文章编号：1005-8451（2013）01-0029-04

动车组故障统计与配件寿命分析

王远翔，贾志凯，张惟皎
（中国铁道科学研究院 电子计算技术研究所，北京 100081）

摘 要：动车组管理信息系统已经在全路各运用所使用，本文依托于动车组管理信息系统故障模块，对动车组各部位故障数据进行样本采集，运用统计学理论系统阐述了对于动车组故障规律的建模分析方法和动车组配件寿命的估计方法，从而为动车组的运用和检修提供了可靠的参考依据，为故障模式、影响及危害度分析FMECA奠定基础。

关键词：故障统计；寿命分析；FMECA
中图分类号：U266.2：TP39 **文献标识码：**A

EMUs fault statistics and part life analysis

WANG Yuanxiang, JIA Zhikai, ZHANG Weijiao
(Institute of Computing Technologies, China Academy of Railway Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: The EMUs-MIS had been national-widely used among depots. The paper researched on the sampling via the fault module of the EMUs-MIS, described the modeling analysis method for EMUs fault law and estimating method for EMUs part life by statistics. Thus it provided significant reference on the EMUs operation and maintenance, and paved the way for the FMECA (Failure Mode Effect Criticality Analysis).

Key words: fault statistics; life analysis; Failure Mode Effect Criticality Analysis

机车车辆故障的可靠性分析是根据故障模式、故障机理、故障的影响及其后果的严重程度，分析机车车辆产品的实效规律，估计产品的可靠度或故障间隔时间（MTBF），以便采取措施预防故障的发生，提高动车组运行的可靠性；通过故障分析，确定各种故障的危害程度，从而合理的制定维修计划，采用适宜的维修方式，并在改进设计时考虑运用、维修和后勤的需求。本文通过对动车组各部件的故障发生规律进行样本的抽取、分析和样本分布的数学建模，研究利用统计学定量分析方法对模型进行参数估计，从而估算出动车组部件发生故障的间隔时间或间隔里程MTBF和相应的置信区间，以确定动车组部件运行的可靠度。

1 样本抽取

寿命试验往往是截尾试验，即只要试验进行到受试产品中的部分故障就停止试验。截尾寿命试验又分为两类：（1）试验到事先规定的时间（或里程）就停止试验，称为定时截尾试验；（2）试验到故障数达到预先的规定数就停止试验，称为定数截尾试验。另外，根据试验中的故障产品是否允许替换，又分为无替换试验和有替换试验。从而可以组成4种截尾寿命试验，即无替换定数截尾试验，有替换定数截尾试验，无替换定时截尾试验，有替换定时截尾试验。

动车组管理信息系统的故障模块中的故障记录为动车组运行和维修时的现场数据。由于发生故障的动车组要及时入库维修以维持后续的安全运行，发生故障的零部件会及时进行修理或替换，所以故障模块中的故障数据都是基于对动车组发生故障的零部件进行有替换试验的。因此，现场的故障数据都是有替换试验的数据。至于定时还是定数的选择，要取决于样本数据的取得方式。

2 样本分布

故障的规律和性质随着发生故障的部位变化而变化，不同的故障部位所发生的故障应用不同的数学模型(即下表中的分布类型)来建模和描述，具体参见表1：

收稿日期：2012-11-12
基金项目：铁道部科技研究开发计划（2011J002）。
作者简介：王远翔，助理研究员；贾志凯，副研究员。

表1 故障种类与分布类型对应表

分布类型	应用范围
对数正态分布	寿命现象事件集中在端部时的不对称情况，且观测值的离散程度很大，例如：电机绕组绝缘，半导体器件，硅晶体管，锗晶体管，风扇叶片，车体结构，金属疲劳等。
威布尔分布	适用于有薄弱环节的模型。机械中的疲劳强度，磨损寿命，腐蚀寿命等。例如：滚动轴承，传动齿轮箱，电动机，发电机，电缆，蓄电池，继电器，开关，电子管，电位器，电阻，电容等许多机械，电气原件等寿命及材料疲劳等。
指数分布	系统、部件等的寿命。对于元件，适用于偶然失效与使用时间无关的情况。常常适用于电子设备和电子元件，多个部件组成的复杂系统，某些软件的故障模型；具有恒定故障率的零部件，经试验并进行定期维修的部件。

3 寿命估计

假设 n 为部件数，r 为故障数，t_i 为故障发生时的时间或里程，t_0 为初始时间或里程，t 为截取的时间或里程。有了样本的数据和样本的分布模型，就可以对模型参数进行估计和可靠性估算。依据初步确定的样本分布，按如下算法进行估计：

3.1 有替换定数截尾

3.1.1 指数分布

平均寿命估计：

$$\hat{\theta}=\frac{n(t_r-t_0)}{r} \tag{1}$$

置信度为 $1-\alpha$ 的平均寿命双侧区间估计：

$$\left(\hat{\theta}\frac{2r}{\chi^2_{1-\alpha 2}(2r)},\hat{\theta}\frac{2r}{\chi^2_{\alpha 2}(2r)}\right) \tag{2}$$

3.1.2 威布尔分布

将 t_i 归一化，即 $t_i=t_i-t_0$

威布尔分布的分布函数为：

$$F(t_i)=1-e^{-\left(\frac{t_i}{\eta}\right)^m} \tag{3}$$

$$L(m)=\frac{\sum_{i=1}^{r}t_i^m\ln(t_i)+(n-r)t_r^m\ln(t_r)}{\sum_{i=1}^{r}t_i^m+(n-r)t_r^m}-\frac{1}{m}-\frac{1}{r}\sum_{i=1}^{r}\ln(t_i) \tag{4}$$

$$m_1=m_0-\frac{L(m_0)}{\frac{d(L)}{d(m)}\Big|_{m=m_0}} \tag{5}$$

$$\frac{L(m_0)}{\frac{d(L)}{d(m)}\Big|_{m=m_0}}>\varepsilon \tag{6}$$

$$\frac{L(m_0)}{\frac{d(L)}{d(m)}\Big|_{m=m_0}}<\varepsilon \tag{7}$$

用极大似然法估计威布尔分布函数（3）中的参数 m 和 η 的步骤如下：

第 1 步：在式（4）中取一个 m 的初始值 m_0。

第 2 步：利用式（5）计算出 m_1。

第 3 步：如果式（6）成立，则将 m_1 作为 m_0 重新带入式（5），回到第 2 步；

如果式（7）成立，则求出的 m_1 即为 m 的估计 $\hat{m}$。

η 的估计值为：

$$\hat{\eta}=\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}t_i^{\hat{m}}\right)^{\frac{1}{\hat{m}}} \tag{8}$$

可靠度为 R 的可靠寿命的估计为：

$$\hat{t}_R=\hat{\eta}\left[\ln\left(\frac{1}{R}\right)\right]^{\frac{1}{\hat{m}}} \tag{9}$$

置信度为 $1-\alpha$ 的可靠寿命的区间估计下限为：

$$t_{RL}=Q_1\,\hat{t}_R \tag{10}$$

其中：

$$Q_1=e^{(\delta_1+m_1)/\hat{m}} \tag{11}$$

$$\delta_1=\frac{-A_6(N_\alpha)^2-rm_1+N_\alpha\sqrt{(A_6^2-A_4A_5)(N_\alpha)^2+rA_4+2rm_1A_6+rA_5m_1^2}}{\left(r-(N_\alpha)^2A_5\right)} \tag{12}$$

$$m_1=\ln(-\ln(1-\alpha)) \tag{13}$$

$$A_4=0.49\frac{r}{n}-0.134+0.622\frac{n}{r} \tag{14}$$

$$A_5=0.2445\left(1.78-\frac{r}{n}\right)\left(2.25+\frac{r}{n}\right) \tag{15}$$

$$A_6=0.029-1.083\ln\left(1.325\frac{r}{n}\right) \tag{16}$$

3.2 有替换定时截尾

3.2.1 指数分布

平均寿命估计：

$$\hat{\theta}=\frac{n(t-t_0)}{r} \tag{18}$$

置信度为 $1-\alpha$ 的平均寿命双侧区间估计：

$$\left(\hat{\theta}\frac{2r}{\chi^2_{1-\alpha 2}(2r+2)},\hat{\theta}\frac{2r}{\chi^2_{\alpha 2}(2r)}\right) \tag{19}$$

3.2.2　威布尔分布

将 t_i 归一化，即 $t_i=t_i-t_0$ 将 归一化，$t=t-t_0$

威布尔分布的分布函数为：

$$F(t_i)=1-e^{-\left(\frac{t_i}{\eta}\right)^m} \tag{20}$$

$$L(m)=\frac{\sum_{i=1}^{r}t_i^m\ln(t_i)+(n-r)t^m\ln(t)}{\sum_{i=1}^{r}t_i^m+(n-r)t^m}-\frac{1}{m}-\frac{1}{r}\sum_{i=1}^{r}\ln(t_i) \tag{21}$$

$$m_1=m_0-\frac{L(m_0)}{\frac{d(L)}{d(m)}\Big|_{m=m_0}} \tag{22}$$

$$\frac{L(m_0)}{\frac{d(L)}{d(m)}\Big|_{m=m_0}}>\varepsilon \tag{23}$$

$$\frac{L(m_0)}{\frac{d(L)}{d(m)}\Big|_{m=m_0}}<\varepsilon \tag{24}$$

用极大似然法估计威布尔分布函数式（20）中的参数 m 和 η 的步骤如下：

第 1 步：在式（21）中取一个 m 的初始值 m_0。

第 2 步：利用式（22）计算出 m_1。

第 3 步：如果式（23）成立，则将 m_1 作为 m_0 重新带入式（22），回到第 2 步；如果式（24）成立，则求出的 m_1 即为 m 的估计 $\hat{m}$。

η 的估计值为：

$$\hat{\eta}=\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}t_i^{\hat{m}}\right)^{\frac{1}{\hat{m}}} \tag{25}$$

可靠度为 R 的可靠寿命的估计为：

$$\hat{t}_R=\hat{\eta}\left[\ln\left(\frac{1}{R}\right)\right]^{\frac{1}{\hat{m}}} \tag{26}$$

置信度为 $1-\alpha$ 的可靠寿命的区间估计下限为：

$$t_{RL}=Q_1\,\hat{t}_R \tag{27}$$

其中

$$Q_1=e^{(\delta_1+m_1)\,\hat{m}} \tag{28}$$

$$\delta_1=\frac{-A_6(N_\alpha)^2-rm_1+N_\alpha\sqrt{\left(A_6^{\,2}-A_4A_5\right)(N_\alpha)^2+rA_4+2rm_1A_6+rA_5m_1^{\,2}}}{\left(r-(N_\alpha)^2A_5\right)} \tag{29}$$

$$m_1=\ln\left(-\ln(1-\alpha)\right) \tag{30}$$

$$A_4=0.49\frac{r}{n}-0.134+0.622\frac{n}{r} \tag{31}$$

$$A_5=0.2445\left(1.78-\frac{r}{n}\right)\left(2.25+\frac{r}{n}\right) \tag{32}$$

$$A_6=0.029-1.083\ln\left(1.325\frac{r}{n}\right) \tag{33}$$

4　系统实现

动车组故障统计与配件寿命分析的计算工作由动车组管理信息系统故障管理子系统的相关功能实现。故障管理子系统是由 .net 实现的用户交互系统，其功能图如图 1 所示。

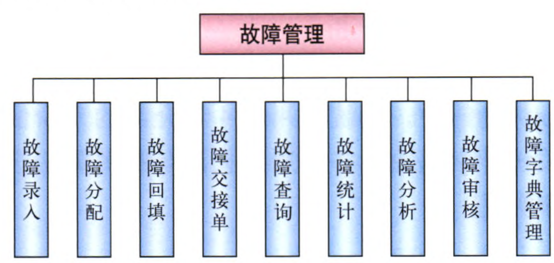

图1　故障管理子系统功能图

其中，样本采集工作在故障录入功能中进行，故障录入功能以故障发生部位、故障发生时间和故障发生的动车组号作为信息项，根据动车组履历相关信息，查询出动车组发生故障时的走行里程。故障基本信息以记录故障发生时间和故障发生的走行里程为样本值。作为故障分析功能的一部分，配件寿命分析基于故障样本的时间和走行里程数据，对数据进行建模和统计分析，最后得出同一动车组部位上相关故障的统计规律。

4.1　样本采集

样本采集工作由故障录入功能实现，故障录入功能将动车组故障归于 13 大类，包括：车体，车端连接系统，转向架，牵引供电系统，辅助电气系统，供风及空气制动系统，车内环境控制，网络控制系统，运行安全控制系统，旅客信息系统，给排水及卫生系统，客室设施，司机室。

故障分类将样本数据分门别类，使得后续的数据建模和统计分析工作得以针对不同类别和部位的故障进行。同时，故障录入功能记录故障发生时间和故障发生的动车组号，根据动车组履历相关信息，查询出动车

组发生故障时的走行里程并做记录，如图 2 所示。样本的样本值以故障的发生时间和故障发生时的走行里程为基准。

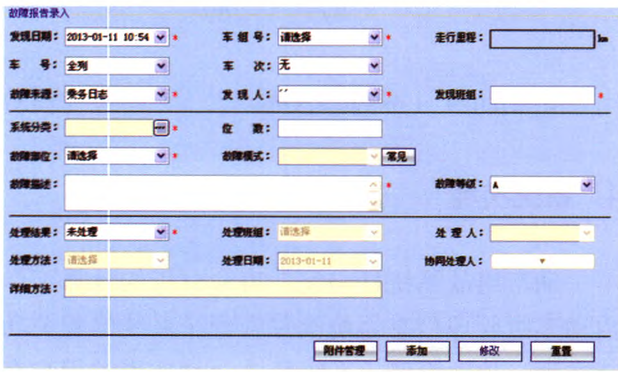

图2 故障录入功能界面

4.2 数据建模与分析

数据建模与分析工作由 .net 实现并集成至故障分析功能中，系统采用第 4 节介绍的寿命估计相关统计学理论，并采用迭代法等相关算法进行程序实现。

5 数据分析

计算故障分类中部位为“内部门”的部件的寿命，以 CRH2C 型车为例，一个类型为“车内设施”，部位为“内部门”的部件有 n=32 个。然后从该动车组一个初始的里程数 t_0，或一个初始的时间 t_0 开始记录连续发生 r=74 次，类型为“车内设施”，部位为“内部门”的故障记录，记下每次故障的里程数，或时间 t, i=1, 2, 3, …, r。样本值就由 $t_i - t_0$ 得出。此种取样方法为有替换定数截尾；也可以从该动车组一个初始的里程数 t_0，或一个初始的时间 t_0 开始记录 t 时间内所有故障数据发生时的动车组里程数或时间 t_i，同时也假设在 t_0 到 t 的区间，共发生故障 r 次 （t_i<t, i=1, 2, 3, …, r），然后样本值同样由 求得，此种取样方法为有替换定时截尾。

本次试验为有替换定数截尾实验，以 CRH2C 的一个动车组为样本抽取对象，考虑动车组内部门部位上的故障。CRH2C 的动车组有“内部门”的部件有 n=32 个，动车组管理信息系统内记录的该动车组自运行开始时，“内部门”故障有 r=74 个，初始里程 t_0=31 061 km，末尾里程 t74=304 047 km。内部门属系统级部件，故采用指数分布对其建模，并进行参数估计结果如下：

内部门发生故障的平均里程数为：

$$\hat{\theta}=\frac{n(t_r-t_0)}{r}=118\ 045.8\ \text{km} \tag{1}$$

置信度为 95% 的平均里程双侧区间估计：

$$(95\ 170.69\ \text{km},\ 150\ 335.7\ \text{km}) \tag{2}$$

根据如上的分析结果，可以判断 2C 型动车组平均每隔 11 万多 km 发生内部门的故障，据保守估计，发生内部门的故障最小里程为 9 万 5 千 km，置信度为 95%。因此，作为对故障的预防以及提高动车组运用可靠性的解决方案，可以在动车组进行 9 万 km 一次规格的检修作业中安排整车内部门的例行检修作业项目。

如上样本的采集如果采用的是动车组内部门发生各故障的时间点，经过同样的分析，也可以获得内部门发生故障的平均时间，以及平均使用时间双侧区间估计。

6 结束语

通过以上推理和分析可以看到，利用统计学定量分析原理进行的动车组配件寿命分析可以有效的预测动车组各配件的使用寿命，给出统计学意义上的寿命（使用时间或使用里程）估计，同时给出估计的置信区间，对动车组的各级别检修计划编制以及作业项目安排提供了重要参考依据。

参考文献：

[1] 董锡明 . 高速动车组工作原理与结构特点 [M]. 北京：中国铁道出版社，2007.

[2] 董锡明 . 机车车辆运用可靠性工程 [M]. 北京：中国铁道出版社，2005.

[3] 董锡明 . 现代高速列车技术 [M]. 北京：中国铁道出版社，2006.

[4] 铁道部运输局 . 动车组管理信息系统总体方案 [R]. 北京：铁道部运输局，2009.

[5] 盛　骤，谢式千，潘承毅 . 概率论与数理统计 [M]. 北京：高等教育出版社，2010.

[6] 刘国俊，陈景鹏 . 威布尔分布在寿命分析中的应用 [J]. 装备指挥技术学院学报，2003，14（6）：65-67.

责任编辑　徐侃春