

输电塔表面所受龙卷风风压转化为塔结构梁单元节点集中力的算法

王勇

1 引言

在 Workbench 平台下进行龙卷风风场中输电塔结构的单向流固耦合分析的思路为：建立考虑输电塔刚性模型的龙卷风风场，通过 fluent 计算得到刚性输电塔表面的风压分布；将 CFD 计算的风压映射到 ANSYS Mechanical 的表面效应单元 SURF154 上，进而加载到输电塔壳单元上；在 ANSYS Mechanical 中进行有限元分析。

这种方法在 Workbench 平台下容易实现（程序可自动将 CFD 风压映射到结构有限元网格）。但这种方法要求结构必须以实体单元或壳单元离散才能实现 CFD 风压的映射，计算量巨大。本文采用梁单元模拟输电塔结构，具有建模简单、有限元计算量较小等特点，但也引入了新的问题：即 CFD 计算得到的风压分布如何传递到梁单元上？

2 算法

由于流场网格对刚性输电塔表面的离散，使得风压点的位置与实际的输电塔结构表面存在偏差。因此需要设计算法实现如下功能：

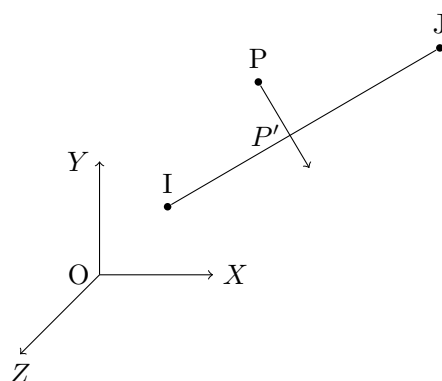


图 1: CFD 风压点 P 与梁单元 IJ 示意图

- 判别每个 CFD 风压点作用于哪个有限元梁单元。
- 将单个 CFD 风压点的风压（垂直于该风压点作用的梁单元的表面）分解到整体坐标系中。
- 将单个有限元梁单元所受所有 CFD 风压点的压力进行合成，并分配到该单元节点上。

任意 CFD 风压点 P 与某个梁单元 IJ 示意图见图1，图中点 P' 为风压点 P 在梁单元轴线 IJ 上的投影。由于本文研究的输电塔为钢管塔，即梁 IJ 的表面为柱面，设其外径为 R_{IJ} ，则 PP' 即为风压作用于梁 IJ 的方向。首先通过如下准则判断风压点 P 是否作用于梁单元 IJ 上：

- P' 是否在线 IJ 内部？
- PP' 是否近似等于单元 IJ 外径？

当同时满足这两个条件时，认为风压点 P 作用于梁单元 IJ 上，数学表达见式(2)。

$$\begin{aligned} \mathbf{P}'\mathbf{I} \cdot \mathbf{P}'\mathbf{J} &< 0 \\ |\mathbf{PP}' - R_{IJ}| &< \epsilon \end{aligned} \quad (1)$$

式中点 P' 的坐标可由式(2)计算，

$$\mathbf{OP}' = \mathbf{OI} - \left(\frac{\mathbf{PI} \cdot \mathbf{IJ}}{|\mathbf{IJ}|^2} \right) \mathbf{IJ} \quad (2)$$

风压点 P 作用于梁单元 IJ 上的风压在整体坐标系下的分量为

$$(p_X, p_Y, p_Z) = p \frac{\mathbf{PP}'}{|\mathbf{PP}'|} \quad (3)$$

根据上述判别法则，对每个 CFD 风压点与每根梁单元进行判别，可确定每根梁单元所受的所有 CFD 风压点及各自的风压分量。下面介绍将单个有限元梁单元所受所有 CFD 风压点的压力进行合成，并分配到该单元节点上的方法。

1. 计算单个有限元梁单元 IJ 受到的所有风压点处风压分量的平均 $\bar{p}_X, \bar{p}_Y, \bar{p}_Z$ ；
2. 将风压根据梁表面面积转化为合力 $F_X = 2\pi R_{IJ} |IJ| \bar{p}_X$ ， Y, Z 方向类似；
3. 将风压合力分量平分到梁单元 I, J 节点上。

至此，完成了将 CFD 风压传递给有限元梁单元节点荷载的算法。

3 测试算例

设计如图2所示的算例测试该算法的有效性。悬臂钢管柱外径 $R = 1.0\text{ m}$ ，高度 $H = 9\text{ m}$ ，单侧受到径向压强，分布为 $p_r(y) = p_0 \frac{y}{H}$, $p_0 = 100\text{ Pa}$ 。据此编程生成风压点及相应的压强值，作为本文算法的输入，输出各节点施加的集中力如图3所示。同时输出各节点集中力的合力见图4所示，与理论合力 $F_X = \int_0^H \int_{\pi/2}^{3\pi/2} p_r(y) \cos(\theta + \pi) R d\theta dy = p_0 R H = 900\text{ Pa}$ 误差很小。

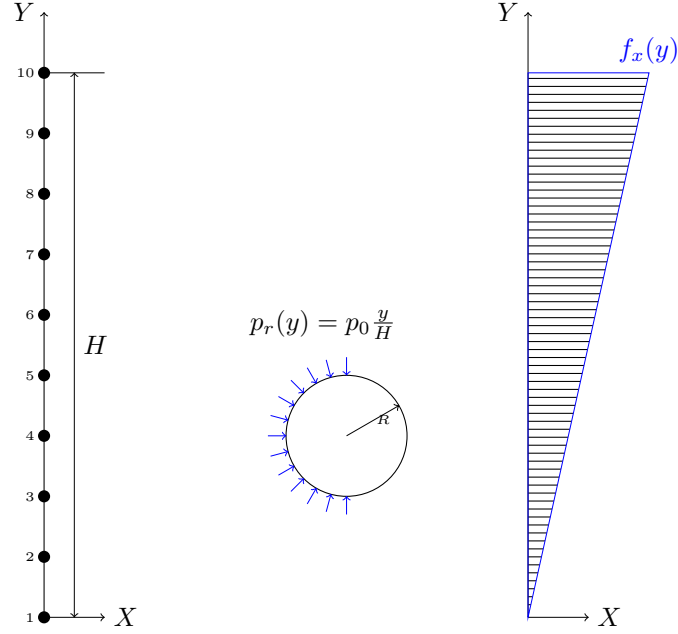


图 2: 测试算例示意图

```
1 F, 1,FX, 5.527
2 F, 1,FY, 0.000
3 F, 1,FZ, -0.000
4 F, 2,FX, 22.526
5 F, 2,FY, 0.000
6 F, 2,FZ, 0.000
7 F, 3,FX, 44.996
8 F, 3,FY, 0.000
9 F, 3,FZ, 0.000
10 F, 4,FX, 66.994
11 F, 4,FY, 0.000
12 F, 4,FZ, 0.001
13 F, 5,FX, 88.994
14 F, 5,FY, 0.000
15 F, 5,FZ, 0.001
16 F, 6,FX, 110.991
17 F, 6,FY, 0.000
18 F, 6,FZ, -0.000
19 F, 7,FX, 132.990
20 F, 7,FY, 0.000
21 F, 7,FZ, -0.002
22 F, 8,FX, 154.990
23 F, 8,FY, 0.000
24 F, 8,FZ, -0.001
25 F, 9,FX, 176.987
26 F, 9,FY, 0.000
27 F, 9,FZ, 0.002
28 F, 10,FX, 93.992
29 F, 10,FY, 0.000
30 F, 10,FZ, 0.002
31
```

图 3: 输出梁单元节点集中力的 APDL 程序

```
CFD Pressure Points mapping ratio: 100.000%.
Sum FX is 898.987 N.
Sum FY is 0.000 N.
Sum FZ is 0.003 N.
```

图 4: 程序计算的合力