

文章编号: 1005-0523(2007)02-0048-04

基于故障树的轨道交通通信系统可靠性研究

陶勇剑, 董德存, 任 鹏

(同济大学 交通运输工程学院, 上海 201804)

摘要:介绍了轨道交通通信系统的基本组成部分和故障树分析法的理论基础,在分析通信系统功能框图的基础上,对通信系统进行可靠性研究.构建了轨道交通通信系统故障树,采用最小割集分析法进行了故障树定性分析,并描述求解通信系统可靠度方法.应用故障树分析方法,对提高轨道交通通信系统的可靠度很有帮助.

关键词:可靠性;轨道交通;通信系统;最小割集;可靠性灵敏度;故障树分析

中图分类号:U213.2

文献标识码:A

0 引言

轨道交通作为高速、大容量公共交通工具,其安全、可靠性直接关系到广大乘客的生命安全.为了保证轨道交通系统安全运行,可靠的通信系统是必不可少的前提条件.轨道交通通信系统作为一个数字通信系统主要为各子系统提供传送各类语音、数据、视频等服务.由于通信系统对于轨道交通系统安全运行至关重要,所以对通信系统的研究除了研究其传输介质、通信速度、拓扑结构和服务品质外,对通信系统可靠性的研究也是一个重要方面.

本文以轨道交通通信系统的功能性框图为基础,采用故障树分析法(Fault Tree Analysis, FTA)对其进行系统可靠性分析.利用故障树寻找潜在的故障或进行故障诊断,预测系统故障发生的概率.文章结构安排如下:第一部分对轨道交通通信系统的功能性框图和组成部分作了简单介绍;第二部分阐述了轨道交通通信系统可靠性研究的理论基础;第三部分是轨道交通通信系统的失效分析;文章最后部分给出本文的结语.

1 轨道交通通信系统组成

轨道交通通信系统作为一个数字通信系统,其功能性框图如图1所示,其基本组成部分如下^[3]:

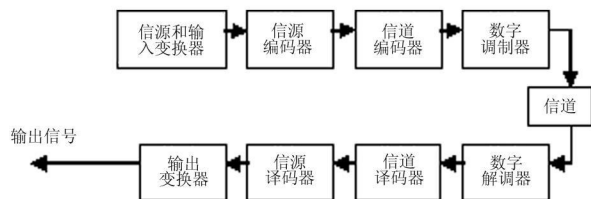


图1 数字通信系统的基本组成

- 信源输出可以是模拟信号,也可以是数字信号;
- 信源编码器将信源输出变换成二进制数字序列,使其很少产生或不产生冗余;
- 信道编码器的目的是在二进制信息序列中以受控的方式引入一些冗余,以便于在接收机中用来克服信号在信道中传输时所遭受的噪声和干扰的影响;
- 数字调制器是通信信道的接口,数字调制的主要目的是将二进制信息序列映射成信号波形;
- 通信信道是用来将发送机的信号发送给接收机的物理媒质;
- 数字解调器对受到信道恶化的发送波形进行

处理,并将该波形还原成一个数的序列,该序列表示发送数据符号的估计值;

- 信道译码器根据信道编码器所用的关于码的知识及接收数据所含的冗余度重构初始的信息序列;

- 信源译码器从信道译码器接收其输出序列,并根据所采用的信源编码方法的有关知识重构由信源发出的原始信号;

清楚了轨道交通通信系统的功能框图和基本组成部分,就可以在此基础上采用故障树分析方法(FTA)对其进行系统可靠性研究.

2 轨道交通通信系统可靠性研究的理论基础

1) 系统可靠性的基本概念

系统可靠性理论是进行故障树分析的基础,它的基本概念包括可靠性与可靠度及可靠函数、故障率、平均故障间隔时间(Mean Time Between Failure, MTBF)、可用性的概念^[1,2].具体阐述如下:

- 系统可靠性表示系统在规定的条件下和规定的时间内完成规定功能的能力;系统可靠度是指系统在规定的条件下和规定的时间内,完成规定功能的概率,表示为 $R(t) = P(\xi > t)$,其中 $R(t)$ ——可靠度函数, ξ ——产生故障前工作时间, t ——规定的时间;

- 故障率是指工作到某时刻尚未发生故障的产品,在该时刻后单位时间内发生故障的概率,也称失效率,记为 $\lambda(t)$;

- 对于不可修复系统,平均故障前时间(Mean Time To Failure, MTTF)为系统故障时间这一随机变量的数学期望,表示为: $MTTF = \int_0^{\infty} tf(t) dt = \int_0^{\infty} R(t) dt$;对于可修复系统,在使用过程中发生了 N_0 次故障,修复后重新投入使用,测得每次工作持续时间为 t_1, t_2, \dots, t_{N_0} ,则平均故障间隔时间(MTBF)记为

$$MTBF = \frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^{N_0} t_i = \frac{T}{N_0}, T \text{ 为系统总的工作时间};$$

- 可用性(Availability)也叫有效性或利用率,是可维修产品在某时刻具有或维持规定功能的能力,

记为 $A = \frac{MTBF}{MTBF + MTR}$, MTR 为系统平均维修时间,即 Mean Time To Repair;

2) 故障树分析方法

故障树分析法(FTA)是在系统设计过程中,通过对可能造成系统故障的各种因素(包括硬件、软

件、环境)进行分析,画出逻辑框图(即故障树),并由此确定系统故障原因的各种可能组合方式及其发生概率,从而计算系统故障概率,采取相应的纠正措施,以提高系统可靠性的一种设计分析方法^[4,5,6].故障树以图形化的方式表示了在一个系统内故障或其它事件之间的交互关系.在故障树中,底事件(basic event)通过一些逻辑符号(如与门和或门)连接到一个或多个顶事件(top event).顶事件一般指危及系统的事件或是不希望发生的系统故障.底事件通常指部件故障或者是人员的错误操作.故障树分析法的基本步骤如下:

- 定义系统和系统故障,确定系统故障事件,即“顶事件”;

- 建造故障树;

- 进行定性与定量分析;

故障树定性分析的目的在于寻找导致顶事件发生的原因事件及原因事件的组合,即故障树叶节点的组合.通常采用下行法求最小割集来进行定性分析,也可以采用最小割集的改进算法^[2],即从故障树的叶节点开始,把‘或’门下基本事件转换为并联,把‘与’门下基本事件转换为串联,层层逐级向上,直到顶事件.转换后得到串并联系统或并串联系统,可以很容易地求出最小割集.若求得的所有最小割集包含的基本事件发生概率已知,则可得到顶事件发生的概率,这也就是故障树的定量分析.

3 轨道交通通信系统失效分析

1) 轨道交通通信系统的失效模型

轨道交通通信系统失效分析就是在通信系统功能框图的基础上,得出系统组成部分失效与系统失效的关系,并用逻辑与门(AND)或逻辑或门(OR)将由组成部分失效导致系统失效的逻辑关系表示出来,这样就可以由底部向上依次构造故障树,得到系统总失效概率,即“顶事件”.轨道交通通信系统功能框图有九个基本组成部分,它们之间是串联关系,即任何一个组成部分失效都会造成系统失效.另外,通信电源对于整个通信系统也是至关重要的,通信电源失效会直接导致整个系统失效.所以,轨道交通通信系统的故障树如图2所示.

2) 轨道交通通信系统故障树分析

在轨道交通通信系统功能框图的基础上,得出了通信系统的故障树.由于通信系统各基本组成部分是串联结构,所以任何组成部分故障都会直接导

致通信系统故障. 继续分析造成系统基本组成部分的原因, 就得到了系统故障树的叶节点, 即系统故障树的底事件, 用 X_i 分别表示系统故障树的叶节点. 由于解调器和译码器工作性能好坏的一个度量是译码序列中发生差错的频度, 更准确地说, 在译码器输出端的平均比特错误概率是解调器—译码器组合性能的一个度量; 所以把解调差错概率大、译码差错概率大、信源译码失真大作为故障树的叶节点 X_{12} 、

X_{14} 、 X_{16} ; X_{12} 、 X_{14} 、 X_{16} 发生也会造成通信故障. 根据通信系统故障树结构, 从顶事件开始, 采用下行法, 逐层向下寻查, 可找出最小割集. 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. 基于最小割集的下行求解方法, 可知轨道交通通信系统每个底事件 X_i 都是最小割集, 该故障树共有十七个最小割集.

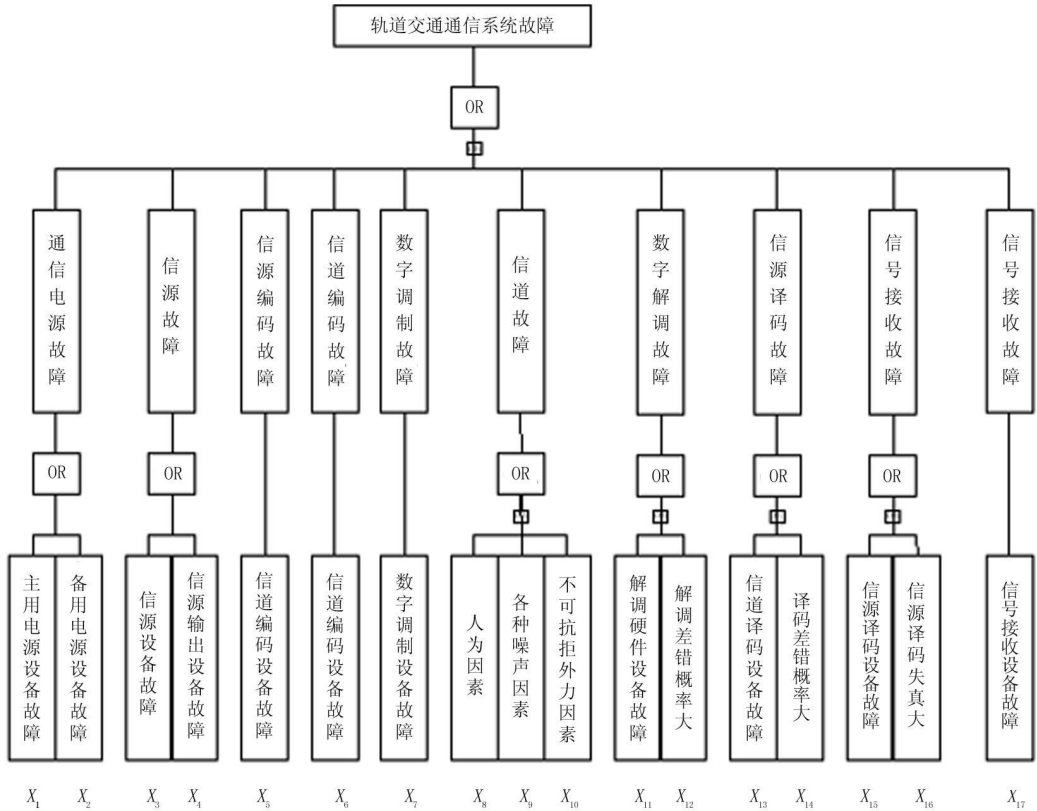


图2 轨道交通通信系统故障树

求得轨道交通通信系统故障树的所有最小割集 X_1, X_2, \dots, X_{17} 后, 则顶事件发生概率为: $P(T) = P(\bigcup_{i=1}^{17} X_i)$, 若两两相斥, $P(T) = \sum_{i=1}^{17} P(X_i)$; 否则, $P(T) = P(X_1) + P(X_1 X_2) + P(X_1 X_2 X_3) + \dots + P(X_1 X_2 X_3 \dots X_{16} X_{17})$.

欲求底事件(X_i)的发生概率 $P(X_i)$, 可以用 X_i 作为新的故障树的顶事件, 重新构建新的故障树, 实现故障树级联. 以底事件 X_1 ——主用电源设备故障为例, 把 X_1 ——主用电源设备故障作为新的故障树的顶事件, 画出主用电源设备系统的硬件框图, 得出系统硬件设备组成. 根据厂商提供的出厂硬件设备可靠性数据——故障率, 就可以计算出主用电源设备发生故障的概率; 如果没有出厂硬件设备可靠性数据, 可以通过故障统计方法估计设备的故障率. 通

过故障树级联方法, 可以得到所有 X_i 的故障率 λ_i , 即 $P(X_i)$, 则顶事件发生概率 $P(T)$ 可得. 由于系统可靠度 $R_s = 1 - P(T)$, 所以可以得出轨道交通通信系统的可靠度, 这也就是系统故障树的定量分析.

系统可靠度 R_s 可以表示成 X_i 的函数, 即 $R_s = F(X_1, X_2, \dots, X_{17})$. 将 R_s 对 X_i 求偏导 $\frac{\partial R_s}{\partial X_i}$, 得到的可靠性灵敏度. 计算单元的可靠性灵敏度的目的在于忽略其它系统之外的因素, 求解某分系统单元的可靠性对于整个系统可靠性的影响程度, 可靠性灵敏度值越大的系统单元对整个系统可靠性影响程度越大. 所以, 可通过增加可靠性灵敏度大的系统单元的可靠度来增加整个系统的可靠度.

4 结语

系统可靠性研究的目的决不仅仅是评价系统及其组成单元的可靠性水平,更重要的是提高系统的可靠性水平.采用故障树分析法可以很快地找出影响轨道交通通信系统可靠性的因素,并找出系统可靠性最薄弱的环节;通过冗余技术改善系统薄弱环节的可靠性,提高整个通信系统的可靠度,从而保障轨道交通运行安全.系统可靠性研究也便于系统的故障诊断和维护,通过对不同方案的比较分析,有利于新建通信系统的可靠性设计.总之,故障树分析法在轨道交通系统中应用,对轨道交通的安全运行大有益处.

参考文献:

- [1]曾声奎.系统可靠性设计分析教程[M].北京:北京航空航天大学出版社,2001.
- [2]李海泉,李刚.系统可靠性分析与设计[M].北京:科学出版社,2003.
- [3]John G. Proakis. Digital Communication (4th edition) [M]. USA: The McGraw-Hill Companies, 2001.
- [4]Y. Dutuit, A. Rauzy. Approximate estimation of system reliability via fault trees [J]. Reliability Engineering and System Safety 2005, (87): 163-172.
- [5]Marianna Lendvay, Attila L. Bencsik. Quality Assurance for Electronic Systems Using Fault Tree Analysis? Intelligent Engineering Systems. 2005. INES '05. Proceedings. 2005 IEEE International Conference on. 2005-9; 16-19, 163-168.
- [6]Barua, A., Sinha, P., Khorasani, K., Tafazoli, S. Control Applications. 2005. CCA 2005. @ roceedings of 2005 IEEE Conference on. 2005-8; 28-31, 1467-1472.

Research on Reliability of Railway Communication System Based on Fault Tree

TAO Yong-jian, DONG De-cun, REN Peng

(College of Traffic and Transportation Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: This paper describes components of communication system of rail transportation and basic concept of Fault Tree Analysis (FTA) method. After analyzing the functional framework, research on communication system is implemented and Fault Tree of communication system is established. The main factors affecting the failure of communication system can be determined by qualitative analysis in which the minimum cut set analysis (MCSA) is employed, meanwhile, quantitative way is also presented. According the outcome of reliability research, Fault Tree Analysis (FTA) method is very efficient for improving reliability of communication system.

Key words: reliability; railway transportation; communication system; minimum cut set; reliability sensitivity; fault tree analysis