

# 基于故障相关关系的地铁车辆转向架维修决策方法研究<sup>\*</sup>

张晓哲 黎 荣 蔡子一 张义军

(西南交通大学机械工程学院, 610031, 成都//第一作者, 硕士研究生)

**摘 要** 鉴于传统部件故障相关关系分析方法依赖专家经验,难以避免主观性,且一致性较差的现状,基于复杂网络分析法和统计分析方法,建立了系统故障相关关系网络模型。定量计算该模型的统计特征值,构建定性与定量相结合的维修方式逻辑决断图,可确定不同类型部件合理的维修方式。以地铁车辆转向架部件的维修方式决策过程为例,验证了该方法的有效性。

**关键词** 地铁; 车辆; 转向架; 维修决策方法; 故障相关关系

**中图分类号** U270.331

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.06.042

## Research on Decision-making Method for Metro Vehicle Bogie Maintenance Based on Fault Correlation

ZHANG Xiaozhe, LI Rong, CAI Ziyi, ZHANG Yijun

**Abstract** Since the conventional component fault correlation analysis method relies on expert experience, it is difficult to avoid subjectivity and poor consistency. A network model of fault correlation relationship of the system based on complex network analysis method and statistical analysis method is established. Statistical eigenvalues of the model are quantitatively calculated. Logical decision chart of qualitatively and quantitatively combined maintenance mode is constructed to determine the reasonable maintenance methods for different types of components. Finally, taking the decision-making process of metro vehicle bogie maintenance mode as an example, the effectiveness of the method is verified.

**Key words** metro; vehicle; bogie; maintenance decision-making method; fault correlation

**Author's address** School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, 610031, Chengdu, China

## 0 引言

随着复杂产品维修思想从传统预防为主向以可靠性为中心转变<sup>[1]</sup>,研究不同类型部件之间的故障相关关系,是分析系统综合可靠度、确定各类部件故障对系统的影响,并据此形成合理维修方式和优化维修策略的基础。

文献[2]将现有的系统可靠性分析方法分为4个大类,即解析法、蒙特卡罗法、综合法和网络法。机电产品设计早期,由于缺乏足够的设计参数,系统可靠性分析时采用解析法的思想,即基于RBD<sup>[3]</sup>(可靠性框图)、FTA<sup>[4]</sup>(故障树分析)和FMECA<sup>[5]</sup>(故障模式、影响和危害性分析)等方法,通过专家经验来定性分析部件故障相关性,以及确定重要功能部件的维修方式。

针对解析法难以避免主观性、一致性和可操作性,以及难以分析部件之间复杂的多因素和非线性影响关系的缺陷,文献[6]建立了故障传播网络模型,采用决策矩阵分析与危害性分析相结合的方式确定出部件的综合重要度,但该方法只能分析相邻部件间的故障影响关系。文献[7]在FMECA方法的基础上,利用决策实验室分析法剖析相关故障的因果传递方向以及存在的综合影响,以此来确定部件的维修方式,但该方法在建立故障影响矩阵时未对部件间的故障相关关系进行分类。

复杂网络分析法<sup>[8]</sup>通过网络来构建元素之间的复杂影响关系,既可以分析元素间的局部相互影响,又可以通过宏观统计特征剖析部件对系统全局的影响。文献[9]从复杂网络的局部属性、全局属性、网络位置及随机游走4个角度出发,对节点重要性评价指标进行了总结。文献[10]针对有向加权

<sup>\*</sup> 国家重点研发计划项目(2017YFB1201102)

网络提出了利用节点的交叉强度来表征节点局部重要性的方法。文献[11]应用改进的 LocalRank 算法,在计算节点重要度时考虑了节点的度数、邻居节点的影响力,以及邻居节点间的聚集程度。文献[12]在 PageRank 算法的基础上提出了节点重要度评价指标 DWCN\_NodeRank,该指标侧重考虑了每个节点的邻居节点的重要度。

地铁转向架部件数量众多,且相互之间存在复杂、多因素和非线性的故障影响关系。故障相关关系的类型会对部件维修方式决策产生十分重要的影响。据此,本文提出基于定量复杂网络故障相关性分析和定性决策树维修方式分析相结合的方法,即在部件局部和全局故障相关性的量化分析结果的基础上,构建维修方式决策树,从微观和宏观两个层面准确把握故障对维修方式的影响,并以地铁转向架部件的维修方式决策过程为对象进行实证,验证了该方法的有效性。

### 1 基于故障相关关系的维修方式决策方法流程

本文首先在对系统功能结构分析的基础上,确定系统的重要功能部件,以及部件间的故障关系。利用系统重要功能部件 FMEA 结果中的故障模式、故障影响、故障频率等参数,建立系统的有向加权故障相关关系网络。将节点的出度  $N_{R,out}$ 、入度  $N_{R,in}$ 、节点介数 3 个网络特征值作为维修方式决策的评价指标。同时考虑部件的安全性、经济性影响,以及故障频数等维修性因素,构建维修方式逻辑决断图,并基于逻辑决断图依次确定部件的维修方式。基于故障相关性的维修方式决策方法流程见图 1。

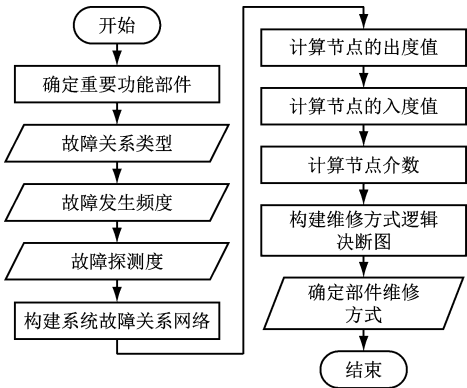


图 1 基于故障相关性的维修方式决策方法流程图

Fig. 1 Flowchart of maintenance mode decision-making method based on fault correlation

## 2 系统故障相关关系网络

构建科学合理的复杂产品故障相关关系网络是系统可靠性分析的前提,因此,分别对维修关系网络中的节点、边以及边的权重进行分析。

### 2.1 构建系统故障相关关系网络

文献[13]将部件间的故障相关关系分为 3 大类型:故障引起损坏型,负载共享型,共模劣化型。

故障引起损坏型又可根据故障影响程度的不同分为 3 类:①部件故障导致整个系统更换(例如,转向架的轮对系统,由于车轮或车轴的故障会影响列车的安全性,因此需要停机检修轮对系统);②部件故障导致另一个部件更换(例如,转向架系统中的传动子系统,当一个齿轮发生故障时,应对另一个齿轮进行更换);③部件故障未造成其他部件或系统的损坏,只需要更换故障部件(例如,转向架系统中的固定螺栓、垫片等部件,由于数量较多,单个零件的作用相对较小,因故当此类部件出现故障后只需更换该部件)。

负载共享型根据负载形式的不同可分为两类:①基于故障的负载共享,表现为非关键部件的故障将加速关键部件劣化(例如,轮缘润滑装置的故障会加速车轮的劣化);②基于劣化的负载共享,表现为关键部件的劣化率与所有关键部件的劣化状态相关(例如,轴箱轴承的劣化与车轴的劣化是相互影响的)。

共模劣化型是指由于相似的工作条件,几个部件可能同时发生故障或劣化(例如,转向架的两个空气弹簧有相似的工作条件,两者的故障关系属于共模劣化型)。但由于本文主要对不同类型部件间的故障相关关系进行分析,为简化模型,将处于不同位置但具有相同结构功能的部件视为同类部件,因此,本文所建立的模型不考虑共模劣化型故障相关关系。

在确定系统故障相关关系网络模型中边的权重时,不仅要考虑到以上 5 种故障相关关系的危害程度,还应考虑该类故障相关关系发生的次数,因此,需计算两者的综合影响。根据 FMEA 确定部件间相互影响关系的类型和故障发生的次数;根据 5 种故障相关关系的危害程度,利用专家打分<sup>[14]</sup>的方法确定每种故障相关关系的权重,如表 1 所示。

表 1 系统部件间的故障相关关系及其权重

Tab.1 Fault correlation between system components and their weights

故障相关关系	权重	故障相关关系	权重
部件故障导致整个系统更换	10	基于故障的负载共享	4
部件故障导致另一个部件更换	5	基于劣化的负载共享	6
部件故障未造成其他部件损坏	1		

通过式(1)计算连接边的综合权重:

$$W_{i,j} = \sum_{k=1}^5 \lambda_{i,j,k} \omega_k \quad (1)$$

式中:

$W_{i,j}$ ——部件  $v_i$  到部件  $v_j$  的综合故障相关关系重要度;

$\lambda_{i,j,k}$ ——部件  $v_i$  与部件  $v_j$  的第  $k$  种故障相关关系的发生次数;

$\omega_k$ ——第  $k$  种故障相关关系的权重。

基于以上分析,本文将系统的重要功能部件作为故障相关关系网络模型中的节点。将部件间的 5 种故障相关关系作为模型的边,即:部件故障导致整个系统更换,部件故障导致另一个部件更换,部件故障未造成其他部件或系统损坏,基于故障的负载共享,以及基于劣化的负载共享。通过式(1)计算连接边的综合权重,以此建立系统故障相关关系网络模型。

## 2.2 系统故障相关关系网络的特征值

本文利用节点的入度  $N_{R,in}$ 、出度  $N_{R,out}$  及介数作为部件维修方式的决策指标。在系统故障相关关系网络中, $N_{R,in}$  反映了系统中其他部件对该部件的影响, $N_{R,out}$  反映了该部件对系统中其他部件的影响。加权网络的介数是指两点之间所有连通的路径中,相似权权重倒数之和最小的路径。因此,节点介数反映了部件在系统故障相关关系网络中的故障传递能力。

1)  $N_{R,in}(v)$  的计算公式<sup>[12]</sup>:

$$N_{R,in}(v) = \frac{(1-\sigma)}{n} + \sigma \left( \frac{\omega(v_1,v)}{S_{out}(v_1)} N_{R,in}(v_1) + \frac{\omega(v_2,v)}{S_{out}(v_2)} N_{R,in}(v_2) + \cdots + \frac{\omega(v_n,v)}{S_{out}(v_n)} N_{R,in}(v_n) \right) = \frac{(1-\sigma)}{n} + \sigma \sum_{i=1}^n \frac{\omega(v_i,v)}{\sum_{j=1}^{m_i} \omega(v_i,z_j)} N_{R,in}(v_i) \quad (2)$$

式中:

$\sigma$ ——阻尼系数( $0 < \sigma < 1$ ),阻尼系数越大越

能接近实际模型,本文  $\sigma$  取 0.95;

$\omega(v_i,v)$ ——节点源  $v_i$  对节点  $v(z_1,z_2,\cdots,z_{m_i})$  的出强度;

$\sum_{j=1}^{m_i} \omega(v_i,z_j)$ ——节点源  $v_i$  的总的出强度;

$S_{out}(v_i)$ ——节点源的出度值。

$N_{R,out}(v)$  的计算公式与  $N_{R,in}(v)$  的计算公式类似。

2) 有向加权网络节点  $v_i$  介数  $C(v_i)$  的计算公式:

$$C(v_i) = \sum_{s \neq i \neq t} \frac{x_{s,t}(v_i)}{y_{s,t}(v_i)} \quad (3)$$

式中:

$y_{s,t}(v_i)$ ——节点  $v_s$  至节点  $v_t$  所有最短路径的条数;

$x_{s,t}(v_i)$ ——经过节点  $v_i$  的最短路径的条数。

## 2.3 基于故障相关关系的维修方式决策图

本文以 RCM 理论为指导,结合网络特征值,制定维修方式逻辑决断图,如图 2 所示。根据帕累托法则,一般认为排名前 20% 的网络特征值属于较大特征值,排名后 20% 的特征值属于较小特征值,其余则为一般特征值。

介数反映了部件的故障传递能力,对系统故障的影响较大; $N_{R,out}$  反映了部件故障对其他部件以及系统的影响,而  $N_{R,in}$  反映了该部件受其他部件故障的影响。因此,应首先判断部件的介数,然后再依次判断部件的出度值和入度值。

# 3 地铁车辆转向架故障相关关系网络案例分析

## 3.1 转向架故障相关关系网络模型的构建

首先以地铁 A 型车转向架大修时的维修部件作为故障相关关系网络中的节点,依据 FMEA 方法中的故障原因,确定故障的作用方向,并作为网络模型中连接边的方向。然后确定部件间故障相关关系的类型,结合表 1 中的权重和该故障相关关系发生的次数,通过式(1)得出连接边的综合权重。最终建立了地铁 A 型转向架的故障相关关系网络,如图 3 所示。

## 3.2 转向架故障相关关系网络的特征值

在转向架故障相关关系网络以及第 2.2 节中特征值计算公式的基础上,通过 MATLAB 编程分别计算节点的  $N_{R,out}$ 、 $N_{R,in}$  及节点介数,见表 2。

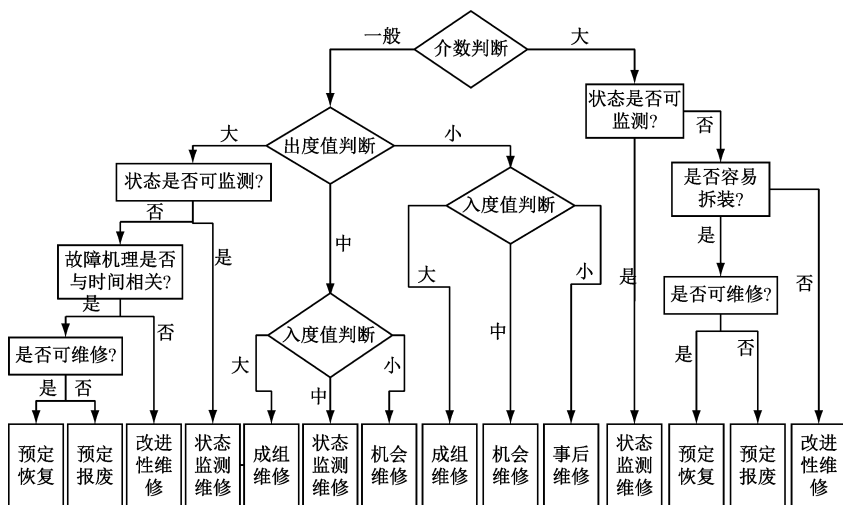
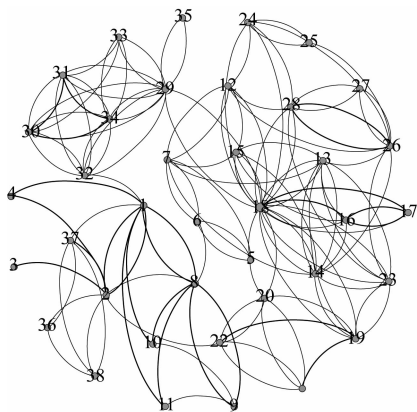


图2 基于故障相关性的维修方式决策图

Fig. 2 Decision-making graph of maintenance mode based on fault correlation



注:图中各节点编号所对应的部件名称,见表2;凹连接线表示对节点的输入影响,凸连接线表示对节点的输出影响;连接线的粗细程度表示连接边的权重大小,连接线越粗,边的权重值越大。

图3 转向架故障相关关系网络

Fig. 3 Bogie fault correlation network

依据帕累托法则,由表 2 可见,转向架部件中,介数大于 0.033 35 的部件为较大介数部件; $N_{R,out} > 0.043\ 35$  的部件为较大出度值部件; $N_{R,out} < 0.010\ 08$  的部件为较小出度值部件; $N_{R,in} > 0.021\ 04$  的部件为入度值较大部件; $N_{R,in} < 0.000\ 84$  的部件为入度值较小部件。

### 3.3 基于特征值部件的转向架维修方式确定

根据转向架部件的特征值以及维修方式决策图,确定的转向架中各重要功能部件的维修方式如下:

1) 牵引拉杆组成、空气弹簧组成、轴箱轴承、轴箱体、定位节点、构架部件安装座及高度阀的介数较大。其中,轴箱轴承采用状态监测维修方式;牵引拉杆组成、转向架部件安装座等属于不易拆装部

件,采用改进性维修方式,即在设计时加强部件的可靠度和冗余度;空气弹簧组成、轴箱体、定位节点、高度阀等由于材料或技术原因属于不可修部件,采用预定报废维修方式,即根据部件的使用寿命进行定期报废。

2) 闸瓦、轮对、抗侧滚扭杆、速度传感器、轴温传感器、齿轮箱润滑油、差压阀、高度调节装置、轮缘润滑装置、踏面清扫装置、制动夹钳装置及闸瓦间隙自动调整器的出度值较大。经维修决策图判断,轮对、闸瓦、轮缘润滑装置、踏面清扫装置、制动夹钳装置、闸瓦间隙自动调整器采用定期恢复的维修方式,速度传感器、轴温传感器、齿轮箱润滑油、差压阀采用定期报废的维修方式,抗侧滚扭杆、高度调节装置采用改进性的维修方式。

3) 轴箱前盖、轴端压盖、构架侧梁、构架横梁、牵引销组成、中央牵引梁组成、齿轮箱吊杆的出度值和入度值都较小,因此采用事后维修方式。

4) 防尘挡圈、一系止档、横向缓冲挡、齿轮箱橡胶密封件的出度值一般,但入度值较大,应采用成组维修方式(例如,齿轮箱橡胶密封件应在每次拆装齿轮箱时进行更换)。

5) 轴箱弹簧组成和一系垂向减振器的每个特征值都相差不大,因此这两个部件应采用机会维修方式。类似的机会维修组合还包括大齿轮和小齿轮、齿轮箱体和支撑轴承。

通过与地铁 A 型车转向架重要功能部件实际采用的维修方式对比,经专家评议,本文所提出的方法能够更加合理地确定转向架各部件的维修方

表 2 地铁车辆转向架各部件故障相关关系网络的特征值

Tab.2 Eigenvalues of fault correlation network of metro vehicle bogie components									
编号	部件名称	$N_{R,out}$	$N_{R,in}$	介数	编号	部件名称	$N_{R,out}$	$N_{R,in}$	介数
1	轮对	0.064 49	0.156 39	0.015 06	20	高度调节装置	0.045 14	0.002 42	0.000 38
2	抗侧滚扭杆	0.060 86	0	0.002 53	21	差压阀	0.055 32	0.021 77	0.002 59
3	轮缘润滑装置	0.045 64	0.001 77	0	22	高度阀	0.020 56	0.024 59	0.075 81
4	踏面清扫装置	0.043 35	0.009 67	0	23	二系垂向减振器	0.019 48	0.008 06	0.005 12
5	轴箱前盖	0.014 91	0.003 61	0.005 21	24	二系横向减振器	0.020 83	0.007 88	0.005 14
6	轴端压盖	0.018 21	0.000 81	0.016 93	25	横向缓冲挡	0.017 73	0.025 97	0.027 12
7	轴箱体	0.006 05	0.001 21	0.058 35	26	牵引销组成	0.001 18	0.000 28	0.001 43
8	轴箱轴承	0.064 49	0.182 18	0.094 83	27	中央牵引梁组成	0.002 09	0.000 84	0
9	防尘挡圈	0.016 53	0.026 49	0.010 74	28	牵引拉杆组成	0.028 21	0.004 84	0.366 31
10	速度传感器	0.060 46	0	0	29	齿轮箱体	0.007 45	0.004 43	0.000 15
11	轴温传感器	0.059 35	0.008 21	0	30	大齿轮	0.010 48	0.022 17	0.003 58
12	定位节点	0.010 08	0.021 77	0.037 35	31	小齿轮	0.011 18	0.021 04	0.003 63
13	一系垂向减震器	0.030 23	0.025 55	0.000 94	32	支撑轴承	0.008 96	0.003 81	0.000 12
14	轴箱弹簧组成	0.029 93	0.022 42	0.000 85	33	齿轮箱橡胶密封件	0.010 08	0.025 24	0.000 03
15	一系止挡	0.015 72	0.028 46	0.002 14	34	齿轮箱润滑油	0.057 33	0.014 51	0.028 00
16	构架侧梁	0.009 75	0.000 96	0.001 01	35	齿轮箱吊杆	0.008 04	0.000 66	0.002 06
17	构架横梁	0.008 46	0.000 43	0.000 92	36	制动夹钳装置	0.027 81	0.047 96	0.000 94
18	构架安装座	0.056 83	0	0.038 86	37	闸瓦	0.070 54	0.001 48	0.033 35
19	空气弹簧组成	0.045 72	0.014 51	0.201 86	38	闸瓦间隙自动调整器	0.016 53	0.008 46	0.001 29

式,同时对适合成组维修和机会维修的部件提出了维修方式修改意见。

4 结论

- 1) 基于故障相关关系网络的维修方式决策方法不仅考虑了部件间的故障传递影响关系,而且结合了部件自身的维修特点进行维修方式决策,使得部件的维修方式更加科学合理。
- 2) 利用节点的  $N_{R,in}$ 、 $N_{R,out}$  及介数 3 个指标从故障相关关系网络的局部特性和全局特性评价网络的特征,体现了部件对系统可靠性的影响。
- 3) 结合地铁车辆转向架部件的结构功能特点、故障频数、维修性及网络特征值等,多维度分析了转向架部件的维修特点,并确定出各部件的维修方式。经验证,该方法具有较好的科学性和实用性。

参考文献

[1] 向琴,张华,孔建益,等. 基于可靠性评估的维修方式决策模型及应用[J]. 现代制造工程,2015(9):123.  
XIANG Qin, ZHANG Hua, KONG Jianyi, et al. Maintenance decision model and application based on reliability estimation

[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2015(9):123.  
[2] 贾利民,林帅. 系统可靠性方法研究现状与展望[J]. 系统工程与电子技术, 2015(12): 2887.  
JIA Limin, LIN Shuai. Current status and prospect for the methods of system reliability[J]. Systems Engineering and Electronics, 2015(12): 2887.  
[3] CATELANI M, CIANI L, VENZI M, et al. RBD model-based approach for reliability assessment in complex systems[J]. IEEE Systems Journal, 2019, 13(3):2089.  
[4] IHEUKWUMERE E L O, KALTUNGO A Y. Assessment of barriers to knowledge and experience transfer in major maintenance activities[J]. Energies, 2020,13(7):342.  
[5] 谭鸿愿,王伯铭,黄挺. 基于 FMECA 的地铁车辆转向架检修计划优化研究[J]. 城市轨道交通研究, 2017(1): 96.  
TAN Hongyuan, WANG Boming, HUANG Ting. On the optimization of bogie maintenance scheduling for metro vehicles based on FMECA[J]. Urban Mass Transit, 2017(1): 96.  
[6] 戚珩,谢清程,杨文凯,等. 基于故障相关性的调距桨 FMECA 分析[J]. 机械科学与技术, 2014(3): 399.  
QI Heng, XIE Qingcheng, YANG Wenkai, et al. Failure mode, effect and criticality analysis of controllable pitch propeller based on fault correlation[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2014(3): 399.