

基于退化量分布的电主轴可靠性评估

瞿佼佼 刘宏昭 蒋 喜 刘丽兰

西安理工大学,西安,710048

摘要:针对在较短的时间内难以评估高可靠度、长寿命电主轴可靠度的问题,利用基于退化量分布的方法对其可靠性进行评估。首先对电主轴的失效机理进行了分析;然后结合退化量分布的基本原理和退化试验数据对电主轴的可靠性进行评估,分别求出电主轴的4个常用可靠性指标,同时绘制可靠度曲线、失效概率密度曲线以及失效率曲线;最后估计出电主轴的平均寿命和特征寿命。该方法缩短了试验时间,提高了评估精度,对长寿命产品的可靠性研究具有一定的意义。

关键词:退化量分布;电主轴;可靠性;寿命

中图分类号:TH133.2

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2014.06.020

Reliability Assessment of Electric Spindle Based on Degradation Values Distribution

Zi Jiaojiao Liu Hongzhao Jiang Xi Liu Lilan

Xi'an University of Technology, Xi'an, 710048

Abstract: It is difficult to assess the reliability of an electric spindle with high reliability and long lifetime in relatively short time. Based on the degradation value distribution method, the reliability of an electric spindle was evaluated. First of all, the failure principle of electric spindle was analyzed. Moreover, according to the basic principle of degradation value distribution and degradation test data, an assessment about electric spindle was made. Four commonly used reliability indexes of an electric spindle were calculated. In the meantime, reliability curves, failure probability density and failure rate were drawn. Finally, mean lifetime and characteristics lifetime of an electric spindle were evaluated. It has certain significance for products with long lifetime for the researches of reliability.

Key words: degradation value distribution; electric spindle; reliability; lifetime

0 引言

随着科学技术的发展和生产规模的不断扩大,工程系统或产品的综合性和复杂性越来越高。可靠性研究对于避免或减少因机械零部件物理特性的老化或退化以及材料强度不够而引起的早期不必要的检查和维修费用尤为重要。传统可靠性方法需要获得产品的失效寿命数据来进行总体可

靠性推断^[1],而当产品寿命较长、可靠度较高时,在较短的试验时间内很难得到其失效寿命数据。因此,对于可靠度要求较高、寿命较长的电主轴,拟采用基于性能退化数据的可靠性分析方法进行可靠性研究。该方法将系统的可靠性与其物理特性联系起来,可以在产品发生失效之前估计出其可靠性,大大地缩短了试验时间,并且能够获得精度较高的可靠度评估结果。

从20世纪70年代起,国内外学者开始对基于性能退化数据可靠性分析方法进行研究,Crk^[2]提出了通用性较强的基于性能退化数据的

收稿日期:2012—10—29

基金项目:国家科技重大专项(2010ZX04014-012);国家自然科学基金资助项目(51275404);陕西省自然科学基金资助项目(2012JQ7011);陕西省重点学科建设专项资金资助项目

Various Parameters on Material Removal Rate and the Footprint in Abrasive Jet Polishing Process[J]. China Mechanical Engineering, 2008, 19(21): 2532-2535.

450.

(编辑 陈 勇)

[14] 计时鸣,付有志,谭大鹏,等.基于剪切应力输运湍流模型的两相磨粒流动力学特性研究[J].兵工学报,2012,33(4):443-450.

Ji Shiming, Fu Youzhi, Tan Dapeng, et al. Study on Dynamic Characteristics of Two-phase Abrasive Flow Based on Shear Stress Transport Turbulent Model[J]. Acta Armamentarii, 2012, 33(4): 443-

作者简介:袁巧玲,女,1979年生。浙江工业大学特种装备制造与先进加工技术教育部重点实验室讲师。主要研究方向为精密、超精密加工技术及装备。发表论文10余篇。计时鸣,男,1957年生。浙江工业大学机械工程学院院长、教授、博士研究生导师。文东祥,男,1974年生。浙江工业大学机械工程学院副院长、教授、博士研究生导师。谭大鵬,男,1979年生。浙江工业大学机械工程学院副教授。张 利,女,1971年生。浙江工业大学机械工程学院副教授。

可靠性分析方法。Lu 等^[3]利用蒙特卡罗仿真方法获取了非线性混合随机系数回归模型的伪失效寿命数据,进而进行可靠性评估。Meeker 等^[4]推导出了金属疲劳裂纹增加的退化轨迹模型并利用极大似然分析方法处理性能退化数据。Lu 等^[5]对失效寿命呈线性分布的产品采用随机回归系数和标准差函数进行分析。最近几年,利用基于性能退化数据的方法对长寿命产品进行可靠性研究的例子越来越多。文献[6]根据液体火箭发动机的失效机理推导出其失效分布函数。文献[7]利用性能退化数据可靠性分析方法对 GaAs 激光器的可靠性进行了评估。文献[8]分别使用加速退化试验方法和伪寿命试验方法对航天连接器的可靠性进行了评估。文献[9]运用性能退化可靠性理论对滚轮滑轨的可靠性进行了研究。工程中采用的性能退化数据统计分析方法主要包括基于伪寿命分布、基于退化量分布和基于随机系数分布的退化数据可靠性评估^[10]。本文采用基于退化量分布的可靠性评估方法对电主轴进行可靠性评估,获得了一系列常用的可靠性指标,包括可靠度、失效率、平均寿命、可靠寿命与中位寿命、特征寿命等。

1 电主轴失效分析

1.1 电主轴失效机理

电主轴主要由电动机、轴承、转轴、轴壳组成,其中,产生旋转磁场的定子和把电能转换成机械能的转子共同组成了电动机,定子和转子之间的空隙主要形成功率输出。

退化是会使产品性能发生变化的一种物理或者化学过程,该变化随着时间逐渐发展,最终导致产品失效^[11]。因此,由产品性能的退化而导致的失效称为退化失效。电主轴的运转速度很高,主轴内各个运动副之间摩擦产生大量的热量,轴承内外圈因发热引起的热变形直接影响了轴承的预紧状况,严重时可使轴承因发生热咬合而毁坏;另外,虽然将电动机的转子直接过盈地配合在主轴上可以减小电主轴的振动,但是电主轴长期高速运转可能导致定子和转子发生静偏心以及电动机转子的形状偏心,从而产生电磁振动,这种电磁振动可以使电主轴产生振动。本文对电主轴施加了轴端径向载荷,如果电主轴长期在该力的作用下高速运转,会导致支撑轴承的磨损,轴端径向跳动增大。当电主轴某一个或者若干个性能退化量大于各自的性能退化失效阈值时,就认为电主轴出现了退化失效。

1.2 电主轴性能退化参数的选取

为了判断电主轴的退化失效状况,需要选取适当的性能指标作为性能退化特征量。性能退化参数应满足以下两个条件^[7]:①被研究产品的退化参数必须能被监测,并且有准确的定义;②随着产品工作时间或试验时间的推移,产品性能退化参数应有明显的趋势性变化,能够明显地反映出产品的工作状况。

本文所研究的电主轴能够测量的性能指标包括前后轴承组的温升、主轴振动以及轴端径向跳动。由于以上 3 个性能指标都会影响工件的加工精度,并且均能满足性能退化量的两个条件,因此可以作为性能退化参数。其中,轴端径向跳动可以直接反映电主轴回转误差,所以,本文选取电主轴轴端径向跳动作为电主轴性能退化特征参数。

2 常用退化量分布模型及退化量分布法的基本原理

2.1 常用退化量分布模型

退化轨迹模型是指试验样品在某一工作条件下性能退化量与试验时间之间的函数关系,所以有几个性能退化指标,就有几条性能退化轨迹。在误差允许的条件下,可以把拟合后的退化轨迹看作产品实际的退化轨迹。对于大部分具有性能退化过程的产品来说,其退化量一般可以用以下 5 种退化轨迹模型来进行有效的拟合^[5,12]。

线性函数模型:

$$G_k = \alpha_k t + \beta_k \quad (1)$$

指数函数模型:

$$G_k = \beta_k \exp(\alpha_k t) \quad (2)$$

幂函数模型:

$$G_k = \beta_k t^{\alpha_k} \quad (3)$$

对数函数模型:

$$G_k = \alpha_k \ln t + \beta_k \quad (4)$$

Lloyd - Lipow 模型:

$$G_k = \alpha_k - \beta_k / t \quad (5)$$

$$k = 1, 2, \dots, q$$

式中, q 为性能退化量的个数; G_k 为性能退化量; α_k, β_k 为待估模型参数; t 为试验时间。

2.2 退化量分布法的基本原理

基于退化量分布的退化数据统计分析方法主要基于统计模型而非物理模型^[10],具体的实现方法及步骤如下:

(1) 收集 n 个样品在 t_1, t_2, \dots, t_m 时刻的性能退化数据 $(t_1, y_{1j}), (t_2, y_{2j}), \dots, (t_m, y_{mj})$ ($j = 1, 2, \dots, n$), 根据相应的国家标准及使用方要求确定失效阈值 D 。

(2) 根据收集到的试验数据,依次对各时刻所有样本的退化量(即 $y_{i1}, y_{i2}, \dots, y_{ij}, \dots, y_{in}, i = 1, 2, \dots, m$) 分别应用正态分布、对数正态分布、威布尔分布进行假设检验,选择其中最优的分布函数并求出该分布函数中的待定参数 G_k 。当产品退化量服从威布尔分布时, G_k 为形状参数 m_y 或尺度参数 η_y ; 当产品退化量服从正态分布或者对数正态分布时, G_k 为均值 μ_y 或标准差 σ_y 。

确定最优分布函数的方法:当绝大多数时刻接受某一分布的假设检验时,则选该分布为最优分布函数;当各时刻接受的假设检验参差不齐时,则确定威布尔分布为最优分布函数,因为威布尔分布具有幂率特性,具有为不同失效模式提供便于处理的完整形式的能力。

(3) 运用最小二乘法将步骤(2)中所求的分布函数中的参数 G_k 分别与 5 种常用的退化轨迹模型进行拟合,确定最优的退化轨迹模型。

(4) 求出可靠度与性能退化量分布关系式,进而获得常用的可靠性指标:可靠度、平均寿命、失效率、特征寿命,并绘制产品的可靠度曲线。

综上所述,以上步骤还可用图 1 直观地表示。

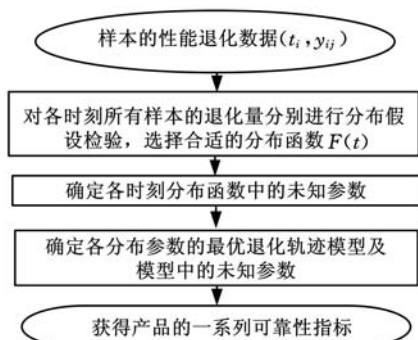


图 1 基于退化量分布的可靠性评估流程

2.3 不同分布函数下可靠度的确定

对于电主轴的轴端径向跳动,当轴端径向跳动量 y_i 大于失效阈值时,认为其发生退化失效。则产品失效分布函数 $F(t)$ 应为

$$F(t) = P(y_i \geq D) \tag{6}$$

当 y_i 服从正态分布时,产品的失效分布函数^[13] 为

$$F(t) = P(y_i \geq D) = \int_D^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_y(t)} \exp\left(-\frac{(x - \mu_y(t))^2}{2}\right) dx \tag{7}$$

可靠度 $R(t)$ 为

$$R(t) = 1 - F(t) = 1 - \int_D^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_y(t)} \exp\left(-\frac{(x - \mu_y(t))^2}{2}\right) dx =$$

$$\int_0^D \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_y(t)} \exp\left(-\frac{(x - \mu_y(t))^2}{2}\right) dx = \Phi\left(\frac{D - \mu_y(t)}{\sigma_y(t)}\right) \tag{8}$$

式中, Φ 为标准正态分布概率; $\mu_y(t)$ 为各时刻的样本均值 μ_y 与 5 种常用退化轨迹模型进行拟合之后得到的最优均值函数; $\sigma_y(t)$ 为各时刻的样本标准差 σ_y 与 5 种常用退化轨迹模型进行拟合之后得到的最优标准差函数。

可靠度与性能退化量分布关系为

$$R(t) = 1 - F(t) = \Phi\left(\frac{D - \mu_y(t)}{\sigma_y(t)}\right) \tag{9}$$

同理,当 y_i 服从对数正态分布时,可靠度与性能退化量分布关系为

$$R(t) = 1 - F(t) = \Phi\left(\frac{\ln D - \mu_y(t)}{\sigma_y(t)}\right) \tag{10}$$

当 y_i 服从威布尔分布时,可靠度与性能退化量分布关系为

$$R(t) = \exp\left(\frac{-\exp(\ln D - \mu_y(t))}{\sigma_y(t)}\right) \tag{11}$$

3 电主轴可靠性评估

3.1 电主轴性能退化试验方案

3.1.1 电主轴的试验原理及方法

本文的试验对象为 4 根磨削电主轴,在自行设计的试验台上进行可靠性试验。该试验台的试验方法如下:在做好试验前的准备工作之后,启动电主轴,使之在较低转速下运转,通过变频器逐渐调节电主轴的转速至 8000r/min,通过电磁加载装置在电主轴的轴端施加一定载荷,用来模拟机床的实际加载量。待电主轴运转平稳以及测试仪器稳定工作后,用激光位移传感器、振动速度传感器和温度传感器分别测量轴端径向跳动量、主轴振动量和前后轴承组温度 3 项退化数据。在整个试验过程中,每隔一段时间记录一次数据,最终获得各个电主轴的可靠性试验数据。

3.1.2 试验终止条件

由于电主轴试验台要求进行可靠性验证试验,故采用的是定时截尾可靠性试验方法。截尾时间的确定方式如下:初步选用定时试验统计方案中的某一方案,根据 GJB899A-2009 可以查出该统计方案的生产方风险、使用方风险、鉴别比和判决标准。同时,试验前先规定平均故障间隔时间的检验上限和检验下限的值,则可以根据给定的生产方风险、使用方风险、平均故障间隔时间的检验上限和检验下限计算出持续试验时间 T 。 T 即为定时截尾试验的截尾时间。

根据电主轴可靠性试验规范以及国家标准,结合客户的要求,笔者设定的试验终止条件如下:

①前后轴承温度升幅超过恒定工作温度的 30%,

或者前后轴承温度差超过 60℃;②主轴振动量超过 1.5mm/s;③主轴的径向跳动超过 0.02mm。

由于电主轴试验在数据采集时有一定的偶然性,记录的数据会有一些的误差,所以只有连续几次出现以上 3 种情况才可以终止试验。若超过截尾时间之后仍未出现上述现象,按照定时截尾试验原则终止试验。

3.2 基于退化量分布的电主轴可靠性评估

按照上述电主轴性能退化可靠性试验方案对电主轴进行可靠性试验,获得的部分试验数据如表 1 所示。依照表 1 的试验数据,根据退化量分布的方法对电主轴的可靠性进行评估。

表 1 电主轴轴端径向跳动 μm

	时间(h)									
	24	48	72	96	120	144	168	192	216	240
样本 1	6.3	6.5	6.0	5.7	5.3	6.0	6.7	6.3	6.9	7.1
样本 2	5.9	6.6	6.1	5.8	5.9	6.7	6.4	6.3	7.2	7.1
样本 3	11.3	11.7	12.7	12.7	12.4	13.0	13.0	14.6	14.7	15.2
样本 4	5.1	5.0	5.2	5.0	5.5	5.8	5.9	5.7	6.1	6.0

	时间(h)									
	264	288	312	336	360	384	408	432	456	480
样本 1	7.1	7.1	7.6	7.6	8.2	8.2	8.7	8.8	8.5	8.7
样本 2	6.5	6.5	6.4	6.9	6.6	8.1	7.4	7.9	7.6	8.0
样本 3	14.7	14.7	14.7	14.9	15.2	14.7	15.1	15.0	14.9	15.5
样本 4	6.1	6.8	6.5	6.4	6.8	6.5	7.0	6.5	7.1	7.3

	时间(h)									
	504	528	552	576	600	624	648	672	696	720
样本 1	8.5	8.4	8.7	8.6	8.7	9.3	9.0	8.8	8.9	9.0
样本 2	7.3	7.6	7.4	7.7	7.3	8.0	8.8	8.9	8.8	8.8
样本 3	15.2	15.5	15.2	16.4	16.2	16.2	16.6	16.3	16.3	16.8
样本 4	6.9	7.0	6.8	6.8	6.8	6.7	7.3	6.9	6.5	7.0

3.2.1 可靠度 $R(t)$

产品的可靠度 $R(t)$ 是产品在规定工作条件下,规定的时间 t 内,完成规定功能的概率^[10]。分别对各时刻所有样本的轴端径向跳动量采用正态分布、对数正态分布以及威布尔分布进行 Kolmogorov-Smirnov 假设检验,因为该检验为拟合优度型检验,可以检验样本数据是否服从制定的理论分布,同时适用于各种常见分布检验,属于通用检验方法^[10]。通常将概率不超过 0.05 的事件当作小概率事件,因此在假设检验时选取检验水平(显著性水平)为 0.05。列出部分时刻的检验结果如表 2 所示。表 2 中, H 值表示是否接受假设检验,若 $H=0$ 则接受假设检验,认为被检验的数据服从假设的分布;若 $H=1$ 则拒绝假设检验,说明被检验数据不服从该分布。 P 值的大小表示接受该假设的概率, P 值越小说明该假设越可疑。

根据所有的运行结果分析可得,各时刻所有样本的轴端跳动量接受的最优分布为对数正态分布,因此,笔者认为各时刻轴端径向跳动量服从对

表 2 部分时刻轴端径向跳动量分布检验结果 μm

	时间(h)							
	576		600		624		648	
	H	P	H	P	H	P	H	P
威布尔分布	0	0.57	0	0.64	0	0.72	0	0.48
正态分布	0	0.56	0	0.62	0	0.71	0	0.49
对数正态分布	0	0.69	0	0.77	0	0.86	0	0.59

数正态分布,并且获得该分布各时刻的未知参数 μ_y 和 σ_y 如表 3 所示。

表 3 对数正态分布各时刻 μ_y 和 σ_y 值 μm

	时间(h)									
	24	48	72	96	120	144	168	192	216	240
μ_y	1.9174	1.9570	1.9476	1.9123	1.9163	2.0042	2.0246	2.0256	2.1004	2.1083
σ_y	0.3496	0.3585	0.4025	0.4247	0.4043	0.3789	0.3641	0.4395	0.3979	0.4163

	时间(h)									
	264	288	312	336	360	384	408	432	456	480
μ_y	2.0820	2.1092	2.1110	2.1293	2.1574	2.1889	2.2064	2.2054	2.2074	2.2429
σ_y	0.4087	0.3875	0.3923	0.3878	0.3880	0.3493	0.3512	0.3578	0.3376	0.3396

	时间(h)									
	504	528	552	576	600	624	648	672	696	720
μ_y	2.1952	2.2108	2.2008	2.2268	2.2133	2.2491	2.2923	2.2709	2.2599	2.2848
σ_y	0.3616	0.3612	0.3618	0.3922	0.3950	0.3816	0.3573	0.3662	0.3854	0.3753

将表 3 中 μ_y 、 σ_y 分别与 5 种常见的退化轨迹模型进行拟合,选择拟合优度最高的一种作为退化轨迹模型。误差平方和是一种反映拟合优度的物理量,该值反映了统计量的实际测量数据与拟合曲线之间的总偏差,故采用误差平方和 N 作为评价模型拟合优度的指标,其表达式为

$$N = \sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x})^2 \quad (12)$$

其中, x_i 为第 t_i 时刻性能退化量的检测值, \hat{x} 为 t_i 时刻退化量的拟合值。因此, N 越接近 0 说明拟合优度越高。

(1) 各时刻样本均值 μ_y 与线性函数、指数函数、幂函数、对数函数以及 Lloyd-Lipow 模型拟合后得到的误差平方和如表 4 所示。

表 4 μ_y 与常用模型拟合的误差平方和

	线性函数	指数函数	幂函数	对数函数	Lloyd-Lipow 模型
N	0.0383	0.0423	0.0443	0.0504	0.2144

显然 0.0383 更接近 0,则说明 μ_y 与线性模型拟合优度最高,同时求出 $\mu_y(t)$ 的表达式为

$$\mu_y(t) = 5.3611 \times 10^{-4}t + 1.9323 \quad (13)$$

(2) $\sigma_y(t)$ 与线性函数、指数函数、幂函数、对数函数以及 Lloyd-Lipow 模型拟合后得到的误差平方和如表 5 所示。

$\mu_y(t)$ 拟合曲线如图 2 所示。

表 5 σ_y 与常用模型拟合的误差平方和

	线性函数	指数函数	幂函数	对数函数	Lloyd-Lipow 模型
$N/10^{-2}$	1.6885	1.6881	1.8158	1.8133	1.8751

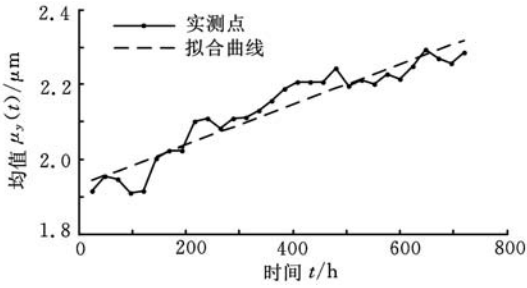


图2 $\mu_y(t)$ 拟合曲线

由于0.016 881更接近0,说明 σ_y 与指数模型的拟合优度最高,从而求得 $\sigma_y(t)$ 的表达式为

$$\sigma_y(t) = 0.3938\exp(-1.028 \times 10^{-4}t) \quad (14)$$

$\sigma_y(t)$ 拟合曲线如图3所示。

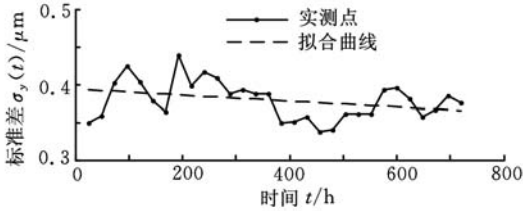


图3 $\sigma_y(t)$ 拟合曲线

由于各时刻轴端跳动量服从对数正态分布,根据相应的国家标准及使用方要求确定电主轴的失效阈值 $D = 20\mu\text{m}$,将式(13)、式(14)代入式(10),整理可得电主轴的可靠度公式:

$$R(t) = \Phi\left(\frac{\ln 20 - 5.3611 \times 10^{-4}t - 1.9323}{0.3938\exp(-1.028 \times 10^{-4}t)}\right) \quad (15)$$

根据式(15)绘制出该电主轴的可靠度曲线,如图4所示。

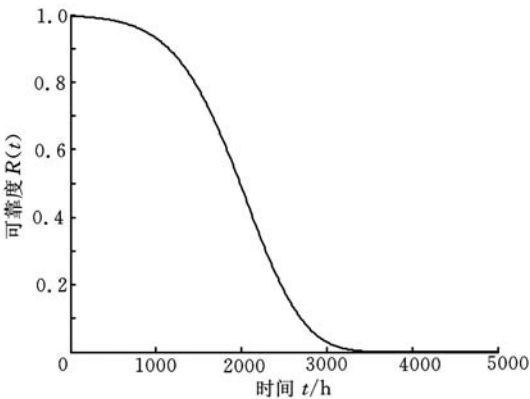


图4 可靠度曲线

3.2.2 失效概率密度函数 $f(t)$

一个连续分布函数的概率密度函数是通过对该分布函数求导得到的。因为电主轴的轴端跳动量服从对数正态分布,所以其失效分布函数为

$$F(t) = 1 - R(t) = 1 - \Phi\left(\frac{\ln 20 - 5.3611 \times 10^{-4}t - 1.9323}{0.3938\exp(-1.028 \times 10^{-4}t)}\right) \quad (16)$$

对式(16)求导并化简可得

$$f(t) =$$

$$-\frac{0.4048 \times 10^{-4} \exp(-1.028 \times 10^{-4}t)}{\sqrt{2\pi}(5.3611 \times 10^{-4}t + 1.9323)} M \exp(-0.5M^2) \Big|_{x=0}^{x=20} + \frac{5.3611 \times 10^{-4}}{\sqrt{2\pi}0.3938\exp(-1.028 \times 10^{-4}t)} \exp(-0.5M^2) \Big|_{x=20} \quad (17)$$

$$M = \frac{\ln x - (5.3611 \times 10^{-4}t + 1.9323)}{0.3938\exp(-1.028 \times 10^{-4}t)}$$

绘制出的电主轴失效概率密度函数曲线如图5所示。

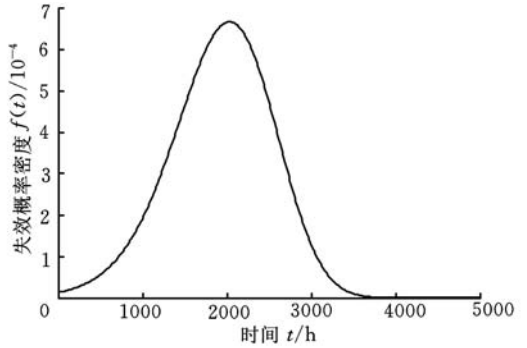


图5 失效概率密度函数曲线

3.2.3 失效率 $\lambda(t)$

失效率是产品工作到某一时刻未发生失效的条件下,在该时刻后单位时间内产品发生失效的条件概率^[10]。其表达式为

$$\lambda(t) = f(t)/R(t) \quad (18)$$

对于电主轴的失效率可以将式(15)和式(17)代入式(18)求得,从而得到电主轴失效率曲线,如图6所示。

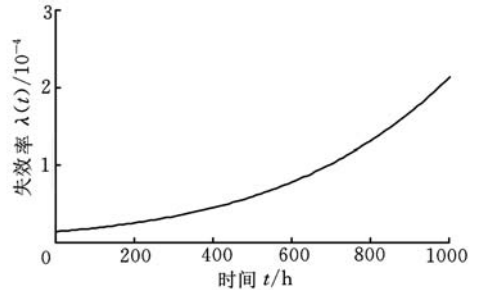


图6 失效率曲线

3.2.4 平均寿命 θ

平均寿命值反映一个产品平均能工作的时间长短,其表达式^[14]为

$$\theta = \int_0^{+\infty} R(t)dt \quad (19)$$

将式(15)代入式(19)可得

$$\theta = \int_0^{+\infty} \Phi\left(\frac{\ln 20 - 5.3611 \times 10^{-4}t - 1.9323}{0.3938\exp(-1.028 \times 10^{-4}t)}\right)dt \quad (20)$$

计算得出该电主轴的平均寿命约为1945.6h。

3.2.4 可靠寿命 t_R

可靠度 $R(t)$ 的值反映了产品在 t 时刻能够正常运行的概率大小,当可靠度为某一给定值 R 时,

对应的时刻 t 为产品的可靠寿命 t_R 。即

$$R(t_R) = R \quad (21)$$

当 $R=0.5$ 时, $t_{0.5}$ 称为中位寿命, 该值反映了好的产品 and 坏的产品各占一半时所对应的时间, 当 $R=e^{-1} \approx 0.368$ 时的可靠寿命为特征寿命, 用 $t_{e^{-1}}$ 表示。由电主轴的可靠度曲线可得, 电主轴的可靠性指标如下: 中位寿命 $t_{0.5} \approx 1983.61\text{h}$, 特征寿命 $t_{0.368} \approx 2181.51\text{h}$ 。

4 结语

电主轴是一种可靠性较高、使用寿命较长的结构单元, 很难在较短的时间内得到其失效数据。因此, 使用传统的可靠性分析方法很难对其进行可靠性评估。本文对电主轴的失效机理进行了分析, 选取了合适的性能退化量, 给出了基于退化量分布的电主轴的可靠性评估方法。通过测量的试验数据, 较精确地绘制出电主轴的可靠度曲线、失效概率密度曲线和失效率曲线, 估计出了电主轴的平均寿命以及特征寿命。基于退化量分布的可靠性评估方法节省了试验时间, 对于结构复杂、寿命长、可靠性高的产品的可靠性研究具有一定的意义。

参考文献:

- [1] 张永强, 刘琦, 周经伦. 基于性能退化数据的可靠性评定方法研究[J]. 飞行器测控学报, 2005, 24(5): 54-58.
Zhang Yongqiang, Liu Qi, Zhou Jinglun. Reliability Evaluation Based on Performance Degradation Data [J]. Journal of Spacecraft TT&CT Technology, 2005, 24(5): 54-58.
- [2] Crk V. Reliability Assessment from Degradation Data [C]//Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium. Los Angeles, 2000: 155-161.
- [3] Lu J C, Meeker W Q. Using Degradation Measures to Estimation a Time-to-failure Distribution [J]. Technometrics, 1993, 35(2): 161-174.
- [4] Meeker M Q, Escobar L A. Statistical Methods for Reliability Data [M]. New York: John Wiley & Sons, 1998.
- [5] Lu Jey-Chyl, Park J, Yang Qing. Statistical Inference of a Time-to-failure Distribution Derived from Linear Degradation Data [J]. Technometrics, 1997, 39(4): 391-400.
- [6] 冯静, 刘琦, 周经伦, 等. 基于性能退化数据的液体火箭发动机可靠性 Bayes 评定[J]. 航空计算技术, 2003, 33(3): 6-10.
Feng Jing, Liu Qi, Zhou Jinglun, et al. The Bayes Reliability Assessment for Liquid Rocket Engine

- Based on Performance Degradation Data [J]. Aeronautical Computer Technique, 2003, 33(3): 6-10.
- [7] 邓爱民, 陈循, 张春华, 等. 基于性能退化数据的可靠性评估[J]. 宇航学报, 2006, 27(3): 546-552.
Deng Aimin, Chen Xun, Zhang Chunhua, et al. Reliability Assessment Based on Performance Degradation Data [J]. Journal of Astronautics, 2006, 27(3): 546-552.
- [8] 钱萍, 陈文华, 高亮, 等. 航天电连接器综合应力可靠性统计模型的验证 [J]. 中国机械工程, 2011, 22(3): 257-273.
Qian Ping, Chen Wenhua, Gao Liang, et al. Reliability Statistical Model Verification of Aerospace Electrical Connectors under Multiple Stresses [J]. China Mechanical Engineering, 2011, 22(3): 257-273.
- [9] 蔡景, 任淑红, 陆晓华. 基于带漂移布朗运动的滚轮滑轨可靠性预测方法研究 [J]. 中国机械工程, 2012, 23(12): 1408-1412.
Cai Jin, Ren Shuhong, Lu Xiaohua. Research on Reliability Prediction for Roller-slide Based on Brownian Motion with Drift [J]. China Mechanical Engineering, 2012, 23(12): 1408-1412.
- [10] 赵宇. 可靠性数据分析 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.
- [11] 张子剑, 钟强晖, 张志华. 退化产品可靠性评估方法的研究 [J]. 中国惯性技术学报, 2007, 15(6): 752-755.
Zhang Zijian, Zhong Qianghui, Zhang Zhihua. Evaluation Method of Degradation Products' Reliability [J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2007, 15(6): 752-755.
- [12] Meeker W Q, Escobar L A. Statistical Methods for Reliability Data [M]. New York: John Wiley & Sons, 1998.
- [13] 秦丽, 孟召丽, 吴永亮. 基于振动传感器性能退化数据的可靠性评估 [J]. 传感器与微系统, 2009, 28(9): 53-55.
Qin Li, Meng Zhaoli, Wu Yongliang. Reliability Assessment Based on Performance Degradation Data for Vibration Sensors [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2009, 28(9): 53-55.
- [14] 张志华. 可靠性理论及工程应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2012.

(编辑 陈 勇)

作者简介: 鲁俊俊, 女, 1989 年生。西安理工大学机械与精密仪器工程学院硕士研究生。主要研究方向为机电系统动力学。发表论文 1 篇。刘宏昭, 男, 1954 年生。西安理工大学机械与精密仪器工程学院教授、博士研究生导师。蒋 喜, 男, 1987 年生。西安理工大学机械与精密仪器工程学院硕士研究生。刘丽兰, 女, 1979 年生。西安理工大学机械与精密仪器工程学院讲师。