

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2016.03.003

智能变电设备监控与决策辅助系统数据库的设计与实现

黄新波¹, 张瑜¹, 朱波²

(1. 西安工程大学电子信息学院, 西安 710048; 2. 浙江省扬中市人事局, 江苏 扬中 212211)

摘要: 智能变电设备在线监测系统作为智能电网的重要实现手段之一,对电力设备的安全高效运行起着重要的作用。文中结合智能变电站设备在线监测软件的设计需求,进行了智能变电设备监控与决策辅助系统数据库的设计,分析了系统数据库需求分析和设计原则,给出了数据库设计和实现的关键技术。基于设计的数据库实现的在线监控与决策辅助系统已经应用到山东济宁供电局变电站智能化改造工程中,系统运行效率和稳定性高。

关键词: 智能电网; 变电设备; 决策; 系统; 数据库

Design and Implementation of the Database for Monitoring and Diagnosis System of Smart Substation Equipment

HUANG Xinbo¹, ZHANG Yu¹, ZHU Bo²

(1. School of Electronics & Information, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China;
2. Yangzhong Personnel Bureaus, Jiangsu Yangzhong 212211, China)

Abstract: The online monitoring system of smart substation equipment is an important unit in smart grid, which plays a vital role in guaranteeing the safety and efficiency of the power equipment. According to the design requirements for on-line monitoring software of smart substation, the database for the monitoring and diagnosis system of smart substation equipment was designed in this study. In this paper, the database design principles are explained, and the key technologies for database implementation are discussed. The expert system based on the designed database has been applied to the smart substation reconstruction project of Jining power supply bureau, and the application has proved that it is efficient and stable.

Key words: smart grid; substation equipment; decision; system; database

0 引言

变电设备智能化监控是智能电网的重要组成部分。传统变电设备的监控与故障诊断系统大多依据单一参量,缺乏多参量综合评估的方法,各个单一参量无法共享数据,不能适应智能电网对变电设备信息化智能化的需求^[1-4]。目前已有的系统的开发水平参差不齐,开发平台也不尽相同,各个系统各自独立

分散运行,无法提供便利的数据统计、查询功能,针对监测信息没有形成统一的传输规范,大多采集到的数据只是分散存放在各自的实时数据库中,只为少数技术人员参考,企业管理人员通过询问或报表才能看到一部分^[5-8]。巨大的数据量和繁杂的数据维护工作,需要一个统一设计搭建的数据库平台来保证数据的安全性和一致性,同时数据库技术的应用还尽可能地提高了数据的共享性,减小数据冗余,优化软件结构,并给用户提供一个简捷、可靠的界面来

收稿日期:2015-10-17; 修回日期:2015-11-26

基金项目:陕西省重点科技创新团队计划(2014KCT-16);陕西省科学技术研究发展计划项目—协同创新计划(2014XT-07);教育部“新世纪优秀人才支持计划”(NCET-11-1043)。

Project Supported by Key Science and Technology Innovation Team of Shaanxi(2014KCT-16), Shaanxi Province Science and Technology Research and Development Program-Collaborative Innovation Plan(2014XT-07), Program for New Century Excellent Talents in University(NCET-11-1043).

进行数据维护,大大减少了数据管理的工作量。

1 系统总体设计

智能变电设备监控与决策辅助系统是实现变电设备状态实时监测,运行检修管理,提升变电生产运营管理信息化自动化水平的重要技术平台。系统通过多种传感器技术、广域通信技术、故障诊断技术和信息处理技术的多方向集成展示,实现对各类变电设备运行状态的实时感知、监测预警、分析诊断和评估预测。该系统面向广大电力设备状态监测、故障报警及检修人员使用,在满足变电设备在线监测的基础需求的基础上,减少人工干预,实现对各类变电设备运行状态的实时感知、监测预警、分析诊断和评估预测。系统设计必须要有技术标准的规范性和统一性,同时具备一定的先进性和良好的可扩展性,在保障已有电网建设的正常运行下,降低工程成本^[9-13]。

该系统采用 Java Web, 基于 Struts+Hibernate+Spring 的主流框架整合,结合 JSP 和 CSS 开发设计,数据库则使用多用户、多线程的小型开源数据库 MySQL。系统的 3 层 B/S 结构见图 1。

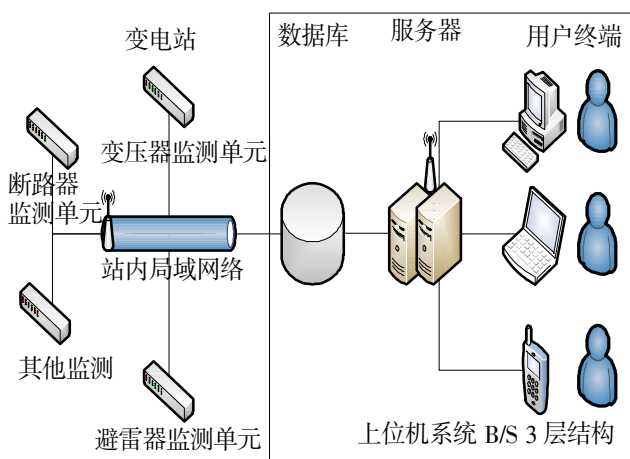


图1 B/S 3层结构

Fig. 1 B/S tri-structure

通信方式采用“光纤通信为主,Wi-Fi接入为辅”的方案,智能变电设备监控与决策辅助系统采用国家统一标准的数据存储格式,从智能电子装置及各类传感器获取监测数据,采用 IEC 61850 标准数据通讯协议来设计实现。

2 系统需求分析

智能变电设备监控与决策辅助系统的设计采用自顶向下的设计方法,由整体结构到各个模块逐级设计,系统的软件功能结构见图 2。

总体设计主要是指对整个系统的功能进行划分,软硬件配置、数据存储和整个系统实现等方便的

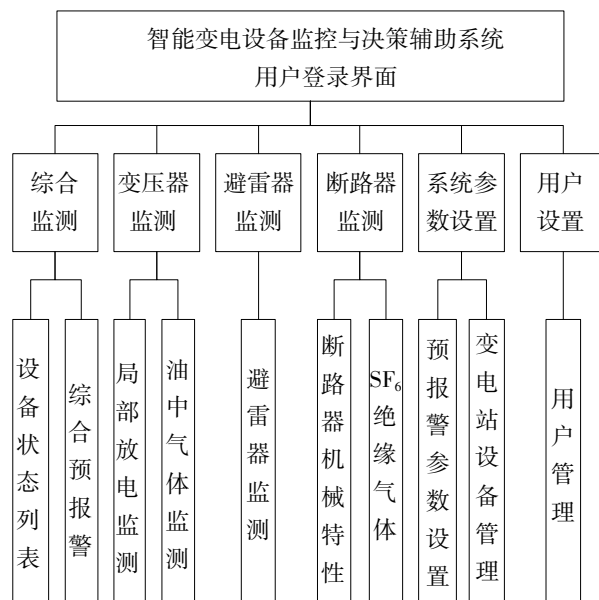


图2 软件功能结构图

Fig. 2 Structure of software function

合理布局,其中用户登录与退出功能保证了系统操作的安全性,对要访问的用户进行身份验证。

2.1 综合监测

分为设备状态列表和综合预报警两部分。其中在设备状态列表中清楚直观地看到目前所有设备的局部放电、油中气体、避雷器、断路器机械特性以及 SF₆ 的实时状态,分为正常、故障及报警 3 种类型,分别以不同的警示灯显示;在综合预报警中可以查询全部设备全部时段的监测数据,可根据设备类型、设备名称、监测类型、起始时间等进行筛选查询,对查询结果导出 Excel 表格,对于已经处理排除或者错报误报的设备故障警告信息可以选择性的进行消警处理。

2.2 变压器监测

分为局部放电监测、油中气体监测两部分。局部放电会严重影响绝缘的寿命,在局部放电监测中,可以根据不同设备名称查询当前设备的实时监测数据和历史数据、历史曲线以及针对历史数据的谱图分析等;油中气体监测用气相色谱法测定绝缘油中溶解气体的组分含量,判断运行中的充油电力设备是否存在潜伏性的过热、放电等故障。该部分同样可以看到不同设备的当前数据、历史数据、历史曲线等,在历史数据界面可根据采集到的气体数据分析诊断进入故障分析页面,分别采用改良三比值法、神经网络法、模糊逻辑法对采集到的数据进行故障诊断,得到诊断结果。

2.3 避雷器监测

避雷器用于保护电力系统中各种电器设备免受雷电过电压、操作过电压、工频暂态过电压冲击而损

坏^[14]。在这部分页面下,通过选择不同设备查询,可查看有关避雷器状态的当前数据、历史数据及历史曲线。

2.4 断路器监测

包括断路器机械特性监测和 SF₆ 绝缘气体监测。断路器作为绝缘装置负责控制和保护电网其他设备,而机械故障是引起高压断路器故障的主要原因,该部分监测主要有行程—时间的监测、分合闸线圈电流的监测及操作过程振动信号的监测等。在此页面下,可以看到断路器机械特性的实时监测数据,历史数据及其曲线,采集录波图像以及实现定值修改;由于定制修改部分需要专业人员的专业控制,所以在此页面下还设置了一次登录的密码校验,根据不同用户权限来控制机械特性监测的安全性、完好性。SF₆ 是一种具有高介电强度的介质,其优良的导热性使其具有良好的灭弧性质,一旦发生泄漏,SF₆ 气体在放电时的高温下会分解出有腐蚀性的气体,对铝合金、酚醛树脂层压材料、瓷绝缘等都有不同程度的损害。在该模块下,可以查询到有 SF₆ 断路器保护的设备的 SF₆ 绝缘气体的状态,包括当前数据、历史数据以及历史曲线。

2.5 系统参数设置

在该模块下,可以分别对系统预报警的参数和变电站设备管理进行设置。在预报警参数设置中,



图 3 数据库分区表

Fig. 3 Database partition table

3.2 数据库架构设计

数据完整性用于保证数据库中数据的正确性和可靠性,数据完整性分为实体完整性、域完整性、引用完整性。实体完整性用于保证数据库表中的每一条记录都是惟一的;域完整性用于保证给定字段中数据的有效性;引用完整性指出表之间的约束关系。

在系统数据库的设计中,各表的主外键之间存

可以对每个设备的每种检测类型设置其注意阈值和警戒阈值,并进行增删改查,设置好以上阈值后,系统才会根据阈值判断设备是否故障;在变电站设备管理中,可以对设备的不同型号进行增删改查,及时添加了设备接入,实现对设备的智能控制。

2.6 用户设置

用户管理模块可以浏览用户、增加用户、删除用户、修改密码和修改权限,并且进行系统参数设置和用户设置操作的前提是具有高级管理权限,一般的用户登录只能浏览信息。

3 数据库设计

整个系统开发的关键步骤是系统的数据库设计,在对系统进行的功能上的设计之后,就可以设计出能够满足用户需求的各种实体,使用 Power Designer 作为建模工具,在保证数据完整性的基础上降低数据冗余,提高数据并发性。

3.1 数据库表分区设计

系统根据业务共分 4 个区域:监测基础区、数据存储区、诊断结果区、数据配置区;基础区为数据存储区各类监测项目表的自由拓展提供服务,诊断结果由基础采集根据数据配置区的各项配置参数计算得出,具体的库表分区见图 3。

在一定的约束关系,各表之间存在一对一、一对多、多对一、多对多的关系,以此来实现复杂的表间查询功能。根据上述数据库分区表,得到系统的数据库架构图见图 4。

3.3 数据库表设计

将上述数据库概念结构转化为数据库系统所支持的实际数据模型,也就是数据库的逻辑结构^[15-16]。

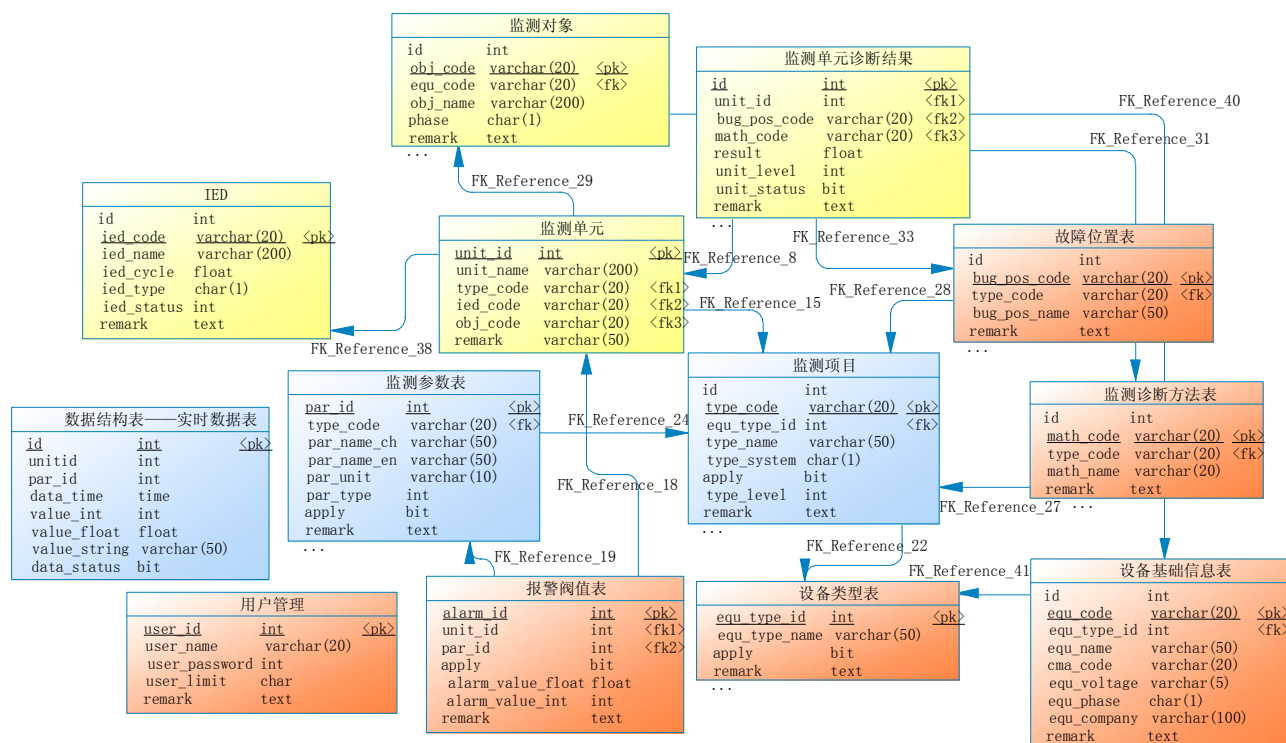


图4 数据库建模

Fig. 4 Database modeling

图4中的每个实体对应着一个表,表的列就是实体的属性,表的主键在图4中已经给出,外键由实体间的依赖关系确定。参照图4中的实体分类,所建表分为4类:监测基础表、数据存储表、诊断结果表、数据配置表,表名中的第2个字段分别设为base,data,res,conf,因所建表较多,关系复杂,加以区分便于查询和管理。下面以系统IED设备列表为例,设计的IED设备主表的表名和具体属性见表1。

表1 IED设备主表

Table 1 Main table of IED

名称	类型	长度	允许空	描述
ied_id	int	11	null	主键,IED设备编号
chest_code	varchar	20	—	箱体编号
ied_name	varchar	200	null	IED设备名称
ied_cycle	float	16	—	IED设备时钟周期
ied_type	char	1	—	IED设备类型
ied_status	int	11	—	IED设备状态
ied_server_ip	varchar	15	—	IED设备服务IP
remark	text	200	—	标注

在设计完整数据库的各个表格之后,须对每个表进行数据库的规范化检查,以避免数据冗余、更新、插入、删除异常等问题,一个数据库表结构的好坏,将影响到整个数据库系统的安全稳定以及数据查询速度^[17]。

3.4 故障诊断数据库设计

对于变电设备在线监测一次设备通过 IEC

61850 变电站通用标准协议上传给系统软件的数据,除了必要的记录查询功能外,还要对其中部分数据进行阈值判断和智能故障诊断以实现系统的决策辅助的功能。故障诊断数据库存储了大量知识库及计算机智能数据库等体系,提供人机交互模式,依据监控采集的数据对变电设备的运行状态进行智能判断预告警,协助系统使用人员定位变电设备的故障地点和故障类型,快速消除故障,确保电网的安全高效运行。故障诊断数据库系统的组成及不同部分之间的关系见图5。

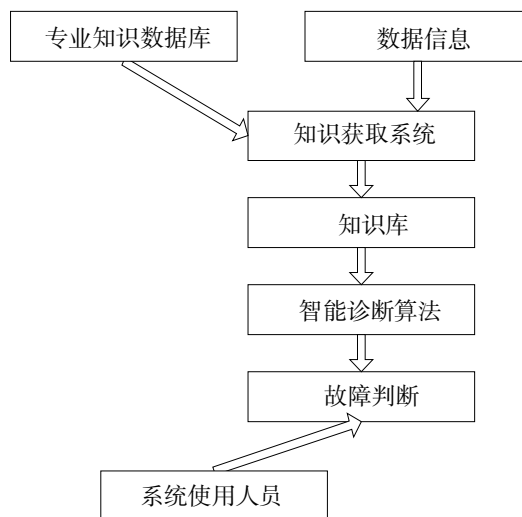


图5 故障诊断数据库关系图

Fig. 5 The diagram of fault diagnosis database

下面以该系统变压器监测的油中气体监测数据

为例,来说明数据库具体设计。

油中气体监测用气相色谱法测定绝缘油中溶解气体的组分含量,判断运行中的充油电力设备是否存在潜伏性的过热、放电等故障。主要采用基于 BP 神经网络理论,结合国标阈值对采集到的数据进行故障诊断。将 7 种特征气体量作为输入量,将正常、中低温过热、高温过热、局部放电、火花放电、电弧放电作为输出量^[18-20]。系统基于 BP 神经网络的特征气体在线监测诊断方法原理图见图 6。

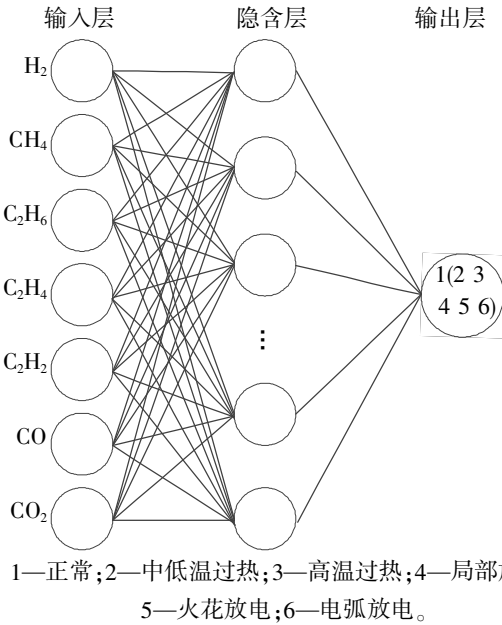


图 6 基于 BP 神经网络的特征气体诊断方法

Fig. 6 The diagnosis method of the characteristics gas based on BP neural network

故障诊断数据可划分为设备集、故障集和处理集^[21-24]。建立 3 种集合,收集故障类型,由于故障现象不能直接符号化,且与故障因子之间为一对多的表间关系,故使用数据库存储,将复合故障分解后,同一故障现象作为主表,故障因子作为子表,将不适合量化的描述有机结合,给人机交互对话界面提供交互信息。故障类型见表 2、3。

表 2 故障类型表

Table 2 Fault type table

故障编号	故障类型
1	正常
2	中低温过热
3	高温过热
4	局部放电
5	火花放电
6	电弧放电

随着数据库系统规模的不断扩大及信息的敏感性不断提高,对数据库的安全要求也日渐提高,安全

表 3 故障诊断表

Table 3 Fault diagnosis table

诊断结果	设备 ID	故障编号	故障原因	处理意见
R ₁	F101	3	冷却风扇、油泵有故障;冷却管结垢。	修理或更换有故障设备;清除冷却管积污。
R ₂	T206	5	套管均压球非正常状态;套管穿缆导管电位悬浮。	检查套管均压球;修理或更换有故障设备。
R ₃	D306	6	瓷件表面积污,盐分高。	带电清洗或者停电清除积污。

管理是数据库管理的一个必要组成部分,系统通过后台的安全访问控制以及前台应用程序的权限设置来实现数据安全。

4 数据库实现

数据库是系统录入原始数据的基本工具,同时也是软件进行中间运算与统计功能的存储媒介;因此数据库表的设计应尽量避免用户重复输入,减少数据空间占用,方便编程、查询与统计运算,最终保证模拟结果的输出符合实际。

4.1 数据库建表

经过上面的需求分析和概念结构设计以后,得到数据库的逻辑结构现在就可以在 MySQL 数据库系统中实现这个数据库逻辑结构。下面仍以系统 IED 设备列表为例,列举该系统数据库中几个数据结构的实现过程,利用 CREATE TABLE 命令数据库建立 IED 设备信息主表。

```
CREATE TABLE `jy_base_ied` (
  `ied_id` int(11) NOT NULL,
  `chest_code` varchar(20) NULL,
  `ied_name` varchar(200) NOT NULL,
  `ied_cycle` float NULL,
  `ied_type` char(1) NULL,
  `ied_status` int(11) NULL,
  `ied_server_ip` varchar(15) NULL,
  `remark` text NULL,
  PRIMARY KEY (`ied_id`)
);
```

4.2 存储过程的使用

在智能变电设备监控与决策辅助系统运行的过程中,会在数据库中频繁查找或更新各种相关信息,为了提高系统的运行效率,采用存储过程的增删改查机制。存储过程具有执行效率高、共享性好、功能强大、使用参数方便等优点。部分存储过程的 SQL 代码如下。

```

CREATE DEFINER = CURRENT_USER PROCEDURE
`pro_jy_insert_res`()
BEGIN
FOR
select obj_id from jy_base_obj;//@ 查询系统基础设备列表中的设备 ID
DECLARE result_alarmgroup CURSOR
.....
FOR
INSERT INTO jy_base_testlog (fname,ftype,fvalue,logdate)
VALUES (`pro_jy_insert_res`,`pro`,`job`,now());//@ 向基础表的测试日志表中插入相关日志信息
open result_alarmgroup;
END;

```

4.3 系统 SSH 架构的 Hibernate 数据库封装

该系统通过 SSH 框架中的 Hibernate 作为对象关系映射框架，它对 JDBC 进行了非常轻量级的对象封装，实现与后台数据库的连接。通过 Hibernate 链接数据库之后，可以在 Servlet/JSP 的 Web 应用中随心所欲的使用对象编程思维来操纵数据库，在应用 EJB 的 Java Web 架构中取代 CMP，完成数据持久化的重任。关键代码如下：

```

<properties>
<! --配置 hibernate 方言为 MySQL-->
<property name="hibernate.dialect" value="org.hibernate.dialect.MySQL5Dialect" />
<! --配置 hibernate 链接驱动-->
<property name="hibernate.connection.driver_class" value="org.gjt.mm.mysql.Driver" />
<! --配置 MySQL 的用户名和密码-->
<property name="hibernate.connection.username" value="root" />
<property name="hibernate.connection.password" value="123456" />
<! --配置程序链接地址端口-->
<property name="hibernate.connection.url" value="jdbc:mysql://127.0.0.1:3306/aa?useUnicode=true&characterEncoding=UTF-8" />
</properties>

```

4.4 SSH 框架中 SQL 语句的优化

由于系统在运行中会反复对数据进行大量的操作，在系统编写代码中也要反复使用 SQL 语句，所以采用 iBATIS 框架中的 Sql Maps 功能，对系统的代码编写以及 SQL 语句的使用进行优化。

iBATIS 是一个较为灵活方便的 ORM 框架，它提供了数据库查询的自动对象绑定功能，SQL Maps 作为整个 iBATIS.net 的核心，可以显著的节约数据库操作的代码量。SQL Maps 使用一个简单的 XML 文件来实现从实体到 SQL statements 的映射，通过

ML 描述映射 dotnet 实体类，用 20%的代码来实现 80%ADO.NET 的功能。部分代码如下：

```

<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<sqlMap>
<! -- 查询避雷器实时信息 -->
<sqlid id="selectBlqForReal">select*from v_blq_real o </sqlid>
<! -- 增加设备基础信息的配置 -->
<sqlid id="addBaseInfoConf">
insert into
jy_conf_equ_baseinfo(equ_code,equ_type_code,
equ_name,station_id,equ_voltage,
equ_phase,equ_company,platform_code) values(?,?,?,?,,?,
?,?)
</sqlid>
<! -- 修改设备基础信息的配置 -->
<sqlid id="updataBaseInfoConf">
update jy_conf_equ_baseinfo o set equ_type_code = ?,
equ_name=?,station_id=?, equ_voltage=?,equ_phase=?,
equ_company=?,platform_code=? where equ_code=?
</sqlid>
<! -- 删除设备基础信息的配置 -->
<sqlid id="removeBaseInfoConf">delete from jy_conf_e-
qu_baseinfo</sqlid>
</sqlMap>

```

5 数据库应用

该系统数据库应用图形—数据一体化和数据预处理的设计思想，使得软件结构更加合理，数据维护更便捷，进一步提高了数据一致性和安全性以及系统实时性。基于以上设计实现的统一标准的变电设备状态监控与决策辅助系统，收集变电站监测数据，并实现与监测主站的交互，可对被监测设备的简况状况进行评价和分析，并对相关数据进行整合。

该系统数据库已某变电站智能化改造工程中投入使用，系统较以前传统变电设备的监控与故障诊断系统来说，提供了便利的数据统计、查询功能，具有较快的响应速度，针对统一的设备传输规范，实现对各类变电设备运行状态的实时感知，监测预警，分析诊断和评估预测。系统实现后对油色谱历史数据进行查询后得到的界面见图 7。

6 结语

变电设备作为智能电网输电的重要物理环节，其智能化升级既要符合当前发展现状，又要考虑未来发展前景。文中设计实现了统一标准的变电设备状态监控与决策辅助系统数据库，讨论了智能变电设备在线监测决策与辅助系统的相关功能，通过对

图7 系统数据库应用实例

Fig. 7 The example of database application

数据库进行规范化,建立索引架构视图、使用存储过程、采用SSH框架下的hibernate对数据库进行封装,优化SSH框架下的SQL语句,收集变电站监测数据,并实现与监测主站的交互,可对被监测设备状况进行评价和分析,并对相关数据进行整合,在统一的数据平台下,可以无缝提取设备的有效信息实现对设备的远程监测和在线诊断,制定相关的维护检修制度,从根本上提高电力设备的安全性高、效性。

参考文献:

- [1] 黄新波. 变电设备在线监测与故障诊断[M]. 北京:中国电力出版社,2008.
HUANG Xinbo. On-line monitoring and fault diagnosis of power transmission equipment[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2008
- [2] 黄新波,贺霞,王霄宽,等. 智能变电站的关键技术及应用实例[J]. 电力建设, 2012, 33(10):29-33.
HUANG Xinbo, HE Xia, WANG Xiaokuan, et al. Key technology and applied example of intelligent substation [J]. Electric Power Construction, 2012, 33(10): 29-33.
- [3] 盛戈皞,刘亚东,江秀臣,等. 输变电设备智能化关键技术及发展趋势[J]. 华东电力, 2011(9):1379-1385.
SHENG Gehao, LIU Yadong, JIANG Xiuchen, et al. Key techniques and development trends of power transmission equipment intelligentization[J]. East China Electric Power, 2011(9): 1379-1385.
- [4] 韩如月,李俊刚,宋小会,等. 输变电设备状态监测系统设计[J]. 高压电器, 2012, 48(11):58-63.
HAN Ruyue, LI Jungang, SONG Xiaohui, et al. Design of condition monitoring system for power transmission and transformation equipment[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(11): 58-63.
- [5] 张毅. 基于数据驱动的考试系统数据库的设计与实现[J]. 计算机与现代化, 2010, 50(1): 160-161.
ZHANG Yi. Design and implementation of examination system database based on data-driven[J]. Computer and Modernization, 2010, 50(1): 160-161.
- [6] 史亚斌. 高压开关设备可靠性数据库的开发与应用[J]. 高压电器, 2014, 50(6): 133-138.
SHI Yabin. Development and application of the high-voltage switchgear reliability database[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(6): 133-138.
- [7] 吴海滨,李庆民,曾伟,等. 分布交互式仿真系统数据库的设计与实现[J]. 计算机仿真, 2003, 20(3):40-42.
WU Haibin, LI Qingmin, ZENG Wei, et al. The design and realization of database system for distributed interactive simulation[J]. Computer Simulation, 2003, 20(3): 40-42.
- [8] 郭剑毅,申立中,马桂芳,等. 基于C/S与B/S的高校科研管理信息系统的设计与实现[J]. 计算机工程与应用, 2003, 39(1):215-217.
GUO Jianyi, SHEN Lizhong, MA Guifang, et al. Design and implementation of collegiate science research management information system based on C/S and B/S[J]. Computer Engineering and Applications, 2003, 39(1): 212-214.
- [9] 陈斯雅. 智能输变电设备状态评估诊断专家系统和可视化监测软件开发[D]. 上海:上海交通大学, 2012.
CHEN Siya. The development of visualization software and expert system of state evaluation and diagnosis for intelligent transmission and transformation equipment[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2012.
- [10] 赵建涛,兰芳. 基于J2EE的智能变电设备巡检系统的设计与实现[J]. 电力科学与工程, 2009, 25(11):51-55.
ZHAO Jiantao, LAN Fang. Design and implement of intelligent substation equipment inspection system based on J2EE[J]. Electric Power Science and Engineering, 2009, 25(11): 51-55.
- [11] 王胜辉,律方成,李和明,等. 高压电气设备紫外成像检测管理系统的开发与应用[J]. 高压电器, 2009, 45(4): 146-149.
WANG Shenghui, LYU Fangcheng, LI Heming, et al. Development and application of UV imaging detection management system for high voltage electrical equipment [J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(4): 146-149.
- [12] CAIXIN S. Present situation and development of condition on-line monitoring and diagnosis technology for power transmission and transformation equipment[J]. Electric Power, 2005, 38(2): 1-7.
- [13] GAN Degang, LIU Fan, DU Lin, et al. Research and implementation of on-line monitoring techniques for high voltage equipments in smart grid[C]//2010 International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE).[S.l.]: IEEE, 2010: 236-239.
- [14] HUANG Xinbo, WANG Zhuo, WANG Hongliang. New-style dielectric loss of transformer bushing on-line monitoring apparatus[J]. Advances in Information Sciences and Service Sciences(AISS), 2012, 4(23):215-223.
- [15] 冯波. 变电站SCADA系统数据库的设计与开发[D]. 济南:山东大学, 2013.
FENG Bo. Design and development of database for substation SCADA system[D]. Jinan: Shandong University, 2013.

- [16] ZHAO Feng, SUN Qiao, ZHAN Jingyu. The real-time database application in transformer substation hotspot monitoring system[C]//2014 16th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT). [S.l.]: IEEE, 2014: 941-944.
- [17] 段海新, CN B E, 杨家海, 等. 基于 Web 和数据库的网络管理系统的设计与实现[J]. 软件学报, 2000(4): 468-472. DUAN Haixin, CN B E, YANG Jiahai, et al. Design and implementation of a network management system based on web and database[J]. Journal of Software, 2000(4): 468-472.
- [18] 黄新波, 王娅娜, 刘林, 等. 变压器油色谱在线监测中 BP 神经网络算法分析[J]. 陕西电力, 2011, 41(6): 56-60. HUANG Xinbo, WANG Yana, LIU Lin, et al. Application of back propagation neural network in dissolved gas analysis based on transformer oil chromatographic on-line monitoring[J]. Shaanxi Electric Power, 2011, 41(6): 56-60.
- [19] 曾鸣, 黄立新, 邱柳青, 等. 基于连续蚁群优化算法的输变电设备检修决策模型[J]. 华东电力, 2012, 40(6): 1007-1011. ZENG Ming, HUANG Lixin, QIU Liuqing, et al. Transmission maintenance decision-making model based on ant colony optimization algorithm for continuous domains[J]. East China Electric Power, 2012, 40(6): 1007-1011.
- [20] 马叶芝, 焦彦军, 王东升. 变压器故障诊断中溶解气体的 PSO-WFCM 算法研究[J]. 高压电器, 2014, 50(1): 72-76. MA Yezhi, JIAO Yanjun, WANG Dongsheng. Detection of dissolved gas with PSO-WFCM algorithm for fault diagnosis of power transform[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(1): 72-76.
- [21] 钱羽, 胡邦喜, 叶辉, 等. 故障智能诊断数据库设计与应用[J]. 机械设计与制造, 2008(2): 16-18.
- QIAN Yu, HU Bangxi, YE Hui, et al. Database design in Intelligent fault diagnosis and application in tangshan steel cold rolling mill[J]. Machinery Design & Manufacture, 2008(2): 16-18.
- [22] 郭伟, 杨江平, 徐晨曦. 一种面向对象的故障诊断数据库设计[J]. 计算机工程与应用, 1999(10): 90-92. GUO Wei, YANG Jiangping, XU Chenxi. An object-oriented design technique of trouble shooting database [J]. Computer Engineering and Applications, 1999(10): 90-92.
- [23] 高吉普, 张沛超, 何旭, 等. 智能变电站保护系统可靠性的自动分析方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(15): 107-112. GAO Jipu, ZHANG Peichao, HE Xu, et al. An automatic reliability analysis method for protection systems in smart substations[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(15): 107-112.
- [24] 高吉普, 徐长宝, 戴宇, 等. 交换机端口安全策略在智能变电站中的应用研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(13): 117-122. GAO Jipu, XU Changbao, DAI Yu, et al. Research on application of switch port access control in smart substation [J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(13): 117-122.

黄新波(1975—), 男, 教授, 博士后, 研究方向为智能电网输变电设备在线监测理论与关键技术的研究。

张瑜(1988—), 女, 硕士研究生, 研究方向为智能电网输变电设备在线监测理论与关键技术的研究。

朱波(1975—), 男, 工程师, 主要研究方向为计算机管理信息系统。

(上接第 14 页)

- LIANG Yongliang, LI Kejun, NIU Lin, et al. A multilayer uncertain transformer condition assessment model [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(2): 74-78.
- [13] 熊浩, 孙才新, 杜鹏, 等. 基于物元理论的电力变压器综合状态评估[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2006, 29(10): 24-28. XIONG Hao, SUN Caixin, DU Peng, et al. Synthetic assessment of power transformer condition based on matter-element theory[J]. Journal of Chongqing University(Natural Science Edition), 2006, 29(10): 24-28.
- [14] 杨丽徙, 于发威, 包毅, 等. 基于物元理论的变压器绝缘状态分级评估[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(6): 55-58. YANG Lixi, YU Fawei, BAO Yi, et al. Classification evaluation of transformer insulation condition based on matter-element theory[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(6): 55-58.
- [15] 徐智. 电力变压器分层分部件状态评估研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2013. XU Zhi. The study on hierarchy and sub-unit condition assessment of power transformer[D]. Chongqing: Chongqing University, 2013.
- [16] 南方电网公司. 一次设备标准缺陷知识库[S]. 2007 China Southern Power Grid. Standard defects knowledge base of primary equipment[S]. 2007.
- [17] 何晓群. 多元统计分析[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2002. HE Xiaqun. Multivariate statistical analysis[M]. Beijing: Renmin University of China Press, 2002.
- [18] 罗玉波. 关于因子分析用于综合排名的一个注记[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2013, 35(4): 106-110. LUO Yubo. A note on application of factor analysis in ranking analysis[J]. Journal of Southwest University(Natural Science Edition), 2013, 35(4): 106-110.
- [19] TANG W H, SPURGEON K, WU Q H, et al. An evidential reasoning approach to transformer condition assessments[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 2004, 19(4): 1696-1703.
- [20] 彭祖赠. 模糊数学及其应用[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2007: 90-95. PENG Zuzeng. Fuzzy mathematics and its applications[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2007: 90-95.
- 曾丹乐(1990—), 女, 硕士研究生, 主要从事基于海量数据的输变电设备状态评估与缺陷诊断方向的研究。