

采用等效载荷的装甲车辆扭力轴 疲劳可靠性评估

白恩军¹, 黄树涛¹, 谢里阳²

(1. 沈阳理工大学汽车与交通学院, 110159, 沈阳;

2. 东北大学航空动力装备振动及控制教育部重点实验室, 110819, 沈阳)

摘要: 为了评估扭力轴在随机载荷作用下的动态疲劳可靠性,提出了一种基于疲劳可靠性异量纲干涉模型的扭力轴动态疲劳可靠性评估方法。将实测扭力轴载荷频次谱进行分布拟合,生成随机载荷历程,利用雨流计数法获得载荷幅值、均值和循环次数,经平均应力修正后统计极值载荷分布,构建等效输入应力谱,避免了多次载荷等效的统计分析;基于材料 $P-S-N$ 曲线,应用样本集聚原理建立疲劳寿命概率分布连续模型,实现变幅应力疲劳寿命的连续表达。对某扭力轴疲劳可靠度的分析结果表明:在寿命为 15×10^4 km 时,计算的扭力轴疲劳可靠度与文献方法计算结果相对误差小于 2%,扭力轴疲劳可靠度的 50 次和 10 000 次仿真结果的变异系数均小于 1%。

关键词: 可靠性评估;随机载荷;连续模型;扭力轴; $P-S-N$ 曲线

中图分类号: TB114 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202009007 **文章编号:** 0253-987X(2020)09-0066-06



OSID 码

Fatigue Reliability Modelling and Evaluation of Torsion Shaft for Armored Vehicles Using Equivalent Load Spectrum

BAI Enjun¹, HUANG Shutao¹, XIE Liyang²

(1. School of Automobile and Transportation, Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China;

2. Laboratory of Vibration and Control of Aero-Propulsion System, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: To evaluate the dynamic fatigue reliability of a torsion shaft under random loads, an evaluation method for the dynamic fatigue reliability of torsion shaft is proposed based on the dissimilar-dimension interference model of fatigue reliability. The measured load frequency spectrum of a torsion shaft is analyzed and the probability distribution is fitted. The random load spectrum is obtained using the probability distribution of load. The amplitude, mean value and number of cycles are obtained using the rainflow counting method. The equivalent stress spectrum is obtained by the statistic extreme load after amending mean stress. Therefore, frequent statistical analysis of equivalent constant load is avoided. A continuous model of probability distribution of fatigue life is established following the principle of sample concentration and $P-S-N$ curves of material. The expression of fatigue life under variable amplitude stress is obtained. The reliability analysis of a torsion shaft shows that the reliability difference between the proposed method and a reference method is less than 2%. The variation coefficient is less than 1% through statistical analysis on the results obtained by multiple

simulations under random loads.

Keywords: reliability evaluation; random load; continuous model; torsion shaft; *P*-*S*-*N* curve

扭力轴是装甲车辆悬挂的重要组成部分,承受随机扭转载荷作用,吸收路面带来的振动与冲击,确保装甲车辆整体性能的稳定性和使用可靠性。扭力轴的疲劳可靠性评估是扭力轴疲劳可靠性设计的重要组成部分。

很多学者对装甲车辆扭力轴的疲劳可靠性评估进行了一系列的研究^[1-5]。Zhi 等基于随机响应面方法和埃尔米特方法提出了扭力轴低周疲劳寿命预测方法^[6-7];狄长春等采用 Adams 软件平台基于应变-寿命分析法建立扭力轴的疲劳虚拟样机^[8];刘喆等运用随机摄动理论和四阶矩技术,并结合灵敏度分析,提出了在多种失效模式下多目标优化的扭力轴可靠性稳健设计模型^[9];刘勤等提出了以双循环策略处理耐久性目标、单循环策略处理可靠性约束的扭力轴耐久性优化设计方法^[10];汤清洪等通过对单一载荷工况雨流计数、分布规律与检验以及对多工况载荷的合成,构建了全寿命历程扭力轴的多工况二维随机疲劳载荷谱^[11]。

目前,针对扭力轴疲劳可靠性的相关研究工作还停留在基于许用应力的静态可靠性评估层面上,评估结果不能真实地反映装备的服役情况。扭力轴承受随机交变扭转载荷的作用,为了精确地评估扭力轴的疲劳可靠性,需要足够重视随机动态载荷特性。本文在现有分析方法基础上,研究了载荷不确定性表征方法以及材料不确定性的连续概率寿命分布模型建模方法,提出了基于异量纲干涉模型的扭力轴疲劳可靠性评估方法,并以扭转疲劳失效为例,详细地给出了评估流程,丰富了扭力轴评估理论方法体系。

1 疲劳可靠性模型

在扭转载荷作用下,扭力轴发生扭转疲劳破坏,通常发生在扭杆与圆弧过渡处。当最大扭转剪切应力大于许用剪切应力时,扭力轴发生失效。根据应力-强度干涉理论,扭力轴单个危险部位的可靠性模型可表示为

$$R = \int_0^{+\infty} f(\tau) \int_{\tau}^{+\infty} f(S) dS d\tau \tag{1}$$

式中: $f(S)$ 为强度概率密度函数; $f(\tau)$ 为剪切应力概率密度函数。

在计算可靠度时,式(1)模型需要已知扭力轴危

险部位材料在指定寿命下的疲劳强度分布。由于材料在指定疲劳寿命下的疲劳强度分布的推理计算过程复杂,而材料在指定强度下的疲劳寿命分布很容易通过疲劳试验获得^[12]。因此,通过疲劳寿命分布估算系统可靠度是相对简便的方法。

假设扭力轴材料的疲劳寿命分布函数为 $g(n)$,那么在某一应力 s 作用下,单个危险部位的疲劳寿命大于 L 的可靠性模型可表达为

$$R_n = \int_0^{+\infty} f(s) \int_L^{+\infty} g(n | s) dn ds \tag{2}$$

式中 $g(n | s)$ 为应力 s 下的材料疲劳寿命概率分布函数。

扭力轴承受扭转载荷作用,扭转剪切应力与拉伸应力的关系为 $\tau/s = 0.59$ ^[13],在剪切应力载荷作用下,单个危险部位的疲劳寿命大于 L 的可靠性模型可表示为

$$R_{\tau} = \frac{1}{0.59} \int_0^{+\infty} f[s(\tau)] \int_L^{+\infty} g[n | s(\tau)] dn d\tau \tag{3}$$

对于具有 m 个危险部位的扭力轴系统,其串联系统可靠性模型可表达为

$$R_{\tau}^{\text{series}} = \frac{1}{0.59} \int_0^{+\infty} f[s(\tau)] \prod_{i=1}^m \int_L^{+\infty} g_i[n | s_i(\tau)] dn d\tau \tag{4}$$

式中 i 为危险部位编号, $i = 1, 2, \dots, m$ 。

2 疲劳寿命概率分布连续模型

目前国内装甲车辆扭力轴使用的材料为 45CrNiMoVA,属于低合金超高强度钢。表 1 为材料 45CrNiMoVA 在 4 个应力水平下具有指定存活率的疲劳寿命 N_P ,存活率(P)-应力(S)-循环次数(N)曲线如图 1 所示。

表 1 材料 45CrNiMoVA 指定存活率的疲劳寿命^[14]

应力 /MPa	$N_P / 10^4$				
	$P=50\%$	$P=90\%$	$P=95\%$	$P=99\%$	$P=99.9\%$
810	2.97	2.02	1.81	1.48	1.18
750	6.20	3.72	3.22	2.45	1.81
670	1.83	9.10	7.45	5.13	3.39
600	52.70	21.80	17.00	10.60	62.60

在对数坐标下拟合的各应力水平疲劳寿命的数学期望 $E(N)$ 和标准差 $S(N)$ 见表 2,疲劳寿命与应力的关系如图 2 所示。拟合关系式如下式

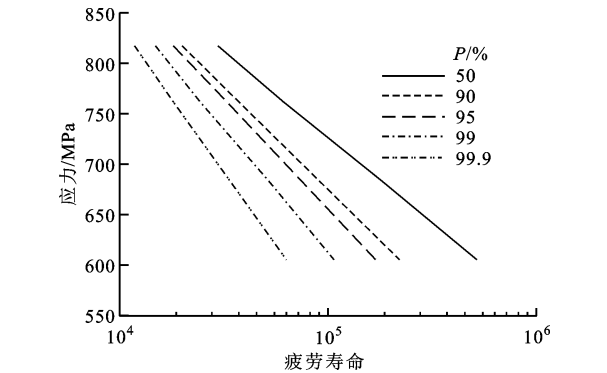


图 1 材料 45CrNiMoVA 的 P - S - N 曲线

表 2 各应力水平疲劳寿命的数学期望和标准差

应力/MPa	疲劳寿命	
	期望	标准差
810	31 076.824 3	9 529.200 7
750	67 131.336 8	27 862.953 5
670	212 276.940 1	124 957.201 1
600	669 213.427 9	521 895.877 9

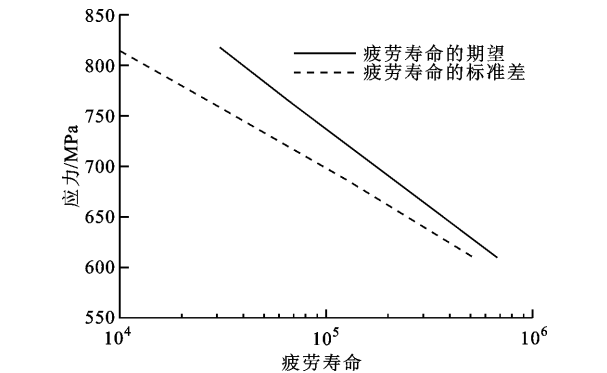


图 2 疲劳寿命的期望和标准差与应力的线性拟合

$$\left. \begin{aligned} E(N) &= 10^{\left(\frac{7.707 - \lg s_i}{0.09773}\right)} \\ S(N) &= 10^{\left(\frac{7.387 - \lg s_i}{0.07506}\right)} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

对数正态分布的数学期望和方差如下式

$$\left. \begin{aligned} E(N) &= \exp(\mu + \sigma^2/2) \\ D(N) &= [\exp(\sigma^2) - 1]\exp(2\mu + \sigma^2) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

将式(5)代入式(6),可得到任意应力下对数循环次数的均值和标准差为

$$\left. \begin{aligned} \mu &= \ln[E(N)] - \frac{1}{2} \ln\left(1 + \frac{S^2(N)}{E^2(N)}\right) \\ \sigma &= \sqrt{\ln\left(\frac{S^2(N)}{E^2(N)} + 1\right)} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

对数正态分布的概率密度函数如下式

$$g(n | s_i) = \frac{(2\pi)^{-1/2}}{n\sigma} \exp\left(-\frac{(\ln n - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (8)$$

将式(7)代入式(8),即可获得任意应力水平下

材料疲劳寿命的连续概率密度函数。

3 疲劳载荷谱的构建

兵器工业部 201 所测定了坦克在随机路面上行驶 6 km 的实测值,经过统计分析,获得扭力轴 12 级扭转载荷谱^[15],见表 3。

表 3 扭力轴 12 级扭转载荷谱

载荷级	剪切应力范围/MPa	剪切应力统计次数
1	0~53	
2	54~106	1 577
3	107~159	979
4	160~212	564
5	213~265	306
6	266~318	208
7	319~371	202
8	372~424	71
9	425~477	30
10	478~530	13
11	531~587	10
12	588~636	5

根据表 3 中每级载荷所在区间的次数占总统计次数的概率,应用蒙特卡罗方法生成一个随机载荷历程,如图 3 所示。载荷历程服从对数正态分布,对数均值为 4.893 4,标准差为 0.546 5,载荷历程的统计直方图如图 4 所示。

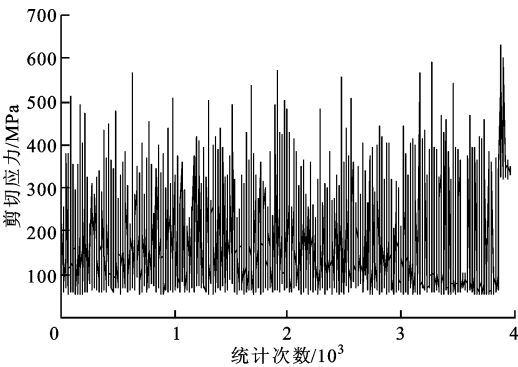


图 3 随机载荷历程

对于承受扭转载荷的圆轴,切应变 $\gamma(\rho)$ 与扭转角 φ 的关系、扭转角与扭矩 M_x 的关系分别如下式

$$\gamma(\rho) = \rho \frac{d\varphi}{dx} \quad (9)$$

$$\frac{d\varphi}{dx} = \frac{M_x}{GI_p} \quad (10)$$

式中: G 为剪切弹性模量; ρ 为轴线距所求剪切应力位置的距离; M_x 为扭矩; I_p 为轴的极惯性矩。

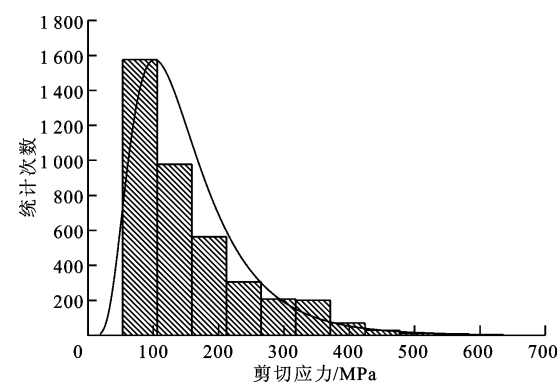


图 4 载荷历程的统计直方图

将式(9)(10)代入剪切胡克定律,可得下式

$$\tau = G\gamma(\rho) = G\rho \frac{d\varphi}{dx} = \frac{M_x\rho}{I_p} \tag{11}$$

通过式(11),可得到扭转角、扭矩和剪切应力之间的关系。在获得危险部位的载荷后,结合式(4)和式(8),对系统可靠度进行评估。

4 随机载荷历程下扭力轴疲劳可靠度评估流程

随机载荷历程下扭力轴疲劳可靠度评估流程如下:

- 步骤 1** 在对数坐标下对材料各应力水平下的疲劳寿命概率分布的参数进行线性拟合,得到均值和标准差与应力水平的关系表达式,利用对数正态分布函数,构建疲劳寿命连续概率分布模型;
- 步骤 2** 统计实测扭力轴随机载荷分布,通过计算得到剪切应力载荷谱;
- 步骤 3** 随机生成一个确定的剪切载荷历程,通过计算获得危险部位剪切应力载荷历程;
- 步骤 4** 利用雨流计数法获得危险部位剪切应力历程中各个循环的应力均值、幅值和循环次数;
- 步骤 5** 应用平均应力修正公式,将非对称循环转化为对称循环应力;
- 步骤 6** 重复步骤 2~5,获得多个循环的载荷峰值,并统计极值载荷分布来作为等效载荷分布;
- 步骤 7** 应用等效载荷与疲劳寿命连续概率分布模型,结合可靠性模型式(4),估算系统可靠度。

5 扭力轴疲劳可靠度计算

图 5 给出了扭力轴在扭转 40°时的剪切应力云图,最大剪切应力在扭力轴圆弧过渡处。下面以扭力轴圆弧过渡处应力集中位置为例,计算危险部位在随机扭转载荷作用下的疲劳可靠度。

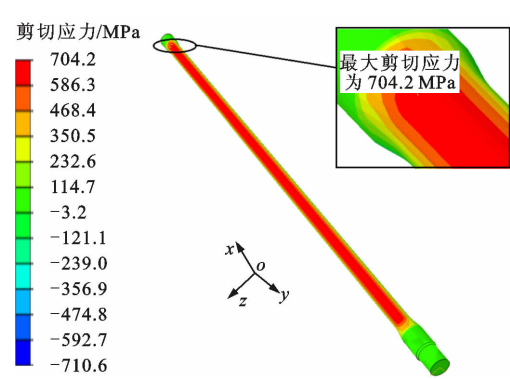


图 5 扭力轴扭转 40°时的剪切应力云图

图 3 所示载荷历程通过雨流计数法,获得随机剪切载荷历程中各循环剪切应力的均值、幅值和循环次数,循环剪切应力的统计结果如图 6 所示。将雨流计数法得到的非对称循环应力通过 Goodman 平均应力修正公式转化为对称循环应力,Goodman 平均应力修正公式如下

$$\frac{S_a}{S_{a(-1)}} + \frac{S_m}{S_u} = 1 \tag{12}$$

式中: S_a 为应力幅; S_m 为平均应力; S_u 为材料极限强度; $S_{a(-1)}$ 为当量应力。

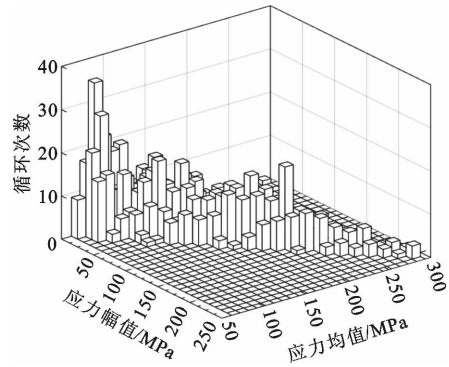


图 6 经雨流计数法处理后的循环剪切应力统计结果

经 Goodman 平均应力修正后,获得对称循环下各循环载荷的幅值、均值和循环次数。重复上述过程,将两次获得的离散载荷混合,拟合离散载荷的概率分布特征参数,作为等效输入载荷分布函数的特征参数。

应用式(4)所示的可靠性模型和文献[16]方法计算扭力轴的可靠度,得到扭力轴可靠度随寿命变化的曲线,如图 7 所示,可见应用文献[16]方法和本文方法计算的可靠度趋势基本一致,在寿命为 15×10^4 km 时,本文方法与文献[16]方法计算的可靠度的相对误差为 1.38%。

本文方法的计算效率相对文献[16]方法有所提高,并且评估结果较稳定。表 4 给出了扭力轴寿命

表 4 寿命为 15×10^4 km 时 50 次随机载荷作用下的可靠度仿真结果

仿真次数	可靠度	仿真次数	可靠度	仿真次数	可靠度	仿真次数	可靠度	仿真次数	可靠度
1	0.886 11	11	0.882 24	21	0.884 93	31	0.881 39	41	0.889 33
2	0.886 09	12	0.884 37	22	0.887 29	32	0.882 22	42	0.877 58
3	0.887 76	13	0.887 86	23	0.885 06	33	0.889 96	43	0.883 03
4	0.886 44	14	0.891 53	24	0.885 17	34	0.887 30	44	0.884 07
5	0.884 63	15	0.887 47	25	0.890 37	35	0.886 40	45	0.890 46
6	0.885 00	16	0.884 53	26	0.886 17	36	0.881 04	46	0.895 14
7	0.889 71	17	0.891 64	27	0.886 67	37	0.889 77	47	0.888 04
8	0.893 13	18	0.886 64	28	0.886 86	38	0.886 03	48	0.883 31
9	0.885 00	19	0.875 85	29	0.886 04	39	0.888 68	49	0.880 74
10	0.888 25	20	0.889 56	30	0.890 02	40	0.892 02	50	0.883 69

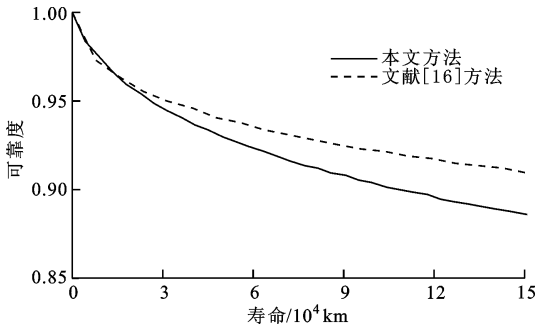


图 7 扭力轴可靠度随寿命的变化曲线

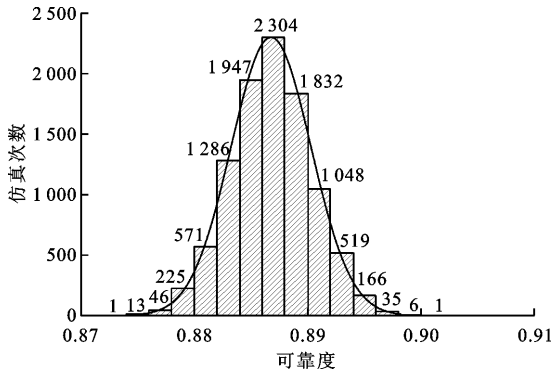


图 9 寿命为 15×10^4 km 时 10 000 次可靠度仿真统计结果

为 15×10^4 km 的 50 次随机载荷作用下的可靠度仿真结果。寿命为 15×10^4 km 时,应用本文方法分别进行 50、10 000 次扭力轴可靠度仿真的统计结果如图 8、9 所示,变异系数分别为 0.42% 和 0.40%。

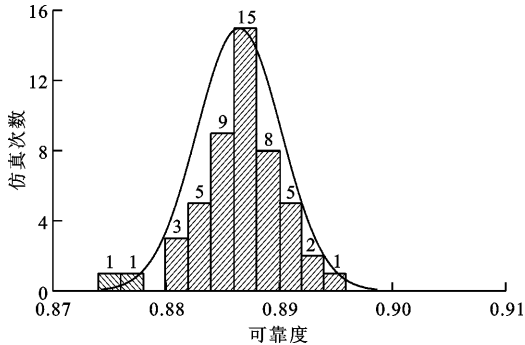


图 8 寿命为 15×10^4 km 时 50 次可靠度仿真统计结果

6 结 论

基于应力-寿命的异量纲干涉模型和扭力轴材料的疲劳寿命概率分布连续模型,考虑扭力轴载荷与强度(寿命)的不确定性(分散性),建立了评估扭力轴系统可靠度的多失效部位模式的疲劳可靠性模型。

应用本文方法计算了某扭力轴的可靠度,并与

文献[16]方法对比,在寿命为 15×10^4 km 时的可靠度相对误差小于 2%,并且通过本文方法进行 50 次和 10 000 次可靠度仿真,其可靠度的变异系数均小于 1%。

参考文献:

[1] 杨涛,孙伟,王红岩. 基于虚拟样机技术的坦克扭力轴疲劳强度分析 [J]. 装甲兵工程学院学报, 2006, 20 (3): 59-63.
YANG Tao, SUN Wei, WANG Hongyan. Fatigue intensity analysis of the torsion bar of a tank based on virtual prototyping technique [J]. Journal of Academy of Armored Force Engineering, 2006, 20(3): 59-63.
[2] 闫思宏,陶凤和,贾长治. 履带车辆承载关重件耐久性疲劳预测与结构优化 [J]. 机械强度, 2018, 40(4): 1012-1016.
YAN Sihong, TAO Fenghe, JIA Changzhi. Durability fatigue prediction and structure optimization of load-bearing key part of tracked vehicle [J]. Journal of Mechanical Strength, 2018, 40(4): 1012-1016.
[3] 周国峰,李晓延,史耀武,等. 某型主战坦克扭力轴工作过程数值模拟及寿命预测 [J]. 机械强度, 2006,

- 28(4): 578-581.
- ZHOU Guofeng, LI Xiaoyan, SHI Yaowu, et al. Numerical simulation of the working process and life prediction of a tank torsion shaft [J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2006, 28(4): 578-581.
- [4] 易当祥, 刘春和, 赵韶平, 等. 随机载荷作用下自行火炮扭力轴疲劳可靠性分析与仿真 [J]. *兵工学报*, 2007, 28(12): 14-17.
- YI Dangxiang, LIU Chunhe, ZHAO Shaoping, et al. Fatigue reliability analysis and simulation of self-propelled gun's torsion bar under random loads [J]. *Acta Armamentarii*, 2007, 28(12): 14-17.
- [5] CHOI J H, LEE H C, SHABANA A A. Spatial dynamics of multibody tracked vehicles: part I Spatial equations of motion [J]. *Vehicle System Dynamics*, 1998, 29(1): 27-49.
- [6] ZHI Jianzhuang, LIU Guangsheng, ZHANG Junjun, et al. Load spectrum measurement and fatigue life prediction of torsion shaft of self-propelled guns [C]// *Proceedings of the International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance and Safety Engineering*. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2012: 975-979.
- [7] LI Yadong, ZHENG Jian, JIA Changzhi. Experiment study and fatigue life prediction of torsion shaft of self-propelled gun based on stochastic response surface method [C]// *Proceedings of the 2009 9th International Conference on Electronic Measurement and Instruments*. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2009: 664-668.
- [8] 狄长春, 杜中华, 王兴贵. 自行火炮扭力轴疲劳寿命仿真研究 [J]. *火炮发射与控制学报*, 2004(4): 39-41.
- DI Changchun, DU Zhonghua, WANG Xinggui. Fatigue life simulation about torsion bar of self-propelled gun [J]. *Gun Launch and Control Journal*, 2004(4): 39-41.
- [9] 刘喆, 陶凤和, 贾长治. 多种失效模式履带车辆扭力轴可靠性稳健设计 [J]. *北京航空航天大学学报*, 2016, 42(4): 815-820.
- LIU Zhe, TAO Fenghe, JIA Changzhi. Reliability robust design of tracked vehicle torque axis with multiple failure modes [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2016, 42(4): 815-820.
- [10] 刘勤, 钱云鹏, 姬广振, 等. 随机载荷作用下扭力轴耐久性优化设计 [J]. *兵工学报*, 2015, 36(5): 933-937.
- LIU Qin, QIAN Yunpeng, JI Guangzhen, et al. Durability-based design optimization of torsion shaft under random loading [J]. *Acta Armamentarii*, 2015, 36(5): 933-937.
- [11] 汤清洪, 马吉胜, 贾长治. 扭力轴多工况二维随机疲劳载荷谱的编制 [J]. *振动与冲击*, 2007, 26(2): 105-106.
- TANG Qinghong, MA Jisheng, JIA Changzhi. Establishment of two-dimensional stochastic fatigue load spectrum in multiple-loading case for torsion shaft [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2007, 26(2): 105-106.
- [12] 谢里阳. 机械可靠性基本理论与方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2009: 90-92.
- [13] 林吉忠. 金属的缺陷、载荷与疲劳 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 1993: 96-100.
- [14] 机械工程材料性能数据手册编委会. 机械工程材料性能数据手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1995: 280-281.
- [15] 周国峰, 李晓延, 史耀武, 等. 坦克扭力轴表面缺陷对疲劳寿命的影响 [J]. *材料科学与工艺*, 2008, 16(1): 6-10.
- ZHOU Guofeng, LI Xiaoyan, SHI Yaowu, et al. Influence of surface notch on fatigue life of tank torsion shaft [J]. *Materials Science and Technology*, 2008, 16(1): 6-10.
- [16] 胡杰鑫, 谢里阳, 尹伟, 等. 复杂结构件疲劳可靠性模型与评估技术研究 [J]. *西安交通大学学报*, 2018, 52(7): 123-129.
- HU Jiexin, XIE Liyang, YIN Wei, et al. Study on fatigue reliability model and evaluation method of complex structures [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2018, 52(7): 123-129.

(编辑 武红江)