

DOI:10.15923/j.cnki.cn22-1382/t.2018.6.01

基于可靠性框图的轨道客车司机操作台 可靠性分析

张邦成^{1,2}, 隋元昆¹, 步倩影¹, 邵昱博¹,

刘丹阳³, 李波⁴, 夏雨⁴

(1.长春工业大学 机电工程学院, 吉林 长春 130012;

2.长春工业大学 汽车工程研究院, 吉林 长春 130012;

3.长春市轨道交通集团有限公司, 吉林 长春 130012;

4.研奥电气股份有限公司, 吉林 长春 130012)

摘要: 采用可靠性框图技术对轨道客车司机操作台进行可靠性研究。首先,根据司机操作台接线图分析其内部元件的逻辑关系,并绘制可靠性框图。其次,计算每个元件的可靠度,从而得出总体可靠性。最后,根据分析结果提出合理的设计及维修建议。

关键词: 轨道客车; 司机操作台; 可靠性框图; 可靠性分析

中图分类号: U462.35; U268.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-1374(2018)06-0521-07

Reliability analysis for driver console of railway vehicles based on reliability block diagram

ZHANG Bangcheng^{1,2}, SUI Yuankun¹, BU Qianying¹, SHAO Yibo¹,
LIU Danyang³, LI Bo⁴, XIA Yu⁴

(1.School of Mechatronic Engineering, Changchun University of Technology, Changchun 130012, China;

2.Automotive Engineering Research Institute, Changchun University of Technology, Changchun 130012, China;

3.Changchun Realail Transit Group Company, Changchun 130012,China;

4.Yeal Electrical Appliance Co., Ltd., Changchun 130012, China)

Abstract: In this paper, the reliability of the driver console of railway vehicles is studied based on the reliability block diagram. Firstly, the reliability block diagram is drawn according to the connection diagram of the driver console. Then, the reliability of each component is calculated to obtain the whole driver consoles reliability. Finally, reasonable design and maintenance suggestions are put forward according to the reliability analysis results.

Key words: railway vehicle; driver console; reliability block diagram; reliability analysis.

收稿日期: 2018-05-25

基金项目: 吉林省科技厅重点科技研发项目(20180201125GX); 长春市科技计划项目(17CX001)

作者简介: 张邦成(1972-),男,汉族,吉林敦化人,长春工业大学教授,博士生导师,主要从事机电系统设计与故障诊断方向研究,
E-mail: zhangbangcheng@ccut.edu.cn.

0 引言

随着我国经济的发展,轨道客车由于用地省、运能大、节能环保、运行时间稳定等优势,社会地位不断提高,逐渐成为城市公共交通系统的主流^[1]。司机操作台是轨道客车的控制中心,控制整车的运行状态,其可靠性直接影响机车行驶安全性,一旦发生故障,轻则延误车次,重则导致灾难性的后果,威胁乘客的人身安全。因此,对轨道客车司机操作台的可靠性进行分析具有重要意义。

目前,在司机操作台可靠性研究领域大多为对其某一部分系统分析,如显示屏故障原因研究^[2]、司机控制器维护方案分析^[3-4]、继电器故障研究^[5]等。对司机操作台进行整体的可靠性分析有利于司机操作台的结构设计及维修,有利于指导工作人员进行技术改进。

另一方面,现有司机操作台研究成果多为通过定性分析方法得到,而定量分析可以让定性更为精确。在考虑整体可靠性的同时加入定量分析方法,会使得研究结论更加真实可信^[6]。为此,文中主要对司机操作台整体可靠性进行定性分析及定量研究。

目前,国内外关于司机操作台可靠性研究的成果较少,但已经有众多学者对可靠性问题进行了深层次研究。文献^[7]采用有向图方法分析了系统可靠性的增长模型;文献^[8-9]基于最小路集法研究了复杂设备的可靠性分析方式;文献^[10]基于分级组合可靠性建模方式分析了设备动态及静态特性。现有研究中多为通过经验知识获取可靠性计算参数,缺乏确信来源,而可靠性框图分析方法具有较强的实用性^[11-12],其计算过程可根据《电子设备可靠性预计手册》获得^[13],因此分析结果更加可靠。故文中基于可靠性框图技术对司机操作台进行可靠性分析。

1 可靠性框图

可靠性框图是一种静态的抽象模型,需先假设研究对象内部原件相互独立,故障互不干涉,是可靠性研究的重要方法^[14],常见的可靠性框图分为串联及并联两种逻辑系统。

1)若某一个单元的失效率是 λ_i ,则串联系统的总体可靠性失效率为:

$$\lambda_{\text{SYS}} = \sum_{i=1}^n \lambda_i \quad (1)$$

系统的平均无故障工作时间为:

$$t_{\text{MBTF}} = \frac{1}{\lambda_{\text{SYS}}} \quad (2)$$

若某一个单元的可靠度是 R_i ,那么系统的总体可靠性为:

$$R_{\text{SYS}} = \prod_{i=1}^n R_i \quad (3)$$

2)若每单元的失效率为 λ ,则并联系统的可靠性总体失效率为:

$$\lambda_{\text{SYS}} = \frac{1}{\frac{1}{\lambda} \sum_{i=1}^n \frac{1}{i}} \quad (4)$$

若某一个单元的可靠度是 R_i ,那么设备总体可靠性为:

$$R_{\text{SYS}} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i) \quad (5)$$

2 司机操作台可靠性框图模型

2.1 轨道客车司机操作台

轨道客车司机操作台主要组成部件有司机控制器、按钮板和仪器仪表等。司机操作台外观形式多种多样,但其主要部件、线束布局、操作功能基本一致。因此,文中以国内某型号地铁司机操作台为例进行可靠性研究,国内某型号地铁司机操作台如图 1 所示。



图 1 国内某型号地铁司机操作台

2.2 司机操作台可靠性框图

司机操作台内集成了大量的元器件,且线束连接复杂,为了更加清楚地体现其逻辑关系,将司

机操作台划分为两个等级 (I 级和 II 级)。首先根据元器件的不同种类, 将司机操作台划分成三个 I 级模块, 分别是司机控制器、仪器仪表和按钮板。每个 I 级模块中含有众多子集, 文中将每个子集归类为 II 级。12 个微动开关和电位器构成

了司机控制器; 语音控制单元、电源变换器、速度表、双针压力表及显示屏构成了仪器仪表模块; 按钮板根据他们实现功能的不同可细分为 6 个模块。

司机操作台的可靠性框图如图 2 所示。

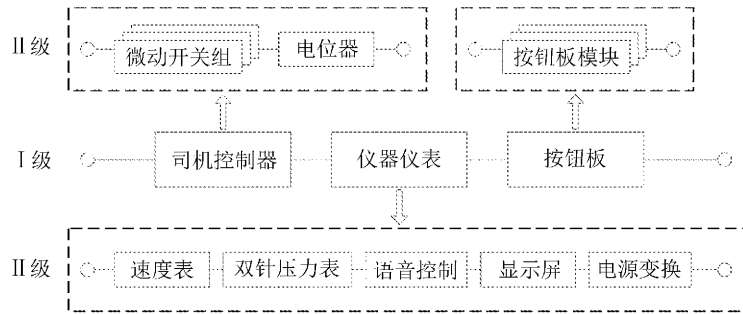


图 2 司机操作台可靠性框图

司机操作台内部还会设有一些虚接的按钮, 只有当工作中的按钮失效后才会被接线使用, 因此从严格意义上来说司机操作台没有热备用元器件。根据可靠性框图法, 可以将司机操作台定义为串联系统。

3 轨道客车司机操作台可靠性计算

基于司机操作台实际接线图纸, 并参照《电子设备可靠性预计手册》得出每一个元器件的可靠性, 其中元件的负载类型、接线个数、操作频次以及工作环境等都会不同程度地影响其可靠性数值, 通过计算得到精确的可靠性计算结果。

3.1 按钮板可靠性

按照按钮元件所实现的功能, 可以将同一类别的按钮元件的输入及输出端集成在一个连接器中。依据连接器的数量, 可以将按钮板划分为 6 个模块, 命名为按钮板 1~6。基于按钮的接线图, 采用 Proteus 软件绘制按钮板 1 的电路图如图 3 所示。

从图 3 可以看出, 按钮板接线图的逻辑关系比较复杂, 运用可靠性框图法则能快速理清每个元件在系统中的作用。元件的接头个数同样是一个不可或缺的关键特征, 它可以通过可靠性计算公式中的接点个数来体现^[13]。按钮板 1 的可靠性框图如图 4 所示。

按钮板主要包含两类元件: 开关类和连接器类。

开关类器件工作失效率预计模型^[13]:

$$\lambda_P = (\lambda_{b1} + \lambda_{b2}) \pi_E \pi_O \pi_L \pi_{CYC} \quad (6)$$

式中: λ_P ——工作失效率, $10^{-6}/h$;

λ_{b1} ——开关驱动机构的基本失效率;

λ_{b2} ——开关有源接点的基本失效率;

π_E ——环境系数;

π_O ——质量系数;

π_L ——触点负载系数;

π_{CYC} ——开关速率系数。

前照灯开关的参数选择: 其类型为旋转式, $\lambda_{b1} = 0.04 \times 10^{-6}/h$; 有源接点数为 2, $\lambda_{b2} = 0.06 \times 10^{-6}/h$; 环境类型为列车平稳地面移动, $\pi_E = 6.4$; 质量系数为 B₁ 标准, $\pi_O = 0.6$; 司机操作台为感性负载^[15-16], $\pi_L = 1.02$; 前照灯开关每日的操作频率可以由文献[17]计算, $\pi_{CYC} = 14$ 。所以, 前照灯开关预计失效率为:

$$\lambda_{P-S1} = (\lambda_{b1} + \lambda_{b2}) \pi_E \pi_O \pi_L \pi_{CYC} = 5.483\ 520 \times 10^{-6}/h$$

连接器的失效率预计模型^[13]:

$$\lambda_P = \lambda_b \pi_E \pi_O \pi_T \pi_P \quad (7)$$

式中: λ_P ——工作失效率, $10^{-6}/h$;

λ_b ——基本失效率;

π_E ——环境系数;

π_O ——质量系数;

π_T ——温度系数;

π_P ——接触件系数。

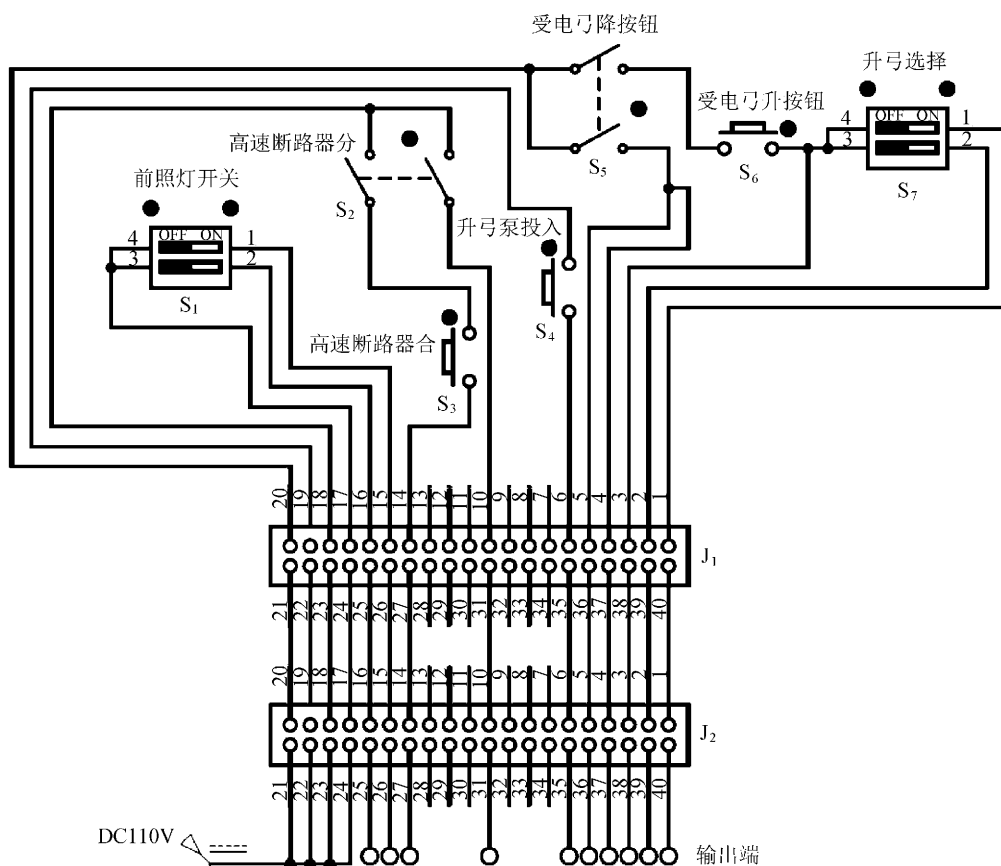


图 3 按钮板 1 的电路图

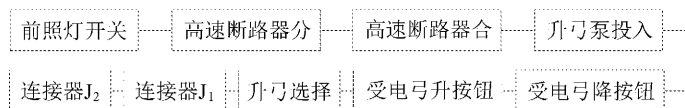


图 4 按钮板 1 的可靠性框图

连接器 J₁ 的参数选择:连接器的类别为通用功率型,λ_b=0.001 50×10⁻⁶/h;环境类型为列车平稳地面移动,π_E=3;连接器为完全按照商用识别图纸采购的产品,π_O=2;工作温度在 30 ℃ 以下,π_T=0.8;由图 3 可知实际使用的接触件数为 14,π_P=2.33。所以,连接器 J₁ 的预计失效率为:

$$\lambda_{P-J_1} = \lambda_b \pi_E \pi_O \pi_T \pi_P = 0.016\ 776 \times 10^{-6} / h$$

司机操作台按钮板模块共有 12 个连接器,25 个开关类元件。限于篇幅,文中仅以前照灯开关和连接器 J₁ 的建模及计算过程为例,其余元件的可靠性计算结果见表 1。

表 1 按钮板全部元件可靠性计算结果

按钮板名称	元件名称	预计失效率/(10 ⁻⁶ /h)
按钮板 1	前照灯开关	5.483 520
	高速断路器分	1.117 084
	高速断路器合	2.198 132
	升弓泵投入	0.097 137
	受电弓降按钮	0.382 279
	受电弓升按钮	0.097 137
	升弓选择	0.313 344
	连接器 J ₁	0.016 776
	连接器 J ₂	0.016 776

续表 1

按钮板名称	元件名称	预计失效率/(10 ⁻⁶ /h)
按钮板 2	ATB 启动按钮	1.648 580
	ATO2 发车按钮	1.648 580
	ATO1 发车按钮	1.648 580
	BM	0.824 290
	RM	0.824 290
按钮板 3	连接器 J ₃	0.013 824
	连接器 J ₄	0.013 824
	司机室顶灯开关	1.288 943
	停放制动控制	0.313 344
	司机室风速调控	3.783 627
	连接器 J ₅	0.013 104
按钮板 4	连接器 J ₆	0.013 104
	关右司机室门	0.194 273
	开右司机室门	0.194 273
	电热玻璃	0.988 178
	司机室电热	1.185 814
	强迫缓解	0.012 142
	试灯按钮	1.031 154
	开右门 1	3.297 162
	开右门 2	3.297 162
	关右门	3.297 162
按钮板 5	连接器 J ₇	0.021 168
	连接器 J ₈	0.021 168
	停放制动未缓解	0.008 436
	制动不缓解	0.008 436
	ATP 切除指示灯	0.008 436
	列车门关好灯	0.008 436
	门旁路指示灯	0.008 436
	CBTC 模式灯	0.008 436
	连接器 J ₉	0.011 664
	连接器 J ₁₀	0.011 664
按钮板 6	紧急制动按钮	0.009 478
	连接器 J ₁₁	0.012 384
	连接器 J ₁₂	0.012 384

按钮板总体失效率 $\lambda_1 = 35.404\ 121 \times$

$10^{-6}/h$, 平均无故障工作时间 28 245.299 470 h。

3.2 仪器仪表可靠性

司机操作台的仪器仪表属于高度集成的设备, 由于外界运行环境及自身复杂程度的影响, 内部元件的可靠性具有相互关联性, 使得故障模式复杂多变, 所以单纯依靠可靠性手册将仪器拆开成若干零件进行计算, 得出的结论可信度不高。因此, 文中采用故障严重程度等级来估计可靠性。根据文献[18], 将极少发生故障的语音控制、显示屏、电源变换、速度表、双针压力表的故障等级定义为 E 级, 分别占全年总故障次数的 0.10%, 0.05%, 0.10%, 0.05%, 0.05%。轨道客车每年约发生 126 次故障, 全年工作时间约为 6 205 h, 得出预计失效率见表 2。

表 2 仪器仪表可靠性计算结果

名称	预计失效率/(10 ⁻⁶ /h)
语音控制单元	20.306 205
显示屏	10.153 103
电源变换模块	20.306 205
速度表	10.153 103
双针压力表	10.153 103

仪器仪表的失效率较高, 失效率达到 $\lambda_2 = 71.071\ 719 \times 10^{-6}/h$, 平均无故障工作时间 14 070.294 26 h。

3.3 司机控制器可靠性

司机控制器是轨道客车必不可少的元器件, 在运行过程中起着举足轻重的作用, 司机通过操作司机控制器速度手柄来调整列车速度, 12 个微动开关做出相应的动作传递电信号[19]。

微动开关的可靠性计算过程见式(6), 开关的类型为微动式, $\lambda_{b1} = 0.001\ 5 \times 10^{-6}/h$; 有源接点数为 1, $\lambda_{b2} = 0.03 \times 10^{-6}/h$; 环境类型为列车平稳地面移动, $\pi_E = 6.4$; 质量系数为 B₁ 标准, $\pi_O = 0.6$; 负载类型为感性负载[15-16], $\pi_L = 1.02$; 速率系数为 $\pi_{CYC} = 147.2$ 。得单个微动开关的预计失效率为:

$$\lambda_{P-SW1} = (\lambda_{b1} + \lambda_{b2})\pi_E\pi_O\pi_L\pi_{CYC} = 18.161\ 418 \times 10^{-6}/h$$

电位器的失效率预计模型[3]:

$$\lambda_P = \lambda_b\pi_E\pi_O\pi_R\pi_{TAPS} \quad (8)$$

其中, λ_P 为工作失效率, 单位 $10^{-6}/h$; 基本失

效率 $\lambda_b = 0.5172 \times 10^{-6}/h$; 环境系数 $\pi_E = 4.0$; 质量系数 $\pi_O = 4.0$; 阻值系数 $\pi_R = 1.0$; 引出端子系数 $\pi_{CYC} = 1.0$ 。所以电位器的预计失效率为:

$$\lambda_{P-RP} = \lambda_b \pi_E \pi_O \pi_R \pi_{TAPS} = 8.2752 \times 10^{-6}/h$$

表3 司机控制器可靠性计算结果

名称	预计失效率/($10^{-6}/h$)
微动开关	18.161 418
电位器	8.275 200

司机控制器的失效率为:

$$\lambda_3 = 12\lambda_{P-SW1} + \lambda_{P-RP} = 226.212\ 219 \times 10^{-6}/h$$

平均无故障工作时间为 4 420.627 696 h。

3.4 司机操作台整体可靠性

司机操作台整体可靠性包括按钮板、仪器仪表和司机控制器的可靠性,根据式(1)得到总体失效率为:

$$\lambda_{SYS} = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 = 332.688\ 059 \times 10^{-6}/h$$

根据式(2)得到司机操作台平均无故障工作时间:

$$t_{MBTF} = 3\ 005.818\ 733\ h$$

串联系统单次测量时间为 T 时的可靠性为:

$$R_{SYS} = \exp(-\lambda_{SYS} \cdot T) \quad (9)$$

以每天工作 17 h 计算,轨道客车的单次测量时间为 $T = 17\ h$,计算出司机操作台的工作可靠性为:

$$R_{SYS} = \exp(-\lambda_{SYS} T) = 0.994\ 360$$

4 可靠性计算结果分析

由表1按钮板模块可以看出,失效率较高的为开关门按钮和司机室风速调控按钮,失效原因却有所不同,开关门按钮由于其使用频率较高,而司机室风速调控按钮由于其开关类型为旋转式,相对按钮式来讲具有更高的失效率。失效率最高的是前照灯开关,其较高的使用频率又是旋转式开关,因此,建议类型改为更可靠的按钮式开关。

由于仪器仪表模块长期处于工作状态,且内部元件相对复杂,所以故障率高于按钮板模块。

由表1~表3得出,司机控制器的故障率最高。微动开关作为影响司机控制器可靠性的关键元件,由于其自身结构简单,所以可靠性很高,但操作频繁导致故障率较高。目前已经有大量文献

提出从微动开关的材料和结构上进行改进,来提升其可靠性。然而,无论怎么改进,元件在较高的使用频率下随着工作时间的增加而逐渐失效是必然的。所以应建立合理的检测机制,定期检查微动开关的退化程度,根据检测结果定制最优替换决策才会更大程度增加其可靠性。

对比司机操作台的3个I级模块故障率可以得出:司机控制器>仪器仪表模块>按钮板。总结分析结果得出决定司机操作台可靠性的关键要素依次为:元件的使用频率、仪器的复杂程度、按钮的形式。

5 结 语

采用可靠性框图法对轨道客车司机操作台进行可靠性分析,并根据模型计算出失效率、平均无故障时间,进而得到可靠性。在已有定性分析方法的基础上进一步做定量分析,找出了影响司机操作台可靠性的关键因素,并提出了合理的改进建议,得到了更精确、可信的分析结果,为轨道客车司机操作台的设计、维修提供重要参考。

参考文献:

- [1] 朱明星,钱辰辰,段晓波,等.城市轨道交通供电系统电能质量限值计算方法[J].电力建设,2014,35(9):39-45.
- [2] 陈智华.地铁车辆国产化显示器的改进措施[J].机车电传动,2012(4):64-65.
- [3] 裴剑,徐文彬.地铁列车司机控制器故障分析及检修策略[J].大连交通大学学报,2015,36(3):116-118.
- [4] 何国浩.广州地铁三号线司机控制器故障浅析及架大修策略[J].现代制造,2016(12):154-155.
- [5] 景建成.上海轨道交通牵引直流开关跳闸故障分析[J].城市轨道交通研究,2009,12(6):44-46.
- [6] 孙强.信息安全风险评估模型的定性与定量对比研究[J].微电子学与计算机,2010,27(6):92-96.
- [7] 赵靖,张汝波,顾国昌.考虑故障相关的软件可靠性增长模型研究[J].计算机学报,2007,30(10):1713-1720.
- [8] 张沛超,高翔.全数字化保护系统的可靠性及元件重要度分析[J].中国电机工程学报,2008,28(1):77-82.
- [9] 刘建强,郭怀龙,社会谦,等.CRH3型动车组辅助供电系统可靠性研究[J].铁道学报,2015(11):44-51.
- [10] 安金霞,朱纪洪,王国庆,等.多冗余度飞控计算机系统分级组合可靠性建模方法[J].航空学报,2010,31(2):301-309.

- [11] 卢彦玲,李新娥,王亚军.可靠性框图在电子测压器可靠性分析中的应用[J].探测与控制学报,2013,35(4):44-48.
- [12] 郝鑫刚,李新娥,崔春生,等.油井压力测试系统可靠性框图分析[J].传感技术学报,2016,29(1):64-68.
- [13] 信息产业部电子第五研究所数据中心.GJB/Z 299C-2006《电子设备可靠性预计手册》GJB/Z 108A-2006《电子设备非工作状态可靠性预计手册》正式发布施行[J].质量与可靠性,2007(2):23-23.
- [14] 张沛超,高翔.全数字化保护系统的可靠性及元件重要度分析[J].中国电机工程学报,2008,28(1):77-82.
- [15] 朱辉,刘祖清.速动开关可靠性试验研究[J].铁道技术监督,2015,43(11):20-22.
- [16] 朱辉,刘祖清.司机控制器可靠性试验装置[J].铁道技术监督,2014,42(8):19-22.
- [17] 陈德钧.地铁车辆司机操纵台人机界面工效学设计方法[D].北京:北京交通大学,2014.
- [18] 邓力铭.动车组故障模式统计分析[D].北京:中国铁道科学研究院,2015.
- [19] 隋元昆.轨道客车司机操作台可靠性设计[D].长春:长春工业大学,2018.