

# 电厂直接空冷系统风效应风洞模拟实验研究

顾志福<sup>1</sup>, 张文宏<sup>1</sup>, 李 辉<sup>1</sup>, 彭继业<sup>2</sup>

(1. 北京大学力学与工程科学系, 北京 100871; 2. 山西省电力勘测设计院, 山西太原 030001)

**摘要:**探讨了利用风洞模拟实验研究电厂直接空冷系统风效应应满足的相似准则和实验方法, 提出了刻画风对空冷器效率影响程度的回流率概念; 最后, 通过一个风洞模拟实验结果的实例说明了外界风速和风向对该具体布置的电厂空冷系统效率的影响规律及在对采用直接空冷系统的电厂进行初步设计前期, 结合当地风气象资料, 进行适当的风洞模拟的重要意义。

**关键词:**发电厂; 空冷系统; 冷凝器效率; 风洞模拟

中图分类号: TM62 文献标识码: A

## 1 引言

由于直接空冷凝器装置是利用周围的空气作为介质来进行冷却的, 所以, 空冷凝器周围的风环境状况必然会对空冷凝器效率和正常运行有很大影响。空冷凝器周围的风环境除了取决于当地的风气象条件外, 还与邻近的建筑物或构筑物形状和大小密切相关。另一方面, 空冷凝器的效率也与其本身支撑结构, 即支撑空冷凝器平台的柱子高度和平台四周挡风墙的高度等的技术参数有关。通常的直接空冷系统都由几十个相同的冷凝器单元组成, 每个空冷凝器单元下部都安装有大型风机, 对空气进行强迫对流。因此, 影响空冷凝器效率的因素很多, 且这些因素是相互关联的。整个问题可以说是相当复杂的, 它涉及到空气动力学、气象学和热力学中的传热传质等多学科的工程项目, 在国内还是第一次提出这样的研究课题。

由于空冷系统附近的厂房存在, 风的影响常常使冷凝器的效率大幅度下降。据国外报告, 严重时特别在夏季会迫使汽轮机停止运行。而我国西北地区又是多风区域, 因此, 在采用直接空冷系统的电厂进行初步设计时, 就十分必要进行风洞模拟实验, 结合当地的风气象资料, 确定风对空冷系统效率的影响程度, 调整工艺布局或采取其它有效措施, 以使风

的不利影响降到最低限度。

直接空冷系统技术本身完善的时间较晚, 目前国外在大型电厂能被采用的经验也不多(也可能由于商业机密的原因), 很难找到公开发表的有关学术资料和文献<sup>[1]</sup>。

本文首先探讨了对电厂直接空冷系统进行风洞模拟实验应满足的相似准则, 提出了用回流率的概念来刻画风对冷凝器效率的影响程度, 给出了相应的实验和测量方法。最后通过一个实例的风洞模拟实验结果, 说明风速和风向对该例电厂直接空冷系统效率的影响规律。

## 2 相似准则, 回流率的概念和实验、测量方法

### 2.1 相似准则

为了使风洞模型模拟实验结果能应用到实际的工程中去, 在理论上必须满足必要的相似条件或相似准则。相似准则包括必要的几何相似和动力相似, 其中动力相似由一系列无量纲参数表示。然而, 由于空冷凝器结构和运行过程两方面的复杂性以及相似参数之间的相互制约(例如雷诺数和弗罗德数), 要在风洞实验中完全模拟几乎是不可能的。所以, 本项研究必须选择几个关键的相似参数进行模拟, 而忽略一些相对次要的参数。

风工程问题的风洞模拟实验可以分为建筑物和结构物风荷载风洞模拟<sup>[2]</sup>和大气污染扩散模拟<sup>[3]</sup>两个主要方面。本课题研究可以认为是上述两方面问题的结合。参照有关经典文献, 结合本课题研究要解决的关键问题, 在风洞实验中应满足以下相似条件:

- (1) 模型的几何相似;
- (2) 来流条件(Jensen's 相似准则);

收稿日期: 2002-04-04; 修订日期: 2002-06-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10172008)

作者简介: 顾志福(1946-), 男, 江苏苏州人, 北京大学教授, 博士生导师。

- (3) 冷凝器风机排风量的动量相似;
- (4) 冷凝器进出口空气温度差产生的热力效应相似;
- (5) 风速与冷凝器热空气排出速度比相似;
- (6) 风洞实验来流风速大小的确定。

可以采用与周围空气密度不同的气体来模拟冷凝器排出空气的温度差别。这样,在实验中模拟了经冷凝器排出的具有浮力效应的热空气与周围空气对流的热交换过程,然而其热辐射过程没有得到模拟。分析比较可知,在本课题中由于对流引起的热交换要比辐射产生的热交换大许多,辐射热的影响可以忽略。

### 2.2 回流率的概念和实验、测量方法

上述提到的两类风洞实验的测量手段完全不同,如何选择一个可测量的特征量是本课题研究的关键。从空气动力学的观点来看,造成空冷凝器效率下降的主要原因是,在有风条件下位于空冷系统上游或附近的厂房形成的尾流区所致。在尾流区中,强烈倒流气流将刚从冷凝器排出的相当部分热空气又重新回流到冷凝器的进风口附近,使得作为冷却介质的冷凝器进风口的空气温度随之升高,从而降低了冷凝器的冷却效率,这是影响冷凝器冷凝效率的直接原因。所以,测量出排出热空气重新回流进风口的流量大小就能定量地刻画风对空冷系统冷凝效率的影响。

空冷系统是由一系列相同的空气冷凝器单元排列而成的,本文定义各个冷凝器单元进风口处的回流率:

$$C_{R(i)} = \frac{\text{空气冷凝器进风口含散热器排出气体体积}}{\text{冷凝器散热器排出气体体积}} \times 100\%$$

$$C_{RT} = \frac{\sum_i C_{R(i)}}{n}$$

其中:  $C_{RT}$  是整个空冷系统的总回流率。

为了在风洞实验中测量排出热空气的回流率,在每个冷凝器排气口释放模拟温度效应的示踪气体,然后在每个冷凝器进风口附近采集进风气体的样本,通过对进风口样本气体中所含示踪气体的浓度分析来计算回流率。以回流率为特征量,包括总回流率及其在各冷凝器单元上的详细分布情况,反映了在各种状态下空冷凝器受风影响的机制和程度。另外,在实验中还进行了流动显示(烟线法),有助于了解空冷系统在各种状态下产生回流率的机制和原因,并为如何采取有效措施减少风对冷凝器效率的不利影响提供帮助。

## 3 实例

### 3.1 实验设备、模型

实验是在北京大学环境中心 32 m(长)× 3 m(宽)× 2 m(高)的直流式大气边界层风洞中进行的。模型主要由锅炉房、汽机房(两者连接在一起)等主厂房和空冷凝器两部分组成。空冷系统位于汽机房一侧,其平台高度基本与汽机房屋顶相当。空冷凝器平台四周除了汽机房一侧外,都有与“A”字型散热器高度相当的挡风墙。模型与实物的几何缩尺比为 1:120,在模型的制作过程中同时还考虑到满足上述相似准则的要求。模型在实验段安装及流动显示情况如图 1 所示。



图 1 模型在实验段安装及流动显示情况  
(照片中左侧为锅炉房和汽机房,正中为空冷系统,风从左侧吹来)

### 3.2 主要结果

#### 3.2.1 风速大小对回流率的影响

按照直接空冷系统的设计,在来流风速为零时对空冷凝器的效率是没有影响的。因此,应首先研究风速大小对空冷系统的影响。选择在最不利风向角下,即风向正对主厂房时(定义为风向角  $0^\circ$ )进行不同风速的实验。本实例分别对 31 m 和 34 m 柱高的空冷系统在  $0^\circ$  风向角下进行了 8 种风速的实验,结果如图 2 所示,其中,纵坐标为总回流率,横坐标为折合到全尺寸时在离地面 10 m 标高的风速。由图中可看出,空冷系统的回流率大小与风速大小关系密切。当风速低于  $1.5 \text{ m/s}$  时,回流率很小;在较大风速下,如  $10 \text{ m/s}$  以上,不同冷凝器平台柱高的总回流率趋于一个定值。在主厂房的几何尺寸不变的情况下,冷凝器平台柱越高回流率越小。然而,不同冷凝器平台柱高在一定的风速下均会出现一个峰

值, 即回流率最大值。柱高不同, 峰值的位置也不同。

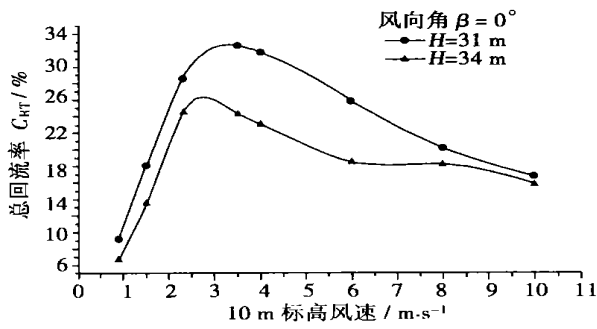


图 2 风向角 0° 时, 两种平台高度的空冷凝器排放热空气总回流率随风速大小的变化

### 3.2.2 风向角变化对回流率的影响

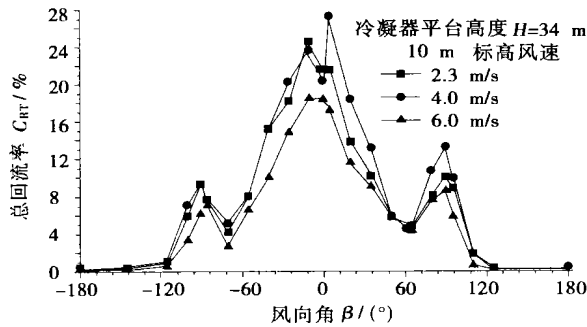


图 3 在 10m 标高来流风速为 2.3、4.0 和 6.0 m/s 时, 34m 平台高度的空冷凝器排放热空气总回流率随风向角的变化

得到风速大小对回流率的影响规律后, 选择 2.3 m/s、4 m/s 和 6 m/s 3 个特征风速进行不同风向角影响的实验。这 3 个风速分别正好是通常气象条件下发生频率较高的 2、3 和 4 级风。因此, 采用这 3 个特征风速后进行的不同风向角系统实验更能反映回流率同时受风速影响的规律。另一方面, 为了更全面反映风向角的变化对回流率的影响, 特别是为了避免遗漏可能出现的非常不利的风向角, 同时还考虑到主厂房布置不是严格对称的, 实验的风向角不局限通常气象资料确定的 16 个方位角。

本文给出空冷凝器平台在 34 m 柱高度下, 10 m 标高风速为 2.3 m/s, 4 m/s 和 6 m/s 时的总回流率  $C_{rr}$  随风向角的变化如图 3 所示。实验结果显示, 冷凝器的总体回流率大小随风向角改变变化很大, 除了当风基本上从厂房正面吹来时形成最大的回流率峰值外, 当风向角平行于汽机房和冷凝器之间的

空隙时, 也会形成一个较小的峰值。三种特征风速在不同风向角时对回流率的影响趋势基本相同。另外, 汽机房建筑外形相对空冷凝器稍微不对称性对回流率大小的影响不是很大, 回流率的变化相对于风向角对厂房和冷凝器布置的几何位置基本上对称的。

冷凝器进风口详细的回流率分布图有助于我们分析和了解其产生的机制, 也能为采取必要的措施提供指导性信息。作为例子, 图 4 分别给出了风速为 4 m/s 时, 风向正对主厂房 (风向角 0°) 和正对厂房与冷凝器间隙 (风向角 90°) 时, 31 m 冷凝器平台高度的进风口回流率分布等值线图。

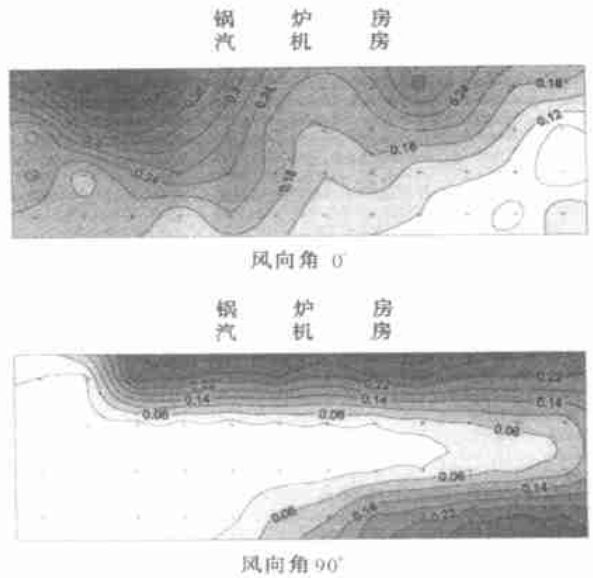


图 4 10 m 标高风速为 4 m/s 时, 风向正对主厂房 (风向角 0°) 和正对厂房与冷凝器间隙 (风向角 90°) 时, 31 m 柱高的冷凝器进风口回流率分布等值线图。

结果显示, 当风向角正对主厂房时, 整个冷凝器进风口回流率都非常大, 特别是在冷凝器进风口紧靠锅炉房背后形成了两个明显的峰值区。结合流动显示的结果可以判断这里的回流热空气除了大量来自下游外, 还主要来自冷凝器和汽机房之间的空隙。这是由于高大锅炉房形成的强烈倒流, 加上风机的强烈抽吸作用, 使得靠近锅炉房一侧冷凝器排放的热空气通过冷凝器和汽机房之间的空隙被直接卷吸下来进入到进风口, 因此造成了锅炉房背后两个局部回流率峰值区。

当风向正对汽机房和冷凝器之间的空隙 (风向角 90°) 时, 总回流率又会变大而出现另一个峰值的

主要原因是在冷凝器在靠汽机房一侧的下游部分的回流率相当大,特别是离迎风面三分之一的地方。这是由于气流在汽机房后壁墙角分离形成的剪切层产生的分离和分离泡等所造成的强烈负压所致。

#### 4 结 论

在满足一定的相似准则条件下,可以采用风洞模拟实验的方法来研究电厂空冷系统的风效应。利用示踪气体的排放、采集和浓度分析获得的在空冷器进风口回流率的数据能很好地刻画风对冷凝器效率的影响程度。一个实例的风洞实验结果表明,风速的大小对回流率有一定影响,风向角的变化对空冷器效率的影响很大。在采用空冷系统的电厂进行总图设计时应避免在当地夏季主导方向时,空冷系统处于主厂房的下风向位置。由于空冷系统和厂房的各参数不同得到的实验结果会差别很大,因

此,在设计类似电厂的初期就应该根据当地的地形地貌本电厂的不同结构和工艺布置等进行相关的风洞实验,尽量减小风对空冷系统的影响,保障电厂的正常运行。

#### 参考文献:

- [1] ZILLER C, SCHWARZKOPF D, BAIZEREIT R. Recirculation, interference and plume diffusion in power stations and the effects on the efficiency [ A ]. Larsen A. **Wind Engineering into 21st Century. Proceedings of the tenth international conference on wind engineering** [ C ]. Copenhagen, Denmark: A. A. Balkema Publishers, 1999. 819—824.
- [2] ASCE manuals and reports on engineering practice, no. 67, 1987, Wind Tunnel Model Studies of Building and Structures [ S ].
- [3] EPA—600/8—81—009, April 1981, Research and Development, Guideline for Fluid Modeling of Atmospheric Diffusion, Environmental Sciences Research Laboratory, United States Environmental Protection Agency [ S ].

(何静芳 编辑)

## 恭贺《热能动力工程》荣获

### “第二届全国期刊奖百种重点期刊”

第七〇三研究所主办的《热能动力工程》期刊,参加了2003年“第二届全国期刊奖”评选活动,荣幸地评为“第二届全国期刊奖百种重点期刊”。

国家期刊奖是国内期刊界的最高奖,能够获此殊荣,是与编委会和主办单位领导的大力支持、重视分不开;是与广大作者和读者的关注、合作分不开;特别是与审稿专家的鼎力帮助、关心分不开。在此,编辑部向支持、关心和帮助《热能动力工程》的先生们,表示最衷心的感谢。

本届国家期刊奖评选工作是以:“坚持导向,注重质量;严格标准,客观公正;滚动评比,优胜劣汰;突出重点,有所兼顾”为指导原则)在我国近9000种期刊中,推荐971种进行评选,最终评选出346种期刊为获奖期刊。

本届评选工作是我国期刊界的一件大事,是对期刊事业改革与发展成果的一次检阅,在各级领导的重视下,评选工作组织比较严密,程序比较科学合理。评选工作分四个阶段:第一阶段审读;第二阶段初评(科技期刊对推荐入围的期刊先由初审专家组按照设立的19项标准打分,取其平均分为期刊得分,同类期刊依照分值高低排出得分排序名单,再由终审专家组进行复议,最终确定入围名单);第三阶段公示;第四阶段终评。评选工作做到了公开、公正和公平,达到了评出导向、评出品牌、评出权威,评出繁荣的预期目的。

本刊作为获奖期刊,当拿到奖杯和证书的时候,我们深感荣幸,但也感到责任和压力的重大,然而光荣将成为历史,而责任将永远与之相伴。我们要努力创新,作出更大的贡献。

By using a IFA300 constant-temperature hot wire anemometer a six-sensor vortex probe was localized for the first time with the help of a three-dimensional movable coordinate stand. Meanwhile, a servomotor was used to drive its fixed base. The vorticity field at the tail section of the multi-platenlets in the foreign-made tangentially fired pulverized-coal furnace was measured by the use of a condition-sampling technique. With the multi-platenlets being assumed as thin-plate airfoils investigated were the separated vortices resulting from the combined action of spiral ascending gas flows and the flows past the thin-plate airfoils. The magnitude of the separated vortices was determined. The results of an experimental study indicate that there exist evident separated vortices at the tail section of a separated platen (front platen) and at the right half of the furnace. Furthermore, some of the separated vortices have been accompanied by other vortices assuming an opposite direction. The measurement results of velocity field and vortex field show that in the neighborhood of a right lateral wall there emerged not only a high flow speed but also a high degree of vorticity. All the above has provided a theoretical basis for the study of in-boiler pulverized-coal combustion and NO<sub>x</sub> emission control technology. **Key words:** tangentially fired furnace, multi-platenlets, spiral ascending flow, thin-plate airfoil, separated vortex, six-sensor vortex probe

六角切圆燃烧锅炉燃烧器区域煤粉粒径分布的试验研究 = **Experimental Investigation of Pulverized-coal Particle Diameter Distribution at the Burner Zone of a Hexagonal-tangentially Fired Boiler** [刊, 汉] / LI Rui-yang, ZHU Qun-yi, ZHAO Yu-xiao, QIN Yu-kun (School of Energy Science and Engineering under the Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001) // *Journal of Engineering for Thermal Energy & Power*. — 2003, 18 (2). 155—158

A cold-state model test was conducted of a 670 t/h tangentially fired pulverized-coal boiler with burners being arranged at the six corners of a furnace. The distribution of pulverized-coal particle diameter and velocity at the outlet zone of burners was studied, using a phase Doppler anemometer to make relevant measurements. Moreover, the impact of the above distribution on the slag formation on heating surfaces was analyzed. By way of comparison one can also perceive a significant alleviation of slag formation following the introduction of a larger imaginary tangential-circle diameter of secondary air fed to the top-layer burners. On the basis of the above a series of effective measures were taken to solve the boiler slugging problem. **Key words:** tangential firing with burners located at six corners, phase Doppler anemometer, particle diameter distribution, slag formation

电厂直接空冷系统风效应风洞模拟实验研究 = **Experimental Investigation of the Wind Tunnel Simulation of Wind Effects on a Directly Air-cooled System for a Power Plant** [刊, 汉] / GU Zhi-fu, ZHANG Wen-hong, LI Hui (Department of Mechanics and Engineering Science, Beijing University, Beijing, China, Post Code: 100871), PENG Ji-ye (Shanxi Provincial Electric Power Exploration and Design Institute, Taiyuan, Shanxi Province, China, Post Code: 030001) // *Journal of Engineering for Thermal Energy & Power*. — 2003, 18 (2). 159—162

The similarity criteria to be met during the wind tunnel simulation-based experimental study of the wind effects on a directly air-cooled system of a power plant are probed along with a description of the relevant experimental methods. The conception of recirculation ratio is proposed to describe the wind effect on the efficiency of an air-cooled condenser. Furthermore, by citing the wind tunnel simulation-test results of a specific case the authors explained the impact of outside wind speed and direction on the efficiency of a specifically configured air-cooled system of a power plant. In this connection it is of vital importance to conduct a pertinent wind tunnel simulation in the light of local meteorological data during the preliminary design of the directly air-cooled system of a power plant. **Key words:** power plant, air cooled system, condenser efficiency, wind tunnel simulation

非均匀布风流化床的 DEM 模拟 = **Discrete Element Method-based Simulation of a Fluidized Bed with Non-uniformly Distributed Air** [刊, 汉] / YIN Bin, ZHANG Ming-chuan, SONG Yu-bao, et al (Department of Energy Engi-