

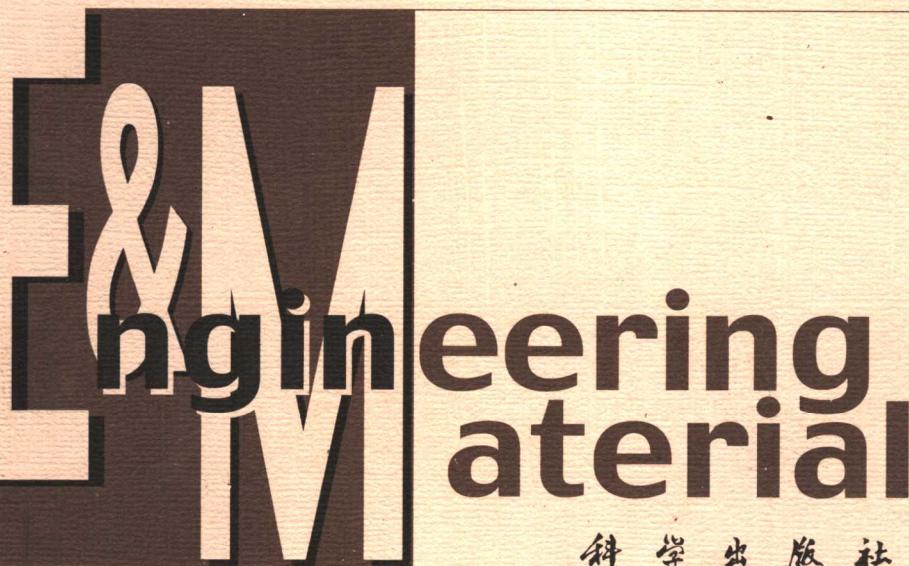


国家自然科学基金研究专著
NATIONAL NATURAL SCIENCE FOUNDATION OF CHINA



炉内火焰可视化 检测原理与技术

周怀春 著





国家自然科学基金研究专著
NATIONAL NATURAL SCIENCE FOUNDATION OF CHINA



炉内火焰可视化 检测原理与技术

周怀春 著

科学出版社

内 容 简 介

本书系统地总结了作者 10 年来的相关研究工作以及国内外同行的研究成果,将高温火焰辐射图像探测器作为炉膛燃烧火焰辐射能二维传感器,结合弥散介质辐射传热及其逆分析、光电信号及图像处理、病态问题求解、热工学、信号分析等多学科的理论 and 知识,阐述了大型炉内三维燃烧温度场和燃烧工况可视化的原理和技术。本书理论联系实际,主题鲜明,结构紧凑,内容丰富,对推动我国先进燃烧过程检测技术的研究和开发,加快大型电站锅炉、工业锅炉和工业窑炉等一次能源消耗大户的三维燃烧工况实时监控技术升级换代,提高一次能源利用率和相关工业产品的质量,降低污染物排放,具有重要的科学意义和应用价值。

本书的主要读者包括高等学校热能与动力工程和工程热物理专业教师 and 研究生、本科生,电力科研院所、火力发电厂、电力高科技公司等的相关专业的研究人员 and 工程技术人员,以及冶金、建材、化工等行业的热能工程及炉窑热工监测与控制专业技术人员。

图书在版编目(CIP)数据

炉内火焰可视化检测原理与技术/周怀春著. —北京:科学出版社,2005
ISBN 7-03-014898-3

I. 炉… II. 周… III. 火焰熔化炉-火焰-检测 IV. TQ038.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 004189 号

责任编辑:陈文芳 童安齐 / 责任校对:柏连海
责任印制:吕春珉 / 封面设计:陈敬

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新蕾印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2005 年 4 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2005 年 4 月第一次印刷 印张:22 插页:8 而

印数:1—1 500 字数:500 000

定价:49.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换(环伟))

前 言

我于1993年完成的博士学位论文中,即开始涉及炉内火焰检测的研究。1994年我开始博士后研究工作,当年就作为负责人获得国家自然科学基金项目的资助(项目名称:煤粉燃烧过程稳定性动态分析及其诊断,项目编号59476026),同时承担甘肃省电力试验研究所科研合作项目,开始致力于炉内火焰图像处理燃烧监控的研究工作。1996年,我再次获得国家自然科学基金资助项目(项目名称:煤粉炉膛燃烧三维瞬态温度分布重建,项目编号59606007),将研究重点集中在采用火焰辐射图像处理技术实现炉内三维燃烧温度场分布可视化的理论和方法上。2001年,在炉内三维可视化监测技术基本成型的条件下,我第三次获得国家自然科学基金的资助(项目名称:低氮氧化物排放燃烧优化控制新方法研究,项目编号50176056),以控制炉内三维温度水平及其分布作为控制氮氧化物生成途径。1999年,我主持国家教育部重点科技项目(项目名称:大型电站燃煤锅炉炉内辐射传热逆问题研究及其可视化),获得了国家教育部首届青年教师教学和科研奖励计划的支持;2001年,我主持国家科技部科技型中小企业技术创新基金项目(项目名称:采用炉膛火焰图像处理技术的新一代燃烧监控系统),继续在国家部委项目的支持下进行燃烧火焰图像处理检测技术的研究和开发。在同一时期,我相继承担湖南、湖北省电力局科技合作项目,还有武汉钢电股份有限公司、湖北省青山热电厂、河南姚孟发电有限责任公司、广东电力发展有限公司沙角A发电厂等单位的科研合作项目,使得我不断有机会和条件把理论研究和实际应用结合起来,相互促进,在采用火焰辐射图像处理技术实现炉内燃烧三维可视化方面进行系统性的、理论结合实践的艰苦研究和探索。10年来,获得了四项国家发明专利,该方向研究在国内外发表论文40多篇,其中SCI收录10篇,EI收录20篇,火焰图像处理研究方面的论文被国内外引用超过100次。2004年3月,我作为负责人和武汉钢电股份有限公司联合完成的《670t/h电站燃煤锅炉炉内三维温度场实时监测及燃烧优化研究》项目,通过由湖北省科技厅组织的专家鉴定,以哈尔滨工业大学秦裕琨院士为主任委员的专家委员会鉴定认为“本项目具有重要的创新性,在用辐射图像处理方法测量炉内三维温度场分布方面达到国际领先水平”,相关研究成果已获得2004年度湖北省科技成果二等奖。2004年7月25日至7月31日,我参加在美国芝加哥举行的第30届国际燃烧会议,宣读有关炉内三维燃烧温度场可视化试验研究的论文,论文已被收入到已出版的“Proceedings of the Combustion Institute”(2005, Vol. 30)中。在这个时期,国内外在基于火焰辐射图像处理的燃烧检测和诊断方面开展了活跃的研究,同行的成果为此方向研究的初步系统化起到了不可或

缺的作用,我也从中汲取了丰富的营养。至此,我感到,采用火焰辐射图像处理技术进行炉内三维温度分布可视化监测的理论已经基本系统化,其技术已在应用中得到成功的证明。因此,出版一部专著,对此进行系统性的总结,为国内外同行进一步深入开展此方向的研究提供参考,为这项技术在实践中的应用提供理论指导,时机已经成熟,而且十分必要。

本书视角独特,将火焰图像监视装置作为炉膛燃烧火焰辐射能二维传感器,在国内外首次系统地研究了基于辐射成像检测的炉膛燃烧二维、三维温度场可视化方法,并在此基础上提出了一种以优化炉内三维温度场分布为中间目标的燃烧优化控制方法。在写作上,既深入浅出,又不连篇累牍地重复已有知识,重点对新原理、新方法进行阐述;既有理论上严谨的求证,又包含着解决实际问题所采取的合理的简化;既包含知识的表述,更强调知识的有效利用和科学的研究方法。

本书是一部学科交叉的学术专著。在本书涉及的光电图像处理、辐射传热、逆问题求解、燃烧测量、燃烧监控等方面,国内外均有很多著作出版。但本书不是不同学科知识的简单拼凑,而是进一步的融合和升华。例如,一般图像处理虽然需要定量分析图像的明暗对比,但没有对其进行热辐射能量的计量分析。红外测温技术虽然利用热辐射进行温度测量,但缺乏对容积辐射对象三维空间温度场的解析能力。辐射传热研究中,国际上还没有见到将其与成像技术紧密结合的相关专著,也没有获得具有高精度方向分辨能力的辐射传递方程求解方法。燃烧测量方面,至今也没有在炉膛三维温度场实时检测技术上取得突破。本书在以上相关学科方向均有创新。本书作者曾参与《煤粉燃烧》(韩才元、徐明厚、周怀春、邱建荣著,科学出版社,2001年版)的撰写,其中第十、十一两章的内容是本书的基础;与之相比,本书无论在深度、系统性上均有明显的提高。

理论紧密结合实际也是本书的特点之一。为了实现炉膛三维温度场可视化,本书在辐射成像过程分析方面进行了一系列理论探讨,如辐射逆问题分析、辐射能成像计算、辐射温度成像模型、病态问题的 Tikhonov 正则化求解算法等。理论问题探讨的步步深入,使得存在严重困难的炉膛燃烧三维温度场可视化的实际问题得到了越来越可行的解决,最后创立了一项新颖的技术。在应用先进的理论解决生产实际的关键技术问题、提出具有原创性价值的技术方面,本书力图体现严谨求实的科学研究态度。希望本书的出版能推动我国燃烧检测技术水平的提高,加快锅炉和工业窑炉的监控技术升级换代,提高一次能源的利用率。同时,也希望它对内燃机、燃气轮机、火箭等更大范围的工业和国防领域的燃烧过程中的高温辐射传递问题研究,对卫星大气遥感、海洋探测、导弹红外预警等领域基于辐射图像检测的辐射传递问题逆分析的研究起到一定的参考作用。

在本书完稿之际,我首先感谢国家自然科学基金委员会对本方向研究工作的持续支持。从1994到2004年的10年间,我三度获得国家自然科学基金项目的支持,不断坚定了我在国内深入开展研究、做出高水平成果的信念,本书包含的研究

成果中有近一半是我在国家自然科学基金资助项目的直接支持下取得的。国家科教兴国的战略体现在对科技教育事业越来越切实有力的投入和支持,本书研究成果的取得也得到了国家教育部和科技部有关奖励和科技计划的直接支持。与此同时,我的研究工作也得到了国内科教和电力工业战线许多前辈师长和同仁的热情鼓励和大力支持。1993年,甘肃省电力试验研究所总工邓元凯博士支持我开展基于火焰图像处理的燃烧检测和诊断研究工作,10万元的科研项目使我开始理论结合实践的探索之旅。当时,江汉石油管理局王传祥高工在我起步的初期给予我有力的支持和鼓励。1997年,南京中电电力有限公司的陆厚平总裁立项支持我开展炉内三维温度场检测的研究。1999年和2000年,在湖南省电力试验研究所袁日秋所长等、湖北省电力公司许萍高工等的大力支持下,湖南省、湖北省电力公司分别立项支持本方向科研工作。2001年和2002年,河南姚孟发电有限责任公司的薛益鸣副总经理等,武汉钢电股份有限公司吕传新总经理、裴振林副总经理、黄本元副总经理等大力支持在各自公司的300MW、200MW燃煤机组上开展炉内燃烧温度场可视化监测和燃烧优化的研究工作,项目经费均在百万元左右。湖北青山热电厂李前锋副厂长、刘尧平总工等支持我的课题组在该厂进行过多次燃烧火焰图像处理现场试验工作。2003年,广东电力发展股份有限公司领导以及沙角A发电厂吴吕斌副厂长等支持立项开展燃烧三维可视化诊断及机组负荷控制新技术研究项目,项目经费160万元,是广东电力发展股份有限公司当年最大的科研项目。华中科技大学产业集团公司王延觉总经理、向才旺副总经理积极支持我进行学研产结合的实践,我在学校产业集团控股的武汉华工大创能科技有限责任公司担任兼职总经理的2000年至2004年间,在各方面的大力支持下,使火焰图像处理燃烧监控技术的产品化初步实现。在学术界,浙江大学岑可法院士,清华大学徐旭常院士,周力行教授,哈尔滨工业大学秦裕琨院士,东南大学徐益谦教授,上海交通大学章明川教授,海军工程大学杜先之教授、孙丰瑞教授,武汉大学唐必光教授等国内学术界前辈对我的研究工作没有停止过他们的热情支持和鼓励。在此,特向他们表示诚挚的谢意!

我从1981年起一直在华中科技大学(原华中工学院、华中理工大学)能源与动力工程学院(原动力工程系)煤燃烧国家重点实验室学习、工作,给我教诲和启发的老师很多,其中包括杨叔子院士、马毓义教授、翦天聪教授、韩才元教授、韩守木教授、郑楚光教授、孙学信教授、吴季兰教授、张家琛教授、黄素逸教授、林志杰教授、曾汉才教授、刘德昌教授、刘华堂副教授等。需要特别提及我攻读博士学位时的导师、现在海南大学的韩才元教授,韩老师豁达的胸襟、活跃的学术思想给了我宽松的学习环境和氛围,教育了我创新研究的思维方法,锻炼了我的独立研究能力。原华中理工大学校长杨叔子院士在我博士毕业后热情接纳我到机械工程博士后流动站从事博士后研究工作。博士后出站后我一直在煤燃烧国家重点实验室工作,实验室竞争向上的氛围令我不敢丝毫懈怠,我的成长离不开实验室的支持。感谢实验室

所有同事。与刘伟教授、黄树红教授、高伟教授、陆继东教授、徐明厚教授、邱建荣教授、陈汉平教授、陈刚教授、丘纪华教授等的共事充满启迪和相互支持。1997年在我开始指导研究生后,研究生们刻苦努力地学习、工作,为本书研究成果的积累做出了重要贡献。特别是我直接指导毕业的第一个博士盛锋、第二个博士韩曙东,他们完成了本书重要的前期基础研究工作,祝贺他们因此获得湖北省优秀博士学位论文奖。我直接指导毕业的第三个博士张师帅完成了采用辐射能信号控制燃烧和机组负荷的初步研究工作,也因此而获得湖南省科技进步奖。另外,我指导毕业的硕士程浩斌、李军、原萍、贾涛、游君、侯玉波、刘浩、李莉、吴峰、杨超、何其伟、李锦、王大伟、曾佳、姜志伟、田国银、万新福在燃烧检测和控制方面的工作也构成了本书的素材。在我目前指导的研究生中,博士生程强(第二章),艾育华(第三章),姜志伟(第四章),娄春(第五至八章),李言钦(第九章),罗自学、王浙芬、杨超(第十章)分别进行了资料搜集、整理以及初稿的准备工作。这些学生,以及其他没有提及的工作,为本书最后完成起了很大作用,在此我也向他们表示衷心的感谢。

感谢我在湖北仙桃农村的父母、还有我的爱人雷玉姣女士和亲朋好友对我的工作给予的理解与支持。因太投入于工作,我对孩子的学习和生活没有尽到一个父亲的责任,但愿这本书能带给他们精神上的鼓舞与激励。

本书的出版得到了华中科技大学研究生教育改革基金、国家自然科学基金研究成果专著出版基金的支持,在此表示特别的谢意。

热切期待广大读者对本书提出宝贵的批评、意见与建议。我的电子邮箱是: hczhou@mail. hust. edu. cn。

周怀春

2004年11月27日

于华中科技大学

主要符号表

拉丁字母符号

A	系数矩阵, m^2
A	面积
a	黑度
B	蓝色分量
B	燃料量, t/h
b	细度系数
C	横截面
C_0	黑体辐射系数, $5.6703, W/(m^2 \cdot K^4)$
C_1	补偿系数, m^{-3} 或者 m^{-2}
C_K	条件数
C_p	气体比热, $J/(kg \cdot K)$
c	声速, m/s
c	颗粒间距, m
c_1	第一辐射常数, $3.741832 \times 10^8 W \cdot \mu m^4/m^2$
c_2	第二辐射常数, $1.4388 \times 10^4 \mu m \cdot K$
D	正则化矩阵
D	燃烧控制对象系数矩阵
D	颗粒直径, μm
D	距离, m
D_{32}	Sauter 平均直径, μm
E	辐射能向量
E	辐射力, W/m^2
E	辐射能, W
E_R	辐射能信号, W/m^2
E_λ	单色辐射力, $W/(m^2 \cdot \mu m)$
F	换热面积, m^2
F_R	炉内燃烧率, MW
f	频率, Hz
f_e	有效角系数

f_v	颗粒容积负荷
G	颗粒体积流量, m^3/s
G	质量流速, kg/s
G	入射辐射, W/m^2
G	绿色分量
G	图像灰度
g	绿色色度坐标
H	光像的发射照度, lx
I	辐射强度向量
I	单位矩阵
I	辐射强度, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$
J	雅克比矩阵元素
K	系数矩阵
K_e	辐射衰减系数, m^{-1}
k	比例系数
k_λ	单色吸收因子
L	长度, m
l	长度, m
M	摩尔质量, kg/mol
m	颗粒光学常数
N_s	颗粒数密度, m^{-3}
N_E	发电功率, MW
n	法向矢量
n	均匀性指数
n	折射率
$P(\cdot)$	概率
P	方位角坐标下的散射相函数
P_T	汽轮机前主蒸汽压力, MPa
p	压力, Pa
Q	能量, W
$\dot{Q}$	介质内辐射热源, W/m^3
q	辐射热流, W/m^2
R	正交矩阵
R	颗粒半径, μm
R	0~1 之间均匀分布的随机数

R	红色分量
R	残差
R_0	8314, 普适气体常数, $\text{J}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$
R_d	READ 数
R_D	粒径大于 D 的颗粒所占的比率
R_d^d	直接能量份额, $1/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$
R_d^i	间接能量份额, $1/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$
R_d^s	散射能量份额, $1/\text{m}^3$
$\boldsymbol{r}$	位置矢量
r	红色色度坐标
r	体积比率
$\boldsymbol{S}$	三维温度场的输出向量
S	源函数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$
S	待测光的光谱功率分布, $1/\text{nm}$
$\boldsymbol{s}$	(入射)方向矢量
$\boldsymbol{s}'$	散射方向矢量
s	距离, m
$\boldsymbol{T}$	温度向量, 其元素为绝对温度的四次方
T	绝对温度, K
t	时间, s
t_λ	光谱透射率
U	控制输入变量
U	信号电压, V
$\boldsymbol{u}$	未知参数向量
u	速度, m/s
V	体积, m^3
$\boldsymbol{v}$	速度矢量
v	速度绝对值, m/s
w_m	离散坐标(DO)法的离散积分集的权值
$\boldsymbol{X}$	物理坐标系, $[\boldsymbol{X} \ \boldsymbol{Y} \ \boldsymbol{Z}]^T$
X_i	组分 i 的质量分数
$\boldsymbol{x}$	照相机坐标系, $[\boldsymbol{x} \ \boldsymbol{y} \ \boldsymbol{z}]^T$
x	水冷壁角系数
Y_i	出射辐射强度测量值, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$
$\boldsymbol{Z}$	未知向量

希腊字母符号

α	孔径角,rad
α	正则化参数
α	光谱吸收率
β	辐射衰减系数, m^{-1}
β'	等效衰减系数, m^{-1}
ε	发射率
ϕ	角度,rad
γ	比热比
γ	结渣系数
κ_a	吸收系数, m^{-1}
λ	波长, μm
μ	方向余弦
μ_T	汽轮机调门开度指令
μ_B	锅炉燃烧率指令
θ	天顶角,rad
ρ	密度, kg/m^3
ρ''	壁面反射率
σ	斯蒂芬-玻耳兹曼常量, $5.67 \times 10^{-8}, \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$
σ	测量数据标准偏差
σ	燃料比
σ_s	散射系数, m^{-1}
τ_s	以光学厚度表示的位置坐标
τ_λ	光谱光学厚度
τ_t	辐射能量透射率
ω	散射率
ψ	角度,rad
ζ	随机变量
Φ	光谱散射相函数
Ω	立体角,sr

上 角 标

*	给定值
+	正向(上游)
-	负向(下游)
c	计算数据

<i>cal</i>	计算值
<i>d</i>	直接
<i>exact</i>	准确值
<i>i</i>	间接
<i>k</i>	迭代次数
<i>m</i>	测量数据
<i>T</i>	转置

下 角 标

<i>abs</i>	吸收
<i>ash</i>	灰
<i>ave</i>	平均值
<i>B</i>	蓝色
<i>b</i>	黑体
<i>f</i>	火焰
<i>E</i>	辐射能
<i>ext</i>	消光
<i>exact</i>	计算值
<i>G</i>	绿色
<i>g</i>	气体
<i>I</i>	辐射强度
<i>in</i>	进入
<i>m</i>	介质
<i>max</i>	最大值
<i>meas</i>	测量值
<i>min</i>	最小值
<i>out</i>	流出
<i>p</i>	颗粒
<i>R</i>	DRESOR 法计算结果
<i>R</i>	红色
<i>sca</i>	散射
<i>s</i>	固体颗粒
<i>T</i>	温度
<i>TC</i>	双色法
<i>w</i>	壁面
η	波数
λ	波长

目 录

前言

主要符号表	ix
-------------	----

第一章 绪论	1
--------------	---

第一节 炉内燃烧火焰检测技术的发展	1
-------------------------	---

一、我国电站锅炉和工业炉窑概况	1
-----------------------	---

二、燃烧火焰及其温度检测	2
--------------------	---

三、国内外燃烧火焰图像处理可视化研究进展	3
----------------------------	---

第二节 本书的内容和特点	4
--------------------	---

一、作者在图像处理燃烧可视化方向的研究回顾	4
-----------------------------	---

二、本书的内容组织	6
-----------------	---

参考文献	7
------------	---

第二章 炉内辐射传热原理及辐射传递方程求解	13
-----------------------------	----

第一节 弥散介质辐射传热基本原理	13
------------------------	----

一、热辐射基本概念和定律	13
--------------------	----

二、弥散介质中的辐射传递过程及辐射传递方程	16
-----------------------------	----

三、炉内颗粒燃烧介质辐射传热特性	18
------------------------	----

第二节 辐射传热及辐射传递方程求解方法简述	24
-----------------------------	----

一、离散坐标法(DOM)	25
--------------------	----

二、球形谐波(P_N)法	28
------------------------	----

三、Monte Carlo 法(MCM)	31
----------------------------	----

第三节 用 DRESOR 法求解辐射传递方程(RTE)	40
-----------------------------------	----

一、辐射传递方程的一般积分形式解	40
------------------------	----

二、真空边界系统辐射传递方程求解的 DRESOR 法	41
----------------------------------	----

三、DRESOR 法在真空边界一维平行平板灰性介质中的验证	45
-------------------------------------	----

四、DRESOR 法对壁面条件的处理及一维系统计算验证	55
-----------------------------------	----

五、DRESOR 法简要小结	63
----------------------	----

参考文献	63
------------	----

第三章 辐射传递逆问题求解	67
---------------------	----

第一节 一般逆问题	67
-----------------	----

第二节 辐射传递逆问题的提出与常用算法	69
---------------------------	----

一、辐射传递逆问题的提出	69
--------------------	----

二、辐射传递逆问题常用解法	71
---------------------	----

第三节 辐射特性参数的逆求解	74
一、解析求解	75
二、迭代求解	81
第四节 源项分布逆求解	85
一、解析解	86
二、迭代求解	90
第五节 辐射特性参数与源项分布同时逆求解重建	95
一、利用雷当逆变换计算吸收系数与温度场	96
二、利用辐射能量和温度图像重建吸收、散射系数与温度分布	98
三、发射 CT 法同时重建非灰性介质的吸收系数与温度分布	101
参考文献	105
第四章 基于图像的测量原理及火焰可视化概述	111
第一节 基于图像的测量原理	111
一、基本概念	111
二、投影	113
第二节 火焰颜色定量及温度检测	117
一、颜色定量及色度坐标	117
二、火焰颜色计测	119
三、彩色三基色温度测量原理	120
第三节 彩色 CCD 成像原理及特性	121
一、电荷耦合器(CCD)基本原理	121
二、彩色 CCD 摄像机及其特性	125
第四节 炉膛及火焰可视化技术概述	129
第五节 火焰形状定量分析	131
一、火焰二维形状可视化及定量分析	131
二、火焰三维形状重建	147
参考文献	151
第五章 火焰温度图像检测及燃烧诊断分析	154
第一节 基于双色法的火焰温度图像检测	154
一、双色法温度检测方法	154
二、基于彩色 CCD 三基色的双色法温度图像检测方法	155
第二节 其他几种辐射温度图像检测方法	165
一、红外热成像火焰温度图像检测	165
二、基于亮度图像处理的全色法	167
三、基于参考测温的单色法	169
四、基于火焰平均温度的单色法	175
第三节 基于辐射温度图像检测的燃烧诊断	177
一、燃煤锅炉炉膛出口未燃尽碳率预测	177

二、煤粉燃烧 NO_x 排放诊断	182
参考文献	186
第六章 炉内燃烧辐射成像过程及其模型	190
第一节 辐射能量成像模型	190
一、CCD 成像的光学模型	190
二、辐射能量成像模型	192
三、MCM 计算辐射能量成像	194
四、辐射能量成像快速计算方法	196
第二节 辐射强度和温度成像模型	208
一、辐射强度成像模型	208
二、辐射温度成像模型	209
第三节 辐射温度图像检测方法的计算比较分析	214
一、双色法和单色法辐射温度图像检测方法比较分析	215
二、简化双色法与单色法辐射温度图像检测方法比较分析	218
三、小结	220
参考文献	221
第七章 炉内二维温度场可视化方法	223
第一节 二维温度场重建方法及其模拟研究	223
一、炉内温度场重建问题的病态性	223
二、线性规划反演方法	224
三、加先验经验的最小二乘反演二维温度场重建方法	228
四、应用正则化反演模型重建二维炉膛温度分布	231
第二节 二维温度场可视化技术实现及实验研究	237
一、可视化系统构成	238
二、火焰图像检测及可视化结果	239
三、小结	242
参考文献	242
第八章 炉内三维温度场可视化方法	244
第一节 三维炉膛空间辐射成像模型及其计算	245
一、三维炉膛系统的描述	245
二、二维辐射能成像计算	247
三、三维辐射强度成像计算方法	251
第二节 炉膛温度场正则化重建方法的模拟研究	256
一、三维温度场重建的正则化方法	256
二、三维温度重建结果及其分析	258
三、小结	262
第三节 大型电站燃煤锅炉炉内三维温度场可视化实验研究	262

一、研究对象及实验装置	262
二、三维温度场可视化结果	264
第四节 加热炉炉内三维温度场可视化实验研究	265
一、研究对象及实验装置	266
二、实验结果	266
三、小结	268
第五节 基于三维温度场可视化的燃烧诊断	268
参考文献	270
第九章 声波法炉内可视化检测原理与技术	272
第一节 声速概念及声波传递衰减特性基础试验	272
一、声速	272
二、燃烧气体中声波衰减特性试验	274
第二节 声波法测温原理及试验研究	276
一、声波在非等温流场中的传播	276
二、声波法温度场重建基本原理	277
三、二维燃烧温度分布监测及燃烧诊断	281
第三节 声波法空气动力场可视化原理和技术	289
一、四角切圆炉膛简化模型动力场重建研究	289
二、一般炉膛空气动力场声波法监测	296
三、简要评述	302
参考文献	302
第十章 基于炉内可视化的燃烧优化控制	305
第一节 炉内辐射换热原理及辐射能信号检测	306
一、炉内辐射换热原理及辐射能信号定义	306
二、火焰辐射能信号检测及其分析	308
第二节 基于辐射能信号反馈的燃烧及机组负荷控制	310
一、基于辐射能信号反馈的燃烧控制	310
二、基于辐射能信号反馈的机组负荷控制	312
第三节 煤粉炉内三维燃烧温度分布优化控制方法	317
一、炉膛三维温度场分布模型	318
二、系数矩阵 D 的计算	320
三、采用遗传算法的燃烧优化控制方法	321
第四节 炉内燃烧控制其他方法	322
一、基于声波法测温的炉内燃烧控制	322
二、基于模型的燃煤电厂 NO_x 排放实时控制	326
参考文献	330
主题索引	333

第一章 绪 论

第一节 炉内燃烧火焰检测技术的发展

一、我国电站锅炉和工业炉窑概况

中国是世界上最大的煤炭生产国和消费国^[1],2004 年产量预计达到 16 亿吨。据统计^[2],2003 年底全国发电总装机容量为 3.91 亿 GW,其中火力发电 2.90 亿 GW,占 74.03%;总发电量为 19052 亿 kWh,其中火力发电占 82.88%。2003 年年底全国发电机组总装机容量和全年发电量均达到或者超过了原国家经贸委制定的《中国电力工业“十五”规划》中预计到 2005 年达到的水平。统计还显示^[2],2003 年底全国拥有 100 MW 及以上火力发电机组 958 台[含燃气-蒸汽联合循环机组(单循环 35MW、联合循环 50MW 级以上)],其中燃煤机组 902 台,燃油机组 26 台,混燃机组 3 台,燃气机组 27 台。因此,数据表明,我国一次能源仍以化石燃料燃烧发电为主,其中煤炭又占其中绝大部分。因为 100MW 及以上火力发电机组总装机容量为 2.09 亿 GW,占火电总装机容量的 72.06%^[2],剩余的火电装机容量若全为 50MW 机组,也将达到 1600 多台。因此,估计全国火电机组超过 2500 台。

21 世纪头 10 年,中国电力工业又将出现一次大的发展。虽然水电、核电及其他新能源发电能力增长加快,但赶不上火力发电增长的速度。电力体制改革后,五大发电集团公司中的中国华能集团公司、中国大唐集团公司、中国华电集团公司、中国国电集团公司均不约而同地规划各公司所属发电机组的容量在 2010 年均达到 6000 万 kW 左右的水平,比 2002 年前后增长近 1 倍;更有的公司规划到 2020 年其发电机组容量在 2010 年的基础上再增长 1 倍。因此,火力发电机组在今后很长一段历史时期仍将是我国电力生产的主力军,火电机组中的三大主机之一的锅炉的安全、经济、环保运行水平的提高是重要的课题。

我国工业炉窑是能耗大户,全国 20 世纪 90 年代中期工业炉窑装备总数已达 12 万余台,年耗能占全国 25%,其中燃料炉占工业炉窑总数的 55%,能耗占工业炉窑能耗的 92%,占全国能耗的 23%。工业炉窑燃料结构不合理,约 64%炉窑仍以煤为燃料,炉窑总体技术水平较低,炉窑热效率与国际平均水平差距很大,节能潜力很大^[3]。