

基于带漂移布朗运动的滚轮滑轨 可靠性预测方法研究

蔡 景 任淑红 陆晓华

南京航空航天大学,南京,210016

摘要:针对滚轮滑轨的高耐磨性、少失效信息的特点,运用性能退化可靠性理论和随机过程方法,对滚轮滑轨的可靠性进行了研究。通过分析滚轮滑轨的磨损失效过程,建立了基于带漂移布朗运动的滚轮滑轨可靠度模型,并利用布朗运动特性研究了基于当前状态的寿命预测方法,从而实现滚轮滑轨可靠性的实时预测。实例证明了该方法的合理性和有效性。研究结果为滚轮滑轨的维修决策提供了理论方法。

关键词:布朗运动;滚轮滑轨;退化失效;可靠性预测

中图分类号:TH117.1

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2012.12.005

Research on Reliability Prediction for Roller-slide Based on Brownian Motion with Drift

Cai Jing Ren Shuhong Lu Xiaohua

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, 210016

Abstract: Because the roller-slide has the characteristic of high wearability and few failure data, the reliability of the roller-slide was researched using the performance degradation theory and stochastic process methods. On the basis of analyzing the wearing process of the roller-slide, a reliability model based on Brownian motion with drift was built, and then the residual life prediction method based on current wear quantity was developed with the characteristics of Brownian motion. Finally, an example was given to show that the proposed method is validity and the prediction accuracy is acceptable. Also, the method provides a foundation for maintenance decision.

Key words: Brownian motion; roller slide; degradation failure; reliability prediction

0 引言

统计数据表明,近年来民用飞机襟翼、缝翼系统故障数占整个飞行操纵系统故障总数的 64.7%,其中滚轮滑轨故障是襟翼、缝翼卡阻、不一致、不对称等故障的主要原因之一,占襟翼、缝翼系统故障总数的 30%~80%^[1-2]。由于滚轮滑轨造价昂贵,无法投入大量样品开展寿命试验,所以不可能得到足够的试验失效数据,而且由于机构磨损具有长寿命的特点,甚至经常出现“零失效”现象,因此,对于高可靠、长寿命的滚轮滑轨,很难通过寿命试验或加速寿命试验的方法来获取其失效时间,这给以产品失效数据为基础的传统可靠性分析带来了极大的困难。基于产品性能退化数据的可靠性分析可以不需要产品的失效数据,而是寻找产品的性能退化规律对其可靠性进行分析,Nair^[3]曾指出退化数据对可靠性分析来说是一个丰富的信息源,因此,基于性能退化数据

的可靠性分析方法为开展滚轮滑轨的可靠性评估提供了一条可行的途径。

在滚轮滑轨的实际磨损过程中,磨料磨损、黏着磨损、疲劳磨损、腐蚀磨损类型往往同时存在,相互影响,因此,要准确确定具体磨损机理是相当困难的,这正是难以准确进行磨损量预测及对应可靠性预测的重要原因之一。为此,国内外学者对该类问题进行了大量的研究并取得了不少成果:Archard 模型在实际磨损量的计算中被广泛采用,但该模型提出的是磨损体积的计算公式,而对于滚轮滑轨而言,磨损深度更具有实际意义;吴越等^[4]采用线性回归模型方法对磨损量进行了预测研究,但在严重磨损阶段,由于磨损量过程不完全是线性过程,所以在严重磨损阶段,线性回归模型方法效果并不是很好;张彦^[5]研究了制动器摩擦衬片磨损量的等维灰色预测方法,然而灰色理论建立的是生成数据模型而不是原始数据模型,灰色预测的数据是通过生成数据的 gm(1,1)模型所得到的预测值的逆处理结果。此外,闫志琴等^[6]通过建立合适的仿真数学模型研究了材料磨损量随载荷变化的规律;刘锐等^[7]通过 BP 神经

收稿日期:2011-04-08

基金项目:航空科学基金资助项目(2009ZF52059);南京航空航天大学专项科研项目(NS2010171)

网络实现对铣刀磨损量的在线监测和刀具剩余寿命的预测,但该研究的对象以及监测手段与滚轮滑轨不同。

从目前国内外的相关研究可以看出,在材料磨损方面的研究主要集中在磨损量本身的监测和预测上,而在此基础上更进一步的磨损可靠性预测方法研究基本属于起步阶段,尤其是针对滚轮滑轨的可靠性预测方法研究还未见报道。本文以滚轮滑轨的试验为基础,针对试验缺乏失效数据的难点,引入带漂移布朗运动的概念,建立了基于带漂移布朗运动的滚轮滑轨可靠性评估模型,提出了基于当前磨损量状态的滚轮滑轨寿命预测方法,实现了对滚轮滑轨的可靠性实时预测。

1 基于带漂移布朗运动的可靠性评估模型

1.1 带漂移的布朗运动

近年来,采用产品的退化性能数据进行可靠性评定已经成为研究的一个热点^[8],由于产品性能的退化过程与微粒扩散的过程比较类似,因此,布朗运动被广泛用于描述产品的退化过程。

布朗运动是一种随机扩散的极限过程,其定义为:如存在随机过程 $\{B(t), t \geq 0\}$, 它满足 ① $B(0) = 0$; ② $\{B(t), t \geq 0\}$ 有独立的平稳增量; ③ 对每个 $t > 0$, $B(t)$ 服从正态分布 $N(0, \sigma^2 t)$; 则认为 $\{B(t), t \geq 0\}$ 是布朗运动。如 $\sigma = 1$ 则 $\{B(t), t \geq 0\}$ 是标准的布朗运动,如果 $\sigma \neq 1$ 则可认为 $\{B(t)/\sigma, t \geq 0\}$ 是标准布朗运动。

由于产品的性能退化过程都存在一定的趋势,因此,需要采用带漂移的布朗运动进行退化规律的描述。带漂移的布朗运动退化模型可表述为

$$X(t) = x_0 + \mu t + \sigma B(t) \quad (1)$$

式中, x_0 为初始状态,为常数; μ 为漂移速度; σ 为扩散速度; $B(t)$ 为标准布朗运动。

由于 $B(t)$ 为标准布朗运动,因此根据布朗运动的定义,可知 $X(t)$ 服从正态分布 $N(x_0 + \mu t, \sigma^2 t)$, 并且具有独立的平稳增量。

1.2 首次到达时间

在性能退化的可靠性分析中,产品失效是通过 $X(t)$ 与失效阈值 L 的大小关系来确定的,如向右漂移时, $X(t) \geq L$ 时为产品失效;如向左漂移时, $X(t) \leq L$ 时为产品失效。根据滚轮滑轨的磨损特点,可知其退化规律属于向右漂移。

Schrodinger 和 Smoluchowsk 在研究布朗运动过程中定义了布朗运动过程首次达到某个点的时间的分布,即逆高斯分布^[9],首次到达 x 的时

间 T_x 具有下面的概率密度函数:

$$f(t; x) = \frac{L - x_0}{\sigma \sqrt{t^3}} \Phi\left(\frac{L - x_0 - \mu t}{\sigma \sqrt{t}}\right) \quad (2)$$

$$\mu > 0, L > x_0$$

因此,其分布函数可以表示为

$$F(t) = 1 - \Phi\left(\frac{L - x_0 - \mu t}{\sigma \sqrt{t}}\right) + \exp\left(\frac{2(L - x_0)\mu}{\sigma^2}\right) \Phi\left(-\frac{L - x_0 + \mu t}{\sigma \sqrt{t}}\right) \quad (3)$$

可靠度函数为

$$R(t) = \Phi\left(\frac{L - x_0 - \mu t}{\sigma \sqrt{t}}\right) - \exp\left(\frac{2(L - x_0)\mu}{\sigma^2}\right) \Phi\left(-\frac{L - x_0 + \mu t}{\sigma \sqrt{t}}\right) \quad (4)$$

式中, $\Phi(\cdot)$ 为标准正态分布的累积分布函数。

1.3 基于当前磨损量的剩余寿命预测

以上所得的滚轮滑轨可靠度函数反映的是多个滚轮滑轨磨损量的统计规律,而在实际工作中更关心的是在某一磨损量下,预测单个滚轮滑轨的失效时间,为此,可以利用布朗运动的 Markov 性以及独立增量性质,得到滚轮滑轨基于当前磨损量的可靠度预测模型。

设当前时刻 h 的磨损量为 x ($x < L$), t 为 h 后的某一时刻,即 $t > h$, 因此可得

$$R(t | X(h) = x) = P(T > t | X(h) = x) = \frac{P(X(t) < L | X(h) = x)}{P(X(h) = x)} = \frac{P(\Delta X(t, h) < L - x) P(X(h) = x)}{P(X(h) = x)} = P(\Delta X(t, h) < L - x) = \Phi\left[\frac{L - x - \mu(t - h)}{\sigma \sqrt{t - h}}\right] \quad (5)$$

式中, $P(\cdot)$ 为概率。

因此,可以进一步得到此时的期望寿命(即预测的寿命)为

$$E(T) = \int_0^\infty R(t | X(h) = x) dt = \int_0^\infty \Phi\left[\frac{L - x - \mu(t - h)}{\sigma \sqrt{t - h}}\right] dt \quad (6)$$

2 滚轮滑轨的磨损失效分析

2.1 滚轮滑轨的磨损失效特点^[10]

对于单件滚轮滑轨的磨损试验,其磨损退化是一个随时间变化而磨损量不断增大的过程,如图 1 所示。

然而,如果多个滚轮滑轨件同时进行磨损试验时就会发现,磨损量和时间的关系并不是一条光滑的曲线,而是非常粗造的曲线,如图 2 所示,其原因如下:① 不同的滚轮滑轨件之间存在差异,这种差异是由于制造过程的差异形成的;② 存在外部干扰,即在磨损量监测过程中存在测量

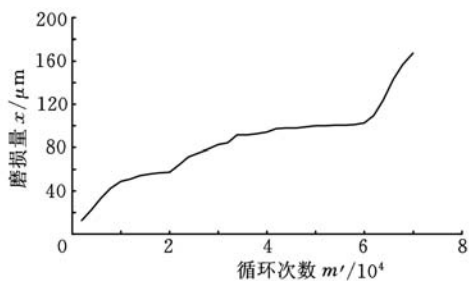


图 1 单件滚轮滑轨的磨损量变化

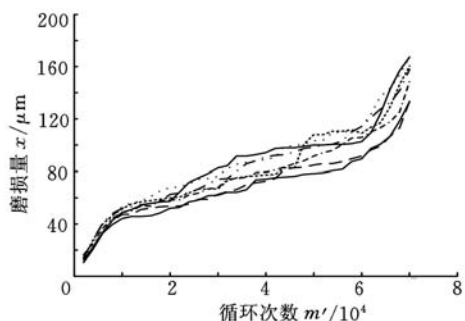


图 2 多件滚轮滑轨的磨损量变化

误差、人为误差等。

2.2 模型中未知参数估计

由于带漂移的布朗运动具有独立增量特性，因此可以利用退化增量数据获得参数 μ 、 σ 的估计值 $\hat{\mu}$ 、 $\hat{\sigma}$ 。

设有 m 个试验样本，在 n 个不同时刻对磨损量进行观测，不同时刻 $t_{i,j}$ 、 $t_{i,j+1}$ ($i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n$) 时的磨损量增量 $\Delta x_{i,j}$ 为

$$\Delta x_{i,j} = X(t_{i,j+1}) - X(t_{i,j}) = \mu(t_{i,j+1} - t_{i,j}) + \sigma[B(t_{i,j+1}) - B(t_{i,j})] \quad (7)$$

且服从正态分布 $N(\mu(t_{i,j+1} - t_{i,j}), \sigma^2(t_{i,j+1} - t_{i,j}))$ 。

利用式(5)所示的极大似然估计方法进行参数估计：

$$L(\mu, \sigma) = \prod_{i=1}^m \prod_{j=1}^{n-1} \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi(t_{j+1} - t_j)}} \cdot \exp\left[-\frac{(\Delta x_{i,j} - \mu(t_{j+1} - t_j))^2}{2\sigma^2(t_{j+1} - t_j)}\right] \quad (8)$$

可得方程组

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \ln(L(\mu, \sigma))}{\partial \mu} &= 0 \\ \frac{\partial \ln(L(\mu, \sigma))}{\partial \sigma} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

利用上述方程组即可求得参数 μ 、 σ 的极大似然估计值 $\hat{\mu}$ 、 $\hat{\sigma}$ 。

2.3 磨损量变化的分布检验

根据式(7)可得

$$X(t_{i,j+1}) = X(t_{i,j}) + \mu \Delta t + \sigma \Delta B(t_{i,j+1})$$

由于 $B(t)$ 服从布朗运动，所以在时间上的小增量 Δt 内满足 $\Delta B(t) = \epsilon \sqrt{\Delta t}$ ，其中 ϵ 是一个标准

正态随机变量，因此上式可变为

$$X(t_{i,j+1}) = X(t_{i,j}) + \mu \Delta t + \sigma \epsilon_{i,j+1} \sqrt{\Delta t} \quad (10)$$

利用 Monte Carlo 法模拟滚轮滑轨磨损量的具体步骤，如图 3 所示，这样就可以得到一组波动遵循带漂移的布朗运动的数据。

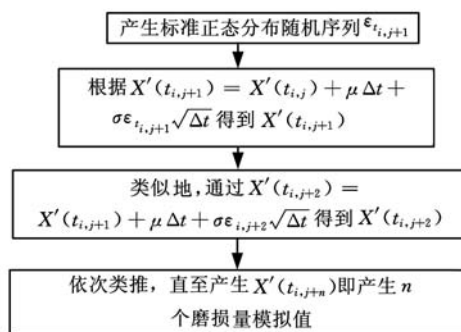


图 3 采用 Monte Carlo 法模拟磨损量的流程图

根据文献[10]可以构造参数 k ，它是实际磨损量波动与模拟磨损量波动之差的函数，其计算公式为

$$k = \frac{[(X(t_{i,j+1}) - X(t_{i,j})) - (X'(t_{i,j+1}) - X'(t_{i,j}))]}{\sigma \sqrt{2\Delta t}} \quad (11)$$

采用 SPSS 软件中的 Kolmogorov-Smirnov 检验(D 检验, 适合样本数大于 2000 的情形)和 Shapiro-Wilk 检验(W 检验, 适合样本数小于等于 2000 的情形)法来检验 k 是否符合标准正态分布, 即可说明实际磨损量变化数据是否服从带漂移的布朗运动。对于此两种检验, 如果 P 检验显著性水平值大于 0.05, 表明数据服从正态分布。

3 实例分析

本文采用的滚轮的材料为不锈钢 1Cr17Ni2, 其弹性模量为 193GPa, 泊松比为 0.30; 滑轨材料为钛合金 TC4, 其弹性模量为 110GPa, 泊松比为 0.33, 接触应力为 800MPa。总共进行了 10 组试验(10 个试件), 分别在 2000、4000、...、70000 循环时记录磨损厚度, 试验中的磨损数据如表 1 所示。

由于滚轮滑轨初试磨损量为零, 所以 $x_0 = 0$, 同时假定磨损量失效判据 $L = 140\mu\text{m}$, 为此, 采用 2.2 节中极大似然估计方法可得到 $\hat{\mu} = 0.00191$, $\hat{\sigma} = 0.233762$ 。在此基础上按照 Monte Carlo 法模拟滚轮滑轨磨损量数据, 并采用 SPSS 软件对构造参数 k 进行标准正态分布检验, 检验结果如表 2 所示。表 2 中, $Statistic$ 为统计量, df 为自由度, Sig 为检验显著性水平值。

表 1 滚轮滑轨磨损量

μm

		循环次数											
		2000	4000	6000	8000	10 000	...	60 000	62 000	64 000	66 000	68 000	70 000
试件号	1	12.27	22.07	33.18	42.32	48.88	...	102.23	108.99	123.46	142.71	156.35	166.96
	2	10.09	20.10	32.87	39.44	43.98	...	89.34	96.92	100.28	106.58	118.04	133.02
	3	13.46	23.64	33.82	45.53	52.69	...	114.05	123.55	136.83	143.49	153.21	166.87
	4	15.91	25.19	36.62	44.15	48.82	...	105.33	109.61	113.11	117.57	125.02	148.71
	5	10.44	21.77	34.03	41.98	47.13	...	91.11	95.96	98.91	106.77	113.07	133.57
	6	13.74	26.98	39.48	46.03	51.13	...	108.93	113.26	116.67	129.28	145.85	160.23
	7	14.00	27.33	40.80	47.89	51.83	...	113.88	120.86	127.14	132.50	141.29	157.84
	8	7.66	16.64	29.44	34.52	42.73	...	85.53	91.98	93.51	96.79	100.15	106.10
	9	8.52	17.29	30.49	40.34	45.77	...	96.65	99.18	109.09	128.43	131.47	139.31
	10	11.98	21.96	30.88	41.12	47.57	...	103.42	105.11	109.27	115.14	125.76	139.14

表 2 正态分布检验

Kolmogorov-Smirnov 检验法			Shapiro-Wilk 检验法		
Statistic	df	Sig	Statistic	df	Sig
0.048	300	0.091	0.992	300	0.128

表 3 结果比较

试件序号	11	12	13
已磨损量(μm)	42.33	66.51	83.72
预测剩余循环数	51160	36480	17232
真实剩余循环数	57656	33479	16237
相对误差(%)	11.27	8.09	5.89
平均误差(%)	8.41		

由表 2 可知,无论采用 Kolmogorov-Smirnov 检验或 Shapiro-Wilk 检验,检验显著性水平都大于 0.05,所以磨损的变化量都服从标准正态分布,因此,滚轮滑轨的可靠度分布函数可表示为

$$R(t) = 1 - F(t) = \Phi\left(\frac{140 - x_0 - 0.00191t}{0.233762\sqrt{t}}\right) - \exp(0.0699(140 - x_0))\Phi\left(-\frac{140 - x_0 + 0.00191t}{0.233762\sqrt{t}}\right) \quad (12)$$

可靠度函数曲线如图 4 所示。

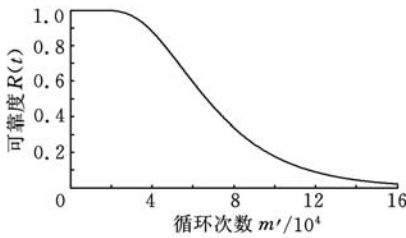


图 4 可靠度函数曲线

为了验证可靠性函数的准确性,又开展了三个滚轮滑轨试件的磨损试验,试件序号分别为 11、12 和 13。其中 11 号试件在 20 000 循环时的磨损量为 42.33μm,又经过 57 656 个循环时达到了磨损量允许值 140μm;12 号试件在 30 000 循环时的磨损量为 66.51μm,又经过 33 479 个循环时达到了磨损量允许值 140μm;13 号试件在 40 000 循环时的磨损量为 83.72μm,又经过 16 237 个循环时达到了磨损量允许值 140μm。而根据式(6)的剩余寿命预测方法,可以预测到 11 号试件在 20 000 循环时的剩余寿命为 51 160 个循环,12 号试件在 30 000 循环时的剩余寿命为 36 480 个循环,13 号试件在 40 000 循环时的剩余寿命为 17 232 个循环。表 3 列出了 11、12 和 13 号试件的真实寿命和预测寿命的误差比较。

4 结论

(1)基于布朗运动的滚轮滑轨的可靠性预测方法充分利用了试验过程中的摩擦磨损数据,克服了缺少失效样本的不足,为高耐磨、长寿命的滚轮滑轨的可靠性预测提供了理论方法。

(2)本文可靠性预测方法的平均误差为 8.41%,能较好地满足工程实际需要。

参考文献:

- [1] 冯元生. 机构磨损可靠性[J]. 航空学报, 1993, 14(12):642-644.
- [2] 贺东斌,冯元生. 航空关节轴承可靠性分析[J]. 机械强度, 1995, 17(1):29-31.
- [3] Nair V N. Discussion of 'Estimation of Reliability in Field Performance Studies' by J. D. Kalbfleisch and J. F. Lawless[J]. Technometrics, 1988, 30: 379-383.
- [4] 吴越,王玫,陈勇. 线性回归模型诊断和在线预测刀具磨损量的方法研究[J]. 机械设计与制造, 2009(6):236-238.
- [5] 张彦. 制动器摩擦衬片磨损量的等维灰色预测[J]. 润滑与密封, 2009, 34(12):30-33.
- [6] 闫志琴,刘燕萍. 材料磨损量数值仿真试验研究[J]. 机械工程与自动化, 2008(2):184-186.
- [7] 刘锐,王玫,陈勇. 铣刀磨损量监测和剩余寿命预测方法研究[J]. 现代制造工程, 2010(6):102-105.
- [8] Vladimir Crk. Reliability Assessment from Degradation Data[C]//Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium. Los Angeles: IEEE, 2000:155-161.

轮式装载机传动系载荷谱编制方法研究

刘永臣 常 绿 孙 丽

淮阴工学院, 淮安, 223003

摘要:为指导轮式装载机可靠性设计,提出一种轮式装载机传动系载荷谱编制方法。采用“五段法”测试了轮式装载机传动系载荷时间历程信号;通过频谱分析,确定载荷信号频率不超过 1Hz 的特征;按照“空载运行—铲掘装载—满载运行—卸载”四段的循环特征,对信号进行分割与合并,完成信号的平稳处理;通过雨流计数与工况合成法,获得载荷均值符合正态分布、幅值符合威布尔分布的特征,完成载荷幅值极值的统计推断;根据波动中心法,编制出了轮式装载机传动系各部件的八级载荷谱与程序加载谱。研究表明,轮式装载机传动系载荷信号可依特征分四段平稳处理,且具有显著的概率分布特征,编制的载荷谱符合装载机真实工况。

关键词:轮式装载机;传动系载荷;载荷谱;雨流计数法;工况合成法

中图分类号:TH243

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2012.12.006

A Method of Compiling Load Spectrum on Wheel Loader Transmission

Liu Yongchen Chang Lü Sun Li

Huaiyin Institute of Technology, Huai'an, Jiangsu, 223003

Abstract:In order to guide the reliability design on the wheel loaders, a method of compiling load spectrum on wheel loader transmission was proposed. Load signals of the wheel loader transmission were tested by using five—fragment method. The load signal frequency characteristics are less than 1Hz by frequency spectrum analysis. Accordance with the four fragments of “empty load, shovel load, full load and unload” cycling characteristics, the load signals were processed smoothly by splitting and merging them. Through the rain—flow counting, it is concluded that mean load is fit to the normal distribution and load amplitude is fit to the Weibull distribution. And by synthesis conditions, the statistical extreme value of load amplitude was inferred. By using the wave center method, the eight load spectrum and the program load spectrum of the wheel loaders transmission parts were compiled. It is concluded that wheel loader transmission load signals can be dealt with four paragraphs smoothly according to significant characteristics, and probability distribution characteristics are clear. The load spectrum is consistent with loader real work conditions.

Key words:wheel loader; transmission load; load spectrum; rain—flow counting; synthesis conditions method

0 引言

轮式装载机在设计阶段必须考虑用户需求与产品工作性能,产品设计过程中,通常基于寿命理

论进行产品可靠性设计,同时,需要进行室内模拟试验或产品样品疲劳试验等。为此,科学编制出产品实际载荷谱尤为重要。

机械产品部件受载情况复杂多样,且多数属于随机载荷,无法得到一致或相似的载荷规律,需要根据不同工作环境特点予以分析,以确定载荷统计规律,借以编制载荷谱^[1]。文献[2-4]依据零

收稿日期:2011—04—07

基金项目:江苏省基础研究计划资助项目(BK2009168);江苏省高等学校自然科学基金资助项目(10KJB580001);江苏省“八大人才高峰”项目(2010—JXQC—023)

[9] Ross S M. Stochastic Processes [M]. 2ed., New York: John Wiley & Sons Inc., 1996.

[10] 李洪宇,李述山,蔺香运. 股票市场价格波动的实证分析[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2001, 20(4): 79-81.

作者简介:蔡 景,男,1976 年生。南京航空航天大学民航学院副教授。主要研究方向为可靠性维修性工程。任淑红,女,1978 年生。南京航空航天大学民航学院博士研究生。陆晓华,男,1977 年生。南京航空航天大学民航学院博士研究生。

(编辑 苏卫国)