

文章编号: 1001-0920(2004)02-0139-04

基于模糊故障树的磁浮列车悬浮系统故障诊断

龙志强, 吕治国, 常文森

(国防科技大学 磁浮技术工程研究中心, 湖南 长沙 410073)

摘要: 悬浮控制系统是 CM S-3 型磁浮列车系统的重要子系统, 其可靠性的高低直接关系到列车能否安全运行。在对 CM S-3 型磁浮列车悬浮系统故障概率分析的基础上, 将模糊数学和故障树方法相结合, 建立了悬浮系统的模糊故障树, 通过对其进行失效分析, 给出了悬浮系统的故障诊断算法。实验表明, 该方法用于悬浮系统的故障诊断是行之有效的。

关键词: 磁浮列车; 悬浮系统; 模糊数; 故障树分析

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Fault diagnosis to suspension system of maglev train based on fuzzy fault tree

LON G Zhi-qiang, LV Zhi-guo, CHAN G Wen-sen

(Engineering Research Center of Maglev Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China. Correspondent: LONG Zhi-qiang, E-mail: ZHQLONG@263.net)

Abstract: After analyzing fault probability on various parts of the suspension system of CM S-3 maglev train system, and combining fuzzy theory with fault tree analysis, a fuzzy fault tree of the suspension system is built and its fault probability is analyzed. The fault diagnosis arithmetic of the suspension system is presented. Practical results show that this method is effective to diagnose the fault of the suspension subsystem in maglev train.

Key words: maglev train; suspension system; fuzzy number; fault tree analysis

1 引言

磁浮列车是一种新型轨道交通工具, 它环抱轨道运行但又与轨道没有机械接触, 通过主动控制的电磁铁来完成悬浮和导向功能, 在直线电机的推进下高速运行。悬浮系统是磁浮列车系统的关键系统, 由于其单元内部各部件故障发生的原因复杂, 系统失效可能与器件的可靠性有关, 也可能是外界某种不确定因素所造成的, 而且各部件故障概率很难精确量化, 应用常规基于布尔逻辑和概率论的故障树分析法对其故障失效分析存在较大误差。

本文将列车悬浮系统中的各部件故障概率用模糊数表示, 通过模糊运算规则, 对悬浮系统故障树进

行分析, 研究了悬浮系统故障诊断算法^[1,2]。

2 悬浮系统的工作原理

图 1 为国防科技大学 2001 年研制成功常导吸力型磁浮列车(简称 CM S-3 型)侧视图。该车共包括 4 个转向架, 每个转向架通过 4 个空气弹簧与车厢连接, 空气弹簧与阻尼器构成二次系用以提高列车的舒适性。每个转向架与 8 个悬浮电磁铁固连在一起, 左右两侧各 4 个。图中转向架 A 一侧有电磁铁 1~4, 分别被 2 个控制器所控制, 其中电磁铁 1 和 2 共用一个悬浮控制器, 3 和 4 共用一个悬浮控制器。当电磁铁通以适当电流时, 悬浮电磁铁产生磁场, 与轨道相吸, 通过克服车体重力而将车体托起。

收稿日期: 2002-11-27; 修回日期: 2003-04-22

作者简介: 龙志强(1967—), 男, 江西吉安人, 副教授, 从事磁浮列车监控和故障诊断等研究; 常文森(1935—), 男, 辽宁绥中人, 教授, 博士生导师, 从事磁浮列车和机器人领域方面的研究。

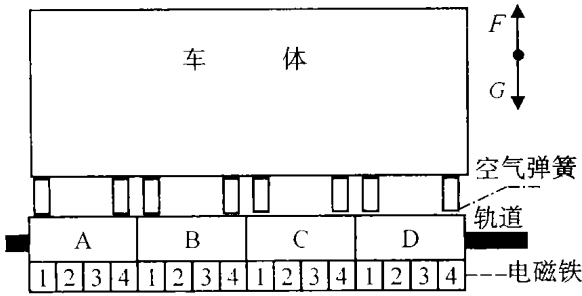


图1 CMS-3型磁浮列车车体侧视图

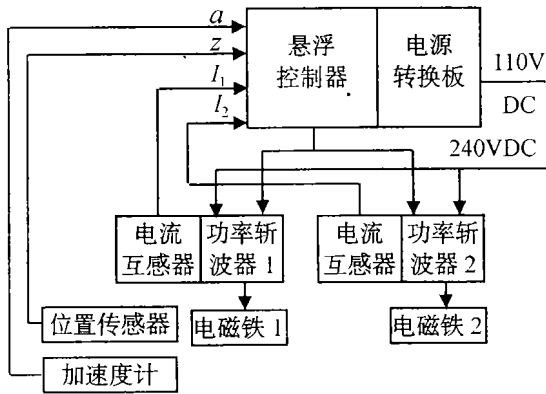


图2 悬浮系统原理框图

图2是单套悬浮单元的原理框图,一辆车有16套悬浮控制单元。当悬浮单元工作时,控制器根据加速度传感器、位置传感器以及电流互感器的反馈信号,经过校正网络输出控制方波信号作用到功率斩波器,从而有效地控制电磁铁两端的电压,产生相应的磁场力与轨道作用,达到列车悬浮的目的。

3 悬浮系统的故障树建立

故障树的建造是故障树分析法中最关键的环节,也是分析故障树的前提。表1对导致悬浮系统故障的各事件进行了编码。

参照图2的悬浮系统原理框图,根据各部件之间的内部关系,采用演绎法建立悬浮系统故障树,如图3所示。

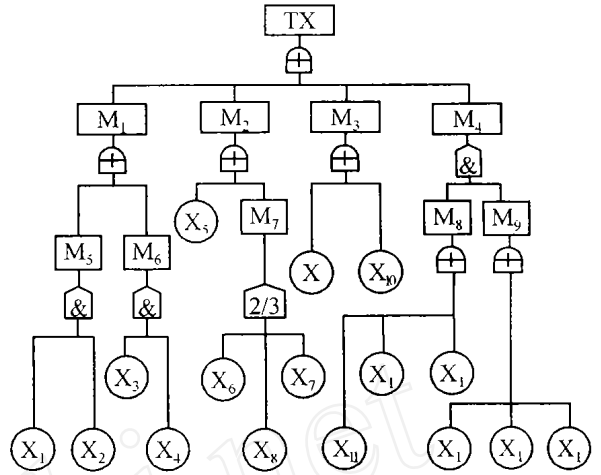


图3 悬浮系统故障树

4 悬浮系统模糊故障树分析

4.1 各底事件的模糊概率表示^[3,4]

设悬浮系统中各底事件的模糊概率采用三角模糊数 \tilde{A} 表示,其参照函数^[1]为

$$\begin{cases} L \left| \frac{m-x}{a} \right| = \max \left\{ 0, 1 - \frac{m-x}{a} \right\}, & x < m, a > 0; \\ R \left| \frac{x-m}{\beta} \right| = \max \left\{ 0, 1 - \frac{x-m}{\beta} \right\}, & x > m, \beta > 0 \end{cases} \quad (1)$$

对应模糊数 \tilde{A} 的隶属度函数^[1]为

表1 事件编码表

事件代号	事件名称	事件代号	事件名称
TX	单套悬浮单元不能完成悬浮功能	X4	240 V DC 直流转换器故障
M1	外部电源故障	X5	加速度计失灵
M2	传感器故障	X6	位置传感器1失灵
M3	控制器故障	X7	位置传感器2失灵
M4	控制执行机构和反馈装置系统故障	X8	位置传感器3失灵
M5	110 V 输入电源故障	X9	控制板故障
M6	240 V 输入电源故障	X10	电源转换板故障
M7	位置传感器故障	X11	电流互感器1坏
M8	执行机构和反馈装置子系统1故障	X12	斩波器1电路故障
M9	执行机构和反馈装置子系统2故障	X13	电磁铁1线圈短路或断路故障
X1	110 V 蓄电池组坏	X14	电流互感器2坏
X2	110 V DC 直流转换器故障	X15	斩波器2电路故障
X3	240 V 蓄电池组坏	X16	电磁铁2线圈短路或断路故障

$$u_{\tilde{A}}(x) = \begin{cases} 0, & x < m - a; \\ 1 - \frac{x - m}{a}, & m - a \leq x \leq m; \\ \frac{x - m}{\beta}, & m < x \leq m + \beta; \\ 0, & x > m + \beta \end{cases} \quad (2)$$

记 $\tilde{A} = (m, \alpha, \beta)$, 其中: m 为 \tilde{A} 的均值, α, β 分别为 \tilde{A} 的置信上下限, α, β 分布越大, \tilde{A} 越模糊, 当 α, β 等于 0 时, \tilde{A} 为非模糊数. 模糊数 \tilde{A} 的 λ 截集可表示为

$$\tilde{A}_\lambda = [(m - \alpha) + \alpha\lambda, (m + \beta) - \beta\lambda] \quad (3)$$

根据试验统计和厂家对设备可靠性指标提供的数据, 悬浮系统中各底事件的故障率均值 m 以及置信上下限 α, β 估计如表 2 所示

表 2 各底事件故障率估计

事件号	m	α, β	事件号	m	α, β
X ₁	0.004	0.000 7	X ₉	0.003	0.000 6
X ₂	0.002	0.000 5	X ₁₀	0.007	0.000 3
X ₃	0.004	0.000 7	X ₁₁	0.003	0.000 7
X ₄	0.002	0.000 5	X ₁₂	0.002	0.000 6
X ₅	0.003	0.000 7	X ₁₃	0.005	0.000 7
X ₆	0.002	0.000 6	X ₁₄	0.003	0.000 7
X ₇	0.002	0.000 6	X ₁₅	0.002	0.000 6
X ₈	0.002	0.000 6	X ₁₆	0.005	0.000 7

4.2 悬浮系统模糊故障树定量分析^[5]

由图 3 知, 各事件逻辑关系式可表示如下:

$$TX = M_1 + M_2 + M_3 + M_4, \quad (4)$$

$$M_1 = M_5 + M_6, \quad (5)$$

$$M_2 = X_5 + M_7, \quad (6)$$

$$M_3 = X_9 + X_{10}, \quad (7)$$

$$M_4 = M_8 \cdot M_9, \quad (8)$$

$$M_5 = X_1 \cdot X_2, \quad (9)$$

$$M_6 = X_3 \cdot X_4, \quad (10)$$

$$M_7 = X_6 \cdot X_7 + X_7 \cdot X_8 + X_6 \cdot X_8 + X_6 \cdot X_7 \cdot X_8, \quad (11)$$

$$M_8 = X_{11} + X_{12} + X_{13}, \quad (12)$$

$$M_9 = X_{14} + X_{15} + X_{16} \quad (13)$$

设 s_1 和 s_2 是与门/或门的输入事件, 输出事件为 s , \tilde{F}_{s_1} 和 \tilde{F}_{s_2} 分别表示 s_1 和 s_2 的模糊故障概率, 则故障树中与门/或门的输出事件 s 模糊故障概率 \tilde{F}_s 可通过下式求得:

1) 与门结构

$$\tilde{F}_s^{\text{and}} = \tilde{F}_{s_1} \tilde{F}_{s_2} =$$

$$[(m_1 - \alpha_1) + \alpha_1\lambda, (m_1 + \beta_1) - \beta_1\lambda] [(m_2 - \alpha_2) + \alpha_2\lambda, (m_2 + \beta_2) - \beta_2\lambda] = [[m_1 - \alpha_1) + \alpha_1\lambda] [(m_2 - \alpha_2) + \alpha_2\lambda], [(m_1 + \beta_1) - \beta_1\lambda] [(m_2 + \beta_2) - \beta_2\lambda]] \quad (14)$$

2) 或门结构

$$\tilde{F}_s^{\text{or}} = 1 - (1 - \tilde{F}_{s_1})(1 - \tilde{F}_{s_2}) = [1, 1] - \prod_{i=1}^2 ([1, 1] - [(m_i - \alpha_i) + \alpha_i\lambda, (m_i + \beta_i) - \beta_i\lambda]) = \left[1 - \prod_{i=1}^2 [1 - (m_i - \alpha_i) - \alpha_i\lambda], 1 - \prod_{i=1}^2 [(1 - (m_i + \beta_i) + \beta_i\lambda)] \right] \quad (15)$$

设 $\tilde{\phi}(x_1, x_2, \dots, x_{16})$ 为系统的模糊结构函数, 其值表示顶事件 TX 发生的模糊概率, \tilde{F}_{M_i} 表示中间事件 M_i 发生的模糊概率, \tilde{F}_{X_i} 表示底事件 X_i 发生的模糊概率, 其值估计如表 2 所示. 由式(4)~(13)可知, 顶事件和底事件的逻辑关系为

$$TX = X_9 + X_{10} + X_1 \cdot X_2 + X_3 \cdot X_4 + X_6 \cdot X_7 + X_7 \cdot X_8 + X_6 \cdot X_8 + X_6 \cdot X_7 + X_8 + (X_{11} + X_{12} + X_{13}) \cdot (X_{14} + X_{15} + X_{16}). \quad (16)$$

由式(3)和表 2 中各底事件的故障率估计, 对底事件 $X_1 \sim X_{16}$ 作 λ 截集可得

$$\begin{aligned} \tilde{F}_{X_1} &= (0.003 3 + 0.000 7 \lambda, 0.004 7 - 0.000 7 \lambda), \\ \tilde{F}_{X_2} &= (0.001 5 + 0.000 5 \lambda, 0.002 5 - 0.000 5 \lambda), \\ \tilde{F}_{X_3} &= (0.003 3 + 0.000 7 \lambda, 0.004 7 - 0.000 7 \lambda), \\ \tilde{F}_{X_4} &= (0.001 5 + 0.000 5 \lambda, 0.002 5 - 0.000 5 \lambda), \\ \tilde{F}_{X_5} &= (0.002 3 + 0.000 7 \lambda, 0.003 7 - 0.000 7 \lambda), \\ \tilde{F}_{X_6} &= (0.001 4 + 0.000 6 \lambda, 0.002 6 - 0.000 6 \lambda), \\ \tilde{F}_{X_7} &= (0.001 4 + 0.000 6 \lambda, 0.002 6 - 0.000 6 \lambda), \\ \tilde{F}_{X_8} &= (0.001 4 + 0.000 6 \lambda, 0.002 6 - 0.000 6 \lambda), \\ \tilde{F}_{X_9} &= (0.002 4 + 0.000 6 \lambda, 0.003 6 - 0.000 6 \lambda), \\ \tilde{F}_{X_{10}} &= (0.006 7 + 0.000 3 \lambda, 0.007 3 - 0.000 3 \lambda), \\ \tilde{F}_{X_{11}} &= (0.002 3 + 0.000 7 \lambda, 0.003 7 - 0.000 7 \lambda), \\ \tilde{F}_{X_{12}} &= (0.001 4 + 0.000 6 \lambda, 0.002 6 - 0.000 6 \lambda), \\ \tilde{F}_{X_{13}} &= (0.004 3 + 0.000 7 \lambda, 0.005 7 - 0.000 7 \lambda), \\ \tilde{F}_{X_{14}} &= (0.002 3 + 0.000 7 \lambda, 0.003 7 - 0.000 7 \lambda), \\ \tilde{F}_{X_{15}} &= (0.001 4 + 0.000 6 \lambda, 0.002 6 - 0.000 6 \lambda), \\ \tilde{F}_{X_{16}} &= (0.004 3 + 0.000 7 \lambda, 0.005 7 - 0.000 7 \lambda). \end{aligned}$$

根据上述截集, 对式(16)反复运用式(14)和

(15), 并忽略 $O(\lambda)$ 高阶项, 可求得顶事件的模糊故障概率为

$$\tilde{\Phi}_\lambda = [0.0091 + 0.0009\lambda, 0.0109 - 0.0009\lambda]$$

当 $\lambda = 1$ 时, $\tilde{\Phi}_\lambda = 0.01$, 即各底事件发生的概率不具有模糊性时, 悬浮系统发生故障而不能工作的概率为 1%; 当 $\lambda = 0$ 时, $\tilde{\Phi}_\lambda = [0.0091, 0.0109]$, 即当各底事件模糊性很明显, 故障概率的不确定性较大时, 悬浮系统失效的概率在 0.91% ~ 1.09% 之间变化

5 故障诊断算法研究

当悬浮系统发生故障时, 需要快速查找故障源并对故障予以排除。悬浮系统的故障诊断主要是通过对所建故障树的节点逐层搜索来完成, 诊断算法实现时利用各事件模糊故障概率(参考历史数据)作为启发信息, 采用广度优先搜索技术, 对树中的所有故障进行查找, 直到最深层所有叶子节点被搜索为止。故障诊断程序流程如下:

- 1) 若悬浮系统故障 TX 事件没有发生, 程序跳转至 5);
- 2) 取下一层节点集 Q , 计算 Q 的模糊概率均值并对其排序 $\text{Sort}(Q)$, 若节点集 Q 为空集, 转 5);
- 3) 节点 $\text{TestOne} = \text{first}(Q)$, $\text{Remove}(\text{TestOne}, Q)$, 若 TestOne 发生故障, 记录故障;
- 4) 若节点集 Q 为空集, 程序跳转至 2); 否则, 程序跳转至 3);
- 5) 显示故障诊断结果, 结束

6 结 语

本文在介绍悬浮系统工作原理的基础上, 建造了磁悬浮列车悬浮系统的模糊故障树并对其作了定

量分析。通过分析可知, 在充分考虑各事件故障概率的不确定性时, 悬浮系统失效的概率在 0.91% ~ 1.09% 之间变化, 尽管这一分析结果具有一定的模糊性, 但比用精确的概率分析更有实际意义, 更能说明悬浮系统的可靠性程度。通过对悬浮系统的故障诊断算法进行研究, 并在首尾车的主监控计算机内进行了实验, 因故障树搜索时利用了各事件的模糊概率作为启发信息, 所以提高了诊断搜索过程的速度。

参考文献(References):

- [1] 徐章遂, 房立清, 王希武, 等. 故障信息诊断原理及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000: 58-95.
- [2] Long Zhiqiang, Lu Zhiguo, Hong Huajie. Reliability design and analysis of auto-monitoring system on maglev train [A]. *The 5th Int Conf on Reliability, Maintainability and Safety* [C]. Hong Kong: Technology Exchange Ltd, 2001: 475-480.
- [3] 赵艳萍, 贡文伟. 模糊故障树分析及其应用研究[J]. 中国安全科学学报, 2001, 11(6): 31-35.
(Zhao Yanping, Gong Wenwei. Fuzzy fault tree analysis and its application [J]. *J of China Safety Science*, 2001, 11(6): 31-35.)
- [4] 史定华, 王松瑞. 故障树分析技术、方法和理论[M]. 北京: 北京师范大学出版社, 1993: 5-20.
- [5] 左健民, 王书城. 基于模糊故障树理论的液压系统故障诊断方法研究[J]. 南京航空航天大学学报, 1999, 31(6): 716-720.
(Zuo Jianmin, Wang Shucheng. Research of fault diagnosis system in hydraulic system based on fuzzy fault tree analysis method [J]. *J of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 1999, 31(6): 716-720.)

(上接第 138 页)

- [3] Su Bao-he. An optimal inspection and diagnosis policy for a multimode system [J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 2002, 76(2): 181-188.
- [4] 苏保河. 四状态可修系统的可靠性和检测策略研究[J]. 自动化学报, 1999, 25(1): 100-104.

- (Su Bao-he. Reliability and check study of a four-mode system [J]. *Acta Automatica Sinica*, 1999, 25(1): 100-104.)
- [5] 史定华. 随机模型的密度演化方法[M]. 北京: 科学出版社, 1999: 81-122.