



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 104462836 B

(45)授权公告日 2017.08.29

(21)申请号 201410785307.7

(22)申请日 2014.12.17

(65)同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 104462836 A

(43)申请公布日 2015.03.25

(73)专利权人 南京理工大学

地址 210094 江苏省南京市孝陵卫200号

(72)发明人 王禹林 欧屹 冯虎田 周斌

祖莉 周长光 曹勇

(74)专利代理机构 南京理工大学专利中心

32203

代理人 唐代盛

(51)Int.Cl.

G06F 19/00(2011.01)

(56)对比文件

JP 特开2001-249705 A, 2001.09.14,

CN 104076224 A, 2014.10.01,

王禹林等.基于结合面的大型螺纹磨床整机
静动态特性优化.《振动与冲击》.2012,第31卷
(第20期),第147-182页.

审查员 秦春芳

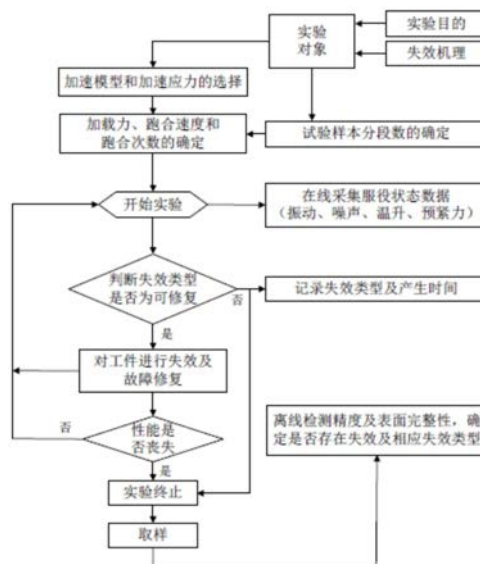
权利要求书3页 说明书5页 附图2页

(54)发明名称

基于全周期分段步加策略的小子样加速失
效演变实验方法

(57)摘要

本发明公开了一种极小子样滚动功能部件加速失效演变实验方法,首先分析功能失效模式和构件损伤与破坏失效模式的失效判据,以及故障判据及故障计数准则,确定加速实验截尾,选择加速模型和加速应力,并确定全周期分段步加实验方案;模拟滚动功能部件服役环境,实验结束后,对每个子段分别取样并离线检测精度和表面完整性,确定是否存在失效及失效类型;基于各子段的长度、等效加载力、等效跑合速度和跑合次数折算出正常应力水平下总的服役时间 T_i 。本发明仅用一次实验,即可方便高效地获得滚动功能部件全周期服役过程中不同时间历程下的在线和离线状态监测数据,为深入探索其服役过程中各种失效演变过程、规律及寿命预测提供依据。



1. 一种基于全周期分段步加策略的小子样加速失效演变实验方法,其特征在于步骤如下:

步骤1:分析功能失效模式和构件损伤与破坏失效模式的失效判据,以及故障判据及故障计数准则,确定加速实验截尾,选择加速模型和加速应力,最终确定所有j个步加服役过程中的等效加载力 F_j ,等效跑合速度 v_j 和跑合次数 z_j , $1 \leq j \leq n$;

步骤2:确定全周期分段步加实验方案,即将工件沿轴线方向分成 $n+1$ 个子段,子段号为 $0, 1, \dots, i, \dots, n$;每个子段长度分别为 $L_0, L_1, \dots, L_i, \dots, L_n$,在子段0上不进行服役实验,以保留工件的初始精度及表面完整性信息;从子段1开始实施全周期分段步加实验,即在等效加载力 F_1 作用下以等效速度 v_1 自子段1至子段n往复跑合 z_1 次,第1个步加服役过程结束,此时子段1跑合了 $2z_1+1$ 次或 $2z_1-1$ 次,子段2至子段n跑合了 $2z_1$ 次;接着继续在等效加载力 F_2 作用下以等效速度 v_2 自子段2至子段n往复跑合 z_2 次,依此类推,直至第n个步加服役过程结束,或出现不可修复性故障而停止;实验完成时,第i个子段共经历了i个步加服役过程,其中在第j个步加服役过程中,将在等效加载力 F_j 下以等效跑合速度 v_j 跑合 $2z_j$ 次, $1 \leq j \leq i \leq n$;而在第i个步加服役过程中,将在等效加载力 F_i 下以等效跑合速度 v_i 跑合 $2z_i+1$ 或 $2z_i-1$ 次;

步骤3:模拟滚动功能部件服役环境,按照步骤2中确定的全周期分段步加实验方案开始实验,实验过程中,在线采集工件服役的状态数据,收集故障信息;

步骤4:步骤3的实验结束后,对每个子段分别取样并离线检测精度和表面完整性,确定是否存在失效及失效类型;

步骤5:基于各子段的长度、等效加载力、等效跑合速度和跑合次数折算出第i个子段单位长度上正常应力水平下总的服役时间 T_i ,则步骤3和步骤4中所测的在线状态数据、故障信息以及离线检测数据,即为所折算的服役时间 T_i 时的各项数据。

2. 根据权利要求1所述的基于全周期分段步加策略的小子样加速失效演变实验方法,其特征在于在步骤1中,所述的截尾方式为定时截尾或定数截尾;所述的加速模型为逆幂率模型或Coffin-Manson模型;所述的加速应力为在等效加载力、等效跑合速度作用下产生的振动平均值或最大值。

3. 根据权利要求1所述的基于全周期分段步加策略的小子样加速失效演变实验方法,其特征在于在步骤2中,所述的分段数 $n+1$,取 $n \geq 3$,所述的各子段i的长度 L_i 满足 $L_0 \leq L_1 \leq \dots \leq L_n$;为重点考察后期的失效演变,所述的所有步加服役过程中,跑合次数应满足 $z_1 \geq z_2 \geq \dots \geq z_n \geq Z/n$,Z为正常应力水平下总的理论跑合次数。

4. 根据权利要求1所述的基于全周期分段步加策略的小子样加速失效演变实验方法,其特征在于在步骤2中所述的所有步加服役过程中的等效加载力 F_j 为恒定力或为周期力,并且各步加服役过程中的等效加载力 F_j 满足 $F_1 \leq F_2 \leq \dots \leq F_n$,且 $F_e \leq F_j \leq F_{\max}$,其中 F_e 为额定载荷, F_{\max} 为工件所能承受的极限载荷;所述的等效跑合速度 v_j 为恒定速度或为周期跑合速度,并且各步步加服役过程中的等效跑合速度满足 $v_1 \leq v_2 \leq \dots \leq v_n$,且 $v_e \leq v_j \leq v_{\max}$,其中 v_e 为额定跑合速度, v_{\max} 为极限跑合速度。

5. 根据权利要求4所述的基于全周期分段步加策略的小子样加速失效演变实验方法,其特征在于周期力为:第j步步加服役过程中,以周期力 $F_j(t)$ 循环加载,所述的周期力可折算为等效力 $F_i = \frac{1}{T} \int_0^T F_j(t) dt$;第j步步加服役过程中,以周期跑合速度 $v_j(t)$ 循环跑合,所述

的周期跑合速度折算为等效跑合速度 $v_i = \frac{1}{T} \int_0^T v_j(t) dt$ 。

6. 根据权利要求1所述的基于全周期分段步加策略的小子样加速失效演变实验方法, 其特征在于在步骤2中, 第j个步加服役过程, 具体分为两种方案之一:

第一种方案: 自子段j至子段n在等效加载力 F_j 作用下以等效速度 v_j 进行往复跑合 z_j 次, 并继续在第j子段单程跑合一次, 此时第j个步加服役过程结束; 服役过程中, 子段j在本次步加服役过程中相应的跑合次数为 $2z_j+1$, 子段j+1到子段n的跑合次数为 $2z_j$;

第二种方案: 自子段j至子段n在等效加载力 F_j 作用下以等效速度 v_j 进行往复跑合 z_j 次, 并在第 $2z_j$ 次单程跑合时至子段j与子段j+1交点处结束第j个步加服役过程; 服役过程中, 子段j在本次步加服役过程中相应的跑合次数为 $2z_j-1$, 子段j+1到子段n的跑合次数为 $2z_j$ 。

7. 根据权利要求1所述的基于全周期分段步加策略的小子样加速失效演变实验方法, 其特征在于在步骤3的实验过程中, 出现可修复性故障时及时停机, 记录故障类型及产生时间, 修复后继续实验。

8. 根据权利要求1所述的基于全周期分段步加策略的小子样加速失效演变实验方法, 其特征在于在步骤5中, 所述子段i单位长度上正常应力水平下总的服役时间 T_i 折算步骤为:

第一步, 折算第i个子段在第j个步加服役过程相应的跑合时间, 第i个子段在第j个步加服役过程为:

(1) 当 $i > j$ 时, 子段i在第j个步加服役过程中, 在等效加载力 F_j 的作用下以速度 v_j 经历了 $2z_j$ 次跑合, 此时子段i在第j个步加服役过程中的服役时间为 t_{ij} :

$$t_{ij} = \frac{2z_j \cdot L_i}{v_j}, \quad 1 \leq j < i \leq n \quad (1)$$

(2) 当 $i = j$ 时, 子段i在第j个步加服役过程中, 在等效加载力 F_j 的作用下以速度 v_j 经历了 $2z_j \pm 1$ 次跑合, 此时子段i在第j个步加服役过程过程中的服役时间为:

$$t_{ij} = \frac{L_i}{v_j} \cdot (2z_j \pm 1), \quad 1 \leq i = j \leq n \quad (2)$$

第二步, 折算第i个子段在第j个步加服役过程中正常应力水平下跑合时间:

(1) 威布尔分布下产品失效的概率密度函数为

$$f(t) = \frac{m}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{m-1} e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^m}, \quad t > 0 \quad (3)$$

失效分布函数为

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^m}, \quad t > 0 \quad (4)$$

式中, m 为形状参数, η 为尺度参数;

(2) 根据Nelson累计失效模型, 某个子段i的j步步加服役过程中, 在应力水平 S_q 下服役时间 t_{ij} 的累计失效概率 $F_q(t_{ij})$ 和在正常应力水平 $S_{q'}$ 下服役时间 $t_{ij'}$ 的累计失效概率 $F_q(t_{ij'})$ 相等, 即

$$F_q(t_{ij}) = F_{q'}(t_{ij'}) \quad (5)$$

(3) 根据可靠性分布模型, 将威布尔分布的失效分布函数代入公式(5), 可得

$$1 - \exp[-(t_{ij}/\eta_{ij})^{m_{ij}}] = 1 - \exp[-(t'_{ij}/\eta_{ij})^{m_{ij}}]$$

$$t'_{ij} = \eta_{ij} \exp\left[\frac{m_{ij}}{m_{ij'}} \ln\left(\frac{t_{ij}}{\eta_{ij}}\right)\right] \quad (6)$$

利用公式 (6) 将第 i 个子段在第 j 个步加实验中的服役时间 t_{ij} 折算成正常应力水平下的服役时间 t'_{ij} , 其中 $1 \leq j \leq i \leq n$;

第三步, 折算子段 i 上总服役时间

对于子段 i 而言, 实验结束后, 第 i 个子段依次经历了自第 1 个步加服役过程至第 i 个步加服役过程, 根据第二步的折算时间得到子段 i 上总的服役时间为:

$$T_i = \frac{\sum_{j=1}^i t'_{ij}}{L_i} = \frac{t'_{i1} + t'_{i2} + \dots + t'_{ii}}{L_i}, \quad 1 \leq j \leq i \leq n \quad (7)。$$

基于全周期分段步加策略的小子样加速失效演变实验方法

技术领域

[0001] 本发明属于加速失效演变实验技术,特别是一种基于全周期分段步加策略的极小子样滚动功能部件加速失效演变实验方法。

背景技术

[0002] 滚动功能部件在其服役过程中的各种失效都将影响其服役性能(精度保持性、可靠性和寿命),严重的可能会导致设备卡死、停机及其它不可预知的故障。对其服役过程中的失效演变机理及其影响规律的分析研究,有助于滚动功能部件的维护和保养,提升其全周期的服役性能,增强可靠性及使用寿命,实现产品的再制造。因此对滚动功能部件的失效演变机理的研究,尤其实验研究至关重要。

[0003] 传统的可靠性及寿命实验研究的对象多针对服役周期短,成本低的电子元器件产品,需要较大的样本量。而滚动功能部件服役周期长、成本高,并且实验台的投入巨大,可利用的实验台数量非常有限,更关键的是,很难通过少量实验在短时间内获得基于时间历程的多种在线和离线状态检测数据,这给滚动功能部件失效演变的实验研究带来了很大困难。

[0004] 专利申请“基于小样本的大型回转支撑剩余使用寿命预测方法(CN103617364A)”通过施加100%极限设计载荷的一次加速寿命实验,根据载荷大小和分布的对称性将失效后的回转支撑滚道分成 $4n$ 段,进而测量每段回转支撑的体积磨损量,对其剩余使用寿命进行了预测。但是滚动功能部件无论从结构还是功能上与轴承类零件都有着很大差别,无法将此方法直接应用于滚动功能部件的剩余寿命预测;更关键的是,由于表面完整性(残余应力,微观组织,表面粗糙度)的测量很难实现在线检测,而且取样时需破坏样件,所以该方法仅能提供实验完成后每段回转支撑的体积磨损量信息,而无法通过一次加速寿命实验得到产品服役过程中基于时间历程的多种状态信息,很难对产品的失效演变规律进行实验研究。

发明内容

[0005] 本发明的目的在于提供一种基于全周期分段步加策略的极小子样滚动功能部件加速失效演变实验方法,仅用一次实验,即可方便高效地获得滚动功能部件全周期服役过程中不同时间历程下的在线和离线状态监测数据,为深入探索其服役过程中各种失效演变过程、规律及寿命预测提供依据。

[0006] 实现本发明目的的技术解决方案为:一种极小子样滚动功能部件加速失效演变实验方法,步骤如下:

[0007] 步骤1:分析功能失效模式和构件损伤与破坏失效模式的失效判据,以及故障判据及故障计数准则,确定加速实验截尾,选择加速模型和加速应力,最终确定所有 j 个步加服役过程中的等效加载力 F_j ,等效跑合速度 v_j 和跑合次数 z_j , $1 \leq j \leq n$;

[0008] 步骤2:确定全周期分段步加实验方案,即将工件沿轴线方向分成 $n+1$ 个子段,子段

号为 $0, 1, \dots, i, \dots, n$; 每个子段长度分别为 $L_0, L_1, \dots, L_i, \dots, L_n$, 在子段0上不进行服役实验, 以保留工件的初始精度及表面完整性信息; 从子段1开始实施全周期分段步加实验, 即在等效加载力 F_1 作用下以等效速度 v_1 自子段1至子段 n 往复跑合 z_1 次, 第1个步加服役过程结束, 此时子段1跑合了 $2z_1+1$ 次或 $2z_1-1$ 次, 子段2至子段 n 跑合了 $2z_1$ 次; 接着继续在等效加载力 F_2 作用下以等效速度 v_2 自子段2至子段 n 往复跑合 z_2 次, 依此类推, 直至第 n 个步加服役过程结束, 或出现不可修复性故障而停止; 实验完成时, 第 i 个子段共经历了 i 个步加服役过程, 其中在第 j 个步加服役过程中, 将在等效加载力 F_j 下以等效跑合速度 v_j 跑合 $2z_j$ 次, $1 \leq j < i \leq n$; 而在第 i 个步加服役过程中, 将在等效加载力 F_i 下以等效跑合速度 v_i 跑合 $2z_i+1$ 或 $2z_i-1$ 次;

[0009] 步骤3: 模拟滚动功能部件服役环境, 按照步骤2中确定的全周期分段步加实验方案开始实验, 实验过程中, 在线采集工件服役的状态数据, 收集故障信息;

[0010] 步骤4: 步骤3的实验结束后, 对每个子段分别取样并离线检测精度和表面完整性, 确定是否存在失效及失效类型;

[0011] 步骤5: 基于各子段的长度、等效加载力、等效跑合速度和跑合次数折算出第 i 个子段单位长度上正常应力水平下总的服役时间 T_i , 则步骤3和步骤4中所测的在线状态数据、故障信息以及离线检测数据, 即为所折算的服役时间 T_i 时的各项数据。

[0012] 本发明与现有技术相比, 其显著优点: (1) 由于表面完整性主要指标 (残余应力, 微观组织, 表面粗糙度) 为有损检测, 样件无法进行二次实验, 因此要在小样本条件下获得不同时间历程下的各种表面完整性信息尤其困难, 而本实验方法可在小子样的限制下, 通过一次全周期分段步加实验, 即可获得滚动功能部件在正常应力水平下服役的时间历程信息和各时间点下的在线及离线状态检测数据。这些数据可用于分析其失效演变机理和规律, 进行精度保持性, 可靠性和寿命预测。通过小子样加速实验, 有效地减少了实验所需样本量, 缩减了实验时间, 降低了实验成本。(2) 对于简单分段跑合, 即第1段在加载力 F_1 作用下以速度 v_1 跑合 z_1 次, 然后第2段再以加载力 F_2 、速度 v_2 跑合 z_2 次, 这种方法存在着每一小段均需频繁加减速, 当长度较短时很难实现的问题; 同时, 也会加重跑合过程中各段磨损不均匀的问题。而本发明的全周期分段步加实验的第 j 个步加服役过程中, 将从第 j 子段至第 n 子段连续往复跑和, 有效避免了简单分段跑合导致的频繁加减速的问题, 同时减小了各段磨损的不均匀性。(3) 本发明亦可应用于其它类似细长工件或环形工件的加速失效演变实验研究。

[0013] 下面结合附图对本发明作进一步详细描述。

附图说明

[0014] 图1是全周期分段步加实验流程图。

[0015] 图2是全周期分段步加实验方案一示意图。

[0016] 图3是全周期分段步加实验方案二示意图。

具体实施方式

[0017] 结合图1, 本发明基于全周期分段步加策略的小子样滚动功能部件加速失效演变实验方法, 步骤如下:

[0018] 步骤1:分析工件精度丧失、性能退变等功能失效模式和疲劳点蚀、材料胶合、变形损伤和断裂等构件损伤与破坏失效模式的失效判据,以及故障判据及故障计数准则,确定合理的加速实验截尾,选择合适的加速模型和加速应力,最终确定所有j个步加服役过程中的等效加载力 F_j ,等效跑合速度 v_j 和跑合次数 z_j , $1 \leq j \leq n$ 。其中关于失效模式及判据,加速试验技术等理论研究相对完善,可查阅国内外相关文献,如[1]徐令令,高过载工况下滚珠丝杠副的失效分析与性能试验研究[D],南京理工,2014。[2]陈循等,加速试验技术的研究、应用与发展[J],机械工程学报,2009,45(8):130-136。

[0019] 步骤1中所述的截尾方式,主要有定时截尾和定数截尾,由于滚动功能部件在其服役过程中故障的出现以及失效具有偶然性和不可控性,为方便统计故障信息,采用定时截尾方式较方便;所述的加速模型为逆幂率模型或Coffin-Manson模型;所述的加速应力为在等效加载力 F_j ,等效跑合速度 v_j 作用下产生的振动平均值或最大值,推荐采用振动平均值。

[0020] 步骤2:确定全周期分段步加实验方案,即如图2、图3所示,将工件沿轴线方向分成 $n+1$ 个子段,子段号为 $0, 1, \dots, i, \dots, n$;每个子段长度分别为 $L_0, L_1, \dots, L_i, \dots, L_n$,在子段0上不进行服役实验,以保留工件的初始精度及表面完整性信息;从子段1开始实施全周期分段步加实验,即在等效加载力 F_1 作用下以等效速度 v_1 自子段1至子段n往复跑合 z_1 次,第1个步加服役过程结束,此时子段1跑合了 $2z_1+1$ 次(参考图2)或 $2z_1-1$ 次(参考图3),子段2至子段n跑合了 $2z_1$ 次;接着继续在等效加载力 F_2 作用下以等效速度 v_2 自子段2至子段n往复跑合 z_2 次,依此类推,直至出现不可修复性故障而停止,或第n个步加服役过程结束;实验完成时,第i个子段共经历了i个步加服役过程,其中第j个步加服役过程为在等效加载力 F_j 下以等效跑合速度 v_j 跑合 $2z_j$ 次, $1 \leq j \leq i$;而第i个步加服役过程为在等效加载力 F_i 下以等效跑合速度 v_i 跑合 $2z_i+1$ 或 $2z_i-1$ 次。

[0021] 具体而言,步骤1中参数可以有如下选择,所述的分段数 $n+1$,取 $n \geq 3$,所述的各子段i的长度 L_i 满足 $L_0 \leq L_1 \leq \dots \leq L_n$,并保证每次跑和时均有足够的长度完成加减速运动;为重点考察后期的失效演变,所述的所有步加服役过程中,跑合次数 z_j 应满足 $z_1 \geq z_2 \geq \dots \geq z_n \geq Z/n$,Z为正常应力水平下总的理论跑合次数;所述的所有步加服役过程中的等效加载力 F_j 可以为恒定力,也可以为周期力,第j步步加服役过程中以周期力 $F_j(t)$ 循环加载,此周期

力 $F_j(t)$ 可折算为等效力 $F_i = \frac{1}{T} \int_0^T F_j(t) dt$;并且各步加服役过程中的等效加载力 F_j 满足 $F_1 \leq$

$F_2 \leq \dots \leq F_n$,且 $F_e \leq F_j \leq F_{\max}$,其中 F_e 为额定载荷, F_{\max} 为工件所能承受的极限载荷;所述的等效跑合速度 v_j 可以为恒定速度,也可以为周期跑合速度,第j步步加服役过程中以周期跑合

速度 $v_j(t)$ 循环跑合,此周期跑合速度 $v_j(t)$ 可折算为等效跑合速度 $v_i = \frac{1}{T} \int_0^T v_j(t) dt$;并且各

步步加服役过程中的等效跑合速度满足 $v_1 \leq v_2 \leq \dots \leq v_n$,且 $v_e \leq v_j \leq v_{\max}$,其中 v_e 为额定跑合速度, v_{\max} 为极限跑合速度。

[0022] 其中步骤2中所述的第i($1 \leq i \leq n$)个步加服役过程,具体可为两种方案之一:

[0023] 第一种方案:如图2所示,自子段j至子段n在等效加载力 F_j 作用下以等效速度 v_j 进行往复跑合 z_j 次,并继续在第j子段单程跑合一次,此时第j个步加服役过程结束;服役过程中,子段j在本次步加服役过程中相应的跑合次数为 $2z_j+1$,子段j+1到子段n的跑合次数为

$2z_j$;

[0024] 第二种方案:如图3所示,自子段j至子段n在等效加载力 F_j 作用下以等效速度 v_j 进行往复跑合 z_j 次,并在第 $2z_j$ 次单程跑合时至子段j与子段j+1交点处结束第j个步加服役过程;服役过程中,子段j在本次步加服役过程中相应的跑合次数为 $2z_j-1$,子段j+1到子段n的跑合次数为 $2z_j$ 。

[0025] 步骤3:模拟滚动功能部件服役环境(如温度,洁净度,预紧力,安装方式等)。按照步骤2中确定的全周期分段步加实验方案开始实验。实验过程中,在线采集工件服役的状态数据,收集故障信息。在线采集的状态数据(也是在线状态数据),具体为在线采集工件服役时的振动、噪声、温度、预紧力等,同时收集并记录如滚道裂纹、点蚀等故障信息及相应的产生时间。

[0026] 在实验过程中出现可修复性故障时,如滚动体碎裂、卡住,润滑油路堵塞,密封端盖破裂,预紧力丧失,须及时停机,记录故障类型及产生时间,修复后继续实验。

[0027] 步骤4:基于步骤3,实验结束后,对每个子段分别取样并离线检测精度和表面完整性得到离线检测数据,具体包括几何精度,粗糙度,表面微观组织、残余应力,磨损量等,以及确定是否存在失效及失效类型(如磨损)。

[0028] 步骤5:基于各子段的长度、等效加载力、等效跑合速度和跑合次数折算出第i个子段单位长度上正常应力水平下总的服役时间 T_i ,则步骤3和步骤4中所测的在线状态数据、故障信息以及离线检测数据,即为所折算的服役时间 T_i 时的各项数据。

[0029] 所述的 T_i 折算方法,具体包括以下步骤:

[0030] 首先假设滚动功能部件寿命在正常应力和加速应力下都服从威布尔分布;滚动功能部件的失效机理仅与当前应力水平和当前已累积的失效部分有关,与累积方式无关。

[0031] 第一步,折算第i个子段在第j个步加服役过程相应的跑合时间,第i个子段在第j个步加服役过程为:

[0032] (1) 当 $i > j$ 时,子段i在第j个步加服役过程中,在等效加载 F_j 的作用下以速度 v_j 经历了 $2z_j$ 次跑合,此时子段i在第j个步加服役过程中的服役时间为 t_{ij} :

$$[0033] \quad t_{ij} = \frac{2z_j \cdot L_i}{v_j}, \quad 1 \leq i < j \leq n \quad (1)$$

[0034] (2) 当 $i = j$ 时,子段i在第j个步加服役过程中,在等效加载 F_j 的作用下以速度 v_j 经历了 $2z_j \pm 1$ 次跑合,此时子段i在第j个步加服役过程过程中的服役时间为:

$$[0035] \quad t_{ij} = \frac{L_i}{v_j} \cdot (2z_j \pm 1), \quad 1 \leq i = j \leq n \quad (2)$$

[0036] 第二步,折算第i个子段在第j个步加服役过程中正常应力水平下跑合时间:

[0037] (1) 威布尔分布下产品失效的概率密度函数为

$$[0038] \quad f(t) = \frac{m}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{m-1} e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^m}, \quad t > 0 \quad (3)$$

[0039] 失效分布函数为

$$[0040] \quad F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^m}, \quad t > 0 \quad (4)$$

[0041] 式中, m 为形状参数, η 为尺度参数;

[0042] (2) 根据Nelson累计失效模型, 某个子段 i 的 j 步步加服役过程中, 在应力水平 S_q 下工作时间 t_{ij} 的累计失效概率 $F_q(t_{ij})$ 和在正常应力水平 $S_{q'}$ 下工作时间 t'_{ij} 的累计失效概率 $F_q(t'_{ij})$ 相等, 即

$$[0043] \quad F_q(t_{ij}) = F_{q'}(t'_{ij}) \quad (5)$$

[0044] (3) 根据可靠性分布模型, 将威布尔分布的失效分布函数代入公式 (5), 可得

$$[0045] \quad 1 - \exp[-(t_{ij}/\eta_{ij})^{m_{ij}}] = 1 - \exp[-(t'_{ij}/\eta_{ij})^{m_{ij}}]$$

$$[0046] \quad t'_{ij} = \eta_{ij} \exp\left[\frac{m_{ij}}{m_{ij'}} \ln\left(\frac{t_{ij}}{\eta_{ij}}\right)\right] \quad (6)$$

[0047] 利用公式 (6) 将第 i 个子段在第 j 个步加实验中的服役时间 t_{ij} 折算成正常应力水平下的服役时间 t'_{ij} , 其中 $1 \leq j \leq i \leq n$;

[0048] 第三步, 折算子段 i 上总服役时间

[0049] 对于子段 i 而言, 实验结束后, 第 i 个子段依次经历了自第 1 个步加服役过程至第 i 个步加服役过程, 根据第二步的折算时间得到子段 i 上总的服役时间为:

$$[0050] \quad T_i = \frac{\sum_{j=1}^i t'_{ij}}{L_i} = \frac{t'_{i1} + t'_{i2} + \dots + t'_{ii}}{L_i}, \quad 1 \leq j \leq i \leq n. \quad (7)$$

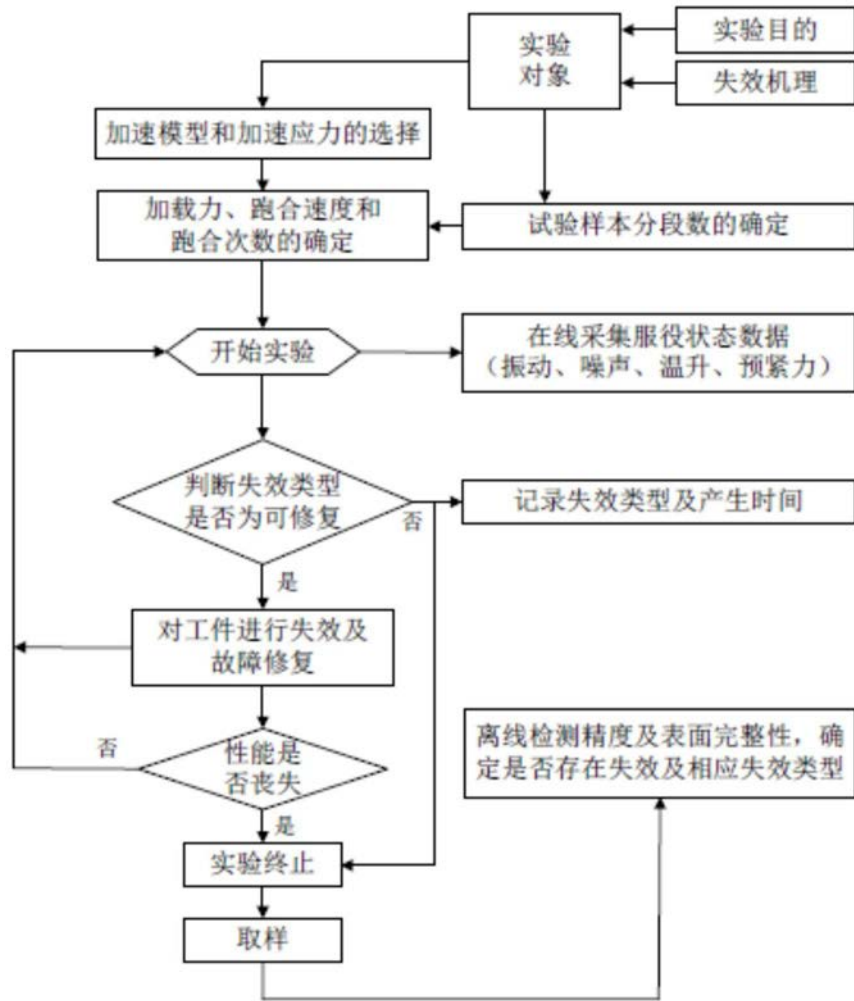


图1

