

疲劳寿命计疲劳响应模型研究

胡明敏 ,方义庆 ,魏 平

(南京航空航天大学航空宇航学院 ,江苏 南京 210016)

摘要 :对疲劳寿命计恒幅加载的响应性能进行了全域实验研究 ,得到疲劳响应的电阻变化标定数据曲线 .在此基础上 ,根据电阻变化等效方法 ,建立了任意循环加载下疲劳响应的数学计算模型 ,并给出了任意加载下电阻响应误差的全域统计分布函数 .通过多级加载实验对计算模型进行验证 ,说明此计算方法能准确预测电阻变化量 .

关键词 :敏感元件 ;疲劳寿命计 ;疲劳损伤 ;健康监测

中图分类号 :TU317 文献标识码 :A 文章编号 :1000-198X(2004)03-0287-04

随着科技进步 ,轻质高强材料和新型结构体系被广泛应用 ,如大型海洋平台、大跨度桥梁等复杂结构 ,对于它们的损伤预报显得非常重要 .这些结构除了处于长期的复杂动载荷作用外 ,在使用过程中各种因素引起的应力发生了较大变化 ,因而结构健康监测的研究与监测系统的开发应运而生^[1] .10 多年来结构健康监测理论主要基于振动信息的结构整体性评估和损伤识别^[2] .这类方法干扰信号大、灵敏度低 ,不能跟踪损伤过程 ,实际上在出现可检裂纹时结构疲劳破坏随时可能发生 .用应变计的实时监测方法由于信号难以处理 ,外界干扰和漂移产生很大的累积误差 ,因此不适用于长期监测 .

本文研制的疲劳寿命计是一种疲劳敏感元件 ,外形如同普通应变计^[3 4] .其电阻变化量是加载参数的单调增函数 ,载荷去除后电阻变化量保留 .它通过电阻变化量的自动累积来记录所粘贴处的交变应变历程 ,适用于结构长期疲劳损伤监测 .其本身的疲劳寿命比常用结构材料高 ,电阻最大累积值可达 8% ,灵敏度和重复精度较高 .电阻累积原理是基于这种合金的微结构在位错作用下发生有序改变 ,从而使材料的电阻率发生不可逆增加^[5 6] .本文研究该传感器在实际工程应用中要解决的基本问题 :复杂加载下疲劳寿命计电阻累积响应的数学计算模型 ,该计算模型能预测任意加载下的电阻累积量和误差统计分布值 .

1 恒幅加载下电阻累积响应

恒幅加载电阻累积是应变幅 ϵ 和循环周次 N 的二参数函数 ,该数据是通过疲劳实验标定得到的 .为此 ,固定其中的一个输入参数不变 ,改变其中的一个输入量 ,由疲劳试验得到一个输入输出关系数据曲线 ,将固定输入参数取不同值 ,就得到了一簇曲线 .将循环次数取 33 个固定值 ,近似在对数坐标下均匀分布 ,得到 33 个输入输出数据曲线 .疲劳寿命计粘贴在圆截面试样上做轴向对称循环疲劳试验 ,每个试样上粘贴 6 ~ 8 枚疲劳寿命计 .

$$\lg(\Delta R/R) = A + B \lg(\epsilon) + C[\lg(\epsilon)]^2 \tag{1}$$

式中 : A, B, C ——拟合常数 $\Delta R/R$ ——电阻相对变化量 ϵ ——应变幅 .

按式 (1) 拟合得到的 33 条曲线均符合对数抛物线函数关系 .根据需要将这 33 个 $\Delta R/R \sim \epsilon$ 拟合数据图进行转换 ,在该图中固定应变值 ,就得到电阻变化与循环数之间的关系曲线簇如图 1 所示 (图中仅绘出 18 条曲线) ,图中量值为应变变程 .用该图数据便于分析计算已知加载参数下的电阻变化 .若固定电阻变化值 ,就得到应变量与循环数之间的关系曲线簇数据图 ,用该图数据便于分析在已知某一电阻变化时的加载历程 .将式 (1) 拟合的数据进行细分后用电子表格存放 ,通过查表程序 ,就可得到某一应变下某个循环值的电阻变化量 .如果要计算的应变水平和循环数不在数据表中 ,则采用对数线性插值的方法计算 .

收稿日期 2003-09-16
基金项目 :国家 863 计划资助项目(2001AA602023)
作者简介 :胡明敏(1957—)男 ,江苏南京人 ,教授 ,硕士 ,主要从事疲劳、断裂及结构健康监测研究 .

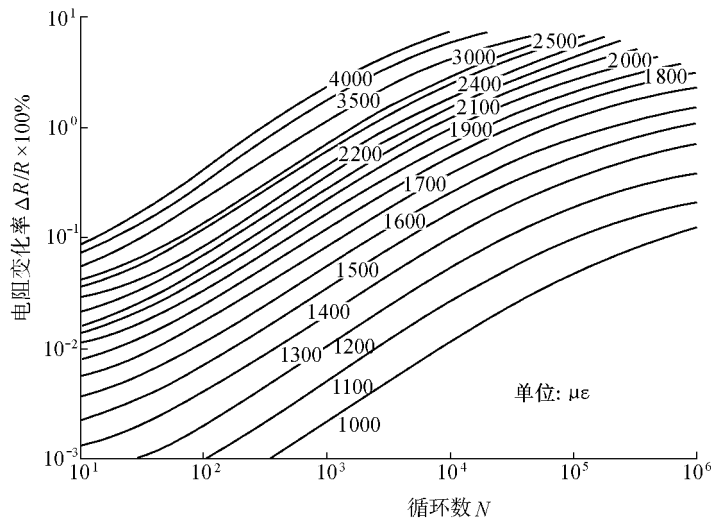


图 1 疲劳寿命计的标定曲线

Fig.1 Calibration curve of fatigue life gauge

从图 1 可看出,电阻变化与加载参数是非线性关系,输出电阻累积响应存在一门槛值(交变应变小于该值无电阻累积),大约在 1000 $\mu\epsilon$ 左右.最大电阻变化量约 8%, $\pm 2000 \mu\epsilon$ 下寿命达到 3.5×10^5 .这个电阻变化在低于 100 $^{\circ}\text{C}$ 时不会改变.

2 复杂加载下电阻累积响应模型

若将实际载荷谱等效为一个块谱,则疲劳寿命计可根据等电阻变化方法计算.以两级加载为例,设第一级加载参数为 N_1, ϵ_1 ,第二级加载参数为 N_2, ϵ_2 .第一级加载由查表程序插值得到电阻变化 ΔR_1 ,这个电阻变化相当于在 ϵ_2 作用下循环了 N_2^* 次,它可由查表插值计算出 N_2^* ,然后再按循环数 $N_2^* + N_2$ 查表,计算 ϵ_2 作用后的累积电阻变化 ΔR_2 ,对任意级加载均可重复上述计算过程得到电阻变化的预测值.大量实验和计算表明^[3],疲劳寿命计电阻累积与加载顺序无关.

块谱加载疲劳试验中包含 7 级应变水平,共进行了 5 个块谱循环,每个试件粘贴 6 枚疲劳寿命计.试验结果见表 1,表中同时给出了计算预测值.结果表明,所给出的电阻变化预测方法是比较准确的,循环应变任意分级结果不变.

表 1 块谱循环电阻变化实验值和预测值

Table 1 Experimental and predicted values of resistance change under cyclic loading												
循环	应变幅 / $\mu\epsilon$	循环数 /万次	电阻变化率/%						电阻变化 均值	计算 预测值	变异 系数 计算值	变异 系数 实验值
			$\Delta R_1/R_1$	$\Delta R_2/R_2$	$\Delta R_3/R_3$	$\Delta R_4/R_4$	$\Delta R_5/R_5$	$\Delta R_6/R_6$				
块 1	± 1400	0.7	0.077	0.110	0.117	0.127	0.094	0.129	0.109	0.135	0.105	0.185
	± 1600	0.6	0.266	0.330	0.337	0.332	0.273	0.363	0.317	0.335	0.057	0.102
	± 1800	0.5	0.546	0.690	0.673	0.685	0.576	0.721	0.649	0.630	0.044	0.085
	± 2000	0.4	0.970	1.372	1.126	1.134	0.996	1.226	1.137	1.025	0.040	0.081
	± 2200	0.3	1.412	1.838	1.599	1.622	1.460	1.747	1.613	1.477	0.038	0.063
	± 2500	0.2	1.906	2.351	2.082	2.137	1.956	2.298	2.122	2.000	0.037	0.054
	± 2800	0.1	2.350	2.793	2.516	2.590	2.373	2.775	2.566	2.414	0.037	0.044
块 2 终值	± 2800	0.1	3.300	3.751	3.424	3.557	3.254	3.767	3.509	3.3821	0.036	0.053
块 3 终值	± 2800	0.1	3.952	4.337	3.974	4.088	3.772	4.327	4.075	4.037	0.036	0.055
块 4 终值	± 2800	0.1	4.533	4.895	4.463	4.595	4.223	4.852	4.594	4.536	0.038	0.055
块 5 终值	± 2200	0.3	4.760	5.250	4.729	4.767	4.355	5.056	4.819	4.678	0.042	0.064

由于在较低应变水平时,疲劳寿命计电阻累积在循环数达到 10^6 之后出现“饱和”现象(从图 1 中看出),所以当前级载荷电阻累积超过后级应变水平的饱和值时,根据加载顺序无关的特性,将其提前计算,表 1 中循环块 2 开始的 $\pm 1\,400\,\mu\epsilon$ 和 $\pm 1\,600\,\mu\epsilon$ 就是如此.循环块 2~5 仅列出块循环终值的电阻变化量.

3 误差概率统计分析

疲劳寿命计电阻变化数据存在一定的分散性,需要进行概率统计分析.实验数据表明,其误差服从正态分布,电阻变化分散性表现为两头大,在 $(\Delta R/R)\% < 0.05$ 和 $(\Delta R/R)\% > 5$ 时电阻分散性较大,在这之间分散性较小.其原因是在电阻变化较小时,电阻应变效应和温度效应引起的电阻变化具有随机性.随机性占有较大比例,随着电阻值增加它迅速变小.当电阻变化较大时,敏感栅出现了微裂纹,这个效应引起的电阻变化表现出较大的随机性.在这之间电阻变化十分有序,有较高重复精度.

等幅加载进行 13 个应变水平 33 个固定循环的疲劳试验,按 33 个不同固定循环数得到的测试点电阻变化 $\Delta R/R\%$ 与其变异系数 γ 的关系表示在图 2 中,从图中看出,变异系数近乎仅与电阻变化量有关,它们之间的关系可用以下两式分段拟合,

$$\gamma = \begin{cases} 0.02 \times \text{ctar}((\Delta R/R)\%) + 0.03 & (0.03 < (\Delta R/R)\% \leq 4.45) \\ 0.002\,4 \times ((\Delta R/R)\%)^2 + 0.05 \times ((\Delta R/R)\%) - 0.138 & (4.45 < (\Delta R/R)\% \leq 7.00) \end{cases} \quad (2)$$

拟合曲线如图 2 所示.用式(2)对所标定的其中 3 个数据曲线进行的概率误差分析如图 3 所示.图中数据点是测量平均值,分散带按 90% 置信度计算,图 4 是按等电阻变化曲线计算的分散带.计算结果是测量数据的概率分布与预测分布吻合.对表 1 块谱加载实验按式(2)误差统计分析也说明计算模型是比较准确的.图 5 中示出第一块谱的电阻变化过程,并给出了每块循环终值 90% 置信度的分散带和测量值.同时从图 5 还可以看出,谱块加载下的电阻响应可以折算为一个等幅循环加载,图 5 中谱块循环终值等效为约 $\pm 2\,100\,\mu\epsilon$ 的恒幅加载.这种等效关系仅对疲劳寿命计而言,一般不意味着所粘贴材料疲劳损伤也具有同样的等效关系.

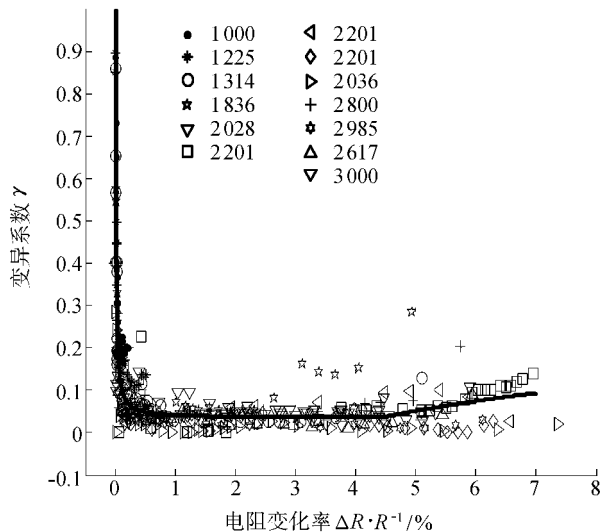


图 2 变异系数拟合曲线

Fig.2 Distribution of coefficient of variation

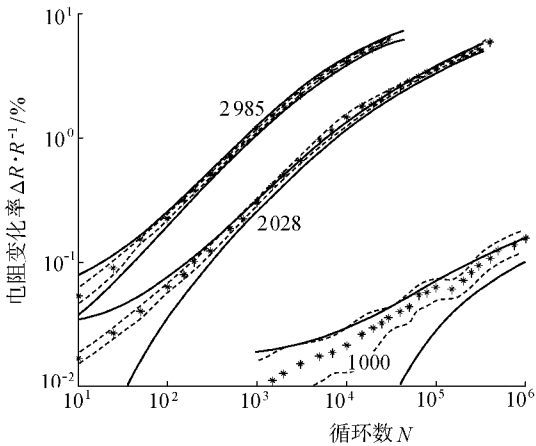


图 3 恒幅加载误差分布

Fig.3 Error distribution under constant load increment

4 结 论

疲劳寿命计在固定循环下,电阻随应变幅变化曲线可用对数抛物线表示,通过等电阻变化和线性插值方法能较准确地预测任意加载下的电阻变化量.用变异系数表示的统计分布特征仅与电阻变化量的大小有关,所给出的统计分布模型能较好地与各种加载下的实验结果吻合.最大电阻变化率达 8%,电阻累积门槛值约在 $\pm 1\,000\,\mu\epsilon$,疲劳寿命和重复精度均能满足工程健康监测要求.

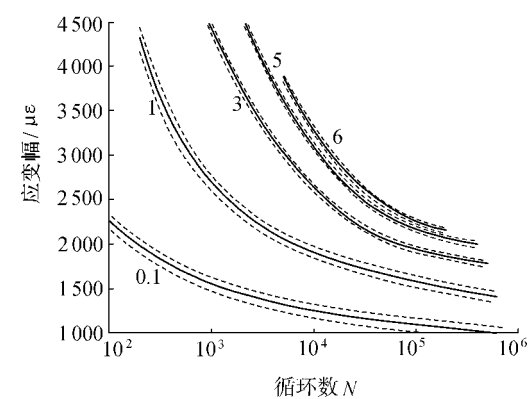


图4 等电阻变化曲线的概率分布

Fig.4 Probability distribution for constant resistance change

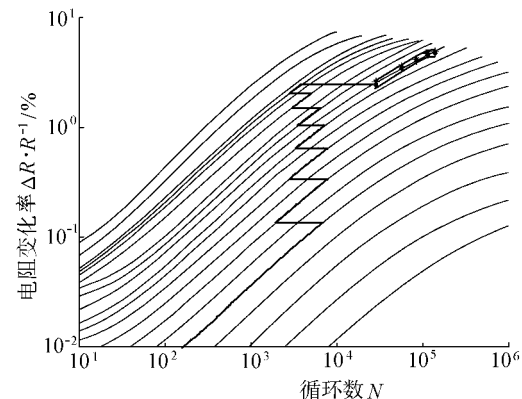


图5 谱加载响应的概率分布

Fig.5 Probability distribution of spectrum loading

参考文献：

[1] HOUSNER G Q ,BERGMAN L A ,CAUGHEY T K ,et al. Structural control :present ,and future[J]. Journal of Engineering Mechanics , 1997 ,123(9) :897—971.

[2] 郑栋梁 ,李中付 ,华宏星. 结构早期损伤识别技术的现状和发展趋势[J]. 振动与冲击 ,2002 ,21(2) :1—11.

[3] 胡明敏 ,陈杰 ,陶宝祺. 疲劳寿命计性能研究[J]. 航空学报 ,1994 ,15(3) :336—339.

[4] CHARSLEY P ,ROBINS B A. Electrical resistance changes of cyclically deformed Copper-Nickel alloy[J]. Mater Sci Eng ,1975 ,7(17) : 117—123.

[5] 胡明敏 ,周克印. 疲劳寿命计电阻变化机理的研究[J]. 航空学报 ,1999 ,20(1) :72—74.

[6] 胡明敏. 疲劳寿命计退火特性及电阻变化推算载荷谱研究[J]. 理化检验 ,2000 ,36(1) :2427.

Study on fatigue response model for fatigue life gauge

HU Ming-min , FANG Yi-qing , WEI Ping

(College of Aerospace Engineering , Nanjing University of Aeronautics and Astronautics , Nanjing 210016 , China)

Abstract : A full-range experimental study is performed on the response performance of the fatigue life gauge under constant load increments , and the calibration curve of resistance variation in response to fatigue is obtained . Based on the equivalent resistance variation method , a mathematical model for fatigue response under random cyclic loading is developed , and the function of the full-range statistical distribution of resistance response error is also given under random loading . Finally , multistage loading experiments are performed to verify the model , and the result shows that the calculating method can predict the variation of resistance accurately .

Key words : sensitive element ; fatigue life gauge ; fatigue damage ; health monitoring