

结合贝叶斯决策网络的钢桁架安全评估*

郑金林¹, 方圣恩^{1,2}

(1. 福州大学土木工程学院 福州, 350108)

(2. 福州大学土木工程防震减灾信息化国家地方联合工程研究中心 福州, 350108)

摘要 为克服既有安全评估方法时效性差、主观性强、难以量化等缺点,解决已有人工神经网络缺乏可解释性和物理意义、图解可视化弱等问题,以贝叶斯推理与效用计算为依据,提出一种结合贝叶斯决策网络(Bayesian decision network,简称BDN)的桁架结构安全评估方法。首先,通过分析桁架传力路径,将桁架体系拆分为多个子结构,再以子结构为不确定性节点,同时增加决策节点和效用节点,通过有向弧连接以完成BDN网络拓扑定义;其次,计算节点变量的条件概率表,确定节点状态参数并计算概率参数;然后,以影响因素为自变量、以效用值为因变量建立函数关系,完成对效用函数的计算;最后,以一榀试验钢桁架为验证对象,通过绘制体系状态评分图,完成对钢桁架当前状态的决策和评估。结果表明:结合BDN可以刻画钢桁架在某荷载组合作用下的状态变化过程,桁架的安全和失效评分曲线交点即为某个状态的临界荷载;通过推理、决策得到的桁架体系状态概率与试验现象基本吻合,可为类似结构体系的安全评定提供参考。

关键词 安全评估;贝叶斯决策网络;桁架结构;决策节点;效用函数

中图分类号 TU322

引言

长期服役下的土木结构存在不同程度的损伤和性能劣化,导致使用功能退化甚至产生安全隐患。因此,及时发现结构潜在的损伤并对结构安全性进行评估和预测,契合土木工程高质量发展需要^[1]。

既有安全评估方法主要依靠常规检测和表观损伤调查,由专家打分结合层次分析法进行评价,存在时效性差、主观性强等不足^[2]。可靠度方法往往需要进行复杂的失效模式判别^[3-5],且难以建立结构非线性功能函数表达式,不利于实际应用。为此,以在线监测数据为依托进行结构评价的结构健康监测系统的应用领域逐渐拓宽^[6-8]。然而,目前土木结构评估仍以超限评价为主(比如桥梁主梁挠度超过限值),缺少针对结构体系的安全评估方法。

基于人工智能的土木结构评估是解决上述问题的可行途径^[9],其中有代表性的如人工神经网络以及贝叶斯网络等。Oh等^[10]针对结构健康监测系统通信中断和数据丢失等问题,基于径向基函数神经网络和遗传算法,提出了一种基于风致应变测量的高层建筑长期安全评估模型,并通过结构缩尺模型的风洞试验验证其可行性。Zhang等^[11]结合粒子群

优化算法和人工神经网络,提出了一种预测隧道及地下空间巷道稳定性的评估方法,评价巷道稳定性对人和设备的威胁程度。然而,人工神经网络的“黑盒”运行模式导致推理过程缺乏可解释性,且输入-输出间映射关系缺乏物理意义。因此,可尝试采用同属于人工智能领域的贝叶斯网络进行土木结构的安全评估^[12-13]。

贝叶斯网络是一种图模型,以结构构件和体系为网络节点,通过可视化拓扑直观表达节点变量间的因果逻辑关系,再通过贝叶斯推理实现对节点状态概率的计算。Fang等^[12]基于力学分析分别建立桁架杆件层次和体系层次拓扑,提出了一种嵌套离散贝叶斯网络拓扑,用于一榀平面桁架结构的安全性评估。Tan等^[13]进一步基于连续型节点变量构建了连续型贝叶斯网络,提出网络模型匹配方法,实现了一榀空间桁架结构的安全评估。

BDN(也称决策网络、影响图)^[14-15]在贝叶斯网络上增加了决策和效用节点,以构造更全面的决策体系,能够直接、清晰地了解决策过程的影响因素及其占比。BDN将贝叶斯推理与效用相结合,已在规划、问题求解、搜索、诊断及决策等领域得到应

* 国家自然科学基金资助项目(52178276)

收稿日期:2023-11-13;修回日期:2024-01-01

用^[16-17]。张帆^[16]通过影响图表征斜拉桥安全施工中的风险影响因素及相互关系,形成了较为完整的索塔分节段循环施工的风险影响图。Penman等^[17]针对环境管理中不确定性因素多和成本管理复杂等问题,建立了用于分析消防管理决策的BDN模型,并通过消防管理案例证明了该模型的实用性。

基于以上讨论,本研究提出一种结合BDN的桁架结构安全评估方法,通过将桁架体系拆分为多个子结构,实现对网络拓扑的定义,进而计算效用函数并绘制体系状态评分图,完成对钢桁架当前状态的决策和评估。

1 BDN方法

BDN是一种显式的有限(节点)、有向无环图^[14-15],在贝叶斯网络上增加了用于决策的决策节点和代表价值的效用节点。因此,BDN具有3种节点和4种用于连接不同节点的有向弧,同时考虑效用以利于决策。

1.1 节点类型

除决策及效用节点外,BDN还有一种不确定性节点,三者共同组成了BDN的主要节点类型^[14-15]。图1为BDN节点类型。图中以椭圆形框表示不确定性节点,赋有随机变量。其中,加工误差使得构件几何参数存在不确定性,认为参数服从某种概率分布,而非确定值。每个变量都有一个相关联的条件概率表,并给出了该节点变量与父节点变量间因果关系的强度,父节点可以是决策节点或不确定性节点。不确定性节点概率值为1时,表示该节点处于某一确定状态。



图1 BDN节点类型

Fig.1 Node types of BDN

用矩形框表示决策节点,体现在特定时间点做出的决定,节点变量值是决策者必须要在其中做出选择的行为,而节点数目则由需要决策的问题数量决定。单决策的BDN仅有1个决策节点,多决策问题则需要多个决策节点。当需要做出一系列决策时,某个决策节点可以是其他决策节点的父节点,节点

间的有向弧方向代表决策顺序。

用菱形框表示效用节点,变量表示决策的效用函数,也称为价值节点,其父节点代表的变量可直接影响网络效用的计算值,在决策网络中可以是不确定性节点或决策节点。每个效用节点均有与其父节点相关联的效用表,当BDN包含多个效用节点时,整体效用为所有效用之和。

1.2 有向弧类型

BDN的有向弧类型如图2所示,其具有条件弧、信息弧、顺序弧、功能弧4种有向弧类型^[14-15]。条件弧连接2个不确定性节点,表示节点之间的直接依赖关系,关系强度由条件概率分布量化。信息弧由不确定性节点指向决策节点,用虚线表示,连接的是不确定性节点和决策节点,仅起到给决策节点传递不确定性节点变量信息的作用,不参与网络的推理计算。顺序弧连接2个决策节点,用点线表示,弧方向表示决策节点的优先级,只存在于包含多个决策节点的网路。功能弧表示父子节点间的多元函数关系,其中子节点为效用节点,父节点可以是不确定性节点或决策节点。

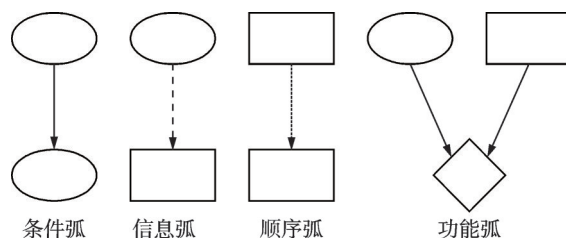


图2 BDN的有向弧类型

Fig.2 Types of directed edges of BDN

1.3 效用

当做出一个决定时,需要在行动可能产生的结果间考虑自己的偏好,而效用理论^[18]提供了一种偏好表示和推理的方法。效用函数通过将偏好映射到实数来量化偏好,反映结果的“合意性”,这种映射允许将效用理论与概率论结合起来。具体来说,效用允许人们在给定任何可用证据的预期效用情况下,计算出哪种行为预期会产生最大的价值(也称收益或效用),计算式为

$$EU(G|E) = \sum_i P(O_i|E, G) U(O_i|G) \quad (1)$$

其中: E 为有效证据; G 为可能结果状态 O_i 的不确定性行为; $U(O_i|G)$ 为行为 G 发生时每个 O_i 的效用;

$P(O_i|E, G)$ 为当观察到有效证据 E 和发生行为 G 时,可能结果状态的条件概率分布。

最大期望效用原则认为,理性主体本质的一个重要部分是选择使期望效用最大化的行动。

1.4 全概率公式

全概率公式为概率论中的重要公式,可将对复杂事件的概率求解问题转化为在不同情况下发生简单事件的概率求和问题^[19]。

如果事件 D_1, D_2, \dots, D_i 构成一个完备事件组,即其中的两两互不相容,则其和为全集;且 $P(D_i) > 0$,则对任一事件 R ,有

$$P(R) = P(R|D_1)P(D_1) + P(R|D_2)P(D_2) + \dots + P(R|D_i)P(D_i) \quad (2)$$

2 结合 BDN 的结构安全评估

2.1 评估流程

结合 BDN 的结构安全评估流程包含网络拓扑定义、条件概率表学习和评估决策。拓扑定义包括确定网络主体和添加效用节点、决策节点,条件概率表学习包含节点状态参数和概率参数的计算,评估决策即效用函数的计算和最终决策。

1) 拓扑定义:网络主体是指由不确定节点组成的部分,一个不确定节点可以指单个构件或子结构。添加的效用节点表示安全评估的最终目标,其值可以量化结构的安全性,取值范围含括从结构最佳到最差状态;添加的决策节点表示结构的状态值,据此进行决策。BDN 中可以存在多个决策节点。定义各节点间因果逻辑关系时,可从效用节点出发,逆向分析影响结构安全的因素,通过筛选来绘制不确定性节点之间的关系。

2) 条件概率表学习:完成 BDN 的拓扑定义后,需要量化连接节点之间的关系,以获取节点变量间概率值或概率分布。节点间的条件概率表可通过参数学习获取,即可通过极大似然估计或贝叶斯后验估计法计算得到。本研究中,所研究的算例均采用极大似然估计算法。

3) 评估决策:要推理网络中某一节点的概率,需要获取先验知识。例如,本研究钢桁架算例中,将各杆件的材料特性作为先验知识输入 BDN,用于其余节点的概率推理。决策节点包含安全和失效 2 种状态,效用节点值完成对决策时安全和失效的量化,

期望效用的最大值对应的决策视为最优决策。

2.2 桁架安全评估步骤

以桁架结构为例,结合 BDN 的桁架结构评估流程如图 3 所示。安全评估具体步骤如下。

1) 对桁架单元和杆件相交的结点进行编号。

2) 由效用节点出发,根据桁架内力分析得出某杆件最先破坏。将最先破坏的杆件前后划分为破坏前阶段和破坏后阶段,效用节点依次受破坏前阶段和破坏后阶段影响。由传力杆件将完整桁架拆分为多个子结构,将子结构作为决策网络节点。对于同一破坏阶段,可选取受力最大的子结构作为不确定性节点,而剩余结构作为未启用节点,等待激活或者弃用,由此确定网络的所有不确定性节点。若构件或子结构本身无不确定性,则设置对应的不确定性节点变量的状态概率恒为 1,网络推理过程不影响该节点的状态概率。按破坏顺序连接不同破坏阶段的不确定性节点,最后加上结构决策节点。

3) 根据单根杆件材料特性,计算子结构失效荷载与桁架整体失效荷载,用于计算条件概率表。考虑到荷载不确定性的主要来源,本研究假设作用荷载服从均匀分布。

4) 根据结构失效荷载确定效用函数,效用函数由表示结构材料应力-应变关系的多段函数组成。基于前述步骤,用于桁架安全性评估的决策网络结构即构建完成。

5) 当有新证据加入时,用信息弧添加影响决策的不确定性节点。

6) 评估决策网络,画出评分图。

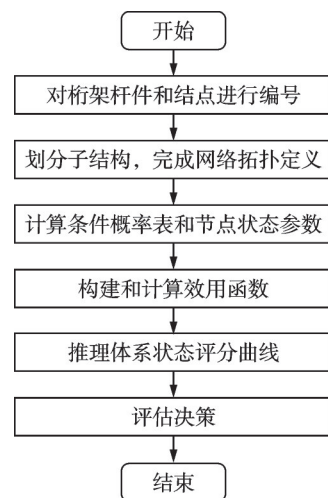


图 3 结合 BDN 的桁架结构评估流程

Fig.3 BDN-based evaluation process of truss structures

3 算例1:数值桁架

七杆桁架示意图如图4所示。各杆件计算长度均为30 mm,腹杆与上、下弦杆之间的夹角均为 60° 。假设杆件材料本构关系均为理想弹塑性,屈服强度为365 MPa,弹性模量为190 GPa,杆件截面积为 9.2 mm^2 。假设在集中力 Q 作用下,杆件仅发生强度破坏,暂不考虑杆件失稳,即当杆件轴向拉(压)应力达到365 MPa时,认为杆件失效。

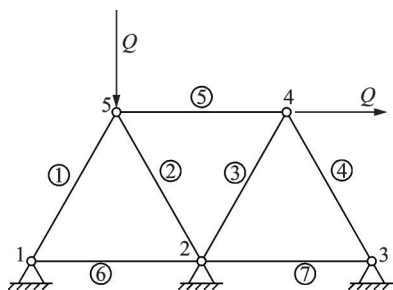


图4 七杆桁架示意图

Fig.4 Schematic diagram of 7-member truss

3.1 拓扑定义

图5为七杆桁架传力路径。由理论计算可知, $Q=3.40 \text{ kN}$ 时,杆②进入塑性; $Q=4.70 \text{ kN}$ 时,杆③、④进入塑性。如图5(a)所示,分析桁架的传力

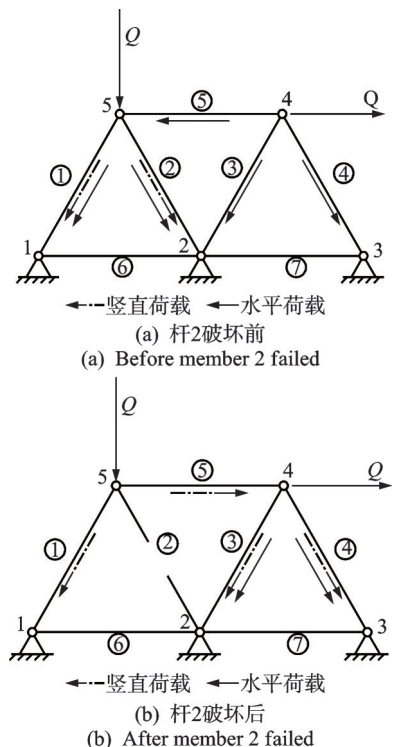


图5 七杆桁架传力路径

Fig.5 Load transfer path of 7-member truss

路径可知,杆②失效前竖直荷载效应仅传递给杆①、②;水平荷载效应在传递给杆③、④的同时,也经由杆⑤传递给杆①、②。如图5(b)所示,杆②失效后,竖直荷载效应传递给杆①的同时,也经由杆⑤传递给杆③、④,而此时水平荷载效应仅传递给杆③、④。考虑到结构体系传力路径发生改变,因而本研究提出将一个完整的桁架体系拆分为多个子结构来建立BDN。为实现对结构进行完整评估,需确保节点变量集合信息的完整性。本研究将完整钢桁架结构拆分多个子结构,不同破坏阶段的子结构间相互独立,共同构成一个完整的评估体系,从而全面反映钢桁架的整体安全性。

图6为七杆桁架子结构划分。如图6(a)所示,具体操作上,杆②破坏前,将桁架杆⑤切断,且杆②、③处的中间铰支座保持不变,拆分为子结构A和B;如图6(b)所示,在杆②破坏后,由杆①、③、④、⑤和⑦构成的新桁架体系受力,此时主要依赖于子结构B承担荷载效应。将结构进行拆分后,除中间铰支座反力外,各杆件和结点受力状态均与原桁架相同。因此,将杆②破坏前的桁架简化为A、B,杆②破坏后的桁架则记为子结构B'。

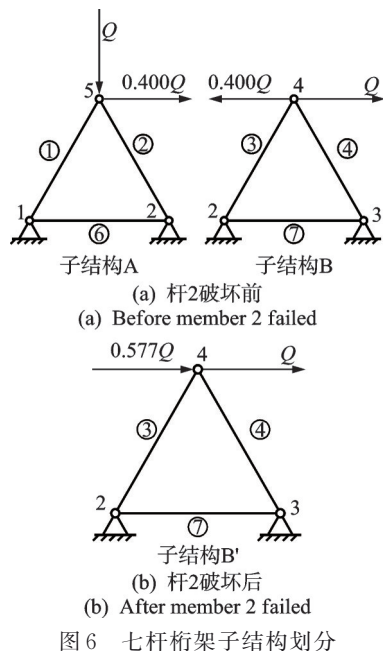


图6 七杆桁架子结构划分

Fig.6 Substructure division of 7-member truss structure

最后,以决策节点作为体系安全性决策的依据,新证据可以通过输入决策节点进行后续的全网络推理。同时,证据节点以概率为100%的不确定性节点出现,并通过信息弧联系决策节点。

3.2 网络参数学习

图 7 为七杆桁架 BDN 网络。由理论计算可知,作用荷载 $Q=3.40$ kN 时,杆②进入塑性; $Q=4.70$ kN 时,杆③、④进入塑性; $Q=5.50$ kN 时,桁架达到理论极限承载力。偏保守计算,定义子结构 A 的失效荷载为 3.40 kN, B' 的失效荷载为 4.70 kN,并以 A 与 B' 失效荷载比值计算得出 A 的先验概率 $P(A)$ 。此外,考虑到 Q 的不确定性,将 Q 的上限扩到理论极限承载力 5.5 kN,即假设 Q 遵循 $U[0, 5.5]$ kN 的均匀分布。

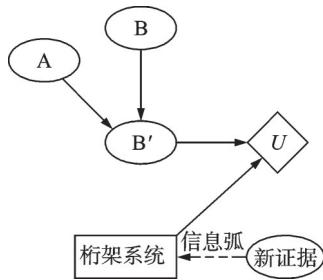


图 7 七杆桁 BDN

Fig.7 BDN of 7-membmer truss structure

B' 在 A 破坏之后破坏,可通过极大似然估计计算进一步计算得出 A 和 B' 之间的条件概率表。七杆桁架网络节点间概率和效用信息如表 1 所示。其中:S、F 分别为安全和失效状态;TS 为桁架系统; Q 为荷载; $P(\cdot)$ 为概率或条件概率值; $U(\cdot)$ 为效用值; $W(\cdot)$ 、 $X(\cdot)$ 、 $Y(\cdot)$ 、 $Z(\cdot)$ 为效用相关函数。B' 为子结构 B 在杆②破坏之后的状态,因此二者之间条件概率为 1。在效用表计算时,考虑到钢桁架仅受到外荷载这一个因素影响,故将效用值设为外荷载的单值函数。

表 1 七杆桁架网络节点间概率和效用信息

Tab.1 Probability and utility information between network nodes of 7-member truss structure

A	$P(A)$	A	B'	$P(B' A)$	B' TS	$U(A, TS)$
S	0.72	S	S	1	S S	$W(Q)$
F	0.28	S	F	0	S F	$X(Q)$
		F	S	0.62	F S	$Y(Q)$
		F	F	0.38	F F	$Z(Q)$

3.3 决策评估

由表 1 和式(2)的全概率公式可得, B' 的失效概率为

$$P(B'=F)=P(A=S) \times P(B'=F|A=S)+$$

$$P(A=F) \times P(B'=F|A=F)=0.1064 \quad (3)$$

故 B' 的安全概率为 0.893 6。由式(1),期望效用函数为

$$\begin{cases} EU(TS=S)=0.8936W(Q)+0.1064Y(Q) \\ EU(TS=F)=0.8936X(Q)+0.1064Z(Q) \end{cases} \quad (4)$$

考虑到杆件材料本构为理想弹塑性,因此期望效用函数可设为线性函数,即效用 $W(Q)$ 、 $X(Q)$ 、 $Y(Q)$ 和 $Z(Q)$ 也为线性函数。

加载初期桁架处于安全状态,选取 $Q=1.00$ kN,且引入 ReLU 函数^[20],设

$$H(Q)=\begin{cases} 0 & (Q \leq 1.00 \text{ kN}) \\ Q-1 & (Q > 1.00 \text{ kN}) \end{cases} \quad (5)$$

此时,有

$$\begin{cases} W(Q)=-16.7H(Q)+100 \\ X(Q)=16.7H(Q) \\ Y(Q)=-16.7H(Q)+100 \\ Z(Q)=16.7H(Q) \end{cases} \quad (0 \leq Q \leq 3.4 \text{ kN}) \quad (6)$$

$$\begin{cases} W(Q)=-30.8H(Q)+133.9 \\ X(Q)=30.8H(Q)-33.9 \\ Y(Q)=-30.8H(Q)+133.9 \\ Z(Q)=30.8H(Q)-33.9 \end{cases} \quad (3.4 \text{ kN} < Q \leq 4.7 \text{ kN}) \quad (7)$$

$$\begin{cases} W(Q)=-25H(Q)+112.5 \\ X(Q)=25H(Q)-12.5 \\ Y(Q)=-25H(Q)+112.5 \\ Z(Q)=25H(Q)-12.5 \end{cases} \quad (4.7 \text{ kN} < Q \leq 5.5 \text{ kN}) \quad (8)$$

图 8 为桁架体系状态评分曲线,由效用函数进行绘制。其中,横坐标为荷载,纵坐标为期望效用(无量纲),安全状态和失效状态分值之和恒为 100, Q 为 1.0、3.4、4.7 kN 时为曲线转折点。由式(4)~(8)可知, $Q=[0, 1]$ kN 时, $EU(TS=S)=100$, $EU(TS=F)=0$; $Q>1.00$ kN 时,失效曲线 $EU(TS=S)$ 开始减少,而 $EU(TS=F)$ 开始增加; $Q=3.40$ kN 时, $EU(TS=S)=60$, $EU(TS=F)=40$,此点后安全状态曲线快速下降,而失效状态分数快速增加,直至 $Q=4.7$ kN 时, $EU(TS=S)=20$, $EU(TS=F)=80$,桁架接近破坏; $Q=5.5$ kN, $EU(TS=S)=0$, $EU(TS=F)=100$,桁架发生破坏。

此外,当桁架体系安全和失效效益均为 50 时,为安全和失效状态的交界点,对应 $Q=3.73$ kN,此时决策节点给出体系后续可能失效的决策。

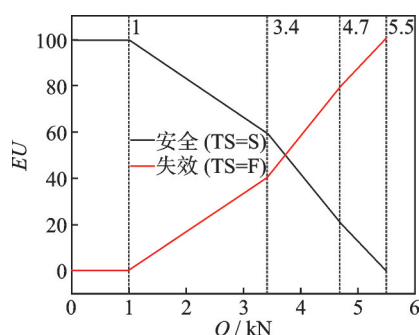


图8 桁架体系状态评分曲线

Fig.8 State score curves of truss system

4 算例2:试验桁架

为进一步验证所提方法的可行性,以一榀试验平面钢桁架为分析对象进行试验。图9为桁架静载试验装置。试验采用系统内千斤顶加载方式,对桁架在不同加载水平下的安全性进行评估和决策。钢桁架底座采用 $200\text{ mm}\times 200\text{ mm}\times 10\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ 规格的工字钢,长度为 $1\,600\text{ mm}$ 。刚桁架与底座间采用焊接连接,圆钢管采用20钢,标准内径为 4 mm ,外径为 6 mm 。圆钢管中部作削弱处理,削弱处标准壁厚为 0.5 mm ,削弱段长度为 30 mm ,作为桁架杆件的计算长度。

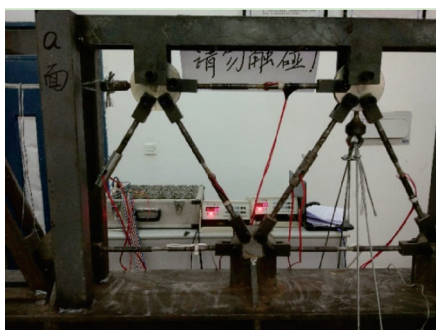


图9 桁架静载试验装置

Fig.9 Static loading test apparatus of experimental truss

$Q=1.0\text{ kN}$ 时,BDN推理得到的安全状态下的期望效用 $EU(TS=S)=100$,失效状态下的期望效用 $EU(TS=F)=0$,试验观测中桁架无明显变化。 $Q=3.4\text{ kN}$ 时,BDN推理得到的安全状态下的期望效用值 $EU(TS=S)=60.0$,而失效状态下的期望效用 $EU(TS=F)=40.0$,试验发现各杆件应变值均处于 $2\,000$ 微应变以内,钢桁架未出现特别情况。 $Q=3.8\text{ kN}$ 时,BDN推理得到的 $EU(TS=S)=47.7$,而 $EU(TS=F)=52.3$,试验中清晰听到桁架发出“噗”的一声,1、2号位千斤顶发生卸载,2号测力计示数降为 3.2 kN 。查看各杆件应变值读数,发现杆②

已溢出,由此推测杆②发生破坏。 $Q=4.6\text{ kN}$ 时,BDN推理得到的 $EU(TS=S)=23.1$,而 $EU(TS=F)=76.9$,试验发现桁架再次发生卸载且为完全卸载,杆③被拉断,杆④发生弯曲,据此可认为此时的桁架发生破坏。

通过上述对比可以发现,BDN的效用评分和试验现象吻合较好,误差可能是源于桁架的理论计算模型与实际结构间的差异,如桁架试验架构的杆件制作误差、安装误差,以及理论计算使用的材料本构关系与实际情况间存在的差异。由于上述主要因素的影响,导致BDN的效用评分和试验现象存在差异性,这也说明BDN的效用评分可作为桁架结构体系安全评定的参考。

5 结 论

1) 提出了一种基于BDN的桁架结构安全评估方法,可将概率推理与效用计算相结合,通过拓扑定义、条件概率计算和决策评估流程,定量评价了桁架结构在不同外荷载作用下的安全性。

2) 基于桁架体系内传力路径分析和子结构划分,建立了明确的拓扑关系。

3) 根据效用函数的计算结果,绘制了桁架体系荷载-状态评分曲线,该曲线直观展示了加载过程的体系安全和失效状态变化,并基于2根曲线的交点来确定临界荷载。

4) 推理的桁架体系状态概率与试验桁架的杆件破坏现象吻合较好,可为类似结构体系安全评定提供参考。

参 考 文 献

- [1] 李宏男,李东升. 土木工程结构安全性评估、健康监测及诊断述评[J]. 地震工程与工程振动, 2002, 22(3): 82-90.
LI Hongnan, LI Dongsheng. Safety assessment, health monitoring and damage diagnosis for structures in civil engineering[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2002, 22(3): 82-90. (in Chinese)
- [2] STANISLAV R, DAVID C, JIRI K, et al. Inspection of quality of concrete of load-bearing structure, bridge No. 121-007 across vltava river at zvikov[J]. Procedia Engineering, 2016, 156: 466-472.
- [3] 吕昊,姜雨良,金雄程,等. 齿轮磨损和接触疲劳竞争失效可靠性模型[J]. 振动、测试与诊断, 2023, 43(3): 525-530.
LÜ Hao, JIANG Yuliang, JIN Xiongcheng, et al.

- Gear wear and contact fatigue competitive failure model [J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2023, 43(3): 525-530. (in Chinese)
- [4] KUBICKA K, RADON' U. Proposal for the assessment of steel truss reliability under fire conditions [J]. *Archives of Civil Engineering*, 2015, 61(4): 141-154.
- [5] 何江飞, 高博青. 桁架结构的易损性评价及破坏场景识别研究[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2012, 46(9): 1633-1637, 1714.
HE Jiangfei, GAO Boqing. Vulnerability assessment and failure scenarios identification of truss structures[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2012, 46(9): 1633-1637, 1714. (in Chinese)
- [6] SUNG Y C, LIN T K, CHIU Y T, et al. A bridge safety monitoring system for prestressed composite box-girder bridges with corrugated steel webs based on in-situ loading experiments and a long-term monitoring database[J]. *Engineering Structures*, 2016, 126: 571-585.
- [7] NÅVIK P, RØNNQUIST A, STICHEL S. A wireless railway catenary structural monitoring system: full-scale case study[J]. *Case Studies in Structural Engineering*, 2016, 6: 22-30.
- [8] LIN T K, CHANG Y S. Development of a real-time scour monitoring system for bridge safety evaluation[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2017, 82: 503-518.
- [9] 《中国公路学报》编辑部. 中国桥梁工程学术研究综述·2021[J]. *中国公路学报*, 2021, 34(2): 1-97.
Editorial Department of China Journal of Highways. Review on China's bridge engineering research: 2021[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2021, 34(2): 1-97. (in Chinese)
- [10] OH B K, KIM K J, KIM Y, et al. Evolutionary learning based sustainable strain sensing model for structural health monitoring of high-rise buildings[J]. *Applied soft Computing*, 2017, 58: 576-585.
- [11] ZHANG X L, NGUYEN H, BUI X N, et al. Evaluating and predicting the stability of roadways in tunnelling and underground space using artificial neural network-based particle swarm optimization[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2020, 103: 103517.
- [12] FANG S E, TAN J L, ZHANG X H. Safety evaluation of truss structures using nested discrete Bayesian networks [J]. *Structural Health Monitoring*, 2020, 19(6): 1924-1936.
- [13] TAN J, FANG S. Safety evaluation of truss bridges using continuous Bayesian networks[J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2022, 29(4): e2912.
- [14] BIEDERMANN A, TARONI F. Bayesian networks and influence diagrams[M]. *Encyclopedia of Forensic Sciences*. 3rd. Oxford: Elsevier, 2022: 271-280.
- [15] HOWARD R A, MATHESON J E. Influence diagrams[J]. *Decision Analysis*, 2005, 2(3): 127-143.
- [16] 张帆. 基于影响图理论的索塔分节段循环施工风险辨识研究[J]. *科技信息*, 2013(3): 181-182.
ZHANG Fan. The research on cable tower points segmental cycle construction risk identification based on the theory of influence diagram[J]. *Science & Technology Information*, 2013(3): 181-182. (in Chinese)
- [17] PENMAN T D, CIRULIS B, MARCOT B G. Bayesian decision network modeling for environmental risk management: a wildfire case study [J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, 270: 110735.
- [18] KORB K, NICHOLSON A. Bayesian artificial intelligence[M]. 2nd. Boca Raton: CRC Press, 2010: 471.
- [19] 盛骤, 谢式千, 潘承毅. 概率论与数理统计(第四版) [M]. 北京: 高等教育出版社, 2010: 17-18.
- [20] SUDJANTO A, KNAUTH W, SINGH R, et al. Unwrapping the black box of deep ReLU networks: interpretability, diagnostics, and simplification [DB/OL]. *arXiv*, 2020: 04041v (2020-11-08) [2023-10-14]. <https://arxiv.org/abs/2011.04041>.



第一作者简介:郑金林,男,1999年10月生,硕士生。主要研究方向为结构健康监测。

E-mail: 210520091@fzu.edu.cn

通信作者简介:方圣恩,男,1980年8月生,博士、教授。主要研究方向为结构健康监测与损伤识别。

E-mail: shengen.fang@fzu.edu.cn