

「电力系统」

贝叶斯理论在智能电网研究中的应用

文/国网安徽电力公司培训中心 吴义纯 徐 华
国网安徽省铜陵市供电公司 孙华伟

贝叶斯理论是利用先验信息和样本数据信息确定事件的后验概率，根据后验概率做出统计推断和决策等分析与评价的方法，在专家系统、人工智能等工程领域有着广泛应用。智能电网已纳入国家能源发展战略，因贝叶斯理论适于人工智能研究的优点，能为智能电网关键技术研究提供有效手段。主要综述了贝叶斯理论电力系统可靠性评估、负荷预测、故障诊断等方面的研究与应用，为贝叶斯理论在当前智能电网研究与深化应用提供借鉴。

电力工程在工业领域中应该是最复杂的领域之一，为了处理电力系统规划、运行、管理和新技术应用等问题，就需要建立相应的数学模型，探讨可行的算法，通过数值模拟发现实际问题的内在规律。提高电网智能化水平是我国电力发展的必由之路，智能电网已纳入国家能源发展战略，在其关键技术和工程实践中，需要不断有新的方法予以应用。近几年，贝叶斯理论因其具有既考虑主观信息又考虑客观信息，将事件先验概率与后验概率巧妙地联系起来，在自然科学及国民经济的许多领域尤其专家系统、人工智能研究中有广泛应用，能为智能电网技术发展提供有效手段。本文通过介绍贝叶斯理论在电力系统研究中的应用，重点综述在应用较多的可靠性评估、故障诊断、负荷预测等方向的研究情况，为贝叶斯方法在智能电网的研究与深化应用提供有价值的借鉴和参考。

贝叶斯理论概论

英国数学家贝叶斯在全概率公式基础上，创立了贝叶斯统计理论，对于统计决策函数、统计推断、统计的估算等做出了贡献，对于现代概率论和数理统计都有很重要的作用。贝叶斯定理原本是概率论中的一个定理，可用著名的贝叶斯公式来表达，贝叶斯公式是条件概率与全概率公式的简单推论，即

设 $D_1, D_2, \dots, D_n$ 为样本空间 S 的一个划分，如果以 $P(D_i)$ 表示事件 D_i 发生的概率，且 $P(D_i) > 0 (i=1, 2, \dots, n)$ 。对于任一事件 x ， $P(x) > 0$ ，则有

$$P(D_i|x) = \frac{P(x|D_i)P(D_i)}{\sum_{j=1}^n P(x|D_j)P(D_j)} \quad (1)$$

$P(D_i)$ 是人们事先对各前提条件出现可能性大小的估计，称之为先验概率。 $P(D_i|x)$ 即是对以 x 为前提下 D_i 的出现概率的重新认识，称为后验概率，后验分布综合了先验分布的信息和样本的信息，在应用上往往根据后验概率做出分析与评价。贝叶斯预测正是建立在利用先验分布求出后验分布的基础上的。

在此基础上，经过多年的发展与完善，形成一整套贝叶斯理论，有贝叶斯分类器、贝叶斯参数估计和区间估计、贝叶斯统计决策、贝叶斯推理、贝叶斯网络，形成概率统计中的贝叶斯学派，其在数值预测、人工智能、心理学、遗传学、模式识别等领域都得到了应用。

贝叶斯理论在电力系统可靠性评估中应用

随着生产和生活对电力依赖性和停电损失越来越大，要求电力系统应有很高的可靠性。通过电力系统可靠性研究，寻求提高可靠性的途径与方法，同时，考虑到提高可靠性增益与为此而付出的成本

之间的最佳平衡,确定系统的可靠性水平。电力系统可靠性包括元件设备和系统的可靠性。

继电器是继电保护的重要设备,传统的继电器可靠性评估方法仅利用当前的试验信息,而贝叶斯方法以往批的先验信息和当前批的后验信息为基础求出可靠性指标,可在给定置信度下,减少当前产品的试验样本个数和工作量,比传统的统计推断方法更经济有效,且评估方法亦有计算简单的优点。核电厂设备可靠性研究是核电厂概率风险分析和维修的重要基础,因目前我国核电厂现场数据少,经典的统计分析往往难以得到较为准确的分布参数,用贝叶斯估计可以对核电厂设备可靠性原始数据这类小子样情况进行大批量参数估计,达到良好的效果。

电力系统可靠性评估主要采用解析法和蒙特卡罗模拟法。贝叶斯网络对节点变量之间的因果概率关系进行有向图解描述,主要用于不确定性知识表达、因果推理和诊断推理等,是电力系统可靠性分析的又一有力工具。利用贝叶斯网络特点,结合故障树和最小路集来建立电力系统的可靠性评估方法,在此基础上,将多状态元件的不同状态映射成贝叶斯网络中的多个节点,对涉及设备计划检修的配电网可靠性评估。有文献应用多状态节点贝叶斯网络对高压直流输电系统进行可靠性评估,用信念度矩阵的来表示各层节点之间连接关系。

与传统方法比,贝叶斯方法不但能计算出电力系统的可靠性指标,还能方便地给出每个部件或几个部件对系统整体可靠性的影响大小,更适合于识别电力系统可靠性的薄弱环节。还可以进一步引入经济指标,通过综合考虑经济性和可靠性来做出电网最优发展规划。

但电力系统可靠性分析涉及非线性、多约束、高维数、随机不确定性特征的数学求解问题,势必造成贝叶斯网络方法实际应用的困难,需要在数学上探索新解法。同时,贝叶斯方法需要正确选择先验分布密度,研究先验分布密度的选择方法也是今后重要研究工作之一。

贝叶斯理论在电力负荷预测中应用

负荷预测是电网运行和规划的基础,有短期预测和中长期预测。

(1) 短期负荷预测

短期负荷预测是电力系统制订负荷分配以

及开停机计划、电力市场运营的主要依据。短期负荷预测有时间序列法、回归分析法、神经网络等,但其输入特征变量(对负荷的影响因素)往往是根据专家经验选取的,常常会增大预测结果的误差,而贝叶斯理论可用于短期负荷预测中输入特征的自适应选取。同时,支持向量机有较好的学习泛化性能和精度,在预测领域取得了较为明显的应用效果。基于贝叶斯理论选取输入特征和支持向量机在线学习的短期负荷预测方法,有效地提高了短期负荷预测的速度和精度。但支持向量机预测方法存在如何确定一组使学习机具有良好学习能力的参数的问题;最小二乘法支持向量机把向量机中的不等式约束转换成等式约束,把求解由二次规划问题转化为一个线性方程组的求解问题,降低了难度。进而采用贝叶斯理论推断出加权最小二乘法支持向量机模型的最优参数和核参数,实现对电力系统短期负荷预测,具有良好的预测效果。在支持向量机预测公式的基础上,以基于贝叶斯理论的概率学习等理论提出了相关向量机,以提高负荷预测模型的精确度。

神经网络常用于短期负荷预测,但其泛化能力一般,影响了预测的准确率,可利用贝叶斯算法改进神经网络泛化能力。对于含大量冲击负荷的负荷预测,先利用小波变换对负荷序列进行多尺度分解,再建立含不同输入量的贝叶斯神经网络预测模型,能提高短期负荷预测精度。

(2) 中长期负荷预测

中长期负荷预测能为电网企业制订合理的发展和投资规划提供依据。多年来其研究方法非常多。组合预测能整合各模型的优点,使综合模型整体优于单个预测结果。为了克服传统的组合预测方法没有明确考虑模型的不确定性,应用贝叶斯模型平均组合预测方法精确估计单项模型的权重。运用支持向量机进行中长期负荷组合预测,但支持向量机对核参数、正则化参数选定存在可能,应用基于贝叶斯框架下最小二乘法支持向量机的中长期电力负荷预测模型,给出了支持向量机估计算法的参数选择和调整方法。有文献在广义回归神经网络基础上,建立了粒子群优化算法的贝叶斯最小二乘法支持向量机模型应用到负荷预测中。

空间负荷预测模型有效性很大程度上取决于对待预测空间区块所属等级的划分是否正确,采用基于样本数据的双层贝叶斯分类模型进行空间

负荷预测,提高了对样本分类的正确性。针对中长期电力负荷预测受经济、人口、天气和政策等因素影响,将其全部考虑进来作为预测模型的输入,采用主分量分析的方法将网络的输入简化,选择贝叶斯归一化法来训练网络,提高了网络的训练速度,也提高了预测的精度。

目前贝叶斯方法在短期和中长期电力负荷预测中的作用,主要体现在利用其他方法预测时引入贝叶斯方法进行辅助的参数估计、聚类或者做一些局部的预测,以后可以考虑直接利用贝叶斯方法来进行中长期电力负荷预测的相关研究。

贝叶斯理论在故障诊断中应用

在经典的统计推断中,只承认并利用样本信息,而不承认和利用主观的判断和直觉。贝叶斯理论正是希望将主观判断和直觉正式引入到统计推断和决策分析中,从而建立信息综合推断和决策分析过程的基础。

(1) 电力设备故障诊断

贝叶斯方法在发电机组和变压器等电力设备故障诊断领域有着颇多应用。尤其在变压器故障诊断方面,变压器故障诊断主要采用油中溶解气体分析数据为主,结合油质分析数据以及电气试验数据等综合诊断。

变压器故障与油中气体含量之间的分布特性也很难推测,溶解气体故障诊断方法在现场应用中不确定或信息不完备问题,应用贝叶斯网络有向图表示随机变量间的因果关系和用概率描述相关性,能有效处理信息不完备问题。在属性信息缺失较少时,针对样本中各属性之间的依赖关系,NB(Naïve Bayesian),TAN(Tree Augmented Naïve Bayesian)和BAN(Bayesian network Augmented Naïve Bayesian)三种贝叶斯分类器可直接用于故障诊断,正判率较高。在属性信息缺失较多时,还需要采用粗糙集的约简技术来去除冗余信息,其性能明显优于单独使用贝叶斯网络分类器或粗糙集的方法。

支持向量机除了用于负荷预测外,可用来建立了变压器油中溶解气体变化和故障特征参量的预测模型,并引入贝叶斯证据框架对预测模型的参数进行了优化选取。

(2) 电网故障诊断

贝叶斯理论能用于电网故障诊断,提高故障定位的准确性。在配电网故障时,控制中心根据

现场馈线终端单元采集的故障特征信息,通过贝叶斯公式计算比较故障时各条支路上发生故障的可能性,利用最大显著度进行故障定位。还可以根据用户投诉信息,用二叉树链表式法建立了基于故障投诉的配电网拓扑模型,采用贝叶斯不精确推理方法有效解决故障定位的不确定性问题。

贝叶斯网络是一种对概率关系的有向图解描述,对于解决复杂系统不确定因素引起的故障具有很大的优势,能用于电网故障诊断问题,构建系统实时网络拓扑并计算故障概率,进行联锁故障模式识别。还有将继电保护动作时间计入到贝叶斯网络关关节点中,建立了含有时序属性的贝叶斯网络模型,实现了在不确定性和不完备信息下计及信息时序属性的电力系统故障诊断。针对输电网拓扑结构日渐复杂且发生故障后报警信息存在不确定性的情况,若只采用元件诊断模型不够,必要时要考虑复杂故障后元件之间的相关性,建立分布式元件诊断模型和联合诊断模型,并对其进行了分层,得到具有最大后验概率的故障元件组合。对于复杂电网复杂故障,可利用粗糙集理论对电网故障诊断知识进行分层挖掘,再运用贝叶斯网络完成故障区域及故障元件的识别,实现对复杂故障采用多区域并行诊断。

通过贝叶斯网络实现状态估计,发现薄弱环节,根据不同的样本信息,建立基于贝叶斯网络的输电线路运行状态评估数学模型,求解架空输电线路各部件对整条线路运行状态的影响,得出整条架空输电线路的薄弱环节。

在电力系统故障诊断领域中,贝叶斯理论得到一定应用,对多重故障诊断的研究不多,这值得进一步深入研究。另外,智能电网中推行状态监测,在电网状态评估领域研究不多,深入研究状态评估与维修策略的定量关系具有实际意义。

结束语

智能电网建设是高度复杂的系统工程,需要不断探索新方法来解决关键技术问题。目前电力行业应用贝叶斯方法的不多。与传统方法相比,贝叶斯理论在人工智能、自我诊断、专家系统等研究中发挥其具有独特的优势,还能在电网智能化、设备状态检修与自诊断、电力市场预测等智能电网关键技术研究提供有效手段。EA

(收稿日期:2014.06.18)