

doi: 10.7690/bgzd.2025.04.013

基于故障物理的装甲车辆可靠性试验严酷度评价模型

侯军芳, 李娟, 邓刚

(中国人民解放军 63966 部队, 北京 100072)

摘要: 针对装甲车辆在外场可靠性鉴定试验中考核严酷度一致性和试验结果可比性较差的问题, 通过分析装甲车辆可靠性影响因素, 构建可靠性试验严酷度评价指标体系。利用等效损伤原理, 将可靠性加速试验理论应用于装甲车辆可靠性试验严酷度评价中, 建立基于故障物理的单应力、多应力和单应力组合可靠性试验严酷度评价模型。通过某装备可靠性试验剖面应用实例, 分析 2 个试验剖面下各应力因素可靠性试验相对严酷度, 实现了装甲车辆可靠性试验严酷度定量评价。结果表明, 该模型为可靠性鉴定试验剖面设计和试验结果评价提供依据。

关键词: 故障物理; 可靠性; 试验严酷度; 加速试验; 加速模型

中图分类号: TJ811 **文献标志码:** A

Severity Evaluation Model of Armored Vehicle Reliability Test Based on Failure Physics

Hou Junfang, Li Juan, Deng Gang

(No. 63966 Unit of PLA, Beijing 100072, China)

Abstract: In view of the poor consistency of severity and poor comparability of test results in the reliability qualification test of armored vehicles in the field, the severity evaluation index system of reliability test is established by analyzing the influencing factors of armored vehicle reliability. Based on the equivalent damage principle, the reliability accelerated test theory is applied to the severity evaluation of armored vehicle reliability test, and the severity evaluation models of single stress, multi-stress and single stress combination reliability test based on failure physics are established. Through the application example of the reliability test profile of a certain equipment, the relative severity of the reliability test of each stress factor under two test profiles is analyzed, and the quantitative evaluation of the severity of the reliability test of armored vehicles is realized. The results show that the model provides a basis for the design of reliability qualification test profile and the evaluation of test results.

Keywords: failure physics; reliability; test severity; accelerated test; accelerated model

0 引言

环境应力是影响装备可靠性的关键因素, 对同一装备而言, 在不同的环境应力下进行考核, 其可靠性(如平均故障间隔时间 MTBF)表现会有显著差异。在设计装甲车辆可靠性鉴定试验方案时, 理想的可靠性试验剖面应该与装备的实际使用剖面一致, 这样才能保证试验应力与实际工作应力一致, 得到的可靠性试验结果才能真实反映装备实际使用中的可靠性水平, 考核的严酷度既不偏严苛, 又不偏宽松。为统一考核标准, GJB 848-90^[1]对装甲车辆可靠性考核剖面进行了规范, 分别针对履带和轮式装甲车辆规定了各个典型环境地区 and 不同行驶路面的里程分配比例, 规定了各地区的环境温度要求。不同于试验条件控制一致性良好的实验室可靠性试验, 装甲车辆在外场进行可靠性考核时, 受试验剖面中环境条件、路面条件等不可控因素的影响, 如

外场试验时的实际气象环境条件不受控制, 可靠性行驶的冰雪路、砂石路、起伏土路等越野路面没有明确的规范要求, 试验路面与部署部队后实际训练演习场地的路面不平度一致性也难以保证, 导致可靠性指标考核时的试验应力与实际部署使用时的试验应力不一致, 可靠性考核结果不能准确反应实际可靠性水平。如何评价不同的可靠性试验应力剖面对可靠性鉴定试验结果的影响程度, 即可靠性试验严酷度评价, 成为装甲车辆可靠性鉴定试验方案设计和试验结果评估时面临的难题。

可靠性试验严酷度评价主要有基于概率统计和基于故障物理 2 种方法。基于概率统计的方法比较客观准确, 但对比试验的时间周期长、经费投入大、可操作性差, 试验剖面改变后还需重新试验。基于故障物理的方法从应力对可靠性的影响机理入手, 对试验剖面设计的指导意义更强, 缺点是已有模型

收稿日期: 2024-08-13; 修回日期: 2024-09-21

第一作者: 侯军芳(1981—), 男, 河南人, 博士。

有限,多应力耦合尚缺少合适的模型。国内外针对基于故障物理的可靠性加速试验理论和方法开展了系统研究,提出了各类试验应力的可靠性故障物理模型,如线性累积疲劳损伤 Miner 模型^[2],表征机械应力与可靠性寿命之间关系的逆幂律模型^[2],表征温度应力与可靠性寿命之间关系的阿伦尼斯模型(Arrhenius model)^[3],表征温度循环与可靠性寿命之间关系的 Coffin-Manson 模型^[4],表征温度和电应力耦合作用的艾林模型(Eyring model)^[2]。此外,各国学者在可靠性加速试验理论^[5-8]及应用^[9-12]方面也进行了深入研究,形成了较成熟的加速试验方法标准^[13-14],而在可靠性试验剖面严酷度评价方面研究较少。笔者主要从故障物理的角度对装甲车辆可靠性试验的严酷度进行研究,构建严酷度评价指标体系,提出基于故障物理的可靠性试验严酷度评价方法,实现对可靠性试验严酷度的定量评价,为可靠性鉴定试验剖面设计和试验结果评价提供参考依据。

1 可靠性试验严酷度及评价指标

装甲车辆可靠性试验严酷度是指装甲车辆在可靠性鉴定试验中对可靠性指标考核的严酷程度(或严苛程度)。可靠性试验严酷度是由可靠性试验剖面中的试验应力及持续时间所决定的,试验应力越苛刻、越恶劣,则可靠性试验严酷度越高,依据可靠性试验方案得出的可靠性指标检验值(如 MTBF)就越低;反之,若试验应力越缓和,则可靠性试验严酷度越低,可靠性指标检验值就越高。同时,依据产品在应力环境下故障发生的累积损伤机理可知,试验时间反应了产品在某时刻的累积损伤程度,与可靠性试验严酷度直接相关。

由此,将可靠性试验严酷度定义为:

$$A = \frac{t/L}{t_0/L_0} \quad (1)$$

式中: L 和 L_0 分别为被试装备在试验剖面 S 和参考剖面 S_0 下的平均寿命或故障前工作时间; t 和 t_0 分别为被试装备在试验剖面 S 和参考剖面 S_0 下的持续时间; A 称为试验剖面 S 、持续时间 t 相对于参考剖面 S_0 、持续时间 t_0 的严酷度。

从可靠性试验严酷度定义可以看出:严酷度是一个相对概念,是对试验剖面下装备累积损伤程度(t/L)的相对量化评价,即被评价的试验剖面的累积损伤程度相对于参考剖面(或基准剖面)的累积损伤程度的比值。对于装甲车辆可靠性鉴定试验而言,

若将装备实际使用时的工作剖面定为参考剖面,严酷度评价的是可靠性鉴定试验中的试验应力剖面相对于实际工作剖面的严酷程度。

对于装甲车辆等复杂系统,发生故障后进行故障原因分析时,常采用故障物理的方法,追寻零部件故障发生的机理,建立故障发生过程的模型,然后根据故障再现的证明,确定防止故障和提高可靠性的方法。故障物理是伴随可靠性技术发展而兴起的一门学科,是研究设备在各种应力条件下发生故障的内在原因及其机理的科学。

基于故障物理的方法,将装备故障机理相关的载荷类型归为如下5类:

- 1) 机械应力,包括:振动、载荷应力、气压等;
- 2) 热应力,包括:高温、低温等;
- 3) 电应力,包括:供电电压、工作电流等;
- 4) 化学应力,包括:湿度、盐雾等;
- 5) 辐射应力,包括:电磁干扰、太阳辐照等。

对于装甲车辆而言,上述5类载荷各个因素都对可靠性有一定程度的影响,但各个影响因素对装甲车辆的影响程度差异较大。通过适当简化,分析其主要影响因素,结合装甲车辆在可靠性鉴定试验中的故障实际情况,提取对装甲车辆可靠性影响较大的主要因素有:温度、湿度、振动、载荷、电应力,构建装甲车辆可靠性验证试验严酷度评价指标体系,如图1所示。其他应力对整装备的影响程度相对较小,进行简化处理。

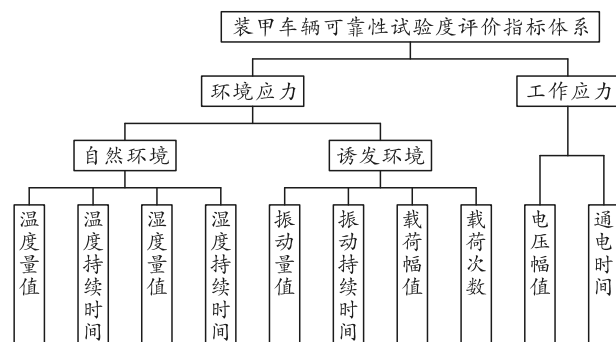


图1 装甲车辆可靠性试验严酷度评价指标体系

该指标体系主要分为环境应力和工作应力。其中,环境应力包括自然环境应力和诱发环境应力;工作应力主要是电应力。自然环境应力主要有温度和湿度。环境温度对装备和部件的可靠性影响显著,高温环境下车载电子设备易引起故障;低温容易引起材料的脆化、变硬,对橡胶制品、密封件、电子设备线路、供电电源等均有较大影响。湿度同样主要影响电气类设备,在高湿环境下,温度发生变化

时电气设备内部容易引起凝露引发短路等故障,在高湿环境中空气的绝缘性能减低,易导致电子设备的绝缘电阻减低,增大设备的泄露电流;高湿环境有利于霉菌的生长,加快设备的腐蚀,降低设备工作可靠性。

诱发环境应力主要有振动和载荷。地面装备在越野路面行驶中,由路面不平度以及动力传动系统自身的振动激励引起装甲车辆剧烈振动,引发多种故障模式,如机械部件的变形、磨损、裂纹、疲劳断裂,以及电子设备的连接件断裂、短路等。主要受力部件如扭力轴、传动轴等在工作中受到高频次长时间的工作载荷应力,是造成受力构件发生裂纹和疲劳断裂的主要原因。

装甲车辆的工作应力主要是电气设备的电应力。电气设备中的带电元器件在长时间通电过程中,易引起击穿、介电失效、接线断路及元件老化等故障。

2 装甲车辆可靠性试验严酷度评价模型

2.1 可靠性加速试验

可靠性加速试验是在进行合理工程及统计假设的基础上,利用与物理故障规律相关的统计模型对在超出正常应力水平的加速环境下获得的信息进行转换,得到产品在额定应力水平下的特征可复现的数值估计的一种试验方法。简言之,可靠性加速试验是在保持故障机理不变的条件下,通过加大试验应力来缩短试验周期的一种试验方法,可提高试验效率,降低试验成本。

任何类型的加速试验都基于加速损伤理论^[2]。产品在其寿命周期内所经历的应力可对其造成渐进的累积损伤,加速试验方法都是通过增加试验应力的方式,使其对产品造成损伤,该损伤应与产品寿命期内预期应力造成的累积损伤等效。

对可靠性试验剖面严酷度的评价可借鉴加速试验的思想,即将参考工作剖面视为基准应力,实际试验剖面作为加速应力,通过加速应力模型,计算出实际试验剖面相对于参考工作剖面之间的相对严酷度。

2.2 单应力试验严酷度

2.2.1 振动应力试验严酷度

振动经常作为机械和电子产品的疲劳故障加速应力,常用的振动加速试验模型为逆幂律模型^[15-19]。逆幂律模型主要适用于动态应力,如正弦

或随机振动,它对各种寿命分布具有很好的适应性,其参数可使用极大似然估计的方法来确定。

MIL-STD-810H^[13]给出了疲劳寿命的逆幂律模型:

$$L=A/W^B. \quad (2)$$

式中: A 和 B 为经验常数,由试验确定;通常在正弦振动下 $B=6$, W 为正弦振动量级(峰值加速度, g);随机振动下 $B=4$, W 为随机振动量级(加速度谱密度)。

由此,确定振动应力相对严酷系数为:

$$A_f = \frac{t/L}{t_0/L_0} = (W/W_0)^B \frac{t}{t_0}. \quad (3)$$

式中: t 、 t_0 分别为 W 、 W_0 量级的振动持续时间; A_f 为振动量级 W 、持续时间 t 相对于振动量级 W_0 、持续时间 t_0 的严酷系数。

对于随机振动,GB/T 34986-2017^[14]中给出的逆幂律关系与 MIL-STD-810H 相同。

逆幂律模型的优点在于假定各种故障模式容易区分时模型简单,在工程中已得到广泛应用。

2.2.2 载荷应力试验严酷度

Palmgram 对材料载荷应力与疲劳损伤之间的关系进行了研究,提出了线性损伤理论,后由 Miner 确立,称为 Miner 线性损伤理论。损伤是对构件危险部位微裂纹生长的度量。当材料承受高于疲劳极限的应力时,每一循环都会使材料产生一定量的损伤,这种损伤是累加的,当损伤累加到临界值时,零件就会发生破坏。

设 N 为对应于应力 σ 的疲劳极限寿命(通常单位为给定应力循环下的故障前循环次数),根据 $S-N$ 曲线的 Basquin 关系式^[2]:

$$N=C/\sigma^m. \quad (4)$$

式中: C 为常数; m 为幂指数。

可得载荷应力相对严酷系数为:

$$A_\sigma = \frac{n/N}{n_0/N_0} = (\sigma/\sigma_0)^m \frac{n}{n_0}. \quad (5)$$

式中: n 、 n_0 分别为载荷应力 σ 、 σ_0 的循环次数; m 为幂指数; A_σ 为载荷应力 σ 、循环次数 n 相对于载荷应力 σ_0 、循环次数 n_0 的严酷系数。

2.2.3 温度应力试验严酷度

阿伦尼斯模型^[2-3]广泛用于建立可靠性特征参数 L (如平均寿命、平均故障前时间等)与温度的关系模型,用于表示某个故障机理对温度的敏感度和

产品的热加速因子，其表达式为：

$$L=A\exp(E_a/kT)。 \quad (6)$$

式中： A 为经验常数，由试验决定； k 为玻尔兹曼常数， $k=8.617\times 10^{-5}$ eV/°C； E_a 为激活能，不同材料有不同的取值，一般介于0.3~1.2 eV之间，电子产品通常取0.6 eV； T 为绝对温度。

根据阿伦尼斯模型，温度应力相对严酷系数为：

$$A_T = \frac{t/L}{t_0/L_0} = \exp\left[E_a(1/T_0 - 1/T)/k\right] \frac{t}{t_0}。 \quad (7)$$

式中： t 、 t_0 分别为温度 T 、 T_0 下的持续时间； A_T 为温度 T 、持续时间 t 相对于参照温度 T_0 、持续时间 t_0 的严酷系数。

阿伦尼斯方法适用于在可靠性分析中使用的大多数统计分布。通过适当统计方法可确定参数的置信限、各分布的寿命函数及可靠性。该模型适用于长时间高温暴露的环境，会引起材料发生累积损伤而改变其物理特性，进而导致电学特性或者其他特性发生变化。

目前，对低温引起的材料寿命特征的变化还未建立有效的统计模型来表征，只能通过故障统计的方式进行计算。

2.2.4 电应力加速试验模型

电压是一种有效的加速应力，常用于电子设备的应力加速。电压和电子设备寿命之间通常遵循逆幂律模型关系^[14]，如下式所示：

$$L=A/V^B。 \quad (8)$$

式中： A 和 B 为经验常数； V 为电压；一般取 $B=2$ 。

根据电压应力加速模型，电压应力严酷系数为：

$$A_V = \frac{t/L}{t_0/L_0} = (V/V_0)^B \frac{t}{t_0}。 \quad (9)$$

式中： t 、 t_0 分别为电压 V 、 V_0 的持续时间； A_V 为电压 V 、持续时间 t 相对于电压 V_0 、持续时间 t_0 的严酷系数。

2.3 多应力试验严酷度

2.3.1 温度-湿度严酷系数

在加速试验中，湿度通常和高温一起作为加速应力进行加速。Peck模型是一种典型的温湿度加速模型^[11]，也是艾林模型的一种应用，即：

$$L = \frac{A}{(RH)^B} \exp(E_a/kT)。 \quad (10)$$

式中： RH 为相对湿度； T 为绝对温度； A 和 B 为经验常数； k 为玻尔兹曼常数。Hallberg和Peck确定

$B=3.0$ 。

根据Peck模型，温度-湿度耦合应力相对严酷系数为：

$$A_{T-RH} = \frac{t/L}{t_0/L_0} = \frac{t}{t_0} \left(\frac{RH}{RH_0} \right)^B \exp \left[\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right]。 \quad (11)$$

式中： t 、 t_0 分别为温湿度 T 、 RH 和 T_0 、 RH_0 的持续时间； A_{T-RH} 为温湿度 T 、 RH 和持续时间 t 相对于温湿度 T_0 、 RH_0 和持续时间 t_0 的严酷系数。

2.3.2 温度-电压严酷系数

艾林模型^[14]是阿伦尼斯模型的扩展，用于温度和电应力同时加速的试验。研究表明，电压和温度之间没有很强的失效耦合效应，因此，温度-电压加速模型如下式所示：

$$L = \frac{A}{V^B} \exp(E_a/kT)。 \quad (12)$$

式中： V 为电压； A 、 B 为经验常数。在电迁移模型(Black模型)中， $B=2$ 。

根据该模型，温度-电压耦合应力相对严酷系数为：

$$A_{T-V} = \frac{t/L}{t_0/L_0} = \frac{t}{t_0} \left(\frac{V}{V_0} \right)^B \exp \left[\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right]。 \quad (13)$$

式中： t 、 t_0 分别为温度 T 、电压 V 和温度 T_0 、电压 V_0 的持续时间； A_{T-V} 为温度 T 、电压 V 、持续时间 t 相对于温度 T_0 、电压 V_0 、持续时间 t_0 的严酷系数。

2.4 单应力组合试验严酷度

2.4.1 单应力多量级组合严酷度

在单应力严酷系数计算时，常会遇到相同应力不同应力量级之间的叠加计算，如温度应力中每日平均温度各不相同的情况和不同路面条件下的振动量级不同的情况等，即温度应力 T_1 持续时间 t_1 与温度应力 T_2 持续时间 t_2 的组合、振动应力 W_1 持续时间 t_1 与振动应力 W_2 持续时间 t_2 的组合等。对于单应力因素下多种量级的组合应力，其相对于参考应力的综合严酷系数，可通过等效关系转化为一种应力下的严酷系数。

下面以振动应力为例，推导多路段组合的振动应力严酷系数，即求组合路面振动应力 $[W_i, t_i]$ ($i=1, 2, \dots, n$)的组合相对于参考路面振动应力 $[W_0, t_0]$ 的严酷系数。

设装备在各路面行驶的振动应力为 W_i ，对应的持续时间为 t_i ，以第一种路面为基准，利用振动等

效损伤原理, 将其他路面下的振动条件等效为第一种路面振动应力量值 W_1 , 计算其等效的持续时间。

根据 GJB 150.16A-2009^[20]中的振动疲劳损伤等效原理, 有:

$$t_i/t_{ei} = (W_i/W_1)^B, \quad i=2, \dots, n. \quad (14)$$

式中: t_{ei} 为第 i 种路面下振动应力 $[W_i, t_i](i=2, \dots, n)$ 等效于 W_1 后的振动持续时间。则:

$$t_{ei} = t_i (W_i/W_1)^B. \quad (15)$$

各路面条件等效转换后的组合振动的振动时间 t_{ce} 为:

$$t_{ce} = t_1 + \sum_{i=2}^n t_{ei} = \sum_{i=1}^n t_i (W_i/W_1)^B \quad (16)$$

此时, 组合振动应力 $[W_i, t_i]$ 所造成的累积疲劳损伤与等效到 W_1 的振动应力 $[W_1, t_{ce}]$ 的累积疲劳损伤相同, 即:

$$\sum_{i=1}^n \frac{W_i^B t_i}{A} = \frac{W_1^B t_{ce}}{A}. \quad (17)$$

将式(16)带入式(3), 计算等效后的单应力 $[W_1, t_{ce}]$ 相对于参考振动应力 $[W_0, t_0]$ 的严酷系数, 有:

$$A_{fc} = \left(\frac{W_1}{W_0} \right)^B \frac{t_{ce}}{t_0} = \left(\frac{W_1}{W_0} \right)^B \frac{1}{t_0} \sum_{i=1}^n t_i \left(\frac{W_i}{W_1} \right)^B = \sum_{i=1}^n A_{fi}. \quad (18)$$

从上述基于振动疲劳损伤等效原理推导的结果可以看出, 多种路面条件组合振动应力的严酷系数等于各单应力相对于参考振动应力的严酷系数之和, 表明振动应力相对严酷系数定义中的累积损伤符合线性叠加原则。同理可知, 其他单应力多量级的组合应力的严酷系数也同样符合线性叠加原则。

2.4.2 单应力多部位组合严酷度

上述单应力严酷系数、多应力严酷系数以及单应力多量级组合的严酷系数计算, 都是针对单测点的, 更适用于单设备或单部件的可靠性试验强度的评价。对于集成设备和部件较多的系统和整车装备, 存在不同部位应力差异较大的情况, 因此难以用单个测点来表征整个系统或装备的应力情况, 就需要根据具体情况采用多个测点的应力值的组合来表征其整体的应力情况。如整车装备的振动, 车载电子类设备对振动应力较为敏感, 然而, 车载设备众多, 分布在不同的部位, 各个部位的振动量级和频率各有不同, 就需要选择几处典型的部位, 如车载设备安装较集中的部位或振动因素造成的故障较多的部位, 作为装备整体的典型振动应力, 以此作为评价装备整体振动严酷系数的依据。

仍以振动应力为例, 推导多部位振动组合严酷系数的计算。不失一般性, 假定装备有 n 个典型的振动测点, 每个测点的振动应力代表了该测点范围内所有对振动敏感设备的典型振动应力。

设可靠性试验剖面各测点振动应力为 W_i , 振动持续时间为 t_i , 参考应力剖面中各测点振动应力为 W_{0i} , 振动持续时间为 t_{0i} , $i=1, 2, \dots, n$, 则各个测点位置的试验剖面相对于参考应力剖面的单测点振动严酷系数为:

$$A_{fi} = \left(W_i/W_{0i} \right)^B \frac{t_i}{t_{0i}}. \quad (19)$$

对于装甲装备而言, 行驶中各测点的振动均为随机振动, 取 $B=4$ 。

研究表明, 对于大型复杂装备而言, 其故障率基本为常数, 可近似用指数分布来描述其在不同载荷条件下的故障分布规律。考虑到各测点部位的振动对装备总体的故障影响不同, 引入各测点振动严酷系数的权重系数, 代表各测点周边范围内的设备因振动所引起的故障占 n 个测点所有设备因振动引起的故障总数的比例。设装备整体在可靠性试验剖面下由振动导致的故障率为 λ_b , 由于振动应力引起的 n 个典型测点部位各设备的故障率分别为 $\lambda_i(i=1, 2, \dots, n)$, 故障比例为 $k_i(i=1, 2, \dots, n)$, 则有:

$$\lambda_i = k_i \lambda_b; \quad (20)$$

$$\sum_{i=1}^n k_i = 1. \quad (21)$$

在可靠性试验剖面 and 参考剖面中, 各测点振动应力的和和持续时间不同, 对装备可靠性影响区别在于单位时间内各设备的故障发生频次, 但不改变装备在给定载荷条件下的故障变化规律, 即仍服从指数分布。

设装备整体在可靠性试验剖面下由振动导致的故障率为 λ_s , 由于振动应力导致的各敏感设备区的故障率分别为 $\lambda_{si}(i=1, 2, \dots, n)$, 则根据振动应力下各设备指数分布的严酷系数计算公式, 有:

$$\lambda_{si} = A_{fi} \lambda_i = k_i A_{fi} \lambda_b. \quad (22)$$

由于

$$\lambda_s = \sum_{i=1}^n \lambda_{si}. \quad (23)$$

所以有:

$$\lambda_s = \sum_{i=1}^n k_i A_{fi} \lambda_b. \quad (24)$$

包含 n 个振动测点的装备整体在试验剖面下相

对于参考应力剖面的振动应力严酷系数为：

$$A_s = \frac{\lambda_s}{\lambda_b} = \sum_{i=1}^n k_i A_{fi} \text{。} \tag{25}$$

若各测点位置设备故障发生比例 k_i 未知或未出现故障，则由预计的各设备故障率占装备故障率的比率作为各设备故障发生比例，此时各测点设备故障发生比例为：

$$k_i = \lambda_i / \sum_{i=1}^n \lambda_i \text{。} \tag{26}$$

3 应用示例

以某装甲车辆为例，在可靠性鉴定试验过程中湿热地区鉴定试验剖面和参考剖面各应力如表 1—3 所示。利用单应力和多应力严酷系数计算模型，分析试验剖面各应力相比于参考剖面的考核严酷程度。

表 1 温湿度比较

类别	平均温度/℃	平均湿度/%	持续时间/d
鉴定试验	30	85	6
	33	82	6
	35	78	8
参考	32	80	20

表 2 振动电压比较

类别	某车载设备加速度 功率谱密度/(g ² /Hz)	供电电压/V	工作时间/h
鉴定试验	0.31	24.4	60
参考	0.32	24.8	60

表 3 传动轴应力与循环次数比较

类别	应力/ MPa	次数	类别	应力/ MPa	次数
鉴定试验	1.5	2 009 250	参考	1.5	2 012 510
	4.5	1 203 750		4.5	1 210 250
	7.5	978 750		7.5	996 750
	10.5	776 250		10.5	785 380
	13.5	513 000		13.5	526 200
	16.5	337 500		16.5	338 600
	19.5	180 000		19.5	186 000
	22.5	106 875		22.5	106 200
	25.5	56 250		25.5	55 750
	28.5	36 300		28.5	35 300
	31.5	19 225		31.5	18 625
	34.5	10 180		34.5	9 825
	37.5	4 550		37.5	4 430
	40.5	2 260		40.5	2 110
	43.5	1 012		43.5	955

1) 温度。

对于湿热地区高温应力，可取装甲车辆对高温应力敏感或历史故障较多部位作为测点，取每日试验期间温度平均值计算每日的温度严酷系数，然后进行组合计算出整个湿热地区试验期间的温度严酷系数。本示例中进行了简化，将其中一个测点在试

验期间的每日温度平均值统计后归为 3 档。依据阿伦尼斯模型，取 $E_a=0.6\text{eV}$ ，试验剖面相对于参考剖面的高温应力严酷系数为：

$$A_T = \frac{t}{t_0} \exp[E_a(1/T_0 - 1/T)/k] = 1.08 \text{。} \tag{27}$$

2) 温湿度。

在湿热地区，装备的湿度应力一般与高温应力耦合，同样取每日试验期间湿度的平均值，计算每日温度-湿度严酷系数后再进行组合。本示例中将其中一个测点的湿度应力简化为与温度对应的 3 档。根据 Peck 模型，取 $B=3.0$ 、 $E_a=0.6\text{ eV}$ ，计算得到试验剖面相对于参考剖面的温度-湿度耦合应力严酷系数为：

$$A_{T-RH} = \frac{t}{t_0} \left(\frac{RH}{RH_0} \right)^B \exp \left[\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right] = 1.12 \text{。} \tag{28}$$

3) 振动。

对振动应力敏感的装甲车辆车载设备较多，重点考虑车载电子设备，测点选择主要是车载设备集中的安装部位、对振动应力敏感且历史故障较多的设备或部位。本示例中给出了某车载设备安装较集中部位的振动加速度功率谱密度均值。根据振动应力逆幂律模型，随机振动取 $B=4$ ，计算得到试验剖面相对于参考剖面的振动应力严酷系数为：

$$A_f = (W/W_0)^B \cdot (t/t_0) = 0.88 \text{。} \tag{29}$$

若要保持振动应力严酷系数相同，可通过调整振动应力大小或持续时间来实现，如试验剖面振动持续时间调整为 68.18 h，应力保持不变，则 $A_f=1$ 。

4) 载荷。

依据 Basquin 应力-疲劳寿命模型，已知传动轴材料的 $S-N$ 曲线，幂指数取 $m=7$ ，根据单载荷应力多量级组合严酷度计算公式，得到试验剖面相对于参考剖面的载荷应力严酷系数：

$$A_\sigma = \sum_{i=1}^{15} n_i \sigma_i^m / \sum_{i=1}^{15} n_{0i} \sigma_i^m = 1.03 \text{。} \tag{30}$$

5) 电压。

装甲车辆车载用电设备较多，其供电电源均为发电机供电，可直接对输入电压进行测量。根据电应力加速逆幂律模型，取 $B=2$ ，计算试验剖面相对于参考剖面的电压应力严酷系数为：

$$A_V = (V/V_0)^B \frac{t}{t_0} = 0.97 \text{。} \tag{31}$$

通过对可靠性试验剖面各应力相对参考剖面的严酷系数计算示例可以看出：鉴定试验剖面的温湿

度应力和载荷应力相比参考剖面更严酷,而振动应力和电压应力则比参考剖面弱;对于振动应力而言,相对参考剖面较小的应力变化也会导致振动应力严酷系数较大的差异;通过试验应力严酷度,能够实现对试验剖面严酷程度的定量评价,可为鉴定试验剖面设计和结果评价提供参考依据;通过调整试验剖面应力大小或持续时间,可使鉴定试验剖面与参考剖面应力严酷系数一致。

4 结论

笔者利用等效损伤原理,将可靠性加速试验理论应用于装甲车辆可靠性试验严酷度评价中,建立了基于故障物理的单应力、多应力和单应力组合可靠性试验严酷度评价模型,结论如下:

1) 单应力多量级组合应力的严酷系数符合线性叠加原则。

2) 通过试验应力严酷度,能够实现对试验剖面严酷程度的定量评价,可为鉴定试验剖面设计和结果评价提供参考依据。

3) 通过调整试验剖面应力大小或持续时间,可使鉴定试验剖面与参考剖面应力严酷系数一致。

参考文献:

- [1] 国防科学技术工业委员会. 装甲车辆设计定型试验规程: GJB 848-90[S]. 1990.
- [2] 陈循. 加速寿命试验技术与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013.
- [3] 林震, 姜同敏, 程永生. 阿伦尼斯模型研究[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2005(6): 12-14.
- [4] 赵帅帅, 陈永祥. 基于修正 Coffin-Manson 模型的加速寿命试验设计与评估[J]. 强度与环境, 2013, 40(4): 52-58.
- [5] UPADHYAY S K, SEN R. A Bayes Analysis of Inverse Gaussian Based Accelerated Test Models[J]. International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering, 2019, 26(2): 28.

(上接第 46 页)

- [3] LIU J W, QIU X T, CHEN D X, et al. Motion Error Mechanism Analysis and Simulation Verification of Ocean Electric Field Sensor[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2024, 2718: 012050.
- [4] 程锦房, 龚沈光. 测量体引起的舰船电场畸变[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2009(7): 816-819.
- [5] 张华, 单潮龙, 王向军, 等. 传感器支架和外加测量体

- [6] JABER A R, LAURENT S, MOHSEN K, et al. Coupling simulation and accelerated degradation model for reliability estimation: Application to a voltage regulator[J]. Microelectronics Reliability, 2022, 138.
- [7] NENEVÊ B L, COSTA M, MEDEIROS-JUNIOR R A. Alternative small-scale accelerated test to measure the effect of thermal shock on rendering mortar properties[J]. Journal of Building Engineering, 2022, 46.
- [8] MA Z H, LIAO H T, JI H, et al. Optimal design of hybrid accelerated test based on the Inverse Gaussian process model[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2021, 210.
- [9] 罗巍. 基于加速试验的可靠性验证理论与方法研究[D]. 北京: 国防科技大学, 2013.
- [10] 曹胜. 基于故障物理的电子产品可靠性预计与试验研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2016.
- [11] 康劲松, 景诗毅. 多应力加速模型及加速系数研究[J]. 机电一体化, 2009, 15(8): 32-34, 37.
- [12] 张晓洁, 李政. 一种基于振动应力变换的加速试验方法研究[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2015, 33(1): 20-23.
- [13] DoD. Environmental Engineering Considerations and Laboratory Tests: MIL-STD-810H[S].
- [14] 中华人民共和国工业和信息化部. 产品加速试验方法: GB/T 34986-2017[S].
- [15] 杨宇辰. 随机振动加速试验的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [16] 王冬梅, 谢劲松. 随机振动试验加速因子的计算方法[J]. 环境技术, 2010, 28(2): 47-51.
- [17] 陈宽裕. 随机振动激励的加速方法研究与试验验证[M]. 成都: 西南交通大学, 2021.
- [18] 王举金. 多轴随机振动疲劳预测与加速疲劳试验研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2019.
- [19] 曹强, 何屏, 王婷, 等. 基于逆幂率模型的随机振动疲劳加速试验应用方法研究[J]. 环境技术, 2020, 38(3): 7-12.
- [20] 中国人民解放军总装备部. 军用装备实验室环境试验方法第 16 部分: 振动试验: GJB 150.16A[S]. 2009.

影响电场测量值的实验[J]. 空军预警学院学报, 2013, 27(2): 3.

- [6] 刘永志. 舰船电场特性测试方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学水声工程学院, 2009.
- [7] 陈闻博, 宋玉苏, 王烨煊. 海洋电场传感器研究概况[J]. 传感器与微系统, 2019, 38(12): 1-4.
- [8] 吕俊军, 陈凯, 苏建业, 等. 海洋中的电磁场及其应用[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2020.