

履带起重机多参数安全监控管理系统的设计及实现

丁克勤¹, 郑惠泽², 赵禹³, 赵利强²

(1. 中国特种设备检测研究院, 北京 100029; 2. 北京化工大学 信息科学与技术学院, 北京 100029;
3. 北京中检希望科技有限公司, 北京 100029)

摘要: 随着生产规模的扩大, 履带起重机被广泛应用于物料搬运与工业生产建设等领域; 而在役履带起重机缺乏运行数据监控装置, 无法实时监控设备运行状态, 并难以为设备检修、故障分析甚至事故回溯提供足够的数据支撑; 基于虚拟仪器技术, 设计并实现了履带起重机的多参数运行安全监控管理系统, 该系统硬件由传感器、PLC 和工控机组成, 软件平台基于 LabVIEW 环境开发, 以状态机与队列结构为基础架构, 设计并实现了一种模块化并行的体系结构; 通过该体系结构可以方便的为系统中增加所需功能, 提高安全监控管理系统的通用性和适用性; 根据系统运行结果显示, 系统能够对履带起重机运行状态进行实时采集、监控与报警, 具有较好的工程应用价值。

关键词: 安全监控管理系统; 履带起重机; LabVIEW; 数据采集; 数据集成

Design and Implement of Multi—parameters Safety Monitoring Management System for Crawler Crane

DING Keqin¹, ZHENG Huize², ZHAO Yu³, ZHAO Liqiang²

(1. China Special Equipment Inspection and Research Institute, Beijing 100029, China; 2. College of Information Science and Technology, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China;
3. Testarc Technologies Co., Ltd., Beijing 100029, China)

Abstract: With the expansion of production scale, crawler crane is widely used in material handling and industrial production construction and other fields. However, the crawler crane in service cannot monitor the operation status of the equipment in real time caused by lacking the operation data monitoring device. Therefore, it is difficult to provide enough data support for equipment maintenance fault analysis and even accident backtracking. A multi—parameters safety monitoring and management system of crawler crane is designed and implemented based on virtual instrument technology. The hardware of the system consists of sensor, PLC and industrial computer. The software platform is developed based on LabVIEW environment, and a modular and parallel architecture is designed and implemented based on the state machine and queue structure. It is convenient for the system to add the required functions through the architecture. And the universality and applicability of the security monitoring management system is improved. According to the system running results, the system can acquire, monitor and alarm the running status of crawler crane in real time, which has a better engineering application value.

Keywords: safety monitoring and management system; crawler crane; LabVIEW; data acquisition; data integration

0 引言

随着国民经济的发展, 不断扩大的生产规模与不断提高的生产效率对起重装备提出了更高的要求。起重设备不仅要容易操作、容易维修, 更要具有低能耗、高可靠性与高安全性^[1]。履带起重机作为起重设备中极其重要的一类起重机, 以其接地比压小, 机动灵活、起重能力强、可带

负载移动、转弯半径小等一系列优点被广泛应用在石油化工、水利水电、市政建设与桥梁建设等多种领域内^[2]。

履带起重机不断向大型化、高参数化、全球化的方向发展, 这对履带起重机的运维安全提出了更高的要求^[3]。但是目前我国的不少履带起重机仍停留在定期停检、人工判断的阶段, 不仅影响经济效益, 而且履带起重机的安全状况完全凭借检验人员的经验判断, 缺乏客观数据支持,

收稿日期: 2021-08-05; 修回日期: 2021-08-27。

基金项目: 国家重点研发计划课题(2018YFF0214700)。

作者简介: 丁克勤(1968-), 男, 安徽枞阳人, 博士, 研究员, 主要从事先进传感技术、结构健康监测、大数据分析、结构健康诊断等方向的研究。

通讯作者: 赵利强(1982-), 男, 河南孟津人, 博士, 副教授, 主要从事智能检测与传感技术方向的研究。

引用格式: 丁克勤, 郑惠泽, 赵禹, 等. 履带起重机多参数安全监控管理系统的设计及实现[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(12): 114-119.

难免会有部分误差, 导致生产安全受到影响^[4-8]。此外, 履带起重机发生故障时, 由于缺乏数据记录装置, 对于设备维护及故障分析缺乏足够的数 据支撑, 难以通过对数据的分析总结出发生故障的原因, 为以后的设备操作与维护提供经验。

对于履带起重机的安全监测已经有了一些研究。刘国权和陈健^[9]利用 PLC 作为控制核心, 使用 ZigBee 网络进行传输监测吊钩状态, 并进行安全预警。徐格宁和李鹏^[10]建立了起升机构综合评价模型, 基于 3 标度层次分析法得到起升机构安全状态的综合评价。此外, 有许多研究工作者从履带起重机的臂架^[11-13]、起升幅度^[14]、钢丝绳弹性^[15]、应力、回转结构^[16]等方面对履带起重机进行设计或建模分析, 以提高履带起重机的安全状态。然而上述的安全监测往往只针对履带起重机的某一处位置, 数据记录只能记录单一位置的数据, 不能够得到起重机整体的运行数据。而后续需要对起重机的故障数据进行分析从而得到起重机故障的原因, 从而提高起重机的可靠性与安全性^[17-20], 其分析依赖的不只是单一的数据。因此需要一种能够采集并存储履带起重机多种参数的采集系统。

因此, 本文提出一种履带起重机多参数安全监控管理系统。系统由硬件设计与软件监控两部分组成。首先对硬件进行设计, 其次优化程序设计结构, 提出模块化并行的程序设计思路, 采集并存储了履带起重机的多参数数据。

1 履带起重机安全监控管理系统硬件系统设计

系统硬件部分由传感器、信号采集模块、工控机等组成。系统硬件全部选用能够适应履带起重机工作环境的专用硬件, 其优点在于能够克服履带起重机工作环境中由于低温、高粉尘、强振动, 电源不稳定等造成的硬件损伤与扰动, 减少故障的发生, 从而保证安全监控管理系统的稳定运行。

1.1 硬件系统设计架构

履带起重机安全监控管理系统主要负责对履带起重机的全部参数进行实时采集与存储, 因此硬件设计方面要考虑到不同参数的采集方式并选取合适的采集架构进行参数采集。

硬件采集系统的架构如图 1 所示。采集系统主要由数据采集层、数据转换层、数据处理层以及辅助层四部分构成。其中数据采集层主要由负责采集不同参数的传感器构成, 通过传感器采集的数据包括电信号、物理信号等多种形式的数 据, 因此需要通过数据转换层将数据转换成工控机能够理解的数据形式。数据转换层主要由可编程逻辑控制器 (PLC), AD 转换模块等构成。数据处理层获取转换后的数据并对其进行存储、显示以及报警。辅助层用来提供硬件抗干扰与不间断电源 (UPS) 等多种硬件辅助手段。

1.2 硬件采集方案

系统硬件主要采集量包括风速、操作指令、起重量、起升高度、水平度、回转角度、大臂角度、声光报警、启

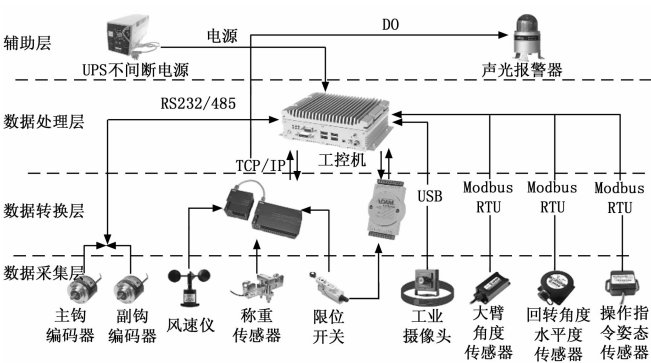


图 1 硬件系统设计架构

动/停止、主钩上升限位、副钩上升限位、防后倾限位等。具体采集方案如表 1 所示。

表 1 硬件采集方案

采集方式	采集量
Modbus TCP/RTU	操作指令、水平度、回转角度、大臂角度
RS232/485	起升高度
PLC	风速、声光报警、启动/停止、主钩上升限位、副钩上升限位、防后倾限位
工业摄像头/旁压式称重传感器	起重量

如表 1 所示, 硬件采集传感器选取具有工业标准协议的传感器进行数据的采集。选取姿态传感器器进行操作指令等数据的采集, 当位置变化时, 姿态传感器能够感受到位置变化并通过 Modbus TCP/RTU 协议返回当前所处的角度, 通过软件计算得到当前操作指令状态, 包括俯仰、提升回转、行驶等。选取绝对值编码器安装在起升卷扬位置, 编码器通过 RS232/485 协议返回其变化圈数, 其可变量值得范围共有 4 096 圈, 每圈有 4 096 个值, 根据其返回值可计算得到卷筒的转数与放出钢丝绳的长度, 结合主臂长度与大臂角度进行综合计算可得到起升高度。在起重机臂架顶端加装风速仪测量风速, 为保证风速仪始终向上, 在底部加装重锤, 风速仪得到 4~20 mA 的电流信号值, 对应量程为 0~30 m/s, 并将之送往 PLC 进行数据转换。同时 PLC 将开关量进行转换, 同时上传到工控机进行数据存储与显示。通过工业摄像机或旁压式称重传感器对起重量进行机器视觉的图像识别或电流信号采集, 得到的值再通过转换模块进行转换, 最终上传到工控机进行数据的存储及显示。

此外, 为保证履带起重机的安全运行, 本设计方案安装了声光报警器用于起重报警、高度报警以及防后倾限位报警等, 报警逻辑通过软件进行设计。同时在硬件设计方案中设计了 UPS 电源用于数据的不间断采集, 以保证采集数据的完整性。

2 履带起重机安全监控管理系统软件系统设计

履带起重机安全监控管理系统软件主要负责与底层的

数据源进行通信，获取数据并对数据进行处理以存储、显示、报警。同时软件还具有工况选择、历史数据回放、数据统计与分析、数据导出等功能。

2.1 软件设计架构

2.1.1 软件架构

安全监控管理系统软件主要由输入输出层、界面交互层以及模块化并行层三部分组成。其中输入输出层主要负责软件与外部文件或设备的输入输出，界面交互层主要负责人机交互界面的事件处理，模块化并行层主要负责多模块软件底层逻辑的运行，如图 2 所示。

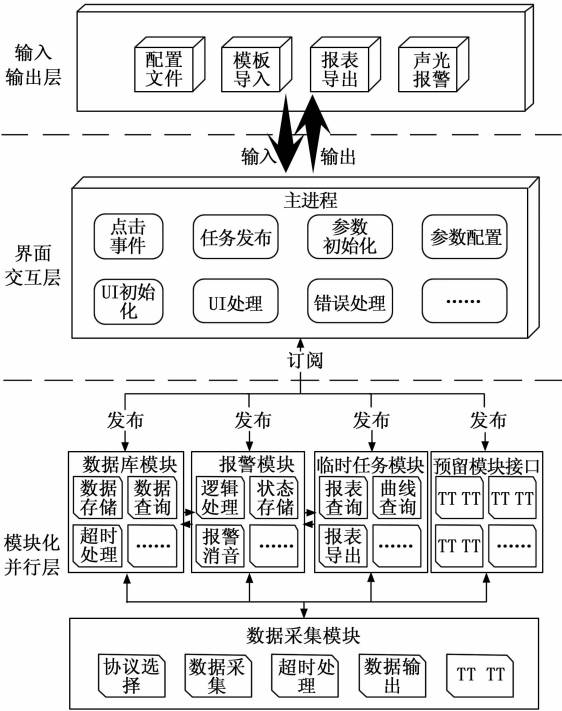


图 2 软件整体架构

界面交互层作为软件与外部环境交互的桥梁，承担着整体软件的功能展示与逻辑实现功能。因此，软件主要采用状态机进行整体软件架构，并辅之以队列结构，从而实现了界面交互层与模块化并行任务层、输入输出层之间的发布—订阅机制，满足了事件处理、逻辑实现、状态输出对于稳定性、快速性的要求。

2.1.2 基于状态机与队列的任务发布—订阅机制

状态机不是指一台实际的机器，而是一个数学模型。基于状态机的编程一般是对已知状态进行编程，因此又称为有限状态机。状态机包含 4 大要素：状态、事件、动作、转换。状态是指程序运行时的不同运行规则，例如程序打开与关闭可视两种不同的状态。事件是指触发某些操作所需要的触发条件或指令。动作是指事件被触发后所执行的操作与动作。转换是指状态机从一个状态变换到另一个状态的过程。

如图 3 所示，本质上来讲，状态机是一个顺序执行，中断插入的过程，状态机依次执行所需状态，当事件发生

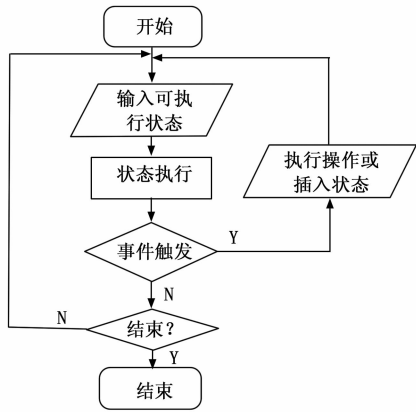


图 3 状态机执行过程

时，触发动作执行相应操作，适当时插入已知状态，中断程序并执行已知状态，执行完成后再依次执行其他状态。

队列是一个特殊的线性表，特殊之处在于队列的入栈出栈遵循的规则不再是后进先出，而是变成了先进先出，后进后出。队列元素只能在线性表的前端进行删除操作，只能在表的后端进行插入操作，因此其操作受到了一定的限制。从而当使用队列结构时，能够保证队列元素完整的执行不会丢失，实现发布—订阅机制。

系统软件开发使用状态机进行编程，在界面交互层使用状态机首先执行“Data: Initialize”、“Config: InitializeSystem”、“UI: Initialize”等多个状态，每个状态分别对软件进行初始化配置，通过获取输入输出层的配置文件，从中读取到所需要的配置参数，并进行界面所需参数的配置，同时对 UI 界面进行优化与界面大小配置，优化可视化体验。全部初始化状态执行完毕后，系统发布采集程序开始命令，使元素入队执行数据采集，接着进入空状态等待触发事件的发生以进行队列元素任务发布等操作。

2.1.3 任务模块化并行执行

多模块化并行层中全部模块通过发布—订阅机制接收到来自界面交互层发布到队列元素中的采集程序开始的命令，数据采集模块开始数据采集，通过 Modbus TCP/RTU、RS232/485、OPC 通讯以及 USB 工业摄像头采集所需数据并进行数据处理得到相应的数值。数据库模块利用所采集到的数据与数据库进行交互，建立相应的数据库表执行数据存储并建立数据查询索引。报警模块利用所得数据结合从参数配置中读取的报警限值进行报警状态的判断，并将报警状态通过队列发布—订阅机制输出到数据采集模块，使数据采集模块进行声光报警的输出。同时将报警状态也通过队列发布到数据库模块并写入数据库进行报警状态的存储。为避免重复性写入数据库造成的数据冗余，因此在程序设计中应考虑使用报警状态上升沿进行队列发布的触发条件。此外，临时任务模块主要负责程序中需要耗时解决的任务，通过订阅相应队列任务，从而获取到需要执行的任务并进行执行。

系统进行模块化设计之后, 当主界面需要增加某一部分特定功能时, 只需要通过预留模块接口增加相应的模块并增加其对应的发布—订阅机制即可, 能够较大的节省程序开发的时间。

2.2 数据库设计方案

为方便数据存储与数据检索, 对数据库表进行设计以保证数据存储与查询的快速性与稳定性。数据库设计方案如图 4 所示。

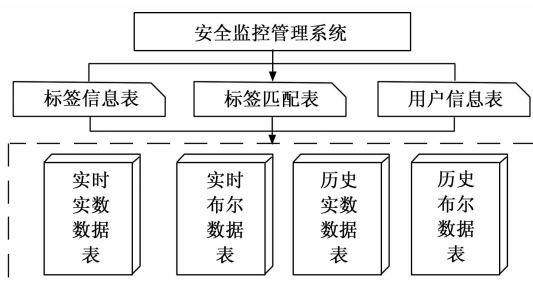


图 4 数据库设计图

数据库采用标签信息表与标签匹配表来对数据库表中的数据量进行了定义, 以便在建立索引时得到其具体含义。同时建立用户信息表为软件登录提供用户信息, 用户信息表设计有用户名、密码、用户权限、是否登录 4 列, 主要用来判断所登录用户的权限所有, 根据所在权限组通过软件设计限制或放开适当功能。

同时设计有实时表与历史表各两个, 分别用来存储实时过程数据与历史数据。历史数据表分为实数类型与布尔类型两个表, 考虑到数据采集速率的快速性以及表的大小问题, 系统设计为根据日期每日建立一个表, 并在每日凌晨零点检查数据库表是否建立并建立最近两天的历史数据表。实时数据表主要提供给软件界面读取显示, 因此在数据表中只有一条实时数据在不断更新。由此便可避免由于同时读取与写入造成的数据损伤影响到历史数据的存储。

2.3 软件数据处理

安全监控管理系统需要向操作人员全方位的展示设备的运行数据, 然而部分数据需要通过计算得到, 因此需要通过软件对采集得到的数据加以计算从而得到所需的数据。需要加以计算的数据包括高度、力矩、工作循环次数、累计工作时间等等。

高度计算需要通过采集所得的臂架幅度以及工况配置的臂架长度, 结合编码器返回值进行计算, 则高度计算值为:

$$H = L * \sin\theta - \frac{DCr}{4\ 096\ mR} \quad (1)$$

式中, H 为吊钩高度, L 为臂架长度, θ 为臂架角度, D 为编码器返回数据, m 为倍率, C 为编码器周长, r 为滚筒内径, R 为滚筒外径。在上式中并没有考虑带有副臂的情况, 若带有副臂, 则主钩高度计算公式如式 (1) 所示, 副钩高度计算公式如式 (2) 所示:

$$H_2 = L_1 * \sin\theta_1 + L_2 * \sin\theta_2 - \frac{DCr}{4\ 096\ mR} \quad (2)$$

式中, H_2 为副钩吊钩高度, L_1 为主臂长度, θ_1 为主臂角度, L_2 为副臂长度, θ_2 为副臂角度, D 为编码器返回数据, m 为副钩倍率, C 为编码器周长, r 为副钩滚筒内径, R 为副钩滚筒外径。

力矩表示的是起重机最大起重载荷量与最小工作幅度之积。起重力矩是起重机保持工作稳定的控制值, 因此是起重机最重要的参数之一, 其计算公式为:

$$T = (L_1 * \cos\theta_1 + L_2 * \cos\theta_2) * W \quad (3)$$

式中, T 表示力矩大小, L_1 表示主臂长度, θ_1 表示主臂角度, L_2 表示副臂长度, θ_2 表示副臂角度, W 为吊重, 当 W 为主钩吊重时, T 表示主钩力矩, 当 W 为副钩吊重时, T 则表示副钩力矩。

此外, 工作循环次数与累计工作时间表示起重机吊重状况。工作循环的判断通过吊重进行判断, 通过获得数据采集模块得到的吊重来进行计算, 当吊重大于 3 t 时, 则判断其进入了工作循环, 当吊重再次小于 3 t 时, 则退出工作循环。为防止数据波动引起的数据记录错误, 因此设计延时判断, 每次进入或退出工作循环前, 在连续 3 s 内进行判断, 若持续保持该状态, 才进行工作循环的进入或退出, 每次工作循环结束进行工作循环次数与时间的累加。

3 履带起重机安全监控管理系统应用

履带起重机安全监控管理系统基于虚拟仪器技术, 在 LabVIEW 开发环境下进行软件的开发。LabVIEW 编程语言, 也被称为 G 语言。与其他编程语言相比, LabVIEW 独特的图形化编程语言具有简洁直观的优点。同时 LabVIEW 具有出色的底层数据采集与通信能力, 对于履带起重机多参数的采集具有极大的便利性^[21]。此外, 得益于 LabVIEW 天生的多线程并行解决方案, 多模块化并行的软件设计思路极易使用 LabVIEW 实现。

履带起重机多参数运行安全监控管理系统要对履带起重机的全部参数进行实时显示。以某厂所属 400 T 履带式起重机进行软件系统的测试与应用。如图 5 所示, 在系统主界面中, 主要针对操作人员所关心的主要参数进行了显示, 同时主界面提供了工况选择按钮以适应履带起重机的不同工况。

如图 6 所示, 安全监控管理系统对特定参数的范围进行划分, 并设置报警限, 当主钩起重重量超过 200 t 或副钩起重重量超过 60 t 时进行报警, 同时设置主臂幅度上限为 81.5°, 此外设置有防后倾限位、主钩上升限位、副钩上升限位等多个限位报警开关, 当达到报警限时, 系统控制输出到声光报警器进行声光报警。

软件对历史数据做了合理的查询与统计优化, 用户可按照日期与时间进行整体数据的查询, 并将得到的数据导出到报表中供后续分析。同时也可以查询专项数据, 并得到数据的整体曲线趋势图, 以便于快速分析履带起重机运行状态, 如图 7 所示。



图 5 安全监控管理系统主界面图



图 6 安全监控管理系统报警界面



图 7 安全监控管理系统报表界面

履带起重机包含有不同的工况，每种工况所对应的主臂长度、副臂长度、主副钩倍率都不尽相同。为了提高所开发的系统的适用性，设计了工况参数的修改与存储，如图 8 所示。



图 8 安全监控管理系统工况修改界面

在工况设置中通过界面交互层的界面设计，方便的设计了工况参数的修改，并可根据实际需要增加所需工况，

并通过输入输出层记录到配置文件中供下次使用，为系统适应不同履带起重机提供了极大的灵活性。

此外，系统设置了报警限大小设置、采集传感器配置设置等多种设置写入配置文件中，并设置了长时间数据导出功能与内存清除功能，优化了程序运行与用户操作。同时系统在五台不同的履带起重机上进行了应用，能够通过修改相应的功能模块与配置参数达到快速配置的目的，证明了该软件思路的可行性。

4 结束语

本文基于虚拟仪器技术提出了一种多模块化并行的软件设计思路，开发了履带起重机多参数安全监控管理系统来研究了在履带起重机工业采集、存储、显示环境下的运行效果，具体结论如下：

- 1) 通过在实际履带起重机工作状态下的测试，该系统能够实现履带起重机全部参数的实时采集与显示，并能够将采集得到的数据实时存储到数据库供后续数据分析人员调用，增加了系统软件使用的便捷性。
- 2) 系统能够实现实时状态报警，并能够通过修改配置文件方便的改变报警触发条件，提高了软件的灵活性。
- 3) 系统能够通过修改相对应的功能模块而不必修改整体软件而达到在不同履带起重机上快速配置的目的，极大地提高了软件的适用性。

参考文献：

- [1] 李 磊. 国内起重机的发展研究 [J]. 中国设备工程, 2017 (15): 212-213.
- [2] 王 皓, 程建棠. 履带起重机安全技术现状调查与思考 [J]. 工程机械与维修, 2016 (10): 88-91.
- [3] 孙 影, 孙 丽. 履带起重机国内外发展趋势 [J]. 建筑机械, 2013 (15): 34-37.
- [4] 庄松鹏. 门座式起重机状态检测及其安全寿命估算 [J]. 中国水运 (下半月), 2021, 21 (5): 54-55.
- [5] 丁海彬. 塔式起重机的安全维护及现场管理 [J]. 设备管理与维修, 2021 (8): 21-23.
- [6] 陈海军, 王 惠, 楚凌宇, 等. 大型履带起重机超起变幅液压缸本质安全改进措施研究 [J]. 工程机械, 2021, 52 (4): 38-43.
- [7] 张建强. 电驱动起重机故障诊断与监测方案设计 [J]. 自动化应用, 2020 (10): 32-34.
- [8] 刘武胜, 袁旭潞, 刘 浩. 起重机智能化应用与故障安全 [J]. 起重运输机械, 2020 (20): 68-72.
- [9] 刘国权, 陈 健. 基于 ZigBee 无线网络的吊钩监测系统 [J]. 起重运输机械, 2015 (4): 41-45.
- [10] 徐格宁, 李 鹏. 基于 3 标度层次分析法的履带起重机起升机构安全工作状态综合评价 [J]. 安全与环境学报, 2013, 13 (4): 240-243.
- [11] 王 刚, 齐朝晖, 王 欣. 履带式起重机折线式臂架结构承载能力 [J]. 机械工程学报, 2015, 51 (3): 111-120.
- [12] 李红彩, 尹文静. 桁架式臂架技术在履带起重机中的应用与

发展 [J]. 建筑机械, 2019 (2): 30-32.

[13] LI J P, BAI L, GAO W, et al. Reliability-based design optimization for the lattice boom of crawler crane [J]. Structures, 2021, 29: 1111-1118.

[14] 王洪柱, 丁克勤. 履带起重机运行参数监测系统设计与应用 [J]. 中国特种设备安全, 2019, 35 (11): 26-29.

[15] TUAN L A, LEE S G. Modeling and advanced sliding mode controls of crawler cranes considering wire rope elasticity and complicated operations [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2018, 103: 250-263.

[16] YANG Q L, QU F Z, YU Z Y, et al. Stress and stability analysis of slewing motion for crawler crane mounted on flexible ground [J]. Engineering Failure Analysis, 2019, 105: 817-827.

[17] VAUGHAN J, SINGHOSE W, DOOROO K. Analysis of unrestrained crawler-crane counter weights during tip-over accidents [J]. Mechanics Based Design of Structures and Ma-

chines, 2020: 1-26.

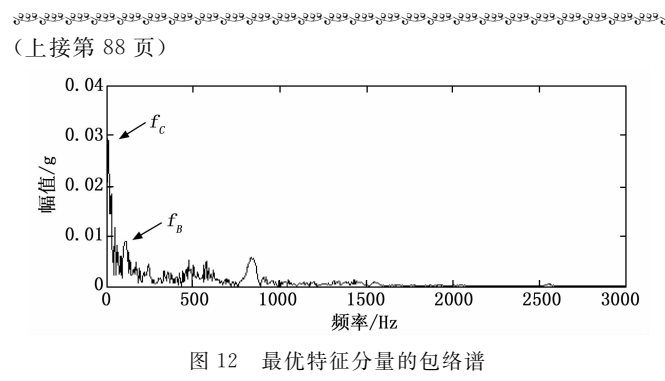
[18] AIKHUELE D O. Evaluation of the root cause of failure in a crawler crane machine using hybrid MCDM model [J]. International Journal of Maritime Engineering, 2019, 161: A219-A228.

[19] 刘 丽, 杨瑞刚. 基于区间非概率起重机臂架可靠性方法及主要因素影响分析 [J]. 安全与环境学报, 2020, 20 (6): 2079-2084.

[20] 褚学宁, 陈汉斯, 马红占. 性能数据驱动的机械产品关键设计参数识别方法 [J]. 机械工程学, 2020, 56: 1-12.

[21] HAMEL M, MOHELLEBI H. A LabVIEW-based real-time acquisition system for crack detection in conductive materials [J]. Mathematics and Computers in Simulation. 2020, 167: 381-388.

[22] 邹 杰, 徐 攀, 胥 军, 等. 基于 LabVIEW 的透镜多参数自动检测系统开发 [J]. 计算机测量与控制, 2021, 29 (3): 18-22.



了航空发动机轴承故障特征中冲击成分的提取。最后, 利用航空发动机轴承数据验证了卷积自编码网络可以基于信号本身挖掘信号局部数据点之间的重复特性, 从而有效地提取出输入信号中的冲击故障特征。

参考文献:

[1] 江金生, 任浩然, 李瀚野. 基于卷积自编码器的地震道插值方法 [C] //中国石油学会 2019 年物探技术研讨会论文集, 2019.

[2] 殷云华, 李会方. 基于混合卷积自编码极限学习机的 RGB-D 物体识别 [J]. 红外与激光工程, 2018 (2): 52-59.

[3] 张 扬. 基于卷积自编码器的异常事件检测研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2019.

[4] 朱 喆, 许少华. 降噪自编码器深度卷积过程神经网络及在时变信号分类中的应用 [J]. 计算机应用, 2020, 40 (3): 698-703.

[5] 胡义凡. 基于振动信号的航空发动机主轴轴承可靠性分析 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2019.

[6] 蔡松涛. 航空发动机轴承故障信号传递路径研究 [D]. 北京: 北京化工大学, 2019.

[7] 金前冲. 某型航空发动机主轴轴承滑蹭损伤分析及机理研究 [D]. 贵阳: 贵州大学, 2019.

[8] 寇思源. 航空发动机主轴轴承 M50NiL 钢应用技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.

[9] 李福根, 杨兵华. 中小型航空发动机主轴轴承打滑测量技术研究 [J]. 大科技, 2019 (27): 183.

[10] 徐红波, 叶宝玉, 高 婕, 等. 基于 EEMD 与 ARMA 模型倒双谱的航空发动机主轴轴承轴承外圈故障分析 [J]. 科技经济导刊, 2020, 28 (3): 50-51.

[11] 汪 伟, 李 军, 翟旭升, 等. 某型航空发动机中介主轴轴承早期微弱故障诊断研究 [J]. 机械与电子, 2019, 37 (6): 6-10.

[12] 郑金涛, 邓四二, 张文虎, 等. 航空发动机主轴滚子轴承非典型失效机理研究 [J]. 航空学报, 2019, 41 (5): 300-312.

[13] 李海涛, 石东丹, 王 萌, 等. 航空发动机主轴圆柱滚子轴承故障分析及改进设计 [J]. 轴承, 2020 (3): 17-20.

[14] 郑金涛, 邓四二, 张文虎, 等. 航空发动机主轴滚子轴承非典型失效机理 [J]. 航空学报, 2020, 41 (5): 305-317.

[15] 彭秋阳, 程振涛, 薛 建, 等. 基于多信息源机床主轴轴承故障诊断研究 [J]. 机电工程技术, 2019, 48 (8): 4-8.

[16] 刘 森, 于庆杰, 范红伟, 等. 航空发动机主轴轴承内圈引导面磨损原因分析及改进 [J]. 轴承, 2019 (11): 51-53.

[17] 曾昭洋, 陈 超, 罗 军, 等. 航空发动机主轴轴承表面粗糙度与滑蹭损伤关联性研究 [J]. 轴承, 2020 (2): 49-53.

[18] 马 圣. 极限学习机在航空轴承故障诊断中的应用研究 [D]. 天津: 中国民航大学, 2020.

[19] 陈 超, 曾昭洋, 罗 军, 等. 航空发动机主轴轴承失效模式分析 [J]. 润滑与密封, 2020, 45 (3): 126-131.

[20] 马 圣. 极限学习机在航空轴承故障诊断中的应用研究 [D]. 天津: 中国民航大学, 2019.

[21] 张振良, 刘君强, 黄 亮, 等. 基于半监督迁移学习的轴承故障诊断方法 [J]. 北京航空航天大学学报, 2019, 45 (11): 2291-2300.