

doi:10.11835/j.issn.2096-6717.2019.028



地铁健康监测 PCBN 模型的 参数相关性分析

刘文黎, 吴贤国, 张文静, 王彦玉

(华中科技大学 土木工程与力学学院, 武汉 430074)

摘要:对城市盾构地铁结构的健康服役和安全可靠性进行评价时,多局限于静态推理,通过构建 PCBN(Pair-Copula Bayes Network)网络结构得到评判指标的多元联合概率分布,实现参数相依性的准确识别和高精度重构。基于 3 种失效模式对盾构地铁结构节点相关性分析及安全状态评价,充分挖掘监测数据的隐藏信息,表征盾构地铁结构的危险状态。以武汉地铁三号线某空推段为工程背景进行 PCBN 模型建模。结果表明:PCBN 模型得出的地铁安全状态与地铁工程中的实际风险信息非常吻合,体现了构建 PCBN 网络模型的准确性和实用性。

关键词:盾构地铁结构;PCBN 模型;相关性分析;可靠度

中图分类号:TU 375.1 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2019)02-0045-08

Correlation analysis of parameters in PCBN model for metro health monitoring

Liu Wenli, Wu Xianguo, Zhang Wenjing, Wang Yanyu

(School of Civil Engineering and Mechanics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, P. R. China)

Abstract: At present, the most common method to evaluate the health service and safety reliability of urban shield metro structures is limited to static analysis. In this paper, by applying the concept of Pair-Copula to Bayesian networks, the multi-joint probability distribution of evaluation index was obtained by constructing PCBN (Pair-Copula Bayes Network) structure, which is capable of identifying parameters' dependencies accurately and high-precision reconstruction. Based on the three kinds of failure modes, the correlation analysis and safety evaluation of shield metro structure nodes were conducted. The implicit information in monitoring data was exploited to characterize the risk status of the shield metro structure. As an example, an empty pushing section of Wuhan Metro Line 3 is used to build a PCBN model. Results show that the metro safety status obtained by the PCBN model is in good agreement with the actual risk information in the subway project, demonstrating the accuracy and practicability of the PCBN network model proposed in this paper.

Keywords: shield subway structure; PCBN model; correlation analysis; reliability

收稿日期:2018-09-11

基金项目:国家自然科学基金(71801101);教育部博士后基金(2018M632880)

作者简介:刘文黎(1989-),男,博士(后),主要从事地铁及隧道安全管理研究,E-mail:newheny2014@hotmail.com。

Received:2018-09-11

Foundation item: Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 71801101); Postdoctoral Fund of Ministry of Education (No. 2018M632880)

Author brief: Liu Wenli (1989-), postdoctoral, main research interests: subway and tunnel safety management research, E-mail:newheny2014@hotmail.com.

随着地铁运营网络规模的逐年扩大,盾构地铁结构运营安全问题逐渐凸显,为了对盾构地铁结构的安全状态进行准确评估,许多研究者进行了大量的工作,提出了许多方法,包括模糊层次分析法^[1]、事故树分析法^[2]、模糊综合评价法^[3]、可靠度评价法^[4]等。但是,盾构地铁赋存环境因素对地铁承载性能的影响有着复杂的非线性、随机性、不确定性及多时空演化等特征。传统的评估方法多局限于静态的推理过程,难以构建监测指标与结构安全之间的隐性非线性映射关系,进行实时风险评定、动态风险预测以及风险诊断推理。

贝叶斯网络(Bayesian Networks, BN)能够直观地构建两个或多个随机变量因素之间的条件概率分布,且能够将先验信息与样本数据有机结合,实现网络节点因素之间的实时推理^[5]。传统的贝叶斯网络较适用于分析离散的节点变量,且难以实现网络节点的动态评价,目前的混合贝叶斯网络、动态贝叶斯网络能较好地解决连续节点变量及节点动态概率评估问题,但对节点相关性的描述中存在 Gaussian 相关性的假设,难以构建节点之间的非正态相关性结构关系^[6]。Copula 理论能较好地捕捉参数之间的非线性相关性,构建两个或多个随机变量联合分布函数,进行参数相依性建模^[7]。Pair-Copula 是在 Copula 理论上发展出来的一种高维相依性建模的方法,藤结构为高维 Copula 提供了可行、有效的建模方式。但在实际应用中,高维下的参数估计较复杂,且可能会出现“过拟合”现象,藤结构无法解释变量间连接关系的实际意义,不利于实际工程中因素之间的逻辑推理^[7]。

Kurowicka 等^[6]将 Pair-Copula 的概念应用到贝叶斯网络当中,得到一种新型的 Pair-Copula 构建方式,该模型被定义为 PCBN 模型。本文基于 PCBN 模型理论,首先,给出基于 PCBN 模型的盾构地铁运营安全评估模型设计方法,通过对单节点边缘分布拟合优度检验、选取多节点联合分布中的最优 Copula 函数;然后,采用能够高效捕捉多元参数

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = \prod_{k=1}^n f(x_k) \prod_{j=1}^{n-1} \prod_{i=1}^{n-j} c_{j, j+i, \dots, j-1}(F(x_j | x_1, \dots, x_{j-1}), F(x_{j+i} | x_1, \dots, x_{j-1})) \quad (4)$$

2) D-Vine。D-Vine 的结构中每棵树的任何一个节点最多只连接的 2 条边缘。这意味着,如果一个资产组合中成分标的资产都相对独立,那么这个

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = \prod_{k=1}^n f(x_k) \prod_{j=1}^{n-1} \prod_{i=1}^{n-j} c_{j, j+i, i+1, \dots, i+j-1}(F(x_i | x_{i+1}, \dots, x_{i+j-1}), F(x_{j+i} | x_{i+1}, \dots, x_{i+j-1})) \quad (5)$$

1.2 贝叶斯网络

贝叶斯网络通常表示为 $BN = (\mathbf{G}, \mathbf{P})$, 其中, $\mathbf{G} = (\mathbf{V}, \mathbf{E})$ 为 DAG, 相应的结点集合和有向边集分

之间相关性关系的 Pair-Copula 模型,结合贝叶斯网络理论,完成参数相依性的准确识别和高精度重构;最后,利用 PCBN 模型进行武汉三号线某空推段进行节点相关性分析,进而进行安全状态可靠度相依性推理,为盾构地铁结构的安全控制和风险管理提供一条全新的思路。

1 Pair-Copula 贝叶斯网络模型

1.1 Pair-Copula 理论

设函数 $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 是 n 维随机变量 $\mathbf{X} = (X_1, X_2, \dots, X_n)$ 的联合分布密度函数,则函数 $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 可以分解成

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = f(x_1) \cdot f(x_2 | x_1) \cdots f(x_n | x_1, \dots, x_{n-1}) \quad (1)$$

则多元联合分布的密度函数可以用一系列 Pair-Copula 密度函数和边缘条件概率密度函数的乘积来构建。

$$f(\mathbf{u} | \mathbf{v}) = c_{w_j | v_j}(\mathbf{F}(\mathbf{x} | \mathbf{v}_j), \mathbf{F}(\mathbf{v}_j | \mathbf{v}_{-j})) \cdot f(\mathbf{u} | \mathbf{v}_{-j}) \quad (2)$$

式(2)中, $\mathbf{v} = (v_1, \dots, v_j, \dots, v_d)$, 是一个 d 维向量, v_j 是其中任意一个向量, $1 \leq j \leq d$, 而 $\mathbf{v}_{-j} = (v_1, \dots, v_{j-1}, v_{j+1}, \dots, v_d)$ 表示在 \mathbf{v} 中去掉 v_j , 用密度函数式(2)还原分布函数,其中, $c_{w_j | v_j}$ 是一个二元 Copula 函数,则有

$$\mathbf{F}(\mathbf{u} | \mathbf{v}) = \frac{\partial c_{w_j | v_j}(\mathbf{F}(\mathbf{x} | \mathbf{v}_j), \mathbf{F}(\mathbf{v}_j | \mathbf{v}_{-j}))}{\partial \mathbf{F}(\mathbf{u} | \mathbf{v}_{-j})} \quad (3)$$

根据 Vine-Copula 理论,有两种常见的藤 Copula 分解模式。

1) C-Vine。在 C-Vine 的结构中,对任意一棵树 T_j , 都有且仅有一个点连接到其他 $n-j$ 条边上。这意味着,如果资产组合中存在一个能影响其他标的的资产,那么这个组合比较适合用 C-Vine 结构来构建。Bedford 等^[8]给出了 C-Vine 结构的 n 维变量联合分布的密度函数表达式。

资产组合比较适合用 D-Vine 结构来构建。Bedford 等^[8]也给出了 D-Vine 结构的 n 维变量联合分布的密度函数表达式。

别为 \mathbf{V} 和 \mathbf{E} , \mathbf{P} 为每个节点的条件概率表,用以定量描述父结点对该结点的作用效果(Conditional Probability Table, CPT)。对于贝叶斯网络中任意

随机变量 $\mathbf{X} = (x_{t_1}, x_{t_2}, \dots, x_{t_n})$, 相应的联合概率分布可以表示为^[5]

$$f(x_{t_1}, x_{t_2}, \dots, x_{t_p}) = \prod_{\forall t_j \in T} f(x_{t_j} | x_{t_1}, \dots, x_{t_{j-1}}) \quad (6)$$

式中: T 为时期长度。如果随机变量 X 为时间序列, 且 x_{t_i} 的父结点为 $(x_{t_{j-1}}, \dots, x_{t_1})$ 。根据概率论中的链规则, 即联合概率可以由条件概率链表达, 公式(6)右端项的条件概率函数构建如

$$f(x_{t_n} | x_{t_1}, \dots, x_{t_{n-1}}) = \frac{f(x_{t_1}, \dots, x_{t_n})}{f(x_{t_1}, \dots, x_{t_{n-1}})} \quad (7)$$

1.3 Pair-Copula 贝叶斯网络模型(PCBN)构建

令 $D = (\mathbf{V}, \mathbf{E})$ 表示一个 BN 对应的 DAG, V 为

$$f(x) = \prod_{v \in V} f_v(x_v) \prod_{\omega \in \text{pa}(v)} c_{v, \omega | \text{pa}(v; \omega)} (F_{v | \text{pa}(v; \omega)}(x_v | x_{\text{pa}(v; \omega)}), F_{\omega | \text{pa}(v; \omega)}(x_\omega | x_{\text{pa}(v; \omega)})) \quad (8)$$

式中: $x = (x_v)_{v \in V} \in R^d$, 该模型被称为 PCBN 模型。

2 结构失效模式及可靠度理论

2.1 运营盾构地铁结构失效模式确定

1) 纵向螺栓受剪破坏模式。受到外荷载的影响, 相邻的两片管片之间可能会出现相互位移, 即产生径向错台值(V11)。如果相对位移量过大, 纵向螺栓可能因为剪力过大而破坏, 相对弯曲的竖向位移由纵向螺栓的最大位移值确定, 而水平距离为两环盾构管片的宽度, 若螺栓受剪破坏时其极限的竖向位移为 ω_{\max} (即径向错台值), 则管片受剪时的相对弯曲^[9]为

$$\frac{\omega_{\max}}{2L} = \frac{[\tau] A l^3}{16 E I L} \quad (9)$$

式中: l 为纵向螺栓有效长度的一半; $[\tau]$ 为纵向螺栓抗剪强度; A 为单根纵向螺栓的横截面积; $E I$ 为单根螺栓的抗弯刚度; L 为一环盾构管片的宽度。纵向螺栓受剪破坏的失效函数为

$$g_1 = \omega_a - \omega_{\max} \quad (10)$$

式中: ω_a 为在外荷载作用下的径向错台量(V11)。

2) 纵向螺栓受弯破坏模式。盾构地铁结构通常采用装配式结构, 在弯矩作用下, 盾片环以中性轴为界, 受压一侧管片混凝土被压缩, 受拉一侧的管片和纵向螺栓均受拉, 地铁轴线产生一定的弯曲曲率, 而盾构地铁结构的主要破坏形式为外侧受拉的纵向螺栓受拉屈服。当盾片处于受弯变形模式时, 外侧的受拉螺栓处于高危状态, 借鉴 Huang 等^[10]对盾片受弯、受力模式的分析及 Hooke's 定理可得, 管片结构的安全性由螺栓的抗拉强度控制, 则盾构地铁的最大纵向曲率半径为

顶点集, E 为边集, 用 D^m 表示 D 的道德图。令 \mathbf{P} 表示 R^d 上绝对连续的概率测度, 其中 $d = |V|$, 令 \mathbf{X} 为概率分布为 P 的随机变量, 假设 P 的概率密度函数为 f , 若 P 满足 D-马尔科夫属性, 通过 Sklar 定理, 可知 P 的概率密度分布函数(CDF)能被唯一分解成一系列单变量边际分布 F_1, F_2, \dots, F_d 和一个 Copula 函数 C 的乘积。Bauer 等^[7]证明 Copula 函数 C 能被进一步分解成一系列(条件)Pair-Copula 函数 $C_{v, \omega | \text{pa}(v)}$, 其中 $v \in V, \omega \in \text{pa}(v)$, 贝叶斯网络为 Copula 提供了一种新型的 PCC 模型, 其中每个(条件)Pair-Copula 对应网络结构 D 中的一条边 $\omega \rightarrow v$, 将节点与其母节点相连接。因此, P 的概率密度函数 f 最终被分解为:

$$\rho_{\max} = E \cdot \frac{D_{\text{out}} l}{[\sigma] L} \quad (11)$$

式中: E 为螺栓的杨氏弹性模量; D_{out} 为盾构环的外径; l 为盾构管片的厚度; L 为连接螺栓的长; ρ_{\max} 为最大纵向曲率半径; $[\sigma]$ 为螺栓抗拉强度值。纵向螺栓受弯破坏的失效函数为

$$g_2 = \rho_a - \rho_{\max} \quad (12)$$

式中: ρ_a 为在外荷载作用下的纵向曲率半径(V9)。

3) 横向螺栓受拉破坏模式。Huang 等^[4]提出通过横断面水平收敛值判断 t 时刻的盾构管片变形性能 $Q(t)$ 。

$$Q(t) = 1 - \left[\frac{\Delta D(t)}{D_{\text{out}}} \right]^2 \quad (13)$$

式中: $\Delta D(t)$ 为 t 时刻的盾构管片累积水平收敛值; ΔD_F 为盾构管片的极限水平收敛值; D_{out} 为一环盾片的外径。根据 Liu 等^[11]研究成果, 考虑到在实际盾构地铁工程中, 由于受外荷载等不确定因素的影响, 断面的极限收敛值并不一定出现在水平向, 故而选取全断面的极限收敛率 $\Delta D_{\max} / D_{\text{out}} = 0.0303$ 为盾构截面承载力极限值。横向螺栓受拉破坏的失效函数为

$$g_3 = \Delta D_a - \Delta D_{\max} \quad (14)$$

式中: ΔD_a 为在外荷载作用下的断面收敛值(V10)。

2.2 基于可靠度理论的盾构地铁运营安全控制体系构建

确定盾构地铁结构的危险状态水平, 有助于对运营盾构地铁结构的安全进行管控。本文将系统的失效概率作为判断建筑风险状态的基础, 为研究盾构地铁结构的安全可靠性, 采用蒙特卡洛模拟法确

定系统的失效概率,计算公式为

$$p_f = P[g_1(CD) < 0 \cup g_2(SD) < 0]$$

$$g_1(CD) = CD - \overline{CD}$$

$$g_2(SD) = SD - \overline{SD} \quad (15)$$

式中: p_f 为系统的失效概率; CD 和 SD 是净空收敛和差异沉降蒙特卡洛法的模拟值; \overline{CD} 和 \overline{SD} 代表净空收敛和差异沉降的极限值。根据《建筑结构可靠设计统一标准》,文中可靠性指数 β 可以确定为

$$\beta = \Phi^{-1}(1 - p_f) \quad (16)$$

式中: $\Phi^{-1}(\cdot)$ 为标准正态分布函数的反函数。

3 工程实例分析

3.1 工程概况

选取武汉市轨道交通三号线工程自跨江段右线王宗区间地铁部分空推段,监测区间为自跨江段右线王宗区间设计起点里程右 DK9+696.728 起,向宗关方向延伸 320 m 左右,覆盖了王家湾站附近的部分商业区下的地铁区间。该段地铁区间有一部分穿越汉江,地铁赋存环境中水压较大,部分区段出现渗透水病害,该区段地铁运营受到地铁运营管控部门的极大重视,故对该段地铁区间从距离右 DK9+696.728 点号 15 m 的环号开始布置的监测系统的 100 组监测数据进行分析。

采用自动化监测中的远程自动全站仪和应变、倾角传感器进行自动化监测数据,如图 1,结合其他人工监测得到的数据,建立监测参数之间的 PCBN 模型,评价该区段地铁区间的安全可靠性,为地铁的安全风险管理提供信息支持。

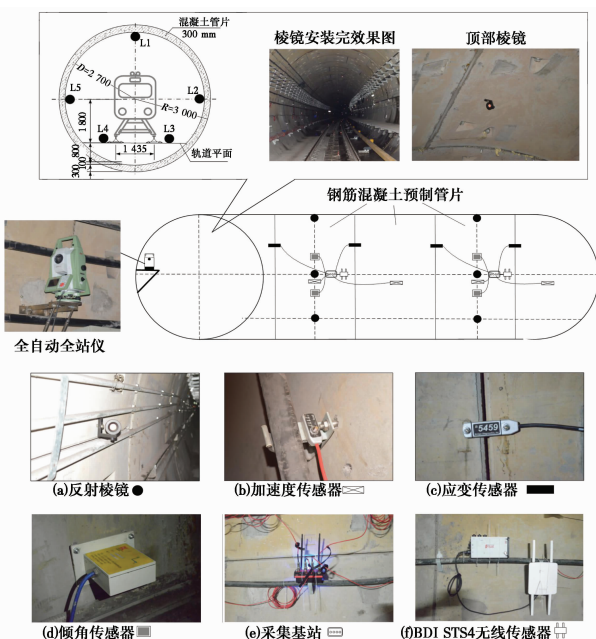


图 1 各监测仪器布置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of each monitoring instrument

3.2 基于 PCBN 的运营安全评估

3.2.1 地铁运营安全 PCBN 模型结构设计 1) 地铁运营安全 PCBN 模型网络节点设计。为对地铁运营安全 PCBN 模型网络进行节点设计,需建立表征盾构地铁结构安全性能的网络节点指标体系,考虑到指标敏感性程度、网络模型复杂程度、实际工程[2-3],参考文献[12-15]和相关规范[16],构建的 PCBN 模型节点包括:拱顶沉降值(V1)、水平收敛值(V2)、管片剥落面积(V3)、差异沉降值(V4)、裂缝面积(V5)、渗透水量(V6)、管片倾斜度变化量(V7)、接缝张开值(V8)、纵向曲率半径值(V9)、断面收敛值(V10)、径向错台值(V11)。2) 网络结构 DAG 图设计。基于故障树理论,将节点之间相依关系的故障树转换为 PCBN 模型网络结构 DAG 图,结合相关工程经验和专家认知,初步对 PCBN 模型 DAG 图进行修剪和完善,构建的地铁运营安全 PCBN 网络 DAG 设计图如图 2 所示。通过这种方式能够极大地提高 PCBN 模型网络结构 DAG 图构建的效率,同时,避免完全依靠数据驱动的网络结构 DAG 图学习可能出现的过拟合问题。

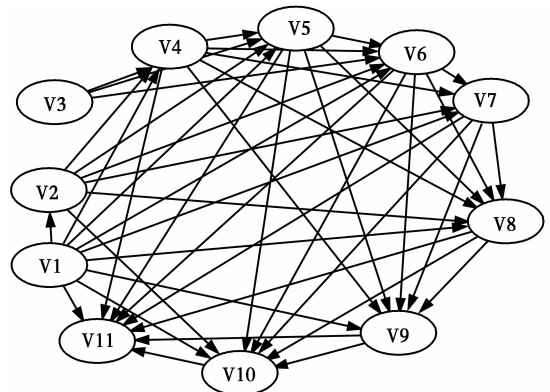


图 2 地铁运营安全 PCBN 模型网络 DAG 设计图

Fig. 2 DAG design of the subway operation safety PCBN model network

3.2.2 地铁运营安全 PCBN 模型参数设计 1) 节点间独立性检验。为精简构建的 PCBN 模型 DAG 图,基于监测数据,对图 2 所示每一条存在有向连接线的两节点之间的独立性进行基于 Kendall' τ (统计量 T)和基于经验 Copula 的独立性检验(统计量 T_n),发现 V1-V5、V1-V6、V2-V4、V4-V5、V4-V7、V4-V8、V5-V8、V5-V10、V5-V11、V6-V7、V6-V10、V6-V11、V7-V9、V8-V9 之间相互独立,故在 PCBN 模型 DAG 图删除这些节点间的有向连线。

2) 网络参数设计。利用 Pair-Copula 理论能够构建贝叶斯网络连接边之间的相依结构,本文利用 AIC、BIC 和 DIC3 种不同判断准则,识别 4 种

Copula 函数中最优 Copula, 构建的 PCBN 模型的 29 条边中, 14 条边的最优 Copula 函数为 Frank Copula, 11 条边为 Gumbel Copula, 3 条边 Clayton Copula, 而只有一条边的最优 Copula 函数是 Gaussian Copula。这表明, 由于参数之间的相关性不同, 其最优 Copula 函数并不相同, 不应在参数之间相关性存在先验性的预设, 说明了传统的贝叶斯网络模型的假设并不准确, 也进一步验证了采用本文构建的 PCBN 模型的函数的合理性和精确性。

在 PCBN 模型 DAG 图删除如 V1-V5 等相互独立的节点间的有向连线, 并计算各节点之间的相关系数所得结果如图 3 所示。

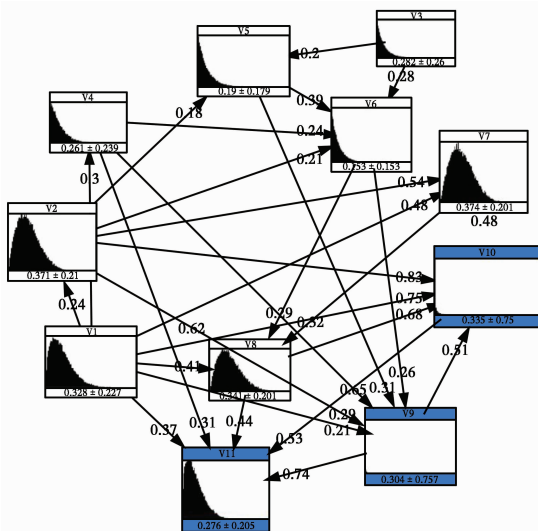


图 3 PCBN 模型网络节点相关系数

Fig. 3 PCBN model network node correlation coefficient

3.2.3 地铁运营安全 PCBN 模型准确性验证 为了进一步研究所构建 PCBN 模型的准确性, 对各个边的拟合情况进行 Rosenblatt 转换检验, 得出的统计量 $S_n^{(p)}$ 及 P 值都明显大于显著性水平 $\alpha = 0.05$, 这表明利用 Pair-Copula 理论构建的 PCBN 模型上各条边的相依结构, 能够准确捕捉节点之间的相关关系。

为了进一步验证 PCBN 模型的可靠性, 对比模型生成 V11 节点(径向错台值)预测值的统计特征和健康监测得到实测值的统计特征, 包括其均值、标准差、偏度和峰度, 发现预测值与实测值的均值和标准差呈现近似一致的趋势, 虽然预测值的偏度和峰度均低于实测值, 但偏差并不大。综合来看, 预测值与实测值的均值、标准差、偏度和峰度均非常近似, 表明所构建的 PCBN 模型能够较好地预测盾片错台值, 进而验证了模型的准确性。

3.3 基于 PCBN 模型的节点相关性分析

3.3.1 参数联合分布散点图分析 1) V1 节点与其

他节点的散点分布研究。由于无法通过图像显示 11 维空间中的参数相关性, 以 V1 节点与其他 10 个节点的散点分布为例, 描述 PCBN 模型得到的节点之间相关性, 得到 V1 节点与其他 10 个节点的散点分布以及拟合曲线, 以 V1 和 V2、V3 为例, 如图 4 所示。

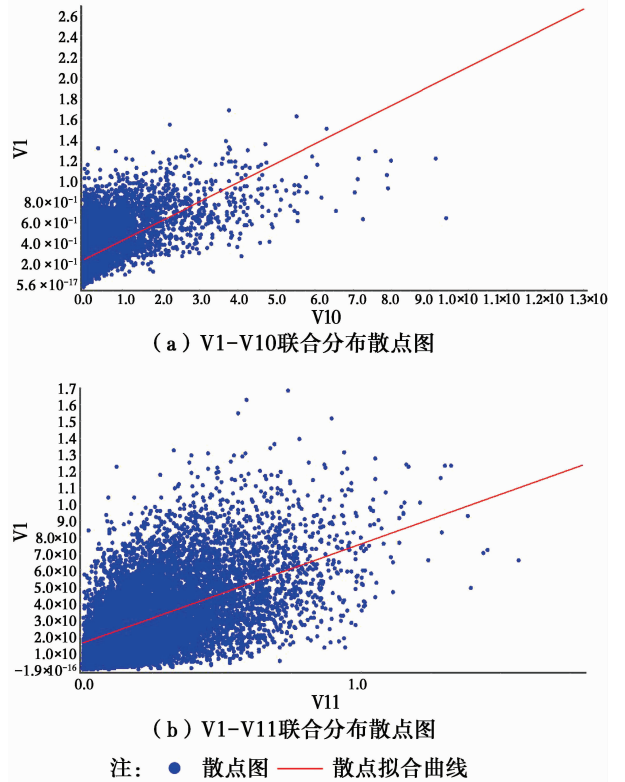


图 4 V1 节点与其他节点的联合散点分布及拟合曲线图

Fig. 4 Joint scatter distribution and fitting curve of V1 node and other nodes

若参数的散点分布呈现斜 45° 角的分布规律, 或者散点图拟合曲线的斜率越大, 表明两参数之间的相关性越大。利用 PCBN 模型模拟得到的散点图的分布规律并不相同, 其中, V1-V10 的散点最为密集, 呈现一定的斜 45° 角的分布规律, 且其拟合曲线的斜率也最大, 显示了 V1 节点与其他节点中, V1 与 V10 节点的相关性最大; V1-V2、V1-V7、V1-V8 和 V1-V11 的分布呈现明显的椭圆形的斜 45° 角分布, 呈现较强的相关性; 而 V1-V3、V1-V5 和 V1-V6 的拟合曲线的斜率趋近于 0, 呈现弱相关性。这些结论与利用原始监测数据得到的参数之间的相关关系较为吻合, 表明 PCBN 模型能够很好地捕捉参数的相依性, 并通过蒙特卡洛模拟法生成稳定的模拟数据, 该数据能够用于后续的结构失效概率与可靠度分析。2) V9-V10-V11 的三维联合散点图分析。在本文构建盾构地铁结构运营安全可靠评价 PCBN

网络模型中,每一环盾片结构的状态由一个 11 维的状态空间数据进行描述,由于难以描述数据在高维空间的分布规律。V9、V10 和 V11 作为本文评价盾构结构运营安全判定指标,以一环盾片的 V9、V10 和 V11 三维属性为例进行分析,100 组 V9、V10 和 V11 监测值散点分布图如图 5 所示,而 10 000 组基于 PCBN 模型的 V9、V10 和 V11 模拟值散点图如图 6 所示。

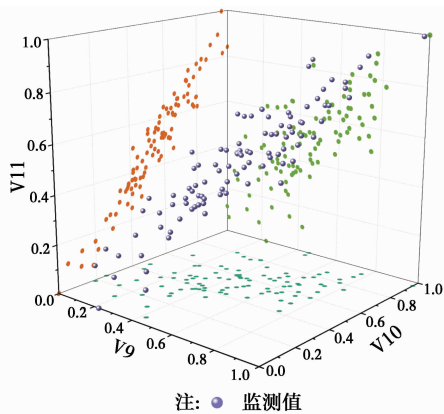


图 5 原始 V9、V10 和 V11 监测值散点图

Fig. 5 scatter plot of the original V9, V10 and V11 monitoring values

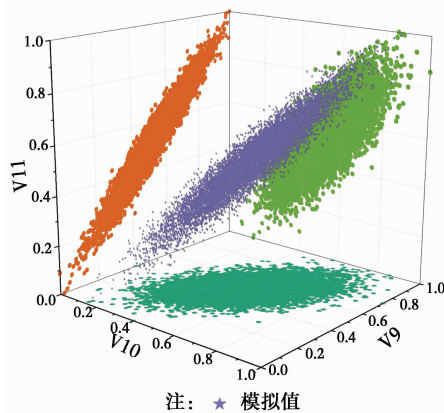


图 6 基于 PCBN 模型的 V9-V10-V11 模拟值散点图

Fig. 6 V9-V10-V11 analog value scatter plot based on PCBN model

对比图 5 和图 6 可知,由 V9、V10 和 V11 的三维分布可知,原始监测值和模拟值散点的聚集状态比较类似,均是呈现束状分布。表明用 PCBN 模型生成的模拟数据与原始数据相似度较高,较之传统的贝叶斯网络模型,生成的数据保留了参数之间的相关性。图 5 和图 6 中的三维散点投影在各个二维面上,呈现了两个参数之间的相关性。对比 V9-V10、V9-V11 和 V10-V11 之间的相关性发现,V9-V11 的相关性最强,其二维散点分布聚集的非常紧密,V10-V11 次之,散点较为离散,V9-V10 最弱,散

点分布得非常离散。且对比图 5 和图 6 也能发现,PCBN 模型能精准捕捉参数的相依性关系。通过 Pair-Copula 理论可以构建参数的相依性模型,能够更精确构建这些属性的在高维状态空间中的分布规律,同时,也表明该模型能够用于盾构地铁结构的安全可靠度精确评估。

3.3.2 节点参数的百分位蛛网图分析 为使 PCBN 模型构建的联合分布模型的结果更加可视化,绘制了参数联合分布的百分位蛛网图(Percentile Cobweb Plots)^[17]。该图的横坐标为各个不同的参数,纵坐标为某个参数取值的百分位取值点,用直线连接同一组数据中落在纵坐标上的取值点,形成蛛网线,直线的分布规律即能表达参数之间的相关性;并统计一组数据中相邻参数百分位取值之和,得到其统计分布图。蛛网线呈现“三角形分布”以及相邻参数百分位取值之和分布呈现“三角形分布”的程度越大,表示参数之间相互独立的程度越大。

选取 PCBN 模型得出的 5 000 组数据绘制百分位蛛网图,如图 7 所示。发现 V1-V10、V10-V11 之间呈现明显的非“三角形分布”,表明这 2 组参数之间具有较强的相关性;V2-V3、V3-V4、V4-V5、V6-V7 和 V7-V8 之间呈现明显的“三角形分布”,表明这 5 组参数之间相对独立;而 V11-V2、V5-V6 和 V8-V9 则呈现不明显的“三角形分布”,表明这 3 组参数存在弱相关性,该结论亦与图 4 的结论较为吻合。

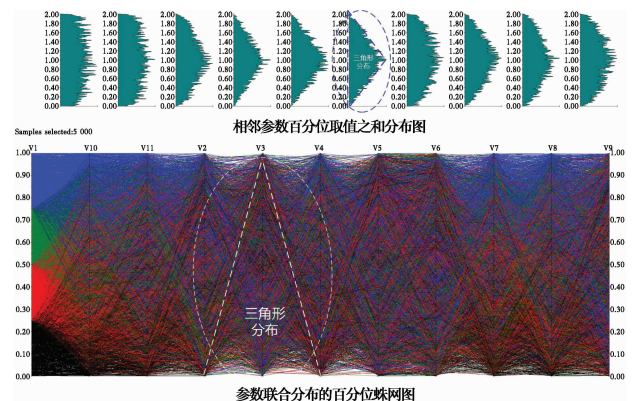


图 7 参数联合分布的百分位蛛网图

Fig. 7 Percentile spider map of joint distribution of parameters

3.4 某地铁空推段安全可靠度评估

在构建的 PCBN 模型的基础上,利用蒙特卡罗法可以得到各节点指标的模拟值,为保证失效概率计算的精度,采用 MCMC 法,进行了 5 次 10^7 次 M-H 抽样,能够保证失效概率的精度达到 0.01×10^{-5} 。

在得到节点指标的模拟值后分别采用 3 种失效模式计算结构的失效概率,计算结果如图 8 所示。

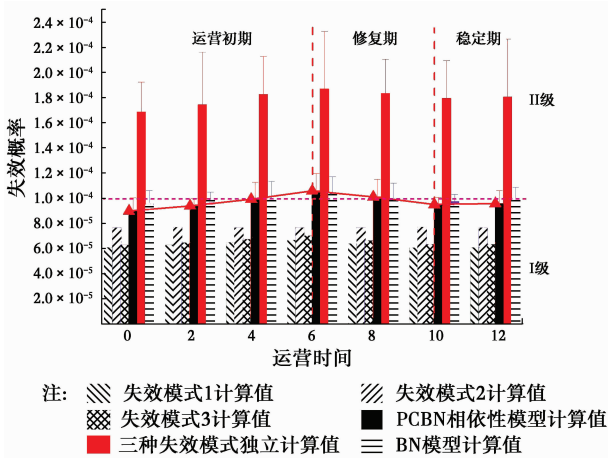


图 8 失效概率计算结果

Fig. 8 Failure probability calculation results

同时,在图 8 中也对比 3 种不同的失效模式以及节点之间独立下的失效概率计算值,发现若只考虑一种失效模式得出的结构失效概率比通过 PCBN 模型得到失效概率的少 20%~30%左右,地铁结构偏于安全。且随着实际工程情况的变化,各个失效模型计算得到的失效概率值变化幅度很小,以失效模式 2 的计算值为例,从 0 到 12 月,其失效概率最大变化量在 1%左右,表明用单一的失效模型并不能很好地描述盾构结构的安全状态。若考虑 3 种失效模式的独立叠加,则发现其失效概率是 PCBN 模型的 2 倍左右,偏向危险,且对比 PCBN 模型和独立模型计算值的误差线发现,独立模型的误差线较长。比如,进行 5 次抽样后得到运营 2 个月的评估结果,PCBN 模型和独立模型的标准差分别为 0.0593×10^{-4} 和 0.4421×10^{-4} ,相差 7.46 倍,表明独立模型计算结构的稳定性很差,也不适合作为盾构地铁结构的安全评判方法。另外,对比 PCBN 模型和传统 BN 模型计算值发现,随着运营时间变化,PCBN 模型能够更好的描述节点参数之间的相依结构,其计算值较 BN 模型变化幅值更大,表明 PCBN 模型计算值能够更敏感的捕捉到结构状态信息的变化。综合以上因素,选用 PCBN 模型计算值作为盾构结构安全状态的最终评判值。

武汉地铁 3 号线越汉江空推段运营 6 个月后,其区间渗透水病害非常明显,并在盾构地铁的局部发现微小裂缝。依据可靠性值将运营地铁结构的安全状态分为 4 个等级,其中 I 级和 II 级分界线的失效概率值为 1.0×10^{-4} 。从图 8 中可知,通过 PCBN

模型发现,空推区监测段地铁结构的失效概率在运营 6 个月后,由 0.898×10^{-4} 增加到 1.061×10^{-4} ,其安全等级由 I 级变化到了 II 级,该评估结果的变化趋势与实际工程中出现的预警信息较为一致。相关地铁运营安全管理部门组织相关专家讨论后,决定对相应区段的病害部位采用修复措施,经过处理后,地铁内的渗透水病害明显减少。由图 8 可知,在经过修复后,地铁结构的失效概率从 6 月到 10 月由 1.061×10^{-4} 减少到 0.954×10^{-4} ,且安全等级回到了 I 级,表明修复措施明显改善了地铁安全状态。而后的 10~12 月,其失效概率从 0.954×10^{-4} 变化到 0.957×10^{-4} ,没有明显的波动,显示地铁结构的安全状态进入了平稳期,安全风险得到了控制。

通过对比 PCBN 模型得出的地铁安全状态与地铁工程中的实际风险信息非常吻合,其中,0~6 月为运营初期,其结构失效概率有一定的增加趋势。而后 6~10 月为地铁结构的修复期,其失效概率明显减少,而 10~12 月为结构修复后的稳定期,其失效概率值基本保持不变,体现了 PCBN 模型对实际地铁运营安全管理有较好的指导效用。

4 结论

基于 PCBN (Pair-Copula Bayes Network) 模型,以武汉地铁三号线某空推段为研究背景,选取 11 个监测指标作为评价盾构地铁结构安全可靠性的评定指标,构建 11 维节点的 PCBN 模型,基于盾构地铁 3 种失效模式进行参数相关性分析、安全状态评价,结论如下:

1) 对实际运营的盾构地铁结构的安全演化规律的研究存在不足,运用 PCBN 模型,结合可靠度分析理论,构建监测指标与结构安全状态之间的隐性非线性映射关系,用于实现运营盾构地铁结构的安全状态动态评价决策。

2) 构建了多元节点的联合概率分布,从参数联合分布散点图分析、节点参数的百分位蛛网图分析两个方面来分析节点之间相关性。结果表明,通过 Pair-Copula 理论可以构建参数的相依性模型,能够更精确构建这些属性在高维状态空间中的分布规律,该模型能够用于盾构地铁结构的安全可靠度精确评估。

3) 以武汉地铁三号线某空推段为工程背景进行 PCBN 模型建模,选取 3 种不同的失效模式,来评判运营盾构地铁结构的失效概率,得到其安全可靠度。结果表明,PCBN 模型得出的地铁安全状态与地铁

工程中的实际风险信息非常吻合。

参考文献:

- [1] ZHANG W, SUN K, LEI C, et al. Fuzzy analytic hierarchy process synthetic evaluation models for the health monitoring of shield tunnels[J]. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. 2014, 29(9SI): 676-688.
- [2] 黄俊. 水底大直径盾构隧道健康监测系統研究与应用[D]. 北京:北京交通大学, 2013.
HUANG J. Research and application of health monitoring system for large diameter shield tunnel under water [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2013. (in Chinese)
- [3] 杨艳青. 运营隧道健康诊断及剩余寿命评估研究[D]. 北京:北京交通大学, 2012.
YANG Y Q. Research on health diagnosis and remaining life assessment of operational tunnels[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012. (in Chinese)
- [4] HUANG H W, ZHANG Y J, ZHANG D M, et al. Field data-based probabilistic assessment on degradation of deformational performance for shield tunnel in soft clay[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2017, 67: 107-119.
- [5] MADADGAR S, MORADKHANI H. Spatio-temporal drought forecasting within Bayesian networks [J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 512(512): 134-146.
- [6] KUROWICKA D, COOKE R M. Distribution-free continuous bayesian belief [M]. *Modern Statistical and Mathematical Methods in Reliability*, 2005, 10: 309.
- [7] BAUER A, CZADO C, KLEIN T. Pair-copula constructions for non-Gaussian DAG models [J]. *Canadian Journal of Statistics-Revue Canadienne De Statistique*, 2012, 40(1): 86-109.
- [8] BEDFORD T, COOKE R M. Probability density decomposition for conditionally dependent random variables modeled by vines [J]. *Annals of Mathematics & Artificial Intelligence*, 2001, 32: 245-268.
- [9] 叶耀东. 软土地区运营地铁盾构隧道结构变形及健康诊断方法研究[D]. 上海:同济大学, 2007.
YE Y D. Research on structural deformation and health diagnosis method of subway shield tunnel in soft soil area [D]. Shanghai: Tongji University, 2007. (in Chinese)
- [10] HUANG X, HUANG H W, ZHANG J. Flattening of jointed shield-driven tunnel induced by longitudinal differential settlements [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2012, 31: 20-32.
- [11] LIU X, BAI Y, YUAN Y, et al. Experimental investigation of the ultimate bearing capacity of continuously jointed segmental tunnel linings [J]. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2016, 12(10): 1364-1379.
- [12] ZHANG H B, CHEN J J, FAN F, et al. Deformation monitoring and performance analysis on the shield tunnel influenced by adjacent deep excavations [J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2017, 30(B40150022SI).
- [13] HUANG H W, SHAO H, ZHANG D M, et al. Deformational responses of operated shield tunnel to extreme surcharge: a case study [J]. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2017, 13(3): 345-360.
- [14] TONDINI N, BURSI O S, BONELLI A, et al. Capabilities of a fiber bragg grating sensor system to monitor the inelastic response of concrete sections in new tunnel linings subjected to earthquake loading [J]. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2015, 30(8): 636-653.
- [15] 周宁, 袁勇. 越江盾构隧道纵向变形曲率与管环渗漏的关系[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2009, 37(11): 1446-1451.
ZHOU N, YUAN Y. Relationship between longitudinal deformation curvature and tube ring leakage of Yuejiang shield tunnel [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2009, 37(11): 1446-1451. (in Chinese)
- [16] 姜帆. 城市轨道交通设施养护维修技术规范[M]. 北京:中国铁道出版社, 2010.
JIANG F. Technical specifications for maintenance and maintenance of urban rail transit facilities [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2010. (in Chinese)
- [17] NESLO R, MICHELI F, KAPPEL C V, et al. Modeling stakeholder preferences with probabilistic inversion [M]. Springer Netherlands, 2008: 265-284.

(编辑 胡玲)