

# 基于故障树分析法的道岔故障诊断与可靠性评估方法\*

张帆<sup>1</sup> 黄世泽<sup>1</sup> 郭其一<sup>2</sup> 刘豪鹏<sup>1</sup> 董德存<sup>1</sup>

(1. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 201804, 上海;

2. 同济大学电子与信息工程学院, 201804, 上海//第一作者 硕士研究生)

**摘要** 故障树分析法(FTA)采用逻辑化方法,直观反映故障、故障原因与系统部件之间的逻辑关系。利用FTA对道岔空转故障建立故障树,逐层分析其故障原因,并对此故障树进行定性与定量分析,为道岔故障诊断和日常维护提供一些参考。

**关键词** 高速铁路; 道岔; 故障树分析法; 故障诊断; 可靠性

**中图分类号** TP206.1; U213.6

**DOI:** 10.16037/j.1007-869x.2018.10.012

## Research on Turnout Fault Diagnosis and Reliability Assessment Technology Based on Fault Tree Analysis

ZHANG Fan, HUANG Shize, GUO Qiyi, LIU Haopeng, DONG Decun

**Abstract** FTA adopts logical method to present directly the causes of fault and the logical relation between faults and system components. In this paper, FTA is used to build a fault tree for turnout idling fault, analyze the fault causes layer by layer, and process the fault tree with quantitative and qualitative analysis, in order to provide references for the turnout fault diagnosis and daily maintenance.

**Key words** high-speed railway; turnout; fault tree analysis (FTA); fault diagnosis; reliability

**First-author's address** Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Education Ministry, Tongji University, 201804, Shanghai, China

随着高速铁路的快速发展,列车速度不断提高,对铁路信号设备的安全与可靠性提出了更高的要求。道岔作为铁路信号车站联锁系统的重要组成部分,是排列列车进路和实现进路转换的关键设

备。由现场调研发现,道岔故障常常是造成重大事故的主要原因之一<sup>[1]</sup>。目前,我国使用微机监测系统,实现了对车站信号设备的实时监测。而该系统尚缺乏完善的状态监测与故障诊断于一体的综合功能,使得道岔故障原因仍需依靠人工经验分析判断,且故障处理时间较长,效率较低,检修人员经验不足时还可能影响行车安全。所以当道岔出现故障时,快速准确地诊断出故障,并及时修理故障,成为一项重要的研究内容。

故障树分析法(FTA)是一种分析、判断系统可靠性和可用性的重要方法,通过对可能造成系统失效的各种因素(包括硬件、软件、环境、人为等因素)进行分析,建造故障树,从而确定系统失效原因的各种可能组合方式及其发生概率,以预测系统的失效概率,并采取相应的纠正措施来提高系统的可靠性和安全性<sup>[2]</sup>。

本文以ZD6型道岔转辙机为例,详细说明了故障树分析法在道岔转辙机故障诊断中的应用。采用故障树分析法可快速有效地诊断出道岔故障,从而提高检修效率及系统可靠性,保证行车安全。

## 1 道岔结构

道岔是机车车辆从一股轨道转入或越过另一股轨道时必不可少的线路设备,是铁路轨道的一个重要组成部分。车站道岔如图1所示。道岔的主要组成部分为转辙机、辙叉、护轨、道岔连接部分。

转辙机是道岔控制系统的执行机构,用于转换锁闭道岔尖轨或心轨,表示监督联锁区内道岔尖轨或心轨的位置和状态。ZD6型电动转辙机内部结构如图2所示。

\* “十三五”国家重点研发计划(2016YFB1200402)



图 1 车站道岔

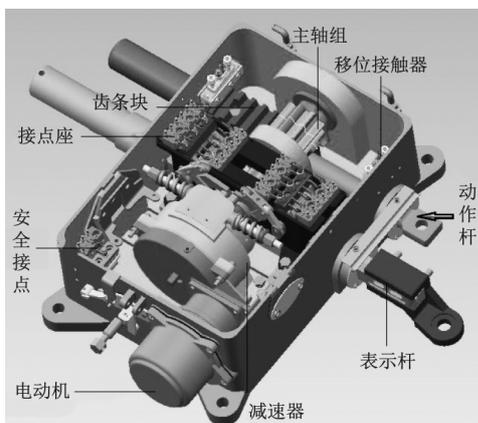


图 2 ZD6 型电动转辙机内部结构图

ZD6 型电动转辙机整体动作过程为: 解锁→转换→锁闭。首先,电动机得电旋转,通过齿轮带动减速器;其次,输出轴通过起片带动主轴,锁闭齿轮随主轴逆时针方向旋转;最后,拨动齿条块,使动作杆带动道岔尖轨运动,转换过程中,通过自动开闭器的接点完成表示。

## 2 道岔常见故障分类

道岔常见故障按现象可分为 3 类: 道岔不启动、道岔无表示和道岔空转。道岔不启动即道岔启动电路发生故障。道岔无表示即道岔扳动到侧向通过状态时,信号无表示的故障。道岔空转即道岔因故转换不到位,电机一直转动,道岔无表示信号而造成的故障。常见的道岔空转故障又可分为不解锁空转、解锁空转与密贴空转。不解锁空转最明显的特点是齿条块不动,解锁空转为齿轮转动 $32.9^\circ$ 后发生的空转,密贴空转为道岔密贴过紧而造成电动机空转。

列车通过道岔时,道岔转换设备必须保证道岔可动部分固定在开通直股或侧股位置。一旦出现道岔空转故障,使得道岔未转换到位,行驶列车就有可能出现进入异线、翻车、掉道等严重后果。然

而,导致道岔空转故障的原因复杂且繁多,若无法直接、准确地找到导致道岔空转故障的原因,此时,即可对其建立故障树,以快速寻找排查故障原因,提高检修效率及道岔可靠性,保证行车安全。

## 3 道岔空转故障树构建

故障树构建是 FTA 的核心内容,它构建的完善程度将直接影响定性和定量分析。构建故障树之前必须深入了解被诊断系统的组成结构和工作原理,广泛收集相关故障信息资料,掌握系统功能与故障模式之间的逻辑关系与受影响程度。建树过程应与专家经验知识紧密结合,逐步深入完善<sup>[3]</sup>。故障树的建立一般分为以下 3 个步骤:

(1) 收集资料。深入理解系统基本原理、功能结构及故障模式,广泛收集系统故障信息资料。

(2) 选择顶事件。顶事件是系统不希望发生的故障事件。根据研究内容,选择定义清晰且可进一步分解的故障事件作为顶事件。

(3) 建造故障树。将已确定的顶事件定在顶部矩形框内,将引起顶事件的全部必要而又充分的直接原因事件(包括硬件、软件、环境、人为因素等)置于相应原因事件符号中画出第二层,再根据系统中它们的逻辑关系用逻辑门连接顶事件和这些直接原因事件。如此逐级向下发展,直到所有最低一层原因事件都是底事件为止。对于复杂系统,建造故障树时应按层次逐级展开<sup>[4]</sup>。

本文以道岔空转故障中的解锁空转故障为例,建立道岔解锁空转故障树如图 3 所示。分析导致道岔解锁空转故障的原因,可得如图 3 a) 所示的故障树;进一步对图 3 a) 中齿条块不动、齿条块能动、尖轨不动以及尖轨能动、道岔转换不到底故障分解,分别得到如图 3 b)、c)、d)、e) 所示的子故障树;再对图 3 e) 中摩擦电流偏小、摩擦阻力偏大、箱内异物卡阻及箱外异物卡阻故障分解,分别得到如图 3 f)、g)、h)、i) 所示的子故障树。

## 4 基于 FTA 的定性分析

故障树定性分析的目的在于寻找导致顶事件发生的原因及原因组合,识别导致顶事件发生的所有故障模式。

对于故障树来说,割集是指:故障树中一些底事件的集合,当这些底事件同时发生时,顶事件必然发生。最小割集是指:若将割集所含的底事件去

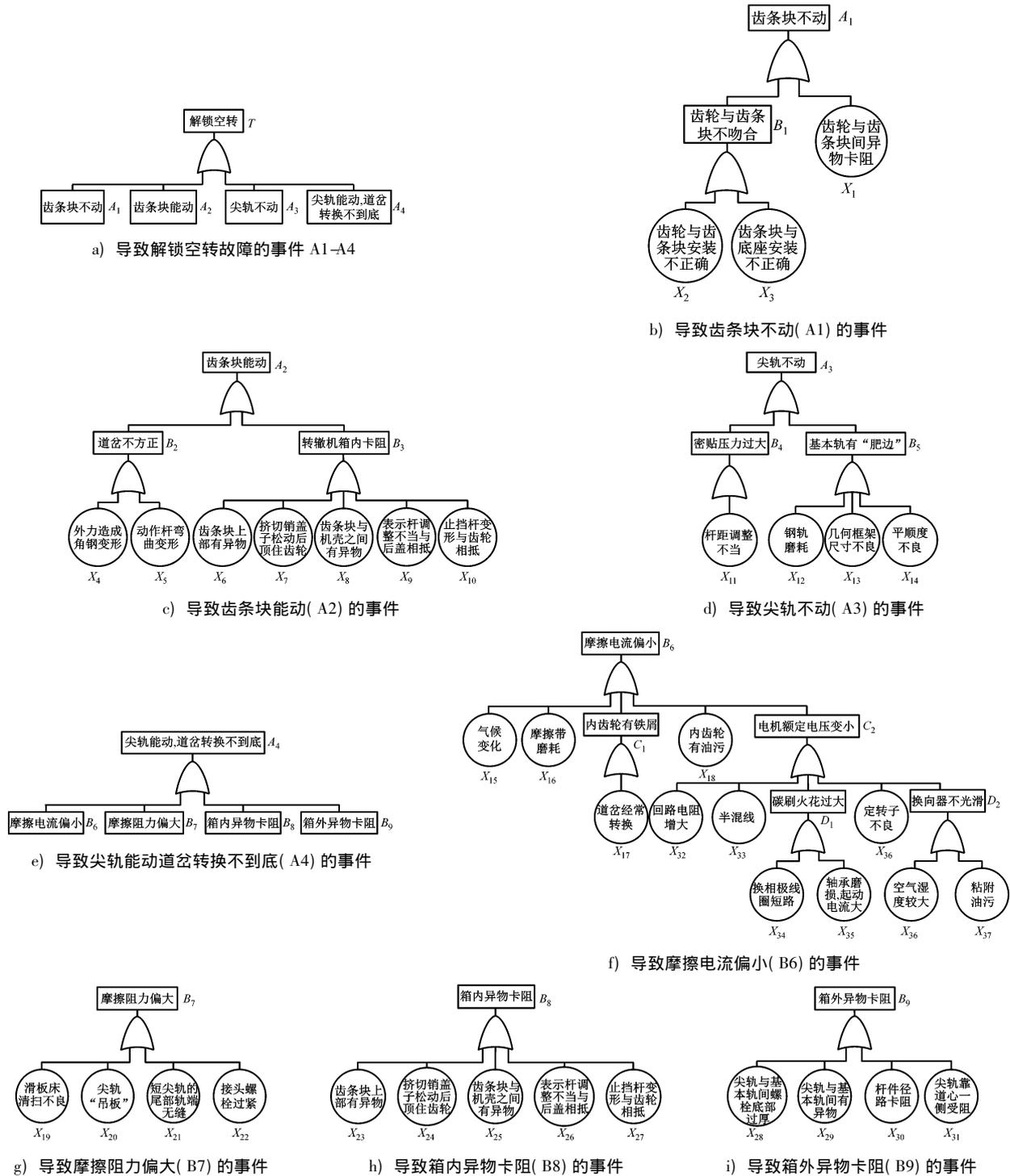


图3 道岔解锁空转故障树

掉任意一个就不再成为割集,这样的割集就是最小割集。故障树定性分析的任务就是要寻找故障树的全部最小割集<sup>[4]</sup>。一般采用 Fussell-Vesejy 算法求解故障树最小割集。

Fussell-Vesejy 算法又称为下行法。根据故障树的实际结构,从顶事件开始,逐层向下寻查,找出

割集。规则就是遇到与门增加割集阶数(割集所含底事件数目),遇到或门增加割集个数。具体做法就是把从顶事件开始逐层向下寻查的过程横向列表,遇到与门就将其输入事件在下一列纵向依次展开,直到故障树的最底层。这样列出的表格最后一列的每一行都是故障树的割集,再通过割集之间的

比较,进行合并消元,最终得到故障树的全部最小割集<sup>[4]</sup>。

采用下行法对道岔解锁空转故障树进行定性分析,求解最小割集过程如表 1 所示,其最小割集即为系统的薄弱环节。

表 1 下行法求解最小割集的过程

1	各层对应割集					最小割集		
	2	3	4	5	6			
T	A <sub>1</sub>	B <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>2</sub>		
	A <sub>2</sub>	X <sub>1</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>3</sub>		
	A <sub>3</sub>	B <sub>2</sub>	X <sub>1</sub>	X <sub>1</sub>	X <sub>1</sub>	X <sub>1</sub>		
	A <sub>4</sub>	B <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>					
		B <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>					
		B <sub>5</sub>	X <sub>6</sub>					
		B <sub>6</sub>	X <sub>7</sub>					
		B <sub>7</sub>	X <sub>8</sub>					
		B <sub>8</sub>	X <sub>9</sub>					
		B <sub>9</sub>	X <sub>10</sub>					
			X <sub>11</sub>					
			X <sub>12</sub>					
	X <sub>13</sub>		X <sub>13</sub>					
	X <sub>14</sub>		X <sub>14</sub>					
	X <sub>15</sub>		X <sub>15</sub>					
	X <sub>16</sub>							
	C <sub>1</sub>	X <sub>17</sub>						
	X <sub>18</sub>							
	C <sub>2</sub>	X <sub>32</sub>						
	X <sub>19</sub>	X <sub>33</sub>						
	X <sub>20</sub>	D <sub>1</sub>	X <sub>34</sub>	X <sub>34</sub>	X <sub>34</sub>	X <sub>34</sub>		
	X <sub>21</sub>	X <sub>36</sub>	X <sub>35</sub>	X <sub>35</sub>	X <sub>35</sub>	X <sub>35</sub>		
	X <sub>22</sub>	D <sub>2</sub>	X <sub>36</sub>	X <sub>36</sub>	X <sub>36</sub>	X <sub>36</sub>		
	X <sub>23</sub>	X <sub>19</sub>	X <sub>37</sub>	X <sub>37</sub>	X <sub>37</sub>	X <sub>37</sub>		
	X <sub>24</sub>	X <sub>20</sub>	X <sub>38</sub>	X <sub>38</sub>	X <sub>38</sub>	X <sub>38</sub>		
	X <sub>25</sub>	X <sub>21</sub>	X <sub>19</sub>	X <sub>19</sub>	X <sub>19</sub>	X <sub>19</sub>		
	X <sub>26</sub>	X <sub>22</sub>	X <sub>20</sub>	X <sub>20</sub>	X <sub>20</sub>	X <sub>20</sub>		
	X <sub>27</sub>	X <sub>23</sub>	X <sub>21</sub>	X <sub>21</sub>	X <sub>21</sub>	X <sub>21</sub>		
	X <sub>28</sub>	X <sub>24</sub>	X <sub>22</sub>	X <sub>22</sub>	X <sub>22</sub>	X <sub>22</sub>		
	X <sub>29</sub>	X <sub>25</sub>	X <sub>23</sub>	X <sub>23</sub>	X <sub>23</sub>	X <sub>23</sub>		
	X <sub>30</sub>	X <sub>26</sub>	X <sub>24</sub>	X <sub>24</sub>	X <sub>24</sub>	X <sub>24</sub>		
X <sub>31</sub>	X <sub>27</sub>	X <sub>25</sub>	X <sub>25</sub>	X <sub>25</sub>	X <sub>25</sub>			
	X <sub>28</sub>	X <sub>26</sub>	X <sub>26</sub>	X <sub>26</sub>	X <sub>26</sub>			
	X <sub>29</sub>	X <sub>27</sub>	X <sub>27</sub>	X <sub>27</sub>	X <sub>27</sub>			
	X <sub>30</sub>	X <sub>28</sub>	X <sub>28</sub>	X <sub>28</sub>	X <sub>28</sub>			
	X <sub>31</sub>	X <sub>29</sub>	X <sub>29</sub>	X <sub>29</sub>	X <sub>29</sub>			
	X <sub>30</sub>							
X <sub>31</sub>								
X <sub>19</sub>								

当最小割集中任一事件发生,必然导致道岔故障,如: {X<sub>1</sub>} 齿轮与齿条块异物卡阻,则导致道岔解锁空转故障。

### 5 基于 FTA 的定量分析

故障树定量分析的任务是根据底事件发生的概率估计顶事件发生的概率以及系统的一些可靠性指标。在故障树定量计算时可以通过故障树的逻辑关系直接求顶事件发生的概率,也可以通过最小割集求顶事件发生的概率<sup>[4]</sup>。

#### 5.1 直接求顶事件的发生概率

在故障树定量分析过程中,在计算中间事件与顶事件的发生概率时,根据故障树的逻辑结构,可以将复杂整树结构分解成一个个单门子树,从最底层开始由下往上进行逐层计算。一般分解得到的单门子树分为与门和或门两种类型,其顶事件发生概率计算方法如下式:

$$P_{T,OR} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_i) \quad (1)$$

$$P_{T,AND} = \prod_{i=1}^n P_i \quad (2)$$

式中:

- $P_i$ ——基本事件  $X_i$  发生的概率;
- $P_{T,OR}$ ——或门顶事件发生的概率;
- $P_{T,AND}$ ——与门顶事件发生的概率。

设  $C_j = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$  表示故障树的第  $j$  个最小割集,基本事件  $X_i$  是割集中的一个元素发生的概率,当各个基本事件是独立事件时,最小割集  $C_j$  发生的概率为:

$$P_{C_j} = P(\cap x_i) = \prod_{i=1}^n P_i \quad (3)$$

#### 5.2 通过最小割集求顶事件的发生概率

若  $\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$  是故障树中的最小割集,则该最小割集的结构函数为:

$$\Phi\{X_1, X_2, \dots, X_n\} = \prod_{i=1}^n X_i \quad (4)$$

若故障树有  $k$  个最小割集,最小割集的结构函数分别为:

$$\Phi_1\{X\}, \Phi_2\{X\}, \dots, \Phi_k\{X\} \quad (5)$$

则故障树顶事件的结构函数  $\Phi_S(X)$  为:

$$\Phi_S(X) = \bigcup_{i=1}^k \Phi_i\{X\}^{[1]} \quad (6)$$

本文选用直接求顶事件发生概率的方法进行定量分析。按照公式 (1) ~ (6),由下往上逐级计算

出中间事件与顶事件的发生概率,其计算过程如表2所示。

表2 中间事件与顶事件发生概率计算过程

步骤	事件发生概率
1	$P_{D_1} = 1 - (1 - P_{X_{34}})(1 - P_{X_{35}})$
2	$P_{D_2} = 1 - (1 - P_{X_{37}})(1 - P_{X_{38}})$
3	$P_{C_1} = 1 - (1 - P_{X_{17}})$
4	$P_{C_2} = 1 - (1 - P_{X_{32}})(1 - P_{X_{33}})(1 - P_{D_1})(1 - P_{X_{36}})(1 - P_{D_2})$
5	$P_{B_1} = 1 - (1 - P_{X_2})(1 - P_{X_3})$
6	$P_{B_2} = 1 - (1 - P_{X_4})(1 - P_{X_5})$
7	$P_{B_3} = 1 - (1 - P_{X_6})(1 - P_{X_7})(1 - P_{X_8})(1 - P_{X_9})(1 - P_{X_{10}})$
8	$P_{B_4} = 1 - (1 - P_{X_{11}})$
9	$P_{B_5} = 1 - (1 - P_{X_{12}})(1 - P_{X_{13}})(1 - P_{X_{14}})$
10	$P_{B_6} = 1 - (1 - P_{X_{15}})(1 - P_{X_{16}})(1 - P_{C_1})(1 - P_{X_{18}})(1 - P_{C_2})$
11	$P_{B_7} = 1 - (1 - P_{X_{19}})(1 - P_{X_{20}})(1 - P_{X_{21}})(1 - P_{X_{22}})$
12	$P_{B_8} = 1 - (1 - P_{X_{23}})(1 - P_{X_{24}})(1 - P_{X_{25}})(1 - P_{X_{26}})(1 - P_{X_{27}})$
13	$P_{B_9} = 1 - (1 - P_{X_{28}})(1 - P_{X_{29}})(1 - P_{X_{30}})(1 - P_{X_{31}})$
14	$P_{A_1} = 1 - (1 - P_{B_1})(1 - P_{X_1})$
15	$P_{A_2} = 1 - (1 - P_{B_2})(1 - P_{B_3})$
16	$P_{A_3} = 1 - (1 - P_{B_4})(1 - P_{B_5})$
17	$P_{A_4} = 1 - (1 - P_{B_6})(1 - P_{B_7})(1 - P_{B_8})(1 - P_{B_9})$
18	$P_T = 1 - (1 - P_{A_1})(1 - P_{A_2})(1 - P_{A_3})(1 - P_{A_4})$

本文提取了齿条块上部有异物等直接关系到道岔可靠性的底事件,但这些底事件并没有包含在日常记录的统计数据中。并且由于铁路运营现场定期排查道岔故障,通常在故障发生前已检修完毕,以保证铁路行车安全与乘客人身安全,对道岔的日常故障记录较少,故未搜集到各个底事件发生的概率数据。若获得各个底事件发生的概率数据,按照表2中公式即可计算出顶事件发生概率,从而对系统进行可靠性评估,为道岔故障诊断和日常维修提供理论依据。从中找出系统薄弱环节,采取相应措施将系统可能发生的故障损失降低到最小程度,调整维修人员的检查周期,提高检修效率,增强铁路运营安全性。

## 6 结语

本文详细分析了道岔空转故障中的解锁空转

故障,对此建立了故障树模型。当出现道岔解锁空转故障时,可根据故障树快速查找故障类型,减少误诊断事件,提高检修准确性。对道岔解锁空转故障树进行了定性与定量分析,找出系统薄弱环节,计算系统可靠性,合理制定部件检修周期,提高检修效率。但是由于条件限制,本文并没有获得具体数据,因此还需要进一步跟踪底事件发生的概率数据,为系统可靠性的评估提供理论依据。

## 参考文献

- [1] 中华人民共和国铁道部. 铁路行车事故案例选编[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1999: 27-87.
- [2] 张丽卿, 王瑞峰. 故障树分析法在信号设备中的应用[J]. 计算机与信息技术, 2007(5): 47.
- [3] 朱继洲. 故障树原理和应用[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1989: 11-21.
- [4] 程荫杭, 穆建成. 铁路信号可靠性与安全性[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2010: 136-447.
- [5] 陆晓峰. 轨道电路智能诊断方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2015.
- [6] 曹柏生. 高速铁路道岔转换设备故障分析及问题对策[J]. 铁道运营技术, 2016, 22(1): 59.
- [7] 赵林海, 陆桥. 基于灰关联的道岔故障诊断方法[J]. 铁道学报, 2014, 36(2): 69.
- [8] 何鑫, 杨顺昆, 刘斌. 基于FMEA/FTA的嵌入式软件故障诊断模型与应用[J]. 计算机测量与控制, 2009, 17(1): 42.
- [9] 沈怀密. ZD6型电动道岔的故障处理[J]. 山东交通科技, 2015(6): 35.
- [10] ZHANG Kai, DU Kai, JU Yongfeng. Algorithm of railway turnout fault detection based on PNN neural network[C]//Seventh International Symposium on Computational Intelligence and Design. Hangzhou: CPS, 2014: 544-547.
- [11] ATAMURADOV V, CAMCI F, BASKAN S, et al. Failure diagnostics for railway point machines using expert systems[J]. International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives, 2009: 1-5. DOI: 10.1109/DEMPED.2009.5292755.
- [12] EKER O F, CAMCI F, GUCLU A, et al. A simple state-based prognostic model for railway turnout systems[J]. Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58: 1718.
- [13] DOS SANTOS G F M, BARBOSA R S. Modeling of a railway vehicle travelling through a turnout[J]. Journal of Rail and Rapid Transit, 2016, 230(4): 1397.

(收稿日期: 2016-12-13)