

# 超高压输电导线疲劳强度衰减规律

秦力<sup>1</sup>, 李军阔<sup>2</sup>, 付强<sup>3</sup>, 宁波<sup>4</sup>

1. 东北电力大学建筑工程学院, 吉林吉林 132012
2. 河北省电力公司, 石家庄 050022
3. 中国长江三峡集团公司, 北京 100038
4. 河北广电网络集团秦皇岛有限公司, 河北秦皇岛 066004

**摘要** 钢芯铝绞线疲劳破坏是一个损伤不断累积、强度逐步下降的过程。导线的疲劳强度随其所受的动载荷和导线振动次数的增加而下降,当导线的剩余强度等于此时的动弯应力时,导线发生疲劳断股。因此,研究导线的剩余强度对导线疲劳断股及导线损伤具有重要意义。本文结合超高压输电导线结构特性及受力特性基于非线性强度退化模型推导出了钢芯铝绞线的疲劳剩余强度模型,并根据国际大电网会议中给出的较为保守的导线 S-N 曲线计算得出了模型中相关参数。通过对导线疲劳剩余强度模型进行实例分析说明了该模型的可行性。研究表明,导线强度衰减程度与载荷加载次数呈非线性关系,不同载荷下导线强度衰减速度不同,导线强度衰减量与导线振动强度及导线振动时长呈正相关,同一载荷下导线强度衰减速度随着载荷加载次数的增加而变快。

**关键词** 钢芯铝绞线; 导线疲劳; 剩余强度

中图分类号 TM723

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.19.006

## Conductor Fatigue Strength Decay Rule of EHV Transmission Line

QIN Li<sup>1</sup>, LI Junkuo<sup>2</sup>, FU Qiang<sup>3</sup>, NING Bo<sup>4</sup>

1. Architecture Engineering College, Northeast Dianli University, Jilin 132012, Jilin Province, China
2. Hebei Electric Power Corporation, Shijiazhuang 050022, China
3. China Three Gorges Corporation, Beijing 100038, China
4. Qinhuangdao Branch of Hebei Radio & TV Network Group Co., Ltd., Qinhuangdao 066004, Hebei Province, China

**Abstract** ACSR fatigue failure is the process of injury continuous accumulation and strength gradual decline. The fatigue strength of the ACSR is declining with the number of dynamic load increasing. When the residual strength of the strand is equal to the dynamic bending stress, the ACSR strands are broken. Therefore, the research on residual strength of EHV transmission line has the important significant on fatigue breakdown and injury of ACSR. Based on the non-linear strength degradation model, the structural properties and loading characteristics of EHV transmission lines are considered in order to derive the ACSR residual strength model. And the model parameters are calculated according to the conservative S-N curve of ACSR formulated by CIGRE. The feasibility of the residual strength model is proved through the analysis on different examples. The research shows that the relationship between the degradation degree of conductor strength and loading times is non-linear. The strength decay rates are different with different loadings. The amount of conductor strength attenuation is positively correlated with the intensity of conductor vibration as well as the duration of vibration; with the same load, the decay rate of ACSR strength is increasing with loading times increasing.

**Keywords** ACSR conductor; conductor fatigue; residual strength

### 0 引言

钢芯铝绞线是电力传输的重要载体,随着超、特高压输电线路的建设,大容量、远距离输电线路陆续投入运行,线路安全性的要求随之越来越高。而钢芯铝绞线运行环境复杂,由于卡门漩涡效应,架空输电导线在微风作用下常年处于微

风振动状态。因微风振动造成导线疲劳破坏的事故时有发生,严重影响着输电线路运行的安全<sup>[1]</sup>。

输电导线的疲劳破坏是一个损伤逐步累积、导线承载能力逐步下降的过程,导线疲劳剩余强度随其承受的载荷和频次而不断衰减。当导线剩余强度(这里指导线的真实静拉伸

收稿日期: 2012-12-15; 修回日期: 2013-03-20

基金项目: 东北电力大学创新基金项目

作者简介: 秦力, 教授, 研究方向为输电工程, 电子信箱: jilinql@163.com

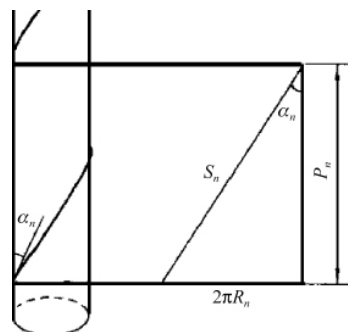
断裂强度)等于或小于循环应力时,导线股线发生静强度破坏。输电导线股线疲劳断裂大多属于此种破坏形式。为了研究导线疲劳剩余强度,国内外学者做了大量的基础研究,如 Knych 等<sup>[2]</sup>介绍了 AlMgSi 合金丝在可变应力的条件下的蠕变实验,得出了用贝利-诺顿函数描述的由应力和温度引起的流变关系,并将此实验应用于架空输电导线中。Poffenberger 等<sup>[3]</sup>介绍了按一侧悬挂点水平固定的半波振动估算导线悬挂点的动弯应变及应力的方法。郑黎阳等<sup>[4]</sup>根据平截面假设求解了各单线纵向力和各层之间挤压力的控制方程,导出了应力计算方法。王景超等<sup>[5]</sup>介绍了 1979 年国际大电网 22-04 工作组关于《电线寿命估算的建议》中对钢芯铝绞线及铝合金线给出一条比较保守的疲劳特性安全边界线。吕文阁等<sup>[6]</sup>从疲劳过程本质上是材料静强度不断退化的过程的观点出发,建立了一个非线性的、连续的强度退化模型,可以较准确地估算两级及多级载荷下的疲劳寿命。黄洪钟等<sup>[7]</sup>提出剩余强度衰减退化的非线性疲劳累积损伤理论,并基于该理论模型进行零件疲劳可靠性寿命分析。

本文根据钢芯铝绞线结构特性及受力特性,运用金属材料的强度退化模型<sup>[8-10]</sup>推导钢芯铝绞线外层铝股线的剩余强度模型,并结合模型研究钢芯铝绞线股线强度衰减规律。

## 1 钢芯铝绞线特性分析

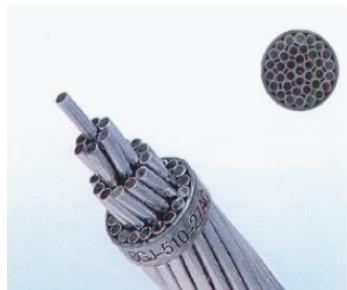
### 1.1 钢芯铝绞线结构特性

钢芯铝绞线是一个较为复杂的结构,其由多根股线缠绕而成。股线结构特点可由其自身的参数体现,如图 1(a)<sup>[11]</sup>所



(a) 钢芯铝绞线几何旋绕示意

(a) Diagram of ACSR geometric convolution



(b) 钢芯铝绞线实体

(b) Entity scheme of ACSR

图 1 钢芯铝绞线结构示意图

Fig. 1 Diagram of ACSR structure

示。股线的直径  $d_n$ 、捻角  $\alpha_n$ (螺旋角),其符号以右旋为正,左旋为负。各层股线绕轴心缠绕一周的长度为  $S_n$ 。每缠绕一周股线螺旋上升的轴向距离,称为节距  $P_n$ ,其节圆半径  $R_n$  为截面圆心至第  $n$  层股线中心的距离, $n$  为股线所在层数。同一层上股线具有相同的直径  $d_n$ 、捻角  $\alpha_n$ ,且具有相同的节层半径  $R_n$ 。导线从内至外依次为钢芯和铝股,股线以一定的螺旋升角紧密缠绕在钢芯外侧,且相邻股层的股线螺旋方向相反如图 1(b)所示,互相制约,以此来抵消同向缠绕给绞线带来的单向扭转作用。每层股线数目不同,直径也不尽相同。

导线捻角  $\alpha_n$  为

$$\tan\alpha_n = 2\pi R_n / P_n \quad (1)$$

### 1.2 钢芯铝绞线受力特性

钢芯铝绞线从结构上可以分为:内层(或芯线)为单股或多股的镀锌钢绞线,内层钢芯主要承担张力;外层为单层或多层硬铝绞线,主要起导电作用<sup>[1]</sup>。作用在架空线上的机械荷载有自重、冰重和风荷载,这些荷载一般是不均匀的,但为方便计算,一般按均匀分布考虑。

导线在荷载作用下主要产生轴向拉伸应力、弯曲应力、扭转剪切应力。导线股线的力学性能会对整根导线的力学性能产生决定性的影响<sup>[12]</sup>。当导线承受轴向载荷或弯曲时,股线与股线之间由于股线的长度不同和空间螺旋形态不同,使导线各股线间应力分配也存在差异。

#### 1.2.1 钢芯铝绞线股线轴向受力

不考虑股线挤压与摩擦时,导线第  $n$  层股线顺轴线方向的张力  $t_n$  为

$$t_n = \frac{\pi}{4} d_n^2 E'_n \varepsilon_n \cos\alpha_n \quad (2)$$

式中,  $E'_n$  为第  $n$  层单股线弹性模量,  $\text{N/mm}^2$ ;  $\varepsilon_n$  为第  $n$  层股线的轴向伸长率。

#### 1.2.2 钢芯铝绞线股线间挤压力

当单股线受轴向拉力  $t_n$  时,其股向拉力  $f_n = t_n / \cos\alpha_n$ ,因线股绕成螺旋状呈弧形,股向力将对内层股线产生向心力,外层股线对相邻内层股线产生的正压力为  $\Delta F_n$ <sup>[1]</sup>,

$$\Delta F_n = \frac{f_n \sin^2\alpha_n d_n}{R_n \sin(\alpha_n + \alpha_{n-1})} \quad (3)$$

式中  $f_n$  为沿股线方向的受力,  $\text{N}$ 。

钢芯铝绞线为多层绞绕而成,内层股线所受的压力并不是沿线股均匀分布的,而是集中作用在该线股与其内层线股的交接触点上。股线所受的径向压力以最外层为最小,而以最内层为最大,因为任一层股线所受的径向压力均由其外部各层累加传递作用并有内邻层反作用力相互作用<sup>[13]</sup>。股间压力随张力增大而增加,当张力增大后,电线振动强度提高,这是由于股间压力增大减少了滑动摩擦耗能和自阻尼作用。

#### 1.2.3 线夹处钢芯铝绞线股线动弯应力

悬垂线夹出口处导线,由于受静拉力及由其引起的上层股线对下层股线的压力以外,还受到风振引起的交变弯曲应力,以及由反复弯曲引起的各线股线间接触产生的切向力。

因此,悬垂线夹出口处导线的受力状况十分复杂。

架空输电线路长期处于野外,经受风雨荷载的冲击,当约 0.5~10m/s 的稳定风速吹向电线时,在电线背风侧产生上下交替的旋涡,引起上下交变的力作用于电线上,使电线产生垂向振动。当旋涡出现频率与电线的固有频率一致时,会在谐振下产生较大振幅的持续振动。导线振动中,由于振动波在悬挂点不能继续往前传播而形成波节点,微风振动作用下悬挂点导线股线产生交变的动弯应力,固定线夹出口的动弯应力表达式为

$$\sigma_c = \pm \frac{1}{\lambda} \pi A d E P \quad (4)$$

$$P = \sqrt{\frac{T}{EJ}} \quad (5)$$

式中,  $A$ 、 $\lambda$  分别为振动最大振幅(mm)和波长(m);  $d$ 、 $E$  分别为绞线外层线股股径(mm)和弹性系数(N/mm<sup>2</sup>),  $T$  为钢芯铝绞线所受张力(N),  $EJ$  为钢芯铝绞线抗弯刚度(N·mm<sup>2</sup>)。

由于钢芯铝绞线是由钢股线和铝股线绞合而成,导线各股线受力在不同时期也各不相同。实际上,当钢芯铝绞线长期作用张力后,铝股会产生较大的塑性及蠕变伸长而松弛,从而降低分担的应力,将其转移到钢芯上,使铝股达到破断时,钢芯分配的应力更大。运行中铝股线的断股主要由动弯应力引起的股线强度下降而造成。

## 2 钢芯铝绞线疲劳强度衰减模型

### 2.1 等幅载荷作用下疲劳强度衰减模型

钢芯铝绞线长期交变荷载作用下,必将产生疲劳损伤,使股线内部微观结构发生变化,随之股线的静力学性能退化。根据前人对疲劳剩余强度的大量研究,认为在等幅应力作用下的疲劳过程中材料静强度退化过程可以描述为<sup>[6]</sup>

$$\frac{d\sigma_R}{dn} = s^p \sigma_R^{-q}(n) \quad (6)$$

式中,  $\sigma_R$  为材料剩余强度,  $s$  为循环应力水平,  $N$  为循环次数,  $p$ 、 $q$  为材料常数,均为正值。其中,  $\sigma_R(N)$  满足边界条件:

$$\sigma_R(0) = \sigma_f \quad \sigma_R(N) = s \quad (7)$$

式中,  $\sigma_f$  为材料真实静拉伸断裂强度,  $N$  为疲劳寿命。由上式边界条件可以看出,在初始时刻材料未受任何损伤,股线强度等于股线未受损伤的真实静拉伸强度,当股线经受  $N$  周应力循环后,股线产生疲劳破坏,此时股线的疲劳剩余强度即为循环应力水平。将(6)式积分,再根据边界条件式(7)可得:

$$\sigma_R^{1+q}(n) = \sigma_f^{1+q} (1+q) s^p n \quad (8)$$

导线动弯应力水平与导线振动强度有关,可以通过式(4)求得。导线强度退化模型中的参数  $p$ 、 $q$  可由导线的  $S-N$  曲线来确定。

### 2.2 多级载荷作用下疲劳强度衰减模型

高压输电导线受环境影响产生微风振动,由于导线运行环境极其复杂,导线振动强度随气候影响而不同,导线所受动弯应力也随之变化,致使导线所受荷载不能维持等幅荷

载,因此导线所受动弯应力是随风速变化的变幅载荷。在变幅载荷作用下,输电导线承受多级载荷作用下的铝股线疲劳破坏时,若加载载荷谱含有  $k$  级应力水平,每个应力  $\sigma_i$  等幅作用  $n_i$  周次,得第  $i$  级应力水平的疲劳剩余强度表达式为

$$\sigma_{R_i}^{1+q}(n_i) = \sigma_{R_{i-1}}^{1+q}(n_{i-1}) - (1+q) s_i^p n_i \quad (9)$$

由此类推,  $k$  级应力作用下疲劳破坏后的剩余强度为

$$\sigma_{R_k}^{1+q}(n_k) = \sigma_{(0)}^{1+q} - (1+q) \sum_{i=1}^k s_i^p n_i \quad (10)$$

式中,  $s_i$  为第  $i$  级循环应力水平,  $n_i$  为第  $i$  级循环应力水平下的振动次数。

式(10)表明了零件在经过多级变幅载荷循环作用后,受到损伤致承载能力下降,即强度衰减退化,得  $k$  级应力循环后强度分布中值:

$$\sigma_{R_k}(n_k) = \left[ \frac{1 - (1+q) \sum_{i=1}^k s_i^p n_i}{\sigma_{(0)}^{1+q}} \right]^{1/1+q} \sigma_{(0)} \quad (11)$$

### 2.3 模型参数的确定

钢芯铝绞线疲劳强度退化模型中的参数可以根据钢芯铝绞线的  $S-N$  曲线求得,各个型号的导线具有不同的  $S-N$  曲线。1979 年国际大电网 22-04 工作组关于《电线寿命估算的建议》中<sup>[14]</sup>,对钢芯铝绞线及铝合金线给出一条比较保守的疲劳特性安全边界线,其曲线中交变应力  $s$  与疲劳振动次数  $N$  间的关系式为

$$\begin{cases} s_i = 450 N_i^{-0.2} & N_i \leq 2 \times 10^7 \\ s_i = 263 N_i^{-0.168} & N_i \geq 2 \times 10^7 \end{cases} \quad (12)$$

根据疲劳剩余强度的衰减方程式及边界条件可简化得

$$s^p N = \frac{\sigma_{(0)}^{1+q}}{1+q} \quad (13)$$

式(13)即为均值意义下的  $S-N$  曲线表达式,同时根据导线的  $S-N$  曲线可以得出:当导线动弯应力大于 15.6N/mm<sup>2</sup> 时,  $N_i \leq 2 \times 10^7$  时,计算得出  $p=5$ 、 $1+q=6.306$ ;当导线动弯应力小于 15.6N/mm<sup>2</sup> 时,即  $N_i \geq 2 \times 10^7$  时,计算得  $p=4.4528$ 、 $1+q=6.08639$ ;最终得出等幅载荷下钢芯铝绞线外层铝股线疲劳强度退化模型为

$$\begin{cases} \sigma_R^{6.306}(n) = \sigma_f^{6.306} - 6.306 s^5 \cdot N_i & N_i \leq 2 \times 10^7 \\ \sigma_R^{6.0864}(n) = \sigma_f^{6.0864} - 6.0864 s^{4.4528} \cdot N_i & N_i \geq 2 \times 10^7 \end{cases} \quad (14)$$

## 3 算例分析

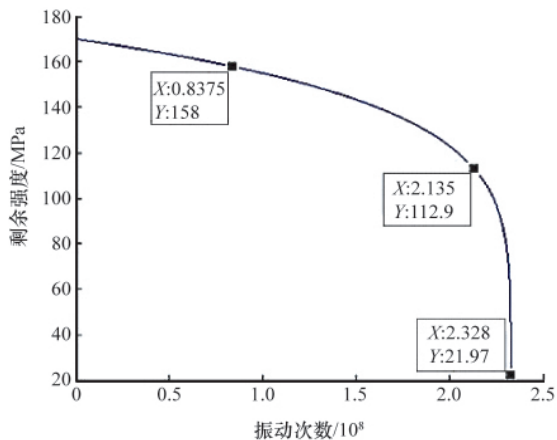
本文采用 LGJ400/35 型钢芯铝绞线对导线疲劳剩余强度模型进行验证,导线张力 20000N,此张力下通过实验测得导线抗弯刚度  $EJ$  为 13711922N·mm<sup>2</sup>,导线铝股线未受损伤时强度为 170MPa,根据导线振动强度(振幅)代入式(4)计算出导线外层铝股线动弯应力,将等幅载荷及多级载荷谱分别代入式(8)和式(11)得出导线疲劳剩余强度曲线。

表 1 为等幅载荷作用谱表,工况 1 和工况 2 分别为导线不同振动强度下的工况。等幅载荷作用下导线疲劳剩余强度曲线如图 2 所示。图 2(a)为工况 1 导线疲劳剩余强度曲线,

表 1 等幅载荷作用谱

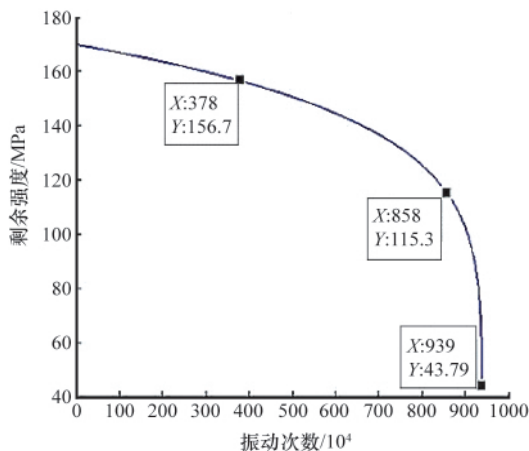
Table 1 Constant amplitude loading spectrum table

工况	振幅/mm	振动频率/Hz	动弯应力/MPa
1	3	15	9.8520
2	7	13	18.1362



(a) 工况 1 剩余强度曲线

(a) Residual strength curve with condition one



(b) 工况 2 剩余强度曲线

(b) Residual strength curve with condition two

图 2 等幅载荷作用导线疲劳剩余强度曲线

Fig. 2 Fatigue Residual strength curve of ACSR with constant amplitude loading

由图可知导线在等幅载荷下振动 2.328 亿次时, 铝股线强度下降为 21.97MPa;图(b)为工况 2 导线疲劳剩余强度曲线,导线在 18.136MPa 动弯应力下振动 939 万次后铝股线强度下降为 43.79MPa。通过图(a)、(b)的对比可以看出,导线股线动弯应力越大,股线强度衰减越快。由图 2 还可以看出,导线疲劳剩余强度随导线振动次数的增加而下降,且振动次数越多,强度下降越快,说明导线损伤累计是非线性的,当导线铝股

线的剩余强度等于此时的动弯应力或小于此时的静载荷时,铝股线发生疲劳断股。

现实中导线振动强度很大一部分决定于导线的运行环境,其随风荷载的改变而改变,导线微风振动是多级载荷分时作用,因此研究多级载荷作用下导线疲劳剩余强度更有现实意义。表 2 为多级载荷对导线作用的载荷谱(载荷按作用先后排列)。

表 2 多级载荷作用谱

Table 2 Multi-level loading spectrum table

载荷	振幅/mm	振动频率/Hz	动弯应力/MPa	振动次数/10 <sup>4</sup>
1	1	30	6.5680	8000
2	5	15	16.4200	430
3	13	3	8.2544	6000
4	3	20	13.1360	4000

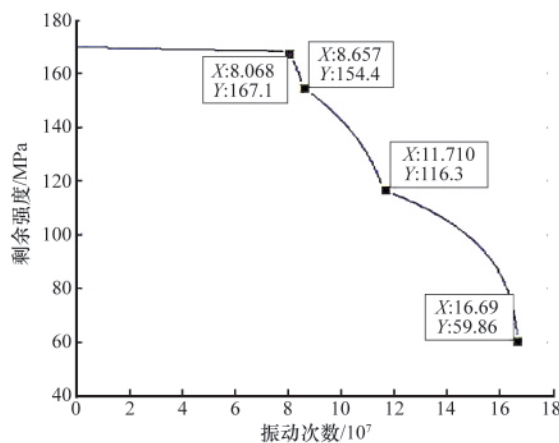


图 3 多级载荷作用导线疲劳剩余强度曲线

Fig. 3 Curve of ACSR fatigue residual strength with multi-level loading

图 3 为多级载荷作用导线疲劳剩余强度曲线,由 4 段组成,每段代表不同载荷作用下导线股线疲劳强度衰减程度。导线在 6.5680MPa 动弯应力下振动 8000 万次后导线铝股线强度下降为 167.1MPa,导线继续在 16.4200 动弯应力下振动 430 万次后导线铝股线强度下降为 154.4MPa,在此基础上导线在 8.2544MPa 动弯应力下振动 6000 万次后,铝股线强度下降为 116.3MPa,此时导线若在载荷 4 下继续振动 4000 万次,导线铝股线强度将下降为 59.86MPa。每段曲线不同的斜率代表不同载荷下股线强度衰减速度,同时同一曲线中,斜率亦不相同,说明导线铝股线强度衰减速度随着荷载加载次数的增加而增加。

实际运行中的导线不仅受动载荷作用,同时要承担自身载荷及覆冰载荷等静载荷,根据有关研究报道在考虑铝股线蠕变效应及扭绞效应时,外层铝股线最大使用应力为 65MPa<sup>[1]</sup>,

而通过计算结果可以看出在不考虑导线蠕变及绞线扭角变化的情况下,导线外层铝股线强度下降为导线原有强度的32%,导线外层铝股线的剩余强度将小于股线所承受的静载荷,此时在静载荷的作用下,外层铝股线便容易产生断股。因此防止导线疲劳断股,一方面要降低导线振动强度,另一方面要尽量减小导线所受静载荷。

通过研究可以清楚地了解导线经长时载荷作用后的剩余强度,研究人员可以以此为参考对导线覆冰断线等课题进行研究;线路工作人员可以以此为参考对导线进行补强,防止导线疲劳断股,从而保证线路正常安全运行。

#### 4 结论

本文通过分析股线受力及输电线 S-N 曲线得出了输电线强度衰减模型的参数,通过对模型施加不同荷载最终得出钢芯铝绞线强度衰减规律,得出如下结论。

(1) 导线疲劳剩余强度随导线振动次数的增加而下降,且振动次数越大,强度下降越快,说明导线损伤累计是非线性的,这也与事实相符,当导线铝股线的剩余强度等于此时的动弯应力时,铝股线发生疲劳断股。

(2) 输电导线在不同载荷作用下,导线强度衰减速度不同,导线所受动弯应力越大,强度衰减越快,疲劳损伤程度越大,对导线安全运行越不利。

(3) 通过导线强度衰减规律可以清晰地得出导线强度衰减的过程,以此预测导线的剩余强度并及时对导线进行补强,防止导线疲劳断股,增加输电线运行的可靠性。

#### 参考文献 (References)

- [1] 邵天晓. 架空送电线路的电线力学计算 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.  
Shao Tianxiao. Mechanical computation of power transmission conductor [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2003.
- [2] Knych T, Mamala A, Smyrak B. Phenomenology of the creep process of a precipitation-hardenable AlMgSi alloy wires for overhead power lines. Experimental tests. Simulation [J]. Mechanics of Time-Dependent Materials, 2009, 13(2): 163-181.
- [3] Poffenberger J C, Swart R L. Differential displacement and dynamic conductor strain[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1965, 84(4): 281-289.
- [4] 郑黎阳, 孙祖志. 铝绞线和钢芯铝绞线的应力分析 [J]. 武汉水利电力大学学报, 1997, 30(3): 65-68.  
Zheng Liyang, Sun Zuzhi. Engineering Journal of Wuhan University, 1997, 30(3): 65-68.
- [5] 王景朝, 徐乃管. 复合交变应力条件下的导线疲劳试验方法 [J]. 电力建设, 2001, 22(2): 18-20.  
Wang Jingchao, Xu Naiguan. Electric Power Construction, 2001, 22(2): 18-20.
- [6] 吕文阁, 谢里阳, 徐灏. 一个非线性强度退化模型[J]. 机械强度, 1997, 19(2): 55-57.  
Lü Wenge, Xie Liyang, Xu Hao. Journal of Mechanical Strength, 1997,

19(2): 55-57.

- [7] 朱顺鹏, 黄洪钟, 谢里阳. 考虑小载荷强化的模糊疲劳寿命预测理论 [J]. 航空学报, 2009, 30(6): 1048-1052.  
Zhu Shunpeng, Huang Hongzhong, Xie Liyang. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2009, 30(6): 1048-1052.
- [8] 杨晓华, 姚卫星, 段成关. 确定性疲劳累积损伤理论进展[J]. 中国工程科学, 2001, 5(4): 81-87.  
Yang Xiaohua, Yao Weixing, Duan Chengguan. Engineering Science, 2001, 5(4): 81-87.
- [9] 朱顺鹏, 黄洪钟, 谢里阳. 基于二元疲劳失效判据的非线性疲劳损伤累积模型及其强度退化研究 [J]. 中国机械工程, 2008, 19 (22): 2753-2761.  
Zhu Shunpeng, Huang Hongzhong, Xie Liyang. China Mechanical Engineering, 2008, 19(22): 2753-2761.
- [10] 黄洪钟, 朱顺鹏, 汪忠来, 等. 基于剩余强度衰减退化的非线性累积损伤准则及其可靠性定寿[J]. 应用基础与工程科学学报, 2011, 19(2): 323-334.  
Huang Hongzhong, Zhu Shunpeng, Wang Zhonglai, et al. Journal of Basic Science and Engineering, 2011, 19(2): 323-334.
- [11] 李永平, 李弘源. 一类大截面导线的结构合理性分析[J]. 东北电力技术, 2001(5): 4-7.  
Li Yongping, Li Hongyuan. Northeast Electric Power Technology, 2001 (5): 4-7.
- [12] 卢明良, 郭文坚. 裸绞线力学性能的理论分析 [J]. 电力建设, 1994(8): 13-17.  
Lu Mingliang, Guo Wenjian. Electric Power Construction, 1994(8): 13-17.
- [13] 蔡延湘. 多股绞线力学性能计算及风振疲劳破坏应力分析 [J]. 电力技术, 1989(10): 53-59.  
Cai Yanxiang. Electric Power Standardization & Construction Cost Control Information, 1989(10): 53-59.
- [14] CIGRE. SC22 WG04. Recommendations for the evaluation of the life time of transmission line conductors[J]. Electra, 1979, 63(3): 103-145.

(责任编辑 吴晓丽)

#### 《科技导报》“研究论文”栏目征稿

“研究论文”栏目专门发表自然科学、工程技术领域具有创新性的研究论文,要求学术价值显著、实验数据完整、具有原始性和创造性,同时应重点突出、文字精炼、引证及数据准确、图表清晰,并附中、英文摘要以及作者姓名、所在单位、通信地址、关键词等信息。在线投稿: [www.kjdb.org](http://www.kjdb.org)。