

输电塔风振系数实用计算方法

黄泉雄

重庆科技学院, 建筑工程学院, 重庆

收稿日期: 2023年1月16日; 录用日期: 2023年2月16日; 发布日期: 2023年2月24日

摘要

在输电塔的设计中风振系数 $\beta(z)$ 是关键参数。本文基于惯性力法, 提出了考虑横担和法兰盘影响的输电塔风振系数计算方法。该方法考虑了局部形状、质量和挡风面积的影响, 研究了 $\beta(z)$ 的修正系数表达式。基于3个悬臂输电塔样本的分析结果, 推导了风振系数公式。分析结果表明, 横担对输电塔的风振响应有很大影响, 但法兰盘对其影响很小。因此, 作为近似计算, 法兰盘对风振系数的影响可以忽略不计。本文的研究结果为输电塔风振系数提供了一种实用计算方法, 该方法与现有规范相比有计算结果更准确的优势; 与有限元计算分析相比, 具有计算过程更简洁的优势。

关键词

输电塔, 风振响应, 风振系数, 横担, 惯性力法

Practical Calculation Method of Wind Vibration Coefficient of Transmission Tower

Xiaoxiong Huang

School of Architecture and Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing

Received: Jan. 16th, 2023; accepted: Feb. 16th, 2023; published: Feb. 24th, 2023

Abstract

The vibration coefficient $\beta(z)$ is the key parameter in the design of the transmission tower. Based on the inertial force method, this paper proposes a calculation method of wind vibration coefficient of transmission tower considering the influence of cross arm and flange plate. This method takes into account the influence of local shape, mass and windshield area, and studies the expression of the correction coefficient of $\beta(z)$. Based on the analysis results of three cantilever transmission

tower samples, the wind vibration coefficient formula is derived. The analysis results show that the cross arm has great influence on the wind-induced vibration response of transmission tower, but the flange plate has little influence on it. Therefore, as an approximate calculation, the influence of flange on wind vibration coefficient can be ignored. The research results of this paper provide a practical calculation method for the wind vibration coefficient of transmission tower, which has the advantage of more accurate calculation results compared with the existing specifications; compared with finite element analysis, it has the advantage of simpler calculation process.

Keywords

Transmission Tower, Wind-Induced Vibration Response, Wind-Induced Vibration Coefficient, Cross Arm, Inertial Force Method

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

输电塔是风敏结构，其风振响应是从业人员的关注点。然而传统方法在计算风振响应时十分复杂。

目前，国内外学者对输电塔风振系数计算的研究很多。蔡熠通过研究发现增加横隔面支撑可以提高输电塔的结构强度[1]。刘荣见等人通过试验发现 $\beta(z)$ 随着高度的增加而增大，但在分叉后会因为质量和刚度的减小而减小[2]。赵建等人通过数值模拟的手段发现虽然 $\beta(z)$ 沿高度呈线性分布，但在横担附近存在较大突变，且沿长悬臂方向变化幅度不大[3]。张爽等人通过有限元建模，研究不同风速、风向和塔型对输电塔风振系数的影响，得到输电塔塔身及横担对风振系数的影响[4]。赵爽等人通过对气动弹性模型的风洞试验，研究了超高层输电塔的 ESWL (等效静力风荷载) [5]。同时，分析了钢管混凝土和梯度风高度对 $\beta(z)$ 的影响，并对中国规范中设计风荷载公式的适用性提出了一些建议。



Figure 1. Transmission towers with cantilever cross-arms

图 1. 悬臂输电塔

本文在此提出一种输电塔风振系数实用计算方法，该方法考虑了横担和法兰盘对风振特性的影响，与现有规范和有限元计算分析相比，具有计算结果更准确、计算过程更简洁的优势。首先建立形状均匀的输电塔计算模型，然后将形状变化的因素以及横担和法兰盘的影响引入到模型中，接着根据实际结构提出了一种新的输电塔设计风荷载计算模型。通过一系列简化，最终得到悬臂输电塔风振系数实用计算方法(如图1所示)。

2. 风振系数推导

输电塔由横担、法兰盘和主塔身组成，建立如图2所示的计算模型。

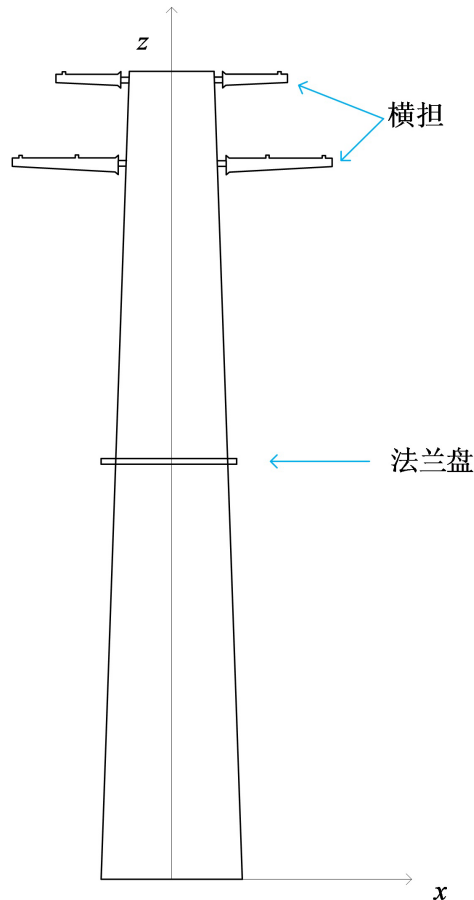


Figure 2. Legend of transmission tower calculation model

图2. 输电塔计算模型图例

首先需确定两个假设：其一，输电塔设计采用塔线分离法，这种方式更为保守[6]。其二，顺风方向的风振系数只能激发该方向的风振。

对于高层塔结构，风振惯性荷载为：

$$\hat{f}_{D1}'(z) = \omega_1^2 m(z) \phi_1(z) g_s \sigma_{q_1}, \quad (1)$$

其中， ω_1 是一阶模态的无阻尼自然圆频率； $m(z)$ 是单位高度的质量； $\phi_1(z)$ 是一阶模态的振型； σ_{q_1} 是 $q_1(t)$ 的标准偏差； $q_1(t)$ 是一阶模态的时变广义坐标。

等效静力风荷载的总和(ESWLs)：

$$f_{ESWL}(z) = \bar{f}(z) + \hat{f}'_{D_1}(z) = \beta(z)\bar{f}(z), \quad (2)$$

$$\beta(z) = 1 + \frac{\omega_1^2 m(z) \phi_1(z) g_s \sigma_{q_1}}{\omega_{10} \mu_z(z) C_d(z) b_s(z)} = 1 + \xi_1 u_1 r_1(z), \quad (3)$$

其中 $\bar{f}(z)$ 是单位高度沿风向的时变风阻力平均分量。 ω_{10} 是 $z = 10$ m 时的平均风压； $\mu_z(z)$ 是风压高度变化系数； $C_d(z)$ 是局部阻力系数； $b_s(z)$ 是局部有效挡风玻璃宽度； ξ_1 是风振引起的动力系数； u_1 与风的波动特性有关，称为综合影响系数； $r_1(z)$ 与计算点的位置相关，可称为位置系数。公式(1)至(3)是 ESWL 的通用公式，适用于任何输电塔。由于公式中涉及的参数多、含有多重积分使其在实际使用中不便。

形状均匀的输电塔的质量和挡风面积在纵向上是不变的。因此， $m(z)$ 、 $b_s(z)$ 、 $C_d(z)$ 和 ξ_1 是常数，且 $z = 0$ 。因此，公式(3)中的 $\beta(z)$ 可改写为

$$\beta(z) = 1 + 2g_s I_{10} B_z(z) \sqrt{1 + R^2}, \quad (4)$$

$$B_z(z) = k_\gamma H^{a_\gamma} \rho_z \rho_x \frac{\phi_1(z)}{\mu_z(z)}, \quad (5)$$

$$\begin{cases} \rho_z = \frac{10\sqrt{H + 60e^{-\frac{H}{60}} - 60}}{H} \\ \rho_x = \frac{10\sqrt{b(0) + 50e^{-\frac{b(0)}{50}} - 50}}{b(0)} \end{cases}, \quad (6)$$

$$R = \sqrt{\frac{\pi}{6\zeta_1} \frac{x_1'^2}{(1 + x_1'^2)^{4/3}}}, \quad (7)$$

$$x_1' = 30n_1 / \sqrt{\omega_{10}}, \quad (8)$$

其中 I_{10} 是 $z = 10$ m 时的湍流强度； $B_z(z)$ 是背景成分因子； R 是共振分量因子； k_γ 和 a_γ 为拟合系数； ρ_z 和 ρ_x 分别为脉动风荷载的垂直方向和水平方向相关系数； $b(z)$ 是局部轮廓宽度； ζ_1 是一阶模态的阻尼比； n_1 是一阶模态频率值。

但该类输电塔在现实中很少见。一般输电塔的塔身成锥形。均匀锥形输电塔的 $m(z)$ 和 $b_s(z)$ 随高度变化，可通过锥度变化进行近似。为分析更为现实输电塔的风振系数计算模型，在此不考虑横担和法兰盘的影响。为了避免混淆，上标“*”被添加到 $\phi_1(z)$ 等，表示结构的形状随高度而变化，如 $\phi_1^*(z)$ 等。

$$B_z(z) = k_\gamma H^{a_\gamma} \rho_z \rho_x \frac{\phi_1(z)}{\mu_z(z)} \alpha_v \alpha_b(z), \quad (9)$$

$$\alpha_v = \frac{\int_0^H \mu_z(z) \phi_1^*(z) I_z(z) b_s(z) dz}{\int_0^H \mu_z(z) \phi_1(z) I_z(z) dz} \frac{\int_0^H \phi_1^2(z) dz}{\int_0^H m(z) \phi_1^{*2}(z) dz}, \quad (10)$$

$$\alpha_b(z) = \frac{m(z)/m(0)}{b_s(z)/b_s(0)}, \quad (11)$$

其中 $I_z(z)$ 是局部湍流强度； α_v 是考虑整体形状变化的 $\beta(z)$ 修正系数； $\alpha_b(z)$ 是考虑局部形状变化的 $\beta(z)$ 的校正系数。

通过公式(6)计算 ρ_x 时, $b(0)=b_1$ 。将公式(9)代入公式(4), 可以获得均匀锥形输电塔的 $\beta(z)$ 。

与主塔身不同, 横担的质量和挡风面积随高度局部突变。在此讨论横担的质量和挡风面积的变化规律, 建立了输电塔风振系数的现实计算模型。

如图 2 所示, 横担的宽度大于主塔身的宽度, 引入了 $\beta(z)$ 的修正系数 α_n :

$$\alpha_n = \frac{\sqrt{\int_0^{b(z_1)} \int_0^{b(z_2)} coh_x(x_1, x_2) dx_1 dx_2}}{\sqrt{\int_0^{b(0)} \int_0^{b(0)} coh_x(x_1, x_2) dx_1 dx_2}} \left[\int_0^H \int_0^H \mu_z(z_1) \phi_1^*(z_1) I_z(z_1) \mu_z(z_2) \phi_1^*(z_2) I_z(z_2) \right. \\ \left. \times coh_z(z_1, z_2) dz_1 dz_2 \right]^{0.5} / \sqrt{\int_0^H \int_0^H \mu_z(z_1) \phi_1(z_1) I_z(z_1) \mu_z(z_2) \phi_1(z_2) I_z(z_2) coh_z(z_1, z_2) dz_1 dz_2} \quad (12) \\ \times \frac{b(0) \int_0^H \mu_z(z) \phi_1(z) I_z(z) dz}{\int_0^H \mu_z(z) \phi_1^*(z) I_z(z) b_s(z) dz},$$

其中 $coh_x(x_1, x_2)$ 和 $coh_z(z_1, z_2)$ 分别是水平相关函数和垂直相关函数。

α_n 主要受输电塔外形的影响, 计算模型可简化为图 3。 b_1 为主塔身宽度; b_2 为每个横担的单个横向平均宽度; Δh_1 为塔身附近每个横担的厚度相同且平均值; Δh_2 为两个相邻横担之间的中心距离平均值。通过分析, α_n 主要受横担宽度和数量的影响。此外, 每个横担宽度的差异对于塔架来说并不显著, 因此图 3 的简化计算模型无误。

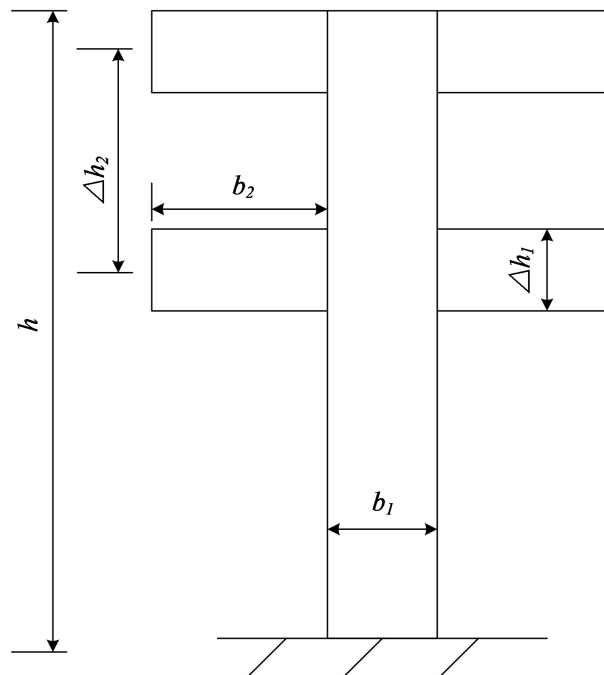


Figure 3. Simplified calculation model of α_n

图 3. α_n 的简化计算模型

根据上述分析, α_n 的影响参数为 b_1 , b_2 , Δh_1 , Δh_2 , h 和 n_c , 其中 n_c 是横担的数量。根据塔结构的控制关系, b_1 随 h 增加; b_2 随 Δh_1 增加。由电气要求控制, b_2 、 Δh_2 与电压水平相关, 与结构要求无关。同样, n_c 也受电气要求控制。法兰盘的形状分布受主塔身的限制。随着 h 的增加, 法兰盘的挡风面积、质量和 b_1 将保持不变。基于上述分析, α_n 的影响参数可简化为 b_2 , h 和 n_c 。

通过对3座悬臂输电塔的分析(如图4所示),得到表达式为 $b_2 = 2.291\Delta h_1$, $\Delta h_2 = 2.052b_1$ 和 $h = 5.856b_1$ 。根据塔的有限数量,此处给出的平均数值的标准偏差分别为 0.032 (2.291)、0.055 (2.052)和 0.314 (5.856)。规定标称高度 h_n 不得小于 15 m, 可以限制 n_c 值的范围。显然,通过公式计算 α_n 很麻烦。为了方便设计, α_n 可查表获取, 如表 1。

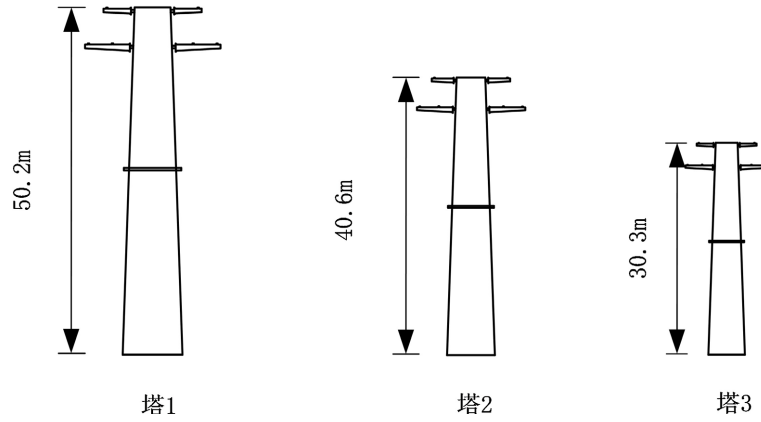


Figure 4. Cantilever transmission tower model
图 4. 悬臂输电塔模型

Table 1. α_n value of cantilever transmission tower
表 1. 悬臂输电塔的 α_n 值

b_2/h	$n_c = 1$	$n_c = 2$	$n_c = 3$
0.05	0.99	0.98	0.94
0.10	0.91	0.89	0.88
0.15	0.86	0.86	0.86
0.20	0.86	0.83	0.82
0.25	0.80	0.79	0.77
0.30	0.75	0.74	0.72

需考虑横担质量和挡风面积对 $\beta(z)$ 的影响。为此引入了两个校正系数:

$$\alpha_u = \left[\int_0^H \mu_z(z) \phi_{a1}(z) I_z(z) b_s(z) dz + \sum_I \mu_z(z_I) \phi_{a1}(z_I) I_z(z_I) A_s(z_I) + \sum_J \mu_z(z_J) \phi_{a1}(z_J) I_z(z_J) A_s(z_J) \right] / \int_0^H \mu_z(z) \phi_{a1}(z) I_z(z) b_s(z) dz, \tag{13}$$

$$\alpha_m = \frac{\int_0^H m(z) \phi_{a1}^2(z) dz}{\int_0^H m(z) \phi_{a1}^2(z) dz + \sum_I M(z_I) \phi_{a1}^2(z_I) + \sum_J M(z_J) \phi_{a1}^2(z_J)}, \tag{14}$$

其中 α_u 是 $\beta(z)$ 的附加质量修正系数; α_m 是 $\beta(z)$ 的附加挡风面积修正系数; \sum_I 和 \sum_J 是所有横担和法兰盘的总和符号。

法兰盘布置在主塔身的二分之一处。在确定塔身中法兰盘的布置方式后,需确定挡风面积以及横担和法兰盘的质量。对3个悬臂输电塔(如图4所示)进行了统计分析,以获得以下关系:

$$A_s(z_I) = 4.576b_s(0)(b_2^2/h), \quad A_s(z_J) = 2.071b_s(0)\mu_{b_s}^{1.5}(z_J), \quad M(z_I) = 3.325m(0)(b_2^2/h) \text{ 和}$$

$M(z_j) = 2.676m(z_j)$ 。此处给出的平均数值的标准偏差分别为 0.012 (4.576)、0.061 (2.071)、0.034 (3.325) 和 0.057 (2.676)。

本文确定的横担和法兰盘的 M 和 A_s 的简化分布不仅建立了与主塔身的关系, 而且采用了图 3 中的计算模型。这些分布达到了简化计算的目的。因为 α_u 和 α_m 的独立影响参数是 b_2 , h , n_c 和 $b_s(h)/b_s(0)$, 为了方便制表, 设 $\alpha_y = \alpha_u \alpha_m$ 。

将 $A_s(z_l)$ 、 $A_s(z_j)$ 、 $M(z_l)$ 和 $M(z_j)$ 代入公式(13)和(14), 可计算 α_y 。同样, 在工程设计参数范围内, 为便于计算, 将 α_y 制成表格, 如表 2 所示。在表 2 中, 令 $T = b_s(H)/b_s(0)$, 列出了与 $T = 0.3$ 和 $T = 0.5$ 相对应的 α_n 。

Table 2. α_y value of cantilever transmission tower

表 2. 悬臂输电塔的 α_y 值

b_2/h	$n_c = 1$		$n_c = 2$		$n_c = 3$	
	$T = 0.3$	$T = 0.6$	$T = 0.3$	$T = 0.6$	$T = 0.3$	$T = 0.6$
0.05	0.77	0.79	0.73	0.75	0.71	0.74
0.10	0.75	0.81	0.71	0.77	0.68	0.80
0.15	0.71	0.80	0.63	0.81	0.62	0.83
0.20	0.63	0.82	0.57	0.84	0.61	0.85
0.25	0.60	0.80	0.54	0.86	0.60	0.89
0.30	0.75		0.74		0.72	

主塔身的 $\alpha_b(z)$ 、横担的 $\alpha_b(z_l)$ 和法兰盘的 $\alpha_b(z_j)$ 可用以下公式计算:

$$\alpha_b(z) = \mu_{b_s}(z), \quad (15)$$

$$\alpha_b(z_l) = \frac{M(z_l)/m(0)}{A_s(z_l)/b_s(0)} = 0.689, \quad (16)$$

$$\alpha_b(z_j) = \frac{M(z_j)/m(0)}{A_s(z_j)/b_s(0)} = 1.269\sqrt{\mu_{b_s}}, \quad (17)$$

$$\mu_{b_s}(z) = 1 + \frac{z}{H} \left[\frac{b_s(H)}{b_s(0)} - 1 \right], \quad (18)$$

当计算悬臂输电塔的 $\beta(z)$ 时, $B_z(z)$ 将修正系数 α_n 和 α_y 添加到公式(9)中。为了确保表达式的简单性和与中国荷载规范(GB 50009-2012, 2012)中的 $\beta(z)$ 表达式的一致性, 将主塔身和横担的 $B_z(z)$ 合并为一个 $B_z(z)$ 公式(公式(19))。横担是离散分布的, 因此可以分段计算, 每个分段的计算高度作为其几何中心的高度。由局部形状变化引起的校正系数 $\alpha_b(z)$ 分别根据公式(15)至(17)计算。

$$B_z(z) = k_\gamma H^{\alpha_\gamma} \rho_z \rho_x \frac{\phi_1(z)}{\mu_z(z)} \alpha_v \alpha_n \alpha_y \alpha_b(z), \quad (19)$$

将公式(19)代入公式(4), 可以获得带有悬臂的输电塔的 $\beta(z)$ 值。

3. 影响参数分析

本节讨论了横担和法兰盘对悬臂输电塔的 $\beta(z)$ 和 $\hat{u}(z)$ 的影响, 并对影响参数进行计算和分析。

为此设置了三种工况。用于图 2 中 1 号塔分析这三种工况。工况 1 仅考虑主塔身；工况 2 在工况 1 的基础上增加法兰盘；工况 3 在工况 2 的基础上增加横臂。本文涉及的计算是对悬臂输电塔进行有限元分析，本文有限元建模方法与参考文献[5]中的一致，该建模方法的准确性在文献[5]中得到了充分验证，能够保证计算结果的准确性。

如图 5 所示，计算了三种工况下输电塔的 $\beta(z)$ 和 $\hat{u}(z)$ 值。如图 5(a)所示，图 5(a)中主塔身的工况 1 和工况 2 以及图 5(b)中主塔身的工况 2 和工况 3 的 R.M.S. 差异分别为 0.024 和 0.135。因此，主塔身的 $\beta(z)$ 随考虑法兰盘的影响而下降，但主塔身和法兰盘的 $\beta(z)$ 考虑横臂的影响而下降。 $\beta(z)$ 受法兰盘影响小，受横担影响大。因此，在计算 $\beta(z)$ 时不可忽略横担的因素，现行规范中未考虑横担的影响，本文提出的方法相较规范更为准确。同时使用本文的方法计算 $\beta(z)$ 时大约 2 秒，而有限元计算约 3 小时 10 分钟，因此使用本文提出的方法相较有限元计算更便捷。如图 5(b)所示，主塔身的 $\hat{u}(z)$ 随考虑法兰盘的影响而增加，但主塔身和法兰盘的 $\hat{u}(z)$ 考虑横臂的影响而增加。横臂和法兰盘对 $\beta(z)$ 和 $\hat{u}(z)$ 的影响相反的。由于横臂的挡风面积和质量较大，且位于输电塔的上部，横臂对输电塔的 $\beta(z)$ 和 $\hat{u}(z)$ 的影响很明显。

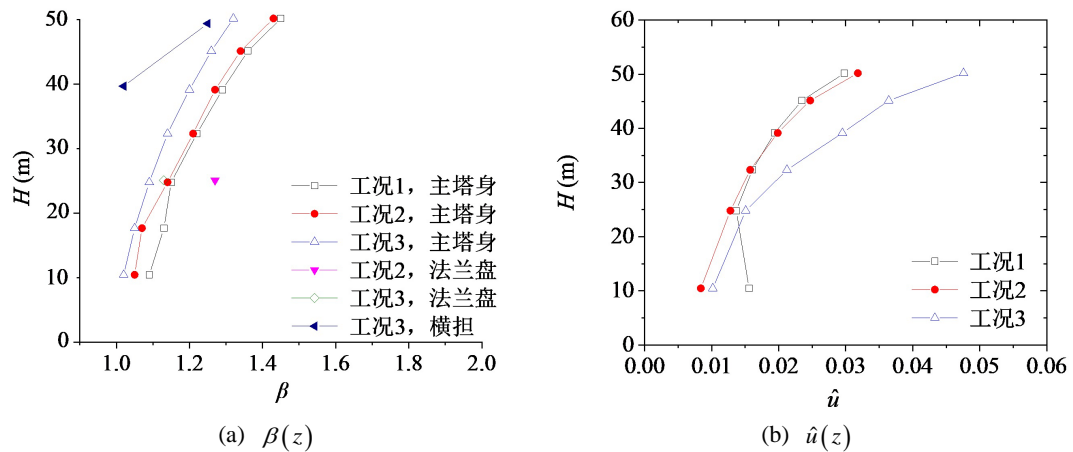


Figure 5. $\beta(z)$ and $\hat{u}(z)$ values of cantilever transmission tower based on inertial force method

图 5. 基于惯性力法悬臂输电塔的 $\beta(z)$ 和 $\hat{u}(z)$ 值

4. 结论

●为了分析法兰盘和横担的影响，设置了三种工况，并计算了三种工况下输电塔的 $\beta(z)$ 和 $\hat{u}(z)$ 值。经过分析，对于输电塔而言， $\beta(z)$ 受法兰盘影响小，受横担影响大；而 $\hat{u}(z)$ 受法兰盘影响大，受横担影响小。因此，作为近似计算，法兰盘对风振系数的影响可以忽略不计。

●悬臂输电塔三部分的 $\beta(z)$ 随高度增加而增加。对于给定高度，法兰盘的 $\beta(z)$ 最大，但对整体风振系数贡献小；横担的 $\beta(z)$ 最小，但对整体风振系数贡献大。通过时域分析得到的输电塔的 $\hat{u}(z)$ 与风振系数计算结果吻合良好，表明本文提出的风振系数公式符合工程要求。

●本文基于惯性力法，提出了输电塔风振系数实用计算方法，该方法与现有规范中计算方法相比计算更为准确，与 ANSYS 有限元计算对比计算速度更快。但输电塔的类型很多，本文仅确定了悬臂输电塔的风振系数表达式，其他类型的输电塔需酌情考虑。

基金项目

本研究项目由重庆科技学院校企协同创新中心开放研究项目资助，批准号为 YKJCX2220624。

参考文献

- [1] 蔡熠. M2型自立输电铁塔增加横隔面补强后抗风能力分析[J]. 湖北电力, 2014, 38(10): 40-43.
- [2] 刘荣见, 余文永, 展语. 110 kV 弹弓型景观输电铁塔风振系数计算研究[J]. 山西建筑, 2022, 48(3): 54-46.
- [3] 赵建, 叶震, 余亮, 等. $\pm 1100\text{kV}$ 特高压长悬臂输电铁塔风振特性研究[J]. 工业建筑, 2019, 49(4): 8-14.
- [4] 张爽, 孙清, 吴彤, 等. $\pm 1100\text{kV}$ 输电塔风振响应及风振系数研究[J]. 特种结构, 2018, 35(4): 52-59.
- [5] 赵爽, 晏致涛, 李正良, 等. 基于风洞试验的苏通大跨越输电塔风振系数研究[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(11): 35-44.
- [6] 谢强, 杨洁. 输电塔线耦联体系风洞试验及数值模拟研究[J]. 电网技术, 2013, 37(5): 1237-1243.