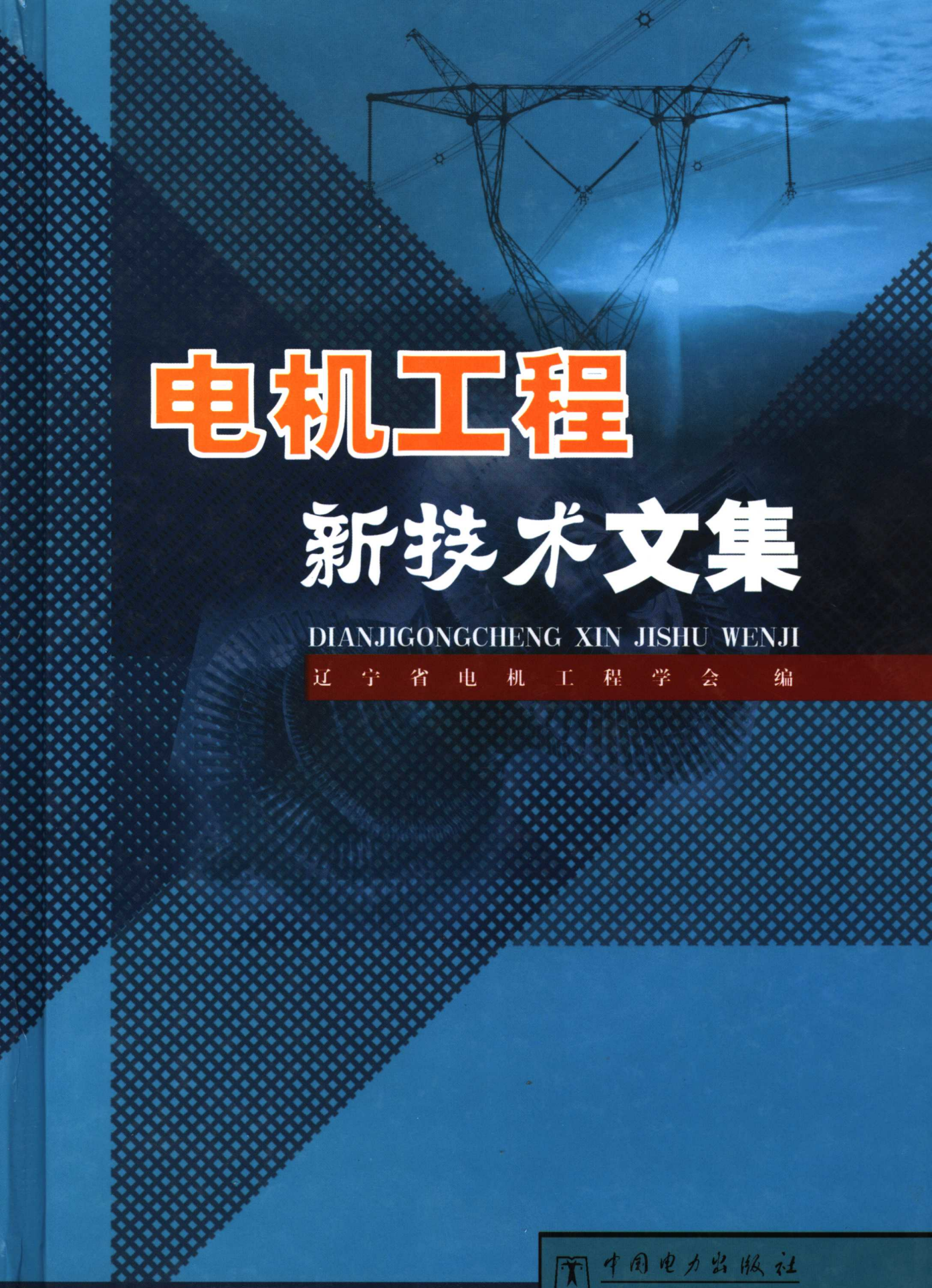




电机工程

新技术文集

DIANJIGONGCHENG XIN JISHU WENJI

辽宁省电机工程学会 编



中国电力出版社

电机工程

新技术文集

辽宁省电机工程学会 编



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

图书在版编目 (CIP) 数据

电机工程新技术文集 / 辽宁省电机工程学会编. —北京: 中国电力出版社, 2005

ISBN 7-5083-3678-X

I. 电… II. 辽… III. 电机-文集 IV. TM3-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 126024 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

北京市铁成印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2006 年 1 月第一版 2006 年 1 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 27.25 印张 736 千字

印数 0001—3000 册 定价 **46.00** 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换)

《电机工程新技术文集》编委会

主 编：黄传兴

副主编：黄其励

成 员：张 华 葛维春 蒋建民 张永兴

王世阁 马庆平 李锡臣 王 漪

张福银 张近朱 鲍 斌 孙长河

李群详 贺兰波 邓维国 夏祖芳

前 言

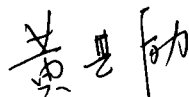
在这金色的收获季节，我们編集出版了电机工程新技术文集，收入了 2000 年以来的百篇优秀论文，这是广大电机工程科技工作者学术的创新、实践的升华和智慧的结晶，是奉献给我国电力工业的丰硕成果。

“科学技术是第一生产力”，是社会发展的决定性因素。科技的创新，要以学术的繁荣为先导，而学术的价值，就是追求真理、造就人才，使科技工作者能够在大胆创新和追求卓越中，探讨、发明和解决学术问题。在学会搭建的为科技人员服务的学术平台上纵横驰骋、体现人生价值、铸造学术成就。

电力工业是国民经济发展的基础性工业，是资金密集、技术密集的行业，要使它快速发展就要以科学发展观为指导，依靠科技进步和创新加快技术升级，满足社会需求。因此，在这本文集中，论述的范围涉及火力发电、输电网、配电系统、继电保护、调度自动化、信息工程、计量技术、营销管理以及施工技术等方面，其中绝大多数的作者都是来自生产一线的中青年科技工作者，他们在实践过程中，理论联系实际，勇于探索、敢于争鸣，通过他们的发现或发明，表达出学术观点，他们在为电力工业做出贡献的同时，也使自己得到提高，他们的学术成果对电力同行提供有益的借鉴。

这些论文是经辽宁省电机工程学会组织专家认真评审后获奖的优秀论文，在辽宁省内具有一定的影响力，但由于我们水平有限，文集中难免存在缺点与不足，恳请读者指正。

在文集编辑过程中，得到中国电力出版社刘丽平编辑及有关专家的大力帮助，在此深表谢意。



2005 年 10 月

黄其励：现为中国工程院院士，电力系统知名专家。现任东北电网有限公司名誉总工程师、中国电机工程学会科普工作委员会主任委员、辽宁省电机工程学会副理事长兼学术委员会主任。

《电机工程新技术文集》

目 录

前言

火 力 发 电 技 术

气—液两相流在并联分支管中流型及流动特性的研究.....	王培斌 (3)
一台 300MW 机组锅炉末级再热器壁温特性的研究.....	吴景兴 冷 杰 张幼明 张永兴 (7)
基于模糊神经网络非线性的电站制粉系统控制研究.....	王庆利 井元伟 (13)
神经模糊控制及其对汽包水位控制的仿真研究.....	赵春元 张玉艳 于红霞 (18)
锦州东港电力有限公司 6 号炉掺烧煤试验研究.....	刘学增 潘 晶 张键如 孙春林 (23)
300MW 机组旁路控制系统的研究	郑 伟 (29)
超超临界火电机组材料与焊接技术.....	郝志信 宋明蔚 (33)
抑制氮氧化物无烟燃煤炉内煤气化过程.....	徐有宁 宋文立 (37)
排烟余热回收系统在电站锅炉中的应用.....	邹天舒 李志山 邹海峰 (41)
辽宁能港发电公司发电机转子引线螺钉接地故障的处理.....	李振伟 (44)
锅炉碳钢炉外管失效原因分析.....	谢广煜 (47)
用一次风机代替给煤机密封风机及冷却风机可行性分析.....	邹德普 (51)
铁岭发电厂 4 号炉结焦原因探析.....	潘 晶 刘学增 (53)
火力发电厂干灰场设计与研究.....	吴 克 (58)
朝阳发电厂疏水泵油封防漏油改造.....	周学明 (62)
辽宁清河发电有限责任公司 8 号汽轮机轴封漏汽系统运行方式的优化.....	赵伟光 江 敏 刘焕武 (65)
绥中电厂 2 号机推力瓦温度高原因分析.....	童 刚 王向前 (71)
350MW 机组汽轮机末级叶片水蚀处理	韩吉亮 (75)
正十八胺防腐保护在大连发电总厂的应用.....	王 玲 (79)
确定发电设备最佳维修周期的数学方法.....	高广勤 (83)

输 电 网 技 术

辽宁电网污闪原因及防治对策.....	陶文秋 (89)
100Mvar 国产化的 SVC 装置在辽宁电网的实施.....	周志玉 徐炳富 (93)

基于 $N-1$ 原则的输电断面传送功率能力分析	李 响 (99)
基于 $N-1$ 静态安全约束的输电断面有功潮流控制	李 响 (103)
500kV 紧凑型六分裂超高压输电线路的特点及架线施工工艺	薛 勇 冯军骁 (106)
辽宁电网责任频率调整策略分析	魏庆海 鲁 顺 (111)
采用硬梯法进入双回线铁塔强电场的试验研究	马 宁 (115)
籍助于网络解耦控制法提高电网安全稳定性	杨春刚 (120)
扩径导线压接工艺的研究	刘利平 (124)
浅谈变电站地网的测试与评估	洪 鹤 (127)
桓仁地区电网黑启动分析	鲁 顺 傅 予 金世军 (132)
采用拒引结合防雷技术改造桓仁电站防雷系统	舒世承 (137)
变电站防污在线监测装置的应用与研究	韩 芳 陈绍英 姚丰春 (141)
气流干扰线抑制导线舞动的机理与实验	赵作利 徐中年 (145)
辽宁电网短期负荷预测方法研究	罗桓桓 王 漪 (148)
东北电网频率与联络线潮流的关系	魏庆海 鲁 顺 范东春 陈晓东 李 铁 (151)

配 电 系 统

关于 10kV 系统电缆线路过电压的原因分析及危害和解决办法的探讨

.....	王 剑 李 英 孙克强 (159)
10kV 自动调谐消弧线圈的选用与运行维护	常 挥 (163)
10kV 系统消谐措施的应用与分析	常 挥 (167)
低压无功补偿装置安装后的效益分析	侯丽花 (172)
新型 10kV 柱上无功自动补偿装置	闫青春 (175)
辽阳地区谐波分析及其抑制措施	宋 丽 (180)
电弧炉在辽阳电网发展、危害及治理	于长广 魏 巍 张海忱 黄振铎 (184)
对 10kV 配电线路用带电作业取代停电作业相关问题的探讨	薛 岩 (188)

继 电 保 护

应用变压器差压环流法测量变压器差动保护相位的探讨与实践	曲 静 (195)
模糊理论在小电流单相接地选线中的应用	张宏宇 杨以涵 于向东 任 杰 顾志强 (199)
基于 DSP 的电力变压器计算机综合保护系统	闫士杰 (204)
保护设备下放后的抗干扰措施	李海杰 (208)
辽沙 1 号线 370kHz 高频异常分析和处理	肖 勇 (211)
从简化整定计算论线路的微机型继电保护装置	毛锦庆 王 澎 (214)
电压互感器二次中性点偏移对继电保护零序方向元件的影响	朱兴勇 邱金辉 孟志宏 (220)
基于 80C196KC 芯片的微机厂用分支保护装置的研制	鲁 顺 魏庆海 (224)
关于大连地区继电保护及自动装置检验周期的探讨	钟春燕 (230)

电力系统调度自动化

调度模拟仿真防误操作票管理系统开发探讨.....	孙道军	王朋举	张连贵	(237)
电网调度 SCADA 系统中常见故障的定位及解决方法.....	石文江	路 钢		(241)
SCADA 系统 SOE 正确处理方式的探讨.....	石文江	路 钢	王荣茂	(245)
提高 SOE 信息真实性的探讨.....			王洪哲	(249)
电力调度数据网络的建设和应用实践.....	施毅斌	向 勇		(252)
在线监测综合自动化控制柜解决方案.....	刘忠政	刘永胜	顾宝富	(258)
变电站自动化设备的干扰及其防护措施.....	焦明程	高 潇		(262)
双纤单向通道保护环和双纤双向复用段保护环的介绍与比较.....			张明宇	(266)

信息化与可视化技术

基于 WEB 的贝叶斯专家系统研究与实践.....			崔奇明	(271)
计算机技术和 CATV 技术相结合的工业电视监控系统在铁岭发电厂的应用.....	孙 伦	王冬艳		(275)
辽宁电力企业门户的建设与应用.....			周英杰	(279)
地理信息系统在电力生产中的应用与开发.....			薛艳玲	(283)
基于 EAM 理念的生产管理信息系统的实现.....	刘永胜	刘 颖		(287)
Ultimus 在电厂业务流程优化和管理中的应用.....	赵 贺	覃一宁		(291)
企业移动办公的实现与应用.....	刘洪艳	隋 巍		(295)
发电企业要如何应用好 MIS.....	张伟华	孙 伦		(298)
华能大连电厂管理信息化建设模式剖析.....			史 磊	(301)
浅析企业计算机信息安全.....			张伟华	(305)
如何做好网络布线.....			杨玉鹏	(308)

计 量 技 术

单相交流仪表检测管理系统的设计与应用.....	刘 萍	史 明		(315)
自动抄表系统.....			王月志	(319)
交流电能表测量结果不确定度的评定.....			朱淑媛	(324)
计量用电流互感器工作于低电流值时的特性分析.....	齐伟夫	徐建源	王 勇	(328)
电厂温度测量元件选择的几点建议.....			牟长信	(332)

电机、电器与变压器

全封闭组合电器 (GIS) 绝缘气室微水超标的新型处理方法.....			张书祥	(337)
空间电压矢量 PWM 算法实现及对电机性能的影响.....	闫士杰	张化光		(341)

智能三相电机保护器系统设计

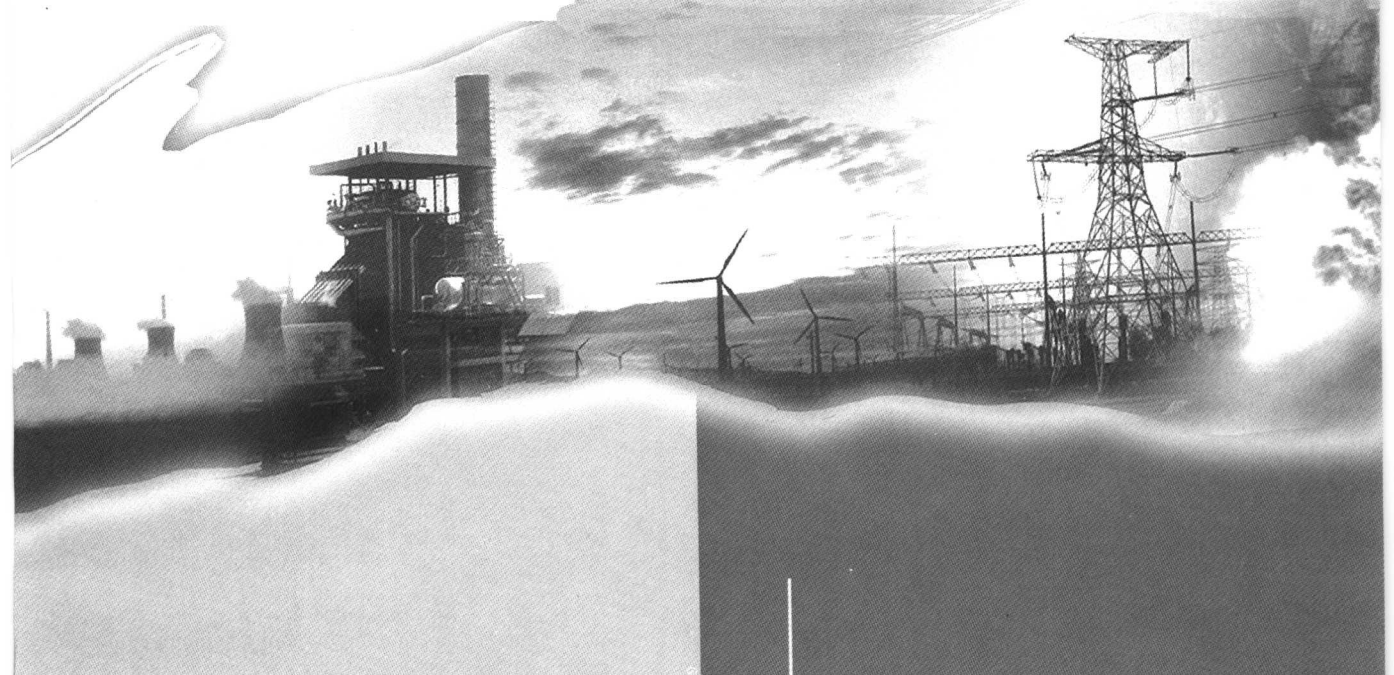
.....	张 石 鲍喜荣 丛国涛 常 皓 陈 剑 马 晔	(345)
直流电动机软启动方式的研究	吴建华 陈岚峰 赵亚威 孙玉琴	(349)
嵌入式网络控制智能接触器的研究	曹云东 李 峰 宁慧英	(353)
断路器绝缘设计平台研究	刘晓明 李 磊 黄丹宇	(356)
一起雷电过电压对变压器冲击事故分析	韩洪刚	(359)
变压器的噪声分析及降低噪声的措施	司洪孝 李洪友	(362)
由引线引起的电力变压器过热性故障分析	韩洪刚	(367)

营 销 管 理

电力营销管理信息系统平台体系架构的规划与设计	王 玮	(373)
电力负荷管理系统在监测用电异常方面的应用	刘延年 李利宪	(378)
电力负荷管理系统建设若干问题的分析和探讨	曾林锁 周晓刚 关 艳	(381)
基于反窃电功能的全负荷管理系统	李福祿	(385)
发挥价格杠杆作用是需求侧管理的重要内容	张近朱 刘 畅	(387)

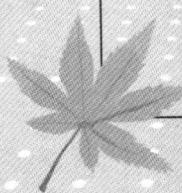
其 他

监理在施工过程中质量检查	杨晓强	(393)
当前招投标管理中存在的问题及其对策	迟宏艳	(396)
对土建设计施工图中一些问题的探讨	吴 松	(401)
CAD 图纸自动积累和重复利用的实现	吴 芬	(406)
基于 MFQ 的补丁优先算法的研究与实现	迟新利 刘禹林 郭 南	(410)
生活供水加氯自动改造的研究与应用	张立春	(414)
50t 吊车与内拉线抱杆相结合进行市区大吨位钢管塔施工	廉秀全	(417)
固定式链传动耙斗格栅清污机开发设计	崔忠涛	(420)
大力发展小型绿色环保分散电源发供电技术—建立辽宁省燃料电池产业化基地	冯玉全	(424)



◎ 《电机工程新技术文集》

火力发电技术



气—液两相流在并联分支管中流型及流动特性的研究

王培斌

沈阳工程学院

摘要:本文以水和空气为工质,对由水平联箱连接的U型和Z型系统中并联分支管中的两相流分配特性进行了试验研究。根据试验结果,得到不同来流流量和来流干度下的U型连接系统和Z型连接系统中两相流的流动情况,流型和流体的停滞及倒流情况,影响两相流在并联分支管中分配不均的因素,气相质量流量分配和总质量流量分配随来流质量流量和干度的变化关系。

关键词:气—液两相流;并联分支管;分配特性;试验研究

1 引言

在动力工程中,经常遇到两相流通过T型管、Y型管及通过联箱向分支管中流动的问题。在这类问题中,若流向各分支管的流体质量流量和干度有较大的差别时,即所谓的流量分配不均,则可能产生一系列的问题,如火电厂水冷壁的安全运行和核反应堆中的失水(LOCA)问题等。

关于两相流在T型管和Y型管中的分配问题,已做了大量的理论和实验研究工作。对由联箱连接的并联管束中的两相流流量及干度的分配问题研究的还比较少,并且均对由水平布置的联箱和分支管束中的分配特性进行了试验和理论研究。实际热力设备中的并联管多为垂直向上布置的,针对此种情况我们对由水平联箱连接的上升并联管束中气—液两相流的分配进行了试验研究。

2 试验系统及试验方法

2.1 试验系统

试验系统由水箱、空气压缩机、水泵、混合器、调节阀及流量计等组成。试验段的汇集联箱两端分别装有调节阀门,通过调节可分别构成Z型连接系统和U型连接系统。

试验段由4根并联的分支管组成。在分配联箱和汇集联箱上装有取压环室,可测定联箱

中的压力分布。在分支管的两端也分别装有取压环室,由此来确定分支管中的压力降。压差值和压力值采用高精度差压变送器测取,通过数据处理后送入计算机中,在计算机中可直接监测和记录压力值和差压值及变化情况。

2.2 试验参数的处理

通过快关阀可得到各分支管中工质的体积含气率,因为两相流的波动性较大,为了计算精确,对体积含气率进行多次测量,然后取平均值,通过体积含气率可求出各分支管中工质的干度和平均密度。

通过差压变送器等把差压信号最终转换成计算机输出的各分支管中的差压值。考虑不同分支管中混合物的平均密度,最终可求出各分支管中工质的摩擦阻压降,采用均相模型计算两相流的流量,计算公式为

$$\Delta P_F = \lambda \frac{L}{D} \frac{(\rho_m u_m)^2}{2\rho_L} \left[1 + x\phi \left(\frac{\rho_L}{\rho_G} - 1 \right) \right] \left[1 + x \left(\frac{\mu_L - \mu_G}{\mu_G} \right) \right]^{1/4}$$

式中: λ 采用单相流体的摩擦阻力系数,流体的流动状态不同时,摩擦阻力的计算公式不同; ϕ 为压降修正系数,采用文献[5]中所推荐的公式。

因为 λ 随 Re 的值和流动状态不同,采用迭代公式进行计算,同时利用质量流量连续方

程和气相质量连续方程进行判定, 最终求得各分支管中两相流的质量流量和气相的质量流量。

2.3 两相流流型的测量

两相流的流型采用压差波动法测量, 两相流有多种流型, 而其管道两端的差压信号随两相流流型的变化而变化, 在实验回路上, 对流体流动时的差压信号进行测量, 通过记录仪上记录的信号曲线可以分析差压信号与对应流型的关系。

3 分支管中的流动情况

3.1 分支管中工质的停滞和倒流

在两相流的流动过程中, 尤其是锅炉中的受热管道, 若某个分支管中工质有倒流和停滞现象发生, 将对设备的安全和经济运行带来十分不利的影响。从 Z-型系统和 U-型系统的实验数据中可以看出, 来流的质量流量、干度和来流的流型是影响并联分支管内流体停滞和倒流的主要因素。

来流的质量流量较小时, 分支管中易发生工质的停滞和倒流, 一般的规律为: 当来流的液相折算速度 J_L 较小时, 若其气相折算速度

J_G 也较小, 分支管中的工质将发生停滞和倒流, 随来流气相折算速度的增大, 分支管中两相流的停滞和倒流情况将发生变化, 一般来流的液相折算速度较小时, 距分配联箱入口较远的各个分支管中, 均有程度不同的倒流现象发生。但随来流气相折算速度的增加, 发生倒流的分支管的位置后移。当 J_G 达到一定值后, 即两相流的干度达到某一值时, 停滞和倒流现象将不再发生, 随来流液相折算速度 J_L 的增大, 并联分支管中发生倒流的分支管的位置也后移。当其 J_L 达到一定值后, 分支管中的停滞和倒流现象将不存在。

当分支管中工质发生停滞和倒流时, 其流动状态多为不稳定的间歇流, 即: 流体一会儿倒流, 一会儿又向上流动, 流体在管内上下波动, 此时两相流的含气率变化也较大。表 1 和表 2 为某些工况下各个分支管中两相流的流动状态和流型。图 1 和图 2 为本实验参数范围内不发生流体倒流和停滞时的 J_G 和 J_L 的曲线图, 曲线为最后一个分支管中也有两相流倒流时的工况, 曲线右下侧的区域中均有流体的倒流发生。

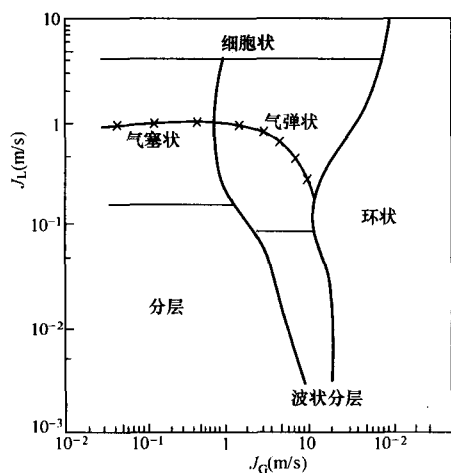
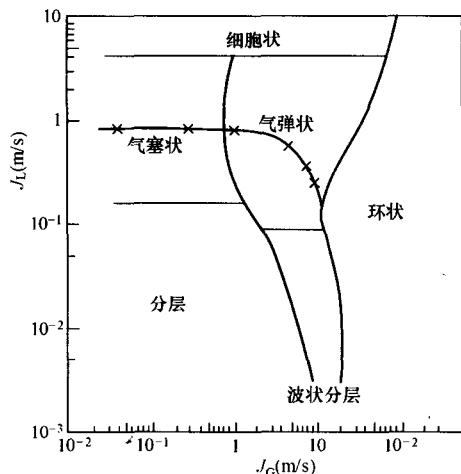
表 1 U-型连接时某些工况下各分支管中的流型和流动情况

J_L	J_G	来流	NO1 管	NO2 管	NO3 管	NO4 管
0.109	1.53	分层	气弹状流型, 上升	细胞+气弹状, 有停滞	细胞状, 有停滞回流	水—极少量气, 回流
0.168	15.6	气弹	环状流型, 极少量水	纤维环状流型	细胞+气弹状, 上升	气弹状流型, 回流
0.293	0.35	气塞	气弹状, 少量回流	气弹状, 有回流	细胞状, 有回流	单相水, 有回流
0.585	0.438	气塞	细胞状+块状流型	细胞状+气弹状流型	细胞+气弹有回流	水(极少气)回流
0.109	20.2	环状	环状流型(极少水)	环状流型	细胞状+块状流型	气弹状流型
0.168	19.3	环状	环状(基本无水)	纤维环状流型	细胞状+气弹状流型	气弹状流型
0.585	7.31	气弹	环状流型	纤维环状+气弹状	细胞状+气弹状流型	细胞状流型(不稳定)
0.878	8.76	气弹	纤维环状+环状流型	纤维环状+块状流型	细胞状+气弹状流型	细胞状流型
1.315	1.826	气弹	纤维环状流型	纤维环状+块状流型	细胞状流型	单相水(极少气)
0.585	20.2	环状	环状流型(水较少)	环状流型	纤维环状+块状流型	细胞状流型

表 2

Z-型连接时某些工况下各分支管中的流型和流动情况

J_L	J_G	来流	NO1 管	NO2 管	NO3 管	NO4 管
0.109	1.23	分层	纤维环状流型	细胞状, 有回流	细胞状, 有停滞回流	水—极少量气, 回流
0.109	20.82	环状	环状流型 (极少水)	环状流型	块状流型	气弹状流型
0.168	8.760	气弹	环状流型, 极少量水	纤维环状+气弹状	细胞状流型	水 (极少气) 回流
0.293	0.731	气塞	纤维环状+块状流型	细胞状, 不稳定	细胞状, 少量回流	水 (少量气) 回流
0.517	20.2	环状	环状流型 (水较少)	环状流型	纤维环状流型	气弹状+块状流型
0.878	13.15	气弹	环状流型 (极少水)	纤维环状+环状流型	块状流型	细胞状+气弹状
0.073	8.77	波分	环状流型 (水较少)	环状流型	细胞状+气弹状	水 (极少气) 回流
1.315	0.365	气塞	细胞状流型	细胞状, 少量回流	水 (少量气) 回流	水 (极少气) 回流
1.171	5.85	气弹	环状流型	纤维环状流型	纤维环状+块状流型	细胞状流型
0.292	21.3	环状	环状流型	环状流型	纤维环状+块状流型	细胞状流型

图 1 Z-型连接时来流流型与 J_L 和 J_G 的关系图 2 U-型连接时来流流型与 J_L 和 J_G 的关系

3.2 分支管中工质的流型

由表 1 和表 2 可以看出, 各分支管内两相流的流型差别较大, 这主要是受流量和气相分配不均的影响。通过实验发现不论是 Z-型连接系统还是 U-型连接系统, 分支管中气相分配的一般规律为 $W_{G1} > W_{G2} > W_{G3} > W_{G4}$, 则 NO1 管中的流型多为干度 X 较大时所体现的流型, 而其他管中的流型则顺序地按干度 X 下降的规律变化。如 J_G 为 13.2 和 J_L 为 0.88 时的工况, NO1 管中为环状流型, NO2 管中为带纤维的环状流型, NO3 管中为块状流型, NO4 管中为细胞状流型。

3.3 来流流型对分支管中两相流流动的影响

来流的流型对分支管中两相流的质量分配, 气相质量分配及流型和流动情况的影响也较大。从本实验范围内的数据和测试结果看, 来流为分层流动时, 分支管中两相流分配不均较严重, 并且多数情况下有停滞和倒流发生。因为此时来流的动量较小, 易发生两相流的停滞和倒流, 该流型中气相在管道的上部, 则气体首先进入 NO1 分支管, 且管中的气相质量流量比相当大, 该管相当于一个相分离器, 而后面的分支管中的动量较小, 多发生停滞和倒流。

来流的流型为波状分层流型时, 并联分支管中两相流的流动情况与来流为分层流动时相差不大, 各个管中工质流动的稳定性更差一

些,在此流型范围内,距联箱入口较远的分支管中的流体的停滞和倒流现象还较严重。

在来流为气塞状流型时,来流的液相折算速度有一定的提高,但气相折算速度较小,两相流总的动量也较小,距分配联箱入口较远的分支管中流体也易发生流体的停滞和倒流。

当来流的液相折算速度增大后,流型变为气弹状流型,此流型范围内,若气相折算速度较小,并联分支管中的流体还有停滞和倒流,当 J_G 和 J_L 达到某一定数值时,其两相流的倒流和停滞现象将不再发生。由于水平管气弹状流型时气体在管道的上部,则分支管中气相分配不均也较严重。

来流为细胞状流型时,来流的液相折算速度 J_L 较大,两相流的总动量也较大,在本实验的参数范围内,该流型中无工质的倒流和停滞现象发生。因为该流型中两相流的干度较小,

则相分配相对较均匀。

在环状流型中,流体的动量较大,其来流的气相折算速度 J_G 较大,各个分支管中均无流体的停滞和倒流现象发生。该流型中,随两相流的干度增加,使液体层底部的液膜向分支管中的分离增强,则有更多的液体进入分支管中,其气相分配较均匀。

4 结论

通过对并联分支管中两相流分配特性的实验研究,得出:分配联箱来流的流量和干度对分支管中两相流的流型、流动情况、质量流量和气相质量流量的分配影响较大,尤其是在较低的液相折算速度和气相折算速度时,所以在热力设备的运行中要考虑两相流的流动情况。

参考文献:

- [1] Nematollah Saba, et al "The Analysis of Phase Separation Phenomena in Branching Conduits" Int.J.Multiphase Flow Vol.10.No1.1984
- [2] J.Hart, et al "A Model for Predicting Liquid Route Preference During Gas—Liquid Flow Through Horizontal Branched pipelines" Chemical Engineering Science, Vol 46, No7, 1991
- [3] J.D.Black, et al. "Steam-water Annular Flow in a Horizontal Dividing T-junction" Int. J.Multiphase Flow Vol 14 No3, 1988
- [4] 林宗虎. 气—液两相流和沸腾传热. 西安: 西安交通大学出版社, 1987.
- [5] 上海电站成套设备研究所等. 锅炉水力计算标准. 1984.

一台 300MW 机组锅炉末级再热器壁温特性的研究

吴景兴 冷 杰 张幼明 张永兴

东北电力科学研究院

摘要: 本文根据某锅炉末级再热器壁温的测量结果, 分析了该再热器的壁温特性。

关键词: 机组负荷; 锅炉; 再热器; 壁温

1 引言

锅炉四管(过热器、再热器、省煤器和水冷壁)泄露是造成机组非计划停运的主要因素之一。某 300MW 机组配 1025t/h 锅炉, 自 1991 年 6 月投产以来, 末级再热器(简称“末再”)和屏式再热器多次发生超温爆管事故, 严重危及机组的正常运行, 至 1996 年机组大修期间, 不得不将末再和屏式再热器部分换热管的材质提高, 并将燃烧器顶部的二次风及上、下两层三次风改为反切。

为了弄清末再壁温的变化特性, 在停炉期间, 在末再的炉内和炉外分别安装了若干个温度测点进行实地测量, 观察各工况末再壁温的变化, 为优化运行方式提供依据。在试验过程中发现: 机组负荷和磨煤机组合方式改变等均可能导致再热器管壁温度(简称“壁温”)的波动。需要说明的是本文所述的炉内是指锅炉炉膛内部; 而炉外则指锅炉炉顶至大罩壳之间的空间。

2 设备简介

锅炉系亚临界压力、一次再热、强制循环汽包炉、4 台钢球磨(编号分别为 A、B、C、D), 中间储仓、热风送粉、四角切圆燃烧。设计煤种为晋东南贫煤, 可燃基挥发分为 14%, 燃煤的低位发热量为 24.2MJ/kg。

末再由 68 排 U 型管束组成, 顺流布置, 管排编号是从 B 侧向 A 侧数(沿炉膛宽度方向将末再分 A、B 两侧), 每排管束包括 6 根 U

型管, 原设计的管材有 3 种, 若由每排管外圈开始数, 第 1 根管入口段(向火侧)、U 型管水平段及出口段下部管材为钢 102, 管径均为 $\phi 57 \times 4.5$, 出口段上部的管材为 T91, 管径为 $\phi 57 \times 4$; 第 2~6 根管的管径均为 $\phi 57 \times 4$, 其入口段、U 型管水平段及出口段下部管材为钢 102, 出口段上部的管材为 T91, 而末再出口炉外管子的管材为 12Cr1MoV, 管径为 $\phi 57 \times 4$ 。在运行过程中, 由于末再 B 侧管子经常发生超温爆管事故, 在 1996 年大修时, 将末再从 B 侧数第 3~22 排管束的全部 6 根管更换为材质为 TP 347H 的管子, 为了便于管子与末再出口集箱焊接, 在炉外与末再出口集箱连接部位保留一段管材为 12Cr1MoV、管径为 $\phi 57 \times 4$ 的管子; 将末再从 B 侧数第 23~42 排管束的最外圈 2 根管的入口段及 U 型管的水平段和弯头更换为材质 TP 347H 的管子, 出口段保留原设计的钢 102 与 T91 接头及 T91 管段, 新换管子的管径均为 $\phi 57 \times 4$; 由于现场 TP347H 的管材有限, 从 B 侧数第 43~68 排管束没有更换材质。

3 测点布置及试验内容

3.1 测点布置

本次试验共装设了 6 个炉内壁温测点和 16 个炉外壁温测点, 均安装在末再入口处, 另外还在末再入口处安装了 1 个炉内烟气温度测点, 另外锅炉原有 22 个运行测点。为了便于分析, 将所有温度测点进行了编号。如前所述, 规定管排编号从 B 侧向 A 侧数, 各 U 型管排的管子编号是从外向里数, 基于以上定义, 如

壁温测点编号 12-1 的含义是温度测点位于从 B 侧数第 12 排 U 型管的从外向里数的第 1 根管子上。在测点编号的前面分别用 I、O、T 和 G 表示炉内、炉外、运行和烟温测点，基于以上定义，如壁温测点编号 I 12-1 的含义是炉内温度测点，测点位于从 B 侧数第 12 排 U 型管从外向里数的第 1 根管子上。

炉内测点均距末再下端水平段 1.5m，其测点编号分别为 I 6-1、I 8-1、I 12-1、I 16-1、I 20-1 和 I 28-1；炉外壁温测点位于炉膛顶棚与炉顶罩壳内，测点编号分别为 O 2-1、O 4-1、O 8-1、O 10-1、O 12-1、O 14-1、O 16-1、O 20-1、O 22-1、O 28-1、O 34-1、O 42-1、O 52-1、O 52-3、O 57-1 和 O 67-1。

烟温测点在炉内第 12 排管束的第 1 根管子上，位置接近该排管束的炉内壁温测点，测点编号为 G 12-1；运行测点的编号分别为 T 2-1、T 4-1、T 6-1、T 8-1、T 10-1、T 12-1、T 14-1、T 16-1、T 17-1、T 17-3、T 20-1、T 22-1、T 28-1、T 34-1、T 38-1、T 42-1、T 52-1、T 52-2、T 52-3、T 57-1、T 62-1 和 T 67-1。

3.2 试验内容

在试验过程中，仅改变机组负荷和磨煤机的组合方式，其他运行参数如再热器进、出口温度和压力、给水温度、省煤器出口氧量和排烟温度等均按习惯工况操作，本次试验进行了较多工况的试验，包括重复校核试验，其数据趋势基本一致，本文优选了 14 个试验工况。

(1) 改变磨煤机组合方式试验：机组负荷分别稳定在 230MW、260MW 和 280MW 左右，磨煤机的组合方式分别为 A、B、C、D，B、C、D，A、C、D，A、B、D 和 A、B、C。

(2) 稳定负荷试验：在不同磨煤机组合时，机组负荷分别稳定在 230MW、260MW 和 280MW 左右。为了分析方便，将试验工况进行了编号，试验工况汇总表如表 1 所示。

表 1 试验工况汇总表

机组负荷 (MW)	磨煤机组合方式	工况号
230	A、B、C、D	1
230	B、C、D	2
230	A、C、D	3
230	A、B、D	4
230	A、B、C	5
260	A、B、C、D	6
260	B、C、D	7
260	A、C、D	8
260	A、B、D	9
260	A、B、C	10
280	A、B、C、D	11
280	B、C、D	12
280	A、C、D	13
280	A、B、C	14

4 试验结果及其分析

4.1 改变磨煤机组合方式试验

图 1~图 3 为机组负荷 230MW，磨煤机组合方式分别为 A、B、C、D，B、C、D，A、C、D，A、B、D 和 A、B、C 时，末再炉内、炉外壁温和运行测点测得的壁温值。

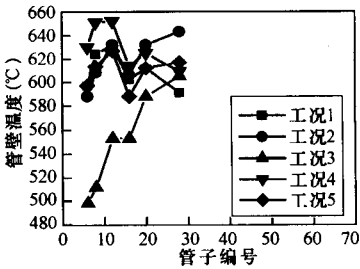


图 1 改变磨煤机组合时，末再炉内壁温 (230MW)