

文章编号: 0253-9993(2008)05-0583-05

机器人化掘进机的运动分析及车体定位

李军利, 廉自生, 李元宗

(太原理工大学 机械工程学院, 山西 太原 030024)

摘要: 为实现对悬臂式掘进机的截割断面实时监测和自动控制, 对其机器人化模型进行简化. 采用平行坐标系法建立掘进机连杆坐标系和工作坐标系, 通过坐标变换矩阵描述掘进机悬臂的姿态以及掘进机车体相对巷道坐标系的位姿变换关系, 并基于闭环尺寸链实现了掘进机车体以及截割头在作业空间的姿态定位. 在分析掘进机悬臂运动学的基础上, 讨论了掘进作业控制的正向和逆向问题, 并进行了仿真验证. 分析表明, 掘进机作业控制正解是截割断面监测的基础, 逆解可指导掘进操作和实现掘进自动控制.

关键词: 悬臂式掘进机; 运动学; 坐标变换; 车体定位

中图分类号: TD421.5 **文献标识码:** A

Kinematics analysis and carriage positioning of roboticized roadheader

LI Jun-li, LIAN Zi-sheng, LI Yuan-zong

(College of Mechanical Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: In order to monitor and control cutting section automatically, the boom-type roadheader was simplified as roboticized model. By using the parallel coordinates system, roadheader link coordinates system and its work coordinates system were established, and its boom posture and transformation relation relative to the tunnel coordinates system were described through coordinates transformation matrix. Based on closed loop size chain, roadheader carriage positioning and cutting header posture localization were achieved in the operation space. On the base of analysis boom kinematics, the forward and inverse problem of tunneling operation control were discussed, and the simulation and confirmation were carried on. The analysis indicates that the forward problem is the foundation of monitoring cutting section, and the inverse problem may instruct tunneling operation and achieve automatic control.

Key words: boom-type roadheader; kinematics; coordinate transformation; carriage positioning

1 悬臂式掘进机的机器人化模型

悬臂式掘进机是煤矿井下巷道掘进的主要设备, 是集截割、行走、装载、灭尘于一体的综合作业机械, 主要由截割部、装载部、刮板输送机、行走部和机架等部分组成. 掘进机的工作机构为一系列连杆通过转动或移动关节串联而成的开式运动链, 可简化为一个履带式机器人. 其简化模型如图 1 所示.

模型的运动关节由机架上回转台的转动关节、切割大臂相对回转台的转动关节、伸缩部相对切割大臂的移动关节构成. 截割头为截割电机驱动的独立运动, 不作为连杆计入简化模型^[1].

为了对掘进机运动学及其作业过程进行分析, 建立以下 3 种坐标系: ① 大地坐标系 $oxyz$. 整个工地的测量工作都与其有关, 用于测量巷道坐标和掘进机车体位姿; ② 掘进机坐标系 $o_i x_i y_i z_i$ ($i=0, 1, 2,$

3). 建立于掘进机几何重心和各连杆关节处, 是掘进机车体、悬臂及截割头的连体坐标系; ③ 巷道坐标系 $o_h x_h y_h z_h$, 定位于巷道断面的底边中点上, 截割头的中心位置在断面上的投影位置在此坐标系中测量. 3 种坐标系如图 2 所示, 且形成空间变换闭环尺寸链^[2].

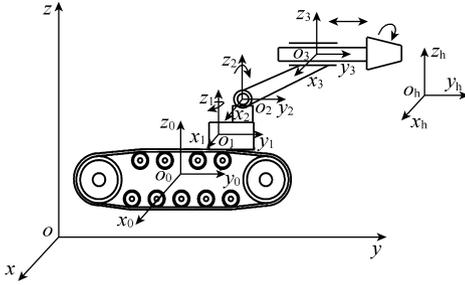


图 1 机器人化掘进机模型及坐标系

Fig. 1 Robotized roadheader model and coordinates system

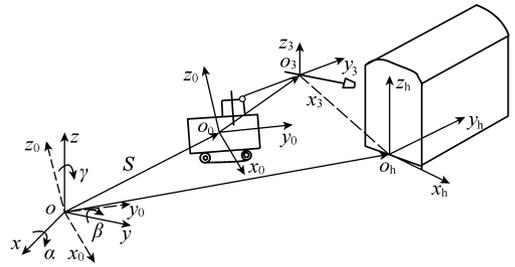


图 2 掘进机作业控制尺寸链

Fig. 2 Work control dimensional chain of roadheader

2 掘进机运动学分析

采用平行坐标系法在掘进机车体及其各连杆关节轴处建立坐标系, 即各连杆初始坐标系 $o_i x_i y_i z_i$ ($i=0, 1, 2, 3$) 的坐标轴相互平行, 如图 3 所示, 其中 $o_0 x_0 y_0 z_0$ 为车体坐标系, 其它为关节坐标系. 对于转动关节, 其旋转角 θ 为关节变量; 对于平移关节, 其平移位移 d 为关节变量^[3]. 相邻两连杆间的齐次坐标变换矩阵为

$${}^i T_{i-1} = \begin{bmatrix} {}^{i-1}R & {}^{i-1}P \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (i = 1, 2, 3),$$

其中, ${}^{i-1}R$ 为连杆坐标系 i 相对于连杆坐标系 $i-1$ 的 3×3 旋转变换矩阵; ${}^{i-1}P$ 为连杆坐标系 i 相对于连杆坐标系 $i-1$ 的 3×1 平移变换向量.

那么, 第 i 坐标系相对基座坐标系的齐次变换矩阵为 ${}^0 T_i = {}^0 T_1 {}^1 T_2 \dots {}^{i-1} T_i$.

机器人运动学包括 2 类问题: ① 给定连杆几何参数和各关节矢量 $\theta = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_N)$, 求机器人末端执行器相对参考坐标系的位置与姿态, 即“正向运动学”问题; ② 给定连杆几何参数及末端执行器相对于参考坐标系的期望位置与姿态, 求对应于此位置与姿态的全部关节转角向量 $\theta = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_N)$ 和移动向量 d , 即“逆向运动学”问题^[4].

2.1 掘进机运动学正解

按图 3 所建立的掘进机连杆坐标系, 列出对应的连杆参数见表 1. 其中, θ_1, θ_2, d 为关节变量, $a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3$ 为连杆常数.

相邻连杆坐标系的齐次变换矩阵分别为

$${}^0 T_1 = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 & 0 & 0 \\ \sin \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 & a_1 \\ 0 & 0 & 1 & b_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, {}^1 T_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & a_2 \\ 0 & \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & b_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, {}^2 T_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & a_3 + d \\ 0 & 0 & 1 & b_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

连杆 3 相对于车体坐标系的齐次变换矩阵为

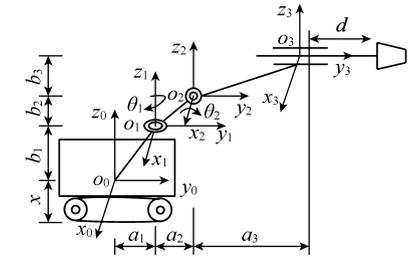


图 3 掘进机连杆坐标系

Fig. 3 Link coordinates system of roadheader

表 1 掘进机连杆参数

Table 1 Link parameters of roadheader

关节 i	旋转			平移		
	x 轴	y 轴	z 轴	x 轴	y 轴	z 轴
1	0	0	θ_1	0	a_1	b_1
2	θ_2	0	0	0	a_2	b_2
3	0	0	0	0	$a_3 + d$	b_3

$${}^0_3\mathbf{T} = {}^0_1\mathbf{T} {}^1_2\mathbf{T} {}^2_3\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 \cos \theta_2 & \sin \theta_1 \sin \theta_2 & -(a_3 + d) \sin \theta_1 \cos \theta_2 + b_3 \sin \theta_1 \sin \theta_2 - a_2 \sin \theta_1 \\ \sin \theta_1 & \cos \theta_1 \cos \theta_2 & -\cos \theta_1 \sin \theta_2 & (a_3 + d) \cos \theta_1 \cos \theta_2 - b_3 \cos \theta_1 \sin \theta_2 + a_2 \cos \theta_1 + a_1 \\ 0 & \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & (a_3 + d) \sin \theta_2 + b_3 \cos \theta_2 + b_1 + b_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

2.2 掘进机运动学逆解

设末端连杆截割臂的位姿矩阵

$${}^0_3\mathbf{T} = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

则掘进机截割臂运动学逆解就是求解关节变量 θ_1 , θ_2 和 d . 由式(1),(2)的元素(1,1)和(2,1)分别对应相等, 得 $\tan \theta_1 = n_y/n_x$, $\theta_1 = a \tan(n_y/n_x)$. 由式(1),(2)的元素(3,2)和(3,3)分别对应相等, 得 $\tan \theta_2 = o_z/a_z$, $\theta_2 = a \tan(o_z/a_z)$. 由式(1),(2)的元素(1,4), (2,4)和(3,4)分别对应相等, 得

$$d = \frac{p_x - b_3 a_x + a_2 n_y}{o_x} - a_3, \quad d = \frac{p_y - b_3 a_y - a_2 n_x - a_1}{o_y} - a_3, \quad d = \frac{p_z - b_3 a_z - b_1 - b_2}{o_z} - a_3. \quad (3)$$

关节变量 d 的解法应取已知位姿式(2)中不为0的 o_j (j 为 x, y, z) 项代入式(3)中对应分母为 o_j 的计算式中求得.

3 掘进机车体位姿

掘进机车体位姿描述为掘进机车体坐标系 $o_0x_0y_0z_0$ 相对大地坐标系 $oxyz$ 的变换, 其位姿变量包括车体俯仰角 α 、横滚角 β 、偏航角 γ ^[4] 以及平移矢量 \mathbf{S} (S_x, S_y, S_z), 其中 α, β, γ 与掘进巷道的坡度、斜度以及掘进机的支撑状态有关. 掘进机位姿如图2所示. 根据坐标变换原理, 掘进机车体坐标 $o_0x_0y_0z_0$ 可由大地坐标系 $oxyz$ 经4个步骤变换得到: 先绕 x 轴旋转 α 角, 然后绕 y 轴旋转 β 角, 再绕 z 轴旋转 γ 角, 最后沿 oo_0 平移矢量 \mathbf{S} (S_x, S_y, S_z). 掘进机车体位姿为

$${}^0\mathbf{T} = \text{RPY}(\gamma, \beta, \alpha) \text{Trans}(S_x, S_y, S_z) = \text{Rot}(z, \gamma) \text{Rot}(x, \alpha) \text{Trans}(S_x, S_y, S_z) = \begin{bmatrix} \cos\gamma\cos\beta & \cos\gamma\sin\beta\sin\alpha - \sin\gamma\cos\alpha & \cos\gamma\sin\beta\cos\alpha + \sin\gamma\sin\alpha & \cos\gamma\cos\beta S_x + (\cos\gamma\sin\beta\sin\alpha - \sin\gamma\cos\alpha)S_y + (\cos\gamma\sin\beta\cos\alpha + \sin\gamma\sin\alpha)S_z \\ \sin\gamma\cos\beta & \sin\gamma\sin\beta\sin\alpha + \cos\gamma\cos\alpha & \sin\gamma\sin\beta\cos\alpha - \cos\gamma\sin\alpha & \sin\gamma\cos\beta S_x + (\sin\gamma\sin\beta\sin\alpha + \cos\gamma\cos\alpha)S_y + (\sin\gamma\sin\beta\cos\alpha - \cos\gamma\sin\alpha)S_z \\ -\sin\beta & \cos\beta\sin\alpha & \cos\beta\cos\alpha & -\sin\beta S_x + \cos\beta\sin\alpha S_y + \cos\beta\cos\alpha S_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

4 巷道掘进作业控制

掘进机的作业控制是建立在图2空间闭环尺寸链基础上. 分2种情况: ① 已知车体相对大地坐标系的位姿 ${}^0\mathbf{T}$ 以及截割臂相对车体的连续运动位姿 ${}^0_3\mathbf{T}$, 求解所掘巷道的形状以及巷道相对大地坐标系的位置, 称为作业控制正解; ② 已知所设计的巷道坐标系相对大地坐标系的位置 ${}^n\mathbf{T}$ 以及巷道的形状 (宽度和高度), 求解为掘进此巷道的车体位姿 ${}^0\mathbf{T}$ 以及掘进过程截割臂相对车体的控制姿态 ${}^0_3\mathbf{T}$, 即求解连杆关节变量值, 称为作业控制逆解^[5].

4.1 作业控制正解

截割臂相对大地坐标系的变换 ${}^3\mathbf{T} = {}^0_3\mathbf{T} {}^0\mathbf{T}$, 其中, ${}^0_3\mathbf{T}$ 由式(1)得到; ${}^0\mathbf{T}$ 由式(4)得到. 设截割头中心在坐标系 $o_3x_3y_3z_3$ 中的坐标向量 ${}^3\mathbf{P} = [0, r, 0, 1]'$, 其中, r 为截割头不伸出时其中心在坐标系 $o_3x_3y_3z_3$ 中的 y 坐标. 则截割头相对大地坐标系坐标 ${}^0\mathbf{P} = {}^0_3\mathbf{T} {}^3\mathbf{P}$, 若测得掘进机位姿变量 α, β, γ 和 \mathbf{S} , 而悬臂在其连杆变量范围内进行回转、升降及伸缩控制, 则截割头所形成的空间曲面即为所掘出的巷道断面.

4.2 作业控制逆解

(1) 按照截割头缩回并置于中央水平位置, 且使截割臂垂直设计巷道断面并交于 z_h 轴的原则, 对车体定位, $\theta_1 = \theta_2 = 0, d = 0$, 式 (1) 简化式和掘进机连杆 3 坐标系相对设计巷道坐标系的变换 ${}^h_3\mathbf{T}$ 分别为

$${}^0_3\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & a_1 + a_2 + a_3 \\ 0 & 0 & 1 & b_1 + b_2 + b_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad {}^h_3\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -r \\ 0 & 0 & 1 & b_1 + b_2 + b_3 + x \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

其中, x 为掘进机车体几何重心到支撑履带沿 z_0 轴的距离 (图 3). 掘进机车体相对大地坐标系的姿态矩阵 $\mathbf{T} = {}_h\mathbf{T}_3 {}^h_3\mathbf{T}_0 {}^0_3\mathbf{T} = {}_h\mathbf{T}_3 {}^h_3\mathbf{T}_3 {}^0_3\mathbf{T}^{-1}$, ${}_h\mathbf{T}$ 为所设计巷道相对大地坐标系的位姿, 已知量; ${}^h_3\mathbf{T}$, ${}^0_3\mathbf{T}$ 由式 (5) 得到.

(2) 在实现上述掘进机车体定位基础上, 若已知截割臂位姿矩阵如式 (2), 可采用 2.2 节所述计算关节变量 θ_1, θ_2 和 d ; 否则, 可以根据设计巷道的高度 H 、宽度 W 和掘进切割深度 t , 用几何关系计算掘进机关节变量 θ_1 和 θ_2 [6], 即悬臂横向摆角 θ_1 , 悬臂最大、最小垂直摆角 θ_2 分别为

$$\theta_{1 \min} = \pm \arcsin \frac{W/2}{a_2 + (a_3 + r + t) \cos \theta_2}, \quad \theta_{2 \max} = \arcsin \frac{H - b_1 - b_2 - x}{\sqrt{b_3^2 + (a_3 + r + t)^2}},$$

$$\theta_{2 \min} = -\arcsin [(b_1 + b_2 + x) / \sqrt{b_3^2 + (a_3 + r + t)^2}].$$

可见, 悬臂横向摆角对称, 且随着悬臂垂直位置的不同而变化; 而悬臂垂直摆角不对称.

5 掘进机运动学仿真研究

以 EBJ-132 掘进机为例, 采用 Matlab [7] 进行掘进作业控制正、逆解仿真研究. EBJ-132 掘进机基本参数: $a_1 = 1\,145$ mm, $b_1 = 720$ mm, $a_2 = 720$ mm, $b_2 = 80$ mm, $a_3 = 2\,050$ mm, $b_3 = 100$ mm, $x = 730$ mm, $\theta_1 = -39 \sim +39^\circ$, $\theta_2 = -31 \sim +42^\circ$, $d = 0 \sim 800$ mm. 限于篇幅, 仅分别对 2 种条件下的正、逆解进行仿真与分析.

图 4 为掘进作业正解截割仿真结果. 图 4(a) 仿真条件: $\alpha = \beta = \gamma = 0$, $S = (S_x, S_y, S_z) = (100, 1\,000, 200)$, $d = 100$ mm, 截割头中心相对 $o_3x_3y_3z_3$ 的坐标 ${}^3P = (0, 1\,200, 0, 1)$, $\theta_1 = -39 \sim +39^\circ$, $\theta_2 = -31 \sim +42^\circ$, 按步长为 5° 变化. 图 4(b) 仿真条件: $\alpha = 10^\circ$, $\beta = 0$, $\gamma = 10^\circ$, 其它条件同图 4(a) 所示.

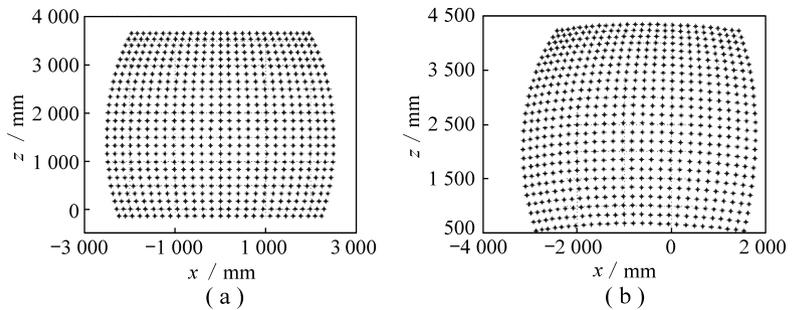


图 4 运动学正解截割仿真结果

Fig. 4 Simulation results of kinematics forward problem

图 5 为掘进作业逆解关节角 θ_1, θ_2 的仿真结果. 图 5(a) 仿真条件: 设计巷道宽度 4 500 mm, 高度 3 500 mm, 切割深度 $t = 400$ mm, 计算得 $\theta_2 = -23.4 \sim +33.6^\circ$. 图 5(b) 仿真条件: 设计巷道宽度 5 000 mm, 高度 3 700 mm, 切割深度 $t = 450$ mm, 计算得 $\theta_2 = -23.4 \sim +37.6^\circ$.

图 6 是分别对图 5 逆解得到的关节角 θ_1 和 θ_2 , 采用图 4 的仿真程序进行正解验证.

仿真结果分析: 图 4(a) 为掘进机车体相对大地坐标系沿 x, y 和 z 轴分别行进 100, 1 000 和 200 mm, 而未发生绕 3 个坐标轴的旋转时, 悬臂垂直摆动 $-31 \sim +42^\circ$, 水平摆动 $-39 \sim +39^\circ$ 后截割形成的掘进断面在大地坐标系 oxz 平面上的投影, 其断面坐标轴相对大地坐标系轴平行, 卧底量大约 240 mm; 图 4(b) 为掘进机在图 4(a) 的基础上, 分别绕 x, z 轴旋转 10° , 即车体仰起 10° , 且向左偏转 10° 后, 截割成形断面的投影, 此时断面形状扭曲, 且成形巷道底面在底板之上, 呈现上坡趋势.

图5(a)为设计巷道断面为 $4\,500\text{ mm} \times 3\,500\text{ mm}$ 的矩形时, 计算得悬臂垂直摆动角 $\theta_2 = -23.4 \sim +33.6^\circ$, 仿真得到沿断面 Z 轴悬臂水平摆动角 θ_1 的正值角曲线, 实际摆角为各角度值的正负对称值, 悬臂垂直位置最低点 -23.4° 时 $\theta_1 = -33.6 \sim +33.6^\circ$, 0° 时 $\theta_1 = -31 \sim +31^\circ$, 最高位置 33.6° 时, $\theta_1 = -36.8 \sim +36.8^\circ$; 图5(b)为设计断面为 $5\,000\text{ mm} \times 3\,700\text{ mm}$ 矩形时, 计算得 $\theta_2 = -23.4 \sim +37.6^\circ$, 仿真得到 θ_1 的正值角曲线, 悬臂最低点 -23.4° 时 $\theta_1 = -34 \sim +34^\circ$, 0° 时 $\theta_1 = -31.5 \sim +31.5^\circ$, 最高位置 37.6° 时 $\theta_1 = -39 \sim +39^\circ$. 可见, 由于设计巷道尺寸及切割深度的不同, 图5(b)的仿真角度 θ_1, θ_2 比图5(a)的均大, 与实际情况相符. 图6验证了掘进作业逆解的正确性.

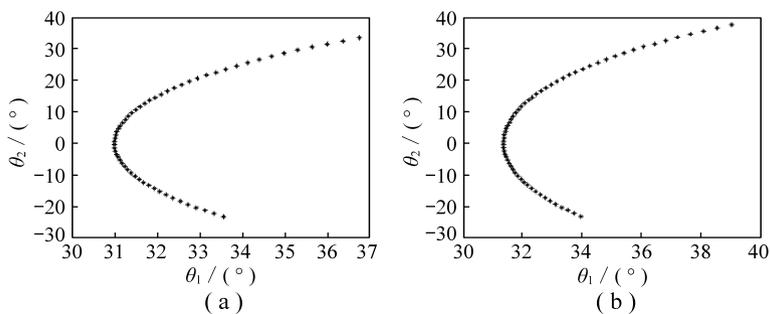
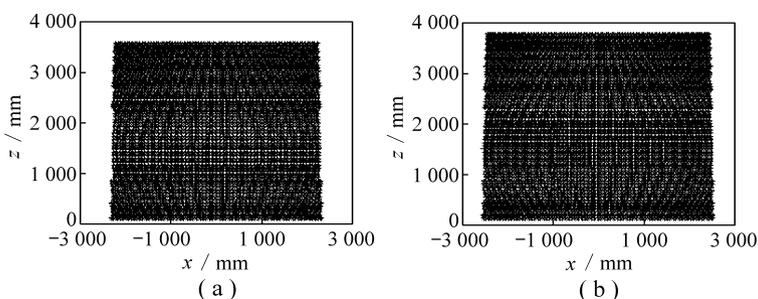
图5 运动学逆解 θ_1 和 θ_2 仿真结果Fig. 5 θ_1 and θ_2 simulation results of kinematics inverse problem

图6 运动学逆解的正解验证

Fig. 6 Confirmation of kinematics inverse problem

6 结 论

(1) 悬臂式掘进机在我国煤矿巷道掘进工程中广泛应用, 但目前均采用手动操作, 超挖、欠挖现象严重, 掘进质量差, 进度慢, 采用掘进断面自动监测以及掘进过程自动控制是掘进机发展的必然方向.

(2) 采用坐标变换原理, 研究了掘进机运动学及其作业控制正、逆解和车体定位.

(3) 掘进作业控制正解从大地坐标系、掘进机坐标系和巷道坐标系组成的空间闭环尺寸链出发, 定位掘进巷道断面与轴线, 是掘进断面自动监测的基础.

(4) 通过反解空间坐标变换矩阵求解掘进作业控制逆解, 同时也提供了掘进作业操作的基本过程与步骤, 是车体定位及掘进断面自动控制的基础.

(5) 仿真证明了算法的正确性, 所得到的掘进断面形状及掘进机空间位姿与实际状况完全一致.

参考文献:

- [1] 丁国富, 吴 晓, 王金诺. 机器人化液压挖掘机的运动学建模与仿真研究 [J]. 机械科学与技术, 2000, 19 (5): 736 ~ 737.
- [2] 何清华, 曾贵英. 凿岩机器人的车体定位 [J]. 中南工业大学学报, 1999, 30 (3): 299 ~ 302.
- [3] 付京逊. 机器人学 [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1989.
- [4] 熊有伦. 机器人技术基础 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002.
- [5] Manfred Hiller. Modelling, simulation and control design for large and heavy manipulators [J]. Robotics and Autonomous Systems, 1996 (19): 167 ~ 177.
- [6] 宁仲良, 张士勇. 悬臂式掘进机巷道自动成形控制初探 [J]. 煤矿机电, 2004 (1): 10 ~ 11.
- [7] 刘卫国. MATLAB 程序设计与应用 (第2版) [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.