

DOI: 10.7667/PSPC160779

电力系统操作人因可靠性分析及其数据库系统研究

文东山¹, 暴英凯², 章禹¹, 郭创新¹, 付红军³, 王景钢³

(1. 浙江大学电气工程学院, 浙江 杭州 310027; 2. 国家电网公司国家电力调度控制中心, 北京 100031;
3. 河南电力调度控制中心, 河南 郑州 450052)

摘要: 人为因素是影响电力系统操作可靠性的重要因素, 并受到越来越多的重视, 但人因数据的缺乏成了阻碍电力系统人因可靠性分析(HRA)领域发展的重要原因。在总结分析电力系统人因可靠性研究现状的基础上, 提出了电力系统操作相关的扩展认知模型及行为影响因子(PIFs)分类体系, 并设计开发了针对电力系统领域的人因数据库系统。所设计的数据库系统除了具有人因数据采集和管理等基本功能外, 还具有人因失误率(HEP)统计计算功能和数据共享机制。结果证明, 该数据库系统可以为验证已有的人因可靠性分析方法对电力系统操作的适用性及发展新的人因可靠性分析方法提供数据支持。

关键词: 电力系统操作; 人因可靠性; 人因可靠性分析方法; PIFs 分类体系; 人因数据库系统

Analysis of human reliability in power system operation and research on its database system

WEN Dongshan¹, BAO Yingkai², ZHANG Yu¹, GUO Chuangxin¹, FU Hongjun³, WANG Jinggang³

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 2. National Electric Power Dispatching and Control Center, State Grid Corporation of China, Beijing 100031, China; 3. Dispatching and Controlling Center of Henan Electric Power Corporation, Zhengzhou 450052, China)

Abstract: Human factor is important to power system operation reliability and getting increasing attention. However, the lack of method and data in human reliability analysis (HRA) is becoming an important reason for preventing the development of HRA in power system. In allusion to the status of HRA in power systems, this paper proposes an expanded cognitive model and PIFs hierarchy related to power system operation. Then a database system of human factor in power system is established, which has functions of data collection, data management, human error probability (HEP) calculation, and data sharing. Results show that the database system can provide data support for verifying the applicability of existed HRA method for power system operation and developing new HRA method.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51537010) and National High-tech R & D Program of China (863 Program) (No. 2015AA050204).

Key words: power system operation; human reliability; HRA methods; PIFs hierarchy; database system of human factor

0 引言

人为因素对电力系统操作可靠性的影响越来越显著, 但相比于核电、航空航天等对安全性要求更高的领域, 电力系统中人因可靠性方面的研究还处于起步阶段。目前, 已有学者对影响电力操作的人为因素进行了研究, 如: 文献[1]中分析了人为因素对电力设备检修的影响, 指出在设备定期检修中充

分考虑人为因素等情况而制定设备检修周期, 可以提高设备可用率; 文献[2]提出了针对电网人为可靠性分析的改进 CREAM 方法; 文献[3]采用改进的 CREAM 方法及贝叶斯网络对电力倒闸操作的人因可靠性进行量化分析; 文献[4]提出用 SLIM 方法量化分析电力系统操作人因失误概率, 并进行了算例分析; 文献[5]提出一种基于模糊克隆选择法的人为可靠性量化模型, 并将其用于电力系统安全评估。

但以上针对电力系统操作进行的人因失误量化分析大都比较粗糙, 或者只是假定人因失误率为某个特定值, 缺乏坚实的理论依据。此外, 由于目前

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51537010); 国家高技术研究发展计划(863 计划)(2015AA050204)

还没有专门针对电力系统操作提出来的人因分析方法, 大多都是借鉴其他领域的人因分析方法, 适用性和有效性都有待实际数据的验证。但目前还没有电力系统人因数据库系统建立及人因数据搜集工作的相关研究, 人因数据的缺乏成了制约电力系统操作人因可靠性研究发展的瓶颈。

在核电领域, 国内外研究者设计、建立了各具特色的人因数据库, 如英国基于实际操作数据的 CORE-DATA 数据^[6], 美国主要搜集硬件失效率和专家判断数据的 NUCLARR 数据库^[7], 以及中国核工业中主要以数据报告形式搜集的人因数据^[8]等。这些领域已有的人因数据库, 一方面可以作为建立电力系统人因数据库系统的重要参考, 但另一方面也普遍存在数据可追溯性差、数据结构单一、数据可靠性无法保证、数据管理和共享机制不完备等问题。

本文总结了电力系统人为操作特点, 研究了现有人因可靠性分析方法, 进而对电力系统任务场景进行分类、并对操作人员认知行为过程进行了研究。在此基础上建立了电力系统操作相关行为影响因子分类体系, 最后完成电力系统人因数据库系统设计。该数据库系统的数据信息具有完整性和通用性, 并不局限于特定的人因分析方法模型。数据库系统除了具有数据管理等基本功能外, 还具有人因失误率统计计算功能和数据共享机制。

1 电力系统操作人因可靠性分析

电力系统人因可靠性分析是建立电力系统人因数据库系统的重要基础和目的之一。一方面需要根据电力系统操作中人为影响因素的特点确定电力系统人因数据库系统中数据种类和结构; 另一方面电力系统人因数据库系统应能为电力系统人因可靠性分析及其他相关研究提供必要的的数据支撑。电力系统中涉及到人为因素的操作主要包括运行操作、检修操作和调度操作^[9]等。每类操作由于任务场景、操作对象不同, 涉及到的人为影响因素也有所差异, 因此下面分别从变电站运行、设备检修和电力调度等三个方面进行操作相关人因可靠性分析。

1.1 变电站运行操作人因可靠性分析

变电站运行操作主要包括一次设备操作和二次设备操作。一次设备操作如刀闸、断路器的分合闸控制, 复杂的母线倒闸操作等, 二次设备操作如保护装置的订制区切换、软压板退投等^[10]。其中涉及最多的倒闸操作^[11]是电网运行过程中的高风险环节, 从而变电运行事故次数也在整个电网生产中占有一定的比例。根据文献^[12]的分析, 基于 CREAM 认知模型的观察、解释、计划和执行等过程中每一

步都有可能发生人为失误。例如观察过程中有可能发生观察目标错误、错误辨识等失误; 解释过程中有可能发生诊断失败、决策失误和延迟解释等失误; 计划过程中有可能发生优先权错误和不适当的计划等失误; 执行过程有可能发生动作方式错误、动作顺序错误等人为失误。

1.2 设备检修操作人因可靠性分析

设备检修主要包括设备现场监测、状态评估、故障修复和更换等。其中在设备监测及状态评估过程中有可能发生数据统计错误、选用模型错误和状态判断偏离标准等错误。在故障修复过程中由于受到专业技能、技术经验、工作态度及精神状态等因素的影响容易发生各种人为失误, 带来的后果是设备检修质量不高, 甚至有可能发生检修后故障。

1.3 调度操作人因可靠性分析

目前, 电力调度员主要根据电网实时数据和个人经验对电网进行调度操作。虽然远动程序化控制和智能操作票系统的运用在很大程度上提高了电力调度操作的可靠性, 但是到目前为止, 调度操作过程中人的角色还不能完全被智能设备所取代, 人为因素对调度操作的可靠性具有很大影响^[13]。目前调度操作人因失误主要表现在状态感知水平不足、调度决策失误和调度操作失误等几个方面, 特别是在紧急事故场景下, 调度员的反应速度、操作经验和果断决策对加快故障恢复进程及减少事故后果损失具有重大影响。

2 电力系统人因数据库 PIFs 分类体系

2.1 现有人因可靠性分析方法中的 PIFs

现有人因可靠性分析方法是建立电力系统操作相关 PIFs 分类体系的重要参考和基础。人因可靠性研究领域发展至今, 已经建立了几十种人因可靠性分析方法^[14]。大部分方法都是在基本人为失误概率 HEP 的基础上对行为影响因子 PIFs 的作用进行修正, 不同方法的主要区别在于选取的 PIFs 种类以及修正方法的不同。例如最具代表性的 THERP、HCR、SLIM、CREAM 和 SPAR-H 方法^[15-18]等。以上五种方法基本包括了静态人因分析领域最典型的分析方法及 PIFs 选取标准。下面对这五种 HRA 方法中 PIFs 进行总结归纳, 有的 PIF 在不同方法中有不同表述, 如表 1 所示。表 1 中前面几行对应不同人因分析方法中具体包含的行为影响因子。最后一行将五种方法中所有 PIFs 综合汇总为 15 个基本项。

以上是对典型人因分析方法中 PIFs 总结。除了具体的 PIFs, 人因分析方法中重要因素还有任务单元或场景分类以及认知模型的建立。如 THERP 方

表 1 五种典型 HRA 方法中的 PIFs
Table 1 PIFs of five classical HRA methods

HRA 方法	行为影响因子
THEHP	工作任务和行为描述、完成任务的个人与小组、可用规程、外部行为影响因子、内部行为影响因子、恢复因子
SLIM	操作功能、班组、设计质量、压力、能力、规程意义、动机/士气、其他
HCR	工作任务和行为描述、诊断时间、执行时间、时间窗口、人机界面、认知水平
CREAM	多人合作质量、可用时间、操作时间段、任务复杂度、人机界面和操作支持、工作条件、操作人员经验、组织完备性、计划充分性
SPAR-H	可用时间、任务复杂度、人体工效学、压力/压力源、操作经验/培训、可用规程、工作流程
5 种 HRA 方法中 PIFs 综合汇总	工作任务和行为描述、完成任务的个人与小组/多人合作质量、任务有效时间/可用时间、操作时间段/时间窗口、任务复杂度、人体工效学/人机界面、工作条件、压力/压力源、操作经验/培训、可用规程、组织完备性/工作流程、计划充分性、认知水平、恢复因子

法中将任务过程分成不同的任务单元对应不同的基本人因失误率,对操作行为进行分类量化。CREAM 方法针对早期 HRA 方法缺乏认知心理学基础等问题,提出认知模型 COCOM 模型(Contextual Control Model),以及 IDAC 方法在 IDA 的基础上加入班组情境因素后形成的动态认知模型,都一定程度上对 PIFs 与 HEP 的相互影响机理给出了理论上的说明。由于电力系统任务场景的复杂性以及电力系统操作不同于其他领域的认知行为过程,在研究电力系统操作 PIFs 分类体系之前有必要对电力系统任务场景进行分类以及建立电力系统操作相关的扩展认知模型。

2.2 电力系统操作任务场景分类

电力系统任务场景复杂、种类繁多,不同任务场景下起主导作用的行为影响因子也是不同的。根据前面对电力系统人因可靠性分析,这里将任务情境分为调度操作、运行操作和检修操作三个基本类型的基础上,再各自按照时间主导型场景、过程主导型场景和应急型场景进行分类,如图 1 所示。

1) 时间主导型场景。时间主导型场景主要是指操作员长时间工作,随着时间增加,由于疲劳、工作强度等因素,人为失误率逐渐增加,在众多行为影响因子当中时间因素起主导作用,如系统状态的监视和设备调试等。

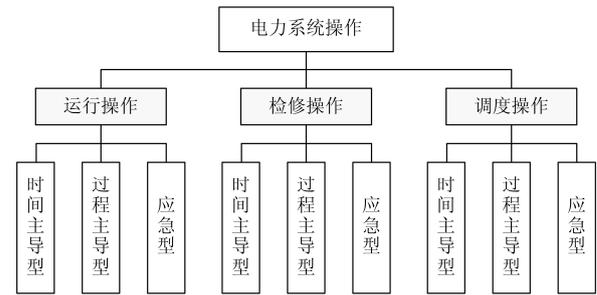


图 1 电力系统操作任务场景分类方法

Fig. 1 Classification of task scene in power system

2) 过程主导型场景。主要指操作任务具有多步骤和按照一定程序操作等特点,导致人因失误率比较大,步骤多样、过程繁琐等因素对人的行为影响起主导作用,如复杂任务下的倒闸操作和电力检修等。

3) 应急型场景。主要指系统或设备出现紧急故障时,操作员需要短时间做出反应采取措施,这种情况下操作员的个人心理素质、操作经验、技能水平,决策习惯等对人的操作起主导作用,如故障恢复过程等。

以上分类方法是根据电力现场操作经验及特点总结得到的,具有实际意义。

2.3 电力系统操作扩展认知模型

到目前为止,在人因可靠性领域还没有一种普遍认可的认知模型,不同的人因分析方法都是根据方法本身及分析对象的特点提出相应的认知模型。本文在分析电力系统操作特点及人因失误机理的基础上,结合 CREAM 方法认知模型^[19]及 IDAC 模型^[20]提出电力系统操作扩展认知模型,将操作过程分为监测发现、理解诊断、组织计划、操作执行和交流协调 5 个阶段,如图 2 所示。

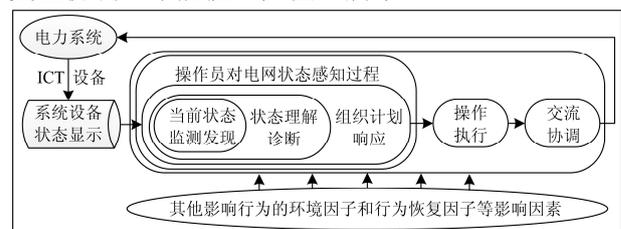


图 2 电力系统操作人员认知状态模型

Fig. 2 Situation awareness model of operator cognition in power system

1) 监测发现。主要指巡视检查发现异常,或者通过报警器等观察到异常状态的过程等。

2) 理解诊断。主要指正常情况下对操作对象评估,以及异常情况下对当前状态的理解判断过程,如发现报警器报警时要根据自己的经验判断确定故障位置和故障类型。

3) 组织计划。主要是指在正常情况下的任务分配、工作计划、事故预案制定,以及在异常情况下提出应对措施和响应计划等过程。

4) 操作执行。主要指物理操作,一般都是对照规程按步操作,如倒闸操作、按钮操作、旋转操作等。

5) 交流协调。主要指在分配任务以及操作执行的过程中根据交流反馈信息调整操作内容,除了正常情况的相互配合还有异常情况下的及时纠错,解除异常等。

每个环节之间是有机联系起来的,任何环节出问题都会导致操作失误。

2.4 电力系统操作 PIFs 分类体系

电力系统人因数据库中 PIFs 数据为了满足全面性、通用性和实用性的需求,一方面需要参考现有典型人因分析方法中的 PIFs 分类体系,如表 1 所示;另一方面也要符合电力系统操作实际和相关规程的规定。通过对《供电企业作业安全风险辨识防范手册》和《供电企业安全风险评估规范》的充分研究,并结合前面的电力系统人因可靠性分析及扩展认知模型对电力系统操作相关的 PIFs 进行分类总结,如表 2 所示。

表 2 电力操作中人为影响因素

Table 2 Human factor in power system operation

操作过程	人为影响因素
监测发现	观察目标错误、显示器故障、数据统计及参数选择错误
理解诊断	诊断基础(指导手册、操作技能,学历知识)、状态感知水平不足、诊断延迟、决策失误
组织计划	任务分配及工作小组安排是否合理、优先权错误、工作负荷太重、是否对操作前风险点进行预判、事故预案是否完备
操作执行	操作时间段合适与否、时间紧急、心理压力、作业难度、天气因素、操作规程、人机设计、设备配备、操作顺序错误、执行目标错误、操作熟练程度
交流协调	是否具备团队合作精神、交流方式是否容易理解、是否有监护把关、发现问题是否及时纠正(恢复因子 RFs)

以上是对电力系统操作相关 PIFs 按照扩展认知模型中的监测发现、理解诊断、组织计划、操作执行和交流协调等认知过程进行分类,每个子类下面对具体的影响因素进行了归纳和描述。在表 1 的基础上对数据采用层次化的结构体系进行组织,具体如图 3 所示。

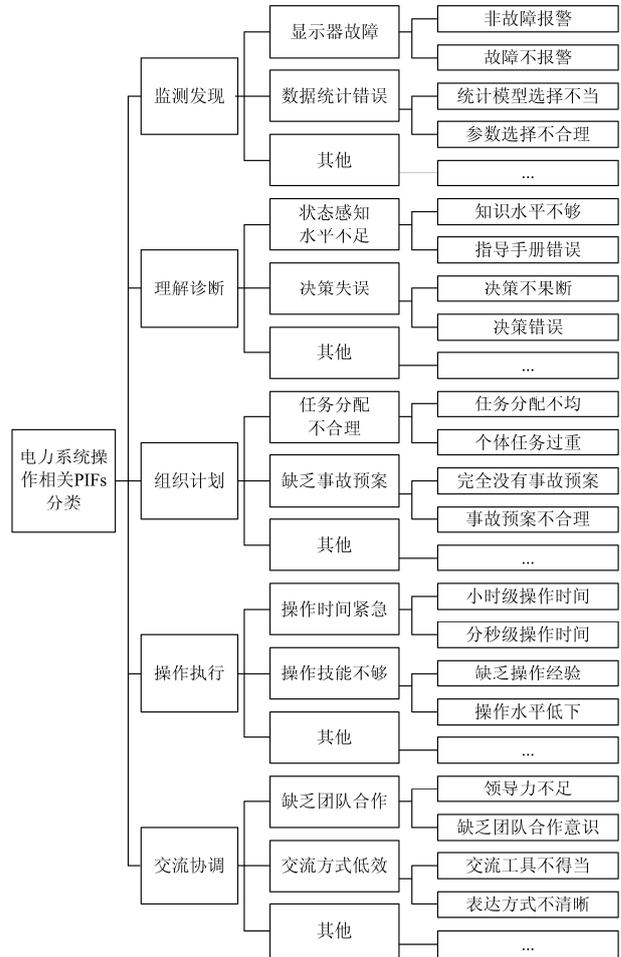


图 3 电力系统行为影响因子分类体系

Fig. 3 Classification of PIFs in power system

3 电力系统人因数据库中数据来源

电力系统操作实际经验数据是进行电力系统操作人因可靠性分析最可靠的数据来源,但也有其局限性:一方面绝大多数数据是日常例行任务操作数据,很少有 HRA 方法中所研究的紧急场景下的数据^[21];另一方面,由于操作中人为因素造成不良后果,实际工作人员在上报和反映情况的时候有所保留。所以完全使用实际数据并不能最好地反映真实情况。改进的方法是在尽量使用实际数据的基础上结合事故报告分析、模拟机实验和专家判断等数据形成互补。

3.1 事故报告分析数据

电力系统事故报告都是基于真实的操作事件,而且是发生过的小概率事件,对于电力系统操作人因分析具有很好的参考价值。文献[22]通过搜集德国许可事件报告系统(German licensee event report system)中的事故报告数据,对核电领域大部分典型操作基本人为失误概率进行了估计,在验证了

THERP 方法可靠性的同时, 也对 THERP 基本数据库进行了补充。但是在研究过程中也遇到几个难点: 1) 相应操作的频率很难获得; 2) 相应的 PIFs 信息不够全面。这也是利用事故报告分析搜集数据的普遍问题。可以通过事故现场回访等方式进行数据再搜集。

3.2 模拟机实验数据

模拟机实验即通过模拟操作人员、操作时间和操作环境等条件进行操作实验。例如文献[23]提出的调度员培训评估仿真系统, 就是对操作员培训过程中各种操作场景下的人因失误数据进行记录分析。通过这种方法可以获得任意场景下的数据。但是缺点是费时费力, 而且很难控制场景的连续性。

3.3 专家判断数据

专家判断法在人因可靠性分析领域使用得最为广泛。该方法有很多优点, 特别是在一些关键数据缺失的时候, 通过专家判断能够省时省力, 且获得的数据具有一定的可靠性。但是专家判断法的不足是主观性太强, 缺乏一致性, 不同专家评估结果的可能差异很大。

每种数据来源都有其优势和不足, 综合使用多种数据源可以起到优势互补的作用。

4 电力系统人因数据库系统功能需求分析

4.1 基本功能

为了便于数据管理, 电力系统人因数据库系统应该具备信息录入、数据查询、数据修改、数据维护、导入导出等基本功能。其中信息录入主要包括管理人员或操作员对操作任务基本信息、人因事件的后果、行为影响因子 PIFs、恢复因子 RFs 等信息的手动录入。数据查询包括按操作员、操作设备、操作时间、操作类型等分类提取出相应的人因事件信息。数据修改、数据维护功能应该严格设定权限。导入导出主要用于相同类型数据库之间的数据交换。

4.2 人因失误率计算功能

电力系统数据库系统的主要应用之一就是通过对大量数据的搜集统计计算出电力系统典型操作的人因失误率, 得到的人因失误率可以为验证现有 HRA 方法以及发展新的 HRA 方法提供数据支持。根据需求的不同, 失误率计算功能主要包括完全基于实际数据的人因失误率统计和基于综合数据的人因失误率统计两种方式。

4.3 数据共享机制

通过对其他领域现有人因数据库的分析, 发现大多存在数据不能共享的问题, 使得人因数据利用效率不高^[24]。由于我国电力企业的庞大性, 总公司与各级分公司以及分公司与分公司之间在分别搜集

人因数据之后通过一定的共享机制进行汇总分析能够更好地发挥电力企业的规模优势, 同时也能最大限度挖掘人因数据的应用潜力。

5 电力系统人因数据库系统的设计与实现

5.1 基本架构设计

根据前面的功能需求分析, 以及参考数据库的一般开发流程^[25], 确定电力系统人因数据库系统的设计开发流程如图 4 所示。下面分别介绍流程图中各个环节。

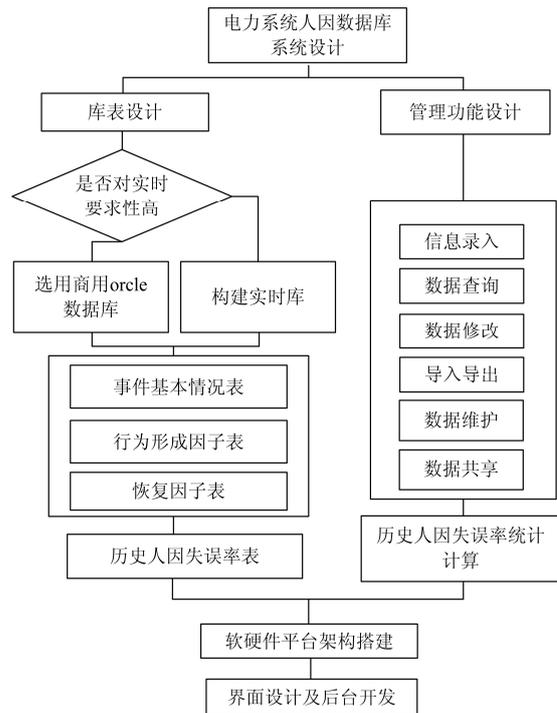


图 4 电力系统人因数据库系统设计开发流程

Fig. 4 Flow chart of design exploitation on database system

5.2 基本数据库表设计

电力系统人因数据库系统中数据库表包含的数据项如下所述。

1) 事件基本情况表。基本情况包括电力事件名称、事件编号、数据来源(如实际操作经验数据)、单位名称(如 XX 变电站)、操作人员或小组、操作类型(如检修操作)、场景类型(如应急主导型)、发生时间(精确到小时)、对应操作频率(如 30 次/月)。

2) 事件深层次描述表。任务的具体描述、操作相关设备名称及状态、事件后果、基本行为影响因子 PIFs 的描述、恢复因子 RFs、基于实际数据以及基于综合数据的人因失误率等。特殊人因事件的特殊影响因子, 用扩充表格和备注的方式进行完整记录。

5.3 数据库系统功能设计

根据前面的功能需求分析, 电力系统人因数据库系统功能模块主要包括基本功能、电力系统操作历史人因失误率统计计算和数据共享三大模块, 数据库系统的功能架构及各模块和数据源的逻辑关系如图 5 所示。下面分别对各个模块进行介绍。

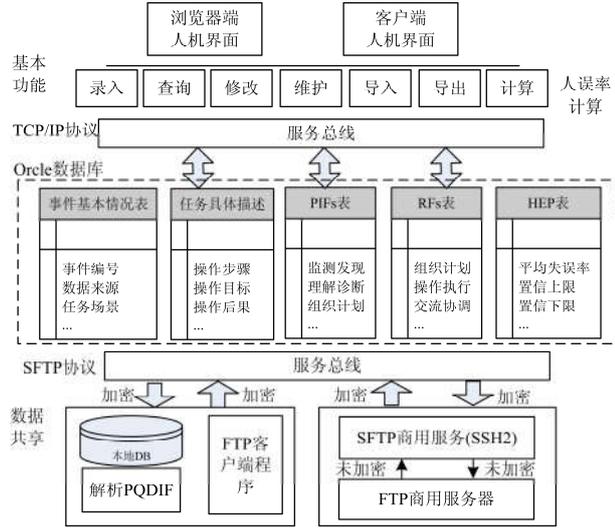


图 5 数据库系统功能架构

Fig. 5 Function architecture of the database system

1) 基本功能设计

信息录入、数据查询、数据修改和数据维护是电力系统人因数据库系统的基本功能需求。数据录入主要通过文本框和复选框的方式实现; 数据查询通过采用多重条件下数据库联合查询的方法实现; 数据修改和数据维护都通过标签页的方式展现出相应数据项的全景信息, 再对需要修改的数据细节进行修改; 导入导出功能通过 JAVA 编辑接口调用 ORACLE 数据导入导出功能。

2) 电力系统操作历史人因失误率计算

人因失误率计算功能的实现方法是通过 JAVA 面向对象编程包装成固定函数供后台调用, 下面对算法思想进行简单介绍。

由于直接统计计算出来的人因失误率属于平均失误率, 没有考虑电力系统实际操作行为个体差异, 即不同个体的认知水平、操作水平等都存在很大的不确定性, 不够合理。一种较好的处理方法是假设人因失误率服从某个概率分布, 通过统计出来的平均失误率来估计概率分布函数的主要参数, 这样可以分析原始数据的不确定性。下面采用贝塔分布^[26]来模拟。贝塔分布自变量严格处于[0,1]区间, 省去了对数正态分布的归一化处理过程; 同时也具有对数正态分布便于参数选择和数学处理的优点。贝塔

分布的分布函数为

$$f_{\alpha, \beta}(\theta) = \frac{1}{B(\alpha, \beta)} \theta^{\alpha-1} (1-\theta)^{\beta-1} \quad (1)$$

式中: $\alpha, \beta > 0$; $\theta \in [0, 1]$ 。

假设对某项操作 i , 假设人因失误概率为 θ_i , 且 $\theta_i \in [0, 1]$ 。如果独立操作 n_i 次, 并有 m_i 次失误的概率服从二项分布(式(2))。

$$p(m_i | \theta_i) = \frac{n_i!}{m_i!(n_i - m_i)!} \theta_i^{m_i} (1 - \theta_i)^{n_i - m_i} \quad (2)$$

式中: $m_i = 0, \dots, n_i$; θ_i 为先验概率。

而所得到的人因失误率观察值为

$$\theta_i \approx \frac{m_i}{n_i} \quad (3)$$

观察值相当于人因失误的似然概率。

将式(1)、式(2)和式(3)代入贝叶斯公式后得到人因失误后验概率分布为

$$p(\theta_i | m_i) = \frac{1}{B(\alpha_0 + m_i, \beta_0 + n_i - m_i)} \theta_i^{\alpha_0 + m_i - 1} (1 - \theta_i)^{\beta_0 + n_i - m_i - 1} \quad (4)$$

式中: $\alpha_0, \beta_0 > 0$; $\theta_i \in [0, 1]$; $m_i = 0, \dots, n_i$ 。

该分布仍然为贝塔分布, 只是将 α_0 替换为 $\alpha_0 + m_i$; β_0 替换为 $\beta_0 + n_i - m_i$, 这个过程称为贝叶斯更新。其期望为

$$\mu_i = \frac{\alpha_0 + m_i}{\alpha_0 + \beta_0 + n_i} \quad (5)$$

参数的选择, 根据 Jeffrey 法则, 选择 $\alpha = \beta = 0.5$ 。采用人为失误率的区间估计时可以选择 0.05、0.95 分位点 $q_{0.05}$ 、 $q_{0.95}$ 作为置信区间的上下限。人为失误率点估计时可以采用期望 μ_i 或者 0.5 分位点 $q_{0.5}$, 具体分位点的获取可以通过查表的方式。

3) 数据共享机制

本数据库系统采用 SFTP 的协议实现数据共享。SFTP(Secure File Transfer Protocol)可以为传输文件提供一种安全的加密方法。工作时一台 FTP 客户机通过加密将数据传输到 SSH2 服务器上, 另外的 FTP 客户机也通过解密技术从 SSH2 服务器上读取数据。整个过程使用 JAVA 编程实现。

5.4 数据库系统实现

电力系统人因数据库系统实现过程及使用的软硬件平台如下所述。

1) 软件平台。数据库系统采用 C/S(客户端/服务器)+B/S(浏览器/服务器)的方式实现^[27], 并用基于 IDEA 的 JAVA 语言进行开发, 界面设计开发使用 JDK 工具包, 前后台交互通过基于 JAVA 的数据库接口语言 JDBC(Java Data Base Connectivity)编程实

现, 数据库系统之间的数据交换采用 SFTP 协议。

2) 硬件平台。服务器的操作系统平台为 Windows2000 server, 数据库管理系统为 Oracle, 客户端的操作系统平台为 Windows98。通信协议采用 TCP/IP。数据全部存放在服务器上。在客户端, 一些相对专业的用户, 如 PSA 分析者可以在上面进行人因事件的定性、定量分析。而浏览器作为一个基本数据访问工具, 提供给普通用户如管理人员等进行一些简单的数据维护和人因数据查询工作。

6 结论

电力系统操作人因可靠性分析起步比较晚, 进一步的发展缺乏足够数据支撑。本文在对电力系统人为操作特点总结分析基础上, 提出了电力系统操作扩展认知模型和行为影响因子分类体系, 并设计开发了电力系统人因数据库系统。该数据库系统除了具有数据录入、查询、修改、导入导出和数据维护等基本管理功能, 还具有人因失误率的统计计算功能和数据共享机制。

本文提出的人因数据库既能为电力系统操作人因可靠性分析提供数据支撑, 也可以通过数据挖掘技术等方法对历史数据中的行为影响因子进行深度提炼分析, 为发展新的人因可靠性分析方法提供思路。目前, 该电力系统人因数据库系统已在工程上进行初步应用, 其功能得到了验证。随着工程应用和人因数据的积累, 该数据库系统将会得到进一步的完善。

参考文献

- [1] 暴英凯, 王逸飞, 文云峰, 等. 考虑人为因素的设备可靠度评估及定检周期决策[J]. 电网技术, 2015, 39(9): 2546-2552.
BAO Yingkai, WANG Yifei, WEN Yunfeng, et al. Equipment reliability evaluation and maintenance period decision considering the impact of human factors[J]. Power System Technology, 2015, 39(9): 2546-2552.
- [2] 陆海波, 王媚, 郭创新, 等. 基于 CREAM 的电网人为可靠性定量分析方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(5): 37-42.
LU Haibo, WANG Mei, GUO Chuangxin, et al. A quantitative method for human reliability in power system based on CREAM[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(5): 37-42.
- [3] BAO Y, TANG J, LU H, et al. Analysis of human reliability in power system switching operation considering dependency of operators[C] // Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2013 IEEE PES Asia-Pacific. IEEE, 2013: 1-6.
- [4] BAO Y, TANG J, WANG Y, et al. Quantification of human error probability in power system based on SLIM[C] // Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2014 IEEE PES Asia-Pacific. IEEE, 2014: 1-5.
- [5] WANG Ansi, LUO Yi, TU Guangyu, et al. Quantitative evaluation of human-reliability based on fuzzy-clonal selection[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2011, 60(3): 517-527.
- [6] KIRWAN B B, TAYLOR-ADAMS G S E. CORE-DATA: a computerized human error database for human reliability support[C] // The 1997 IEEE 6th Conference on Human Factors and Power Plants, 1997: 7-9.
- [7] GERTMAN D I, GILMORE W E, GALYEAN W J, et al. Nuclear computerized library for assessing reactor reliability (NUCLARR): volume 1, summary description[R]. EG and G Idaho, Inc., Idaho Falls (USA), 1988.
- [8] 张炯. 核反应堆人误数据的收集[J]. 核动力工程, 1991, 12(3): 27-29.
ZHANG Jiong. Collection of human error data on nuclear reactors[J]. Nuclear Power Engineering, 1991, 12(3): 27-29.
- [9] 暴英凯. 人为因素对电力系统运行可靠性影响分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
BAO Yingkai. Impact analysis of human factors on power system operation reliability[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.
- [10] 陆海波. 电网人因可靠性及操作风险研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
LU Haibo. Research on human reliability analysis and operation risk in power system[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.
- [11] 汪洪明, 丁罕, 胡一峰. 倒闸操作中几起接地闸刀典型异常实例分析[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(23): 125-127.
WANG Hongming, DING Han, HU Yifeng. Typical abnormal cases analysis about earthing switches operation[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(23): 125-127.
- [12] 暴英凯, 文云峰, 韩宇琦, 等. 影响电力系统运行可靠性的人为失误分析与建模[J]. 电网技术, 2016, 40(2): 500-507.
BAO Yingkai, WEN Yunfeng, HAN Yuqi, et al. Analysis and modeling of human errors in power system reliability evaluation[J]. Power System Technology, 2016, 40(2): 500-507.
- [13] 方勇杰, 鲍颜红, 徐泰山, 等. 人工紧急调控与自动紧

- 急控制协同防御[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(22): 6-11.
- FANG Yongjie, BAO Yanhong, XU Taishan, et al. Coordinated prevention based on manual and automatic emergency control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(22): 6-11.
- [14] 李鹏程. 核电厂数字化控制系统中的人因失误与可靠性研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2011.
- LI Pengcheng. Study on human error and reliability in digital control system of nuclear power plant[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2011.
- [15] SWAIN A D. THERP—technique for human error rate prediction[C] // Proc Symp Quantification of Human Performance, 1964.
- [16] The SPAR-H human reliability analysis method[M]. Division of Risk Analysis and Applications, Office of Nuclear Regulatory Research, US Nuclear Regulatory Commission, 2005.
- [17] HANNAMAN G W, SPURGIN A J, LUKIC Y. A model for assessing human cognitive reliability in PRA studies[C] // Conference Record for 1985 IEEE Third Conference on Human Factors and Nuclear Safety, 1985.
- [18] AI Q, FAN S, PIAO L. Optimal scheduling strategy for virtual power plants based on credibility theory[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 48-55.
- [19] HOLLNAGEL E. Cognitive reliability and error analysis method [M]. Amsterdam: Elsevier, 1998.
- [20] DEGRAUWE M G R, NYS O, DIJKSTRA E, et al. IDAC: An interactive design tool for analog CMOS circuits[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 1987, 22(6): 1106-1116.
- [21] LIAO H, GROTH K, STEVENS-ADAMS S. Challenges in leveraging existing human performance data for quantifying the IDHEAS HRA method[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2015, 144: 159-169.
- [22] 张姝, 谭熙静, 何正友, 等. 基于层次分析法的复杂配电网健康诊断研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(13): 7-13.
- ZHANG Shu, TAN Xijing, HE Zhengyou, et al. A study of health diagnosis for complex distribution grid based on analytic hierarchy process[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(13): 7-13.
- [23] BAO Y, LI Z, WEN D, et al. Development and design of dispatcher training simulation evaluation system based on IDAC[C] // Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2015 IEEE PES Asia-Pacific. IEEE, 2015: 1-5.
- [24] 白加林, 高昌培, 王宇恩, 等. 基于数据源共享的广域智能保护及控制系统研究与应用[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(18): 157-162.
- BAI Jialin, GAO Changpei, WANG Yuen, et al. Research and application of wide-area intelligent protection and control system based on the shared data source[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(18): 157-162.
- [25] 胡勇. 主动配电网用户侧能量管理系统设计与实现[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(16): 149-155.
- HU Yong. Design and implementation of user energy management system on active distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(16): 149-155.
- [26] PREISCHL W, HELLMICH M. Human error probabilities from operational experience of German nuclear power plants, Part II[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2016, 148: 44-56.
- [27] 金小明, 吴鸿亮, 周保荣, 等. 电网规划运行数据库与集成管理平台的设计与实现[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(15): 126-131.
- JIN Xiaoming, WU Hongliang, ZHOU Baorong, et al. Design and implementation of integrated database management platform for power grid planning and operation[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(15): 126-131.

收稿日期: 2016-05-30; 修回日期: 2016-10-25

作者简介:

文东山(1990—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行风险评估与电力系统人为操作可靠性研究; E-mail: 1131545701@qq.com

暴英凯(1989—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统运行风险评估及操作可靠性;

章禹(1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为输变电设备风险评估、可靠性分析。

(编辑 姜新丽)