

盾构隧道施工刀盘状态实时监测系统研制

龚秋明¹ 王庆欢¹ 王杜娟² 邱海峰³ 吴帆¹

(1 北京工业大学城市防灾与减灾教育部重点实验室,北京 100124;2 中国中铁工程装备集团有限公司,郑州 450016;3 北京玖瑞科技有限公司,北京 100107)

摘要 盾构隧道施工中,由于盾构刀盘后面为有压舱,刀盘工作处于“黑箱”状态。为了实时监测盾构掘进过程中刀盘滚刀及刀盘整体的工作状态,研发了一套盾构隧道施工刀盘状态实时监测系统。该系统由传感器、控制与数据传输及算法与显示三个子系统组成;传感器子系统集成了自制的滚刀磨损量与转速传感器、温度传感器、数据采集模块和电源;集成的传感器安装于刀盘滚刀刀箱内,可实时监测滚刀的磨损量、转速与刀盘的温度。采集的数据通过有线或无线传输到中心端,再通过有线方式传送给上位机。上位机软件集成了盾构设计参数及隧道地层参数、盾构施工参数、传感器监测参数,可实时显示传感器采集的参数,并结合地层条件与盾构施工参数综合判定盾构刀盘工作状态,预测滚刀使用寿命。经过实验室测试、工厂测试,结果表明该系统满足设计要求,可用于盾构刀盘工作状态监测。

关键词 盾构机 刀盘状态 滚刀磨损 滚刀转速 实时监测系统

中图分类号:U455.3 **文献标识码**:A

1 引言

随着我国经济的快速发展和基础设施建设需求的持续增长,盾构机已成为地铁及跨海越江隧道等工程建设中不可缺少的施工设备。盾构机在掘进过程中,刀盘系统直接与岩土体相互作用,具有切削岩土体与支护掌子面的功能。盾构机的土压舱与泥水舱在正常施工过程中是有压舱,刀盘及刀具的工作状态处于“黑箱”之中。盾构施工过程中会遇到不同的地质条件,如砂卵石地层、复合地层等,刀具及刀盘极易磨损,从而影响设备工作性能,刀具磨损到一定程度时应及时更换,否则会加重周围滚刀的载荷,加速磨损,甚至造成整个刀盘的损坏^[1]。越来越多的隧道位于江河湖海的下方,承受了较高的水压力,受周边环境的影响,盾构刀盘换刀更加困难,需要提前进行换刀规划,因此对盾构刀盘工作状态及刀具磨损程度的监测提出了更高的要求。

按李凯磊^[2]、孙志洪^[3]、侯振德等^[4-6]的分类,刀具磨损检测方法主要有开舱检测法、阈值检测法、异味添加剂法、掘进参数分析法、岩渣形状分析法和实时监测法等。开舱检测法是检测刀具磨损情况最直接、最有效的方法,但带压开舱检测通常耗时较长,不仅会影响施工进度,而且还存在较高的安全风险;阈值检测法是单一设定值检测。异味添加剂法适合在TBM(隧道掘进机)中应用,在盾构中的应用大打折扣,只能反应单个刀的破坏;掘进参数分析法通过分析盾构机工作的掘进速度和负载扭矩,推算出刀具的磨损量。因盾构机的施工工况不同,推进设备的推力、土体参数、土舱压力也不尽相同,很难应用到实际工程中滚刀磨损估算。岩渣形状分析法,主要用于对切削后的岩渣进行分析,新旧刀具切削土体产生的岩渣块的形状、大小、切口断面和断裂棱角有所不同,据此判断刀具的磨损情况。由于岩渣形

修改稿返回日期:2020-06-10

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973计划)(2015CB058103)。

作者简介:龚秋明(1969-),男,博士,教授,主要从事掘进机、盾构机方面的研究工作,E-mail:gongqiuming@bjut.edu.cn。

状受到的影响因素多,故此种方法难以实用。

随着传感器、计算机及通信等技术的快速发展,国内外一些研究机构及公司在实时滚刀磨损和滚刀转速监测方面进行了有益的探索。夏毅敏等^[7]发明了一种电感式位移传感器,用于测量滚刀刀刃面到传感器的距离信号,传感器的分辨率可以做到0.1 mm。其信号采用无线传输方式,为了克服岩土介质和水对无线电波的屏蔽作用,无线发送和无线接收模块各用4个,每个间隔90°。郑伟等^[8]设计了一种基于电涡流传感器的TBM滚刀刀刃磨损量在线监测系统。利用电涡流传感器将磨损前后滚刀刀圈与传感器之间的距离信号转化为电压信号,对信号进行处理,然后通过无线传输将信号传出,达到实时监测的目的。兰浩等^[9]设计了一种基于电涡流传感器的TBM滚刀转速在线实时监测系统。滚刀转动时,电涡流传感器会检测到安装在刀体上的6个2 mm高的圆形金属凸起,由此实时获得滚刀的转速,该方法在试验台上进行了标定。任德志、孙晓平^[10]采用电涡流传感器,设计了低功耗短距离无线数据采集及传输系统,形成了盾构滚刀磨损实时检测系统。各个传感器实时监测滚刀磨损量、转速及刀盘转速的变化量,终端节点的微处理器将采集的数据加以处理,并以一定的数据格式经射频模块转发至中继路由。中继路由再将数据传送给上位机。该系统在南宁地铁1号线进行了试用。孙志洪等^[3]在上述研究的基础上,建立了一套复合盾构滚刀磨损的无线实时监测系统,也在某工程现场进行试验。但是上述两个系统传感器测量量程小、介质中无线传输通信质量不稳定及安装结构易损坏,影响了实际应用效果。

张斌等^[11]设计了一种基于平行激光光路通断的TBM滚刀磨损量在线监测装置。激光传感式滚刀磨损监测装置的检测原理是随着滚刀的磨损,激光线路的导通数目也将随之发生相应的改变,进而以此来判断滚刀的磨损量。刘泉声等^[12]发明了一种TBM滚刀磨损在线实时监测装置及监测方法,其工作原理是随着滚刀的磨损,其与永磁体之间的距离变大,引起磁敏Z元件阻值的变化,从而改变定值电阻两端的电压,单片机处理器测得定值电阻两端的电压值,并通过无线发射模块发送给计算机,计算机通过事先标定时录入的公式便可计算出滚刀的磨损量。该监测装置标明精度为1.0 mm,量程可达100 mm,但还没有具体应用。

罗宾斯公司^[13]研制了一套刀具监测系统(Smart Cutter),是通过安装在刀轴上的电子传感器实时监

测滚刀的振动、转速和温度,安装在刀盘内的数据接收器处理刀具传感器发出的信号,然后通过有线或无线的方式将数据传输到上位机。根据滚刀转速的实时数据,可计算刀具的刀圈直径,制定合理的刀具检查计划,但用于监测的滚刀刀轴是特制的。海瑞克公司^[14]也设计了一套滚刀转动监控系统,可实时监测TBM滚刀的转动和温度,因商业保密具体原理不详。滚刀转动的监控结果可用于优化刀盘的维护时间间隔,提高隧道掘进作业效率。

对于掘进机中刮刀磨损的监测,候振德等^[4-6]设计了三种刮刀磨损在线监测装置:一种是电阻排式的盾构机刀具磨损量在线监测系统;一种是基于丝栅式的盾构机刀具磨损量在线监测系统;还有一种是电阻柱芯式盾构刀具磨损传感器及磨损量监测装置。何峰等^[15]提出了一种盾构机刀具磨损检测装置,其主要由超声波测厚装置、蓝牙信号发射装置和蓝牙信号接收装置组成,保证工作时长3个月以上。Gharahbagh等^[16]提出了一种通过在管片拼装或者维修的间隙,做液压圆锥贯入测试来测量不同掘进位置处的边刀超挖深度,通过一定的关系将超挖深度转化为边刀磨损量。

综上所述,目前的系统为滚刀、刮刀磨损或滚刀转动监测等单参数或双参数的刀具监测系统,国内在工地测试过的系统主要是滚刀磨损量与滚刀转速的监测系统,使用的监测手段是电涡流传感器监测,其它方法基本还没有付诸应用。电涡流传感器量程小,一般在30 mm左右,传感器体积大,安装不便且电涡流传感器所需功耗较大,连续应用的时间短。国外罗宾斯公司和海瑞克公司设计的滚刀实时监测系统仅监测滚刀的转动与温度,而滚刀磨损量靠推算,且刀轴需要特殊设计,不便于大规模监测应用。本文在分析前人成果的基础上,课题组研制了盾构隧道施工刀盘状态监测系统,实时监测盾构施工中滚刀的转速、磨损量、刀盘温度等参数。系统结合盾构施工开挖地层条件,辅以盾构操作参数,实时预测滚刀寿命,并综合判定盾构刀盘工作状态,为盾构施工提供指导,避免相关施工事故。

2 系统设计方案

为了实现对盾构刀盘状态的监测,除地层参数和盾构施工参数需要输入系统软件外,整个系统由传感器子系统、控制与数据传输子系统、算法及显示子系统三部分组成,如图1所示。控制与数据传输子系统基于相同的控制单元,数据传输方式根据刀盘的结构以及实际工作环境,可以选择有线传输

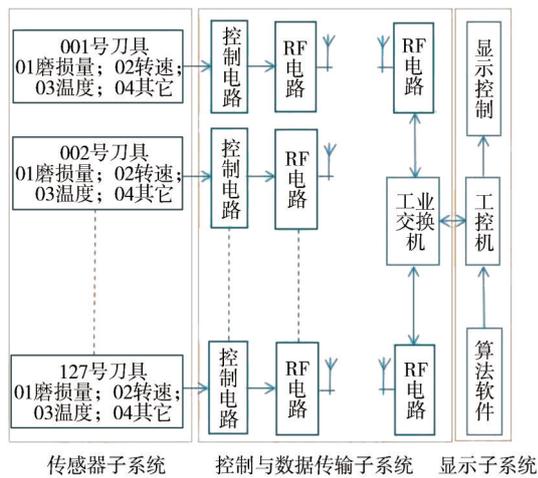


图1 盾构刀盘状态监测系统设计图

Fig.1 Design of a monitoring system for shield cutterhead conditions

或无线传输两种方式。无线传输方式具有安装灵活、监测节点多等特点。有线传输方式相较于无线传输方式,具有实时性更高、数据传输速率更快等优点,并且由于直接使用盾构机电源进行供电,传感器使用寿命也比较长久,但限于刀盘结构,可监测节点数相对较少。

传感器子系统由滚刀磨损量监测、滚刀转速监测、温度监测及其它量监测等四部分组成一个完整的传感器监测子系统。各监测部分可单独工作,也可按现场要求灵活组合监测。主要研究任务为传感器的研制、标定、封装以及有限空间内不同传感器的布置与安装。

控制与无线数据传输子系统由控制部分、射频部分、主副冗余传输部分三部分组成。包括不同类型传感器的控制软硬件、监测系统的状态控制软硬件、盾构舱内的高效无线数据传输软硬件。控制部分负责传感器状态控制、系统数据逻辑、简单算法等功能,分为传感器控制与上位机控制。射频部分采用最先进的扩频通讯技术,实现无线数据在泥水和渣土中的有效传播。主副冗余传送部分采用独特多路径设计,实现数据冗余传送,提高数据的可靠性,将无线数据转换为有线数据,并通过中心端转换为网络数据后传送给上位机。

控制与有线传输子系统由控制部分、串行通讯总线及集线器、滑环、串口服务器等组成。控制部分与无线传输方式中的控制部分承担相同的功能,但控制逻辑有所不同,以实现更加高效的实时性传输。通信总线经过滑环引出盾体隔板之后,经过中

心端即串口服务器转换为网络信号传输到上位机。

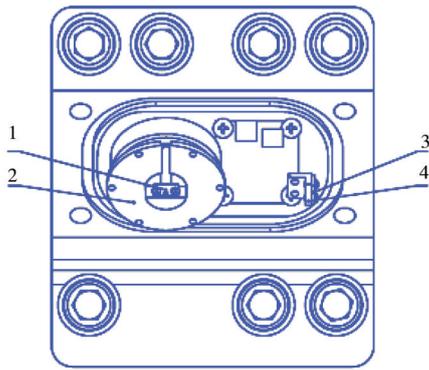
算法及显示子系统是对接收到的数据进行分析判断计算,包括实时监测数据与盾构施工数据的分析算法、显示界面软硬件,得出各测量数据并对其存储、分析、展示等。

3 传感器研制

由于盾构机或掘进机滚刀安装在滚刀刀箱内,如果对其磨损量及转速进行监测,传感器的安装空间有限,还需要考虑传感器安装后对刀盘刚度、施工过程及传感器本身耐久性的影响。目前已有应用电涡流传感器与磁传感器分别进行滚刀磨损量及滚刀转速的监测方法,所用传感器量程小,安装必须靠近滚刀,突起于刀箱,容易毁坏。同时电涡流传感器因为功耗大,使用时间短,两种传感器需要独立安装,不利于系统集成及走线。

课题组根据刀盘结构的不同,研制了多种结构类型的大量程传感器对盾构机及掘进机滚刀磨损量以及滚刀转速进行实时测量,基本可分为嵌入式传感器、倾斜式传感器以及跨接式传感器,以适应不同的安装需求。其中一体化的倾斜式传感器设计如图2所示,其实物如图3所示。安装于刀箱箱体的传感器模块包括磨损量传感器子模块和转速传感器子模块两部分。由于滚刀不具磁性,磨损量传感器配置一块激励磁铁,激励磁铁产生的磁力线穿过传感器芯片,当滚刀磨损引起磁力线分布变化时,通过传感器芯片的磁通密度发生变化,传感器芯片感受到这一变化量,输出模拟差分信号,经过放大电路转换为单端信号送到AD采样芯片,转换为数字信号并传送到上位机,上位机存储有预先标定的数据,通过查表法或拟合法求得滚刀的磨损量数据。转速传感器的激励磁铁,采用在滚刀刀圈上打孔或者焊接磁铁座的方式安装,当滚刀转动时,传感器芯片感受到周期性变化的磁感应强度信号,输出周期性的脉冲信号,经处理器计数之后,求得滚刀的转速并上传给上位机。与电涡流传感器相比,磁传感器具有极低的功耗,其磨损量监测部分最大量程达到80 mm,精度为0.1 mm,转速监测部分最大量程为100 mm,并且能够在满足大量程的情况下做到较小体积,便于安装。

考虑到铁磁性物体对传感器的影响,采用无磁钢作为传感器模块的前面板,在磁路的方向,消除面板对磁场的影响。无磁钢还具有比普通Q235钢更好的耐磨性能,其防护性更好。图4所示为实际应用于盾构施工项目的倾斜式传感器安装示意图。



注:1 磨损量传感器模块;2 磨损量传感器安装座;
3 转速传感器模块;4 转速传感器安装座.

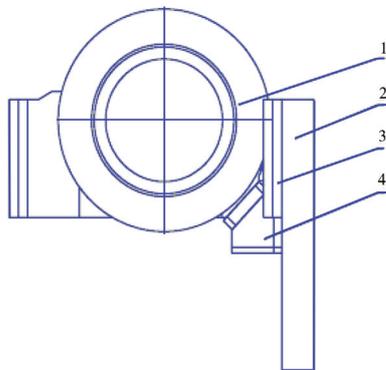
图2 滚刀磨损量与转速传感器的一体化设计图

Fig.2 Integrated design of disc cutter wear and rotation speed sensors



图3 滚刀磨损量与转速传感器实物图

Fig.3 Picture of actual disc cutter wear and rotation speed sensors



注:1 滚刀;2 刀梁;3 联结板;4 倾斜式传感器总装.

图4 传感器安装示意

Fig.4 Installation of sensors

4 系统软件

4.1 系统软件设计框架

为了实现系统中传感器的标定、参数采集与存储、多参数综合分析、结果展示与用户管理等多种功能,对系统软件首先进行了框架设计。上位机软件主要由以下五个模块组成,包括终端数据及盾构机数据接收模块、数据分析模块、数据展示模块、参数设置模块和用户管理模块,各个模块再按其功能分成相对独立的子模块,按用户权限来实现各模块数据的相互调取,如图5所示。盾构隧道施工刀盘状态机监测系统上位机软件由Qt和VC++编程语言开发完成,使用SQLite作为数据库。

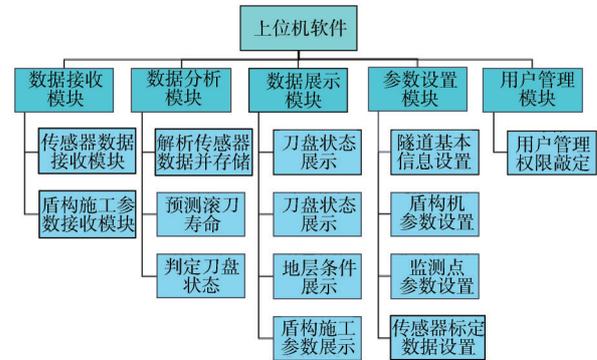


图5 上位机软件结构图

Fig.5 Software structure of upper computer

上位机数据接收模块主要负责接收中心端转发的由传感器模块采集到的数据,包括滚刀的磨损量、滚刀转速、刀盘温度以及传感器本身状态参数,并存储到数据库中。另外,数据接收模块还接收盾构机施工参数并存入数据库。数据分析模块从数据库中读取监测数据,解析出磨损量、转速、温度及电池电量等数据,再存入数据库并为数据展示模块做数据服务支持。数据分析模块分析监测数据、地层数据与盾构施工参数之间的关联,预测滚刀寿命,判定当前盾构的工作状态,对异常工况进行预警。数据展示模块的主要功能是展示刀盘工作状态、滚刀磨损量、滚刀转速、刀盘温度、当前地层条件、单个刀具寿命、盾构机各施工参数等,既可以查阅历史数据,也可以进行一些关联计算,对于超过给定阈值的数据用特定颜色进行预警,给予操作人员告警信息。隧道工程地质剖面图以svg或jpg格式的文件通过软件目录下的icon文件夹实现导入,并在数据展示模块展示。参数设置模块包括隧道基本信息、盾构机参

数、监测点设定参数、传感器标定数据等的设定,用户管理模块用于对不同用户的管理权限的设定,便于项目相关人员对当前盾构刀盘工作状态的掌握,对盾构施工进行有效监督与管理。

3.2 软件界面

上位机软件主界面如图6所示,界面左侧为刀盘实时状态及终端节点安装位置的显示,也可以根据滚刀的安装半径显示成简易的同心圆模式;中间部分用于显示终端节点所采集的盾构滚刀的实时工作状态信息;界面右侧则显示盾构机当前掘进参数状态信息,界面最下面用于显示实际盾构隧道的掘进里程及隧道沿线的工程地质信息。

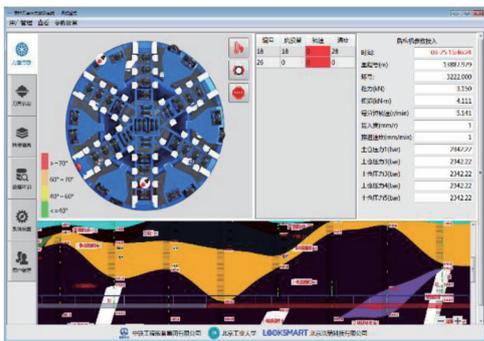


图6 上位机软件管理操作界面

Fig.6 Operation interface of the upper computer software

除主界面外,上位机软件还包含刀具信息界面、地质信息界面、数据查询页面、系统设置界面和用户管理等分界面。其中,刀具信息界面用来显示所有被测量滚刀的信息,如滚刀磨损量、滚刀转速和温度等,如图7所示。从图中可以看到滚刀当前的轮廓曲线、磨损量和转速随里程的变化曲线。地质信息

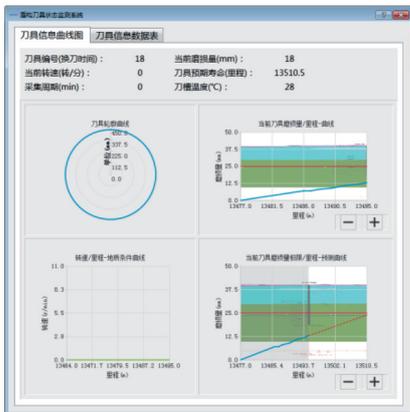


图7 刀具信息界面

Fig.7 Cutting tool information interface

界面用来显示项目的工程地质条件及与之相对应的盾构施工参数。数据查询页面可以查询存储盾构机掘进数据及刀盘状态监测系统实时监测的所有数据。系统设置界面主要是对刀盘参数(刀盘半径等)及刀具参数(滚刀直径、安装半径等)进行设置,输入传感器的标定参数。

5 系统搭建与测试

5.1 刀盘状态监测系统搭建

在系统的软硬件设计完成后,按照系统的设计要求进行搭建,如图8所示。其中终端节点安装在滚刀刀箱内,中心端固定在盾构主控室内,盾构刀盘状态机监测系统软件安装于盾构机主控室内的上位机。终端节点与中心端之间通过无线或有线方式连接,中心端与上位机通过网络连接。

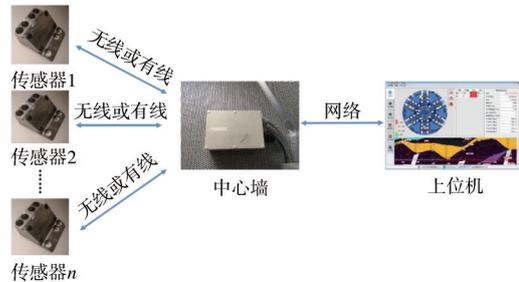


图8 系统搭建

Fig.8 Establishment of the monitoring system

5.2 实验室测试

在实验室标定前,课题组研制了标定装置,如图9所示。标定装置由标定箱、滚刀支撑、电机、导轨、光栅尺、传感器及传感器吊杆组成。标定箱为一个四周封闭的无上盖金属箱体,底部带有脚轮方便移

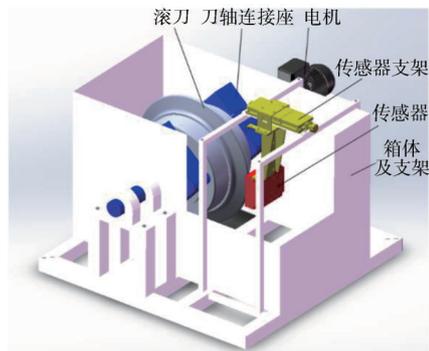


图9 标定装置结构图

Fig.9 Structure of the calibration device

动。内部可以装水、渣土、泥浆等介质,用于测试不同介质对传感器的影响,修正传感器的标定数据。滚刀支撑位于标定箱的两个侧面内部,由不锈钢制成,用于安装支撑滚刀并提供转轴。转轴通过密封装置与外部电机连接,实现滚刀的转动。导轨垂直于滚刀刀轴安装,用来精确调整传感器与滚刀刀刃之间的距离。传感器吊杆安装于导轨下方,用于安装并调整传感器与滚刀刀刃切面平行。导轨上安装光栅尺,其活动端随导轨同步运动,光栅尺的显示表精确显示传感器到滚刀刀刃之间的距离。实验室标定装置实物如图10所示。

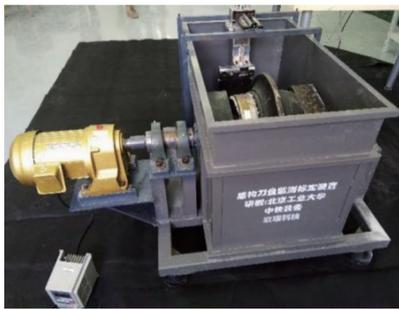


图10 标定装置实物图

Fig.10 Photo of the actual calibration device

标定前用无线传输的方式搭建系统,把传感器装入实验室标定装置,通过传感器支架移动传感器或启动电机转动刀具,在上位机上观察传感器的电压值是否发生变化或测定滚刀的转速是否与实际转速一致来测试系统是否工作正常,待系统工作正常后进行标定试验。通过导轨调整传感器与滚刀刀刃之间的距离,来模拟滚刀的磨损量,此时磨损量传感器会输出不同的电压值,标定装置光栅尺读取磨损量的变化。依据系统设计精度及量程要求,传感器与滚刀刀刃之间距离值的变化范围为6~50 mm。传感器在四种介质中的测试如图11所示,测试时记录每一个距离下对应的电压值,每种介质中测试三次,取平均值。四种介质中的标定曲线如图12所示,图中横坐标代表传感器正对滚刀刀刃的距离(mm),纵坐标为电压值(V)。由图中可以看出,随着传感器与滚刀刀刃之间距离的增大,即模拟滚刀磨损量增加,传感器输出的电压值逐渐减小,且在四种介质中的变化趋势相同,说明传感器在四种介质中工作性能良好。通过精确计算,可以得到传感器在不同介质中相邻的两个值相对于空气中的偏差并存储于上位机,用于在实际环境中通过曲线拟合的方式修正传感器测量数据,以达到更高的测量精确度。实验

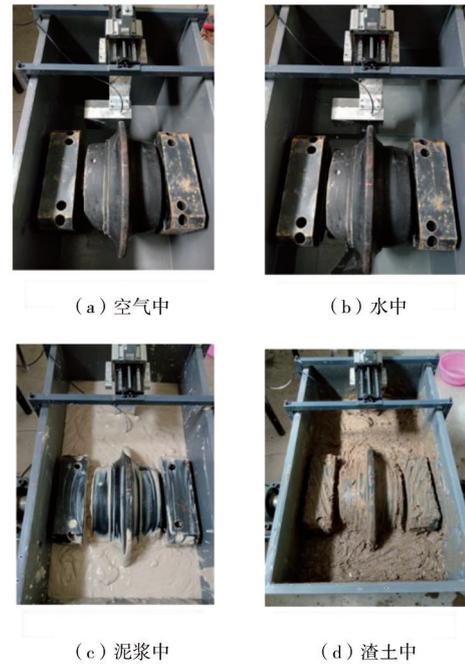


图11 四种介质中测试图

Fig.11 Testing in four mediums

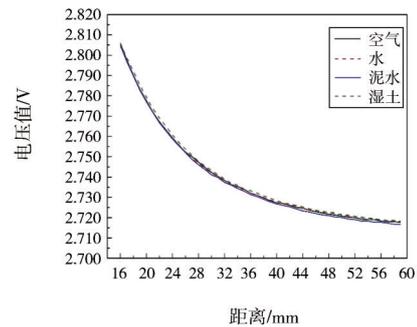


图12 传感器在四种介质中的标定曲线

Fig.12 Calibration curves of sensor in four mediums

室标定过程中,我们研究了放大器在不同放大倍数下的标定,发现无论其初始值是多少,标定的结果依然符合这样的变化趋势,这也可以从放大器工作于线性放大区域来解释。

5.3 工厂测试与标定

因传感器的实验室标定装置内的环境与盾构刀盘实际的安装环境存在较大差异,在盾构刀盘制造完成,刀盘平放时,在传感器实际安装位置对传感器进行了工厂环境传感器标定工作。为了准确测量模拟磨损量的变化,课题组设计制作了能在刀盘上安装的标定装置,如图13所示。标定装置用螺母固定于滚刀刀箱的紧固螺栓上,集成的磨损量传感器、转速传感器与温度传感器固定在标定装置上,如图14

所示,使磨损量传感器正对刀刃并与刀刃垂直。通过转动标定装置上的手柄改变传感器与滚刀刀刃之间的距离来模拟滚刀磨损量的变化,应用标定装置上安装的光栅尺准确测量传感器与滚刀刀刃之间的距离。



图13 安装于刀盘上的标定装置
Fig.13 Calibration device installed on the cutterhead

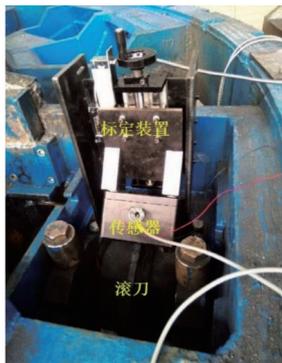


图14 标定装置安装
Fig.14 Installation of the calibration device

标定工作开始前,搭建系统,安装标定装置,检查通信是否正常。等一切准备工作完成后进行标定试验,通过标定装置的转动手柄控制传感器与滚刀刀刃之间的距离,以1 mm为单位,光栅尺进行测量,距离从6 mm逐渐增大到50 mm,上位机软件的标定模块记录并显示、存储每一个距离所对应的电压值,工厂标定如图15所示。取三次电压的平均值作为最终标定数据,标定曲线如图16~图18所示,与图12进行对比,可知传感器可以准确测读磨损量的大小。每个传感器对应的标定曲线电压值大小及对应的磨损量与其它传感器的数据有所不同,一方面是由于每个传感器自身的灵敏度不同并且放大电路周围电路的参数并非严格一致而造成输出电压不同;



图15 磨损量传感器标定
Fig.15 Calibration of the cutter wear sensor

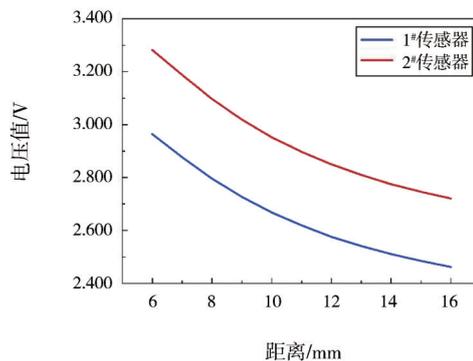


图16 磨损量传感器标定曲线
Fig.16 Calibration curves of cutter wear sensors

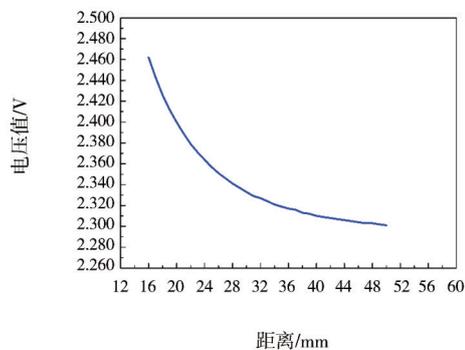


图17 1#磨损量传感器标定曲线
Fig.17 Calibration curve of cutter wear sensor 1

另一方面,磁传感器周围的磁环境不同,磁力线分布也会不同,这同样影响磁传感器及放大电路的输出,但这不会影响标定曲线的一致性。这也说明系统在不同工程应用中在确定好安装位置后需要对不同安装位置的传感器进行逐一标定,获得每个传感器的标定曲线。现场实际配置两个传感器,特意将两个传感器放大电路的放大倍数设置不同,两个传感器输出的电压值也不相同,以示区分。

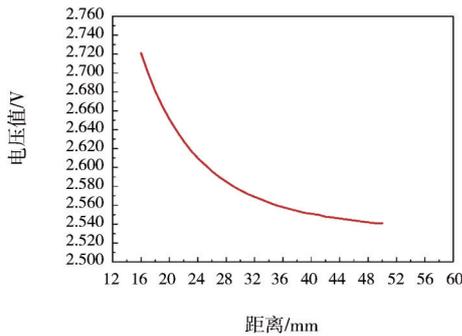


图 18 2#磨损量传感器标定曲线

Fig.18 Calibration curve of cutter wear sensor 2



图 20 通信测试图

Fig.20 Communication testing

在盾构机组装完成,刀盘安装在盾构机上,传感器完全安装完成始发之前,再一次对系统进行了测试。首先对单个传感器进行测试,用万用表测量磨损量传感器的输出信号,用示波器测试转速传感器的电平信号。万用表显示的电压值与之前的传感器安装位置标定值相吻合,示波器在人工转动滚刀时有高低电平信号的变化,说明传感器能正常工作,如图 19 所示。最后对系统进行通信测试,因项目决定系统应用有线数据传输方式,测试用 RS-485 线连接传感器和中心端,用网线连接中心端和电脑,然后打开上位机软件,测试环境如图 20 所示。传感器能准确上传数据,上位机软件显示的磨损量、转速、温度等信息正常。



图 19 传感器测试图

Fig.19 Testing of sensors

6 结论

本文研发了一套盾构隧道施工刀盘状态实时监测系统,该系统采用模块化设计,包括传感器子系统、控制与数据传输子系统和算法与显示子系统。研制的滚刀磨损量与转速磁传感器具有量程大、精度高、体积小、功耗低等优点。考虑不影响刀盘结构强度与不干扰盾构施工换刀的原则,集成设计了包括滚刀磨损量、滚刀转速、刀盘温度、控制电路与电源在内的传感器模块,根据盾构刀盘及刀箱布局,设计了多种安装方式,传感器采集的信息可通过有线或无线的方式传输到上位机并与上位机进行交互通信。

研制了实验室传感器标定装置、刀盘环境下传感器标定装置。在室内采用实验室传感器标定装置,在标定箱为空气、水、渣土及泥浆条件下对传感器进行标定,获得了相似的规律与精度。在工厂利用刀盘环境下传感器标定装置,对不同安装位置的传感器进行了再次标定,显示不同安装位置的标定曲线规律与精度同实验室标定曲线具有一致性,但读数不同,这就需要在工厂对不同位置传感器进行逐一标定,并作为系统输入条件。通过室内及工厂测试,说明系统工作正常,达到了设计要求,可为下一步隧道工程中应用提供参考。

参考文献

References

- [1] 张厚美. 盾构隧道的理论与施工实践[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
ZHANG Houmei. Theoretical Research and Construction Practice of Shield Tunnel[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.
- [2] 李凯磊. TBM 刀具消耗分析研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2015.
LI Kailei. Analysis of TBM Tool Consumption[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2015.

- [3] 孙志洪, 李东利, 张家年. 复合盾构滚刀磨损的无线实时监测系统[J]. 隧道建设, 2016, 36 (4): 485-489.
SUN Zhihong, LI Dongli, ZHANG Jianian. Wireless Real-Time Disc Cutter Wear Monitoring System for Composite Shield Machine [J]. Tunnel Construction, 2016, 36 (4): 485-489.
- [4] 侯振德, 岳澄, 亢一澜, 等. 基于电阻排式的盾构机刀具磨损量在线监测装置: CN102288099A[P]. 2011-12-21.
HOU Zhende, YUE Cheng, KANG Yilan, et al. Shield Machine Cutter Wearing Capacity On-Line Monitoring Device Based on Resistor Network: CN102288099A[P]. 2011-12-21.
- [5] 侯振德, 岳澄, 亢一澜, 等. 基于丝栅式的盾构机刀具磨损量在线监测装置: CN102352754A[P]. 2012-02-15.
HOU Zhende, YUE Cheng, KANG Yilan, et al. Wire Grid-Based Shield Machine Cutter Abrasion Loss On-Line Monitoring Device: CN102352754A[P]. 2012-02-15.
- [6] 侯振德, 岳澄, 亢一澜, 等. 电阻柱芯式盾构刀具磨损传感器及磨损量监测装: CN203772666U[P]. 2014-08-13.
HOU Zhende, YUE Cheng, KANG Yilan, et al. Resistance Column Core Type Shield Cutter Wear Sensor and Wearing Loss Monitoring Device: CN203772666U[P]. 2014-08-13.
- [7] 夏毅敏, 兰浩, 朱宗铭, 等. 一种TBM滚刀磨损实时监测装置: CN103148771A[P]. 2013-06-12.
XIA Yimin, LAN Hao, ZHU Zongming, et al. Real-Time Tunnel Boring Machine (TBM) Hob Abrasion Monitoring Device: CN103148771A[P]. 2013-06-12.
- [8] 郑伟, 赵海鸣, 兰浩, 等. TBM滚刀刀圈磨损量在线监测系统[J]. 仪表技术与传感器, 2015 (2): 46-50.
ZHENG Wei, ZHAO Haiming, LAN Hao, et al. Design of On-Line Monitoring System for Tunnel Boring Machine's Disc Cutter Wear[J]. Instrument Technique and Sensor, 2015 (2): 46-50.
- [9] HAO Lan, XIA Yimin, ZHU Zongming, et al. Development of On-Line Rotational Speed Monitor System of TBM Disc Cutter[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2016 (57): 66-75.
- [10] 任德志, 孙晓平. 基于CC1101的盾构滚刀磨损监测系统的设计[J]. 矿山机械, 2015, 43 (4): 120-124.
REN Dezhi, SUN Xiaoping. Design on Wear Detection System for TBM Cutter Based on CC1101[J]. Mining & Processing Equipment, 2015, 43 (4): 120-124.
- [11] 张斌, 刘建琴, 郭伟, 等. TBM滚刀磨损检测装置: CN103234903A[P]. 2013-08-07.
ZHANG Bin, LIU Jianqin, GUO Wei, et al. TBM Hob Abrasion Detection Device: CN103234903A[P]. 2013-08-07.
- [12] 刘泉声, 张建明, 张晓平, 等. 一种TBM滚刀磨损在线实时监测装置及监测方法: CN105352420A[P]. 2016-02-24.
LIU Quansheng, ZHANG Jianming, ZHANG Xiaoping, et al. TBM Hobbing Cutter Wear Online Real-Time Monitoring Device and Monitoring Method: CN105352420A[P]. 2016-02-24.
- [13] 罗宾斯. 刀具监测系统[EB/OL]. [2020-04-12]. <http://www.therobbinscompany.com/zh-hans/about/advancements/cutter-monitoring/>.
Robbins. Cutter Monitoring[EB/OL]. [2020-04-12]. <http://www.therobbinscompany.com/zh-hans/about/advancements/cutter-monitoring/>.
- [14] <http://cn.herrenknecht.com/cn/innovation/research-development/machines-components/dcrm.html>.
- [15] 何峰, 吕传田, 任勇, 等. 盾构机刀具磨损监测装置: CN201540105U[P]. 2010-08-04.
HE Feng, LYU Chuantian, REN Yong, et al. Tool-Wear Monitoring Device for Shield Machine: CN201540105U[P]. 2010-08-04.
- [16] GHARAHBAGH E A, MOONEY M A, FRANK G. Periodic Inspection of Gauge Cutter Wear on EPB Tbm's Using Cone Penetration Testing[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2013, 38: 279-286.

Development of a Real-time Monitoring System of Cutterhead Conditions in Shield Tunnelling

GONG Qiuming¹ WANG Qinghuan¹ WANG Dujuan² QIU Haifeng³ WU Fan¹

(1 Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering of Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124; 2 China Railway Engineering Equipment Group Co., Ltd., Zhengzhou, 450016; 3 Beijing JiuRui Technologies Co., Ltd., Beijing 100107)

Abstract During the shield tunnelling, the cutterhead is in a black box state because the chamber behind the cutterhead is pressurized. In order to monitor the working state of the disk cutters and cutterhead in real time, a real-

time monitoring system of cutterhead conditions in shield tunnelling is developed. The system consists of three subsystems, namely the sensor subsystem, control and data transmission subsystem, algorithm and display subsystem. The sensor subsystem integrates the self-made disk cutter wear sensor, disk cutter rotation speed sensor, temperature sensor, data acquisition module and power supply unit. The integrated sensors are mounted in the disk cutter housings on the cutterhead to monitor the disc cutter wear and rotation speed and cutterhead temperature in real time. The collected data is transmitted to the central end through wire or wireless modes, and then transmitted to the upper computer by wire. The software of the upper computer integrates the shield design parameters, stratum parameters, shield driving parameters and sensor monitoring parameters, by which it can display the parameters monitored by these sensors in real time, comprehensively determine the working condition of the cutterhead and predict the service life of the disc cutters. Through laboratory testing and factory testing, this system is proven to meet the design requirements and can be used for monitoring the working state of shield cutterhead.

Keywords Shield machine; Cutterhead condition; Disc cutter wear; Disc cutter rotation speed; Real-time monitoring system



(上接第21页)

On Development Law of Karst Water and Prediction of Water Inflow in a Tunnel in Southwest China

ZHANG Junfeng¹ LI Qiang² SHI Yongyue² WU Lei²

(1 Shandong Zhengyuan Geophysical Information Technology Co., Ltd., Jinan 250101; 2 China Railway Southwest Research Institute Co., Ltd., Chengdu 611731)

Abstract Karst groundwater is a key hydrogeological problem in tunnelling. Based on the surface and borehole survey on both sides of a tunnel on Chongqing-Kunming high-speed railway, the measurement and sampling at key geological and hydrological points are carried out, and the water flows of main springs, karst caves and rivers in the studied area are rechecked. In combination with the results of water quality analysis and isotope analysis, the distribution of soluble rocks and karst development law in the tunnel area are identified, the characteristics of occurrence, supply, runoff and discharge of karst water are analyzed, and the hydraulic connections among aquifers as well as between aquifer and the surface water are clarified. The potential concentrated water burst sections, water inflow volumes and corresponding risk levels are classified according to the lithology and structure. The tunnel area is divided into one first-level karst water system and four second-level subsystems, and the water burst risk is classified into four grades. The pure soluble horizontal runoff zone of the tunnel is a high-risk section of karst water inrush. The study results are of great significance in guiding the design, construction and operation of tunnel projects.

Keywords Chongqing-Kunming high speed railway; Karst tunnel; Water inflow prediction; Risk level