

# 基于随机过程相关性的风电机组强度退化建模

刘小刚<sup>1</sup>, 魏晋<sup>2</sup>

(1. 兰州理工大学机电工程学院, 甘肃 兰州 730050;

2. 兰州理工大学艺术设计学院, 甘肃 兰州 730050)

**摘要:** 为了描述机械系统强度特性的变化过程, 达到准确分析系统剩余强度的动态概率分布的目的。引用相关性随机过程描述机械系统方差的变化趋势, 在此基础上, 根据随机变化过程模型建立系统强度退化率模型。运用 MATLAB 随机函数和三维图形拟合模块, 仿真获得系统强度退化模型。仿真结果表明: 系统强度退化过程是应力二概率分布与剩余强度二维概率分布逐级靠近的过程, 载荷作用次数的差值决定着剩余强度与应力概率分布曲线耦合区域面积。

**关键词:** 相关系数; 剩余强度; 方差; 概率分布

doi: 10.3969/j.issn.1006-8554.2020.05.023

## 0 引言

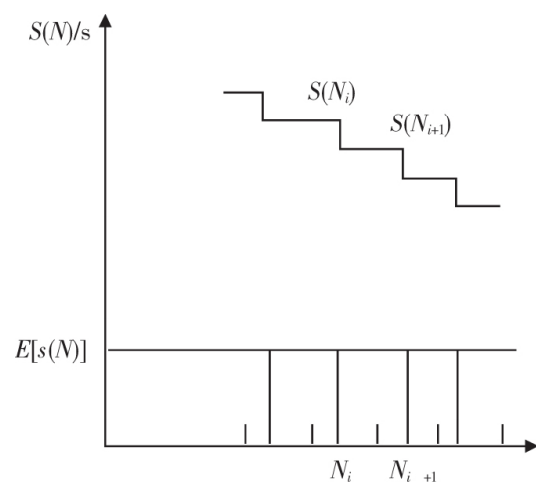
在工程中, 机械系统的退化过程受到多种外载荷的影响, 例如: 载荷、振动、温度及其相互间的耦合关系, 造成机械系统强度退化过程不能精确描述。随着对航空航天材料物理性能的研究, 对具有时间序列不确定量的深入探索, 引入疲劳强度分析理论和随机过程分析思想, 发现不确定量能以某一个标准的概率分布模型进行描述, 采用平稳增长的相关性随机过程对机械系统强度退化过程进行分析。应用随机过程理论描述机械系统动态特性和剩余强度变化情况, 达到分析零件载荷作用规律的目的, 具有一定的工程使用价值。

### 1 机械系统相关性分析

本文中所分析的过程是不同状态下的系统不同零部件剩余强度集中与分散之间概率分布相互独立的情况, 根据相关性分析, 过去状态的结果决定着当前状态发生的过程, 因此, 必须考虑过去状态对当前状态的影响系数, 即相关系数。唐新安等人<sup>[1-4]</sup>通过对 600 kW 风电机组故障监测结果分析, 验证了多种分析方法满足故障监测结果; 周培毅等人<sup>[5]</sup>通过遗传算法和 BP 神经网络运用于风电机组故障诊断中, 提出了新的神经网络算法。安宗文<sup>[7]</sup>、屈衍静等人<sup>[8]</sup>从强度退化过程入手, 详细分析了强度退化过程中期望值的变化规律。上述论文分析了风电机组运行过程, 论述了其强度退化过程的特征, 但是对概率分布的方差值的相关性没有分析。因此, 本文引入方差值的相关系数来描述剩余强度三维分布的疏密程度。

系统强度退化由各部件的强度退化决定的, 由于各部件的强度初始强度和强度退化量不同, 所以必然有最先失效的部件, 失效部件满足随机过程, 将随机过程离散化进行分析, 同时, 两个不同时刻的强度具有相关性。在整个寿命周期中, 两个不同载荷循环次数  $N_i, N_{i+1}$  时, ( $N_i < N_{i+1}$ ), 其剩余强度为

$S_i > S_{i+1}$ 。如图 1 所示。



$N$  为载荷循环次数,  $s(N)$  为载荷值,  $S(N)$  为剩余强度值

图 1 离散化强度退化过程

根据时间序列基本理论<sup>[10]</sup>, 在  $N_i, N_{i+1}$  时刻, 二维分布函数为:

$$F(S_i, S_{i+1}; N_i, N_{i+1}) = F(S_i, S_{i+1}; N_i + \varepsilon, N_{i+1} + \varepsilon) + E[S(N)] - E[S(N_{i+1})] \quad (1)$$

式中,  $F$  为概率分布函数,  $S$  为剩余强度,  $N_i$  为载荷循环次数,  $\varepsilon$  为载荷循环次数增加量。

令  $\Delta N = N_{i+1} - N_i$ ,  $\Delta E[S(\Delta N)] = E[S(N_i)] - E[S(N_{i+1})]$  则上式为:

$$F(S_i, S_{i+1}; N_i, N_{i+1}) = F(S_i, S_{i+1}; 0, N_{i+1} - N_i) + \Delta E[S(\Delta N)] \quad (2)$$

即平稳衰减随机过程的二维分布疏密程度与时间起点无关, 只与时间间隔有关。因而其二维密度函数有:

$$f(S_i, S_{i+1}; N_i, N_{i+1}) = f(S_i, S_{i+1}; N_{i+1} - N_i) \quad (3)$$

2 系统剩余强度模型

受到载荷多次作用下,基于方差值相关性强度退化概率模型,能够计算系统零部件的剩余强度分布,建立不同载荷次数下系统状态之间的关系模型。在相关系数不为零的情况下,系统剩余强度满足正态分布概率密度函数关系式为:

$$f(S, N) = f\{S, E[S(N)], D[S(N_{i+1}) + S(N_i)]\} \quad (4)$$

式中,  $f(S, N)$  为概率密度函数,  $S$  为剩余强度,  $S_0$  为初始强度,  $N$  为广义外载荷作用次数,  $E$  为期望值,  $D$  为方差。

系统零件相互作用下,系统剩余强度  $S(N)$  的相关系数模型:

$$R_s(N_i, N_{i+1}) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} S_i S_{i+1} f(S_i, S_{i+1}, N_{i+1} - N_i) dS_i dS_{i+1} = R_s(N_{i+1} - N_i) \quad (5)$$

剩余强度概率模型为:

$$F\{[S(N)], s(N)\} = \int_s^{\infty} f\{S, E[S(N)], D[R_s(N_i, N)]\} dS ds \quad (6)$$

式中  $h(s)$  为外载荷的概率分布函数,  $R(S, N)$  为系统可靠度。强度随机过程的方差差值:

$$R_s = \sigma D(N_i) = D(N_{i+1}) / D(N_i) \quad (7)$$

载荷循环次数为  $N_{i+1}$  时, 剩余强度概率分布特征的方差为:

$$D[S(N_{i+1})] = D[S(N)] \times R_s \quad (8)$$

3 风电机组系统剩余强度建模及分析

风电机组所承受随机载荷是基于期望值上下波动的分布

特性, 满足平稳随机过程特性, 具有右连续性、相关性。本文中研究对象为增速齿轮箱输出轴, 属于外齿轮轴, 由于其传递扭矩大、转速高, 因此, 选择材料为 17CrNiMo6 的高强度渗碳合金钢作为增速齿轮箱输出轴, 初始强度为 1360 MPa, 初始方差为  $2.7 \text{ MPa}^2$ , 满足正态分布, 材料力学性能符合 GB/T3077 - 1999, JB/T6396 - 1992, JB/T6396 - 2006 要求。假设剩余强度按照线性退化, 在不同载荷作用次数下, 剩余强度期望值如表 1 所示。

表 1 输出轴剩余强度值

载荷循环次数/次	剩余强度期望值/MPa
$4.42 \times 10^7$	1131
$8.65 \times 10^7$	902
$1.33 \times 10^8$	673
$1.77 \times 10^8$	444
$2.21 \times 10^8$	215
$2.28 \times 10^8$	180

则剩余强度的概率分布为:

$$f(S, N) = f\{S, E[S(N)], D[1360 + S(N)]\} \quad (9)$$

载荷作用次数为  $N_i$  与  $N_{i+1}$  时刻测试点方差分布(见表 2、表 3)。

运用 MATLAB 曲线拟合模块获得方差相关系数模型如图

2 所示。

表 2 测试点方差分布

载荷作用次数	测试点 1	测试点 2	测试点 3	测试点 4	测试点 5	测试点 6	测试点 7	测试点 8	测试点 9	测试点 10	测试点 11
$N_i$	0.1396	0.1559	0.919	0.96	0.99	0.574	0.637	0.7055	0.145	0.144	0.318
$N_{i+1}$	0.5115	0.6131	4.322	6.504	7.443	5.562	5.49	4.27	0.827	1.194	1.985

表 3 方差差值分布

方差差值	$\sigma D1$	$\sigma D2$	$\sigma D3$	$\sigma D4$	$\sigma D5$	$\sigma D6$	$\sigma D7$	$\sigma D8$	$\sigma D9$	$\sigma D10$	$\sigma D11$
数值	3.664	3.933	4.703	6.775	7.5182	9.69	8.62	6.05	5.703	8.292	6.242

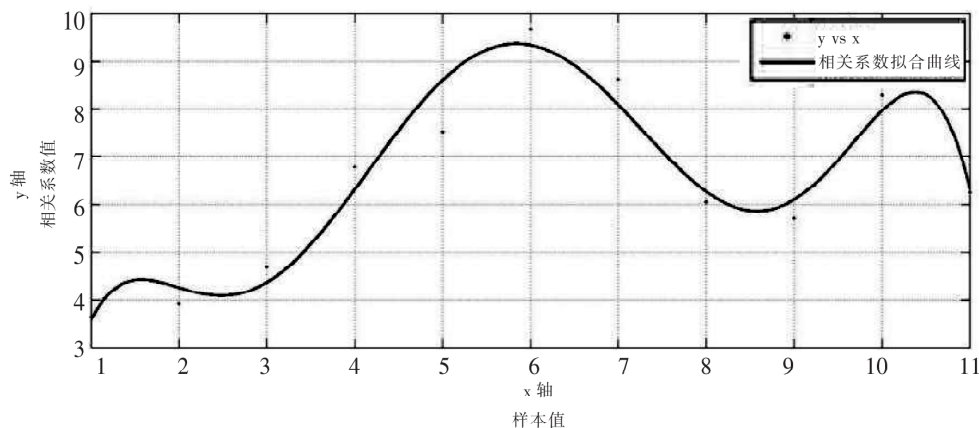


图 2 相关系数拟合曲线

相关系数拟合模型如下式所示:

$$R_s [D(N_{i+1})] = -0.002871 \times D(N_i)^5 + 0.09587 \times D(N_i)^4 - 1.171 \times D(N_i)^3 + 6.198 \times D(N_i)^2 - 12.5 \times D(N_i) + 11.31 \quad (10)$$

运用 MATLAB 随机曲线模块与三维图像模块仿真分析:

剩余强度概率分布期望值大于应力值时,其概率分布与应力值相距很远。载荷循环次数差值缩短时,可以看出剩余强度的三维概率分布满足峰值逐渐降低,分布面逐渐出现发散现象。

剩余强度概率分布三维曲面的峰值逐渐接近应力分布的峰值,其概率分布也逐渐发散,证明机械系统整机故障率在升高。剩余强度趋近于应力值时,其概率分布只有也逐渐趋于0值,只有12条直线分布,证明大部分风电机组已经失效,只有概率值的一部分机组能够运行,其可靠性也趋于零。因此,当接近某一个载荷作用次数时,期望值趋于零,方差值趋于无穷大。

#### 4 结论

根据时间序列分析方法,采用随机过程相关性的理论推导分析表明,系统部件动态相关性与时间间隔有关,根据 MATLAB 仿真结果可以看出,在风电机组中,随着载荷循环次数的增加,零部件剩余强度的概率分布逐渐趋于零平面,强度随机值与期望值的偏离值趋于发散,发散速度与强度退化速率相关,同时,通过应力强度分析表明,正常工作风电机组数量也在减少。建立动态方差变化与系统强度退化之间的仿真模型,能够有效地描述机械系统的作用规律,为提高机械的可靠性能提供了理论依据。

参考文献:

- [1] 唐新安. 600 kW 风力发电机组故障诊断[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2006(5): 27-48.
- [2] Michael. R. Wilkinson, Peter. J. Tavner. Condition Monitoring of Wind Turbine Drive Trains [J]. ICEM, 2006, 441(9): 1-5.
- [3] Sheng S, Oyague F, Butterfield S. Investigation of Various Wind Turbine Drive Train Condition Monitoring Techniques [J]. Presented at the 7th International Workshop on Structural Health Monitoring 2009 Stanford, California, September 2009: 9-11.
- [4] Sheng S, Veers P. Wind Turbine Drivetrain Condition Monitoring—An Overview [J]. Presented at the Mechanical Failures Prevention Group: Applied Systems Health Management Conference 2011 Virginia Beach, Virginia, May 2011: 10-12.
- [5] 周培毅, 张新燕, 张华中. 基于遗传算法与 BP 神经网络的风力发电机齿轮箱故障诊断研究 [J]. 华北电力技术, 2010(7): 6-11.
- [6] 安宗文, 刘小刚, 高建雄. 基于裂纹扩展理论的结构强度退化理论 [J]. 兰州理工大学学报, 2014(6).
- [7] 刘小刚. 基于裂纹扩展理论的零件动态可靠性建模 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2014(6): 45-48.
- [8] 屈衍静, 杨深然, 史妍妍, 等. 基于强度退化的齿轮可靠性计算模型研究及应用 [J]. 航空发动机, 2017, 43(5): 35-38.
- [9] 安宗文, 董雅芸. 基于马尔可夫过程的风电齿轮箱齿轮强度退化模型 [J]. 兰州理工大学学报, 2018(6): 34-38.
- [10] 王燕. 应用时间序列分析 [M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2012: 1-20.