

# 机器人化月表采样器故障诊断算法的研究\*

解 洪<sup>1,2</sup> 李 斌<sup>1</sup>

( 1 中国科学院沈阳自动化研究所机器人学国家重点实验室 沈阳 110016;

2 中国科学院研究生院 北京 100039 )

**摘 要:** 已搭建的月表采样器的采样工作机构主要有两个部分: 仿生蚌式复合铲和转塔式钻机。本文针对采样器钻机的钻进过程, 设计了一套基于神经网络 BP 算法的故障诊断方法。可以实现对钻进过程中的卡钻事故进行在线监控和诊断。实验表明该算法达到了预期的设计目的, 取得了良好的效果。

**关键词:** 故障诊断 分布式控制系统 钻进过程 BP 算法

## Study of fault diagnosis method of robotic lunar surface sampler

Xie Qi<sup>1,2</sup> Li Bin<sup>1</sup>

(1 State Key Laboratory of Robotics, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;

2 Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract:** The developed lunar surface sampler constitutes of bionic clam shovel and turret rig. The fault diagnosis method based on BP neural algorithm is discussed in the paper for diagnosing the drilling process of the rig. The control system can supervise the state of the rig and predict if the drill pipe sticks. The algorithm is validated by related experiments and it performances well.

**Keyword:** fault diagnosis distributed control system drilling process BP neural algorithm

### 1 引言

中国探月“嫦娥工程”中的第二步: 进行月岩的现场探测和采样分析及第三步: 进行月球样品自动取样并返回地球, 都对月表采样器明确的需求<sup>[1]</sup>。月表采样器工作在恶劣的月球环境下, 因此需要具备自治采样的能力。国外为标示星球采样钻机的自动化水平, 下表 1 给出了五种不同等级的自动化水平的定义。

采样器控制系统的智能性决定了采样器的智能性, 为使搭建的采样器控制系统的智能化水平由原先的 A2 水平 (具有基本速度闭环及位置闭环) 提高到 A3 水平, 即具备故障诊断及恢复的能力, 本文设计了一套基于 S3C2440 主控制器的神经网络 BP 算法用于实现钻进过程中的卡钻事故进行在线监控和诊断。

### 2 采样器主控制系统的设计

#### 2.1 采样器基本机构

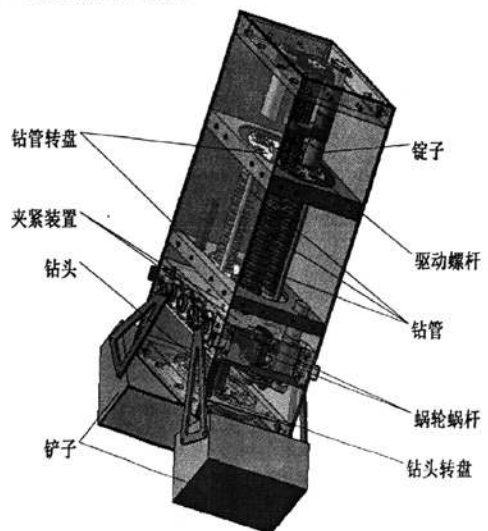


图 1 机器人化月表采样器

月表采样器具有夹持、铲、钻取等六自由度。其

\*基金项目: 机器人学国家重点实验室创新基金项目: 08A1207101

表1 星球采样钻机自动化水平分级表<sup>1</sup>

种类	对错误做出的反应				描述
	探测	诊断	预测	校正方法	
A0	识别非正常态	估计系统状态	无	无	可遥操作：钻进和采样及样本运输都是开环的
A1	识别非正常态	估计钻机错误类型	无	停止钻机让系统进入安全状态	半自动化：对钻取速率和平台反应力有一些闭环控制
A2	识别非正常态	估计钻机及采样机错误类型	无	停止钻取和采样，进入安全状态	半自动化：基本的闭环控制：如钻取、采样和运输
A3	识别非正常态	估计错误类型	无	故障恢复并进行钻取和采样操作	自治的：基本的闭环控制，故障诊断及恢复
A4	识别非正常态	估计错误类型	预测故障	故障恢复并继续钻进采样，并能进行故障预测	完全自主：闭环控制；故障预测；错误诊断及恢复，并能采用最佳的方式进行钻进采样

机构主要有两个部分：仿生蚌式复合铲和转塔式钻机。采样器结构如图1所示。

2.2 控制系统结构

该采样器机构复杂，部件之间必须按照严格的时序协调运作。为精确地控制各部件的运作，保证系统可靠地运行，本文设计一套基于S3C2440微处理器的嵌入式分布式控制系统，如图2所示。

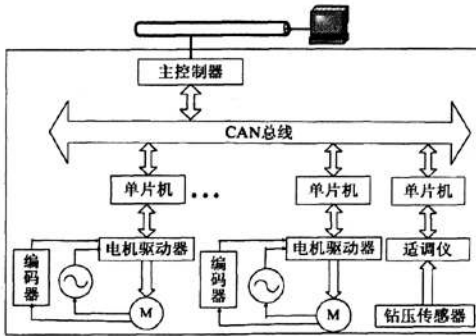


图2 控制系统框图

2.3 硬件设计

系统硬件组成如图3所示，嵌入式主板采用飞凌的TE-2440II开发板，其工作可靠，接口丰富。它采用32位的微处理器S3C2440。

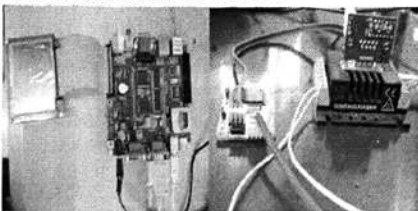


图3 主控制器与从控制器实物图

3 故障诊断 BP 算法的构建

采样器钻进作业过程中可能由于钻屑无法及时排出，或者遇到大块坚硬岩石等情况发生卡钻事故，为使控制系统能够识别及预测卡钻事故，并在卡钻事故发生后能及时处理使系统恢复运行，构建了一套故障诊断神经网络BP算法。

神经网络能对各种传感器的信息及其对应的钻进过程状态进行识别，以传感器的信号作为输入信号，输出信号为钻进运行状态，利用理论分析、事故记录与专家经验进行学习训练。它能在数据缺失的情况下准确给出结果<sup>[5]</sup>。

故障诊断算法的开发过程由神经网络的构造，数据准备，神经网络的训练，利用神经网络进行分析以及对诊断系统的集成等阶段组成。

3.1 选择特征信号

卡钻预测信号：即将发生卡钻时，钻杆转速减小，钻压和扭矩增大，因此可选择转速，钻压，扭矩作为预测卡钻的特征信号。

卡钻的识别信号：卡钻发生时，转速急降，钻速减小，扭矩和猛增。因此，可选转速，钻压，扭矩作为识别卡钻的特征信号。

3.2 检测特征信号

3.2.1 钻压检测

下图4为锭子及螺杆驱动机构图，通过传动齿轮及丝杆螺杆把驱动螺杆电机的旋转运动转化为直线运动。

钻压为钻进时钻头上的轴向压力。本采样器钻

机的钻压为给进力（螺杆的轴向驱动力和钻具重量）减去孔内摩擦阻力后剩余的载荷。

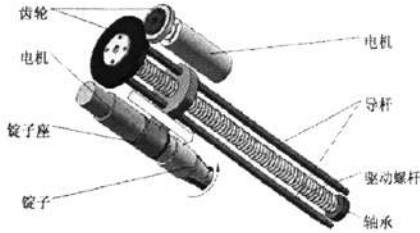


图 4 铤子及螺杆驱动机构

鉴于在钻头上安装钻压传感器比较困难，可采用间接测量的方法近似反映钻压。

测量钻压的实验设置：

标定驱动螺杆的电机的电流值与钻杆端外力的关系，可以得出驱动螺杆的电机的电流与钻进作业时钻杆所受钻压的关系。

从铤子座的中心处引出钢丝绳，然后经过定滑轮，绳的另一端可悬挂砝码。图 5 为钻压测量的布置图。

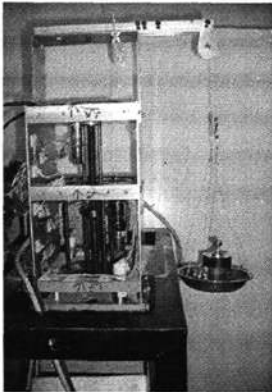


图 5 钻压测量的布置图

静止时，丝杠螺杆不能把铤子端的受力传递给螺杆电机。所以，实验时需要动态的标定螺杆电机电流值与铤子端的受力的关系。表 2 为驱动螺杆匀速运动时，螺杆电机电流值与铤子端悬挂砝码质量的关系。

表 2 电机电流值与砝码质量的关系

螺杆电机电流值 (mA)	铤子端的重物 (kg)
226	4
216	3
200	2
184	1
165	0

根据上表可得出如下图 6 所示的钻压与螺杆电机电流值的曲线图。

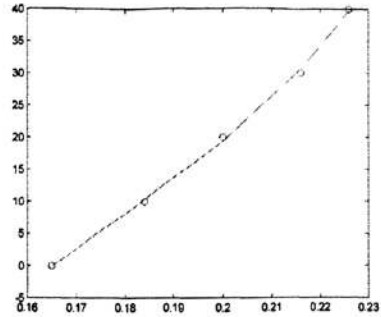


图 6 钻压与螺杆电机电流值的关系

由上图可以看出铤子端受力 F 与螺杆电机电流 I 之间的关系是近似的线性关系。表达式为：

$$F = 642.5I - 106.6; \tag{1}$$

采样器钻进时，螺旋钻杆的受力情况如图 7 所示。

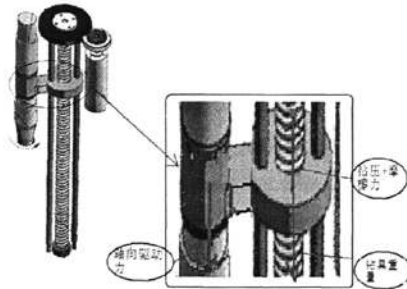


图 7 铤子端受力分析

忽略摩擦力不计，铤子端受力=钻压-钻具重量，即钻压=铤子端受力+钻具重量。钻具重量为 2.6KG，所以钻压=铤子端受力+26N。

由此上述关系得出钻压的表达式为：

$$F = 642.5I - 80.6 \text{ (N)}; \tag{2}$$

### 3.2.2 扭矩检测

钻杆的回转运动由铤子端的电机驱动产生的，从控制器每 200ms 返回各电机的当前电流值，钻杆的扭矩可用铤子端的电机的电流值表达：

$$\text{torque} = i\eta_1\eta_2(K_m I - M_r) \tag{3}$$

式中 i—铤子电机传动的减速比，i=415；

$\eta_1, \eta_2$ —分别为电机，减速器的传动效率。

### 3.2.3 转速及钻速的检测

从控制器每 200ms 返回各电机的当前相对码

值, 因此钻杆的直线钻进速度及回转速度可分别由旋子端电机及螺杆电机的运动控制器返回的码值计算得出。

### 3.3 神经网络的构建

构建如图 8 所示是我三层的 BP 神经网络。

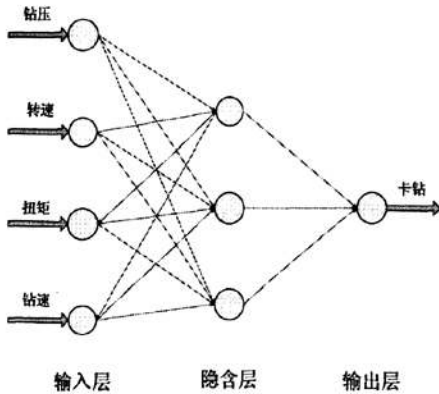


图 8 三层的 BP 神经网络

输出值定义为 0-1 之间, 数值越小说明钻进作业比较平稳, 数值越大说明钻进过程可能遇到障碍物, 有可能发生卡钻的危险。输出值的定义见表 3。

表 3 输出值的定义

输出值	现象
0-0.3	正常
0.4-0.7	预测卡钻将要发生
0.8-1	卡钻

学习样本集 (部分) 如表 4 所示。

表 4 学习样本集

	钻速	转速	钻压	扭矩	输出	状态
Max	1	9	50	0.5	0	正常
Min	1	8	200	3	1	卡钻
1	1.08	8.62	82.4	0.88	0	正常
2	1.04	8.48	83.7	0.92	0	
3	1.07	8.66	112.3	1.10	0.1	
4	1.07	8.62	119.5	1.39	0.2	
5	1.06	8.58	124.5	1.26	0.3	
6	1.10	8.81	131.7	1.73	0.5	预测卡钻
7	1.04	8.48	132.2	1.55	0.5	
8	1.04	8.46	140.8	1.66	0.7	
10	1.07	8.50	143.9	1.89	0.7	卡钻
11	1.05	8.48	146.2	1.95	0.8	
12	1.05	8.36	153.1	1.89	0.9	
13	1.07	8.62	157.1	2.04	1	

使用 MATLAB 的神经网络工具对样本进行训练。

```
net=newff(pr,[3 1],{'tansig','purelin'},
'trainlm','learnngdm','mse');
```

利用上述表 2.3 中的样本, 对网络进行训练, 并选取  $\eta=0.01$ ,  $\alpha=0.9$ , 规定系统误差  $\varepsilon=0.0001$ 。

学习样本的训练结果如图 9 所示。

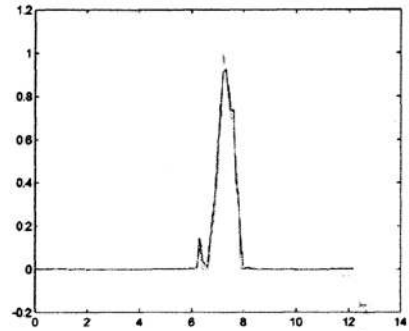


图 9 学习样本训练结果

提取训练结果的权值与阈值, 在主控制系统里实现其算法, 实验证明其可以实时实现卡钻事故的预测及恢复。

### 3.4 控制界面的设计

PC 机通过串口与下位机通信, 发送串口指令, 现在 PC 机上基于 labview 设计了一控制界面, 通过图表可以实时的反应钻进作业的钻压, 转速, 钻速, 扭矩信息, 直观的监控采样器的作业情况。如图 10 所示。

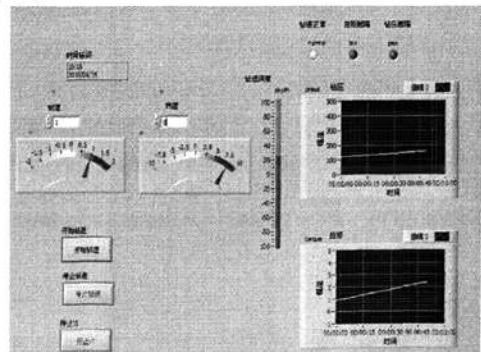


图 10 控制界面

## 4 实验

分别在熟石灰及砂子上进行了钻进实验。图 11 所示的是在熟石灰上的钻进实验。螺杆电机走速度

模式(下钻时:速度 1mm/s,加速度 0.2mm/s 起钻时:速度-0.5mm/s,加速度-0.2mm/s.)锭子电机走速度模式(下钻时:速度 8rpm,加速度 1rpm/s,起钻时:速度 -3rpm,加速度 1rpm/s),实验采集的数据如图所示:

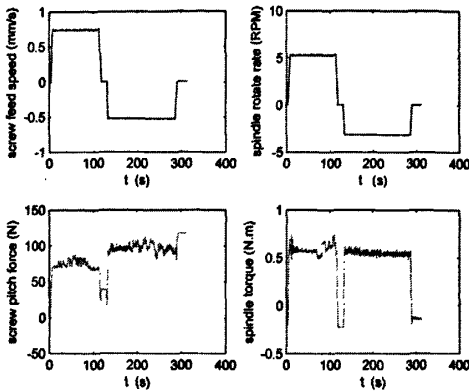


图 11 钻进实验

下图 12 是在熟石灰上进行的卡钻实验(未加入故障诊断算法时),钻杆下放置一个长\*宽为 3\*8cm 的塑料片,距离钻头位置 3.5cm。下图得出钻机最大钻压和最大扭矩分别为 180N 和 5.45mN.m。

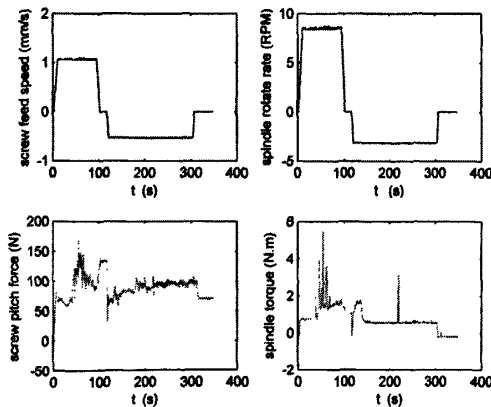


图 12 熟石灰上进行的卡钻实验

有上两图比较可以分析出,卡钻发生时的现象,即钻压与扭矩升高。

主控制系统加入故障诊断算法时,在 40 组钻进实验里,据统计发生卡钻并预测正确的概率为

98%,未发生卡钻给出错误报警的概率为 0.8%,由以上数字可以得出此故障诊断算法可以准确有效的预测卡钻事故。

## 5 结 论

国外将现有的星球采样机器人的自动化水平划分成 A0~A4 等 5 个级别<sup>[6]</sup>。通过采样试验表明:该控制系统能控制采样器机构能够通过仿生蚌式复合铲铲取表层样品实现浅层采样,通过转塔式钻机钻取深层样品实现深层采样过程,并能进行预测故障,自动化水平已达到 A2 级别,为提高钻机的自动化水平,使之自动化水平达到 A3 标准,下一步工作是一步改善现有的采样器部件的不足之处,提高电机的运动控制精度,改进钻机的故障诊断算法,在钻具上安装温度,震动传感器等,使之能随钻具下钻,得到更精确钻进作业状态信息,使系统具有更高的智能性。

## 参 考 文 献

- [1] 王文睿,李斐,月球探测中若干问题的研究进展[J],地球物理学进展,2008,23(6): 1751-1757.
- [2] GRUNTZ D W. Development and evaluation of a tool for EVA or robotic planetary sampling [D].College Park: Univ. of Maryland, 2007:70-100.
- [3] ANTTILA M. Concept evaluation of Mars drilling and sampling instrument [D].Espoo: Helsinki Univ. of Technology, 2005: 107-120.
- [4] PAULSEN G, ZANCY K, CHU P, et al. Robotic drill system for planetary exploration [C]. Collection of Technical Papers - Space 2006 Conference, San Jose, CA, USA, 2006: 19-21.
- [5] 史玉升,梁书云. 钻进过程实时状态监控与事故诊断专家系统[J],地质与勘探. 1999.35(2): 52-55.
- [6] MUKHERJEE S, BARTLETT P, BRIAN G, et al. Technologies for exploring the Martian subsurface[C]. Proceeding of 2006 IEEE Aerospace Conference, Big Sky, MT, USA, 2006: 1-11.