

基于故障树的轨道车辆车厢LED照明控制系统可靠性因素分析

在轨道车辆运行过程中, 控制系统作为轨道车辆LED照明系统的“神经中枢”, 其故障会导致整车照明系统的故障。为了提高照明控制系统的可靠性, 首先需对其进行可靠性影响因素分析。应用故障树分析法对轨道车辆车厢LED照明控制系统进行定性和定量分析, 得出影响其可靠性的因素, 并分析各个因素的重要度, 找出系统的最薄弱环节, 为轨道车辆车厢LED照明控制系统的设计维修提供重要参考, 并为进一步的可靠性分析提供理论指导。

张邦成 陈珉珉 尹晓静/长春工业大学机电工程学院
高 智/长春工业大学应用技术学院
吴利刚/第二炮兵驻西安地区军代室



张邦成/教授

关键词/Keywords

轨道车辆·
LED照明·
可靠性·
故障树·

轨道车辆车厢LED照明控制系统是一种复杂的电气控制系统^[1]。整个照明控制系统电路复杂, 电子元器件多, 在实际应用中, 任何一部分电路或者任何一个元器件出现故障, 都会导致轨道车辆车厢LED照明控制系统不能正常工作, 同时有可能造成局部甚至整车照明系统的瘫痪, 影响正常行车安全。因此, 对轨道车辆车厢LED照明控制系统进行可靠性因素分析显得尤为重要^[2]。

轨道车辆车厢LED照明控制系统故障属于高发故障, 由于其结构的封闭性和复杂性使得故障症状和原因之间的关系极不明确, 且盘根错杂。为了快速准确地分析轨道车辆车厢LED照明控制系统的故障, 引入故障树分析法^[3]。故障树分析法是系统故障分析和可靠性分析的有效手段, 尤其在解决复杂系统的

分析问题上很有效果。用故障树分析法对轨道车辆车厢LED照明控制系统进行分析, 找出故障发生的路径, 明确导致故障的原因, 为制定安全措施提供有力依据。

故障机理分析

为建立轨道车辆车厢LED照明控制系统的故障树模型, 首先需要了解控制系统的组成。控制系统主要由控制模块和驱动模块组成^[4]。

LED控制模块是整个轨道车辆车厢LED照明控制系统的核心, 主要由工业计算机(IPC)、单片机、继电器以及控制电路的重要载体电路板等组成。IPC故障主要由硬件故障造成, 硬件故障主要指IPC的硬件(如CPU、RAM等)出现问题, 使IPC不能正常工作; 单片机是轨道车辆车厢LED照明系统的微型控制器, 在轨道车辆运行中, 高温、低温和振动等都会对单片机的正常工作造成威胁; 继电器属于电磁系统, 其故障主要发生在线圈及动、静铁心部分, 由于轨道车辆的特殊性, 如高温、环境粉尘、油污、噪声以及异物进入等都会造成继电器的异常; 电路板主要由模拟电路和数字电路组成, 一般的数字电路只有“0”和“1”两种状态, 所以其受噪声、振动等的影响较小, 故电路板故障主要是模拟电路故障。

LED驱动芯片是LED驱动电源模块的重要组成部分^[5], 主要的故障经常出现在LED驱动芯片上。芯片过热是导致其

吉林省教育厅十一五科学技术研究项目(2009109), 吉林省教育厅“十二五”科学技术研究项目(吉教科合字[2014]第117号)。

发生故障的最主要原因，其中短路、过电压、过电流和芯片参数变化等都会导致芯片过热^[6]。

故障树的建立

1. 故障树模型

故障树分析法始创于美国贝尔电话实验室，是建立在一种特殊的某个不希望发生的事件基础上^[7]，它将系统的故障从总体到零件、从系统到元件进行逐步细化，找出所有导致事件发生的原因。在可靠性分析中，这是一种最基本、最常用的方法。故障树的应用有三种假设：①事件的状态有工作和失效两种；②各个事件之间是独立的；③事件之间有逻辑门关系^[8]。通常故障树分析的程序为选择顶端事件、建立故障树以及定量评定故障树。定性分析是故障树分析的核心内容，其目的是分析某类故障的发生规律及特点，找出控制该事件的可行方案；定量分析是故障树分析的最终目的，是在基本事件发生概率给定的条件下，计算顶端事件发生概率以及任一个逻辑子系统内部事件的概率^[9]。

2. 故障树的构建

根据轨道车辆车厢LED照明控制系统的故障机理，建立其故障树模型，如下图所示。故障树中分别对应的符号含义如表1所示。

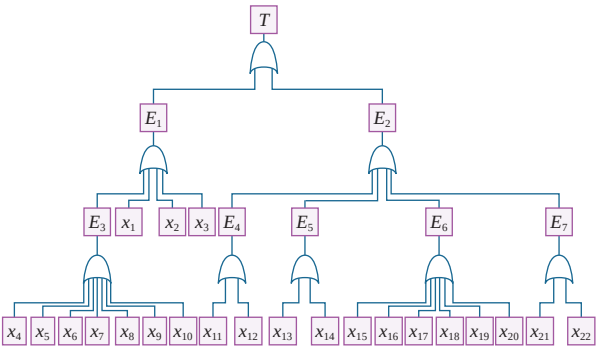


图 轨道车辆车厢照明控制系统故障树

故障树分析

1. 定性分析

故障树定性分析的目的是寻找导致顶端事件发生的各种原因事件及原因事件的组合，识别导致顶端事件发生的所有故障模式集合^[10]。为了进

表1 故障树图中符号含义

符号	含义
T	轨道车辆车厢LED照明控制系统故障
E ₁	驱动模块故障
E ₂	控制模块故障
E ₃	LED驱动芯片故障
E ₄	IPC故障
E ₅	单片机故障
E ₆	继电器故障
E ₇	电路板故障
x ₁	芯片参数变化
x ₂	内部信号振荡
x ₃	外部信号干扰
x ₄	短路
x ₅	过电压
x ₆	高温
x ₇	过电流
x ₈	电容故障
x ₉	电感故障
x ₁₀	二极管故障
x ₁₁	CPU故障
x ₁₂	RAM故障
x ₁₃	高温
x ₁₄	振动
x ₁₅	噪声
x ₁₆	油污
x ₁₇	粉尘
x ₁₈	高温
x ₁₉	开路
x ₂₀	短路
x ₂₁	开路
x ₂₂	短路

一步分析影响轨道车辆车厢LED照明控制系统的可靠性因素，根据故障树模型，运用最小割集理论对上图进行分析，找出导致顶端事件发生的所有底端事件的可能组合。最小割集也是最小故障模式，其描述了处于故障状态的系统所必然修理的基本故障，代表了系统中最薄弱的环节。下面利用下行法^[11]来确定故障树的最小割集。

$$\begin{aligned} T &= E_1 \cup E_2 \\ E_1 &= E_3 \cup x_8 \cup x_9 \cup x_{10} \\ E_2 &= E_4 \cup E_5 \cup E_6 \cup E_7 \\ E_3 &= x_1 \cup x_2 \cup x_3 \cup x_4 \cup x_5 \cup x_6 \cup x_7 \end{aligned}$$

$$E_4 = x_{11} \cup x_{12}$$

$$E_5 = x_{13} \cup x_{14}$$

$$E_6 = x_{15} \cup x_{16} \cup x_{17} \cup x_{18} \cup x_{19} \cup x_{20}$$

$$E_7 = x_{21} \cup x_{22}$$

由此可知

$$T = x_1 \cup x_2 \cup x_3 \cup x_4 \cup x_5 \cup x_6 \cup x_7 \cup x_8 \cup x_9 \cup \dots \cup x_{19} \cup x_{20} \cup x_{21} \cup x_{22}$$

因此,该故障树顶端事件的最薄弱环节由22个最小割集组成。

2. 定量分析

故障树定量分析是在各个底端事件相互独立且发生概率已知的情况下,计算或者估计顶端事件发生的概率和底端事件的重要度。

(1) 顶端事件发生概率的计算

设基本事件 $x_1, x_2, \dots, x_m$ 发生的概率是 $q_1, q_2, \dots, q_n$,其中 n 为基本事件的个数。则最小割集失效概率为

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

式中, m 为最小割集阶数^[12]。

顶端事件发生的概率为

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

式中, $P(T)$ 为顶端事件发生概率; y_i 为最小割集; k 为最小割集的个数。

在“或”门故障事件中

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

式中, P_i 为某一个最小割集的失效概率。

根据大量调研数据、实际经验以及其他同类控制系统部件的可靠性数据得出底端事件发生的概率为 $q_1 = 0.000\ 2, q_2 = 0.000\ 2, q_3 = 0.000\ 1, q_4 = 0.000\ 1, q_5 = 0.000\ 1, q_6 = 0.000\ 2, q_7 = 0.000\ 1, q_8 = 0.000\ 3, q_9 = 0.000\ 2, q_{10} = 0.000\ 1, q_{11} = 0.000\ 2, q_{12} = 0.000\ 1, q_{13} = 0.000\ 1, q_{14} = 0.000\ 1, q_{15} = 0.000\ 1, q_{16} = 0.000\ 1, q_{17} = 0.000\ 2, q_{18} = 0.000\ 3, q_{19} = 0.000\ 1, q_{20} = 0.000\ 1, q_{21} = 0.000\ 2, q_{22} = 0.000\ 1$ 。

则顶端事件的发生概率为

$$P(T) = 1 - (1 - 0.000\ 2)(1 - 0.000\ 2)(1 - 0.000\ 1)$$

$$(1 - 0.000\ 1)(1 - 0.000\ 1)(1 - 0.000\ 2)(1 - 0.000\ 1)(1 - 0.000\ 3)(1 - 0.000\ 2)(1 - 0.000\ 1)(1 - 0.000\ 2)(1 - 0.000\ 1)(1 - 0.000\ 1)(1 - 0.000\ 1)(1 - 0.000\ 1)(1 - 0.000\ 1)(1 - 0.000\ 2)(1 - 0.000\ 3)(1 - 0.000\ 1)(1 - 0.000\ 1)(1 - 0.000\ 2)(1 - 0.000\ 1) = 0.003\ 29$$

一般情况下,割集的阶数越小,其发生的可能性就越大。因此,22个一阶最小割集构成了影响可靠性因素的最薄弱环节。

(2) 底端事件的重要度计算

根据实际经验,系统中各个部件并非同样重要。一般将底端事件发生对顶端事件的贡献称为底端事件的重要度。重要度可分为结构重要度和概率重要度。

结构重要度是指底端事件所处位置对顶端事件发生的影响程度,与本身的发生概率无关,表达式为^[12]

$$I_i = 1 - \prod_{x_i \in y_l} \left(1 - \frac{1}{2^{n-1}} \right) \quad (4)$$

式中, I_i 为底端事件 x_i 的结构重要度近似值; n 为底端事件 x_i 所在割集 y_l 的阶数。

采用最小割集法判断结构重要度,将求得的22个最小割集代入式(4)中得底端事件的结构重要度。由于22个底端事件均为一阶最小割集,即 $n = 1$,故结构重要度均为1。这表明,不管其发生概率的大小,只要发生,就会导致顶端事件,即轨道车车辆厢LED照明控制系统就会发生故障。

第 i 个底端事件失效率的变化,引起系统失效率变化的程度,称为概率重要度。概率重要度的定义为

$$I_i = \frac{\partial P(T)}{\partial q_i} \quad (5)$$

式中, I_i 为第 i 个底端事件的概率重要度; $P(T)$ 为顶端事件的发生概率; q_i 为底端事件的发生概率。

将数据 $q_1 = 0.000\ 2, q_2 = 0.000\ 2, q_3 = 0.000\ 1, q_4 = 0.000\ 1, q_5 = 0.000\ 1, q_6 = 0.000\ 2, q_7 = 0.000\ 1, q_8 = 0.000\ 3, q_9 = 0.000\ 2, q_{10} = 0.000\ 1, q_{11} = 0.000\ 2, q_{12} = 0.000\ 1, q_{13} = 0.000\ 1, q_{14} = 0.000\ 1, q_{15} = 0.000\ 1, q_{16} = 0.000\ 1, q_{17} = 0.000\ 2, q_{18} = 0.000\ 3, q_{19} = 0.000\ 1, q_{20} = 0.000\ 1, q_{21} = 0.000\ 2,$

$q_{22}=0.000$ 1代入式（5）得基本事件概率重要度，并提供重要参考。

并对其进行排序，如表2所示。

表2 底端事件概率重要度排序

序号	底端事件	概率重要度
1	x_{15}	0.996 899 6
2	x_{11}	0.996 899 48
3	x_{21}	0.996 899 38
4	x_{14}	0.996 899 22
5	x_{20}	0.996 896 7
6	x_{16}	0.996 896 5
7	x_{12}	0.996 896 25
8	x_{19}	0.996 894 8
9	x_{17}	0.996 894 4
10	x_{18}	0.996 892 8
11	x_3	0.996 799 639
12	x_{22}	0.996 799 55
13	x_7	0.996 799 532
14	x_{10}	0.996 799 429
15	x_{13}	0.996 799 371
16	x_4	0.996 799 369
17	x_6	0.996 799 355
18	x_5	0.996 799 341
19	x_8	0.996 699 855
20	x_9	0.996 699 711
21	x_1	0.996 699 379
22	x_2	0.996 699 079

由表2可以看出： x_{15} （噪声）的概率重要度为0.996 899 6，对轨道车辆车厢LED照明控制系统失效影响最大，是影响其可靠性最重要的因素。

结束语

本文采用故障树分析法对轨道车辆车厢LED照明控制系统进行分析，找出影响其可靠性的因素。通过故障树的定性分析和定量分析可知，22个底端事件作为最小割集对系统顶端事件发生起决定性作用。从概率重要度来看，噪声和CPU故障对轨道车辆车厢LED照明控制系统故障影响较大。因此，在控制系统安装时重点考虑环境因素，出现故障时应该首先检查IPC中CPU是否出现故障，这为以后轨道车辆车厢照明控制系统的设计维修

参考文献

[1] 张邦成, 谭海东, 郝明亮, 等. 基于WTB/MVB总线的轨道车辆LED照明控制系统设计 [J]. 电子技术应用, 2014 (5) : 49-51, 58.

[2] 章国栋, 陆延孝, 屠庆慈, 等. 系统可靠性与维修性设计 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1990.

[3] 陶勇剑, 董德存, 任鹏. 基于故障树的系统可靠性估计不确定性分析 [J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2010 (1) : 141-145.

[4] 杨旻, 赵梦恋, 陆佳颖, 等. 高亮度白光LED驱动控制器设计 [J]. 浙江大学学报: 工学版, 2010 (1) : 111-117.

[5] 钱平, 郭茂派. 高亮LED驱动芯片HV9930的应用 [J]. 照明工程学报, 2010 (5) : 78-80, 85.

[6] 田传军, 张希艳, 邹军, 等. 温度对大功率LED照明系统光电参数的影响 [J]. 发光学报, 2010 (1) : 96-100.

[7] Lee W S, Crrosh D L, Tilman F A. On reliability [J]. IEEE Transactions on Lie C H, 1985, 34 (3) : 194-203.

[8] 曹晋华, 程侃. 可靠性数学引论 [M]. 2版. 北京: 科学出版社, 2007.

[9] 许荣, 车建国, 杨作宾, 等. 故障树分析法及其在系统可靠性分析中的应用 [J]. 指挥控制与仿真, 2010 (1) : 112-115.

[10] 胡隆基. 基于故障树分析法的某型高炮随动系统故障诊断 [J]. 四川兵工学报, 2011 (4) : 40-43.

[11] 魏选平, 卞树檀. 故障树和分析法及其应用 [J]. 计算机科学与技术, 2004 (3) : 43-45.

[12] 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 (1) : 105-109.

(收稿日期: 2014-12-18) EA