

一种高压输电架空线路综合专家系统的设计

输电架空线路是电网的重要组成部分，对其进行在线检测，实现故障诊断、状态、风险与经济性评估对于电网安全、经济运行具有重要的作用。设计了一种具备人工智能的高压输电线路综合专家系统，阐述了该系统的设计方案与框架，给出了状态评估、风险评估和经济性评估的模型以及多维度评估的实现方法。

常 安 钱 海 王 奇/南方电网超高压输电公司检修试验中心
林冰垠 邓红雷/华南理工大学电力学院



常 安/工程师

高压架空输电线路是智能电网的重要组成部分，对其状态进行监测，获取线路自身运行及周边环境状态等动态信息，对于输电线路的安全预警和辅助决策，提高运行维护、生产管理的精益化水平具有重要作用^[1-3]。部分文献采用故障树、蒙特卡罗和灰色关联度等人工智能算法分别对输电线路运行状态、运行风险以及稳定性进行了评估，得到了输电线路可靠性的指标^[4-8]，但是输电架空线路是一个复杂的体系，单个评价体系并不能完整地对其做出公正的评价。针对现有架空输电线路评估模型功能单一的缺点，本文在数字电网统一功能架构的前提下，按照南方电网的要求，设计了一种输电线路综合专家系统，从状态、风险和经济性等方面，对输电线路系统进行多维度的评价，实现了各类设备数据的统计分析、状态评价和预警等高级应用功能，对于输电线路安全、稳定和经济运行具有非常重要的意义。

关键词/Keywords

架空输电线路·
综合专家系统·
多维度评估·

架空输电线路综合专家系统的功能结构

本输电线路综合专家系统是在数字电网的统一框架下设计的，系统的设计遵循以下几个原则。

- 1) 一体化原则。即数据的一体化，体系框架的一体化，应用的一体化，与数字电网其他系统集成的一体化。
- 2) 开放性原则。即采用开放性的体系结构，方便与数字电网其他系统的集成。
- 3) 可扩展性原则。即要有较强的扩展性，为未来的功能与应用扩展预留接口。
- 4) 先进性、实用性、可靠性和标准化相结合的原则。即系统在业务上严格按照南方电网公司相关规范和各种管理规定、办法进行设计，切合供电企业生产管理的实际需要，符合操作人员和管理人员的工作习惯，符合供电企业的生产管理规范。技术先进，系统稳定安全。

输电线路综合专家系统的功能设计如图1所示，采用目前比较流行的B/S结构和J2EE软件实现。它由数据集成层、高级应用层和展示层组成。数据集成模块主要对架空输电线路在线监测数据、台账数据和检修试验缺陷等数据进行收集、处理、分析和储存，实现和外部系统的数据连接。高级应用层由故障诊断模块、智能预警模块、状态评价模块、风险评估模块、经济性评估模块和多维度分析与辅助决策等几大功能模块组成。展示层综合展示高级应用产生的预警信息、故障信息、

国家高技术研究发展(863)计划
(2012AA050209)。

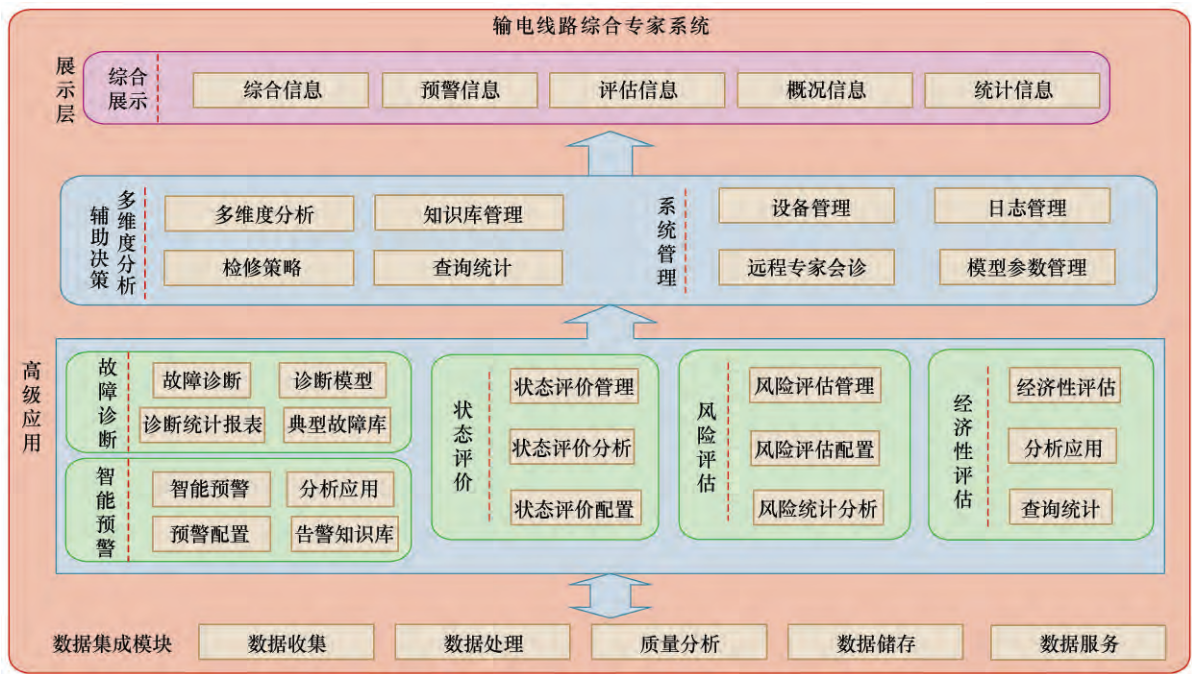


图1 输电线路综合专家系统功能结构图

评估信息和统计分析信息等。下面对高级运用层的各个模块进行介绍。

高级运用层各主要模块介绍及其实现方案的研究

1. 状态评估模块

常用的输电线路运行状态评估模型和算法有故障树、蒙特卡罗和模糊算法等。本系统采用基于贝叶斯网络对架空输电线路运行状态进行评估。它由影响输电线路运行状态的七个因素即杆塔、绝缘子串、导地线、金具、基础及防护设施、防雷及接地装置以及线路防护区组成，如图2所示。其中，每个因素又细分为多个子因素，每个因素以及多个子因素分为正常、注意、异常和严重四种运行状态，七个因素和子因素分别作为上一级的条件属性集（指标参量），线路的运行状态作为决策属性，构建输电线路运行状态评估的贝叶斯网络结构，根据样本训练得到条件概率表。利用贝叶斯网络特有的双向推理技术，能够通过因果推理判断线路的运行状态，还能由诊断推理识别状态隐患；当存在评估偏差时能够通过自反馈系统预警和修正，实时动态修正评估数据库及网络结构和参数以适应更新，切实保障输电线路的健康运行。

2. 风险评估模块

风险评估模块在传统层次分析法的基础上，将信息熵与层次分析法融合，综合考虑风险概率、风险产生的后果和风险权值，应用互信息来量化风险后果严重度，再利用层次-熵组合方法取代传统层次分析法计算权值，并用最小二乘法来优化权值，多重组合、逐层推理计算输电线路运行综合风险值，形成一种自主优化的评估模型。克服了纯主观分析思想，提高了输电线路风险评估的准确性和输电线路运行的可靠性，为及早发现线路运行的潜在风险、降低线路运行的可能风险及减少线路运行的风险损失提供了有力支持，有利于风险的分析、管理和决策。对应的多重组合优化的架空输电线路运行风险信息化评估方法的评估流程示意框图以及层次化结构如图3、图4所示。

3. 经济性评估模块

本项目计划采用专家咨询德尔菲法、层次分析法和模糊综合评价相结合的方法对输电线路经济性进行评估，建立全面评价输电线路系统经济性的评价指标体系^[8]，如图5所示。首先采用专家咨询德尔菲法来选择和设计指标，再将层次分析和德尔菲法有机结合构建评价指标体系、确定

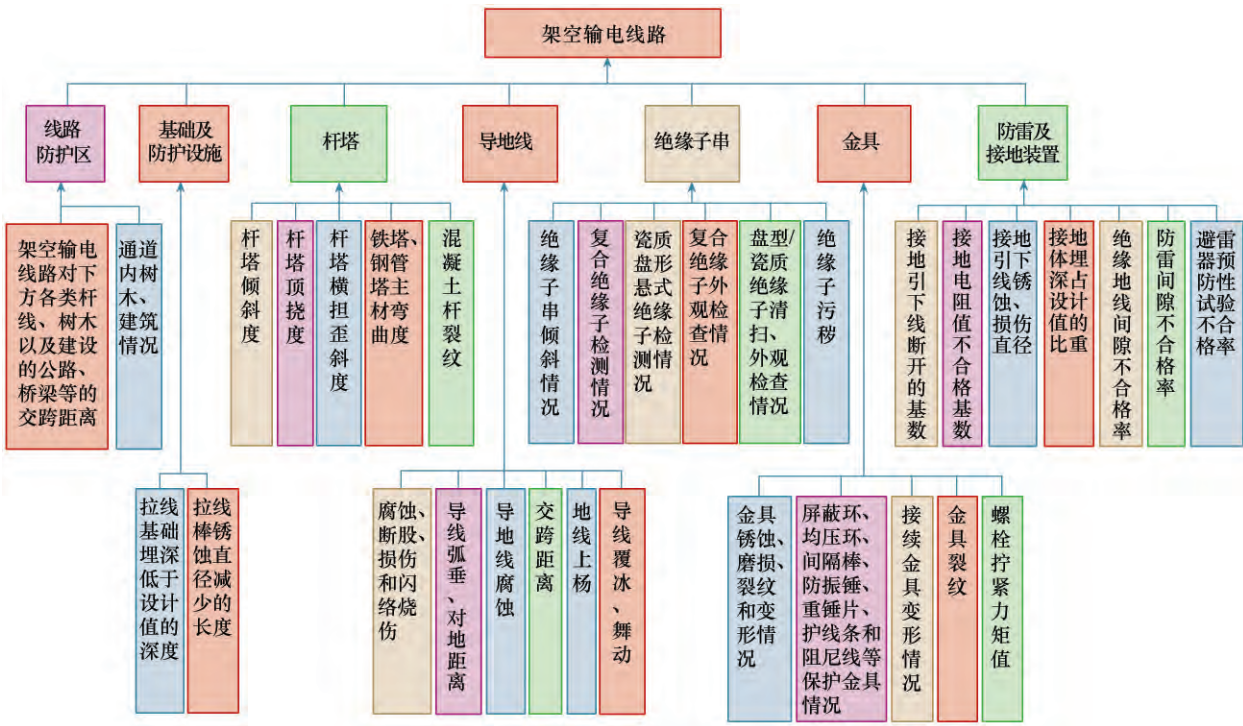


图2 架空输电线路运行状态评估的贝叶斯网络结构图

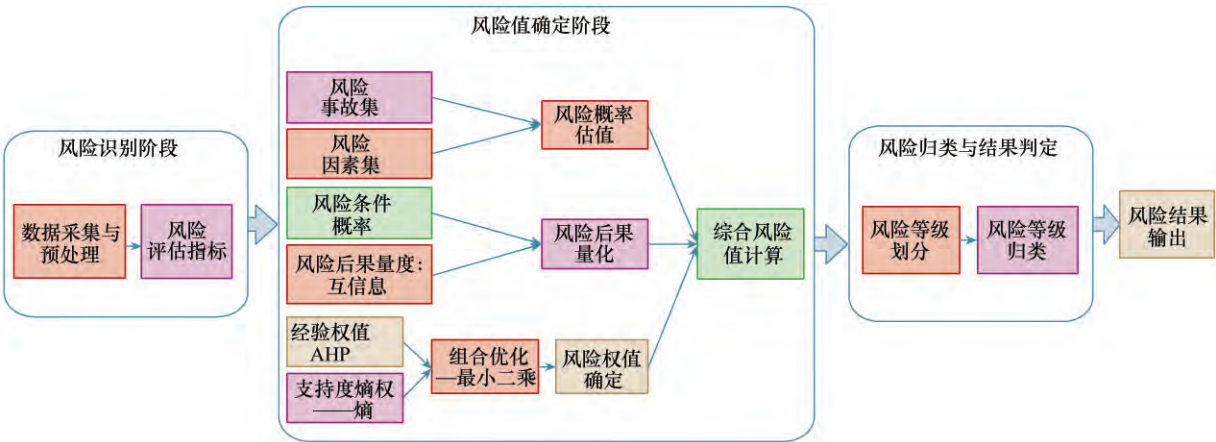


图3 架空输电线路运行风险信息化评估方法的评估流程示意框图

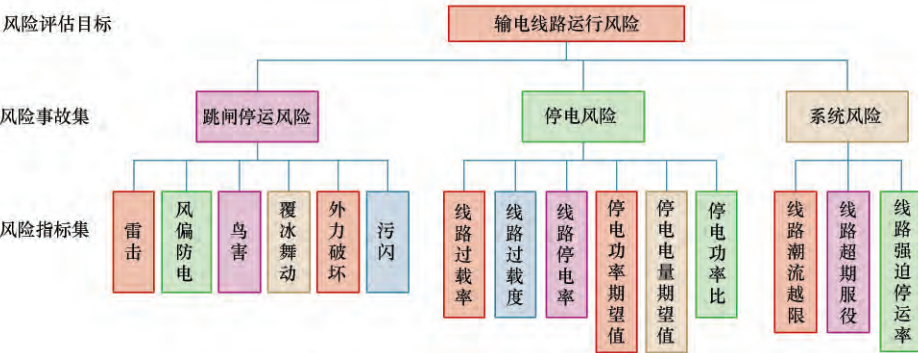


图4 架空输电线路运行风险评估的层次化结构

指标权重，然后利用模糊评价中隶属度的概念确定指标的评价标准，最后应用层次分析综合计算综合评价结果。运行经济性是从运行时的直接效益来考虑，包括考虑输电线路总体的利用率、线损率以及平均负荷率的高低。年费用则是对输电线路的投资、运行维护费用和损耗费用的折算值。指标停电损失主要从停电时间的长短来考虑，分为计划外停运和计划内停运时间。

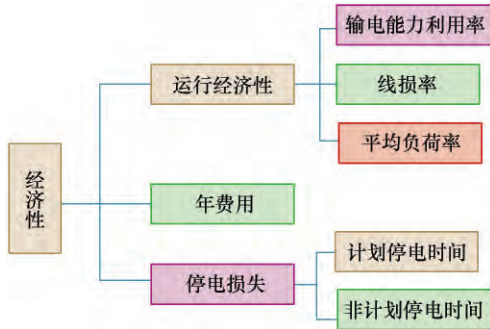


图5 输电线路系统经济性评估模型

4. 多维度评估模型

多维度评估与辅助决策方法模型采用点面结合、多阶段对输电线路状态、风险与经济性进行评估的方法，如图6所示。对输电线路状态、风险和进行经济性进行评估，为检修、技术改造提供支持。点：各个输电线路各个部件的状态、风险的评价；面：线路总体状态、风险综合评估。对某一时间断面上的单一输电线路的点进行评价，可以找出输电线路存在的具体问题；由综合评分结果，描述输电线路整体水平。如输电线路状态分析，可以得到某个时间点的总体状态和各个部件的状态水平，便于对影响整个线路状态的部件进行分析，以便做出合适的检修方案。多阶段评价：线路状态、风险和进行经济性横、纵向对比和变化趋势评估。描述输电线路状态、风险和进行经济性的变化，根据指标数值和评分的变化趋势把握输电线路的发展趋势，为合理的安排检修、线路改造提供决策支持。

5. 故障预警与诊断模块

故障预警是对输电线路运行的预警信息进行实时的监控，对预警信息进行处理、分析应用、策略管理和配置等相关操作，及时了解输电线路出现的异常运行状态，当发生预警时，能迅速以



图6 多维度评估模型

预警为核心，确定故障原因和故障位置，以便及时修复故障，保证设备和输电线路的正常运行。系统获取原始的监测数据后，经过预警引擎设置的规则过滤处理，产生各种类型、不同等级和不同状态的警情信息。这些警情信息根据系统配置的不同的通知策略，以不同的方式通知到用户，再由用户决定进一步的处理流程。

故障诊断模块是指系统对产生预警的设备采用智能算法，结合信息技术，根据状态数据、故障知识库以及以往积累的经验进行类比及推理，以得出正确的故障诊断结论。本系统故障诊断算法主要采用故障树方法，通过贝叶斯、神经网络和粗糙集等多参量融合的辅助方法对经过处理的状态量与故障诊断相关的设备相关信息进行诊断，得出故障诊断结果，包括可能的故障、建议再进行的诊断试验以及故障处理建议。

结束语

基于数字电网统一框架，建立了基于多角度、多维度的智能化高压输电线路专家系统，该系统能实现对输电线路健康状态动态评估、故障预警、故障诊断、运行风险评估、状态检修策略、经济性分析和多维度辅助决策等多种功能，该输电线路专家系统构建完成后，将应用于南方电网超高压公司输电线路的监测和运行管理当中，对保障超高压输电线路安全、经济运行必将起到非常大的作用。

参考文献

[1] 盛戈峰，江秀臣，曾奕. 架空输电线路运行和故障

- 综合监测评估系统 [1]. 高电压技术, 2007, 33 (8): 183-186.
- [2] 杨勋晓. 高压输电线路在线监测系统的设计与研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2011.
- [3] 王凯, 蔡炜, 邓雨荣, 等. 输电线路在线监测系统应用和管理平台 [J]. 高电压技术, 2012, 38 (5): 1274-1280.
- [4] 韩富春, 董邦洲, 贾雷亮, 等. 基于贝叶斯网络的架空输电线路运行状态评估 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2008, 20 (1): 102-104.
- [5] 郑传材, 管霖, 梁英杰. 基于影响因素识别的架空输电线路可靠性管理系统和评估模型 [J]. 电网技术, 2009, 33 (20): 158-163.
- [6] 韩富春, 周林伟, 贾雷亮, 等. 基于灰色关联度的架空线路运行状态的评价 [J]. 高电压技术, 2009, 35 (2): 399-402.
- [7] 牛春节. 高压架空输电线路可靠性评估方法的研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2008.
- [8] 帅海燕, 龚庆武, 陈道君. 计及污闪概率的输电线路运行风险评估理论与指标体系 [J]. 中国电机工程学报, 2011, 31 (16): 48-54.
- [9] 罗凤章. 现代配电系统评价理论及其综合应用 [D]. 天津: 天津大学, 2009.
- (收稿日期: 2014-02-08) EA

信息动态

百通推出新一代工业安全解决方案

百通 (Belden Inc.) 是信号传输解决方案领域关键任务应用的全球领导者。该公司日前宣布推出适用于新一代工业控制系统的 Tofino 安全解决方案。新的 Tofino Xenon 和 Tofino Configurator (TC 2.0) 能够提供业界独特的灵活性和定制性, 并使得网络管理者无须停机便可轻松升级现有的系统。



百通工业安全硬件和软件解决方案不断更新和演变, 提高了产品定制能力和易用性。这些新一代产品的增强性功能使得石油天然气、电力和制造业等领域的运行系统轻松实现安装升级。这些新的功能特点通过提高总体的数据安全性 and 降低运营风险, 最终将网络正常运行时间最大化。

Tofino Xenon 能够耐受最严酷的条件, 同时保证生产网络的数据安全达到最大化。Tofino Xenon 还具有其他优势: 定制选项, 包括指定温度范围和软件模块; 满足全球标准, 适用于变电站、危险环境和交通运输系统; 可轻松集成于现有的运行网络, 没有预先配置的要求, 也不存在生产中断的风险。

百通 Tofino 安全解决方案首席技术官 Eric Byres 表示: “Tofino Xenon 定制化程度高。无论网络工程师的需求如何, 这种防火墙都能够满足不同协议、行业和环境的安全要求。由于硬件已预装所需的软件, 其无须预先配置便能可靠地安装在运行网络上。我们的目标是各个企业能够按照自己的方式创建其工业安全解决方案。”

为了便于配置和管理 Tofino Xenon 设备, 百通还推出了一个基于 Windows 的辅助管理软件——TC 2.0, 它的开发采用了一家大型石油公司的建议, 使用起来更加快捷和简便。各种预定义的模板使得该软件能够同时满足基本和高級的网络安全需求。TC 2.0 的用户界面更加直观, 部署流程也更加简便, 能够轻松集成于第三方安全产品。最重要的是, 它能够指导操作和技术人员简便而准确地创建规则, 无需全职的网络安全专家。

Eric Byres 说道 “推出这款配置软件的目的是简化实施流程, 使其不仅适用于高级用户, 而且还适用于刚从事管理网络安全的人员。通过预定义模板, TC 2.0 可以针对工厂采用的具体控制产品, 直观提出一套规则。它能够满足任何用户的需求, 保证工业生产的安全运行, 使管理变得更加简便。” 作为工业以太网的早期创新者, 百通熟知工业 IT, 并提供各种新一代的工业网络解决方案。其全球品牌 (Hirschmann、GarrettCom 和 Tofino Security) 引领着工业以太网应用的发展方向。百通的有线、无线和嵌入式产品形成了一个完整的产品组合, 能够提供最高水平的可靠性、可用性和安全性。此外, 卓越的质保和专业的客户支持也可以减少故障, 保护重要的基础设施, 让客户用得放心。