计及微振磨损与风雨荷载的输电线可靠性建模

赵 渊[1]，魏亚楠[2]，范 飞[1]，杨 清[3]，熊小伏[1]，毛艳丽[2]

(1.输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室(重庆大学)，重庆 400044；2.温州供电公司，浙江 温州 325000；3.云南电网公司生产设备管理部，云南 昆明 650011)

摘要：输电线长期受风导致的振动引起股线间微振磨损，而外部强风雨荷载的冲击进一步加剧了磨损程度，导致断股、断线事故风险显著增加，因此对经受长期微振磨损的输电线在强风雨荷载冲击下的可靠性模型进行研究具有重要实用价值。基于微振磨损的理论模型建立了 ACSR 的结构强度时变模型，在考虑微振磨损的基础上计入强风雨荷载的影响，结合输电线强度和永久荷载的随机特性，建立输电线时间相依可靠性模型。所提时间相依故障概率模型可以对输电线断股、断线风险进行准确预测并实现恶劣天气下的输电线风险预警。算例结果表明，微振磨损会显著降低输电线的结构可靠性，而强风雨条件下的雨荷载则进一步加剧了事故风险。

关键词：可靠性建模；微振磨损；结构强度时变模型；风雨荷载

Reliability modeling for transmission lines incorporating fretting under strong wind and rain loads

ZHAO Yuan[1], WEI Yanan[2], FAN Fei[1], YANG Qing[3], XIONG Xiaofu[1], MAO Yanli[2]

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology (Chongqing University), Chongqing 400044, China; 2. Wenzhou Power Supply Company, Wenzhou 325000, China; 3. Yunnan Power Grid Corporation Equipment Management Department, Kunming 650011, China)

Abstract: The fretting between wires of transmission lines caused by long-term wind-induced vibration results in rupture of wires easily. The impact of strong wind and rain loads exacerbates the risk, which results in a significant increase in broken strand and broken lines. It's necessary to study reliability modeling of transmission lines which bears long-term fretting under the impact of strong wind and rain loads. According to theoretical models of fretting, the time-varying structural strength model of aluminium conductor steel reinforced (ACSR) is built up, the contact stress between wires is solved. Thereby the time-varying model of structural resistance is built up. According to the joint action of fretting and strong wind and rain loads, the random nature of transmission line strength and permanent load, the time-dependent reliability model of transmission lines are built up. Numerical results show that fretting degrades reliability model and rain load can't be neglected under strong wind and rain condition. Time-dependent failure probability model can be used to perfect forecast the rupture risk of wires and make risk warning under inclement weather. The example results prove that fretting will reduce the structural reliability of the transmission line significantly and the strong wind and rain loads increase the risk of the accident.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50977094), Natural Science Foundation of Chongqing (No. 2011BB6047), State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology (No. 2007DA10512711208), and the Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. CDJZR11150012).

Key words: reliability modeling; fretting of ACSR; time-varying model of structural resistance; real wind and rain load

中图分类号： TM76 文献标识码：A 文章编号： 1674-3415(2015)02-0019-07

0 引言

对于暴露在大气环境中的输电线，腐蚀和微振疲劳是造成其强度退化的主要原因，在大气环境较好的地区，由风致振动引起的钢芯铝绞线(AluminiumConductor Steel Reinforced, ACSR)各股线间的微振磨损作用更为明显[1]，长期的微振磨损会引发输电线断股、断线事故，而强风雨荷载的冲击在一定程度上加剧了上述风险。近年来沿海地区台风登陆带来的强风雨荷载造成大范围的倒塔断线事故，产生严重的经济损失[2-3]。

基金项目：国家自然科学基金(50977094)；重庆市自然科学基金(CSTC, 2011BB6047)；输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室自主研究项目(2007DA10512711208)；中央高校基本科研业务费科研专项资助(CDJZR11150012)

从影响因素分类，当前针对输电线的可靠性模型研究主要集中在两个方面：(1) 根据线路的运行状态进行可靠性评估，文献[4-5]分别考虑线路过负荷状态和可修多状态建立相应的可靠性模型；(2) 考虑各种气象灾害的冲击建立可靠性模型，文献[6-7]分别从覆冰、雷电的角度建立了输电线可靠性模型。以上研究中均未对输电线的结构可靠性进行分析。

ACSR 的微振磨损研究也并未涉及到其对输电线结构可靠性的影响。文献[8]利用有限元理论分析了 ACSR 各股线间的力学特性及磨损机制，但未分析磨损程度随时间的变化；文献[9]利用自制微振实验装置对 ACSR 进行微振实验研究，建立断裂力学寿命预测模型，但并未指出在使用寿命内，磨损程度对强度的影响。在考虑环境荷载对结构可靠性影响时，忽视了线路强度随时间的变化，并且目前各国的输电线设计标准均以风荷载为主，忽略了雨荷载的影响，而强风雨荷载对高耸建筑，尤其是输电线造成的危害极大[10]。文献[11]建立了输电杆塔的精细化有限元分析模型，研究了风雨共同作用下的输电塔体系的动力响应，得出雨荷载对输电塔的影响不可忽略的结论，但作者只进行了动力分析，并未分析其可靠性。因此，有必要对经受长期微振磨损的输电线在恶劣风雨条件下的可靠性模型进行研究。

本文利用有限元软件 ANSYS 建立 ACSR 的有限元模型，计算股线间的接触应力，建立结构抗力时变模型，综合考虑线路微振磨损和外部强风雨荷载的共同作用，建立输电线时间相依可靠性模型。

1 输电线强度时变模型

输电线的老化是一个非常复杂的随机过程，架空线暴露在高空环境中，受风荷载的影响产生机械振动，在导线与线夹船体接触处和 ACSR 各股线间容易发生磨损疲劳(微米级别)，本文主要分析 ACSR 各股线间的微振磨损造成的线路强度退化，因为 ACSR 中钢绞线负责支撑、铝绞线负责导电，线夹出口处主要是外层铝绞线产生的磨损。可以用式(1)表示强度时变模型。

$$R(t)=R_0 g(t) \tag{1}$$

式中：$R(t)$为强度的时变函数；R_0为 t=0 时刻的强度，是一个服从高斯分布的随机变量；$g(t)$表示线路强度随时间退化的过程，从初始值 1 开始单调递减。t 时刻强度的随机性依赖于 t=0 时刻的强度随机性，即 $R(t)$和 R_0的概率分布相同，均值和变异系数分别为

$$\mu_{R(t)}=\mu_{R_0} g(t), \quad \delta_{R(t)}=\delta_{R_0} \tag{2}$$

ACSR 微振磨损是指在风荷载影响下在导线各股线间相互作用力与滑移作用下导致的疲劳磨损。文献[12]通过实验室模拟建立了钢丝微振磨损的理论模型。

$$\begin{aligned}&\sqrt{\left[2ra_f(t)-a_f^{\,2}(t)\right]\left[4ra_f(t)-4a_f^{\,2}(t)\right]}\times \\ &\pi\left[a_f(t)-\mathrm{c}\right]-\mathrm{k}\cdot P\cdot 2A\cdot f\cdot t=0\end{aligned} \tag{3}$$

式中：$a_f(t)$为钢丝在 t 时刻的磨损深度；r 为钢丝的半径(μm)；c 和 k 为常数，c=13.055 8，k=0.049 12；P 为钢丝之间的相互作用力；A 为钢丝微振振幅；f 为钢丝微振频率。而文献[12]并没给出 P、A、f 的取值方法，本文将该模型运用到钢芯铝绞线中，利用理论分析与有限元推导这三个量的求解方法。

1.1 钢丝的微振频率 f 和微振振幅 A

钢丝微振频率与输电线的振动频率 f 相等，输电线的振动频率一般为 0.1~3 Hz，振幅约为输电线直径的 5~300 倍，多风地区输电线风致振动的时间为全年的 30%~60%，本文取其振动频率为 f=1 Hz，振幅为 1.5 m。

钢丝之间的相互滑移与输电线的振幅成正比，当输电线的振幅达到最大时，线夹处产生最大弯曲，此时两根接触钢丝之间相对滑移即为钢丝的微振振幅 A，如图 1 所示。

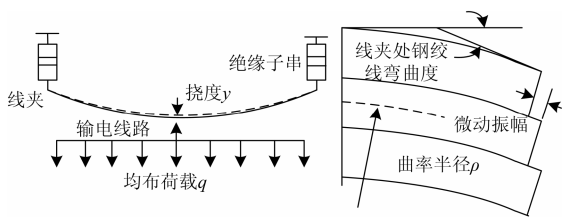

图 1 线夹处钢绞线微振振幅示意图

Fig. 1 Fretting amplitude in the cable clip

将输电线看作一根两端刚接的细梁，在挠度达到最大时，线夹刚接段产生弯曲。梁在均布荷载 q 下的挠度 y 计算公式和曲率半径 ρ 增量分别为[13]

$$y=\frac{ql^4}{384EI} \tag{4}$$

$$\Delta\rho=\frac{EI}{M}=\frac{12EI}{ql^2}=\frac{l^2}{32y} \tag{5}$$

式中：E 为钢的弹性模量(应力与应变的比值，单位 Pa)；I 为钢的截面惯性矩(与截面尺寸成正比，衡量截面的抗弯能力，单位 kg·m^2)。

根据同心圆近似计算，微振振幅 A 为

$$A\approx D_1=\frac{2r}{\Delta\rho}=\frac{64ry}{l^2} \tag{6}$$

式中：D_1为线夹处钢丝之间相互滑移量，近似取为微振振幅；r为钢丝半径；l为输电线长度。

1.2 钢丝相互作用力 P 的求解

本文以 LGJ-300/40 为例，利用大型有限元软件 ANSYS 建立 ACSR 有限元模型，钢丝之间为三维的面-面接触，因此设置单元类型为 solid45 单元，该单元用于构造三维实体结构，有 8 个节点，多用于梁、杆的受力分析，钢芯线的弹性模量为 196 Gpa、泊松比为 0.28，铝绞线的弹性模量为 59 Gpa、泊松比为 0.31，中心线面定义为目标面 target170 单元，该单元用于定义三维目标面，绞线面定义为接触面 Contact173 单元，该单元用于构造三维面-面接触，有限元模型如图 2 所示。

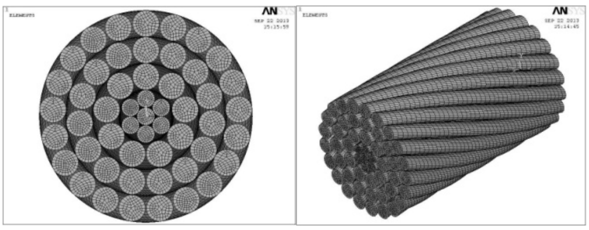

图 2 钢芯铝绞线整体和侧面有限元模型

Fig. 2 Overall and side finite element model of ACSR

模型两端固结，考虑模型自重，施加与自重同方向的均布荷载，并施加垂直于模型中轴方向的最大振幅等效位移，分析钢芯表面的接触应力。提取出中心钢芯线的应力计算结果如图 3 所示，从图中可以明显看出股线之间的接触应力呈螺旋状分布在钢丝的表面，颜色较浅的为接触点，图下方为应力条显示，图左上角为应力范围，可以看出最大应力值达到了 387 MPa。

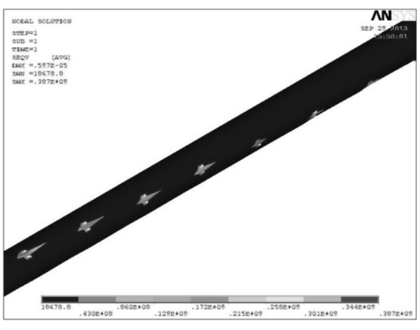

图 3 股线表面的接触应力

Fig. 3 Contact stress of wire surface

为求得钢丝之间的等效接触力 P，需要对接触点应力区域积分，如式(7)。

$$P=\int F\left(s\right)\mathrm{d}s \tag{7}$$

式中：s 为接触区域网格面积；F 为接触应力值。每个接触区域大概有占有 7~8 个计算网格，每个网格的面积为 0.007 mm^2，由式(7)可以得出接触点的等效应力。

对于其他型号的输电线，只需在建模时改变线路模型的长度和每根绞线直径以及施加相应的自重即可。

1.3 输电线强度时变模型

求得 P、A、f 后利用式(3)即可计算钢芯铝绞线疲劳磨损深度随时间变化的规律，由式(6)、式(7)计算得：P=20.32 N，A=14.4 μm，f=1 Hz。磨损深度随时间变化的规律如图 4 所示。

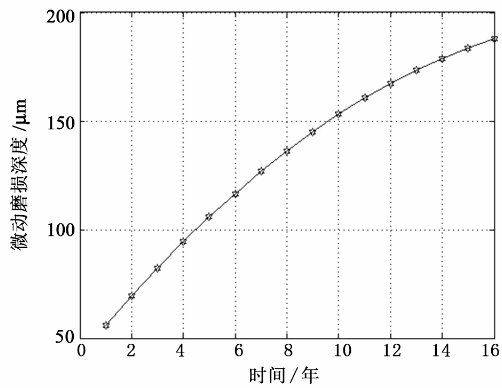

图 4 磨损深度随时间变化曲线

Fig. 4 Relationship between wear depth and time

通过曲线拟合，得出微振疲劳磨损深度随时间变化的函数为

$$a_f\left(t\right)=-0.3355t^2+14.99t+41.77 \tag{8}$$

由文献[13]总结出的经验公式得到钢绞线的强度随机退化过程与钢丝的磨损深度的关系。

$$g\left(t\right)=1-74.2\times a_f\left(t\right)-82.6\times a_f^2\left(t\right) \tag{9}$$

由此可得出输电线路强度时变模型

$$R\left(t\right)=R_0\left(1-74.2\times a_f\left(t\right)-82.6\times a_f^2\left(t\right)\right) \tag{10}$$

式中，R_0为输电线初始强度。

2 输电线承受的风雨荷载

2.1 风荷载

根据国标 110~750 kV 架空输电线路设计标准[14]，确定输电线承受风荷载为

$$F_{\mathrm{w}}\left(t\right)=\alpha\cdot\frac{V^2\left(t\right)}{1600}\cdot\mu_{\mathrm{z}}\mu_{\mathrm{sc}}\beta_{\mathrm{c}}dL_{\mathrm{v}}B\sin^2\theta \tag{11}$$

式中：$F_{\mathrm{w}}(t)$为实时风荷载(kN)；$V(t)$为实时基本风速，是监测站 10 m 高度处 10 min 内平均的风速观测数据，其他参数可参照 GB 50545-2010。

2.2 雨荷载

一般情况下，可以按照降雨量的大小对降雨类型进行分类：小雨、中雨、大雨、暴雨以及大暴雨。其中大暴雨的降雨量≥64 mm/h，而中雨以下的降雨等级对元件的冲击程度较小，几乎可以忽略不计，故不予研究。本文以中雨荷载为基准，利用文献[11]给出的模型计算雨荷载。

$$F_{\mathrm{r}}\left(t\right)=\frac{2}{9}\pi d^{3}nbV_{\mathrm{s}}^{2} \tag{12}$$

式中：d 为雨滴直径；n 为单位体积内的雨滴个数；b 为线路迎雨面的宽度；V_{s} 为雨滴降落前速度，若风雨共同作用时，此时的速度等于风速。

式(12)中的 n 可用式(13)表示[11]，即

$$n\left(d\right)=n_{0}\exp\left(-\Lambda d\right) \tag{13}$$

式中：$n_0=8\times10^{3}$ 个/($\mathrm{m^3\cdot mm}$)；Λ 为斜率因子，$\Lambda=4.1I^{-0.21}$；I 为降水量(mm/24 h)。

2.3 荷载的组合

本文的荷载主要由三部分组成：永久荷载、风荷载和雨荷载。其中的永久荷载为元件的自重，根据IEC标准[15]，永久荷载是呈高斯分布的随机变量；风雨荷载是随时间变化的变量。

考虑较坏的情况，即风雨荷载和永久荷载同向。

$$S\left(t\right)=G+Q\left(t\right)=G+F_{\mathrm{w}}\left(t\right)+F_{\mathrm{r}}\left(t\right) \tag{14}$$

式中：$S(t)$为线路承受的总荷载；G 为线路的永久荷载，其均值和标准差分别为μ_{G}和 δ_{G}，由高斯分布函数的特征可知，总荷载在 t 时刻也服从高斯分布，其均值和均方差分别为$\mu_{\mathrm{G}}+F_{\mathrm{r}}(t)+F_{\mathrm{w}}(t)$和 δ_{G}。

3 可靠性建模

3.1 输电线的结构可靠性

根据结构可靠性的相关理论，长期经受微振磨损的输电线在强风雨冲击下的结构功能函数为

$$Z\left(t\right)=g\left(R\left(t_{1}\right),S\left(t_{2}\right)\right)=R\left(t_{1}\right)-S\left(t_{2}\right) \tag{15}$$

式中：$R(t_1)$表示输电线强度在强度退化期 t_1(year)内的随机变化过程；$S(t_2)$为时刻 $t_2(h)$时荷载的随机变化过程。当输电线设计强度大于其所承受的荷载时，线路正常运行；反之，线路就会发生故障。

输电线强度概率密度分布和荷载概率密度分布之间的关系如图 5 所示。图 5(a)表示在正常运行期间，不考虑环境荷载，输电线永久荷载概率密度函数和强度概率密度函数之间的关系，在正常运行期间元件的设计强度大于永久荷载，在结构上是可靠的；图 5(b)表示经受长期的微振磨损的输电线强度概率密度分布和永久荷载概率密度分布之间的关系，图中两个概率密度函数有重叠，我们称重叠区域为干涉区[16]，干涉区的存在表明线路有发生故障的可能，这是长期受微振磨损输电线强度退化，导致实际强度低于设计强度，荷载就有可能大于线路强度，发生故障；图 5(c)表示输电线在正常运行期间，不考虑微振磨损只考虑环境荷载的情况下，荷载的概率密度函数和线路强度概率密度之间的关系，环境荷载的增加导致输电线所承受的荷载总和增加，大于输电线的强度，可能发生故障；图 5(d)表示，综合考虑微振磨损和环境荷载的共同作用，重叠区较前两种大，发生故障的概率大。

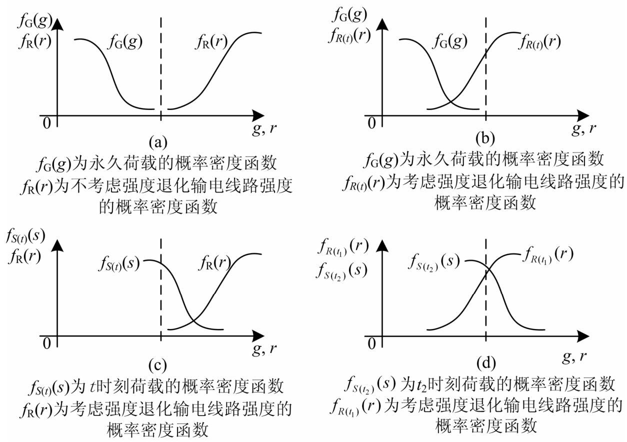

图 5 强度与荷载的概率密度曲线干涉区

Fig. 5 Interferogram of strength and load probability density curve

3.2 输电线故障概率计算

输电线的故障概率等于输电线强度小于承受其所荷载的概率

$$\begin{aligned}P_{f}\left(t_{1},t_{2}\right)=P\left(Z\left(t_{1},t_{2}\right)<0\right)= \\ P\left(R\left(t_{1}\right)-S\left(t_{2}\right)<0\right)\end{aligned} \tag{16}$$

式中，t_1和 t_2是两个不同的时间尺度，其中强度 $R(t_1)$的退化为长期的累积(年)，荷载 $S(t_2)$为短期的冲击(小时)。

线路强度 $R(t_1)$和荷载 $S(t_2)$是相互独立的，二者的联合概率分布为

$$f_{R(t_1),S(t_2)}\left(r,s\right)=f_{R(t_1)}\left(r\right)\cdot f_{S(t_2)}\left(s\right) \tag{17}$$

式(16)可以用式(18)表示。

$$\begin{aligned}p_{f}\left(t_{1},t_{2}\right)&=p\left(R\left(t_{1}\right)<Q\left(t_{2}\right)\right)=p\left(r<s\right)= \\ &\iint f_{R(t_1)}\left(r\right)\cdot f_{S(t_2)}\left(s\right)\mathrm{d}r\mathrm{d}s= \\ &\int_{0}^{+\infty}f_{S(t_1)}\left(s\right)F_{R(t_2)}\left(s\right)\mathrm{d}s\end{aligned} \tag{18}$$

由 IEC 60826 标准[15]可知，一般情况下，荷载和强度均服从高斯分布，联合概率密度函数为

$$f_{Z(t_1,t_2)}=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_Z}\exp\left(-\frac{\left(z-\mu_{Z(t_1,t_2)}\right)^2}{2\sigma_Z^2}\right) \tag{19}$$

式中：$\mu_{Z(t_1,t_2)}=\mu_{R(t_1)}-\mu_{S(t_2)}$；$\sigma_Z^2=\sigma_R^2+\sigma_S^2$；$\mu_{R(t_1)}$、$\mu_{S(t_2)}$分别为强度和荷载概率密度函数的均值；$\sigma_R$、$\sigma_S$分别为强度和荷载概率密度函数的标准差；$\mu_{Z(t_1,t_2)}$、$\sigma_Z$分别为联合概率密度函数的均值和标准差。

式(18)用式(20)表示。

$$p_f\left(t_1,t_2\right)=p\left(Z\left(t_1,t_2\right)<0\right)=\int_{-\infty}^{0}\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_Z}\exp\left(-\frac{\left(z\left(t_1,t_2\right)-\mu_{Z(t_1,t_2)}\right)^2}{2\sigma_Z^2}\right)\mathrm{d}z \tag{20}$$

令$\alpha\left(t_1,t_2\right)=\dfrac{z\left(t_1,t_2\right)-\mu_{Z(t_1,t_2)}}{\sigma_Z}$，将其转化为标准正态分布

$$p_f\left(t_1,t_2\right)=p\left(Z\left(t_1,t_2\right)<0\right)=\int_{-\infty}^{-\frac{\mu_{Z(t_1,t_2)}}{\sigma_Z}}\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\exp\left(-\frac{\alpha\left(t_1,t_2\right)^2}{2}\right)\mathrm{d}x \tag{21}$$

则输电线的故障概率为

$$p_f\left(t_1,t_2\right)=\Phi\left(-\frac{\mu_{Z(t_1,t_2)}}{\sigma_Z}\right) \tag{22}$$

上述计算过程求解的是一段档距的失效概率，对于处在同一气象区域内的具有 n 个档距的一整条输电线的失效概率而言，相当于 n 段线路的串联，如图 6 所示。

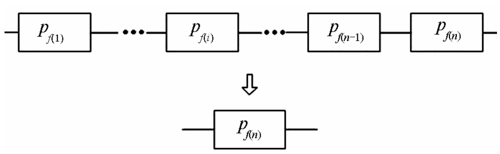

图 6 输电线的串联等效失效概率

Fig. 6 Series equivalence failure probability of transmission lines

图中，$p_{f(i)}$为第 i 段线路的失效概率，$p_{f(n)}$为第 n 段线路的失效概率，$P_{f(n)}$为 n 段线路串联后的等效失效概率，根据串联网络的定义可以求得一整条输电线的失效概率，如式(23)。

$$P_{f(n)}\left(t\right)=P_{f(n-1)}\left(t\right)+p_{f(n)}\left(t\right)-P_{f(n-1)}\left(t\right)\cdot p_{f(n)}\left(t\right),n\ge 2 \tag{23}$$

式中：$P_{f(n)}(t)$为整条输电线的串联等效失效概率；$P_{f(n-1)}(t)$为前 $n-1$ 段线路的串联等效失效概率；$p_{f(n)}(t)$为第 n 段线路的失效概率。

4 算例分析

4.1 算例简介

本文的输电线采用常用的 110 kV 线型 LGJ-300/40，线路的外径 23.94 mm，计算拉断力为 T_p=92.22 kN，安全系数为 K=2.5，线路的单位重 Q=1133 kg/km，设计风速为 27 m/s，设置一段输电线的长度为 60 km，根据经验，线路的垂直档距可取为水平档距的 1.25~1.7 倍 (本文取 1.5 倍)，根据 IEC 标准，输电线路的的永久荷载均值系数为 1.06，变异系数为 0.07，强度的均值系数为 1.091 7，变异系数为 0.091 5。

4.2 计算结果与分析

假定 50 km 线路的档距平均值为 600 m，则该段线路的水平档距和垂直档距分别为

$$l_\mathrm{h}=600\ \mathrm{m},\ l_\mathrm{v}=1.5l_\mathrm{h}=900\ \mathrm{m}$$

可以得出输电线的永久荷载为

$$G_\mathrm{d}=10Q\cdot l_\mathrm{v}=10\times1133\times0.9=10.20\ \mathrm{kN}$$

则输电线永久荷载的均值和均方差为

$$\mu_\mathrm{G}=10.20\times1.06=10.81$$

$$\delta_\mathrm{G}=10.81\times0.07=0.76$$

输电线总荷载的均值和均方差分别为

$$\mu_\mathrm{S}=F_\mathrm{w}\left(t\right)+F_\mathrm{r}\left(t\right)+10.81$$

$$\sigma_\mathrm{S}=0.76$$

输电线的初始强度可用下式来表示

$$R_0=T_\mathrm{d}=0.5T_\mathrm{m}=0.5T_\mathrm{p}/K=0.5\times92.22/2.5=18.44\ \mathrm{kN}$$

式中：T_p为导线的拉断力；T_d为线路的断裂张力，取为最大使用张力 T_m乘以一个百分比值[14]，本文取为 0.5。

则线路强度的均值和均方差为

$$\mu_\mathrm{R}=18.44\times1.0917=20.13$$

$$\delta_\mathrm{R}=20.13\times0.0915=1.84$$

令输电线在使用期的第 10 年，由式(8)~式(10)计算输电线在第 10 年的强度为

$$R\left(10\right)=20.13\left(1-74.2\times a_f\left(10\right)-82.6\times a_f^{\ 2}\left(10\right)\right)=20.13\times0.9889=19.91\ \mathrm{kN}$$

利用式(22)、式(23)计算 60 km 输电线的故障概率，对不考虑微振磨损和经受 10 年微振磨损的线路在不同的风荷载下的故障概率进行比较，并分析了其故障概率增大量，如表 1 所示。

通过计算结果看出，在风速为 28 m/s 时，增大程度达到了123.17%，考虑输电线的微振磨损后，

表 1 不同等级风速下输电线的故障概率

Table 1 Probability of failure of transmission lines in different levels of wind speed

风速/(m/s)	20	24	28	30	32	34	36
故障概率(正常)	0.000 3	0.009 2	0.090 2	0.280 1	0.690 1	0.860 4	0.977 1
故障概率(退化)	0.000 4	0.013 4	0.201 3	0.469 9	0.7699	0.950 1	0.996 3
增大量/%	33.33	45.65	123.17	67.76	11.56	10.42	1.96

导线的故障概率明显增大，在输电线的设计风速附近增大程度较为明显，即在承受风速的临界点位置，微振磨损造成的强度退化影响最为显著，因此评估输电线的可靠性必须要考虑微振磨损造成的强度退化。

表 2 是风速为设计风速(27 m/s)时，不同降雨强度对输电线故障概率的影响程度。由表中数据可以看出，不利情况下的雨荷载对输电线故障概率的贡献比仅考虑风荷载增加了 33.22%，因此工程实际应用中，雨荷载对输电线失效概率的影响同样不可忽略。

表 2 不同等级的强降雨下输电线故障概率

Table 2 Transmission lines probability of failure in different levels of rainfall

荷载	风	风雨			风雨(大暴雨)		
		(中雨)	(大雨)	(暴雨)	弱	中	强
失效概率	0.173 4	0.182 3	0.186 5	0.191 3	0.196 4	0.210 5	0.231 0
增大量/%	--	5.13	7.55	10.32	13.26	21.40	33.22

对于综合考虑微振磨损和强风雨荷载的输电线，表 3 所示为沿海某地台风来袭的 10 小时内风速和降雨强度变化曲线，第 5~8 h 为台风 10 级风圈穿越输电线的时刻。

表 3 10 h 预测风速和降雨量

Table 3 Forecast wind speed and rainfall capacity in 10 hours

时间/h	1	2	3	4	5
风速/(m/s)	2.50	12.70	14.82	17.20	18.90
降雨量/(mm/h)	1.01	22.46	65.46	85.38	102.33
时间/h	6	7	8	9	10
风速/(m/s)	23.50	26.30	25.60	16.00	6.00
降雨量/(mm/h)	96.52	100.00	65.13	26.85	4.13

依据本文提出的输电线可靠性模型，可以计算出输电线在仅考虑风荷载、考虑风雨荷载、考虑风荷载和微振磨损、综合考虑风雨荷载和微振磨损四种情况下的时间相依故障概率，如图 7 所示，由图可以明显地看出强风雨条件下雨荷载和微振磨损造成的强度退化对输电线故障概率的影响，并且综合考虑环境荷载和强度退化对输电线的可靠性影响最大。

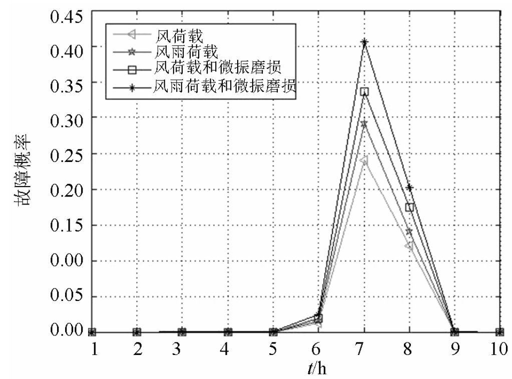

图 7 时间相依的故障概率

Fig. 7 Time-dependent probability of failure

5 结论

本文综合考虑了 ACSR 的微振磨损导致的强度退化和强风雨荷载共同作用对输电线结构可靠性的影响，建立了时间相依的故障概率模型。得出以下结论：

(1) ACSR 的微振磨损导致的强度退化会严重降低输电线的结构可靠性；

(2) 当风雨荷载共同作用时，雨荷载对输电线故障概率的贡献不容忽视，尤其是台风侵袭期间带来的强降雨对输电线的冲击较大；

(3) 在强风雨条件下对输电线进行可靠性评估时，要综合考虑线路强度退化和环境荷载的共同作用；

(4) 基于实时风雨荷载的故障概率模型可以求解输电线时间相依的故障概率，进行短期可靠性评估和风险预警。

参考文献

[1] 李波，李颉，陈浩宾，等. 高压输电导线的微振磨损行为研究[J]. 润滑与密封, 2009, 30(2): 71-73, 81.
LI Bo, LI Jie, CHEN Haobin, et al. Research on fretting wear of high-voltage transmission conductor[J]. Lubrication Engineering, 2009, 30(2): 71-73, 81.

[2] 宋晓喆，汪震，甘德强，等. 台风天气条件下的电网暂态稳定风险评估[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(24): 1-8.
SONG Xiaozhe, WANG Zhen, GAN Deqiang, et al.

Transient stability risk assessment of power grid under typhoon weather[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(24): 1-8.

[3] 唐斯庆，张弥，建设，等. 海南电网“9·26"大面积停电事故的分析与总结[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(1): 1-7, 16.
TANG Siqing, ZHANG Mi, JIAN She, et al. Review of blackout in Hainan on September 26th — cause and recommendations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(1): 1-7, 16.

[4] 任震，梁振升，黄雯莹. 考虑相关故障的双回输电线可靠性评估[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(6): 14-17.
REN Zhen, LIANG Zhensheng, HUANG Wenying. Reliability evalution of two parallel transmission lines with respect to relevant fault[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(6): 14-17.

[5] 何金定，贺星棋. 考虑可修多状态的输电线可靠性评估模型[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(4): 11-14, 53.
HE Jinding, HE Xingqi. Evaluation model of reliability for overhead transmission line with considerations of repairable multi-state[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(4): 11-14, 53.

[6] 孙羽，王秀丽，王建学，等. 架空线路冰风荷载风险建模及模糊预测[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(7): 21-28.
SUN Yu, WANG Xiuli, WANG Jianxue, et al. Wind and ice loading risk model and fuzzy forecast for overhead transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(7): 21-28.

[7] 熊小伏，方伟阳，程韧俐，等. 基于实时雷击信息的输电线强送决策方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(19): 7-11.
XIONG Xiaofu, FANG Weiyang, CHENG Renli, et al. Forced power supply decision of transmission lines based on real-time lightning information[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(19): 7-11.

[8] 赵新泽，劳海军，高伟. 钢芯铝绞线绞线间接触与磨损分析[J]. 润滑与密封, 2009, 34(11): 48-52.
ZHAO Xinze, LAO Haijun, GAO Wei. Contact and wear analysis on the wires of ACSR[J]. Lubrication Engineering, 2009, 34(11): 48-52.

[9] 陈国宏，倪满生，刘俊建. ACSR的微振疲劳及其寿命预测[J]. 宿州学院学报, 2013, 28(5): 74-77.
CHEN Guohong, NI Mansheng, LIU Junjian. ACSR fretting fatigue and life prediction[J]. Suzhou College Journal, 2013, 28(5): 74-77.

[10] 谢强，张勇，李杰. 华东电网500 kV任上5237线飑线风致倒塔事故调查分析[J]. 电网技术, 2006, 30(10): 59-63.
XIE Qiang, ZHANG Yong, LI Jie. Investigation on tower collapses of 500 kV Renshang 5237 transmission line caused by downburst[J]. Power System Technology, 2006, 30(10): 59-63.

[11] 白海峰，李宏男. 架空输电线风雨致振动响应研究[J]. 电网技术, 2009, 33(2): 36-40.
BAI Haifeng, LI Hongnan. Dynamic response of overhead transmission lines to oscillation caused by wind or rainfall loads[J]. Power System Technology, 2009, 33(2): 36-40.

[12] 张德坤，葛世荣. 钢丝微动磨损的评定参数及理论模型研究[J]. 摩擦学学报, 2005, 25(1): 50-54.
ZHANG Dekun, GE Shirong. Research on the evaluation parameters and theory model of fretting wear between steel wires[J]. Tribology, 2005, 25(1): 50-54.

[13] 刘沐宇，陈齐风，吴志强. 考虑微动疲劳的斜拉桥钢绞线斜拉索时变可靠性分析[J]. 土木工程学报, 2012, 45(7): 141-147.
LIU Muyu, CHEN Qifeng, WU Zhiqiang. Time-dependent reliability analysis of strand cables of cable-stayed bridges considering fretting-fatigue factor[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(7): 141-147.

[14] GB 50545-2010 110 kV~750 kV架空输电线路设计规范[S].
GB 50545-2010 code for design of 110 kV~750 kV over head transmission line[S].

[15] IEC 60826-design criteria of overhead transmission lines[S].

[16] GB50068-2001 建筑结构可靠度设计统一标准[S].
GB50068-2001 unified standard for rebility design of building structures[S].

收稿日期：2014-04-14；　**修回日期：**2014-07-08

作者简介：

赵 渊(1974-)，男，博士，教授，博士生导师，主要从事电力系统规划与可靠性评估相关研究；E-mail：yuanzhao@msn.cn

魏亚楠(1989-)，男，硕士，主要从事电力系统规划与可靠性评估方面的研究。E-mail: weiyanan1989@foxmail.com