

电机设备远程运维云平台的边缘装置研发^{*}

陆树汉¹, 周 健¹, 丁小健¹, 杨云帆¹, 李小兵², 王建辉³, 王春辉¹, 黄创绵¹, 王远航¹

[1. 工业和信息化部电子第五研究所, 广东 广州 510610;

2. 广东省电子信息产品可靠性技术重点实验室, 广东 广州 510610;

3. 上海电器科学研究所(集团)有限公司, 上海 200063]

摘 要: 介绍了一种基于 ARM 处理器的电机状态评估和诊断边缘装置, 围绕电机设备远程运维云架构下边缘装置的特点, 提出了其底层硬件架构、软件设计等。该边缘装置实现了对电机运行参数进行实时采集, 解析关键特征参数, 并与云端运维平台进行实时数据交互, 实现对电机运行状态的监测管理。最后, 将该边缘装置在现场环境与远程电机运维云平台进行应用, 证明了系统的有效性。

关键词: 边缘装置; 远程运维; 电机产品; 在线监测

中图分类号: TM 307 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2020)07-0087-06

doi: 10.12177/emca.2020.056

Research and Development of Edge Device for Remote Operation and Maintenance Cloud Platform of Motor Products^{*}

LU Shuhan¹, ZHOU Jian¹, DING Xiaojian¹, YANG Yunfan¹, LI Xiaobing², WANG Jianhui³,
WANG Chunhui¹, HUANG Chuangmian¹, WANG Yuanhang¹

[1. China Electronic Product Reliability and Environmental Testing Research Institute (CEPREI),
Guangzhou 510610, China;

2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Electronic Information Products Reliability Technology,
Guangzhou 510610, China;

3. Shanghai Electrical Apparatus Research Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200063, China]

Abstract: A motor state assessment and diagnosis edge device based on ARM processor is introduced, and its underlying hardware architecture and software design are put forward by centering on the characteristics of the edge device under the remote operation and maintenance cloud architecture of motor equipment. The edge device realizes the real-time collection of motor operation parameters, the analysis of key characteristic parameters, and real-time data interaction with the operation and maintenance cloud platform to achieve the monitoring and management of motor operation status. Finally, the edge device is applied to the field environment and the remote motor operation and maintenance cloud platform, proving the effectiveness of the system.

Key words: edge device; remote operation and maintenance; motor products; online monitoring

0 引 言

交流异步电机因其结构简单、方便耐用,已经

成为一种覆盖面最广,应用量最大的电机。但是,由于电机往往运行在比较恶劣的环境之中,出现短路、断路与过载等故障时有发生。为了实时监

收稿日期: 2020-03-24; 收到修改稿日期: 2020-05-11

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金项目(51605095); 工信部智能制造标准化项目(MIV1770260)

作者简介: 陆树汉(1996—), 男, 助理工程师, 研究方向为自动化。

王远航(1987—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为 PHM。(通信作者)

测电机运行状态,保证电机能够安全平稳运行,电机监控系统应运而生。根据监控形式,一般可分为本地监控和远程监控 2 种类型。本地监控以本地 PC 端(或 LCD)作为监控上位机,结合数据采集系统实现对电机的状态监控。蔡燕等^[1]基于 LabVIEW 开发了一种电机实时在线监测系统。该系统采用数字信号处理(DSP)进行数据采集,实现了对电机电流、电压、扭矩、转速运行参数的获取,上位机采用图形化界面 LabVIEW 实现了对电机运行状态的实时在线监测。王晨辉等^[2]设计了一种基于 ARM 和 Linux 的嵌入式异步电机监测系统,以实现电机的电压、电流、转速等参数进行实时采集和在线监测。本地监控优点是当出现特殊情况时,专门值班人员能够第一时间到达现场;缺点是需要值班人员在作业现场才能查看电机状态。随着工业互联网时代的到来,利用网络技术对电机进行远程监控,及时的发现电机存在的问题,实现更准确、更高效的电机远程运维正在逐渐成为趋势^[3-4]。以移动监测终端、云服务器和数据采集装置实现对电机运行状态的远程监控^[5]。Shyamala 等^[6]设计了一种基于物联网平台的电机在线监控系统。这种系统能够持续监测电机状态,及时接收警报信息和将数据存储于云平台。同时,运维人员可通过 web(World Wide Web)页面接入互联网进行远程监控。

基于云平台的远程运维系统能够在线监控电机的运行状态,甚至提前预警避免电机故障性停机。即使故障停机后,运维人员也可远程获取电机运行前后的关键数据,方便故障排查。但是,电机异常所涉及的关键征兆参数较多,已有远程运维系统中的数据采集装置监测内容单一,不够全面,且成本较高难以推广应用。

本文针对电机远程运维系统开发过程中的数据采集系统存在的问题,提出了一种电机设备远程运维云平台的边缘装置。该装置采用 ARM 嵌入式系统实现三相交流异步电机关键征兆参数的监测,远程传输至云平台进行展示和存储。对电机设备远程运维平台进行构造,和电机常见故障机理进行分析。给出了边缘数据采集装置硬件设计与软件设计等内容,并结合系统应用实例,验证了该平台。

1 电机设备远程运维云平台架构

为了实现对电机的运行状态进行实时监测,结合电机远程运维需求,构建出电机设备远程运维云平台架构,如图 1 所示。主要由边缘数据采集装置、电机远程运维服务平台、移动监测终端、电机等核心部件组成。本文将对边缘数据采集装置设计内容进行详细阐述。

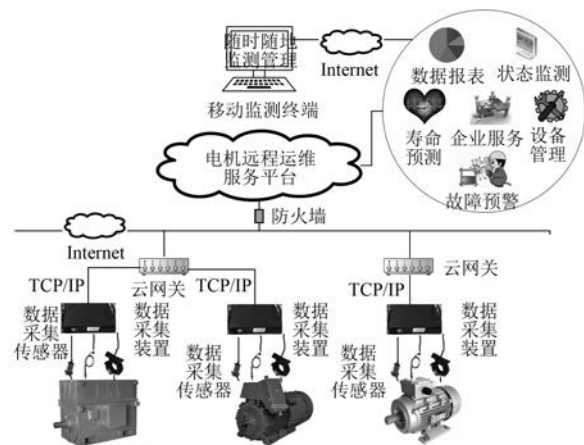


图 1 电机设备远程运维云平台架构图

2 电机设备机理分析

2.1 故障机理

异步电机在长期的运行过程中,受到供电电源、负载状况、运行机制以及环境因素的影响,其部件会逐渐劣化。三相异步电机运行过程中出现的异常,主要包括机械异常和电气异常。

2.1.1 机械异常

机械异常是异步电机主要的故障类型。在长期负荷、恶劣环境情况运行下电机机械组成由于老化、受潮、异物侵入等,会造成机械式故障。该故障会映射到电机振动异常,相关部件发热严重。电机长期运行过程中,润滑油逐渐蒸发或泄露会导致电机轴承在运转中出现明显的温度变化特征。此外,轴承内圈与转轴应当实现紧配合,如果配合不当,过紧或过松均会引起轴承过热。过盈量过大,会造成工作游隙过小,而轴承滚珠转动后摩擦发热膨胀,会使游隙进一步变小,如此循环,引起轴承过热,甚至烧毁轴承。配合过松,则会造成轴承内圈磨轴,或轴承外圈磨端盖,同样会引起轴承过热,严重时

造成转子扫膛。监测轴承的异常时一般将温度传感器安置在轴承座壳内靠近轴承处,通过记录固定点的温度变化,来达到推测轴承基层部件及内部油脂温度形势的目的。

轴承损坏,电机本身各部件配合尺寸上的缺陷,电机装配不当,以及负载端的机械设备振动波及等,均会造成电动机振动超标。振动超标会对电动机产生额外负荷,严重时还会对电机或机械设备的结构产生破坏。一般情况下,振动适用的主要频率范围是中频,通常把振动速度和峭度值作为电机振动是否超标的评估量。

2.1.2 电气异常

电机的电气异常主要包括接地短路、绕组短路以及绕组开路故障。电机运行过程中,定子绕组绝缘老化、电机受潮或者潮湿、腐蚀性气体、粉尘进入电机绕组内部,容易造成绕组电气异常。当绕组的导体和铁心、机壳之间相碰时,即为绕组接地短路。绕组接地短路会造成故障相绕组电流过大,绕组局部过热,严重时烧毁绕组。当绕组中相邻 2 条导线之间的绝缘损坏后,两导体接触相通时,即为绕组短路。发生在同一绕组中的绕组短路为匝间短路。发生在两相绕组之间的绕组短路为相间短路。绕组短路会引起故障相电流急剧变大,局部烧毁或全部烧毁电机定子绕组。电机的定子绕组碰断或烧断,则造成绕组开路。电动机缺相运行,出力不足,非开路相的电流变大并严重不平衡,时间稍长就会导致电机烧毁。转子绕组开路,一般表现为转动无力,定子三相电流增大、电流负序分量增加以及电机电磁噪声异常。

2.2 机理参数

三相异步电机常见故障特征变化如表1所示。

表 1 常见故障特征变化

常见故障	特征变化
堵转	功率因数低、电流大等
缺相	三项电流不平衡、温度上升、振动异常等
过载	电流增加、电机发热量增加、转速下降等
欠压	输出功率下降,绕组电流上升、温度上升等
相间短路	电流增大、出现较大负序电流等
接地故障	故障的相电压降低、电流增大等
轴承损坏	振动信号异常等

三相异步电机发生故障时特征变化比较复杂,同一个故障可能出现不同特征变化,同一特征变化可能又是由于不同的故障引起的。因此,需要根据电机特征参数变化情况进行综合性分析后判断电机可能出现的故障。

根据以上对于电机的失效分析与电机常见故障特征变化,可知电机异常涉及电压、电流、振动等方面。传感器布置位置与征兆参数采集如表 2 所示。

表 2 传感器布置位置与征兆参数采集

监测参数	来源	安装位置
电压、电流时域值、功率、三相电压不平衡度、负序分量	三相电压传感器、电流传感器	从接线盒引出
定子绕组温升	PT100	绕组端部
前轴承温度	PT100/热电偶	端盖接触前轴承的挡板中间位置
后轴承温度	PT100/热电偶	端盖接触后轴承的挡板中间位置
环境温/湿度	温湿度传感器	电机附近
振动烈度、峭度值、电磁噪声量	三轴向振动加速度传感器	前轴承径向安装

3 核心边缘装置开发

3.1 硬件设计

边缘数据采集装置硬件设计如图 2 所示。采用基于 ARM Cortex-M4 内核的微处理器 STM32F429 作为数据处理单元。外围电路设计包括:振动信号模块、温度数据模块、综合电力模块、通信网络模块等主要核心模块。

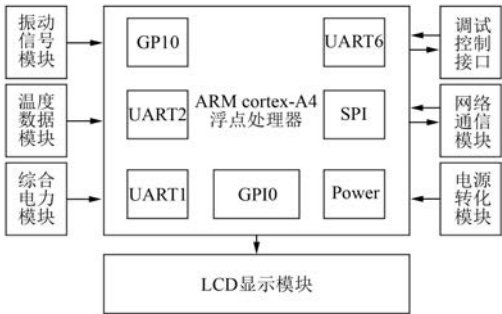


图 2 边缘数据采集装置设计图

3.1.1 数据处理单元

控制核心采用 ARM Cortex-M4 内核的微处理器 STM32F429 作为数据采集处理单元。其主频达到 180 MHz,确保系统能够实时进行数据采集

与传输。拥有单精度 FPU 和 DSP 指令保证数据处理速度和精度。2 个 32 位定时器和 12 个 16 位定时器确保系统采样频率。同时,拥有内置 RTC 时钟、4+4(USART+UART)等丰富硬件资源为系统开发提供更多有利保障。

3.1.2 振动信号模块

振动信号采集模块由振动传感器、振动调理电路、外置高速 A/D 采样电路组成。信号调理电路给振动传感器输入恒定电流后得到随着振动加速度变化的电压信号,再通过外置高速 A/D 采样电路将电压信号传输至数据处理单元中。ARM 处理器对采集的振动信号滤波、数据解析后得出

振动峭度、振动烈度等直观振动数字信号。使用快速傅里叶变换算法进行频谱分析,根据幅值频谱图中的特征频率对电机故障进行诊断。

3.1.3 温度数据模块

温度数据采集模块由温度传感器和温度调理电路组成。采用 PT100 作为系统温度传感器,PT100 连接信号转化模块之后采用 485 通信将采集的温度数据传输到 ARM 中。PT100 温度传感器根据需求贴于电机需要采样位置或根据电机预埋的 PT100 进行温度数据采集,配合其他监测模块预测电机运行状态,剔除电机故障早期风险。温度数据采集电路如图 3 所示。

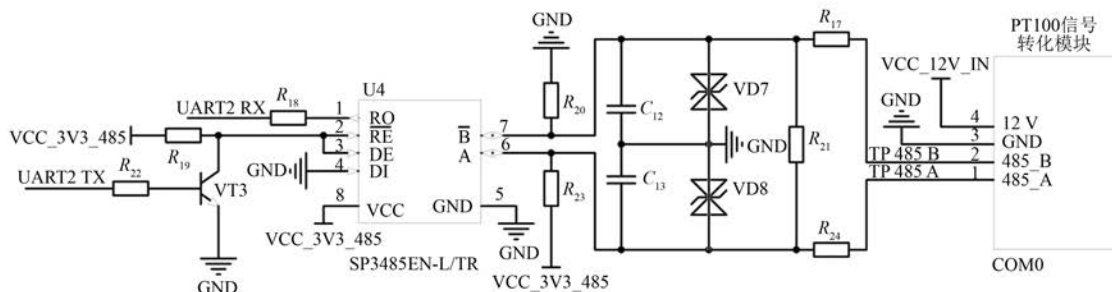


图 3 温度数据采集电路

3.1.4 综合电力模块

电力采集模块由电压互感器、电路互感器和综合电力调理模块组成。采用非侵入式监测,从电机二次侧采集电压电流信号,兼容三相三线制与三相四线制连接方法。经 ARM 算法解析后得到三相电压电流有效值、电流不平衡度、有功功率等特征参数。综合电力采集示意图如图 4 所示。

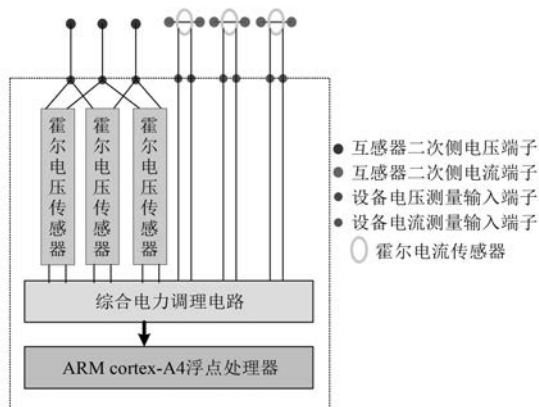


图 4 综合电力采集示意图

3.1.5 网络通信模块

系统采用集成全硬件 TCP/IP 协议栈的嵌入

式以太网控制芯片 W5500 与远端服务器进行数据通信。W5500 支持高速标准 4 线 SPI(最高可达 80 MHz)接口与主机进行通信,其内部还集成了以太网数据链路层(MAC)和以太网物理层(PHY)、网络唤醒等功能,使得硬件方案更加简单方便,能够快速地接入以太网。W5500 接入方案如图 5 所示。

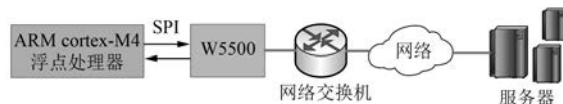


图 5 W5500 接入方案

3.2 软件设计

数据采集装置软件主程序运行图如图 6 所示。主要完成程序自检、数据采集分析、故障判断、故障处理、与云端数据交互等工作。

3.2.1 程序自检

系统上电之后对各硬件模块功能进行初始化并检测其功能是否正常。检测失败模块通过 LCD 显示出来,并将错误信息打包到传输至云端的数据包中。功能检测完毕后将 flash 中存储的电机

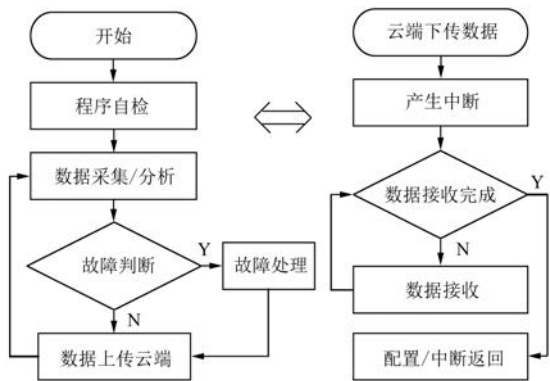


图6 数据采集装置软件主程序运行图

参数进行读取设置等操作。程序自检流程如图7所示。

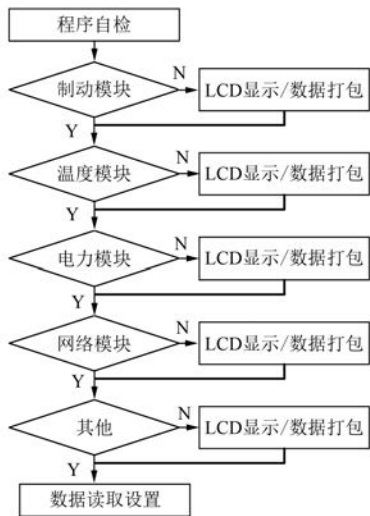


图7 程序自检流程

3.2.2 数据采集分析

数据采集从各硬件模块中读取原数据操作。将原始数据进行计算解析后,得到三相电压、三相电流、功率因数、有功功率、无功功率、温度、振动峭度、振动烈度、振动加速度等特征数据参数。

3.2.3 故障判断

故障判断将解析得到的特征数据与预设阈值进行对比,判断参数是否在预值范围内。如判断电机参数不在预值内,系统进行故障处理。故障处理:故障码通过 LCD 显示出来,蜂鸣器报警,并将报警时间、报警原因等参数打包传输至云端的数据包中。

3.2.4 数据交互

数据交互分为数据上传与数据接收 2 个过程。数据上传:系统将采集到的特征参数、故障信息、自检状况等信息进行打包发送至云服务器中。同时,为了保障数据传输可靠性,采用超时重传、断线重连等机制,确保系统整体运行状况良好。数据接收:根据云端下发的参数进行配置,并将配置信息保存至 flash 中。

4 试验验证

为了验证系统在现场中运行的实际效果,现场测试电机如图8所示。测试对象:高压隔爆型三相异步电机,额定电压 6 kV,额定电流 26.7 A,额定功率 220 kW,额定频率 50 Hz,额定转速 2 975 r/min,功率因数 0.85,效率 93.3%,Y 接法。

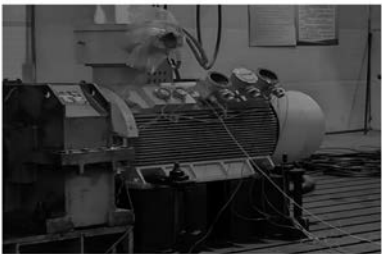


图8 现场测试电机

云平台数据监控界面如图9所示。显示的是装置上传至云端的电流测量有效值。



图9 云端数据监控

高压电机带载运行,在额定工况下试验,部分电机现场仪表数据与采集装置监测云端数据对照如表3所示。电相关参数误差率不超过1%,频

表3 综合电力采集数据对比表

数据	AB 相	A 相	B 相	C 相	频率/
	电压/V	电流/A	电流/A	电流/A	Hz
现场仪表数据	5 976.100	27.708	27.325	27.547	49.992
云平台数据	6 010.216	27.450	27.150	27.300	49.990
相对误差	0.571%	0.931%	0.640%	0.897%	0.004%

率监测准确。在长时间运行下,电机采集数据与已有自带仪表数据进行对比,误差较小,确定采集设备采集数据准确性与抗干扰性正常。

5 结 语

电机设备远程运维云平台的边缘装置以 ARM Cortex-M4 内核的微处理器作为控制核心,将嵌入式系统引用到电机监测中,对电机温度、振动、电流电压等信号进行实时采集,并对采集数据进行优化分析。与云端远程运维平台相互协调配合,全方位监控电机运行状况,提高了设备的安全性。试验结果证明了系统地有效性,有助于企业更好的监测电机运行状况。

【参 考 文 献】

- [1] 蔡燕,孙流斌,姜文涛,等. 基于 LabVIEW 的电机实时在线监测系统[J]. 仪表技术与传感器,

2017(10): 70.

- [2] 王晨辉,郭英军,全浩,等. 基于 ARM 和 Linux 的嵌入式异步电机监测系统[J]. 仪表技术与传感器, 2011(11): 68.
- [3] DOL S, BHINGE R. SMART motor for industry 4.0 [C] // IEEE 2018 IEEMA Engineer Infinite Conference (eTechNXT), 2018.
- [4] 据长江,谭爱国,胡良辉. 电机智能制造远程运维系统设计与试验平台研究[J]. 电机与控制应用, 2018, 45(5): 83.
- [5] SEN M, KUL B. IoT-based wireless induction motor monitoring[C] // 2017 XXVI International Scientific Conference Electronics(ET), 2017.
- [6] SHYAMALA D, SWATHI D, PRASANNA J L, et al. IoT platform for condition monitoring of industrial motors[C] // IEEE 2017 2nd International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES), 2017.

(上接第 67 页)

- [3] 陈俊,王莹,魏俊天,等. 一款基于双面水冷 IGBT 的双电机控制器开发与验证[J]. 电机与控制应用, 2019, 46(10): 99.
- [4] 王学梅. 宽禁带碳化硅功率器件在电动汽车中的研究与应用[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(3): 371.
- [5] 张舟云,贡俊. 新能源汽车电机技术与应用[M]. 上海:上海科学技术出版社, 2013.

- [6] 袁新枚,范涛,王宏宇,等. 车用电机原理及应用[M]. 北京:机械工业出版社, 2016.
- [7] 袁登科,徐延东,李秀涛. 永磁同步电动机变频调速系统及其控制[M]. 北京:机械工业出版社, 2015.
- [8] 张舟云,徐国卿,沈祥林. 牵引逆变器散热系统的分析与设计[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2004, 32(6): 775.

(上接第 78 页)

- [2] 赵立军,佟钦智. 电动汽车结构与原理[M]. 北京:北京大学出版社, 2012: 92-109.
- [3] 万珍平,温万昱,吴柏禧,等. 考虑换热能力和压降的永磁同步电机冷却流道设计[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2017, 45(7): 25.
- [4] 王升平,吴柏禧,温万昱,等. 基于热管-风冷系统的新能源汽车电机热分析[J]. 电机与控制应用, 2018, 45(8): 91.
- [5] 田玉东,王潇,张舟云,等. 车用电机冷却系统热仿真及其优化[J]. 机械设计与制造, 2015(2): 238.
- [6] 路义萍,阴文豪,韩家德,等. 汽轮发电机转子端部及槽内绕组温升[J]. 电工技术学报, 2010, 25(2): 1.

- [7] RASEKH A, SERGEANT P, VIERENDEELS J. Fully predictive heat transfer coefficient modeling of an axial flux permanent magnet synchronous machine with geometrical parameters of the magnets[J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 110: 1343.
- [8] POLIKARPOVA M, LINDH P, GERADA C, et al. Thermal effects of stator potting in an axial-flux permanent magnet synchronous generator[J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 75: 421.
- [9] 任志安,郝点,谢红杰. 几种湍流模型及其在 FLUENT 中的应用[J]. 化工装备技术, 2009, 30(2): 38.