

基于 Monte Carlo 仿真的地铁车辆 系统可靠性研究

张小辉 何杰 过秀成 孙婧

东南大学, 交通学院, 南京 210096

摘要: 论文在地铁车辆系统失效模式与影响分析 (FMECA) 的基础上, 考虑到地铁车辆系统故障率较低, 故障状态枚举方法难以获得精确的随机状态, 故运用蒙特卡洛 (Monte Carlo) 改进算法模拟仿真了地铁车辆系统设备单元发生故障的实际过程, 并给出仿真的一般求解方法。针对地铁车辆系统故障模式及故障持续时间, 构建了其可靠性的评估指标, 应用实例数据进行了分析计算, 得出了稳态下的系统可靠性结果。研究成果对地铁车辆运营及维修管理均具有一定的参考价值。

关键词: 地铁车辆系统; 可靠性; 蒙特卡洛; 失效模式与影响分析

中图分类号: U495

文献标识码: A

文章编号: 1672-4747(2010)01-0050-06

Reliability Research of Metro Vehicle System

Based on Monte Carlo Simulation

ZHANG Xiao-hui HE Jie GUO Xiu-cheng SUN Jing

Transportation College, Southeast University, Nanjing 210096, China

Abstract: Based on the failure mode effect and impact analysis of the metro vehicle system, considering the lower failure rate, it is difficult to obtain the precise random state with enumeration method for the failure state, and the failure information of the equipment units cannot be acquired by direct sampling. Thus, the improved Monte Carlo algorithm was used to simulate the real breakdown process of metro vehicle equipment, and the solving course of the simulation was presented. According to the failure mode and failure lasting time

收稿日期: 2009-05-05.

基金项目: 住房和城乡建设部科学技术项目“基于运营安全与可靠性的城市轨道交通系统维保关键技术研究(2008-K5-10)”及“东南大学优秀青年教师资助计划”资助。

作者简介: 张小辉(1985-), 男, 江苏海安人, 东南大学交通学院博士研究生, 研究方向为交通运输规划。

of the metro vehicle system, this paper established a reliability evaluation index system, analyzed some data for the reliability result of the system in stability state. The research results has great references for the metro vehicle operation and maintenance.

Key words: Metro vehicle system, reliability, Monte carlo, failure mode effect and impact analysis.

0 引言

2008 年, 国内拥有运行地铁列车 3 000 多辆, 按照各城市的发展速度, 到 2010 年左右仅上海市的地铁车辆数量就将超过 4 000 多辆^[1], 如此庞大数目车辆的维修工作值得关注。

地铁车辆系统是一个技术难度高、维修专业性强的复杂系统。有效地预测系统设备各失效模式下的失效率是提高维修技术水平的关键问题, 不仅可以减少偶然的系统故障, 降低非计划性的停运时间, 同时可以缩减维修成本。

然而, 一般情况下用结构可靠性直接求解计算各故障模式下的失效率通常难以实现, 地铁系统设备故障的发生表现出一定的随机性。因此, 在基于随机特性的基础上分析研究地铁车辆系统的可靠性对国内轨道交通车辆的运营及维修具有深远的影响。

1 地铁车辆系统失效模式分析

故障模式分析方法主要是研究引起地铁车辆系统功能故障发生的原因。在复杂系统中, 常用的故障分析方法主要有故障树法 (FTA)、失效模式与影响分析的因果方法 (FMECA)、可靠性框图法 (RBD)、因果分析图法、运行危险分析(HAZOP)等^[2]。

1.1 地铁车辆系统的主要构成

地铁车辆系统中的设备元件错综复杂, 并且不同厂家及类型车辆具有差异。根据我国《地铁车辆通用技术条件》(GB/T 7928-2003) 知地铁车辆分 A 型车和 B 型车, 主要差别是轴距和长宽度不同。

一般而言, 地铁车辆系统都包含以下的主要设备单元: 车体、车钩、转向架、主回路、辅助回路、气动回路、空气制动、列车控制、故障诊断设备、总线、空调、照明设备等。为了便于分析研究, 将其归纳总结为五个子系统, 如图 1 所示。

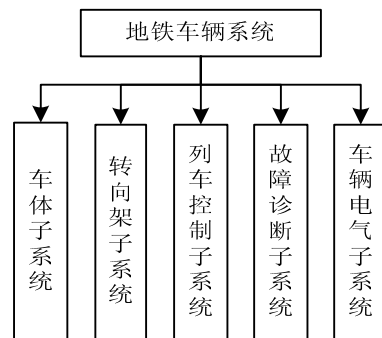


图 1 地铁车辆系统设备子系统

Fig. 1 Sub-system of a metro vehicle system

1.2 地铁车辆系统的失效模式与影响分析

失效模式与影响分析的因果方法 (FMECA) 是分析从零部件所发生的故障与系统之间存在的因果关系。通过对系统各部件的每一种可能潜在的故障模式进行分析, 找出引发故障的原因, 确定故障发生后对系统功能、使用性能及维修等的影响^[3]。针对前面划分的子系统的各个组成设备进行失效模式及影响分析, 结果如表 1 所示。

表 1 地铁车辆系统失效模式与影响分析

Tab. 1 Failure mode and impact analysis of the metro vehicle system

编号	单元	故障模式 (现象)	故障影响
01		车体子系统	
		(1) 车窗玻璃损坏;	
011	壳体	(2) 绝缘层性能下降;	列车损坏运行
		(3) 地板破损	

续表 1

编号	单元	故障模式(现象)	故障影响
012	底架	(1) 变形超限; (2) 运行时断裂	车辆运行中断
013	车门	(1) 到站时门打不开; (2) 离站时门无法关	影响列车正点运行
014	车钩	(1) 运行时车钩断裂	列车脱轨
02 转向架子系统			
021	构架	(1) 运行时断裂	转向架损坏
022	减震器	(1) 缓冲性能下降	影响列车平稳运行
023	车轴	(1) 发生燃轴	列车运行瘫痪
024	轴箱	(1) 发生热轴导致滚轴破裂	列车运行瘫痪
025	齿轮传动装置	(1) 运行时联轴节断裂; (2) 齿轮剥落; (3) 润滑油泄露	列车运行中断
026	弹簧悬挂装置	(1) 弹簧变形/刚度下降; (2) 支架破裂; (3) 空气弹簧泄露	影响列车平稳运行
03 列车控制子系统			
031	车门控制	(1) 硬件故障; (2) 软件故障	影响列车正点运行
032	牵引控制	(1) 硬件故障; (2) 软件故障	列车牵引性能下降
033	空调控制	(1) 硬件故障; (2) 软件故障	影响车内温度
034	电制动控制	(1) 硬件故障; (2) 软件故障	影响列车运行
04 车辆电气子系统			
041	受电弓	(1) 碳棒磨损超限; (2) 运行时落弓	受流质量下降
042	牵引电机	(1) 机械部件故障; (2) 输出性能下降超限	列车动力下降
043	牵引逆变器	(1) 三相模块失效; (2) 斩波模块失效; (3) 制动电阻烧毁	影响列车运营性能
044	主电路	(1) 电缆漏电; (2) 接触器失效; (3) 输入滤波单元故障	影响列车安全
045	辅助回路	(1) 三相模块失效; (2) 继电保护系统失效; (3) 紧急照明失效	控制系统断电
05 故障诊断子系统			
051	监视器	(1) 硬件故障; (2) 软件故障	不能及时发现故障
052	中央故障存储器	(1) 硬件故障; (2) 软件故障	故障诊断失效
053	显示器	(1) 显示出错	故障发布失效

2 改进的蒙特卡洛可靠性评估方法

2.1 蒙特卡洛法基本原理

蒙特卡洛(Monte Carlo)方法是一种基于“随机数”的计算方法,该方法源于美国数学家冯·诺伊曼在第二次世界大战研制原子弹的“曼哈顿计划”。

蒙特卡洛方法的基本思想即利用事件产生的“频率”来近似事件发生的“概率”,它是一种试验的方法,通过大量的试验来获取较高精度的结果。在可控参数比较少情况,蒙特卡洛法不失为一个对研究对象获得认识的良好方法。

蒙特卡洛法通过随机抽样获取对象的属性特征,其抽样仿真算法通常包括序贯、非序贯和伪序贯三种^[4]。序贯算法是重复过程的一种抽样,非序贯算法是随机状态的抽样,而伪序贯抽样法是上述两种算法的通称。

在一些可靠性研究中,已有报道应用直接抽样仿真算法进行可靠性的分析^[5]。而由于地铁车辆系统失效样本数不足以达到直接抽样的要求,因此其故障信息无法通过直接抽样获取。本文通过研究,提出了改进后的蒙特卡洛方法来模拟地铁车辆系统故障发生的随机过程,进而科学地评估其可靠性水平。

2.2 改进的蒙特卡洛算法

蒙特卡洛方法是通过某种概率分布来模拟对象失效的随机过程,在机械电子设备和控制系统使用寿命中,通常使用正态分布和负指数分布分别来描述其寿命的实际过程^[6]。美国军用可靠性手册(MIL-HDBK-338B)中也有应用威布尔分布(Weibull)、伽马分布(Gamma)和离散分布函数模拟设备失效率的例子。

本文根据不同设备的特性采用不同的失效分布函数分别进行失效过程的模拟。下面以正态分布模拟为例,模拟系统设备单元故障状态及故障发生时间的随机动态过程。

2.2.1 基于正态分布的系统状态抽样方法

假设系统设备单元故障发生服从 $N(\lambda, \sigma)$ 分布的正态函数,根据设备单元固有的可靠度或无故障概率,确定此设备单元对应的无故障区间。可靠度越高的设备单元其对应无故障区间越大,通过判断产生的随机数落入无故障状态区间的情况,获得设备单元模拟的随机状态序列。

假设系统由 m 个设备单元构成,用 m 维状态向量 \mathbf{X} 表示系统各设备单元的随机状态:

$$\mathbf{X} = (X_1, X_2, \dots, X_j, \dots, X_m) \quad (1)$$

式中, X_j 为设备单元 j 的随机状态, 当设备单元处于正常运行时, X_j 的值为 1; 当设备处于非正常运行状态时, X_j 的值为 0。

而设备单元 j 的随机状态 X_j 由正态随机数 x_j 产生, 根据设备单元 j 的无故障概率, 确定其无故障区间。通过正态随机数发生器产生 x_j , 判别设备单元在某时刻的运行状态。

若 X_j 表示设备单元 j 的状态, $[-U_j, U_j]$ 为无故障区间, 则

$$X_j = \begin{cases} 0 & x_j > U_j \text{ or } x_j < -U_j \\ 1 & -U_j < x_j < U_j \end{cases} \quad (2)$$

设备单元随机状态 \mathbf{X} 经过状态分析后得到系统随机状态序列, 多次迭代直至其收敛。

2.2.2 基于正态分布的故障时间抽样方法

设备故障持续时间通常无法直接通过非序贯算法获得, 但将各设备单元故障持续时间作为服从正态分布的随机数出现后, 结合系统状态矩阵, 便可获得系统故障持续时间的随机分布序列:

$$\phi(ij) = N(MTTR_j, 1) \quad (i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m) \quad (3)$$

$$\varepsilon_{ij} = \phi(ij) \cdot (1 - X_{ij}) \quad (i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m) \quad (4)$$

ε_{ij} 为设备单元 j 在第 i 个模拟状态下的维修时间, $\phi(ij)$ 为设备单元 j 服从平均维修时间为均值的正态分布, $MTTR$ 为设备单元 j 的平均维修时间 (h), X_{ij} 为设备单元 j 的 0-1 随机状态序列:

$$\delta_i = \max(\varepsilon_{ij}) \quad (i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m) \quad (5)$$

δ_i 为系统在第 i 个模拟状态下的故障维修时间 (h), 即各设备单元在同一状态中故障维修时间的最大值。

系统故障维修时间由各设备单元平均维修时间和系统状态共同决定, 向量 δ 即为系统故障维修时间模拟序列。

2.3 改进的蒙特卡洛法求解步骤

(1) 系统状态抽样

采用改进的 Monte Carlo 算法对地铁车辆系统各设备单元进行随机状态抽样, 在获取设备单元随机状

态后, 判断系统所处状态, 结合故障持续时间仿真算法得到系统故障的完整时序信息。

(2) 系统状态分析

根据地铁车辆系统可靠性评估指标, 对各设备单元不同状态进行系统分析。通过建立各状态的试验函数 (又称指示函数), 反映系统随机状态中的可靠性指标, 其计算公式与可靠性指标相互对应。

(3) 数据收敛性判断

根据大数法则和中心极限定理^{[7]-[8]}, 在抽取足够样本后, 需保证估计值收敛于待求真值, 因此需要进行状态收敛性判断。假设某可靠性指标 R 的试验函数为 $F(\mathbf{X})$, 则 R 的估计值为:

$$\hat{R} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n F(\mathbf{X}_i) \quad (6)$$

\mathbf{X}_i 是系统状态向量 \mathbf{X} 的第 i 个样本值, 则估计值 \hat{R} 的方差为 $V(\hat{R})$:

$$V(\hat{R}) = \frac{V(F(\mathbf{X}_i))}{N} \quad (7)$$

一般地, 引入方差系数作为计算收敛的判断依据:

$$\beta = \frac{\sqrt{V(\hat{R})}}{\hat{R}} = \frac{\sqrt{V(F(\mathbf{X}_i)) / N}}{\hat{R}} \quad (8)$$

通过控制抽样次数 N 来调整方差系数, 判别抽样是否收敛。另外, 同一指标中试验函数的优劣也决定了抽样效果的好坏。

3 地铁车辆系统可靠性评估

3.1 系统可靠性指标

根据车辆故障严重程度, 车辆故障可分为车辆瘫痪和局部故障。从时间的角度评价, 车辆故障又可以发生频率和发生概率两个指标衡量, 因此建立的系统评价指标包含四项: 车辆瘫痪概率 ($TFOP$), 车辆瘫痪频率 ($TFOF$), 局部故障概率 ($PFOP$) 和局部故障频率 ($PFOF$)。计算公式如下所示:

$$TFOP = \frac{1}{N \times T} \sum_{i=1}^N F_{TFOP}(\mathbf{X}_i) \quad (9)$$

$$TFOP = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N F_{TFOF}(X_i) \quad (10)$$

$$PFOP = \frac{1}{N \times T} \sum_{i=1}^N F_{PFOP}(X_i) \quad (11)$$

$$PFOF = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N F_{PFOF}(X_i) \quad (12)$$

公式(9)、(10)、(11)和(12)中, N 为系统随机状态数目; T 为单次模拟试验时间, F_{TFOF} 为车辆瘫痪持续时间; F_{TFOF} 为车辆瘫痪次数; F_{PFOP} 为局部故障持续时间; F_{PFOF} 为局部故障次数; 试验函数由系统随机状态向量 X_i 决定。

3.2 系统参数设定

根据地铁车辆系统的 FMECA 分析, 通过分析各失效模式下的失效概率, 判断系统故障类型, 运用改进的蒙特卡洛算法评估地铁车辆系统的可靠性指标。初始参数如表 2 所示^{[9],[10]}。

表 2 系统设备初始参数

Tab.2 The initial parameters of the equipment system

单元	失效率	服从分布	平均维修时间/h
车体子系统			
壳体	2.78E-03	正态分布	1.5
底架	9.26E-05	正态分布	3
车门	8.96E-02	正态分布	1
车钩	2.78E-04	正态分布	1
转向架子系统			
构架	9.26E-05	正态分布	1.6
减震器	5.56E-05	正态分布	1
车轴	9.26E-05	正态分布	2

续表 2

轴箱	2.78E-04	正态分布	1.4
齿轮传动装置	2.78E-04	正态分布	1
弹簧悬挂装置	9.26E-05	正态分布	1
列车控制子系统			
车门控制	2.78E-03	指数分布	1.5
单元	失效率	服从分布	平均维修时间/h
牵引控制	1.39E-02	指数分布	2
空调控制	2.78E-03	指数分布	1.2
电制动控制	2.78E-03	指数分布	1.5
车辆电气子系统			
受电弓	2.78E-03	指数分布	1.6
牵引电机	2.78E-03	指数分布	2
牵引逆变器	2.78E-02	指数分布	2
主电路	2.78E-03	指数分布	2.5
辅助回路	2.78E-02	指数分布	2
故障诊断子系统			
监视器	2.78E-03	正态分布	1.5
中央故障存储器	2.78E-03	正态分布	2.5
显示器	2.78E-03	正态分布	1

3.3 系统可靠性计算结果

通过将算法编入 MATLAB 仿真程序, 用车辆瘫痪概率($TFOP$)、车辆瘫痪频率($TFOF$)、局部故障概率($PFOP$)和局部故障频率($PFOF$)计算车辆瘫痪和局部故障的可靠性指标 $TFOP$ 、 $TFOF$ 、 $PFOP$ 、 $PFOF$ 及其控制性系数 $V(TFOP)$ 、 $\beta(TFOP)$ 、 $V(TFOF)$ 、 $\beta(TFOF)$ 、 $V(PFOP)$ 、 $\beta(PFOP)$ 、 $V(PFOF)$ 、 $\beta(PFOF)$, 如表 3 所示。表 4 所示为车辆局部故障仿真结果。

当仿真次数达到 55 000 次时, 各指标的 β 参数趋于收敛。仿真结果表明, 在表 2 数据的基础上得出

表 3 车辆瘫痪仿真结果

Tab.3 The simulation results for the total failure of the vehicle system

仿真次数	$TFOP$	$TFOF$	$V(TFOP)$	$V(TFOF)$	$\beta(TFOP)$	$\beta(TFOF)$
10 000	9.24E-04	7.00E-04	1.10E-10	7.00E-12	1.14E-02	3.80E-03
15 000	4.87E-04	4.00E-04	2.39E-11	1.78E-12	1.00E-02	3.30E-03
20 000	3.78E-04	3.33E-04	1.73E-11	1.48E-12	1.10E-02	3.70E-03
25 000	7.83E-04	6.50E-04	2.15E-11	1.62E-12	5.90E-03	2.00E-03
30 000	1.00E-03	8.00E-04	1.41E-11	8.88E-13	3.60E-03	1.20E-03
35 000	5.97E-04	4.86E-04	5.43E-12	3.96E-13	3.90E-03	1.30E-03
40 000	2.60E-03	8.25E-04	7.94E-12	5.15E-13	2.60E-03	8.70E-04
45 000	8.28E-04	6.44E-04	4.87E-12	3.18E-13	2.70E-03	8.75E-04
50 000	6.10E-04	4.80E-04	2.87E-12	1.92E-13	2.80E-03	9.13E-04
55 000	5.35E-04	4.18E-04	2.13E-12	1.38E-13	2.70E-03	8.89E-04

表 4 车辆局部故障仿真结果

Tab.4 Simulation results for partial failure of the vehicle system

仿真次数	$PFOP$	$PFOF$	$V(PFOP)$	$V(PFOF)$	$\beta(PFOP)$	$\beta(PFOF)$
10 000	1.10E-03	9.00E-04	1.30E-10	8.99E-12	1.01E-02	3.30E-03
15 000	9.49E-04	7.33E-04	4.98E-11	3.26E-12	7.40E-03	2.50E-03
20 000	1.90E-03	1.50E-03	1.02E-10	6.51E-12	5.30E-03	1.70E-03
25 000	1.20E-03	8.50E-04	3.83E-11	2.12E-12	5.20E-03	1.70E-03
30 000	1.30E-03	1.00E-03	1.64E-11	1.15E-12	3.20E-03	1.00E-03
35 000	8.22E-04	6.29E-04	8.09E-12	5.13E-13	3.50E-03	1.10E-03
40 000	1.10E-03	8.50E-04	7.95E-12	5.31E-13	2.60E-03	8.57E-04
45 000	9.74E-04	7.33E-04	5.88E-12	3.62E-13	2.50E-03	8.20E-04
50 000	1.10E-03	8.80E-04	5.34E-12	3.52E-13	2.00E-03	6.74E-04
55 000	1.30E-03	9.82E-04	5.23E-12	3.24E-13	1.80E-03	5.80E-04

车辆瘫痪和局部故障的概率分别为 0.053 51%和 0.13%，发生频率为 0.041 818%和 0.098 182%。按每次仿真时间为 3 计算（根据设备寿命与仿真次数设定），则地铁车辆系统可能发生停运的间隔为 7174h，局部故障的间隔时间为 3 056h。

4 结束语

在地铁车辆系统 FMECA 分析的基础上，本文应

用蒙特卡洛仿真方法动态模拟了地铁车辆系统失效过程。针对系统故障模式及故障持续时间，建立了可靠性评估指标，并且实例数据进行了分析计算，得出了稳态下系统的可靠性评价结果。

研究结果对车辆系统运营的安全性及可靠性具有指导性的参考意义，定量地分析了地铁车辆系统在实际运行中的稳定性。同时，研究成果可以衡量关键设备平均维修时间的缩短对系统可靠性的影响。

参考文献

- [1] 严俊. 以可靠性为中心的维修在地铁车辆制动系统中的应用[J]. 公用科技, 2008, 22(4): 30-35.
- [2] E. Zio. Reliability engineering and system safety evaluation [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2009, (94): 5-41.
- [3] Naess. System reliability analysis by enhanced monte carlo simulation[J]. Structural Safety, 2009, (31):349-355.
- [4] Raktim Pal. An optimization based approach for deployment of roadway incident response vehicles with reliability constraints[J]. European Journal of Operational Research, 2009(198): 452-463.
- [5] 何宗华, 汪松滋, 何其光, 城市轨道交通车辆运行与维修[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
- [6] MIL-HDBK-338. Military handbook electronic reliability design handbook [M]. Department of defense, 1998. Department of defense, US, 1998, 5-8
- [7] 金星, 洪延姬, 沈怀荣. 可靠性数据计算及应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.
- [8] 郭永基. 系统可靠性原理和应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 1986
- [9] GB/T50157-2003, 地铁设计规范[S].北京: 中国计划出版社, 2003
- [10] 赵惠祥.城市轨道交通系统的运营安全性与可靠性研究[D]. 上海: 同济大学, 2006

(中文编辑: 刘娉婷)