

全电游船锂电池组健康诊断平台

陈少华¹, 俞万能^{1,2}, 朱永怀¹

(1. 集美大学轮机工程学院, 福建 厦门 361021, 2. 福建省船舶与海洋工程重点实验室, 福建 厦门 361021)

[摘要] 为了实时监测全电游船锂电池组的运行状态, 基于阿里云服务器, 采用 Web 浏览器、4G 通信以及数据库管理等应用技术, 建立基于模糊神经网络的锂电池组状态诊断模型。同时开发出集监视、通讯以及控制管理为一体的全电游船锂电池组的健康诊断平台, 实现对锂电池组健康状态的自动化诊断。实船测试结果表明: 平台运行稳定, 对电池组的运行状况监测和健康状态诊断迅速准确, 达到预期目标。

[关键词] 全电游船; 锂电池组; 健康诊断; 云技术

[中图分类号] TM 301

Health Diagnosis Platform for Lithium Battery Pack of All Electric Power Cruise Ship

CHEN Shaohua¹, YU Wanneng^{1,2}, ZHU Yonghuai¹

(1. School of Marine Engineering, Jimei University, Xiamen 361021, China;

2. Fujian Province Key Laboratory of Naval Architecture and Marine Engineering, Xiamen 361021, China)

Abstract: In order to diagnose the health status of the lithium battery pack of all-electric cruise ships, based on adopting alibaba cloud server, using the technology of web browser, 4G communication and database management, establishing the state diagnosis model of lithium battery pack based on fuzzy neural network, a health diagnosis platform with detection, communication and control management functions was developed to achieve automatic diagnosis of the health status of the lithium battery pack. The test results show that the platform runs stably, and the monitoring of the battery running condition and the status diagnosis of the health condition are rapid and accurate, and the expected target is achieved.

Keywords: all electric power cruise ship; lithium battery pack; health diagnosis; cloud technology

0 引言

全电游船采用高性能锂电池储能技术和电力推进技术, 具有安静稳定、无烟无尘、可靠性强等优点。锂电池组作为全电游船的关键设备, 为游船用电设备和推进电机供电, 是影响游船安全运行的主要设备和故障来源。为了对锂电池组各项信息进行实时监测, 及时判断电池状态, 并进行应急处理, 李素文等^[1]、张春燕等^[2]提出“基于 GPRS 与 Delphi 的全电游览船无线监控中心设计”, 但是系统存在部署复杂, 界面不友好, 性能拓展性差等问题。因此, 结合先进的云计算服务技术, 本文提出采用阿里云服务器和 4G 通信技术, 以及脚本程序和数据库开发等软件开发技术, 研发一套集控制、监

[收稿日期] 2019-04-04

[基金项目] 国家自然科学基金项目(51679106); 福建省科技重大项目(2018H6014)

[作者简介] 陈少华(1993—), 男, 硕士生, 从事船舶电力推进及其控制研究。通信作者: 俞万能(1970—), 男, 博士, 教授, 从事船舶电力推进及其控制研究。

视、查询和管理为一体的小型化、智能化的全电游船锂电池组健康状态诊断平台。陈晓彬等^[3]、姜长元^[4]和王一卉等^[5]曾提出, 使用模糊神经网络对动力锂电池进行故障诊断, 但是都没有在实际场景中部署应用。为了更准确的判断锂电池组的健康状态, 本文基于模糊神经网络的锂电池组健康状态诊断模型, 通过优化锂电池组健康状态隶属度, 提高对不精确或不确定等模糊电池状态信息的处理能力, 并在实船中部署应用, 最终达到保障游船安全运行, 减少安全事故发生, 提升游船运行效益的设计目标。

1 健康诊断平台整体设计

1.1 系统结构

全电游船锂电池组健康诊断平台由四大模块组成。

- 1) 数据采集模块。由传感器负责锂电池电流电压等信息的数据采集, 以及数据转换。
- 2) 数据传输模块。由 DTU (Data Transfer unit) 负责向云服务器发送锂电池相关数据, 并接受下传的控制指令。
- 3) 云服务器。由后台和前端两部分构成, 后台主要完成数据接收、控制信号下传、数据存储、数据处理和信息分析; 前端即网站前台部分, 包括人机界面交互和锂电池组不同等级故障报警。
- 4) 本地服务器。负责从云端数据库读取数据, 导入锂电池组健康状态诊断模型, 计算出锂电池组健康状态, 并将结果返回至云端, 以供前端调用显示。

1.2 总体设计

本系统数据采集传输模块由传感器和 4G DTU 组成, 保证锂电池组电流、电压和温度等数据的采集与上传。云服务器采用阿里云服务器 (ECS), 操作系统为 CentOS 7.6, 系统软件采用 B/S 架构, 用 PHP (hypertext preprocessor) 脚本语言编写服务器后台脚本程序, HTML (hyper text markup language) 结合 JavaScript 语言负责前端程序编写, MySQL 数据库管理系统负责数据的存储、备份和处理。

系统工作流程如图 1 所示。传感器采集游船锂电池组电流、电压等数据, 经 RS-232 串口上传至 WG-8020 型 4G DTU 模块; DTU 模块把数据转换成在因特网上数据传输所需的 TCP 协议格式, 实现数据采集系统与云服务器的信息交互; 云服务器实时监听指定端口, 并接收保存数据至数据库; 本地机从云端数据库读取数据, 并导入锂电池组健康状态诊断模型, 计算出锂电池组健康状态, 并将结果返回至云端, 供前端调用显示; 用户通过客户端浏览器, 以 IP 地址形式访问云服务器, 云服务器向客户端随时广播锂电池组编号、电压、电流、温度、健康状态和历史数据等信息, 实现人机交互^[7-9]。

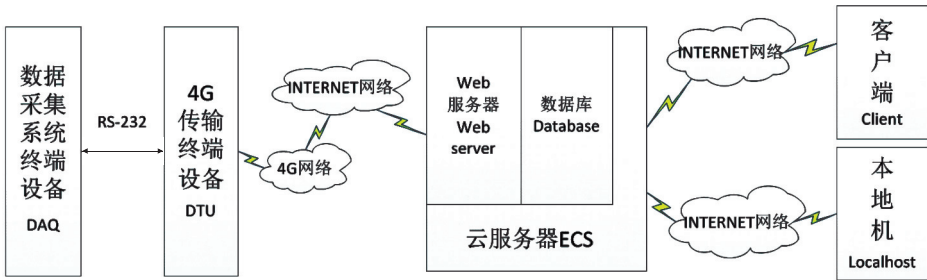


图 1 系统流程图
Fig.1 System flow chart

2 程序开发

2.1 客户端与服务器动态交互实现

后台脚本程序主要实现 CGI (common gateway interface) 功能。CGI 是外部扩展应用程序与 Web 服务器 (又称网站服务器) 交互的一个标准接口。Web 服务器通过调用 CGI 程序实现和 Web 浏览器的交互, 即 CGI 程序接收 Web 浏览器发送给 Web 服务器的信息并进行处理, 将响应结果再回送给

Web 浏览器，具体过程如图 2 所示^[8]。

本平台选用 Apache 服务器作为 Web 服务器，采用 PHP 作为服务器端脚本语言编写 CGI 程序，从而实现客户端与服务器的动态交互。

2.2 Apache 服务器与 PHP

Apache 服务器功能是提供网上信息浏览服务。客户端向 Apache 服务器管理的 HTML 静态网页文件发起文件请求，Apache 服务器接受到该请求并在相关目录下寻找这个 HTML 网页文件，然后将结果反馈至客户端浏览器，附带的文本类型信息会指示浏览器该如何查看文件^[7]。如果 HTML 文件请求包含 PHP 脚本文件，就需要调用相应的 CGI 程序，实现客户端与服务器的动态交互，在浏览器端通过表单向服务器端提交请求^[8]。

PHP 是在服务器端执行嵌入式 HTML 文档的脚本语言，具有快捷、高效和功能强大等优点，常和 Apache 服务器搭配完成一个含有数据库功能的网页。云服务器 linux 系统本身不支持 PHP 运行环境，亦不自带 Apache 服务器，因此首先要完成相应的基础运行环境配置^[8]。

2.3 利用 PHP 完成数据库的操作

在全电游船锂电池组健康诊断平台开发中，一方面要实现远程锂电池组的实时监测，另一方面还需将采集上来的数据放入数据库中存储，以供本地机及时调用，这些采集上来的数据是本地机锂电池组健康状态诊断模型的数据源。MySQL 具有快速、多线程、多用户等特点，是目前最受欢迎的开源 SQL 关系型数据库管理系统，因此，本系统使用 MySQL 数据库^[8]。在服务器中利用 PHP 程序访问数据库，通过解释 PHP 程序连接或者直接操作数据库，完成数据的读取、添加、修改、删除等操作，这样就可以完成用户的相应请求。具体实现过程如图 3 所示。

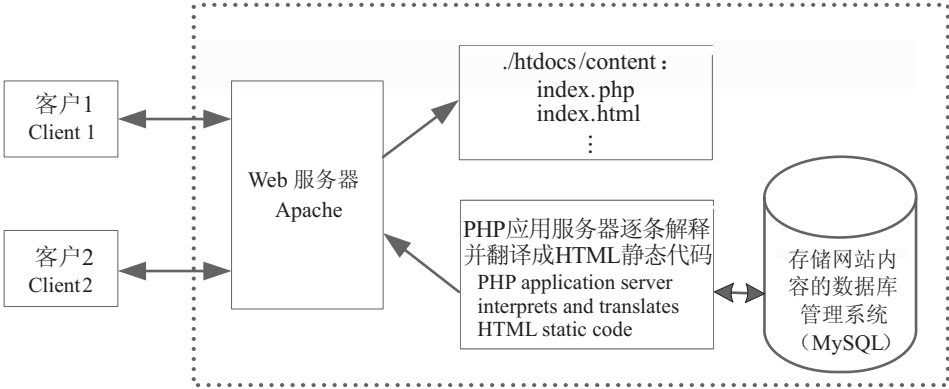


图 3 客户端对数据库操作示意图

Fig.3 Client-side operation diagram for database

3 交互界面设计

前端人机界面由 HTML 和 Javascript 语言编写完成。当浏览器收到 Apache 服务器发来的 HTML 代码后，逐条解释成网页，在客户端浏览器显示锂电池组的电压、电流、温度、健康状态、警告等信息，完成平台所需的人机交互功能。

针对所有用户，结合对游船监控的功能需求，前端人机交互设计由 5 个功能模块组成，分别是用户状态管理模块、监控数据管理模块、监控船舶管理模块、系统日志管理模块、用户管理模块，其中

用户管理模块仅供系统超级管理员（root 权限管理员）操作使用，其他功能模块分系统管理员（普通权限管理员）都可以使用。

4 电池组健康状态诊断

本平台锂电池组健康状态是基于已经建立的“基于模糊神经网络的锂电池组健康诊断模型”来判断的。模糊神经网络的结构由三个模块组成^[5]。

- 1) 输入模糊化模块。将输入的电池组健康状态转化成以隶属度表示的模糊量的集合。
- 2) 学习判断模块。应用 BP 神经网络算法完成从故障征兆到故障原因的推理诊断过程。
- 3) 输出清晰化模块。完成神经网络的输出模式到诊断结果的去模糊过程，并根据 FNN 输出向量的隶属度，最终确定故障原因。

模糊神经网络结构如图 4 所示。

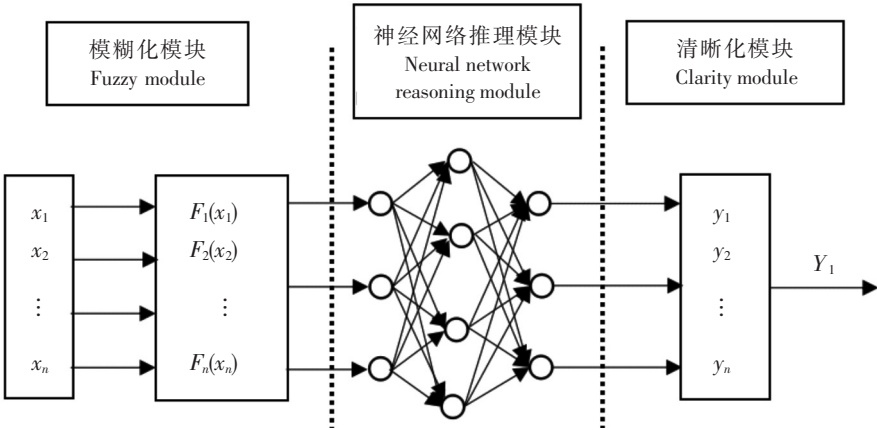


图 4 模糊神经网络模型
Fig.4 Fuzzy neural network model

4.1 电池组不健康状态表征分析

本平台以 2 组磷酸铁锂电池作为研究对象，每组锂电池由 20 节单体锂电池串联组成，每组锂电池包标准放电电流 30 A，最大持续放电电流 100 A；单节锂电池标称电压 3.2 V，容量 100 A · h，放电温度 -20 ~ 60 ℃。

锂电池组在工作中出现的不健康状态症状有：电池放电电压低 (x_1)，放电电压下降快 (x_2)，充电电压高 (x_3)，充电电压上升快 (x_4)，充电电压低 (x_5)，电压远低于平均电压 (x_6)，充电电压上升慢 (x_7)，静置时电压下降快 (x_8)，充放电时电池温度过高 (x_9)。

出现不健康状态的原因有：锂电池容量变小 (y_1)，锂电池内阻过大 (y_2)，锂电池充电不足 (y_3)，锂电池自放电过大 (y_4)，锂电池损坏 (y_5)，锂电池接线连接异常 (y_6)。

4.2 模糊健康诊断规则的建立

根据模糊数学之间的“if, ..., then”的逻辑性，建立如下的不健康状态诊断规则。

- 1) If 充电电压过高 x_3 and 充电电压上升过快 x_4 and 放电电压过低 x_1 and 放电电压下降过快 x_2 , then y_1 = 电池容量变小；
- 2) If 充电电压过高 x_3 and 放电电压过低 x_1 , then y_2 = 电池内阻过大；
- 3) 放电电压过低 x_1 and 放电电压下降过快 x_2 and 充电电压过低 x_5 , then y_3 = 电池充电不足；
- 4) 放电电压下降过快 x_2 and 放电电压远低于平均电压 x_6 , then y_4 = 自放电过大；
- 5) 充电电压上升过慢 x_7 and 放电电压下降过快 x_2 and 静置电压下降过快 x_8 , then y_5 = 电池损坏；
- 6) 充电电压过高 x_3 and 电池温度过高 x_9 , then y_6 = 电池接线连接异常。

4.3 电池组健康状态隶属度

由于锂电池的不健康状态征兆与原因之间没有明确的对应关系，因此需要用模糊数学中模糊三角函数对输入量进行模糊化和归一化处理，将不健康症状信号转化成以隶属度表示的模糊量的集合^[5]。电池组不健康状态隶属度由症状隶属度确定。最后，判断出不健康状态的类别。用表 1 来表示隶属度和不健康状态程度之间的关系。

表 1 隶属度

Tab. 1 Membership degree	
隶属度 Membership degree	健康状态程度 Health degree
0 ~ 0.4	健康 Health
0.4 ~ 0.8	亚健康 Subhealth
0.8 ~ 1.0	不健康 Unhealth

4.4 模糊神经网络的建立与训练

根据电池的充放电历史数据库，基于模糊神经网络诊断规则，并用模糊数学三角函数的方法求出不健康状态隶属度，作出表 2 所示的不健康状态征兆和原因的对应关系，即模糊规则库，即为 BP 神经网络的训练样本。

利用 MATLAB 中的 Neural Network Toolbox（神经网络工具箱），建立三层 BP 神经网络，进行样本训练。输入层为 9 个输入点，对应 9 个不健康状态征兆；输出层为 6 个节点，对应 6 个不健康状态原因。设定训练的最大循环次数为 1000 次，学习速率为 0.1，目标误差平方和指标为 0.000 1。为了满足模糊逻辑隶属度取值在（0，1）之间，各神经元传递函数均取 S 型对数函数（log - sigmoid），它能把输入范围从（-∞，+∞）映射至（0，1）。隐含层神经元个数结合网络的收敛性、速度，确定隐含层节点数为 6 个，传递函数选取双曲正切 S 型函数（tansig），仿真精度为 15。采用 L - M 算法对该网络进行训练，所以训练函数选取 trainlm。经过 10 次训练后误差满足期望值，网络训练成功^[10-12]。

表 2 电池组不健康征兆与不健康原因的对应关系

Tab. 2 Corresponding relationship between battery pack fault symptoms and fault reasons

样本	输入不健康状态征兆 Enter an indication of unhealth status									输出不健康状态原因 Output unhealth status reason					
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	y_6
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0.2	0	0.2	0	0	0	0.3	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0.9	0.8	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
4	0	0	0.9	0.8	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
5	0.8	0	0.8	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
6	0	0	0.9	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
7	0.8	0.9	0	0	0.8	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
8	0	0.7	0	0	0	0.9	0	0	0	0	0	0	1	0	0
9	0	0.9	0	0	0	0	0.9	0	0	0	0	0	0	1	0
10	0	0	0	0	0	0	0.8	0.8	0	0	0	0	0	1	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0.9	0	0	0	0	0	1
12	0	0	0.7	0	0	0	0	0	0.8	0	0	0	0	0	1

4.5 健康状态报警

本地机的 MATLAB 调用 Database explorer 模块与云服务器的 MySQL 建立数据链接，为模糊神经网络电池组健康诊断模型提供数据源，经过模型运算的处理结果实时保存在数据库结果表中，供 PHP 程序调用，并显示在前端界面上，程序一旦监测到电池组出现不健康状态，将触发报警程序并进行停机，在平台上显示报警信息（电池组编号和故障编号），由工作人员对相应的锂电池组做进一步人工检测或更换。

本平台于筲箕湖 16 号游船进行实船验证。

5 应用实例及结果分析

用户在 Ipad、电脑等终端输入云服务器 IP 地址, 就可以访问全电游船锂电池组健康诊断平台, 实时获取锂电池组运行状态信息和健康状态信息, 对锂电池组进行远程监控, 不受任何客观环境限制。表 3 为导出的笕筲湖 16 号实船采集数据。

表 3 游船数据
Table.3 Sightseeing boat data

游船编号 Number	DTU 序号 DTU ID	时间 Time	电池组 1#监测信号 1# Battery pack data	健康类型 Health type
11	407508410985	20190115T100102	电池组放电电压 63.8 V; 电池组放电电流 22.9 A; soc52%; 温度 20 ℃ Battery pack discharge voltage 63.8 V; battery pack discharge current 22.9 A; soc52%; temperature 20 ℃	健康 Healthy
11	407508410985	20190115T103102	电池组放电电压 62.9 V; 电池组放电电流 22.1 A; soc50%; 温度 20 ℃ Battery pack discharge voltage 62.9 V; battery pack discharge current 22.1 A; soc50%; temperature 20 ℃	健康 Healthy
11	407508410985	20190115T110102	电池组放电电压 61.5 V; 电池组放电电流 16.8 A; soc46%; 温度 21 ℃ The battery pack discharge voltage is 61.5 V; the battery pack discharge current is 16.8 A; soc46%; temperature 21 ℃	亚健康 Subhealthy
11	407508410985	20190115T120102	电池组放电电压 60.1 V; 电池组放电电流 15.9 A; soc41%; 温度 21 ℃ Battery pack discharge voltage 60.1 V; battery pack discharge current 15.9 A; soc41%; temperature 21 ℃	亚健康 Subhealthy
11	407508410985	20190115T140102	电池组放电电压 58.9 V; 电池组放电电流 17.5 A; soc30%; 温度 22 ℃ The battery pack discharge voltage is 58.9 V; the battery pack discharge current is 17.5 A; soc30%; temperature 22 ℃	不健康 Unhealthy

表 3 中, 平台在 11 时 01 分检测到 1#电池组放电电压下降过快, 放电电压低于正常放电电压, 1#锂电池组处于亚健康状态, 平台提示用户切换至其他电池组。为了验证模型的准确性, 试验选择不切换电池组, 降低航速, 1#电池组继续工作。14 时 01 分 1#电池组放电电压下降过快, 放电电压远低于正常放电电压, 此时电池组处于自放电过大的不健康状态, 触发平台报警程序, 平台发出报警提示, 同时自动切换至其他电池组或者断电。PC 端报警如图 5 所示。

故障诊断		
设备	状态	故障类型
电池组1#	良好	温度过高
单体电池①	注意	无
单体电池②	良好	接触不良
单体电池③	异常	无法连接
单体电池④	注意	无

图 5 手机端报警图
Fig.5 Cell phone alarm display

6 结束语

本文详细介绍了基于阿里云服务器搭建全电游船锂电池组健康诊断平台设计实现过程。通过此平台, 用户可远程获取锂电池组运行状况和健康状态信息, 便捷操纵对电池组进行充电、断电和切换电池组等动作, 提高了游船安全水平, 降低了游船运行成本。运行结果表明: 该方案设计性能可靠稳定, 操作简单便捷, 满足设计要求。

[参 考 文 献]

- [1] 李素文, 吴永红, 俞万能. 基于 GPRS 与 Delphi 的全电游览船无线监控中心设计 [J]. 中国造船, 2014, 55(4): 159-163.
- [2] 张春燕, 俞万能. 基于 Delphi 的全电游览船无线监控管理系统 [J]. 集美大学学报 (自然科学版), 2013, 18(5): 360-364.
- [3] 陈晓彬, 俞万能. 基于模糊神经网络的船用锂电池故障诊断的研究 [J]. 船电技术, 2016, 36(2): 22-25.
- [4] 姜长元. 模糊神经网络模型及其应用研究 [D]. 南京: 南京师范大学, 2005.
- [5] 王一卉, 姜长泓. 模糊神经网络专家系统在动力锂电池组故障诊断中的应用 [J]. 电测与仪表, 2015, 52(14): 118-123.
- [6] 鞠初旭. 模糊神经网络的研究及应用 [D]. 成都: 电子科技大学, 2012.
- [7] 刘凯, 徐轶群. 基于 Web 的船舶主机监测报警系统设计 [J]. 机电技术, 2012, 35(6): 166-168.
- [8] 徐叶, 袁敏, 李国军. 嵌入式 Web 服务器远程监控系统的设计与实现 [J]. 计算机与现代化, 2013(02): 94-98.
- [9] 余文焕, 贾华宇, 马珺. 基于 ARM11 的嵌入式 Web 远程实时温度监测系统 [J]. 仪表技术与传感器, 2017(12): 67-71, 113.
- [10] 郭琦沛. 锂离子动力电池健康特征提取与诊断研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2018.
- [11] 陈满, 李勇琦, 刘邦金, 等. 锂电池健康状态监测与评价技术研究 [J]. 水电站机电技术, 2015, 38(增刊): 77-81, 89.
- [12] 夏承成, 王顺利, 尚丽平, 等. 机载锂电池健康评价与管理方法和技术研究 [J]. 电源技术, 2015, 39(10): 2110-2112, 2330.
- [13] WANG Y, TIAN J, CHEN Z, et al. Model based insulation fault diagnosis for lithiumion battery pack in electric vehicles [J]. Measurement, 2019, 131: 443-451.
- [14] DAI H, ZHAO G, LIN M, et al. A novel estimation method for the state of health of lithium-ion battery using prior knowledge-based neural network and Markov chain [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(10): 7706-7716.
- [15] LI J, TAN F, ZHANG C, et al. Capacity Fade Diagnosis of Lithium Ion Battery Pack in Electric Vehicle Base on Fuzzy Neural Network [J]. Energy Procedia, 2014, 61: 2066-2070.

(责任编辑 陈 敏 英文审校 郑青榕)