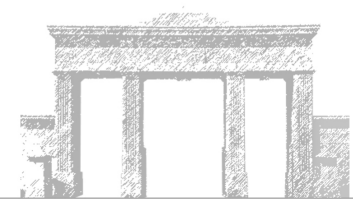


心於至善



SOUTHEAST UNIVERSITY

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

学校代码: 10286  
分类号: 000  
密级: 公开  
UDC: 000  
学号: 140926



SOUTHEAST UNIVERSITY

# 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 2016年7月31日

二级学科名称 结构工程 学位授予日期 2016年7月31日

答辩委员会主席 评阅人

2016年7月31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

# 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 2016 年 7 月 31 日

二级学科名称 结构工程 学位授予日期 2016 年 7 月 31 日

答辩委员会主席 评 阅 人

2016 年 7 月 31 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

2016/7/31



## 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

关键词：

---

## **Abstract**

**Keywords:**

---

# 目录

摘 要	I
Abstract	III
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 龙卷风的数值模拟	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 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	8
1.3.3 数值风场的风压分布特征	10
1.3.4 实测龙卷风风场对比	10
参考文献	13



# 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站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 $V(\text{m/s})$	旋转风速 $V_R(\text{m/s})$	平移风速 $V_T(\text{m/s})$	最大旋转半径 $R(\text{m})$	压力降 $\Delta P(\text{Pa})$	降压时间 $t(\text{s})$
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，这在实际情况中是并不存在的。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>：

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

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。

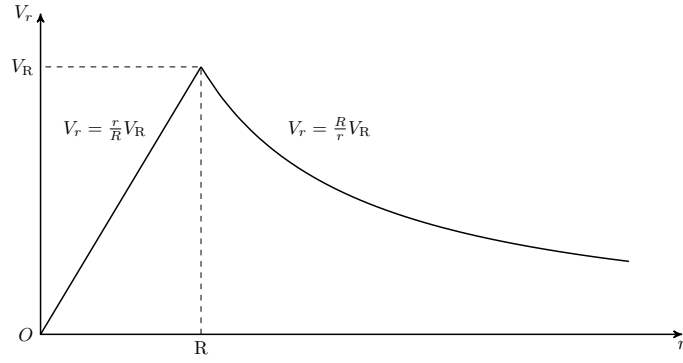


图 1.1: Rankine 涡模型中切向速度沿涡半径的变化曲线图

## 1.2 龙卷风的数值模拟

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>。

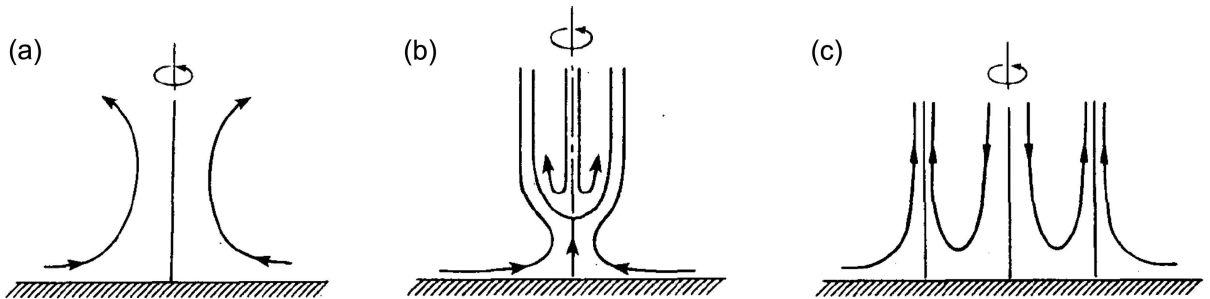


图 1.2: 增大涡流比引起龙卷风风场结构发生变化的示意图

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  $X$  轴对应龙卷风风场的径向， $Z$  轴对应龙卷风风场的竖向。

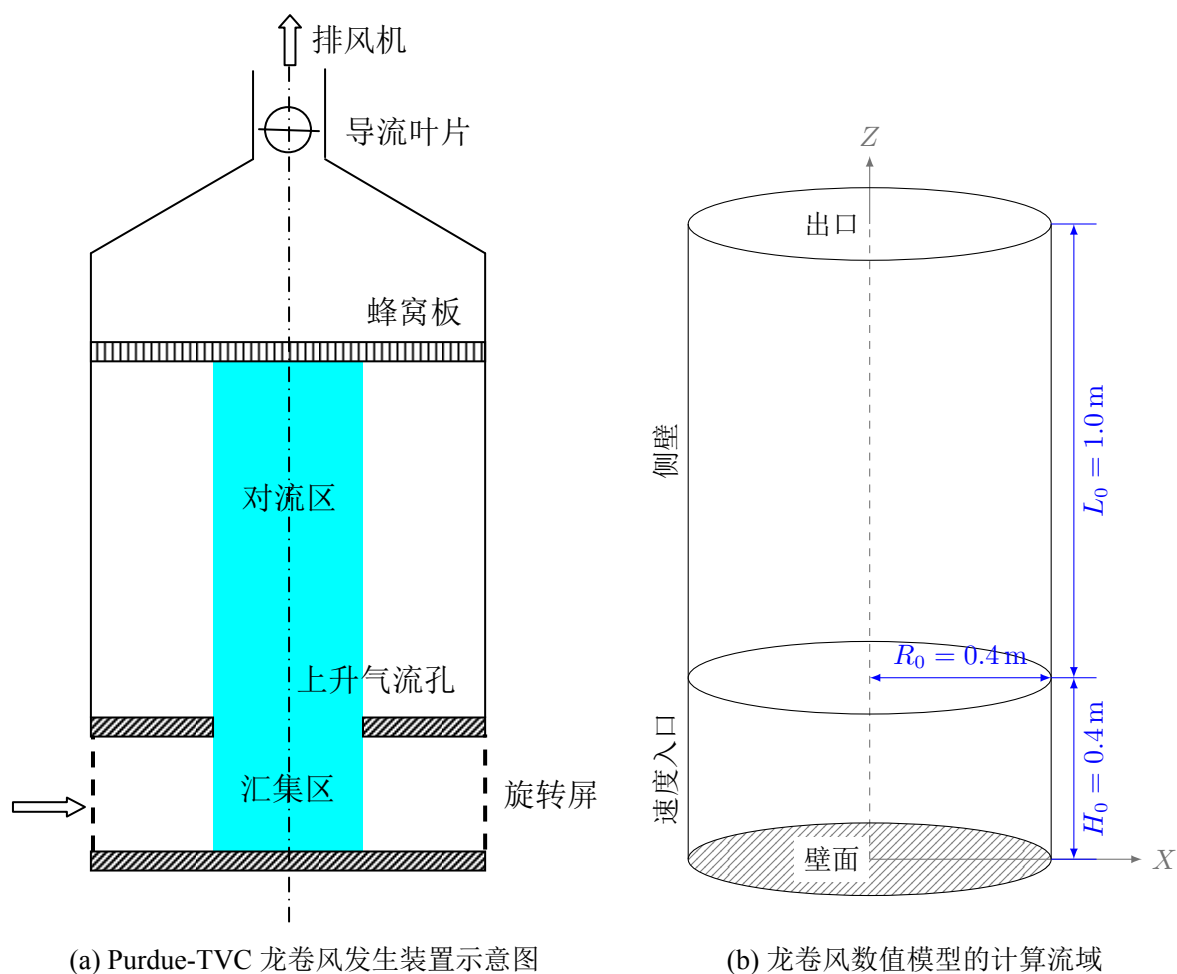


图 1.3: 龙卷风发生装置和计算流域示意图

### 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： $C_\mu = 0.09$ ;  $C_{1\epsilon} = 1.44$ ;  $C_{2\epsilon} = 1.92$ ;  $C1-ps = 1.8$ ;  $C2-ps = 0.6$ ;  $C1'-ps = 0.5$ ;  $C2'-ps = 0.3$ 。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。

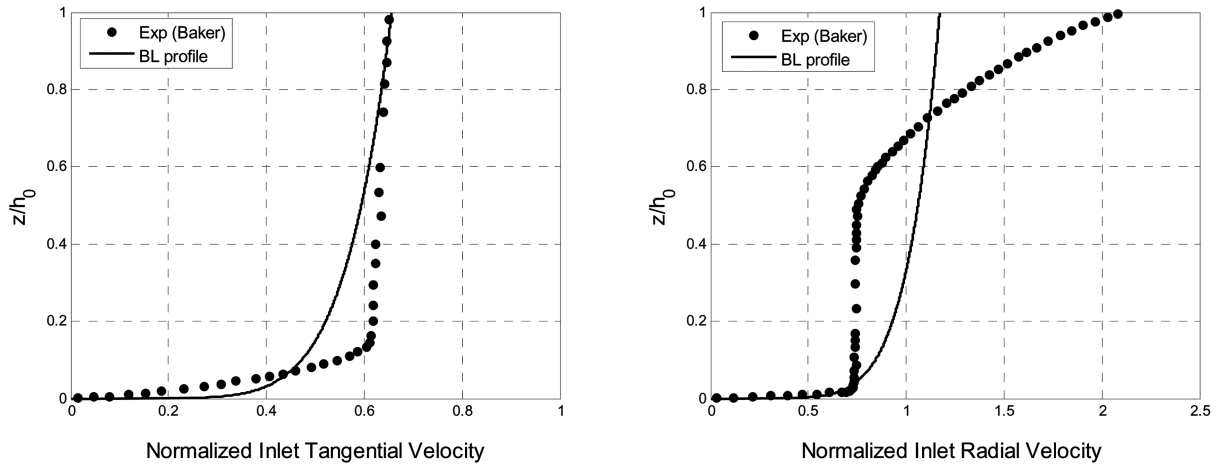


图 1.4: 入口处规格化切向和径向速度与 Baker<sup>[12]</sup> 试验的对比

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>。

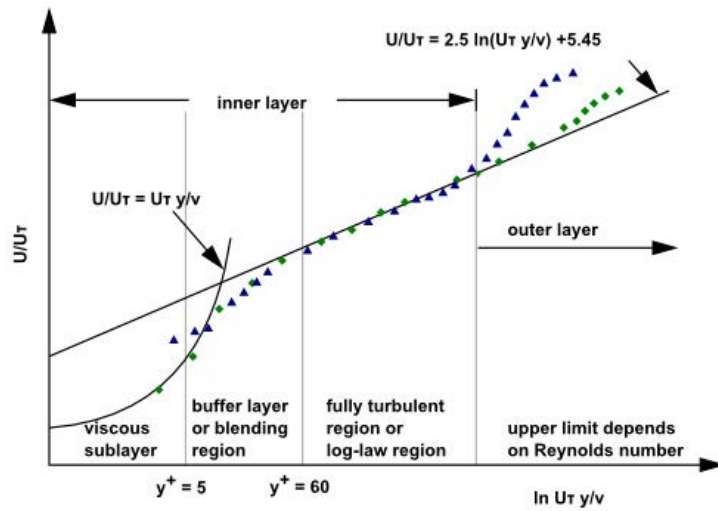


图 1.5: 近壁面区域划分

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>。

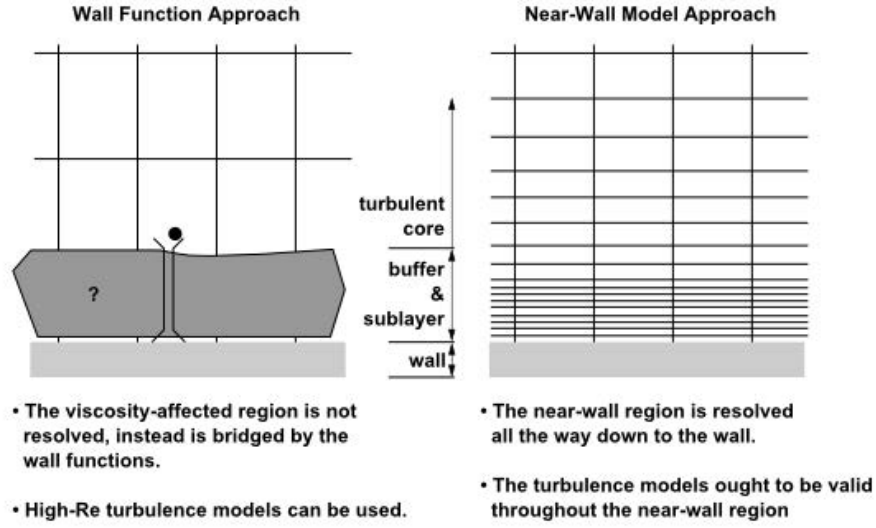


图 1.6: 近壁面区域处理方法

### 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 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  $V_a(r, z)$ 。

将上述轴对称风场与 Baker 试验<sup>[12]</sup> 结果及多普勒雷达实测风场进行对比，以验证数值风场的正确性。并探讨缩尺龙卷风数值风场转化为足尺风场的方法。

### 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。

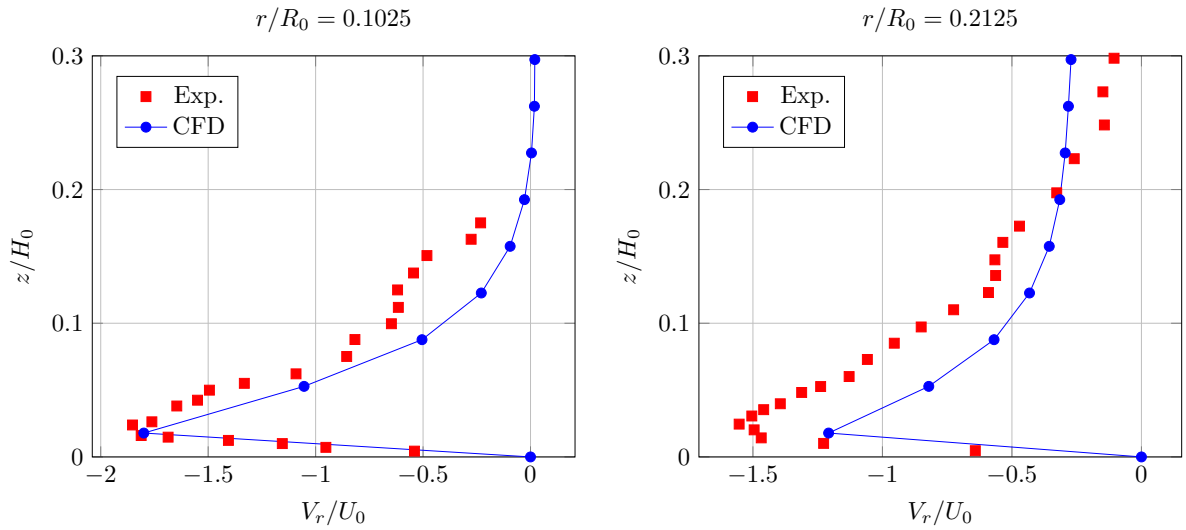


图 1.7: 数值风场与 Baker 试验无量纲化径向速度随高度变化的对比,  $S = 0.28$

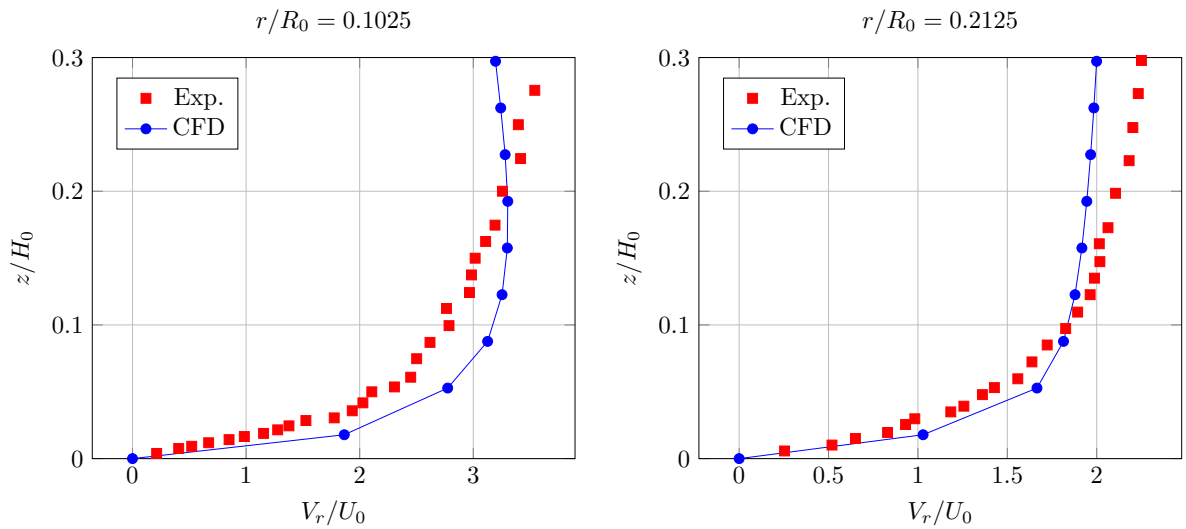
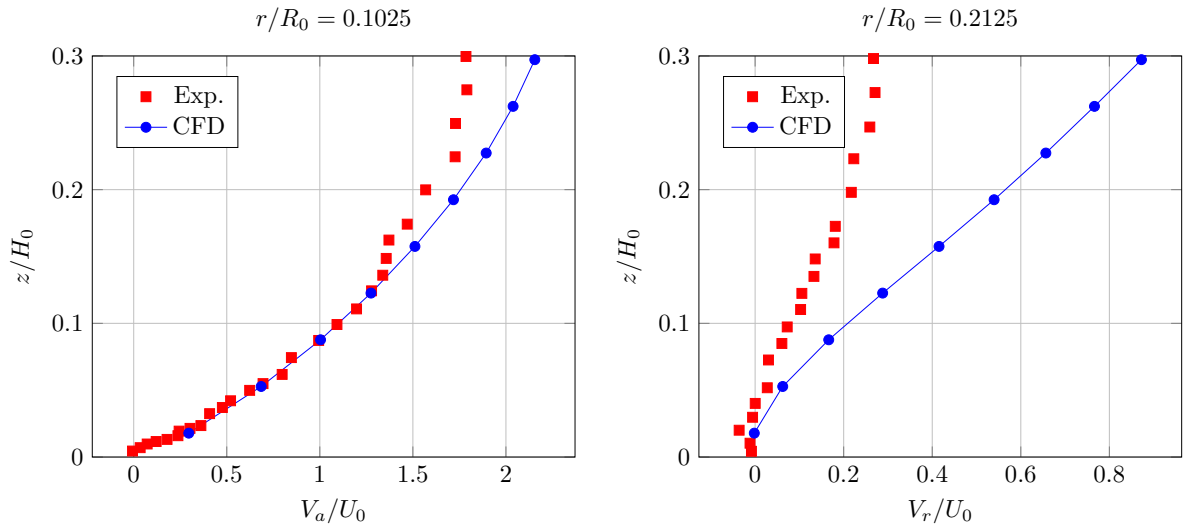


图 1.8: 数值风场与 Baker 试验无量纲化切向速度随高度变化的对比,  $S = 0.28$

### 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


 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,  $S = 0.28$ 

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。

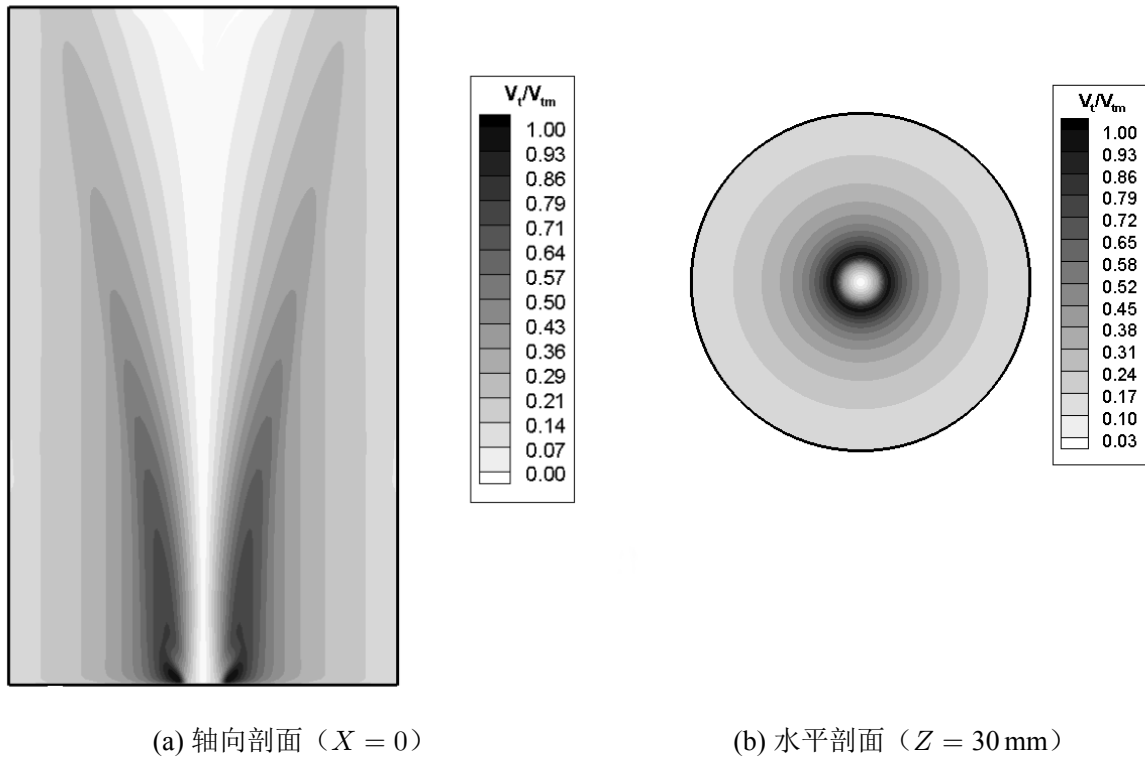


图 1.10: 切向速度云图



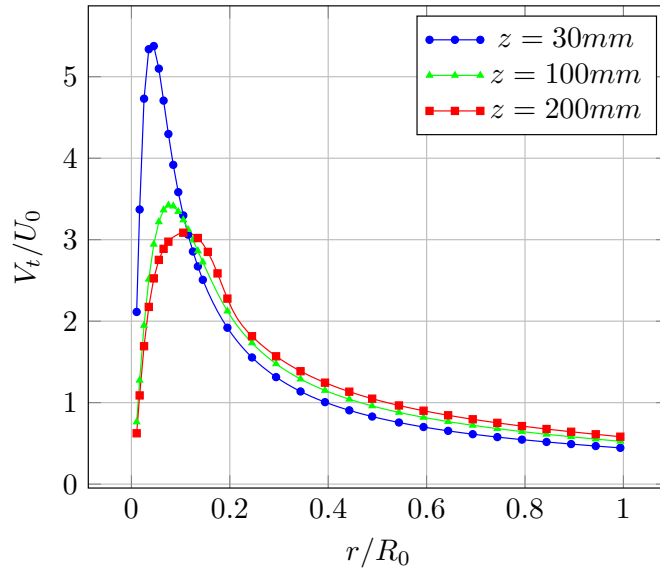


图 1.11: 数值风场不同高度处切向速度沿径向的变化图,  $S = 0.28$

### 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 ( $Z = 30mm$ ) 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。

### 1.3.4 实测龙卷风风场对比

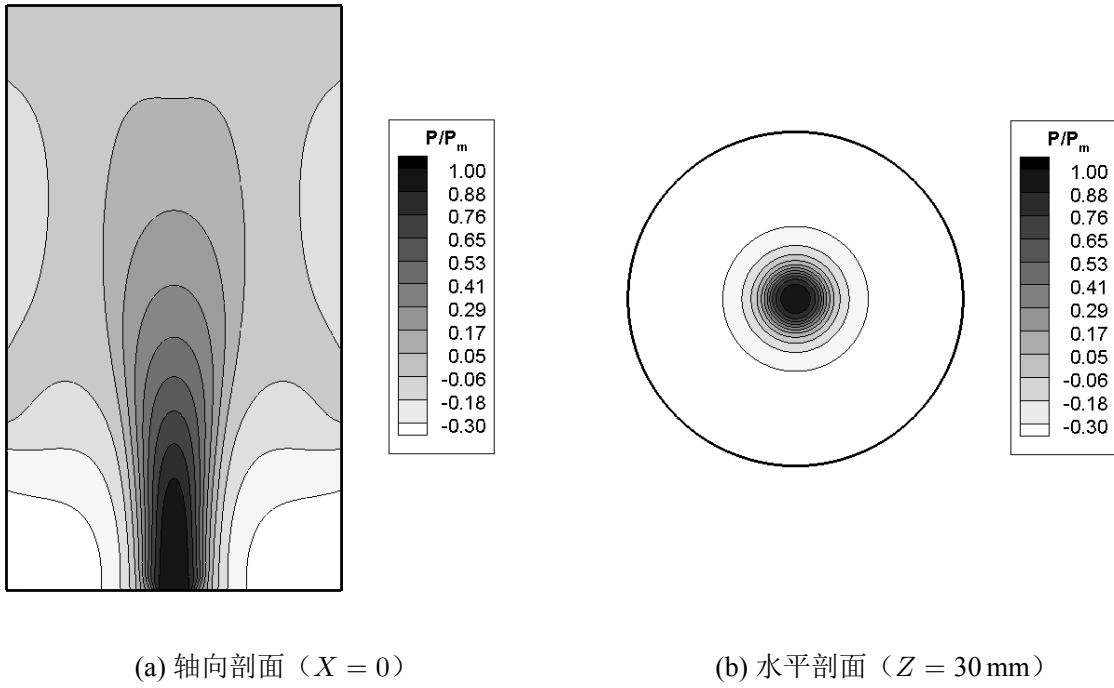


图 1.12: 风压云图

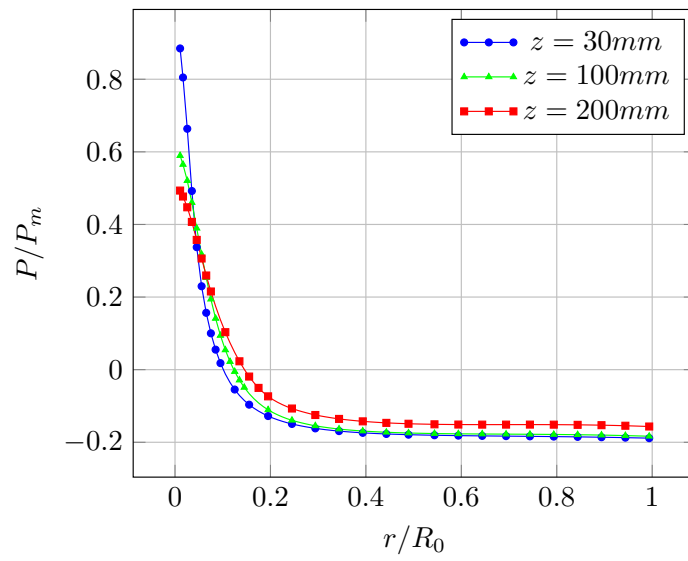


图 1.13: 数值风场不同高度处风压沿径向的变化图



## 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] 中国核工业总公司. 三十万千瓦压水核电厂安全重要土建结构抗龙卷风设计规定[S]. 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] Commission, U. S. Nuclear Regulatory. Design-Basis Tornado and Tornado Missiles for Nuclear Power Plants[EB/OL]. 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, WS. 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.



心於至善

---

