

钴结壳螺旋切削采矿头截齿最大载荷的分布特性

夏毅敏, 聂四军, 卜英勇, 赵海鸣

(中南大学 机电工程学院, 湖南 长沙, 410083)

摘要: 考虑海水力的作用, 建立深海钴结壳微地形的数学模型和采矿头截齿切削过程的数学模型, 应用 Matlab 软件 GUI 工具编制相应的仿真程序, 并通过实验验证仿真模型的正确性和仿真软件的工程有效性。在此基础上, 随机生成 200 个典型海底地形, 对采矿头截齿最大载荷的分布特性进行研究; 应用置信度为 0.95 的柯尔莫哥洛夫-斯米尔诺夫(Kolmogorov-Smirnov)检验验证参数估计所得的正态总体与样本数据的一致性。仿真结果表明: 截齿最大载荷的分布偏于正态分布; 通过置信度为 0.95 的参数估计, 得出最大载荷正态分布概率密度函数的参数 μ 和 σ^2 及其置信区间; 由 3σ 规则确定了截齿最大载荷以 99.73% 的概率落于区间 [2.027 0 11.110 0], 截齿最大载荷基本不超过 11.11 kN。

关键词: 富钴结壳; 截齿; 数值仿真

中图分类号: P744; TD807

文献标识码: A

文章编号: 1672-7207(2007)03-0512-05

Distribution properties of cutting tooth's maximum load of spiral mining head for cobalt-crust

XIA Yi-min, NIE Si-jun, BU Ying-yong, ZHAO Hai-ming

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

Abstract: Mathematic model of the tiny terrain covered cobalt-rich crust and the cutting process of mining head's cutting tooth were established by considering the force of sea water, and simulation software was developed by GUI tool of Matlab software to study the distributive properties of maximum load of the cutting tooth. The validity of simulation results were tested by experiments. Through statistical analysis, the parameter (μ, σ^2) of normal distribution function of the maximum load, and tested uniformity of the normal population and the sample were obtained. The simulation results of 200 typical tiny terrain indicate that the distribution of maximum load is near normal distribution. The maximum load of cutting tooth is from 2.027 0 to 11.110 0 by the probability of 99.73%, in other words, the maximum load of cutting tooth is no more than 11.11 kN.

Key words: cobalt-rich crust; cutting tooth; numerical simulation

钴结壳生长在水深 0.8~2.4 km 的海山、岛屿斜坡上, 其平均厚度仅为 4~6 cm^[1-5], 其开采的难点之一是如何将薄薄的一层钴结壳从高低不平的基岩上破碎剥离下来。采用螺旋切削式采矿头, 通过截齿切削钴结壳及其基岩是一种最佳的破碎方法^[6]。为了保证截

齿长期可靠工作, 必须掌握截齿所受最大载荷(极限参数)的分布范围, 但由于海洋采矿环境复杂, 难以进行耗资巨大的海上实物试验。在此, 本文作者通过建立螺旋切削式采矿头截齿切削过程的受力模型, 采用分形理论生成海底钴结壳微地形, 研制了相应的计算

收稿日期: 2006-11-05

基金项目: 国家海洋技术发展项目(DY105-03-02-1)

作者简介: 夏毅敏(1967-), 男, 江西永新人, 博士, 副教授, 从事机电一体化、海洋机电装备的研究

通讯作者: 夏毅敏, 男, 江西永新人, 博士, 副教授; 电话: 0731-8830245; E-mail: xiaymj@mail.csu.edu.cn

机仿真程序。通过仿真实验, 研究截齿载荷分布规律和载荷分布范围。

1 截齿载荷仿真系统

1.1 截齿切削受力分析

截齿在工作过程中, 受到切削力(F_{cut})、进给力(F_{nit})和侧向力(F_{tit})的作用, 取其中 1 个截齿进行分析, 其受力情况如图 1 所示。

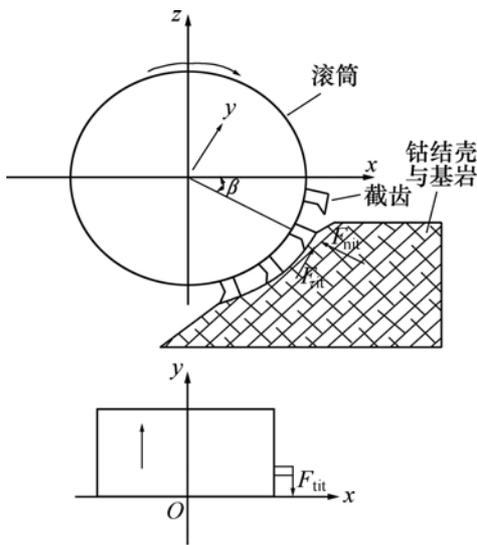


图 1 采矿头工作过程中截齿受力分析图

Fig.1 Force analysis chart of the mining head's cutting tooth in the cutting process

在参考文献[7, 8]中, 截齿切削力、进给力 and 侧向力的计算式同时考虑海水浮力作用及截齿的自重, 得出在 t 时刻, 截齿 i 分别在切削方向、进给方向和侧向所受力的计算式:

$$\begin{cases} F_{\text{ait}} = 10A \cdot \frac{0.35b + 0.3}{b + B \cdot h_{\text{it}}^{0.5}} \cdot l_0 \cdot k \cdot h_{\text{it}} + \\ \quad 100f \cdot k_n \cdot \sigma_y \cdot S_d - F_1 \cdot \sin \theta, \\ F_{\text{nit}} = K_n \cdot F_{\tau i} + 100k_n \cdot \sigma_y \cdot S_d - F_1 \cdot \cos \theta, \\ F_{\text{tit}} = F_{\text{ai}} \cdot \left(\frac{e}{h_{\text{it}} + c} + d \right) \frac{h_{\text{it}}}{l_0}. \end{cases} \quad (1)$$

式中: f 为钴结壳截割阻力系数; k_n 为平均接触应力对单向抗压强度的比值; σ_y 为钴结壳单向抗压强度; $F_1 = V_T \cdot \rho_s \cdot g + V_T \cdot \rho_w \cdot g$; F_b, F_g 和 F_1 分别为截齿所受的浮力、重力和合力, $F_b = V_T \cdot \rho_w \cdot g$, 其方向垂直向上, $F_g = V_T \cdot \rho_s \cdot g$, 其方向垂直向下; V_T 为截齿的体积; ρ_w 和 ρ_s 分别为海水和截齿材料的密度; g 为重力加速度; S_d

为截齿磨损面积; A 为钴结壳平均截割阻抗; h_{it} 为切屑厚度; l_0 为截距; e, c 和 d 为经验系数; b 为截齿截刃宽度; B 为钴结壳的脆性程度指数; $k = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4$; k_1, k_2, k_3 和 k_4 分别为外露自由表面系数、截割角的影响系数、截齿前刃面形状系数和考虑截齿排列方式的系数。

1.2 富钴结壳微地形的生成

自 20 世纪 80 年代出现分形几何以来, 分形理论得到广泛关注和迅速发展, 而且用分形的方法来研究地表面起伏、模拟地貌是分形几何近年来最活跃的应用领域之一^[9-11]。秦宣云^[12]认为海底数字高程模型 (digital elevation model, 简称 DEM) 数据近似服从正态分布。为了更好地模拟海底微地形, 本文作者先应用 Matlab 软件 GUI 工具生成相对较少的二维正态随机数, 然后, 在这些数据的基础上, 对其进行分形插值, 得到最终 DEM 数据。随机微地形生成流程图如图 2 所示。计算模拟地形的分形维数, 并将其与实测的 DEM 数据的分形维数比较, 发现二者相吻合。

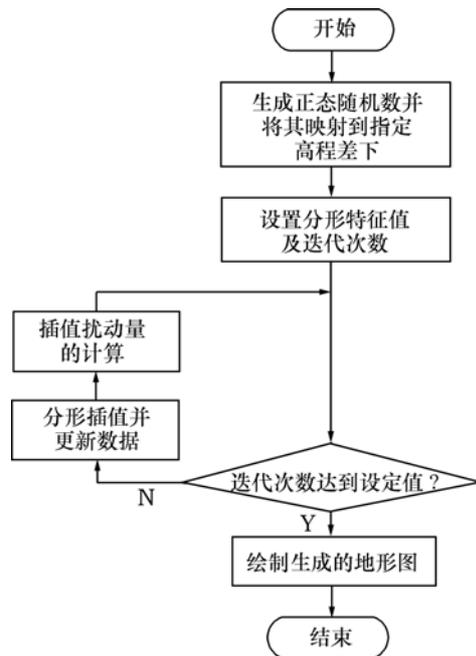


图 2 微地形生成流程图

Fig.2 Flow diagram of tiny terrain generation

公认有开采价值的富钴结壳矿区是大片结壳层型矿区, 大面积附着在坡度为 $7^\circ \sim 15^\circ$ 的海山山坡上, 微地形起伏不大, 高差大部分为 $5 \sim 10 \text{ cm}$ ^[13-14]。因此, 应用分形理论, 随机生成高程差介于 $4.5 \sim 15.5 \text{ cm}$ 的 200 个微地形, 并以这 200 个微地形为深海钴结壳微地形的随机样本。

1.3 截齿载荷仿真程序的开发

据以上分析所建立的截齿力学模型和富钴结壳微地形生成算法, 编制了基于富钴结壳微地形采矿头截齿切削过程的计算机仿真程序, 仿真流程如图 3 所示。

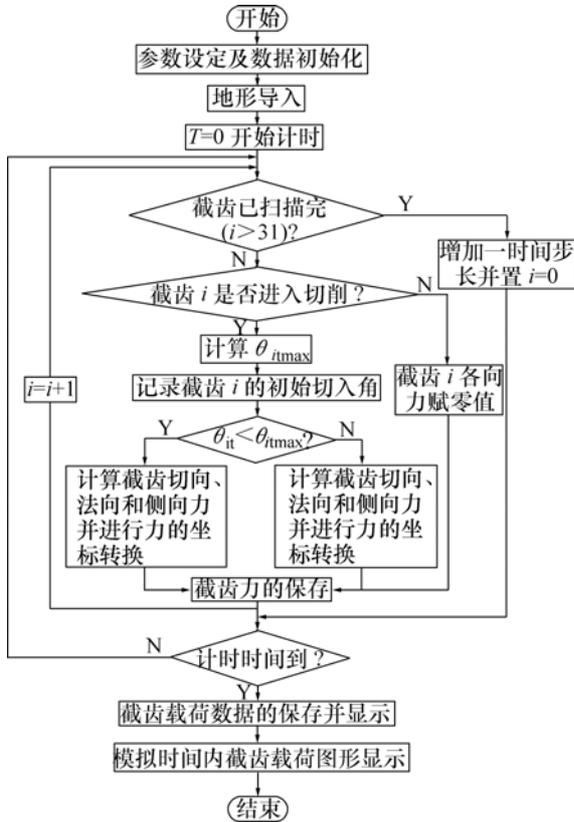


图 3 采矿头截齿切削过程仿真流程图

Fig.3 Flow diagram of cutting process simulation of mining head's cutting tooth

2 实验验证

2.1 实验台的设计

整个实验台由螺旋滚筒、钴结壳模拟料、滑动小车、轨道、支架、轨道以及 2 台电动机和数据采集系统组成。实验台采用 1 台功率为 7.5 kW 的交流电动机, 通过链传动, 使螺旋滚筒采矿头绕其轴心自转切削。以 1 台 0.75 kW 的交流电动机驱动固定有钴结壳模拟料的料台小车在轨道上来回运动, 模拟采矿头的进给动作, 两者配合完成整个采掘头破碎钴结壳模拟料的工作。数据采集系统由 IPC-610 工控机、PCL-818L 多功能数据采集卡、PCL-836 多路计数器、动态电阻应变仪、智能数字式转矩转速测量传感器组成, 系统框图如图 4 所示。

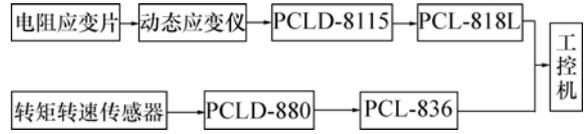


图 4 数据采集系统硬件配置图

Fig.4 Hardware layout drawing of data acquisition system

2.2 实验验证

通过实验检验仿真模型的真实性和可靠性。其方法是: 首先进行实验, 得出若干组截齿载荷的数据, 统计出每组载荷数据的最大值, 并将所有统计的数据组成 1 个样本; 其次, 对该样本进行非参数估计, 先后得出样本的分布类型和未知参数; 最后, 在相同实验条件下进行若干次仿真实验, 得到具有相应数量仿真结果的 1 个样本。将该样本与通过实验数据得出的分布函数进行 Kolmogorov-Smirnov^[15]检验, 检验二者的分布函数是否一致。截齿载荷实验结果与仿真结果比较见图 5, 实验结果直方图见图 6。

由图 6 可知, 实验结果呈偏正态分布, 对其进行参数估计, 得出均值($\mu=2.929\ 0$)和方差($\sigma^2=0.722\ 1^2$)。经检验, 实验数据样本服从均值为 2.929 0、均方差为 0.722 1 的正态分布。对仿真数据样本进行置信度为 0.95 的 Kolmogorov-Smirnov 检验, 结果表明, 仿真数据样本也服从均值为 2.929 0、均方差为 0.722 1 的正态分布, 如表 1 所示。这表明仿真数据样本与实验数据样本来自同一总体, 也就是说, 采矿头截齿切削过程仿真模型可以替代物理模型进行实验。

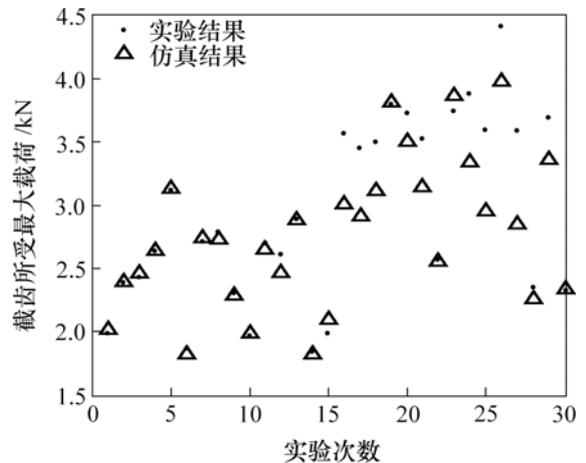


图 5 截齿载荷实验结果与仿真结果图

Fig.5 Diagram of experimental results and artificial results of cutting tooth's load

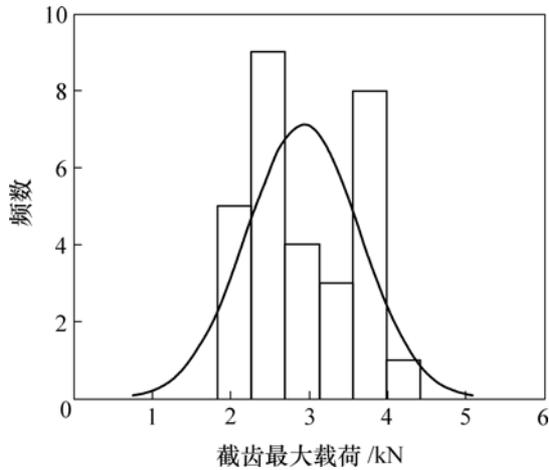


图 6 截齿载荷实验结果直方图

Fig.6 Histogram of experimental results of cutting tooth's load

表 1 Kolmogorov-Smirnov 检验结果表

Table 1 Results of Kolmogorov-Smirnov test

H(0 接受, 1 拒绝)	原假设成立概率	测试统计量	临界值
0	0.362 5	0.164 2	0.241 7

3 仿真结果与分析

将所生成的随机微地形样本分别导入采矿头切削过程仿真程序中, 并设置采矿头的转速和最优切削深度^[5], 得到 200 个仿真数据, 如图 7 所示。

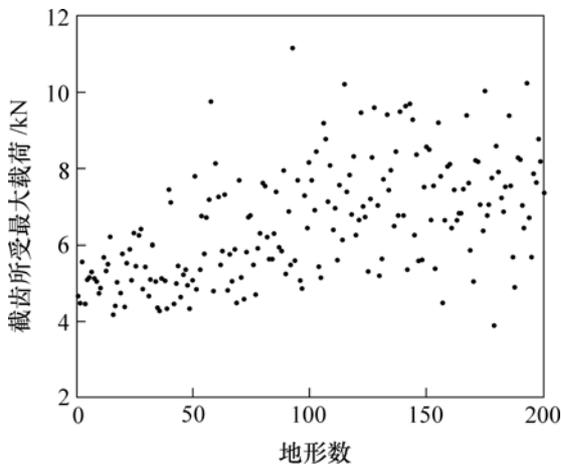


图 7 截齿载荷仿真数据图

Fig.7 Load diagram of artificial result of cutting tooth

对 200 个仿真数据进行分析, 绘制截齿最大载荷直方图, 如图 8 所示。由图 8 可知, 截齿最大载荷近似服从正态分布。假设该 200 个数据服从正态分布, 对其进行置信度为 0.95 的参数估计, 得出均值和均方差及其置信区间, 结果如表 2 所示。然后, 对仿真数据样本进行置信度为 0.95 的 Kolmogorov-Smirnov 检验, 检验结果如表 3 所示。检验结果表明, 200 个仿真数据构成的样本 X 服从参数为 $\mu=6.568 5$ 和 $\sigma^2=1.513 8^2$ 的正态分布, 即 $X \sim N(6.568 5, 1.513 8^2)$ 。

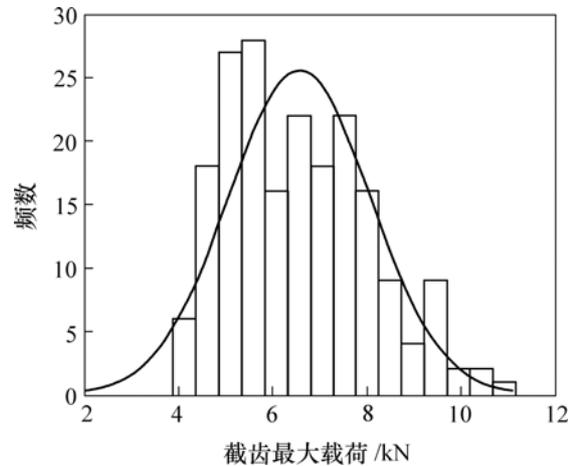


图 8 截齿最大载荷直方图

Fig.8 Histogram of maximum load of cutting tooth

表 2 截齿最大载荷正态分布参数估计表

Table 2 Parameter estimation Normal distribution of cutting tooth's maximum load

均值 μ	均方差 σ	μ 的置信区间	σ 的置信区间
6.568 5	1.513 8	[6.357 4 6.779 6]	[1.378 6 1.678 7]

表 3 Kolmogorov-Smirnov 检验结果表

Table 3 Results of Kolmogorov-Smirnov test

H(0 接受, 1 拒绝)	原假设成立概率	测试统计量的值	临界值
0	0.062 1	0.092 3	0.095 2

根据 3σ 规则, 对于正态随机变量, 它的值落在区间 $[\mu-\sigma, \mu+3\sigma]$ 内。也就是说, 以最优切削深度切削海底钴结壳微地形, 截齿最大载荷以 99.73% 的概率落于区间 $[2.027 0, 11.110 0]$ 内。同理, 当区间为 $[\mu-2\sigma, \mu+2\sigma]$ 时, 截齿最大载荷以 95.45% 的概率落于区间 $[3.540 8, 9.596 2]$ 内。

4 结 论

a. 考虑海水浮力对截齿的作用,建立了基于深海钴结壳微地形的采矿头截齿切削过程仿真模型,并研制了仿真系统。

b. 仿真模型可以替代物理模型进行仿真实验。

c. 采矿头截齿最大载荷服从正态分布,即服从 $\mu=6.5685$ 和 $\sigma^2=1.5138^2$ 的正态分布。

d. 截齿最大载荷以 99.73% 的概率落于区间 $[2.0270, 11.1100]$, 并以 95.45% 的概率落于区间 $[3.5408, 9.5962]$, 截齿最大载荷的最大值基本不超过 11.11 kN。

参考文献:

- [1] Glasby G P. Lessons learned from deep-sea mining[J]. *Science*, 2000, 289(5479): 551–553.
- [2] Yamazaki T, Park S-H, Shimada S, et al. Development of technical and economical examination method for cobalt-rich manganese crusts[C]//Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference. Cupertino: ISOPE, 2002: 454–461.
- [3] 武光海, 周怀阳, 陈汉林. 大洋富钴结壳研究现状与进展[J]. *高校地质学报*, 2001, 7(4): 379–389.
WU Guang-hai, ZHOU Huai-yang, CHEN Han-lin. Progress in the research of cobalt-rich crusts[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2001, 7(4): 379–389.
- [4] 张海生, 赵鹏大, 陈守余, 等. 中太平洋海山多金属结壳的成矿特征[J]. *地球科学: 中国地质大学学报*, 2001, 26(2): 205–209.
ZHANG Hai-sheng, ZHAO Peng-da, CHEN Shou-yu, et al. Mineralizing characters of cobalt-rich ferromanganese nodule and crust in central pacific ocean seamount[J]. *Earth Science: Journal of China University of Geoscience*, 2001, 26(2): 205–209.
- [5] 何清华, 李爱强, 邹湘伏. 大洋富钴结壳调查进展及开采技术[J]. *金属矿山*, 2005(5): 4–7.
HE Qing-hua, LI Ai-qiang, ZOU Xiang-fu. Investigation progress and exploitation technology of ocean cobalt-rich crusts[J]. *Metal Mine*, 2005(5): 4–7.
- [6] John E H. Technology for mining cobalt rich manganese crusts from seamounts[M]. New York: IEEE, 1985: 352–374.
- [7] 卜英勇, 刘 勇. 采掘机器人滚筒式采矿头载荷谱计算机模拟[J]. *中南工业大学学报: 自然科学版*, 2002, 33(3): 289–292.
BU Ying-yong, LIU Yong. Computer simulation and analysis of the load chart of drum-type collecting head of deep-sea cobalt crust excavating robot[J]. *Journal of Central South University of Technology: Science and Technology*, 2002, 33(3): 289–292.
- [8] XIA Yi-min, BU Ying-yong, TANG Pu-hua, et al. Modeling and simulation of crushing process of spiral mining head[J]. *J Cent South Univ Technol*, 2006, 13(2): 171–174
- [9] Zribi M, Ciarletti V, Taconet O, et al. Characterisation of the soil structure and microwave backscattering based on numerical three-dimensional surface representation: Analysis with a fractional brownian model[J]. *Soil Structure and Microwave Backscattering*, 1999(8): 159–169.
- [10] 李旭涛, 曹汉强, 赵鸿燕. 分形布朗运动模型及其在地形分析中的应用[J]. *华中科技大学学报: 自然科学版*, 2003, 31(5): 50–52.
LI Xu-tao, CAO Han-qiang, ZHAO Hong-yan. The analysis of the model of fractal brownian motion and its applications to terrain[J]. *J Huazhong Univ of Sci & Tech: Nature Science Edition*, 2003, 31(5): 50–52.
- [11] ZHOU Gui-yun, Lam N S N. A comparison of fractal dimension estimators based on multiple surface generation algorithms[J]. *Computers & Geosciences*, 2005(31): 1260–1269.
- [12] 秦宣云. 基于微地形重构的深海钴结壳最佳采集切削深度控制模型研究[D]. 长沙: 中南大学机电工程学院, 2005.
QIN Xuan-yun. Study on control modeling of optimized depth of cut in mining of deep-sea-cobalt-rich crusts based on reconstruction of tiny terrain[D]. Changsha: School of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, 2005.
- [13] 梁 平, 石海林, 崔 波, 等. 洋底富钴结壳矿床微地形和物理特性[J]. *金属矿山*, 2002(315): 15–17.
LIANG Ping, SHI Hai-lin, CUI Bo, et al. Microtopography and physical properties of seabed cobalt-rich crust deposit[J]. *Metal Mine*, 2002(315): 15–17.
- [14] Yamazaki T. Microtopographic analysis of the cobalt-rich manganese deposits on a mid-pacific seamount[J]. *Marine Georesources and Geotechnology*, 1994(12): 33–52.
- [15] Andrade F A, Esat I, Badi M N M. A new approach to time-domain vibration condition monitoring: Gear tooth fatigue crack detection and identification by the Kolmogorov-Smirnov test[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2001, 240(5): 909–919.