

文章编号:1671-251X(2020)08-0106-06

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2020040005

煤矿机电设备预测性维护用采集计算平台设计

周李兵^{1,2}

- (1. 中煤科工集团常州研究院有限公司, 江苏 常州 213015;
2. 天地(常州)自动化股份有限公司, 江苏 常州 213015)



扫码移动阅读

摘要:常用的煤矿机电设备运维模式为井下采集数据、地面工控机或云平台进行数据分析,存在实时性和灵活性差、采集数据量受限、成本高等问题,而边缘计算机+数据采集卡的通用工业预测性维护解决方案因不易实现矿用本质安全型设计、现场布置灵活性差、成本过高等,不适用于煤矿机电设备运维场景。针对上述问题,设计了一种基于STM32F4主控芯片的煤矿机电设备预测性维护用采集计算平台。该平台可并行高速采集煤矿机电设备振动、温度、压力等数据并实时进行快速傅里叶变换、包络谱分析等处理,进而得出机电设备健康状态,通过人机交互模块本地显示监测与诊断结果,并可通过以太网将监测数据及诊断结果传输至地面工控机或云平台进行大规模数据分析。测试结果表明,该平台对振动信号的测量误差小于4%,且可准确判断机电设备不同部件的运行状况和故障,满足现场实时计算、就地分析、灵活布置的需求。

关键词:智能矿山;煤矿机电设备;预测性维护;边缘计算;振动信号分析;故障诊断
中图分类号:TD67 文献标志码:A

Design of collecting and computing platform used for predictive maintenance of coal mine electromechanical equipment

ZHOU Libing^{1,2}

- (1. CCTEG Changzhou Automation Research Institute, Changzhou 213015, China;
2. Tiandi(Changzhou) Automation Co., Ltd., Changzhou 213015, China)

Abstract: Existing operation maintenance mode of coal mine electromechanical equipment is collecting data in underground and analyzing data by ground controller or cloud platform, which has poor real-time performance and flexibility, limited data collection amount, high cost, etc. While predictive maintenance solution scheme in general industry of edge computer plus data collection card is not applicable for operation maintenance of coal mine electromechanical equipment because of difficulty of mine-used intrinsically safe design, poor flexibility of field arrangement, too high cost, etc. For the above problems, a collecting and computing platform used for predictive maintenance of coal mine electromechanical equipment was designed, which was based on main controlling chip of STM32F4. The platform can parallel collect vibration, temperature, pressure and other data of coal mine electromechanical equipment with high speed and take out fast Fourier transform and envelope spectrum analysis real-timely, so as to obtain health status of the electromechanical equipment. The monitored data and diagnosis results can be displayed through man-machine interaction module on the spot, and be transferred to underground controller or cloud platform through Ethernet for large-scale data analysis. The test results show that the platform has measuring errors of less than 4% for vibration signals, and can correctly judge running status

收稿日期:2020-04-01;**修回日期:**2020-06-24;**责任编辑:**李明。
基金项目:天地科技股份有限公司科技创新创业资金专项项目(2019-TD-ZD007)。
作者简介:周李兵(1984—),男,湖北黄梅人,高级工程师,硕士,现主要从事矿山自动化与信息化方面的研究工作,E-mail:15295023477@126.com。
引用格式:周李兵.煤矿机电设备预测性维护用采集计算平台设计[J].工矿自动化,2020,46(7):106-111.
ZHOU Libing. Design of collecting and computing platform used for predictive maintenance of coal mine electromechanical equipment [J]. Industry and Mine Automation, 2020, 46(7): 106-111.

and faults of different components in the electromechanical equipment, which meets requirements of real-time calculation, analysis on the spot and flexible arrangement in coal mine field.

Key words: smart mine; coal mine electromechanical equipment; predictive maintenance; edge computing; vibration signal analysis; fault diagnosis

0 引言

在以工业 4.0 为代表的下一代工业数字化与智能化升级浪潮引领下,机电设备维护管理由传统的定期维护保养+故障维修方式向基于数字化实时监控与分析技术的预测性维护方向发展,以降低机电设备故障停机时间,减少因机电设备故障或非计划性停机对工厂集约化、柔性化生产造成的损失^[1-2]。在智能矿山建设过程中,目前常用的在井下采集机电设备运行状态数据、通过井下网络将数据传输至地面工控机或云平台进行数据分析的运维模式因实时性和灵活性差、采集数据量受限、成本高等问题,已无法满足智能矿山机电设备预测性维护要求,需要进行技术方法与手段的升级与更新换代。

通用工业面向智能制造的预测性维护解决方案一般采用边缘计算机+数据采集卡方式,并基于 LabVIEW 等软件进行二次开发实现数据处理与控制输出。该方案具有较强的数据采集及处理能力,但对于煤矿井下机电设备运维应用场景,存在因功耗过大而不易实现矿用本质安全(以下简称本安)型设计、体积过大而影响现场布置的灵活性、井下机电设备分布离散而导致方案成本过高等问题。针对该问题,笔者采用基于 ARM Cortex-M4 内核的 STM32F4 主控芯片,结合 8 通道 16 bit 并行高精度 AD 采样芯片 AD7606,设计了一种低功耗、本安型煤矿机电设备预测性维护用采集计算平台,实现了 4~20 mA、0~5 V、RS485 总线、CAN 总线等常见传感器信号的采集与分析,并具有 CAN 总线通信、以太网通信、蓝牙通信、人机交互等功能,满足煤矿机电设备预测性维护实时计算、就地分析、灵活布置等需求。

1 采集计算平台总体方案

煤矿机电设备预测性维护用采集计算平台包括 STM32F4 主控芯片单元、4~20 mA 模拟量采集单元、0~5 V 模拟量采集单元、RS485 总线型信号采集单元、CAN 总线通信单元、USB 转串口驱动单元、以太网通信单元、供电模块、人机交互模块等,如图 1 所示。该平台以振动监测为主^[3],辅以温度、液位、压力、介电常数、电流、电压、声信号参数监测,实现面向预测性维护需要的多源数据耦合分析。

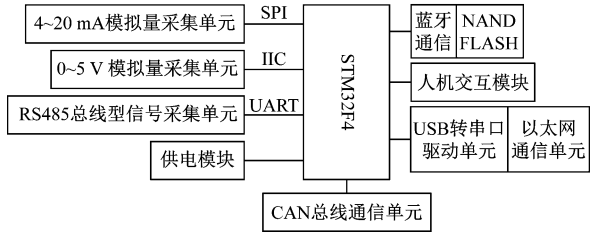


图 1 煤矿机电设备预测性维护用采集计算平台总体方案
Fig. 1 General scheme of collecting and computing platform used for predictive maintenance of coal mine electromechanical equipment

采集计算平台设计有 3 路 IIC 总线接口,1 路接入 0~5 V 模拟量采集单元,1 路接入 PT100/PT1000 型温度传感器,1 路备用;设计有 2 路 CAN 总线接口,用于接入现场 CAN 总线型传感器;设计有 2 路 RS485 总线接口,一主一从,用于接入现场 RS485 制式传感器或以 RS485 方式对外通信;设计有全速 USB2.0 接口、以太网接口、蓝牙接口、NAND FLASH 存储扩展模块等。平台中人机交互模块具有用于传感器参数、IP 地址、系统参数等配置及硬件重启等应用的物理按钮,支持红外遥控及 USB 键盘/鼠标方式输入,并有液晶显示屏显示各参数监测值及诊断结果。考虑到采集计算平台自身存在一定功耗、外接传感器数量较多、煤矿井下对电气设备的安全性要求高等因素,在供电模块设计了软启动电路,并通过软件实现分批次、延时启动,以满足本安型设计要求。

在现场应用时,采集计算平台采集电动机、轴承、齿轮箱、管路、油液等机电设备转动部件的振动、温度、压力等数据并进行数字化,之后实时对数据进行快速傅里叶变换、包络谱分析等处理,根据处理结果分析各机电设备及部件的健康状态,并本地输出监测与诊断结果。同时,平台将数据存储至 NAND FLASH 中,用于煤矿机电设备预测性维护算法自学习和优化,并通过以太网传输至地面工控机或云平台,用于大规模数据分析。

2 采集计算平台硬件设计

2.1 STM32F4 主控芯片单元

STM32F4 主控芯片单元是采集计算平台的计算力中心,可实现传感器数据采集、时频域转换、频谱分析、包络谱分析及设备预测性维护计算、通信等计算与逻辑控制功能。

12 V,1 A。考虑到煤矿井下长距离低压直流供电方式较为常见,且单个采集计算平台至多可接入 67 台传感器,因此,除采用低功耗、宽电压方案外,供电模块还设计了软启动电路和分时启动工作方式,以降低采集计算平台开机启动阶段的冲击电流,避免产生浪涌电流^[6]。

供电模块电路如图 7 所示。采用 F240050-25 型 5 脚 DIP 封装本安电路专用软启动电源芯片,可实现 DC9~24.5 V 宽电压输入、DC5 V 恒压输出。考虑到 STM32F4 及其他芯片需要 DC3.3 V 电压,选用 AMS1117 芯片设计了 DC3.3 V 输出电路。

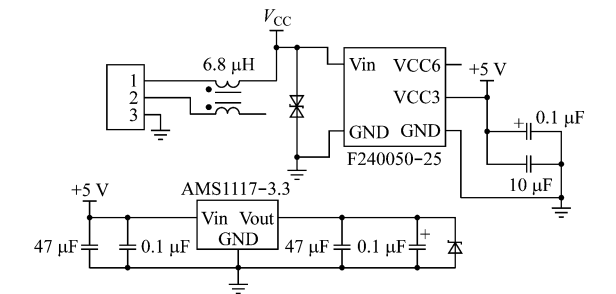


图 7 供电模块电路

Fig. 7 Circuit of power supply module

点亮液晶显示器并工作于最大计算能力情况下,采集计算平台稳定工作时功耗约为 6.6 W (12 V,0.55 A)。考虑到极限情况下电源负荷,设计了 3 路电源输入:1 路负责向采集计算平台、8 台 4~20 mA 振动传感器和至多 4 台其他传感器供电;另 2 路负责给至多 55 台传感器供电。此外,考虑到传感器满载工况下,即使有软启动电路协助,采集计算平台正常启动冲击电流也会超过 1 A,因此在软件设计中采用分时启动机制:上电启动时,首先启动 STM32F4 主控芯片及人机交互模块,使能关闭模拟量采集单元及所有传感器供电电源部分,延迟一定时间(如 1 s)后再使能开启模拟量采集单元及所有传感器供电电源。通过该分时启动机制,可有效避免产生冲击电流,确保采集计算平台稳定、可靠工作。

3 采集计算平台软件设计

采集计算平台软件主要包括主程序、信号采集程序、通信程序等。本文主要介绍主程序、4~20 mA 模拟量采集程序、以太网通信程序的设计。

3.1 主程序

考虑到采集计算平台对监测与控制的实时性要求,采用 FreeRTOS 实时操作系统,以便高效利用 STM32F4 片上资源。主程序流程如图 8 所示。首

先进行硬件初始化,包括 IO 端口、通信端口、NAND FLASH、人机交互模块、AD 采样芯片初始化;然后进行传感器数据采集和分析处理^[7-9],得出诊断结果后在人机交互模块显示;最后通过以太网将采集数据及诊断结果传输至地面工控机或云平台等上位机。

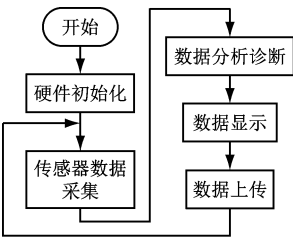


图 8 主程序流程

Fig. 8 Process of main program

3.2 4~20 mA 模拟量采集程序

采集计算平台采用 AD7606 并行采集 8 路 4~20 mA 模拟信号,最大采样频率达 200 kHz 且可配置。STM32F4 通过 SPI 读取 AD7606 采样数据,并对采样数据做限幅处理,以消除信号顶底尖峰干扰^[10-11],之后对处理后的数据进行时频域分析。4~20 mA 模拟量采集程序流程如图 9 所示。

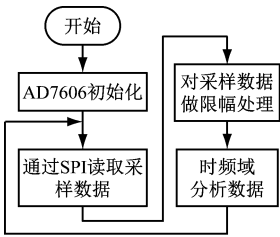


图 9 4~20 mA 模拟量采集程序流程

Fig. 9 Process of 4-20 mA analog quantity collection program

3.3 以太网通信程序

以太网通信程序流程如图 10 所示。上电后首先进行初始化,随后检测地面工控机或云平台等上位机配置指令,并根据指令发送诊断数据或原始数据等^[12-13]。上位机接收到相关数据后回传应答数据和配置、控制指令等。

4 采集计算平台测试

采集计算平台设计、试制、调试完毕后,进行功能性测试,主要包括传感器数据采集功能测试和数据分析与预测性维护评估能力测试。

4.1 传感器数据采集功能测试

在传感器数据采集功能测试中,对于 CAN, RS485, IIC 等总线型及 0~5 V 模拟量信号的采集,

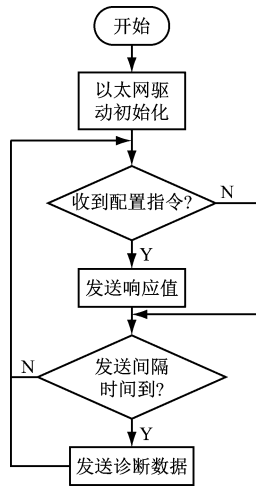


图 10 以太网通信程序流程

Fig. 10 Process of Ethernet communication program

采用函数信号发生器、仿真器、测试工装等进行功能性测试。重点测试 4~20 mA 模拟量信号采集功能。采用 DC12000-120 水冷型电动振动试验台产生标准振动信号^[14]，设置振动频率为 20,240,460,900,1 500 Hz。采用 KGS18 振动加速度传感器、GSD20 振动速度传感器测量振动信号，采集计算平台采集传感器峰峰值，每种频率下采集 3 组数据，分别与振动试验台数据进行对比，结果见表 1(振动加速度为 5.1g,g 为重力加速度)。可看出采集计算平台测量误差小于 4%。

表 1 振动信号测量结果

Table 1 Measurement results of vibration signals

频率/ Hz	振动信号 测量值/mm	振动信号 实际值/mm	测量 误差/%
20	9.84	10.02	-1.80
	9.85	10.03	-1.75
	9.85	10.03	-1.75
240	9.94	10.07	-1.30
	10.00	10.10	-1.00
	9.99	10.10	-1.05
460	10.15	10.18	-0.25
	10.17	10.19	-0.15
	10.19	10.20	-0.05
900	11.45	11.09	3.25
	11.38	10.97	3.70
	11.25	10.90	3.25
1 500	12.21	11.77	3.78
	12.25	11.78	3.99
	12.22	11.80	3.57

4.2 数据分析与预测性维护评估能力测试

采用 DDS2010 型动力传动故障诊断综合试验

台模拟不同工况下机电设备轴承、齿轮、电动机正常和非正常工作状态，由 KGS18 振动加速度传感器、GSD20 振动速度传感器、GWP150B 温度传感器、GPD60(A)压力变送器等测量机电设备不同部件各参数并接入采集计算平台，由平台进行快速傅里叶变换、包络谱分析等预测性维护分析计算。以模拟三级平行齿轮箱 ER-16K 型轴承外圈磨损故障为例，采集计算平台输出结果如图 11 所示。转速为 960 r/min、配备 9 个滚珠的 ER-16K 型轴承发生外圈磨损故障时，故障特征频率为 3.723 Hz。采集计算平台计算得到的故障特征频率为 3.765 Hz，与实际值之间的误差为 1.13%。经多次测试可知，采集计算平台接入各类传感器满负荷运转时，工作可靠，响应及时，能够准确判断典型机电设备部件运行状态及故障，满足现场使用要求。

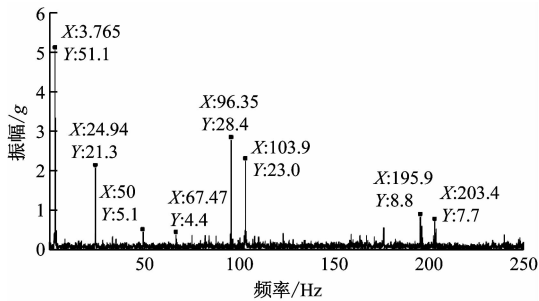


图 11 ER-16K 型轴承外圈磨损故障频谱分析结果

Fig. 11 Frequency spectrum analysis result of outer lane abrading fault of ER-16K type bearing

5 结语

煤矿机电设备预测性维护用采集计算平台充分利用了主控芯片 STM32F4 的片上资源，特别是浮点计算能力和丰富的 I/O 接口，结合 FreeRTOS 实时操作系统，在满足现场灵活布置、就地计算及分析决策要求的同时，降低了成本，是现有煤矿机电设备工作状态监测或故障诊断云平台化部署、远程分析方式的有益补充。随着智能制造特别是智能矿山建设工作的推进，边缘计算、就地控制的模式将成为智能矿山运维体系的重要方式，且适用于风电机组、水电机组、智慧工厂等智能制造相关特种工业数据采集与分析计算场景。

参考文献 (References):

[1] 欧阳劲松,刘丹,杜晓辉. 制造的数字化网络化智能化的思考与建议[J]. 中国仪器仪表,2018(4):28-36.
OUYANG Jinsong,LIU Dan, DU Xiaohui. Thinking and suggestion on digitalization networking and

- intelligentization of manufacturing [J]. China Instrumentation, 2018(4):28-36.
- [2] 常宏,朱艳梅,徐小成,等. 物联网技术在设备预测性维护中的应用[J]. 物流工程与管理, 2018, 40(9): 79-80.
- CHANG Hong, ZHU Yanmei, XU Xiaocheng, et al. Application of Internet of things technology in predictive maintenance of equipment [J]. Logistics Engineering and Management, 2018, 40(9): 79-80.
- [3] 吴新光. 故障诊断技术对矿山机械维修的相关分析[J]. 矿业工程, 2017, 15(4): 47-48.
- WU Xinguang. Analysis of fault diagnosis technique for maintenance of mine machinery [J]. Mining Engineering, 2017, 15(4): 47-48.
- [4] 马青. 高速数据采集信号调理电路的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2009.
- MA Qing. Research on signal conditioning circuits of high-speed data acquisition system [D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2009.
- [5] 曲皎,王红亮,童一飞. 高精度桥式传感器信号调理电路设计与实现[J]. 仪表技术与传感器, 2019(4): 20-23.
- QU Jiao, WANG Hongliang, TONG Yifei. Design and implementation of signal conditioning circuit for high precision bridge sensor[J]. Instrument Technique and Sensor, 2019(4): 20-23.
- [6] 林引. 一种矿用开关电源设计[J]. 工矿自动化, 2018, 44(2): 95-99.
- LIN Yin. Design of a mine-used switching power supply[J]. Industry and Mine Automation, 2018, 44(2): 95-99.
- [7] 徐青青,赵海芳,李守军. 一种煤矿机械轴承故障诊断方法[J]. 工矿自动化, 2019, 45(10): 80-86.
- XU Qingqing, ZHAO Haifang, LI Shoujun. A fault diagnosis method for coal mine machinery bearing[J]. Industry and Mine Automation, 2019, 45(10): 80-86.
- [8] 郑煜,王凯. 基于分层优化自适应随机共振的滚动轴承早期故障诊断[J]. 机械设计与制造工程, 2019, 48(5): 109-112.
- ZHENG Yu, WANG Kai. The early malfunction diagnosis of rolling bearing based on multilevel optimized self-adaptive stochastic resonance [J]. Machine Design and Manufacturing Engineering, 2019, 48(5): 109-112.
- [9] 孙鲜明,刘欢,赵新光,等. 基于瞬时包络尺度谱熵的滚动轴承早期故障奇异点识别及特征提取[J]. 机械工程学报, 2017, 53(3): 73-80.
- SUN Xianming, LIU Huan, ZHAO Xinguang, et al. Singular point recognition and feature extraction for incipient bearing fault based on instantaneous envelope scalogram entropy[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(3): 73-80.
- [10] 郝高岩,刘永强,廖英英. 一种基于改进阶次包络谱的滚动轴承故障诊断算法[J]. 振动与冲击, 2016, 35(15): 144-148.
- HAO Gaoyan, LIU Yongqiang, LIAO Yingying. A rolling bearing fault diagnosis algorithm based on improved order envelope spectrum [J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(15): 144-148.
- [11] 陈宁新. 双包络蜗轮蜗杆的现代设计与检测方法[J]. 北京工业大学学报, 2015, 41(11): 1601-1610.
- CHEN Ningxin. Computerized design and measurement of double-enveloping worm-gears [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2015, 41(11): 1601-1610.
- [12] 罗仁泽,曹鹏,代云中,等. 旋转机械故障诊断理论与实现[J]. 仪表技术与传感器, 2014(3): 107-110.
- LUO Renze, CAO Peng, DAI Yunzhong, et al. Rotating machinery fault diagnosis theory and implementation [J]. Instrument Technique and Sensor, 2014(3): 107-110.
- [13] 冯伟,陈闽杰,贺石中. 油液在线监测传感器技术[J]. 润滑与密封, 2012, 37(1): 99-104.
- FENG Wei, CHEN Minjie, HE Shizhong. Oil on-line monitoring sensor technology [J]. Lubrication Engineering, 2012, 37(1): 99-104.
- [14] 李志农,朱明,褚福磊,等. 基于经验小波变换的机械故障诊断方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(11): 2423-2432.
- LI Zhinong, ZHU Ming, CHU Fulei, et al. Mechanical fault diagnosis method based on empirical wavelet transform [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(11): 2423-2432.