

城市轨道交通信号设备综合寿命评价系统研究*

姜 西^{1,2} 虞 翊² 阿力玛斯·伊力夏提^{1,2} 陈义军²

(1. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 201804, 上海;

2. 同济大学国家磁浮交通工程技术研究中心, 201804, 上海//第一作者, 硕士研究生)

摘 要 城市轨道交通信号设备是保证列车安全运行的关键设备。对轨道交通信号设备的使用寿命进行综合评估,是实现信号设备维修更新的重要依据。采用信号设备的相对健康水平、相对技术水平和相对经济性 3 个指标对信号设备的使用寿命进行综合评价,并给出一种信号设备使用寿命评价系统。设备综合使用寿命评价的结果可作为对设备进行维修更新决策的重要依据。

关键词 城市轨道交通; 信号设备; 使用寿命; 综合评价

中图分类号 U284.92

DOI:10.16037/j.1007-869x.2019.01.022

Research on Comprehensive Lifetime Evaluation System of Urban Rail Transit Signaling Equipment

JIANG Xi, YU Yi, ALIMASI Yilixiati, CHEN Yijun

Abstract The signaling equipment of urban rail transit are critical facilities to ensure the operation safety of trains. The comprehensive evaluation of urban rail transit signaling equipment service lifetime is an important basis for the maintenance and updating of the signaling equipment. In this paper, the relative health, relative technical level and relative economy of the signaling equipment are used to comprehensively evaluate the signaling equipment service lifetime, and a system for signal equipment lifetime evaluation is proposed. The comprehensive evaluation result of the equipment is taken as an important basis for the renewal decision of equipment maintenance and updating.

Key words urban rail transit; signaling equipment; service lifetime; comprehensive evaluation

First-author's address State Key Laboratory of Road and Traffic Engineering, Tongji University, 201804, Shanghai, China

我国城市轨道交通已有多条早期开通运营线路已进入或已超越大修期,今后会有越来越多的运营线路设备临近或进入大修期。但我国在城市轨道交通信号设备的使用及替换等方面始终未能提出明确的处理办法,由此造成了资金浪费、故障频繁及设备滥用等情况。

目前,对信号设备寿命的研究大多是针对其可靠度及故障率,并提出相应的维修维护策略。文献[1-3]仅针对设备的物理寿命进行了研究,未考虑其经济性及其它方面的因素影响。但实际上,对设备使用寿命的评估不仅要考虑设备管理的过程,也要考虑价值变动的过程。因此,科学地评估设备全寿命周期,要综合考虑设备的可靠性、技术性及经济性等因素。

1 信号设备的使用寿命

设备的使用寿命是指从设备产品的需求设计开始至设备停用或报废为止。也有学者认为,设备的寿命是指设备从投入生产开始,经过有形磨损,直至在技术上或经济上不宜继续使用,需要进行更新所经历的时间。

从不同的角度,可将设备的寿命划分为物理寿命、技术寿命和经济寿命等,需要综合考虑各方面的影响因素来确定复杂设备的实际使用寿命。

1.1 信号设备的物理寿命

设备的物理寿命是指设备从全新状态开始使用,一直到不再具有正常功能而报废为止的全部时间。它与设备的固有可靠性有关,也与维修保养的好坏密切相关。一般来说,信号设备的物理寿命与其健康水平相关。二者关系如图 1 所示,信号设备的相对健康水平 $S_1(t)$ 随时间的变化为^[3]:

* 上海市磁浮与轨道交通协同创新中心基金(20132223);上海市申通地铁集团信号系统使用寿命状态评价与辅助工具研发项目(JS-KY17R039)

$$S_1(t) = a_0 + f_1(t) \quad (1)$$

$$t_{s1} = t_{f1} - t \quad (2)$$

式中:

a_0 ——设备相对健康水平变化曲线的形状参数,为常数;

$f_1(t)$ ——描述设备相对健康水平变化规律的单调减函数, $f_1(t) < 0$;

t_{s1} ——信号设备当前的剩余物理寿命;

t_{f1} ——设备功能失效不能满足继续工作要求的时刻。

$S_1(t) \in [0, 100]$,即用 $[0, 100]$ 之间的分值表示设备当前的相对物理健康水平, $S_1(t) = 0$ 表示 t 时刻设备处于功能失效的临界点, $S_1(t) = 100$ 表示 t 时刻设备处于最佳工作状态。

对设备进行维修(包括预防性维修)可以在一定程度上提高设备的相对健康水平,从而延长设备的物理寿命(见图2)。对设备进行维修,维修后的设备相对健康水平变化曲线形状参数为 a_1 ,所以维修后的设备健康水平为:

$$S_1(t) = a_1 + f_1(t), (t > t_{1,2}) \quad (3)$$

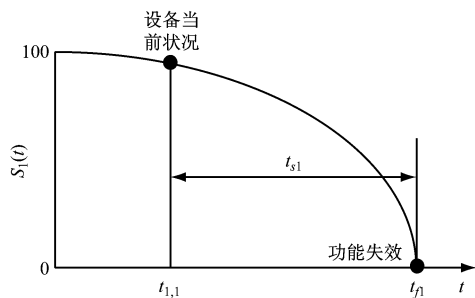


图1 设备相对健康水平随时间变化曲线

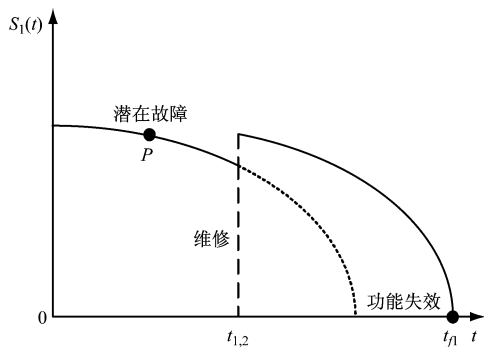


图2 维修后设备健康水平随时间变化曲线

1.2 信号设备的技术寿命

信号设备的技术寿命是指从开始使用到因技术落后而被淘汰所经历的时间,以技术落后作为

不能“有效使用”的判别准则。图3为信号设备技术水平随使用时间改变的示意图。

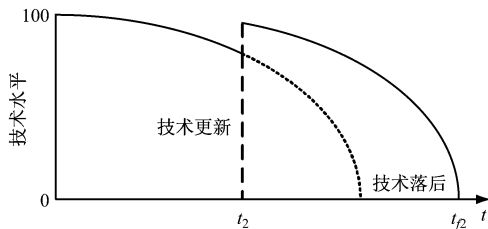


图3 设备技术水平随时间变化曲线

信号设备的技术水平是一个与时间相关的变量,同设备的相对健康水平类似。设备开始投入使用后的相对技术性评价为式(4),在 t_2 时对设备进行技术更新后,设备的相对技术性评价为式(5)。 $S_2(t) \in [0, 100]$,0表示设备技术落后的临界点,100表示设备使用了最新的技术。对设备进行技术更新改变的一般是 b_0 的值。

$$S_2(t) = b_0 + f_2(t) \quad (4)$$

$$S_2(t) = b_1 + f_2(t), (t > t_2) \quad (5)$$

式中:

b_0 ——设备相对技术水平变化曲线的形状参数,为常数;

b_1 ——维修后的设备相对技术水平变化曲线形状参数;

$f_2(t)$ ——描述设备相对技术水平变化规律的单调减函数, $f_2(t) < 0$ 。

1.3 信号设备的经济寿命

信号设备的经济寿命是指设备从开始使用到其年度总费用最小的使用年限。设备的经济寿命如图4所示。当设备的年度运营维护费用和年度设备消耗费用之和最小时,即 t_{f3} 时为设备的经济寿命。设备在 t_3 时的年均总费用 C_t 如式(6)所示。

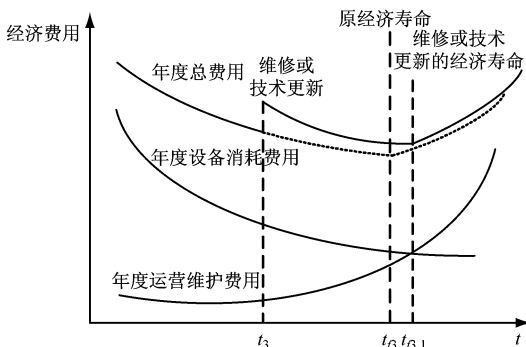


图4 设备的经济寿命

$$C_i = \frac{A}{t_{f3}} + \frac{\sum_{i=1}^{t_3} M_i}{t_3} + \frac{B}{t_3} \quad (6)$$

式中:

A ——设备初期的购置费;

M_i ——设备第 i 年的运营维护费用;

B ——设备截至 t_3 时的维修或技术更新总费用^[4]。

对设备进行维修或技术更新会对设备的经济寿命造成一定的影响,有时会延长设备的经济寿命,而设备在实际使用过程中的经济性却降低了。本文对设备的相对经济性 $S_3(t)$ 用式(7)表示。其中, $S_3(t) \in [0, 100]$, 0 表示在没有维修和技术更新情况下,设备年均总费用最大;100 表示该条件下设备年均总费用最小。可见,设备的年均总费用越低,经济性评价越高。

$$S_3(t) = \frac{C_{\max} - C_t}{C_{\max} - C_{\min}} \times 100 \quad (7)$$

式中:

C_{\max} ——不存在维修和技术更新条件下设备的最大的年度总费用(一般为设备刚投入使用的一年);

C_{\min} ——最小的年度总费用。

设备使用过程中的 $S_3(t)$ 变化如图 5 所示,则设备的经济寿命 t_{f3} 即为 $S'_3(t) = 0$ 的时间。

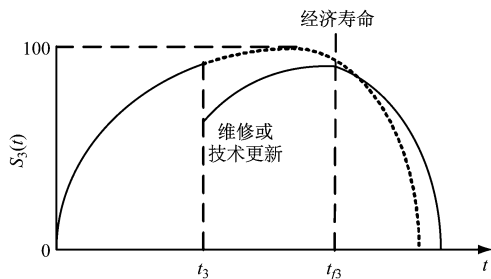


图 5 设备相对经济性随时间变化曲线

2 信号设备寿命评价系统设计

本研究主要从设备的相对健康水平、技术水平和经济性等方面对轨道交通信号设备当前剩余寿命进行综合评价预测,并针对设备的使用现状给出相应的维修决策。

2.1 系统结构和功能设计

本研究采用最新的维修管理体系 OSACBM (Open System Architecture for CBM), 构建信号设备寿命评价体系结构,如图 6 所示。信号系统关键

设备寿命评价结构主要分为数据采集、数据处理、状态监测、寿命评估与预测、维护决策支持、表示等 6 个层次。

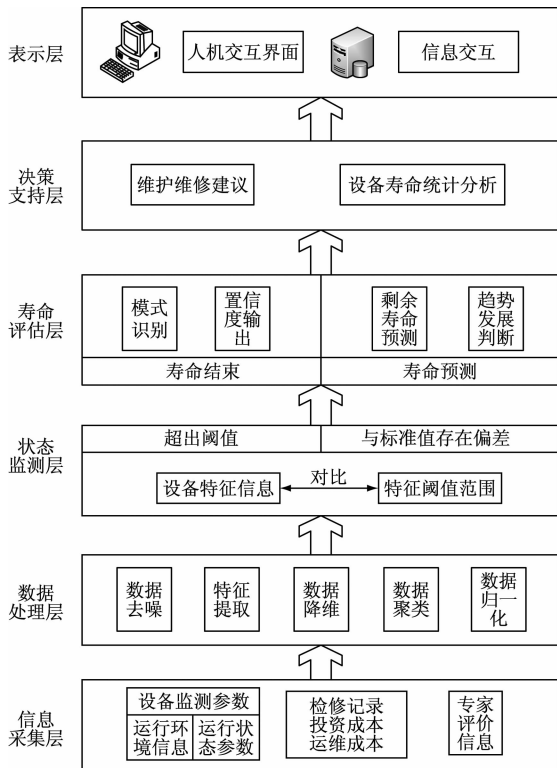


图 6 信号设备寿命评价系统

信号系统关键设备寿命评价系统联合既有监测系统、传感器组合、智能采集单元等信号设备的数据库,获得各种设备的运行环境和工作状态信息,结合专家评价信息和运维消费信息,经数据融合和处理,得到设备的寿命评价结果,并进一步给出相应的维修维护决策建议。

2.2 系统功能

信号系统关键设备寿命评价系统是一个开放式分层体系结构的系统工程,主要有数据处理、寿命评价预测,以及维护决策的优化及建模等主要功能。

2.2.1 数据处理

信号设备实际应用环境复杂、影响使用寿命的指标繁多,而且与其使用寿命相关的特征信息很多难以定量。寿命评价系统采取的数据处理方法主要包括数据去噪、数据降维、数据归一、数据融合等。

2.2.2 寿命评价预测

对设备的剩余寿命评价包括对设备物理寿命、技术寿命和经济寿命的评价。设备的使用剩余寿命由三者共同决定^[5]。

目前,运用较广泛的设备剩余寿命预测方法主要是基于可靠性的剩余寿命预测法和基于状态监测的剩余寿命预测法^[6-8]。基于可靠性的剩余寿命预测法主要针对服从物理寿命分布类型的设备,根据设备的使用情况,来预测该设备的剩余寿命^[9]。基于状态监测的剩余寿命预测方法主要通过通过对设备实时状态的监测参数,选择符合监测现状的失效模型,确定设备失效的界限,从而预测设备的剩余寿命^[10]。

设备技术寿命的评估方法主要有历史经验法和对比分析法。

2.2.3 维修决策的优化及建模

一般情况下,对设备进行维修或技术更新后,当前设备的相对健康水平或技术水平有一定提升,而设备实际的经济性却有所下降。

维修决策的优化目标是:①保证设备的相对健康水平和技术水平能满足安全可靠性的要求;②信号设备经济性要求尽可能高,即使用过程中其相对经济性呈增长趋势;③维修必须改善设备的实际使用寿命。

在寿命评估预测技术的支持下,设备决策利用最优化维修建模,科学合理地确定维修活动的周期和维修方式,形成提高各关键设备实际使用寿命的综合维修决策。

3 信号设备综合寿命评价方法

3.1 信号设备综合使用寿命

本研究主要采用设备的相对健康水平、相对经济性及技术水平等对设备的剩余寿命进行综合评价。

首先,获取运维管理专家对这三方面的客观评价,借鉴层次分析法的思想构造判断矩阵 \mathbf{A} ,

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix}$$

式中:

a_{ij} —— i 元素与 j 元素的重要度之比; $i=j$ 时,

$a_{ij} = 1$; $i \neq j$ 时, $a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}}$ 。

将矩阵 \mathbf{A} 按列归一化处理:

$$b_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^3 a_{ij}}$$

然后按行求得到:

$$v_i = \sum_{j=1}^3 b_{ij}$$

对 v_i 归一化处理,得到

$$w_i = \frac{v_i}{\sum_{i=1}^3 v_i}$$

所得 $\mathbf{W} = [w_1, w_2, w_3]$ 即为各影响因素的相对重要度权重。

然后,进行一致性检验。一致性指标为 $I_C = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$,一致性比例为 $R_C = \frac{I_C}{I_R}$ (I_R 为平均随机一致性指标)。若 $R_C \leq 0.1$,则认为一致性检验合理,权重是可以接受的;否则,需要对 \mathbf{A} 进行修改。

对设备的综合评价为:

$$E(t) = \mathbf{W} \times \mathbf{S}(t), \mathbf{S}(t) = \begin{bmatrix} S_1(t) \\ S_2(t) \\ S_3(t) \end{bmatrix} \quad (8)$$

记 t 时刻设备的综合状态为 $E(t, E(t))$, 则设备的综合评价 $E(t)$ 变化趋势如图 7 所示。预测得到的剩余寿命是设备维修决策优化的重要依据。

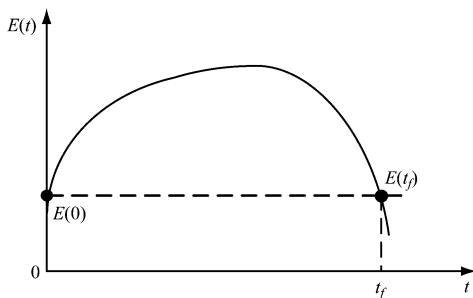


图7 $E(t)$ 随 t 变化曲线

3.2 设备的维修决策

设备在使用的过程可能会出现以下两种情况:

(1) 设备出现物理不可接受的、技术不可接受的或经济不可接受的状态。

(2) 设备虽未出现物理不可接受、技术不可接受或经济不可接受的状态,但如综合考虑物理、技术和经济是不可接受的状态。

对于已处在 $E(t_f, E(t_f))$ 的设备,应立刻中止其使用,其使用寿命已经结束,应更换设备。对于处于不可接受状态的设备,以及虽处于可接受范状态但可以进行预防性维修或技术更新的设备,应判断 $E(t)$ 采取的措施是否可改善其状态。

如图 8 所示,对采取措施之后的设备状态记为 $E(t, E(t))/S_n(t)$, 其寿命结束条件变为 $E(t_f, E$

(t_f)。对处于不可接受状态的设备,若采取措施之后 $E(t) > E(0)$,则建议对设备采取相应的维修或技术更新措施,否则建议更换设备。对处于可接受状态的设备,若 $E(t) > E(0)$,且 $t_f > t_{f,0}$,则建议采取预防性维修或技术更新措施。

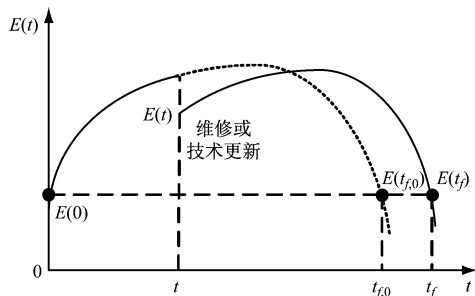


图8 采用维修或技术更新等措施的 $E(t)$ 随 t 变化曲线

3.3 算例分析

例如,某信号设备购置安装费用 $A = 40\,000$ 元,其计划维修周期间隔为 5 a 。通过历史数据的分析可知,使用过程中不采用维修和技术更新时,其相对健康水平 $S_1(t) = 102 - 2e^{0.2t}$;其相对技术水平 $S_2(t) = 100.1 - 0.1e^{0.2t}$;其年均总费用 $C_t = \frac{40\,000\text{ 元}}{t} + \frac{400\text{ 元}(t+1)}{2}$ 。计算得最高年均费用 C_H 为 $40\,400$ 元,最低年均费用 C_L 为 $5\,857$ 元。

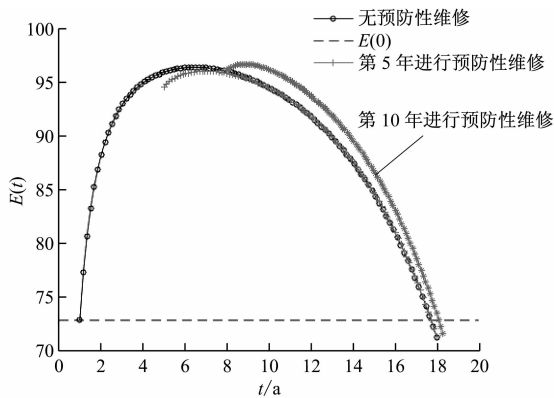
若在该设备投入使用后的第5年对该设备进行预防性维修,则需维修费用 $2\,000$ 元,该设备的相对健康水平 $S_1(t) = 102 - 2e^{0.2t} + 0.5$,其年均总费用为 $C_t = \frac{40\,000\text{ 元}}{t} + \frac{400\text{ 元}(t+1)}{2} + \frac{2\,000\text{ 元}}{t-4}$ 。

若在该设备投入使用后的第10年对该设备进行预防性维修,需维修费用 $3\,000$ 元。该设备的相对健康水平 $S_1(t) = 102 - 2e^{0.2t} + 6$,年平均总费用 $C_t = \frac{40\,000\text{ 元}}{t} + \frac{400(t+1)\text{ 元}}{2} + \frac{3\,000\text{ 元}}{t-9}$,

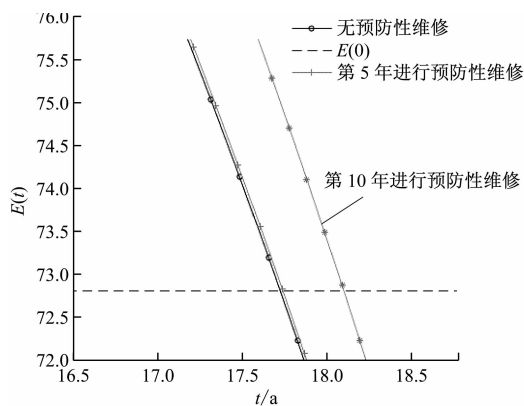
则该设备的相对经济性 $S_3(t) = \frac{C_H - C_t}{C_H - C_L}$ 。

通过采集相关专家的评价意见,计算得到设备的物理健康状态、技术水平、经济性等三个因素的权重为 $W = (0.40, 0.33, 0.27)$ 。代入式(8)中进行计算,设备在无预防性维修、第5年进行预防性维修和第10年进行预防性维修条件下的设备综合评价状态趋势变化如图9所示。

在无预防性维修的情况下,设备的综合评价使用寿命为 17.7 a 。若在设备使用的第5年进行预防



a) 整体趋势图



b) 趋势图局部放大图

图9 维修决策对综合评价寿命影响趋势

性维修,则设备综合评价使用寿命仍为 17.7 a ;因此,不建议在第5年对设备进行维修。而如在设备使用的第10年对设备进行预防性维修,则可将设备综合评价使用寿命提高为 18.1 a ;因此,建议在第10年对设备进行预防性维修。

对于综合评价高于 $E(0)$ 的偶然失效设备,需进行维修预测,若设备维修后的综合评价低于 $E(0)$ 则建议对设备进行更换,否则建议对设备进行故障维修。

4 结论

本文从轨道交通信号设备的物理寿命、技术寿命和经济寿命等方面综合对信号设备的实际使用寿命进行评价,给出一种信号设备寿命的评价系统,通过相对健康水平、相对技术水平和相对经济性等指标对信号设备使用寿命进行综合评价,并据此作为信号设备的维修决策依据,提出了轨道交通信号设备维修更新处理决策的方法,在一定程度上减少了信号设备维修的资源浪费。

参考文献

- [1] 张凯, 杜凯, 巨永锋. 基于BP神经网络的提速道岔故障诊断算法[J]. 武汉理工大学学报, 2014, 36(11):77.
- [2] 米根锁, 张凤霞, 魏蕾. 基于剩余寿命的铁路轨道电路调整型维修方法研究[J]. 铁道学报, 2015(4):69.
- [3] 张凤霞, 米根锁. 基于健康指数的轨道电路设备寿命预测方法的研究[J]. 铁道学报, 2015, 37(12):61.
- [4] 饶永波, 常治元, 杨宗霄, 等. 高速公路机电设备使用寿命预测模型[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2011, 32(2):12.
- [5] 李章杨, 陆国政, 虞翊, 等. 高铁信号关键设备使用寿命评估方法[J]. 铁道通信信号, 2017, 53(10):1.
- [6] 戎翔. 民航发动机健康管理中的寿命预测与维修决策方法研

究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2008:8.

- [7] WU X H, WEN D, LI R G, et al. A model to predict the residual life of aero-engine based upon Support Vector Machine [C]//International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering. New York: IEEE, 2013.
- [8] HESS A, FILA L. The Joint Strike Fighter (JSF) PHM concept: Potential impact on aging aircraft problems [C]//IEEE. Aerospace Conference Proceedings. New York: IEEE, 2003.
- [9] 野中保雄. 可靠性数据的收集与分析方法[M]. 高金钟, 译. 北京:机械工业出版社, 1988:11-17.
- [10] 尤明懿. 基于状态监测数据的产品寿命预测与预测维护规划方法研究[D]. 上海:上海交通大学, 2012.

(收稿日期:2018-03-19)

(上接第95页)

度考虑,采用轮缘槽宽较宽、轮缘顶部集成轨顶坡的59R2槽型轨是最佳的选择。若考虑为提高路面的平顺度而选择了槽窄的60R2槽型轨,则转向架需要采用薄轮缘踏面。这样将大大降低了轮缘的使用寿命,增加了车辆维护成本。此外,为实现有轨电车在槽型轨线路和铁路干线线路上的共轨运行,建议尽快设计出匹配国内常用T型轨的槽型轨型面。

参考文献

- [1] European Committee Standardization. Railway applications track special purpose rail grooved and associated construction.: EN 14811—2009[S]. Brussels: European Committee, 2009:29.
- [2] SAMYN F. Functional Specification for Track infrastructure [R]. Brussels: European Commission, 2010.

- [3] Länder-fachausschusses für Stadtbahnen und andere spurgebundene Ortsverkehrssysteme (LSO). Technische Regeln für die Spurführung von Schienenbahnen nach der Verordnung über den Bau und Betrieb der Straßenbahnen (BOStrab): TR Sp-2004 [S]. Cologne: Association of German Transport Companies, 2004:43.
- [4] Transportation Research Board. TCRP REPORT 155-2012[R]. Washington D C: The Federal Transit Administration in cooperation with the Transit Development Corporation, 2012.
- [5] DIN. Nahverkehrs-Schienenfahrzeuge Radreifen-Profil Breite 95 und 110mm.: DIN 25112-1980, [S]. Berlin: Deutsches Institut, 1983.
- [6] Andrés Muñoz de Dios Rodríguez, Pablo Oromí Frago. Comparative study on wheel-rail interface and wheel wear in light rail [R]. Brussels: The International Association of Public Transport, 2013.

(收稿日期:2017-03-09)

(上接第99页)

- [4] 张菊, 王若昆. 基于FMECA和FTA的轨道电路系统安全性分析[J]. 高速铁路技术, 2016, 7(6):23.
- [5] 杨洋, 谢开贵, 孙鑫. 基于FTA法的宁夏电网运行元件故障率分析[J]. 电力系统保护与控制, 2009(18):134.
- [6] 王洪飞, 施绮. 基于故障树(FTA)方法的二次系统项目评估方法研究[J]. 华东电力, 2014(12):2747.
- [7] 朱云飞, 周凤舞, 凌明胜. FTA在多输出通信网络系统中的应用[J]. 指挥信息系统与技术, 2012, 3(3):68.
- [8] 韩小涛, 尹项根, 张哲. 故障树分析法在变电站通信系统可靠性分析中的应用[J]. 电网技术, 2004, 28(1):56.
- [9] 陆锦军, 王执铨. 基于故障树的校园网通信系统的可靠性分析[J]. 计算机应用与软件, 2006, 23(11):14.
- [10] 丁坚勇, 张华志, 吴新民, 等. 城轨供电系统接触网可靠性的故障树分析[J]. 城市轨道交通研究, 2009(9):38.

- [11] 曾德容, 何正友, 于敏. 地铁牵引变电所可靠性分析[J]. 铁道学报, 2008, 30(4):22.
- [12] MÁRQUEZ F P G, PÉREZ J M P, MARUGÁN A P, et al. Identification of critical components of wind turbines using FTA over the time[J]. Renewable Energy, 2016, 87:869.
- [13] MIRZA S, OMIDVARI M, LAVASANI S M R M. The application of Fuzzy logic to determine the failure probability in Fault Tree Risk Analysis[J]. Safety promotion and injury prevention (Tehran), 2014, 2(2):113.
- [14] AKSU S, TURAN O. Reliability and availability of pod propulsion systems[J]. Quality and Reliability Engineering International, 2006, 22(1):41.
- [15] 魏春荣, 张建华, 张锦鹏. 事故树定性分析法及其在矿井安全评价中的应用[J]. 工业安全与环保, 2009, 35(9):39.

(收稿日期:2017-04-05)