

## 覆冰导线任意方向驰振分析方法

马文勇, 顾明, 全涌, 黄鹏

(同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

**摘要:** 在分析传统单自由度驰振激发机理的基础上, 推导任意风向作用下覆冰导线在任意振动方向的单自由度驰振判别式, 从理论上证明顺风向驰振发生的可能性. 分别运用 DenHartog, Nigol 判别式和上述判别式, 分析风洞试验得到的准椭圆形覆冰导线模型气动力, 判断准椭圆形覆冰导线发生驰振的可能性. 结果表明, 对覆冰导线, 该方法不仅可得到可能发生驰振的风向, 还可判断可能发生驰振的振动方向.

**关键词:** 覆冰导线; 任意方向; 驰振; 分析方法

**中图分类号:** TU 312.1; TM 75

**文献标识码:** A

### Analysis Method of Galloping in Arbitrary Directions of Iced Conductors

MA Wenyong, GU Ming, QUAN Yong, HUANG Peng

(State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Based on the analysis of galloping mechanism of a single degree-of-freedom system, the criterion for galloping in arbitrary directions of quasi-oval shape iced conductors is derived, and the occurrence possibility of along-wind galloping is also theoretically proved in this paper. Then, DenHartog criterion, Nigol criterion and the galloping criterion proposed in this paper are applied to analyzing the aerodynamic forces of quasi-oval shape iced conductors obtained from wind tunnel tests. The results indicate that not only the wind direction at which galloping takes place but also the galloping directions of the iced conductors can be obtained by using the present method.

**Key words:** iced conductor; arbitrary direction; galloping; analysis method

冻雨、雪凝等恶劣天气下的输电导线覆冰问题,

一直是输电线路安全研究的重要课题. 输电线路所处地理条件的复杂性和局部气候的多样性, 造成输电线路覆冰的随机性很大, 加之对不同覆冰截面形状气动力特性的研究相对缺乏, 使覆冰导线风荷载及响应的研究较困难. 驰振是一种不稳定自激振动, 振动频率低(0.1~3.0 Hz), 振幅大(是导线直径的5~300倍), 危害很大<sup>[1]</sup>, 常发生于覆冰输电导线.

目前, 用于驰振激发的机理主要有 DenHartog 横风向激发机理、Nigol 扭转激发机理和惯性耦合驰振机理. DenHartog 于 1956 年完整阐述了其垂直自激的驰振激发机理<sup>[2]</sup>, 经其他学者的完善发展, 成为目前最具代表性的驰振激发机理之一. Nigol 等对 DenHartog 理论系统分析后, 提出了扭转激发机理<sup>[3]</sup>, 后人称为 Nigol 激发机理. Yu 认为, 理论上单独出现横风向自激和扭转自激是可能的, 但实际上多数覆冰导线同时出现垂直、水平和扭转三种振动, 由于覆冰的不对称, 导线偏心, 某一种运动就可能诱发另一种振动, 驰振属于两种以上运动耦合引发的自激振动<sup>[4-5]</sup>. Macdonald 等将观测到的无覆冰和雨线情况下斜拉索顺风向发生的一种发散的自激振动归入驰振范畴, 并认为是由于雷诺数变化引起的, 是一种顺风向驰振激发机理<sup>[6]</sup>. 对于覆冰导线, 由于覆冰的复杂性和多样性, 从理论上讲, 上述激发机理中的任意一种都可能发生. 另外, 考虑到覆冰导线各运动方向的低阶频率可能相差较大, 对覆冰导线单自由度驰振激发机理的研究仍然非常必要.

笔者通过分析传统的驰振激发机理, 给出了顺风向驰振激发机理的理论依据和任意风向任意振动方向的驰振判别式; 以覆冰导线高频天平测力风洞试验数据, 进一步阐释准椭圆形覆冰导线单自由度驰振机理.

收稿日期: 2008-11-20

基金项目: 国家自然科学基金创新研究群体科学基金资助项目(50621062); 国家自然科学基金重点资助项目(50638010)

作者简介: 马文勇(1980—), 男, 博士生, 主研究方向为结构抗风. E-mail: mawenyong@126.com

顾明(1957—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为结构抗风. E-mail: minggu@tongji.edu.cn

## 1 传统单自由度驰振机理简介

### 1.1 横风向驰振机理(DenHartog 激发机理)

作为最具代表性的驰振激发机理,DenHartog 横风向驰振的发生取决于系统机械阻尼与气动阻尼之和,总阻尼小于零,系统趋于不稳定,同时,将气动阻尼小于零作为驰振不稳定性的必要条件<sup>[7]</sup>.

$$\delta_D = C_D + \frac{\partial C_L}{\partial \alpha} < 0 \quad (1)$$

式中:  $\delta_D$  为横风向 DenHartog 系数;  $C_D$ ,  $C_L$  分别为阻力系数和升力系数;  $\alpha$  为风向角.

图1为通过风洞试验得到的准椭圆形覆冰导线的气动力系数均值<sup>[8]</sup>,横坐标为风向(图1中横坐标下示意图),纵坐标为气动力系数均值.以  $120^\circ$  风向角为例,因导线系统处于升力系数的负斜率区,导线向上运动,则相对风向角变小,气动力为正值(向上);反之气动力为负值(向下).作用力与运动速度同向,运动吸入能量,有可能发展为大幅不稳定振动.

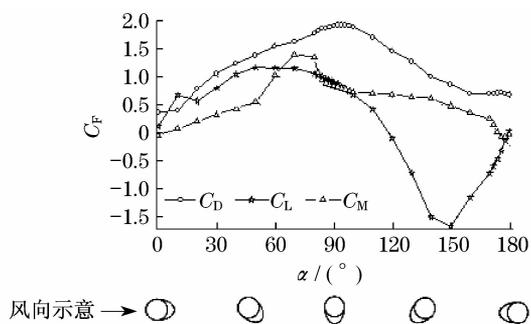


图1 准椭圆覆冰导线气动力系数

Fig.1 Aerodynamic force coefficients of quasi-oval iced conductors

### 1.2 扭转驰振机理(Nigol 激发机理)

扭转驰振机理与横风向驰振机理类似,其不稳定状态的必要条件为<sup>[3]</sup>

$$\delta_N = \frac{\partial C_M}{\partial \alpha} < 0 \quad (2)$$

式中:  $\delta_N$  为 Nigol 系数;  $C_M$  为扭矩系数;  $\alpha$  为风向角.从图1可以看到,准椭圆形覆冰导线模型在  $90^\circ \sim 150^\circ$  风向角之间为扭矩系数负斜率区,属于可能的扭转不稳定工况.

## 2 任意风向任意振动方向上的单自由度驰振判据推导

图2为一类似覆冰导线的细长结构物横截面,

考虑系统在  $y$  方向的运动微分方程为

$$m\ddot{y} + c\dot{y} + ky = F_y \quad (3)$$

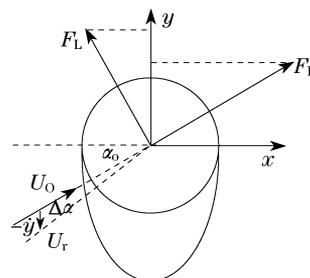


图2 气动力示意图

Fig.2 Diagram of aerodynamic force

式中,  $m$ ,  $c$ ,  $k$  分别代表系统的质量、阻尼和刚度.设来流方向与  $x$  轴夹角为  $\alpha_0$ ,沿  $y$  向运动引起的相对风向角变化值为  $\Delta\alpha$ ,作用在结构上沿  $y$  方向的气动力表示为

$$F_y + F_D \sin(\alpha_0 + \Delta\alpha) + F_L \cos(\alpha_0 + \Delta\alpha) \quad (4)$$

$$F_y = \rho u_0^2 DC_{F_y} / 2 \quad (5)$$

$$F_D = \rho u_r^2 DC_D / 2 \quad (6)$$

$$F_L = \rho u_r^2 DC_L / 2 \quad (7)$$

将式(6),(7)带入式(4),并与(5)对比,得

$$C_{F_y} = \frac{u_r^2}{u_0^2} (C_D \sin(\alpha_0 + \Delta\alpha)) \quad (8)$$

考虑初始的微幅运动,  $\Delta\alpha$  为小量,因此,  $\sin(\alpha_0 + \Delta\alpha) \approx \sin \alpha_0$ ,  $\cos(\alpha_0 + \Delta\alpha) \approx \cos \alpha_0$ .将  $C_{F_y}(\alpha_0 + \Delta\alpha)$  在  $\alpha_0$  处1阶 Taylor 展开,得

$$C_{F_y}(\alpha_0 + \Delta\alpha) = C_{F_y}(\alpha_0) + \frac{\partial C_{F_y}(\alpha_0)}{\partial \alpha} \Delta\alpha + o(\Delta\alpha^2) \quad (9)$$

$$\frac{\partial C_{F_y}(\alpha_0)}{\partial \alpha} = \frac{u_r^2}{u_0^2} \left( \frac{\partial C_D(\alpha_0)}{\partial \alpha} \sin \alpha_0 + C_D \cos \alpha_0 + \frac{\partial C_L(\alpha_0)}{\partial \alpha} \cos \alpha_0 - C_L \sin \alpha_0 \right) \quad (10)$$

将式(8)~(10)及(4)代入式(3),并考虑  $u_r = u_0 - \dot{y} \sin \alpha_0$ ,  $u_0 \Delta\alpha \sec \alpha_0 \approx -\dot{y}$ ,得到模型运动方程

$$m\ddot{y} + c\dot{y} + ky = \rho u_0^2 D [u_0^2 - 2u_0 \dot{y} \sin \alpha_0 + \dot{y}^2 \sin^2 \alpha_0] / u_0^2 \cdot (C_D(\alpha_0) \sin \alpha_0 + C_L(\alpha_0) \cos \alpha_0) / 2 + (u_0^2 - 2u_0 \dot{y} \sin \alpha_0 + \dot{y}^2 \sin^2 \alpha_0) / u_0^2 \cdot \frac{-\dot{y} \cos \alpha_0}{u_0} \left( \frac{\partial C_D(\alpha_0)}{\partial \alpha} \sin \alpha_0 + C_D \cos \alpha_0 + \frac{\partial C_L(\alpha_0)}{\partial \alpha} \cos \alpha_0 - C_L \sin \alpha_0 \right) \quad (11)$$

忽略  $\dot{y}$  的高阶量且略去方程右端静力部分

$\rho u_0^2 D (C_D(\alpha_0) \sin \alpha_0 + C_L(\alpha_0) \cos \alpha_0) / 2$ , 整理式(11)得

$$m\ddot{y} + \left\{ c + \rho D u_0 \left[ (C_D(\alpha_0) \sin \alpha_0 + C_L(\alpha_0) \cos \alpha_0) \sin \alpha_0 + \frac{1}{2} \left( \left( \frac{\partial C_D(\alpha_0)}{\partial \alpha} - C_L(\alpha_0) \right) \sin \alpha_0 + \left( C_D(\alpha_0) + \frac{\partial C_L(\alpha_0)}{\partial \alpha} \right) \cos \alpha_0 \right) \cos \alpha_0 \right] \right\} \dot{y} + ky = 0 \quad (12)$$

气动阻尼为负的等价条件为

$$\delta = (C_D \sin \alpha_0 + C_L \cos \alpha_0) \sin \alpha_0 + \frac{1}{2} \cos \alpha_0 \left( \left( \frac{\partial C_D}{\partial \alpha} - C_L \right) \sin \alpha_0 + \left( C_D + \frac{\partial C_L}{\partial \alpha} \right) \cos \alpha_0 \right) < 0 \quad (13)$$

若分析对象处于亚临界雷诺数边界, 气动力系数易受到雷诺数的影响<sup>[9]</sup>, 即式(6)中的气动力系数是风向角和风速的函数:  $C_{F_y}(\alpha, u)$ . 对  $C_{F_y}(\alpha_0 + \Delta\alpha, u_r)$  在  $\alpha_0, u_0$  处 Taylor 展开. 并取至 1 阶项

$$C_{F_y}(\alpha_0 + \Delta\alpha, u_r) = C_{F_y}(\alpha_0, u_0) + \frac{\partial C_{F_y}(\alpha_0, u_0)}{\partial \alpha} \Delta\alpha + \frac{\partial C_{F_y}(\alpha_0, u_0)}{\partial u} (u_r - u_0) \quad (14)$$

考虑到小量的影响,  $u_r = u_0 - \dot{y} \sin \alpha_0$ ,  $\Delta\alpha = -\dot{y} \cos \alpha_0 / u_0$ , 并忽略高阶小量的影响, 将式(5), (14)代入式(3), 整理得到运动方程的阻尼项为

$$c + \rho u_0 D (C_D \sin \alpha_0 + C_L \cos \alpha_0) \sin \alpha_0 + \frac{1}{2} \rho u_0 D \frac{\partial C_{F_y}}{\partial \alpha} \cos \alpha_0 + \frac{1}{2} \rho u_0^2 D \frac{\partial C_{F_y}}{\partial u} \sin \alpha_0$$

所以, 判断任意  $y$  方向的平动单自由度驰振的必要条件表述为

$$\delta = (C_D \sin \alpha_0 + C_L \cos \alpha_0) \sin \alpha_0 + \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial C_{F_y}(\alpha_0, u_0)}{\partial \alpha} \cos \alpha_0 + \frac{u_0}{2} \cdot \frac{\partial C_{F_y}(\alpha_0, u_0)}{\partial u} \sin \alpha_0 < 0 \quad (15)$$

式(15)可作为任意平动方向单自由度驰振的判别准则, 其中,  $\delta$  为驰振系数.

下面分别讨论横风向 ( $\alpha_0 = 0^\circ$ ) 和顺风向 ( $\alpha_0 = 90^\circ$ ) 两种特殊情况下的驰振系数.

横风向驰振判别准则的讨论: 将  $\alpha_0 = 0^\circ$  代入式(15). 考虑到公式(10), 令  $u_r = u_0$ , 并忽略高阶小量, 式(15)等效为  $\delta = C_D + \frac{\partial C_L}{\partial \alpha} < 0$ . 与式(1)的横风向驰振判别式完全相同. 由式(15)发现, 当  $\alpha_0 = 0^\circ$

时, 气动阻尼是由于风向角变化引起的, 因此可以认为, 横风向驰振是相对风向角变化引起的气动负阻尼造成的不稳定振动.

顺风向驰振判别准则的讨论: 将  $\alpha_0 = 90^\circ$  代入式(15), 式中的  $C_{F_y}$  即为传统意义上的阻力系数  $C_D$ . 忽略高阶小量, 式(15)等效为  $\delta = C_D + \frac{u_0}{2} \cdot \frac{\partial C_D}{\partial u} < 0$ , 即为顺风向驰振判别式. 由式(15)发现, 当  $\alpha_0 = 90^\circ$  时, 气动阻尼是由于相对风速变化引起的(式(15)右端第一项也是由于相对风速变化引起的, 参见公式(11)的推导), 可以认为, 顺风向驰振是相对风速变化引起的气动负阻尼造成的不稳定振动.

以上考虑覆冰导线雷诺数位于亚临界边界范围, 气动力系数受雷诺数影响的情况. 如果覆冰导线雷诺数对导线的阻力系数没有影响, 设  $u_r = u_0$ , 则式(15)可简化为

$$\delta = \left( \left( \frac{\partial C_D}{\partial \alpha} - C_L \right) \sin \alpha_0 + \left( C_D + \frac{\partial C_L}{\partial \alpha} \right) \cos \alpha_0 \right) \cos \alpha_0 < 0 \quad (16)$$

### 3 覆冰输电导线稳定性判定实例

以图1给出的通过试验获得的准椭圆形覆冰导线气动力系数<sup>[8]</sup>为依据, 分别分析其横风向驰振、扭转驰振及任意风向任意振动方向驰振稳定性.

#### 3.1 横风向和扭转驰振稳定性判别

图3和图4分别给出了该准椭圆形导线横风向 DenHartog 系数和 Nigol 系数.  $110^\circ \sim 140^\circ$  风向的横风向 DenHartog 系数  $\delta_D < 0$ , 因此, 风向在  $110^\circ \sim 140^\circ$  时, 模型截面满足 DenHartog 横风向驰振的必要条件, 并且属于出现概率较高的覆冰状况. 风向为  $80^\circ \sim 176^\circ$  时, 模型的 Nigol 系数  $\delta_N < 0$ , 对应工况存在 Nigol 扭转驰振的可能性. 最值得关注的是, 在  $172^\circ$  和  $174^\circ$  风向下的导线模型,  $\delta_N \ll 0$ , 临界风速相对较低, 同时考虑到  $172^\circ$  和  $174^\circ$  风向出现的可能较大, 发生扭转驰振的可能性很大.

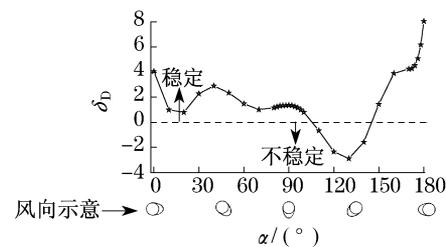


图3 横风向时的  $\delta_D$

Fig.3 DenHartog coefficients

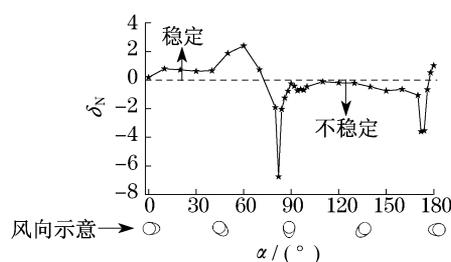
图4 Nigol系数  $\delta_N$ 

Fig.4 Nigol coefficients

### 3.2 任意方向平动单自由度驰振稳定性分析

图1中,准椭圆形覆冰导线风洞试验雷诺数  $Re = 4.79 \times 10^4$ ,处于亚临界区,可不考虑雷诺数变化对气动力系数的影响.假设  $u_r = u_0$ ,可采用式(16)分析任意方向驰振稳定性.

图5给出任意方向平动单自由度驰振模型示意图,  $\alpha = 0^\circ \sim 180^\circ$ .考察覆冰导线沿  $y_1, y_2, y_3$  三个方向发生驰振的可能性,  $y_1$  与模型  $x$  轴正方向同向,  $y_2$  与  $x$  轴呈  $45^\circ$  夹角,  $y_3$  与模型  $y$  轴正方向同向.

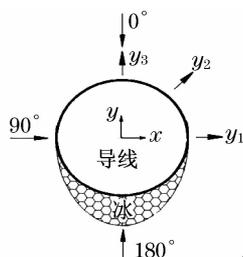


图5 驰振模型示意图

Fig.5 Diagram of galloping model

图6给出不同风向(风向参考图5)下  $y_1, y_2$  和  $y_3$  三个方向的驰振系数,并以横风向驰振系数为对比.从图6可见,横风向的  $\delta_D$  可找到部分不稳定风向角,但无法得到其他振动方向的驰振不稳定信息.如  $130^\circ$  风向角下,  $y_1$  和  $y_3$  方向也可能出现不稳定振动.

覆冰导线驰振的方向与覆冰形状密切相关,因此在特定风向角下,驰振的可能振动方向需通过分析力系数确定.下面采用任意风向、任意振动方向的驰振系数来判别典型风向角下不同振动方向的驰振可能性.由于多数导线迎风覆冰,并随着覆冰厚度增加产生偏心扭转,因此,  $90^\circ \sim 180^\circ$  风向较为常见.图7给出了  $90^\circ \sim 180^\circ$  风向下,准椭圆覆冰导线各个振动方向的驰振系数,以  $y_1$  方向为起始方向,定义为  $0^\circ$  振动方向,  $15^\circ$  等间隔逆时针旋转,至  $y_1$  反方向,定义为  $180^\circ$  振动方向.

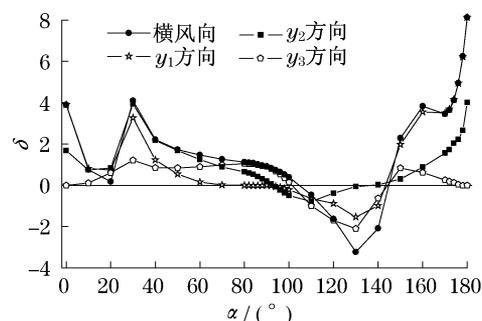


图6 不同振动方向的驰振系数

Fig.6 Galloping coefficients in different vibration directions

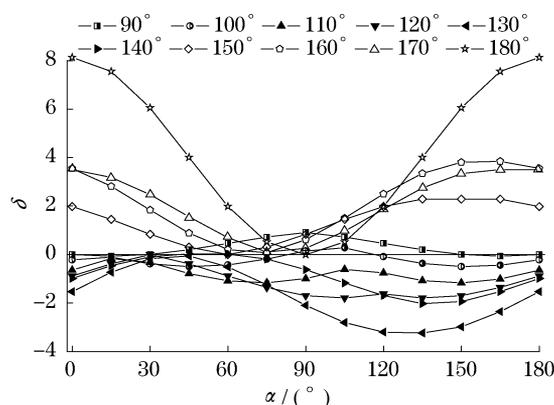


图7 准椭圆形覆冰导线驰振系数

Fig.7 Galloping coefficients of quasi-oval iced conductors

按  $\delta$  与 0 的大小关系,可将图7的10条曲线分为三组,第一组,整条曲线位于零线以下(图中的实心图例),说明在该风向角下,各个方向气动阻尼均为负值,都有驰振的可能,包括  $110^\circ, 120^\circ, 130^\circ$  和  $140^\circ$  风向角;第二组,曲线部分位于零线以下(图中的半实心图例),部分位于零线以上,意味着该风向角下,部分振动方向的气动阻尼为负值,有驰振可能,包括  $90^\circ$  和  $100^\circ$  风向角;第三组,整条曲线位于零线以上,各个方向气动阻尼均为正值,不会发生单自由度驰振,包括  $150^\circ, 160^\circ, 170^\circ$  和  $180^\circ$ .第一组曲线所对应的风向角发生驰振的可能性较大,这与图3的横风向驰振可能性分析一致,但图7可进一步确定发生驰振可能性最大的方向,如  $110^\circ$  和  $120^\circ$  风向角对应于  $150^\circ$  和  $135^\circ$  振动方向的  $\delta$  值最小.第二组曲线对应的风向角有驰振可能性,该部分信息从图3的横风向驰振分析无法得到,例如  $90^\circ$  和  $100^\circ$  风向角下在  $165^\circ$  振动方向有驰振可能.图7可以很好反映准椭圆形导线的不稳定风向角和有可能驰振的振动

方向,对防止导线舞动有一定的意义.例如,在最可能发生舞动的振动方向施加约束或提高阻尼,将极大地提高导线舞动的临界风速,从而限制导线驰振.

## 4 结论

(1) 任意方向平动单自由度驰振,在理论上是可能发生的.

(2) 采用本文推导的任意风向任意振动方向驰振判别式,不仅可以找到可能发生驰振的风向,而且可以确定不稳定振动方向.

### 参考文献:

- [1] 郭应龙,李国兴,尤传永.输电线路舞动[M].北京:中国电力出版社,2003.  
GUO Yinglong, LI Guoxing, LONG Chuanyong. Galloping of transmission line[M]. Beijing: China Power Press, 2003.
- [2] DenHartog J P. Mechanical vibrations[M]. 4th ed. New York: McGraw Hill, 1956.
- [3] Nigol O, Buchan P G. Conductor galloping-part II: torsional

mechanism [J]. Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions, 1981, 100(2): 708.

- [4] Yu P, Shah A H, Popplewell N. Inertially coupled galloping of iced conductors[J]. Journal of Applied Mechanics—Transactions of the Asme, 1992, 59(1): 5.
- [5] Yu P, Popplewell N, Shah A H. Instability trends of inertially coupled galloping: Part II: Periodic vibrations[J]. Journal of Sound and Vibration, 1995, 183(4): 679.
- [6] Macdonald J H G, Larose G L. A unified approach to aerodynamic damping and drag/lift instabilities, and its application to dry inclined cable galloping[J]. Journal of Fluids and Structures, 2006, 22(2): 229.
- [7] Simiu E, Scanlan R H. Wind effects on structures[M]. 3rd ed. New York: John Wiley and Sons, 1996.
- [8] 顾明, 马文勇, 全涌, 等. 两种典型覆冰导线气动力特性及稳定性分析[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2009, 37(10): 1328.  
GU Ming, MA Wenyong, QUAN Yong, et al. Aerodynamic force characteristics and stabilities of two typical iced conductors[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2009, 37(10): 1328.
- [9] Engineering Science Data Unit. Mean forces, pressures and flow field velocities for circular cylindrical structures: single cylinder with two-dimensional flow [R]. London: Information Handling Service, 1980.

(上接第53页)

### 参考文献:

- [1] WANG Yalong. Ground response of circular tunnel in poorly consolidated rock [J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1996, 122(9): 703.
- [2] Jiang Y, Yonedah H, Tanabshi Y. Theoretical estimation of loosening pressure on tunnels in soft rocks [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2001, 16(2): 99.
- [3] 任青文, 张宏朝. 关于芬纳公式的修正[J]. 河海大学学报, 2001, 29(6): 109.  
REN Qingwen, ZHANG Hongchao. A modification of Fanner formula[J]. Journal of Hohai University, 2001, 29(6): 109.
- [4] 许东俊, 耿乃光. 岩石强度随中间主应力变化规律[J]. 固体力学学报, 1985, 6(1): 72.  
XU Dongjun, GENG Naiguang. The variation law of rock strength with increase of intermediate principal stress [J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 1985, 6(1): 72.
- [5] 俞茂宏. 双剪理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 1998.  
YU Maohong. Twin-shear theory and its application [M]. Beijing: Science Press, 1998.
- [6] YU Maohong. Unified strength theory and its applications[M].

Berlin: Springer, 2004.

- [7] 张常光. 圆形压力隧洞弹塑性应力和位移分析[D]. 西安: 长安大学建筑工程学院, 2008.  
ZHANG Changguang. Analysis of elastic-plastic stress and displacement for circular pressure tunnel[D]. Xi'an: Chang'an University. School of Civil Engineering, 2008.
- [8] 蒋明镜, 沈珠江. 岩土类软化材料的柱形孔扩张统一解问题[J]. 岩土力学, 1996, 17(1): 1.  
JIANG Mingjing, SHEN Zhujiang. Unified solution of expansion of cylindrical cavity for geometries with strain softening behaviour[J]. Rock and Soil Mechanical, 1996, 17(1): 1.
- [9] 蔡晓鸿, 蔡勇平. 水工压力隧洞结构应力计算[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004.  
CAI Xiaohong, CAI Yongping. Structure stress calculation for hydraulic pressure tunnel [M]. Beijing: China Water Power Press, 2004.
- [10] 陈昌富, 肖淑君, 杨宇. 考虑应变软化厚壁圆筒受外压作用统一极限解[J]. 湖南大学学报, 2006, 33(2): 1.  
CHEN Changfu, XIAO Shujun, YANG Yu. Unified limit solution of thick wall cylinder subject to external pressure considering strain softening [J]. Journal of Hunan University, 2006, 33(2): 1.