

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2018.03.002

凿岩机器人三角钻臂的运动研究^{*}

朱建新^{1,2}, 罗南安¹, 周烜亦^{1,2}, 高 静¹

(1. 中南大学 机电工程学院, 湖南 长沙 410083; 2. 湖南山河智能机械股份有限公司 技术中心, 湖南 长沙 410100)

摘要:针对凿岩机器人三角钻臂精确运动控制困难的问题,对三角钻臂的机械结构进行了运动解耦分析。首先通过 D-H 坐标法建立了多关节闭链钻臂的完备运动学方程,构建了三角钻臂运动位置与支臂油缸长度的数学模型;随后基于三角钻臂特定结构约束下的运动特点,利用空间几何解法,构建了相对简单的运动数学模型,同时在此基础下提出了三角钻臂运动的一般控制流程;最后结合具体实例分析两种不同模型下的计算结果并与相同条件下的三角钻臂三维模型的测量结果进行了相互验证。研究结果表明:运动解耦分析所建立的运动数学模型正确性得到了验证,这可以为钻臂的精确定位控制打下基础。

关键词: 凿岩机器人;三角钻臂;空间几何;运动研究

中图分类号: TH113.2; TP242

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2018)03-0224-05

Motion of triangle boom on rock drilling robot

ZHU Jian-xin^{1,2}, LUO Nan-an¹, ZHOU Xuan-yi^{1,2}, GAO Jing¹

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;

2. R&D Center, Sunward Intelligent Equipment Co., Ltd., Changsha 410100, China)

Abstract: Aiming at the difficulty of precise motion control of the triangle boom of the rock drilling robot, the motion decoupling analysis of the mechanical structure of the triangle boom was carried out. Firstly, the complete kinematic equations of the multi-closed-chain triangle boom were established by D-H coordinate method. The mathematical model of the boom motion position and the length of hydraulic cylinder was constructed. Then, based on the motion characteristics under the constraint of the specific structure of the rock drilling manipulator, a relatively simple mathematical model was constructed by using the geometric analysis method. At the same time, the general control flow of the triangle boom movement was put forward. Finally, a case calculation was given to analyze the two different model results and verify with the three-dimensional model of the triangle boom under the same conditions. The results indicate that the motion mathematical model established by the motion decoupling analysis is correct, which built the foundation for the precise positioning control of the rock drilling boom.

Key words: rock-drilling robot; triangle boom; space geometry; motion research

0 引 言

在交通道路工程中,隧道开凿是一项重要内容。目前我国的隧道施工方法以钻爆法为主,凿岩机器人以其准确的定位钻孔功能,良好的操控性,

较好的成洞质量等优点成为隧道施工的主要机械设备。

钻臂是凿岩机器人的主要工作机构,采用双三角架式定位结构,它的主要特点就是可以在空间中平行移动,动作迅速,结构紧凑,平稳性比较好,但是不容易

收稿日期:2017-07-25

基金项目:湖南省重大科技专项资助项目(2011XK4001)

作者简介:朱建新(1965-),男,湖南湘潭人,教授,博士生导师,主要从事工程装备与电液控制自动化领域基础研究与实用开发。E-mail:

zjx_csu@163.com

控制,是一个多输入多输出并且有耦合的复杂运动^[1]。而定位精度是影响钻臂作业的重要因素,因此对三角钻臂的运动研究是非常必要的。

而控制三角钻臂移动又是通过由液压驱动的两支臂缸伸缩组合实现的。因此推出支臂缸伸长量与大臂运动偏转角和俯仰角的数学模型是三角钻臂运动研究的关键。文献[2]建立了凿岩机器人从大臂到钻杆6个旋转关节、3个移动关节的运动学方程,但对三角钻臂的驱动及运动没有进行研究;文献[3]研究了驱动支臂油缸长度与机械钻臂的空间位置之间的耦合关系,借助空间几何的方法,利用直角、球面和平行坐标的转换,得到了近似代数式,实现了钻臂的运动控制,但由于将十字铰视为球铰,结果是近似的,难于实现精确控制;文献[4]建立了三角钻臂的杆件坐标系,利用多关节闭链的约束条件建立了运动学方程,得到了由给定钻臂位置计算油缸长度的比较精确算式。在增加油缸俯仰角的测量点后,得到缸长的简化算式,提高臂轨迹控制的精确度。但忽略了支臂液压缸伸出杆与钻臂连接点间的长度,将其视为一点,简化了理论模型,所以结果依然是近似的;文献[5]分别以几何法和坐标变换法计算凿岩机器人钻臂的油缸长度,并与实际拉线传感器测得油缸伸缩长度进行比较,得出了坐标变化法计算值和实际值的吻合度较高,但没有建立与钻臂偏摆角和俯仰角的函数关系,不能用于运动控制;文献[6]通过对凿岩机械手支臂部分建立几何模型,推出了支臂油缸行程和钻臂偏摆、俯仰角度之间的关系。然而所建几何模型与实际结构有一定误差且将钻臂固定面与大臂连接杆和固定面与液压缸连接杆的运动偏转角视为相同,所以结果是不准确。

本文结合三角钻臂机械结构模型,考虑支臂液压缸伸出杆与钻臂连接杆之间的长度,分析得到钻臂运动位置与支臂油缸长度的精确转换数学模型,利用空

间几何解法构建三角钻臂简易数学模型。

1 机器人坐标变换法

本研究结合三角钻臂实际结构模型,考虑两支臂液压缸伸出杆与钻臂连接处的长度,视为一端与钻臂中心轴固定另一端通过转动副与支臂缸连接的连杆。

本研究建立的三角钻臂模型如图1所示。

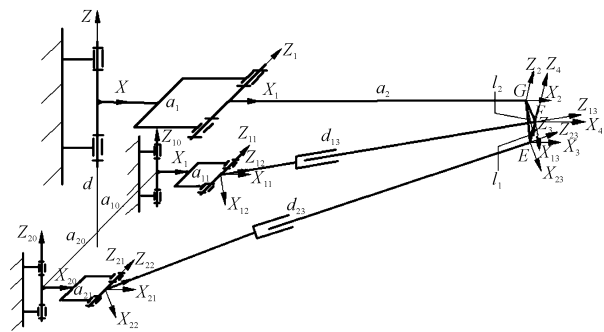


图1 三角钻臂的机构图

本研究在连接处 E, F 点分别建立定坐标系3,4,根据机器人坐标系变换原理^[7-8]可得二者与坐标2的变换为固定变换,其变换矩阵为:

$$A_3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & L2 \\ 0 & 0 & 1 & -L1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$A_4 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & L2 \\ 0 & 0 & 1 & L1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

式中: E 点, F 点—转动副; G 点—固定连接;杆长 EG 和 FG —连接长度,且其长度和与大臂的相对位置是固定不变的。

结合文献[9]中的相连连杆的坐标变换关系,由多关节闭链的约束条件可得到以下方程组:

$$\begin{cases} a_1 \cos \theta_1 + l_1 \sin \theta_1 + l_2 \cos \theta_1 \cos \theta_2 + l_2 \cos \theta_1 \sin \theta_2 = \cos \theta_{21} \sin \theta_{22} d_{23} + a_{21} \cos \theta_{21} \\ a_1 \sin \theta_1 - l_1 \cos \theta_1 + a_2 \sin \theta_1 \cos \theta_2 + l_2 \sin \theta_1 \sin \theta_2 = \sin \theta_{21} \sin \theta_{22} \cdot d_{23} + a_{21} \sin \theta_{21} + a_{20} \\ l_2 \cos \theta_2 - a_2 \sin \theta_2 = \cos \theta_{22} d_{23} + d_{20} \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} a_1 \cos \theta_1 - l_1 \sin \theta_1 + a_2 \cos \theta_1 \cos \theta_2 + l_2 \cos \theta_1 \sin \theta_2 = \cos \theta_{11} \sin \theta_{12} d_{13} + a_{11} \cdot \cos \theta_{11} \\ a_1 \sin \theta_1 + l_1 \cos \theta_1 + a_2 \sin \theta_1 \cos \theta_2 + l_2 \sin \theta_1 \sin \theta_2 = \sin \theta_{11} \sin \theta_{12} d_{13} + a_{11} \sin \theta_{11} + a_{10} \\ l_2 \cos \theta_2 - a_2 \sin \theta_2 = \cos \theta_{12} d_{13} + d_{10} \end{cases} \quad (4)$$

式中: θ_1 —大臂水平偏摆角; θ_2 —大臂俯仰角; θ_{11} —左支臂缸的水平偏摆角; θ_{12} —左支臂缸的俯仰角; θ_{21} —右支臂缸的水平偏摆角; θ_{22} —右支臂缸的俯仰角; d_{13} —左支臂缸的长度; d_{23} —右支臂缸的长度; l_1 —两油缸缸体铰接点之间距离的一半; l_2 —钻臂交点至两油缸缸体铰接点连线的距离。

方程组(3~4)即为三角钻臂机构的运动学数学模型,控制三角钻臂的目的在于将大臂移动到一定的空间位置,实现钻臂定位,即达到指定摆角 θ_1 和俯仰角 θ_2 。而这又是通过驱动两支臂缸运动即改变两缸的长度 d_{13} 和 d_{23} 来实现的^[10]。

所以笔者在已知摆角 θ_1 和俯仰角 θ_2 ,通过上述方程组可以得到两支臂缸的伸长量,从而实现目标量与控制量之间的耦合转换,进而可实现进一步的运动控制。

2 空间状态几何法

三角钻臂简化的空间几何模型如图 2 所示。

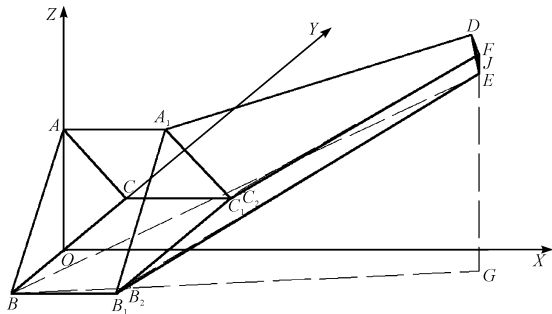


图 2 大三角钻臂的几何模型

A_1 —钻臂铰座点; B_1 —右支臂油缸活塞杆铰座点; C_1 —左支臂油缸活塞杆铰座点; B_2 —偏转 θ_1 后右油缸活塞杆铰座点; C_2 —偏转 θ_1 后左油缸活塞杆铰座点; E —右油缸缸体铰座点; F —左油缸缸体铰座点; D —点为油缸铰座与钻臂交点; G — E 点在 XOY 平面的投影点; J — EF 中点

由凿岩机器人三角钻臂机械结构可知, A_1 点绕 A 转动,其运动轨迹是一段圆弧,且 AA_1 偏摆角度与钻臂偏摆角度相同, A_1D 垂直平面 EDF 且 D 点为固定连接。在已知偏摆角度 θ_1 和俯仰角度 θ_2 ,求解支臂油缸位移与钻臂运动角度之间的数学模型即为求解长度 B_2E 和 C_2F 与角度 θ_1, θ_2 之间的函数关系。

根据图 2,笔者建立三维空间坐标系,平面 ABC 三点固定,原点 O 为 BC 中点, X 轴水平向右且与 AA_1 初始位置平行, Y 轴沿 BC 方向且由 B 指向 C , Z 轴过 A 点方

向竖直向上。

设 $A_1(x_A, y_A, z_A)$ 、 $B(x_B, y_B, z_B)$ 、 $C(x_C, y_C, z_C)$ 、 $D(x_D, y_D, z_D)$ 、 $E(x_E, y_E, z_E)$ 、 $F(x_F, y_F, z_F)$ 、 $G(x_G, y_G, z_G)$ 、 $J(x_J, y_J, z_J)$, 由有空间几何原理^[11] 可得:

$$\begin{cases} x_A = a_1 \cdot \cos\theta_1 \\ y_A = a_1 \cdot \sin\theta_1 \\ z_A = d \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} x_B = 0 \\ y_B = a_{20} \\ z_B = 0 \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} x_C = 0 \\ y_C = a_{10} \\ z_C = 0 \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} x_D = a_1 \cdot \cos\theta_1 + a_2 \cos\theta_2 \cos\theta_1 \\ y_D = a_1 \cdot \sin\theta_1 + a_2 \cos\theta_2 \sin\theta_1 \\ z_D = d + a_2 \sin\theta_2 \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} x_J = a_1 \cdot \cos\theta_1 + a_2 \cos\theta_2 \cos\theta_1 + l_2 \sin\theta_2 \cos\theta_1 \\ y_J = a_1 \cdot \sin\theta_1 + a_2 \cos\theta_2 \sin\theta_1 + l_2 \sin\theta_2 \sin\theta_1 \\ z_J = d + a_2 \sin\theta_2 - l_2 \cos\theta_2 \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} x_E = a_1 \cdot \cos\theta_1 + a_2 \cos\theta_2 \cos\theta_1 + l_2 \sin\theta_2 \cos\theta_1 + l_1 \sin\theta_1 \\ y_E = a_1 \cdot \sin\theta_1 + a_2 \cos\theta_2 \sin\theta_1 + l_2 \sin\theta_2 \sin\theta_1 - l_1 \cos\theta_1 \\ z_E = d + a_2 \sin\theta_2 - l_2 \cos\theta_2 \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} x_F = a_1 \cdot \cos\theta_1 + a_2 \cos\theta_2 \cos\theta_1 + l_2 \sin\theta_2 \cos\theta_1 - l_1 \sin\theta_1 \\ y_F = a_1 \cdot \sin\theta_1 + a_2 \cos\theta_2 \sin\theta_1 + l_2 \sin\theta_2 \sin\theta_1 + l_1 \cos\theta_1 \\ z_F = d + a_2 \sin\theta_2 - l_2 \cos\theta_2 \end{cases} \quad (11)$$

结合三角钻臂的约束条件,由空间几何关系先求 BE 的长度:

$$|BE| = \sqrt{x_E^2 + y_E^2 + z_E^2} \quad (12)$$

在直角三角形 BEG 中,由勾股定理可得:

$$\begin{aligned} |BG| &= \sqrt{|BE|^2 - |GE|^2} = \\ &= \sqrt{x_E^2 + (y_E - a_{20})^2 + z_E^2 - z_E^2} = \\ &= \sqrt{x_E^2 + (y_E - a_{20})^2} \end{aligned} \quad (13)$$

又 B, B_2, G 三点在平面 XOY 始终共线,故有:

$$\begin{aligned} |B_2G| &= |BG| - |BB_2| = \\ &= \sqrt{x_E^2 + (y_E - a_{20})^2} - a_{21} \end{aligned} \quad (14)$$

$$|B_2E| = \sqrt{|B_2G|^2 + |GE|^2} =$$

$$\sqrt{(\sqrt{x_E^2 + (y_E - a_{20})^2} - a_{21})^2 + z_E^2} \quad (15)$$

代入坐标,可得右支臂油缸长度为:

$$|B_2E|^2 = \left(a_{21} - \left(\sqrt{\frac{(a_1 \cos \theta_1 + l_1 \sin \theta_1 + a_2 \cos \theta_1 \cos \theta_2 + l_2 \cos \theta_1 \sin \theta_2)^2 + (a_{20} + a_1 \sin \theta_1 - l_1 \cos \theta_1 + a_2 \cos \theta_2 \sin \theta_1 + l_2 \sin \theta_1 \sin \theta_2)^2}{2}} \right) \right)^2 + (d - l_2 \cos \theta_2 + a_2 \sin \theta_2)^2 \quad (16)$$

同理可得左支臂油缸长度:

$$|C_2F|^2 = |C_2N|^2 + |NF|^2 = (\sqrt{x_E^2 + (y_E - a_{11})^2} - a_{10})^2 + z_E^2 =$$

$$\left(a_{11} - \left(\sqrt{\frac{(a_1 \cos \theta_1 - l_1 \sin \theta_1 - a_{11} + a_2 \cos \theta_1 \cos \theta_2 + l_2 \cos \theta_1 \sin \theta_2)^2 + (a_{10} + a_1 \sin \theta_1 + l_1 \cos \theta_1 + a_2 \cos \theta_2 \sin \theta_1 + l_2 \sin \theta_1 \sin \theta_2 - a_{10})^2}{2}} \right) \right)^2 + (d - l_2 \cos \theta_2 + a_2 \sin \theta_2)^2 \quad (17)$$

式中:各参数含义与方程式(3,4)中相同。

该数学模型更为简单方便。

本研究在实际控制过程中通过控制左右油缸的伸缩来实现大臂的偏转和俯仰运动进而实现钻臂的定位控制。而支臂缸长度与偏转和俯仰角是一一对应,从而可以通过对中间量油缸长度的准确控制来实现钻臂角度即位置的精确定位控制^[12]。

由此可得运动控制器框图如图3所示。

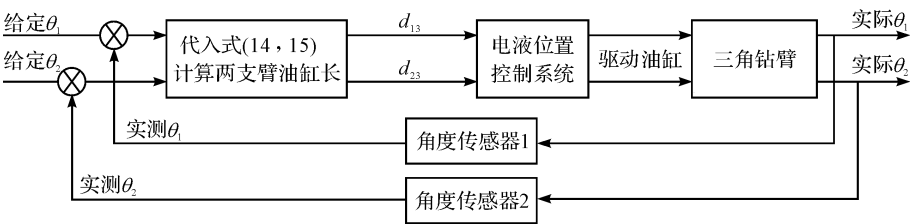


图3 三角钻臂控制框图

控制流程如下:

给定期望的偏摆与俯仰角,可计算出两油缸期望缸长,经由电液位置控制系统使油缸运动到计算长度,两个角度传感器实时检测三角钻臂偏转角与俯仰角并反馈控制。

3 算例与结果分析

某实际凿岩机器人三角钻臂的参数为:

- $a_1 = 215\text{ mm},$
- $a_{11} = a_{21} = 200\text{ mm},$
- $a_2 = 1\,750\text{ mm},$
- $d_{10} = d_{20} = 520;$
- $a_{10} = -a_{20} = 260\text{ mm},$
- $l_1 = 172\text{ mm}, l_2 = 320\text{ mm}。$

当 θ_1 和 θ_2 分别在-45到45之间取5个值,利用式(3)可得到右支臂缸缸长 d_{23} 的计算结果,如表1所示。

在同样的条件下,代入式(16)的计算结果,如表2所示。

表1 式(3)的计算结果

$\theta_1 /$ (°)	d_{23} / mm				
	$\theta_2 = -45^\circ$	$\theta_2 = -20^\circ$	$\theta_2 = 0^\circ$	$\theta_2 = 20^\circ$	$\theta_2 = 45^\circ$
-45	1 264.989 5	1 417.870 8	1 593.790 1	1 783.646 3	2 005.305 9
-20	1 331.659 0	1 511.028 3	1 689.348 8	1 869.724 5	2 068.945 7
0	1 396.453 7	1 597.882 5	1 778.252 3	1 950.601 7	2 130.227 1
20	1 462.343 0	1 683.629 8	1 865.947 4	2 031.039 2	2 192.391 7
45	1 534.547 6	1 774.888 4	1 959.115 8	2 117.129 3	2 260.240 3

表2 式(16)的计算结果

$\theta_1 /$ (°)	d_{23} / mm				
	$\theta_2 = -45^\circ$	$\theta_2 = -20^\circ$	$\theta_2 = 0^\circ$	$\theta_2 = 20^\circ$	$\theta_2 = 45^\circ$
-45	1 264.989 5	1 417.870 8	1 593.790 1	1 783.646 3	2 005.305 9
-20	1 331.659 0	1 511.028 3	1 689.348 8	1 869.724 5	2 068.945 7
0	1 396.453 7	1 597.882 5	1 778.252 3	1 950.601 7	2 130.227 1
20	1 462.343 0	1 683.629 8	1 865.947 4	2 031.039 2	2 192.391 7
45	1 534.547 6	1 774.888 4	1 959.115 8	2 117.129 3	2 260.240 3

对比表1和表2结果可以发现:在相同条件下式(3)和式(16)计算得到的支臂缸长度完全一致,这初步验证了两种方法所建立模型的正确性;且计算过程中式(16)更快速简便。

最后本研究在Pro/E中建立三角钻臂的三维模

型,某凿岩机器人三角钻臂的三维模型如图 4 所示。



图 4 某凿岩机器人三角钻臂的三维模型

其大三角参数与算例一致。本研究设定固定基准面,使钻臂相对基准面转动指定角度后,测量其支臂液压缸长度,测量结果如表 3 所示。

对比可以看出:三者结果一一吻合,表明了所建立数学模型的正确性,且结果在理论上无偏差。

表 3 三维模型的测量结果

$\theta_1 /$ (°)	d_{23} / mm				
	$\theta_2 = -45^\circ$	$\theta_2 = -20^\circ$	$\theta_2 = 0^\circ$	$\theta_2 = 20^\circ$	$\theta_2 = 45^\circ$
-45	1 264.99	1 417.87	1 593.79	1 783.65	2 005.31
-20	1 331.66	1 511.03	1 689.35	1 869.72	2 068.95
0	1 396.45	1 597.88	1 778.25	1 950.60	2 130.23
20	1 462.34	1 683.63	1 865.95	2 031.04	2 192.39
45	1 534.55	1 774.89	1 959.12	2 117.13	2 260.24

4 结束语

三角钻臂的运动控制直接影响钻臂的定位控制,因此建立准确的运动模型是至关重要的。本文首先在前人基础上利用机器人运动学理论建立了三角钻臂机构的完善运动学模型,并解出其数学模型;然后结合三角钻臂机械结构运动约束条件利用空间状态几何解法,分析得到支臂液压缸长度与大臂偏转角和俯仰角之间的函数关系。最后结合算例与三维模型进行了相

互验证。
研究表明:运动数学模型建立正确,这为钻臂的精确运动控制及钻臂定位的误差补偿的研究打下了基础。

参考文献 (References):

[1] 何清华. 隧道凿岩机器人[M]. 长沙:中南大学出版社, 2004.

[2] 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.

[3] 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(2):21.

[4] 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.

[5] 李尊远,代慧敏,高 明. 凿岩机器人钻臂油缸行程计算方法的误差分析[J]. 矿山机械,2011,39(9):110-112.

[6] 殷建坤. 多臂凿岩台车孔序规划研究[D]. 长沙:中南大学机电工程学院,2013.

[7] 董慧颖. 机器人原理与技术[M]. 北京:清华大学出版社, 2014.

[8] 柳建飞,张伟中. 新型二自由度移动并联机构设计[J]. 轻工机械,2017,35(2):63-65.

[9] 王恒升. 凿岩机器人双三角臂定位及 CAN 总线控制系统研究[D]. 长沙:中南大学机电工程学院,2006.

[10] 邹湘伏,周友行,何清华,等. 隧道凿岩机器人双三角十字铰钻臂的运动控制[J]. 凿岩机械气动工具,2002(4):30-33.

[11] 范崇金,王 锋. 线性代数与空间解析几何[M]. 北京:高等教育出版社,2016.

[12] 李力争,何清华,谢习华,等. 双三角钻臂直接定位自适应预测控制[J]. 中南大学学报:自然科学版,2004,35(6):983-987.

[编辑:张 豪]

本文引用格式:

朱建新,罗南安,周烜亦,等. 凿岩机器人三角钻臂的运动研究[J]. 机电工程,2018,35(3):224-228.

ZHU Jian-xin, LUO Nan-an, ZHOU Xuan-yi, et al. Motion of triangle boom on rock drilling robot[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2018, 35(3):224-228.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>