

基于区间直觉犹豫模糊集的高速列车系统关键部件辨识

林 帅, 贾利民[†], 王艳辉

(北京交通大学 轨道交通控制与安全国家重点实验室, 北京 100044;

北京交通大学 北京市城市轨道交通信息智能感知与服务工程技术研究中心, 北京 100044)

摘要: 关键部件作为系统可靠性分析的重要组成以及系统维修策略制定的重要基础, 其辨识方法与识别结果的准确性一直是研究热点与难点. 为有效识别关键部件保证高速列车系统安全可靠运行, 本文提出一种新的基于区间直觉犹豫模糊集的关键部件辨识方法. 首先通过回顾现有复杂系统网络建模方法及其优缺点, 归纳总结部件的提取规则与部件间作用关系的定义和类型, 提出由局部到整体的高速列车系统全局拓扑网络模型构建方法. 其次鉴于现有针对同一高速列车同一节车辆同一部件的故障维修记录数据量少、随机性大等特点, 提出将节点属性值区间化, 构建节点属性的区间直觉犹豫模糊集, 其中节点属性包括由故障数据分析获得的节点可靠性属性值以及由所建全局拓扑网络得到的拓扑属性. 最后利用区间直觉犹豫模糊积分算子综合节点的多种属性辨识系统中的关键部件. 以转向架系统的拓扑结构以及历史故障数据为基础的实例分析表明, 所提出的辨识方法能够准确的识别出系统中的关键部件, 且与专家经验的分析结果基本一致.

关键词: 高速列车系统; 网络理论; 模糊集理论; 区间直觉犹豫模糊集; 关键部件

引用格式: 林帅, 贾利民, 王艳辉. 基于区间直觉犹豫模糊集的高速列车系统关键部件辨识. 控制理论与应用, 2019, 36(2): 295 – 306

中图分类号: N945.17; U266.2

文献标识码: A

DOI: 10.7641/CTA.2018.70781

Identification of critical components of high-speed train system based on interval-value intuitionistic hesitant fuzzy set

LIN Shuai, JIA Li-min[†], WANG Yan-hui

(State Key Laboratory of Rail Traffic Control and Safety, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

Beijing Research Center of Urban Traffic Information Sensing and Service Technologies, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Critical component is an integral part to system reliability analysis and a mainstay in establishing system maintenance strategy. The identification methods of critical component and their accuracy of the results are always one of the most difficult and hottest problems. In order to identify critical components synthetically and effectively and guarantee safety of high-speed train system, a novel identification method of critical components based on interval-value intuitionistic hesitant fuzzy set is presented in this paper. First, the existing system network modeled methods and their advantages and disadvantages are summarized. Based on above research, the holistic topological network model is proposed from part to whole, according to physical structure and reliability properties, and then the extraction rules of nodes and the types and definition of edges are supposed. The interval of components' attributes is considered and interval-value intuitionistic hesitant fuzzy set of nodes' properties are constructed, in view of the characteristics of high speed train system, such as the small amount and randomness of failure data. To utilize interval-value intuitionistic hesitant fuzzy Choquet operator, multi-properties of nodes are aggregated and finally critical components can be identified. The results show that the holistic topological network model can be described the structure of the whole system, and the proposed identification method can give quantitatively the ranking of importance components for bogie system.

Key words: high-speed train system; network theory; fuzzy set theory; interval-value intuitionistic hesitant fuzzy set; critical components

Citation: LIN Shuai, JIA Limin, WANG Yanhui. Identification of critical components of high-speed train system based on interval-value intuitionistic hesitant fuzzy set. *Control Theory & Applications*, 2019, 36(2): 295 – 306

1 引言

高速列车系统^[1]通常是由45000多个零部件构成的有机整体,其各零部件的功能作用与结构地位不同,对系统级可靠性影响也不同.通过识别系统中关键部件,并对其性质与行为探究以达到提高全局系统可靠性,有效制定维修策略,降低维护费用的目的.在实际运营中,通常对关键部件监测以快速的预估计系统可靠性,以确保高速列车系统安全运行.

常用“重要性测度”识别系统中的关键部件.如基于系统可靠性理论的“部件重要性测度”,利用故障树^[2]、事件树^[3]等方法以“专家知识经验”构建面向功能的系统结构模型,再结合部件的可靠性属性(如固有可靠度、故障频率等)构建重要性测度识别关键部件,典型的有: Birnbaum 重要度^[4]、有限边界可靠度(conditional marginal reliability importance, CMRI)^[5]、融合重要度(integrated importance measure, IIM)^[6]、改进PageRank(improved-PageRank, IPR)^[7]等. “部件重要性测度”是目前高速列车系统中广泛采用的关键部件辨识方法,但其存在的如系统功能结构建模并不能完整的反映系统拓扑结构、系统部件间相互独立等缺陷往往影响辨识结果的准确率;计算“部件重要性测度”所必须的可靠性属性通常是由故障记录数据计算获得,虽然目前已有较完善的系统记录高速列车系统的故障维修情况,但是针对同一列车同一辆车同一部件的故障数据量有限,受随机性与不确定性影响导致部件可靠性属性计算结果误差较大.

基于网络理论的“节点重要性测度”,依据任何系统的本质均为网络^[8]的客观规律,首先将高速列车系统物理结构抽象为拓扑网络模型,借鉴网络理论中“节点重要性测度”评估网络中的关键节点即为系统的关键部件,如度^[9]、介数^[9]、特征向量^[10]、凝聚度^[11]等. “节点重要性测度”仅是对部件在系统中拓扑结构地位的分析,部件自身所具有的可靠性属性等对部件在全局系统中重要程度的影响却未考虑;总结现有的高速列车系统网络模型发现,所建网络模型^[12-13]都未明确给出作为节点的部件提取标准,而高速列车系统中零部件众多,若干零部件实质上作为一个整体参与列车功能实现,若其中一个零部件故障则更换一个整体而非单一故障零部件,由此导致某些零部件的可靠性参数获取存在一定难度;现有网络模型中连接边所表征的物理含义混乱(如以部件间维修关系^[13]为边,以能量传递过程^[14]为边等),缺乏规范的连接边类型划分,以及直接对全局系统建模工程量巨大等均导致网络模型在描述系统完整性、准确性等方面很难得到验证.

“部件重要性测度”和“节点重要性测度”均为

单一测度辨识关键部件,其可能受随机性、不确定性以及偏重点不同的影响导致不同测度识别关键部件结果不同^[15-16]的情况.为此部分研究者提出从多属性决策角度^[17]出发,将关键部件识别问题视为多属性决策问题,融合多种重要性测度识别系统中的关键部件,常见的方法有模糊积分^[18-19]、熵权^[20]、理想解法(technique for order preference by similarity to an ideal solution, TOPSIS)^[21]等.但是现有的融合多种测度的研究多是对同一类型测度的综合,即多种“部件重要性测度”聚合或多种“节点重要性测度”综合,缺少从系统功能与拓扑相结合角度综合多种属性辨识关键部件的研究.

鉴于上述关键部件识别方法存在的问题以及关键部件对系统可靠性和维修策略制定的重要意义,本文首先给出高速列车系统部件的提取规则以及部件间连接关系的划分,提出系统全局网络模型建模方法,并以此为基础计算节点拓扑属性;其次针对现有高速列车系统故障数据的特点,提出将部件的属性值区间化,构建节点各属性的区间直觉模糊集,并利用区间直觉模糊积分聚合节点的多种拓扑和可靠性属性辨识系统中关键部件;最后以高速列车转向架系统为例应用所提出的方法识别关键部件,并与现有的多种方法比较.

2 面向全局的系统网络模型构建

2.1 部件(Components)

高速列车系统全局结构与行为是由构成系统的部件行为及耦合作用关系所决定的^[22-23].因此,首先需要将系统分解为可管理的部件或零件.依据系统功能特点可将高速列车系统划分为系统层、部件层和零件层(如图1所示).

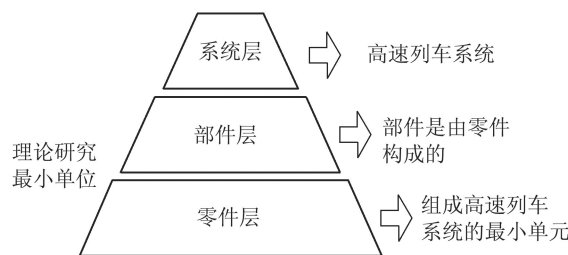


图1 高速列车系统层次划分

Fig. 1 Hierarchical division of high-speed train system

如图1所示,零件应为理论上构成高速列车系统的最小单元.但在实际运行过程中通常是由几个零件作为一个整体参与系统运行、维修,单个零件的相关信息(如故障频率、维修信息等)获取难度较高,因此这里以部件作为高速列车系统的最小研究单元.为了使部件具有功能性、可计算性进而参与系统可靠性分析,这里给出部件提取普适性规则:

1) 可计算: 部件的表征参量是可获取或可计算的, 例如故障频率、可靠度、平均无故障时间(mean time between failure, MTBF)等;

2) 功能性: 部件应是具有特定功能、特定物理化学联系、特定行为的整体, 它作为一个不可分割的整体参与系统的运行过程;

3) 规范性: 部件的划分可参考动车组的各级维修规程。

2.2 部件间连接关系

通过对高速列车系统拓扑结构分析, 按照部件间传输物质的不同, 可将部件间的连接关系划分为3种, 即机械、电气和信息连接3种。

1) 机械连接: 如果两部件通过紧固件(如螺栓、螺钉、铆钉等^[24])相连接传递能量(如动能等), 则认为这两个部件间存在机械连接。

2) 电气连接: 若部件间以电缆、管道等为传输媒介传输电流、气体、油等, 则认为该部件间存在电气连接。

3) 信息连接: 若信息或指令通过电缆等传输媒介从一部件传输到另一部件, 则认为这两部件之间存在信息连接^[25]。

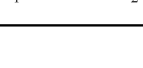
2.3 系统全局拓扑网络模型

将所提取的部件抽象为网络模型中的节点 v_i ; 若部件间存在机械连接, 则认为该部件间存在一条有向连接边 $e_{st} \in E_m$, 同理可得到电气连接的边 $e_{ij} \in E_e$ 和信息连接的边 $e_{pq} \in E_i$ 。对于机械连接而言, 删除不存在机械作用关系的孤立节点, 形成系统机械拓扑网络模型 $G_m(V_m, E_m)$, 其中: $v_j \in V_m, e_{st} \in E_m$ 。同样的, 可构建电气拓扑网络模型 $G_e(V_e, E_e)$ 和信息拓扑网络模型 $G_i(V_i, E_i)$ 。

网络中的连接边表征的是能量、信息等的传输过程, 因此应该具有方向性。通过与科技部“十三五”国家重点研发计划(No. 2016YFB1200402), 结合专家经验以及高速列车系统的功能特点, 确定3种连接边的方向如表1所示。其中黑色的点表示部件, 带有箭头的线表示部件间的连接关系。

表1 连接边方向

Table 1 The direction of edges

连接边方向	连接方式
 (双向)	机械连接
 (单向)	信息连接
	电气连接
	信息连接

将机械、电气和信息拓扑网络模型统称为基础拓扑网络模型, 则它们是对系统局部拓扑的建模。但通常情况下, 更多关注的是高速列车系统级的可靠性, 因此需要将基础拓扑网络模型聚合形成能够表征整体系统的网络模型, 具体融合过程如图2所示。

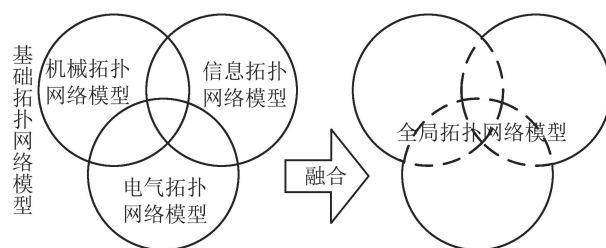
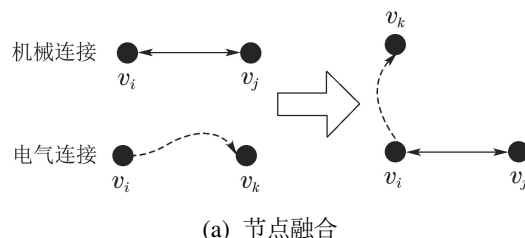


图2 系统全局拓扑网络模型

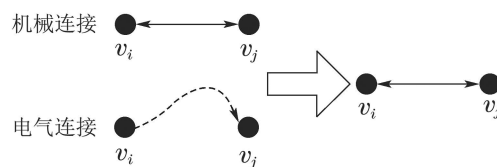
Fig. 2 The system holistic network model

若一个节点存在于两种或两种以上的基础拓扑网络模型中, 则构建全局拓扑网络模型时可将该节点合并。如图3(a)所示, 节点 v_i 同时存在于机械和电气拓扑网络中。在实际系统中, 节点 v_i 所对应的均为同一部件, 因此可将其融合为一个节点。

若两个节点间存在两条或两条以上连接边, 则合并为一条。如图3(b)所示, 节点 v_i 和节点 v_j 之间既存在机械作用关系又存在电气作用关系, 对于系统全局结构而言我们更多的是关注部件间是否存在耦合作用关系, 因此可将其合并成为一条边。合并后的边实际上是一条表示多种作用关系的边。



(a) 节点融合



(b) 边融合

图3 节点和边的融合

Fig. 3 The integration of nodes and edges

依据上述节点和边的融合规则, 利用布尔运算融合 $G_m(E_m, V_m)$, $G_e(E_e, V_e)$ 和 $G_i(E_i, V_i)$ 构建系统全局拓扑网络模型 $\tilde{G}(E, V)$ 规则如下:

$$\tilde{G}(V, E) : \begin{cases} V = V_i \cup V_m \cup V_e, \\ E = E_i \oplus E_m \oplus E_e, \end{cases} \quad (1)$$

其中 $\oplus$ 为逻辑加, 定义如表2所示.

表2 逻辑加运算

Table 2 The operation of logic additive

$\oplus$	0	1
0	0	1
1	1	1

模型(1)仅仅是对系统拓扑结构的反映, 而节点自身的属性特征在模型中并未显示. 因此结合部件的可靠性与拓扑属性, 将模型(1)扩展:

$$G(V, E, X_i) : \begin{cases} V = V_i \cup V_m \cup V_e, \\ E = E_i \oplus E_m \oplus E_e, \\ X_i = \{x_{i1}, \dots, x_{ij}\}, \end{cases} \quad (2)$$

其中: X_i 为节点 v_i 的属性集, x_{ij} 为节点 v_i 的第 j 个属性值.

3 高速列车系统关键部件辨识

3.1 部件属性选取与计算

依据高速列车故障维修数据以及拓扑特征, 选取高速列车系统部件的属性集. 例如, 通过科技部“十三五”国家重点研发计划(No. 2016YFB1200402), 获得如图4所示的转向架系统部件的属性集. 以系统全局拓扑网络模型 G 为基础, 可计算得到部件的拓扑属性: 中心度、介数、紧密度以及特征向量; 以现有故障维修记录数据为基础, 可获得部件可靠性属性: 故障频率、平均无故障时间、使用寿命.

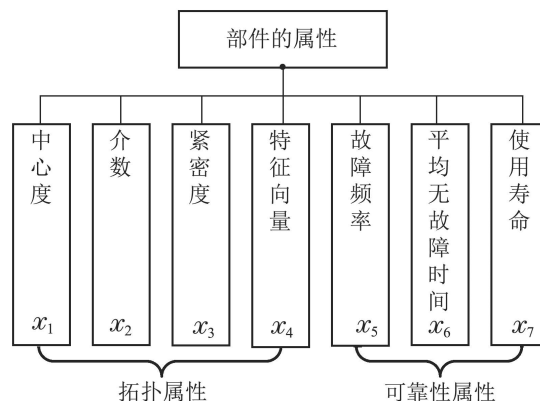


图4 部件的属性集

Fig. 4 The set of component properties

以往的研究中通常将部件的可靠性属性作为一个确定的值参与系统可靠性分析, 但通过对高速列车故障记录数据分析发现, 针对同一列车同一辆车的同一个部件故障数据相对较少. 以2007年1月至2013年12月的50列CRHX型高速列车故障处理记录数据为例, 受电弓总共故障198次, 但是针对同一列车同一车辆的受电弓故障数据仅有1条或2条(如表3所示). 虽然同一列车运行工况基本相同, 但同一列车的不同车辆结构也是存在差异性的, 如列车有动车和拖车之分. 因此将同一列车不同车辆相同位置部件的故障数据用于计算同一部件的可靠性参数显示是不合理的. 针对这一情况, 本文以区间数的形式来描述部件的可靠性属性, 以提高故障数据分析结果的精确度.

表3 CRHX型高速列车受电弓故障数据

Table 3 Fault data of pantograph for CRHX high-speed train

序号	列车号	车号	故障日期	所属系统	部件	初步原因	行驶公里	故障后果
1	CRH2003A	6	3/25/2011	高压供电系统	受电弓	运行环境造成	2006461	无影响
2	CRH2013A	4	4/27/2010	高压供电系统	受电弓	运行环境造成	1574278	无影响
3	CRH2013A	4	3/12/2010	高压供电系统	受电弓	运行环境造成	1488733	无影响
4	CRH2021A	6	10/19/2010	高压供电系统	受电弓	使用维护不当造成	1858364	临修
5	CRH2021A	6	10/19/2010	高压供电系统	受电弓	供方制造质量问题	1858364	无影响
6	CRH2021A	6	2/7/2011	高压供电系统	受电弓	运行环境造成	2025500	无影响
7	CRH2046A	6	11/28/2011	高压供电系统	受电弓	供方制造质量问题	2462996	继续运行
8	CRH2055A	6	5/27/2011	高压供电系统	受电弓	供方制造质量问题	2152829	无影响
9	CRH2057A	4	3/24/2010	高压供电系统	受电弓	运行环境造成	1318421	碎修
10	CRH2157A	6	8/9/2011	高压供电系统	受电弓	供方制造质量问题	306642	无影响
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

例如, 以同一列车相同类型车辆的相同位置部件的可靠性属性的最大值和最小值构建该类属性的区间数作为识别系统中关键部件的数据基础. 以CRHX型动车组动车转向架轮对为例(如图5所示), 若计算车轮对故障频率的区间数, 则需分别计算2号、3号、

6号和7号动车车轮对的故障频率 $x(2)$, $x(3)$, $x(6)$ 和 $x(7)$, 则动车轮对的故障频率区间数为

$$[\max\{x(2), x(3), x(6), x(7)\}, \min\{x(2), x(3), x(6), x(7)\}].$$

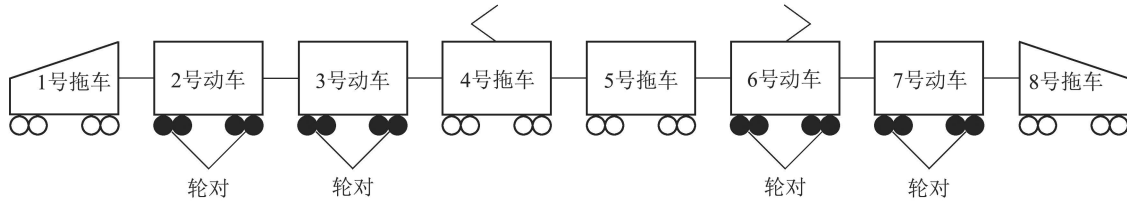


图5 CRHX型高速列车整体结构

Fig. 5 The holistic structure of CRHX high-speed train

3.2 关键部件识别模型

这里提出基于区间直觉犹豫模糊集^[26-28]的多属性融合的高速列车系统关键部件识别模型, 原因如下: 1) 如上所述, 单部件故障数据相对不足, 导致部件可靠性属性的计算结果精度较差, 因此提出以区间直觉犹豫模糊集的形式来表征由故障数据计算得到的部件属性, 以提高计算精度, 弥补数据量不足的缺陷。2) 如图4所示, 影响系统中部件关键程度的属性较多, 且各属性间的相关性一般是未知的, 因此提出以多属性融合的方法辨识关键部件。

首先依据图4中所选取的高速列车系统部件属性集, 构建关键部件属性测度集 $X_i = \{x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im}\}$, 并将其区间化形成区间直觉犹豫模糊矩阵:

$$\begin{cases} \tilde{D} = (\tilde{h}_{ij})_{n \times m}, \\ \tilde{h}_{ij} = \{x_{ij} | x_{ij} \in \tilde{h}_{ij}\} = \\ \{([\gamma_{x_{ij}}^+, \gamma_{x_{ij}}^-], [v_{x_{ij}}^+, v_{x_{ij}}^-]) | x_{ij} \in \tilde{h}_{ij}\}, \end{cases} \quad (3)$$

其中: $\tilde{h}_{ij}$ 是区间直觉犹豫模糊集^[29]; $\gamma_{x_{ij}} = [\gamma_{x_{ij}}^+, \gamma_{x_{ij}}^-]$ 表示节点 v_i 的第 j 个属性 x_{ij} 的可能取值范围; $v_{x_{ij}} = [v_{x_{ij}}^+, v_{x_{ij}}^-]$ 则为节点 v_i 的第 j 个属性 x_{ij} 的几乎不可能取值范围。

· 节点拓扑属性的区间直觉犹豫模糊集为

$$\tilde{h}_{ij} = ([x_{ij}, x_{ij}], [1 - x_{ij}, 1 - x_{ij}]).$$

· 节点可靠性属性的区间直觉犹豫模糊集为

$$\tilde{h}_{ij} = ([\min x_{ij}, \max x_{ij}], [1 - \max x_{ij}, 1 - \min x_{ij}]).$$

为了全面、综合的辨识系统中的关键部件, 需将节点的多种属性值融合。依据Deepa和Kumar^[25]提出的区间直觉犹豫模糊积分算子(interval-valued intuitionistic hesitant fuzzy Choquet integral, IVIHFCI), 将节点 v_i 的多个区间直觉犹豫模糊集 $\tilde{h}_{ij}$ 综合, 得到融合重要度 $\bar{h}_i$:

$$\begin{aligned} \bar{h}_i = \\ \text{IVIHFCI}_i(\tilde{h}_{i1}, \tilde{h}_{i2}, \dots, \tilde{h}_{im}) = \\ \{([\prod_{j=1}^m (\gamma_{x_{i,\sigma(j)}}^-)^{\mu(A_{i,\sigma(j)}) - \mu(A_{i,\sigma(j)})}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \prod_{j=1}^m (\gamma_{x_{i,\sigma(j)}}^+)^{\mu(A_{i,\sigma(j)}) - \mu(A_{i,\sigma(j)})}], \\ & [1 - \prod_{j=1}^m (v_{x_{i,\sigma(j)}}^-)^{\mu(A_{i,\sigma(j)}) - \mu(A_{i,\sigma(j)})}, \\ & 1 - \prod_{j=1}^m (v_{x_{i,\sigma(j)}}^+)^{\mu(A_{i,\sigma(j)}) - \mu(A_{i,\sigma(j)})}]. \end{aligned}$$

$$|x_{i,\sigma(1)} \in \tilde{h}_{i,\sigma(1)}, \dots, x_{i,\sigma(m)} \in \tilde{h}_{i,\sigma(m)}\}, \quad (4)$$

其中: $x_{i,\sigma(j)}$ 是节点 v_i 的 m 个属性中第 j 大的属性; $\tilde{h}_{i,\sigma(j)}$ 为节点 v_i 的 m 个属性中第 j 大的属性值 $x_{i,\sigma(j)}$ 的区间直觉犹豫模糊集; $\tilde{h}_{i,\sigma(1)} > \dots > \tilde{h}_{i,\sigma(m)}$ 并且 $\tilde{h}_{i,\sigma(0)} = \phi$; μ 为属性权重。

利用IVIHFCI算子得到的融合重要度 $\bar{h}_i$ 仍为区间值(式(4))。为了比较区间值的大小, 这里提出利用海明距离^[26]将融合重要度 $\bar{h}_i$ 转化为精确值。这是因为: 1) 将区间值转化为精确值也是区间型数据比较大小的常见方法之一。2) 所得到的融合重要度 $\bar{h}_i$ 并不是传统意义上的距离长度, 直接利用现有的区间值大小比较的方法显然是不合适的。因此, 这里利用海明距离^[26]确定各节点的区间直觉犹豫模糊积分 IVIHFCI 到最理想关键节点和最理想非关键节点的距离:

$$\begin{cases} d_i(\bar{h}, \alpha^+) = \\ \frac{1}{4m} \sum_{j=1}^m (|\max \gamma_{x_{ij}}^- - \gamma_{x_{i,\sigma(j)}}^-| + |\max \gamma_{x_{ij}}^+ - \gamma_{x_{i,\sigma(j)}}^+| + \\ |\min v_{x_{ij}}^- - v_{x_{i,\sigma(j)}}^-| + |\min v_{x_{ij}}^+ - v_{x_{i,\sigma(j)}}^+|), \\ d_i(\bar{h}, \alpha^-) = \\ \frac{1}{4m} \sum_{j=1}^m (|\min \gamma_{x_{ij}}^- - \gamma_{x_{i,\sigma(j)}}^-| + |\min \gamma_{x_{ij}}^+ - \gamma_{x_{i,\sigma(j)}}^+| + \\ |\max v_{x_{ij}}^- - v_{x_{i,\sigma(j)}}^-| + |\max v_{x_{ij}}^+ - v_{x_{i,\sigma(j)}}^+|), \end{cases} \quad (5)$$

其中 m 为属性的数量, 最理想关键节点 α^+ 和最理想非关键节点 α^- 的定义为

$$\alpha^+ = ([\max \gamma_{x_{ij}}^-, \max \gamma_{x_{ij}}^+], [\min v_{x_{ij}}^-, \min v_{x_{ij}}^+]),$$

$$\alpha^- = ([\min \gamma_{x_{ij}}^-, \min \gamma_{x_{ij}}^+], [\max v_{x_{ij}}^-, \max v_{x_{ij}}^+]).$$

若 α^+ 和 α^- 是最大和最小区间直觉模糊值, 则 $\alpha^+ = ([1, 1], [0, 0])$, $\alpha^- = ([0, 0], [1, 1])$ 。

定义节点属性融合值与理想关键节点的接近程度

为接近系数:

$$Cc_i = \frac{d(A_i, \alpha^+)}{d(A_i, \alpha^+) + d(A_i, \alpha^-)}.$$
 (6)

若该节点接近系数 Cc_i 越大,表明该节点与理想中的重要节点或关键节点位置越接近,则该节点也越重要.

4 实例研究与分析

4.1 全局拓扑网络模型

转向架系统(如图6所示)是高速列车系统的重要组成部分之一,其功能结构直接影响车辆的运行品质、动力性能以及行车安全.本文以高速列车动车的

转向架系统为例,应用所提出的方法识别系统中的关键部件(这里认为所有安装在转向架上的部件均属于转向架系统的一部分,包括轴温传感器、加速度传感器等).首先依据第2.1节中部件提取规则,提取转向架系统的33个部件(如表4所示).

深入分析转向架系统拓扑结构特征,依据第2.2节中部件间连接关系的划分,依次提取转向架系统中部件间的连接,构建基础拓扑网络模型(如图7(a)–(c)),并依据式(2)融合基础拓扑网络模型形成转向架系统全局拓扑网络模型如图7(d)所示.

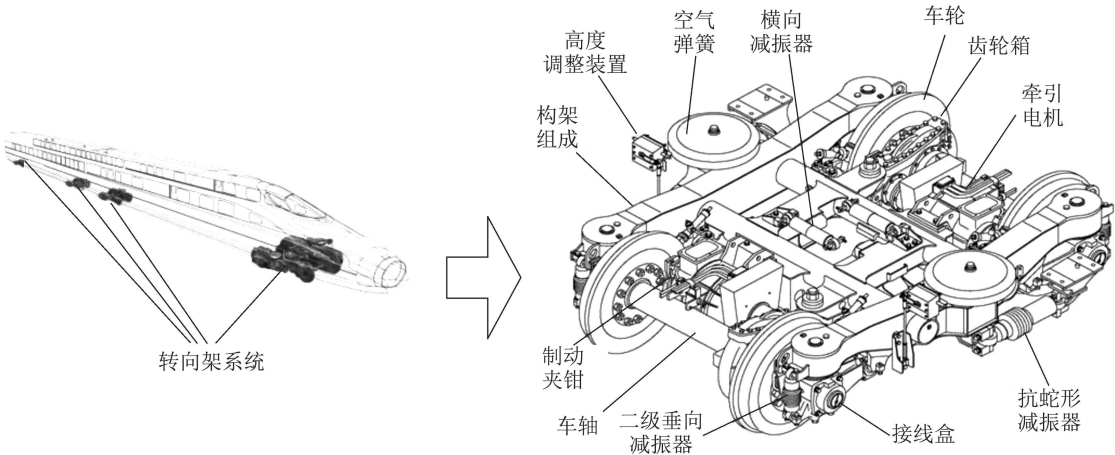


图 6 转向架系统示意图

Fig. 6 The bogie system

表 4 转向架系统的部件

Table 4 The components of bogie system

节点	部件名称	节点	部件名称	节点	部件名称
v_1	构架组成	v_{12}	二级垂向减振器	v_{23}	横向止挡
v_2	制动夹钳	v_{13}	联轴节	v_{24}	抗侧滚扭杆
v_3	闸片	v_{14}	齿轮箱	v_{25}	控制阀
v_4	轮装制动盘	v_{15}	接地装置	v_{26}	速度传感器1
v_5	增压缸	v_{16}	牵引电机	v_{27}	速度传感器2
v_6	弹簧组成	v_{17}	高度调整装置	v_{28}	踏面清扫装置
v_7	轴箱体	v_{18}	抗蛇行减振器	v_{29}	加速度传感器
v_8	一级垂向减振器	v_{19}	空气弹簧	v_{30}	集线盒
v_9	轴承	v_{20}	中心牵引销	v_{31}	齿轮箱轴承温度传感器
v_{10}	车轮	v_{21}	牵引拉杆	v_{32}	轴温传感器
v_{11}	车轴	v_{22}	横向减振器	v_{33}	AG37传感器

以图7中的4种网络模型为基础,图8给出了在不同网络中转向架系统节点的拓扑属性值.其中机械拓扑网络中由度识别的最关键节点为 v_1 ,而信息拓扑网络和电气拓扑网络的最关键节点则分别为 v_{25} 与 v_{31} ;由介数识别的转向架机械结构中最关键节点为 v_1 ,信息结构中节点 v_{25} 为最关键部件.可见转向架系统中各局部结构的关键节点是不同的.图7中

可以明显看出转向架系统主要以机械结构为主,图8的分析结果显示机械拓扑网络的分析结果与全局拓扑网络的结果最相近,但又有所差异.如机械拓扑网络中由特征向量识别出的较关键节点依次为 v_1 , v_7 和 v_6 ,全局拓扑网络中的较关键节点则为 v_1 , v_{25} 和 v_{31} .

另外,在全局拓扑网络模型下4种拓扑测度的识

别结果分析发现(图8所示), 最关键部件是不同的, 如由紧密度辨识的结果认为 v_4 是关键部件, 其余3种测度则认为节点 v_1 为关键部件. 这与本文之前所

提到的不同单一测度识别的结果不同有时可能是相互矛盾. 因此, 将多种节点属性融合提高识别结果的准确性.

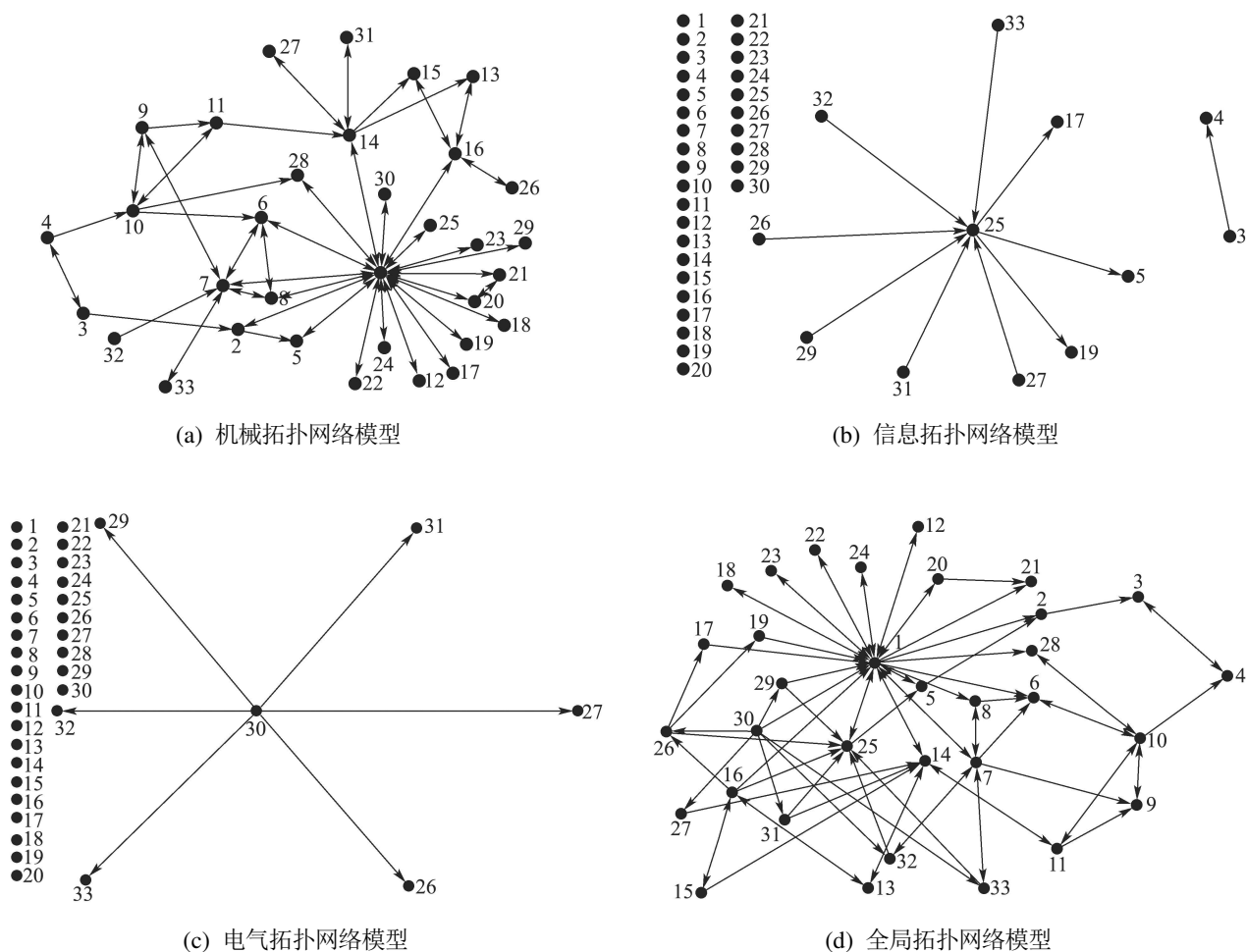
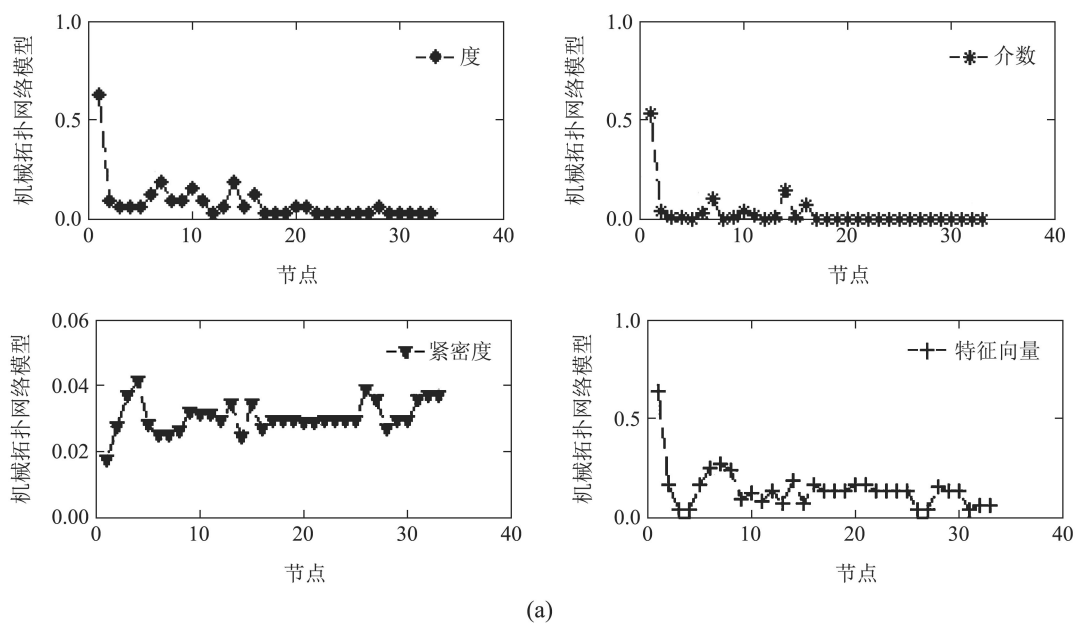


图7 转向架系统全局拓扑网络模型

Fig. 7 The holistic network model of bogie system



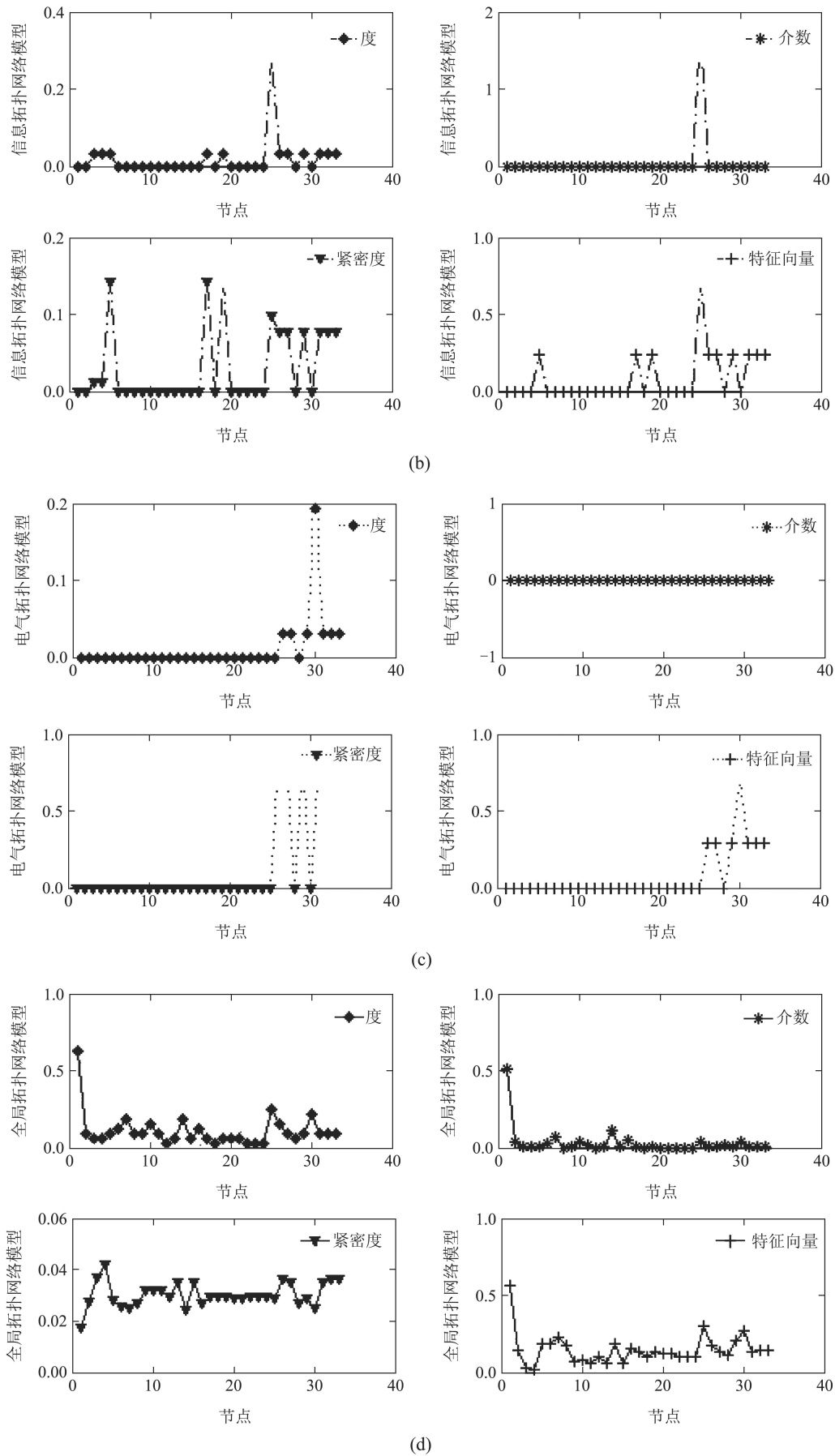


图8 转向架系统节点中心性测度

Fig. 8 The centrality measure of nodes for bogie system

通过比较基础和全局拓扑网络模型的平均度以及平均路径长度(如图9所示), 可以看出系统全局拓扑网络的性质并不是3种基础拓扑网络的简单相加. 如全局拓扑网络的平均路径长度远远低于3种基础拓扑网络模型平均路径长度之和, 同时也低于机械拓扑网络; 全局拓扑网络的平均度低于基础拓扑网络的平均度之和. 可见任意一种基础拓扑网络均不能完整的描述转向架系统拓扑.

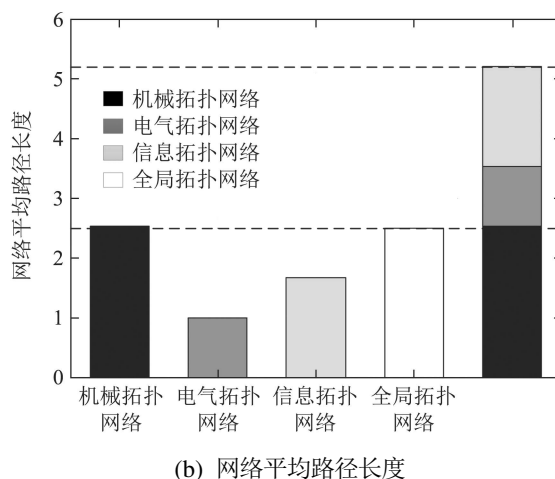
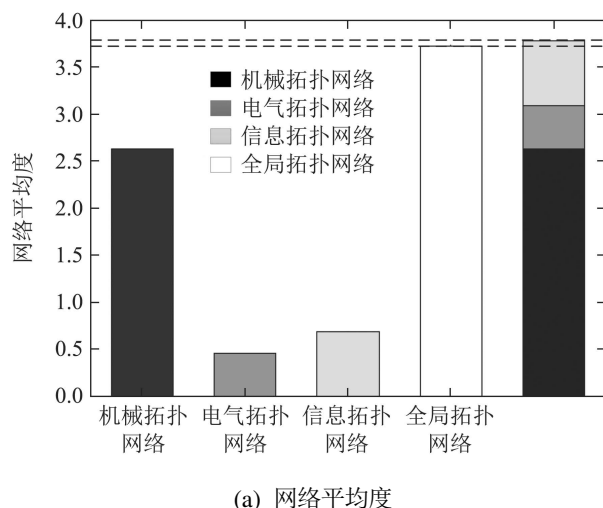


图9 转向架系统网络平均度和平均路径长度对比
Fig. 9 The comparison of average degree and average path length for bogie system

4.2 相关数据

通过科技部“十三五”国家重点研发计划(No. 2016YFB1200402), 获得转向架系统故障数据, 包括列车编号、所属系统、部件、故障日期、故障描述等33个属性. 对数据进行预处理, 删除与研究不相关的数据, 得到如表5所示转向架系统故障数据.

表5 转向架系统故障数据
Table 5 The fault data of bogie system

列车编号	所属系统	部件	故障日期	走行公里
CRH2011A	转向架系统	轴温传感器	2010-02-25	1337471
CRH2011A	转向架系统	轴承	2010-10-15	1613295
CRH2013A	转向架系统	车轴	2011-01-15	1917472
CRH2014A	转向架系统	轴承	2010-05-27	1697305
CRH2019A	转向架系统	中心牵引销	2010-02-05	1543458
CRH2019A	转向架系统	轴温传感器	2011-01-09	1988862
CRH2020A	转向架系统	加速度传感器	2010-09-13	1799366
CRH2032A	转向架系统	车轴	2010-01-08	1489984
CRH2032A	转向架系统	齿轮箱	2010-06-07	1630474
CRH2040A	转向架系统	齿轮箱	2010-02-25	1549695
CRH2045A	转向架系统	轴温传感器	2010-01-04	1365793
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

依据图4所构建的节点属性集, 构建转向架系统关键部件的评价测度集: $X = \{x_1, x_2, \dots, x_7\}$, 其中节点的拓扑属性, 度 x_1 、介数 x_2 、紧密度 x_3 和特征向量 x_4 (如图8所示); 由故障数据(如表5所示)计算获得的部件可靠性属性为故障频率 x_5 , MTBF x_6 和使用寿命 x_7 (如表6所示).

由图4可知节点的多个属性间并不是严格遵循相

互独立原则的, 通常属性间均具有一定的相关性: 这里选取7个节点属性作为识别关键部件的基础, 常见的利用Sharply值和Marichal熵构建优化模型确定 μ 的方法, 需要求解具有 2^7 个未知数的优化模型, 计算复杂度较高. 因此, 这里借鉴马田系统通过正交试验可降维的优势^[30], 计算节点各属性的模糊测度(如表7所示).

表6 节点的可靠性属性

Table 6 Reliability properties of nodes

节点	故障频率	故障频率区间数	MTBF	MTBF区间数	使用寿命	使用寿命区间数
v_1	1	[0,1]	2.34	[2.34,3.25]	7	[7,7]
v_2	3	[3,4]	1.25	[1.25,1.78]	5.25	[4.99,5.25]
v_3	3	[3,3]	1.54	[1.54,1.67]	4.2	[3.95,4.2]
v_4	2	[2,3]	2.21	[1.92,2.21]	4.5	[4.26,4.5]
v_5	1	[1,2]	1.72	[1.72,2.01]	6	[5.87,6]
v_6	4	[3,4]	1.92	[1.84,1.92]	5.9	[5.64,5.9]
v_7	3.67	[2,3.67]	1.41	[1.41,1.63]	5.4	[5.4,5.62]
v_8	2	[1.67,2]	1.69	[1.69,1.95]	5.8	[5.8,6.02]
v_9	6	[6,8]	1.21	[1.21,1.56]	3.9	[3.9,4.25]
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$

表7 评价测度集的模糊测度

Table 7 Fuzzy measures of evaluation index

A	μ_A	A	μ_A	A	μ_A
$\{x_1\}$	0.4020	$\{x_1, x_2\}$	0.8717	$\{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5\}$	0.8532
$\{x_2\}$	0.5848	$\{x_1, x_3\}$	0.7959	$\{x_1, x_2, x_3, x_4, x_6\}$	0.9430
$\{x_3\}$	0.2260	$\{x_1, x_4\}$	0.6535	$\{x_1, x_2, x_3, x_4, x_7\}$	0.2933
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$

4.3 转向架系统关键部件

针对评价测度集中节点的7种属性, 首先将属性区间化处理后构建区间直觉犹豫模糊矩阵 $\tilde{D} = (\tilde{h}_{ij})_{33 \times 7}$, 其中区间直觉犹豫模糊集 $\tilde{h}_{ij}$ 见表8.

以节点属性的区间直觉犹豫模糊集为数据基础,

依据式(4)的区间直觉犹豫模糊积分算子IVIHFICI将节点的多种属性聚合; 并计算各节点的IVIHFICI到最理想关键节点和最理想非关键节点的海明距离(公式(5)), 最后依据公式(6)得到各节点的接近系数, 如表9所示.

表8 区间直觉犹豫模糊集

Table 8 Interval-value intuitionistic hesitant fuzzy set

$\tilde{h}_{ij}$	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7
v_1	([0.625, 0.625], [0.375, 0.375])	([0.507, 0.507], [0.493, 0.493])	([0.017, 0.017], [0.983, 0.983])	([0.562, 0.562], [0.438, 0.438])	([0, 0.011], [0.989, 1])	([0.044, 0.056], [0.944, 0.956])	([0.04, 0.04], [0.96, 0.96])
v_2	([0.094, 0.094], [0.906, 0.906])	([0.042, 0.042], [0.958, 0.958])	([0.028, 0.028], [0.972, 0.972])	([0.138, 0.138], [0.862, 0.862])	([0.032, 0.034], [0.966, 0.968])	([0.023, 0.031], [0.969, 0.977])	([0.029, 0.03], [0.97, 0.972])
v_3	([0.063, 0.063], [0.937, 0.937])	([0.01, 0.01], [0.99, 0.99])	([0.038, 0.038], [0.962, 0.962])	([0.028, 0.028], [0.972, 0.972])	([0.026, 0.032], [0.968, 0.975])	([0.029, 0.029], [0.971, 0.971])	([0.023, 0.024], [0.976, 0.977])
v_4	([0.063, 0.063], [0.937, 0.937])	([0.006, 0.006], [0.994, 0.994])	([0.042, 0.042], [0.958, 0.958])	([0.019, 0.019], [0.981, 0.981])	([0.021, 0.026], [0.975, 0.979])	([0.033, 0.041], [0.960, 0.967])	([0.024, 0.026], [0.974, 0.976])
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
v_{33}	([0.094, 0.094], [0.906, 0.906])	([0.001, 0.001], [0.999, 0.999])	([0.036, 0.036], [0.964, 0.964])	([0.142, 0.142], [0.858, 0.858])	([0.021, 0.026], [0.975, 0.979])	([0.027, 0.028], [0.972, 0.973])	([0.026, 0.029], [0.971, 0.974])

表9 关键节点辨识结果

Table 9 The identification result of critical components

节点	IVIHFCl	到 α^+ 的距离	到 α^- 的距离	接近系数 Cc_i
v_1	([0, 0.0057], [0.6553, 0.854])	0.4380	0.0621	0.8759
v_2	([0.0005, 0.0005], [0.1401, 0.9569])	0.3870	0.1130	0.7740
v_3	([0.0001, 0.0001], [0.0755, 0.9866])	0.3827	0.1173	0.7655
v_4	([0.0001, 0.0001], [0.0756, 0.9907])	0.3833	0.1167	0.7665
v_5	([0.0001, 0.0002], [0.137, 0.9868])	0.3904	0.1096	0.7809
v_6	([0.0005, 0.0006], [0.1663, 0.9643])	0.3912	0.1088	0.7824
v_7	([0.0008, 0.0011], [0.2199, 0.938])	0.3945	0.1055	0.7890
v_8	([0, 0], [0.1346, 1])	0.3918	0.1082	0.7837
v_9	([0.0002, 0.0002], [0.1073, 0.9842])	0.3864	0.1136	0.7728
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
v_{33}	([0.0001, 0.0001], [0.1224, 0.9923])	0.3893	0.1107	0.7786

以往的研究中通常将节点的属性视为一个确定的值, 图10给出了以节点属性为确定值的基础上利用Choquet积分、TOPSIS法和熵权法识别关键部件进行比较. 如图10所示, 可以看出最关键部件均为节点 v_1 , 但是其余部件的重要性排序则不同. 节点的可靠性属性通常与运行时间、运行工况等相关, 系统处于不同时期节点可靠性属性并非一成不变. 因此以节点属性为确定值分析关键部件时某一时刻的系统关键部件, 分析结果瞬时性较强, 而以节点属性为区间数辨识时, 则能够反映出系统在某一个时期内部件的关键程度, 对于研究系统可靠性的意义更大.

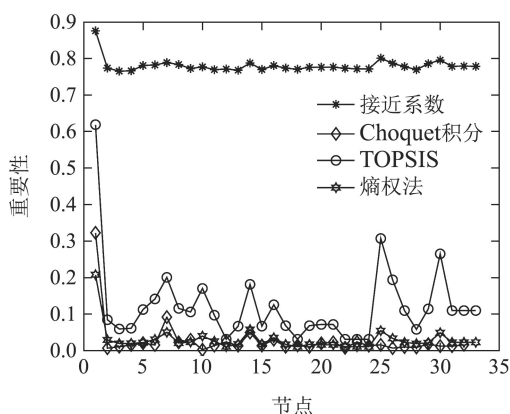


图10 转向架系统关键部件

Fig. 10 The critical components of bogie system

图11给出了由接近系数识别出的节点在转向架系

统中关键程度排序以及专家经验得到的排序结果. 可以看出转向架系统中关键部件的辨识结果与专家经验的一致程度较高, 而非关键部件识别结果的差异性相对较大. 这是由于专家经验在一定程度上主观影响较大.

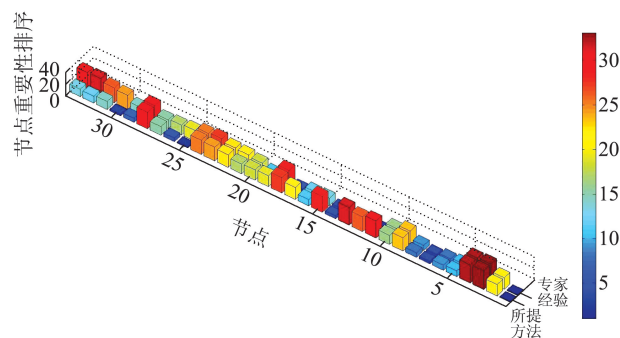


图11 转向架系统节点重要程度排序

Fig. 11 The importance ranking of nodes for bogie system

5 结论与展望

关键部件是系统可靠性评估的一部分. 通过对关键部件性质的分析, 研究系统可靠性的变化, 进而制定合理的维修优化措施, 以保证系统安全可靠的运行. 事实上, 影响高速列车系统中部件重要程度的属性众多且各属性计算的精确度不同, 如何提高属性值的精确度, 同时有效处理这些属性间的相互影响、交错与依存关系, 保证权重分配的客观合理均是识别高速列车系统关键部件所要考虑的问题.

1) 本文总结了现有系统网络模型的构建方法及其存在的优缺点, 提出了针对高速列车系统的部件提取规则、部件间连接方式的划分; 并结合部件可靠性属性按照由局部到整体的思想提出了高速列车系统全局拓扑网络模型建模方法.

2) 提出了将部件的属性区间化, 以区间直觉犹豫模糊集的形式表征节点属性, 并利用区间直觉犹豫模糊积分算子IVIHFCl聚合节点的多种属性, 辨识系统中的关键部件.

3) 需要指出的是, 这里在确定各属性的模糊测度时仍然是以属性为确定值进行计算的, 因此还需要在下一步的研究中以属性为区间值确定模糊测度, 进一步提高辨识的准确性.

参考文献:

- [1] ZHOU Zhenghua. The future of high speed rail: safety and sustainability. *China News Week*, 2012, (26): 19.
(周政华. 高铁未来: 安全性和可持续性——专访《高速列车科技发展“十二五”专项规划》专家组组长贾利民. 中国新闻周刊, 2012, (26): 19.)
- [2] RUIJTERS E, STOELINGA M. Fault tree analysis: a survey of the state-of-the-art in modeling, analysis and tools. *Computer Science Review*, 2015, 15: 29 – 62.

- [3] RATHNAYAKA S, KHAN F, AMAYOTTE P. Accident modeling and risk assessment framework for safety critical decision-making: application to deepwater drilling operation. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability*, 2013, 227(1): 86 – 105.
- [4] SHEN J, CUI L, DU S. Birnbaum importance for linear consecutive-out-of-systems with sparse. *IEEE Transactions on Reliability*, 2015, 64(1): 359 – 375.
- [5] WU S, CHEN Y, WU Q, et al. Linking component importance to optimisation of preventive maintenance policy. *Reliability Engineering & System Safety*, 2016, 146: 26 – 32.
- [6] SI S, LEVITIN G, DUI H, et al. Component state-based integrated importance measure for multi-state systems. *Reliability Engineering & System Safety*, 2013, 116: 75 – 83.
- [7] WANG Y, BI L, LIN S, et al. A complex network-based importance measure for mechatronics systems. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2017, 466: 180 – 198.
- [8] RUBINOV M, OLAF S. Complex network measures of brain connectivity: uses and interpretations. *Neuroimage*, 2010, 52(3): 1059 – 1069.
- [9] BENZI M, KLYMKO C. On the limiting behavior of parameter-dependent network centrality measures. *SIAM Journal on Matrix Analysis and Applications*, 2015, 36(2): 686 – 706.
- [10] BONACICH P, LLOYD P. Eigenvector centrality and structural zeroes and ones: When is a neighbor not a neighbor?. *Social Networks*, 2015, 43: 86 – 90.
- [11] TERDENG L M, HEISEL S, SCHEMBECKER G, et al. Agglomeration degree distribution as quality criterion to evaluate crystalline products. *Chemical Engineering Science*, 2015, 133: 157 – 169.
- [12] ZONG Gang, ZHANG Chao, WANG Huasheng. Reliability study of the components for the traction system of high speed train based on complex network theory. *China Railway Science*, 2014, 35(1): 94 – 97.
(宗刚, 张超, 王华胜. 基于复杂网络理论的高速列车牵引系统部件可靠性研究. 中国铁道科学, 2014, 35(1): 94 – 97.)
- [13] ZONG Gang, ZHANG Qi, LIU Wenzhi. Study on complexities in relational network of component maintenance for high-speed train in network perspective. *China Railway Science*, 2013, 34(3): 105 – 108.
(宗刚, 张超, 刘文芝. 网络视角下高速列车部件维修关系网络复杂性研究. 中国铁道科学, 2013, 34(3): 105 – 108.)
- [14] GUATINIELLO C, DELAURENTIS D. Dependency analysis of system-of-systems operational and development networks. *Procedia Computer Science*, 2013, 16: 265 – 274.
- [15] WEI D, DENG X, ZHANG X, et al. Identifying influential nodes in weighted networks based on evidence theory. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2013, 392(10): 2564 – 2575.
- [16] DU Y, GAO C, HU Y, et al. A new method of identifying influential nodes in complex networks based on TOPSIS. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2014, 399(4): 57 – 69.
- [17] MARDANI A, JUSOH A, ZAVADSKAS E K. Fuzzy multiple criteria decision-making techniques and applications—Two decades review from 1994 to 2014. *Expert Systems with Applications*, 2015, 42(8): 4126 – 4148.
- [18] WEI G, ALSAADI F E, HAYAT T, et al. A linear assignment method for multiple criteria decision analysis with hesitant fuzzy sets based on fuzzy measure. *International Journal of Fuzzy Systems*, 2016, 19(3): 1 – 8.
- [19] ZHANG L, ZHOU D Q, ZHOU P, et al. Modelling policy decision of sustainable energy strategies for Nanjing city: a fuzzy integral approach. *Renewable Energy*, 2014, 62(3): 197 – 203.
- [20] WEI G. Picture fuzzy cross-entropy for multiple attribute decision making problems. *Journal of Business Economics and Management*, 2016, 17(4): 491 – 502.
- [21] BROUMI S, YE J, SMARANDACHE F. An extended topsis method for multiple attribute decision making based on interval neutrosophic uncertain linguistic variables. *Neutrosophic Sets & Systems*, 2015, 8: 22 – 31.
- [22] HUSEJNAGIĆ D, BUTALA P. Discovering autonomous structures within complex networks of work systems. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2012, 61(1): 423 – 426.
- [23] BEBER M E, BECKER T. Towards an understanding of the relation between topological characteristics and dynamic behavior in manufacturing networks. *Procedia CIRP*, 2014, 19: 21 – 26.
- [24] HIRTZ J, STONE R B, MCADAMS D A, et al. A functional basis for engineering design: reconciling and evolving previous efforts. *Research in engineering Design*, 2002, 13(2): 65 – 82.
- [25] LEI L, ZHONG Z, LIN C, et al. Operator controlled device-to-device communications in LTE-advanced networks. *IEEE Wireless Communications*, 2012, 19(3): 96.
- [26] ZHANG Z M. Interval-valued intuitionistic hesitant fuzzy aggregation operators and their application in group decision-making. *Journal of Applied Mathematics*, 2013, 2013(2): 337 – 384.
- [27] ATANASSOV K, GEORGI G. Interval valued intuitionistic fuzzy sets. *Fuzzy Sets and Systems*, 1989, 31(3): 343 – 349.
- [28] TORRA V. Hesitant fuzzy sets. *International Journal of Intelligent Systems*, 2010, 25(6): 529 – 539.
- [29] CHEN Zhiwang, CHEN Lin, YANG Qi, et al. Interval-valued intuitionistic fuzzy set method for group multi-attribute decision-making with unknown attribute weights. *Control Theory & Applications*, 2014, 31(8): 1025 – 1033.
(陈志旺, 陈林, 杨七, 等. 用区间直觉模糊集方法对属性权重未知的群求解其多属性决策. 控制理论与应用, 2014, 31(8): 1025 – 1033.)
- [30] CHANG Zhipeng, CHENG Longsheng. Multi-attribute decision making method based on Mahalanobis-Taguchi system and fuzzy integral. *Journal of Industrial Engineering and Engineering Management*, 2015, 29(3): 107 – 115.
(常志朋, 程龙生. 基于马田系统和模糊积分的多属性决策方法. 管理工程学报, 2015, 29(3): 107 – 115.)

作者简介:

林 帅 博士, 主要研究方向为复杂机电系统可靠性与安全性, E-mail: linshuai2013@126.com;

贾利民 教授, 博士生导师, 目前研究方向为轨道交通控制与安全、交通安全测控工程、交通运输智能化、智能交通系统等, E-mail: lmjia@bjtu.edu.cn;

王艳辉 教授, 博士生导师, 目前研究方向为轨道交通系统可靠性与安全性、交通运输规划与管理、交通安全测控工程等, E-mail: wangyanhui@bjtu.edu.cn.