

发电厂直接空冷系统

散热特性研究

赵万里 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

发电厂直接空冷系统 散热特性研究

赵万里 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书主要从发电厂直接空冷系统散热特性的研究背景、国内外研究现状、目前存在的问题出发,论述了热回流及其对散热效果的影响,研究了环境风对塔下热回流的影响、空冷塔几何尺寸对塔下热回流的影响,并将试验与数值模拟结果进行比较,得出的结论对提高直接空冷系统的散热效果具有理论指导意义和工程价值。

本书内容系统、全面、新颖、实用,可作为高等院校能源动力类专业教学、科研的参考书,也可作为相关科研院所、火电行业等研究人员的技术参考与培训用书。

图书在版编目(CIP)数据

发电厂直接空冷系统散热特性研究 / 赵万里著. --
北京:中国水利水电出版社, 2015.6
ISBN 978-7-5170-3347-9

I. ①发… II. ①赵… III. ①发电厂—空气冷却—散
热—研究 IV. ①TM621.7

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第148686号

书 名	发电厂直接空冷系统散热特性研究
作 者	赵万里 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京嘉恒彩色印刷有限责任公司
规 格	170mm×240mm 16开本 10印张 149千字
版 次	2015年6月第1版 2015年6月第1次印刷
印 数	0001—1500册
定 价	48.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

当自然风吹过空冷塔时,气流在塔顶发生分离,在空冷塔的背风面形成巨大的漩涡;在漩涡结构的边缘,从空冷散热器排出的热气在强烈的紊动剪切和混合作用下重新回到空冷塔的进风口,形成热回流。影响热回流的主要因素有:环境因素、空冷塔几何尺寸因素、风机因素等,这些因素相互联系,涉及空气动力学、气象学以及传热学等多门学科。

本书通过理论分析证明了在空气比热不变的条件下,基于体积流率定义的热回流率和基于温差比值定义的热回流率是统一的;并针对简化的空冷散热器外形,建立了无风条件下热回流率与各影响因素之间的定量关系。

通过研究发现流动控制具有较大的潜力和发展前景,本书对此进行了详细阐述,希望引起更多专家和学者的注意,并进行研究和应用。

本书是在华北水利水电大学青年科技创新人才项目及水利部黄河泥沙重点实验室开放课题基金(2015006)的支持下完成的,在此表示感谢。

本书的试验工作是在北京航空航天大学进行的,刘杰硕士、朱健勇硕士、王亚平博士均参与了试验和应用研究,在此对他们的辛勤工作表示感谢。

本书的编写得到华北水利水电学院高传昌教授和王玲花教授的鼓励,并对研究给予了大力支持和指导,同时,也得到了孙东坡教授、王二平教授、陈建副教授、薛海副教授、王鹏涛讲师、张晓雷讲师、

张先起副教授、宋永军副教授、张羽副教授的帮助，在此一并表示诚挚的感谢。

本书的目的在于抛砖引玉，对于相关的研究，期待有更加成熟的见解，由于作者水平有限，书中疏漏之处在所难免，敬请读者批评指正。

作者

2014年12月

主要符号表

符号	含 义	符号	含 义
A_p	原型翅片管束迎风面积	H_E	基于蒸汽分配管中心高程的挡风墙高度
A_m	模型翅片管束迎风面积		
ACC	空冷凝汽器	H_p	挡风墙高度施工值
ACHE	空冷换热器	H_1	基于蒸汽分配管顶部高程的挡风墙高度
B	加宽平台的宽度		
C_p	空气比热	H_w	挡风墙高度
D_N	风机直径	H_{wm}	挡风墙高度最大值
e_r	空冷散热器散热效率	K	速度比
Eu	欧拉数	k	比例系数
ΣF	气流流经散热器各部件总的流动损失	L	空冷平台长度, 加长平台长度
		L_{he}	翅片管束长度
Fr	弗劳德数	L_F	跨距
Fr_D	密度弗劳德数	L_s	两蒸汽分配管之间水平距离
g	重力加速度	L_w	走廊宽度
g_i	重力加速度分量	m	进入塔下总的质量流量
h	翅片管束某点高度	m_a	冷空气质量流量
Δh	挡风墙增加高度	m_r	回流热空气质量流量
H	空冷平台高度	W	空冷平台宽度
H_r	回流高度	W_i	风机做功
H_b	基于蒸汽分配管底部高程的挡风墙高度	N	风机单元数
		N_p	风机功率
H_c	挡风墙高度计算值	n	风机转速
H_d	挡风墙高度设计值	n_p	原型风机转速

续表

符号	含 义	符号	含 义
n_m	模型风机转速	v_j	两蒸汽分配管出口平均风速
P	压强	v_o	翅片迎面风速
P_1	总压	v_m	模型风机轴向速度
q	风机流量	v_p	原型风机轴向速度
Q_r	热回流时的传热量	v_{rp}	原型风机周向速度
Q	没有热回流时的传热量	v_{rm}	模型风机周向速度
R'	无风条件下回流率值	w	挡风墙宽度
R	有风条件下回流率值	λ	比尺
$\bar{R}$	平均回流率	λ_L	几何比尺
Re	雷诺数	λ_ρ	密度比尺
Re_c	临界雷诺数	λ_N	功率比尺
S_i	斯特劳哈数	λ_q	流量比尺
T_i	空冷散热器入口平均温度	λ_p	压力比尺
T_o	翅片管束出口平均温度	λ_v	速度比尺
ΔT	温度差	α	幂指数, 夹角
ρ_i	空冷散热器入口气体密度	β	风向角
ρ_o	空冷散热器出口气体密度	η	效率
ρ_a	环境大气的密度	σ	标准差
u_m	10m 标高点的风速	Δ	测量随即不确定度
u	流体质点速度	θ	翅片管束顶角
v_a	环境来流风速	ν	运动黏滞系数
v_i	进入空冷塔下气流平均风速	z_m	10m 标高点的参考高度

目 录

前言

主要符号表

第1章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 国内外研究现状	3
1.2.1 直接空冷系统在各国的的发展	3
1.2.2 影响热回流的主要因素	6
1.2.3 环境风对空冷系统塔下热回流的影响研究	7
1.2.4 几何尺寸对塔下热回流的研究	8
1.2.5 大直径轴流冷却风机	9
1.2.6 降低热回流以提高空冷散热器的散热特性	11
1.2.7 空冷塔下热回流及热态流场的研究方法	12
1.3 存在的问题	15
1.4 研究内容	16
第2章 热回流及其对散热效果的影响	18
2.1 热回流的危害	18
2.2 热回流产生的原因	20
2.2.1 热回流受环境风影响的原因	20
2.2.2 空冷塔几何尺寸对热回流的影响	21
2.2.3 风机性能对热回流的影响	21
2.3 热回流的评价方法	22
2.4 影响热回流的主要因素及热回流对背压、散热效率 的影响	24
2.4.1 热回流的理论分析	25
2.4.2 热回流对背压的影响	30

2.4.3 热回流对散热器散热效率的影响	33
2.5 本章小结	34
第3章 环境风对塔下热回流的影响试验研究	36
3.1 研究方法	36
3.2 试验模型及主要设备	36
3.2.1 试验模型及系统	36
3.2.2 试验热循环系统	40
3.2.3 PIV 系统及其布置	41
3.2.4 主要设备	45
3.3 试验条件及相似参数	48
3.3.1 地面梯度风的相似	50
3.3.2 模型几何相似	51
3.3.3 空冷凝汽器的相似	51
3.3.4 速度比相似	51
3.3.5 动力相似准则	51
3.3.6 空冷散热器进出口温差产生的热浮力效应相似	52
3.3.7 主要测量参数	52
3.4 试验误差分析	54
3.5 风速比的变化对塔下温度场和回流率的影响	55
3.5.1 风速比对塔下温度场的影响	55
3.5.2 风速比对塔下回流率的影响	60
3.6 密度弗劳德数对塔下温度场和热回流的影响	62
3.6.1 密度弗劳德数对塔下温度场的影响	63
3.6.2 密度弗劳德数对塔下热回流的影响	67
3.7 风向角的变化对塔下温度场和热回流的影响	68
3.7.1 风向角的变化对塔下温度场的影响	68
3.7.2 风向角的变化对塔下热回流的影响	85
3.8 风机流量的变化对塔下温度场分布和热回流的影响	86
3.8.1 风机流量的变化对塔下温度场的影响	86
3.8.2 风机流量的变化对塔下热回流的影响	86
3.9 本章小结	87

第4章 空冷塔几何尺寸对塔下热回流影响的试验研究	88
4.1 加高挡风墙对塔下温度场与热回流以及对热态流场的影响	89
4.1.1 加高挡风墙对塔下温度场的影响	89
4.1.2 加高挡风墙对塔下热回流的影响	94
4.1.3 加高挡风墙对空冷塔流场的影响	95
4.2 加宽、加长空冷平台对塔下温度场、热回流以及对热态流场的影响	97
4.2.1 加宽空冷平台对塔下温度场的影响	97
4.2.2 加宽空冷平台对塔下热回流的影响	102
4.2.3 加宽空冷平台对流态的影响	104
4.3 挡风墙高度的选择	106
4.4 本章小结	109
第5章 试验与数值模拟结果的比较	111
5.1 数值模型及数值方法	111
5.1.1 模型的建立	111
5.1.2 网格划分	112
5.1.3 边界条件	112
5.1.4 控制方程及湍流模型	114
5.1.5 数值求解方法	116
5.2 数值计算结果分析	117
5.2.1 风速比对空冷塔下热风回流的影响	117
5.2.2 不同风向角对空冷塔下热回流的影响	118
5.3 试验结果与数值模拟结果的比较及分析	120
5.3.1 空冷塔前后流场与温度场分布	120
5.3.2 风速比的变化对塔下热回流的影响	128
5.3.3 同一风速下, 风向角的变化对塔下热回流的影响	128
5.3.4 增加空冷平台上部四周风墙的高度	130
5.3.5 增加空冷风机转速	134
5.4 本章小结	136

第1章 绪 论

1.1 研究背景

随着电力工业的迅速发展，火力发电厂中的大容量高参数汽轮发电机组不断增加，这些机组在燃用大量煤炭的同时，也耗用大量水资源。电力工业的发展迅速，建设规模、规划布局本应与国民经济的发展相适应，但由于受到煤和水资源的制约而不能合理安排。在富煤地区，往往由于缺水而不能就地兴建发电厂，因此丰富的煤炭资源不能尽早开发与利用，这在宏观经济上无疑是极大的损失。发电厂汽轮机凝汽系统采用空气冷却系统（简称发电厂空冷系统），就是为了解决在“富煤缺水”地区或干旱地区建设火力发电厂而逐步发展起来的^[1-3]。空冷系统的应用和发展为在严重缺水地区的煤矿和电力负荷中心区域建设大型火力发电厂开辟了一条经济、安全、可靠的途径；也为在水资源丰富区域保持生态平衡、避免江河水资源污染创造了有利的条件。

直接空冷系统如图 1.1 所示，主要包括：排气管道、空冷凝汽器（管束——风机）和冲洗系统。直接空冷凝汽器工作原理为：将在蒸汽轮机低压缸内做功后的乏汽从汽轮机尾部引入大口径蒸汽管道，输送至汽轮机房外的空冷平台上，进而经各配汽管送至数量众多的翅片管换热管束内；空气流在轴流风机的驱动下，穿过翅片管束的翅片^[4-9]间隙，从而将翅片管束内的蒸汽凝结为凝结水，凝结水由凝结管收集起来，在重力作用下回流至凝结水箱。再由凝结水泵升压，送往汽机的热力系统，去完成下一个热力循环。

与间接空冷相比，直接空冷系统不仅具有设备少、系统简单、防冻性能好等优点，还具有以下优点^[1-3,10-19]。

(1) 可以大量节水。在水冷凝汽器发电机组中，耗水量的 80%

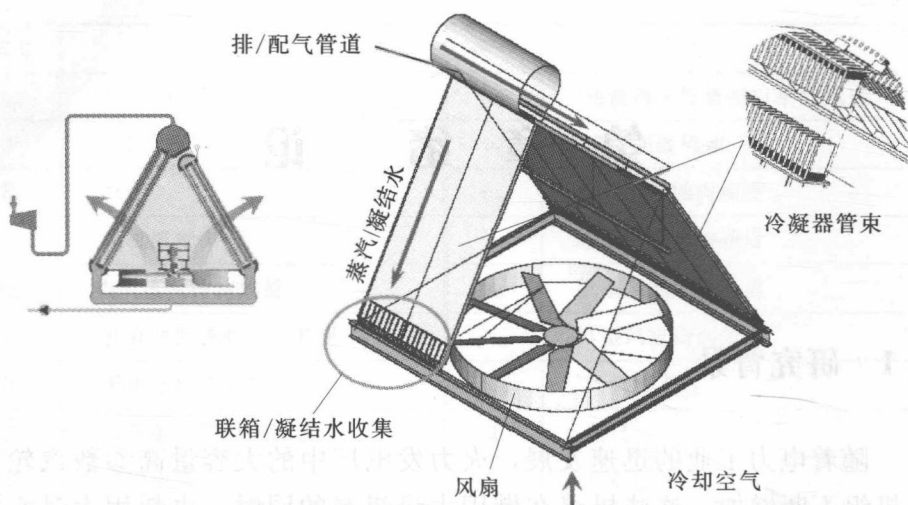


图 1.1 空冷凝汽器示意图

~85%以上是在冷却塔中蒸发掉的。直接空冷凝汽器采用空气直接冷却，省去了作为中间冷却介质的水。1 台 600MW 机组的节水量在 700~800t/h，这是直接空冷机组最大的优势。

(2) 通过优化设计，减少了空冷系统的占地面积。在水冷凝汽器系统，循环冷却水塔和循环水泵房要单独占用一定的建设用地。采用直接空冷系统，通过优化设计，可以将上述用地全部省掉。比如，将直接空冷凝汽器安装到汽轮机厂房房顶，或者安放在汽轮机厂房 A 列外电器设备的上面，可以使机组总占地面积减少。

(3) 由于汽轮机排出的蒸汽与空气直接换热，省去了中间介质和二次换热，综合换热效率提高。

(4) 具有较高的社会效益和与水冷凝汽器机组可比的经济性。在水源充足的地方建设水冷式凝汽器电厂时，考虑到尽量获得最高的经济效益，使用水冷凝汽器当然是最佳的选择。然而，随着水源的日益紧张和水价的不断提高，以及环保要求的日益尖锐，使用直接空冷凝汽器也是一条必由之路。尽管直接空冷机组造价不菲，运行热耗率高、自耗能大，但在靠近煤矿而贫水的地方建设电厂，用于空冷的额外费用可能要比把大量的煤炭运输到水源充足地方所需的费用还要少，而且还可以大量节水。

(5) 运行方式方便。因为直接空冷凝汽器系统分为几个单元,且均装有隔离阀,所以设备出现问题时关闭隔离阀可以安全地将故障设备与运行系统隔离;又因为每个单元分成若干组管束,每个管束配一台冷却风机,风机可以无级变频,所以运行时可以通过降低风机转速和停运风机等方法,调节某一单元和某一组管束的负荷,控制其凝结水的过冷度和汽轮机背压。

然而直接空冷系统的主要装置——空冷凝汽器暴露在空气中,冷却介质为风机鼓入的冷空气。空冷凝汽器设计环境风速不超过 3m/s ,此时空冷凝汽器排出的热空气在热浮力作用下扩散到大气中。然而实际运行过程中在不同天气情况下,大气温度、环境来流风速和风向也不相同,特别是当环境来流风速大于 6m/s 时,从空冷凝汽器排出的热空气在炉后来流的作用下,重新回到空冷塔下,这些热空气被风机吸入,从而形成了“热回流”或“热风再循环”,热回流的产生提高了空冷凝汽器进口温度,导致空冷凝汽器的冷却能力下降,甚至造成停机^[4,21-29]。因此,弄清楚环境风速和风向对塔下热回流的影响,揭示空冷塔周围流场的变化与塔下热回流之间的关系,对于降低塔下热回流,提高夏季空冷凝汽器散热效果具有重大的工程应用价值。同时冷却风机是大直径、低压头、高风量的小轮毂比的轴流式鼓风机,风机叶尖风速高,因此风机性能也是业界关心的问题。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 直接空冷系统在各国的发展

发电厂空冷技术从提出到现在,约有 90 年的历史,并在国际上有了迅速发展。

1920 年,由德国 GEA 公司的哈帕博士 (Dr. Happel) 发明了直接空冷技术,并成功地应用于工业生产;德国早在 1939 年就在缺水的鲁尔矿区建成了世界上第一个 1.5MW 汽轮机组的直接空冷系统,此系统目前仍然在运行;20 世纪 50 年代,卢森堡的杜德兰格钢厂自备电站 13MW 机组和意大利的罗马电厂 36MW 机组分别投入了直接

空冷系统。1961 年,德国 GEA 公司为德国大众汽车公司建造了 $4 \times 48\text{MW}$ 直接空冷发电厂;1978 年 GEA 为美国怀俄明州 Wyodak 电站(图 1.2)建造了单机容量为 365MW 的直接空冷发电厂,开创了当时直接空冷系统应用于大型火力发电机组的先例,并且该厂至今保持着世界空冷凝汽器系统正常运行的极端天气条件记录($-44 \sim 42^\circ\text{C}$, 风速 36m/s);1991 年,南非 Matimba(图 1.3) $6 \times 665\text{MW}$ 直接空冷电厂建成竣工,也是当今世界上直接空冷系统整厂装机最大的直接空冷电厂;1994 年,南非马珠巴电厂 $3 \times 665\text{MW}$ 直接空冷电厂建成投产,并运行发电^[3]。目前,全世界已有 1000 多台不同容量的空冷发电机组在运行,单机最大容量已达 690MW 。

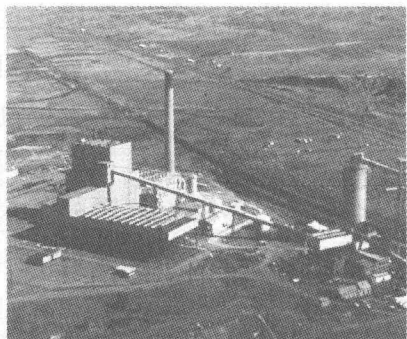


图 1.2 美国怀俄明州 Wyodak 电站

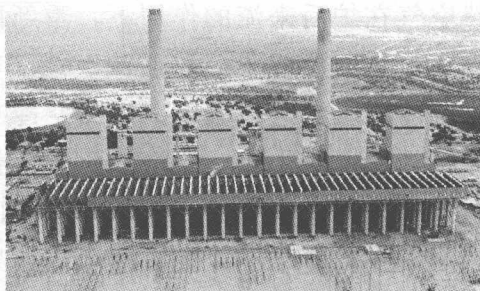


图 1.3 南非 Matimba 电厂 $6 \times 665\text{MW}$ 直接空冷电厂

直接空冷系统在国外实施多年,有关机构已进行了若干数值模拟和风效应的模拟试验。然而关于直接空冷系统特别是空冷凝汽器各部件具体参数的优化设计,以及影响空冷凝汽器主要运行参数的模型试验和数值计算,可能出于商业机密和知识产权的原因,很少有关于直接空冷系统数值计算和风洞试验的论文和资料公开发表^[16,18-19],以至于造成国际上两大空冷制造商(德国 GEA 公司、美国 SPX 公司)几乎垄断全球空冷市场的局面。国外相关的试验研究仅有在 1999 年丹麦哥本哈根召开的第十届国际风工程会议上由德国的 Dieter Schwarzkopf 博士等发表的一篇论文^[30],该论文所引的文献也仅限于作者本人的博士论文等内容的报告。对直接空冷(ACC)系统进行数值模拟,C G Du Toit、C G Tharit、D G Kroger^[31]、Martin P、Van Standen、Leon

Pretorius and Josua P Meyer^[32-33]采用商业软件对南非马廷巴直接空冷电站进行了数值模拟研究,模拟环境条件及对ACC系统性能产生效果的数值模型的开发研究情况,取得较好的模拟结果。

大型电站直接空冷系统在我国应用较晚,我国的空冷技术研究工作始于20世纪60年代中期;自20世纪80年代末,我国先后建成并投产了8台间接空冷机组,而大容量空冷机组的建设只是近几年的事。山西大同第二发电厂的 $2\times 200\text{MW}$ 空冷机组相继于1987年、1988年投产,两台机组均采用引进的匈牙利海勒式空冷系统,与国产汽轮发电机组配套使用,投产以来,运行稳定、节水效果显著^[14]。在各方面取得了一些经验的基础上,2001年9月,我国自己设计、制造和安装的国内首台空冷机组(单机容量6MW),在山西交城义望铁合金厂自备电厂建成投产。2002年1月,大同大唐国际云冈热电厂 $2\times 200\text{MW}$ 扩建工程引进德国双排管直接空冷技术,并于2003年12月成功投入运行(图1.4),这是我国最早的直接空冷机组,当年发电小时数达7000h。2005年4月、7月国电电力大同发电有限责任公司7号、8号机组(600MW)顺利投产发电,成为我国首个600MW等级直接空冷电厂(图1.5),被国家发展和改革委员会列为节水示范项目,对山西省和京津唐地区的经济建设发挥了积极作用。2005年9月和12月,内蒙古大唐托克托三期 $2\times 600\text{MW}$ 直接空冷机组也成功投入运行。



图 1.4 大唐国际云冈热电厂
 $2\times 200\text{MW}$ 直接空冷机组

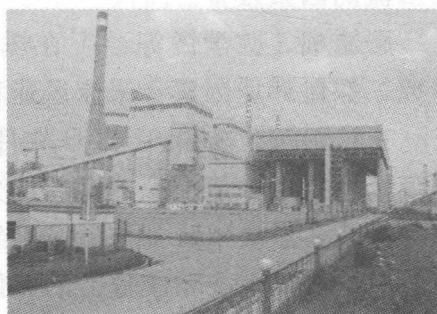


图 1.5 国电电力大同发电有限责任
公司第二发电厂 $2\times 600\text{MW}$
直接空冷机组



尽管我国的空冷技术起步较晚,但是经过几代空冷工作者多年的摸索和总结,也具有一定的空冷设计能力;而且科研部门也对空冷系统进行了相应的研究,取得了很多成绩。目前,北京大学、华北电力大学、北京航空航天大学等对直接空冷系统进行了相应的数值模拟研究,采用CFD计算软件,计算空冷塔周围的流场。国内对直接空冷系统进行风洞模型试验公开发表的有北京大学顾志福等^[34-37],他们在环境风洞中模拟大气边界层,对缩比模型进行吹风试验。采用密度较轻的甲烷来模拟热空气,在不同来流速度和方向的条件下,测量空冷塔下各测点甲烷的浓度来计算回流的大小,同时在风洞中做流场显示试验,检验空冷凝汽器受风速影响机理。马义伟^[38-39]对空冷系统热风再回流及横向风的关系进行了分析。赵文升、王松龄等^[40-41]利用CFD软件,对大型电站空冷系统的流场和温度场进行了数值模拟,定性地分析了热回流发生的原因及对空冷机组的影响。段会申、刘沛清等^[42-44]采用FLUENT软件对大同二电厂直接空冷系统进行数值模拟研究,得出空冷塔周围流场与温度场与环境风的关系。

1.2.2 影响热回流的主要因素

由于空冷凝汽器的强迫对流换热是一个在环境风作用下产生的复杂分离尾流场中的强迫对流换热现象,涉及热气流与分离漩涡流的相互作用与干扰以及在风机抽吸作用下产生的热回流现象。因此,影响热回流的因素很多。

顾志福、陈学锐等^[34-37]在风洞中对直接空冷系统进行模型试验研究,探讨环境因素(来流风速和风向)对塔下热回流的影响。赵文升、王松龄等^[40-41]利用CFD软件通过对大型电站空冷系统的流场和温度场进行的数值模拟,定性地分析了热回流发生的原因及对空冷机组的影响。段会申、刘沛清等^[42-44]采用FLUENT软件通过对大同第二发电厂直接空冷系统进行的数值模拟研究,探讨了环境因素对空冷塔周围流场与温度场的关系。C G Du Toit、D G Kroger^[45-46]采用简化空冷散热器,对二维机械通风换热器的热回流问题进行理论分析,在无风条件下,建立起空冷塔几何参数与热回流之间的关系,最后对机械通风塔进行数值模拟,全面了解机械通风换热器的流场和相关的