

深海钴结壳自行式采矿车航迹推算方法研究

卜英勇, 刘光华, 史春雪, 王纪蝉

(中南大学 机电工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘要: 针对深海钴结壳矿区地形不平坦、采矿车作业环境恶劣、车体打滑严重等复杂情况, 设计研究了一种具有地形感知能力的从动轮测速机构, 用不同时刻不同斜面复合三维地形的的方法, 建立非平坦地形上作业采矿车的航迹推算模型。采用倾角传感器、电子罗盘、角位移传感器、光电编码器等测量采矿车的动态参数, 依据航迹推算模型实现采矿车水下定位。与传统的基于驱动轮转速的航迹推算方法相比, 它能适应各种复杂的工作条件, 保证较高的定位精度。试验结果证明了上述方法的有效性。

关键词: 深海采矿车; 钴结壳; 非平坦地形; 航迹推算; 从动地轮

中图分类号: TP 242.6

文献标识码: A

0 引言

大洋富钴结壳主要生长在坡度为 $7^{\circ} \sim 15^{\circ}$ 的海山山坡上, 微地形起伏 $< 5 \sim 10 \text{ cm}^{[1]}$ 。为适应海底微地形及结壳厚度变化, 需对采矿头进行有效控制, 以实现实时优化开采 $^{[2-3]}$ 。对采矿车进行准确、实时定位, 是实现钴结壳优化采集的关键。

深海采矿特殊环境下, 采矿车行走状态不稳, 行走过程打滑严重, 周围能见度低 $^{[4]}$, 基于水声、视觉、电磁定位系统应用受到限制, 航迹推算方法对环境的依赖性小, 能在一段时间内保持较高的精度, 实时性强。但在非平坦地形且存在打滑的情况下, 传统的基于驱动轮速度的航迹推算模型会造成极大的定位误差 $^{[5]}$ 。为克服这些不足, 笔者设计了一种具有地形感知能力的从动轮测速机构, 用不同时刻不同斜面拼接复合复杂三维地形的的方法, 建立了非平坦地形上采矿车运动学模型, 据此实现采矿车空间位置推算。

1 具有地形感知能力的独立从动轮测速机构

地形不平、驱动轮打滑, 采用编码器获取移动机器人的航向和里程信息, 难以保证定位精度。轮式车辆通过安装从动轮在一定程度上解决了纵向打滑的问题, 密歇根大学的“SET”系统对粗糙地

形和履带式差动转向具有一定的适应能力 $^{[6]}$ 。综合上述两种思想, 设计一种具有地形感知能力的从动轮测速机构, 其结构(采矿车车体省略)如图1所示。

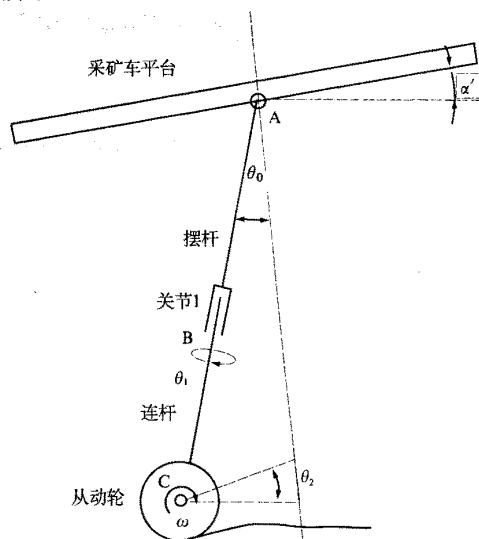


图1 从动地轮示意图

Fig.1 The structure of driven wheel

连杆可绕摆杆中心轴旋转, 在一定的高差内(可采矿区一般小于 20 cm), 从动轮始终与地面良好接触, 依靠自重产生的摩擦力滚动。摆杆铰接在采矿车车体, 随地形起伏摆动。地轮可装在采矿车前端底部(同时探测前方地形变化), 也可拖曳

收稿日期:2006-09-15;修订日期:2006-11-30

基金项目:中国大洋矿产资源研究开发协会技术发展资助项目(DY105-03-02)。

作者简介:卜英勇(1944-),男,安徽芜湖人,中南大学教授,博士生导师,主要研究方向为深海采矿装备、设备状态监测与故障诊断。

在采矿车尾部,装有测量转角和转速的传感器。

地轮在采矿车主对称面内做刚体平面运动,由于地形的随机性,存在4种运动情况:①车体上坡,地轮下坡;②车体上坡,地轮上坡;③车体下坡,地轮上坡;④车体下坡,地轮下坡。在主对称面内,根据速度瞬心定理和机构的几何约束分别对4种情况进行运动学分析,可得采矿车速度为

$$v = \omega r \cos \theta_1 |\sin(\theta_0 + \theta_2 - \alpha') / \sin \theta_0| \quad (1)$$

设主对称面与水平面的交线为 l ,式中, α' 为采矿车速度方向与 l 的夹角; θ_2 为地轮中心速度方向角; θ_0 为摆杆与采矿车平台法向的夹角; θ_1 为连杆的偏转角; ω 、 r 分别为地轮的角速度和半径。 α' 、 θ_0 、 θ_2 均在主对称面内, θ_0 、 θ_1 通过角位移传感器直接测量。

2 非平坦地形上采矿车航迹推算方法

假设:①不发生整车侧滑;②不发生整车原地打转。

将非平坦的三维地形看成由不同方位的斜面拼接复合而成^[7]。采矿车在海底的行驶过程看成不同时间段不同斜面上直线运动模型的复合,在采样间隔较小的情况下,可以较准确的逼近实际行走路径。

2.1 坐标系的建立及转换

建立地理坐标系 $E - \varepsilon\eta\zeta$ 和车体坐标系 $O - xyz$,以地理坐标系 $\{E\}$ 为参考坐标系,车体坐标系 $\{O\}$ 相对于 $\{E\}$ 的姿态矩阵为 ${}^O_E T$,该姿态变化通过如下的组合得到:

$${}^O_E T = \text{Rot}(\zeta, \gamma) \text{Rot}(\eta_{\text{new}}, \alpha) \text{Rot}(\zeta_{\text{new}}, \beta') \quad (2)$$

$\text{Rot}(\zeta, \gamma)$ 为地理坐标系围绕 $E\zeta$ 轴旋转 γ 角, $\text{Rot}(\eta_{\text{new}}, \alpha)$ 为新坐标系围绕 $E\eta_{\text{new}}$ 旋转 α 角, $\text{Rot}(\zeta_{\text{new}}, \beta')$ 为再围绕新的坐标轴 $E\zeta_{\text{new}}$ 旋转 β' 角, $\beta' \neq \beta$ ^[8]。设 OY 轴在 $\zeta E\eta$ 平面内的投影与 $E\eta$ 轴的夹角为 ψ ,根据几何关系推导出

$$\sin(\psi - \gamma) = \tan \alpha \tan \beta \quad (3)$$

令 $\delta = \gamma - \psi$,有 $\delta = \arcsin(\tan \alpha \tan \beta)$ 。

根据方向余弦法求得

$${}^O_E T = \begin{bmatrix} \cos \alpha \cos \gamma & \cos \beta \sin(\gamma - \delta) & -\cos \alpha \sin \beta \sin \gamma - \cos \beta \sin \alpha \cos(\gamma - \delta) \\ \cos \alpha \sin \gamma & \cos \beta \cos(\gamma - \delta) & -\sin \alpha \cos \beta \sin(\gamma - \delta) + \cos \alpha \sin \beta \cos \gamma \\ \sin \alpha & -\sin \beta & \cos \alpha \cos \beta \cos \gamma \cos(\gamma - \delta) + \cos \alpha \cos \beta \sin \gamma \sin(\gamma - \delta) \end{bmatrix} \quad (4)$$

采用上述坐标转换方法,角度参数可通过倾角传感器和电子罗盘测量,降低了测量难度和成本。

2.2 空间航迹推算

设原点 O 在 $\{E\}$ 中的位置矢量为 $U = [\xi, \eta, \zeta]^T$,地轮中心 O_d 在 $\{E\}$ 中的位置矢量为 ${}^d U = [{}^d \xi, {}^d \eta, {}^d \zeta]^T$,采矿车的位置姿态用车体参考中心的状态 $(\xi_k, \eta_k, \zeta_k, \alpha_k, \beta_k, \gamma_k)$ 来表示,其中 k 表示与时间序列对应的时刻序号。建立一个采样间隔内,采矿车在斜面上的直线运动方程为

$$U_1 = T_{OB} T_{ov}, U_{k+1} = T_{kB} T_{kv} \quad (5)$$

式中: T_{kB} 为 k 时刻采矿车所处斜面, T_{kv} 为直线行驶变换矩阵。

$$T_{kB} = \begin{bmatrix} a_{x\xi}^k & a_{x\eta}^k & a_{x\zeta}^k & \xi_k \\ b_{y\xi}^k & b_{y\eta}^k & b_{y\zeta}^k & \eta_k \\ c_{z\xi}^k & c_{z\eta}^k & c_{z\zeta}^k & \zeta_k \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

T_{kB} 中左上角 3×3 矩阵为采矿车的姿态矩阵 ${}^O_E T_k$,表示 $O - xyz$ 相对于 $E - \varepsilon\eta\zeta$ 的姿态,右上角 3×1 矩阵为采矿车的位置矩阵,表示 O 点相对于 $E - \varepsilon\eta\zeta$ 的位置。

$$T_{kv} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & X \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: $X = \int_{t_k}^{t_{k+1}} v_x dt = v_x T$ 为采矿车航向上的位移。

地轮与地面实际接触点随机,地轮中心速度方向不可直接测,作者用地轮中心空间坐标值进行线性外推,将空间直线向主对称面投影,以投影线方向作为速度方向,其算法如下:地轮中心 O_d 在 $\{E\}$ 中的坐标为

$$\begin{bmatrix} {}^d \xi_{k+1} \\ {}^d \eta_{k+1} \\ {}^d \zeta_{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \xi_{k+1} \\ \eta_{k+1} \\ \zeta_{k+1} \end{bmatrix} + {}^O_E T \begin{bmatrix} -l \sin \theta_{0,k+1} \\ 0 \\ -l \cos \theta_{0,k+1} \end{bmatrix} \quad (8)$$

设 ${}^d U_k {}^d U_{k+1}$ 的方向矢量为 S_{k+1} ,在主对称面的投影方向矢量为 S'_{k+1} ,采矿车主对称面的法向矢量为 n_{k+1} ,主对称面与水平面交线的方向矢量为 m_{k+1} ,水平面的法向矢量为 p_{k+1} , Ox 轴的方向矢量为 q_{k+1} ,有

$$s'_{k+1} = (S_{k+1} \times n_{k+1}) \times n_{k+1} \quad (9)$$

$$m_{k+1} = p_{k+1} \times n_{k+1} \quad (10)$$

式中: $p_{k+1} = \{0, 0, 1\}$;

$s_{k+1} = \{ {}^d \xi_{k+1} - {}^d \xi_k, {}^d \eta_{k+1} - {}^d \eta_k, {}^d \zeta_{k+1} - {}^d \zeta_k \}$;
 $q_{k+1} = \{ \cos \alpha \xi, \cos \alpha \eta, \cos \alpha \zeta \}_{k+1}$ 表示 Ox 轴在 $\{E\}$ 中的方向余弦,为 ${}^O_E T$ 的第一行; $n_{k+1} = \{ \cos \gamma \xi, \cos \gamma \eta, \cos \gamma \zeta \}_{k+1}$ 表示 Oy 轴在 $\{E\}$ 中的方向余弦,

为 0_kT 的第二行;

计算向量的夹角得到

$$\cos\alpha'_{k+1} = \frac{\mathbf{q}_{k+1} \cdot \mathbf{m}_{k+1}}{|\mathbf{q}_{k+1}| |\mathbf{m}_{k+1}|} \quad (11)$$

$$\cos\theta_{2,k+1} = \frac{\mathbf{s}'_{k+1} \cdot \mathbf{m}_{k+1}}{|\mathbf{s}'_{k+1}| |\mathbf{m}_{k+1}|} \quad (12)$$

角度方向由空间坐标点相对位置决定,将 α'_{k+1} 、 $\theta_{2,k+1}$ 代入式(1)得 $v_{x,k+1}$.

初始值 u_0 通过水面支持平台 GPS 信息和深度计或水声系统确定. 实验测定地轮启动加速度曲线,以便准确计算 ω_0 ,采矿车作业起点一般选择平坦地形,可取 $\theta_{2,0}$ 等于 α_0 . 综合以上条件即可实现采矿车坐标原点空间位置连续推算. 用各斜面运动模型复合三维空间运动会带来误差,但地形有起有伏,造成误差有正有负,在一段地形内会部分抵消.

3 试验及结果分析

3.1 试验系统构成

在不考虑深水压力对传感器影响的情况下,可在陆上和浅水环境中检验定位精度. 在 $5\text{ m} \times 5\text{ m}$,最大高差为 0.25 m 的钴结壳模拟地形上进

行定位测量. 系统由工控机、履带式 4 轮模型车、自制地轮、3 轴数字罗盘、角位移传感器和光电编码器组成. 电子罗盘是定位系统中的关键传感器,其测量精度受到多种因素的影响. 静态情况下,对罗盘进行软件标定,消除硬铁干扰,同时将电子罗盘安装平台抬高,与其他电器保持一定距离,消除环境中的电磁干扰. 动态情况下,采用 5 点均值平移法对野值进行在线识别和补值. 设 k 时刻电子罗盘输出数据为 α_k ,取其前 5 点数据算术平均值 $\bar{\alpha}_k = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 \alpha_{k-i}$,令 $\Delta\alpha_k = |\alpha_k - \bar{\alpha}_k|$,当 $\Delta\alpha_k$ 超过给定的阈值时,取 $\alpha_k = \bar{\alpha}_k$,否则保留 α_k . 数据处理后,电子罗盘测量的精度稳定在俯仰角($\pm 1.5^\circ$)、横滚角($\pm 1^\circ$)和航向角($\pm 1.5^\circ$),保证了推算定位的准确性.

3.2 定位精度测量

采用相对测量方法,模型车的初始位置 A 点坐标设为 $(0,0,0)$,移动到 B 点得到 (X_b, Y_b, Z_b) ,于是 AB 间的距离为 $L_{AB} = \sqrt{(X_b - X_a)^2 + (Y_b - Y_a)^2 + (Z_b - Z_a)^2}$,若测得 AB 间的实际距离为 L'_{AB} ,则相对误差为 $\Delta L = L_{AB} - L'_{AB}$,部分试验结果如表 1 所示.

表 1 试验数据及测量误差

Tab.1 The experimental data and its measurement error

点序	X/m	Y/m	Z/m	L_{AB}/m	L'_{AB}/m	$\Delta L/\text{cm}$	$\Delta X/\text{cm}$	$\Delta Y/\text{cm}$	$\Delta Z/\text{cm}$
B_1	1.439	0.396	0.026	1.510	1.494	1.6	1.5	0.9	0.6
B_2	0.292	0.015	0.002	0.300	0.294	0.9	0.8	0.3	0.5
B_3	0.771	0.831	0.013	1.150	1.134	1.7	1.6	0.6	1.2
B_4	3.513	3.328	0.424	5.110	4.895	12	8.4	7.8	2.7

在各种典型模拟钴结壳地形进行多组试验,结果表明定位系统轨迹均匀、连续而且光滑,定位结果离散度小,定位误差小于航程的 4%. 整车打滑情况下,航迹推算暂停,采矿车位置保持不变.

4 结论

实时准确的采矿车定位是深海采矿各种行为的基础,航迹推算方法对深海采矿控制系统必不可少. 作者提出的基于从动地轮的空间航迹推算方法,实时性强,能适应崎岖的海底地形. 通过对传感器数据进行处理,有效地控制了定位误差,其定位误差小于航程的 4%. 同时定位结果可与采矿车水下长程定位信息融合,以提高整车水下定位精度和定位的连续性.

参考文献:

- [1] YAMAZAKA T, SHARAMA R, TSURUSAKI K. Influence of distribution characteristics and associated seabed features exploitation of cobalt-rich manganese deposits[R]. Proceedings of the ISOPE Ocean Mining Symposium, 1995, 119-124.
- [2] 秦宣云,卜英勇. 大洋富钴结壳实时开采切削深度优化分级模型研究[J]. 海洋工程, 2005, 23(8): 99-104.
- [3] 卜英勇,任凤跃,罗柏文,等. 基于 Avs/Express 三维显示的机械式微地形探测器研制[J]. 矿山机械, 2005, 33(12): 6-8.
- [4] 陈峰,桂卫华,王随平,等. 深海底采矿机器人的研究现状[J]. 矿山机械, 2002, 33(9): 21-24.
- [5] 于金霞,蔡自兴,邹小兵,等. 非平坦地形下移动机

- 器人航迹推算方法研究[J]. 河南理工大学学报, 2005, 24(3): 210 - 216.
- [6] BORENSTEIN J, FENG L. A method for measuring, comparing, and correcting dead-reckoning errors in mobile robots[R]. Copies of this report are available from the University of Michigan as: Technical Report UM-MEAM-94-22. 20 - 22.
- [7] 柳方舟, 李满华, 马培荪. 管道形轮腿式月球探测机器人的运动学建模[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2003, 33(6): 741 - 745.
- [8] 丁宝新. 关于定位与测磁中的坐标转换问题[J]. 水雷战与舰艇防护, 1994, (2): 5 - 14.

Study on Dead Reckoning for a Deep-sea Cobalt-rich Mining Vehicle

BU Ying - yong, LIU Guang - hua, SHI Chun - xue, WANG Ji - chan

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

Abstract: Taking into account uneven terrain, complex working environment, rolling slip, we design a driven wheel machine with the ability to apperceive changing of terrain and measure the velocity. We present the kinematics model for a deep - sea mining vehicle operating in uneven terrain combining different kinematics models of the vehicle on different slopes at different times. Sensors such as tilt, compass, coder and angular displacement sensors measure the dynamic parameters information, then the dead reckoning of mining vehicle is realized on complex deep - sea environment according to its kinematics model. It can work under complex working conditions. The result of experiment shows that these technologies are viable.

Key words: deep - sea mining vehicle; cobalt - rich; uneven terrain; dead reckoning; driven wheel

(上接第11页)

Research on Fault Pattern Recognition Based on Support Vector Machines

QI Bao - lin^{1,2}, LI Ling - jun¹, LI Zhi - nong¹

(1. Institute of Vibration Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Food Engineering Department, Zhengzhou College of Animal Husbandry Engineering, Zhengzhou 450011, China)

Abstract: SVM provides people with a completely new means of artificial intelligent diagnosis which was restricted by shortage of large quantity of fault datasets. In this paper, feature vectors extracted from vibration signals of rolling bearing were selected as inputs of support vector machines to recognize fault patterns of rolling bearing. The results show that SVMs have excellent classification performance to fault patterns of rolling bearing, even under noises and interference.

Key words: support vector machines (SVMs); pattern recognition; fault diagnosis