



基于疲劳累积的物流产品寿命预估

doi:10.3969/j.issn.1674-7100.2020.02.010

丁逸秋 曾台英

上海理工大学
出版印刷与艺术设计学院
上海 200093

摘要: 针对物流产品在运输过程中的状态以及如何预估产品疲劳寿命的问题, 根据当前的损伤评价标准和经典损伤理论, 列举出两种常见疲劳寿命预估方法。通过实例从理论分析和 Matlab Simulink 数值仿真分析两个方面验证了两种方法的有效性, 而且两种方法预估的产品疲劳寿命基本一致。通过对产品的疲劳寿命的预估, 可为产品的运输方式、运输时间选择以及运输缓冲包装设计提供参考。

关键词: 物流产品; 疲劳累积; 疲劳寿命; 损伤评价; Matlab Simulink

中图分类号: TB487 **文献标志码:** A

文章编号: 1674-7100(2020)02-0071-06

引文格式: 丁逸秋, 曾台英. 基于疲劳累积的物流产品寿命预估 [J]. 包装学报, 2020, 12(2): 71-76.

0 引言

物流产品在运输过程中会受到诸多因素的影响, 例如振动、冲击、湿度、温度等, 其中产品破损主要受振动与冲击的影响。基于此, 国内外学者对产品破损进行了大量研究。江春东等^[1]通过应用线性累积损伤理论, 提出了一种基于线性累积损伤理论对产品进行振动疲劳计算的方法, 为产品结构设计提供了理论指导。叶菲^[2]基于 Miner 线性累积损伤理论, 提出了随机振动载荷下频域疲劳寿命预估方法, 该方法对后续结构设计有重要意义。G. J. Burgess^[3]在线性累计损伤理论的基础上, 推导了产品塑性失效加速度、速度准则, 建立了疲劳破损边界新理论, 从而指导后续的结构设计。M. Matsuishi 等^[4]提出的雨流计数法是疲劳寿命估计较精确的方法之一, 它可以将时间历程片段简化为已知循环次数的应力幅值和应力

均值, 具有很强的适用性。

上述文献中的研究一般基于理论方法展开, 没有通过数值仿真来验证。本文介绍了两种损伤评价方法, 并建立两种方法的数学模型, 再通过应用 Matlab Simulink 进行数值仿真来验证两种方法的有效性, 以期对产品后续的结构设计和产品运输的评判方法提供参考。

1 疲劳累积损伤理论

一个完整的疲劳累积损伤理论有 3 个要素: 首先要定义疲劳损伤, 即一个载荷循环对材料或结构造成多大损伤; 其次要了解损伤在多个载荷循环作用时的叠加方式; 最后要找出结构失效的损伤极限。M. A. Miner 提出的线性损伤理论为: 产品在随机振动下承受的交变循环载荷, 对其造成的损伤可以线性累加, 各个载荷之间相互独立、互不相关, 当累加的损伤达

收稿日期: 2020-01-25

基金项目: 上海市教师教学发展研究基金资助项目 (CFTD194049)

作者简介: 丁逸秋 (1995-), 男, 江苏南通人, 上海理工大学硕士生, 主要研究方向为包装运输动力学,
E-mail: 962430043@qq.com

通信作者: 曾台英 (1978-), 女, 浙江台州人, 上海理工大学讲师, 博士, 主要从事包装运输动力学方面的教学与研究,
E-mail: zty3130@126.com

到某一数值时(临界值),产品就会发生疲劳损坏^[5]。常见的疲劳累积损伤理论有 Miner 理论、基于滞回能的线性累积损伤理论、Carten-Dolan 理论等^[6],其中最经典的是 Miner 线性损伤理论。

Miner 理论^[7]完整地回答了疲劳累积损伤理论的三要素,即一个循环造成的损伤、等幅载荷下 n 个循环造成的损伤、变幅载荷下 n 个循环造成的损伤。用 D 表示疲劳累积损伤过程的总损伤,其计算公式为

$$D = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i}, \quad (1)$$

式中: k 为应力等级;

N_i 为产品在应力 σ_i 作用下的疲劳破坏循环次数;

n_i 为产品在应力 σ_i 作用下的实际循环次数。

2 疲劳寿命预估法

产品疲劳寿命是线性损伤理论中的重要评判指标。疲劳寿命分析方法,首先要描述材料疲劳行为,然后研究循环载荷下结构的响应,最后运用疲劳累积损伤法则预估疲劳寿命^[8]。按照计算疲劳损伤参量的不同,可以将疲劳寿命分析方法分为局部应力应变法、名义应力法、功率谱密度法等^[9]。下面介绍了两种常见的疲劳寿命预估方法。

2.1 基于 $S-N$ 曲线的疲劳寿命估算

为了评价和估算疲劳寿命或疲劳强度,需要建立外载荷与材料寿命之间的关系, $S-N$ 曲线反映了外加应力 S 和疲劳寿命 N 之间的关系^[10]。基于 $S-N$ 曲线来估算随机振动载荷下产品疲劳寿命,此时疲劳曲线方程为

$$S^m N_S = C, \quad (2)$$

式中: C 、 m 为材料常数;

N_S 为应力为 S 时的破坏循环次数。

令 $p(S)$ 为概率密度函数,则在峰值 S 至 $S+dS$ 区间内应力循环的概率为 $p(S)dS$ 。在应力区间 $[S, S+dS]$ 内的循环次数 $N_S = N \cdot p(S)dS$, 将 N_S 代入式

(2) 中,通过计算有

$$N \int_{S_0}^{S_{\max}} \frac{p(S)}{C} S^m dS = 1, \quad (3)$$

式中: S_0 为疲劳极限;

S_{\max} 为应力幅值的最大值。

从而得到估算疲劳寿命 N 的公式^[11]

$$N = \frac{1}{\int_{S_0}^{S_{\max}} \frac{p(S)}{C} S^m dS}。 \quad (4)$$

2.2 基于失效物理模型预测的疲劳寿命预估

基于失效物理模型预测法是故障预测与健康管理 (prognostics and health management, PHM) 技术中的一种,另外两种方法是基于统计和基于数据驱动的^[12]。其中基于失效物理模型预测的方法所得结果精度更高。

此方法的流程是先确定产品危险部位的应力严重系数和疲劳缺口系数,然后用修正局部应力应变法预测连接件疲劳寿命。

应力严重系数公式为

$$K_y = \frac{\alpha\beta}{\sigma_{ck}} (\sigma_2 + \sigma_3) = \frac{\alpha\beta}{\sigma_{ck}} \left(K_{tb} \frac{R}{ldt} + K_t \frac{P_p}{Wt} \right), \quad (5)$$

式中: α 为孔表面状况系数;

β 为孔充填系数;

σ_2 为由紧固件传递载荷引起的孔边局部最大应力;

σ_3 为由旁路载荷引起的局部最大应力;

σ_{ck} 为参考应力;

K_{tb} 为应力集中系数;

K_t 为理论应力集中系数;

R 为钉传载荷;

P_p 为紧固载荷;

l 为紧固件个数;

d 为紧固件直径;

t 为板厚;

W 为板宽。

疲劳缺口敏感系数公式为

$$q = \frac{1}{1+a/r}, \quad (6)$$

式中: a 为材料参数; r 为圆角半径。

因此,疲劳缺口系数公式为

$$K_f = 1 + q(K_y - 1), \quad (7)$$

在产品寿命计算过程中, K_y 与理论应力集中系数 K_t 相对应。

修正 Neuber 公式能将名义应力转化为局部应力,如式 (8) 所示

$$\frac{K_f^2 (\Delta S)^2}{E} = \Delta \sigma \cdot \Delta \varepsilon, \quad (8)$$

式中: ΔS 、 $\Delta \sigma$ 、 $\Delta \varepsilon$ 分别为名义应力、局部应力和局

部应变;

E 为材料弹性模量。

因为要考虑尺寸因素和表面加工对结构的影响, 要对弹性线斜率 b 值进行修正, 修正公式为

$$b^* = b + \frac{\lg \delta \beta_1}{\lg(2N)}, \quad (9)$$

式中: b^* 为修正后的弹性线斜率;

δ 为尺寸系数;

β_1 为表面加工系数。

将 b 值代入描述应变-寿命曲线 Manson-Coffin 公式^[13], 得表达式为

$$\varepsilon_a = \frac{\sigma'_f}{E} (2N)^b + \varepsilon'_f (2N)^c, \quad (10)$$

式中: ε_a 为应变幅值;

σ'_f 为疲劳强度系数;

ε'_f 为疲劳延性系数;

c 为疲劳延性指数。

疲劳寿命 N 可由迭代法求出。

3 实例模型与路况数据

基于上述两种疲劳寿命预估法, 结合具体实例模型和路况数据对两种方法进行数值仿真分析。

3.1 实例模型

运输的各类物流产品中, 有大量形状不规则的产品。这类产品中可能存在小孔, 容易受冲击和振动的影响而使其尺寸突变。因此, 对这一特殊类产品进行疲劳寿命分析有利于后续运输防护设计。现以常见的物流产品: 中心孔铝合金板为例进行疲劳寿命预估分析, 产品如图 1 所示。

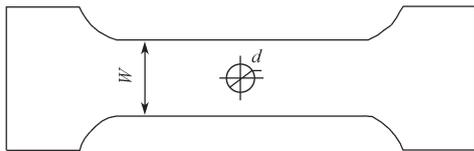


图 1 中心孔铝合金板

Fig. 1 Center hole aluminum alloy plate

图 1 为一中心孔铝合金板模型, 板宽 $W=50$ mm, 板厚 $t=10$ mm, 紧固件直径 $d=8$ mm, 理论应力集中系数 $K_t=3$ 。材料的性能参数^[14]如表 1 所示。

表 1 材料性能参数

Table 1 Material performance parameters

α	β	σ'_f/MPa	$\varepsilon'_f/\%$	b	c	E/GPa
1	1	724	13.7	0.063	0.654	73.2

3.2 运输环境

铝合金板大多采用公路运输的方式, 因此选择产品在 ISTA 3A 模式下进行公路运输, 此模式下的加速度功率谱如表 2 所示。

表 2 ISTA 3A 模式下加速度功率谱

Table 2 Acceleration power spectral in ISTA 3A mode

频率 /Hz	加速度功率谱 /($\text{g}^2 \cdot \text{Hz}^{-1}$)
1	0.000 700
3	0.020 000
5	0.020 000
7	0.001 000
12	0.001 000
15	0.004 000
24	0.004 000
28	0.001 000
36	0.001 000
42	0.003 000
75	0.003 100
200	0.000 004

4 疲劳寿命预估和数值仿真

4.1 基于 S-N 曲线的疲劳寿命

4.1.1 疲劳寿命计算

首先将产品受到的加速度功率谱 $G(\omega)$ 转化为应力谱 $W(\omega)$, 加速度功率谱为 ISTA 3A 公路运输模式下的加速度功率谱, 具体数据见表 2, 其转化计算公式为

$$W(\omega) = \frac{2841}{\omega^4} G(\omega) \times 10^8. \quad (11)$$

根据疲劳损伤计算公式

$$D = \int_{S_0}^{S_{\max}} \frac{P(S)}{C} S^m dS = \int_{S_0}^{S_{\max}} \frac{P(S)}{N_S} dS, \quad (12)$$

以及疲劳寿命的计算公式

$$N = \frac{1}{D}, \quad (13)$$

通过计算得到疲劳损伤 $D=1.47 \times 10^{-9}$, 疲劳寿命 $N=6.8 \times 10^8$ 。

将式 (13) 计算得到的疲劳寿命进行换算, 得到产品的疲劳寿命

$$T = \frac{N}{3600f}, \quad (14)$$

式中 f 为频率, 取公路运输的最大频率。

通过式 (14) 计算得 $T=94$ h。若产品以铁路方

式运输, 此时的加速度功率谱为铁路测试下的加速度功率谱, 通过类似计算得疲劳寿命为 90 h。若产品采用空运的方式运输, 计算得疲劳寿命为 87 h。

4.1.2 数值仿真

在 Matlab R2016b 的环境下, 基于公式 (12) 进行数值仿真的流程如图 2 所示。利用 Simulink 数值仿真, 能将复杂的公式有层次地显示出来, 从而便捷地观察应力寿命曲线。该计算公式为一个积分方程, 方程的上下极限决定疲劳寿命的长短, 通过改变极限应力的数值, 可得到疲劳寿命与应力的关系曲线, 如图 3 所示。

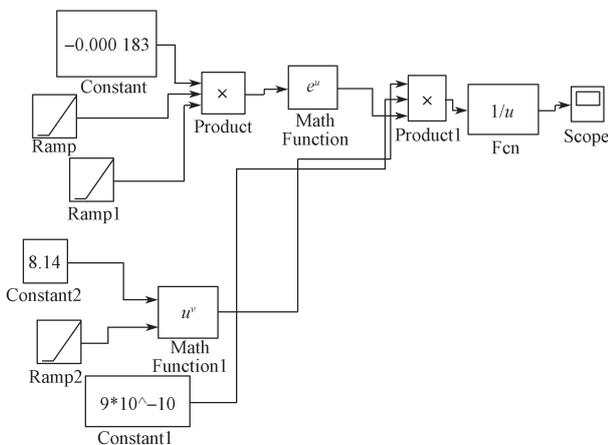


图 2 基于 S-N 曲线的疲劳寿命预估法流程框图

Fig. 2 Flow chart of fatigue life estimation method under random vibration

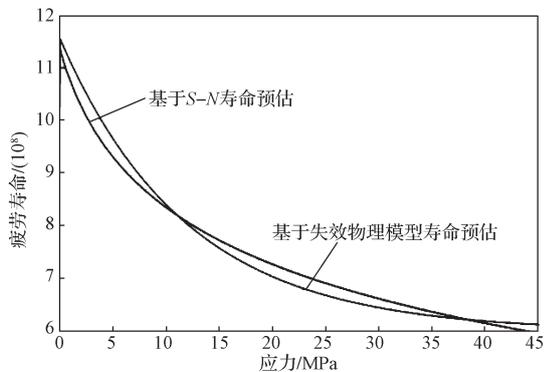


图 3 应力疲劳寿命曲线

Fig. 3 Stress fatigue life curve

4.1.3 结果分析

由图 3 可知, 疲劳寿命随着应力的增大而减小, 直至达到稳定。产品达到稳定时的疲劳寿命为 6.3×10^8 , 误差率为

$$n^* = \frac{6.8 - 6.3}{6.8} \times 100\% = 7.4\%$$

4.2 基于失效物理模型的疲劳寿命

4.2.1 疲劳寿命计算

1) 疲劳缺口系数 K_f 的计算

首先根据公式 (5) 计算得到理论应力集中系数 $K_t=2.60$, 然后按照 Peterson 公式 (15) 计算疲劳缺口系数。

$$K_f = 1 + \frac{K_t - 1}{1 + a/r} \quad (15)$$

由铝合金的材料参数 $a=0.63$ mm, 圆角半径为 $r=4$ mm, 从而算得 $K_f=2.38$ 。

2) 局部应力应变的计算

局部应力应变按照 Neuber 近似解法求解。第 1 个反复的求解过程如下。

外加应力 $S: 0 \rightarrow 93$ MPa, $\Delta S_1=93$ MPa。净面积 (除去孔以外的面积) 外加应力按式 (16) 计算, 结果为 101.71 MPa。

$$\Delta S_{n1} = \Delta S_1 \frac{W}{W-d} \quad (16)$$

计算 Neuber 常数

$$C_1 = \frac{K_f^2 (\Delta S_{n1})^2}{E} = 0.948455$$

根据修正的 Neuber 公式计算第 1 个反复的应力应变 σ_1 和 ε_1 。

$$\sigma_1 = \sigma_0 + \text{sgn}(\Delta S_1) \cdot \Delta \sigma_1, \quad (17)$$

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_0 + \text{sgn}(\Delta S_1) \cdot \Delta \varepsilon_1 \quad (18)$$

式 (17) (18) 中 σ_0 、 ε_0 分别为初始应力、应变, 取值分别为 90 MPa 和 0.001, 从而算得局部应力应变 σ_1 、 ε_1 分别为 263.49 MPa 和 0.0035995。

3) 疲劳寿命估算

通常 b 的绝对值远小于 c 的绝对值, 通过式 (10) 计算得到 $N=8.93 \times 10^8$, 再根据式 (14), 计算得到疲劳寿命为 123 h。

与第 1 个反复的求解过程相同, 第 2 个反复取名义应力为 98 MPa, 计算得到疲劳寿命为 125 h; 第 3 个反复取名义应力为 100 MPa 时, 计算得到的疲劳寿命为 131 h。

4.2.2 数值仿真

基于失效物理模型预测疲劳寿命方法中的参数较多, 相关参数见表 1。采用 Matlab Simulink 进行数值仿真, 其流程如图 4 所示。取尺寸系数为 0.9, 通过改变输入的应力值, 得到了疲劳寿命曲线, 如图 3 所示。

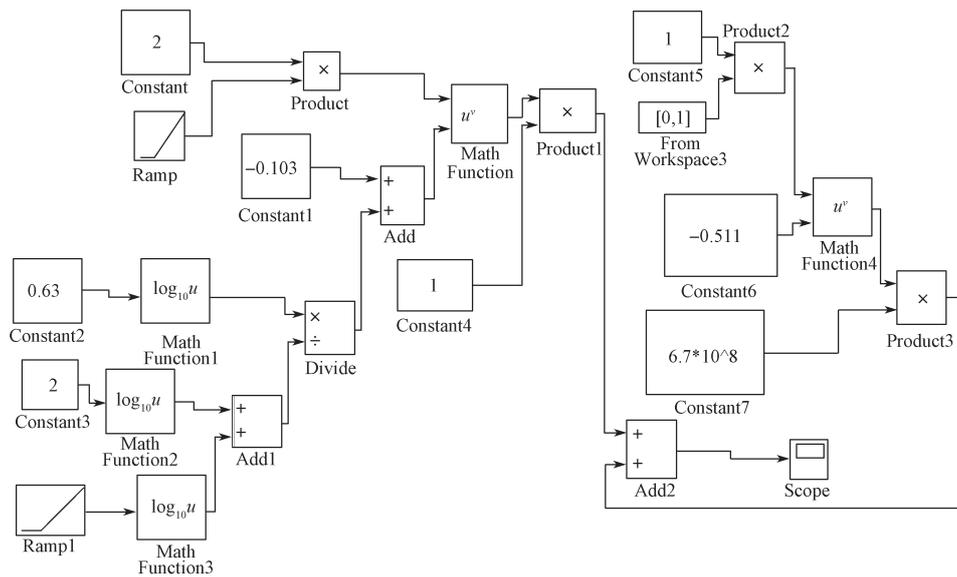


图4 基于失效物理模型疲劳寿命预估法流程框图

Fig. 4 Block diagram of fatigue life prediction method based on failure physics model

4.2.3 结果分析

由图3可知, 疲劳寿命随着应力的增加而减少, 直至稳定。产品达到稳定时的疲劳寿命为 7.80×10^8 , 误差率为

$$n^* = \frac{8.93 - 7.80}{8.93} \times 100\% = 12.6\%。$$

通过比较两种方法误差率的大小可知, 基于 $S-N$ 曲线的疲劳寿命预估更为准确。

4.3 结果分析

对于同一个产品, 基于 $S-N$ 曲线的疲劳寿命和基于失效物理模型的疲劳寿命的计算结果, 其数值量级相同, 只是系数有差别, 可认为结果一致, 这说明两种预估方法是有效性的。

依据产品参数的不同, 可采用不同的计算方法来预估其疲劳寿命, 从而使预测的疲劳寿命更准确, 同时指导产品后续的结构设计。

基于上述两种方法得到的疲劳寿命分别为 94 h 和 123 h, 折算后分别约为 4 d 和 5 d。从疲劳寿命上来说, 该铝合金板适合于公路长途运输, 由于公路运输成本较高, 运输时间应尽量控制在 2 d 以内。

5 结语

本文分析了产品在随机振动下的线性疲劳评价标准和损伤理论, 提出了用疲劳寿命作为评判产品质量好坏的标准。列举了两种常见的疲劳寿命预估方

法, 通过实例从理论计算和数值仿真两方面, 验证了两种预估方法的有效性, 而且两种方法得到的疲劳寿命基本一致。通过产品的疲劳寿命的预估, 可为产品的运输方式、运输时间的选择提供指导和建议, 同时也可对运输时有针对性地进行缓冲包装设计提供参考。

参考文献:

- [1] 江春冬, 武玉维, 杜太行, 等. 包装件在随机振动下的破损机理及相关量检测 [J]. 中国测试, 2015, 41(8): 27-30.
JIANG Chundong, WU Yuwei, DU Taihang, et al. Damage Mechanism of the Package Under Random Vibration and the Detection of Relevant Quantities[J]. China Measurement & Test, 2015, 41(8): 27-30.
- [2] 叶菲. 随机振动荷载下结构的疲劳寿命研究 [D]. 天津: 天津大学, 2017.
YE Fei. Research on Fatigue Life for Structures Under Random Vibration Loading[D]. Tianjin: Tianjin University, 2017.
- [3] BURGESS G J. Extension and Evaluation of Fatigue Model for Product Shock Fragility Used in Package Design[J]. Journal of Testing and Evaluation, 2000, 28(2): 116-120.
- [4] MATSUISHI M, ENDO T. Fatigue of Metals Subjected to Varying Stress[J]. Proceeding of the Kyushu Qeding Branch of Japan Society of Mechanical Engineers.

- 1968, 102: 37-40.
- [5] 孙晓丹, 欧进萍. 基于动力检测的损伤指标评价方法[J]. 振动与冲击, 2009, 28(1): 9-13, 191.
SUN Xiaodan, OU Jinping. Assessment of Vibration-Based Damage Indexes in Structural Health Monitoring[J]. Journal of Vibration and Shock, 2009, 28(1): 9-13, 191.
- [6] 王璐璐, 刘美华, 张连文, 等. 果品物流运输包装件堆码振动传递性能的实验研究[J]. 包装工程, 2012, 33(19): 5-10.
WANG Lulu, LIU Meihua, ZHANG Lianwen, et al. Research on Vibration Transmission Property of Fruit Logistics Packaging[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(19): 5-10.
- [7] 魏居业. 基于疲劳寿命分析的结构拓扑优化设计方法及应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
WEI Juye. Research on Structural Topology Optimization Design Based on Fatigue Life Analysis and Its Application[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.
- [8] 陈小翠, 杜成斌, 江守燕. 金属材料在冲击荷载下局部变形的数值模拟及分析[J]. 振动与冲击, 2018, 37(11): 153-159.
CHEN Xiaocui, DU Chengbin, JIANG Shouyan. Numerical Simulation and Analysis for Local Deformation of Metallic Materials Under Impact Loads[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(11): 153-159.
- [9] 朱林. 基于多因素修正的结构件疲劳寿命预测与可靠性评估方法研究及应用[D]. 南京: 东南大学, 2018.
ZHU Lin. Study of the Approach and Its Application for Structural Fatigue Life Prediction and Reliability Assessment Based on Multi-Factor Correction[D]. Nanjing: Southeast University, 2018.
- [10] 彭兆春. 基于疲劳损伤累积理论的结构寿命预测与时变可靠性分析方法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2017.
PENG Zhaochun. Research on Methods for Structural Life Prediction and Time-Dependent Reliability Analysis Using Cumulative Fatigue Damage Theories[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2017.
- [11] 刘同文. 持续动载荷作用下包装制品结构疲劳损伤研究[D]. 无锡: 江南大学, 2011.
LIU Tongwen. Investigation on Fatigue Damage of Packaging Products Structure Under Continuous Dynamic Loading[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2011.
- [12] 宋博, 祝青钰, 曾照洋. PHM技术在航空结构疲劳寿命预测中的应用[J]. 机械强度, 2017, 39(2): 435-440.
SONG Bo, ZHU Qingyu, ZENG Zhaoyang. Application on Predicting Fatigue Life in Aircraft Structure Based on PHM Technology[J]. Journal of Mechanical Strength, 2017, 39(2): 435-440.
- [13] 章晶晶. 考虑参数不确定性的结构疲劳寿命预测和安全性评估[D]. 福州: 福州大学, 2017.
ZHANG Jingjing. Fatigue Life Prediction and Safety Assessment of Structures Considering Parameter Uncertainties[D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2017.
- [14] 王红民, 谢锋, 郑国峰, 等. 汽车悬架控制臂拉压溃分析及疲劳寿命预测[J]. 振动与冲击, 2016, 35(20): 41-46.
WANG Hongmin, XIE Feng, ZHENG Guofeng, et al. Collapse Analysis and Fatigue Life Prediction of a Vehicle Suspension Control Arm[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(20): 41-46.

(责任编辑: 邓光辉)

Life Expectancy of Logistics Products Based on Fatigue Accumulation

DING Yiqiu, ZENG Taiying

(College of Communication and Art Design, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Aiming at the conditions of logistics products in the process of transportation and the issues of estimating the fatigue life of the products, two common fatigue life prediction methods were listed according to the current damage evaluation criteria and classical damage theory. The effectiveness of the two methods was verified by examples from theoretical analysis and Matlab Simulink numerical simulation analysis, and the predicted fatigue life from the two methods was basically the same. By estimating the fatigue life of the product, it could provide reference for the transportation mode, transportation timing and transportation buffer packaging design of the product.

Keywords: logistics product; fatigue accumulation; fatigue life; damage assessment; Matlab Simulink