theta_1, \theta_2) = \frac{a_2(-a_{20} \sin \theta_1 \sin \theta_2 + d_{10} \cos \theta_2)}{d_{23}}; \quad (8)$$

$$d_{13} = \frac{-a_2 \sin \theta_2 - d_{10}}{\cos \theta_2};$$

$$d_{23} = \frac{-a_2 \sin \theta_2 - d_{20}}{\cos \theta_2}。 \quad (9)$$

将式(3)和(4)写成增量的形式, 即

$$\Delta d_{13} = f_{13}(\theta_1, \theta_2) \Delta \theta_1 + g_{13}(\theta_1, \theta_2) \Delta \theta_2; \quad (10)$$

$$\Delta d_{23} = f_{23}(\theta_1, \theta_2) \Delta \theta_1 + g_{23}(\theta_1, \theta_2) \Delta \theta_2。 \quad (11)$$

由上2式可得到如图1所示控制系统结构。与文献[5]中的图3相比, 这一结构的控制系统以关节变量构成闭环控制, 通过静态解耦, 得到操纵变量(即油缸长度的驱动输入), 控制作用更为直接。

以上算式的推导是对实际机构简化后得到的^[5], 为了研究其控制的精确度与可行性, 拟在 MATLAB 中进行仿真, 但由于双三角机械臂是一个多输入、多输出的本质非线性动力学系统, 难以建立数学模型, 故在 ADAMS 建立其动态模型, 以实现仿真。

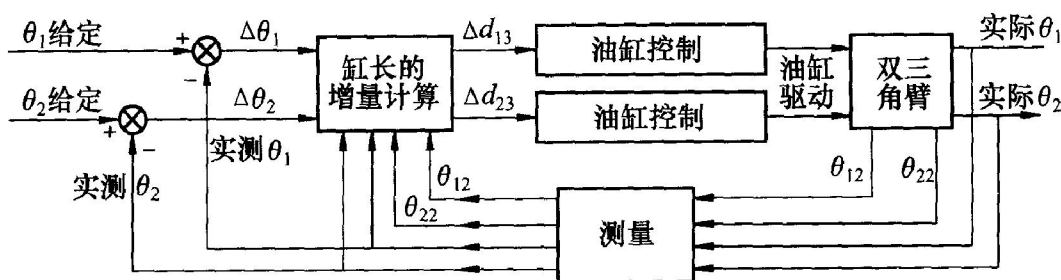
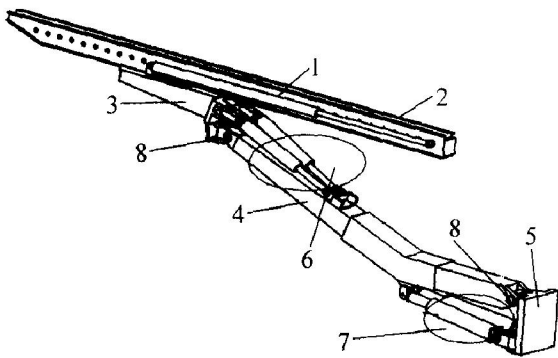


图1 控制系统结构

Fig. 1 Structure of control system

2 仿真模型

考虑到双三角机械臂各零部件之间存在复杂的运动约束关系和严格的位置关系,因此,三维几何模型的建立采用专业的三维 CAD 软件 SOLIDWORKS。在 SOLIDWORKS 中实现零件的建模及机械臂的整体装配,也就是确定模型的零件外形、尺寸和零件间的位置关系。双三角机械臂三维几何模型总装图如图 2 所示。



1—推进油缸; 2—推进梁; 3—小臂;
4—大臂; 5—后板; 6—俯仰油缸
7—支臂油缸; 8—十字铰

图 2 双三角机械臂模型装配图

Fig. 2 Assemble drawing of double triangle boom

将 SOLIDWORKS 建立的模型导入 ADAMS,在 ADAMS 中重新定义各个刚体的材质、表面颜色及刚体间的约束关系等,运动副及杆件坐标系的定义与文献[5]中的图 1 相同。

双三角臂在实际工作中,保持钻杆平行是一种主要运动方式,因此,在模型导出时将前、后支臂缸设定为联动方式,相应油缸按同一状态变量呈比例运动。因此,导出模型(图 3 中的 adams_sub)的输入状态变量 $(\Delta d_{13}, \Delta d_{23})^T$ 反映后支臂油缸的运动速度(与前支臂油缸联动),输出状态变量 $(\theta_1, \theta_2, \theta_{11}, \theta_{12}, \theta_{21}, \theta_{22})^T$ 为后三角杆件的关节变量^[5]。

根据图 1 可构建双三角臂运动仿真过程如图 3 所示。图 3 中除 ADAMS 模型子程序(adams_sub 即 MATLAB.m)外,还包含 1 个 S 函数子程序 Deltalen_cyli,该子程序的输入变量为 $(\theta_1, \theta_2, \theta_{12}, \theta_{22}, \Delta\theta_1, \Delta\theta_2)^T$,输出变量为 $(\Delta d_{13}, \Delta d_{23})^T$,其功能就是运算算式(5)~(11)。仿真时,直接用油缸距目标长度的差作为驱动油缸的速度输入,只要有位置差,油缸就有逼近目标位置的速度输入,因

此,这是一个位置无差系统。

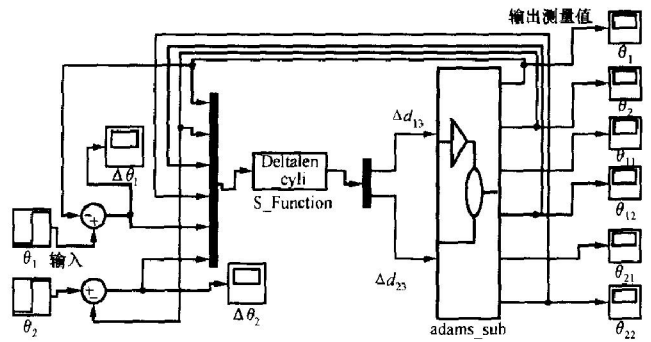


图 3 双三角臂的仿真过程

Fig. 3 Simulation process of double triangle boom

本仿真的目的是为了验证增量算式的正确性,不关注控制算法和动态性能指标。事实上,这里直接将计算的缸长增量(即缸长偏差)作为双三角臂动态模型的输入,在 ADAMS 中将该输入定义为支臂油缸移动副的速度驱动,因此,就控制算法来说,这是一个比例积分运算。

3 仿真实例

某实际机械臂的参数为: $a_1 = a_{11} = a_{21} = 90.63$ mm, $a_2 = 866.06$ mm, $d_{10} = d_{20} = 250$ mm, $a_{10} = a_{20} = 115$ mm。

在初始位置时各关节变量均在零位,给定 θ_1 在零时刻有 $+20^\circ$ 的阶跃,在 3 s 时有 -40° 的阶跃; θ_2 的给定与 θ_1 的给定相似,只是阶跃的幅度分别为 $+5^\circ$ 和 -10° ,仿真时间为 6 s,得到的仿真曲线如图 4 所示(为使图面清楚,图中未画出 θ_2 的给定曲线)。

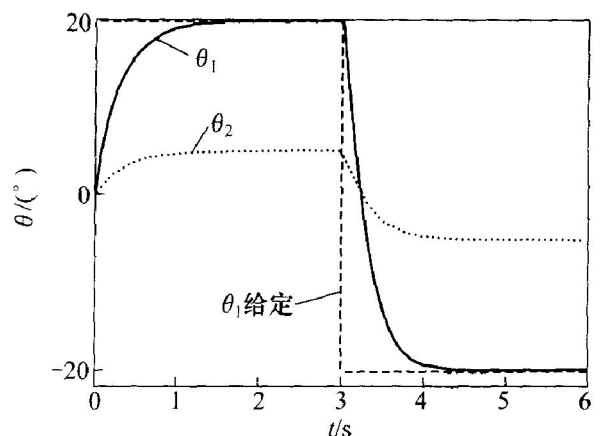


图 4 θ_1 和 θ_2 的仿真过程曲线

Fig. 4 Simulation process of θ_1 and θ_2

从图4可以看出, 经过暂态过程后, 2个被控角度均趋于预期值。为了说明 θ_1 和 θ_2 是否同步逼近目标值, 图5给出了逼近过程中 θ_1 和 θ_2 的关系曲线。若 θ_1 和 θ_2 是线性关系, 说明两者是同步从起始点到达目标点, 这时钻臂端点的移动轨迹在隧道断面的投影将是一条直线^[15], 这对缩短钻臂移动时间和提高钻臂移动过程的平稳性都有利。从图5可以看出, 钻臂移动过程接近一条直线, 在该仿真条件下最大线性相对误差为3.3%。

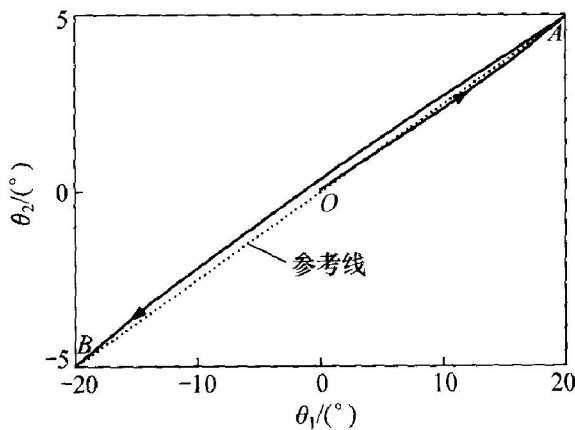


图5 θ_1 和 θ_2 的相对变化过程曲线

Fig. 5 Relationship between θ_1 and θ_2 in approximation

从图5还可得出一个非常重要的结论, 即尽管本文提出的增量算式是在微变量条件下(求导数)得到的, 对于大的偏差变化范围该算式仍然适用, 只是钻臂运动的轨迹稍微偏离直线, 但误差并不大。图5中OA段表示钻臂从初始零位到达 θ_1 为 20° , θ_2 为 5° 的过程, 此时 θ_1 的最大偏差为 20° , θ_2 的最大偏差为 5° ; AB段表示钻臂从 θ_1 为 20° 和 θ_2 为 5° 到达 θ_1 为 -20° 和 θ_2 为 -5° 的过程, 此时 θ_1 的最大偏差为 40° , θ_2 的最大偏差为 10° 。

4 结 论

a. 推导出了双三角机械臂支臂油缸长度计算的增量公式, 由此得出了以关节变量为目标参数的钻臂定位闭环控制系统结构。

b. 在MATLAB环境下进行仿真, 仿真中用到的双三角臂的动力学模型是在ADAMS中建模, 然后导出成为MATLAB.m函数计算模型得到的。

c. 某实际双三角臂的仿真结果证明本文推出的增量算式和提出的控制系统结构是正确的; 增量公式尽管是在微变情况下得到的, 对于大变化范围

依然适用, 其误差会对控制过程产生影响, 体现在钻臂轨迹稍微偏离直线, 但这不会影响最终的控制精度, 同时轨迹误差也不大, 完全可以用于实际控制。

参考文献:

- [1] Kimber E V, Lundstrom A L. Drill boom arrangement: US: 4232849[P]. 1980-11-11.
- [2] Zhong G, Nikiforuk P N, Ukrainetz P R. Kinematics of a robot manipulator—A hydraulic drilling boom [C]//Proceedings of the First International Symposium on Fluid Power Transmission and Control. Beijing, 1991: 556-559.
- [3] Zhong G G Z. Development of a hydraulic robot for tunnel drilling—manipulator kinematics and tracking control [D]. Saskatoon: Department of Mechanical Engineering, University of Saskatchewan, 1995.
- [4] 何清华. 隧道凿岩机器人[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2005.
HE Qing-hua. Tunnel rock-drilling robot [M]. Changsha: Central South University Press, 2005.
- [5] 王恒升, 何清华, 邓春萍. 三角钻臂的运动控制研究[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2006, 34(5): 660-664.
WANG Heng-sheng, HE Qing-hua, DENG Chun-ping. Motion control of triangle boom [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2006, 34(5): 660-664.
- [6] 何清华, 周宏兵, 吴凡. 凿岩机器人钻臂的运动学研究[J]. 中南工业大学学报: 自然科学版, 1998, 29(5): 483-486.
HE Qing-hua, ZHOU Hong-bing, WU Fan. The kinematics equations of the boom of rock-drilling robot [J]. Journal of Central South University of Technology: Natural Science, 1998, 29(5): 483-486.
- [7] 陈世涛. 直接定位双三角支承钻臂运动轨迹的计算机仿真[J]. 凿岩机械气动工具, 1995(3): 1-9.
CHEN Shi-tao. Computer motion simulation of double triangle boom [J]. Rock Drilling Machinery & Pneumatic Tools, 1995(3): 1-9.
- [8] 陈世涛. 钻车钻臂与推进器干涉条件的数学模型[J]. 矿山机械, 1997, 25(5): 1-3.
CHEN Shi-tao. Interference condition mathematical model between boom and thruster of rock drilling jumbo [J]. Mine Machinery, 1997, 25(5): 1-3.
- [9] 杨孝球, 王绍友, 黄柏龄, 等. LYZ-XD12型单臂液压凿岩钻车的研制[J]. 探矿工程: 岩土钻掘工程, 1996(2): 23-25.

- YANG Xiao-qiu, WANG Shou-you, HUANG Bai-ling, et al. LYZ-XD12 single-boom hydraulic rock drilling jumbo [J]. *Exploration Engineering: Rock & Soil Drilling and Tunnelling*, 1996(2): 23 - 25.
- [10] 陈世涛. 钻臂类型分析[J]. *凿岩机械气动工具*, 1998(4): 24 - 29.
- CHEN Shi-tao. Type analysis of rock drilling jumbo boom [J]. *Rock Drilling Machinery & Pneumatic Tools*, 1998(4): 24 - 29.
- [11] 李川, 阎天俊. 双三角式液压钻臂平动机构分析[J]. *凿岩机械气动工具*, 1999(1): 3 - 5.
- LI Chuan, YAN Tian-jun. Parallel motion analysis of hydraulic double triangle boom [J]. *Rock Drilling Machinery & Pneumatic Tools*, 1999(1): 3 - 5.
- [12] 何清华, 方向. 隧道凿岩机器人双三角钻臂运动分析与控制策略[J]. *矿山机械*, 2000, 28(2): 21 - 23.
- HE Qing-hua, FANG Xiang. Motion analysis and control strategy of double triangle boom of rock drilling robot [J]. *Mine Machinery*, 2000, 28(2): 21 - 23.
- [13] 何清华, 李力争, 周宏兵. 双三角钻臂及其液压系统的建模与参数估计[J]. *中南工业大学学报(自然科学版)*, 2001, 32(5): 519 - 522.
- HE Qing-hua, LI Li-zheng, ZHOU Hong-bing. Modeling and parameter estimation for double triangle boom and its hydraulic system [J]. *Journal of Central South University of Technology: Natural Science*, 2001, 32(5): 519 - 522.
- [14] 周友行, 何清华, 徐海良, 等. 多关节凿岩机械手快速定位方法[J]. *中南工业大学学报: 自然科学版*, 2001, 32(6): 622 - 625.
- ZHOU You-hang, HE Qing-hua, XU Hai-liang, et al. The speediness orientation of the multi-joint rock-drilling manipulator [J]. *Journal of Central South University of Technology: Natural Science*, 2001, 32(6): 622 - 625.
- [15] 李力争, 何清华. 凿岩机器人轨迹跟踪自适应预测控制[J]. *机械科学与技术* 2003, 22(1): 12 - 14.
- LI Li-zheng, HE Qing-hua. Adaptive predictive control for trajectory tracking of a rock-drilling robot [J]. *Mechanical Science and Technology*, 2003, 22(1): 12 - 14.
- [16] 何清华. 一种新型钻臂变幅机构的设计与分析[J]. *工程机械*, 1988(7): 12 - 14.
- HE Qing-hua. Design and analysis of a new boom luffing mechanism of rock drilling jumbo [J]. *Construction Machinery*, 1988(7): 12 - 14.
- [17] Sellgren U. Simulation-driven design motives, means and opportunities [D]. Stockholm: Department of Machine Design, the Royal Institute of Technology, 1999.