

基于样本的 MTTR 验证方法及案例

朱爱凤 盛银胜 张明宇 张桢

中车南京浦镇车辆有限公司，江苏南京，210031；

摘要：MTTR 是平均修复时间（Mean Time to Repair）的简称。目前，在城市轨道车辆技术规范中常见有 MTTR 指标及验证的要求，也有部分要求 MTTRmaxc 的指标分析或验证。由于轨道车辆系统寿命期长、复杂性高的特点，MTTR 及 MTTRmaxc 的常规验证不易做到，本文着重于介绍基于样本的验证方法，通过样本数据进行演示，为开展此类验证提供一定参考。

关键词：MTTR；验证；样本

DOI：10. 64216/3080-1508. 25. 06. 043

近年来，国内城市轨道交通车辆的用户普遍开始重视和提出车辆的维修时间均值指标及其验证的要求，这是因为车辆维修时间均值的长短直接关系着车辆的可用性及车辆的运营，从而直接或间接的影响着用户满意度及车辆运维成本。

在车辆技术规范中提出的维修时间均值指标通常以 MTTR 的数值要求，然而由于地铁车辆寿命期长、系统复杂度高、数据量大及收集难度高的特点，MTTR 验证不可能做到统计所有故障的修复时间来进行常规验证，只能通过阶段性样本或抽样的方式进行科学评估。本文依据统计学理论，着重于介绍一种基于统计抽样的 MTTR 验证方法，通过建立置信区间模型和假设检验框架，解决传统全样本验证效率低下的问题，为设备可维护性分析管理提供新思路，结合车辆设备现场的阶段性数据，进行维修时间均值的评估，验证了该方法在 95%置信水

平的有效性，评估方法和判别依据可以作为验证各分析对象 MTTR 指标是否满足要求的理论参照。

另外，鉴于车辆技术规范中经常出现 MTTRmaxc 分析指标要求，本文也对 MTTRmaxc 验证方法进行了简单介绍，MTTRmaxc 表示故障修复所允许或实际发生的最大时间，用于衡量糟糕情况下的修复时长，MTTRmaxc 中的下拉字母 C 表示置信度，比如定义为 95%，就是表示 95% 置信度时的最大 MTTR 数值。

1 MTTR 验证方法的选择

参考标准^[1]的定义，MTTR 验证可以采用表 1 中罗列的两种方法，选择验证方法的基本依据是根据分析对象维修时间的分布类型而定，对复杂的地铁车辆而言，实践表明，维修时间在大多数情况下都符合对数正态分布，通常可选择“验证 A”，如果假设维修时间的分布未知，也可选择“验证 B”。

表 1 验证方法的选择

编号	检验参数	分布假设	最小样本量	作业选择	规定的参量
验证 A	维修时间平均值	对数正态， 总体对数方差 σ^2 已知	≥ 30	自然或模拟故障	μ_0 、 μ_1 、 α 、 β
验证 B	维修时间平均值	分布未知， 总体方差 d_2 已知	≥ 30	自然或模拟故障	μ_0 、 μ_1 、 α 、 β

上表中： μ_0 —可接受值、 μ_1 —不可接受值、 α —承制方风险概率、 β —用户风险概率

2 现车 MTTR 均值评估

2.1 评估假设

目前地铁车辆技术规范中规定的 MTTR 常见为 45 分钟，本文就以“MTTR=45 分钟”作为评估目标假设，将

其定义为不可接受值。按照表 1 中的验证方法，并参考标准^[2]中关于鉴别比（ μ_1/μ_0 ）和风险概率的定义，合理定义表 1 中规定的 4 个参量数值为： μ_0 为 30 分钟、 μ_1 为 45 分钟、 α 为 0.05、 β 为 0.05。

2.2 维修时间数据

以苏州地铁 1 号线项目车队 2013 年度客室车门故障的修复时间（参见表 2）为例。

表 2 客室车门故障修复时间登记

编号	故障件名称	故障原因/现象	发生数量（起）	维修方式	修复时间（分钟/个）
1	门控单元 EDCU	软件报错	9	现场重刷软件	12、12、14、15、16、14、13、14、15
2	门电机	功能失效	1	更换	62
3	门页密封条	损坏或密封不良	3	更换	105、116、92

4	钢丝绳（紧急解锁用）	断开或松动	2	更换、调节	55、38
5	门机构（防夹无故启动）	门页变形、门参数偏离	8	调节	26、19、20、25、18、32、25、22
6	承载驱动机构	卡滞、异响	3	调节、润滑	25、32、28
7	摆臂组件	卡滞、异响	2	调节、润滑	17、22
8	平衡轮组件	异响、功能不良	3	更换、润滑	45、60、49
9	下档销组件	松动、掉落	4	更换、调节	20、22、25、22
10	门页中空玻璃	破损	1	更换	146

表 2 中登记了一共有 36 个自然故障，提取故障修复时间（单位：分钟）的观测值分别为：12、12、14、15、16、14、13、14、15、62、105、116、92、55、38、26、19、20、25、18、32、25、22、25、32、28、17、22、45、60、49、20、22、25、22、146。

2.3 验证样本量

用来验证的样本量不是随便定义的，最低需求的样本量需通过公式测算获得，实际验证的样本量不能小于测算出的最低样本量，当测算结果 < 30 时，按照表 1 中“最小样本量”定义，实际样本量至少取 30。

2.3.1 验证 A 的样本量测算

表 3 常用的正态分布分位数表

p	0.01	0.05	0.10	0.15	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80	0.85	0.90	0.95	0.99
Zp	-2.33	-1.65	-1.28	-1.04	-0.84	-0.52	-0.25	0	0.25	0.52	0.84	1.04	1.28	1.65	2.33

根据以上数据，计算 n：

$$n = \left(\frac{1.65 + 1.65}{\ln 45 - \ln 30} \right)^2 * 0.5 = 33.12 \approx 34$$

实际样本量 36 大于需求的最低样本数 34，可以满足验证 A 样本的要求数量。

2.3.2 验证 B 的样本量测算

验证 B，以分布未知计算，样本量 n 计算的公式如下：

$$n = \left(\frac{Z_{1-\alpha} + Z_{1-\beta}}{\mu_1 - \mu_0} \right)^2 d^2$$

公式中，Z_{1-α}、Z_{1-β} 同验证 A 为正态分布分位数，Z_{1-α} = Z_{1-β} = Z_{0.95} = 1.65，根据以往经验和估计，总体方差 d² 定为 600，计算结果同样需归整为较大整数。

根据以上数据，计算 n：

$$n = \left(\frac{1.65 + 1.65}{45 - 30} \right)^2 * 600 = 29.04 \approx 30$$

实际样本量 36 大于需求的最低样本数 30，可以满足验证 B 样本的要求数量。

2.4 判别规则

2.4.1 验证 A 的接受条件与结果

验证 A 中：当所有 36 个样本修复时间的自然对数均值 $\bar{Y}$ 满足下列公式时，则认为该车门设备符合维修性

验证 A，以满足对数正态分布计算，样本量 n 计算的公式如下：

$$n = \left(\frac{Z_{1-\alpha} + Z_{1-\beta}}{\ln \mu_1 - \ln \mu_0} \right)^2 \sigma^2$$

式中：

Z_{1-α}、Z_{1-β} — 正态分布分位数

Z_{1-α}、Z_{1-β} 可以通过查“正态分布分位数表”获得结果，Z_{1-α} = Z_{1-β} = Z_{0.95} = 1.65，根据以往经验和估计，总体对数方差 σ² 定为 0.5，计算结果应归整为较大整数。常用的正态分布分位数表如表 3 所示：

要求（MTTR ≤ 45 分钟）而接受，否则拒绝。公式如下：

$$\bar{Y} \leq \ln \mu_0 - \frac{1}{2} \sigma^2 + Z_{1-\alpha} \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

$$\bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln X_i$$

带入各参数和样本量数据，计算过程及结果如下：

$$\ln \mu_0 - \frac{1}{2} \sigma^2 + Z_{1-\alpha} \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = \ln 30 - \frac{1}{2} \times 0.5 + 1.65 \times \frac{\sqrt{0.5}}{\sqrt{36}} = 3.345$$

$$\bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln X_i = (\ln 12 + \ln 12 + \ln 14 + \dots + \ln 146) \div 36 = 3.321$$

结果：3.321 < 3.345，符合接受条件，应予接受。

以上的接受判别计算是以“总体对数方差 σ²”确定下的结果，当有足够的验证样本量时，可以以“样本对数方差 S²”代替“总体对数方差 σ²”进行二次检验，使接受条件更充分。首先计算出 36 个样本的 S²，其公式及计算结果如下：

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\ln X_i - \bar{Y})^2 = [(\ln 12 - 3.321)^2 + (\ln 12 - 3.321)^2 + (\ln 14 - 3.321)^2 + \dots + (\ln 146 - 3.321)^2] \div (36 - 1)$$

=0.455

把 S2 代替 σ^2 ，可以计算出：

$$\ln \mu_0 - \frac{1}{2} S^2 + Z_{1-\alpha} \frac{S}{\sqrt{n}} = \ln 30 - \frac{1}{2} \times 0.455 + 1.65 \times \frac{\sqrt{0.455}}{\sqrt{36}} = 3.359$$

结果：3.321 < 3.359，同样符合接受条件，应予接受。

上述评估中，虽然该客室车门的维修时间均值符合了验证接受条件，但是也仅仅是勉强通过，这点可从评估结果比较间看出，该车门最终比较的两个数值非常相近，说明其故障的随机性抽样将会对评估结果造成明显影响，应该以此敦促该车门供应商进一步改善其维修性指标。

2.4.2 验证 B 的接受条件与结果

验证 B 中：与验证 A 的差别在于用自然均值 $\bar{X}$ 进行可接受判别，公式如下：

$$\bar{X} \leq \mu_0 + Z_{1-\alpha} \frac{d}{\sqrt{n}}$$

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$$

带入相应数据，计算过程及结果如下：

$$\mu_0 + Z_{1-\alpha} \frac{d}{\sqrt{n}} = 30 + 1.65 \times \frac{\sqrt{600}}{\sqrt{36}} = 36.715$$

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i = (12 + 12 + 14 + \dots + 146) \div 36 = 35.917$$

结果：35.917 < 36.715，符合接受条件，应予接受。

以上的接受判别计算是以“总体方差 d2”确定的条件下的结果，同验证 A 一样，也可以用样本方差 S2 代替总体方差 d2 进行检验，其公式及计算结果如下：

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2$$

$$= [(12-35.917)^2 + (12-35.917)^2 + (14-35.917)^2 + \dots + (146-35.917)^2] \div (36-1) = 1017.964$$

把 S2 代替 d2，可以计算出：

$$\mu_0 + Z_{1-\alpha} \frac{d}{\sqrt{n}} = 30 + 1.65 \times \frac{\sqrt{1017.964}}{\sqrt{36}} = 38.747$$

结果：35.917 < 38.747，同样符合接受条件，应予接受。

2.5 车辆抽样的思路

如果针对整列车进行 MTTR 验证，验证方法是一致的，但是像上述客室车门一样长期收集数据非常困难，抽样验证是更好的选择，当然抽样的方法、样本选择及样本量确定都应该获得用户的认可。

常见的抽样方法有：随机抽样、整群抽样、系统抽样、分层抽样，考虑到整列车庞大复杂的特点，可以系统抽样与分层抽样组合考虑，能获得较好效果。思路如下：把整车按主要功能分解成子系统，如车门系统、空调系统、转向架系统、内装系统……对各系统分别研究，通过以往现场数据和供应商提供数据的分析和评估，在系统内部进行维修项时间的分层；抽样时，从各子系统中抽取处于中间位层次的一些维修项作为试验样本，各系统样本量的分配可以根据系统故障率的比例确定。

3 MTTRmaxc 验证方法介绍

本文介绍的 MTTRmaxc（可简称为 M' maxc）验证方法通常应用于纠正性维护（故障修）置信度的最大维修时间验证，也可拓展应用于预防性维护（周期性维护）置信度的最大维修时间验证。

本方法基于数据统计学中心极限定理，适用于维护时间潜在分布为对数正态分布的情况，但无需维护时间方差（d）的信息，因此，只要验证对象的维护时间样本量足够（要求最小样本量为 30 个，数量越多越好），物料基础分布的形式如何，它都可以应用。

标准^[4]定义了测算公式，公式中 MTTRmaxc 被简称为 M' maxc：

$$M'_{\max c} = \text{Antilog} \left[\frac{\sum_{i=1}^{n_c} \ln X_{c_i}}{n_c} + \Psi \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_c} (\ln X_{c_i})^2 - \left(\sum_{i=1}^{n_c} \ln X_{c_i} \right)^2 / n_c}{n_c - 1}} \right]$$

其中：

Xci 表示各个样本的维修时间；

nc 表示样本量；

Ψ 表示置信度百分位；

基于这种方法，作者曾对多个地铁项目同一供方的车门 EDCU 控制单元故障进行样本统计，对检修时间进行了 MTTRmaxc 测算，现将样本、数据过程及 MTTRmaxc 结果示意如下：

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
样本 序号	平均维修时 间 (X) (分钟)	自然对数 Ln(X)	自然对数的 平方 [Ln(X)]²	自然对数的和 ΣLn(X)	自然对数的平方和 Σ[Ln(X)]²	样本量n	[ΣLn(X)]/n	{[ΣLn(X)]²-[ΣLn(X)]²/n}/(n-1) 的开方	ψ (95%分 位)	MTTRmaxc结果 (分钟)
1	26	3.26	10.62	115.22	383.04	34.00	3.39	0.51	1.65	62.97
2	14	2.64	6.96							
3	21	3.04	9.27							
4	30	3.40	11.57							
5	70	4.25	18.05							
6	69	4.23	17.93							
7	20	3.00	8.97							
8	21	3.04	9.27							
9	18	2.89	8.35							
10	65	4.17	17.43							
11	16	2.77	7.69							
12	35	3.56	12.64							
13	26	3.26	10.62							
14	16	2.77	7.69							
15	40	3.69	13.61							
16	28	3.33	11.10							
17	42	3.74	13.97							
18	33	3.50	12.23							
19	19	2.94	8.67							
20	19	2.94	8.67							
21	43	3.76	14.15							
22	54	3.99	15.91							
23	12	2.48	6.17							
24	18	2.89	8.35							
25	13	2.56	6.58							
26	26	3.26	10.62							
27	10	2.30	5.30							
28	50	3.91	15.30							
29	21	3.04	9.27							
30	31	3.43	11.79							
31	42	3.74	13.97							
32	30	3.40	11.57							
33	46	3.83	14.66							
34	24	3.18	10.10							

本表包含了样本数量、样本数据输入、基于公式分解的数据计算直至输出MTTRmaxc结果的过程，把复杂的公式用EXCEL表单进行简单的切分，这种数据处理方式也是值得借鉴的；第10列的符号“Ψ”与本文2.3.1章节的正态分位表的“Zp”一致，只是不同的符号表示，本计算取值95%分位，表示MTTRmaxc是95%置信度的结果，在实际工作中，可以根据产品合同要求的置信度取值。

从上表可以看出，车门 EDCU 样本量为 34 个，符合样本量大于等于 30 个的要求，选择置信度 95%分位，表单中对公式过程进行了详细分解，过程数据带小数位结果的都保留小数点后两位的整理。基于表单样本的 MTTRmaxc 结果为 62.97 分钟。

4 结语

本文主要介绍了两种基于样本的 MTTR 验证方法，并以实际数据进行全过程的演示，考虑到各类作业时间分布的相似性，两种评估方法还可以拓展应用于验证预防性维修时间、故障诊断时间、维修工时、加工时间等

的评估。另外，本文还介绍了 MTTRmaxc 的验证方法说明及计算公式，并且给出了样本过程案例。上述方法及样本过程案例可为开展此类验证提供借鉴与参考价值。

参考文献

[1]GJB 2072-1994，维修性验证与评定标准[S].
[2]GJB 899A-2009，可靠性鉴定和验收验证[S].
[3]GB 3187-1994，可靠性维修性术语[S].
[4]MIL-HDBK-470A-1997，设计开发可维护性的产品和系统[S].