

# 山地地形对输电塔风振响应的影响

李正良, 魏奇科, 孙毅

(重庆大学 土木工程学院, 重庆市 沙坪坝区 400045)

## Influences of Mountain Topography on Response to Wind-Induced Vibration of Transmission Tower

LI Zhengliang, WEI Qike, SUN Yi

(College of Civil Engineering, Chongqing University, Shapingba District, Chongqing 400045, China)

**ABSTRACT:** In wind-resistant design of transmission towers the influence of terrain on wind field must be considered. The influence of typical terrain on close to ground wind field is retrospectively analyzed in details and currently wind load specifications adopted in all developed countries and regions are compared and analyzed in depth, then it is found that the specifications drafted by different countries basically originate in the same thinking, but the proposed models that describe the influence of terrain on wind field diverse from each other. Foreign wind load specifications are compared with that executed in China to offer reference for wind-resistant design of power facilities in China. Analysis results of wind-induced vibration of a certain UHVAC large-span transmission tower in China show that the mountain topography greatly influences wind field, and then it also greatly influences the response to wind-induced vibration of transmission tower. The displacement response of transmission tower under mountain topography increases within the range from 23.0% to 59.6% than that in flat terrain.

**KEY WORDS:** transmission tower; response to wind-induced vibration; topography influence; wind velocity; turbulent intensity

**摘要:** 在输电塔电力设施的抗风设计中, 必须考虑地形对风场的影响。详细回顾了典型地形对近地风场的影响, 对所有发达国家和地区的现行风荷载规范进行了深入对比分析, 发现各国规范的制定思路基本相同, 但提出的地形对风场影响的模型各不相同, 并与我国风荷载规范进行了比较, 为我国电力设施抗风设计提供了参考。某特高压大跨越输电塔的风振分析实例结果表明, 山地地形对风场有很大影响, 进而对输电塔的风振响应也有很大影响, 山地地形下输电塔的位置响应比平地增大约 23.0%~59.6%。

**关键词:** 输电塔; 风振响应; 地形影响; 风速; 湍流度

基金项目: 国家自然科学基金项目(90715024)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (90715024).

## 0 引言

随着我国西电东输战略的实施, 输送电压越来越高, 输送距离越来越长, 这导致特高压大跨越输电塔不断涌现, 输电塔高度不断增加, 跨越距离不断增大, 输电塔的抗风问题日益凸显<sup>[1-2]</sup>。同时, 由于我国地形复杂多变, 山地地形约占国土面积的 70%, 与平地地形不同, 山地地形对近地风场必然造成很大的影响, 这对输电塔在山地风场下的安全性提出了新的要求。因此, 评估山地地形对风场的重要影响, 解决山地地形下输电塔的抗风设计问题, 成为迫切需要解决的课题。

各国建筑结构荷载规范是各国近期研究的总结和应用, 具有很高的参考价值。本文将详细回顾国内外山地风场的研究现状, 对中国《建筑结构荷载规范》<sup>[3]</sup>、美国规范<sup>[4]</sup>、加拿大规范<sup>[5]</sup>、国际 ISO 标准<sup>[6]</sup>、欧洲规范<sup>[7]</sup>、日本规范<sup>[8]</sup>、澳大利亚、新西兰规范<sup>[9]</sup>等多种最新的现行建筑结构荷载规范中关于风场地形影响的条文进行深入对比分析, 发现各国规范地形影响系数的制定思路不尽相同, 各参数的取值也有较大差异, 并运用频域分析方法对某特高压大跨越输电塔实例进行计算, 得出山地地形对输电塔风振响应的影响范围。

## 1 国内外山地风场研究进展

早在 20 世纪 70 年代, DeBray 进行了模拟单个斜坡和陡坡流动的风洞试验研究, 给出了斜坡上、下游不同高度处的风速模型<sup>[10]</sup>。Bowen 等人更为详细地研究了不同坡度角对风剖面的影响, 验证了 DeBray 的试验结果<sup>[11]</sup>。Jackson 等人通过理论与数值研究, 得到了平面对称小山的风剖面模型<sup>[12-13]</sup>,

并用一个无量纲参数表示了山体对上游风速的扰动，导出了越过陡坡的风剖面规律，指出风剖面模型可用于长度小于 10 km，坡度小于 20°的陡坡。Mason 等将文献[13]的解析方法推广到3维小山<sup>[14]</sup>。随后，Taylor 总结了早期的研究成果，并运用混合谱有限差分法及非线性混合谱有限差分法对山地风流动进行了一系列计算，结合风洞试验结构进行了分析，提出了新的山地风计算模型<sup>[15-16]</sup>。随着风洞技术的发展，山地风场试验研究越来越多，越来越精确。William David Lubitz 等进行了山地风场精确的试验研究，考虑了不同山体模型和风向的影响，并与现场实测结果进行了对比<sup>[17]</sup>。Cao Shuyang 等详细考虑了山体和地面覆盖层粗糙度的影响，分析了风剖面、湍流度和功率谱的变化<sup>[18-19]</sup>。Takeo Takahashi 等用先进的 3 维激光多普勒风速仪研究了不平稳大气对山地风场的影响<sup>[20]</sup>。

在 Jackson 和 Hunt 提出的算法<sup>[12]</sup>中，3 维轴对称山体山顶最大风速增大系数  $\Delta S_{\max 3D}$  和 2 维对称山体山顶最大风速增大系数  $\Delta S_{\max 2D}$  分别为

$$\Delta S_{\max 3D} \approx 1.6H/L_1 \quad (1)$$

$$\Delta S_{\max 2D} \approx 2.0H/L_1 \quad (2)$$

式中： $H$  为山体高度； $L_1$  为山顶至山体高度一半位置的水平距离。

Taylor 在 Jackson 算法基础上提出了“原始算法”<sup>[16]</sup>，可以按照下式计算山顶不同高度处的风速增大系数  $\Delta S$ ：

$$\Delta S_{\max} = BH/L_1 \quad (3)$$

$$\Delta S = \Delta S_{\max} \exp(-Az/L_1) \quad (4)$$

式中： $\Delta S_{\max}$  为最大风速增大系数； $z$  为计算点距山体表面的相对高度； $A$ 、 $B$  为常数，取值见表 1。

表 1 原始算法中的常数取值

Tab. 1 The value of the parameters in the original guideline

几何形式	A	B
2 维山体	3.0	2.0
3 维山体	4.0	1.6
2 维悬崖	2.5	0.8
2 维连续山体	3.5	1.55
3 维连续山体	4.4	1.1

然而国内对风场的地形影响研究还比较少。张志田等进行了桥址处峡谷地形模型的风场特性风洞试验，主要研究了山区峡谷风对桥梁结构抗风设计的影响<sup>[21]</sup>。胡峰强等通过模拟桥址地形的风洞试验，分析了平均风剖面、脉动风速功率谱和湍流度分布，确定了桥梁设计基准风速和相关的特性参

数<sup>[22]</sup>。李元齐等进行了高层建筑考虑地形影响的风荷载增大系数取值分析的基本研究，简单对比了一些国家规范，并研究成果运用到工程实际<sup>[23]</sup>。

## 2 各国规范对山地风场的规定

### 2.1 中国规范

对于山区的建筑物，风压高度变化系数还应考虑地形条件的影响。对于山峰和山坡，其山顶位置的地形影响系数  $\eta$  计算公式为

$$\eta = 1 + K \tan \alpha \left(1 - \frac{z}{2.5H}\right) \quad (5)$$

式中： $\alpha$  为山坡与水平面的夹角，当  $\tan \alpha > 0.3$  时，取  $\tan \alpha = 3$ ； $K$  是比例系数，对山峰  $K$  取 3.2，对山坡  $K$  取 1.4。

中国规范中山峰和山坡示意如图 1 所示。图中： $d$  为山顶与山脚间的水平距离； $AB$  间和  $BC$  间山峰和山坡其他位置的影响系数按线性插值确定，取  $A$ 、 $C$  处的地形影响系数为 1。

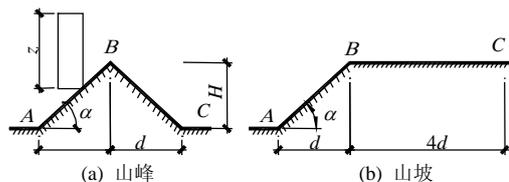


图 1 山脊和陡坡示意

Fig. 1 The schematic diagram of the crest and the escarpment

按中国规范计算的山顶处地形影响系数  $\eta$  沿高度分布情况如图 2 所示。

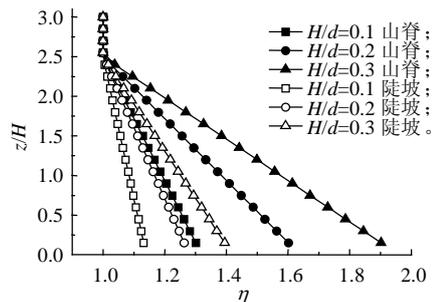


图 2 按中国规范计算的山顶处地形影响系数沿高度分布情况

Fig. 2 The topography effect coefficient distributed with the height at the hilltop calculated by the China code

由图 2 可见：随着坡度增大，山脊和陡坡山顶位置地形影响系数不断增大，近地最大可达 1.9；同时，相同坡度下山脊顶部各高度的影响系数较陡坡顶部各高度的要大。由式(5)可知，山顶位置地形影响系数随坡度增加是线性比例增大的，而随计算点高度增加是线性比例减小的，当计算点高度增大到 2.5 倍山体高度时，山顶位置地形影响系数均减

小到 1。概括来讲，中国规范对地形影响系数的规定为简化线性模型，比较简单。

### 2.2 美国规范、加拿大规范及 ISO 标准

风由开敞地形通过小山和陡坡时在山体表面离地一定高度内有明显增大现象，可以用风速地形增大因子  $K_{zt}$  表示，计算公式如下：

$$K_{zt}=1+K_1K_2K_3 \quad (6)$$

式中： $K_1$  是考虑地形影响的最大增速因子，按表 2 取值； $K_2$  是考虑上下风向离山顶的折算因子， $K_2=[1-|x|/(\mu L_1)]$ ，其中  $x$  为计算点至山顶的水平距离， $\mu$  为常数，按表 2 取值； $K_3$  是考虑计算点高度的折算因子， $K_3=e^{-\gamma z/L_1}$ ，其中  $\gamma$  为常数，按表 2 取值。

表 2 美国规范中各参数的取值

Tab. 2 The value of the parameters in the American standard

地形形状	$K_1$			$\gamma$	$\mu$	
	B 类地貌	C 类地貌	D 类地貌		上风向	下风向
2 维山脊	1.30	1.45	1.55	3.0	1.5	1.5
2 维陡坡	0.75	0.85	0.95	2.5	1.5	4.0
3 维轴对称小山	0.95	1.05	1.15	4.0	1.5	1.5

美国规范是在 Taylor “原始算法”基础上发展与提高的<sup>[4]</sup>。按美国规范计算的山顶处地形影响系数  $K_{zt}$  沿高度分布情况见图 3。由图 3 可见：随着坡度增大，山顶位置地形影响系数近地表不断增大，而上层空间反而有所减小，这主要是由于  $L_1$  减小，影响系数沿高度指数衰减加快；同时山脊对风速的影响较相同坡度的陡坡要大。

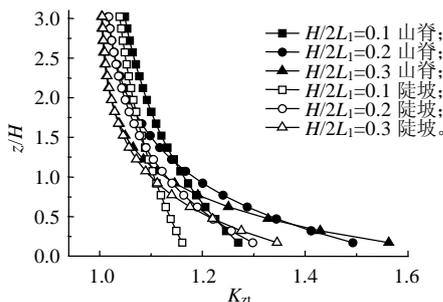


图 3 按美国规范计算的山顶处地形影响系数沿高度分布情况

Fig. 3 The topography effect coefficient distributed with the height at the hilltop calculated by the American code

加拿大规范<sup>[5]</sup>和国际 ISO 标准<sup>[6]</sup>同美国规范基本相同，仅仅是最大增速因子取值不同：

1) 加拿大规范不考虑地貌不同对最大增速因子的影响，山脊、陡坡和小山各地形最大增速因子的取值分别为 2.2、1.3 和 1.6，均比美国规范要大。

2) 国际 ISO 标准未考虑地貌的影响，山脊、

陡坡和小山的取值分别为 2.0、1.8 和 1.6，比美国规范要大。

### 2.3 欧洲规范

当坡度超过 0.05 时，需要考虑地形对风速的影响，地形影响系数  $c_0$  按下列公式计算：

$$c_0=1+2s\phi \quad (7)$$

式中： $\phi$  是山体坡度， $\phi=H/L_u=H/(2L_1)$ ，当  $\phi < 0.05$  时，取  $\phi=0$ ，当  $\phi > 0.3$  时，取  $\phi=0.3$ ； $s$  是参数，根据上风向、下风向以及地形形状按下面 2 种情况计算。

1) 山脊、山峰及陡坡上风向计算式为

$$s=A_1 \exp(B_1 \frac{x}{L_u}) \quad (8)$$

式中： $A_1=0.155 2(z/L_e)^4-0.857 5(z/L_e)^3+1.813 3(z/L_e)^2-1.911 5z/L_e+1.012 4$ ； $B_1=0.354 2(z/L_e)^2-1.057 7z/L_e+2.645 6$ ；其中当  $\phi \leq 0.3$  时，取  $L_e=L_u$ ，当  $\phi > 0.3$  时，取  $L_e=H/0.3$ 。

山脊和山峰下风向计算式中  $A_1$  的取值与式(8)相同， $B_1$  的取值为  $B_1=-0.306 56(z/L_e)^2+1.021 2(z/L_e)-1.763 7$ 。

2) 陡坡下风向计算式为

$$s=A_2 \lg^2(x/L_e)+B_2 \lg(x/L_e)+C_2 \quad (9)$$

式中： $A_2=-1.342 0 \lg^3(z/L_e)-0.822 2 \lg^2(z/L_e)+0.460 9 \lg(z/L_e)-0.079 1$ ； $B_2=-1.019 6 \lg^3(z/L_e)-0.891 0 \lg^2(z/L_e)+0.534 3 \lg(z/L_e)-0.115 6$ ； $C_2=0.803 0 \lg^3(z/L_e)+0.423 6 \lg^2(z/L_e)-0.573 8 \lg(z/L_e)+0.160 6$ 。

按欧洲规范计算的  $x/L_e=0.1$  处的地形影响系数见图 4。由图 4 可见：随着坡度增大， $x/L_e=0.1$  位置处的地形影响系数不断增大，且底部增大较快，上部空间增加较慢，这主要是由于沿高度变化，系数  $A$  是高度  $z$  的 4 次多项式；陡坡的地形影响系数较同坡度的山脊或山峰略大。总体来说，欧洲规范较复杂，系数都采用的高次多项式拟合公式。

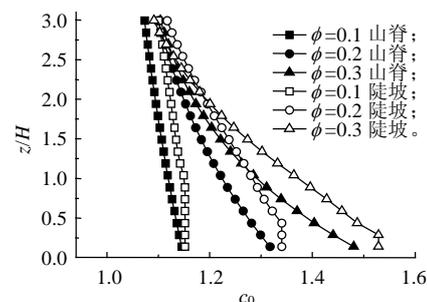


图 4 按欧洲规范计算的  $x/L_e=0.1$  处地形影响系数沿高度分布情况

Fig. 4 The topography effect coefficient distributed with the height at  $x/L_e=0.1$  calculated by the European code

### 2.4 日本规范

当所计算地形的坡度大于 7.5 时, 应考虑地形对风速的影响。风速地形影响系数  $E_g$  可由下式确定:

$$E_g = (C_1 - 1)[C_2(z/H - C_3)]\exp[-C_2(z/H - C_3)] + 1 \quad (10)$$

式中: 任何条件下均需满足  $E_g \geq 1$ ; 参数  $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$  取值详见文献[8]。

按日本规范计算的山顶处地形影响系数见图 5。由图 5 可见: 随着坡度增大, 山顶位置地形影响系数却不断减小, 这与其他规范形成较大差别; 陡坡的地形影响系数在近地面先增大后减小。

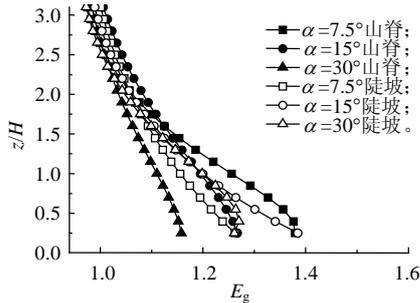


图 5 按日本规范计算的山顶处地形影响系数沿高度分布情况

Fig. 5 The topography effect coefficient distributed with the height at the hilltop calculated by the Japan code

日本规范还定义了湍流度的地形影响系数:

$$E_{g1} = E_1 / E_g \quad (11)$$

式中  $E_1$  为湍流度地形影响系数,  $E_1$  的计算与  $E_g$  类似, 只是各参数的取值要另外查表, 具体可直接参见文献[8]。

### 2.5 澳洲规范

山体对风速的影响系数  $M_h$  可通过式(12)计算:

当  $H/(2L_1) < 0.05$  时, 山体对风速的影响系数  $M_h = 1.0$ ; 当  $0.05 \leq H/(2L_1) \leq 0.45$  时, 山体对风速的影响系数为

$$M_h = 1 + \frac{H}{3.5(z + L_3)}(1 - |x|/L_4) \quad (12)$$

当  $H/(2L_1) > 0.45$  时, 山顶近地面  $0.1H$  高度内, 山体对风速的影响系数为

$$M_h = 1 + 0.71(1 - |x|/L_4) \quad (13)$$

式中:  $L_3$  取  $0.36L_1$  或  $0.4H$  的较大值;  $L_4$  除了陡坡的下风向取  $10L_3$  外, 其他均取  $4L_3$ 。当  $H/(2L_1) > 0.45$  时, 山顶近地面  $0.1H$  高度以上, 山体对风速的影响系数同式(12)。

由上述分析可知: 美国规范考虑了地貌类别, 即表面粗糙度对地形系数的影响。表面越粗糙, 增大系数越小。其他规范均未考虑表面粗糙度对地形系数的影响。同时, 在美国规范地形影响系数的计

算公式中, 二维山脊和三维山峰采用的系数不同, 计算出的三维山峰地形影响系数比二维山脊要小, 而且随着高度增加, 减小得更快。

中国规范地形影响系数计算公式的适用范围为  $0 \leq H/(2L_1) \leq 0.3$ ; 美国规范为  $0.1 \leq H/(2L_1) \leq 0.25$ ; 欧洲规范为  $0.05 \leq H/(2L_1) \leq 0.3$ ; 日本规范为  $0.132 \leq H/(2L_1) \leq 1.732$ ; 澳洲规范为  $0.1 \leq H/(2L_1) \leq 0.45$ 。可见, 日本规范的覆盖范围更广, 其他规范相比较小。

## 3 山地风场对比分析

### 3.1 山地地形对风场竖向分布的影响

假定中国规范规定的地面粗糙度类别为 B 类地貌上有一座 2 维山脊, 风垂直吹向山脊, 山脊上风向平坦宽敞, 山脊高度  $H$  为 150 m, 倾角  $\alpha$  分别为  $7.5^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $30^\circ$ , 则坡度  $H/(2L_1)$  分别为 0.132、0.263、0.572。现根据各国规范, 分别计算 3 种坡度下山顶以及山顶下游风向  $x/H = 0.1$  处随地面高度增加的风速地形影响系数。不同坡度山顶处的地形影响系数见图 6。

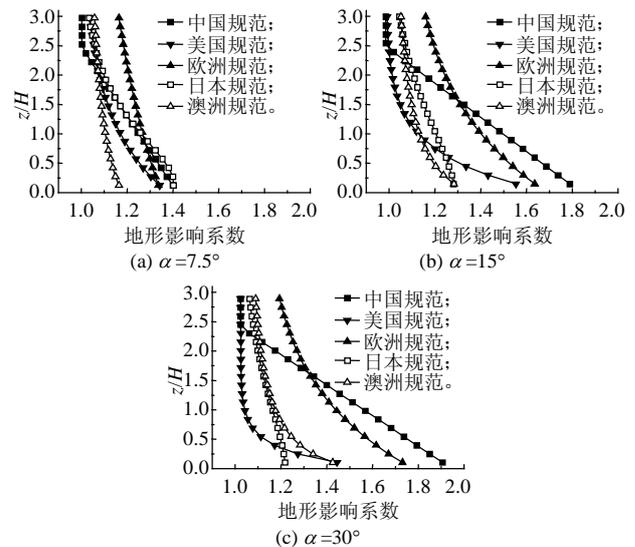


图 6 不同坡度山顶处的地形影响系数

Fig. 6 The topography effect coefficient at the hilltop for the different hill slopes

由计算结果可以看出: 当坡度较小时, 按各规范计算结果相差不大, 在近地处澳洲规范计算较小, 小于 1.2, 而按照欧洲规范得到的计算值较大, 整体都在 1.2~1.4 之间。当坡度较大时, 中国和欧洲规范计算结果较大, 均在 1.8 左右, 而美国、日本和澳洲规范计算结果较接近, 均在 1.4 左右。

各规范思路基本相同, 都包含考虑高度变化的高度修正系数以及考虑水平位置变化的水平修正系数。但高度和水平调整的公式不同, 高度方向上,

中国规范随高度增加，地形系数是线性衰减的，美国规范是指数衰减的，欧洲规范是4次多项式，日本规范是指数和1次项相乘的形式，而澳洲规范是反比例函数形式。

### 3.2 山地地形对风场水平分布的影响

假定山脊和陡坡高度  $H$  为 150 m，倾角  $\alpha$  分别为  $15^\circ$ ，按各规范计算的山脊和陡坡 10 m 高度地形影响系数分别如图 7、8 所示。其中欧洲规范和日本规范考虑了 2 维山脊和 3 维山峰上下风向对风场的不同影响，分别采用不同的地形影响计算公式，欧洲规范采用指数衰减的模型，而日本规范的最大影响系数甚至不在山顶位置，而是偏向于下风向。中国、美国和澳洲规范则完全成为对称问题，且是线性衰减。水平方向考虑的范围也有所不同，中国规范为  $2L_1$ ；美国规范为  $1.5L_1$ ；欧洲规范上风向为  $1.5L_1$ ，下风向为  $2L_1$ ；日本规范上风向为  $4H$ ，下风向为  $8H$ ；澳洲规范为  $1.44L_1$ 。同时可以看出，中国规范最大，其次为美国规范、欧洲规范，日本规范和澳洲规范接近且最小。

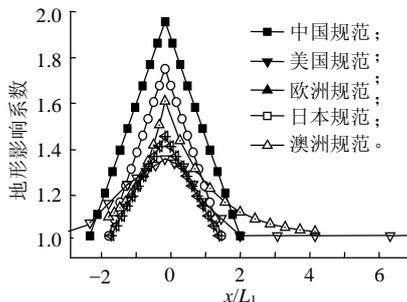


图 7 山脊不同位置的地形影响系数  
Fig. 7 The topography effect coefficient at the different place of the crest

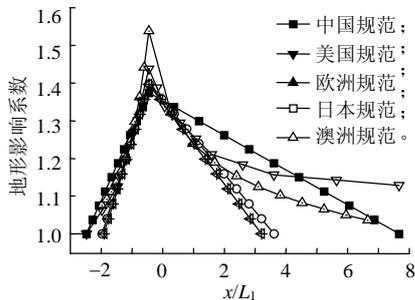


图 8 陡坡不同位置的地形影响系数  
Fig. 8 The topography effect coefficient at the different place of the escarpment

对于陡坡地形，所有的规范对上下风向分别考虑，认为下风向地形的影响范围要大于上风向。其中，中国规范上风向取至山脚，而下风向影响范围扩大到  $8L_1$ ；美国规范上风向为  $1.5L_1$ ，下风向为  $4L_1$ ；欧洲规范上风向为  $1.5L_1$ ，下风向为  $3.5L_1$ ；日本规

范上风向为  $4H$ ，下风向为  $8H$ ；澳洲规范上风向为  $4L_3$ ，下风向为  $10L_3$ 。

除欧洲和日本规范外，其他国家地形影响系数在水平方向上都是线性变化的，在山顶或陡坡边缘最大，向上风向和下风向逐渐减小。各规范计算结果相当，但日本规范考虑了风过山体和陡坡的流动分离，下风向地形系数仍然保持在一个较高的水平。

### 4 山地地形对输电塔风振响应的影响

输电塔大都架设在地势较高的地方，尤其是特高压大跨越输电塔，更是架设在江河两边较高的山顶上，地形对风场的影响巨大，对输电塔抗风也提出了更高的要求。

在文献[1-2]超高压大跨越输电塔的抗风分析实例中，取特高压大跨越输电塔总高 108 m，1 阶频率为 0.937 Hz，周期约为 1 s，阻尼比取 1.5%，地面基本风压取 0.55 kPa。将输电塔简化为 11 节段的质量串模型，如图 9 所示。该模型节段参数见表 3。

利用频域分析方法计算了输电塔在山地与平地下的顶部位移响应，山体高度  $H$  取 150 m，倾角  $\alpha$  为  $15^\circ$ 。

平地和山顶位置的风速谱均直接选用广泛应

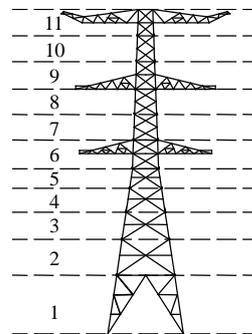


图 9 直线塔分段示意  
Fig. 9 The schematic diagram of the transmission tower segments

表 3 输电塔节段模型参数  
Tab. 3 The parameters of the segments of the transmission tower

节段	高度/m	质量/t	迎风面积/m <sup>2</sup>	阻力系数
1	19.5	29.20	37.87	1.63
2	31.5	20.25	25.01	1.55
3	40.5	10.63	16.80	1.58
4	48.5	8.95	14.15	1.62
5	55.0	7.75	11.79	1.66
6	64.5	17.90	31.63	1.48
7	73.0	7.22	13.07	1.30
8	81.5	9.51	12.22	1.22
9	90.6	13.45	29.40	1.29
10	99.2	4.53	9.82	1.51
11	108.0	16.84	35.31	1.80

用的 Davenport 谱, 即

$$\frac{nS(n)}{k\bar{v}_{10}^2} = \frac{4f^2}{(1+f^2)^{4/3}} \quad (14)$$

式中:  $S(n)$  为脉动风速功率谱;  $n$  为脉动风频率;  $k$  为与地貌类别有关的常数;  $\bar{v}_{10}$  为 10 m 的平均风速;  $f$  为折减频率,  $f=1200n/\bar{v}_{10}$ 。

相干函数为

$$f_{\text{Coh}}(r, n) = \exp\left(\frac{-2n\sqrt{C_y^2(y_1 - y_2)^2 + C_z^2(z_1 - z_2)^2}}{v_{z1} + v_{z2}}\right) \quad (15)$$

式中:  $f_{\text{Coh}}(r, n)$  为相干函数;  $r$  为两点间距离;  $y_1$ 、 $y_2$  为水平坐标;  $z_1$ 、 $z_2$  为竖向坐标;  $C_y$ 、 $C_z$  分别为水平和竖向系数;  $v_{z1}$ 、 $v_{z2}$  分别为  $z_1$ 、 $z_2$  高度的平均风速。

由风速谱乘以相干函数就可以得到空间分布的互谱, 再乘以振型的平方在空间上积分就得到 1 阶广义力谱。1 阶广义力谱乘以传递函数可得 1 阶广义位移谱, 即

$$S_{y1}(z, n) = \varphi_1^2(z) \frac{S_{p1}(n)}{M_1^2} |H_1(n)|^2 \quad (16)$$

式中:  $S_{y1}(z, n)$  为 1 阶广义位移谱;  $S_{p1}(n)$  为 1 阶广义荷载谱;  $\varphi_1(z)$  为 1 阶振型;  $H_1(n)$  为 1 阶传递函数;  $M_1$  为 1 阶广义质量。

1 阶广义位移谱再乘以振型的平方可得到结构各高度 1 阶位移谱。对各层位移谱频域积分再开方可得各层位移根方差值, 最后乘以峰值系数, 叠加上平均响应, 即可得特高压输电塔的总响应。平地与山地条件下输电塔顶部位移响应计算结果如表 4 所示。

表 4 平地与山地下输电塔顶部位移响应对比

Tab. 4 The comparison between the displacement response of the transmission tower in the hilly and flat terrain

顶部位移	平均响应/m	动力响应/m	总响应/m
平地	0.146	0.068	0.287
山地(中国规范)	0.394	0.111	0.625
山地(美国规范)	0.208	0.081	0.377
山地(欧洲规范)	0.267	0.091	0.458
山地(日本规范)	0.222	0.084	0.397
山地(澳洲规范)	0.192	0.078	0.353

由表 4 可见, 当输电塔位于倾角为 15° 的山地的山顶时, 输电塔的平均位移响应、动力位移响应以及总位移响应都比相应的平地要大得多。其中按中国规范计算的响应增大最多, 平均位移响应增大 2.7 倍, 动力位移响应增大 1.6 倍, 总的位移响应增大 2.2 倍。与其他发达国家相比, 上述结果显得比较保守。但是按照其他发达国家和地区计算

的山地下输电塔的风振响应要比平地大很多, 平均响应增大约 31.5%~82.8%, 动力响应增大约 14.7%~33.8%, 总的响应增大约 23.0%~59.6%。由此可见, 山地地形对输电塔风振响应有很大影响。

## 5 结论

1) 通过与所有发达国家和地区的风荷载规范对比可以得出, 我国规范中地形影响系数的模型还比较简单, 同时也偏于保守; 而国外地形对风场的影响模型已有较明确的思路, 综合考虑了山地坡度、高度、地面粗糙度、建筑物水平位置的影响, 这些发达国家的规范可为我国电力设施抗风设计提供参考。

2) 特高压大跨越输电塔风振分析实例结果表明, 山地地形对风场有很大影响, 山地风场下输电塔的位移响应增大约 23.0%~59.6%。

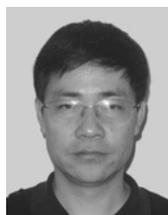
## 致谢

本文的研究工作得到了重庆大学研究生创新团队建设项目(200909C1017)资助, 谨此致谢!

## 参考文献

- [1] 李正良, 肖正直, 韩枫, 等. 1000kV 汉江大跨越特高压输电塔线体系气动弹性模型的设计与风洞试验[J]. 电网技术, 2008, 32(12): 1-5.  
Li Zhengliang, Xiao Zhengzhi, Han Feng, et al. Aeroelastic model design and wind tunnel tests of 1000 kV Hanjiang long span transmission line system[J]. Power System Technology, 2008, 32(12): 1-5(in Chinese).
- [2] 汪之松, 李正良, 肖正直, 等. 1000KV 双回路特高压输电塔等效静风荷载研究[J]. 电网技术, 2009, 33(14): 6-12.  
Wang Zhisong, Li Zhengliang, Xiao Zhengzhi, et al. Equivalent along-wind direction static wind load of transmission tower for 1000 kV double circuit transmission lines on same tower[J]. Power System Technology, 2009, 33(14): 6-12(in Chinese).
- [3] GB50009—2001 建筑结构荷载规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.
- [4] ANSI/ASCE. Minimum design loads for buildings and other structures[R]. New York: ASCE, 2002.
- [5] Canadian Commission on Building and Fire Codes. National building code of Canada (NBC)[R]. Ottawa: National Research Council of Canada, 1995.
- [6] International Standard ISO4354, Wind actions on structures [S]. Switzerland: International Organization for Standardization, 2004.
- [7] European Standard EN1991-1-4, actions on structures[S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2004.
- [8] Architectural Institute of Japan. AIJ recommendations for loads on buildings[R]. Tokyo: Architectural Institute of Japan, 2004.
- [9] AS/NZS. Australian/New Zealand standard[R]. Sydney: AS/NZS, 2002.
- [10] DeBray B G. Atmospheric shear flows over ramps and

- escarpments[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1973(9): 1-4.
- [11] Bowen A J, Lindley D A. Wind-tunnel investigation of the wind speed and turbulence characteristics close to the ground over various escarpment shapes[J]. *Boundary Layer Meteorological*, 1977(12): 259-271.
- [12] Jackson P S, Hunt J C R. Turbulent flow over a low hill[J]. *Journal of Royal Meteorological*, 1975(101): 929-955.
- [13] Jackson P S. A theory for flow over escarpments[C]//*Proceedings of the Fourth International Conference on Wind Effects on Buildings and Structures*, London, UK, 1976: 33-40.
- [14] Mason P J, Sykes R I. Flow over an isolated hill of moderate slope[J]. *Journal of Royal Meteorological*, 1979(105): 383-395.
- [15] Taylor P A, Mason P J, Bradley E F. Boundary-layer flow over low hills: a review[J]. *Boundary Layer Meteorological*, 1987(39): 107-132.
- [16] Taylor P A. Turbulent boundary-layer flow over low and moderate slope hills[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1998(74): 25-47.
- [17] William D L, Bruce R W. Wind-tunnel and field investigation of the effect of local wind direction on speed-up over hills[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2007(95): 639-661.
- [18] Cao Shuyang, Tetsuro T. Experimental study on roughness effects on turbulent boundary layer flow over a two-dimensional steep hill[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2006(94): 1-19.
- [19] Cao Shuyang, Tamura T. Effects of roughness blocks on atmospheric boundary layer flow over a two-dimensional low hill with/without sudden roughness change[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2007(95): 679-695.
- [20] Takeo T, Shinsuke K, Shuzo M, et al. Wind tunnel tests of effects of atmospheric stability on turbulent flow over a three-dimensional hill[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2005(93): 155-169.
- [21] 张志田, 李春光, 陈政清. 山区峡谷地带大跨度桥梁风场特性试验研究[C]//第十三届全国结构风工程学术会议论文集, 大连, 2007: 502-509.
- [22] 胡峰强, 陈艾荣, 王达磊. 山区桥梁桥址风环境试验研究[J]. *同济大学学报: 自然科学版*, 2006, 34(6): 721-725.  
Hu Fengqiang, Chen Airong, Wang Dalei. Experimental study of wind field in bridge site located in mountainous area[J]. *Journal of Tongji University: Natural Science*, 2006, 34(6): 721-725(in Chinese).
- [23] 李元齐, 刘振军, 夏季, 等. 某高层建筑考虑地形影响的风荷载增大系数取值分析[J]. *建筑结构*, 2008, 38(7): 120-124.  
Li Yuanqi, Liu Zhenjun, Xia Ji, et al. Speed-up ratio estimation of wind load for a practical tall building considering topographical effect[J]. *Building Structure*, 2008, 38(7): 120-124(in Chinese).



李正良

收稿日期: 2010-08-10.

作者简介:

李正良(1963), 男, 教授, 博士生导师, 从事工程力学与结构风工程方面的研究工作;

魏奇科(1984), 男, 博士研究生, 从事风工程方面的研究工作, E-mail: wqkremember@163.com;

孙毅(1980), 男, 博士研究生, 从事结构风工程方面的研究工作。

(责任编辑 杜宁)