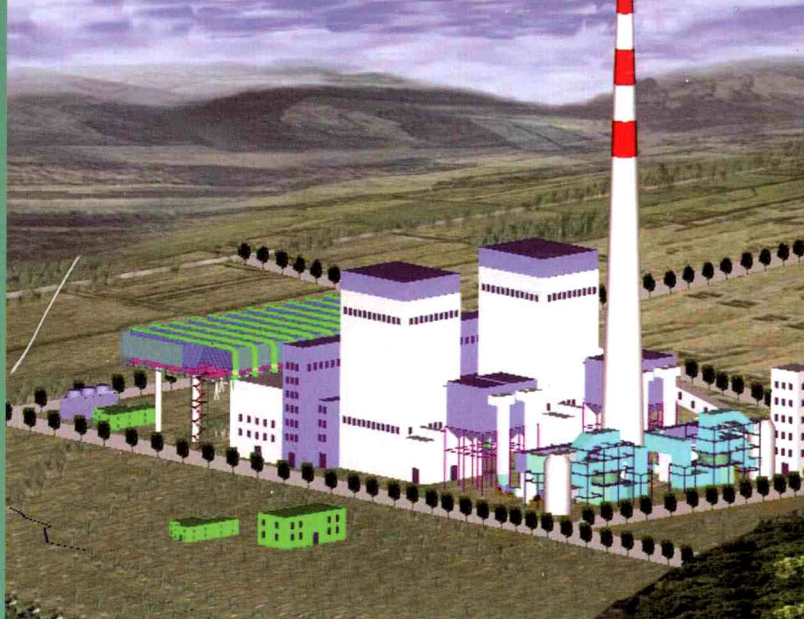
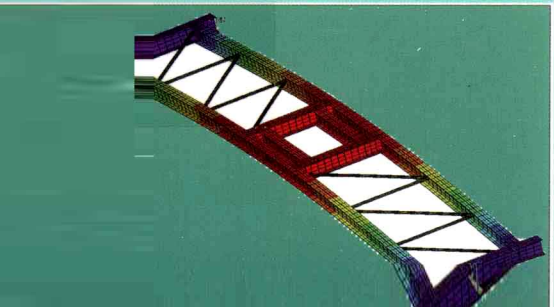
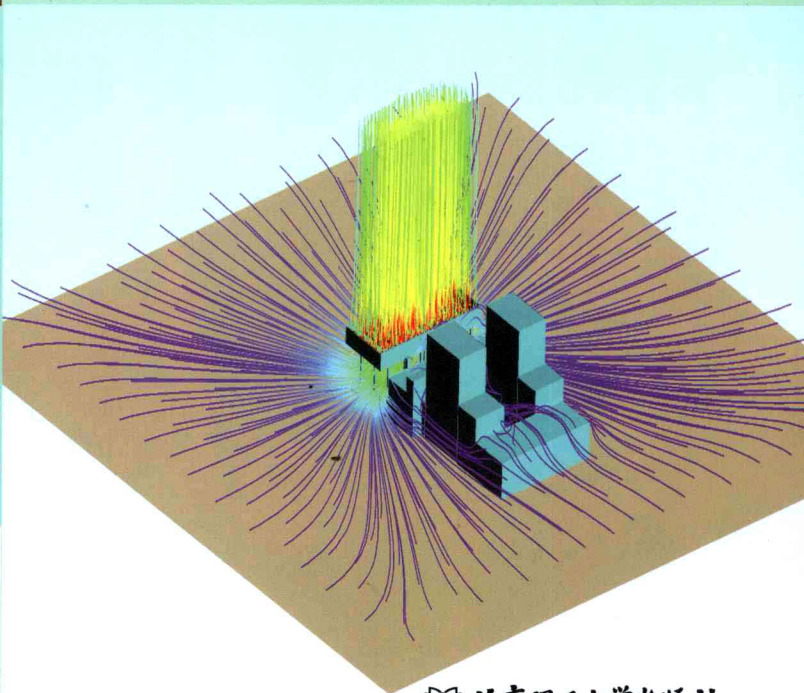
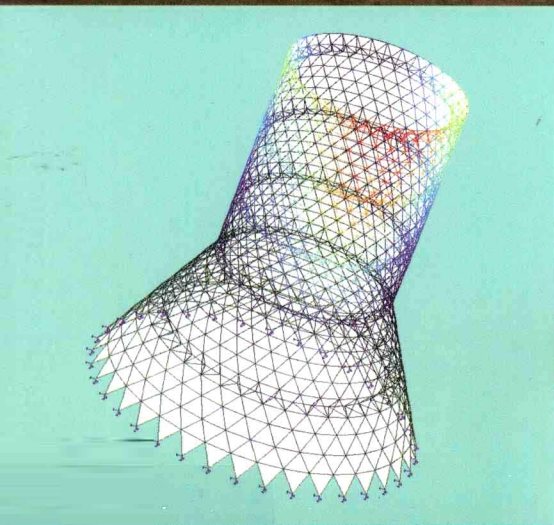




空冷技术研究 (2010 年度)

主编 胡振岭 荆云涛 刘万里



空冷技术研究

(2010 年度)

主 编	胡振岭	荆云涛	刘万里
编 委	王吉特	齐志广	冯增辉
	周顺燕	裘 新	冯 峰
	朱剑平	龚宇洋	魏家现
	曲方文	李凤满	



北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

为了对大型电站空冷系统的最新技术和发展方向进行全面的介绍,进一步提高大型电厂直接空冷成套设备自主创新及研发能力,哈尔滨空调股份有限公司暨国家电站空冷系统研发中心根据广大空冷设备用户的需求,结合2010年度研究成果,编写了《空冷技术研究(2010年度)》一书。

本书共分为8章,内容涵盖了空冷凝汽器外部流场的研究,直接空冷风机桥架振动特性的分析,钢结构干式自然通风冷却塔研究、空冷电厂厂用电系统谐波分析及仿真研究、空冷凝汽器功能描述,讲述了空冷凝汽器钢结构、排气管道施工及验收概要,并密切关注低碳产业建设的进展,对生物柴油的研究和应用进行了技术经济分析。

本书内容新颖,包含作者多年的实践经验,注重理论与实际应用的结合,力求使读者能较快理解和应用空冷系统的最新技术,把握空冷技术的发展方向,也为相关行业人员提供了可资借鉴的内容。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

空冷技术研究.2010年度 / 胡振岭,荆云涛,刘万里主编. —北京:
北京理工大学出版社,2011.3

ISBN 978-7-5640-4320-9

I. 空… II. ①胡… ②荆… ③刘… III. ①空冷冷却-技术-研究
IV. ①TK264.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第032738号

出版发行 / 北京理工大学出版社

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街5号

邮 编 / 100081

电 话 / (010)68914775(办公室) 68944990(批销中心) 68911084(读者服务部)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 保定市中国画美凯印刷有限公司

开 本 / 787毫米×1092毫米 1/16

印 张 / 8.25

字 数 / 188千字

版 次 / 2011年3月第1版 2011年3月第1次印刷

印 数 / 1~1000册

定 价 / 35.00元

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 边心超

图书出现印装质量问题,本社负责调换

国家能源电站空冷系统研发中心
哈尔滨空调股份有限公司
空冷技术研究（2010 年度）编辑委员会

主编：胡振岭 荆云涛 刘万里
编委：王吉特 齐志广 冯增辉 周顺燕
裘 新 冯 峰 朱剑平 龚宇洋
魏家现 曲方文 李凤满

序

经过改革开放 30 年来的发展，我国在各个领域都取得了长足的进步，国内生产总值以超过 9% 的速率高速增长，实现了从工业化初期向工业化中期的历史性跨越。工业发展无论是在总量上还是在技术水平上都有了极大的提高，为国民经济发展、国际地位的提升和人民生活质量的改善作出了重大贡献。然而随着工业的发展，国家对电能的需求也日益强烈。现阶段我国的能源主要依赖煤炭，因此以煤炭为燃料的火力发电站在我国的经济与社会发展中占有极为重要的地位。传统的火力发电机组采用水冷技术，需要消耗大量的水资源，而我国是一个水资源严重缺乏的国家，特别是在煤炭储量丰富的北方地区水资源严重不足，因此，能节水 75% 以上的直接空冷机组在我国北方地区被大量使用。

哈尔滨空调股份有限公司是国内最早也是最大的参与研发火力发电厂直接空冷凝汽器系统的公司，也是国家能源局首批批准的国家能源电站空冷系统研发中心。依托国家能源电站空冷系统研发中心，哈尔滨空调股份有限公司在火力发电厂直接空冷凝汽器系统方面投入大量的人力、物力、财力进行科研攻关，突破技术封锁，终于取得了一定的成就，打破了国外公司对该行业的长期垄断地位，实现了火力发电厂直接空冷凝汽器系统的国产化，并成功走向国门，在国际市场上占有一席之地。

本书内容为 2010 年国家能源电站空冷系统研发中心的部分成果汇总，本书的作者均为多年从事空冷研究的专业人员，他们基础知识扎实、实践经验丰富，希望能将自己掌握的知识全面地阐述出来与行业内的各位同仁相互交流，以期共同进步，为我国的空冷事业作出应有的贡献。



前 言

空冷技术因具有显著的节水优势，在工业领域特别是火力发电厂中已经得到了广泛的应用，为水资源匮乏地区工业的发展开辟了一条安全、经济、可持续发展的途径。哈尔滨空调股份有限公司是目前中国最大的具有空冷成套设备及系统设计、制造及研发的高科技国有上市公司，同时也是首批批准的国家能源电站空冷系统研发中心，肩负着我国空冷技术发展的重任。

本书是以火力发电厂汽轮机空冷凝汽器为基础，结合国内外技术研发情况以及实际运行中的一些问题，编写而成的一部具有较高参考价值的专业著作。它涵盖了直接空冷及间接空冷技术，包括工艺、结构、电气及控制等专业领域的内容，既体现了目前空冷技术研发趋势和新技术的应用，又能为提高空冷系统设计水平提供借鉴，同时本书也对目前最新的海藻制取生物柴油技术做了全面的论述。

本书共分8章：第1章主要对电站空冷凝汽器外部流场及其影响进行了分析；第2章主要对空冷凝汽器风机桥架的振动特性进行了全面的分析；第3章主要对钢结构干式自然通风冷却塔进行方案比较及可行性论证；第4章主要对空冷电厂厂用电系统谐波进行理论分析及软件模拟；第5章主要对直接空冷凝汽器的控制功能描述进行标准化，提出更合理更优化的设计方案；第6章主要对火力发电厂直接空冷凝汽器钢结构施工及验收所采用的规范及标准进行阐述，为结构设计及施工提供指导；第7章主要对火力发电厂直接空冷凝汽器排气管道施工及验收所采用的规范及标准进行阐述，为排气管道设计及施工提供指导；第8章主要对二氧化碳养殖海藻提炼生物柴油技术进行调研分析，对国内外最新的进展情况进行全面的阐述。

本书可以作为科研院所、工程公司等从事电站空冷技术研发及设计的技术人员的参考教材，亦可作为发电厂运行人员及技术管理人员培训的参考教材。同时，本书还可以作为高等院校相关专业的本科生、研究生拓展知识的参考用书。

本书由国家能源电站空冷系统研发中心、哈尔滨空调股份有限公司负责编写，并在3位主编和全体编委的辛勤工作下，得以顺利完成。哈尔滨空调股份有限公司北京研发处（国家能源电站空冷系统研发中心北京研发处）全体成员在编写过程中付出了大量辛勤工作，在此一并感谢。

由于时间仓促，加之作者水平有限，书中难免存在不足和疏漏之处，敬请广大读者批评指正，同时欢迎相关技术人员进行交流学习。

编 者

目 录

第 1 章 直接空冷凝汽器外部流场的研究	1
1.1 概述	1
1.2 研究内容	1
1.3 分析工具	1
1.4 主要参数及结构模型	2
1.5 研究结果	3
1.6 本章小结	17
第 2 章 直接空冷风机桥架振动特性的分析	19
2.1 概述	19
2.2 分析方法及振动荷载分析	22
2.3 国外某项目风机桥架振动特性分析	25
2.4 国内某项目风机桥架振动特性分析	35
2.5 本章小结	44
第 3 章 钢结构干式自然通风冷却塔研究	46
3.1 概述	46
3.2 可行性方案分析	47
3.3 本章小结	55
第 4 章 空冷电厂厂用电系统谐波分析及仿真研究	56
4.1 项目研究背景	56
4.2 600 MW 空冷机组厂用电典型接线	56
4.3 电能质量评估标准	58
4.4 PSCAD/EMTDC 对空冷变谐波叠加的定性仿真	59
4.5 本章小结	67
第 5 章 空冷凝汽器功能描述	68
5.1 概述	68
5.2 总描述	68
5.3 空冷凝汽器的控制系统	69
5.4 空冷系统	70
5.5 辅助系统	73
5.6 空冷系统的运行	74

5.7 汽机背压控制·····	76
5.8 空冷系统的防冻·····	76
5.9 本章小结·····	77
第6章 火力发电厂直接空冷凝汽器钢结构施工及验收概要 ·····	78
6.1 概述·····	78
6.2 结构形式·····	78
6.3 工程划分·····	81
6.4 原材料进场验收及成品进场·····	81
6.5 钢结构焊接·····	81
6.6 螺栓连接·····	84
6.7 钢构件制作·····	85
6.8 钢结构安装·····	93
6.9 本章小结·····	96
第7章 火力发电厂直接空冷凝汽器排气管道施工及验收概要 ·····	97
7.1 总则·····	97
7.2 材料·····	99
7.3 预制·····	99
7.4 组装 ·····	101
7.5 焊接 ·····	104
7.6 检查验收 ·····	105
7.7 管道试验 ·····	106
7.8 管道的吹扫 ·····	106
7.9 管道涂敷与保温 ·····	106
7.10 管道的运输包装·····	107
7.11 不合格时的一般处理·····	108
7.12 本章小结·····	108
第8章 二氧化碳养殖海藻提炼生物柴油项目调研分析 ·····	109
8.1 概述 ·····	109
8.2 微藻生产生物柴油技术介绍 ·····	109
8.3 项目的国外开展情况 ·····	115
8.4 项目的国内开展情况 ·····	116
8.5 经济分析 ·····	117

第 1 章 直接空冷凝汽器外部流场的研究

1.1 概 述

直接空冷系统以其突出的节水优势而备受关注，而且其建设周期短且相对容易，因此成为世界上大多数缺水地区电站冷却行之有效的方案。汽轮机排气通过管道引导到达由翅片管束构成的凝汽器单元阵列，再利用风机的强迫对流方式迫使空气与热交换器进行换热以实现将排气冷凝的目的。在此过程中，对气流通过冷却单元时的换热能力和流场情况的考察显得尤为重要，然而有关换热的大量计算都是建立在经验公式的基础之上，并且对换热与流场的研究通常都是分离进行的，或者单独计算换热大小，或者只研究流动规律。而在实际情况下，换热的发生在空间上是不均匀的，而且受流动的影响极大；流场中考察换热计算比较困难，特别是在空冷凝汽器中，凝汽器的尺寸较大，而翅片及间距的尺寸较小，整体细致建模并不现实，因此需要利用简化模型。

横向风场对电厂空冷岛的正常工作的影响较大。横向风不仅会影响到风机的进气量，同时还可能引起热风回流，进气量的减小以及热风回流又会导致热交换器换热能力的降低，最终影响到电厂的运行，例如，20 世纪 90 年代南非马丁巴电厂多次发生停机事故。因此，在设计空冷岛时需要综合考察当地的气象条件，特别是风速、风向等情况。本章将对横向风场的影响进行计算，考察空冷凝汽器外部流场的分布，并分析对比不同风场情况对空冷换热器换热能力的影响。

1.2 研究内容

本章主要针对国内 2×300 MW 火力发电机组直接空冷凝汽器的典型布置，对空冷岛外部流场进行分析，计算中的一些主要计算参数取自乌拉山项目。本章的主要内容包括以下两项。

(1) 对单个空冷凝汽器模块的流场及换热进行计算，与实际情况给出的参数进行对比，考察温度及压力分布。

(2) 对整个空冷平台及电厂主要建筑所在的空间建模，得到空冷凝汽器外部流场的分布，研究横向风对流场及系统散热量的影响，并分析原因。

1.3 分析工具

本章的研究基于 CFD 计算，采用了 ANSYS 中的流场分析软件 CFX。它具有丰富的物理模型，强大的用户扩展特性，较为准确的计算结果，较强的工业应用背景，其可靠性和正确性也得到了大量的工程计算以及研究报告的验证。

1.4 主要参数及结构模型

换热计算需要用到的参数取自哈空调热交换器的热力设计参数表，其中比较重要的参数包括单个模块的散热量、风机进气量、热交换器对数温差、传热系数和通过热交换器的压力下降。

按照单个冷却单元的详图，建立模型，为减小计算量，只考察一半区域，结构与网格如图 1-1 和图 1-2 所示。同时还要结合哈空调热交换器热力设计参数表的数据以及 CFX 帮助文件定义流量大小、换热系数、压降等参数。

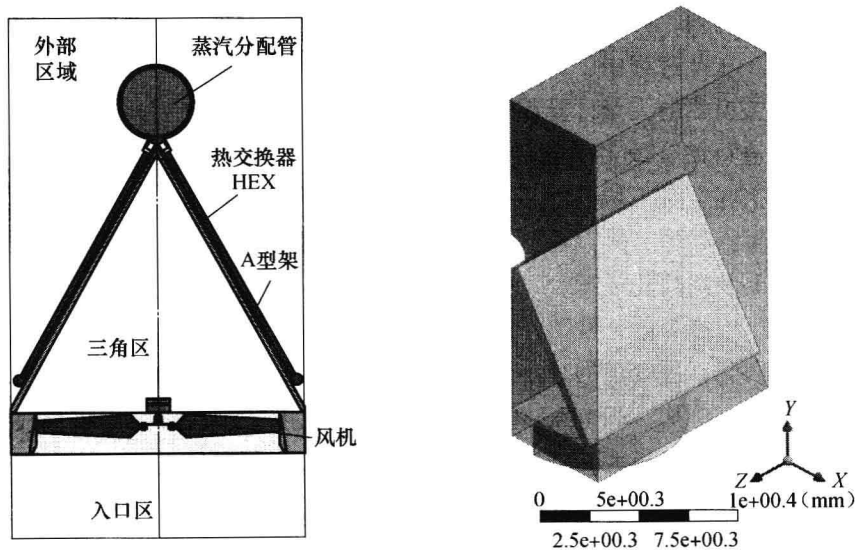


图 1-1 单个冷凝模块的结构说明与模型

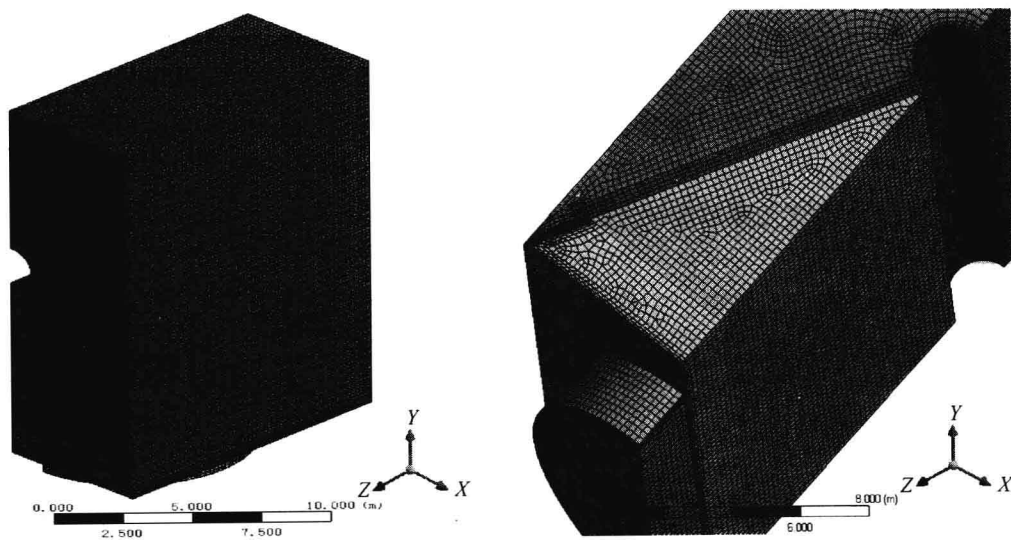


图 1-2 单个冷凝模块的网格划分（不同视角）

模拟风场影响需建立包围整个空冷岛以及周围建筑物的流场区域的模型，如图 1-3 所示，以此计算横向风场对空冷岛换热量大小的影响。风速随高度而变化，其关系式为

$$\frac{v}{v_r} = \left(\frac{z}{z_r} \right)^n$$

式中 v ——高度为 z 处的参考风速；
 v_r ——高度为 z_r 处的参考风速；
 n ——系数，通常较开阔的地区可取作 0.2。

计算时考察了从建筑物正后方吹来的（北）风的影响，包括距地面 5 m 处参考风速为 5 m/s 和 3 m/s 两种情况，参考风速 5 m/s 时的情况所对应的风速随高度的曲线关系如图 1-4 所示。由于缺乏当地详细的气象资料，本章只考察了几种典型情形，在进行具体的工程计算时，需要根据当地的详细气象资料进行详细分析。

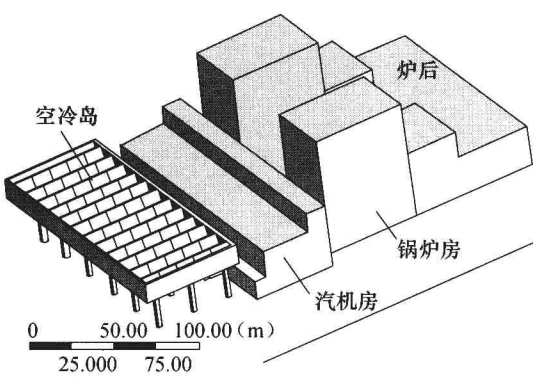


图 1-3 空冷岛及周围建筑物模型

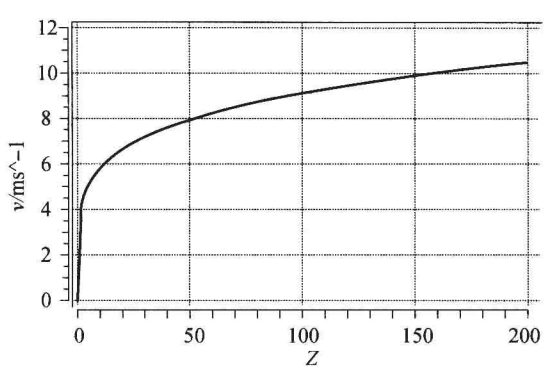


图 1-4 风速随高度变化的关系曲线

1.5 研究结果

1.5.1 对单个冷凝单元的模拟

对单个冷凝单元的流场与换热模拟，可以细致地了解到流动是如何发生的，什么部位的空气流速较低，什么部位气流温度较高，是什么原因导致了这些现象的发生。

图 1-5 显示了中截面上的压力与温度云图。由于热交换器上紧密排布的翅片的存在，流动受到阻碍，A 型架内侧压力较高，外侧压力较低。压力特性与风机的选型关系紧密，当然还包括流量大小的考虑。热交换器中压力渐变，对其两个表面的压力按流量作为权系数进行积分平均后得到的压差为 63.2 Pa，利用通过热交换器的流量除面积得到平均流速为 2.065 m/s，全场计算得到的最高温度为 336.046 K（合 62.90℃）。A 型架内侧气流温度较低，经过与 HEX 换热后温度升高，可以看出 A 型架左右两侧的温度较高，特别是在图 1-6 中比较明显。从图 1-7 则能看出两个角区的流体流速较低，因此驻留时间长，换热使得空气温度升高更多，图 1-8、图 1-9 显示了 HEX 出口及入口的截面速度和温度云图。当然这并不意味着这些角区的换热量较大，换热量等于气体吸收热量，从公式 $Q = \rho S v c_p \Delta t$ （ ρ 为密度， S 为面积， v 为气流速度， c_p 为等压热容， Δt 为温差）可以看出其数值的大小主要取决

于气流速度和温差, 尽管这部分区域气流温度较高, 但是流速较低, 也正因为流速较低才使得换热充分而温度升高较多。图 1-10 给出了中截面上的速度矢量, 其方向符合一般的物理规律, 计算得到的单元换热量为 14.75 MW。

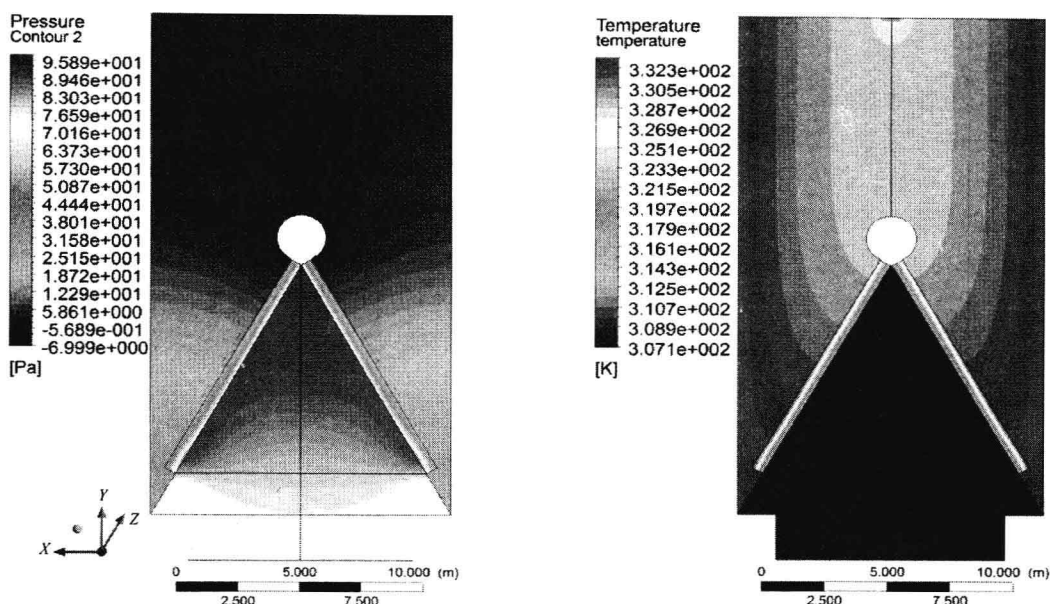


图 1-5 单个单元中截面压力与温度云图

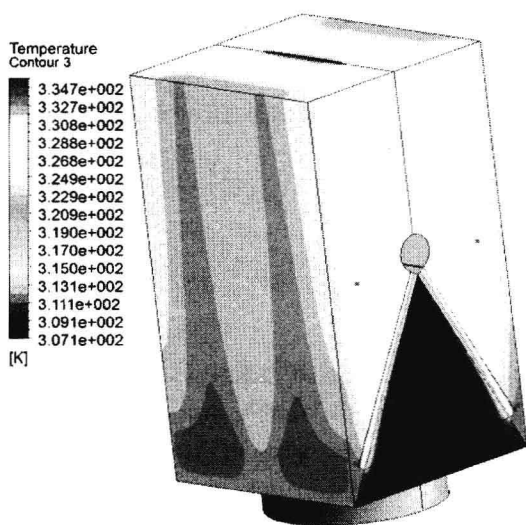


图 1-6 模型空间周围温度云图

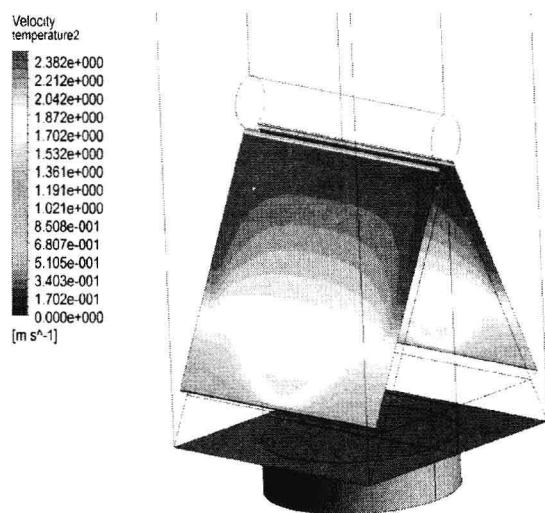


图 1-7 HEX 出口截面气流速度大小

从图 1-11 所示的流线可以看出 A 型架内侧的 4 个角区存在涡的流动结构, 其流体来自于风机壁面附近, 流量有限, 换热量也不大。参与冷凝的空气主体基本上略为外扩后就流向 HEX 进行换热。

从压差和流速以及最高温度、速度矢量、换热量、流线等结果可以看出, 该模拟能准确反映实际情况, 描述流动现象, 计算换热大小。同时通过该模拟还能比较直观地了解单元所在空间中的特殊流动现象, 揭示导致这些现象的原因。

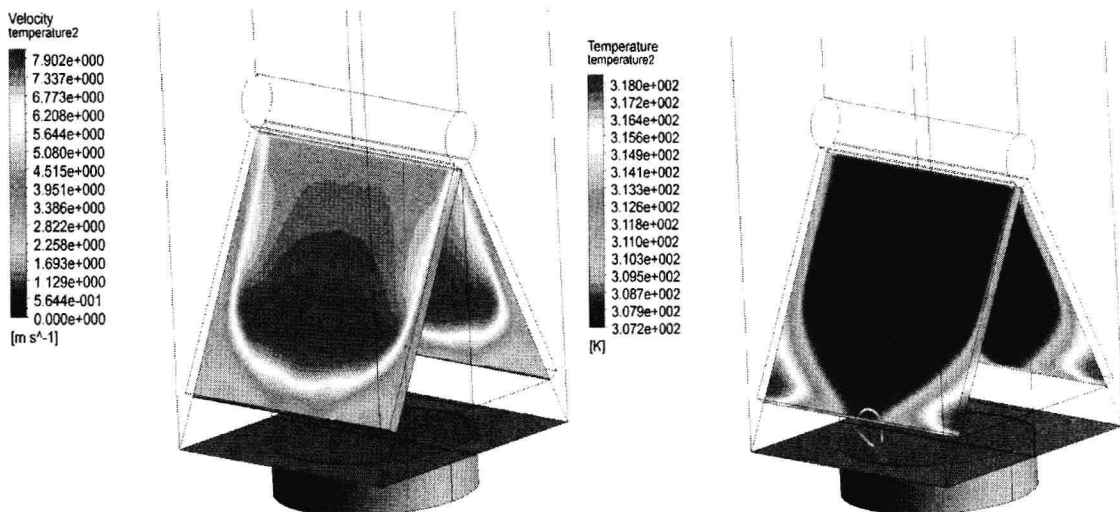


图 1-8 HEX 入口截面速度及温度云图

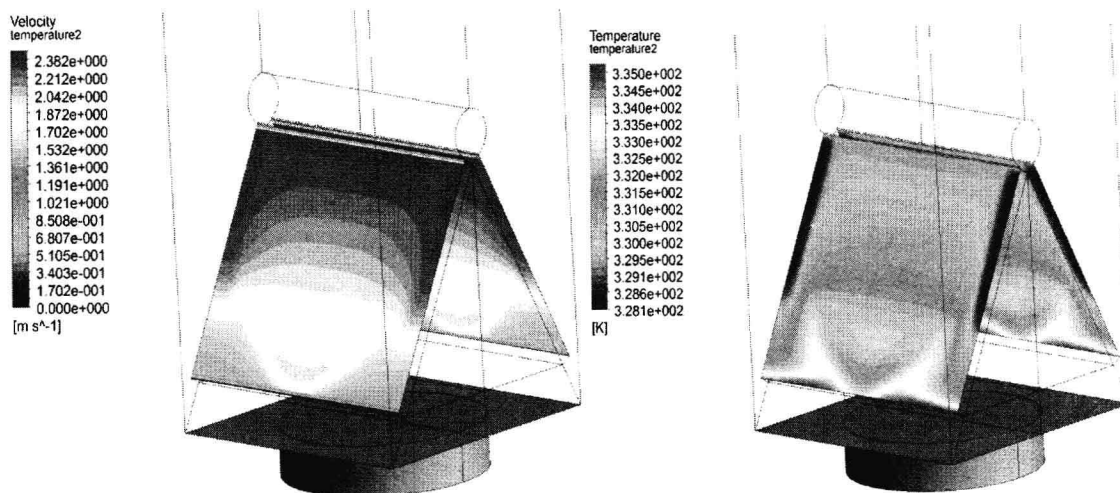


图 1-9 HEX 出口截面速度及温度云图

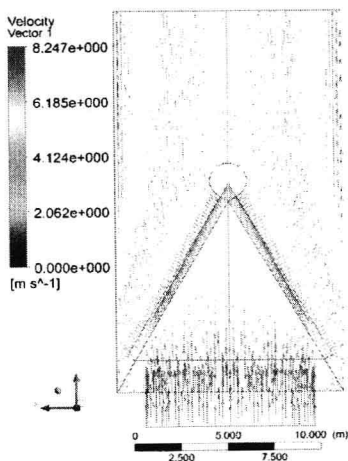


图 1-10 单个单元中截面速度矢量

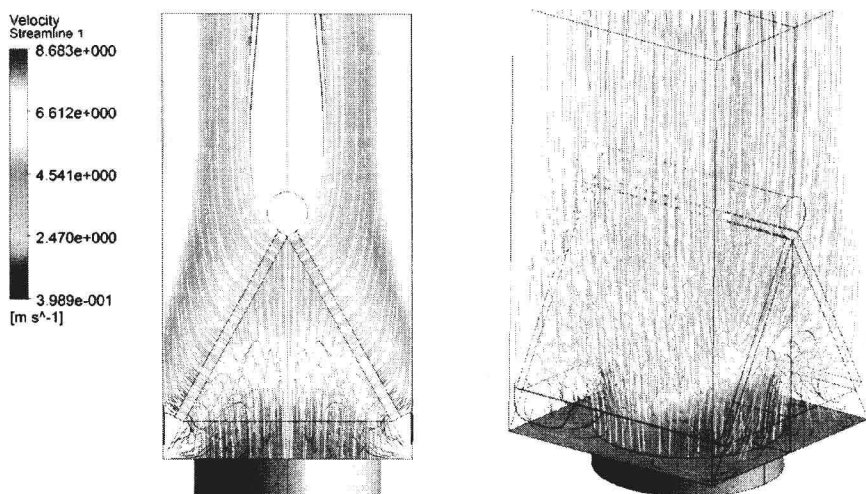


图 1-11 单个单元模块空间流线

1.5.2 环境横向风场对系统冷却的影响

直接空冷凝汽器开机运行时,其冷却能力受到环境风场的影响较大,在特殊条件下甚至会出现电厂跳闸停运的现象。横向风场对空冷岛的影响比较复杂,特别是综合考虑换热计算的情况。总体上横向风场通过改变冷凝空气流量以及热风回流这两种方式发生作用,特别是大规模的热风回流现象,这是空冷凝汽器的设计所要竭力避免的。本节通过考察风机进气温 度、进气流量,计算换热大小,综合考察温度场、静压场、流线,分析热风回流的情况及影响。将计算得到的结果进行切面显示,所取平面如图 1-12 所示。

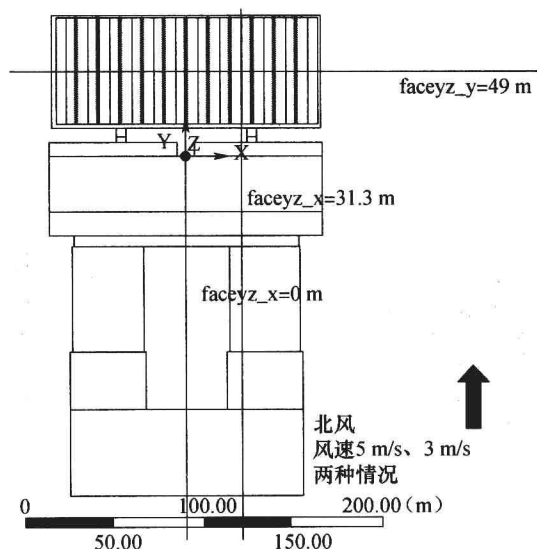


图 1-12 云图显示所在平面的位置示意

1. 无风条件下的流场及换热

无横向风条件下计算得到风机进气平面温度云图,如图 1-13 所示。可以看出圆形的风

机进口处气流温度较低 (307.15 K 即为环境温度的 34℃), 虽然局部区域有 310 K (约 37℃), 但并没处在圆形进气口范围内, 由此可以判断无热风回流发生。由图 1-14 所示风机进口平面速度云图可以判断除图示下方一侧 (靠近汽机房) 之外, 其余 3 侧边缘附近冷却单元的进气速度略高, 流量稍大, 靠近中心的冷凝单元进气量较小。无风条件下中截面静压云图如图 1-15、图 1-16 所示。

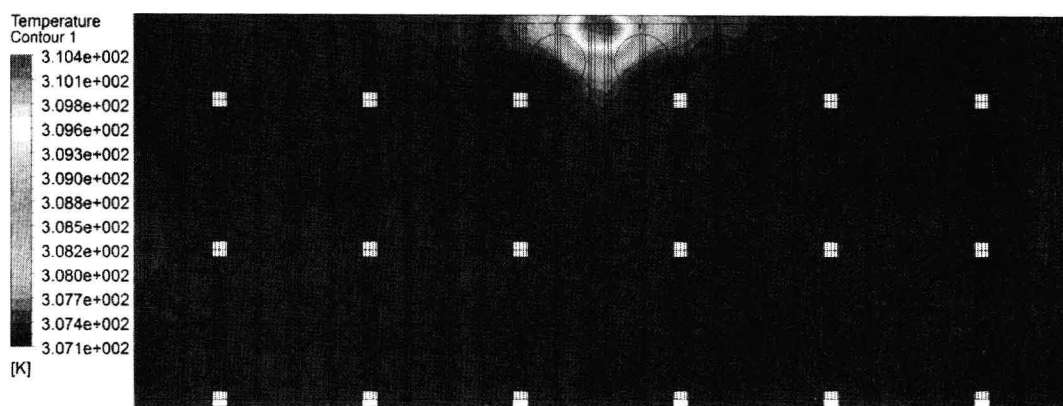


图 1-13 无风条件风机进口平面静温云图

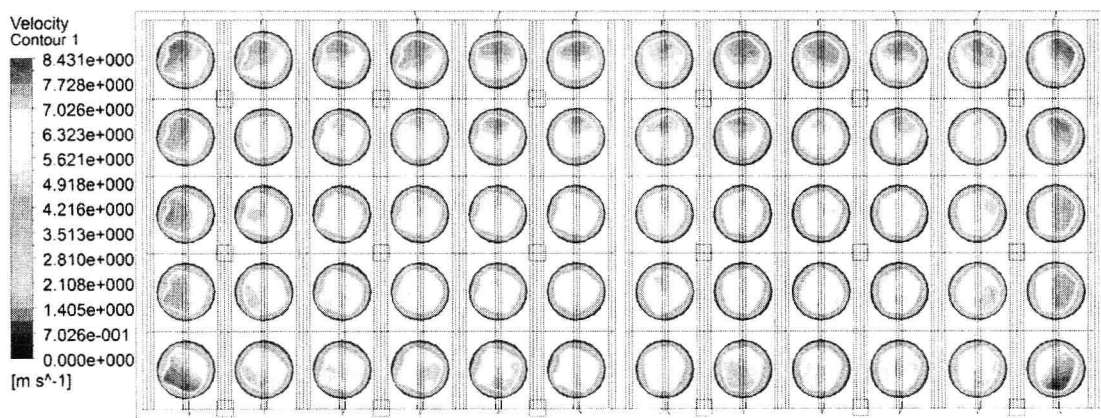


图 1-14 无风条件风机进口平面速度云图

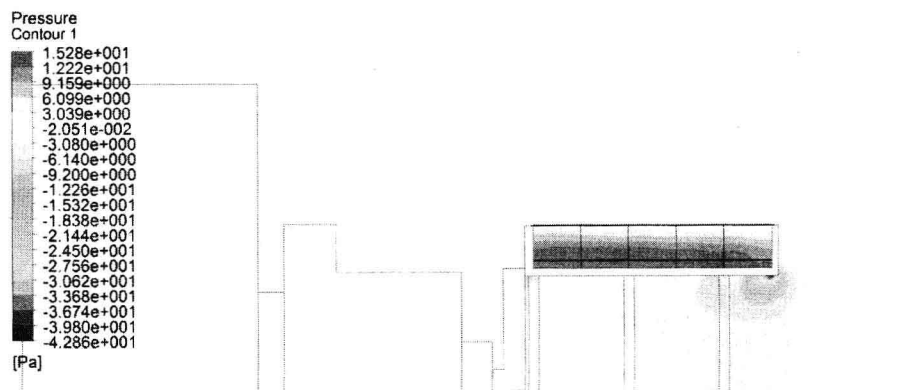


图 1-15 无风条件 faceyz_x = 0 m 平面 (中截面) 静压云图

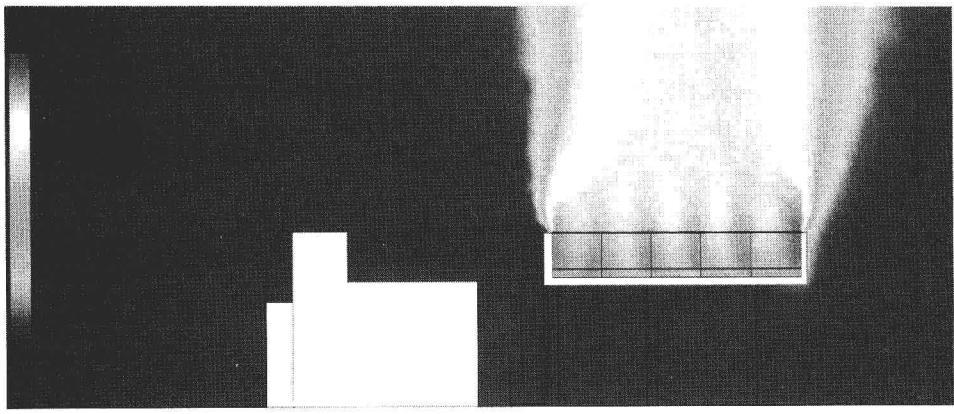


图 1-16 无风条件 faceyz_x = 0 m 平面 (中截面) 静温云图

图 1-17 显示了其外部流场流线, 由于挡风墙的存在, 没有出现热风回流。尽管汽机房与锅炉房等附属结构干扰了外部流场, 但其余 3 侧的进气足以满足冷凝器的设计要求。计算得到总的散热量为 807 MW, 平均每个单元为 13.45 MW。一些其他结果如图 1-18 ~ 图 1-23 所示。

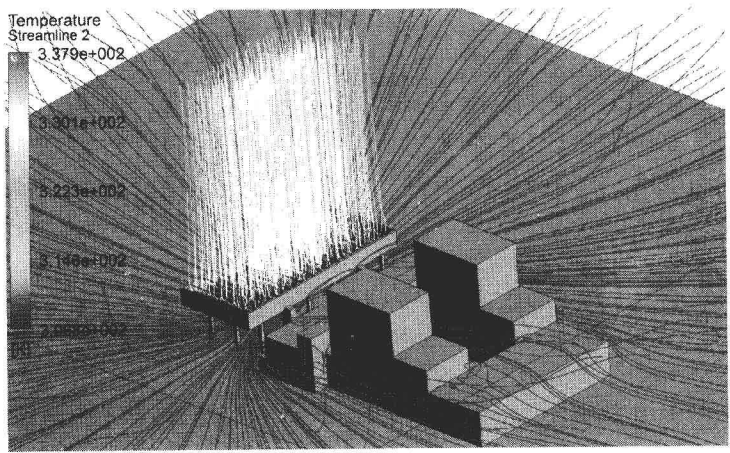


图 1-17 无风条件下空冷岛流场流线

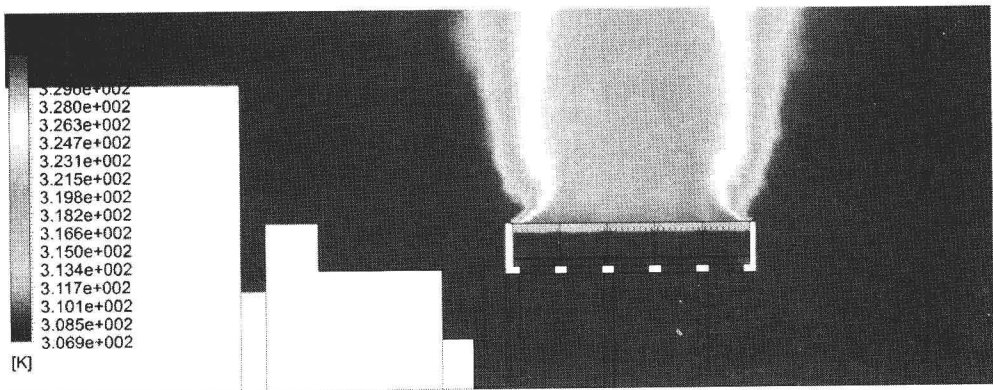


图 1-18 无风条件 faceyz_x = 31.3 m 平面静压云图

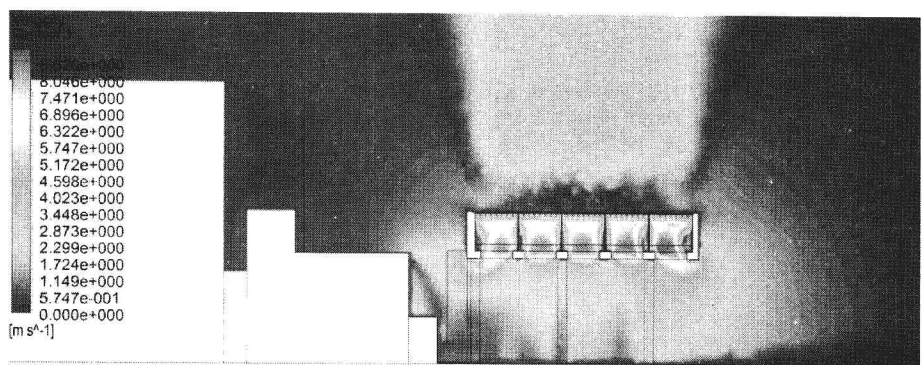


图 1-19 无风条件 faceyz_x = 31.3 m 平面速度云图

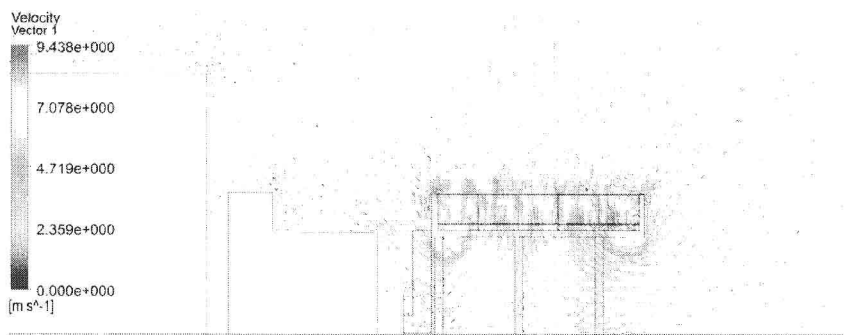


图 1-20 无风条件 faceyz_x = 31.3 m 平面速度矢量

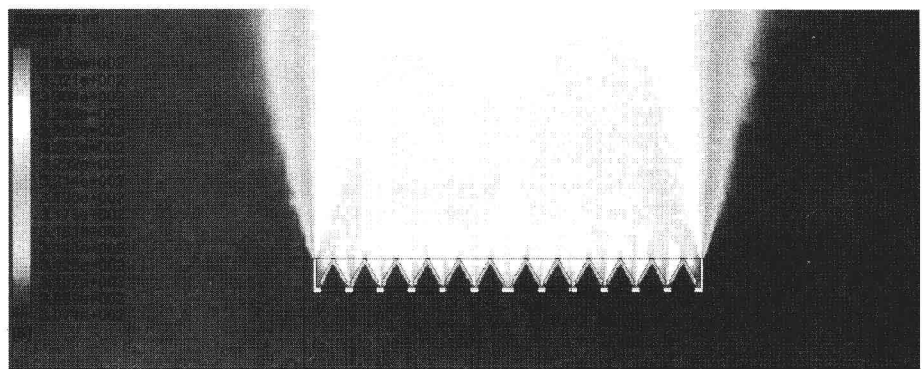


图 1-21 无风条件 facexz_y = 49 m 平面静温云图

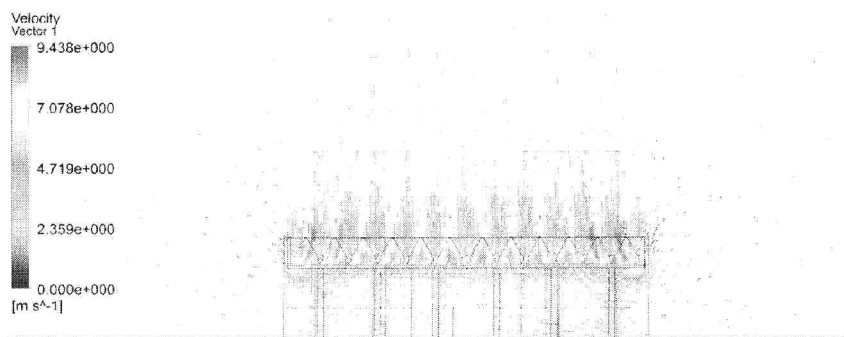


图 1-22 无风条件 facexz_y = 49 m 平面速度矢量