

试  
验  
检  
测基于Isograph的故障树分析技术  
在轨道客车中的应用

张丽娜, 武 彤, 刘金安, 王金田

(长春轨道客车股份有限公司 技术中心, 吉林 长春 130062)



作者简介: 张丽娜 (1983-), 女, 工程师, 从事轨道车辆可靠性研究工作。

**摘 要:** 以列车在正线运行时客室门意外打开为顶事件, 利用 Isograph 软件建立故障树和进行故障树分析, 详细说明了以 Isograph 软件为基础的故障树分析过程和方法, 并对故障树分析结果进行了分析, 说明了故障树分析技术在轨道客车安全性分析、系统可靠性分析及风险评估中的应用价值。

**关键词:** 轨道客车; 故障树分析; 可靠性分析; 最小割集; 重要度

**中图分类号:** U292.91; O213.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-128X(2011)06-0038-03

## Application of Fault Tree Analysis Technique Based on Isograph to Railway Vehicles

ZHANG Li-na, WU Tong, LIU Jin-an, WANG Jin-tian

(Technical Center, Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., Changchun, Jilin 130062, China)

**Abstract:** By taking the saloon door unexpectedly opening of the train on the main line as the top event, the fault tree based on Isograph was established and the fault tree analysis was carried out. Method and process of the fault tree analysis based on Isograph was described in detail and the result of the fault tree analysis was discussed, which validated the application value of fault tree analysis in the area of safety analysis, reliability analysis and risk assessment for the railway vehicles.

**Key words:** railway vehicles; FTA; reliability analysis; minimum cut; importance

## 0 引言

近年来, 我国轨道交通系统和设备所使用的技术越来越先进、其内部结构越来越复杂、自动化程度越来越高, 因此, 对于列车运行的安全性和可靠性也越来越受到人们的重视。而故障树分析(Fault Tree Analysis, FTA)则是对系统进行安全性分析、风险评估以及可靠性工程设计的最好的演绎手段。FTA 技术自 60 年代初诞生至今经过许多先进国家的工程师以及可靠性方面的专家的大力提倡和发展, 特别是近年来, 其理论研究成果在工程上得到了广泛应用, 使它成为目前国际上公认的一种简单、有效的可靠性分析和故障诊断方法。它是指导系统优化设计、运行维修和薄弱环节分析的有力工具。Isograph 可靠性软件是英国 Isograph 公司的一系列软件产品, 广泛应用于航空、航天、船舶、兵器、电子、能源、电力、铁路、医药、化工、教育等行业。FaultTree+ 是 Isograph 公司在 1986 年开发的故障树分析工具, 软件在建树时可以迅速检索、定

位逻辑门或事件, 可以对图形和数据进行动态管理, 对故障树进行精确计算和简化计算, 并提供多种优化计算功能。

## 1 故障树分析技术

故障树分析一般包含下面几个步骤: 选择顶事件、建立故障树、故障树的定性分析、故障树的定量分析。

## 1.1 选择顶事件

建立故障树首先要确定顶事件。顶事件的选取根据分析的目的不同, 可分别考虑对系统技术性能、经济性、可靠性和安全性影响显著的故障事件。在开展轨道车辆可靠性、安全性分析时, 一般选择风险等级较高的风险事件为顶事件, 如列车制动能力丧失、列车运行时脱轨、列车运行时门意外打开等对列车和乘客安全有重大影响的事件。

## 1.2 建立故障树

在建立故障树之前应熟悉系统, 明确分析目的, 确定故障判据, 确定系统界限, 对于不感兴趣或未探明原因的事件可以直接作为底事件, 不进行展开。在建立故障树时, 对系统功能、结构原理了解越全面, 对

收稿日期: 2011-06-30

故障原因分析就越准确, 建立出的故障树会更全面。

例如列车客室门系统的主要功能是实现乘客上下车, 运行时保护车内乘客安全, 在紧急情况时为司机和乘客提供逃生通道。门系统主要组成为: 门控装置、驱动装置、紧急解锁、门扇、隔离锁装置等。列车开门的条件一般为列车零速信号、司机左右侧门选择(当默认为某一侧开门则不用进行选择)、司机开门指令。正常情况下, 门控制电路与牵引互锁, 在门打开状态下, 无法施加牵引。在车门未被隔离且车门旁路开关未被操作时, 车门的开关符合表1条件。

表1 门控制逻辑

| 硬件命令 |    |    | 下一车门状态 |
|------|----|----|--------|
| 零速   | 开门 | 关门 |        |
| 1    | 1  | 0  | 打开     |
| 1    | 0  | 1  | 关闭     |
| 0    | x  | x  | 关闭     |

“1”——相应命令被请求; “0”——相应命令被禁止; “x”——不考虑

本文利用 Isograph 软件, 以列车运行时门意外打开为顶事件建立故障树, 如图1所示, 所有事件见表2。Isograph 可以建立庞大、复杂的故障树, 并具有对故障树进行分页编辑与显示等功能。如图1中对中间事件P5进行了分页显示, 再建立较复杂的故障树, 这样便于建树和分析时的检查。

表2 故障树事件表

| 代号 | 含义          | 事件类型 |
|----|-------------|------|
| P1 | 列车运行时门意外地打开 | 顶事件  |
| P2 | 收到错误的零速信号   | 中间事件 |
| P3 | 门控器错误发出开门指令 | 中间事件 |
| P4 | 门控器故障       | 中间事件 |
| P5 | 门控器硬件故障     | 中间事件 |
| X1 | ATC故障       | 底事件  |
| X2 | 零速环路中继器触点故障 | 底事件  |
| X3 | 司机误操作开门按钮   | 底事件  |
| X4 | 门控器软件故障     | 底事件  |
| X5 | 光耦损失        | 底事件  |
| X6 | 元器件引脚短接     | 底事件  |
| X7 | 元器件失效       | 底事件  |
| X8 | PCB导线短接     | 底事件  |

### 1.3 故障树定性分析

故障树定性分析主要是求最小割集。它的基本用途在于识别导致顶事件发生的所有可能的系统故障模式, 因而有助于判明潜在的故障, 避免遗漏重要的故障模式, 有助于指导故障诊断和制订使用维修方案。故障树定性分析结果也是进一步定量分析的基础<sup>[1]</sup>。

求最小割集一般采用下行法或上行法, 但利用 Isograph 软件可以不对故障树进行简化, 便可以直接求最小割集。对图1中的故障树求最小割集, 结果为: X3X1、X3X2、X5X1、X4X1、X8X1、X7X1、X6X1、X5X2、X4X2、X8X2、X7X2、X6X2。

因此可以看出, 上述底事件的组合将直接导致顶事件的发生。在最小割集阶数相同的条件下, 在不同最小割集中重复出现次数越多的底事件越重要<sup>[1]</sup>, 因此, 底事件X1和X2对顶事件的发生影响很大。

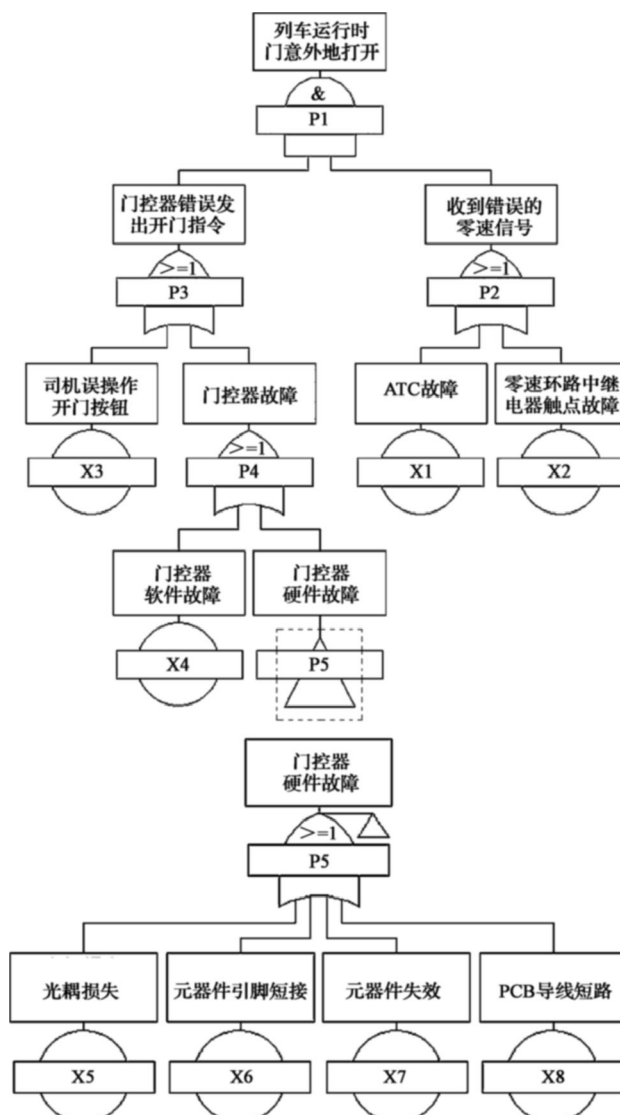


图1 故障树—列车运行时门意外打开

### 1.4 故障树定量分析

在确定故障树的全部最小割集后, 可利用有关的故障数据进行定量分析。定量分析的主要内容有2个, 一个是计算顶事件发生概率, 另一个是计算底事件重要度。

#### 1.4.1 求顶事件发生概率

在 Isograph 软件中求顶事件的概率和不可用度有多个模型, 这里根据已知条件采用 Rate 模型(故障率和修复率模型), 以故障率和修复率为参数。这个模型用来表达故障立刻显现的故障, 并且假定故障率和修复率均为指数分布<sup>[2]</sup>。一个部件的不可用度和故障频率由故障率和修复率模型表达如下:

$$Q(t) = \frac{\lambda}{\lambda + u} [1 - e^{-(\lambda + u)t}] \quad (1)$$

$$\omega(t) = \lambda [1 - Q(t)] \quad (2)$$

式中： $Q(t)$ ——部件不可用度； $\omega(t)$ ——部件故障频率； $\lambda$ ——部件故障率； $\mu$ ——部件修复率。

在软件对话框中，输入故障率和修复率即可。若没有修复率数据，只输入故障率，系统则默认该部件为不可修复部件，将修复率 $\mu=0$ 代入不可用度的通用表达式，得 $Q(t)=1-e^{-\lambda t}$ ，在实际中一般有 $Q(t)\ll 1$ ，这时有 $\omega\approx\lambda$ 。

将表3中底事件的故障率输入到软件中，得到顶事件的故障频率 $\omega=(1.96E-13)/h$ 。在进行量化风险评估时以这个故障频率为基础，若要评价整个车队每年此类事故出现的频率则需乘以车队列车数、一年内系统运行总时间(小时)。最终结果可根据标准EN50162中的风险矩阵来进行评价，结合事故严重度等级，可评估该事故风险是否满足ALARP原则<sup>[3]</sup>。

表3 故障树底事件故障率

| 代号 | 含义          | 故障率      |
|----|-------------|----------|
| X1 | ATC 故障      | 2.28E-10 |
| X2 | 零速环路中继器触点故障 | 6.94E-13 |
| X3 | 司机误操作开门按钮   | 4.26E-08 |
| X4 | 门控器软件故障     | 6.18E-11 |
| X5 | 光耦损失        | 8.49E-11 |
| X6 | 元器件引脚短接     | 1.16E-11 |
| X7 | 元器件失效       | 3.77E-11 |
| X8 | PCB 导线短接    | 4.39E-11 |

#### 1.4.2 重要度分析

重要度分析是故障树分析的重要部分，重要度是指一个部件或系统的割集发生失效时对顶事件概率的影响程度，是时间、部件的可靠性参数以及系统结构的函数。它在系统可靠性预测和分配、运行和维修、贮存管理中都起着指导性作用。例如，可以估计部件可靠度参数的变化所导致的系统可靠度的变化；可以按部件重要度顺序进行检查、维修和发现故障，并改进重要度较大的部件，从而提高系统的可靠性<sup>[4]</sup>。

在Isograph软件中，计算的是以下几种重要度：

##### 1) Birnbaum重要度(概率重要度)

概率重要度定义为：第*i*个元部件由正常状态转为故障状态时，系统由正常转为故障状态的概率。它反映了基本事件概率变化对系统概率变化的贡献。数学表达式为：

$$I_i^{pr}(t) = \frac{\partial g[F(t)]}{\partial F_i(t)} = \frac{\partial F_s(t)}{\partial F_i(t)} \quad (3)$$

式中： $I_i^{pr}(t)$ ——第*i*个元部件的概率重要度；

$g[F(t)]$ ——顶事件发生概率；

$F_s(t)$ ——系统不可靠度函数；

$F_i(t)$ ——元部件不可靠度函数。

##### 2) Fussell-Vesely重要度(FV重要度)

Fussell和Vesely在研究部件重要度时，发现只研究部件处于关键状态的重要度还不够，还必须研究部件处于非关键状态时的重要度。所谓处于非关键状态是

指当元部件*i*由正常状态变为故障状态时，顶事件并不发生，但是元部件*i*对顶事件发生的概率却有影响。

假设包含第*i*个故障部件的全部最小割集数为 $N_k^i$ ，由它们构成的并集结构函数记做：

$$\Phi_k^i[X(t)] = \begin{cases} 1, & \text{含元部件}i\text{的最小割集并集发生} \\ 0, & \text{含元部件}i\text{的最小割集并集不发生} \end{cases} \quad (4)$$

则包含部件*i*的 $N_k^i$ 个最小割集并集的结构函数为：

$$\Phi_k^i[X(t)] = \bigcup_{j=1, l \in K_j}^{N_k^i} x_l \quad (5)$$

其概率 $g_k^i[F(t)] = E\{\Phi_k^i[X(t)] = 1\}$ 为部件*i*对顶事件发生概率的贡献。因此，定义FV重要度为：

$$I_i^{FV}(t) = \frac{g_k^i[F(t)]}{g[F(t)]} \quad (6)$$

##### 3) Barlow Proschan重要度(BP重要度)

所谓BP重要度是指部件*i*在过去一段时间里发生故障对顶事件发生概率的贡献。设每一时刻*t*系统中只可能有一个部件发生故障，部件*i*的故障密度为 $f_i(t)$ ，则在 $[0, t]$ 区间内部件*i*发生故障导致顶事件发生的概率：

$$I_i^{BP} = \int_0^t [g(1_i, F(t)) - g(0_i, F(t))] f_i(t) dt \quad (7)$$

式(7)被称作重要度。

$I_i^{BP}$ 表示元部件*i*在 $[0, t]$ 区间内发生故障对顶事件发生的累积贡献，它是表示时刻*t*以前的事件，而不是时刻*t*的事件。为了归一化，将上式除以 $g(F)$ ，这时有 $\sum_{i=1}^n I_i^{BP} = 1$ ，Isograph中的计算结果是归一化后的。

底事件X1~X8的3种重要度值如表4所示。

表4 底事件重要度

| 代号 | 概率重要度   | FV 重要度  | BP 重要度  |
|----|---------|---------|---------|
| X1 | 4.28E-4 | 0.997   | 0.499   |
| X3 | 2.29E-6 | 0.994   | 0.497   |
| X2 | 4.28E-4 | 3.03E-3 | 1.52E-3 |
| X5 | 2.29E-6 | 1.98E-3 | 9.91E-4 |
| X4 | 2.29E-6 | 1.44E-3 | 7.22E-4 |
| X8 | 2.29E-6 | 1.02E-3 | 5.13E-4 |
| X7 | 2.29E-6 | 8.80E-4 | 4.40E-4 |
| X6 | 2.29E-6 | 2.71E-4 | 1.35E-4 |

#### 1.5 故障树分析结果

从分析结果可以看出，底事件X1(ATC故障)和X3(司机误操作开门按钮)及X2(零速环路中继器触点故障)对顶事件发生贡献很大。从建立的故障树可以看出，X1或X2发生将直接导致P2(收到错误的零速信号)的发生，若此时司机误操作开门按钮(X3)，将导致顶事件发生。因此，为了避免此类故障发生，可以增加开门条件，如增加门使能信号，或在开门前司机必须先进行左右门选择，这样就增加了第一级与门的个数，

(下转第44页)

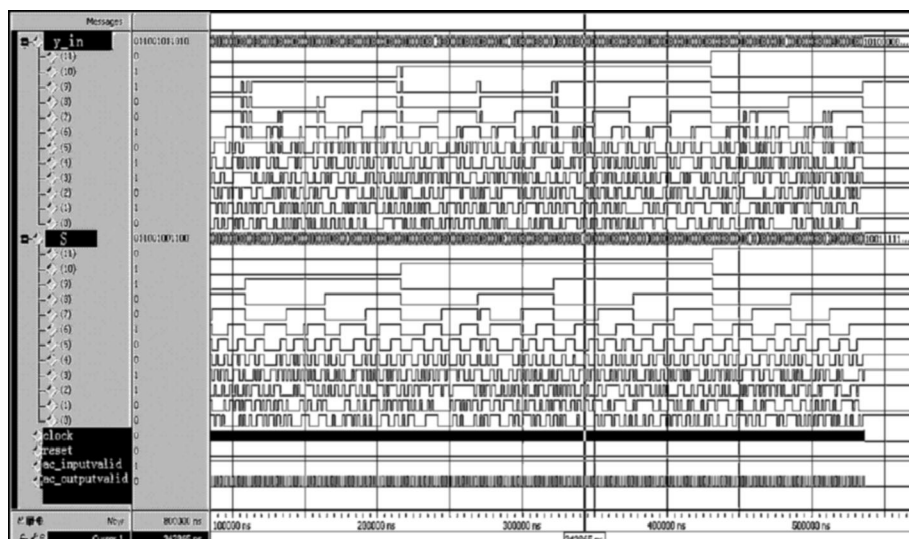


图 7 时序仿真

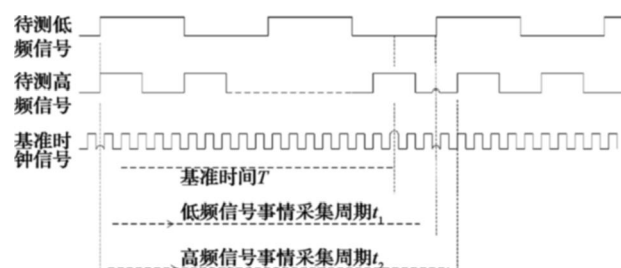


图 8 变时间窗测频示意图

因此,只要时间窗选取的测量精度合适,同时待测信号的捕获较准确,变时间窗测频法就能既保证低频下脉冲测量精度,又能稳定高频下脉冲测量精度。



图 9 状态转换图

### 3.2 变时间窗测频的FPGA实现

变时间窗测频模块被抽象成控制信号序列,即它的运行具有实际的时序逻辑关系,利用状态机实现各个状态之间的转换,状态转换图如图9所示。

而VHDL的结构非常适合编写状态机,采用if\_then\_else语句设计优先度的编码逻辑,同时该状态机有4个状态,即Idle、Tap1、Tap2和Tap3。当Reset信号为‘1’时,状态机复位到Idle状态,当Reset信号为‘0’时,状态机正常工作。状态机的状态转换关系见图9,具体FPGA实现略。

## 4 结语

本文详细论述了利用Kalman滤波和变时间窗测频方法进行机车转速测量研究,在Matlab仿真验证和算法优化的基础上,实现了基于FPGA平台的转速信号测量和处理。FPGA仿真结果表明上述方法能快速、准确地获取机车的运行速度,有效地抑制各种干扰,是确保速度计算安全的可靠手段之一。

### 参考文献:

- [1] Rudolf E Kalman. A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems [J]. ASME Journal of Basic Engineering, 1960, 82:34-45.
- [2] 邓自立. 卡尔曼滤波与维纳滤波—现代时间序列分析方法 [M]. 长春: 东北师范大学出版社, 2001.
- [3] Mobinder S Grewal, Angus P Andrews. Kalman Filtering Theory and Practice Using MATLAB [M]. Canada: John Wiley & Sons inc., 2008.
- [4] 呼秀山, 钱利民, 李迎春. 一种基于PLC开关量输入单元的转速信号测量方法 [J]. 微计算机信息, 2006 (13).

(上接第40页)

即增加了最小割集的阶数,达到降低顶事件发生概率、降低风险的目的。

## 2 结语

①本文介绍了利用Isograph建立故障树及进行故障树分析的方法,尤其对软件中进行故障率计算和重要度计算的方法进行了解释说明。利用Isograph软件进行故障树分析能大大提高故障树分析的效率,同时也提高了故障树分析的准确性。

②故障树分析简明、图形直观,容易理解其结构,是对列车各系统进行可靠性、安全性、部件重要度分

析的有效数学工具。采用故障树分析进行危害事件风险分析,能够将分析的危害事件风险水平量化,从而提供更科学、更精确的评估结果。

### 参考文献:

- [1] GJB Z768A—1998, 故障树分析指南 [S].
- [2] FaultTree+11.2故障树中文使用手册 [M]. 北京: 北京世纪坐标科技有限公司, 2009.
- [3] CENELEC. EN50126—1999, 铁路应用—可靠性、可用性、可维护性和安全性技术条件和验证(RAMS) [S].
- [4] 孙红梅, 高齐圣, 朴营国. 关于故障树分析中几种典型重要度的研究 [J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2007, 25(2): 39-42.