



学校代码: 10286

分 类 号: 000

密 级: 公开

U D C: 000

学 号: 140926

心於至善



大跨越输电塔结构在龙卷风作用下的响应分析

王勇

东南大学



## 东南大学 硕士学位论文

### 大跨越输电塔结构在龙卷风作用下的 响应分析

研究生姓名: 王勇

导师姓名: 吕令毅 教授

申请学位类别 工学硕士 学位授予单位 东南大学

一级学科名称 土木工程 论文答辩日期 2017年3月3日

二级学科名称 结构工程 学位授予日期 2017年3月3日

答辩委员会主席 评 阅 人

2017年3月3日

学校代码: 10286

分 类 号: 000

密 级: 公开

U D C: 000

学 号: 140926



东南大学

# SOUTHEAST UNIVERSITY

## 硕士学位论文

### 大跨越输电塔结构在龙卷风作用下的 响应分析

研究生姓名: 王勇

导师姓名: 吕令毅 教授

申请学位类别 工学硕士 学位授予单位 东南大学

一级学科名称 土木工程 论文答辩日期 2017年3月3日

二级学科名称 结构工程 学位授予日期 2017年3月3日

答辩委员会主席 评 阅 人 \_\_\_\_\_

2017年3月3日



東南大學  
硕士学位论文

大跨越输电塔结构在龙卷风作用下的  
响应分析

专业名称: 土木工程

研究生姓名: 王 勇

导师姓名: 吕令毅 教授



# DYNAMIC RESPONSE ANALYSIS OF LONG SPAN TRANSMISSION TOWER STRUCTURE UNDER TORNADO WIND LOADING

A Thesis submitted to  
Southeast University  
For the Academic Degree of Master of Engineering

BY  
Wang Yong

Supervised by:  
Prof. Ling-yi Lv

School of Civil Engineering  
Southeast University

2017/3/3



## 东南大学学位论文独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得东南大学或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

研究生签名: \_\_\_\_\_ 日期: \_\_\_\_\_

## 东南大学学位论文使用授权声明

东南大学、中国科学技术信息研究所、国家图书馆有权保留本人所送交学位论文的复印件和电子文档，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文。本人电子文档的内容和纸质论文的内容相一致。除在保密期内的保密论文外，允许论文被查阅和借阅，可以公布（包括刊登）论文的全部或部分内容。论文的公布（包括刊登）授权东南大学研究生院办理。

研究生签名: \_\_\_\_\_ 导师签名: \_\_\_\_\_ 日期: \_\_\_\_\_



## 摘要

第一章主要描述了龙卷风风场的特性；利用 CFD 技术模拟了龙卷风缩尺风场，与试验对比以验证数值风场的正确性；最终与实测的 Spencer 龙卷风足尺风场进行对比，以确定数值风场的长度缩尺比和速度缩尺比。

第二章根据500 kV南京三江口长江大跨越工程进行输电塔结构的有限元建模，进行模态分析，提取各阶固有频率和振型与文献进行对比，以确定有限元模型的正确性。

第三章研究了将极坐标系下的缩尺龙卷风风场转化为直角坐标系下的足尺风场，并提取输电塔结构上任意节点处所受龙卷风的风速分量。然后根据中美相关规范探讨施加龙卷风荷载的方法；还利用经典的悬链线理论计算输电线传给输电塔的张力。最终将上述方法编制成 APDL 程序，进行输电塔结构在重力、输电线张力和静态龙卷风荷载作用下的静力弹塑性分析。程序可以改变龙卷风核心位置，进行塔顶位移的参数化分析，以确定位移响应的危险工况。

关键词： 龙卷风数值模拟；大跨越输电塔结构；悬链线理论；参数化分析



## **Abstract**

**Keywords:**



# 目录

摘要 . . . . .	I
<b>Abstract . . . . .</b>	<b>III</b>
第一章 龙卷风风场及其数值模拟 . . . . .	1
1.1 龙卷风的特性及描述 . . . . .	1
1.1.1 龙卷风的强度等级 . . . . .	1
1.1.2 龙卷风的特征参数 . . . . .	1
1.1.3 龙卷风的 Rankine 涡模型 . . . . .	1
1.2 缩尺龙卷风的 CFD 模拟 . . . . .	3
1.2.1 风场几何区域 . . . . .	4
1.2.2 网格划分 . . . . .	4
1.2.3 湍流模型 . . . . .	5
1.2.4 边界条件 . . . . .	5
1.2.5 控制方程及求解选项 . . . . .	7
1.3 龙卷风数值模拟结果及其正确性验证 . . . . .	7
1.3.1 Baker 试验对比 . . . . .	7
1.3.2 数值风场的风速分布特征 . . . . .	9
1.3.3 数值风场的风压分布特征 . . . . .	9
1.4 足尺龙卷风 CFD 模拟 . . . . .	9
1.4.1 长度相似比和速度相似比 . . . . .	9
1.4.2 足尺龙卷风风场 CFD 模拟 . . . . .	12
第二章 输电塔结构在龙卷风作用下的静态响应分析 . . . . .	15
2.1 500 kV 南京三江口长江大跨越工程介绍 . . . . .	15
2.1.1 输电塔有限元模型 . . . . .	15
2.1.2 输电塔结构模态分析 . . . . .	17
2.2 输电塔龙卷风荷载计算的 FSI 方法 . . . . .	19
2.2.1 单向流固耦合方法介绍 . . . . .	19
2.2.2 包含输电塔刚性模型的龙卷风风场 . . . . .	19
2.2.3 龙卷风风压转化为输电塔梁单元节点集中力 . . . . .	20
2.2.4 输电塔支撑构件的龙卷风荷载计算 . . . . .	24

---

2.3	输电塔龙卷风荷载计算的规范方法 . . . . .	24
2.3.1	龙卷风风场处理 . . . . .	24
2.3.2	输电塔结构龙卷风风荷载计算 . . . . .	26
2.3.3	索的悬链线理论及输电线作用于塔的荷载 . . . . .	31
2.4	FSI 方法与规范方法的对比 . . . . .	35
第三章	考虑龙卷风平移的动态响应分析 . . . . .	39
3.1	动态龙卷风模型 . . . . .	39
3.1.1	龙卷风路径 . . . . .	39
3.2	动态龙卷风风速及荷载时程 . . . . .	40
3.2.1	典型龙卷风运动工况 . . . . .	40
3.2.2	动态龙卷风风速时程 . . . . .	42
3.2.3	动态龙卷风荷载时程 . . . . .	42
3.3	输电塔结构动力时程分析 . . . . .	44
3.3.1	动力方程及其求解 . . . . .	44
3.3.2	输电塔结构的阻尼 . . . . .	45
3.3.3	输电塔动态响应结果 . . . . .	45
参考文献	. . . . .	47
附录 A	龙卷风数值模拟速度入口处边界条件的 UDF 程序 . . . . .	51
附录 B	计算输电线对输电塔荷载的 APDL 和 MATLAB 程序 . . . . .	53
B.1	计算跨越塔之间输电线对跨越塔水平荷载的 ANSYS APDL 命令流 . . . . .	53
B.2	计算跨越塔之间输电线对跨越塔竖向荷载的 MATLAB 程序 . . . . .	55
附录 C	静态响应分析的 APDL 程序 . . . . .	57
C.1	主程序.\SETUP.MAC . . . . .	57
C.2	参数定义子程序.\InputAPDL\PARA.MAC . . . . .	59
C.3	有限元模型子程序.\InputAPDL\MODEL.MAC . . . . .	60
C.4	龙卷风荷载施加子程序.\InputAPDL\WLOAD.MAC . . . . .	60
C.5	输电塔结构响应提取子程序.\InputAPDL\POST.MAC . . . . .	62

# 第一章 龙卷风风场及其数值模拟

## 1.1 龙卷风的特性及描述

无论是模拟龙卷风，还是评估龙卷风对结构的影响，都需要对龙卷风的风场特性进行研究。人们采用龙卷风的强度级数来衡量龙卷风造成的破坏的程度。但由于龙卷风风场的复杂性，实际工程的抗龙卷风设计中，一般对其进行简化。目前工程界主要通过给定龙卷风的特征参数以及通过 Rankine 涡模型中给定的龙卷风切向速度和压强等详细流场信息，来确定龙卷风对结构的影响。

### 1.1.1 龙卷风的强度等级

1970 年，美国芝加哥大学的藤田（T. Theodore Fujita）教授提出将龙卷风按最大风速划分为 7 个等级，这种等级划分方法即为藤田级数。但要直接测量龙卷风的最大风速并不容易，一般是根据龙卷风带来的破坏程度来估计龙卷风的最大风速，进而确定它的强度等级。

2007 年 2 月 1 日起，美国气象部门采用改进的藤田级数（The Enhanced F-scale<sup>[1]</sup>）。改进的藤田级数见表1.1，分为 EF0 到 EF5 级。它考虑了建筑物的坚固程度，对物体进行分类，共包括 23 种房屋以及 5 种非房屋类，如树木、桅杆等。通过对给定各类物体的破坏描述，来估计龙卷风的最大风速，确定龙卷风的强度等级。因此，改进的藤田级数能更准确地评估龙卷风的强度<sup>[2]</sup>。

### 1.1.2 龙卷风的特征参数

工程计算采用的龙卷风风场模型，具有如下参数：（1）最大旋转风速  $V_R$ ；（2）龙卷风涡的平移速度  $V_T$ ；（3）最大旋转风速的半径  $R$ ；（4）气压降  $\Delta P$ ；（5）气压降速率  $dP/dt$ 。

我国《三十万千瓦压水堆核电厂安全重要土建结构抗龙卷风设计规定》中根据我国国情给出的两组龙卷风设计参数，如表1.2所示。除龙卷风发生概率低于  $10^{-7}$  的地区以外，根据厂址所在地区龙卷风资料的调研结果，从安全角度出发，选用一组合适的设计参数作为设计基准龙卷风<sup>[3]</sup>。

### 1.1.3 龙卷风的 Rankine 涡模型

为了描述龙卷风风场的相关详细信息，工程界采用较多的是由 Depperman<sup>[4]</sup> 于 1947 年提出的 Rankine 涡模型。Rankine 涡模型是满足 Navier-Stokes 方程的最简单的模型，仅

表 1.1: 龙卷风强度级数的划分

等级	风速 (m/s)	破坏程度
EF0	29.2 – 38.1	轻度破坏: 烟囱被损坏; 刮断树枝; 浅根系树木倾斜; 毁坏商店招牌
EF1	38.3 – 49.4	中度破坏: 掀起屋顶的砖瓦; 掀翻移动住房; 行动汽车被刮离路面
EF2	49.7 – 60.6	较严重破坏: 刮走屋顶; 摧毁活动住房; 掀翻火车车厢; 连根拔起大树; 空中轻物乱飞; 汽车被卷起
EF3	60.8 – 73.9	严重破坏: 坚固房屋屋顶和墙壁被刮走; 掀翻火车; 森林中大多数树木被连根拔起; 重型汽车被卷离地然后被抛起
EF4	74.2 – 89.4	毁灭性破坏: 坚固房屋被整体刮倒; 基础不牢的建筑物被刮跑; 汽车被抛向空中, 空中比较大的物件横飞
EF5	> 89.4	极度破坏: 坚固房屋框架被刮走; 汽车大小的物件在空中横飞超过 100 米; 飘飞碎片挂树梢; 出现很罕见的现象

表 1.2: 设计基准龙卷风特性

组别	最大风速 $V$ (m/s)	旋转风速 $V_R$ (m/s)	平移风速 $V_T$ (m/s)	最大旋转半径 $R$ (m)	压力降 $\Delta P$ (Pa)	降压时间 $t$ (s)
A	107.3	84.9	22.4	45.7	8620	2.5
B	134.1	107.3	28.8	45.7	13500	1.875

由切向速度控制。它不考虑径向速度，并假定风速和压强不随高度变化，这在实际情况下是并不存在的。但研究者最关心的也正是龙卷风的切向速度，因为相比于切向速度，龙卷风的径向速度和竖向速度较小。其切向速度与离漩涡中心径向位置的关系曲线见图1.1所示：强制涡区域内 ( $r \leq R$ ) 切向速度与半径成正比，而在自由涡区域内 ( $r > R$ ) 成反比。Rankine 涡的切向速度表达式为<sup>[5]</sup>:

$$\begin{aligned} V_r &= \frac{r}{R} V_R, \quad r \leq R \\ V_r &= \frac{R}{r} V_R, \quad r > R \end{aligned} \tag{1.1}$$

式中： $V_r$  是距涡中心为  $r$  处的切向风速， $V_R$  为 Rankine 涡中的最大切向风速， $R$  为最大切向风速对应的旋转半径。

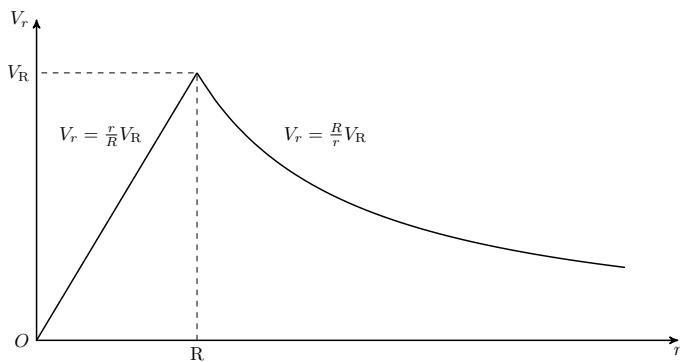


图 1.1: Rankine 涡模型中切向速度沿涡半径的变化曲线图

## 1.2 缩尺龙卷风的 CFD 模拟

本文选择 Ward 型龙卷风发生装置 (Ward-type Tornado Vortex Chamber, 下文简称 Ward-TVC)<sup>[6]</sup> 的改进版 (Purdue-TVC)<sup>[7]</sup> 进行数值模拟, Purdue-TVC 的示意图见图1.3(a)。 Davies-Jones<sup>[8]</sup> 详细评述了各种龙卷风发生装置, 认为 Ward-TVC 与实际发生的龙卷风之间具有较好的几何和动力学相似性 (geometric and dynamic similarity)。

控制龙卷风风场的主要无量纲参数为<sup>[9]</sup>: 高宽比  $A$ 、涡流比  $S$ 、雷诺数 (Reynolds number)  $Re$ 、弗劳德数 (Froude number)  $Fr = (\Delta P / 2g\Delta\rho z)^{1/2}$ ;  $\Delta P$  为气压降、 $\Delta\rho$  为流域内空气密度的变化、 $g$  为重力加速度、 $z$  为距离地面的高度。高宽比和涡流比的定义如下:

$$A = H_0/R_0 \quad (1.2)$$

$$S = V_t/2AV_r \quad (1.3)$$

其中  $R_0$  为上升气流孔的半径,  $H_0$  为气流入口的高度 (见图1.3(a)),  $V_t$  和  $V_r$  为  $R_0$  处的切向和径向入流速度。试验<sup>[6][7][10]</sup> 和数值模拟<sup>[8]</sup> 等说明涡流比是控制龙卷风风场特征的最主要参数。图1.2展示了龙卷风风场结构随涡流比的增大而发生变化<sup>[11]</sup>。

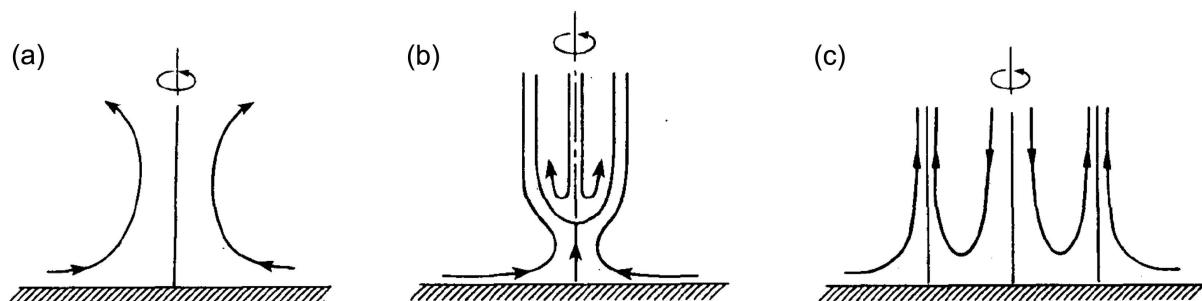


图 1.2: 增大涡流比引起龙卷风风场结构发生变化的示意图

随着涡流比的增大, 龙卷风从射流状流场变化为单涡状涡旋 (图1.2(a)), 接着风场产生一个驻点、涡旋脱离地面 (图1.2(b)), 最后涡旋着地, 分裂形成双涡状龙卷风

(图1.2(c))。

本节主要介绍计算流体力学软件 ANSYS Fluent 模拟 Ward-TVC 的方法，并探讨涡流比对数值风场的影响。

### 1.2.1 风场几何区域

数值模拟的计算流域取 Purdue-TVC 的阴影区域，见图1.3(a)。为了与 Baker<sup>[12]</sup> 的试验进行对比以验证数值风场的正确性，取计算流域的尺寸及边界条件如图1.3(b)所示。其中  $X$  轴对应龙卷风场的径向， $Z$  轴对应龙卷风场的竖向。

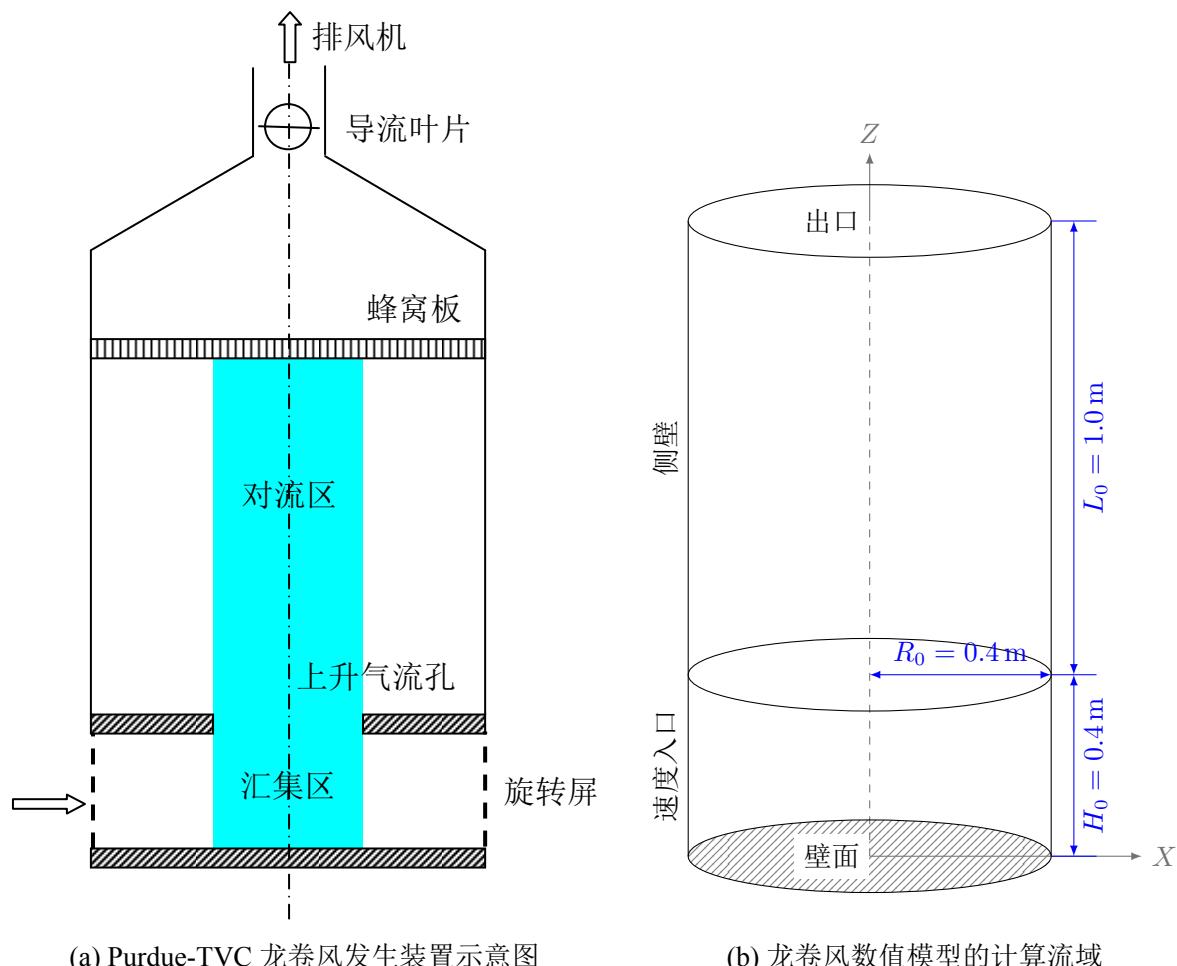


图 1.3: 龙卷风发生装置和计算流域示意图

### 1.2.2 网格划分

采用适应性良好的六面体结构化网格进行计算流域的划分。初始网格数量大概为 300,000，然后根据速度梯度和  $Y+$  进行自适应网格划分<sup>[13]</sup>。由于工程实际主要关注近地面附近龙卷风对结构的作用，故细分主要针对近地面流域处的网格。不断加密网格

直到近地面最大切向速度和最大切向速度所在半径的位置前后两次计算结果相差小于5%。最后根据计算机的能力及计算结果的有效性，采用的网格数量为1,536,000。

### 1.2.3 湍流模型

龙卷风风场是旋流流场，根据 Launder<sup>[14]</sup> 的研究，采用雷诺应力方程模型（RSM）较为合适。模型参数为： $C_\mu = 0.09$ ;  $C_{1\varepsilon} = 1.44$ ;  $C_{2\varepsilon} = 1.92$ ;  $C1 - ps = 1.8$ ;  $C2 - ps = 0.6$ ;  $C1' - ps = 0.5$ ;  $C2' - ps = 0.3$ 。湍流动能（TKE）普朗特数为1; 湍动耗散率（TDR）普朗特数为1.3。

### 1.2.4 边界条件

速度入口处径向和切向速度分布采用如下形式：

$$V_r(z) = V_0 \times (z/z_0)^{1/7} \quad (1.4)$$

$$V_t(z) = 2 \times S \times V_r(z) \quad (1.5)$$

式中， $V_r$  为径向速度， $V_t$  为切向速度， $V_0$  为参考速度， $z_0$  为参考高度， $S$  为涡流比。

图1.4为公式(1.4)和(1.5)所定义的风速分布与 Baker<sup>[12]</sup> 试验的对比。注意到试验风速分布与试验装置有关，而非实际的大气边界层风速分布。公式(1.4)和(1.5)类似于大气边界层风速分布，并尽可能与 Baker<sup>[12]</sup> 试验保持一致。

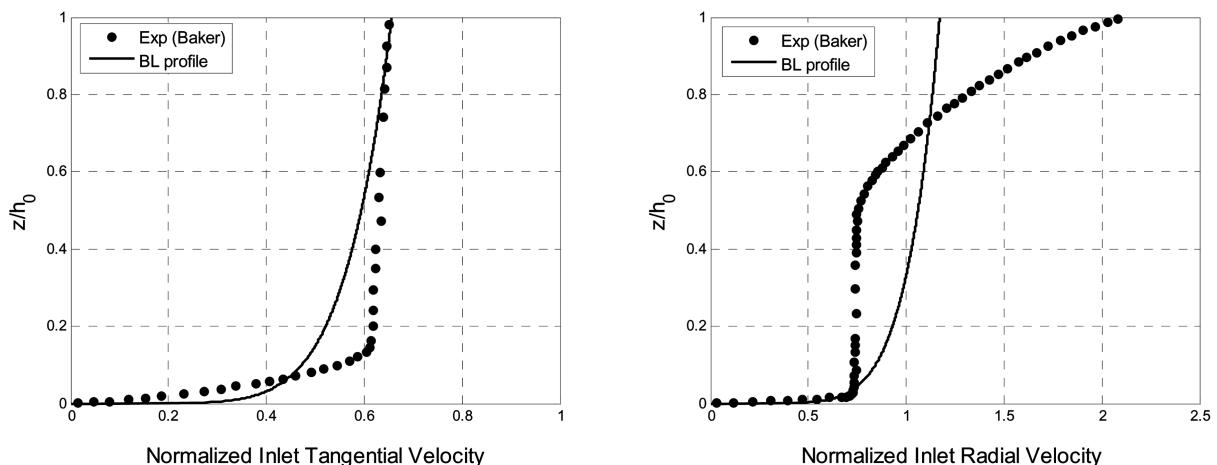


图 1.4: 入口处规格化切向和径向速度与 Baker<sup>[12]</sup> 试验的对比

试验表明，沿壁面法线方向的不同距离，可以将近壁面区域分成三层区域。最里层，又称粘性底层，流动区域很薄，粘性力在动量、热量及质量交换中都起主导作用；最外层为对数率层，粘性力不起主要作用；两层之间的区域为过渡层，粘性力作用与湍流作用相当。

为描述粘性底层和对数率层内的流动，现引入无量纲参数  $u^+$  和  $y^+$ ：

$$u^+ = \frac{u}{u_\tau} \quad (1.6)$$

$$y^+ = \frac{yu_\tau}{\nu} = \frac{y}{\nu} \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (1.7)$$

式中： $u$  是流体的时均速度、 $u_\tau = \sqrt{\tau_w/\rho}$  为壁面摩擦速度、 $\tau_w$  为壁面处切应力、 $\nu$  为空气动粘度系数、 $y$  为壁面第一层节点到壁面的距离。

以  $y^+$  的对数为横坐标，以  $u^+$  为纵坐标，可将壁面区域内的三个区域表示为图1.5所示<sup>[15]</sup>。

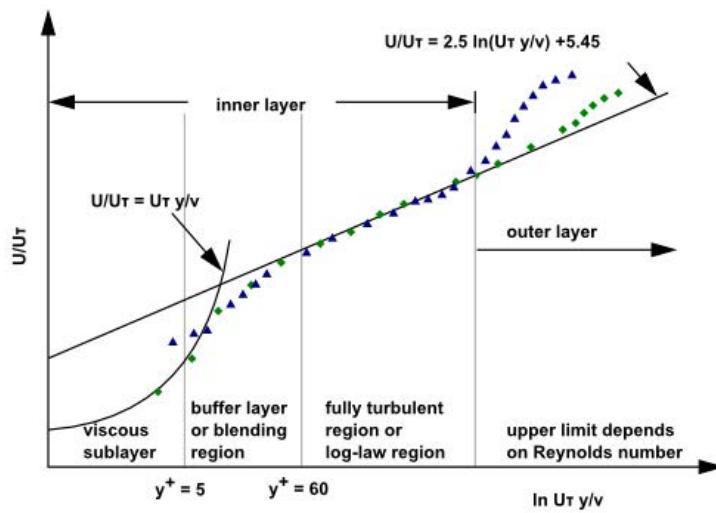


图 1.5: 近壁面区域划分

通常有两种方法模拟近壁面区域：一种采用“壁面方程”的半经验公式模拟受粘性力影响较大的区域，能够较好地修正湍流模型，解决壁面的存在对流场的影响；另一种方法采用低 Re 数的  $k - \varepsilon$  模型来求解粘性底层和过渡层，越靠近壁面，网格划分就越细，这种方法被称为“近壁面模型”法。图1.6为两种方法的对比<sup>[15]</sup>。

本文地面处采用强化壁面函数（Enhanced wall treatment<sup>[13]</sup>），需要对近壁面的网格进行细化。边界层网格节点是否合适需要检查计算后的  $y^+$  值。 $y^+ = u_\tau y / \nu$  小于 1.5 能取得较好效果。

Smith 的数值模拟<sup>[16]</sup>说明了侧壁的边界条件的选取对汇集区风场（主要关注的区域）的影响很小。因此选择无滑壁面条件。

Purdue-TVC 出口处设置了蜂窝板，能使气流竖直流出，还能阻止排风机对涡旋的影响。试验中排风机驱动了流场运动，而在数值模型中，入口风速驱动了流场运动，且不包含排风机的影响，因此数值模型出口处不需设置代表直流蜂窝板的边界条件。根据 Smith<sup>[16]</sup> 的论述，上边界更合适的边界条件为压强出口边界条件（pressure-outflow）。此边界条件假设除压强外的所有物理量在边界的法向梯度为零<sup>[13]</sup>。

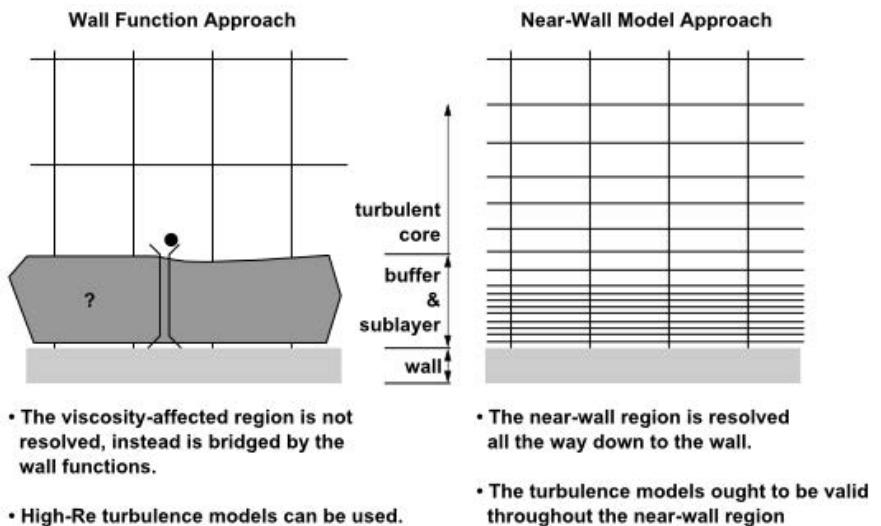


图 1.6: 近壁面区域处理方法

### 1.2.5 控制方程及求解选项

控制方程采用非定常雷诺平均纳维—斯托克斯方程 (Unsteady Reynolds Averaged Navier-Stokes, RANS)。时间离散采用一阶隐性格式，压强速度场的耦合采用压力修正的分离式算法，SIMPLEC 算法。动量、TKE、TDR 和雷诺应力采用二阶迎风格式。

## 1.3 龙卷风数值模拟结果及其正确性验证

图1.3(b)所示的风场几何区域，建立柱面坐标系  $\{O : r\theta z\}$ 。本文主要关注在柱面坐标系下数值风场的速度特征，其中径向 (radial)、切向 (tangential)、竖向 (axial) 风速分别记为  $V_r(r, \theta, z)$ 、 $V_t(r, \theta, z)$  和  $V_a(r, \theta, z)$ 。

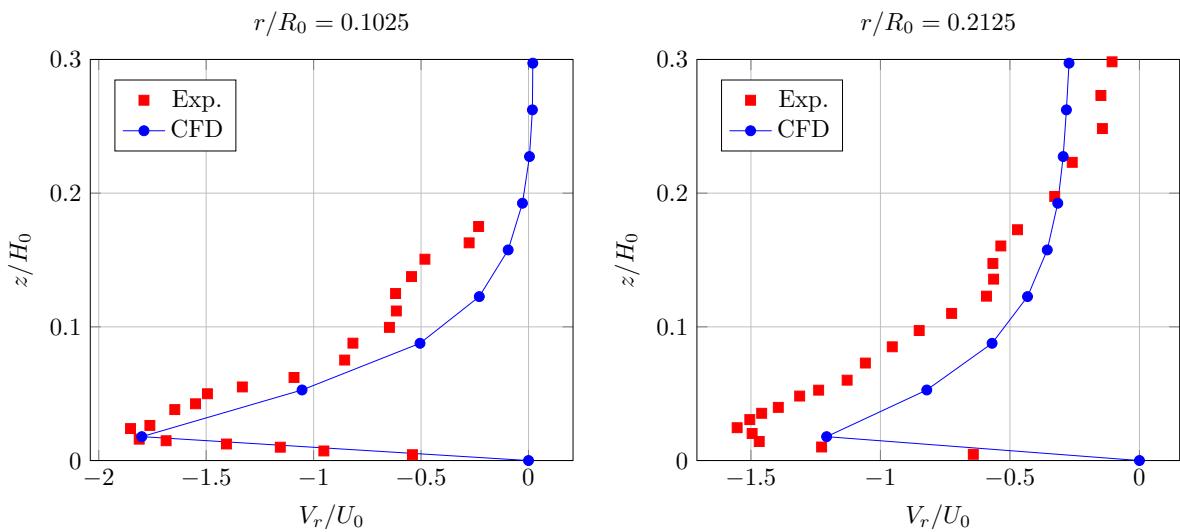
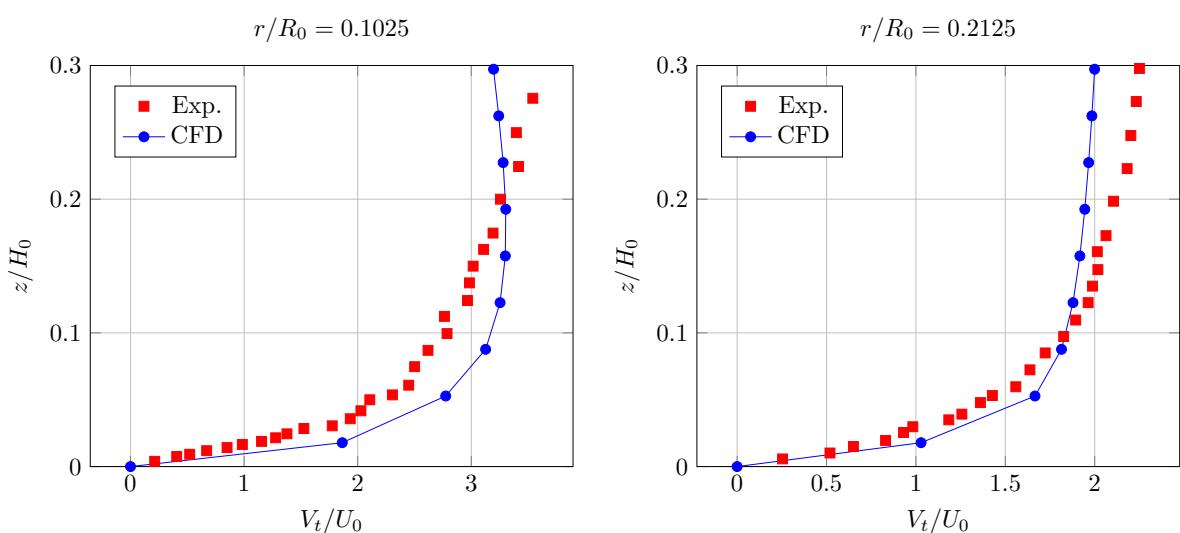
考虑到龙卷风风场具有轴对称性，故对数值风场速度分布沿圆周 ( $r = \text{常数}$ ) 进行平均，消除速度随  $\theta$  的变化，得到轴对称的风场  $V_r(r, z)$ 、 $V_t(r, z)$  和  $V_a(r, z)$ 。

### 1.3.1 Baker 试验对比

Baker 利用 Purdue-TVC 进行了龙卷风风场的试验模拟<sup>[12]</sup>，选取  $S = 0.28$  的风场在  $r/R_0 = 0.1025$  和  $r/R_0 = 0.2125$  处风速各分量随高度变化曲线与数值风场进行对比。将高度以  $R_0$  进行无量纲化，速度以入口平均径向速度  $U_0 = Q/(R_0 H_0)$  进行无量纲化，其中  $2\pi Q$  为速度入口边界处的流量。将(1.4)定义的速度入口边界的径向速度代入可得：

$$U_0 = \frac{Q}{R_0 H_0} = \frac{R_0 \int_0^{H_0} V_r(z) dz}{R_0 H_0} = \frac{\int_0^{H_0} V_0(z/z_0)^{1/7} dz}{H_0} = \frac{7}{8} V_0 \left(\frac{H_0}{z_0}\right)^{1/7} \quad (1.8)$$

图1.7、图1.8和图1.9分别为数值风场 (CFD) 与 Baker 试验无量纲化径向、切向和轴向风速随高度变化的对比图。二者总体上吻合较好。

图 1.7: 数值风场与 Baker 试验无量纲化径向速度随高度变化的对比,  $S = 0.28$ 图 1.8: 数值风场与 Baker 试验无量纲化切向速度随高度变化的对比,  $S = 0.28$

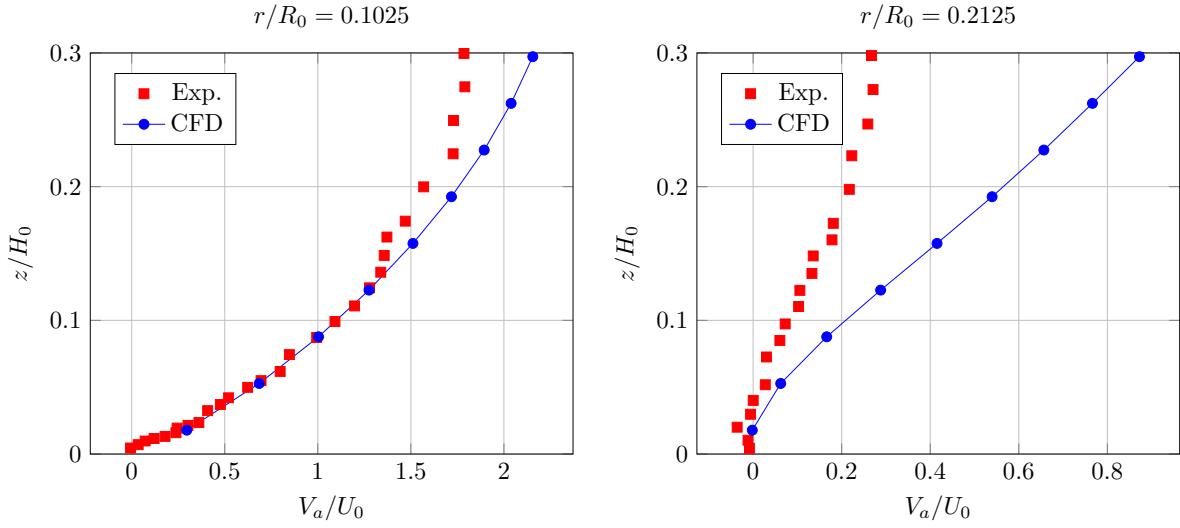


图 1.9: 数值风场与 Baker 试验无量纲化竖向速度随高度变化的对比,  $S = 0.28$

### 1.3.2 数值风场的风速分布特征

图1.10(a)为计算流域轴向剖面 ( $X = 0$ ) 处切向速度云图。从图中可以明显看出涡旋中心处切向速度接近于零; 图1.10(b)为30 mm高度处的切向速度云图, 可以看出流域的涡旋接近中心轴线, 并能显示出漏斗状形态, 显示了龙卷风风场具有很好的涡旋特性。由图1.11可知龙卷风涡旋中心的切向速度较小, 在核心半径处达到最大, 而后随着远离涡旋中心的距离增大而逐渐减小。且在核心半径内, 切向速度的变化较快, 而远离核心半径时, 变化逐渐缓和, 与 Rankine 模型吻合较好。此外还可看出随着离地高度的增加, 核心半径有所增大, 而最大切向风速呈逐渐减小的趋势。

### 1.3.3 数值风场的风压分布特征

图1.12(a)和图1.12(b)分别给出了计算流域轴向剖面 ( $X = 0$ ) 和水平剖面 ( $Z = 30$  mm) 处风压云图,  $P_m$  是风场最大静压, 为负压。可以看出龙卷风中心处离地面一定高度范围内存在很强的负压, 且随着半径的增加而逐渐减小。

图1.13给出了三种不同高度处的风压沿径向的分布, 可以看出不同高度处风压分布接近一致。

## 1.4 足尺龙卷风 CFD 模拟

### 1.4.1 长度相似比和速度相似比

足尺风场选用 1998 年 5 月发生在美国南达科他州 Spencer 地区的实测龙卷风风场, 这些数据由车载式多普勒雷达采集, Wurman 等人有详细的介绍<sup>[17][18][19]</sup>。

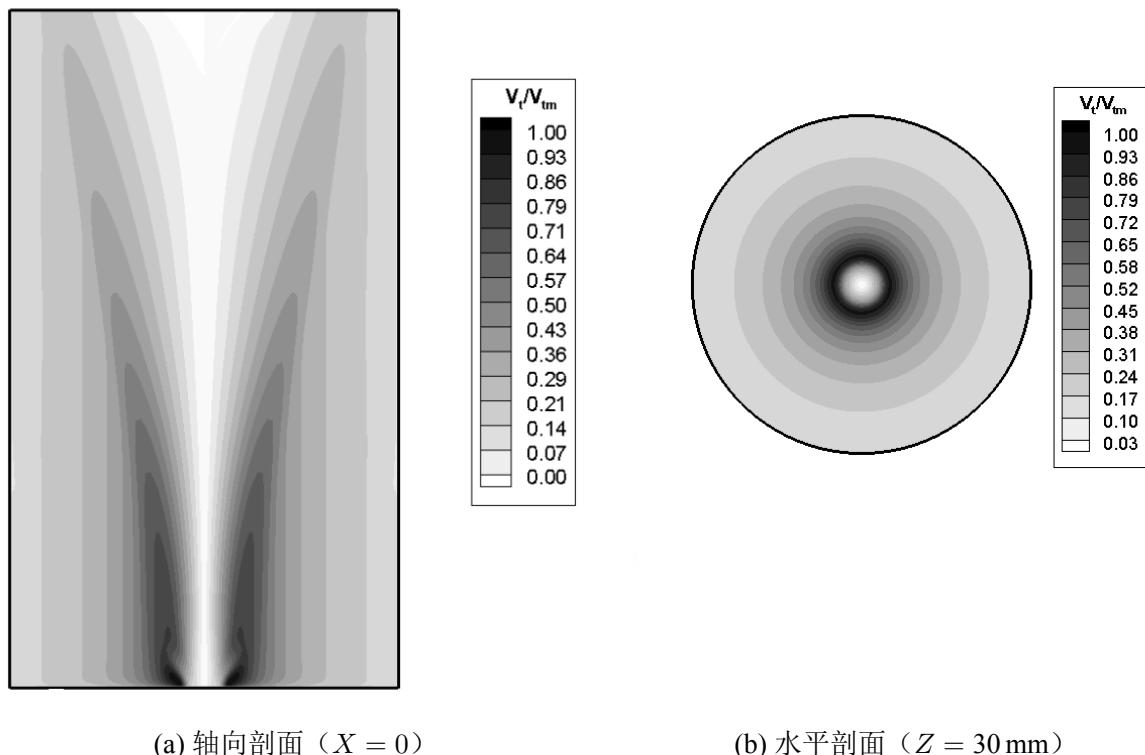


图 1.10: 切向速度云图

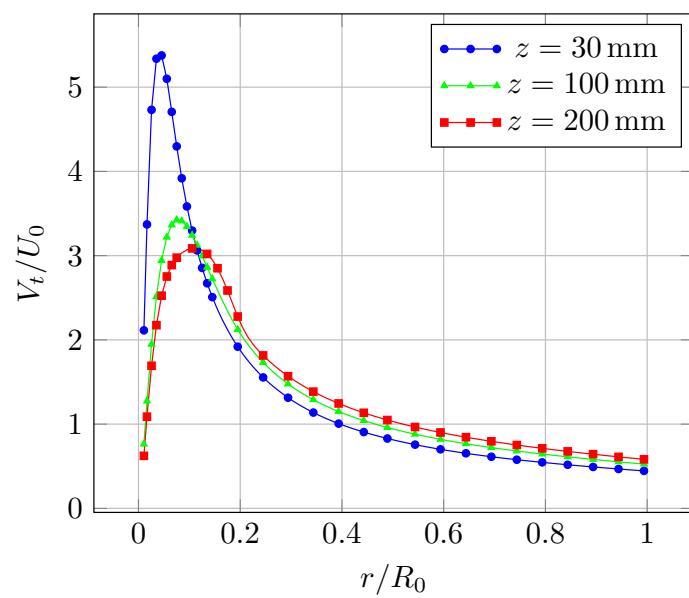


图 1.11: 数值风场不同高度处切向速度沿径向的变化图,  $S = 0.28$

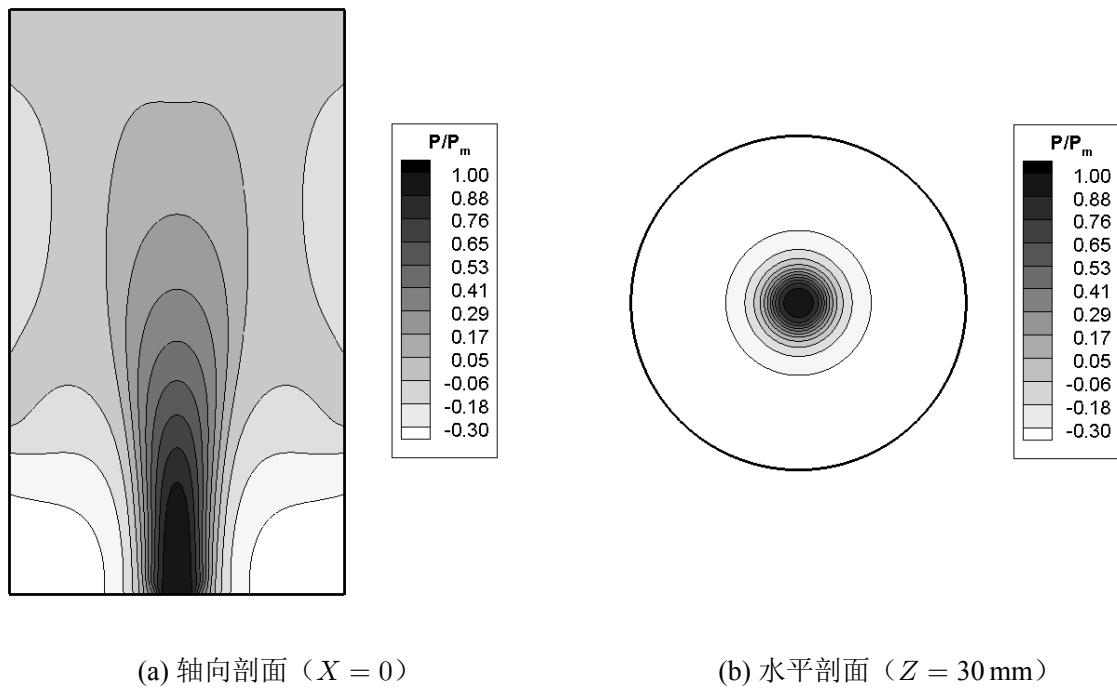


图 1.12: 风压云图

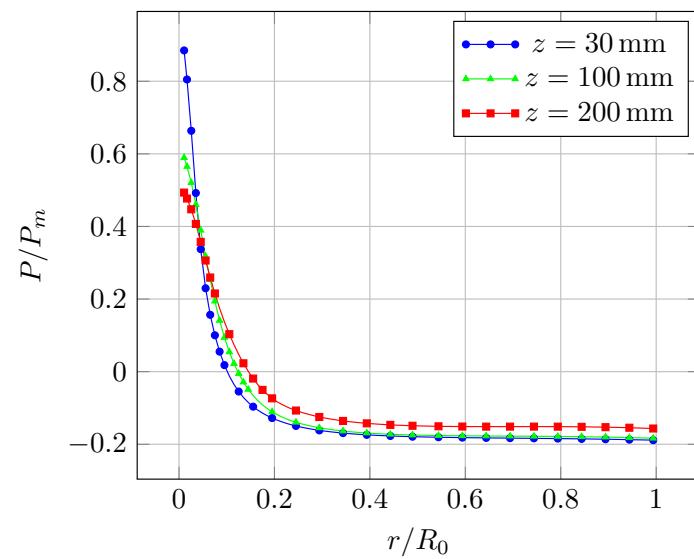


图 1.13: 数值风场不同高度处风压沿径向的变化图

采集的风场在不同竖向高度处、 $2\text{ km} \times 2\text{ km}$ 的水平区域内（水平测点间距为 $20\text{ m}$ ）。将原始风场去除龙卷风平移速度，得到涡旋风场，并利用最小二乘原理将速度场沿圆周平均，以消除多涡等因素的影响。最终得到的龙卷风切向速度随离开涡旋中心径向距离的变化关系如图1.14所示。

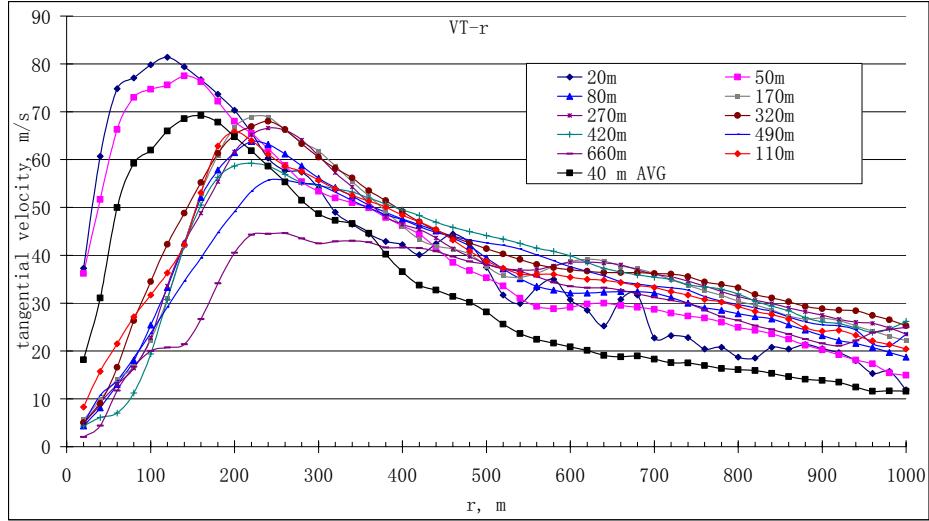


图 1.14: 实测风场在不同高度处切向速度与径向距离的关系曲线<sup>[20]</sup>

考虑缩尺风场和实测风场的最大切向速度及其发生位置  $V_t(r_{c,\max}, z_{\max})$ ，其中  $r_{c,\max}$  为风场在  $z_{\max}$  高度处的核心半径（龙卷风最大切向速度点距龙卷风中心的距离）。速度相似比和长度相似比定义为<sup>[11]</sup>:

$$V_s = \frac{V_{t,\max}^{\text{Full}}}{V_{t,\max}^{\text{CFD}}} \quad (1.9)$$

$$L_s = \frac{r_{c,\max}^{\text{Full}}}{r_{c,\max}^{\text{CFD}}} \quad \text{or} \quad \frac{z_{c,\max}^{\text{Full}}}{z_{c,\max}^{\text{CFD}}} \quad (1.10)$$

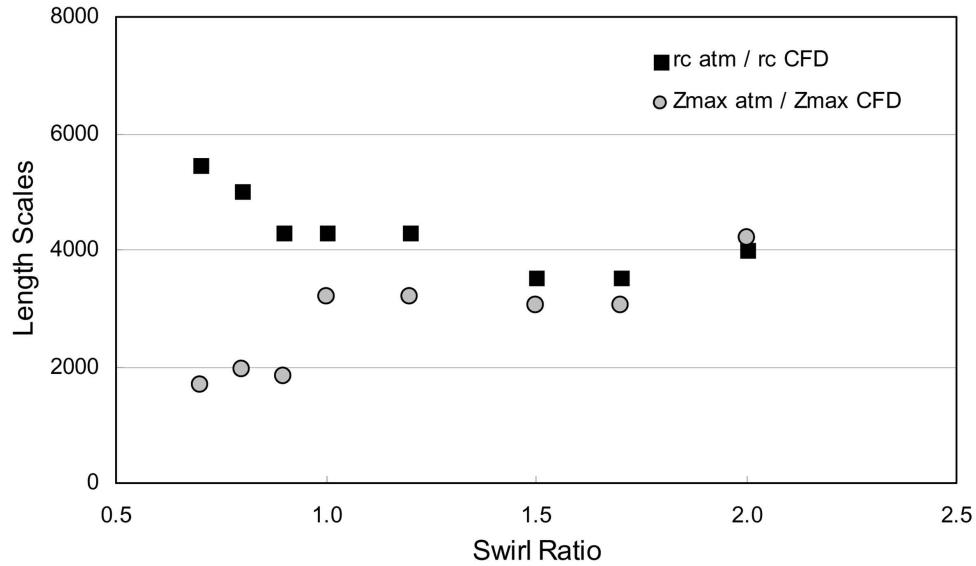
本文模拟的缩尺龙卷风速度相似比为  $V_s = 60$ 。文献<sup>[11]</sup>研究了长度相似比  $L_s$  随涡流比  $S$  变化的情况，见图1.15。发现两种方式定义的长度相似比  $L_s$  随涡流比  $S$  的增大逐渐趋向于定值。本文取长度相似比  $L_s$  为该定值 4000。

#### 1.4.2 足尺龙卷风风场 CFD 模拟

本节利用长度相似比  $L_s$  和速度相似比  $V_s$  将缩尺 CFD 风场转化为足尺龙卷风风场。首先，将缩尺风场的计算流域（见图1.3）的底面半径放大为  $L_s \times R_0$ 、速度入口高度放大为  $L_s \times H_0$ ；入口边界条件的径向和切向入流速度设置为：

$$V_r^{\text{Full}}(z) = (V_s V_0) \times [z/(L_s z_0)]^{1/7} \quad (1.11)$$

$$V_t^{\text{Full}}(z) = 2 \times S \times V_r^{\text{Full}}(z) \quad (1.12)$$

图 1.15: 长度相似比  $L_s$  随涡流比  $S$  的变化<sup>[11]</sup>

比较足尺龙卷风风场与 Spencer 龙卷风实测风场在不同高度处的切向速度沿径向的分布，见图1.16所示，二者整体上吻合较好。

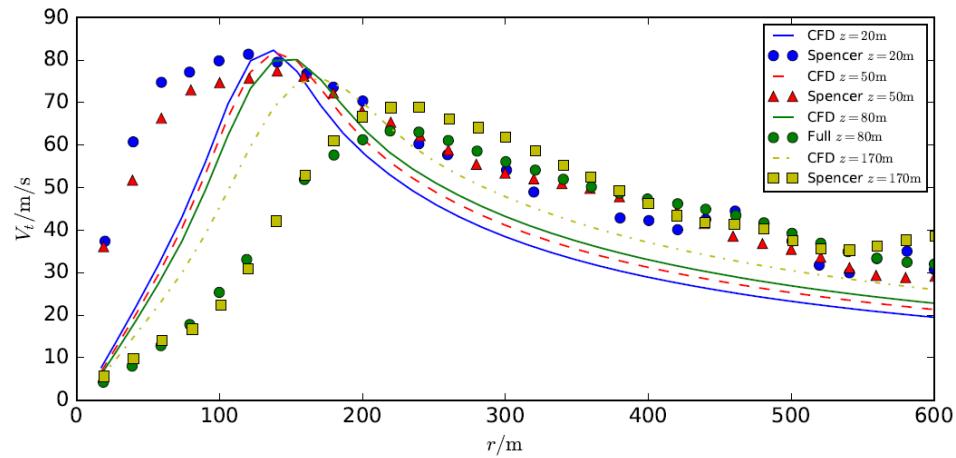


图 1.16: CFD 足尺风场与 Spencer 实测风场切向速度分布比较



## 第二章 输电塔结构在龙卷风作用下的静态响应分析

### 2.1 500 kV南京三江口长江大跨越工程介绍

500 kV南京三江口长江大跨越工程是山西阳城电厂二期工程电力送出江苏省内配套等输变电工程的重要组成部分，跨越点在长江南京河段的三江口节点位置。按耐一直一耐实施跨越，档距分布为520 m-1770 m-520 m（图2.1），跨越塔与跨越塔之间的输电线矢高为132.4 m，跨越塔与锚塔之间的输电线矢高为50 m。

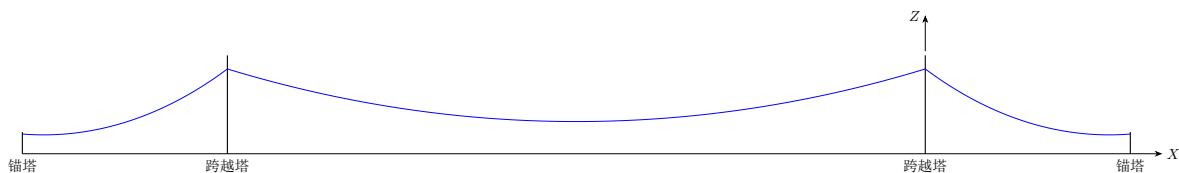


图 2.1: 三江口大跨越示意图

大跨越南、北跨越塔均为双回路蝶型布置的钢管塔，呼高215 m，全高249.5 m，根开49.6 m，单基塔重（含旋梯及走道）共1924 t。钢管塔最大管径1480 mm，相应壁厚25 mm，钢管材质采用 Q345B 和 Q235B 级钢，最大螺栓直径56 mm，螺栓采用 6.8 级和 8.8 级两种。大跨越输电塔（下文简称大跨越塔）实物如图2.2所示。锚塔为单回干字型角钢塔，锚塔横担垂直于跨越段中心线布置，根开为16 m×24 m布置，呼高24 m，全高55 m，单基塔重106 t。每个回路分别对应 2 基铁塔，共使用 4 基锚塔。

导线采用四分裂布置，型号为 AACSR/EST-500 特强钢芯铝合金绞线，两根地线采用 36 芯的 OPGW-325 型复合光缆，光缆为层绞结构。导线、OPGW 均为整根，跨越耐张段没有接头。锚塔上跳线采用 LGJ-630/45 型钢芯铝绞线，越侧耐张绝缘子串引流线夹与 LGJ-630/45 型钢芯铝绞线匹配。跨越塔导线采用四联 530k N 级盘瓷悬垂绝缘子串，OPGW 采用双联预绞式悬垂金具串；锚塔导线采用六联 400k N 级盘瓷耐张绝缘子串，OPGW 采用预绞式耐张金具串。

#### 2.1.1 输电塔有限元模型

本文选择大型通用有限元软件 ANSYS Mechanical APDL 进行输电塔建模。

选用二节点非线性三维梁单元 BEAM 188 模拟输电塔构件。单元每个节点处包括三个平动自由度和三个转动自由度。输电塔构件之间为多孔螺栓连接，有限元模型以刚性节点模拟。输电塔的有限元模型见2.3所示。考虑到输电塔为空间对称结构，取塔的底面中心为坐标原点，高度方向为 Z 轴方向，输电线方向为 X 轴方向（图2.1、2.3）。



图 2.2: 三江口大跨越输电塔

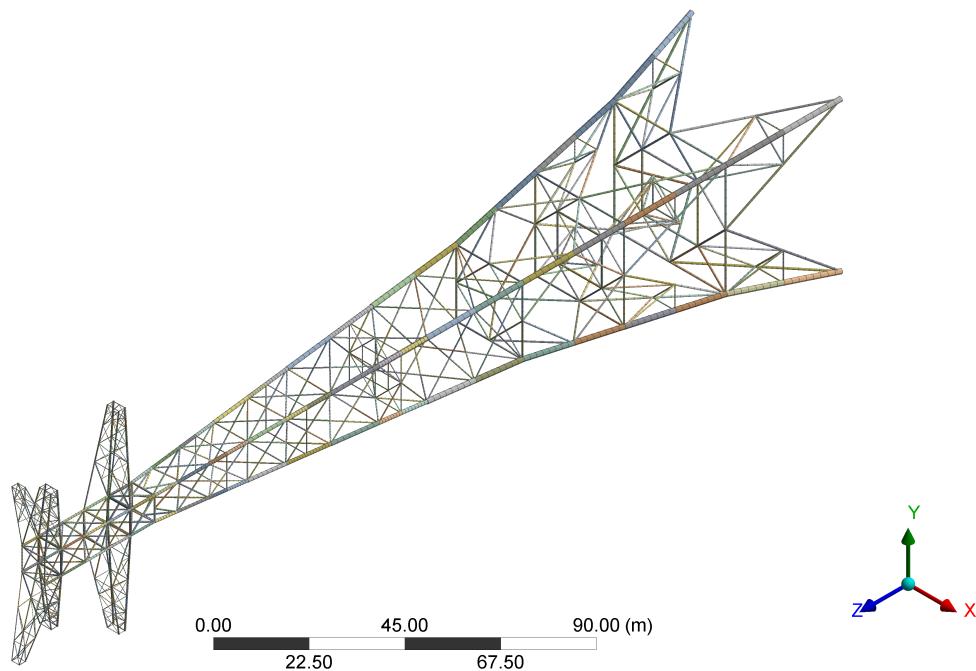


图 2.3: 输电塔有限元模型

### 2.1.2 输电塔结构模态分析

本节对大跨越输电塔结构进行模态分析，计算其固有频率及振型，与文献对比，以验证输电塔有限元模型的正确性，并为后续的动态响应分析提供参考。

输电塔各阶固有频率及其与文献<sup>[21]</sup>的对比见表2.1，各阶振型见图2.4所示。

表 2.1: 输电塔固有频率 /Hz

振型	1	2	3	4	5	6	7	8	9
频率 <sup>[21]</sup>	0.609	0.612	1.102	1.558	1.608	2.113	2.296	2.407	3.046
频率	0.613	0.615	1.093	1.565	1.594	2.084	2.312	2.363	2.368

本章主要进行输电塔结构在龙卷风作用下的静态响应分析，即忽略龙卷风的平移效应，选定龙卷风核心相应于输电塔结构中心的位置，进行静力弹塑性分析。输电塔结构受到的主要荷载为：

1. 重力荷载
2. 输电塔受到的龙卷风涡旋风场的荷载
3. 输电线传到输电塔的荷载

其中忽略了龙卷风对输电线的荷载，主要是因为：

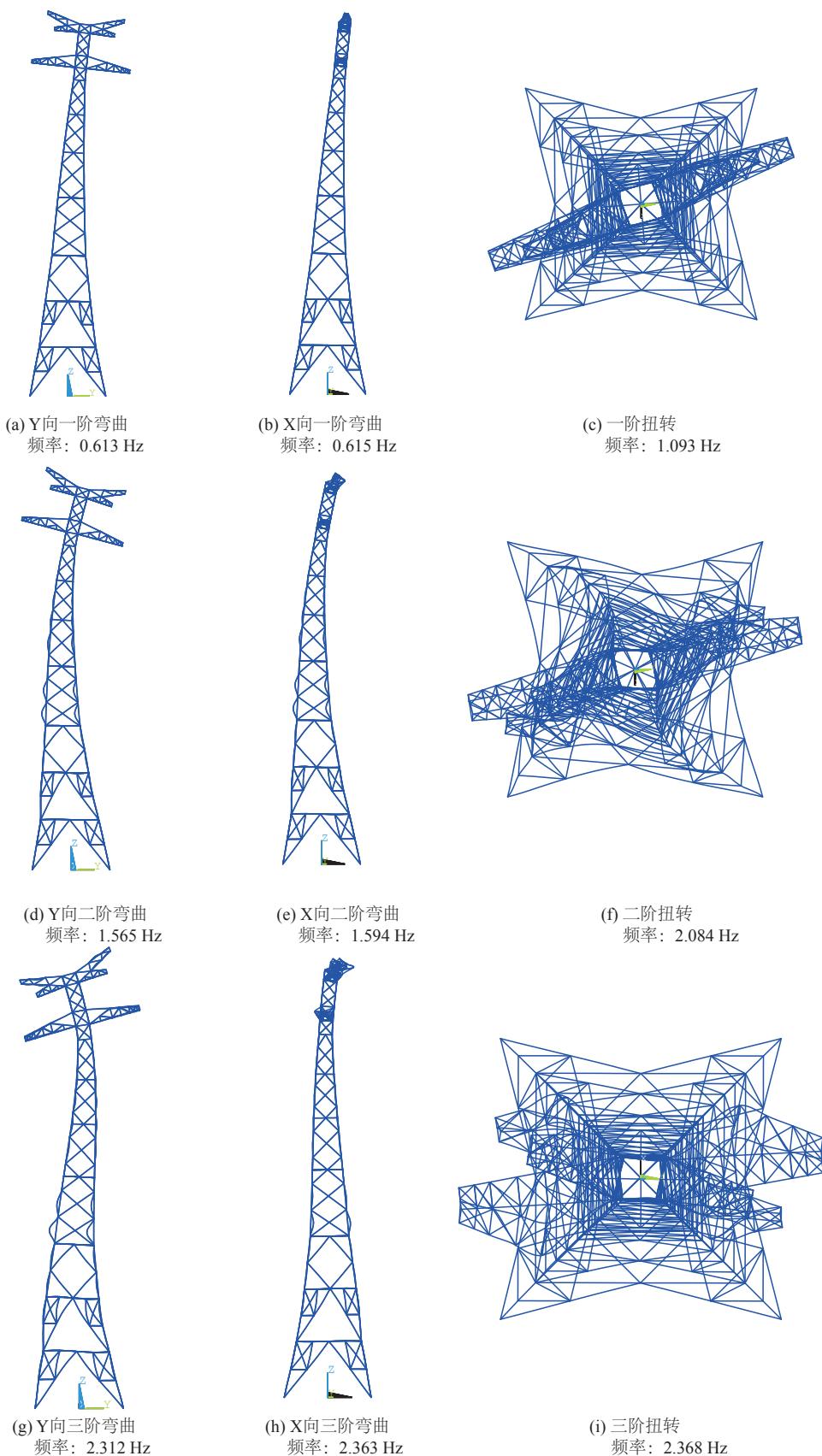


图 2.4: 输电塔各阶振型图

1. 龙卷风路径宽度较小，F1-F2 级龙卷风的路径宽度为 60 m-150 m。
2. 输电线受到的风荷载作用机制比较复杂。

## 2.2 输电塔龙卷风荷载计算的 FSI 方法

### 2.2.1 单向流固耦合方法介绍

### 2.2.2 包含输电塔刚性模型的龙卷风风场

输电塔结构可分为梁柱主体框架和支撑体系，将输电塔整体的刚性模型包含进风场时，发现划分的网格数量巨大，需要较长时间才能完成 CFD 计算。故本文采用的方法如下：首先在 SolidWorks 中用实体建立输电塔结构主体梁柱框架模型，忽略迎风效应（截面）较小的支撑等构件，然后从代表足尺龙卷风风场的圆柱体中利用布尔运算减去输电塔梁柱实体，生成包含输电塔刚性模型的计算流域。支撑等构件受到的风荷载的计算方法在第 2.4 节中介绍。

在该计算流域上设置第 1.4.2 足尺龙卷风风场的边界条件，并将输电塔刚性模型表面的边界条件设置为不可滑移壁面。利用 ICEM CFD 软件进行网格划分，先采用 Octree 算法将计算流域初步划分为六面体和四面体混合的非结构化网格，再将生成的网格以 Delaunay 算法进行优化。网格划分过程采用以下选项提高网格质量：控制输电塔表面网格划分的最大单元尺寸为 0.4 m；同时在输电塔表面设置厚度为 1.0 m 的棱柱形单元膨胀层网格（Prism Layers）；并以输电塔中心建立半径为 150 m 的球状区域，在此区域内进行网格加密以尽可能精确离散结构表面。计算流域底部和输电塔刚性模型表面的网格划分见图 2.5 所示。

考虑到龙卷风风场压强分布的梯度较大，故 CFD 计算采用 PISO 求解方法，压强离散采用 PRESTO! 格式<sup>[13]</sup>。

Change this  
ref.

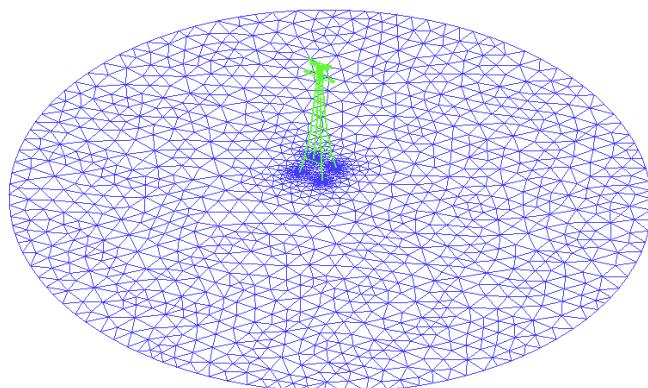


图 2.5：输电塔周围计算流域网格

设置输电塔结构表面的压强积分值为求解监测值，迭代过程中当残差和压强积分检

测值趋于稳定时结束计算。20 m高度处流场剖面速度矢量分布和结构表面风压云图分别见图2.6和图2.7所示。后处理提取输电塔梁柱表面受到的风压，格式为风压点坐标及风压值，见表。

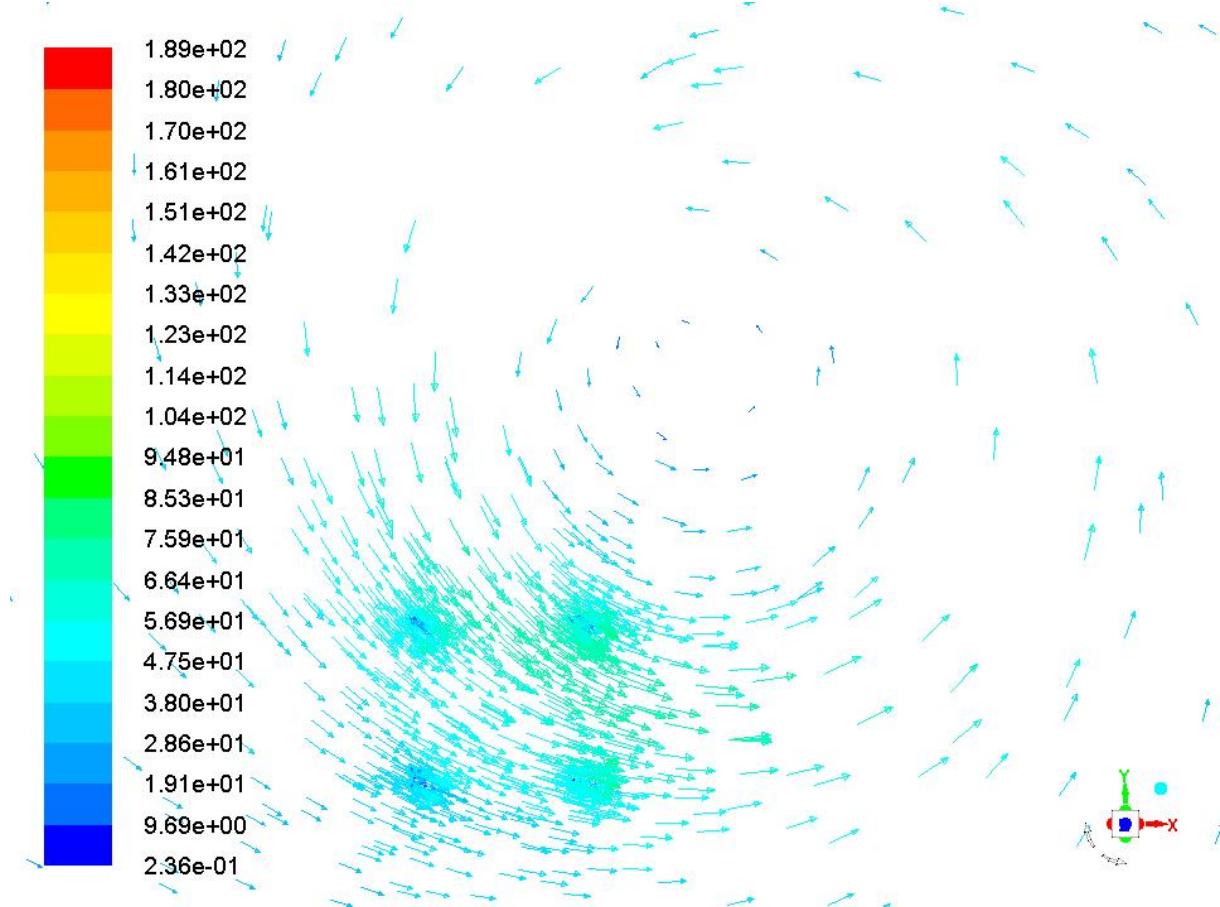


图 2.6: 20 m高度处风速矢量图

表 2.2: 输电塔表面 CFD 风压输出

$X$ (m)	$Y$ (m)	$Z$ (m)	Pressure(Pa)
-94.756	-95.510	0.000	1.906E+03
-45.910	-94.756	0.000	-1.664E+03
⋮	⋮	⋮	⋮
-69.484	-95.910	249.707	8.067E+02

### 2.2.3 龙卷风风压转化为输电塔梁单元节点集中力

在 ANSYS Mechanical APDL 中采用梁单元模拟输电塔结构，这就带来了 CFD 计算得到的龙卷风风压如何施加到梁单元上的问题。设计如下算法以实现风压转化为梁单元

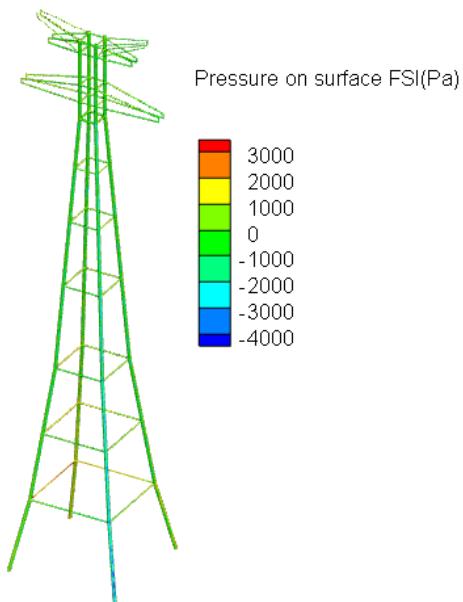
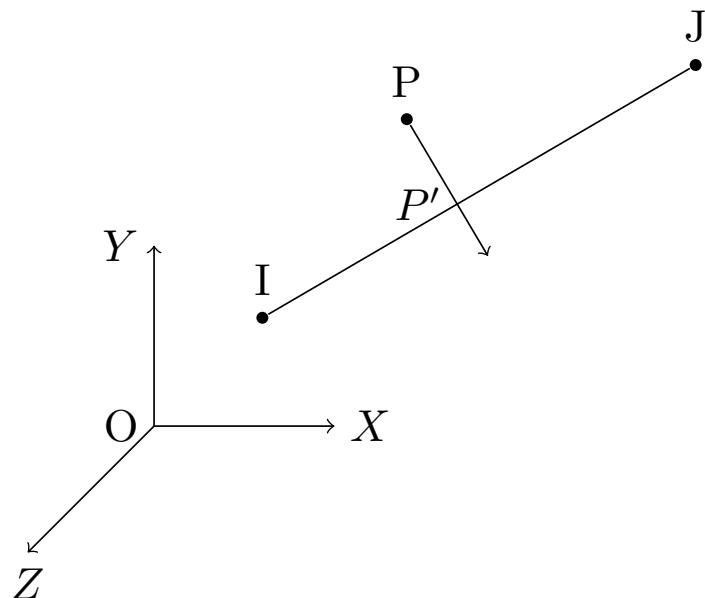


图 2.7: 输电塔表面风压

节点集中力。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 2.8: 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2.8，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(2.2.3)。

$$\begin{aligned} \mathbf{P}'\mathbf{I} \cdot \mathbf{P}'\mathbf{J} &< 0 \\ |PP' - R_{IJ}| &< \epsilon \end{aligned} \quad (2.1)$$

式中点  $P'$  的坐标可由式(2.2)计算，

$$\mathbf{OP}' = \mathbf{OI} - \left( \frac{\mathbf{PI} \cdot \mathbf{IJ}}{|\mathbf{IJ}|^2} \right) \mathbf{IJ} \quad (2.2)$$

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

$$(p_x, p_y, p_z) = p \frac{\mathbf{PP}'}{|\mathbf{PP}'|} \quad (2.3)$$

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。

## 测试算例

设计如图2.9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见表2.3所示。计算各节点集中力的合力见表2.3，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。

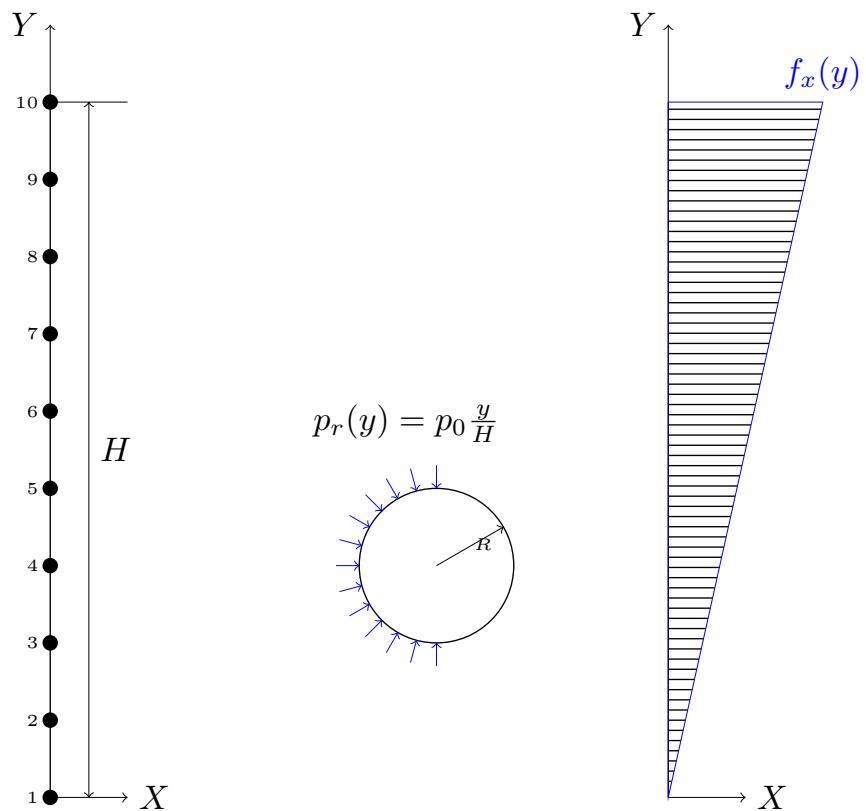


图 2.9: 测试算例示意图

表 2.3: 测试算例输出节点集中力

Node	$F_X(\text{N})$	$F_Y(\text{N})$	$F_Z(\text{N})$
1	5.527	0.000	0.000
2	22.526	0.000	0.000
3	44.996	0.000	0.000
4	66.994	0.000	0.001
5	88.994	0.000	0.001
6	110.991	0.000	0.000
7	132.990	0.000	-0.002
8	154.990	0.000	-0.001
9	176.987	0.000	0.002
10	93.992	0.000	0.002
$\sum$	898.987	0.000	0.003

### 2.2.4 输电塔支撑构件的龙卷风荷载计算

利用 APDL 命令流从输电塔结构有限元模型中提取相应于支撑构件的梁单元节点编号及坐标。并通过下述方法计算支撑构件梁单元所受龙卷风荷载的方法。

首先，支撑构件梁单元某节点受到的风荷载可由下式计算<sup>[22]</sup>:

$$\mathbf{F}_w = \frac{1}{2} \rho_a C_d A |U| \mathbf{U} \quad (2.4)$$

式中， $\rho_a$  为空气密度， $C_d$  为体型系数，本位取为 1.0， $A$  为该节点迎风投影面积， $\mathbf{U}$  为风场在该节点处的风速矢量。编制 fluent UDF 程序提取任意支撑节点  $P(x, y, z)$  在第 2.2.2 节模拟风场中的速度，算法如下：

1. 首先判断出点  $P$  所在的计算流域网格控制体（可通过点  $P$  与某控制体各表面形心连线的向量与控制体表面法向量的关系判断点是否属于该控制体）；
2. 提取该控制体的中心  $C$  点坐标  $(x_c, y_c, z_c)$  和  $C$  处的流场速度分量和速度梯度分量（将速度和各方向速度梯度矢量记为  $\mathbf{U}_C$  和  $\mathbf{G}_{CX}$ 、 $\mathbf{G}_{CY}$ 、 $\mathbf{G}_{CZ}$ ）；
3. 利用下式计算点  $P$  处  $X$  方向速度分量为

$$U_{PX} = U_{CX} + (\mathbf{OP} - \mathbf{OC}) \cdot \mathbf{G}_{CX} \quad (2.5)$$

$Y$  和  $Z$  方向速度分量可类似计算。

## 2.3 输电塔龙卷风荷载计算的规范方法

### 2.3.1 龙卷风风场处理

输电塔在龙卷风风场中的水平投影示意图如图 2.10 所示。输电塔直角坐标系  $\{O : XYZ\}$  的建立方法见第 2.1.1 节。 $abcd$  为输电塔处于同一水平剖面的节点。下文主要展示推导  $d$  节点处龙卷风风速的方法，其余节点类似。龙卷风中心在坐标系  $\{O : XYZ\}$  中的位置用极坐标  $(R, \theta)$  表示。输电塔节点  $d$  相应于龙卷风核心的极坐标为  $(R_{fd}, \theta_{fd})$ ， $d$  节点受到的龙卷风切向、径向风速分别为  $V_{td}$ 、 $V_{rd}$ ，以及图 2.10 未明确表示的竖向风速  $V_{ad}$ 。

### 输电塔节点相应于龙卷风中心位置的极坐标

假设  $d$  节点在输电塔坐标系  $\{O : XYZ\}$  中的坐标为  $(x_d, y_d, z_d)$ ，下文将推导节点  $d$  相应于龙卷风中心的极坐标  $(R_{fd}, \theta_{fd})$ 。

龙卷风中心  $T(R, \theta)$  在输电塔坐标系  $\{O : XYZ\}$  中的直角坐标为  $(R \cos \theta, R \sin \theta)$ ，则节点  $d$  相应于龙卷风中心  $T$  的向量为：

$$\vec{Td} = \vec{Od} - \vec{OT} = (x_d - R \cos \theta, y_d - R \sin \theta) = R_{fd}(\cos \theta_{fd}, \sin \theta_{fd}) \quad (2.6)$$

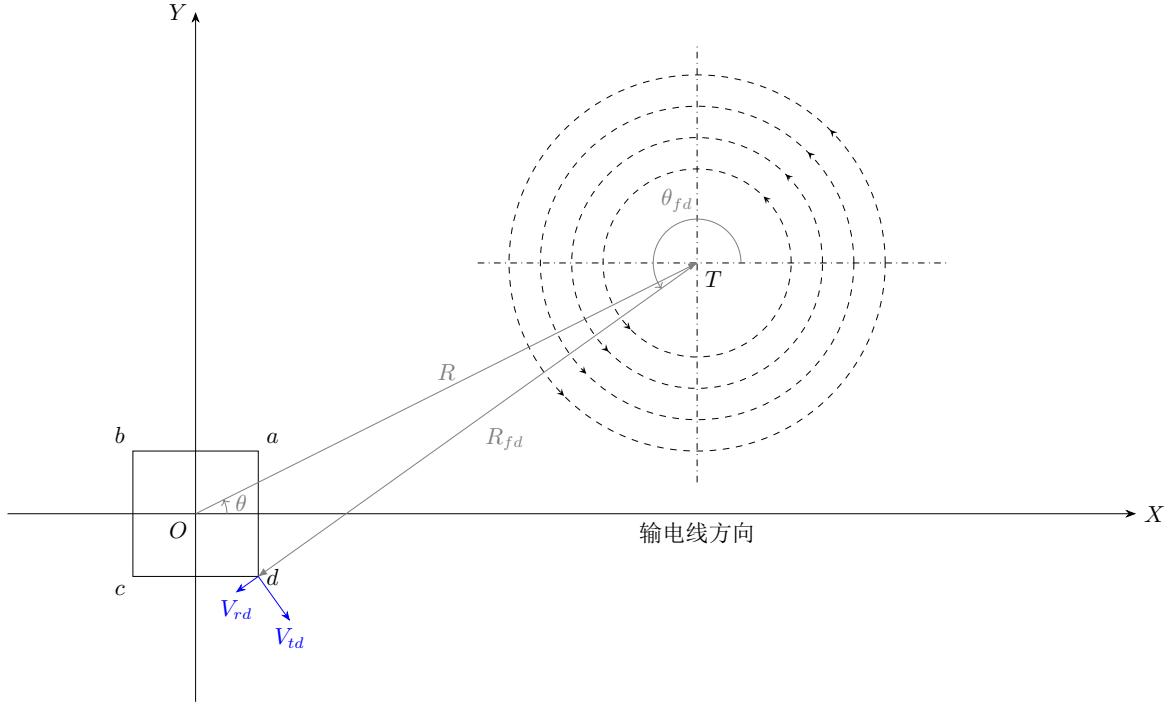


图 2.10: 输电塔在龙卷风风场中的水平投影示意图

式中,

$$\begin{aligned} R_{fd} &= \sqrt{(x_d - R \cos \theta)^2 + (y_d - R \sin \theta)^2} \\ \theta_{fd} &= \arctan \frac{y_d - R \sin \theta}{x_d - R \cos \theta} \end{aligned} \quad (2.7)$$

### 龙卷风风场在直角坐标系下的分量

第1.3节模拟的龙卷风风场是定义在极坐标系下的，而施加风荷载采用直角坐标系下的风速分量较为简单，因此需要将龙卷风风场从极坐标系转化为直角坐标系。

输电塔节点  $d$  受到的龙卷风径向风速  $V_{rd}$  与  $X$  轴正方向的夹角为  $\theta_{fd}$ （图2.10），切向风速  $V_{td}$  与  $X$  轴正方向的夹角为  $(\theta_{fd} + \pi/2)$ ，进行速度的分解如下：

$$\begin{aligned} V_{xd} &= V_{rd} \cos \theta_{fd} + V_{td} \cos(\theta_{fd} + \pi/2) \\ &= V_{rd} \cos \theta_{fd} - V_{td} \sin(\theta_{fd}) \\ V_{yd} &= V_{rd} \sin \theta_{fd} + V_{td} \sin(\theta_{fd} + \pi/2) \\ &= V_{rd} \sin \theta_{fd} + V_{td} \cos(\theta_{fd}) \\ V_{zd} &= V_{ad} \end{aligned} \quad (2.8)$$

有了上述准备工作，就可以计算输电塔上任意节点受到的龙卷风风速在直角坐标系下的分量了。

## 龙卷风风场中任意节点处风速分量

输电塔节点  $d$  相应于龙卷风中心的实际位置为  $(R_{fd}, \theta_{fd})$  (见第2.3.1节), 此节点对应于缩尺龙卷风风场  $V_r(r, z)$ 、 $V_t(r, z)$  和  $V_a(r, z)$  (见第1.3节) 中的位置为  $(R_{md}, Z_{md})$ , 且

$$\begin{aligned} R_{md} &= R_{fd}/L_s \\ Z_{md} &= z_{fd}/L_s \end{aligned} \quad (2.9)$$

在缩尺龙卷风风场中, 由位置  $(R_{md}, Z_{md})$  可提取缩尺龙卷风风场径向、切向和竖向风速分量分别为  $V_{rmd}$ 、 $V_{tmd}$  和  $V_{amd}$ 。根据缩尺龙卷风速度相似比  $V_s$  可将其转化为足尺龙卷风风场中的速度分量:

$$\begin{aligned} V_{rd} &= V_{rmd} \times V_s \\ V_{td} &= V_{tmd} \times V_s \\ V_{ad} &= V_{amd} \times V_s \end{aligned} \quad (2.10)$$

最后根据第2.3.1节的方法即可将输电塔节点  $d$  受到的极坐标系下的足尺龙卷风风速分量转化为直角坐标系下的风速分量。

### 2.3.2 输电塔结构龙卷风风荷载计算

#### ASCE 输电塔荷载规范风荷载计算方法

ASCE 主编的输电塔荷载规范 Guidelines for electrical transmission line structural loading<sup>[23]</sup> 中输电塔风荷载计算公式为:

$$F = \gamma_w Q K_z K_{zt} (V_{50})^2 G C_f A \quad (2.11)$$

其中:

$F$  顺风向风荷载

$\gamma_w$  考虑平均重现期的风荷载调整系数。平均重现期为 50 年时,  $\gamma_w = 1.0$ ; 平均重现期为 100 年时,  $\gamma_w = 1.15$

$V_{50}$  平均重现期为 50 年规定的风速基准值 (基本风速)

$K_z$  风速压力暴露系数

$K_{zt}$  地形系数

$Q$  将风速转化为速度压的常数,  $Q = 1/2\rho_a = 0.613 \text{ kg/m}^3$

$G$  阵风系数

$C_f$  风压系数

$A$  迎风面构件的投影面积

各量中文翻译参考刘刚的论文<sup>[24]</sup>。

下面介绍 ASCE 规范中输电塔结构所受风荷载的风压系数  $C_f$  的计算方法。

风压系数是密实度系数 (solidity ratio)  $\Phi$  的函数，定义为：

$$\Phi = \frac{A_m}{A_o} \quad (2.12)$$

其中：

$A_m$  迎风面构件的投影面积

$A_o$  塔架的轮廓面积

风压系数与密实度系数  $\Phi$  的关系表见图2.11<sup>[23]</sup> 方形截面的风压系数根据图2.11中 Table 2-4 计算，圆形截面的风压系数根据 Table 2-4 的系数再乘上 Table 2-5 中的系数。

## 中国架空输电线路设计规范风荷载计算方法

中国《110～750kV 架空输电线路设计规范》<sup>[25]</sup> 中杆塔风荷载的计算公式为：

$$W_s = W_0 \cdot \mu_z \cdot \mu_s \cdot B_2 \cdot A_s \cdot \beta_z \quad (2.13)$$

$$W_0 = V^2 / 1600 \quad (2.14)$$

式中：

$W_s$  杆塔风荷载标准值 (kN);

$W_0$  基准风压标准值 ( $\text{kN}/\text{m}^2$ )；

$V$  基准高度为 10 m 的风速 ( $\text{m}/\text{s}$ );

$\mu_z$  风压高度变化系数

$\mu_s$  构件的体型系数，杆塔取  $1.3(1 + \eta)$ ，环形截面钢筋混凝土杆取 0.7;

$B_2$  杆塔构件覆冰风荷载增大系数，5 mm 冰区取 1.1，10 mm 冰区取 1.2，15 mm 冰区取 1.6，20 mm 冰区取 1.8，20 mm 以上冰区取  $2.0 \sim 2.5$ ;

$A_s$  迎风面构件的投影面积计算值 ( $\text{m}^2$ );

$\eta$  塔架背风面荷载降低系数，按表2.4选用；

$\beta_z$  杆塔风荷载调整系数。

Table 2-4. Force Coefficients,  $C_f$ , for Normal Wind on Latticed Truss Structures Having Flat-Sided Members

Solidity Ratio, $\Phi$	Force Coefficient, $C_f^a$	
	Square-Section Structures	Triangular-Section Structures
<0.025	4.0	3.6
0.025–0.44	$4.1 - 5.2\Phi$	$3.7 - 4.5\Phi$
0.45–0.69	1.8	1.7
0.70–1.00	$1.3 + 0.7\Phi$	$1.0 + \Phi$

Source: "Minimum design loads for buildings and other structures." ASCE 7-88 (revision of ANSI A58. 1-1982).

<sup>a</sup> $C_f$  values account for both the windward and leeward faces, including shielding of the leeward face.

Table 2-5. Correction Factors for Normal Wind on Round-Section Members in Latticed Truss Structures

Solidity Ratio, $\Phi$	Correction Factor
<0.30	0.67
0.30–0.79	$0.67\Phi + 0.47$
0.80–1.00	1.00

Source: "Guide for design of steel transmission towers." (ASCE 1988).

图 2.11: 风压系数

表 2.4: 塔架背风面荷载降低系数  $\eta$

$b/a$	$A_s/A$	$\leq 0.1$	0.2	0.3	0.4	0.5	$> 0.6$
$\leq 1$		1.0	0.85	0.66	0.50	0.33	0.15
2		1.0	0.90	0.75	0.60	0.45	0.30

## 中美规范计算输电塔龙卷风荷载参数取值

美国输电塔荷载规范 Guidelines for electrical transmission line structural loading<sup>[23]</sup> 针对输电塔受到的龙卷风风荷载的建议为：考虑 F2 等级的龙卷风荷载，因为 F2 等级龙卷风发生的概率较高，且能够在经济投入允许的情况下加以设防；由于龙卷风风场速度为阵风风速，故风速压力暴露系数  $K_z$  和阵风系数  $G$  取为 1.0，即利用龙卷风风场的实际风速代入公式计算，不利用系数  $K_z$  对其进行修正；由于龙卷风荷载是一种极端荷载情况，故考虑平均重现期的风荷载调整系数  $\gamma_w$  取为 1.0。

文献<sup>[26][27][28]</sup>等建议地形系数  $K_{zt}$  取为 1.0，因为龙卷风多发生在平坦开阔的平原。

参考美国输电塔荷载规范计算龙卷风荷载的参数取值建议，中国《110～750kV 架空输电线路设计规范》的相关参数建议为：忽略覆冰荷载的影响，故杆塔构件覆冰风荷载增大系数取为 1.0；忽略龙卷风的风振效应，将杆塔风荷载调整系数取为 1.0。

## 输电塔龙卷风荷载施加方法

将输电塔分为多层，见图2.12所示，某具体层示意图见图2.13。输电塔节点 a, b, c 和 d 上受到的龙卷风荷载的计算步骤如下：

1. 根据第1.3节计算输电塔节点 a, b, c 和 d 处龙卷风速度分量  $V_x$  和  $V_y$ ；
2. 分别沿 X 和 Y 方向计算风速风量的均值  $V'_x$  和  $V'_y$ ；
3. 计算输电塔节点 a, b, c 和 d 处所在层龙卷风荷载，值得注意的是公式中各物理量采用 SI 单位制，即风速单位为m/s，风荷载单位为N。

根据美国 ASCE 规范，该层 X 和 Y 方向龙卷风荷载  $F_{wx}$  和  $F_{wy}$  为

$$F_{wx} = 0.613(V'_x)^2 C_{fx} A_x \quad (2.15)$$

$$F_{wy} = 0.613(V'_y)^2 C_{fy} A_y \quad (2.16)$$

其中， $A_x$  和  $A_y$  分别为该层迎风面构件沿 X 和 Y 方向的投影面积。风压系数由2.11计算。

根据中国规范，该层 X 和 Y 方向龙卷风荷载  $F_{wx}$  和  $F_{wy}$  为

$$F_{wx} = 0.625(V'_x)^2 \mu_{sx} A_x \quad (2.17)$$

$$F_{wy} = 0.625(V'_y)^2 \mu_{sy} A_y \quad (2.18)$$

体型系数  $\mu_s = 1.3(1 + \eta)$ ， $\eta$  由表2.4计算。

可知中美规范计算龙卷风荷载的公式的主要区别如下：中国将风速转化为速度压的系数为  $0.625 \text{ kg/m}^3$ ，美国为  $1/2\rho_a = 0.613 \text{ kg/m}^3$ ，中国规范稍微偏保守；二者

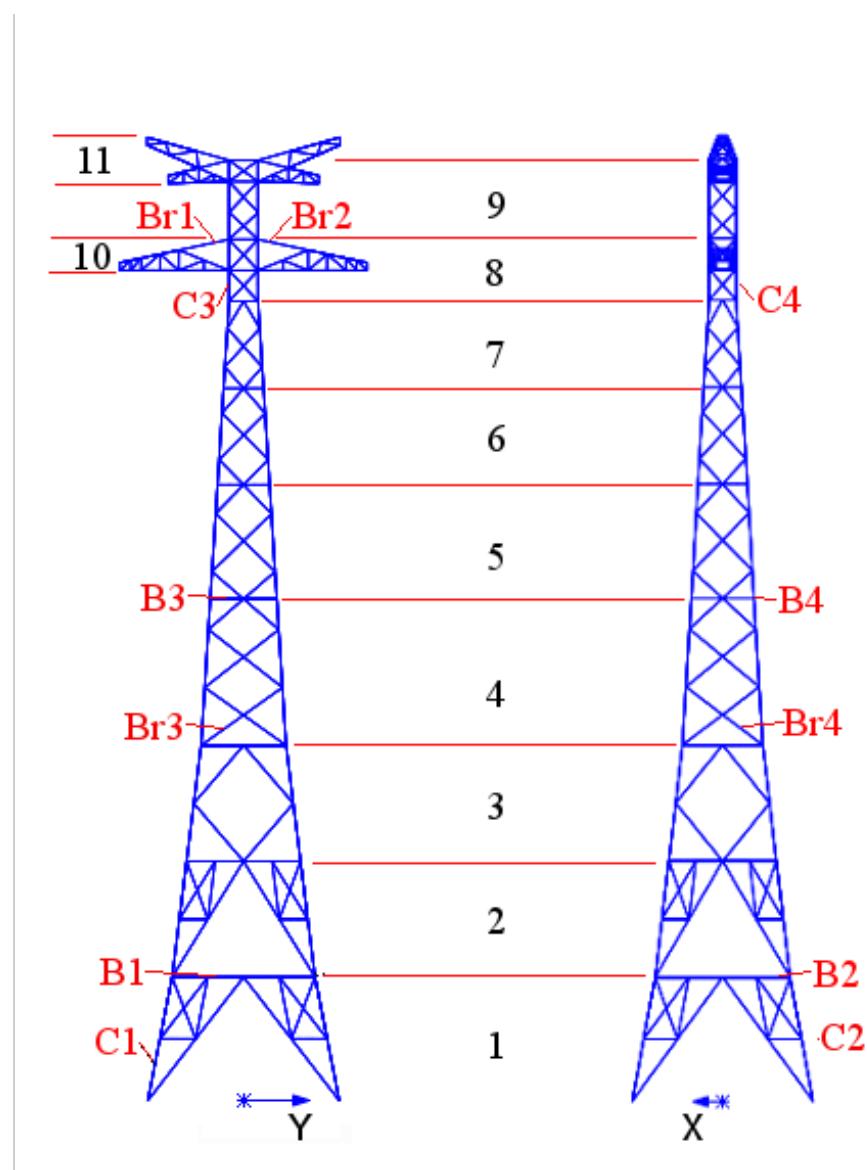


图 2.12: 输电塔分层示意图

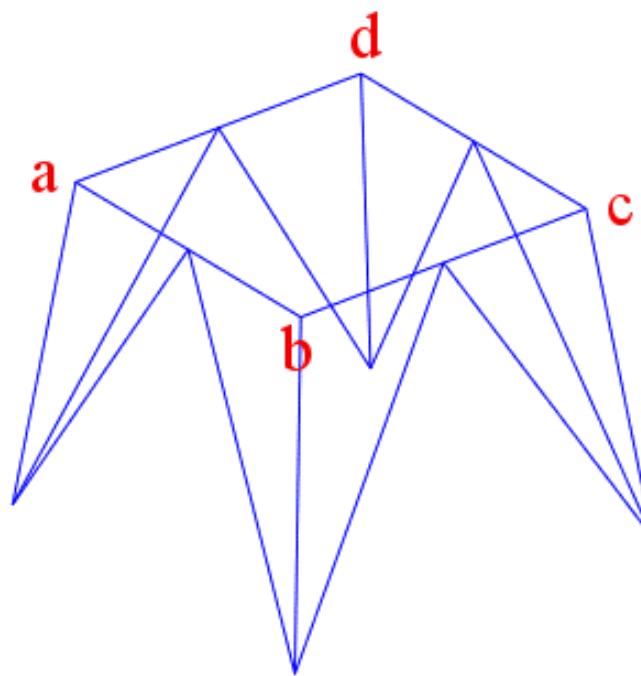


图 2.13: 输电塔典型层示意图

的主要差别为体型系数（风压系数）的计算：对于圆形截面输电塔， $\Phi < 0.025$  的层，美国规范的风压系数为  $C_f = 4.0 \times 0.67 = 2.68$ ，中国规范为  $\mu_s = 1.3(1 + \eta) = 1.3 \times (1 + 1.0) = 2.6$ ，相差不大，美国规范偏保守。

#### 4. 迎风面和背风面上风荷载分配

中国规范根据塔架背风面荷载降低系数  $\eta$  对某层输电塔所受风荷载进行分配，即迎风面节点在  $X$  和  $Y$  方向所受风荷载分量分别为  $1/(1 + \eta)F_{wx}$  和  $1/(1 + \eta)F_{wy}$ ；背风面节点在  $X$  和  $Y$  方向所受风荷载分量分别为  $\eta/(1 + \eta)F_{wx}$  和  $\eta/(1 + \eta)F_{wy}$ ；

#### 5. 迎（背）风面节点间风荷载分配

迎（背）风面上的节点根据各节点的投影面积进行迎（背）风面上风荷载的分配。

### 2.3.3 索的悬链线理论及输电线作用于塔的荷载

#### 索的悬链线理论基本假设

索由高强钢丝集束而成，相对抗弯刚度很小，其受力特点可以认为是完全柔性。在自重和张力作用下分析其线形和力学参数时，基本假设如下：

- 索是理想柔性，既不能受压也不能受弯；
- 索的材料符合胡克定律；

- 索的横截面积在外荷载作用下的变化量十分微小，可忽略不计。

为了确定重力作用下索的线形，以弦左端点为原点、竖直向上为Y轴正方向建立右手直角坐标系。则索受到的重力沿Y轴负向。假设单位长度索的质量恒定，且不随张力变化。

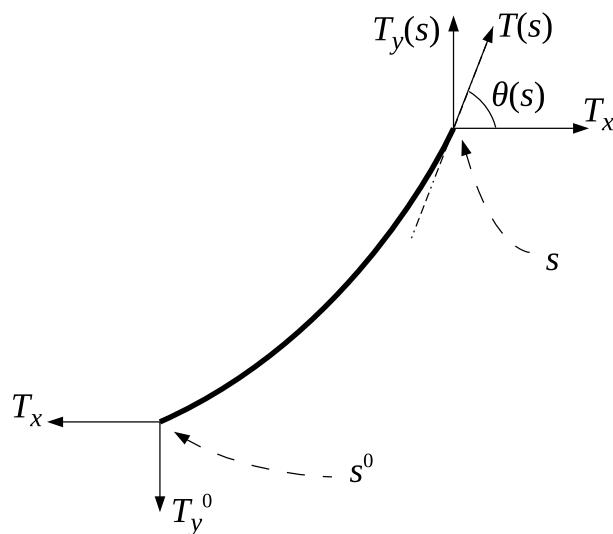


图 2.14: 索段计算示意图

### 符号约定

$s$  从索左端点（坐标系原点）开始计算的索长度；

$\mu$  单位长度索的质量（假设是恒定的）；

$T(s)$  索长度为  $s$  处的索张力（根据柔性索假设，张力沿索的切线方向）；

$T_y(s)$  索长度为  $s$  处的索张力的  $Y$  向分量；

$T_x$  张力的  $X$  向分量（任取索段进行受力分析，由  $X$  向平衡方程可知  $T_x$  沿索长是均匀的）；

$\theta(s)$  索切向量与  $X$  轴正向的夹角。

## 自重作用下的单索线形求解

索段竖向的平衡方程为:

$$\begin{aligned} T_y(s) &= g \int_{s^0}^s \mu ds + T_y^0 \\ T_x \tan(\theta(s)) &= g\mu \int_{s^0}^s ds + T_y^0 \\ T_x \frac{dy}{dx} &= g\mu \int_{s^0}^s \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} dx + T_y^0 \\ \frac{d^2y}{dx^2} &= \frac{g\mu}{T_x} \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} \end{aligned} \quad (2.19)$$

此二阶微分方程的解析解为:

$$y = \frac{T_x}{g\mu} \cosh\left(\frac{g\mu}{T_x} + c_1\right) + c_2 \quad (2.20)$$

式中,  $c_1$  和  $c_2$  为由边界条件确定的积分常量。代入边界条件:  $x = 0, y = 0; x = L, y = C$  (见图2.15)。

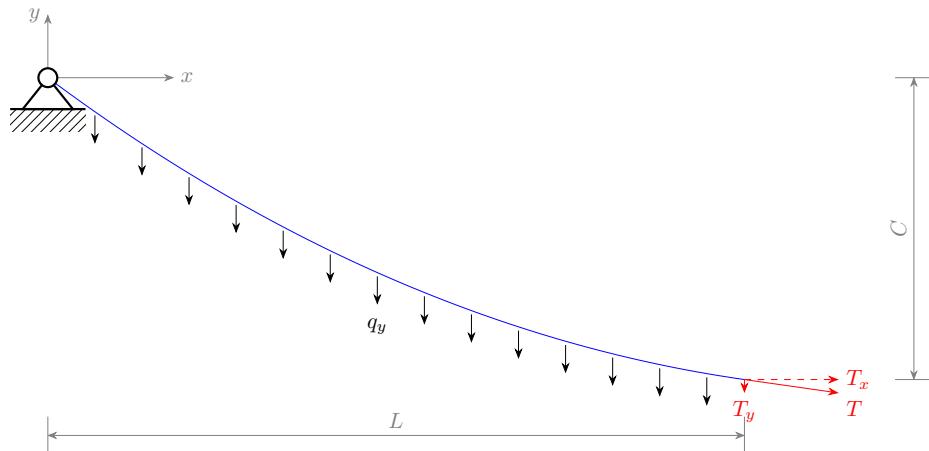


图 2.15: 单缆尺寸及边界条件示意图

$$\begin{cases} \beta = \frac{g\mu L}{2T_x} \\ c_1 = \sinh^{-1}\left(\frac{\beta C/L}{\sinh \beta}\right) \\ c_2 = -\frac{T_x}{g\mu} \cosh(c_1) \end{cases} \quad (2.21)$$

悬链线索的形状长度  $S$  和无应力长度  $S_0$  分别为:

$$S = \frac{T_x}{g\mu} \left[ \sinh\left(\frac{g\mu L}{T_x} + c_1\right) + \sinh(c_1) \right] \quad (2.22)$$

$$\begin{aligned}
 S_0 &= S - \Delta S \\
 &= S - \frac{T_x}{E A g \mu} \left[ \frac{1}{2} g \mu L + \frac{1}{8} T_x (e^{2(c_1+2\beta)} - e^{-2(c_1-2\beta)} - e^{2c_1} + e^{-2c_1}) \right]
 \end{aligned} \tag{2.23}$$

### 输电线施加在输电塔的荷载求解

跨越塔之间输电线跨度为  $L = 1770$  m, 右侧支座比左侧支座高度相同, 即  $C = 0$ , 跨中矢高  $f = 132.4$  m, 单位长度质量  $\mu = 3219$  kg/km。索的弹性模量  $E = 108\,070$  MPa, 截面积  $A = 729$  mm<sup>2</sup>。假设在外荷载作用下两支座的间距及高差保持不变。主要任务是利用上述悬链线理论计算输电线对输电塔施加的荷载。

主要思路: 输电线在自重和张力作用下, 其线形为悬链线, 故可采用悬链线经典公式来进行求解。采用直接建模的方式, 单缆采用 LINK1 单元模拟, 单元水平长度为 1 m。分析时, 首先假定水平力大小, 根据悬链线方程求解节点坐标, 由此建立节点和单元, 并分析单缆在自重作用下的内力和线形。如果求解获得的水平力与假定水平力之间的误差较大或者单缆变形较大, 则返回重新计算, 直至满足误差要求。计算框图如图 2.16 所示。

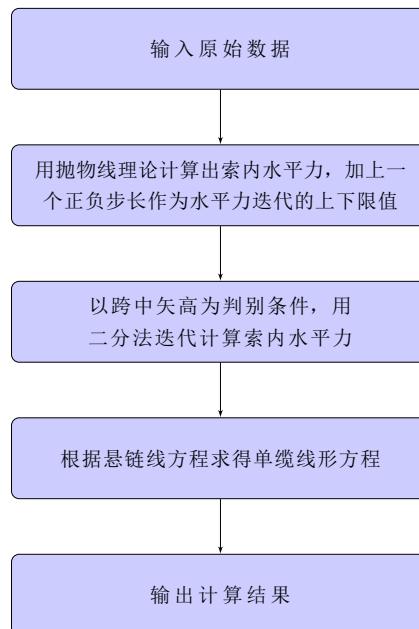


图 2.16: 单缆线形和力学参数计算框图

计算的 APDL 和 MATLAB 程序见附录 B。单缆最大位移为 12.7 mm, 相比于跨径  $L = 1770$  m 该变形已足够小, 认为已满足精度要求。

对于跨越塔和锚塔之间的输电线对跨越塔的荷载计算采用相同的方法, 在此不一一列举。

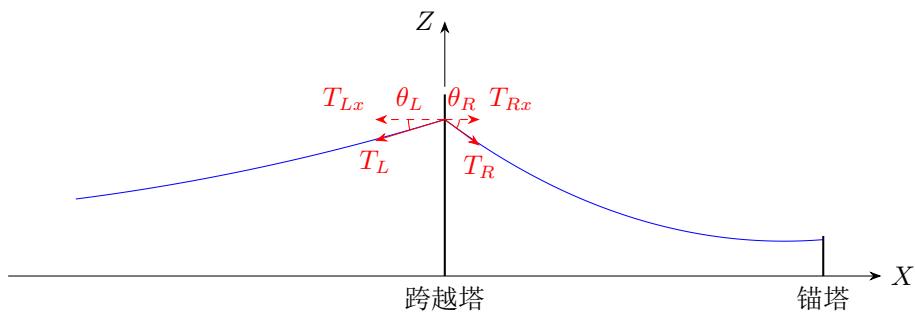


图 2.17: 跨越塔受到输电线的张力示意图

跨越塔受到的两侧输电线传来的张力的示意图见图2.17所示。

经过附录B程序的计算, 图2.17中各量为:

$$\begin{aligned} T_{Lx} &= 93.31 \text{ kN}, \quad \theta_L = 16.89^\circ \\ T_{Rx} &= 21.33 \text{ kN}, \quad \theta_R = 36.70^\circ \end{aligned} \quad (2.24)$$

## 2.4 FSI 方法与规范方法的对比

为了考虑最不利工况, 将龙卷风核心距离输电塔中心的径向距离设置为龙卷风核心半径  $R_T = r_{c,\text{mat}} = 120 \text{ m}$ ,  $\theta_T$  分别取  $0^\circ$ 、 $45^\circ$  和  $90^\circ$ 。分别根据单向流固耦合方法 (FSI 方法) 和规范方法计算并施加龙卷风荷载, 进行输电塔结构的静态响应分析。输电塔结构最大轴向压力和位移响应随袭击角  $\theta_T$  的变化见图2.18和图2.19所示。代表性构件 (见图2.12所示) 的轴向力取得极值的工况见表2.5所示。

采用单向流固耦合和规范方法计算得到的输电塔结构响应整体上吻合较好, 表2.5所列构件中, 二者最大误差不超过 50%。

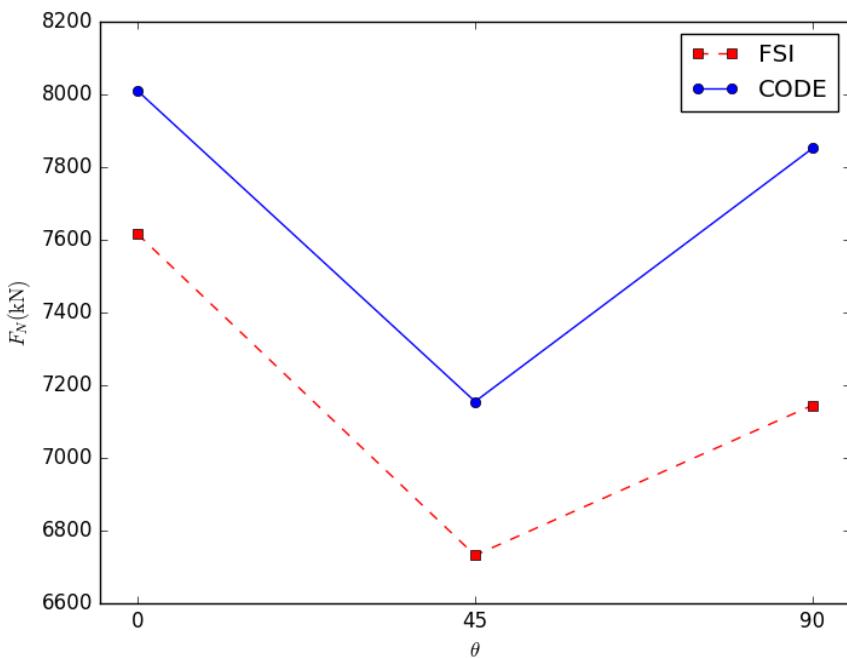


图 2.18: 输电塔构件最大轴向压力随袭击角的变化

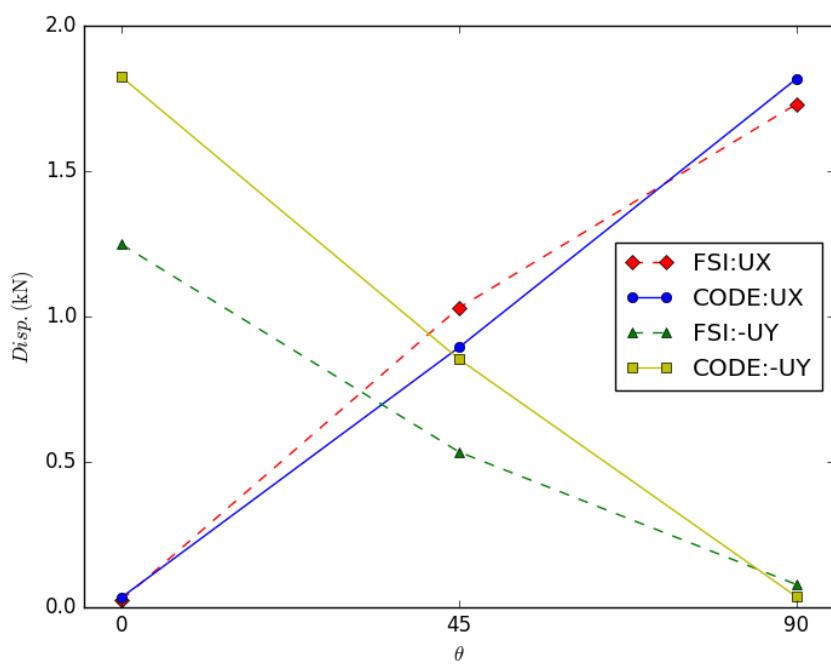


图 2.19: 输电塔构件最大位移分量随袭击角的变化

表 2.5: 输电塔代表构件的轴向力

编号	构件 类型	单向流固耦合		规范方法	
		轴向内力 (kN)	角度 (°)	轴向内力 (kN)	角度 (°)
C1	柱	-6485	90	-7803	90
C2	柱	7739	0	8154	0
C3	柱	-4958	90	-5024	90
C4	柱	5700	0	5762	0
B1	梁	328	90	488	90
B2	梁	-274	0	-316	0
B3	梁	87	0	120	90
B4	梁	-123	90	-130	90
Br1	支撑	-27	45	-51	45
Br2	支撑	-42	45	-71	45
Br3	支撑	318	90	588	90
Br4	支撑	-268	0	-371	0



### 第三章 考虑龙卷风平移的动态响应分析

第二章忽略了龙卷风平移运动的影响，分别在 $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 和 $90^\circ$ 工况下进行静力非线性分析。本章考虑龙卷风平移运动的影响，假定其移动轨迹后计算输电塔结构各节点荷载时程，进行动力时程分析，分析其动态响应。

#### 3.1 动态龙卷风模型

根据第2.1.1建立整体坐标系，如图2.10所示。龙卷风相应于输电塔结构做平移运动的示意图见图3.1所示。

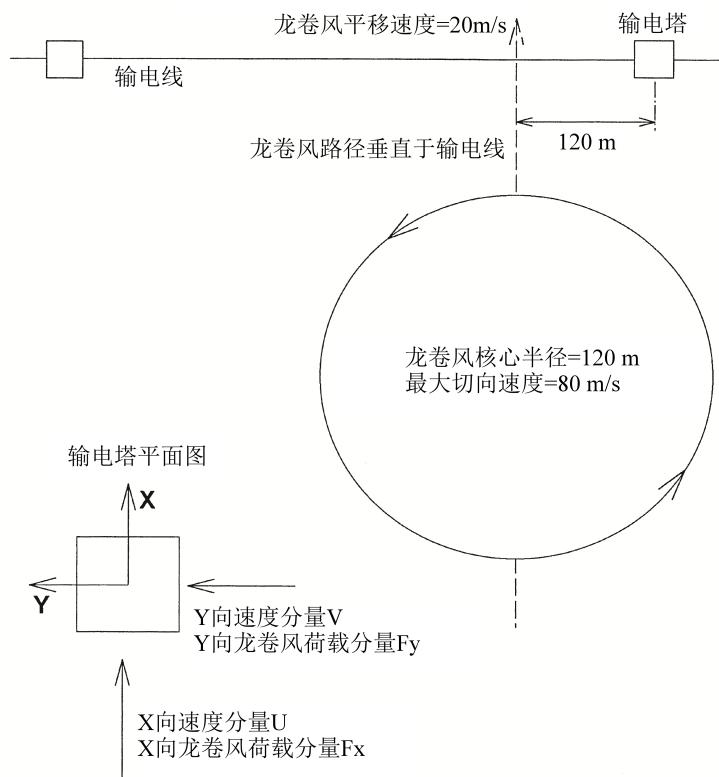


图 3.1: 龙卷风相应于输电塔做平移运动的示意图

##### 3.1.1 龙卷风路径

假定龙卷风核心在地面上做匀速直线运动，描述其路径的关键参数为核心初始位置和运动速度。

为了使得初始时刻输电塔结构所受龙卷风荷载较小，需要将龙卷风核心初始位置设置在距离输电塔较远的地方。若初始时刻龙卷风核心距离输电塔很近，结构会受到量值很大的突加荷载的影响，与实际情况不符。初始位置在整体坐标系中的位置记为 $(x_0^T, y_0^T)$ 。

关于龙卷风的平移速度在第1.1.2节已有介绍，我国《三十万千瓦压水堆核电厂安全重要土建结构抗龙卷风设计规定》中A类龙卷风平移速度为22.4 m/s，文献<sup>[22][27]</sup>中选用龙卷风平移速度为20.0 m/s，二者差别较小，本文为计算简便选用 $v^T = 20.0 \text{ m/s}$ 。确定龙卷风路径还需龙卷风平移速度的方向，设平移速度相对于输电线、即X轴正向的夹角为 $\theta^T$ 。

综上，龙卷风运动轨迹 $(x^T(t), y^T(t))$ 可表示为：

$$\begin{cases} x^T(t) = x_0^T + (v^T \cos \theta^T) t \\ y^T(t) = y_0^T + (v^T \sin \theta^T) t \end{cases} \quad (3.1)$$

龙卷风的平移运动引起了龙卷风核心相对输电塔位置 $(x^T(t), y^T(t))$ 随时间变化，进而使得输电塔受到了随龙卷风位置变化的荷载时程，需进行动力时程分析计算结构响应。

本文假设龙卷风风场结构不随时间变化（实际中龙卷风会随其运动衰减，本文忽略这一现象），即采用第1.4.2中模拟的足尺龙卷风风场作为任一时刻动态龙卷风的风场。

## 3.2 动态龙卷风风速及荷载时程

在任意时刻 $t$ ，利用第2.3节中规范方法施加该时刻的龙卷风荷载。由于第2.3节已编制了计算龙卷风荷载并施加到输电塔结构的APDL程序，在动力分析中，改变龙卷风核心相应于输电塔中心的极坐标 $(R, \theta)$ （见第2.3.1节），调用龙卷风荷载施加子程序，即可完成动态荷载施加过程。

### 3.2.1 典型龙卷风运动工况

龙卷风平移运动的两种典型工况见图3.2和图3.3。图3.2中龙卷风运动路径平行于输电线，下文简称为龙卷风平行运动工况；图3.3中龙卷风运动路径垂直于输电线，下文简称为龙卷风垂直运动工况。

平行运动工况（图3.2）中，龙卷风核心初始位置选为 $x_0^T = 1500 \text{ m}$ ,  $y_0^T = 120 \text{ m}$ ；平移速度 $v^T = 20.0 \text{ m/s}$ ,  $\theta^T = \pi$ 。满足初始时刻龙卷风距离输电塔较远，龙卷风荷载较小，且在运动过程二者距离取得龙卷风核心半径 $r_c = 120 \text{ m}$ ，受到龙卷风荷载较大。

类似选取垂直运动工况（图3.3）的参数，龙卷风核心初始位置选为 $x_0^T = 120 \text{ m}$ ,  $y_0^T = 1500 \text{ m}$ ；平移速度 $v^T = 20.0 \text{ m/s}$ ,  $\theta^T = -\frac{1}{2}\pi$ 。

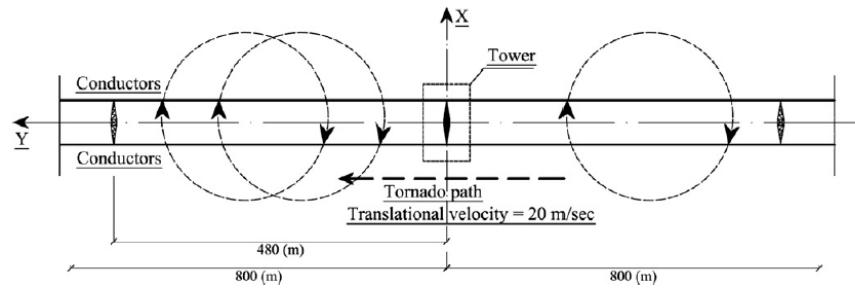


图 3.2: 龙卷风平行运动工况

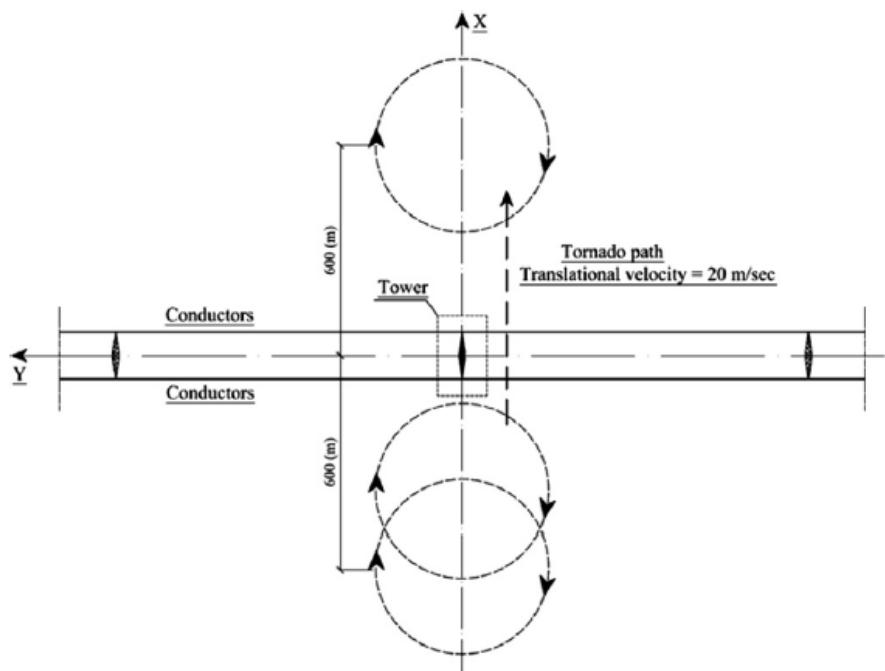


图 3.3: 龙卷风垂直运动工况

### 3.2.2 动态龙卷风风速时程

随着龙卷风移动位置的变化，输电塔结构各节点受到风速时程的作用。现选取塔顶节点，平行工况和垂直工况时塔顶节点风速时程分别如图3.4、图3.5所示。

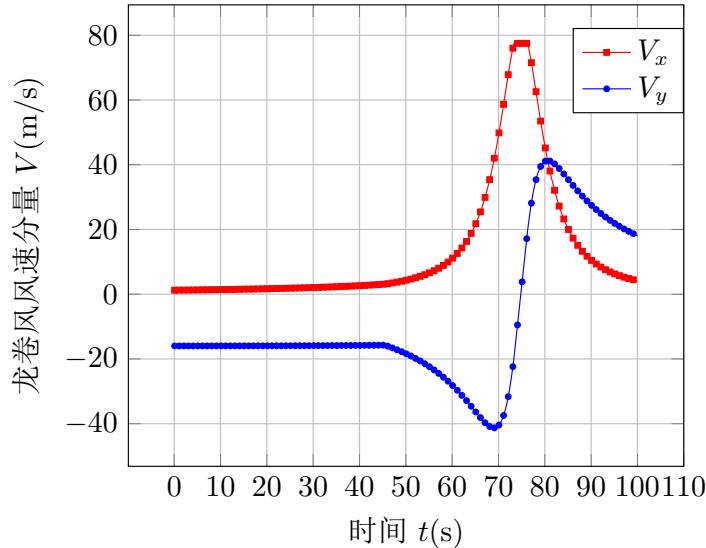


图 3.4: 龙卷风运动平行工况塔顶节点风速时程

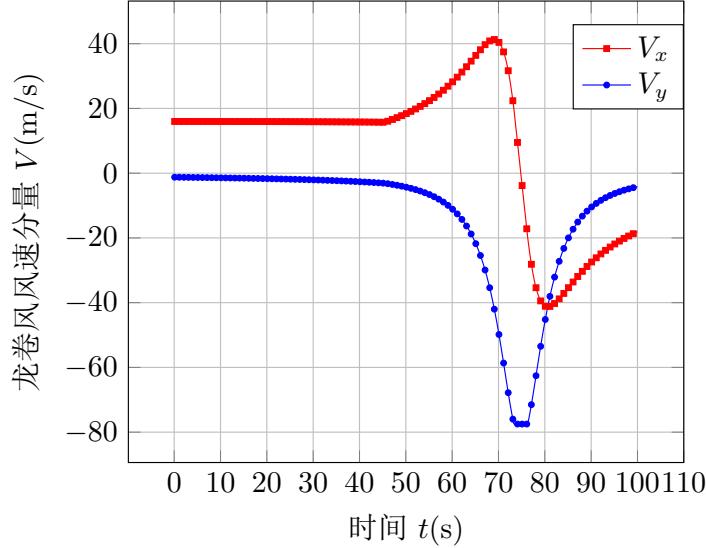


图 3.5: 龙卷风运动垂直工况塔顶节点风速时程

### 3.2.3 动态龙卷风荷载时程

在龙卷风移动过程中，任一时刻确定龙卷风位置后，根据规范方法（第2.3节）计算输电塔结构受到的龙卷风荷载。并将结构有限元模型所有节点受到的龙卷风荷载在  $X$  和  $Y$  轴的分量进行求和，绘制龙卷风荷载分量合力的时程曲线，如图3.6和3.7所示。

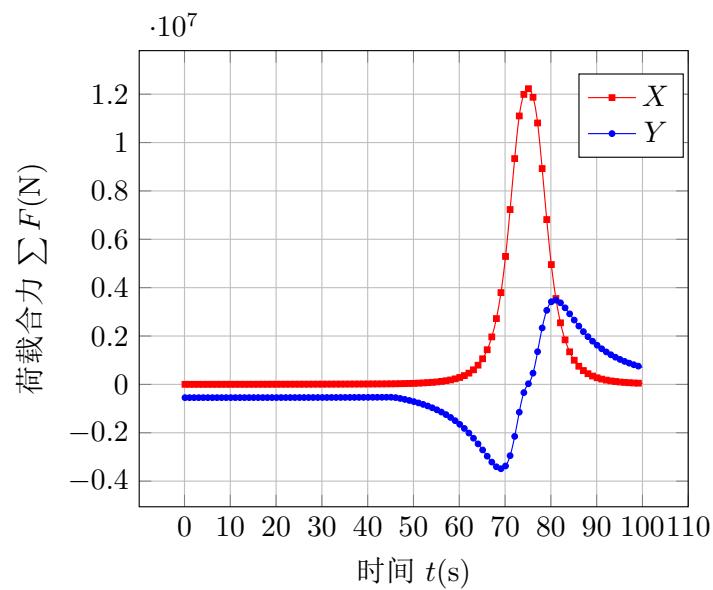


图 3.6: 龙卷风运动平行工况荷载分量合力时程

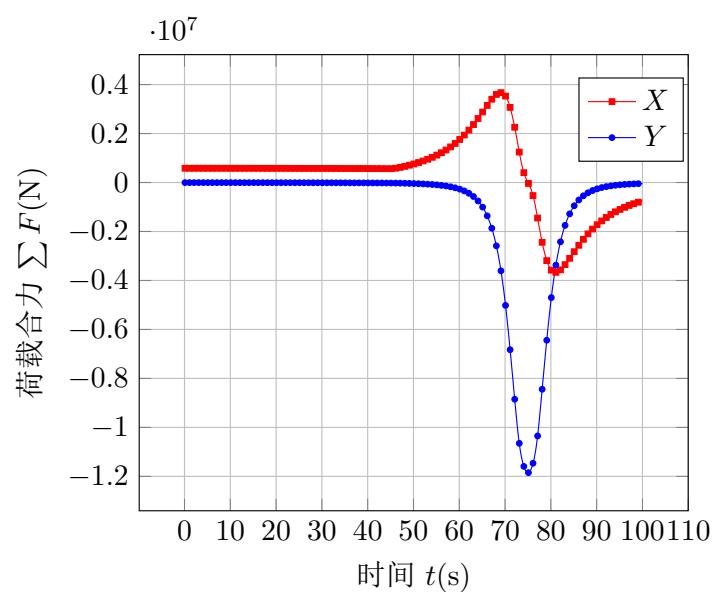


图 3.7: 龙卷风运动垂直工况荷载分量合力时程

### 3.3 输电塔结构动力时程分析

对输电塔进行风荷载动态响应分析，常采用时程分析方法，即将动态龙卷风荷载施加到结构上，利用数值方法求解动力运动方程，可全面了解结构在龙卷风动态荷载作用时间内的动力响应状况，求解精度较高。本文采用时程分析方法分析输电塔结构在龙卷风作用下的动态响应。

由于时程分析方法计算量较大，故本节不考虑输电塔结构材料非线性和几何非线性的影响。由于输电线与塔结构的耦合效应机理复杂，本文忽略这一效应的影响。时间步长初选为0.10 s，并进行时间步长的敏感性分析，发现当时间步长减小为0.05 s时结构动态响应差别较小。这说明0.10 s的时间步长是足够精确的。

#### 3.3.1 动力方程及其求解

输电塔结构在考虑移动效应的龙卷风荷载时程作用下的动力方程为：

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}\mathbf{u} = \mathbf{F}(t) \quad (3.2)$$

式中： $\mathbf{M}$ 、 $\mathbf{C}$  和  $\mathbf{K}$  分别为输电塔结构总体质量矩阵、阻尼矩阵及刚度矩阵； $\ddot{\mathbf{u}}$ 、 $\dot{\mathbf{u}}$  和  $\mathbf{u}$  分别为节点的加速度、速度及位移向量； $\mathbf{F}$  为输电塔受到的龙卷风荷载时程。

对结构的时程分析一般采用逐步积分方法。从积分格式的形式上可划分为隐式方法与显式方法；从计算格式的稳定性上可划分为无条件稳定方法与条件稳定方法。评价逐步积分方法的优劣包括稳定性、精度、高频能耗及幅值超越性。其中稳定性占有重要地位。无条件稳定的逐步积分方法在应用时，其计算时间步长不受方法本身所控制，而仅由计算精度要求确定；条件稳定的逐步积分方法的计算时间步长，不但要受计算精度要求的控制，而且还受其稳定条件的限制。隐式逐步积分方法与显示方法的区别在于计算格式所形成的线性方程组的耦联与否。显式方法一般为条件稳定，故只在某些领域如离散网格中波动的研究中采用。隐式逐步积分方法的研究成果较多，在结构计算中得到应用的有常平均加速度方法、Newmark 法和 Wilson-θ 法等。

本文采用隐式的直接积分方法 Newmark 法对输电塔体系进行动力时程分析求解。

Newmark 法假设  $t + \Delta t$  时刻的速度和位移为：

$$\dot{\mathbf{u}}_{t+\Delta t} = \dot{\mathbf{u}}_t + [(1 - \gamma)\ddot{\mathbf{u}}_t + \gamma\ddot{\mathbf{u}}_{t+\Delta t}] \quad (0 \leq \gamma \leq 1) \quad (3.3)$$

$$\mathbf{u}_{t+\Delta t} = \mathbf{u}_t + \dot{\mathbf{u}}_t \Delta t + \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{1}{2} - \beta \right) \ddot{\mathbf{u}}_t + \beta \ddot{\mathbf{u}}_{t+\Delta t} \right] \Delta t^2 \quad \left( 0 \leq \beta \leq \frac{1}{2} \right) \quad (3.4)$$

由式(3.4)可以解得：

$$\ddot{\mathbf{u}}_{t+\Delta t} = \frac{1}{\beta \Delta t^2} (\mathbf{u}_{t+\Delta t} - \mathbf{u}_t) - \frac{1}{\beta \Delta t} \dot{\mathbf{u}}_t - \left( \frac{1}{2\beta} - 1 \right) \ddot{\mathbf{u}}_t \quad (3.5)$$

将式(3.5)代入式(3.3), 然后共同代入式(3.2), 则得到从  $\mathbf{u}_t$ 、 $\dot{\mathbf{u}}_t$  和  $\ddot{\mathbf{u}}_t$  计算  $\mathbf{u}_{t+\Delta t}$  的两步递推公式为:

$$\begin{aligned} & \left( \mathbf{K} + \frac{1}{\beta \Delta t^2} \mathbf{M} + \frac{\gamma}{\beta \Delta t} \mathbf{C} \right) \mathbf{u}_{t+\Delta t} = \mathbf{F}_{t+\Delta t} + \\ & \mathbf{M} \left[ \frac{1}{\beta \Delta t^2} \mathbf{u}_t + \frac{1}{\beta \Delta t} \dot{\mathbf{u}}_t + \left( \frac{1}{2\beta} - 1 \right) \ddot{\mathbf{u}}_t \right] + \\ & \mathbf{C} \left[ \frac{\gamma}{\beta \Delta t} \mathbf{u}_t + \left( \frac{\gamma}{\beta} - 1 \right) \dot{\mathbf{u}}_t + \left( \frac{\gamma}{2\beta} - 1 \right) \Delta t \ddot{\mathbf{u}}_t \right] \end{aligned} \quad (3.6)$$

Newmark 方法中, 当参数  $\gamma \geq 0.5$ ,  $\beta \geq 0.25 (0.5 + \gamma)^2$  时, 算法是无条件稳定的, 即时间步长  $\Delta t$  的大小不影响解的稳定性。

### 3.3.2 输电塔结构的阻尼

阻尼能耗散动力系统能量, 使自由振动的振幅随时间衰减。影响结构动力响应的阻尼主要有粘性阻尼、滞后阻尼、库伦阻尼等<sup>[29]</sup>。结构动力分析的阻尼通常足够小, 不考虑其实际来源, 将其看做粘性阻尼, 可足够精确模拟阻尼对结构的影响。

描述粘性阻尼的方法通常称为比例阻力(又称 Rayleigh 阻尼)和模态阻尼。在使用直接积分法求解结构动力方程时, 通常采用比例阻尼。比例阻尼矩阵定义为结构总体质量矩阵和刚度矩阵的线性组合, 即:

$$\mathbf{C} = \alpha_1 \mathbf{M} + \alpha_2 \mathbf{K} \quad (3.7)$$

式中:  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$  分别为质量和刚度阻尼系数。具体表达式为:

$$\begin{cases} \alpha_1 = \frac{2(\zeta_i \omega_j - \zeta_j \omega_i)}{\omega_j^2 - \omega_i^2} \omega_i \omega_j \\ \alpha_2 = \frac{2(\zeta_j \omega_j - \zeta_i \omega_i)}{\omega_j^2 - \omega_i^2} \end{cases} \quad (3.8)$$

其中  $\omega_i$ 、 $\omega_j$  分别为结构的第  $i$ 、 $j$  阶固有频率;  $\zeta_i$ 、 $\zeta_j$  分别为结构的第  $i$ 、 $j$  阶振型的阻尼比。通常工程计算中取前两阶。

在计算大跨越输电塔的结构阻尼时, 文献<sup>[23][30][31][32]</sup>建议只考虑其第一阶振型及频率, 且不考虑质量矩阵对阻尼的影响, 即取  $\alpha_1 = 0$ ,  $\alpha_2 = 2\zeta/\omega$ , 取结构的阻尼比  $\zeta = 0.04$ <sup>[30]</sup>, 由此可计算处结构的阻尼矩阵。

### 3.3.3 输电塔动态响应结果

龙卷风动态荷载作用下, 输电塔塔顶节点动态位移响应见图3.8和图3.9所示。

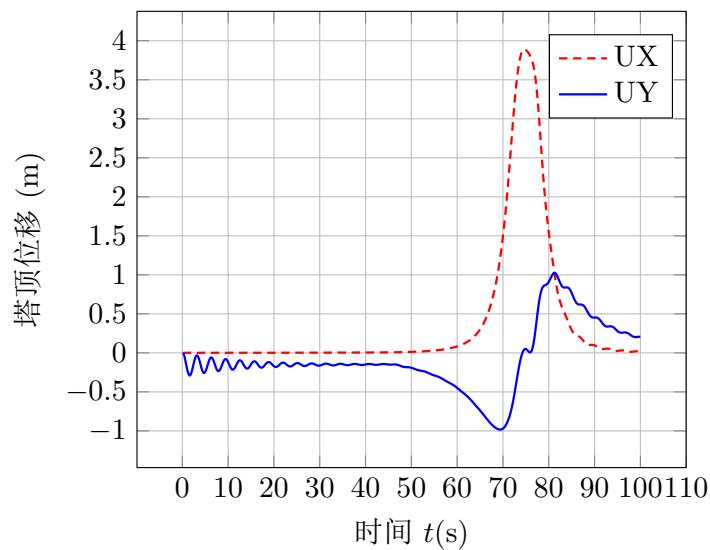


图 3.8: 龙卷风运动平行工况塔顶节点位移响应时程

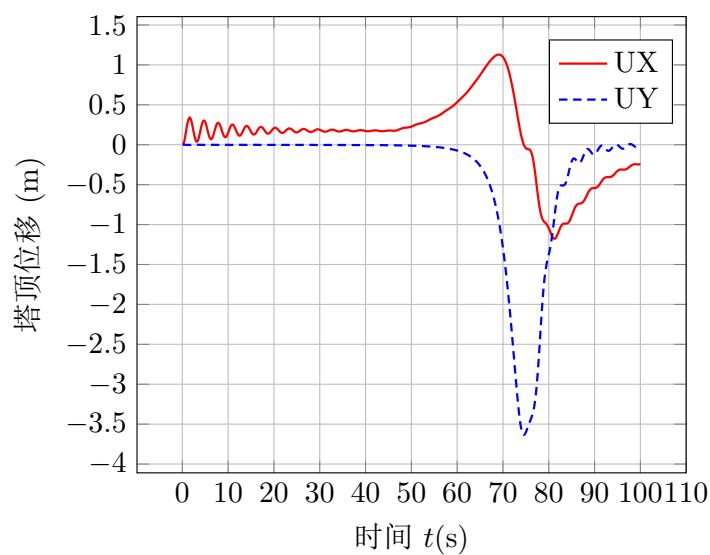


图 3.9: 龙卷风运动垂直工况塔顶节点位移响应时程

## 参考文献

- [1] Marshall Timothy P, McDonald JR, and Forbes GS. The enhanced Fujita (EF) scale[C]. In: Preprints, 22d Conf. on Severe Local Storms, Hyannis, MA, Amer. Meteor. Soc., CD-ROM 3B.2. 2004.
- [2] Doswell Charles A., Brooks Harold E., and Dotzek Nikolai. On the implementation of the enhanced Fujita scale in the USA[J]. Atmospheric Research, 2009, 93(1):554–563.
- [3] 中华人民共和国核工业标准. EJ 420-89, 三十万千瓦压水堆核电厂安全重要土建结构抗龙卷风设计规定 [S]. 北京: 核工业标准化所, 1989.
- [4] Depperman C. E. Notes on the origin and structure of Philippine typhoons[J]. Bull. Amer. Meteor. Soc, 1947, 28:399–404.
- [5] U. S. Nuclear Regulatory Commission. Design-Basis Tornado and Tornado Missiles for Nuclear Power Plants[S]. NRC's Public Document Room, 2007.
- [6] Ward Neil B. The exploration of certain features of tornado dynamics using a laboratory model[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1972, 29(6):1194–1204.
- [7] Church C. R., Snow J. T., Baker G. L., et al. Characteristics of tornado-like vortices as a function of swirl ratio: A laboratory investigation[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1979, 36(9):1755–1776.
- [8] Davies-Jones Robert P. Laboratory simulations of tornadoes[C]. In: Proceedings of the Symposium on Tornadoes: Assessment of Knowledge and Implications of Man. Boston: , 1976. 151–174.
- [9] Lewellen W.S. Tornado vortex theory[J]. The Tornado: Its Structure, Dynamics, Prediction, and Hazards, 1993, pages 19–39.
- [10] Snow John T. A review of recent advances in tornado vortex dynamics[J]. Reviews of Geophysics, 1982, 20(4):953–964.
- [11] Hangan H. and Kim J-D. Swirl ratio effects on tornado vortices in relation to the Fujita scale[J]. Wind and Structures, 2008, 11(4):291–302.
- [12] Baker GL. Boundary layers in laminar vortex flows[D]: [PhD thesis]. Ph. D. dissertation, Purdue University, 1981.

- [13] Fluent ANSYS. ANSYS Fluent 16.0 User's Guide[M]. 2015.
- [14] Launder Brian Edward. Second-moment closure and its use in modelling turbulent industrial flows[J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 1989, 9(8):963–985.
- [15] Fluent ANSYS. ANSYS Fluent 16.0 Theory Guide[M]. 2015.
- [16] Smith David R. Effect of boundary conditions on numerically simulated tornado-like vortices[J]. Journal of the atmospheric sciences, 1987, 44(3):648–656.
- [17] Wurman Joshua. The multiple-vortex structure of a tornado[J]. Weather and forecasting, 2002, 17(3):473–505.
- [18] Alexander Curtis R. and Wurman Joshua. The 30 May 1998 Spencer, South Dakota, storm. Part I: The structural evolution and environment of the tornadoes[J]. Monthly weather review, 2005, 133(1):72–97.
- [19] Wurman Joshua and Alexander Curtis R. The 30 May 1998 Spencer, South Dakota, storm. Part II: Comparison of observed damage and radar-derived winds in the tornadoes[J]. Monthly weather review, 2005, 133(1):97–119.
- [20] Sarkar Partha, Haan Fred, Gallus Jr William, et al. Velocity measurements in a laboratory tornado simulator and their comparison with numerical and full-scale data[C]. In: 37th joint meeting panel on wind and seismic effects. 2005.
- [21] 任超. 极端环境条件下大跨越输电塔线体系的动态响应分析 [D]: [硕士学位论文]. 苏州大学, 2010.
- [22] Savory Eric, Parke Gerard AR, Zeinoddini Mostafa, et al. Modelling of tornado and microburst-induced wind loading and failure of a lattice transmission tower[J]. Engineering Structures, 2001, 23(4):365–375.
- [23] Wong C. Jerry and Miller Michael D. Guidelines for electrical transmission line structural loading (third edition)[S]. Reston, Virginia: American Society of Civil Engineers(ASCE), 2009.
- [24] 刘刚. 中国与美国规范风荷载计算分析比较 [J]. 钢结构, 2010, (12):47–52.
- [25] 中华人民共和国国家标准. GB 50545-2010, 110 ~ 750kV 架空输电线路设计规范 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2010.
- [26] Hamada A., El Damatty A.A., Hangan H., et al. Finite element modelling of transmission line structures under tornado wind loading[J]. Wind and Structures, 2010, 13(5):451–469.

- [27] Hamada A. and El Damatty A.A. Behaviour of guyed transmission line structures under tornado wind loading[J]. *Computers & Structures*, 2011, 89(11):986–1003.
- [28] Altalmas A. and El Damatty A.A. Finite element modelling of self-supported transmission lines under tornado loading[J]. *Wind and Structures*, 2014, 18(5):473–495.
- [29] Chopra Anil K and 谢礼立. *结构动力学理论及其在地震工程中的应用* [M]. 北京: 高等教育出版社, 2007.
- [30] Loredo-Souza AM and Davenport AG. The influence of the design methodology in the response of transmission towers to wind loading[J]. *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, 2003, 91(8):995–1005.
- [31] Madugula Murty KS. *Dynamic response of lattice towers and guyed masts*[M]. ASCE Publications, 2001.
- [32] Ostendorp Markus. Damping characteristics of a steel lattice structure[C]. In: Building to Last:. 1997. 358–362.



## 附录 A 龙卷风数值模拟速度入口处边界条件的 UDF 程序

```
#include "udf.h"

#define H 0.4
#define R 0.4
#define UREF 0.34      /* reference velocity */
#define ZREF 0.025     /* reference height */
#define S 0.28        /* swirl ratio */

/* profile for radial velocity */
DEFINE_PROFILE(V_r, t, i)
{
    real x[ND_ND], z;
    face_t f;

    begin_f_loop(f, t)
    {
        F_CENTROID(x, f, t);
        z = x[2];
        F_PROFILE(f, t, i) = -UREF*pow(z/ZREF,1.0/7.0);
    }
    end_f_loop(f, t)
}

/* profile for tangential velocity */
DEFINE_PROFILE(V_t, t, i)
{
    real x[ND_ND], z;
    face_t f;

    begin_f_loop(f, t)
    {
        F_CENTROID(x, f, t);
```

```
z = x[2];
F_PROFILE(f, t, i) = 2.0*S*UREF*pow(z/ZREF,1.0/7.0);
}
end_f_loop(f, t)
}
```

## 附录 B 计算输电线对输电塔荷载的 APDL 和 MATLAB 程序

### B.1 计算跨越塔之间输电线对跨越塔水平荷载的 ANSYS APDL 命令流

```
! UNITS: m-kN  
FINISH  
/CLEAR  
/PREP7  
EA=729E-6          ! 单缆面积 (m^2)  
EE=1.0807E8        ! 弹性模量 (kN/m^2)  
QQ=0.0315462      ! 单缆每延米重量 (kN/m)  
YSM0=132.4         ! 中跨矢高 (m)  
CH=0               ! 中跨锚点高差 (m)  
SPAN=1770          ! 跨径  
  
ET,1,LINK1          ! 定义单元  
R,1,EA,1.0E-5        ! 设置一个较小的初应变  
MP,EX,1,EE           ! 定义材料特性  
MP,PRXY,1,0.3  
MP,DENS,1,43.273  
  
! 根据抛物线理论计算水平力迭代初始值  
FF=YSM0-CH/2  
HH=QQ*SPAN**2/(8*FF)    ! 计算水平力  
HH1=0.9*HH           ! 设置水平力迭代区间  
HH2=1.1*HH  
  
! 用二分法迭代计算主缆水平力  
*DO,I,1,100,1  
  HFM=(HH1+HH2)/2      ! 水平力迭代初值  
  CI=QQ/HFM            ! 中间参数  
  A0=CH*CI/SINH(SPAN*CI/2)/2    ! 中间参数  
  AI=LOG(A0+SQRT(A0**2+1))+SPAN*CI/2  ! 中间参数 alpha  
  BI=COSH(AI)/CI        ! 中间参数 alpha1
```

```

YSM=BI-COSH(CI*(SPAN/2)-AI)/CI          ! 计算跨中矢高
*IF, YSM, GT, YSM0, THEN                 ! 修正水平力
    HH1=HFM
*ELSEIF, YSM, LE, YSM0
    HH2=HFM
*ENDIF
*ENDDO

ERROR1=(YSM-YSM0)/YSM0                  ! 跨中处索垂度误差
MSS=(SINH(CI*SPAN-AI)+SINH(AI))/CI      ! 按悬链线方程得出的形状长度
DS0=HFM*(SPAN+(SINH(2*CI*SPAN-2*AI)+SINH(2*AI))/2/CI)/(2*EE*EA)
                                         ! 按悬链线方程得出的伸长量
YBM=DS0/(MSS-DS0)                      ! 中跨的初始应变
R,1,EA,YBM                            ! 修改单缆初始应力

EL=1 ! 单元水平长度
ENU=SPAN/EL+1

*DIM,X,ARRAY,ENU,1
*DIM,Y,ARRAY,ENU,1
*DO,I,1,ENU,1                          ! 定义单缆节点
    X(I)=(I-1)*EL
    Y(I)=BI-COSH(CI*X(I)-AI)/CI
    N,I,X(I),-Y(I),0
*ENDDO

TYPE,1
MAT,1
REAL,1
ESYS,0                                  ! 单缆单元
*DO,I,1,ENU-1,1
    E,I,I+1
*ENDDO

EPLOT
FINISH

/SOLU
D,1,ALL                                ! 定义边界条件
D,ENU,ALL
ACEL,0,1,0                               ! 施加重力荷载

```

---

```
ANTYPE,STATIC
```

```
NLGEOM,ON
```

```
NROPT,AUTO
```

```
LUMPM,OFF
```

```
EQSLV,,,0
```

```
AUTOTS,OFF
```

```
NSUBST,100
```

```
KBC,0
```

```
ALLSEL
```

```
SOLVE
```

```
/POST1
```

```
PLNSOL,U,Y
```

## B.2 计算跨越塔之间输电线对跨越塔竖向荷载的 MATLAB 程序

```
L = 1770;
C = 0;
q_y = 0.0315462;
Tx = 93.3072979;
beta = q_y*L/(2*Tx);
c1 = asinh((beta*C/L)/sinh(beta))-beta;
c2 = -Tx/q_y*cosh(c1);
cat = @(x) Tx/q_y*cosh(q_y/Tx*x+c1)+c2;
cat_d = @(x) sinh(q_y/Tx*x+c1);
x = 0:L;
y = cat(x);
csvwrite('cat.csv',horzcat(transpose(x/100), transpose(y/100)))
mid_def = cat(L/2);
theta = cat_d(L);
plot(x,y)
hold on
axis equal
```



## 附录 C 静态响应分析的 APDL 程序

### C.1 主程序.\SETUP.MAC

```
! UNIT: N-mm
FINISH $ /CLEAR
/TITLE,"ANALYSIS OF TOWER"
! Parameters
workDir='.'
inputData='./InputData/'
inputAPDL='./InputAPDL/'
/INPUT,'PARA','MAC',%inputAPDL%
/INPUT,'MODEL','MAC',%inputAPDL%
/REP7
/VUP,1,Z
/VIEW,1,1,1,1
EPLOT
! 将模型中的 MESH200 单元改为 BEAM188 单元
ET,2,BEAM188
ESEL,ALL
EMODIF,ALL,TYPE,2
ALLSEL,ALL
! 将模型中的线弹性材料改为理想弹塑性材料
MP,DENS,2,7.85E-09          ! 材料密度 (10^3 kg/mm^3)
MP,EX,2,200000                ! 弹性模量 (MPa)
MP,PRXY,2,0.3
TB,BKIN,2,1
TBDATA,1,335,0                ! 屈服强度 (335 MPa)
ESEL,ALL
MPCHG,2,ALL
```

```

NSEL,ALL
NUMMRG,NODE ! 合并模型节点
FINISH

/SOLU
! 约束
NSEL,S,LOC,Z,0-SEL_TOR,0+SEL_TOR
D,ALL,ALL,0
ALLSEL,ALL ! 施加底部节点的固定支座约束
! 施加重力荷载
ACEL,0,0,9.8E3 ! 重力加速度 (mm/s^2)
! 施加输电线作用于跨越塔的荷载
*DO,I,1,8
TN=NODE(TP(I,1),TP(I,2),TP(I,3))
*IF,NX(TN),GT,0,THEN
  F,TN,FX,Tx_R
  F,TN,FZ,-Tz_R
  ! F, TN, MY, My_R
*ELSEIF,NX(TN),LE,0
  F,TN,FX,-Tx_L
  F,TN,FZ,-Tz_L
  ! F, TN, MY, -My_L
*ENDIF
*ENDDO

*DO,IR,1,1,1
*DO,IT,1,7,1
  R=R_IN(IR)
  THETA=THE_IN(IT)
/SOLU
! Apply tornado load
/INPUT,'WLOAD','MAC',%inputAPDL%
ANTYPE,STATIC
NLGEOM,ON
NSUBST,100
ALLSEL,ALL

```

```

SOLVE
/INPUT, 'POST', 'MAC', %inputAPDL%
  USUM_OUT(IR,IT)=USUM
*ENDDO
*ENDDO

*CFOPEN, OUT_U
*VWRITE, USUM_OUT(1,1,1), USUM_OUT(1,2,1), USUM_OUT(1,3,1), USUM_OUT(1,4,1), USUM_OUT(1,5,
(F6.1, ',', F6.1, ',',
*CFCLOS

```

## C.2 参数定义子程序.\InputAPDL\PARA.MAC

```

! Parametric Analysis of the tower under tornado
SEL_TOR=1                                     ! 选择精度
*DIM,Vt, TABLE,100,9,, 'radical', 'height'    ! 缩尺龙卷风切向风速场
*TREAD,Vt, 'tangential_velocity', 'csv', %inputData%,2
*DIM,Vr, TABLE,100,9,, 'radical', 'height'      ! 缩尺龙卷风径向风速场
*TREAD,Vr, 'radial_velocity', 'csv', %inputData%,2
*DIM,Va, TABLE,100,2,, 'radical', 'height'        ! 缩尺龙卷风竖向风速场
*TREAD,Va, 'axial_velocity', 'csv', %inputData%,2
LS=12000                                       ! 缩尺龙卷风模型长度相似比
VS=40                                           ! 缩尺龙卷风模型速度相似比
! 龙卷风荷载作用位置
WLP_NUM=48                                      ! 龙卷风荷载施加的节点数
SEC_NUM=12                                       ! 输电塔模型分层数
*DIM,WLP, TABLE,WLP_NUM,3, , 'NO.', 'XYZ'
*TREAD,WLP, 'wind_load_points', 'csv', %inputData%,2
! 龙卷风风速场转化为龙卷风荷载需要的参数
*DIM,PA, TABLE,SEC_NUM,3, , 'LEVEL', 'AXYZ'      ! 各个龙卷风荷载作用点的迎风面积
*TREAD,PA, 'projected_area', 'csv', %inputData%,2
YITA=1.0                                         ! 风荷载遮挡系数
MU_S=1.3*(1+YITA)                                ! 体型系数
RHO_A=1.225                                       ! 空气密度 (kg/m^3)
*DIM,PV, ARRAY, WLP_NUM,3                          ! 存储各作用点处龙卷风速

! 输电线施加给跨越塔的力

```

```

Tx_L=93.3073E3                                ! 跨越线的张力 X 分量 (N)
Tx_R=21.3252E3                                ! 锚塔线的张力 (N)
tan_L=0.3037                                    ! 跨越线在跨越塔处的切线斜率
tan_R=0.7454                                    ! 锚塔线在跨越塔处的切线斜率
Tz_L=Tx_L*tan_L                                ! 跨越线的张力 Z 分量 (N)
Tz_R=Tx_R*tan_R                                ! 锚塔线的张力 Z 分量 (N)
h_insu=9.45E3                                    ! 绝缘子串高度 (mm)
My_L=Tx_L*h_insu                               ! 绝缘子串高度引起的力矩 (N-mm)
My_R=Tx_R*h_insu
! 输电线施加给跨越塔的力的作用位置

*DIM,TP,TABLE,8,3,, 'NO.', 'XYZ'
*TREAD,TP,'tension_points','csv',%inputData%,2

! 龙卷风位置参数化
! Parametric Sweep
*DIM,R_IN,ARRAY,1
R_IN(1)=120
*DIM,THE_IN,ARRAY,7
THE_IN(1)=0,15,30,45,60,75,90
*DIM,U$UM_OUT,ARRAY,1,7

FINISH

```

### C.3 有限元模型子程序.\InputAPDL\MODEL.MAC

略。

### C.4 龙卷风荷载施加子程序.\InputAPDL\WLOAD.MAC

```

! Apply tornado load
*DO,I,1,WLP_NUM
x_i=WLP(I,1)/1000                            ! 获取龙卷风荷载作用点的 X 坐标，并将其赋值给 x_i
y_i=WLP(I,2)/1000                            ! 获取龙卷风荷载作用点的 Y 坐标，并将其赋值给 y_i
z_i=WLP(I,3)/1000                            ! 获取龙卷风荷载作用点的 Z 坐标，并将其赋值给 z_i

```

```

R_hi=SQRT((x_i-R*COS(THETA))**2+(y_i-R*SIN(THETA))**2)
          ! 龙卷风荷载作用点相对于龙卷风坐标系
R_ma=R_hi/LS
          ! 根据长度相似比对应于缩尺龙卷风模型的
Z_ma=z_i*1.0/LS
          ! 根据长度相似比对应于缩尺龙卷风模型的
V_t=Vt(R_ma,Z_ma)*VS
          ! 龙卷风切向风速
V_r=Vr(R_ma,Z_ma)*VS
          ! 龙卷风径向风速
V_a=Va(R_ma,Z_ma)*VS
          ! 龙卷风竖向风速
PV(I,1)=-V_t*(y_i-R*SIN(THETA))/R_hi+V_r*(x_i-R*COS(THETA))/R_hi
          ! 龙卷风 X 向风速
PV(I,2)=V_t*(x_i-R*COS(THETA))/R_hi+V_r*(y_i-R*SIN(THETA))/R_hi
          ! 龙卷风 Y 向风速
PV(I,3)=V_a
          ! 龙卷风 X 向风速

```

\*ENDDO

! 施加龙卷风荷载

\*DO,I,1,SEC\_NUM

```

VX_AVG=(PV(4*I-3,1)+PV(4*I-2,1)+PV(4*I-1,1)+PV(4*I,1))/4
VY_AVG=(PV(4*I-3,2)+PV(4*I-2,2)+PV(4*I-1,2)+PV(4*I,2))/4
FX_T=0.5*RHO_A*VX_AVG**2*MU_S*PA(I,1)
FY_T=0.5*RHO_A*VY_AVG**2*MU_S*PA(I,2)
WLN1=NODE(WLP(4*I-3,1),WLP(4*I-3,2),WLP(4*I-3,3))
WLN2=NODE(WLP(4*I-2,1),WLP(4*I-2,2),WLP(4*I-2,3))
WLN3=NODE(WLP(4*I-1,1),WLP(4*I-1,2),WLP(4*I-1,3))
WLN4=NODE(WLP(4*I,1),WLP(4*I,2),WLP(4*I,3))

```

! 施加 X 向龙卷风荷载

\*IF,VX\_AVG,GE,0,THEN

```

F,WLN2,FX,0.5/(1+YITA)*FX_T
F,WLN3,FX,0.5/(1+YITA)*FX_T
F,WLN4,FX,0.5*YITA/(1+YITA)*FX_T
F,WLN1,FX,0.5*YITA/(1+YITA)*FX_T

```

\*ELSE,VX\_AVG,LT,0

```

F,WLN4,FX,-0.5/(1+YITA)*FX_T
F,WLN1,FX,-0.5/(1+YITA)*FX_T
F,WLN2,FX,-0.5*YITA/(1+YITA)*FX_T
F,WLN3,FX,-0.5*YITA/(1+YITA)*FX_T

```

\*ENDIF

```

! 施加 Y 向龙卷风荷载
*IF,VY_AVG,GE,0,THEN
  F,WLN2,FY,0.5/(1+YITA)*FY_T
  F,WLN3,FY,0.5/(1+YITA)*FY_T
  F,WLN4,FY,0.5*YITA/(1+YITA)*FY_T
  F,WLN1,FY,0.5*YITA/(1+YITA)*FY_T
*ELSE,VX_AVG,LT,0
  F,WLN4,FY,-0.5/(1+YITA)*FY_T
  F,WLN1,FY,-0.5/(1+YITA)*FY_T
  F,WLN2,FY,-0.5*YITA/(1+YITA)*FY_T
  F,WLN3,FY,-0.5*YITA/(1+YITA)*FY_T
*ENDIF
*ENDDO

```

## C.5 输电塔结构响应提取子程序.\InputAPDL\POST.MAC

```

/POST1
PLNSOL,U,SUM
out_node=NODE(3750.2,3750.2,243500)
*GET,USUM,NODE,out_node,U,SUM

```



心於至善

---

---

