

基于Qt的TMSR熔盐泵试验台架控制系统

余嘉莉^{1,2} 陈永忠¹ 韩利峰¹

1(中国科学院上海应用物理研究所 上海 201800)

2(中国科学院大学 北京 100049)

摘要 针对钍基熔盐堆(Thorium Molten Salt Reactor, TMSR)熔盐泵试验台架实时性、跨平台性等要求,由基于C++的Qt图形化界面开发框架开发试验台架控制系统。通过Blender绘制的熔盐泵试验台架3D模型图加载到Qt,控制系统与实验物理与工业控制系统(Experiment Physics and Industrial Control System, EPICS)连接,实现对3D模型的显示、旋转、缩放,控制系统设备并实时显示系统数据。通过测试,TMSR熔盐泵试验台架控制系统表现出良好的稳定性与灵活性,为熔盐泵成功应用到熔盐堆中奠定基础。

关键词 熔盐泵试验台架, 3D模型, 实验物理及工业控制系统, Qt Creator

中图分类号 TL36

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2022.hjs.45.060603

The control system for TMSR molten salt pump experimental platform based on Qt

YU Jiali^{1,2} CHEN Yongzhong¹ HAN Lifeng¹

1(Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

2(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract [Background] A low-flow high-temperature molten salt pump is developed for the thorium-based molten salt reactor (TMSR) nuclear energy project launched in 2012. Before the low-flow high-temperature molten salt pump is applied to the molten salt reactor, a large amount of experimental data is required. [Purpose] This study aims to develop 3D interface of molten salt pump experiment platform control system to monitor the real-time data generated by the system. [Methods] First of all, the Blender opensource software was used to draw the 3D model of this control system, then, Qt Creator was employed to load the model and develop the control system interface, and "sqlite" was applied to the storage of the real-time data generated by the system. Finally, experimental tests were conducted to verify its performance. [Results] Experimental results show that the display of 3D models and real-time data are achieved in the monitoring system, so do the 3D model rotation and scaling. Functionalities such as the valve switch state control, the user operation behavior and historical data recording, over-threshold alarm, etc. are realized with stability and flexibility. [Conclusions] This new technology of Qt and 3D can be applied to the development of the molten salt pump control system in the future.

Key words Molten salt pump experimental platform, 3D model, Experimental physics and industrial control system, Qt Creator

钍基熔盐堆(Thorium Molten Salt Reactor, TMSR)核能专项^[1]是中国科学院提出研发的第四代

裂变反应堆核能系统,钍基熔盐堆的反应堆冷却剂是高温熔盐,而推动其冷却循环的“心脏”是熔盐泵。

中国科学院战略先导科技专项(No.XDA02010300)资助

第一作者: 余嘉莉, 女, 1996年出生, 2018年毕业于湖北科技学院, 现为硕士研究生, 研究领域为EPICS实时控制系统

通信作者: 陈永忠, E-mail: chen Yongzhong@sinap.ac.cn

收稿日期: 2022-03-31, 修回日期: 2022-04-18

Supported by Strategic Pilot Science and Technology Project of Chinese Academy of Sciences (No.XDA02010300)

First author: YU Jiali, female, born in 1996, graduated from Hubei University of Science and Technology in 2018, master student, focusing on EPICS real-time control system

Corresponding author: CHEN Yongzhong, E-mail: chen Yongzhong@sinap.ac.cn

Received date: 2022-03-31, revised date: 2022-04-18

TMSR 熔盐泵是熔盐回路的驱动设备,具有熔盐驱动、液位控制、取样等功能。通过建立熔盐泵控制系统,不但可以实现远程控制熔盐泵及其阀门开关,而且还可以实时显示温度、压力、气流量等参数。TMSR 熔盐泵试验台架则是对泵的熔盐介质下的高温实验研究,使用的技术、产生的数据可以为后续熔盐堆的设计提供数据和技术支撑。目前 TMSR 熔盐泵试验台架不仅有大量先进的传感器和阀门,而且其构造复杂,可视化水平不够。

本文利用 Qt 图形化界面开发框架进行人机交互界面的开发,并结合使用 3D 建模技术建立了 TMSR 熔盐泵试验台架的 3D 模型。该试验台架控制系统不但能够实现熔盐泵 3D 模型显示、旋转、缩放,而且还可以实现设备参数的实时监控,增强了熔盐泵试验台架的可视化水平。

1 3D 可视化技术在核能领域的应用

国内外各大科研机构对 3D 技术应用到核能领域的研究越来越深入,西班牙开发了 SICOMORO (Simulation of Control Room Modifications) 和 ACEWO (Control Access Worker to Nuclear Power Plant) 虚拟现实系统^[2-5]。模拟了 Confrents 核电站环境中辐射防护的交互式计算,模拟重现了核电站操作员所有重要操作过程,显示虚拟现实系统中每位操作员的瞬时和累积剂量,通过对操作和数据分析最大限度地减少操作员在核电站的操作时间和辐射剂量。为了模拟拆除核电厂涡轮机的必要程序设计了 TILOS (Turbine Planification for the Simulation of the Turbine Dismantle) 虚拟现实应用程序,通过所有不同可能性分析获得最佳选择,且优化了人机界面、改进了控制室的设计。

日本开发一套用于核电站辐射剂量防护的虚拟现实系统^[3,6],提高维护人员工作效率,同时减少核电厂维护人员的辐射,将维修人员剂量率分布通过三维可视化技术显示。

武汉核动力运行研究所利用三维可视化技术构建了核污染物扩散系统,结合 3D 建模技术展现核电站的三维全景效果,实现核电厂址区域污染物浓度场和剂量场的三维展示和动态分布^[7]。模拟污染物动态扩散分布,实现数据三维可视化,为后续应急决策提供参考。魏子奇等^[8]利用可视化技术监测核电设备状态,通过融合三维模型,建立了以设备为中心的三维场景。张琳^[9]利用三维技术应用到核电设计中方案的验证与工程建造中,对项目的各个阶段进行模拟,对整个流程进行动态可视化展示,开发三维可视化工程设计验证平台。

由此可见,构建一种以 3D 可视化技术为基础、融合系统数据分析的应用程序,能够为核电站等重大设施的监测和诊断提供数据管理和数据分析工具,为核电站设备运行的管理提供更有力的 3D 可视化支撑。本项目开发了一套基于 Qt 架构的 TMSR 熔盐泵试验台架控制系统,为以后的熔盐堆控制系统提供实践经验。

2 TMSR 熔盐泵试验台架控制系统任务与控制内容

2.1 需求分析

为了保障 TMSR 熔盐泵试验台架的正常运行,需要对试验台架上设备的控制信号进行监控。通过实验物理及工业控制系统 (Experiment Physics and Industrial Control System, EPICS) 的 IOC (Input Output Controller) 实时数据库监测实时数据,设备的控制信号有:温度、压力、气流量、阀门开关等。通过人机交互界面完成各个设备的控制,在 PC 端发出指令,控制阀门的开关。操作人员可以通过控制系统界面调节各阀门或加热器的温度、气流量、压力等参数,从而使系统在各个工况下运行,为后续是否能够应用到熔盐堆中提供相应的实验数据及技术支持。

根据以上设备控制信号,系统上层界面需要实现 3D 模型显示、旋转、缩放,设备的开关控制,系统数据实时显示并存储于数据库和用户账户信息管理及操作行为记录功能。

2.2 系统总体结构

基于 EPICS 熔盐泵实时控制系统采用分布式体系的结构的标准模型,即操作员接口级、子系统处理级和设备接口级^[10]。本文熔盐泵试验台架使用 FA-M3 系列的可编辑逻辑控制器 (Programmable Logic Controller, PLC),其物理架构如图 1 所示。

上位机使用 Linux 操作系统的 PC 机,运行 EPICS IOC 及基于 Qt 开发的人机交互界面,对设备进行监测与控制,通过以太网将 5 个 PLC 模块连接在一起。熔盐泵试验台架控制系统采用横河 FA-M3 系列 YewPlc 开发控制系统驱动,主要用于 PLC 中控和加热。

熔盐泵试验台架按照系统功能划分为 6 个系统:主回路系统、气路系统、测控系统、支持系统、预热与散热系统、熔盐储存与加载系统^[11]。统计 6 个系统设备共有 81 种类型,如熔盐罐、泵罐、加热器、截止阀等,系统组成如图 2 所示。

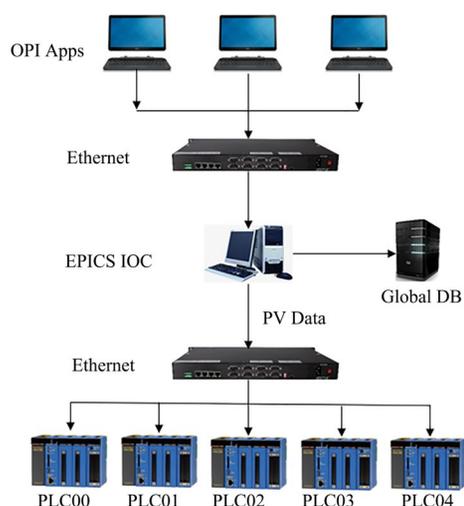


图1 熔盐泵试验台架物理架构
Fig.1 Physical structure of molten salt pump experimental platform

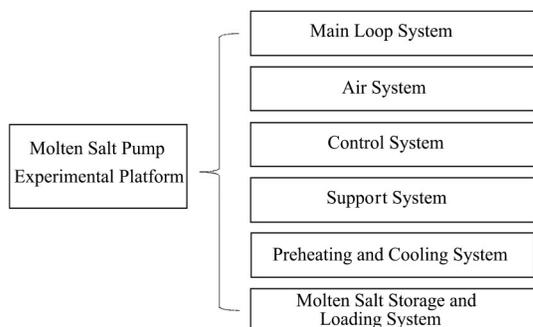


图2 熔盐泵试验台架系统图
Fig.2 The system diagram of molten salt pump

3 系统设计方案

3.1 3D建模

控制系统需要监控试验台架上各个设备的温度、压力、气流量等参数,可以调节各阀门或加热器的温度、气流量、压力等参数,为后续实验分析提供各个工况下大量的实验数据支撑。界面设计之初绘制控制系统模型图,并将其后续加载至Qt。

本文采用Blender开源软件绘制系统模型图,它是一个开源的多平台轻量级全能动画软件,提供全面的创作工具。Blender软件还拥有建模、UV映射、贴图、动画等其他系统的物理学模拟、脚本控制、渲染^[12-13],它可以工作在Windows、Linux等其他操作系统上。在三维建模的基础上,完成熔盐泵整个实验流程的虚拟呈现,实现循环泵、阀门等设备布局的3D化。

由于结构的复杂性,熔盐泵是建模的重点。熔盐泵为熔盐回路的驱动设备,具有熔盐驱动、液位控制、取样等功能。熔盐泵为立式离心悬臂泵,主要由

电机、壳体、干气密封、泵罐等组成。

根据熔盐泵的几何参数图与泵本体结构图(图3)利用Blender进行手动建模,构建熔盐泵试验台架的三维模型。

1)预设工作区域。启动Blender建模软件后对工作区域进行预设,在物体模式下鼠标配合快捷键G(移动)、S(缩放)、R(旋转)的使用,可以对模型的坐标、大小进行调整。

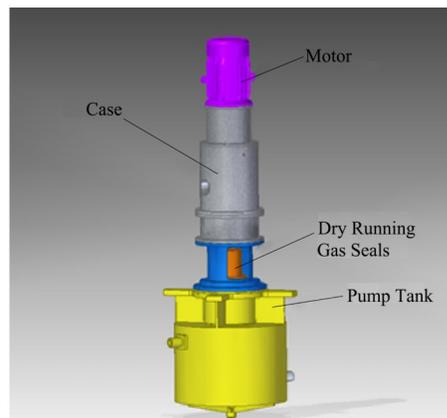


图3 泵本体结构示意图
Fig.3 Schematic diagram of the structure of the pump body

2)设置坐标参数。快捷键N进入Transform功能区(图4),确定全局坐标中物体原点所处的位置。熔盐泵试验台架模型原点处于(0,0,0),物体模型没有旋转缩放。



图4 Transform功能
Fig.4 Transform ribbon

3)分图层建模。图层1绘制熔盐泵三维模型,图层2绘制熔盐储罐三维结构,图层3绘制试验台架的加热管以及其他管道的三维结构,图层4绘制试验台架的阀门三维结构。

4)关联复制。熔盐泵试验台架熔盐泵的部分模型可对称,对电机凸起部分、泵罐法兰部分、各螺丝螺帽等小部件建立单个模型后对其进行关联复制。

5)使用倒角、表面细分修改器。Blender软件中的倒角不仅有为几何体创建倒角或圆角的功能,也可以实现平滑边线或拐角。表面细分修改器将网格的面分割成更小的面,使其看起来更加平滑。应用倒角、表面细分修改器,并对其参数进行合理的设置使建立的熔盐泵模型效果更加真实。图5分别为编辑模式、物体模式下使用倒角和表面细分修改器的泵罐。

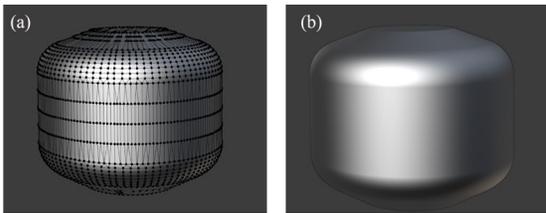


图5 泵罐模型 (a) 编辑模式, (b) 物体模式

Fig.5 The model of pump tank
(a) Editing mode, (b) Object mode

6)在熔盐泵的主要设备三维模型绘制完成后,为了系统更加完善,后续继续对储罐、阀门、管道进行建模,最后对整个系统进行装配、调试与渲染。图6为熔盐泵试验台架的三视图,分别为前视图、右视图、俯视图。

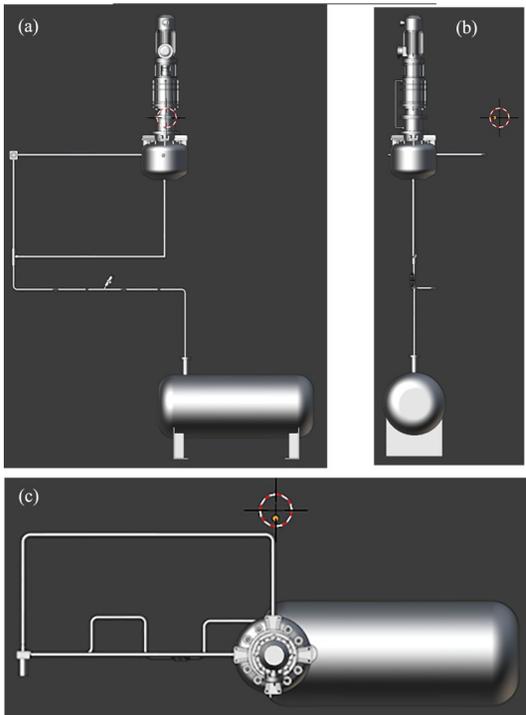


图6 熔盐泵试验台架三视图
(a) 前视图, (b) 右视图, (c) 俯视图

Fig.6 Three-view diagram of molten salt pump experimental platform (a) Front view, (b) Right side view, (c) Top view

3.2 3D模型图加载

QWidget类是所有用户界面对象的基类^[14],向QWidget当中放置容器显示加载系统三维模型,搭建可以显示实体的大环环境。创建根实体(基础实体)以用来创建其他实体,创建相机设置视角,设置光和强度。最后使用QMesh的setSource方法将循环泵的3D模型(使用Blender绘制的.obj类型文件)加载到Qt中。添加鼠标事件MouseArea,实现模型旋转、缩放功能。

```
Model *basicModel=new Model(sceneRoot);
basicModel->transform()->setTranslation
(Avector3D(0.0f,2.0f,0.0f));
basicModel->mesh->setSource(Qurl
(QStringLiteral("qrc:/obj/beng.obj")));
//滚轮缩放、鼠标左键按住拖动
onWheel: {
if(wheel.angleDelta.y>0)
camera.z = camera.z+5
else
camera.z = camera.z-5
}
onPressed: {
cx = mouse.x
cy = mouse.y
}
onPositionChanged: {
var intervalX = mouse.x-cx
var intervalY = mouse.y-cy
cameraNode.eulerRotation.y = intervalX+
cameraNode.eulerRotation.y
cameraNode.eulerRotation.x = cameraNode.
eulerRotation.x-intervalY
cx = mouse.x
cy = mouse.y
}
```

3.3 系统软件程序设计

为了设计人机友好交互界面,选择Qt作为开发环境。Qt的跨平台特性可以减轻开发人员工作量,加快应用程序开发效率,可移植性强^[15]。Qt利用C++语言调用各类开源库和函数接口实现通信,且C++的语言特性保证了开发程序的运行效率,跨平台特性比java好。前台界面和后台代码的管理机制保证了基于Qt的程序有较高的灵活性,后期扩展维护方便。

本系统利用Qt Creator图形化界面开发框架,实

现用户注册登录、系统3D模型旋转缩放、系统数据实时显示、阀门开关控制、历史数据存储、用户操作信息记录等功能。熔盐泵试验台架控制系统有两个界面：循环泵控制系统界面、运行伴热系统界面，相对应的循环泵控制系统有PLC中控(YewPlc)、运行伴热系统有PLC加热器(YewPlcHTer)。基于Qt的熔盐泵试验台架控制程序流程如图7所示。

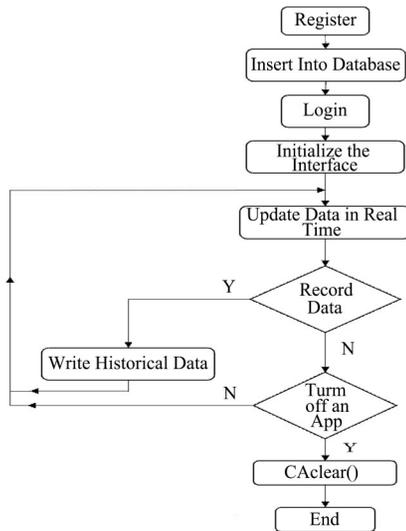


图7 程序整体流程图

Fig.7 The overall flowchart of the program

3.4 数据库设计

EIPICS IOC是运行在内存的实时数据库,是由记录名、域、链接域组成的集合。为了能记录操作行为、存储用户信息、存储系统实时数据等信息,本监控系统采用SQLite数据库,对熔盐泵IOC数据库进行管理和配置。SQLite是一款支持跨平台的轻型数据库^[16],而且Qt对它提供很好地默认支持。

Qt中的QtSql模块提供了数据库的支持,该模块的许多类基本上可分为三层:用户接口层、SQL接口层和驱动层。驱动层为数据库和SQL接口层之间提供了基本的保障;SQL接口层的API接口实现了用户对数据库的访问,其中QSqlDataBase类用来创建连接,QSqlQuery类可以通过SQL语句来实现与数据库交互;用户接口层的类可以将数据库中的数据显示到窗口部件上^[17-18]。如果要使用QtSql模块中的类,需要在项目文件(.pro)中添加一行代码“QT += sql”,表明使用sql模块,并保存文件后方可使用。

```

QSqlDataBase database; //创建数据库连接
database = QSqlDataBase::addDataBase
("QSQLITE"); //添加数据库驱动
database.setDatabaseName("beng.db"); //设置
数据库名称
  
```

1) 账户信息管理模块

用户在登录界面输入用户名及密码,后台通过相关函数进行解析和验证。若用户未注册过本系统,则将提示注册信息,注册后的用户信息保存于添加的sqlite数据库中,只有同时验证用户名和密码正确才能进入控制系统主界面。用户登录成功后,界面提示初始化进度条,完成后进入循环泵界面。在Qt Creator中双击login.ui和regis.ui文件进入设计模式,在界面中添加“button”按钮和“label”标签,并对其属性设计。在编辑模式中进入source目录下,编辑login.cpp和regis.cpp文件。

使用QSqlQuery创建用户表(UserTable),并输入userID、user Name、userPwd、userSex、userDep字段。在用户登录界面初始化数据库,当用户输入已注册过的用户名及正确密码时,进入系统控制界面。反之,进行注册。注册时输入的字段,通过query.addBindValue()函数将其插入用户表中,同时更新表中内容。

```
QSqlQuery query;
```

```

QString sql = "create table if not exists User (id
integer PRIMARY KEY autoincrement, userID
varchar(50), userName varchar(50), userPwd
varchar(50), userSex varchar(50), userDep
varchar(50))";
  
```

```

query.prepare("insert into User(userID,
username, userPwd, userSex, userDep) values()");
query.addBindValue(info.userID);
  
```

2) 历史数据模块

历史数据模块中包含循环泵界面实时数据、运行伴热系统界面实时数据、操作员操作行为记录信息,提供历史数据查询功能。创建记录操作员操作信息的用户行为表(UserActionTable)、循环泵数据表(BengDataTable)、运行伴热系统数据表(HTerDataTable),历史数据表通过insert、update等函数将系统产生的实时数据存入到数据库中。当表中的数据发生改变时,触发槽函数实时更新表中内容。

```

connect(ui->tabwidget, SIGNAL
(currentChanged(int)), this, SLOT(slot_changeIndex
(int));
  
```

```
//设置表头信息,刷新列表显示
```

```

headers << "时间" << "用户账号" << "用户姓名" << "用户行为";
  
```

```

UserInfo info = gAllUsers.find(users[row].
userID).value();
  
```

3.5 与EPICS系统连接

完成EPICS环境变量的配置,在Qt的项目文件(.pro)中添加EPICS base的路径,在头文件(.h)中需要添加<cadef.h>引用。

添加完成后,在应用程序系统软件中可以直接调用CA通道访问协议的接口函数API,如ca_get()、ca_put()、ca_create()等函数,实现应用程序系统软件与EPICS的连接,从而实现对控制系统的参数进行读取以及控制。

4 系统测试结果与讨论

TMSR熔盐泵试验台架控制系统不仅提供远程

控制阀门开关的功能,还对整个熔盐泵实验回路系统进行3D显示、旋转、缩放。同时,控制系统实现了对电机定子热电阻、加热器、熔盐泵轴承振幅、泵转速等设备参数的实时监控,并对各个参数设置超阈值报警;还提供历史数据存储浏览、记录操作员行为功能。最大化地利用Qt信号与槽函数机制,控制系统运行稳定,平均响应时间缩短到100 ms;历史数据的查询时间约为1 s,数据采集周期最短可以达到1 s,历史数据库中系统界面数据的显示间隔2 s。图8为循环泵控制系统界面,入口阀、出口阀等各个阀门开关可控,通过该循环泵控制系统界面可以实现对阀门开关控制,以及监控各设备的温度、气流量、压力等参数。

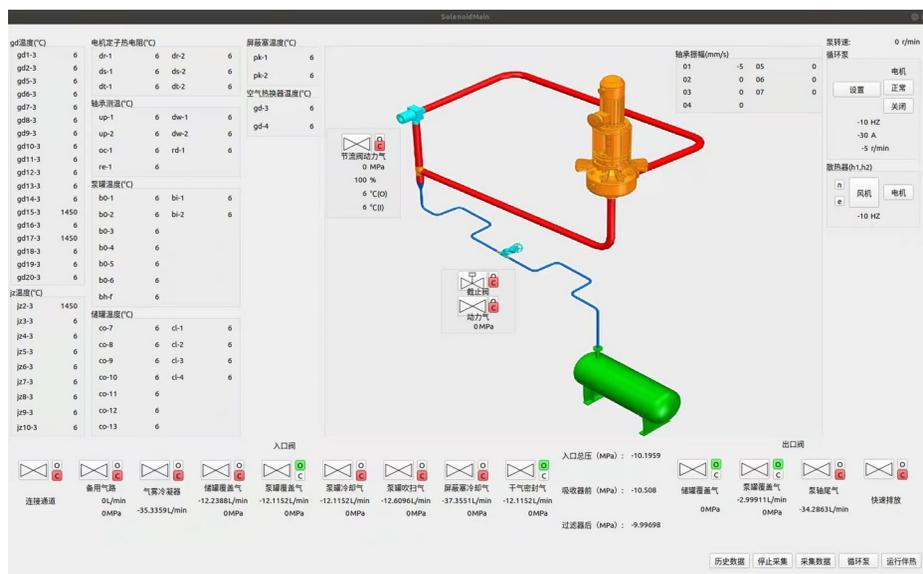


图8 循环泵控制系统界面
Fig.8 The interface of circulation pump control system

泵的运行伴热主要针对泵罐,泵罐的伴热采用上下两段分段式加热,两段加热独立控制。运行伴热系统界面主要监测温度,包括:jz、gd、储罐、泵罐、蒸汽、流量计等共40个管段及设备的温度的监控。整个熔盐泵试验台架控制系统对各个设备设置超阈值报警,例如流量计报警,且在报警的同时提示操作员打开操作规程文档,及时处理设备故障。图9为超阈值报警,并提示打开操作员规程文档。

QString msg = flag + “异常,是否打开操作员规程?”;

QFile file(“Operation Manual.txt”);

file.open(QIODevice::ReadOnly);

历史数据界面记录了循环泵控制系统界面和运行伴热系统界面部分设备的系统实时数据(图10),并记录了操作员的操作行为。在系统发生故障时,可由此找到操作员具体步骤引起故障。

5 结语

本文研究了TMSR熔盐泵试验台架控制系统,建立了3D系统模型的人机交互界面。通过Blender绘制三维模型,Qt加载三维模型,且利用Qt软件设计循环泵控制系统、运行伴热系统、历史数据界面的设计开发,实现了将3D技术成功应用到熔盐泵试验台架控制系统中,实现了对设备开关的控制、对设备参数的实时监控,还提供了历史数据查询及操作员行为记录的功能。为今后熔盐堆中熔盐泵控制系统3D界面的开发奠定了基础。

作者贡献声明 余嘉莉:设计试验,开展研究,起草文章;陈永忠:对文章内容作批评性审阅;韩利峰:指导,支持性贡献。

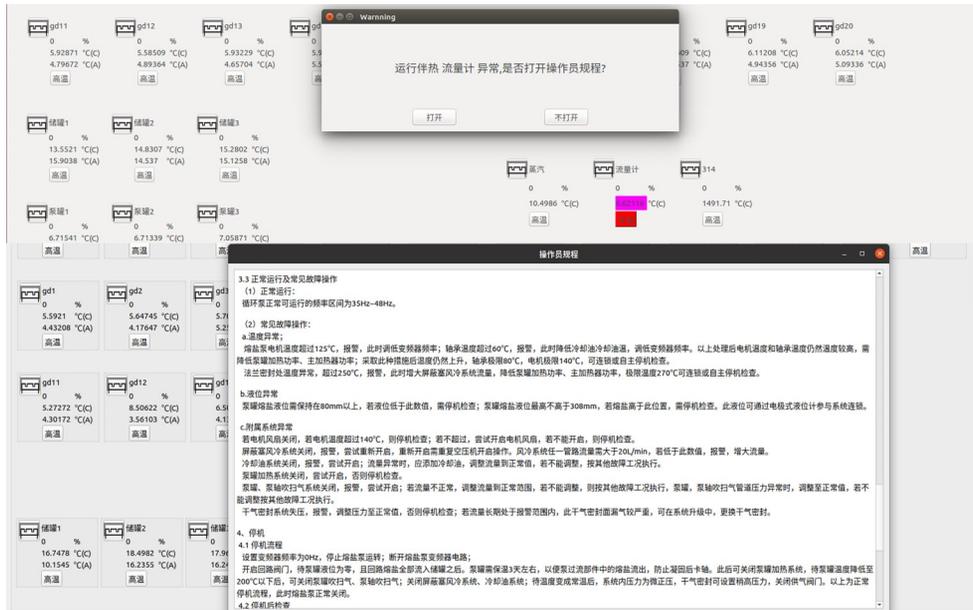


图9 报警提示界面
Fig.9 The interface of alarm prompt

运行伴热	循环泵	操作行为					
时间	JZ1	GD11	储罐1	泵罐1	蒸汽		
1	2022-03-14 19:19:18	0;6.12;5.1	0;6.06;5.05	0;5.94;5.05	0;14.7;15.15	0;7.14;6.12	0;9.8;0
2	2022-03-14 19:19:20	0;6.0588;5.151	0;5.9388;5.1005	0;5.8806;4.949	0;14.553;15.3015	0;7.0686;5.9976	0;9.702;0
3	2022-03-14 19:19:22	0;6.17998;5.20251	0;6.05758;5.20251	0;5.76299;5.04798	0;14.2619;15.4545	0;7.20997;5.93762	0;9.50796;0
4	2022-03-14 19:19:24	0;6.30358;5.25454	0;6.17873;5.15048	0;5.70536;5.14894	0;14.5472;15.6091	0;7.28207;5.81887	0;9.60304;0

运行伴热	循环泵	操作行为					
时间	GD	JZ	电机定子	轴承	泵管	储罐	
3085	2022-03-15 17:41:19	9.44288;3.8042;1.98...	283.747;3.37611;6...	2.61015;6.34969;12...	2.07656;5.08976;2.2...	4.53979;2.24886;1.5...	10.4085;7.76049;9...
3086	2022-03-15 17:41:21	9.25402;3.72811;1.9...	286.584;3.34235;6...	2.55795;6.2227;12.7...	2.09733;5.14066;2.2...	4.49439;2.22637;1.5...	10.6166;7.83809;9...
3087	2022-03-15 17:41:23	9.16148;3.76539;2.0...	289.45;3.40919;6...	2.60911;6.34715;12...	2.05538;5.08925;2.1...	4.44945;2.24864;1.5...	10.5105;7.99485;9...
3088	2022-03-15 17:41:25	8.06987;3.8407;1.96...	295.239;3.47738;6...	2.6352;6.41062;12.4...	2.07593;5.03836;2.2...	4.49394;2.20366;1.5...	10.4054;7.83496;1...

运行伴热	循环泵	操作行为		
时间	用户账号	用户姓名	用户行为	
1	2022-03-14 19:48:26	余嘉莉	余嘉莉	打开泵罐吹扫气
2	2022-03-14 19:48:43	余嘉莉	余嘉莉	整体启动
3	2022-03-15 15:44:41	余嘉莉	余嘉莉	整体启动

图10 历史数据界面
Fig.10 Historical data interface

参考文献

- 江绵恒, 徐洪杰, 戴志敏. 未来先进核裂变能: TMSR 核能系统[J]. 中国科学院院刊, 2012, 27(3): 366 - 374. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3045.2012.03.016.
JIANG Mianheng, XU Hongjie, DAI Zhimin. Advanced fission energy program - TMSR nuclear energy system[J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 2012, 27(3): 366 - 374. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3045.2012.03.016.
- Lamela B, Felipe A, Sanchez-Mayoral M L, et al. Applications of virtual reality to radiation[C]. 11th International Congress of the International Radiation Protection Association, Madrid Spain, 2004: 121-125.
- Yoon Hyuk Kim, Won Man Park. Use of simulation technology for prediction of radiation dose in nuclear power plant[C]. 2004 International Symposium on Computational and Information Science (CIS 2004), Shanghai, 2004: 185-190.
- Xu X G. Virtual-reality dose simulation for nuclear power plant[C]. The American Nuclear Society's 14th Biennial Topical Meeting of the Radiation Protection and Shielding Division, Carlsbad New Mexico, 2006: 84-89.
- Rodenas J. Developing a virtual reality application for training nuclear power plant operators: setting up a database containing dose rates in the refuelling plant[J]. Radiation Protection Dosimetry, 2004, 111(2): 173 - 180. DOI: 10.1093/rpd/nch043.

- 6 Ohga Y, Fukuda M, Shibata K, *et al.* A system for the calculation and visualisation of radiation field for maintenance support in nuclear power plants[J]. *Radiation Protection Dosimetry*, 2005, **116**(1 - 4): 592 - 596. DOI: 10.1093/rpd/nci014.
- 7 陈明, 彭波. 核应急污染物扩散三维可视化系统研究设计[J]. *设备管理与维修*, 2019(11): 155 - 157. DOI: 10.16621/j.cnki.issn1001-0599.2019.06.74.
CHEN Ming, PENG Bo. Research and design of 3D visualization system for nuclear emergency pollutant diffusion[J]. *Plant Maintenance Engineering*, 2019(11): 155 - 157. DOI: 10.16621/j. cnki. issn1001-0599.2019.06.74.
- 8 魏子奇, 王保军, 王双飞, 等. 核电站重大设备状态监测可视化技术研究[J]. *信息技术与信息化*, 2021(11): 107 - 110. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9528.2021.11.030.
WEI Ziqi, WANG Baojun, WANG Shuangfei, *et al.* Research and visualization technology for condition monitoring of major equipment in nuclear power plants [J]. *Information Technology & Informatization*, 2021(11): 107 - 110. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9528.2021.11.030.
- 9 张琳. 核电站三维可视化工程设计验证平台开发[D]. 上海: 上海交通大学, 2016.
ZHANG Lin. Development of 3D visual engineering design and verification platform[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2016.
- 10 吴伟. 基于EPICS和MDSplus的快控电源监控系统[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2018.
WU Wei. Fast control power monitoring system based on EPICS and MDSplus[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2018.
- 11 张立园. 基于WEB的TMSR熔盐泵实验平台数据库管理系统的设计与实现[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院上海应用物理研究所), 2019.
ZHANG Liyuan. Design and implementation of database management system for TMSR molten salt pump experiment platform based on WEB[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences), 2019.
- 12 Blender 2.80 Manual. Wave Modifier[EB/OL]. [2019-03-31]. [https://docs. blender. org/manual/zh-hans/dev/modeling/modifiers/deform/wave.html](https://docs.blender.org/manual/zh-hans/dev/modeling/modifiers/deform/wave.html).
- 13 朱权洁. 基于Blender引擎的矿山虚拟现实自动建模与运输仿真研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2010.
ZHU Quanjie. Auto-generation of mining virtual reality model and transportation simulation on blender[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2010.
- 14 王维波, 栗宝鹃, 侯春望. Qt 5.9 C++开发指南[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2018.
WANG Weibo, LI Baojuan, HOU Chunwang. Qt 5.9 C++ development guide[M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2018.
- 15 许耀锦, 祁丹丹. 基于Qt的AUV监控系统设计与开发[J]. *现代电子技术*, 2011, **34**(22): 75 - 76, 79. DOI: 10.16652/j.issn.1004-373x.2011.22.060.
XU Yaojin, QI Dandan. Design and development of AUV monitoring system based on Qt[J]. *Modern Electronics Technique*, 2011, **34**(22): 75 - 76, 79. DOI: 10.16652/j. issn.1004-373x.2011.22.060.
- 16 黄怡昕. 基于Qt的电网继电保护信息管理软件设计与实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
HUANG Yixin. Design and implementation of relay protection information management software for power grid based on Qt[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2020.
- 17 霍亚飞. Qt Creator快速入门[M]. 3版. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2017.
HUO Yafei. Qt Creator quick star[M]. 3rd Ed. Beijing: Beijing University of Aeronautics & Astronautics Press, 2017.
- 18 倪朋朋. 基于ZigBee的LED智能照明无线控制系统的研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2017.
NI Pengpeng. The research of intelligent lighting wireless technology control system of LED based on ZigBee[D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2017.