

# 输电线路风雨激振分析模型及数值分析\*

周 超, 芮晓明, 柳亦兵

(华北电力大学能源动力与机械工程学院 北京, 102206)

**摘要** 在分析电晕放电激振机理的基础上, 基于有限单元法和 Newmark 积分法建立了输电线路风雨激振有限元分析模型。基于试验和数值分析方法, 以输电线型号 LGJ-240 的相关参数为参考, 分别研究了电晕放电离子风的产生及响应、电晕力和风载作用下的瞬态响应和谐响应特性。研究表明, 电晕放电对舞动具有显著作用, 并在特定输电线路结构条件下, 易于与外界风载耦合作用引起舞动。分析方法和结论可为多风雨区域的特高压输电线路设计、已有线路升级改造以及振动抑制提供必要参考。

**关键词** 风雨激励; 有限单元法; 离子风; 电晕放电

**中图分类号** TH212; TM751

## 引 言

电晕是极不均匀电场中产生的一种自持放电现象<sup>[1-2]</sup>, 伴有可听噪声、电晕损失和振动等效应。输电线路在正常天气下, 电晕放电引起的导线振动现象较少。雨、雾或大湿度条件下易于在导线表面形成水滴, 引起导线表面电场畸变, 降低导线的起晕电压, 从而发生电晕放电产生振动<sup>[3-4]</sup>。电晕振动具有振幅大、频率低和偶然性特点, 易于造成金具剧烈磨损及导线伤股、断股现象, 严重影响到输电线路的正常运行。文献[5-6]用光滑直导线进行试验, 分析了高压输电线的电晕振动现象, 指出了诱使振动的主要物理参数, 并与实际观察数据进行了对比。文献[7-9]分别建立了覆雨、冰条件下的试验模型, 并进行了相关分析。文献[10]研究了水滴的数量对导线电晕放电起始特性的影响, 并将电晕放电分为 3 个阶段。文献[11-12]建立了输电塔线的风雨激振模型, 将降雨作为一种激励来处理仿真分析, 但未考虑电晕放电激励的影响。不难发现, 已有电晕振动的研究多集中在试验模型、试验方法和数据分析等方面, 较少有涉及电晕振动风数值仿真分析。笔者在分析输电线路振动机理的基础上, 利用索单元建立有效的风雨激振有限元分析模型, 分别研究了电晕放电离子风的产生及响应、电晕力和风载作用下的瞬态响应和谐响应特性。

## 1 电晕放电机理及风雨激振分析模型

雨滴引起电场畸变进而加剧了电晕放电, 电晕放电离子风和空间电荷的交替出现, 导致了输电线的电晕振动的产生。结合文献[5-9], 简要描述电晕振动机理如下:

- 1) 降雨条件下, 在输电线的下方悬挂雨滴, 在电场作用下雨滴被极化成锥形, 并在表面形成畸变电场;
- 2) 畸变电场引起电晕放电, 并产生离子风, 离子风作用下气体绕流过输电线表面形成向上的推力, 并将雨滴弹射出去;
- 3) 随着水滴的减小, 畸变电场逐渐消失, 当导线位移最大时, 离子风最小, 空间电荷处于主导地位;
- 4) 在空间电荷的作用下, 输电导向回到平衡位置。在降雨充沛的条件下, 输电线的下方再次悬挂雨滴, 重复上述过程, 如图 1 所示。

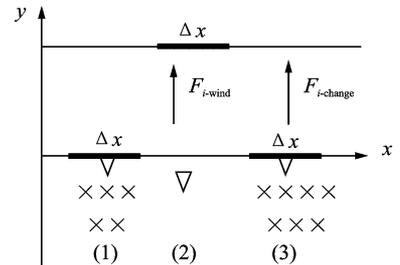


图 1 降雨条件下电晕放电机理

\* 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(编号:11QG07)

收稿日期:2011-06-09;修改稿收到日期:2011-08-25

输电线为股状铰接结构,股与股之间存在着相对滑移,所以其抗弯刚度变化很大,一般在 $16\sim 577\text{ N/m}^2$ 范围内取值<sup>[13]</sup>,图2所示为输电线振动微元模型。实际输电线的跨距可达几百米,忽略电线刚度,利用弦振动模型模拟输电线误差很小。将输电线简化成延长度方向几何特性与材料特性不变的细长实心圆柱体,并且忽略其抗弯刚度,给出输电线在外载荷作用下的振动微元方程

$$m(x) \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial t^2} + c(x) \frac{\partial y(x,t)}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left( T(x) \frac{\partial y(x,t)}{\partial x} \right) = \Sigma f_i(x,t) \quad (1)$$

其中: $0 \leq x \leq l; t > 0$ ;  $m(x)$ 为导线单位长度质量; $y(x,t)$ 为振动位移; $c(x)$ 为导线阻尼系数; $T(x)$ 为张力; $\Sigma f_i(x,t)$ 为外载荷激励。

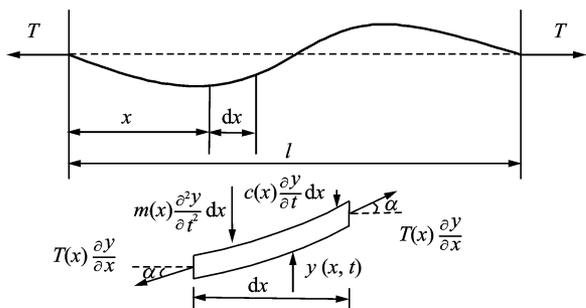


图2 输电线振动微元受力分析

位移边界条件BC(u)为

$$\begin{cases} x = 0, & y(0,t)|_{t>0} = 0 \\ x = l, & y(l,t)|_{t>0} = 0 \end{cases}$$

力的边界条件BC(P)为

$$\begin{cases} x = 0, & \sigma(0,t)|_{t>0} = T/A \\ x = l, & \sigma(l,t)|_{t>0} = T/A \end{cases}$$

用 $\phi_i(x)$ 表示形状函数, $v_i(t)$ 表示节点位移, $n$ 表示自由度数, $e$ 表示输电线离散有限元单元,则输电线微元的位移可用有限单元表示为

$$y^e(x,t) = \sum_{i=1}^n \phi_i(x) v_i(t) \quad (2)$$

应用Galerkin加权残值法,将式(2)代入可得

$$\begin{aligned} & \int_e \phi_i^e(x) m(x) \frac{d^2 v(t)}{dt^2} \phi_j^e(x) dx + \\ & \int_e \phi_i^e(x) c(x) \frac{dv(t)}{dt} \phi_j^e(x) dx + \\ & \int_e \frac{d\phi_i^e(x)}{dx} T(x) v(t) \frac{d\phi_j^e(x)}{dx} dx = \\ & \int_e \phi_i^e(x) \sum f_i(x,t) dx + \\ & \int_{x_1}^{x_n} T(x) v(t) \frac{d\phi_j^e(x)}{dx} \phi_i^e(x) dx \quad (3) \end{aligned}$$

将式(2)代入式(1),并整理得

$$M^e \frac{d^2 v(t)}{dt^2} + C^e \frac{dv(t)}{dt} + K^e v(t) = \sum F_i(t) \quad (4)$$

其中:

$$\begin{aligned} M_{ij}^e &= \int_e \phi_i^e(x) m(x) \phi_j^e(x) dx; \\ C_{ij}^e &= \int_e \phi_i^e(x) C(x) \phi_j^e(x) dx; \\ K_{ij}^e &= \int_e \frac{d\phi_i^e(x)}{dx} T(x) \frac{d\phi_j^e(x)}{dx} dx; \\ v(x,t) &= T(x) v(t) \frac{d\phi_j^e(x)}{dx}. \end{aligned}$$

取插值函数 $\phi_i(x)$ 为 $\phi_1(x) = 1 - x/l_e, \phi_2(x) = x/l_e$ ,那么方程(5)可表示如下

$$\begin{bmatrix} \frac{m^e l_e}{3} & \frac{m^e l_e}{6} \\ \frac{m^e l_e}{6} & \frac{m^e l_e}{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{d^2 v_1(t)}{dt^2} \\ \frac{d^2 v_2(t)}{dt^2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{c^e l_e}{3} & \frac{c^e l_e}{6} \\ \frac{c^e l_e}{6} & \frac{c^e l_e}{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{dv_1(t)}{dt} \\ \frac{dv_2(t)}{dt} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{T^e}{l_e} & -\frac{T^e}{l_e} \\ -\frac{T^e}{l_e} & \frac{T^e}{l_e} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1(t) \\ v_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\sum f_i^e l_e}{2} + v^e(x,t) \\ \frac{\sum f_i^e l_e}{2} - v^e(x,t) \end{bmatrix}$$

将单元的各个矩阵进行组装,形成输电线路系统的整体有限元方程

$$M\ddot{v}_t + C\dot{v}_t + K v_t = F_t \quad (5)$$

应用Newmark直接积分法来求解式(5)可得

$$M\ddot{v}_{t+\Delta t} + C\dot{v}_{t+\Delta t} + K v_{t+\Delta t} = F_{t+\Delta t} \quad (6)$$

其中: $\dot{v}_{t+\Delta t} = \dot{v}_t + [(1-\beta)\ddot{v}_t + \beta\ddot{v}_{t+\Delta t}]\Delta t; v_{t+\Delta t} = v_t + \dot{v}_t\Delta t + [(1/2-\alpha)\ddot{v}_t + \alpha\ddot{v}_{t+\Delta t}]\Delta t^2; \alpha, \beta$ 可根据积分精度和稳定性决定。

通过该方法对输电线的动力学方程进行时间分段离散,再计算每一时刻的位移函数值,则不难求出输电线的振幅、结构特性和动力响应。

## 2 输电线载荷及结构阻尼

输电线含雨滴的截面受力如图3所示,其中: $U$ 为导线所受横向风速; $\dot{V}$ 为导线垂向的运动速度;

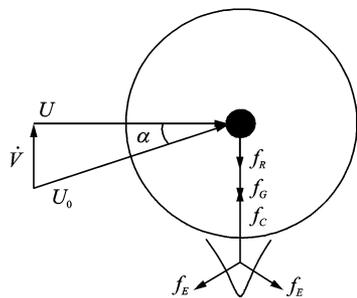


图3 输电线截面受力关系图

$U_0$  为相对风速;  $f_R$  为空气阻力;  $f_G$  为导线重力(忽略水滴);  $f_C$  为电晕力;  $f_E$  为表面电场力。

### 2.1 电晕力

通常电晕力  $f_C$  与时间难以表述,一般用简谐函数或脉冲函数来近似替代<sup>[6]</sup>。电晕力  $f_C$  表述如下

$$\iint_{cs} T dA = \iint_{cs} \mathbf{V}(\rho \mathbf{V} \cdot d\mathbf{A}) \Rightarrow f_C = \rho \sum V_i^2 A_i \quad (7)$$

考虑到电压极性、电压等级和降雨密度等影响<sup>[14-15]</sup>,将式(7)改写为

$$f_C = \rho \sum V_i^2 A_i \times 1.84 \sin \omega t \quad (8)$$

### 2.2 风载

在风速  $U$  作用下,空气绕流过输电线表面,在后方交替脱落,形成周期激励风载荷。输电线的每个单元(微元)在均匀层流风场所受风载激励力为

$$F_y = \frac{P_w}{\pi y(x) f} \sin \omega t \quad (9)$$

将 Diana & Falco 风能表达式<sup>[16]</sup>代入式(9),就可得到基于 Diana & Falco 的风激励表达式为

$$F_y = \begin{cases} 35.902 \ 8d^2 f^2 y^{0.2126} & y < 1.2d \\ 17.513 \ 4d^4 f^2 y^{-1} & 1.2d < y < 2d \\ 0 & y > 2d \end{cases} \quad (10)$$

其中:  $d$  为输电线直径;  $y$  为振动位移; 基频  $f = sU/d$ ; 斯特劳哈尔数  $s = 0.2$ 。

### 2.3 电场力

雨滴中的水分子为极性分子,整个水滴将受到向下的电场力  $f_E$ <sup>[17]</sup> 为

$$f_E = \frac{\pi \epsilon_0}{4} \left[ \frac{3(\epsilon_2 - \epsilon_1)}{\epsilon_2 + 2\epsilon_1} \right]^2 |E_0|^2 r^2 \quad (11)$$

其中:  $\epsilon_0$  为真空介电常数;  $\epsilon_1$  为空气的相对介电常数;  $E_0$  为电场强度;  $r$  为水滴半径。

### 2.4 输电线结构阻尼

输电线在振动中自身消耗的能量主要来自振动中各股间的滑动摩擦耗能和材料的磁滞阻尼耗能,其机理十分复杂,有限元方法难以模拟。因此,将复杂的阻尼等效成为经典的黏滞阻尼以规避难点,其等效阻尼  $c$ <sup>[18]</sup> 可表示为

$$c = \frac{2^{\alpha-1} k}{d^{\alpha} \pi^2} A^{\alpha-2} f^{\beta} \Delta l \times 10^{-3} \quad (12)$$

## 3 输电线路风雨激振的数值分析

以文献[4]的现场试验和观测数据为参考,运用

上述有限元方法进行数值仿真分析,以验证其实用性。拓常线路参数如下:全长 102.5 km,最大海拔不超过 0.7 km,输电线离地约 6 m,挡距约 255.5 m。输电线型号为 LGJ-240,相关参数为  $E = 190 \text{ GPa}$ ,  $\mu = 0.3$ ,  $\rho = 7\ 300 \text{ kg/m}^3$ ,  $h = 4 \text{ m}$ 。

根据参数,应用有限元数值法进行模态分析计算,可以得到该段输电线各阶模态频率如表 1 所示。

表 1 输电线各阶模态频率

阶次	1	2	3	4	5
$f/\text{Hz}$	0.695 51	0.815 21	1.392 8	2.095 9	2.096 7

### 3.1 电晕放电离子风的产生及响应分析

如图 4 所示,离子风是指在不均匀电场中,电晕放电发生时,相对曲率较大的电极附近产生离子射流运动,离子射流运动对周围气体流动产生强烈的扰动<sup>[19-20]</sup>。

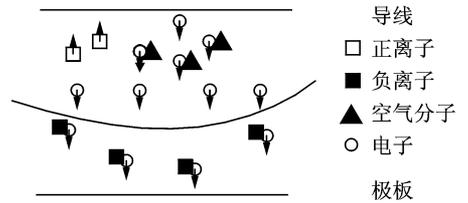
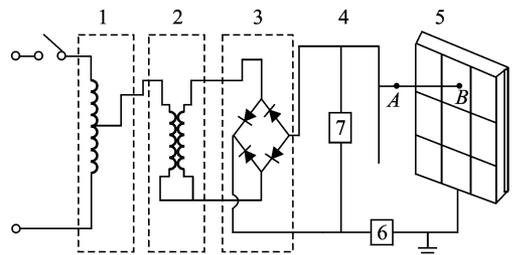


图 4 电晕离子风的产生

建立试验装置来测量离子风速,试验原理如图 5 所示。试验装置包括电晕线  $D20 \text{ mm}$  的光圆铜线、接地极板、平面网电极和高压供电系统等。取点 A(距离电晕线 2 mm)、B(距离电晕线 10 mm),测量结果如图 6 所示。根据图 3 可知,A、B 两点的离子风速均随电场强度的升高而增加,A 点的趋势较 B 点迅速,且风速差值较大,这是由于离子风衰减较快造成的。15 kV/cm 之前相差不大,这是在于电场强度较低时,电源线附近形成的离子风微弱,电流体流场湍流度较小。15 kV/cm 之后,随着电压的升高,形成离子风速增大,离子之间的相互作用逐渐增强。



1-调压变压器;2-升压变压器;3-硅整流器;4-电晕线;5-双层板;6-微安表;7-静电电压表

图 5 试验装置原理图

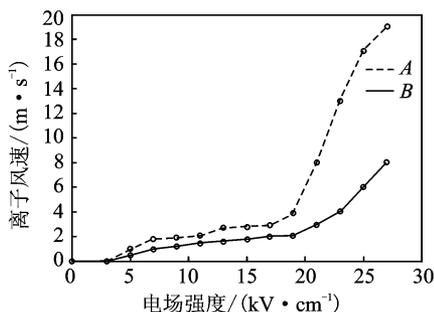


图6 A,B 两点的离子风速

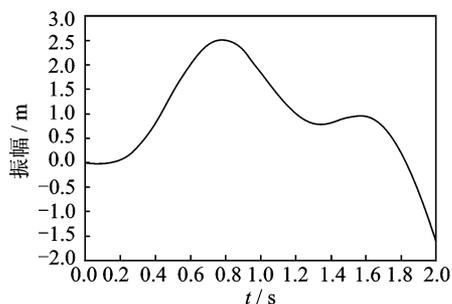


图8 输电导线弧垂底点的动态响应位移

以拓常线路输电线型号LGJ-240的相关参数为参考,以旋涡脱离频率 $\omega_c$ 和离子风速 $v$ 为变量来进行输电导线电晕振动仿真,如图7所示。可见,由于输电导线电晕放电产生离子电晕放电,并产生离子风,输电导线的振幅随着离子风速的增大而增大,在离子风速为8 m/s左右时,振动幅度甚至可达到12 cm左右,频率约为0.5 Hz。文献[4]的现场观测带电舞动振动幅度低于10 cm,随着电场强度增大,振幅逐渐增大。仿真结果振幅略高于现场观测带电舞动幅度,这是由于未考虑空气阻力和输电线结构阻尼的影响,仿真数据与现场观测数据相近。因此,可以初步判定无风条件下,电晕放电产生的离子风是输电线路舞动的主要诱因。

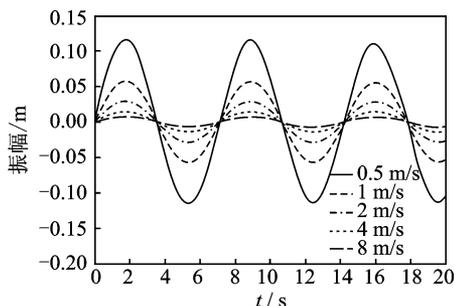


图7 电晕放电振幅与离子风速关系

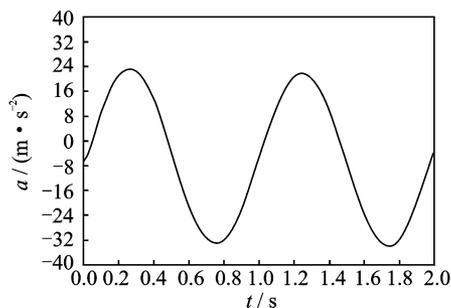


图9 输电导线弧垂底点的动态响应的加速度

延长,到达最下方位置时,在电场作用下被极化成锥形,并在表面形成畸变电场;畸变电场引起电晕放电,离子风作用下气体绕流输电导线表面形成向上的推力,并将雨滴弹射出去,形成新一轮运动过程。

### 3.3 输电线路风雨激振的谐响应分析

图10所示为输电线型号LGJ-240的弧垂底点及挡距1/4处的谐响应曲线。分析图像曲线,不难发现当频率处于 $f \approx 0.8$ 时,即2阶模态频率附近时,输电导线振幅达到极大值。一般输电塔的主频约1 Hz左右,输电线路在2阶模态频率附近时易于诱发共振,仿真结果与文献[4]现场观测输电线路舞动频率区间基本相符,频率的微差主要产生于导线张力和密度的取值。因此,可判定输电导线结构的频率与

### 3.2 输电线路风雨激振的瞬态响应分析

图8、图9所示为输电线型号LGJ-240在频率为1 Hz的正弦激励(风载与电晕力综合)作用下,导线弧垂底点的位移及加速度的瞬态响应曲线。分析图像曲线,当导线处于竖向最上方位置时,加速度则达到最大值( $t \approx 0.8$ )。以文献[5-6]的试验报告为参考观察输电线路瞬态响应,忽略具体数据存在差异,两者的响应趋势基本一致。响应趋势归纳如下:在竖向最上方位置时,残余雨滴为扁平状,电晕离子风微弱,加速度最大;输电导线向下运动,加速度递减直到平衡位置为零;从平衡位置继续向下,雨滴开始聚集、

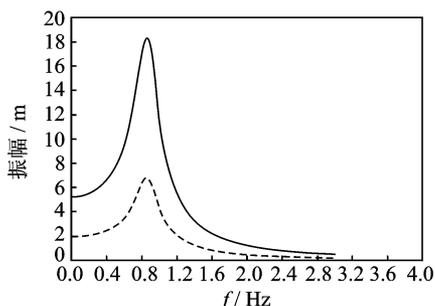


图10 输电导线弧垂底点和挡距1/4处的谐响应

外载的耦合是输电线路舞动加剧的又一主要因素。在条件允许的情况下,可调节输电导线的张力、跨距及直径等来改变其频率特性,避免与外载耦合以削弱该项的影响。

## 4 结束语

在分析电晕放电激振机理的基础上,基于有限单元法和Newark积分法建立了考虑电晕力的输电线路风雨激振有限元分析模型。以拓常线路的输电线路型号LGJ-240的相关参数为参考,基于试验和数值分析方法,分别研究了电晕放电离子风的产生及响应、电晕力和风载作用下的瞬态响应和谐响应特性,将结果与相关文献数据进行了对比,基本吻合。研究表明,电晕放电产生的离子风是输电线路舞动的主要诱因之一,并在特定输电线路结构条件下,易于与外界风载耦合作用引起舞动。

### 参 考 文 献

- [1] 周泽存. 高电压技术[M]. 北京:中国电力出版社, 2004.
- [2] 杨精基. 气体放电[M]. 北京:科技出版社, 1983.
- [3] Adachi T, Phan L C. A laboratory study of corona induced vibration of HV smooth aluminum conductors in a mass-spring configuration [J]. Journal of Electrostatics, 1981, 9: 273-288.
- [4] 刘振铎. 关于导线电晕舞动的初步探索[J]. 高电压技术, 1980, 1: 56-59.
- [5] Masoud F, Luan C. Vibration of high voltage conductors induced by corona from water drops or hanging metal points [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1984, 1: 2746-2752.
- [6] Masoud F, Yves T. Mechanical vibration of HV conductors induced by corona; roles of the space charge and ionic wind [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1988, 3: 1122-1127.
- [7] Phan L C, Tadeusiewicz A, Allaire M C. Experimental investigations of corona-induced vibration on high voltage conductors with different types [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and System, 1981 (4): 1975-1984.
- [8] Kollar L E, Farzaneh M, Karev A R. Modeling droplet collision and coalescence in an icing wind tunnel and the influence of these processes on droplet size distribution [J]. Internal Journal of Multiphase Flow, 2005, 31: 69-92.
- [9] Kollar L E, Farzaneh M. Vibration of bundled conductors following ice shedding [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(2): 1097-1104.
- [10] 舒立春, 宫林, 蒋兴良, 等. 水滴或污秽对导线电晕放电起始特性的影响[J]. 高电压技术, 2008, 34(4): 633-637.
- [11] 李宏男, 任月明, 白海峰. 输电塔体系风雨激励的动力分析模型[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(30): 43-48.
- [12] 白海峰, 李宏男. 架空输电线路风雨致振动响应研究 [J]. 电网技术, 2009, 33(2): 36-40.
- [13] Vecchiarelli J, Currie G I, Havard G D. Computation analysis of aeolian conductor vibration with stockbridge-type damper [J]. Journal of Fluids and Structures, 2000, 14: 489-509.
- [14] Kawamoto H, Umezumi S. Force at spark discharge in pin-to-plate system [J]. Journal of Electrostatics, 2007, 65: 75-81.
- [15] Boumahrat M, Akazaki M. Onset mechanism and development of corona discharge on water dripping from a conductor under high direct voltage [J]. Journal of Electrostatics, 1981, 9: 339-353.
- [16] Diana G, Falco M. On the forces transmitted to a vibrating cylinder by a blowing fluid [J]. Meccanica, 1971, 6(1): 9-22.
- [17] 冯治国, 张爽, 杨嘉祥, 等. 雨雾天气对导线电晕放电的影响分析 [J]. 黑龙江电力, 2010, 32(2): 145-148.
- [18] 孔德怡, 李黎, 龙晓鸿, 等. 特高压架空输电线路微风振动有限元分析[J]. 振动与冲击, 2007, 26(8): 64-67.
- [19] 岳永刚, 丁兆军, 王科, 等. 气体放电对金属平板强化传热作用研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(3): 91-95.
- [20] 袁均祥, 邱炜, 郑程, 等. 空气放电离子风特性的研究 [J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(13): 110-116.



**第一作者简介:**周超,男,1980年7月生,讲师。主要研究方向为机械动力学、非线性振动和结构设计。曾发表《粘弹性体阻尼隔振体的非线性振动分析》《工程设计学报》2009年第16卷第3期等论文。  
E-mail:zhouchao@ncepu.edu.cn