

轮式装载机可靠性加速试验加速系数的研究

Study on The Acceleration Factor of Wheel Loader Accelerated Life Test

机械科学研究院工程机械军用改装车试验场 田志成

摘要 本文首次对国内使用的轮式装载机可靠性加速试验方法及加速系数进行了研究。通过对可修复系统装载机可靠性故障特点的分析,指出不能用单一的疲劳损伤理论或磨损理论来解释具有多种故障模式的复杂的可修复系统的故障规律。作者认为用随机过程理论来研究它的可靠性规律更为合理。应用随机过程理论对不同条件下获得的大量可靠性试验数据进行了分析和处理,计算出了加速系数,获得了较好的结果。本文的研究对确定加速系数、找出加速试验方法的不足、提高国产装载机可靠性试验水平和改进试验方法具有重要意义。

关键词 轮式装载机 可靠性 加速试验(可靠性强化试验) 加速系数

1 前言

轮式装载机是工程机械中使用最广泛的铲土运输机械之一,它主要用于公路、铁路、港口、煤矿等工程中,对松散物料进行铲装和短距离运输,主要型号为 ZL30、ZL40 和 ZL50,年产销量为 4 万台左右,生产企业约 60 余家。近几年,随着国家经济建设的发展,装载机的需求量越来越大,新产品开发的速度越来越快,装载机的可靠性问题也越来越重要。因此研究装载机可靠性加速试验方法和加速系数,对于缩短试验周期,提高装载机可靠性显的非常重要。

对装载机而言,可靠性试验方法主要有工业性试验和可靠性加速试验两种。工业性试验指的是现场使用试验,该试验周期长,费用高,而试验作业工况与机器实际使用工况一致;可靠性加速试验是指装载机在试验场苛刻的试验道路上行驶或苛刻的工况下作业。相对讲,可靠性加速试验具有试验周期短,试验费用低的特点。装载机可靠性加速试验是从 1990 年开始的,即目前国内装载机

行业普遍采用的《轮胎式装载机可靠性加速试验规范》标准所规定的试验方法。现在每年有几十台装载机用可靠性加速试验的方法进行定型产品的可靠性试验和新产品的工业性试验。但是,该标准是参照前苏联标准经试验对比后形成的,对可靠性加速试验方法和加速系数没有进行过科学的论证。经过十余年的应用,也暴露了它的不足,需要对其多年的试验结果和用户现场使用结果进行对比分析,计算出加速系数,为改进试验方法提供一定的依据。

轮式装载机可靠性加速试验加速系数的研究对于制定和完善轮式装载机可靠性加速试验方法和规范,设计加速试验场,缩短试验周期,降低试验成本,加快国内装载机新产品研制开发速度,提高产品的质量与可靠性将发挥重要作用。其次,轮式装载机可靠性加速试验加速系数的研究方法揭示了轮式装载机这一可修复系统故障发生的规律,对于制定装载机的维修、保养规程,提高其可靠性具有重要的理论价值。

2 试验数据和实际使用数据的采集

根据调查,获得了多台装载机分别在可靠性加速试验场和用户使用过程中的可靠性数据。250h 加速试验数据和 1000h 可靠性试验数据来自机械工业工程机械军用改装车试验场(国家工程机械质量监督检验中心)的试验报告,实际使用数据来自国内两大装载机生产骨干企业的三包记录。共采集了 100 台装载机的故障数据,其中 250h 加速试验 29 台,1000h 可靠性试验 21 台,企业三包记录 50 台。所有数据均为近三年的试验结果或三包记录。所有数据均采用随机抽样的办法获得,例如,三包记录在一年中的每个月的一号记录中随机抽取获得。在装载机配置上,主要配套件如发动机、变速箱、驱动桥、泵和阀等基本相同,主要结构相同或相近。

250h 加速试验数据采用了国内具有代表性的企业和产品。其中 ZL30 型装载机选用了九个企业的 11 台产品;ZL40 型装载机选用了八个企业的 10 台产品;ZL50 型装载机选用了五个企业的 8 台产品。

试验场跟踪 1000h 可靠性试验数据采用了国内十三家企业的产品。其中 ZL30 型装载机选用了三个企业的 4 台产品;ZL40 型装载机选用了六个企业的 6 台产品;ZL50 型装载机选用了十个企业的 11 台产品。具有广泛的代表性。

用户 1000h 实际使用数据选用了装载机骨干企业 A 和企业 B 近几年的三包记录,共计 50 台产品。其中 ZL30 装载机 9 台,ZL40 装载机 10 台,ZL50 装载机 31 台。

这些数据具有以下特征,以国产典型机型 ZL30、ZL40 和 ZL50 装载机为研究对象;可靠性加速试验数据和 1000h 可靠性跟踪试验数据摘自机械工业工程机械军用改装车试验场的试验报告;用户使用数据来自企业的三包期记录,它们都是定时截尾试验。采集数据为故障发生时刻、故障发生模式和发生

部位(限于篇幅,具体数据已删节)。

3 试验结果与实际使用结果的对比分析

国内使用的可靠性加速试验方法主要依据行业标准《轮胎式装载机可靠性加速试验规范》和《轮胎式装载机可靠性试验方法、故障分类及评定》进行,前者分解了装载机作业过程中的典型工况,即铲装作业和行驶作业工况,然后分别进行加速试验,两种工况交替进行,最后对整机可靠性作出评价。加速试验的试验工况条件,由于标准有明确规定,不受地理位置和气象条件的影响,其加速试验工况具有相同性。

装载机的实际使用工况,由于地点不同,作业对象不同,使用者不同,对装载机的使用结果有较大的影响。但是,因为装载机应用广泛,任何一种具体的使用工况都不能代表装载机的标准使用工况。在行业标准《轮胎式装载机可靠性试验方法、故障分类及评定》中,对装载机 1000h 可靠性试验规定了应该完成的土方量。为使装载机的使用工况具有代表性,缩小不同工况的差异,作者选用了在不同使用条件下的多台装载机的可靠性试验数据和企业三包记录进行分析处理。

通过对比分析,确定三种方法所得结果的可比性和差异,以此分析和计算它们的可靠性指标,并对比三者之间的关系。

(1) 装载机加速试验与实际使用工况对比分析

装载机在使用工况中的作业方式和主要工况分别为铲装→满载运输(倒车、前进)→满载举升→卸料→动臂下降→返回,完成一个作业循环。

装载机加速试验分两种试验模式,即载重在“∞”形跑道上行走和铲装作业。前者满载行走和倒车,通过规定高度的障碍块;后者在原地连续完成铲装→举升→卸料→动臂下降等基本动作。以 ZL50 装载机为例,在

250h 可靠性加速试验和 1000h 实际使用中， 需要完成以下工作：见表 1。

表 1 ZL50 装载机加速试验与实际使用参数对比

工作量	转弯半径 mm	障碍块高度 mm	载重行走循 环圈数	完成作业 循环次数	完成作业载重量 t	备注
250h 加速	8700~10050	130	9450	12860	64300	φ30~ φ100mm 鹅卵石
1000h 使用	“V”型作业法	无障碍	—	大约 40000	大约 120000	不确定

可以看出，两种试验方法都包含了装载机在实际使用中的典型工况，而加速试验浓缩并综合了这些典型工况。

(2) 故障发生部位统计分析

可以把装载机划分为：发动机、传动系统（变矩器、变速箱、驱动桥）、工作装置、前后车架、液压系统、电器仪表、转向系统、制动系统等八大系统，考察在三种试验方法条件下收集的 100 台装载机数据，观察其差异和相同处。可以看出，在三种试验条件下，

故障频率发生最高的系统均为液压系统、发动机和传动系统三个系统，各系统故障所占比例比较接近，其中加速试验的发动机故障数低于企业 1000h 三包记录，制动系统故障高于企业 1000h 三包记录。其中 10 组数据平均，液压系统故障占总故障的 25.18%，发动机故障占总故障的 23.07%，传动系统故障占总故障的 20.9%，三种模式故障之和占总故障数的 69.78%。统计结果见表 2。

表 2 不同试验条件下装载机部件发生故障频率统计

部 件	ZL30 加速试 验数据	ZL40 加速试 验数据	ZL50 加速试 验数据	ZL30 跟踪试验 1000h	ZL40 跟踪试验 1000h	ZL50 跟踪试验 1000h	A 企业 1000h 三包 记录 ZL50	B 企业 1000h 三包记录		
								ZL30	ZL40	ZL50
发动机	21.4%	11.1%	17.5%	25.0%	13.0%	22.4%	24.6%	35.8%	37.5%	22.4%
传动系统	26.2%	27.8%	17.5%	25.0%	28.3%	12.1%	16.2%	24.5%	8.9%	22.4%
工作装置	—	—	7.0%	8.3%	8.7%	5.2%	8.9%	3.8%	—	—
前后车架	—	—	—	8.3%	—	—	3.7%	—	—	—
液压系统	23.8%	22.2%	22.8%	33.3%	34.8%	34.5%	17.8%	18.9%	16.1%	27.6%
电器仪表	14.3%	—	8.8%	—	8.7%	15.5%	3.1%	5.7%	7.1%	—
转向系统	—	11.1%	—	—	—	6.9%	3.1%	—	7.1%	3.4%
制动系统	—	—	8.8%	—	—	3.5%	17.3%	9.4%	21.4%	17.2%
其 他	—	22.2%	15.8%	—	—	—	5.2%	—	—	6.9%

(3) 故障模式统计分析

对以下十种典型的故障发生模式进行统计：①断裂或开裂；②渗漏；③松动、脱落；④异常磨损；⑤变形；⑥堵塞、卡死；⑦性能下降；⑧功率下降；⑨油耗上升；⑩零部件功能失效。各种故障模式所占比例见表 3。

其中平均渗漏占总故障的 38.36%，平均断裂或开裂占总故障的 24.6%，零件失效占总故障的 14.05%，三种模式故障之和占总故障数的 77%。

可以看出，在三种试验条件下，故障发生最多的三种模式依次为渗漏、断裂或开裂

和零部件功能失效，除断裂或开裂 1000h 三包记录较高外，其他模式所占比例基本相同。由于装载机是一个复杂的系统，故障出现的随机性比较大，故障发生的模式各系统所占的比例不可能完全一致，但可以看出，三包记录中除发动机故障和制动系统故障较多，

渗漏较少（可能是由于故障小没有记录造成）外，其余都非常接近。

通过以上分析，可以认为加速试验与实际使用工况在作业负荷、故障发生模式和故障发生部位所占比例都基本相同。

表 3 不同试验条件下装载机发生故障模式统计

故障发生模式	ZL30	ZL40	ZL50	ZL30	ZL40	ZL50	ZL50 三	B 企业 1000h		
	加速试 验数据	加速试 验数据	加速试 验数据	跟踪试验 1000h	跟踪试 验 1000h	跟踪试 验 1000h	包 1000h 记录	三包记录		
								ZL30	ZL40	ZL50
断裂或开裂	13.2%	5.6%	12.5%	—	14.9%	10.7%	30.4%	49.0%	52.7%	57.1%
渗漏	57.9%	55.6%	51.8%	50.0%	55.3%	44.6%	39.2%	10.2%	8.3%	10.7%
松动、脱落	13.2%	16.7%	14.3%	8.3%	8.5%	7.1%	3.3%	4.1%	8.3%	10.7%
异常磨损	—	—	—	—	—	5.4%	7.2%	8.2%	8.3%	7.1%
变形	—	—	—	—	—	—	—	—	—	3.6%
堵塞、卡死	—	—	7.1%	—	8.5%	7.1%	3.9%	6.1%	8.3%	5.4%
性能下降	—	—	—	—	—	—	1.1%	—	—	—
功率下降	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
油耗上升	—	—	—	—	—	—	6.1%	—	—	—
零部件 功能失效	13.2%	22.2%	7.1%	41.7%	10.6%	10.7%	8.3%	18.4%	8.3%	—

4 关于装载机可靠性评价指标和数据处理方法

(1) 关于装载机可靠性评价指标

由于装载机是可修复系统，根据其特点，结合装载机可靠性试验的有关标准，提出以下几项可靠性指标：

- a) $(0, t)$ 时间内故障次数 $N(t)$ 的分布及累积故障强度函数 $\Lambda(t)$;
- b) 有效度 A ;

$$A = \frac{\text{可工作时间}}{\text{(可工作时间)} + \text{(不能工作时间)}}$$

- c) 平均无故障工作时间 $MTBF$ 。

$$MTBF = \frac{\text{总工作时间}}{\text{(该时间的) 总失效数}}$$

第一项指标 $\Lambda(t)$ 表示系统在 $(0, t)$ 时间

内发生故障次数 $N(t)$ 的平均值： $\Lambda(t)$ 随时间的变化可以描述系统故障出现时间 T_1, \dots, T_n 的规律。

第二项指标是考核系统是否容易发生故障以及发生故障后是否容易维修的可靠性指标，它是装载机可靠性的一项重要指标，由于本文主要研究装载机随时间推移其故障的变化规律，不考虑修理时间的长短，因此该项指标不做进一步的分析。

第三项指标表达的是可修复系统的平均无故障工作时间 $MTBF$ ，它与第一项指标相关，是可修复系统最为重要、使用最广泛的一项指标，但该指标是建立在故障按线性规律发生的基础上。

(2) 装载机可靠性数据处理方法

对于装载机这样的可修复系统，因为有修理的因素，情况要复杂一些。由于系统出

现故障后可以通过修理来恢复工作，此时，在系统的运行随时间的进程中，工作状态与故障状态交替出现，若不考虑修理所花的时间，可以获得的数据为依时间顺序记录下来的故障时刻： T_1, T_2, \dots, T_n ；约定 $T_0=0$ 。假定不计修理时间。记

$$X_i = T_i - T_{i-1}, \quad i = 1, 2, \dots$$

为相邻的故障间隔时间，或称为无故障工作时间。

我们感兴趣或关心的问题是数据 $X_i = T_i - T_{i-1}$ 来评定系统的运行是否随时间的增大而劣化，或者得到改善。

可修复系统在试验或使用过程中，若不考虑修理时间，随着时间的推移，系统故障发生的时刻可以看成时间轴上的一些随机点，因而能够用随机点过程来描述。适合于描述可修复系统的随机过程模型有很多种。为了能够反映车辆（可修系统）实际故障情况中相邻故障间隔之间的某种相依性，需要找出能够反映装载机实际故障情况的随机过程模型。

在实际工作中，我们经常关心的一个重

$$P\{N(s) - N(t) = k\} = \frac{[\lambda(s-t)]^k}{k!} \exp\{-\lambda(s-t)\}, \quad k = 0, 1, \dots \quad (2)$$

2) 更新过程

定义 设随机变量 X_1, X_2, \dots 独立同分布 $G(t)$, $G(0-) = 0$ 。记

$$T_n = \sum_{i=1}^n X_i$$

约定 $T_0=0$ 。

$$N(t) = \sup\{n: T_n \leq t\}, \quad t \geq 0 \quad (3)$$

由(3)定义的 $\{N(t); t \geq 0\}$ 称作是一个更新过程（简记为 RP）。

显然，若把 T_n 看成系统第 n 次失效的时刻，由于故障间隔随机变量 X_1, X_2, \dots 独立同分布，可以认为系统失效后，瞬时更换成同型系统。更新过程对固定的 t , $N(t)$ 是 $(0,$

要问题是要确定在一定时间内系统的平均故障数。系统在 $(0, t)$ 内的平均故障次数为：

$$E[N(t)] = \sum_{k=1}^{\infty} kP_k(t) = \Lambda(t) \quad (1)$$

$\Lambda(t)$ 也称为累积故障强度函数，它可以描述随着时间的变化，可修复系统平均故障数的变化规律。下面讨论几种与本题相关的随机过程模型。

1) 时齐泊松过程

定义 时齐泊松过程（为简单起见，省略时齐两字，记作 HP）的定义简述如下：

记 $N(t) = (0, t)$ 中系统故障次数满足如下三条的一个随机过程 $\{N(t); t \geq 0\}$ 是 HP。

a) $N(0) = 0$;

b) $N(t)$ 具有独立增量。即对任意 n 及不相交的区间 $[a_i, b_i], i=1, \dots, n, N(b_i) - N(a_i)$ 互相独立, $i=1, \dots, n$;

c) 对任意的 $0 \leq t < s, N(s) - N(t)$ 为参数 $\lambda(s-t)$ 的泊松分布，即

$t)$ 中系统失效的次数，它是取非负整数的随机变量。若 $G(t)$ 为参数 λ 的指数分布时，更新过程 $N(t)$ 即时齐泊松过程（HP），因此更新过程（RP）是 HP 的一个直接推广。

3) 非时齐泊松过程（NHP）

定义 若 $\{N(t); t \geq 0\}$ ，同时满足：

a) $N(0) = 0$;

b) $N(t)$ 具有独立增量。即对任意 n 及不相交的区间 $[a_i, b_i], i=1, \dots, n, N(b_i) - N(a_i)$ 互相独立, $i=1, \dots, n$;

c) 对任意的 $0 \leq t < s$ ，在 (t, s) 中的故障数 $N(s) - N(t)$ 有参数

$$\Lambda(t, s) = \int_t^s \lambda(u) du \text{ 的泊松分布}$$

$$P\{N(s) - N(t) = k\} = \frac{[\Lambda(t, s)]^k}{k!} \exp\{-\Lambda(t, s)\}, k = 0, 1, \dots \quad (4)$$

这里 $\lambda(u)$ 是一个非负函数, 称作强度函数; 则 $\{N(t); t \geq 0\}$ 称作是一个 NHP (非时齐泊松过程)。

一般的 NHP, 相邻故障间隔 $\{X_i, i=1, 2, \dots\}$ 既不独立亦不同分布, 而且在同样长度的区间上, 平均故障数不仅依赖于区间的长度, 还依赖于区间的起点。由于这些特点, 它用来描述不是“修复如新”的可修系统。

5 数据处理结果与结论

从表中可以看到, 在 250h 加速试验、试验场跟踪 1000h 可靠性试验和用户 1000h 三包记录三种工况条件下, ZL30、ZL40、ZL50

三种产品的 10 组数据的工作时间里程都遵从更新过程。进一步的分布类型判别结果是, 它们全部遵从时齐泊松过程, 这说明三种工况条件下的三种产品, 共计 10 组数据全部遵从更新过程和时齐泊松过程, 加速试验数据与实际使用数据具有可比性。

这里用 Delphi5 程序语言编写了数据处理程序, 该程序依次对每台或每组数据进行判别和处理, 然后对故障强度函数参数和分布函数参数进行估计计算。对这些数据进行了处理, 根据不同试验方式和不同机型共分十组进行分别计算。故障数据分析处理流程见图 1。

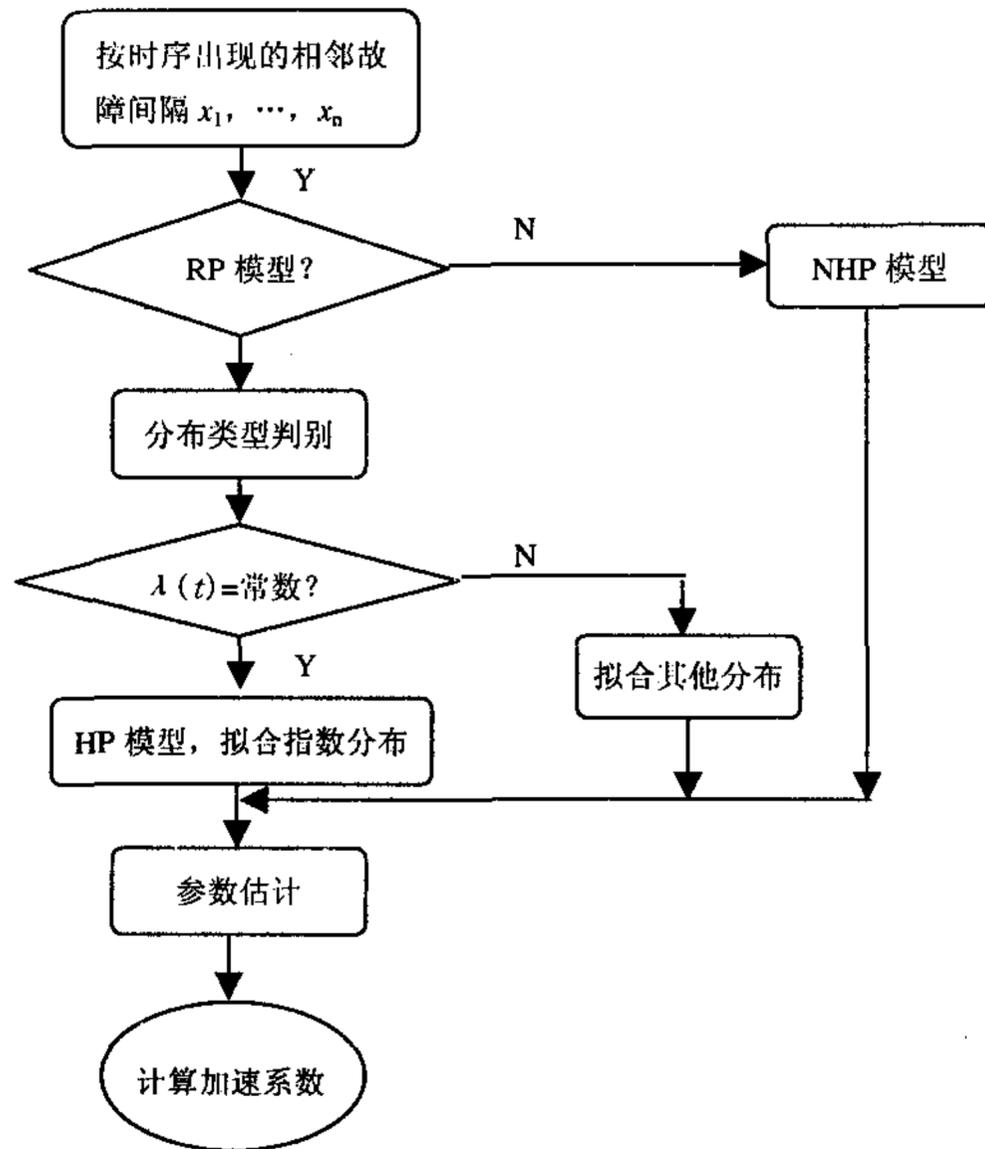


图 1 可修复系统故障数据分析处理流程图

(1) 数据处理结果

数据处理结果见表 4。

表 4 十组装载机数据处理结果

数据类型和来源	定时截尾时间 h	随机过程类型或分布类型	故障强度函数参数或分布函数参数	平均故障间隔时间 (MTBF) h
试验场 ZL30 加速试验	250	更新过程 时齐泊松过程	$\lambda=0.02727^*$	36.7
试验场 ZL40 加速试验	250	更新过程 时齐泊松过程	$\lambda=0.02300^*$	43.5
试验场 ZL50 加速试验	250	更新过程 时齐泊松过程	$\lambda=0.02700^*$	37.0
试验场 ZL30 跟踪使用记录	1000	更新过程 时齐泊松过程	$\lambda=0.00600^*$	166.7
试验场 ZL40 跟踪使用记录	1000	更新过程 时齐泊松过程	$\lambda=0.00616^*$	162.3
试验场 ZL50 跟踪使用记录	1000	更新过程 时齐泊松过程	$\lambda=0.00645^*$	155.0
企业 A ZL50 三包记录	1000	更新过程 时齐泊松过程	$\lambda=0.00615^*$	162.6
企业 B ZL30 三包记录	1000	更新过程 时齐泊松过程	$\lambda=0.00400$	250.0
企业 B 三 ZL40 包记录	1000	更新过程 时齐泊松过程	$\lambda=0.00410$	243.9
企业 B ZL50 三包记录	1000	更新过程 时齐泊松过程	$\lambda=0.00445$	224.7

说明：表中带“*”号为考虑了轻度故障的处理结果，不带“*”号为没有考虑轻度故障的处理结果。

从表 4 中可以看到，在 250h 加速试验、试验场跟踪 1000h 可靠性试验和用户 1000h 三包记录三种工况条件下，ZL30、ZL40、ZL50 三种产品的 10 组数据的工作时间里程都遵从更新过程。进一步的分布类型判别结果是，

它们全部遵从时齐泊松过程，这说明三种工况条件下的三种产品，共计 10 组数据全部遵从更新过程和时齐泊松过程，加速试验数据与实际使用数据具有可比性，可以进行加速系数的计算。计算结果见表 5 和表 6。

表 5 含有轻度故障的加速系数及 MTBF 计算结果

数据来源	定时截尾时间 h	产品型号	λ /MTBF h	加速系数 K
加速试验数据	250	ZL30	0.02727/36.7	—
		ZL40	0.02300/43.5	—
		ZL50	0.02700/37.0	—
试验场跟踪数据	1000	ZL30	0.00600/166.7	4.545
		ZL40	0.00616/162.3	3.734
		ZL50	0.00645/155.0	4.186
企业 A 三包记录	1000	ZL50	0.00615/162.6	4.390

表6 不含有轻度故障的加速系数及 MTBF 计算结果

数据来源	定时截尾时间 h	产品型号	λ /MTBF h	加速系数 K
企业 B 三包记录	1000	ZL30	0.00400/250.0	6.871
		ZL40	0.00410/243.9	5.610
		ZL50	0.00445/224.7	6.067

从表 5、表 6 中可以看出，加速系数 K 在 3.73~6.87 之间，其中试验场 250h 加速试验和试验场 1000h 跟踪数据之间的加速系数 K 为 3.73~4.55，三个型号平均 K 为 4.16，这与 JB/T 51147—1994《轮胎式装载机可靠性加速试验规范》标准所确定的加速系数 4 基本一致；试验场 250h 加速试验和企业 A 的 1000h 三包记录之间的加速系数 K 为 4.39，也接近于加速系数 4；试验场 250h 加速试验和企业 B 的 1000h 三包记录之间的加速系数 K 为 5.61~6.87，三个型号平均 K 为 6.18。该加速系数大于 4，超过 4 近 50%，检查发现，试验场 250h 加速试验数据和试验场 1000h 跟踪数据均含有轻度故障，企业 A 的 1000h 三包记录也含有轻度故障，而企业 B 的 1000h 三包记录则不含有轻度故障，这就是造成加速系数超过 4 较多的主要原因。因此可以说国内现行的加速试验方法与 1000h 实际使用比较，加速系数接近 4，在 4.16 与 4.39 之间。

(2) 结论

1) 对于轮式装载机这样的可修复系统，其可靠性试验数据可以采用适合它的数理统计方法来处理，即采用适合可修复系统的更新过程、时齐泊松过程或非时齐泊松过程等随机过程模型来处理。在此领域本文首次应用采用了这种方法，对装载机不同试验方法获取的试验数据进行了处理，获得了较好的处理结果。

2) 国内三种主要机型 ZL30、ZL40 和 ZL50 装载机，在 250h 加速试验、试验场跟踪 1000h 可靠性试验和用户 1000h（或 6 个

月）三包服务记录三种工况条件下，其试验数据的工作时间里程都遵从更新过程（RP）中的时齐泊松过程（HP）。它说明新装载机在进行 250h 加速试验或 1000h 实际使用的时段内，每次维修完成后都不影响整机“修复如新”，即没有因为老化、磨损、疲劳使相邻的故障间隔时间缩短，也没有因为合理的维护、管理和使用，使得相邻的故障间隔变大。在 1000h 的工作时间内，这种估价是合理的。

3) 本文首次对目前使用的装载机加速试验方法加速系数进行了研究和计算，在新装载机进行 250h 加速试验和 1000h 实际应用相比较的条件下，装载机加速试验与实际使用相比，加速系数 K 平均为 4.16。

4) 装载机在加速试验和 1000h 使用条件下的故障发生模式基本一致，各系统发生故障频率也基本相同，说明加速试验与使用试验具有可比性。

5) 采集所得的可靠性数据共计三种主要机型，100 台产品，具有广泛的代表性。

6) 可以认为目前应用的装载机加速试验方法和加速系数 4 基本上是合理的，但《轮胎式装载机可靠性加速试验规范》标准还存在需要改进的地方。

(3) 对现行装载机可靠性加速试验方法的改进建议

1) 加速试验中暴露的制动系统故障相对较少，说明加速试验中应增加额定载荷情况下的制动试验。

2) 加速试验中暴露的发动机故障相对较少，在充分论证的基础上，应考虑进一步强

化发动机试验或适当增加整机试验时间。

3) 考虑以上两条, 加速试验中应增加装载机额定载荷情况下的上下坡试验及制动试验, 用于进一步强化发动机和制动系统的试验。建议将“∞”跑道改为环形跑道, 障碍块集中于一侧, 另一侧为上下坡道, 坡度建议定为 10°左右。然后进行试验验证。

参考文献

[1] 茆诗松等. 可靠性统计. 上海华东师范大学出版社 1984

[2] 曹晋华, 程侃. 可靠性数学引论. 科学出版社, 1986. 447~471

[3] 姜华. 车辆强化试验加速系数的研究. 中国农业大学博士论文, 2000

[4] 万梦嘉. 应用概率统计. 北京农业大学, 1987

[5] 刘峰. 叉车可靠性强化试验加速系数的计算研究. 北京农业大学硕士学位论文, 1990

[6] [日]盐见弘. 可靠性工程. 科学出版社, 1982

[7] 董德元等. 试验研究的数理统计方法. 中国计量出版社, 1987

[8] [英]J.H. 邦帕斯-史密斯. 机械的可靠性——可靠性数据资料的应用. 国防工业出版社, 1981

[9] 范杰等. 日本建设机械化研究所发展概况. 机械工业部工程机械试验场, 1982.

[10] 行业标准, JB/T 51147—1994《轮胎式装载机可靠性加速试验规范》

[11] 行业标准, JB/T 51148—1994《轮胎式装载机可靠性试验方法、故障分类及评定》

[12] 国家标准, GB/T 3187—1994《可靠性、维修性术语》

[13] 前苏联《ПРИЛОЖЕНИЕ》24 К ГОСТ 16391—1970 标准

[14] 装载机加速试验报告和 1000h 跟踪试验报告, 机械工业工程机械及军用改装车

验场

[15] 企业 A 和企业 B 部分产品三包服务记录

[16] 曹正清等. 叉车可靠性强化试验中加速系数的计算方法. 北京农业大学学报, 1993

[17] [美]Caterpillar 公司装载机试验方法

[18] 袁尚平. 轮胎式装载机疲劳强度与可靠性计算分析. 工程机械, 1997, 第八期

[19] 石米德. 利用可靠性计算方法研究车辆在强化试验路面上的强化系数. 建筑机械, 1993, 第四期

[20] 周长城等. 拖拉机室内快速可靠性试验可靠性指标计算与 FTA 研究

[21] [美]N.R. 曼等. 可靠性与寿命数据的统计分析方法. 中国电子学会电子产品可靠性与质量管理专业学会, 1980

[22] [日]市田嵩铃木和幸. 可靠性分布与统计. 机械工业出版社, 1988

[23] Billinton. & Allan R N, Reliability Evaluation of Engineering Sestem, the 2nd Edition. New York: Prenum Press, 1992.

[24] K.V.Smith. 汽车主要承载构件等量累积损伤建立不同路面行驶里程的当量关系的方法. SAE, 1979 年

[25] М.А. Г Р И Г О Р И Е В 等. 用疲劳损伤理论用于发动机的加速寿命试验研究. 1987 年, 第 7 期

[26] 虞明. 随机路面汽车加速可靠性试验的研究. 装甲兵工程学院硕士学位论文, 1990

[27] 王霄锋等. 汽车零部件室内耐久性试验, 武汉工学院学报. 1992 年第 14 卷第一期

[28] 虞明等. 随机不平路面上的汽车强化试验研究. 汽车工程, 1993 年第一期

[29] 吴珂等. 汽车试验场可靠性试验强化系数的研究. 汽车工程, 1996 年第二期

[30] [日]小林明. 汽车工程手册, 第三分册. 机械工业出版社, 1984.4