

# 某拉线式测风塔结构荷载计算与分析

程冕洲

北京瑞科同创科技股份有限公司, 北京 100079

**摘要 :** 拉线式测风塔由于其优秀的测量精度以及经济性广泛应用于风资源评估。拉线式测风塔塔身属于一种高耸柔性结构, 依靠钢绞线的拉力保持稳定, 主要承受风荷载及覆冰荷载作用。在进行数值模拟时, 塔身和钢绞线上的荷载计算及施加方式存在差异, 并且风荷载与覆冰荷载之间会相互产生影响, 较为复杂。目前对于拉线式测风塔的荷载计算并没有一个详细明确的方法。本文依托某 141m 拉线式测风塔项目, 介绍其数值模拟中荷载计算方法以及施加方式, 并结合国内外规范对荷载计算中的风振系数等参数进行分析。

**关键词 :** 拉线式测风塔; 数值模拟; 荷载计算; 风荷载

## Structural Load Calculation and Analysis of a Tensioned Wind Tower

Cheng Mianzhou

RETEC, Beijing 100079

**Abstract :** Tie-line wind towers are widely used in wind resource assessment due to their excellent measurement accuracy and economy. The tower body of a tie-line wind tower is a kind of towering flexible structure, which relies on the steel strand to maintain stability and is mainly subjected to wind loads and ice-covering loads. In the numerical simulation, there are differences in the calculation and application of the loads on the tower body and the steel strand, and the wind load and the ice cover load will affect each other, which is more complicated, and there is no detailed calculation method for the load calculation of the tie-line wind tower at present. This paper introduces the load calculation method and application method in numerical simulation and analyzes the wind vibration coefficients and other parameters in the load calculation in combination with domestic and international norms, relying on a project of a 141m cable-type wind tower.

**Key words :** pull-wire wind tower; numerical simulation; load calculation; wind load

## 一、引言

测风塔结构大体上可分为自立式测风塔以及拉线式测风塔, 自立式测风塔通过塔体自身杆件提供支撑, 具有良好的抗扭刚度, 并且减少占地面积。拉线式测风塔塔身由桁架结构组成, 并通过预应力钢绞线提供横向约束以保持稳定, 可以充分发挥两种材料各自的特性, 从而减少工程量。相比于自立式测风塔, 拉线式测风塔的受力更加合理, 并且可以节约 40% 左右的工程量, 在工程上应用更为广泛。

目前, 在进行拉线式测风塔结构设计时, 由于不同的荷载计算方法以及在一些参数上的取值差异, 会对结构的计算结果产生较大的影响, 在工程计算时仍存在问题, 影响结构安全性或造成材料的浪费。本文通过某拉线式测风塔工程实例, 阐述一种完善的荷载计算方法, 对一些参数的不同取值方法进行分析。

## 二、有限元模型建立

拉线式测风塔结构是复杂的高耸柔性超静定结构, 采用有限

元软件开展静力分析。

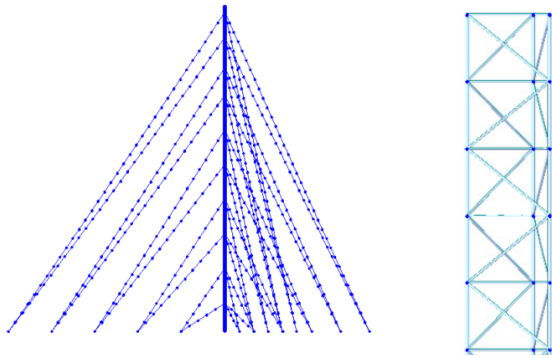
### (一) 项目概况

选取某高度为 141m 的测风塔为研究对象, 该测风塔塔身为格构式钢桁架结构, 共由十层钢绞线和主塔组成, 每两层锚固在同一基础。钢绞线水平分为三个方向, 间隔 120°, 每个方向距离塔柱水平距离分别为 19m、38m、57m、76m、95m, 高度分别为 12m、27m、42m、57m、72m、87m、102m、114m、128m、138m。主塔由多个标准节通过法兰连接, 标准节为实心钢管焊接组成, 每节构件长 3m; 第一节底部呈漏斗状; 主塔截面为等边三角形, 三角形边长为 650mm。该测风塔主塔所有构件均为圆钢, 所有材料均为 Q245 钢材, 共 47 节。竖向塔柱布置分别为  $\Phi 42 \times 25$ 、 $\Phi 36 \times 5$ 、 $\Phi 32 \times 5$ 、 $\Phi 28 \times 12$ 、横杆布置为  $\Phi 16$ ; 次杆布置为  $\Phi 20$  (底部 35 节)、 $\Phi 18$  (顶部 12 节)。

### (二) 模型建立

采用 Midas Gen 有限元软件建立模型, 塔身杆件采用梁单元, 钢绞线采用索单元模拟其只受拉不受压的特性。模型共 1417 个节点, 3120 个单元, 模型示意图如图 1 所示

\* 程冕洲 (1997-), 男, 籍贯: 北京, 民族: 汉族, 职称: 助理工程师, 学历: 研究生, 研究方向: 土木工程



> 图1.模型示意图

### 三、荷载计算及施加方案

拉线式测风塔除自重外，受到的外荷载主要为风荷载和覆冰荷载，由于塔身和钢绞线的构件类型不同，荷载的施工方案亦存在不同。风荷载和覆冰荷载均是沿着高度不断变化的，且覆冰荷载会改变构件的直径，从而对风荷载的计算结果产生影响。在荷载计算的过程中，不同的施加方式及参数取值方法均会对结果产生影响。

#### (一) 钢绞线风荷载

钢绞线的布置在水平面分为三个方向，由于每个方向与风向的夹角不同，故每个方向产生的风荷载也不同，为方便表述，规定自X轴逆时针旋转三个方向分别为A、B、C，每个方向从下至上编号分别为1~10。30根钢绞线编号分别为A1~A10、B1~B10、C1~C10。

对于三向拉线的对称结构，最少需要施加X+、X-、Y+三个方向的风荷载进行验算。笔者建议，在计算钢绞线风荷载时，先将不同方向的风速正交分解为钢绞线的切向及法向，计算完两个方向的力后再进行合成，此原因会在后文中进行说明。并根据钢绞线的长度对单元进行划分，划分时保证每个单元长度基本一致，并且尽可能多的进行划分，后续按照节点集中力进行风荷载的施加。

垂直作用于高耸结构表面单位计算面积上的风荷载标准值应按式 $\omega_k = \beta_z \mu_s \mu_z \omega_0$ 计算，其中 $\omega_0$ 为基本风压，单位为kN/m<sup>2</sup>，按照项目所在地风速计算，取值不得小于0.35kN/m<sup>2</sup>； $\beta_z$ 为风振系数； $\mu_s$ 为体型系数， $\mu_z$ 为高度z处的风压高度变化系数。

#### (1) 钢绞线风振系数 $\beta_z$

风振系数是结构总响应与平均风压引起的结构响应的比值，可根据相应峰值因子、紊流度、风剖面指数、脉动增大系数、振型系数等参数求得。《高耸结构设计标准》(下称高耸规范)中规定风振系数的简便取值，表明钢桅杆纤绳风振系数在高度不大于150m时均取1.6即可。但笔者认为，风振系数是沿着高度变化的系数，如按照同一取值进行计算，在不同的环境以及结构形式中，难免会出现材料的浪费，以此法取值设计出的结构合理性需要进一步探讨。

笔者通过对国内规范《建筑结构荷载规范》(下称荷载规范)与欧洲标准《EN 1991-1-4》中对于风振系数的计算方法进行分

析，按照规范对风振系数的取值进行了较为真实的计算，由于具体计算过程篇幅较长，不在此进行赘述，各参数计算结果如下表所示<sup>[1][2]</sup>。

表1 风振系数计算

相对高度 z/H	实际高度 H <sub>z</sub>	高度变化系数 U <sub>z</sub>	背景因子 B	共振因子 R	湍流强度 I	峰值因子 g	风振系数 β <sub>z</sub>
0.100 14.100		1.378	0.031	1.712	0.120	2.500	1.036
0.200	28.200	1.643	0.077	1.712	0.120	2.500	1.092
0.300	42.300	1.813	0.163	1.712	0.120	2.500	1.194
0.400	56.400	1.941	0.250	1.712	0.120	2.500	1.298
0.500	70.500	2.054	0.350	1.712	0.120	2.500	1.416
0.600	84.600	2.148	0.452	1.712	0.120	2.500	1.538
0.700	98.700	2.224	0.560	1.712	0.120	2.500	1.666
0.800	112.800	2.289	0.729	1.712	0.120	2.500	1.867
0.900	126.900	2.354	0.771	1.712	0.120	2.500	1.918
1.000	141.000	2.419	0.873	1.712	0.120	2.500	2.038

笔者将钢绞线沿高度变化分为十段以此计算风振系数，如需要更精确的荷载取值，可进一步进行划分。根据表格可以发现，风振系数 $\beta_z$ 在98m处数值为1.666，超过高耸规范中的1.6取值。需要注意的是，计算出的风振系数根据《工程结构通用规范》规定不应小于1.2，故计算出小于1.2的值均应取1.2。对于拉线式测风塔结构，笔者仍验算了120m、130m、150m的测风塔结构，由于所在地环境不同会有些许差异，但风振系数均会在0.6~0.7倍塔高的区间内超过1.6。由此可知，若风振系数在150m高度以下若均按1.6取值会造成上部风荷载计算偏小，下部风荷载计算偏大的情况。通过对120m~150m高度的拉线式测风塔工程量进行统计发现，按此法计算所设计的塔身工程量会略大于计算所得，故笔者建议按照公式进行风振系数的计算，不建议150m以下所有高度的风振系数均按照同一数值取值<sup>[3][4]</sup>。

除此以外，在计算风振系数时，计算过程中的参数共振因子的取值与结构的自振频率有关。然而结构在覆冰以后自振频率会产生变化，若需要求得更为精确的数值，在计算覆冰工况下风荷载取值时，应当根据当地实际覆冰厚度修改模型后再计算结构的自振频率，以此算得精确的数值。

#### (2) 钢绞线体型系数

体型系数 $\mu_s$ 表示了建筑物表面在稳定风压作用下的静态压力的分布规律，目前无法完全从理论上确定，仅可通过规范中经验值计算或开展风洞试验求得，但通过规范求得的体型系数仍存在一些差异，在实际工程计算中经常出现按照经验取保守值的情况，进而造成材料的大量浪费<sup>[5]</sup>。

在计算钢绞线体型系数时，荷载规范中有对于风向与钢绞线在垂直面产生夹角时的算法，高耸规范中有对于风向与钢绞线在水平面产生夹角时的算法，但往往进行风荷载计算时既存在水平夹角也存在竖向夹角，此时两本规范中的方法均不适用。

针对此问题笔者提出，若风向与钢绞线既存在水平夹角也存在竖向夹角时，应通过风速分解的方法进行计算。可以对风速进

行正交分解分解为钢绞线的法向方向与切向方向，通过分解后的法向风速与切向风速计算法向风压与切向风压，后续则可根据相应规范求得对应的体型系数以计算荷载。钢绞线体形系数的影响因素为钢绞线与风向水平和竖直的夹角，与覆冰厚度无关，在计算体形系数时无需考虑覆冰厚度的影响。

### (3) 钢绞线风压高度变化系数

风压高度变化系数  $\mu_z$  是沿高度不断变化的参数。上述风振系数部分有提到根据相对高度的划分方法，划分的段数越多，所求得结果更为精确。经过多个数值模拟分析，笔者认为在计算时分为十段可满足大部分的计算需求。

上文中计算体型系数时，将风速进行了正交分解，故最后计算出来的风荷载方向应与上述风速正交分解后的方向相同。计算出钢绞线上的风荷载后，由于索单元的结构特性，应将风荷载乘钢绞线的直径和长度后除以节点个数，按照节点荷载进行施加。在覆冰工况下，计算直径取值应为覆冰后的钢绞线直径。

### (二) 塔架风荷载

前文中详细讲述了一种钢绞线的风荷载计算与施加方式，塔架的风荷载计算方法与施加方式与其略有不同。塔架风荷载计算中的风振系数  $\beta_z$  与风压高度变化系数  $\mu_z$  与钢绞线的计算方法一致，塔架的体型系数计算和施加方式则与钢绞线不同<sup>[9]</sup>。

首先在计算塔架体型系数时，对于三角形角钢塔架，可先计算其挡风系数（迎风面杆件和节点净投影面积 / 迎风面轮廓面积），然后根据工程经验求得每一段塔架相应的体型系数，按高度进行划分时，应按照上述在计算钢绞线风振系数时的划分方法保持一致，以免造成参数对应关系错误而导致荷载计算误差。

其次在施加方式上，钢绞线为索单元，根据其单元特性，仅能按照节点荷载进行施加，而塔架的杆件为梁单元，可以按照线荷载进行施加。计算出构件的风荷载值后乘上塔身相应的构件的宽度得到应施加在构件上的线荷载值，线荷载的方向应与风向保持一致。若与构件产生夹角，在进行计算时，线荷载的计算长度应为风向在构件上的投影面积，而不是构件自身长度。与钢绞线体形系数计算不同，覆冰厚度会严重影响塔架的体形系数计

算，所以在计算覆冰工况时应考虑覆冰以后的构件尺寸显得尤为重要<sup>[7][8]</sup>。

### (三) 覆冰荷载

根据公式  $q = \pi \cdot b \cdot a_1 a_2 (d + b \cdot a_1 \cdot a_2) \cdot \gamma \cdot 10^{-6}$  计算覆冰重力荷载， $q$  为单位长度上的覆冰重力荷载 (kN/m)； $b$  为基本覆冰厚度 (mm)； $a_1 a_2$  分别为与构件有关、与高度有关的修正系数； $d$  为圆截面构件、拉绳、缆索、架空线的直径 (mm)； $\gamma$  为覆冰重度，一般取  $9 \text{ kN/m}^3$ 。在监测出实际覆冰厚度时  $b$  不需要进行修正，实际覆冰厚度为  $b \cdot a_1 a_2$ 。覆冰荷载除了方向竖直向下外，其他施加方式与上述风荷载相同，此处不再赘述<sup>[9]</sup>。

### (四) 荷载组合

进行荷载组合时，对于不同指标的验算应分为正常使用极限状态、承载能力极限状态，其中正常使用极限状态的组合为 1.0 恒荷载 + 1.0 活荷载；承载能力极限状态组合为 1.3 恒荷载 + 1.5 活荷载。活荷载组合可大体分为是否考虑覆冰的不同组合，在考虑覆冰时，风荷载的组合系数折减从 1.0 折减为 0.25 ~ 0.7，故当覆冰荷载较小时，不考虑覆冰的组合方式更为不利<sup>[10]</sup>。例如本测风塔，在覆冰厚度 10mm 时，为风荷载 + 自重 + 平台活荷载组合最不利，塔柱最大应力值为 188.3Mpa，横杆最大应力值为 134.5Mpa，次杆最大应力值为 52.0Mpa。

## 四、结语

本文以我国某 141m 拉线式测风塔为依托，根据国内外规范对于风振系数、体形系数等参数选择了一种较为合理的算法，结合荷载规范及欧洲标准对风振系数进行精确计算，并与高耸规范中风振系数的简便取值进行对比分析，建议仍按照实际情况进行计算，简便取值仍存在不足。笔者提出了一种拉线式测风塔钢绞线体形系数的取值方法，对荷载规范及高耸规范进行融合，提高了计算精度及合理性阐述了拉线式测风塔的荷载计算方法及施加方式，并对覆冰组合工况进行分析。以上的分析与结论对日后的类似工程项目具有借鉴参考价值。

## 参考文献:

- [1] 中华人民共和国国家标准 GB50009-2012 建筑结构荷载规范. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [2] 中华人民共和国国家标准 GB50135-2019 高耸结构设计标准. 北京: 中国计划出版社, 2019.
- [3] 中华人民共和国国家标准 GB55001-2021 工程结构通用规范. 北京: 中国建筑工业出版社, 2021.
- [4] 中华人民共和国广播电视行业标准 GY5001-2004 钢塔桅结构设计规范. 北京: 国家广播电影电视总局, 2004.
- [5] 中华人民共和国国家标准 GB50017-2017 钢结构设计标准. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
- [6] 杨宗奇, 贾晓亚, 张斌. 悬索拉线塔结构设计探究 [J]. 电工技术, 2019(17): 55-57.
- [7] 陈正, 唐可人, 周强, 等. 风荷载作用下输电塔极限承载力和失效模式计算模型 [J]. 建筑科学与工程学报, 2018, 35(2): 47 - 55.
- [8] 白泉, 朱浮声, 康玉梅. 风速时程数值模拟研究 [J]. 辽宁科技学院学报, 2006(1): 1 - 3, 6.
- [9] 钱之银, 耿翠英, 李颖. 超高压输电线路覆冰倒塔机理分析 [J]. 高电压技术, 2008, 34(11): 24952497
- [10] 陈俊旗, 王伟. 覆冰输电塔线体系风振响应数值模拟 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2011, 43(S1): 147 - 151.