

# 基于微分算法的码盘故障诊断系统及应用

展鹏<sup>1</sup>,陈勇<sup>2</sup>,郝瑞峰<sup>1</sup>,郑剑<sup>1</sup>,程金海<sup>1</sup>,康宁<sup>1</sup>

(1.天津电气科学研究院有限公司,天津 300180;2.辽宁天丰特殊工具制造股份有限公司,辽宁 鞍山 114020)

**摘要:**在无缝钢管生产线中,高速定位直线运动设备的安全保护工作尤为重要。针对高速定位系统位置编码器损坏、断轴等故障以及位置系统位置反馈偏移等问题,论述了一种基于微分算法的编码器故障诊断系统,对该系统的工作原理和故障诊断策略进行阐述,并结合工程案例对此系统在无缝钢管生产线的应用进行了说明。

**关键词:**无缝钢管生产线;微分算法;编码器故障诊断

**中图分类号:**TP13 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed19167

## Encoder Fault Diagnosis System and Application Based on Differential Algorithm

ZHAN Peng<sup>1</sup>, CHEN Yong<sup>2</sup>, HAO Ruifeng<sup>1</sup>, ZHENG Jian<sup>1</sup>, CHENG Jinhai<sup>1</sup>, KANG Ning<sup>1</sup>

(1. Tianjin Research Institute of Electric Science Co., Ltd., Tianjin 300180, China; 2. Liaoning Tianfeng Special Tool Manufacturing Co., Ltd., Anshan 114020, Liaoning, China)

**Abstract:** In the seamless steel tube production line, the safety protection of high-speed positioning linear motion equipment is particularly important. Aiming at the problems of position encoder damage, shaft breakage and position feedback deviation in high speed positioning system, a fault diagnosis system based on differential algorithm was discussed, and the working principle and fault diagnosis strategy of the system were described. The application of the production line was explained.

**Key words:** seamless steel tube production lines; differential algorithm; encoder fault diagnosis

在无缝钢管生产线中关键设备限位齿条、横移小车等重载高速直线运行设备的位置检测编码器出现故障时,通过常规方式很难完美地进行诊断。由于重载设备的大惯量特性,无论漏判还是延迟判断,都可能对设备造成极大损伤,导致停产等不良后果,经济损失较大。针对此问题走访鞍山、天津以及山东地区的大小型无缝钢管厂,了解到几乎每家都存在由此问题造成过设备损坏,停机时间最长可达数月。

某国外公司提出了一种双位置编码器保护方式,但其程序已被加密,且在国内没有成功案例,无参考性。国内同类设备中,绝大多数控制系统缺少此类诊断系统。

结合双位置编码器共同保护的思路,我们自行研发了一套采用微分算法的编码器故障诊断系统,通过对同一系统中多个编码器变化量的微分

运算,比对运算差别,得出故障诊断结果,并在多条生产线上进行了实际应用,获得理想的效果。

## 1 编码器故障诊断系统

### 1.1 系统介绍

编码器故障诊断系统主要是由微分模块、信号处理模块以及系统逻辑模块组成的,如图1所示。

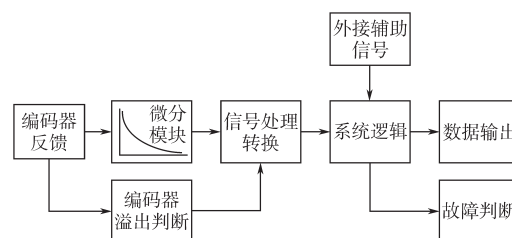


图1 编码器故障诊断系统

Fig1 Fault diagnosis system of encoder

编码器故障诊断系统通过对同一系统中1个或多个位置编码器的反馈数值进行微分运算,再经过量纲转换和逻辑分析判断,得出位置编码器的振动状态、同步状态以及生命状态,并进行输出,达到保护设备安全运行的目的。

### 1.1.1 微分模块

对位置编码器的反馈数值在时间轴上进行定周期的微分,公式如下:

$$n = \frac{dk}{dt} \quad (1)$$

式中:  $n$  为微分结果输出;  $k$  为每采用周期输入值的步长;  $t$  为采样周期时间。

### 1.1.2 信号转换模块

对微分模块的输出值进行筛选,去除编码器溢出时、人工维修时以及断电瞬间出现的数值变化,并对数值按照系统要求进行量纲转换,使输出值可被方便的利用。

### 1.1.3 系统逻辑模块

结合一些外部辅助信号,如加速度、速度设定等,对信号转换模块输出的数值进行运算与分析。得出编码器的振动状态、与连接轴运行的同步状态以及编码器的生命状态,并输出最终结果。

## 1.2 算法介绍以及故障诊断

图2为编码器反馈微分波形。图2中,位置编码器输出信号为设备运行的绝对位置,将此信号在时间上进行微分计算得出位置的变化率即转速。若再对转速进行再次微分可得出转速的加速度,当系统匀速运行,转速的加速度可以被认为是系统直线运动设备的振动幅度。

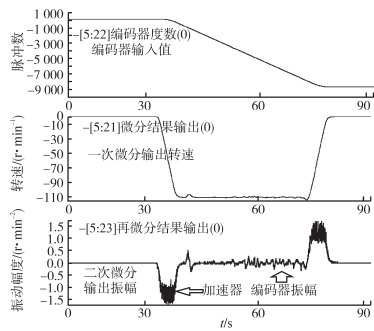


图2 编码器反馈微分波形

Fig.2 Feedback differential waveforms encoder

通过分别对一次、二次微分波形进行逻辑分析,最终可得出需要的故障结果。

### 1.2.1 一次微分波形分析及应用

通过对编码器一次微分波形及给定波形之间的对比,或多个编码器一次微分波形之间的对

比,我们可以得出编码器之间的同步状态与生命状态。不论是编码器断轴导致同步性下降还是编码器损坏导致生命状态消失,都会直接引起位置系统出现偏差,可能造成设备相撞的事故。本文就双编码器之间对比为例进行介绍。

如图3、图4所示,图中2根曲线分别代表不同2个位置编码器的一次微分输出值,图3中,2个位置编码器相互之间的跟随性较好,2个曲线几乎完全重合;图4中,2#编码器的微分输出值略微滞后于1#编码器,可见图4系统中,双编码器之间的同步性略差。

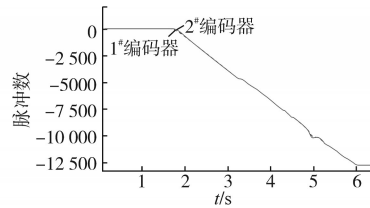


图3 同步性检测波形 1

Fig.3 Waveform 1 with synchronism detection

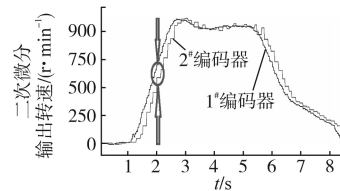


图4 同步性检测波形 2

Fig.4 Waveform 2 with synchronism detection

由于编码器安装位置不同以及机械间隙的存在,编码器之间会存在一些同步性差异,在使用中通过对同步性差异值设置阈值来解决同步性差异带来误报问题。编码器同步性监测模块示意图如图5所示。

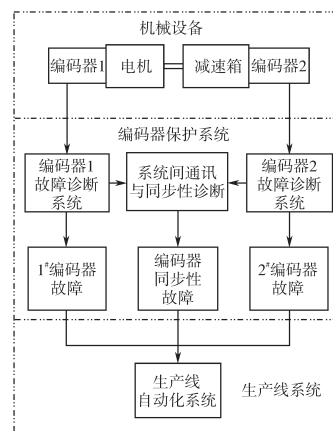


图5 编码器同步性检测模块示意图

Fig.5 The schematic of encoder synchronization detection module

只有当同步性差值超过阈值时,编码器存在同步性差问题或生命型号问题,系统给予报警输出。编码器断轴故障实例波形,如图6所示,1<sup>#</sup>,2<sup>#</sup>编码器反馈几乎重合,同步性较好。

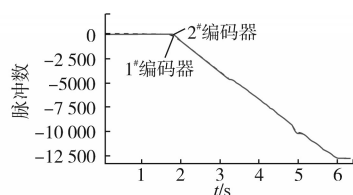


图6 编码器断轴故障实例波形

Fig.6 Example waveforms of encoder broken shaft failure

图6为某生产线调试时,编码器联轴断开波形,当同步出现异常时系统成功报警。在此后的实际应用中,同步性异常直接被当做系统故障使用,并做相应的停机处理,由于此系统具有较强的实时性,所以大大的提高了生产线的安全性。

### 1.2.2 二次微分波形分析

对采用光栅编码器,设备较大的振动幅度既是导致其光栅编码器损坏的主要原因,又是导致编码器断轴的重要因素。

通过对二次微分波形进行分析,我们可以得出每个采样周期的编码器振动值,对此振动值进行逻辑判断,当其超出预设阈值时,系统进行报警。

图7为某厂实际使用时的波形1。在某次编码器更换后,由于安装同心度不达标,编码器故障诊断系统振动检测始终输出振动值过大报警信号。

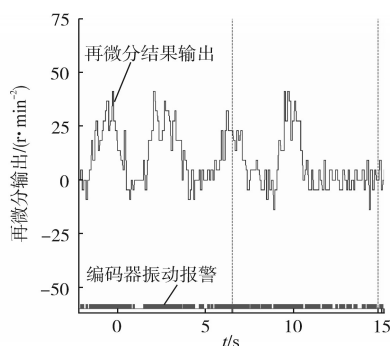


图7 编码器震动检测波形 1

Fig.7 Waveform 1 of encoder vibration detection

图8为调整同心度后的振动波形2。调整同心度后的编码器反馈振动已经大幅度减少,编码器振动报警信号已消除,系统成功预警了编码器振动可能带来的生产安全隐患。

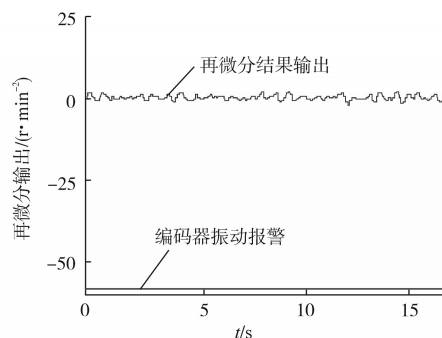


图8 编码器振动检测波形 2

Fig.8 Waveform 2 of encoder vibration detection

对于二次微分波形来说,阈值与采样周期的标定也是系统精度的一个影响因素。其中阈值的标定需要根据机械的实际情况确定,我们推荐首次安装完编码器时对其同心度进行测量,编码器振动小于 $3\ \mu\text{m}$ 时进行阈值标定。同样系统采样周期的标定也需要根据现场实际情况来确定,根据相容性采样定理,建议二次微分的采样周期应是一次微分采样周期的2~3倍。

### 1.3 案例分析

如图9所示,某厂顶杆小车正常轧制过程中,安装于顶杆小车的2个位置编码器中的1个出现了断轴故障。系统及时的诊断出了编码器同步性故障,并将系统切换至低速轧制状态,完成轧制后自动发出系统停机命令。后经工人检查确认,2<sup>#</sup>位置编码器连接轴出现损坏。从图9可看出,整个诊断过程时间小于250 ms,系统具备高度的实时性。

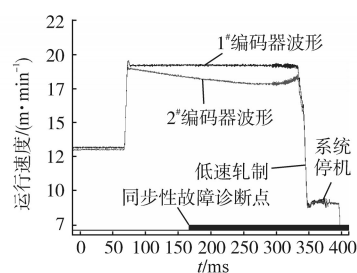


图9 事故案例

Fig.9 Accident case

### 1.4 数据统计

表1为某厂使用此编码器故障诊断系统1a后的故障统计数据。从表1中数据可以看出,投入此编码器故障诊断系统后,故障次数、卡钢次数及平均停机时间明显减少。

表1 某厂年平均故障次数统计记录

Tab.1 Statistical records of the annual average failures numbers in a factory

穿孔顶杆小车			
	年故障数/次	故障卡钢数/次	平均停机时间/min
投入前	6	6	240
投入后	2	0	20

以上是对基于微分算法的编码器故障诊断系统的介绍,此系统通过对一次微分波形的分析来实时监测位置编码器的生命状态与同步状态,再通过对二次微分波形来确保编码器安装精度,减少振动造成的编码器损坏和断轴的可能性,双管齐下最大限度提高了生产的连续和设备的安全。

## 2 编码器故障诊断系统在无缝钢管生产线上的应用

无缝钢管生产线中,编码器故障诊断系统被应用在顶杆小车、毛管横移小车、限动齿条等所有需要位置调整装置的控制中,根据被控对象的不同,编码器故障诊断系统的控制策略有所改变,在此对顶杆小车和限动齿条的编码器故障诊断系统进行介绍。

### 2.1 顶杆小车编码器故障诊断系统

在生产过程中,顶杆小车负责运送穿孔顶杆和毛管,其运行速度一般在4 m/s以上。如图10所示,顶杆小车驱动系统由电机带卷筒组成,卷筒与小车由钢绳连接,一般配备2个编码器,即安装在电机侧的速度编码器以及减速机侧的位置编码器。

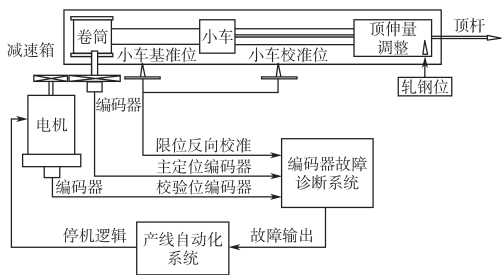


图10 顶杆小车编码器故障诊断系统

Fig.10 Fault diagnosis system for encoders of top bar trolley

首先编码器故障诊断系统通过安装在减速机侧的主定位编码器对位置进行检测,再通过编码器故障诊断系统对主定位编码的振动情况、旋转情况、以及与校准位编码器的同步性进行分析,最后通过限位开关反向对位置进行校验,将

最终的故障结果输出,通过生产线自动化系统的停机逻辑对是否停机以及停机方式进行最终处理。在最大程度保证不卡轧的情况下,进行安全停车。进行故障判断时需要预设一定的门槛值,具体门槛值范围应当根据生产线长期运行数据来确定,以减少误报的概率。

当然也有少数厂家在顶杆小车上安装3个编码器,也就是减速机上安装2个位置检测编码器,这种情况下可以对2个位置编码器的反馈进行主从关系设计,当主编码器诊断出故障后,系统自动切换主从编码器,并对主编码器进行报警处理,已确保运行的流畅性,减少故障停机次数。

### 2.2 限动齿条编码器故障诊断系统

限动齿条是无缝钢管生产线的核心设备,为钢管轧制过程提供限动力矩,其自身质量很大,控制时一般选用多电机联轴控制,根据轧制工艺设计,限动齿条工作时如果出现故障,只能通过停机处理。为降低故障齿条运行时的故障率,设计时一般选用多编码器共同控制,见图10。

图11为一个由双电机控制的限动齿条编码器故障诊断系统示意图。

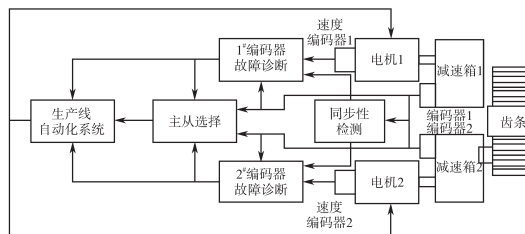


图11 限动齿条编码器故障诊断系统

Fig.11 Fault diagnosis system for limited rack encoder

图11中,假定编码器1为主编码器,系统运行时优先使用编码器1的读数进行位置控制,当1#编码器故障诊断系统发出故障信息时,通过主从选择将位置反馈读数由1#编码器切换至2#编码器,为了保证切换时无缝衔接,需要对2个位置检测编码器进行同步性比对,当同步性较差时,不建议在线进行编码器切换。当然也通过建立数学模型的办法对限动齿条的实时位置进行模拟,如果某个编码器的位置反馈数值与模拟出来的位置相差太大,可以将自动切除,使用另外一个编码器进行控制,只有2个位置反馈编码器都处于故障状态时,系统才会选择自动停车,这样大大地降低了生产线的故障停车率。实际使用时可根据现场编码器安装数量对系统进行拓展。

### 2.3 停机策略

当系统诊断出了编码器故障,并发给生产线自动化系统后,我们需要对信号进行正确的处理。由于卡钢在任何轧钢生产线上都是一个重大的问题,处理难度很大,处理时间较长,造成的经济损失很大,所以在需要故障停机时,我们应该本着最大程度地减少卡钢问题进行处理。

图12为编码器故障诊断系统的停机策略示意图。

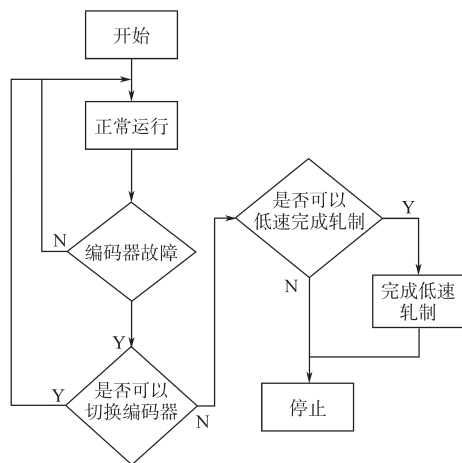


图12 停机策略示意图

Fig12 Schematic diagram of shutdown strategy

系统正常轧钢时,当系统诊断出编码器故障时,如果是多编码器系统,那首先从所有编码器

(上接第91页)

- [4] Hu Xiaolin, Changyin Sun, Bo Zhang. Design of Recurrent Neural Networks for Solving Constrained Least Absolute Deviation Problems. *IEEE Transactions on Neural Networks [J]*, 2010, 21(7): 1073-1086.
- [5] 丛爽,戴谊. 递归神经网络的结构研究[J]. *计算机应用*, 2004, 24(8): 18-20, 27.
- [6] 梅柏杉,易蒙,冯江波,等. 基于无功功率的永磁同步电机转速辨识[J]. *电气传动*, 2017, 47(5): 10-13.

中选择可以使用的编码器进行切换,并对故障编码器进行报警。若没有可切换的编码器或系统为单编码器系统,那么判断系统是否可以降低运行速度完成轧制,在无缝钢管生产线上除限定齿条外的所有线性运行设备都可以降低速度进行轧制作业,完成轧制作业后,报警停机。最后如果以上条件均无法满足,那么只有系统停机了。通过此停机策略能够最大限度地减少卡钢率。

### 3 结论

此编码器故障诊断系统,可以有效地保护各类依靠编码器、磁尺等检测元件进行位置控制设备。通过微分算法以及对比计算,能够快速诊断编码器振动、断轴等问题。并且能够通过系统模型之间对比进行多编码器控制,并实现编码器在线切换,对生产设备进行保护。

此系统已经先后在多条无缝钢管生产线上投入使用,运行效果良好。

#### 参考文献

- [1] 同济大学数学系编.《高等数学》上册[M]. 北京:高等教育出版社,2014.110-120.

收稿日期:2018-06-06

修改稿日期:2019-05-16

- [7] 何炳生. 从变分不等式的投影收缩算法到凸优化的分裂收缩算法[J]. *高等学校计算数学学报*, 2016, 38(1): 74-96.
- [8] 张虎,孙安博,樊生文. 改进的永磁电机参数辨识研究[J]. *电气传动*, 2016, 46(7): 8-11, 15.

收稿日期:2018-07-27

修改稿日期:2018-10-09