

基于人因可靠性的道岔失表故障处置量化分析*

陈宇 朱海燕 刘志钢 刘晓静

(上海工程技术大学城市轨道交通学院,201620,上海//第一作者,硕士研究生)

摘要 针对城市轨道交通车站值班员岗位道岔失表故障处置作业,构建 THERP(人因失误率预测技术)和 HCR(人员认知可靠性)模型,细化了道岔失表作业流程,开展了轨道交通标准化作业下人因失误量化分析。同时,基于贝叶斯估计模型,借助车站值班员作业仿真试验对先验分布函数的两个形状参数进行估计,验证了 THERP+HCR 模型的合理性。

关键词 城市轨道交通;车站;人因可靠性;道岔失表故障

中图分类号 U29-39:U284.5

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.01.026

Quantitative Analysis of Turnout Loss of Indication Fault Disposal Based on Human Factor Reliability

CHEN Yu, ZHU Haiyan, LIU Zhigang, LIU Xiaojing

Abstract Targeting the turnout loss of indication fault disposal operation of urban rail transit station attendant, the THERP (technology for human error rate prediction) and the HCR (human cognitive reliability) models are constructed. The operation process of turnout loss of indication is refined, and a quantitative analysis of human error under rail transit standardized operation is carried out. At the same time, based on Bayesian estimation model, the two shape parameters of prior distribution function are estimated by means of operation simulation test of station attendant, which verifies the rationality of the THERP+HCR model.

Key words urban rail transit; station; human factor reliability; turnout loss of indication fault

Author's address School of Urban Railway Transportation, Shanghai University of Engineering Science, 201620, Shanghai, China

作为人因可靠性研究中最重要数据支撑,人因失误数据因其不会被系统直接记录,而较难采取有效的方法获取。国内外诸多学者通过不同的量化分析方法开展轨道交通关键岗位人员作业失

误分析研究^[1-3],但其研究大多是基于理论模型的计算分析。由于人因数据的缺乏,无法与实际的失误数据形成对比并验证理论模型的有效性。本文针对人因失误数据难以采集的问题,通过构建 THERP(人因失误率预测技术)+HCR(人员认知可靠性)模型,细化了道岔故障导致 ATS(列车自动监控系统)工作站失去表示(以下简称“道岔失表”)故障处置作业流程,开展了人因操作失误的量化分析,并通过仿真试验验证了所提模型的有效性。本文研究可为排查和消除城市轨道交通系统中的人因隐患提供理论基础。

1 道岔失表分析

道岔失表是城市轨道交通线路中发生频率较高的故障之一。该故障大多是由于转辙机内部装置故障、尖轨与基本轨之间存在异物、道岔滑床板被异物卡住等原因导致的。一旦故障发生,将致使列车晚点、车站客流积压,甚至引发乘客投诉等问题。目前,城市轨道交通车站应对道岔失表采取的措施为先由行车值班员进行道岔单独操作(以下简称“单操”)测试,若无效,则需要值班站长和设备值班员协同合作,执行手摇道岔接发车作业。道岔失表故障处置流程及其失误原因类别如图1所示。

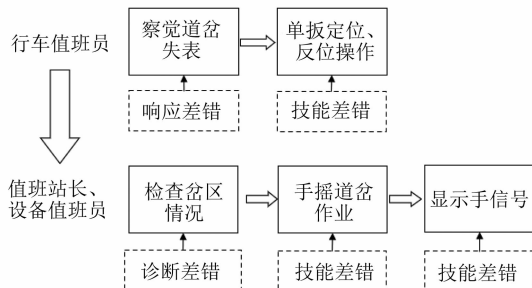


图1 道岔失表故障处置流程及其失误原因类别

Fig. 1 Disposal process and cause category of turnout loss of indication fault

* 国家自然科学基金项目(52072235);“十三五”国家重点研发计划子课题(2017YFC0804900)

2 THERP+HCR 分析方法

既有研究表明,在常见的 12 种人因可靠性分析方法中,THERP 与 HCR 方法在综合评价表现上较为良好,具有广泛的适用性^[4]。

2.1 人因失误率预测技术

THERP 主要利用 HRA(人因可靠性分析)事件树模型将值班员的某项任务划分成一系列按照操作规程的子任务,并基于 THERP 手册给出每个动作的人因失误概率(以下简称“人误率”),同时考虑其所处环境,利用行为形成因子加以修正,再依据任务之间的相关性测算获得最终的人误率。THERP 应用步骤如图 2 所示。

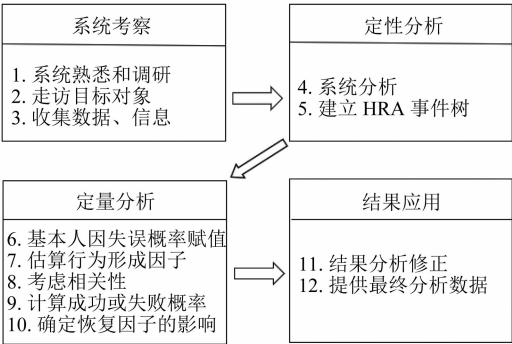


图 2 THERP 应用步骤
Fig. 2 Application steps of THERP

2.2 人员认知可靠性

HCR 模型在对人因可靠性进行分析时,从人因失误机理入手,结合认知过程中的心理学,着重研究在突发事件下值班员故障应急处置中的认知过程。人在认知过程中的行为类别分为技能型、规则型和知识型,而 HCR 模型在此基础上提出每种行为类型的失误概率遵循三参数的威布尔分布^[5],即:

$$P(t)=\exp\left\{-\left[\frac{(t/t_{0.5})-\gamma}{\lambda}\right]^{\mu}\right\}\tag{1}$$

式中:

$P(t)$ ——在允许值班员响应的时间内,值班员未做出反应的概率值;

t ——道岔故障时,允许设备值班员岔区检查的时间;

$t_{0.5}$ ——正常情况下(如演练、培训),值班员响应某项故障的平均时间;

λ 、 μ 、 γ ——特定行为类别下的威布尔修正参数。

考虑到事发时,每位值班员所处的环境以及每

个人的自身反应时间或业务熟练程度有所不同,故需要利用行为影响因子 $K_i(i=1,2,3)$ 对 $t_{0.5}$ 进行修正,具体公式为:

$$t_{0.5,m}=t_{0.5}(1+K_1)(1+K_2)(1+K_3)\tag{2}$$

式中:

K_1 、 K_2 、 K_3 ——分别为值班员操作经验、心理素质、人机界面影响因子;

$t_{0.5,m}$ ——修正后的值班员响应某故障平均时间。

2.3 模型计算

基于 THERP+HCR 模型,将道岔失表作为算例,对值班员故障处置中的认知和操作过程进行人误率估算。由图 3 的道岔失表事件失误分析示意图可知,按照时间发展序列,值班员存在 4 种失误路径。

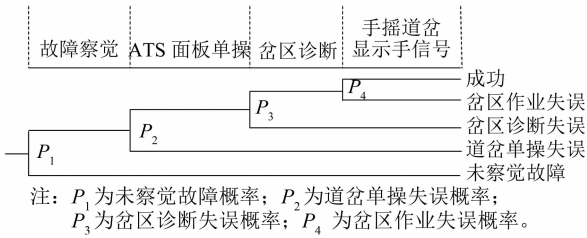


图 3 道岔失表事件失误分析示意图
Fig. 3 Error analysis diagram of turnout loss of indication event

2.3.1 未察觉故障概率

当 ATS 面板报警时,认为行车值班员未发现故障的概率非常小, $P_1=1.0\times10^{-4}$ 。

2.3.2 道岔单操失误率

道岔单操属于序列操作,采用 THERP 方法,行车值班员在 ATS 面板进行单操的 HRA 事件树如图 4 所示。依据 THERP 数据表^[5],行车值班员单扳定位、反位操作的失误率为 $P(A_1)=P(B_1)=1\times10^{-3}$,修正系数为 1,所以 $P_2=1-P(a_1)P(b_1)=1.999\times10^{-3}$ 。

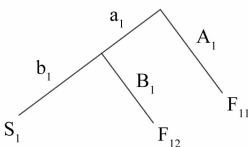


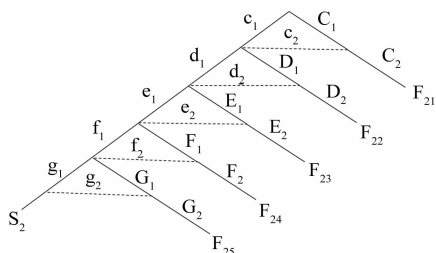
图 4 行车值班员道岔单操 HRA 事件树示意图
Fig. 4 HRA event tree diagram of train operator independent turnout operation

2.3.3 岔区检查失误率

对于诊断行为,采用 HCR 模型。根据车站的实际调研情况,车站设备值班员平均工龄为 4 年,具有较好的业务水平。设 $t=60\text{ s}$,依据标准化作业平均时间,岔区检查作业时间实际约为 $t_{0.5}=30\text{ s}$ 。值班员失误类别视为规则型,国内学者通过大规模的模拟机试验得出,当行为类型为较为熟悉的规则型时,采用其修正后的威布尔修正参数 λ, μ, γ 处理数据模型更为恰当^[6],即 $K_1=-0.22, K_2=0.28, K_3=-0.22, \lambda=0.88, \mu=1.63, \gamma=0.3$,修正后代入式(1),可得 $P_3=5.146\times 10^{-3}$ 。

2.3.4 岔区作业失误率

采用 THERP 方法,设备值班员在岔区手摇道岔作业的 HRA 事件树如图 5 所示。据 THERP 数据表, $P(C_1)=P(D_1)=P(G_1)=1\times 10^{-3}, P(E_1)=P(F_1)=5\times 10^{-2}$,修正系数为 2;值班站长全程盯控值班员作业,两者的相关性为中等,则有 $P_4=\sum_{i=1}^5 P(F_{2i})=4.659\times 10^{-2}$ 。故整个道岔失表故障处置作业的理论失误率为 $P=\sum_{m=1}^4 P_m=5.384\times 10^{-2}$ 。



注: c_1, d_1, e_1, f_1, g_1 分别为成功执行打开套简锁、打开遮蔽器、手摇至“咔嚓”声、加装钩锁器、显示手信号; C_1, D_1, E_1, F_1, G_1 分别为上述操作失误; c_2, d_2, e_2, f_2, g_2 分别为在值班站长纠正下成功完成上述操作; C_2, D_2, E_2, F_2, G_2 分别为在值班站长纠正下上述操作仍失误; S_2 为手摇道岔作业成功; F_{2i} 为手摇道岔作业失误, $i=1,2,\dots,5$ 对应 c_1-g_1 这 5 个事件。

图 5 设备值班员手摇道岔作业的 HRA 事件树示意图

Fig. 5 HRA event tree diagram of equipment attendant manual turnout operation

3 试验过程

3.1 试验目的及方法

在城市轨道交通系统中,值班员实际操作的失误数据并不会被系统或者人为记录,因此通过车站作业仿真试验的方法,依据每次试验的失误次数以及执行总次数测算实际人误率 θ 。引入贝叶斯估计参数思想,即在试验测得的人误率基础上加入先验信息进而获得后验信息,后验分布的期望即为所要研究的值班

员故障处置失误率的实际精确值。后验分布的推导步骤可参考文献[7],其期望 $E(\theta)$ 可以表示为:

$$E(\theta) = \frac{\alpha + x}{\alpha + \beta + n} \quad (3)$$

式中:

x ——值班员失误次数;

n ——值班员作业总次数;

α, β ——分别为先验分布函数中的两个形状参数。

为了准确估计出人误率 θ ,需对先验分布函数中的两个形状参数 α, β 进行求解。采用值班员作业仿真试验的方式,计算出 k 次试验失误率的均值 $\bar{\theta}$ 和方差 s^2 , α, β 的推导步骤可参考文献[7],其求解公式为:

$$\alpha = \bar{\theta} \left[\frac{(1 - \bar{\theta}) \bar{\theta}}{s^2} - 1 \right] \quad (4)$$

$$\beta = (1 - \bar{\theta}) \left[\frac{(1 - \bar{\theta}) \bar{\theta}}{s^2} - 1 \right] \quad (5)$$

3.2 试验对象

将 12 名应届学生(均为男性,平均年龄为 25 岁)作为试验对象,对其进行专业培训,使其熟悉常规的 ATS 操作及故障处置流程,并分组进行道岔失表故障处置试验。

3.3 试验仪器与设备

本试验通过模拟的车站控制室、道岔转辙机、屏蔽门及调度指挥台完成,能够满足值班员日常行车业务办理及故障应急处置。

3.4 试验情景设计

上海轨道交通 3 号线中山公园站 ATS 线路软件截图如图 6 所示。行车值班员完成岗前一系列操作后,下行列车在中山公园站清客并运行至 TC63E 轨道区段,但此时 12E 道岔突发故障,控制台弹出挤岔报警提示框,行调通知车控室行车值班员进行道岔故障处置,在单操测试无响应后,命令值班站

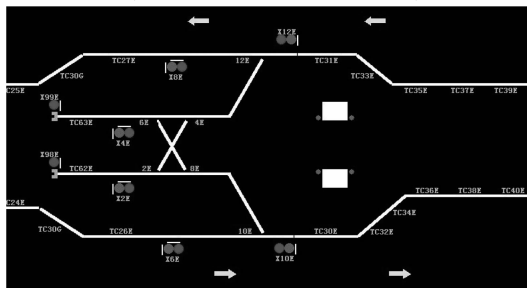


图 6 中山公园站 ATS 线路软件截图

Fig. 6 Software screenshot of Zhongshan Park Station ATS route

长与设备值班员准备手摇工具进入岔区,检查 12E 道岔并进行手摇操作。

3.5 数据处理

在试验过程中,通过人工评判记录每项操作步骤的失误次数,同时用计算机辅助记录作业时间,若超过标准作业时间也将判为失误。每次试验分为 8 个步骤,失误次数统计情况如表 1 所示。

表 1 失误次数统计表
Tab.1 Statistics of errors

试验编号	失误次数	失误率
①	1	0.125
②	0	0
③	2	0.250
④	0	0
⑤	1	0.125
⑥	1	0.125
⑦	1	0.125
⑧	1	0.125

由表 1 可知,值班员 8 次模拟故障处置试验的平均人误率为 0.109,方差为 0.021。将上述参数取值代入式(4)和式(5)可得 $\alpha = 0.398$ 、 $\beta = 3.241$,即后验分布的均值 $E(\theta|x)$ 可以表示为:

$$E(\theta|x) = \frac{0.398 + x}{3.639 + n} \tag{6}$$

结合某地铁新线试运行 16 次演练,共计 128 项操作步骤的道岔故障处置情况,经评估统计共 7 次人员失误。其间道岔故障处置情况如图 7 所示。最终计算出道岔失表应急故障处置的实际人误率为 5.62×10^{-2} 。实测值与理论值误差为 4.2%,精度良好,故可认为 THERP+HCR 模型适用于计算值班员道岔失表应急处置人误率。

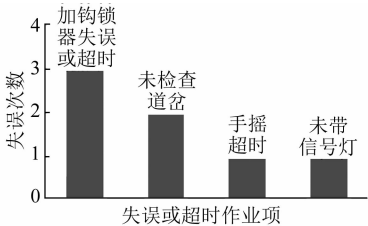


图 7 新线试运行演练道岔故障处置情况

Fig. 7 Turnout fault disposal status during trial operation drill of new lines

4 结语

基于 THERP+HCR 模型,能够直观显示值班员在不同故障处置中认知阶段与操作阶段的人误率,再结合不同故障下的操作标准细则,分解标准操作后,

就能够建立相应的人因失误模型。通过该模型计算和试验获得的各环节人误率结果均为 $P_4 > P_3 > P_2 > P_1$,且手摇道岔作业项中的手摇和加装钩锁器相较于其他步骤失误率较高。从认知角度看,设备值班员进入岔区后,容易忽略对道岔的检查,导致列车存在冒进挤岔风险,值班站长应全程做好值班员的盯控与提醒;从操作角度看,各车站的钩锁器型号有所不同,建议同一线路使用同一类型的钩锁器,同时加强对钩锁器使用的培训。而对于现场标准化作业时间,建议可根据车站的类型,如核心有岔站和有岔通过站进行分级分类设定,最大程度地降低运营列车的延误水平。

参考文献

[1] 石磊. 基于改进 CREAM 的轨道交通人因可靠性分析方法研究[D]. 北京:北京交通大学,2016.
SHI Lei. Human reliability analysis method research for rail traffic based on improved CREAM[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University,2016.

[2] MARKOVIĆ M, PAVLOVIĆ N, IVIĆ M. Fuzzy renewal theory about forecasting mistakes done by a locomotive driver: a Serbian railway case study[J]. Transport,2011,26(4):403.

[3] 吴海涛,罗霞. 高铁列车调度员人因失误概率量化方法研究[J]. 中国安全科学学报,2015,25(5):108.
WU Haitao, LUO Xia. Research on human error probability quantification method for high-speed railway train dispatcher[J]. China Safety Science Journal,2015,25(5):108.

[4] 张力. 概率安全评价中人因可靠性分析技术研究[D]. 长沙:湖南大学,2004.
ZHANG Li. The research on human reliability analysis technique in probabilistic safety assessment[D]. Changsha: Hunan University,2004.

[5] 程颖. 地铁调度员人因失误数据及其采集方法的研究[D]. 北京:首都经济贸易大学,2017.
CHENG Ying. The study of human error data and collection method for subway dispatcher[D]. Beijing: Capital University of Economics and Business,2017.

[6] 颜弘扬. 基于 HRA 的核电厂主控室数字化人机界面布局优化研究[D]. 衡阳:南华大学,2016.
YAN Hongyang. The digital human machine interface layout optimization in nuclear power plant control room based on human reliability analysis [D]. Hengyang: University of South China,2016.

[7] 王洁. 面向地铁突发事件的行车调度系统人误预测研究[D]. 北京:北京交通大学,2013.
WANG Jie. Research on traffic dispatching system human error prediction for the subway emergency[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University,2013.

(收稿日期:2020-09-29)