

大型复杂结构可靠性评定专家系统研究进展*

An Expert System for the Reliability Assessment of Large Complex Structural System

董 聪

(清华大学土木工程系, 副教授、博士 北京 100084)

本世纪 80 年代以来,在北美、欧洲和亚洲的许多国家和地区,相继发生了一些大型桥梁、高层建筑和海上石油钻井平台的突然性断裂和倾覆事件。这些灾难性事故不仅引起了公众舆论的严重关注,也使各发达国家的政府和科研机构意识到对大型重要工程结构的可靠性状态进行研究和评定已刻不容缓。80 年代末 90 年代初,在理论研究取得了一系列突破性的进展之后,世界各主要国家的科学家和工程师均开始尝试对现有大型桥梁和海上石油钻井平台的可靠性状况进行实际评定。研究结果表明,定期检测和维修制度的建立有助于在一定程度上消除隐患和避免灾难性事故的发生。同时,从实际运作中还发现,对于载荷和结构特性均存在很大变异的大型土木工程结构,将理论分析、实验测试和专家经验结合起来建立交互式的预测评估体系不仅有利于降低实际运营成本,也有助于确保分析和评定结果的真实性和可靠性。对实测结果重要性的认同促使北美、欧洲和日本的一些大型桥梁和海上石油钻井平台增装了灾情实时监测系统。对领域知识及专家经验在降低复杂结构体系损伤识别与定位难度、加速损伤识别与定位效率等方面起关键性作用的发现,则促使以知识和案例为共同基础的混合型专家系统体系结构与算法实现的研究迅速成为各发达国家研制实用型大型复杂结构可靠性分析与评定系统的重点。1994 年,国家自然科学基金启动了题为“城市与工程减灾基础研究”的重大项目;1995 年,经反复研究和论证,国家科委随即启动了题为“重大水利和土木工程结构的安全性和耐久性基础研究”的攀登计划重大项目。这两项重大举措标志着大型工程结构可靠性分析与评定这一国际性的前沿课题已开始引起我国土木工程界的高度重视。

大型复杂结构体系的可靠性分析与评定是一项综合性的大系统工程,涉及许多学科和领域。历

史经验表明,解决这种集综合性和复杂性于一体的高难问题,开放型的集成式专家系统是合适的选择。

一、系统组成与结构

建造专家系统需要解决好 3 个最基本的问题:一是要有充分的领域知识作为基础;二是要有处理这些知识的有效工具;三是要有合理的集成方案。下文将对此 3 个方面做深入的研究和探讨。

1. 领域知识

领域知识主要包括 3 个层次:数据库、专家经验、结构化的分析程序。

数据库 众所周知,数据库是建造专家系统的基础。1992 年启动、1997 年予以延续的国家自然科学基金重大项目“我国自然环境材料腐蚀数据积累及基础研究”和 1995 年启动的攀登计划重大项目“重大水利和土木工程结构的安全性和耐久性基础研究”在工程材料基础数据库建立方面投入了大量的经费,积累了丰富的数据资料。此外,航空工业总公司、船舶工业总公司、机械部和国家航天局等部门从“六五”或“七五”计划开始也分别投入了大量的资金用于建立各自行业领域的基础数据库。1997 年,以 CHINANET 网为依托的国家级基础材料数据库在我国首先投入实际运营。随着 INTERNET 网和 CHINANET 网的日益普及,利用这些数据库和国外其他相关数据库的工作将越来越容易,这一发展趋势为复杂结构体系可靠性分析与评定专家系统的建立创造了良好的契机。

基础材料数据库通常不能被专家系统直接利用。原因之一是,实际可供使用的基础材料数据库不仅规模大,而且通常是动态的,数据的不完整性和不确定性是这类数据库的基本特征。发展基于数据库的数据智能挖掘技术以有效地减缩数据库的

* 国家自然科学基金(59505011,59778039)、航空基金(95B51062)、攀登计划重大项目、香港路政署资助课题

规模和维数,建立基于数据库的知识发现理论,发展与数据的不完整性和不确定性相适应的知识表示方法,是当前国际信息处理智能化领域的前沿课题。研究基于数据库的知识发现中知识表示的多种形式及其层次结构,与不同知识表示形式相适应的推理方式及它们间的协同工作原理,是当前及今后一段时间专家系统建造领域的热点课题,也是本项研究的重点。

专家经验 从80年代中期开始,美国、加拿大、英国、日本及其他主要西方国家在建筑、航空、航天和核工程等领域逐渐采用了以概率分析为基础的可靠性设计规范,以一次二阶矩为基础的结构系统可靠性分析技术开始流行。80年代末90年代初,我国在建筑、航空和航天等领域也先后制定了以概率分析为基础的结构可靠性设计规范,并对一些典型工程结构的可靠性状况进行过评定。因此,在工程结构的可靠性评定方面,各国专家目前已积累了一些初步的经验,从形式上看,这些经验多数是具体的案例(Case),由于未能以规则的形式表现出来,无法被以知识和规则为基础的常规专家系统所利用。因此,建立新的专家系统形式体系将成为国际学术界和工程界当前和今后一段时间研究的重点。

新的专家系统形式体系的突出特点是能够直接从案例和数据库中抽取知识,以形成类似专家经验的东西。并且,这些抽取的知识能够像人类专家的经验一样,随案例和数据的增多逐步扩充和完善。从逻辑上讲,以前向网络为基本框架,以Bayes推理为知识更新原则的专家系统形式体系可解决这类问题。

结构化分析程序 对数据的归纳构成经验,对经验的归纳形成规则,对规则的抽象、压缩和推广形成假说,以假说为基础可建立形式化的演绎体系。结构化的系统可靠性分析程序就是典型的演绎体系。在结构工程领域,对于线性系统,结构化的系统可靠性分析程序已初步建立^[1];对于非线性系统,如果考虑系统的失效演化历程,则安全裕量方程通常不存在显式^[2]。因此,失效模式识别问题,安全裕量方程近似重构问题和多设计点、多模式系统综合失效概率计算问题已成为当前该领域研究的重点^[3]。

与专家系统相匹配的结构化分析程序应当具有广泛的适应性,并且专家经验的加入应能加速程序的分析进程,确保分析结果的正确性和准确性。换句话说,该分析程序应具有递归型的自适应优化体系结构,可随系统一起在使用过程中逐步进化。

2. 学习方法

长期以来,专家系统的学习问题一直是国际学术界和工程界关注的焦点,也是实用型专家系统建

造中最令人头痛的问题。常规专家系统形式体系以演绎逻辑和符号操作为基础,由于缺乏内在的学习机制,使系统的自主进化无法实现;从数理逻辑的角度看,只有以归纳逻辑为基础的专家系统形式体系才可能具有自主进化功能。事实上,从英国著名哲学家培根时代开始,人们就发现了这个道理,只是一直没有找到可行的实现方式。Rumelhart, Hinton 和 Williams(1986)的工作终于打破了令专家系统建造者困惑和尴尬的局面。他们发现,Werbos发明的误差反传算法(Back Propagation error, BP)能够有效地解决多层前向网络的学习问题^[4]。多层前向网络可以自组织和自适应的方式进行学习,这意味着它具有从数据和案例中自动抽取规则的潜质。Hornik(1991)的工作则从理论上回答了多层前向网络从数据中自动抽取得到的规则的品质究竟如何。Hornik 证明,在一个相当宽的范围内,3层前向网络具有以任意精度逼近定义在紧致子集上的任意非线性连续函数的能力^[5]。在多层前向网络的构造与实现方面,笔者等人建立了多层前向网络拓扑结构学习的通用算法^[6];发现了多层前向网络逼近与泛化的内在机制^[7];解决了多层前向网络对于离散点集的全局最优逼近问题^[8];推广了BP算法^[9]。上述一系列工作标志着专家系统的学习这一长期以来令专家系统建造者束手无策的难题已在很大程度上得以解决。另外,基于案例的推理技术(Case-Based Reasoning)依靠类比推理,从另一个角度也在一定程度上解决了专家系统的学习问题。

3. 系统集成

一个系统要想长期保持较高的水准,它必须是开放性的、动态的和自洽的。开放型系统的基本特征是允许新的知识、规则和数据加入系统;系统的动态性要求系统具有自组织和自学习功能,最基本的要求是系统具有从数据中自动抽取规则,并能根据数据的变化和积累逐步更新和完善规则;系统的自洽性要求系统各组成部分之间协调匹配。对于封闭型的系统来讲,自洽性是系统设计时预先设定的。而对于开放型的系统来讲,由于系统本身在逐渐演化,则系统的自洽性必须通过内部的竞争和约束机制来实现。

大型结构可靠性分析工作主要由结构化的系统分析程序来实现,近10年来笔者等人在此方面做了大量的工作,积累了比较丰富的经验^[1-3]。大型结构可靠性评定工作需要利用专家的知识 and 经验,这不仅是因为专家知识和经验是加速推理进程和避免组合爆炸的关键,更重要的是因为评定工作的逻辑基础是类比推理。选择人工神经网络作为建造大型结构可靠性分析与评定专家系统的主要工具,其原因在于人工神经网络的自组织学习能力一方面有助于专家知识和经验的提炼和归纳,另一

方面也有助于直接从案例和实测数据中抽取知识和规则。常规人工神经网络对经验知识的利用缺乏有效的机制,为弥补这一不足,可借助于经验贝叶斯推理来有效地融合经验知识和实测数据进行混合折衷决策^[10]。

二、系统实现方案

在专家系统的研制中,系统的先进性和可操作性是最重要的两个方面。前文已经讲过,一个系统要想长期保持较高的水准,它必须是开放性的、动态的和自洽的。开放型系统的基本特征是允许新的知识、规则和数据加入系统;系统的动态性要求系统具有自组织和自学习功能,最基本的要求是系统能够从数据中自动抽取规则,并能根据数据的变化和积累逐步更新和完善规则。从人工神经网络的基本特性可以推知,基于神经网络的专家系统在实现开放性和动态性方面没有本质的困难。系统的自洽性要求系统各组成部分之间协调匹配。对于开放型的系统来讲,由于系统本身在逐渐演化,则系统的自洽性必须通过内部的竞争和约束机制来实现。在我们的系统中,主要是通过 Bayes 折衷决策来确保系统的自洽性和相容性。为确保系统的可操作性,需充分考虑实际分析与评定对象可能存在的参数的不完整性和不确定性,及部分现象的不可观性和数据的不可测性。

系统的实现方案如下:

1. 利用多层前向网络的自适应和自组织学习能力,解决专家系统的学习问题;采用多层前向网络的最简拓扑结构学习算法,实现专家系统中有关规则体系及其组合方式的最简压缩,提高专家系统的泛化能力和运行效率。

2. 采用经验 Bayes 推理,解决基于知识、案例或实测数据的混合型专家系统的折衷决策问题,并通过折衷决策,确保系统的自洽性和相容性。

3. 采用全局分枝—约界算法和子波神经网络相结合,解决考虑损伤累积、材料耐久性下降和存在系统失效演化历程的动态大型非线性结构系统的失效模式重构问题;采用递推型自适应分层重要抽样算法,加速非线性结构系统可靠性模拟实验的计算效率。

4. 利用广义遗传算法的全局最优化特性,解决大型结构中传感器群的最优布点设计问题,并将所用传感器的数量压缩至最少^[11,12]。

5. 利用系统失效模式分析和仿真结果对结构的可能失效部位进行预测,并根据预测结果设计最佳观测与实证方案。通过实验对预测结果的正确性和准确性进行评价,并将评价结果反馈给系统。系统以自组织的方式根据评价结果调整系统的知识

结构,使系统在使用过程中逐步进化和完善。

三、主要应用目标和关键技术

该系统的应用目标主要有 3 类:在土木工程领域的应用目标为大跨桥和超高层建筑;在海洋工程领域的应用目标为海上石油、天然气钻井平台;在航天领域的应用目标为大型空间站。在以上 3 个领域,我们均做过一些工作。上述大型结构可靠性评定专家系统实现方案的研制原型为目前世界上单跨最长的铁路、公路两用桥——香港青马大桥。

在系统实现方案中,我们对大型复杂结构可靠性评定通用专家系统的实现方案进行了阐述。下面将分析青马大桥可靠性评定专家系统中需要解决的一些关键技术问题。

青马大桥是香港的标志性建筑之一,全长 2 200 米,主跨 1 377 米,横跨青衣岛和马湾岛之间的海峡,是一铁路、公路两用桥。整个工程 1992 年动工,1997 年 5 月正式竣工并投入使用,全部工程费用 72 亿港币。青马大桥为悬索式结构,设计寿命 120 年,是目前世界上主跨最长的兼有铁路和公路的悬索桥。青马大桥是通往香港新机场的唯一通道,因此,确保桥梁安全十分重要。

为确保桥梁使用安全,青马桥设计安装了先进的健康监控系统。桥梁健康监控系统是一个实时系统,它借助于合理布置的应变仪和加速度传感器群,对桥梁结构关键部位的瞬时应变和瞬时加速度进行实时监测。通过将监测值和临界值进行比较,对桥梁系统的安全状况作出评价,并在危险可能发生之前作出快速反应,以避免灾难性事故的发生。由于桥梁系统的各类临界值和系统的完整性有关,而系统的完整性会随时间的推移发生变化,因此必须加装桥梁健康诊断系统,对桥梁结构的完整性及其演化规律进行标定。健康诊断系统的基本原理是:通过采样数据对系统的损伤部位和损伤程度进行辨识,并以此为基础对桥梁系统完整性和桥梁系统的各类临界值进行动态标定。为提高系统损伤部位和损伤程度的辨识精度,通常需要长时间采样。因此,健康诊断系统通常没有严格的实时性要求。青马桥可靠性评定专家系统是建立在健康诊断系统基础上的一个高级系统,因此,解决多损伤识别与定位问题是成功构建这一系统的前提和基础。

多损伤识别与定位是国际模式识别领域长期未能妥善解决的难题。笔者等人的研究证明,针对不间断序贯采样的演化系统,通过采用递阶算法,可将该问题的复杂性逐步分解,从而达到可解的程度。对于青马桥可靠性评定专家系统,与多损伤识别和定位相关的关键技术是:

(下转第 17 页)