

基于故障树的轨道交通车载电源可靠性分析

李 恒¹, 柴晓冬¹, 徐纪康¹, 王 伟², 陆鑫源³

(1. 上海工程技术大学 城市轨道交通学院, 上海 201620; 2. 上海轨道交通建设管理中心, 上海 200000; 3. 上海轨道交通维护保障公司通号分公司, 上海 200000)

摘要: 文章介绍了城市轨道交通车载电源的组成、功能和故障树分析法的理论基础; 在分析车载电源功能的基础上, 针对车载电源可靠性研究的不全面, 提出运用故障树分析方法对车载电源的可靠性进行分析和研究; 通过建立电源失效故障树, 对导致电源失效的故障进行了定性以及定量分析, 定性分析找出了导致城市轨道交通车载电源失效的所有故障组合; 定量分析找出了容易导致车载电源失效的故障类型, 根据定性定量分析得到的结果, 为城市轨道交通车载电源的可靠度计算方法提供了新的思路, 并提出了有效提车载信号电源可靠性的相应建议, 为车载电源的维修以及检测提供科学依据。

关键词: 城市轨道交通; 车载电源; 可靠性; 故障树

Reliability Analysis of Urban Rail Transit Vehicle Power Supply Based on Fault Tree

Li Heng¹, Chai Xiaodong¹, Xu Jikang¹, Wang Wei², Lu Xinyuan³

(1. Shanghai University of Engineering Technology, Shanghai 201620, China;

2. Shanghai Urban Rail Transit Construction and Management Center, Shanghai 200000, China;

3. Shanghai Urban Rail Transit Maintenance and Supply Co., Shanghai 200000, China)

Abstract: This paper mainly discusses the theoretical foundation for composition, function and fault tree analysis of urban rail transit vehicle power supply. On the basis of analyzing the function of vehicle power supply, aiming at the incompleteness of vehicle power supply, the fault tree analysis used for analyzing and researching the reliability of vehicle power supply is proposed. Through building power fail fault tree, the fault that cause power fail is analyzed qualitatively and quantitatively. All fault combination that lead to urban rail transit vehicle power supply fail are found by qualitative analysis, while fail types that easy cause vehicle power supply fail found by quantitative analysis. Combining the results get from qualitative and quantitative analysis, this paper opens a new approach to calculate urban rail transit vehicle power supply reliably, and puts forward corresponding suggestions to effectively improve reliable vehicle signal power supply, further to provide scientific basis for maintenance and detection of vehicle power supply.

Keywords: urban rail transit; vehicle power supply; reliability; fault tree

0 引言

轨道交通是否安全可靠意义重大, 作为是当前公共交通之一, 因其高速、容量大等特点受到广泛使用^[1]。信号系统作为列车的指挥官, 保证了列车安全可靠地运行, 车载电源的正常供电又保证了信号系统的正常工作。虽然车载的电源设备在出厂前均接受过严格的测试, 但是往往各个单板隶属于不同的设备系统中, 来自于不同的设备供应商, 在单个测试时未必进行过全面周详的测试与估量。同

时, 在安装的过程中由于受到空间的限制, 不同的板卡与连接线相互堆叠, 增大了电磁干扰的几率。也使得不同的信号在辐射过程中产生叠加, 从而产生不可预计的谐波分量。

这就是在工作环境下频频出现电磁干扰而丢包, 产生高误码, 而拆解下来测试又恢复正常的“怪现象”的原因。由于电气设备种类繁多, 且不同电器元件的电磁兼容性有所不同, 却缺乏一个统一的标准衡量和比较, 从而导致车载电源工作质量受到不同程度的影响。进一步的会导致列车无法安全运行, 对乘客的安全带来了极大的隐患。

关于电源可靠性的研究一直都是电源研究的核心方向。杨中书基于故障危害度对飞机电源系统进行可靠性评估^[2], 一是建立可靠性评估模型, 考虑各故障样本对飞机电源系统供电可靠性危害度影响, 二是根据故障对电源系统的危害大小将其划分成不同的等级, 其指标主要包括安全、性能、任务以及维修等; 三是结合故障的失效机理, 对对应的分布模型进行确立; 四是对整个系统的可靠性指标进行评估, 在这里笔者主要用到分布计算和二次分布等算法。

收稿日期: 2018-11-03; 修回日期: 2018-12-06。

基金项目: 国家自然科学基金项目(51478258); 上海市科委重点支撑项目(No. 18030501300); 车载信号系统电源质量提升的对策研究(JS-BZ16R006)。

作者简介: 李 恒(1992-), 男, 安徽砀山县人, 硕士研究生, 主要从事交通通信与智能信息处理方向的研究。

柴晓冬(1962-), 男, 安徽黄山市人, 教授, 硕士研究生导师, 主要从事智能信息处理, 包括光信息处理, 信号处理和多媒体通信中的图像加密方向的研究。

曹涛, 吴善勇, 方钧华采用 Isograph 公司的可靠性工作平台 RWB 对飞机电源系统可靠性进行分析研究^[3]。通过分析研究, 确定在系统设计过程中引起系统故障的各种因素(包括硬件、软件、环境、人为因素等), 及其逻辑因果关系, 还得到引发故障出现一切可能的因素。与此同时, 为进一步确保系统的性能与安全性提升, 采用定性与定量结合方式, 发现了系统设计不足指出, 并进行了改正。吕宏, 袁海文, 张莉, 袁海滨通过针对航空电源系统可靠性分析的需要, 研究现有典型系统的结构特点, 提出基于模式重要度的系统可靠性估计方法^[4]。

对于电源可靠性的研究需要掌握其中的逻辑性, 目前关于城市轨道交通车载电源可靠性的研究还属于空白。因此本文提出基于故障树分析法研究城市轨道交通车载电源的可靠性。通过故障树模型的建立分析城市轨道交通车载电源可靠性的影响因素, 进而达到提高可靠性的目的。

1 基于故障树的可靠性分析理论

故障树分析(Fault Tree Analysis, 简称 FTA)又称事故树分析, 是安全系统工程中最重要的分析方法。事故树分析从一个可能的事故开始, 自上而下、一层层的寻找顶事件的直接原因和间接原因事件, 直到基本原因事件, 并用逻辑图把这些事件之间的逻辑关系表达出来^[5]。

故障树分析法的基本步骤如下:

1) 对系统和系统故障的概念进行分析, 然后对系统故障事件进行明确, 即“顶事件”;

2) 建造故障树;

3) 进行定性与定量分析。

(1) 故障树定性分析。

这种方法的最终目标就是通过对顶事件进行分析, 从而找出导致其出现的原因事件及其组合^[6]。一般情况下, 在对其进行定性分析时, 主要对下行法进行使用, 从而对计算出最小割集来。同时也能够对最小割集的改进算法进行应用, 主要先从故障树的叶节点入手, 将“或”门下基本事件转变成并联方式, 将“与”门下基本事件转变成串联方式, 由下一层次上升到上一层次, 最后对顶事件进行分析。通过这种系统转变方式, 我们能够轻易地计算出最小割集。如果我们已经得出全部最小割集中的基本事件出现几率, 因此可以计算出顶事件的发生概率。

(2) 故障树定量分析。

故障树定量分析指的是在所有底事件是单独存在的, 并且已经计算出其出现几率的前提下, 根据上述定性分析的计算数据, 从而对故障树模型的有关可靠性指标进行准确计算。

设底事件 x_1, x_2, \dots, x_n , 发生概率为 q_1, q_2, \dots, q_n , 其中 n 为底事件个数。则最小割集失效概率为:

$$p(x_1 \cap x_2 \dots \cap x_m) = \prod_{i=1}^m q_i \quad (1)$$

式中, m 为最小割集阶数。

顶事件发生的概率为:

$$P(T) = P(y_1 \cap y_2 \dots \cap y_k) \quad (2)$$

其中: $P(T)$ 、 y_i 、 k 分别为顶事件的发生概率、最小割集、最小割集个数。当最小割集为独立事件时,

$$P(T) = 1 - \prod_{i=1}^k (1 - P_i) \quad (3)$$

在以上公式中, 某个最小割集的出现概率可 P_i 进行表示, 而失效率可用 $P(T)$ 进行表示。

结合已经得出的各个部件的失效率, 通过公式(3)我们能够对系统的失效率 $P(T)$ 进行准确运算。然后可对系统平均无故障运行时间进行运算:

$$MTTF = \frac{1}{P(T)} \quad (4)$$

通过上述分析, 系统的薄弱环节重要度主要包括两大部分: 第一是结构重要度; 第二是概率重要度^[7]。

结构重要度: 指的是基本事件的自身结构在顶事件出现过程中所起到的重要程度, 这和其自身的出现几率没有关系, 我们可用下述公式对其进行表示:

$$J_i = 1 - \prod_{x_i \in y_j} \left(1 - \frac{1}{2^{n-1}}\right) \quad (5)$$

式中, x_i 为基本事件; J_i 为结构重要度数值; y_j 为 x_i 所在最小割集; n_j 为割集的阶数

概率重要度: 当第 i 个部件失效率的数值出现变动时, 从而导致整个系统的失效率出现变化幅度的大小, 公式表达为:

$$I_i = \frac{\partial P(T)}{\partial q_i} \quad (6)$$

式中, I_i 为第 i 个事件的概率重要度; $P(T)$ 为顶事件的失效概率; q_i 为基本事件的出现概率。

2 车载电源失效表现形式

2.1 上海申通地铁某线 CBTC 系统电源板结构及功能

车载信号电源是由多种不同型号的电源板组合在一起构成的, 安装在车辆电源柜内, 它们共同担负着车载信号系统的正常供电的任务, 将从受电弓转换得到的 DC110V 电源转换成不同数值的直流电压供给车在控制器的相关负载, 确保了车辆的正常运行, 如图 1 所示。常见的电源板卡有 MPU-PSU, PCM-PSU 等。不同型号的板卡具有不同的功能, 例如 MPU-PSU 主要功能是将 DC110V 转化成两路 DC5V 的电压, 一路给 Pentium 板使用, 另一路给 CAN 电路使用。

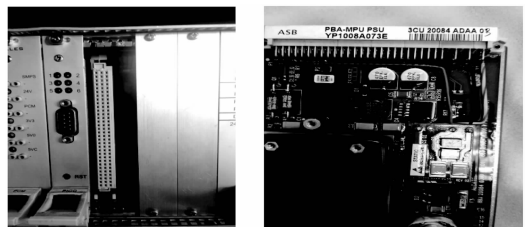


图 1 电源板实物图

城市轨道交通车载电源板卡以“3取2”的冗余方式确

保设备工作安全。正常状态下, 每种电源板包含的三块相同的电源板卡会产生相同的指令给相应的设备, 每个处理器输出的同时与其他两个处理器的输出进行比较, 最终以两路的形式进行输出, 如果其中一个处理器输出与其他两个输出不同时, 其将被关闭, 并且该电源板将按照“2 取 2”的模式继续运行。如果所有三块电源板的处理器输出都不同, 则整个设备将被关闭, 这将导致车载电源的故障, 并最终导致车载控制器的死机。

冗余的作用如其功能所述, 当电源板设备中的信息指令输出出现不一致, 或电源板自身硬件问题, 导致其中一块电源板的微处理器所输出的信息指令与其他两个微处理器不一致, 此时, 电源板卡中的隔离板就会将指令不一致的处理器通道进行断电, 使整个电源板的工作降级成“2 取 2”的工作模式。这种设计方式可以确保设备安全的同时, 也能够降低故障发生的概率, 维护人员可以通过 ATS 数据或夜间日检工作发现冗余丧失故障并及时进行处理, 不对正线造成影响。

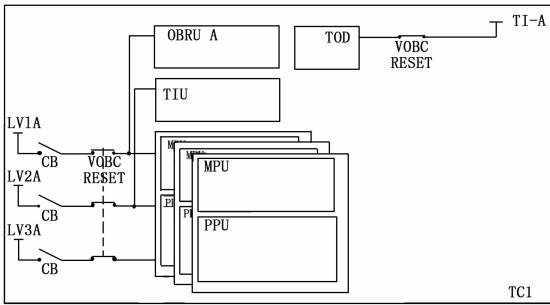


图 2 电源板结构图

2.2 车载电源失效表现形式

电源失效特征分析就是分析车载信号电源失效的主要表现形式并分析每一部分的失效度和各部分间的相互关系。目前, 申通地铁车载班组数据统计的总结得到车载电源失效主要表现在数据日常报警、车载控制器 (VOBC) 自检功能故障、车载备份功能丧失、车载电源板卡故障。

车载电源的可靠度可以定义为: 在一定的时间和规定的工况下, 车载电源能否正常供电。这关系着信号系统能否正常工作。而目前还没有预测车载电源的可靠度的方法, 借鉴申通地铁以往的经验, 可以从负载的特征表现来预测车载电源的可靠度。

3 车载电源故障树分析

3.1 故障树模型的建立

基于以上车载电源失效表现形式, 建立车载电源故障树模型, 设定顶事件为“车载电源故障”, 将电源的主要失效形式作为中间事件建立车载电源故障树模型如下图 3 所示。

图 3 故障树中相应事件的标注, 如表 1 所示。

3.2 定性分析

为了能够对城市轨道交通车载电源的可靠性进行深入的研究、剖析, 结合故障树模型, 采用最小割集理论, 对

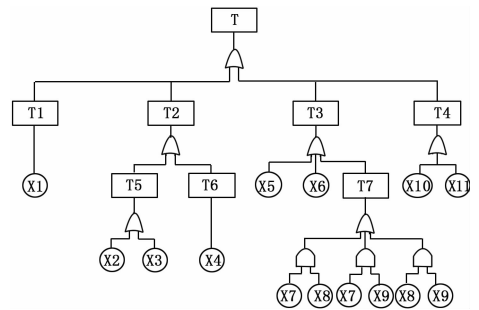


图 3 车载电源故障树模型图

表 1 故障树各层级事件及含义

故障层级	故障描述	编号	故障层级	故障描述	编号	
顶事件	车载电源故障	T	底事件	MPU-PSU 宕机	X2	
中间事件	数据日常报警	T1		PCM-PSU 宕机	X3	
	VOBC 自检功能故障	T2		PCM 检测失败	X4	
	备份功能故障	T3		MPU 备份端口故障	X5	
	一路板卡故障	T4		MPU 备件故障	X6	
	VOBC 启动故障	T5		MPU1 备份故障	X7	
	VOBC 运行故障	T6		MPU2 备份故障	X8	
	冗余丧失	T7		MPU3 备份故障	X9	
				MPU 一路板卡故障	X10	
	底事件	电磁环境干扰	X1		PCM 电源 OK 故障	X11

图 2 开展了深入的研究, 通过利用布尔代数化简法, 实现对其的简化, 其中和用来代表逻辑或门, 乘用来代表逻辑与门, 化简如下:

$$T = T1 + T2 + T3 + T4 + T5 = X1 + X2 + X3 + X4 + X5 + X6 + (X7 \times X8) + (X7 \times X9) + (X8 \times X9) + X10 + X11$$

所以可得该故障树模型的最小割集为 {X1}、{X2}、{X3}、{X4}、{X5}、{X6}、{X7, X8}、{X7, X9}、{X8, X9}、{X10}、{X11}。

3.3 定量分析

根据上海申通地铁车载班组大量调研数据以及维修管理系统中同类故障概率数据平均计算得到基本事件的发生概率, 如表 2。

(1) 车载电源可靠度计算。

将定性分析所得车载电源故障树模型最小割集与基本事件发生的概率代入公式 (1)、(2)、(3) 可得车载电源的失效概率为 $P(T) = 0.1066$, 即失效度为 0.1066, 由公

式 (4) 可得车载电源的可靠度为 0.893 4, 平均无故障时间 (MTTF) 为 9.4 天。

表 2 某典型产品测试数据

基本事件	事件符号	故障率	基本事件	事件符号	故障率
电磁环境干扰	X1	0.01227	MPU1 备份故障	X7	0.01833
MPU-PSU 宕机	X2	0.00167	MPU2 备份故障	X8	0.00833
PCM-PSU 宕机	X3	0.00114	MPU3 备份故障	X9	0.01833
PCM 检测失败	X4	0.05001	MPU 一路板卡故障	X10	0.01666
MPU 备份端口故障	X5	0.005	PCM 电源 OK 故障	X11	0.01591
MPU 备件故障	X6	0.00334			

(2) 基本事件重要度计算。

以上得出了 11 个最小割集, 再将其代入公式 (3) 中, 从而准确计算出这些基本事件结构重要度的数值, 同时还对其重新进行了编排, 如表 3 所示。

表 3 故障树基本事件相对于顶事件的结构重要度

序号	基本事件	结构重要度
1	X1, X2, …, X6, X10, X11	1
2	X7, X8, X9	0.25

在计算过程中, 使用最小割集法对其结构重要度进行判断, 同时还对其排列次序进行了重新排列, 从基本事件的重要度为 1 表明, 不管其发生概率的大小, 只要发生, 就会导致顶事件的发生, 即车载电源故障, 因而要尽量降低这些事件的发生概率。

通过公式 (6), 能够准确得出概率重要度的数值。之后再以上数值带入到该公式中, 就能够得出基本事件的概率重要度, 如表 4 所示, 其中, PCM 检测失败对顶事件概率影响最大, PCM 宕机对顶事件概率影响最小。

表 4 故障树各基本事件相对于顶事件的概率重要度

基本事件	事件符号	概率重要度
电磁环境干扰	X1	1
MPU-PSU 宕机	X2	1
PCM-PSU 宕机	X3	1
PCM 检测失败	X4	1
MPU 备份端口故障	X5	1
MPU 备件故障	X6	1
MPU1 备份故障	X7	0.02666
MPU2 备份故障	X8	0.03666
MPU3 备份故障	X9	0.02666
MPU 一路板卡故障	X10	1
PCM 电源 OK 故障	X11	1

4 结论

借助故障树方法来分析, 需要进行以下三步: 1) 基于分析和调研之上确立车载电源失效故障树; 2) 采用定性与定量相结合的方法对上述故障树进行计算; 3) 对结果进行分析, 得出下列建议, 给今后车载电源维修带来一定的借鉴。

(1) PCM 检测失败概率的变化对顶事件概率变化影响最大, PCM 检测失败直接导致 VOBC 在运行过程中自检故障, 对列车的安全运行影响很大, 因此在日常维护中应将重心放在 PCM 检测上。

(2) 电磁环境干扰、MPU-PSU 宕机、PCM-PSU 宕机、PCM 检测失败、MPU 备份端口故障、MPU 备件故障、MPU 一路板卡故障、PCM 电源 OK 故障。这些基本事件的结构重要度为 1, 说明这些事件一旦发生便会导致顶事件发生。应该加强对于这些部件的检测与维护。

(3) 经过计算, 城市轨道交通车载电源的平均无故障工作时间为 9.4 天, 因此车载班组应该建议对于车载电源的检测周期为 9 天, 这样可以保证电源无故障工作。

(4) 目前, 关于城市轨道交通车载电源的研究仍有很大的局限性。板卡隶属不同厂商缺乏统一标准, 车载的电磁环境复杂, 干扰较为严重, 以及板卡内部导致故障的原因都会是以后车载电源研究工作的重点。

参考文献:

[1] 郝 裕. 城市轨道交通系统的电磁兼容 (EMC) 问题 [J]. 地铁与轻轨, 2003, (3): 46-48.

[2] 杨中书. 基于故障危害度的飞机电源系统可靠性评估 [J]. 通信电源技术, 2016, 33 (1): 12-14.

[3] 曹 涛. 基于故障树的飞机电源系统可靠性分析研究 [A]. 江苏省航空航天学会、上海市宇航学会、上海市航空学会、浙江省航空航天学会. 第九届长三角科技论坛——航空航天科技创新与长三角经济转型发展分论坛论文集 [C]. 江苏省航空航天学会、上海市宇航学会、上海市航空学会、浙江省航空航天学会, 2012.

[4] 吕 弘, 袁海文, 张 莉, 等. 基于模式重要度的航空电源系统可靠性估计 [J]. 航空学报, 2010, 31 (3): 608-613.

[5] 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 (1): 56-59.

[6] 赵 琼, 王思华, 尚方宁. 基于故障树分析法的接触网可靠性分析 [J]. 铁道标准设计, 2014, 58 (1): 105-109.

[7] 钟明勋. 故障树分析方法及其应用 [J]. 兵器材料科学与工程, 1986 (4): 26-35.

[8] 王 鹏, 吴 亮. 车载控制器设备故障处理浅析及维护建议 [J]. 铁道通信信号, 2012, 48 (8): 39-41.

[9] 张 伟. 航天电源技术及标准体系探讨 [J]. 国防技术基础, 2009 (6): 10-14.

[10] 夏远飞. 基于故障危害度的飞机电源系统可靠性研究 [J]. 中国测试, 2011, 37 (5): 18-20.

[11] 王 磊. 航空 DC-DC 多路电源的设计与研究 [D]. 西安: 西京学院, 2016.

[12] 陶勇剑, 董德存, 任 鹏. 基于故障树的轨道交通通信系统可靠性研究 [J]. 华东交通大学学报, 2007 (2): 48-51.