

文章编号: 1000-4750(2013)Suppl-0279-05

# 力变形下螺旋槽干气密封气膜流场近似计算及分析

苏 虹, 丁雪兴, 张海舟, 吴 昊, 刘 勇

(兰州理工大学石油化工学院, 甘肃, 兰州 730050)

**摘 要:** 基于滑移边界条件下的雷诺方程, 不考虑密封环的变形, 力平衡的条件下, 利用迭代法求解获得密封腔内气膜压力函数式; 根据微尺度流体流动过程中压力及转速的变化, 得到不同压力下的密封面的转角及变形量的分布规律, 获得相应的气膜厚度近似表达式。同时, 在广义雷诺方程下, 求出无变形时理论泄露量。利用 Maple 程序求解, 得到不同压力下的密封环力变形泄露量, 并与理论值进行比对。研究表明: 随气体从外径流入内径, 泄露量随着压力的增大而增大; 相同工况下, 与无变形泄露量相比, 有变形的泄露量更接近于实验值, 从而对密封性能产生影响。

**关键词:** 干气密封; 力变形; 泄露量; 气膜厚度; Maple 程序

中图分类号: TH136 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2012.05.S035

## GAS MEMBRANE FLOW FIELD APPROXIMATE CALCULATION AND ANALYSIS OF SPIRAL GROOVE DRY GAS SEAL ON THE FORCE DISTORTION

SU Hong, DING Xue-xing, ZHANG Hai-zhou, WU Hao, LIU Yong

(College of Petrochemical Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu 730050, China)

**Abstract:** The pressure distributions function is obtained not considering the seal rings' deformation, based on the Reynolds equation under the slid boundary conditions. Changing with the revolving speeds and pressure of fluid in the spiral groove, the corners and deformations of the sealing surface distributions are solved, and the approximate analytic of the corresponding gas film thickness is obtained. Meanwhile, the theoretical leakage not considering forced deformation is obtained by using the Generalized Reynolds Equation. The Maple software is applied to solve the leakages with the forced deformation in the seal ring. The leakages are calculated out and compared with the theoretical values under different pressures. The result shows that with an increasing of pressure, the leakage is increased along the radial from the outside to inside. In the same condition, the leakage considering forced deformation is closer to the experimental values, compared with theoretical values. Thus it affects the sealing performance.

**Key words:** dry gas seal; forced deformation; leakage; gas film thickness; Maple program

螺旋槽干气密封是一种非接触式密封。随着螺旋槽干气密封性能研究的不断深入<sup>[1-3]</sup>, 其应用范围从常温、常压扩大到高温、高压(如核电设备的轴

端干气密封)。大压降引起的力变形影响着气膜流动的规律<sup>[4]</sup>。考虑干气密封的力变形, 对改进干气密封设计有重要的意义<sup>[5]</sup>。因此, 引发了关于干气密

收稿日期: 2012-05-01; 修改日期: 2012-12-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(51165020)

通讯作者: 丁雪兴(1964—), 男, 江苏苏州人, 教授, 博士, 博导, 主要从事流体动密封和机械振动研究(E-mail: dingxx1@163.com).

作者简介: 苏 虹(1987—), 女(满族), 辽宁抚顺人, 硕士生, 主要从事流体动密封和机械振动的研究(E-mail: suh725@163.com);

张海舟(1986—), 男, 河南周口人, 硕士生, 主要从事流体动密封及机械振动的研究(E-mail: haizhou27@163.com);

吴 昊(1989—), 男, 黑龙江齐齐哈尔人, 硕士生, 主要从事流体动密封及机械振动的研究(E-mail: haoge1237@163.com);

刘 勇(1987—), 男, 河南驻马店人, 硕士生, 主要从事流体动密封及机械振动的研究(E-mail: liuyong7805801@126.com).

封力变形问题的研究。

早期研究者主要侧重于机械密封的力变形研究<sup>[6-7]</sup>。Stolarski 等<sup>[8-9]</sup>研究了人字形槽液体润滑密封和气体普通密封的力变形问题,发现了力变形对端面流体膜的产生和保持非常重要。丁雪兴<sup>[10]</sup>等在无力变形下,建立了微尺度理论下的非线性雷诺方程,利用多目标优化方法优化出了螺旋角的最佳值,研究了微槽道内流体的动力学行为。迄今为止,少见将力变形理论应用到干气密封特性计算中。

本文着重研究微尺度内力变形下螺旋槽干气密封的流动特性。在平衡的条件下,根据压强与外力作用,利用迭代法求出密封腔内气膜压力分布,计算出力变形下密封环的变形量,进而获得密封间隙的近似解析式,得到干气密封在力变形下的泄漏量。

### 1 无力变形下,螺旋槽内气膜动压

无力变形下,考虑滑移边界条件的雷诺方程表达式为:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{ph^3}{\mu} (1+6kn') \frac{\partial p}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \frac{ph^3}{\mu} (1+6kn') \frac{\partial p}{\partial y} \right] = 6U_0 \frac{\partial(\rho h)}{\partial x} \quad (1)$$

将式(1)无量纲化为:

$$\frac{\partial}{\partial \varphi} \left[ PH^3 \frac{\partial P}{\partial \varphi} \right] + \frac{\partial}{\partial \zeta} \left[ PH^3 \frac{\partial P}{\partial \zeta} \right] = \chi \frac{\partial(PH)}{\partial \varphi} \quad (2)$$

其中:  $x = R_1 \varphi$ ,  $y = R_1 \zeta$ ,  $U_0 = 2\pi n_r R_1$ ,

$$\Lambda = \frac{12\pi\mu n_r R_1^2}{p_i (h_b + E')^2}, \quad h = H(h_b + E'),$$

$$\chi = \frac{\Lambda}{(1+6kn')}。$$

利用 PH 线性化方法、迭代法对非线性雷诺方程式(2)近似求解,获得如下气膜压力函数式<sup>[11]</sup>:

$$P = \psi_2 / H = 1 + \eta(\eta_{1(\zeta)} \cos\omega + \eta_{2(\zeta)} \sin\omega) / H - \frac{3}{2} \beta_0 \eta^2 \eta_{2(\zeta)} (\zeta_0 - \zeta) \quad (3)$$

## 2 静环受力分析及变形计算

### 2.1 密封环的受力分析

弹簧力、气膜反力、介质压力的作用分布如图1所示,根据近似解析式(3),得到气膜压力分布作用在图1中。

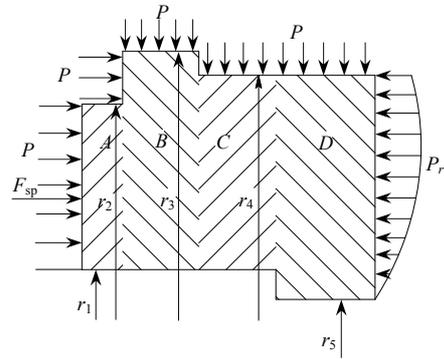


图1 静环的力学模型图

Fig.1 The mechanics model picture of the static ring

### 2.2 静环的形心坐标计算

如图2所示:

$$x_1 = \frac{l_1}{2}, \quad x_2 = l_1 + \frac{l_2}{2}, \quad x_3 = l_1 + l_2 + \frac{l_3}{2}, \quad x_4 = l_1 + l_2 + l_3 + \frac{l_4}{2} \quad (4)$$

$$y_1 = \frac{r_2 - r_1}{2} + (r_1 - r_5), \quad y_2 = \frac{r_3 - r_1}{2} + (r_1 - r_5), \quad y_3 = \frac{r_4 - r_1}{2} + (r_1 - r_5), \quad y_4 = \frac{r_4 - r_5}{2} \quad (5)$$

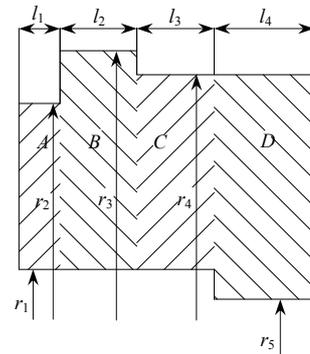


图2 螺旋槽干气密封静环尺寸

Fig.2 The size of the static ring in the spiral groove dry gas seal

截面积:

$$A_1 = l_1(r_2 - r_1), \quad A_2 = l_2(r_3 - r_1), \quad A_3 = l_3(r_4 - r_1), \quad A_4 = l_4(r_5 - r_1) \quad (6)$$

总面积:

$$\sum A = A_1 + A_2 + A_3 + A_4 = A \quad (7)$$

计算环的形心:

$$x_c = (x_1 A_1 + x_2 A_2 + x_3 A_3 + x_4 A_4) / A \quad (8)$$

$$y_c = (y_1 A_1 + y_2 A_2 + y_3 A_3 + y_4 A_4) / A \quad (9)$$

$$r_c = y_c + r_5 \quad (10)$$

### 2.3 静环力矩计算

1) 简化成集中力并求单位形心圆周长度上作用力(如图3所示):

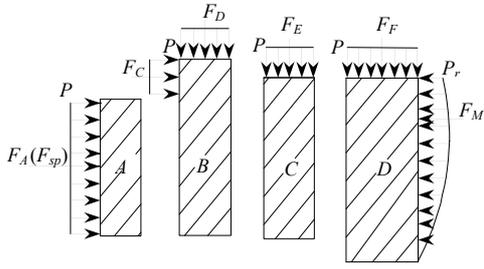


图3 各单元简化成集中力图

Fig.3 The pictures of the simplified focus in each units

$$\begin{aligned}
 F_A &= p\pi(r_2^2 - r_1^2) / 2\pi r_c, & F_B &= 2\pi p r_2 l_1 / 2\pi r_c, \\
 F_C &= p\pi(r_3^2 - r_2^2) / 2\pi r_c, & F_D &= 2\pi p r_3 l_2 / 2\pi r_c, \\
 F_{sp} &= F_e / 2\pi r_c, & F_M &= P_r \pi(r_4^2 - r_5^2) / 2\pi r_c \quad (11)
 \end{aligned}$$

作用位置  $x_i$ 、 $y_i$ 、 $R_i$  :

$$\begin{aligned}
 y_A &= \frac{1}{2}(r_2 - r_1) + (r_1 - r_5), & R_A &= y_A + r_5; \\
 y_C &= \frac{1}{2}(r_3 - r_2) + (r_2 - r_5), & R_C &= y_C + r_5; & x_B &= x_1; \\
 x_D &= x_2; & x_E &= x_3; & x_F &= x_4; & y_{sp} &= y_A; & R_{sp} &= y_{sp} + r_5; \\
 y_M &= r_M - r_5; & R_M &= y_M + r_5 \quad (12)
 \end{aligned}$$

2) 求对  $x$  轴的惯性矩:

$$\begin{aligned}
 J_1 &= l_1(r_2 - r_1) / 12 + A_1(x_c - x_1)^2, \\
 J_2 &= l_2(r_3 - r_1) / 12 + A_2(x_c - x_2)^2, \\
 J_3 &= l_3(r_4 - r_1) / 12 + A_3(x_c - x_3)^2, \\
 J_4 &= l_4(r_4 - r_5) / 12 + A_4(x_c - x_4)^2, \\
 J_5 &= \int_A (P_r)^2 dA \quad (13)
 \end{aligned}$$

$$J = \sum J_i = J_1 + J_2 + J_3 + J_4 + J_5 \quad (14)$$

3) 求通过形心的力矩:

$$\begin{aligned}
 M_A &= F_A(r_c - R_A), & M_B &= F_B(x_c - x_B), \\
 M_C &= F_C(r_c - R_C), & M_D &= F_D(x_c - x_D), \\
 M_E &= F_E(x_c - x_E), & M_E &= F_E(x_c - x_E), \\
 M_F &= F_F(x_c - x_F), & M_{sp} &= F_{sp}(r_c - R_{sp}), \\
 M_M &= F_M(r_c - R_M) \quad (15)
 \end{aligned}$$

$$M = \sum M_A + M_B + M_C + M_D + M_E + M_F + M_{sp} + M_M \quad (16)$$

### 2.4 变形计算

折合成简单的矩形断面, 其形心不变:

$$x_c = \sum x_i A_i / \sum A_i, \quad y_c = \sum y_i A_i / \sum A_i$$

矩形长度为:

$$L = l_1 + l_2 + l_3 + l_4 \quad (17)$$

矩形宽度为:

$$b' = \sum A / L \quad (18)$$

密封面转角为:

$$\varphi_p = \frac{12M y_c}{EL^3 \ln(R_o / R_i)} \quad (19)$$

静环变形量的最大值  $\delta_{max}$  为:

$$\delta_{max} = (R_o - R_i) \varphi_p$$

密封面的变形量  $\delta$  为:

$$\delta = R_i \varphi_p (\zeta - 1).$$

## 3 力变形下, 螺旋槽内气膜流场计算

### 3.1 气膜厚度计算

无力变形时, 气膜厚度  $h_b$  为常数, 当有力变形时, 气膜厚度  $h_b$  为变量, 其表达式为:

$$h_b = h_{min} + \delta_{max} - \delta \quad (20)$$

式中,  $h_b$ 、 $h_{min}$ 、 $\delta_{max}$ 、 $\delta$  之间关系的几何结构图如图4所示。

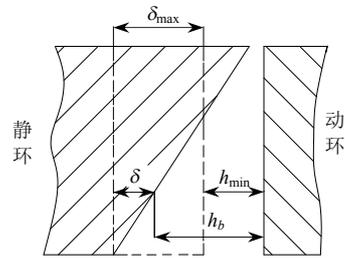


图4 气膜厚度几何结构图

Fig.4 The geometric structure of the gas film thickness

干气密封中的开启力如下:

$$\begin{aligned}
 F_o &= 2\pi \int_{R_i}^{R_o} r p dr = \\
 & \left[ \frac{p_i}{1 - \varepsilon_z \cos \varphi - \frac{E' \cos \omega}{E' + h_b}} + \frac{\frac{E' p_i}{E' + h_b} (\eta_{1(\zeta)} \cos \omega + \eta_{2(\zeta)} \cos \omega)}{1 - \varepsilon_z \cos \varphi - \frac{E' \cos \omega}{E' + h_b}} - \right. \\
 & \left. \frac{3}{2} \beta_0 \left( \frac{E'}{E + h_b} \right)^2 \eta_{2(\zeta)} (\zeta_0 - \zeta) p_i \right] (\pi R_o^2 - \pi R_i^2) \quad (21)
 \end{aligned}$$

力变形后, 静环气膜间建立了新的平衡态。密封环平衡时, 气膜开启力  $F_o$  等于闭合力  $F_c$ , 即:

$$F_o = F_c$$

闭合力等于静环背侧面介质压力与弹簧力之和, 即:

$$F_c = F_p + F_{sp} \quad (22)$$

由式(21)、式(22)可得到:

$$F_o = p_o A + F_{sp} \quad (23)$$

其中:  $A$  为静环侧面的面积;  $F_{sp}$  为弹簧力。根据上式求出力平衡时, 最小的气膜厚度  $h_{min}$ 。

### 3.2 力变形下的泄漏量计算

有变形下的气膜压力:

$$P_b = \psi_2 / H = 1 + \eta_b (\eta_{1(\zeta)} \cos \omega + \eta_{2(\zeta)} \sin \omega) / H - \frac{3}{2} \beta_0 \eta_b^2 \eta_{2(\zeta)} (\zeta_0 - \zeta) \quad (24)$$

式中:  $\eta_b = \frac{E'}{E' + h_b}$ 。

径向流量:

$$Q = \int_0^h 2\pi v R_i dz = -\frac{(1 + 6kn')\pi p_i h^3}{6\mu} \frac{\partial P_b}{\partial \zeta} \quad (25)$$

泄漏量:

$$Q|_{\zeta=1} = -\frac{(1 + 6kn')\pi}{6} \left( \frac{\partial P_b}{\partial \zeta} \right)_{\zeta=1} \quad (26)$$

## 4 工程实例计算及试验分析

### 4.1 工程实例计算

样机尺寸<sup>[12]</sup>: 内径 156.3mm; 外径 197.5mm; 根径 149mm; 螺旋槽数量 12 个; 螺旋槽深度 4μm; 螺旋角 20°36'; 密封环的材料为石墨环。

实验工艺参数: 介质压力  $p_0 = 5\text{MPa}$ , 介质气体为  $N_2$ , 转速 10747r/min,  $F_{sp} = 50\text{N}$ 。

经计算得到环的形心为:

$$x_c = 7.277\text{mm}, \quad y_c = 11.663\text{mm}, \quad r_c = 86.163\text{mm}$$

各单元对  $x$  轴的惯性矩之和:  $J = 10783.793\text{mm}^4$

通过形心的力矩之和:  $M = -179.073\text{N} \cdot \text{m/m}$

矩形的长度:  $L = 13.5\text{mm}$

矩形的宽度:  $b' = 17.7\text{mm}$

密封面转角:  $\varphi_p = -0.00299$

密封面最大变形量:  $\delta_{\max} = -61.658\mu\text{m}$

$\delta$  与无量纲极径  $\zeta$  的解析关系式:

$$\delta = 224.096\zeta - 224.074 \quad (27)$$

利用 Maple 程序求解, 得到气膜厚度的最小值为:  $h_{\min} = 3.023\mu\text{m}$ , 密封环力变形后, 气膜厚度  $h_b$  与无量纲极径  $\zeta$  的解析关系式为:

$$h_b = -224.096\zeta + 165.439 \quad (28)$$

运用 Maple 程序, 由式(28), 利用式(24)、式(26), 当介质压力为 5MPa 时, 计算出力变形下的泄漏量为  $0.4563\text{m}^3/\text{h}$ 。

### 4.2 试验分析

将无变形的气膜厚度和力变形下的气膜厚度分别代入到式(26)中, 利用 Maple 程序, 计算了两种情况下不同压力的理论泄漏量。同时, 测试了样

机随工质压力变化的实测密封泄漏量。

取样机进行实验研究, 获得了不同情况下的泄漏量(如图 5)。为了更清楚的表示三种情况下流量与压力间的关系、以及相同压力下不同气膜厚度下的泄漏量, 将无变形理论流量、有变形理论流量与实测流量用曲线表示。

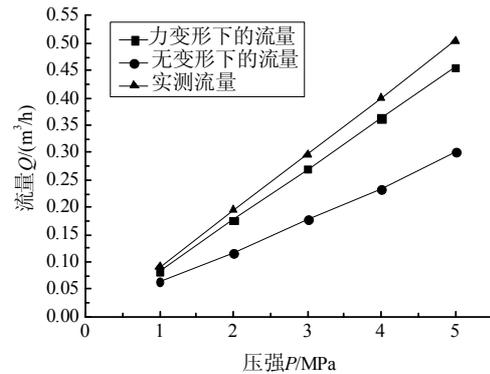


图 5 泄漏量  $Q$  随压力  $P$  变化曲线

Fig. 5 The relationship with the leakage and pressure

从图 5 可看出随介质压力的增大, 密封环的泄漏量增大; 有力变形的泄漏量理论计算值与无变形的理论计算值相比, 两者最大相对误差分别为 9.65% 和 41.61%。由此可知, 有力变形的泄漏量理论计算值相对误差较小, 比无变形的泄漏量更接近于实测泄漏量。

## 5 结论

(1) 随着介质压力(外压)增大, 干气密封的泄漏量随之增大。高压影响着密封的稳定性, 对密封性能的要求更高。

(2) 相同工况下, 干气密封中, 有力变形的泄漏量大于无变形的泄漏量; 与无变形的泄漏量相比, 有变形的泄漏量更接近于实验数值。

因此, 应用力变形理论来解决工程实践中的一些高速高压问题是十分必要的。

符号说明:

$E$  为弹性模量;  $E'$  为槽深的 1/2;  
 $F_{sp}$  为静环的弹簧力;  $H$  为无量纲密封间隙;  
 $P$  为无量纲气膜压力;  $P_0$  为无量纲介质压力;  
 $R_i$  为密封环内径;  $R_0$  为密封环外径;  
 $h$  为密封间隙;  $h_b$  为气膜厚度;  
 $h_{\min}$  为气膜厚度最小值;  
 $kn'$  为努森数;  $n_r$  为轴的转速;  
 $p_i$  为环境压力(内压);  $p_0$  为介质压力(外压);

$\delta$  为变形量;  $\delta_{\max}$  为变形量的最大值;  
 $\zeta$  为无量纲极径;  $\eta$  为槽深变化相对幅度;  
 $\mu$  为介质的动力粘度;  $\varphi$  为无量纲极角;  
 $\chi$  为一阶滑移边界条件下可压缩性修正系数;  
 $\Lambda$  为可压缩性参数。

## 参考文献:

- [1] Gad-el-Hak M. The fluid mechanics of micro devices—The freeman scholar lecture [J]. Transactions of the ASME, Journal of Fluids Engineering, 1999, 121(1): 5—33.
- [2] Gad-el-Hak M. Flow physics in MEMS [J]. Mecanique and Industries, 2001, 2(4): 313—341.
- [3] Kassner M E, Nemat-Nasser S, Suo Z, et al. New directions in mechanics [J]. Mechanics of Materials, 2005, 37(2/3): 231—259.
- [4] Beskok A, Karniadakis G E, Trimmer W. Rarefaction and compressibility effects in gas micro flows [J]. Journal of Fluids Engineering, 1996, 118(5): 448—456.
- [5] 张宝忠, 肖敏. 内置式机械密封变形分析与计算[J]. 机械设计与制造, 2003, (1): 62—63.  
 Zhang Baozhong, Xiao Min. Analysis and calculation of inside mechanic seal deformation [J]. Machinery Design & Manufacture, 2003, (1): 62—63. (in Chinese)
- [6] 顾永泉. 机械端面密封[M]. 东营: 石油大学出版社, 1994.  
 Gu Yongquan. Mechanical face seal [M]. Dongying: University of Petroleum Press, 1994. (in Chinese)
- [7] 张书贵, 顾永泉. 机械密封变形的研究[J]. 石油大学学报(自然科学版), 1992, 16(2): 48—53.  
 Zhang Shugui, Gu Yongquan. Study on the deformation of mechanical face seal [J]. Journal of the University of Petroleum, China, 1992, (2): 48—53. (in Chinese)
- [8] Stolarski T A, Xue Y. [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part J: Journal of Engineering Tribology, 1998, 212(4): 279—290.
- [9] 王美华, 董勋. 人字形螺旋槽机械密封热变形及力变形[J]. 流体工程, 1992, 20(5): 34—38.  
 Wang Meihua, Dong Xun. Thermal and mechanical deformations of herringbone spiral groove mechanical seal [J]. Fluid Engineering, 1992, 20(5): 34—38. (in Chinese)
- [10] 丁雪兴, 陈德林, 张伟政, 俞树荣, 杜兆年. 螺旋槽干气密封微尺度流动场的近似计算及其参数优化[J]. 应用力学学报, 2007, 24(3): 425—428.  
 Ding Xuexing, Chen Delin, Zhang Weizheng, Yu Shurong, Du Zhaonian. Approximate calculation and parameters optimization for micro-scale flow field in spiral grooved gas seal [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2007, 24(3): 425—428. (in Chinese)
- [11] 丁雪兴, 蒲军军, 韩明君, 等. 基于二阶滑移边界的螺旋槽干气密封气膜刚度计算与分析[J]. 机械工程学报, 2012, 47(23): 119—124.  
 Ding Xuexing, Pu Junjun, Han Mingjun, et al. Calculation and analysis of gas film stiffness in the spiral groove gas seal based on the second order slip boundary [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 47(23): 119—124. (in Chinese)
- [12] 丁雪兴. 干气密封螺旋槽润滑气膜的稳、动态特性研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2008.  
 Ding Xuexing. Spiral groove gas seal lubrication film stability dynamic characteristics [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2008. (in Chinese)

(上接第 278 页)

- [6] GB 50260-96, 电力设施抗震设计规范[S]. 北京: 1996.  
 GB 50260-96, Code for design of seismic of electrical installations [S]. Beijing: China Planning Press, 1996. (in Chinese)
- [7] 邓洪洲, 陈晓明, 屠海明, 等. 江阴大跨越输电塔模型实验研究[J]. 建筑结构学报, 2001, 22(6): 31—35.  
 Deng Hongzhou, Chen Xiaoming, Tu Haiming, et al. Experimental study on model of Jiangyin long span transmission tower [J]. Journal of Building Structures, 2001, 22(6): 31—35. (in Chinese)
- [8] 沈世钊, 徐崇宝, 赵臣. 悬索结构设计[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997: 67—80.  
 Shen Shizhao, Xu Chongbao, Zhao Chen. Design of suspension cable structure [M]. Beijing: China Building Industrial Press, 1997: 67—80. (in Chinese)
- [9] Tian L, Li H N, Liu G H. Seismic response of power transmission tower-line system subjected to spatially varying ground motions [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2010, Article ID 587317: 1—20.
- [10] 柳国环, 李宏男, 林海. 结构地震响应计算模型比较与分析[J]. 工程力学, 2009, 26(2): 10—15.  
 Liu Guohuan, Li Hongnan, Lin Hai. Comparison and evaluation of models for structural seismic responses analysis [J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(2): 10—15. (in Chinese)
- [11] 柳国环, 李宏男, 国巍, 田利. 求解结构地震响应位移输入模型中存在问题的一种新解决方法[J]. 工程力学, 2010, 27(9): 55—62.  
 Liu Guohuan, Li Hongnan, Guo Wei, Tian Li. A new method for solving problem of current displacement input model for calculating structural seismic responses [J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(9): 55—62. (in Chinese)
- [12] Hao H, Oliveira C S, Penzien J. Multiple-station ground motion processing and simulation based on SMART-1 array data [J]. Nuclear Engineering and Design, 1989, 111: 293—310.