

基于贝叶斯网络的起重机专家系统^①

钟虞全, 杨贯中

(湖南大学 软件学院, 长沙 410082)

摘要: 提出了一种改进当前某大型起重机上的一个基于专家规则知识库的专家系统的方法。改进后的系统保留原有的基于规则库的诊断方式, 同时也能运用专家经验构建出来的贝叶斯网络对出现故障进行诊断, 诊断出所有可能导致故障发生的原因并以概率度量每个原因发生的可能性。系统采用了因果调查问卷和概率刻度方法对贝叶斯网络进行初始化, 同时运用最大似然估计和最大后验估计法则对贝叶斯网络的概率刻度表(CPT)进行学习修正。通过比较改进前和改进后专家系统对同一故障的诊断结果, 可以确定改进后的专家系统能更快更准的定位故障原因。

关键词: 贝叶斯网络; CPT; 概率刻度; 最大似然估计; 最大后验估计

Expert System of Crane Based on Bayesian Networks

ZHONG Yu-Quan, YANG Guan-Zhong

(School of Software, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: This paper proposes a method to improve Knowledge Base Expert System (KBES) of Some Large Crane, grounded on Expert Rules. On detecting failures of the Large Crane, the improved system can diagnose almost all possible reasons for failures, and measure the occurrence probability of each. The diagnosis process is supported by reasoning, according to Bayesian Network, constructed by Expert Experience. Another feature of this system is adopting a method to initialize Bayesian Network and learn Bayesian Network CPT. By comparison, applications of conventional and improved expert system to failure diagnosis presented in this paper, illustrate that the latter can identify the cause of failure more promptly and accurately.

Key words: Bayesian networks; CPT; probability scale; MLE; MAP

近年来, 大型工程机械已成为国民经济发展的主要产业。面对功能日益强大和结构愈加复杂的机械设备, 传统的专家系统逐渐显示出诸多不足如诊断效率和准确性低下等, 越来越难以满足实际的需要, 因此对大型工程机械的智能故障诊断技术的研究^[1]具有很大的实际意义。

某大型起重机上有已实现的遵循 SAE J1939 应用层协议^[2]的专家系统, 该起重机现有的基于知识规则库的故障诊断系统在保证其连续工作、削减维修成本、延长设备健康使用寿命等方面发挥了很大作用。此故障诊断系统的诊断方式虽然表现形式易读, 知识变更

容易, 解释方便, 诊断推理过程简单快捷。但起重机是一种复杂的机电设备, 由电、机、液等不同子系统组成。当起重机表现出一故障时, 往往不确定性问题占多数。基于知识规则库的故障诊断技术难以满足起重机对诊断故障要定位快速而又准确的要求。随着现代计算机技术、检测技术、通讯技术和电子技术等相关领域学科的进步, 已经形成了一门集物理、数学、化学、电子技术、通讯技术、计算机技术、信息处理、模式识别和人工智能等多学科交叉的综合性技术, 相应的起重机故障诊断技术也步入了智能化阶段。本文采用一种适合于表达和分析不确定性问题的智能故

① 收稿时间:2011-03-09;收到修改稿时间:2011-04-05

障诊断方法,改进该诊断系统在面对不确定性故障时的不足。

基于概率推理的贝叶斯网络(Bayesian Network)是为了解决不定性和不完整性问题而提出的,它对于解决复杂设备不确定性和关联性引起的故障很有优势。目前国外成功将贝叶斯网络应用于故障诊断的有美国通用电气公司的 Auxiliary Turbine Diagnosis^[3],而国内典型的有西北工业大学采用贝叶斯网络故障诊断模型应用于柴油机动力装置的故障诊断中^[4],取得了较大的经济和安全效益。本文将贝叶斯网络引入现有的起重机专家系统,以解决起重机面对复杂而又不确定性故障时的问题。

1 改进后专家系统介绍

1.1 系统结构

改进后的专家系统结构见图 1:

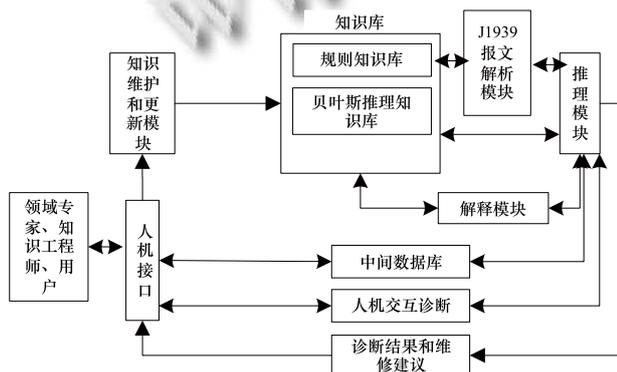


图 1 贝叶斯网络专家系统的体系结构

系统由知识库、推理模块、中间数据库、解释模块、知识库维护和学习模块、J1939 报文解析模块、以及人机接口组成^[5]。其中知识库包括原有专家规则库和基于贝叶斯推理的知识库;中间数据库用来存放推理过程的输入事实、中间结果以及结论,报文解析模块解析出来的数据;解释模块用来对推理过程作出解释,解释推理的路线和推理得到的正确结论;推理模块是专家库的核心。

1.2 系统诊断机制

系统进行故障诊断的执行过程如下所述。

(1) 专家系统通过人机接口或 J1939 报文解析模块获取当前起重机故障征兆。

(2) 推理模块首先搜索规则知识库,给出规则知识库的诊断结果。

(3) 若(2)中未有诊断结果或用户对诊断结果不满意,则推理模块运用贝叶斯推理模型进行诊断,给出诊断结果。

(4) 起重机故障解决之后,用户通过知识维护和更新模块对知识库进行维护或更新。

在诊断机制方面,本文提出了一种融合规则库和贝叶斯网络两种诊断方式的方法,使改进后的专家系统诊断方式能根据用户的选择进行诊断,当用户对基于规则库的诊断结果不满意或者没有结果时,可以选择贝叶斯网络诊断模型进行诊断。

2 贝叶斯网络知识库

2.1 贝叶斯网络的知识表示方法

贝叶斯网络是一种概率网络,它是基于概率推理的图形化网络,而贝叶斯公式则是这个概率网络的基础。贝叶斯网络是基于概率推理的数学模型,所谓概率推理就是通过一些变量的信息来获取其他的概率信息的过程,从直观上讲,贝叶斯网络表现为一个赋值的复杂因果关系有向图,网络中的每一个节点表示一个变量,即一个事件。弧(各变量之间的连线)表示事件发生的直接因果关系,根据概率统计学的原理,建立起各个变量之间的依赖关系。关于一组变量 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 的贝叶斯网络由以下两个部分组成:(1)一个表示 X 中变量的条件独立性假设的网络结构 G ;(2)与每一个变量相联系的局部概率分布集合 P ;即可表示为一个二元组 $B = \langle G, P \rangle$,其中 $G = \langle X, A \rangle$ 是一个有向图网络结构,其节点为 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}, n \geq 1$, A 是弧的集合。而网络参数 P 是与每个节点相关的条件概率表,它表达了节点与其父节点之间的相关关系——条件概率。 G 和 P 定义 X 的联合概率分布。

于是,随机变量集合 X 上的一个贝叶斯网络唯一确定了一个 X 上的概率分布:

$$p(X) = \prod_{i=1}^n p(x_i | V_i)$$

V_i 为 x_i 在 G 中的父节点集合。

2.2 贝叶斯网络知识库的构造

贝叶斯网络的初始化包括两部分,即贝叶斯网络结构和参数初始化。贝叶斯网络结构是贝叶斯诊断方法的最重要的部分,其正确与否决定着贝叶斯参数学习和网络推理的正确性。起重机的故障领域知识已经非常完善,因此本系统的贝叶斯网络结构直接根据经验丰富的领域专家们的知识构建。为了方便专家确定

贝叶斯网络结构中各节点之间的因果关系，采用一种称为因果关系调查问卷的方法^[6]，专家根据经验和掌握的领域知识填写因果调查问卷表格，然后知识工程师根据表格中各变量之间的因果关系构造贝叶斯网络的结构。

每一个贝叶斯网络节点的条件概率表 (CPT) 是一个完整贝叶斯网络所不可缺少的部分，本系统采用概率刻度的方法^[6]初始化贝叶斯节点的 CPT。见下图：

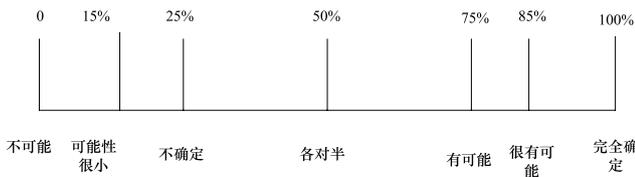


图 2 概率刻度表

专家依据概率刻度表给出贝叶斯网络各节点的条件概率，从而初始化了贝叶斯网络的 CPT。

采用上述的因果调查问卷方法和概率刻度法构建贝叶斯网络知识库。现构建“发动机不能启动”故障的网络模型实例，见下图：

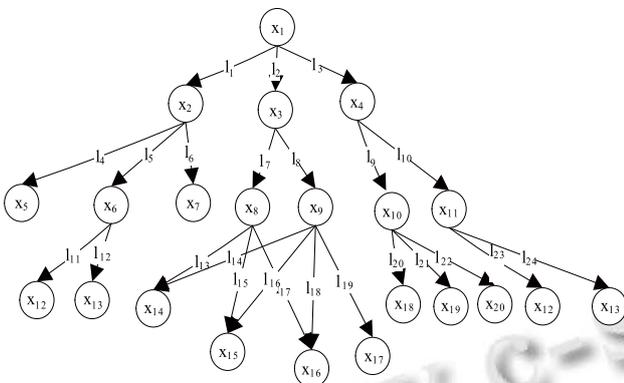


图 3 “发动机不能启动”的贝叶斯网络模型图

对图 3 中的节点和条件概率分布用表 1 表示：

表 1

编号	故障状态	条件概率
X ₁	发动机不能启动	
X ₂	启动子系统故障	$l_1:0.5$
X ₃	供油子系统故障	$l_2:0.35$
X ₄	压缩压力不足	$l_3:0.15$
X ₅	环境温度过低	$l_4:0.15$
X ₆	起动机故障	$l_5:0.50$
X ₇	电瓶没电或者不足	$l_6:0.35$
X ₈	柴油雾化不良	$l_7:0.75$
X ₉	不来油	$l_8:0.25$
X ₁₀	压缩系漏气	$l_9:0.75$

X ₁₁	进气阻力大	$l_{10}:0.25$
X ₁₂	电路接线不良	$l_{11}:0.85$
X ₁₃	启动电机电刷与换向器接触不良	$l_{12}:0.15$
X ₁₄	油箱油量过少	$l_{13}:0.15/l_{14}:0.25$
X ₁₅	柴油滤清器堵塞	$l_{15}:0.75/l_{16}:0.5$
X ₁₆	喷油器故障	$l_{17}:0.1/l_{18}:0.15$
X ₁₇	喷油泵损坏	$l_{19}:0.1$
X ₁₈	气缸垫漏气	$l_{20}:0.5$
X ₁₉	气门漏气	$l_{21}:0.25$
X ₂₀	活塞环漏气	$l_{22}:0.25$
X ₂₁	空气滤清器堵塞	$l_{23}:0.85$
X ₂₂	气门配气相位不对称	$l_{24}:0.15$

2.3 家库贝叶斯网络的学习方法

因为贝叶斯网络结构直接根据经验丰富的领域专家们的知识构建，因此对本专家系统贝叶斯网络的学习主要是 CPT 学习。当学习样本数量较大时，采用 MLE^[7]（最大似然估计）进行 CPT 学习。现有数据样本 $D = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ ，每一个 x_k 都是随机节点变量 X 的实例。当有足够多的样本数据时，采用 MLE 可以得到满足条件的条件概率值。

这样，最大似然函数最大值的获得就由样本数据中的观测频数决定：

$$\theta_{m,i} = \frac{P_i}{P_i + n_i}$$

求出的 $\theta_{m,i}$ 即 x_i 的条件概率值， P_i ， n_i 分别表示 D_i 中 x_i 为真、假的发生次数。

当数据样本数较少，此时 MLE 得出的结果会出现较大误差，甚至会出现被零除的不合理情况。因此采用 MAP^[7]（最大后验估计）对数据样本库进行学习此时在贝叶斯网络的参数学习中采用 Dirichlet 分布或者 Beta 分布作为贝叶斯网络参数的先验概率分布。设 $X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ 为对应各节点的随机变量集，且 x_i 为二元随机变量， $i=1, 2, \dots, n$ 。 $X_i = \begin{cases} t \\ f \end{cases}$

t 表示其值为真； f 表示为假

$$p(X = t | D, \xi) = \frac{\alpha + N_t}{\alpha + \beta + N_t + N_f}$$

D 是给定的数据样本集， ξ 是背景知识， α ， β 是 Beta 分布中的参数且均 >0 。

3 专家系统的贝叶斯网络模型诊断机制

改进后的起重机专家系统贝叶斯网络模型的诊断流程为：由用户通过人机交互界面或 J1939 报文解析模块获取当前故障征兆，将该故障征兆输入贝叶斯网

络知识库,进行搜索和匹配,当匹配到当前故障征兆处于某个故障节点状态时,向前找到该故障节点的父节点直至根节点,向后找出该故障节点的子节点直至叶节点。如当前故障节点状态下有关联测试节点时,则可通过 J1939 报文解析模块或人机接口获取故障征兆进行验证,并将验证结果返回贝叶斯网络诊断模型进行进一步的推理,得出故障发生的原因以及概率,进入解释模块,输出诊断结果,诊断推理流程图如下:



图 4 诊断推理流程图

4 诊断结果验证

现比较改进前和改进后的专家系统诊断结果,以故障“发动机不能启动”的为例,改进前的专家系统得出的诊断结果为请加油、清理滤清器、更换喷油器、修理或者更换喷油器,此时用户将按照诊断结果逐一实施 4 条维修意见。

使用改进后的专家系统对该故障进行诊断,诊断过程如下:首先在贝叶斯网络知识库可得到“发动机不能启动”的贝叶斯网络模型(见图 3)和对应该贝叶斯节点的 CPT(见表格 1),该贝叶斯网络有关联测试节点 x_3 供油子系统故障,此时专家系统收到底层控制器发送过来的故障帧 DM1,通过 J1939 解析模块解析该故障帧得到可疑参数编号(SPN)1762 和故障模式标识符(FMI)1^[8],由此可知油泵输出的油压低于正常值范围,所以关联测试节点 x_3 (供油子系统故障)成立。按照表格中各条件概率值,计算 x_3 分支下 4 个

叶节点的概率值。根据全概率公式和贝叶斯网络中任意节点 x_i , $p(x_i | x_1, x_2, \dots, x_{i-1}) = p(x_i | U(x_i))$ ($U(x_i)$ 为 x_i 的父节点集合),计算出导致供油子系统故障的原因概率值分别是:油箱油量过少 0.175,柴油滤清器堵塞 0.685,喷油器故障 0.1125,喷油器损坏 0.025,用户根据按照故障原因的概率值大小进行维修。

对比两种诊断结果,可以看出改进后的专家系统解决了当起重机面对不确定性故障时无法快速而又准确定位故障原因的问题。

5 结语

本文将贝叶斯网络因果有向图方法引入专家系统的知识库,是对原有的基于规则知识库的专家系统的一种扩展和改进。通过比较改进前和改进后专家系统的诊断结果,得出改进后的专家系统能有效解决起重机故障诊断领域内的不确定性问题,提高了故障的定位速度,贝叶斯网络的 CPT 越符合实际,则贝叶斯网络诊断的结果越准确。

参考文献

- 魏攀,徐红兵.基于贝叶斯网络的故障诊断系统.计算机测量与控,2007,15(7):855-857.
- SAE Standard. SAE J1939/73, Application Layer-Diagnostics. 2001.
- Wolbrecht E, Ambrosio BD, Passch B. Monitoring and Diagnosis of A Multi-stage Manufacturing Process Using Bayesian Networks. Artificial Intelligence for Engineering, Design and Manufacturing, 2000,14(2):53-67.
- 傅军,贺炜,阎建国.贝叶斯网络在柴油机动装置故障诊断中的应用.上海海运学院学报,2001,22(3):69-77.
- 李海军,马登武.贝叶斯网络理论在装备故障诊断中的应用.北京:国防工业出版社,2009.
- Hu XX, Wang H, Wang S, et al. Using Expert's Knowledge to Build Bayesian Networks. Harbin 2007 International Conference on Computational Intelligence and Security Workshops, 2007,220-223.
- 费致根. Bayes 网络在故障诊断中的应用.郑州:郑州大学,2004.
- 陈家斌,龚进,谭祖香.SAE J1939 协议在发动机上的应用.现代机械,2006,2:64-70.