



Institute of Advanced Power Technology
Harbin Institute of Technology. Harbin, China

哈尔滨工业大学先进动力技术研究所

电厂安全节能产品

汽轮机运行性能的在线监测预警 及综合优化技术

哈尔滨工业大学先进动力技术研究所

2017 年 4 月



目 录

1. 成果简介	1
1.1. 技术服务支持单位介绍	1
1.2. 产品及技术介绍	1
2. 系统平台介绍	2
2.1. 系统组成及平台界面功能介绍	2
2.2. 产品应用案例	4
3. 产品配套的关键技术服务项目	7
3.1. 单/顺序阀的无扰切换优化技术	7
3.2. 喷嘴调节的最优重叠度设置优化技术	7
3.3. 高调门流量特性的综合优化技术	7
3.4. 机组低负荷运行的适应性优化技术	8
3.5. 三维滑压运行曲线的综合优化技术	9
3.6. 抽汽机组热电负荷分配的综合优化技术	9
3.7. 机组 AGC 及一次调频性能综合优化技术	9
4. 技术特色及优势	10
4.1. 汽轮机高精度仿真模型	10
4.2. 经济性和安全性等多目标的综合优化	10
4.3. 流量特性的准确辨识	10
4.4. 三维滑压曲线的二维设计及实现方法	10
4.5. 在线修改规律，消除非计划停机损失	11
4.6. 技术成熟度高，实际经验丰富	11
5. 技术的成果产出	11
5.1. 申请的发明专利	11
5.2. 开发的专业分析软件	15
5.3. 在国内及国际高水平期刊发表的文章	16
5.4. 技术成果鉴定及所获奖励	17
6. 附录一：产品及技术的推广应用	18
7. 附录二：部分用户使用证明	22



1. 成果简介

1.1. 技术服务支持单位介绍

哈尔滨工业大学先进动力技术研究所，现有教师 20 名，其中有教授 6 名，副教授 5 名，硕士研究生与博士研究生共 120 余名。研究所密切结合国家的重大技术需求，获得了国家自然科学基金、总装探索一代、国防基础科研、航天集团等多方面的资助。在热力机械自动控制领域积极探索新的研究方向，主要研究方向为动力系统建模及控制、大机组和大电网交互作用和协调等。先后承担了国家重点基础规划项目、自然科学基金项目、863 项目、国防基础科研重点项以及横向课题 60 余项。获中国青年科技奖、黑龙江省科技进步二等奖 1 项，国防科技三等奖 1 项。目前主持国家杰出青年科学基金 1 项、国家自然科学基金重点项目 1 项、面上项目 2 项，国家 863 计划一级课题 4 项，国防基础科研重点项目 2 项。共发表论文 500 余篇，被 SCI 收录 300 余篇，已授权国家发明专利近 100 项。

1.2. 产品及技术介绍

汽轮机的流量特性曲线和最优主蒸汽压力对机组的安全性、调节特性以及经济性有着重要的影响，其设计必须综合热力学、气体动力学、转子动力学等相关专业的理论和知识进行系统的理论分析和试验研究。哈工大先进动力技术研究所汽轮机课题组(以下简称本课题组)，系统、细致地分析了配汽对机组安全性、经济性的影响，并且进行了大量的理论分析和实验研究，建立了一套完整的汽轮机调门流量特性曲线和最优运行主蒸汽压力的综合分析和优化的产品与技术服务相结合的方法。

目前，该产品的一项子技术已进入《煤电节能减排升级与改造行动计划(2014—2020 年)》的《燃煤电厂节能减排主要参考技术》推广目录，属于现役机组节能改造技术。主要内容如下“汽轮机阀门管理优化，通过对汽轮机不同顺序开启规律下配汽不平衡汽流力的计算，以及机组轴承承载情况的综合分析，采用阀门开启顺序重组及优化技术，解决机组在投入顺序阀运行时的瓦温升高、振动异常问题，使机组能顺利投入顺序阀运行，从而提高机组的运行效率，预计可降低供电煤耗 2~3g/kWh。技术成熟，适用于 20 万千瓦以上机组。

准确合理的阀门流量特性曲线不仅能够有效提高机组控制精度、改善机组的安全性，而且还能够保证机组滑压运行曲线处于最优经济状态。然而，当机组调门节流特性发生改变时，往往不能及时被发现并同时同时对机组滑压运行曲线进行调整。所以，本课题组进一步开发一套调门流量特性的 3D 可视化监测系统，实现对调门部件运行状态的在线监测和故障预警。当机组高调门流量特性，不仅能够对高调门的喷嘴配汽特性故障进行预警，保证机组的安全稳定性；而且还能够方便电厂专业人员进行直观和方便的观察和操作，指导运行人员实时对机组最优滑压点进行优化调整，实现机组复杂变工况模式下滑压运行的高效经济性。



2. 系统平台介绍

2.1. 系统组成及平台界面功能介绍



图 2-1 系统登录界面

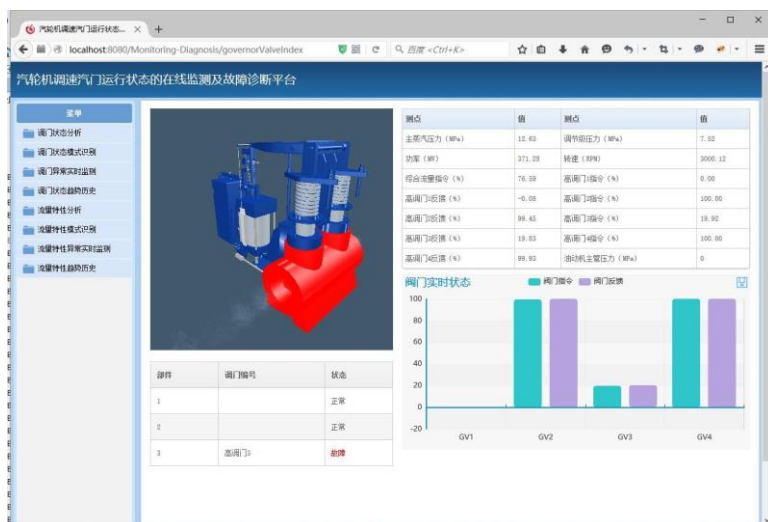


图 2-2 功能界面--调门 3D 可视化实时监控

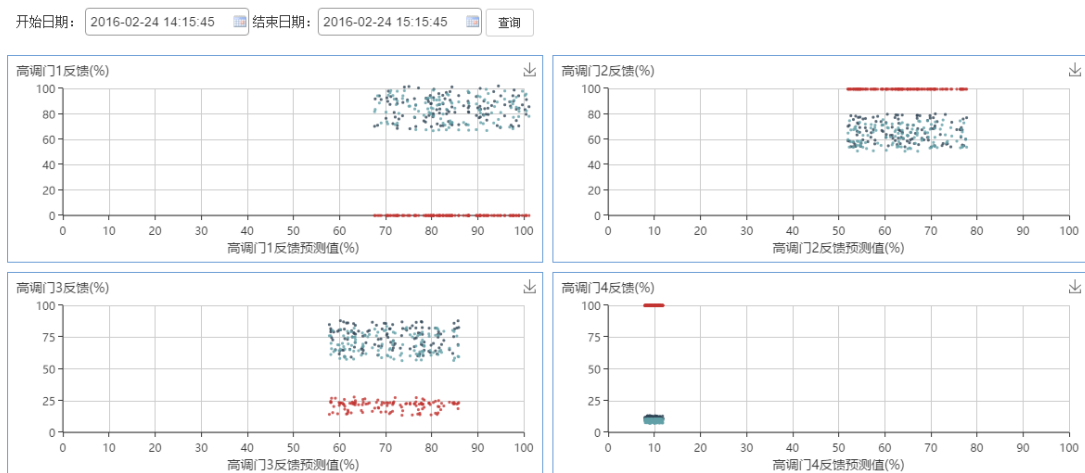


图 2-3 功能界面--调门状态模式识别

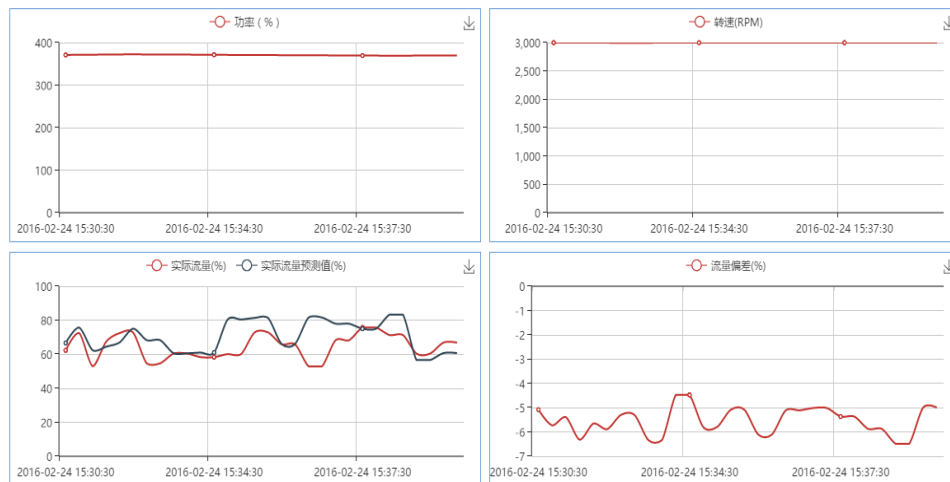


图 2-4 功能界面--流量特性异常实时监测

汽轮机调速汽门运行状态的在线监测及故障预警平台的设备情况：1 台工控机+1 台服务器+1 个显示器+1 台平板电脑（移动终端，可以在厂里任何有网络的地方看）。该系统平台不仅有运行参数的实时监测功能，而且还有关键部件的预警功能：

- 1) 调速汽门卡涩故障预警
- 2) 阀门摆动故障预警
- 3) 高调门流量特性改变诊断
- 4) 阀头脱落主动防御
- 5) AGC 及一次调频能力评估
- 6) 热电负荷优化分配

传统的阀门流量特性和滑压运行曲线优化属于离线技术服务，虽然研究成果比较多、实践经验比较丰富，但是仍然具有以下局限性：

- 1) 受地域限制，响应速度慢；
- 2) 故障数据获取量受人工技术限制，对故障处理的有效性有一定的影响；
- 3) 设备二维显示，难以及时指出具体部件和位置；
- 4) 服务器存储数据，不利于技术人员对故障进行诊断分析。

而本软件系统平台区别于传统的阀门流量特性和滑压运行曲线优化属于离线技术服务，具有以下几个特色和优势：

- 1) 实时监测机组调门性能，调门特性发生较大改变时，给出提示；
- 2) 培训电厂专业人员对一些简单的故障进行及时处理；
- 3) 实时监测机组安全性，对机组调门做出相关的故障预警和性能退化预判，以便于采取措施进行处理；
- 4) 三维可视化，及时掌握故障部件具体位置；
- 5) 基本性能监测及故障数据单独存储，便于技术服务人员及时获取大量有效信息。

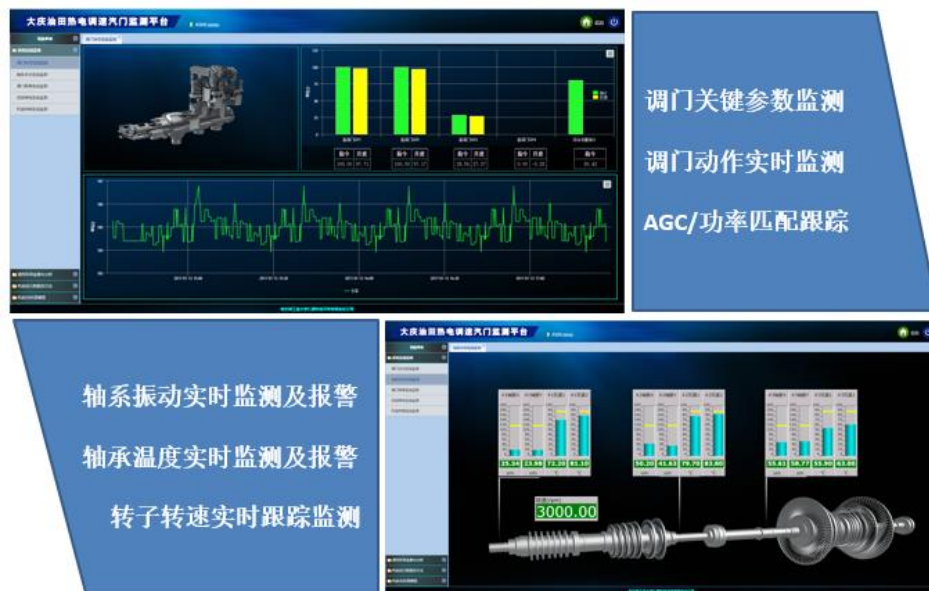


2.2. 产品应用案例

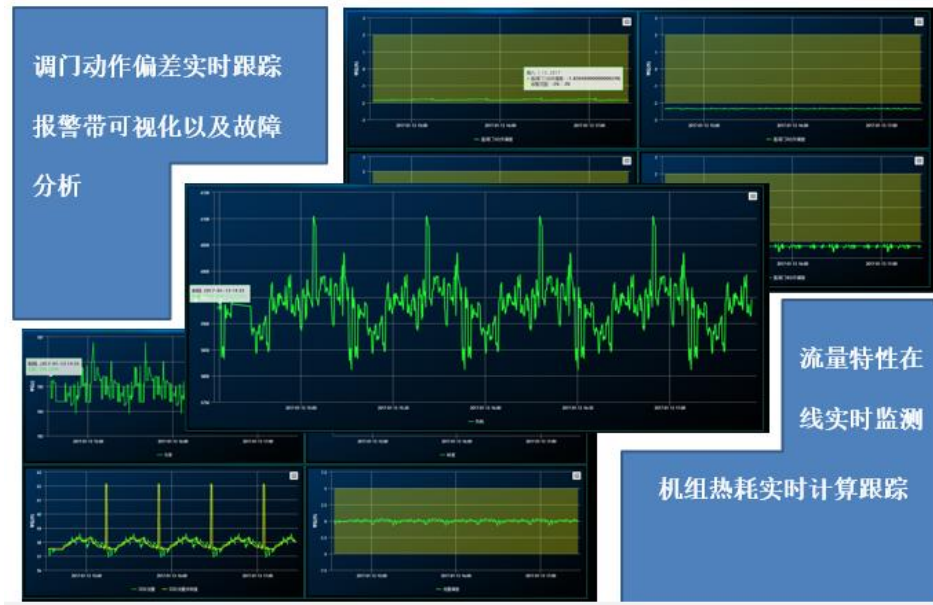
该产品最初来源于贵州电科院的一个机组远程监测项目，后经融入哈三电厂的实时监测平台项目以及哈汽厂国核自仪 TDM 系统的一些理念和元素，形成最终的调门性能的综合监测及故障预警平台，并配备了相应的技术服务支持。目前，已经在几个电厂进行小批量投产应用测试，如大庆油田热电厂、吉林长山热电厂、江浙滨海热电厂。如下图 2-5 所示，为油田热电厂的汽轮机端产品部分主要功能界面。



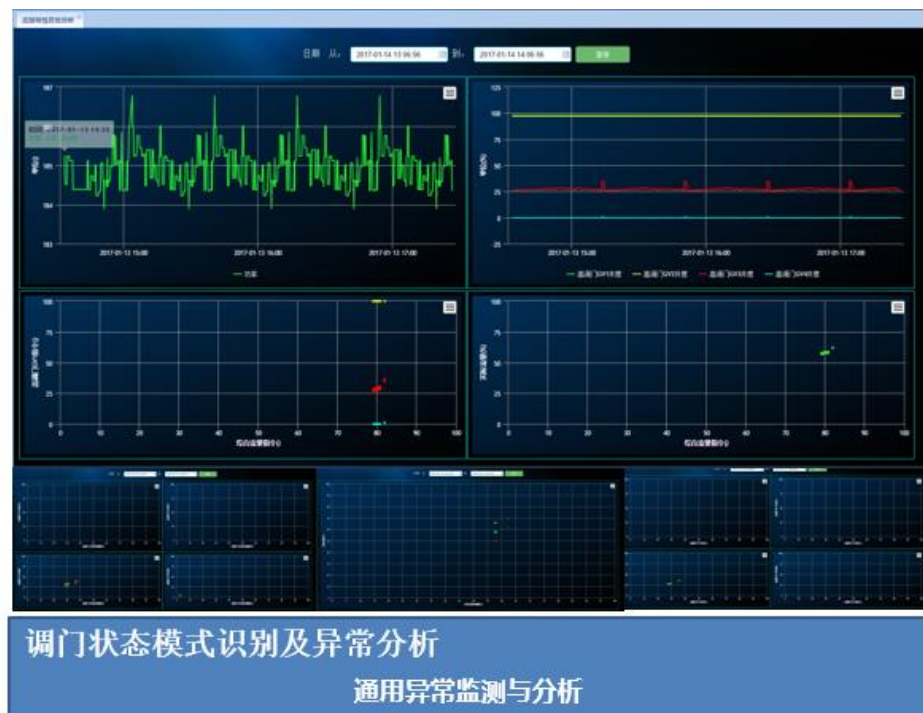
(1) 主界面



(2) 调门性能监测界面



(3) 流量特性及通流能力监测



(4) 调门状态异常检测



诊断结果总览					
2017-01-07 14:16:43至2017-01-14 14:16:43					
检测部件	故障特性	高调门1	高调门2	高调门3	高调门4
总故障点数	0.0	0.0	6600.0	6573.0	6600.0
故障比例 (%)	0.0	0.0	100.0	99.5909090909091	100.0
报警次数	0	0	165	165	165

故障特性故障诊断报警列表					
时间	故障	机组状态	故障点数	故障报警比例 (%)	故障对策

高调门1故障诊断报警列表					
时间	故障	机组状态	故障点数	故障报警比例 (%)	故障对策

高调门2故障诊断报警列表					
时间	故障	机组状态	故障点数	故障报警比例 (%)	故障对策
2017-01-13 17:25:44	高调门2调节迟缓	运行	40.0	100.0	高调门2调节不灵敏,有可能是高调门卡涩导致,若长时间处于该报警,建议检查高调门
2017-01-13 17:24:44	高调门2调节迟缓	运行	40.0	100.0	高调门2调节不灵敏,有可能是高调门卡涩导致,若长时间处于该报警,建议检查高调门
2017-01-13 17:23:44	高调门2调节迟缓	运行	40.0	100.0	高调门2调节不灵敏,有可能是高调门卡涩导致,若长时间处于该报警,建议检查高调门
2017-01-13 17:22:44	高调门2调节迟缓	运行	40.0	100.0	高调门2调节不灵敏,有可能是高调门卡涩导致,若长时间处于该报警,建议检查高调门
2017-01-13 17:21:44	高调门2调节迟缓	运行	40.0	100.0	高调门2调节不灵敏,有可能是高调门卡涩导致,若长时间处于该报警,建议检查高调门
2017-01-13 17:20:44	高调门2调节迟缓	运行	40.0	100.0	高调门2调节不灵敏,有可能是高调门卡涩导致,若长时间处于该报警,建议检查高调门
2017-01-13 17:19:44	高调门2调节迟缓	运行	40.0	100.0	高调门2调节不灵敏,有可能是高调门卡涩导致,若长时间处于该报警,建议检查高调门
2017-01-13 17:18:44	高调门2调节迟缓	运行	40.0	100.0	高调门2调节不灵敏,有可能是高调门卡涩导致,若长时间处于该报警,建议检查高调门
2017-01-13 17:17:44	高调门2调节迟缓	运行	40.0	100.0	高调门2调节不灵敏,有可能是高调门卡涩导致,若长时间处于该报警,建议检查高调门
2017-01-13 17:16:44	高调门2调节迟缓	运行	40.0	100.0	高调门2调节不灵敏,有可能是高调门卡涩导致,若长时间处于该报警,建议检查高调门
2017-01-13 17:15:44	高调门2调节迟缓	运行	40.0	100.0	高调门2调节不灵敏,有可能是高调门卡涩导致,若长时间处于该报警,建议检查高调门
2017-01-13 17:14:44	高调门2调节迟缓	运行	40.0	100.0	高调门2调节不灵敏,有可能是高调门卡涩导致,若长时间处于该报警,建议检查高调门
2017-01-13 17:13:44	高调门2调节迟缓	运行	40.0	100.0	高调门2调节不灵敏,有可能是高调门卡涩导致,若长时间处于该报警,建议检查高调门

机组历史数据管理、运行日志查询、机组故障

诊断记录查询并可生成详细诊断报告

(5) 机组历史运行状态查询



(6) 汽轮机部件 3D 可视化及拆解安装展示

图 2-5 油田热电厂汽轮机性能监测与故障诊断端产品



3. 产品配套的关键技术服务项目

3.1. 单/顺序阀的无扰切换优化技术

研究得到大功率汽轮机调节级配汽不平衡汽流力的产生和作用机理，能够解决机组的顺序阀安全投运问题；解决机组瓦温偏高或者轴振偏大的问题，尤其是机组由于瓦温和轴振故障而不能安全投运顺序阀，通过单/顺序阀的无扰切换技术，可使机组安全投运顺序阀：对于 200MW~660MW 等级的机组，低负荷运行区域的供电煤耗可降低 $2\sim 5\text{g/KW}\cdot\text{h}$ ；

- 1) 解决由于机组调门流量特性曲线规律设计不当，导致顺序阀运行方式下出现的#1、#2 瓦瓦温偏高或者两个测点温度值偏差大的问题，以及#1、#2 瓦轴振偏大或者两个测点振动值偏差大的问题，可以综合考虑机组轴承承载能力，合理分配调节级剩余气流量，综合优化瓦温和振动水平；尤其是异喷嘴组数目引发的调节级不平衡汽流力的处理问题；
- 2) 解决由于机组调门流量特性曲线规律设计不当，导致机组在某些常运行负荷点存在的气流激振现象而出现机组轴振突增的问题；

解决机组在单阀/顺序阀切换过程中，由于调门流量特性曲线规律设计不合理，出现负荷大幅波动、主汽压不稳定、阀门剧烈摆动问题，切换性能较差的问题。机组在单/顺序阀切换过程中的负荷波动最大不超过 20MW，最小负荷波动仅为 2MW，实现无扰切换的功能。

3.2. 喷嘴调节的最优重叠度设置优化技术

- 1) 如果机组投运时间较久，调门流量特性曲线规律设计时并没有考虑深度调峰的要求，低负荷时机组处于三阀运行状态，调节级和高压缸效率也会偏低，严重影响机组的经济性，尤其是对于 600MW 等级的早期国外引进机组，通过调门流量特性曲线优化，低负荷运行区域的供电煤耗可降低 $1\text{g/KW}\cdot\text{h}$ 左右；
- 2) 解决机组在冲转过程中，由于机组阀门流量特性曲线与 PID 调节参数不匹配而引发的转速严重超调的问题，提高机组起机安全性；
- 3) 解决顺序阀运行方式下，由于重叠区域设计不合理导致的机组出现阀门高频摆动或者大幅摆动的问题，减小 EH 油压波动范围；
- 4) 如机组顺序阀规律的阀门开启重叠度设置偏大，通过综合优化机组调门流量特性曲线规律的阀门开启重叠度，对于 200MW~660MW 等级的机组，在阀门重叠度区域运行的供电煤耗可降低 $0.2\sim 0.5\text{g/KW}\cdot\text{h}$ 。

3.3. 高调门流量特性的综合优化技术

- 1) 通过调门流量特性曲线优化，还可以避开由于高压调节阀门本身设计缺陷导致机组运行至某些负荷点出现阀体振动问题；
- 2) 通过调门流量特性曲线优化，开发了阀门硬件问题引发负荷突变的故障诊断技术，能



够诊断由于机组运行硬件磨损而出现的影响机组经济性、安全性以及调节性的问题；

- 3) 设计机组故障缺陷状态下经济性调门流量特性曲线优化规律，解决由于故障缺陷而不得不停机检修或者直接切换至单阀方式运行，所带来的各种损失；
- 4) 解决顺序阀运行方式下，由于机组阀门流量特性曲线与汽轮机 PID 调节参数不匹配引发的高调门高频大幅摆动问题；
- 5) 调门流量特性曲线优化所也能解决机组的调节性较差问题，尤其是由于调门流量特性曲线规律设计不当，导致阀门综合流量特性曲线的线性度较差，引发机组跟踪负荷指令迟缓（甚至负荷振荡问题）。通过机组流量特性曲线优化，直接改善机组的 AGC 指标，使机组 AGC 扭亏为盈。

3.4. 机组低负荷运行的适应性优化技术

- 1) 开发了机组深度调峰优化运行的改造策略及应用软件；如果机组投运时间较久，调门流量特性曲线规律设计时并没有考虑深度调峰的要求，低负荷时机组处于三阀运行状态，调节级和高压缸效率也会偏低，严重影响机组的经济性，尤其是对于 600MW 等级的早期国外引进机组，通过调门流量特性曲线优化，低负荷运行区域的供电煤耗可降低 $1\text{g/KW} \cdot \text{h}$ 左右；
- 2) 开发了流量特性辨识软件，如机组顺序阀规律的阀门开启重叠度设置偏大，通过综合优化机组调门流量特性曲线规律的阀门开启重叠度，对于 200MW~660MW 等级的机组，在阀门重叠度区域运行的供电煤耗可降低 $0.2\sim 0.5\text{g/KW} \cdot \text{h}$ ；
- 3) 开发了机组异喷嘴组数目优化组合软件，如果机组高压调节阀门所对应的喷嘴数目存在一定差异性，通过综合优化可以使机组在常运行负荷点的经济性处于最优状态，对于 200MW~660MW 等级的机组，不同负荷点供电煤耗最大可降低 $1\text{g/KW} \cdot \text{h}$ ；
- 4) 并且，如果由于调门流量特性曲线规律设计不佳，机组可能会在低负荷时上下半缸进汽不均而出现温差偏大致使漏气量增大的问题，通过调门流量特性曲线的综合优化可以减小低负荷时上下半缸温差偏大问题，同时，对于 200MW~660MW 等级的机组，在相应的运行负荷区域内的供电煤耗可降低 $0.2\sim 0.5\text{g/KW} \cdot \text{h}$ ；
- 5) 同时，对于空冷机组，如果机组背压变化范围较大同时高调门对应的喷嘴组数目还存在差异性，可以通过调门流量特性曲线优化提高机组常运行负荷点的经济性；对于抽汽供热机组（或者抽汽用于工业生产的机组），如果机组的抽汽量变化范围较大同时高调门对应的喷嘴组数目还存在差异性，则通过调门流量特性曲线优化也可以提高机组常运行负荷点的经济性；
- 6) 最后，针对大功率机组，开发了低负荷适应性改造软件，通过优化计算得到最优喷嘴组组合方案，对多余喷嘴采用堵住的策略，根据不同的机组及常运行负荷点煤耗可降低 $0.5\sim 1\text{g/KW} \cdot \text{h}$ 。



3.5. 三维滑压运行曲线的综合优化技术

国内的火电机组一般都是采用汽轮机厂家提供的理论滑压运行曲线，或者在机组投运一段时间后再基于机组的现场实际运行数据对理论滑压曲线进行优化，确定出**负荷与滑压值**之间的最优对应关系，从而提高机组的运行经济性，达到节能降耗的目的。但是，这种采用以功率（负荷）为横坐标的滑压运行曲线存在一定的局限性，没有考虑**背压及抽汽**的变化对机组的影响。尤其是对于抽汽供热机组和空冷机组，其**抽汽量**和**背压变化**对滑压运行曲线的影响更大，极大地影响了机组的运行经济性

- 1) **提高抽汽供热机组的变工况运行经济性：**如果机组在供热期和非供热期都是一直处于定压运行方式，则机组的滑压综合优化潜力是最大的：一般来讲，对于 200MW~660MW 等级的机组，通过滑压综合优化，在一些常运行负荷点的供电煤耗可降低 $1\sim 3\text{g/KW}\cdot\text{h}$ 左右；如果机组在供热期和非供热期都是一直采用以负荷压力查询点的方式进行滑压运行，则对于 200MW~660MW 等级的机组，通过滑压综合优化，在一些常运行负荷点的供电煤耗平均可降低 $0.5\sim 2\text{g/KW}\cdot\text{h}$ 左右；
- 2) **提高背压变化范围大机组的变工况运行经济性：**如果机组在冬季和夏季以及白天和晚上的背压大范围变化期间，都是一直处于定压运行方式，则机组的滑压综合优化潜力是最大的：一般来讲，对于 200MW~660MW 等级的机组，通过滑压综合优化，在一些常运行负荷点的供电煤耗平均可降低 $1\sim 3\text{g/KW}\cdot\text{h}$ 左右；如果机组在冬季和夏季以及白天和晚上的背压大范围变化期间，都是一直处于采用以负荷压力查询点的方式进行滑压运行，则对于 200MW~660MW 等级的机组，通过滑压综合优化，可使机组在一些常运行负荷点的供电煤耗可降低 $0.5\sim 2\text{g/KW}\cdot\text{h}$ 左右。

3.6. 抽汽机组热电负荷分配的综合优化技术

一般来讲，厂内有多台机组供热时，存在一个最优的负荷调度问题。因此，增加负荷优化分配控制系统后，能够实时地对全厂热电负荷进行优化分配，以达到最佳的机组热电分配效果，另外还可以根据机组的耗差信号动态调整机组的热电负荷，使机组热电负荷的分配更加趋向合理，保证了在全厂总的电负荷和热负荷指令一定的情况下，煤耗达到最小，由此降低了发电煤耗，节约了发电成本，经济效益显著提高。全厂热电负荷分配优化系统实施简单，投资较少，但投入后的回报是非常可观的。

目前电厂供热抽汽机组间电负荷及热负荷进行分配优化时，均没有考虑冷凝器背压的影响，因此，本课题将研究考虑冷凝器背压的情况下，供热抽汽机组间电负荷及热负荷的分配优化问题，以使冷凝器背压变化如白天、夜间以及冬季、夏季时，电负荷及热负荷分配最优。

3.7. 机组 AGC 及一次调频性能综合优化技术

随着新能源入网的规模越来越大，电网的调频能力要求也随之增大，电网对并网发电厂的 AGC 考核也越来越重视。加装 AGC 设备的并网发电厂的 AGC 性能的提高，不仅有利于



电网稳定性的提高，也可以为本厂争取尽量多的补偿电量。AGC 的性能与发电机组的运行特性紧密相关，在提高 AGC 性能的同时，要兼顾锅炉汽压、主蒸汽温度、再热蒸汽温度和设备寿命等相关安全要素，综合评估，得到发电机组的最佳运行状态。针对此发电机组，建立面对控制的数学仿真模型，根据发电机组历史运行数据，调整参数，复现发电机组的整个运行状态，分析 AGC 性能提高的潜力点；结合发电机组的安全要素，挖掘发电机组 AGC 性能的最大潜力，并在发电机组的仿真模型进行试验和调试；最后，对发电机组进行 AGC 性能相关改造和调试。

与 AGC 性能优化技术类似，一次调频能力优化也需要建立发电机组面对控制的数学仿真模型，寻找一次调频性能提高的潜力点，针对发电机组做整体优化和调试，最大程度的挖掘机组一次调频性能提高的潜力。

4. 技术特色及优势

4.1. 汽轮机高精度仿真模型

本技术可以根据机组自身特性进行专业建模，建立超临界 660MW 机组复杂变工况模式下的动态耦合模型，包括油动机模型、蒸汽容积效应模型、转子模型、回热系统模型、再热系统模型等。同时，为了满足本项目进行各种运行工况下的仿真优化分析等能力，还需要基于机组实际运行数据完成整个系统数学模型的仿真校验，保证模型与实际物理系统具有较高吻合度，能够如实反映整个系统的静态和动态耦合影响关系。

4.2. 经济性和安全性等多目标的综合优化

本技术与国内的一般技术最大的不同点在于：多目标综合优化。在考虑热力学、气体动力学等相关专业的基础上进行系统的理论分析和试验研究，将机组的经济性、安全性以及调节性能等问题做多目标优化，所设计得到的调门流量特性曲线规律兼顾了调节效率、高压缸效率、瓦温、轴振、阀门流量特性线性度等所有因素，包括将机组滑压运行和热电负荷分配进行综合优化，全面挖掘提高机组的运行经济型，是一项多目标综合优化技术。当然，这也包括机组 AGC 和一次调频能力的综合优化。

4.3. 流量特性的准确辨识

汽轮机高压调节阀门的流量特性辨识是整个调门流量特性曲线优化技术的核心，阀门流量特性辨识的准确性直接影响机组的安全性、经济性以及调节性能。

4.4. 三维滑压曲线的二维设计及实现方法

目前采用的以功率（负荷）为横坐标的滑压运行曲线存在一定的局限性，没有考虑背压及抽汽的变化对机组的影响。本产品针对对于抽汽供热机组和空冷机组，所设计的滑压曲线



能够考虑抽汽和背压变化的影响，改善机组的变工况运行经济性。

4.5. 在线修改规律，消除非计划停机损失

目前，调门流量特性曲线规律采用在线修改技术，机组运行期间即可完成调门流量特性曲线优化改造，整个改造过程不超过 1 小时，避免由于改造影响机组正常运行所带来的经济损失，或者由于不能进行调门流量特性曲线优化而只能节流调节的低效率运行。

4.6. 技术成熟度高，实际经验丰富

该科研成果在工程实际中得到了广泛的推广应用，并且成功应用到机组的改进设计中，结果表明能够提高机组安全性及经济性，经济效益与社会效益显著，用户反映良好。所综合优化改造过的机组型号范围为 **50MW~660MW**，从水冷到空冷机组、从亚临界到超临界机组、既有抽汽用于居民供热的也有抽汽用于工业生产的，基本遍历了全国的典型机组类型；此外还与国内的两大汽轮机生产商开始合作，针对新型号、大功率以及高参数的汽轮机的调门流量特性曲线规律进行设计指导。

并且，最早优化改造的机组，目前已经安全运行接近 20 年。

5. 技术的成果产出

5.1. 申请的发明专利

本调门流量特性曲线优化技术经过多年的理论研究和实际试验，积累了一些新的技术和方法，近 5 年申请的专利有 7 项，正在申请的有 3 项；其中，已经取得国家专利局授权的发明专利达到 6 项，具体专利如下表 1 所示：

表 1 调门流量特性曲线综合优化技术的专利成果

	专利名称	受理授权号	发明人
1	汽轮机配汽规律的一种流量线性变化的无扰切换方法	201310015948X	刘金福；万杰；等
2	汽轮机单阀或多阀的一种非线性自动无扰切换方法	201210539660.8	刘金福；万杰；等
3	考虑汽轮机实际运行约束的各喷嘴组的喷嘴数目优化设计	201210168056.9	刘金福；万杰；等
4	基于改进遗传算法的汽轮机调节级喷嘴数目设计优化方法	201210149399.0	刘金福；李飞；等
5	一种提高空冷汽轮机组效率的喷嘴装置	200910071437.3	于达仁；段岩峰；等
6	一种考虑背压影响的汽轮机配汽最佳方式的优化实现方法	201310264053X	万杰；刘金福；等
7	一种确定抽汽供热机组实际热耗的方法	201210122463.6	刘金福；胡宝权；等
8	基于高调门开关试验的汽轮机负荷突变故障诊断方法	2014105536759	万杰；孙建国；等
9	一种调门进汽顺序优化的通用测试方法	201510267316.1	万杰；马国林；等
10	一种以主蒸汽流量作为调度变量获取汽轮机滑压曲线方法	201210180860.9	刘金福；万鹏程；等



	专利名称	受理授权号	发明人
11	基于空冷机组三维滑压曲线二维设计的 DCS 方法	201511022188.0	万杰；孙建国；等
12	基于抽汽点和抽汽量变化的供热机组滑压曲线 DCS 设计	201610052466.6	万杰；李兴朔；等
13	基于配汽规律切换的 200MW 供热机组运行方式优化	201610108192.7	李兴朔；万杰；等
14	一种基于热管的间接空冷机组的间冷系统	201610266699.5	万杰、李兴朔；等
15	间接空冷机组高背压供热宽适应性控制机构及控制方法	201610263569.6	万杰、李永生；等
16	一种基于排汽分流的宽适应性空冷系统	201610265040.8	于达仁、刘金福、万杰；等
17	一种基于蓄水池储冷的间接空冷系统	201610265051.6	刘金福、万杰；等
18	一种组网运行的空冷系统	201610265110.X	刘金福、万杰；等
19	一种六高调门汽轮机顺序阀优化设计方法	201610768525.9	万杰；高岩松；等
20	一种火电机组负荷振荡与负荷突变故障的在线诊断方法	201610726795.3	李兴朔；万杰；等
21	一种基于多抽汽点大抽气量的火电机组滑压运行优化系统	201611018375.6	万杰；俞金树；等
22	适用全工况变负荷运行的八高调门汽轮机顺序阀优化方法	201611109167.7	王波；王威；万杰

此外，发表的国内国际高水平文章，有独立技术开发的成果，也有与电厂合作进行推广应用的效果。其中，部分文章信息如下表 2 所示。

表 2 配汽综合优化技术的近几年文章成果

	文章名称	杂志	作者
1	汽轮机配汽设计的优化	动力工程学报	于达仁，刘占生,等
2	汽轮机油系统故障监测与诊断综述	中国电力	张志强，于达仁，徐基豫.
3	DEB 的新认识--增益调度控制	热能动力工程	于达仁，徐志强，翁一武等
4	基于智能信息处理的电厂优化运行技术	节能技术	于达仁，李晓栋，等
5	降低阀门节流损失的阀门管理新策略	汽轮机技术	于达仁，刘金福，等
6	滑动轴承非线性动态油膜压力分布特性的研究	动力工程学报	杨金福，杨昆，于达仁等
7	汽轮机蒸汽功率测量的多传感器信息融合方法	汽轮机技术	范轶，唐井峰，于达仁等.
8	计及回热器蓄热效应的汽轮机动态模型	中国电机工程学报	于达仁，郭钰锋，王晓娟等.
9	考虑再热压力对高压缸影响的再热汽轮机模型	汽轮机技术	于达仁，王建波，徐基豫等
10	提高空冷机组效率的阀门管理	汽轮机技术	段岩峰，刘金福，于达仁等
11	国产引进型 600MW 汽轮机顺序阀投运情况调查	汽轮机技术	徐志强，宋英东，范轶等
12	Experimental Study on Fault Caused by Partial Arc Steam Forces and Its Economic Solution	ASME	于达仁，段岩峰，刘金福等



	文章名称	杂志	作者
13	Establishment of Nonlinear Dynamic Model for Prediction of Rotor dynamic Instability of Turbine Rotor-Bearing System Caused by Partial Admission	ASME	崔颖, 刘占生, 于达仁等
14	基于遗传算法的抽汽供热机组热电负荷分配优化	节能技术	柏春光, 万杰, 刘娇等
15	热电联产机组抽汽供热期的汽轮机滑压运行优化	节能技术	万杰, 许天宁, 李泽等
16	汽轮机高调门硬件问题引发的负荷突变故障及其诊断测试方法	汽轮机技术	万杰, 张宏学, 等
17	Turbine HP-Valve's Excitation Fault Caused by Steam's Unsteady Flow and its Economic Solution	AMM	万杰, 谷军生, 任国瑞等
18	基于生成型深信度网络的回归算法鲁棒性分析	科学技术与工程	万杰, 马国林, 等;
19	Turbine Load Mutation Caused by HP-Valve Fault and Its Economic Solution	AMM	万杰, 孙建国, 刘晓婷等
20	考虑背压变化的空冷机组滑压运行曲线优化	汽轮机技术	万杰, 孙建国, 等
21	Sliding Pressure Optimization Method for Steam Turbine with Main Steam Flow Rate as Independent Variable	International Journal of Simulation: Systems, Science & Technology	万杰, 赵婷, 刘金福, 等
22	高参数汽轮机高调门汽流流动失稳故障的分析及其经济性解决方法	节能技术	万杰, 唐海峰, 等
23	大功率汽轮机高压缸内部流场流动特性分析	汽轮机技术	刘世雄, 万杰, 等
24	Turbine Load Oscillation Fault Caused by Its HP-Valve Problem	AER	李兴朔, 徐卓, 万杰 等
25	由高调门特性问题引发的汽轮机负荷失控故障及其诊断方法	汽轮机技术	赵婷, 薄利明, 万杰, 等

其中, 本配汽优化技术专利受理书及授权书如下图 5-1 所示:



(1)

(2)

(3)

(4)

(5)

(6)

(7)

(8)

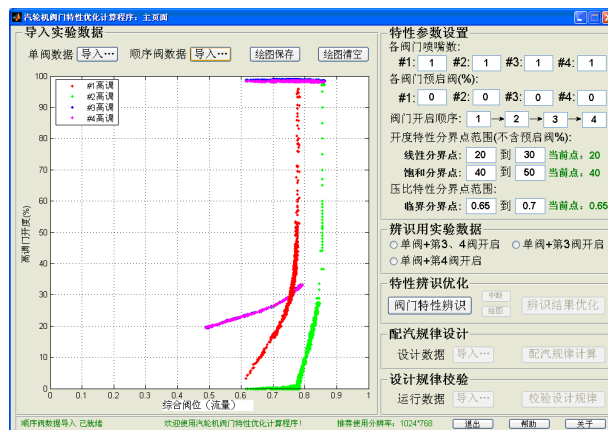
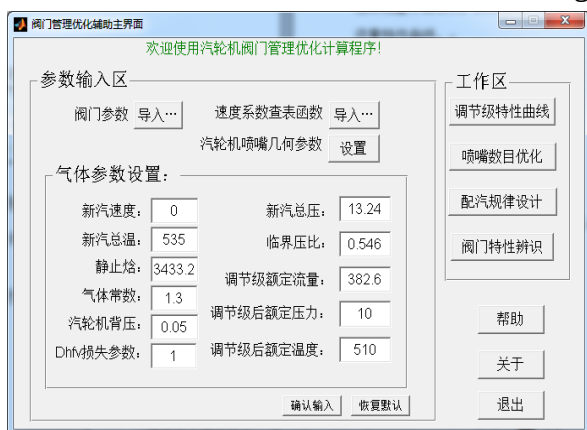
(9)



5.2. 开发的专业分析软件

本课题组经过多年的技术积累和研发,已经突破了调门流量特性曲线优化的几个关键技术,并且,本调门流量特性曲线综合优化的几个关键技术已经集成在一起形成软件,平台主界面如下图 5-2 所示。已成功研制开发了基于汽轮机调节级变工况机理计算与机组实际运行数据相结合的阀门流量特性曲线辨识计算平台,如下图 5-3~图 5-5 所示。在实际机组的调门流量特性曲线优化改造中取得了良好的应用效果。应用该平台计算得到的特性曲线,能够较好地与机组实际的阀门流量特性曲线相吻合,阀门综合流量特性的线性度改善明显,能够很好的提高机组对 AGC 和一次调频的考核能力。

同时, 如下图 5-5 所示, 本课题组还开发了一套的阀门重组综合优化技术软件。通过最优的阀门重组, 兼顾瓦温和轴振的基础上, 提高机组效率; 根据机组经常运行的负荷区段以及机组各喷嘴组的喷嘴数差异, 通过阀门重组调整阀门的开启次序, 使得经常运行的这些负荷点附近调节阀处于全开或不开状态, 减小调门流量特性曲线节流损失, 能够最大限度的提高机组经常运行负荷区段的效率, 提高运行经济性; 实际测试 200MW 机组, 通过阀门重组优化后的缸效提高约 2%, 煤耗降低约 $1\text{g/KW} \cdot \text{h}$ 。





Institute of Advanced Power Technology
Harbin Institute of Technology. Harbin, China
哈尔滨工业大学先进动力技术研究所

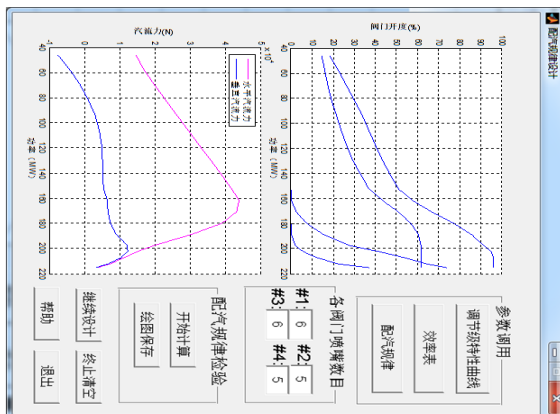


图 5-4

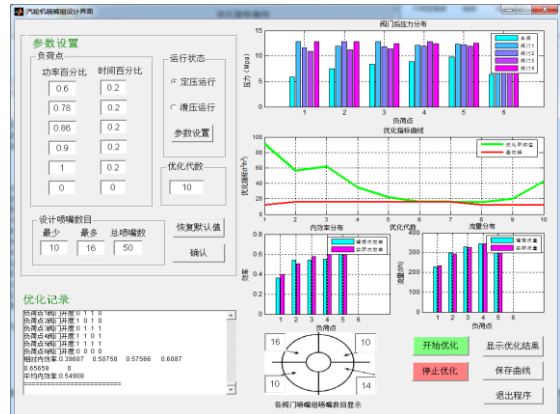


图 5-5

并且，经过二十几年的科技成果积累，将大部分关键技术形成 2 个统一的软件平台，如图 5-6 和图 5-7 所示。此外，本课题组还申请了一些相应的软件著作权。



图 5-6



图 5-7

5.3. 在国内及国际高水平期刊发表的文章

目前，研究所独立以及与电厂等单位合作撰写并发表的国家级核心期刊论文几十篇，如《节能技术》、《动力工程》、《汽轮机技术》以及《电机工程学报》等；同时，撰写汽轮机专业专著《汽轮机调节原理》一本；包括 EI 检索论文以及国际高水平 SCI 检索 ASME 杂志论文十几篇，如图 5-8 所示。



图 5-8 课题组发表的高水平文章及专著



5.4. 技术成果鉴定及所获奖励

2004 年 12 月由黑龙江省科技厅主持召开了“汽轮机配汽设计优化技术”鉴定会，鉴定委员会委员包括梁维燕院士、朱家驹高工、王富美高工、孙世峰高工、刘思平高工、魏宝林高工和刘顺隆教授。鉴定委员会认为：“汽轮机配汽设计优化技术”具有重要的理论价值和工程实用价值，处于国内领先水平，具有广泛的推广应用前景。调门流量特性曲线优化技术还获得了省级的相关奖励，获奖证书如图 5-9 和图 5-10。



图 5-9

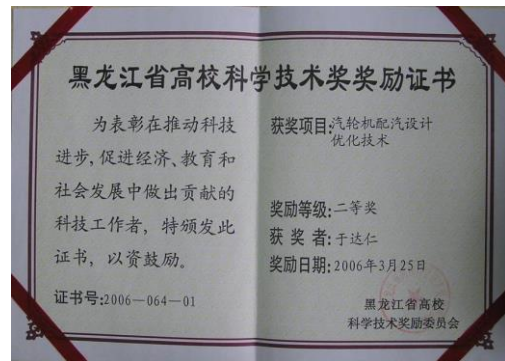


图 5-10



图 5-11



图 5-12

同时，还与华电能源哈尔滨第三发电厂合作开了两套实际应用系统“热电负荷分配”和“实时经济性监测与计算”，其中一套已经获得集团奖励，如图 5-11 和 5-12 所示。其中，实时经济性监测与计算系统，近期已升级为火电机组综合管理与运行监测系统，该系统的整体构架及部分功能概况。还与电厂和电科院合作获得了多项科技进步奖：黑龙江电网科技进步三等奖，获奖证书如下图 5-13 所示；北方联合电力集团“科技进步二等奖”和华能集团“科技进步三等奖”，获奖证书如下图 5-14 所示；国家电力集团科技进步三等奖，如下图 5-15 所示。此外，研究所经过多年的积累，还获得黑龙江省自然科学一等奖，如下图 5-16 所示。



图 5-13



图 5-14

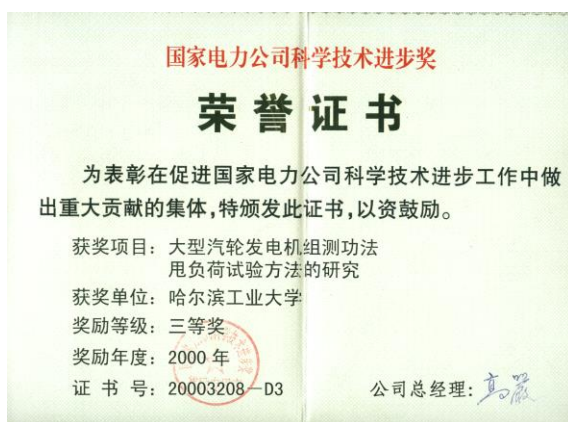


图 5-15



图 5-16



图 5-17



图 5-18

6. 附录一：产品及技术的推广应用

本调门流量特性监测及相关的优化技术经过近 20 年研究与应用，其成果的推广应用效果非常突出；目前，不完全统计结果为 300 多台机组，包括 2 个汽轮机厂和十几家电科院的技术相关合作。其中，近五年推广应用的如下表 1 所示。



表 1 近五年的技术推广及应用部分成果

序号	应用改造电厂	机组类型	配汽优化时间
在国内电厂开展的机组改造项目			
1	牡丹江第二发电厂	(1 台) 215M	2011 年
2	霍林河电坑口电厂	2 台 600MW (亚临界空冷机组)	2011 年
3	通辽发电总厂	(4 台) 200M	2011 年
4	通辽第二发电厂	(1 台) 600M (亚临界空冷机组)	2011 年
5	内蒙古达拉特电厂	(2 台) 600M (亚临界空冷机组)	2011 年
6	天津东北郊电厂	(2 台) 330M (亚临界供热机组)	2011 年
7	牡丹江第二发电厂	(1 台) 215M (供热机组)	2012 年
8	国华沧东电厂	(2 台) 660MW (超临界机组)	2012 年
9	宁夏临河电厂	(2 台) 350MW (超临界空冷机组)	2013 年
10	包头东华电厂	(1 台) 300M (亚临界供热机组)	2013 年
11	国华定州电厂	(1 台) 660MW (超临界机组)	2013 年
12	国华锦界电厂	(1 台) 600M (亚临界空冷机组)	2013 年
13	国华沧东电厂	(1 台) 660MW (超临界机组)	2013 年
14	霍煤鸿骏铝业 A 厂	(2 台) 100MW	2013 年
15	霍煤鸿骏铝业 A 厂	(2 台) 150MW	2013 年
16	霍煤鸿骏铝业 B 厂	(2 台) 300MW (亚临界空冷机组)	2013 年
17	上安电厂	(1 台) 660MW (超临界机组)	2014 年
18	国华宁东电厂	(2 台) 330MW (亚临界空冷机组)	2014 年
19	国华沧东电厂	(1 台) 600MW (亚临界机组)	2014 年
20	内蒙达拉特电厂	(1 台) 330MW (亚临界供热机组)	2014 年
21	吉林辽源电厂	(1 台) 330MW (亚临界)	2014 年
22	长春三热电厂	(1 台) 300MW (亚临界供热)	2014 年
23	吉林江南电厂	(1 台) 300MW (亚临界)	2014 年
24	大唐野马寨电厂	(1 台) 200MW	2014 年
25	青铝自备电厂	(1 台) 330MW (亚临界空冷机组)	2014 年
26	临河热电厂	(1 台) 300MW (亚临界供热机组)	2014 年
27	包头东华电厂	(1 台) 300M (亚临界供热机组)	2014 年



序号	应用改造电厂	机组类型	配汽优化时间
28	河北清苑电厂	(1 台) 330MW (亚临界空冷机组)	2014 年
29	国华沧东电厂	(1 台) 660MW (超临界机组)	2014 年
30	营口鲅鱼圈电厂	(1 台) 600MW (超临界机组)	2014 年
31	大唐发耳电厂	(1 台) 600MW (亚临界机组)	2015 年
32	包头东华电厂	(1 台) 300M (亚临界供热机组)	2015 年
33	神华亿利电厂	(1 台) 200 MW	2015 年
34	华电卓资电厂	(2 台) 200MW (空冷机组)	2015 年
35	吉林江南电厂	(1 台) 300MW (亚临界)	2015 年
36	内蒙达拉特电厂	(1 台) 330MW (亚临界供热机组)	2015 年
37	国华沧东电厂	(1 台) 600MW (亚临界机组)	2015 年
38	大唐双鸭山发电厂	(1 台) 210MW	2015 年
39	河北清苑电厂	(1 台) 330MW (亚临界空冷机组)	2015 年
40	青铝自备电厂	(1 台) 330MW (亚临界空冷机组)	2015 年
41	包头金桥电厂	(1 台) 300M (亚临界供热机组)	2015 年
42	长春四热电厂	(2 台) 300MW (供热机组)	2015 年
43	京科热电厂	(1 台) 330MW (亚临界空冷机组)	2015 年
44	国华呼伦贝尔电厂	(1 台) 660MW (超临界空冷机组)	2015 年
45	中卫热电厂	空冷岛及小汽机联合运行优化	2015 年
46	宁夏铝电电厂	铝电孤岛运行联合仿真	2015 年
47	大庆油田热电厂	300MW 机组运行方式综合优化	2016 年
48	国华沧东电厂	(1 台) 660MW (超临界抽汽机组)	2016 年
49	国华定洲电厂	(2 台) 600MW (亚临界抽汽机组)	2016 年
50	华电卓资电厂	(3 台) 200MW (供热机组)	2016 年
51	神华亿利电厂	(1 台) 200 MW (空冷机组)	2016 年
52	国电大武口电厂	(2 台) 300MW (供热机组)	2016 年
53	包头东华电厂	(1 台) 300M (亚临界供热机组)	2016 年
54	大唐鸡西热电	(1 台) 300M (亚临界供热机组)	2016 年
55	大唐哈一热	(1 台) 300M (亚临界供热机组)	2016 年
56	大唐武安电厂	(1 台) 330M (亚临界 6 调门机组)	2016 年
57	大唐珥春电厂	(1 台) 200MW (供热机组)	2016 年



序号	应用改造电厂	机组类型	配汽优化时间
58	福建鸿山电厂	(1 台) 660MW (超临界抽汽机组)	2016 年
59	内蒙古金牛热电厂	(2 台) 300M (亚临界供热机组)	2016 年
60	辽宁东方电厂	(1 台) 300M (亚临界供热机组)	2016 年
61	内蒙古赤峰热电厂	(2 台) 135M (供热机组)	2016 年
62	内蒙古达拉特电厂	(1 台) 330M (亚临界供热机组)	2016 年
63	吉林长山电厂	(2 台) 300M (亚临界供热机组)	2017 年 (进行中)
64	宁夏海勃湾电厂	(2 台) 300M (亚临界供热机组)	2017 年 (进行中)
65	辽宁调兵山电厂	(1 台) 330M (亚临界 6 调门机组)	2017 年 (进行中)
66	大唐武安电厂	(1 台) 330M (亚临界 6 调门机组)	2017 年 (进行中)
67	内蒙古京科热电厂	(1 台) 330M (亚临界 6 调门机组)	2017 年 (进行中)
与国内大型汽轮机厂、电科院等开展的相关合作			
68	哈尔滨汽轮机厂	300MW 新机型配汽规律的设计	2003 年
69	哈尔滨汽轮机厂	汽轮机远程监测及故障诊断系统	2007 年
70	上海汽轮机厂	汽轮机阀门流量特性辨识计算	2009 年
71	上海汽轮机厂	汽轮机 DEH 仿真系统开发	2010 年
72	哈尔滨汽轮机厂	双轴汽轮机甩负荷建模分析	2011 年
73	华电能源哈热电厂	抽汽机组滑压运行曲线综合优化	2011 年
74	甘肃电科院	电网频率事故与汽轮机 OPC 保护的相互影响及对策仿真	2011 年
75	哈尔滨汽轮机厂	汽轮机迟缓率测算	2012 年
76	北京国核华清研究院	CERT 试验蒸汽系统关键设备评价及设计改进方案	2012 年
75	广东电科院	原动机模型建立及仿真精度研究	2012 年
76	广东电科院	电力系统稳定与 DEH 系统特性关系研究	2013 年
78	辽宁电科院	汽轮机调节阀流量特性测试及 DEH 凸轮配汽曲线修正	2013 年
79	华电能源哈三电厂	考虑动态过程影响的火电机组经济性在线监测及分析系统	2013 年
80	华北电科院	汽轮机涉网特性参数及模型适应性研究	2013 年



Institute of Advanced Power Technology
Harbin Institute of Technology. Harbin, China
哈尔滨工业大学先进动力技术研究所

81	北京国核华清	CERT 试验蒸汽系统建模分析、方案改进及控制方案设计	2013 年
82	中科院热物理所	轴系振动结构试验台的研制	2014 年
83	北京国核华清	CERT 试验台架现场调试及控制试验优化	2014 年
84	黑龙江电科院	供热机组平抑风电不确定性的控制及优化配置分析	2014 年
85	哈汽自控公司	国核自仪科研项目 TDM 软件开发	2015 年
86	中国电科院	火电机组锅炉蓄热模型建模方法研究	2016 年
87	国网经研院	电网调频问题研究	2016 年
88	大唐东北院	汽轮机调门特性曲线优化技术推广应用	2016 年
89	国家电投电科院	汽轮机运行方式综合优化技术推广应用	2016 年
90	西安热工院	超临界 CO ₂ 循环建模仿真研究	2016 年

7. 附录二：部分用户使用证明

用户使用证明	
项目名称	超临界 660MW 机组汽轮机高调门阀体磨损问题处理
研制单位	哈尔滨工业大学先进动力技术研究所
使用单位	河北国华沧东发电有限责任公司
应用机组	#3、#4 号机组
项目起止时间	2012 年 05 月——2012 年 08 月
项目应用情况	
河北国华沧东发电有限责任公司二期（#3、#4）机组是哈尔滨汽轮机厂有限公司生产的 660MW 超临界机组，型号为 CLN660-24.2/566/566，超临界蒸汽参数：一次中间再热，单轴三缸四排汽，双背压抽汽凝汽式汽轮机。主蒸汽进汽为两个主汽门带四个高调门，顺序阀运行方式，高压调节阀开启后顺序为 CV1-CV3-CV4-CV2。 两台机组高调门 CV4 运行在 28%~32% 区间，负荷点 600MW 时，存在阀体磨损现象，导致其前面的主蒸汽管道也出现大幅振动。600MW 负荷点是机组经常运行的负荷点，阀体磨损问题严重影响机组的运行安全，虽经多方努力，但始终未能找到合适的解决方案。 针对上述问题，河北国华沧东发电有限责任公司委托哈尔滨工业大学先进动力技术研究所对 #3、#4 号机高调门的阀体磨损开展研究，以解决 #3、#4 机组在经常运行负荷点存在的汽轮机高调门阀体磨损问题。 通过现场试验，哈尔滨工业大学先进动力技术研究所对汽轮机高调门的开启规律进行重新优化设计，解决了 #3、#4 机组的高调门阀体磨损问题。经实地观察和监测，#3、#4 机组在顺序阀方式运行时，高调门 CV4 在 28%~32% 区间的阀体磨损现象消失，其它经常运行的负荷点也不存在阀体磨损问题，处理效果良好，有效地解决了影响机组安全运行的隐患。	
应用单位（盖章）	2012 年 8 月 5 日
生产技术部	

用户使用证明	
项目名称	#5 机组汽轮机配汽优化
开发单位	哈尔滨工业大学 先进动力技术研究所
使用单位	牡丹江第二发电厂
项目起止时间	2012 年 3 月——2011 年 5 月
项目情况	
牡丹江第二发电厂 #5 机组系俄罗斯生产的 K-215-130-1 型汽轮发电机组，最近大修后机组投入顺序运行时，出现汽温瞬间突增、振动偏大的问题，严重时汽温突增 10℃，振动增至 200um 左右，严重影响机组的安全运行，致使机组只能在单阀方式运行，极大地影响了机组的经济运行。 针对上述问题，哈尔滨工业大学于 2012 年 5 月对牡丹江第二发电厂 #5 机组的配汽规律进行优化设计和校核计算，达到如下效果： 1、通过重新设计阀门开启顺序及开启规律，满足了机组配汽不平衡气流以及调节阀叶片强度要求，改造后，机组能够顺利投入顺序阀方式运行，在 130MW~210MW 变负荷实际运行时，最高汽温降至 65℃ 以下，最大振动降至 125um 以下，满足了机组顺序阀运行的安全性要求； 2、通过机组的变工况计算，并结合实际运行数据的流量特性辨识修正，改造后，实测数据表明：机组阀门的综合流量指令与实际流量接近线性，阀门流量特性明显改善； 3、通过机组改造前后实测数据计算，配汽规律改造后与改造前单阀运行相比，煤耗最高降低 5g/kWh 以上，经济效益显著； 4、通过采用阀门管理的在线修改技术，机组运行期间即可完成配汽优化改造，整个改造过程不超过 1 小时，避免由于改造影响机组正常运行所带来的经济损失。	
牡丹江第二发电厂（盖章）	2012-5-16
生产技术部	

用户使用证明	
项目名称	#1-#4 机组汽轮机配汽优化
研制单位	哈尔滨工业大学 先进动力技术研究所
使用单位及机组	通辽发电总厂 #1-#4 机组
项目起止时间	2010 年 11 月——2011 年 6 月
项目情况	
通辽发电总厂 #1-#4 机组是哈尔滨汽轮机厂 70 年代设计生产的产品，汽轮机的型号为 N200-130/535/535，机组原设计的调节系统是机械液压式，后委托东方汽轮机厂将其改为纯电控系统。通过对机组的实际运行情况的调研发现，机组原有的高调门开启顺序 #1-#2-#3-#4-#5 及开度曲线线性度等都存在一些问题，机组在按照原设计的顺序阀方式运行时，存在一些安全性和安全性方面的问题。低负荷时，喷嘴数目较多的高调门开度较小，节流损失较大，同时，#3 号调门在低负荷区一直存在一个较小的残留在高调门的开度，这也会产生一定的节流损失。两者导致机组低负荷运行时的经济性较低。此外，#3 和 #4 号高调门开度特性过陡，当机组运行在此重叠区域附近时，会导致高调门的启动问题，这对高调门的工作产生不利影响。此外，机组的轴振水平较高，如 #3 瓦 Y 轴振最高达到 115um，不利于机组的安全运行。针对上述问题，哈尔滨工业大学先进动力技术研究所于 2011 年 11 月对 #1-#4 号机进行汽轮机配汽优化，所取得的优化成果简要如下： 首先，机组在优化后的顺序阀规律下，冲转过程中的振动水平以及定速平稳性较优化前有了很大的改善。然后，优化后顺序阀运行状态下，机组安全性大改善：与单阀顺序阀规律相比，#1、#2 和 #3 瓦的瓦温基本相当，都维持在较低水平 55℃~75℃ 左右，而 #1、#2 和 #3 瓦的轴振大幅降低 30um 左右，都维持在较低水平 70um 左右，安全性大有改善。同时，通过优化调门的开启的程度曲线，改善了由于原规律下的在 68% 和 88% 流量处的高调门开启过陡的规律所引起的高调门剧烈波动，E31 油压波动幅度变小，在一定程度上也改善了机组的安全性。此外，配汽优化后，顺序阀运行状态下的高调门综合流量特性曲线的线性度大大改善，这也改善了机组的调节特性，即 AGC 和一次调频性能，能够很好的满足电网考核要求。最后，配汽优化后，顺序阀运行状态下的调节级和低压缸效率，在不同的流量使得得到不同程度提高；尤其是在低负荷区域，调节级效率提高了 5% 左右，低压缸效率提高了 1% 左右；机组在相同流量下，发电功率增加，汽耗率降低，经济性得到了明显的提高。	
通辽发电总厂（盖章）	2011-5-30
生产技术部	

- 1) 沧东电厂 #3、#4 机组 2) 牡丹江第二发电厂 #5 机组（215MW） 3) 通辽电厂 #1-#4 机组（200MW）



Institute of Advanced Power Technology Harbin Institute of Technology. Harbin, China 哈尔滨工业大学先进动力技术研究所

用户使用证明	
项目名称	#1 机组汽轮机配汽优化
开发单位	哈尔滨工业大学 先进动力技术研究所
使用单位	天津国电津能热电有限公司
项目起止时间	2011 年 10 月—2011 年 11 月
项目情况	
天津国电津能热电有限公司的#1 机组，是东汽生产的 330MW 一次中间再热两缸两排汽抽汽凝汽式汽轮机（C330/262-16.7/0.3/538/538 型），机组在满设计配汽规律下存在以下几个主要问题：机组在起机采用高中压联合启停方式时转速调节性能较差，转速超调严重，最大超调 200rpm 左右；高调门实际流量特性的辨识不准确，高调门综合流量特性曲线的线性度较差，极大地影响了机组的调节性能，不能很好满足电网的考核指标；机组在顺序运行方式下的配汽规律设计不佳，导致机组在顺序运行时出现过调门的大幅波动现象，并且还伴有不同程度的大幅负荷波动问题，极大地影响了机组的安全稳定运行。因此，天津国电津能热电有限公司，于 2011 年 10 月委托哈尔滨工业大学，对#1 机组实施配汽优化工作，希望通过综合优化设计#1 机组汽轮机高调门的配汽规律，解决机组存在的安全、调节以及经济性等各方面的问题。	
哈尔滨工业大学在现场施工等技术人员积极配合下，于 2011 年 11 月 2 日对#1 机组实施配汽优化工作，优化后机组的安全性、调节性以及经济性得到极大改善：	
1、在大机组实际改造经验的基础上，#1 机组采用直接在线修改配汽规律的策略；	
2、通过优化顺序配汽规律，机组在变负荷工况时的转速超调过大问题；	
3、通过对顺序规律的优化，很好地解决了顺序运行方式下的高调门大幅波动以及伴有大幅负荷波动问题，机组在变负荷过程中运行非常平稳，消除了安全隐患；	
4、通过对高调门流量特性的准确辨识，给出了机组在顺序运行时的最佳位置以及运行优化操作指导，切换过程负荷波动仅为±0.5MW 左右，实现了无扰切换过程；	
5、机组在顺序运行方式下，瓦温与轴振水平与单阀方式的基本相当，安全性较好；同时，机组调节性能也得到了明显改善，满足了华北电网 AGC 两个细则考核指标，如 Kp 值有提高，减少了考核损失，间接地提高了发电经济效益；	
6、最后，通过综合优化配汽规律，顺序运行时在相同负荷指令下的各高调门开度更合理，调节损失更小，改善了机组在不同负荷下的经济性，折合降低煤耗 0.3g/kWh 左右。	
因此，#1 机组配汽优化的在线修改工作圆满完成，达到了预期效果。	
天津国电津能热电有限公司设备部 2011-12-30	

用户使用证明	
项目名称	#7、#8 机组阀门管理优化
研制单位	哈尔滨工业大学 先进动力控制与可靠性研究所
使用单位	北方联合电力达拉特发电厂
应用机组	#7、#8 号机组
项目起止时间	2011 年 2 月—2011 年 3 月
年经济效益	
新增年产值	人民币 546 万
新增节约成本收入	人民币 82 万
项目情况及经济效益	
北方联合电力达拉特发电厂的#7、#8 号机组，是上海汽轮机有限公司（STC）生产的 N600—16.7/538/538（C157）型 600MW 中间再热空冷凝汽式汽轮机。机组在按照原设计的顺序阀方式运行时，#1、#2 瓦瓦温较高（相对于单阀方式运行时最大上升约 10℃），EH 油压波动严重（最大约 1MPa），严重影响了机组的安全运行。以至于机组一直以来都是以单阀方式运行，严重影响了机组的运行经济性；另外，#7、#8 号机还普遍存在单阀——顺序阀切换时负荷波动大的问题（最大约至 50MW），针对上述问题，达拉特发电厂于 2011 年 2 月委托哈尔滨工业大学先进动力控制与可靠性研究所对#7、#8 号机进行阀门管理优化。	
优化后，#7、#8 号机能够顺利投入顺序阀运行，机组各项指标满足安全性要求：优化后的顺序阀运行方式相对单阀运行#7、#8 瓦瓦温与振动基本与单阀相当。另外，在单阀——顺序阀切换过程中，负荷波动小于 5MW。	
经过阀门管理优化，#7、#8 号机的运行经济性得到了明显提高，以机组经常运行的负荷段 320-460MW 为例，采用优化后的顺序阀方式运行较原运行方式调节效率平均提高 40% 左右，折合额定压力运行时发电煤耗降低 5g/kWh 左右，机组运行经济性显著提高，可能效果明显，每台机组按 420MW 的平均功率，年利用按 5000 小时计算，每台机组年节煤量约 5g/kWh×420MW×5000 小时=10500 吨标准煤，每吨标准煤按 260 元计算，折合人民币约 273 万元。每年 2 台机组共节约煤 21000 吨，每吨标准煤按 260 元计算，折合人民币约 546 万元。	
相当于#7、#8 号机年增产值 546 万元，按税率 15% 计算，新增利税 546 万×15%=81.9 万元，经济效益十分显著。	
北方联合电力达拉特发电厂杨静娜 2011-3-30	

用户使用证明	
项目名称	660MW 超临界汽轮机顺序阀投入及优化
研制单位	哈尔滨工业大学先进动力控制与可靠性研究所
使用单位	河北国华沧东发电有限责任公司
应用机组	#3、#4 号机
项目起止时间	2009 年 09 月—2010 年 3 月
年经济效益	
新增年产值	1237 万元
新增利税（纯收入）	210 万元
项目应用情况及经济效益	
河北国华沧东发电有限责任公司#3、#4 号机是哈尔滨汽轮机厂有限责任公司生产的超临界 660MW 中间再热式汽轮机，机组原设计的高压调节阀开闭顺序为 C11-C12-C13-C14，#3、#4 号机一直采用单阀方式运行，严重影响机组的运行经济性。另外，机组在单阀——顺序阀切换时存在明显的负荷波动现象，最大负荷波动达 70-80MW，针对上述问题，河北国华沧东发电有限责任公司委托哈尔滨工业大学先进动力控制与可靠性研究所对#3、#4 号机实施顺序阀优化。	
顺序阀优化后，#3、#4 号机能够顺利投入顺序阀运行，机组各项指标满足安全性要求：优化后的顺序阀方式运行相对于单阀方式运行#1、#2 瓦瓦温分别降低 4℃ 和 6℃，振动基本不变。另外，在单阀——顺序阀切换过程中，负荷平稳；不致发生回跳运行并引起负荷波动现象，<10MW 至 10MW 之间。	
经过顺序阀优化，#3、#4 号机的运行经济性得到了明显提高，以机组经常运行的负荷段 400-500MW 为例，优化后的顺序阀规律高负荷率平均提高 1% 左右，折合额定压力运行时发电煤耗降低 5g/kWh 以上。机组运行经济性显著提高，可能效果明显，每台机组按 450MW 的功率，年利用 5100 小时计算，每台机组年节煤量约 5g/kWh×450MW×5100 小时=12735 吨标准煤，相当于节约标准煤 15468 吨，每吨标准煤按 400 元计算，折合人民币约 618 万元。每年 2 台机组共节约标准煤 30936 吨，每吨标准煤按 400 元计算，折合人民币约 1237 万元。	
相当于#3、#4 号机年增产值 1237 万元，按税率 17% 计算，新增利税 1237 万×17%=210 万元，经济效益显著。	
应用单位（盖章） 2010 年 4 月 9 日	

4) 东北郊电厂#1、#2 机组 5) 达拉特电厂#7、#8 机组 6) 沧东电厂#3、#4 机组

用户使用证明	
项目名称	600MW 汽轮机阀门管理优化
研制单位	哈尔滨工业大学先进动力控制与可靠性研究所
使用单位	陕西国华锦界能源有限责任公司
应用机组	#2、#3、#4 号机
项目起止时间	2008 年 11 月—2009 年 2 月
年经济效益	
新增年产值	1074 万元
新增利税（纯收入）	182.58 万元
项目应用情况及经济效益	
陕西国华锦界能源有限责任公司#2、#3、#4 号机是上海汽轮机有限公司（STC）生产的 N600—16.7/538/538（C157）型 600MW 中间再热空冷凝汽式汽轮机。机组按照原设计的顺序阀方式运行时，#1、#2 瓦瓦温相对于单阀方式运行时平均上升 13℃ 左右，瓦温最高达到 93℃ 以上，严重影响机组的安全运行，以致于机组在单阀运行方式下，严重影响机组的运行经济性。另外，#2、#3、#4 号机还普遍存在单阀——顺序阀切换时负荷波动大的问题，针对上述问题，陕西国华锦界能源有限责任公司自 2008 年 11 月起委托哈尔滨工业大学先进动力控制与可靠性研究所对#2、#3、#4 号机实施阀门管理优化。	
优化后，#2、#3、#4 号机能够顺利投入顺序阀运行，机组各项指标均得到明显改善：优化后的顺序阀方式运行相对于单阀方式运行#1、#2 瓦瓦温平均降低 12℃，振动基本不变。另外，在单阀——顺序阀切换过程中，负荷平稳；不致发生回跳运行并引起负荷波动约 ±0.6 万千瓦，切换时进行负荷的指令人为调整时，负荷波动约 ±0.2 万千瓦。	
经过阀门管理优化，#2、#3、#4 号机的运行经济性得到了明显提高，以机组经常运行的负荷段 320-430MW 为例，采用优化后的顺序阀方式运行较原运行方式发电煤耗平均提高 10% 左右，折合额定压力运行时发电煤耗降低 5g/kWh 以上。机组运行经济性显著提高，可能效果明显，每台机组按 400MW 的平均功率，年利用 5500 小时计算，每台机组年节煤量约 5g/kWh×400MW×5500 小时=11000 吨标准煤，相当于节约标准煤 13750 吨，每吨标准煤按 260 元计算，折合人民币约 358 万元。每年 3 台机组共节约标准煤 41250 吨，每吨标准煤按 260 元计算，折合人民币约 1074 万元。	
相当于#2、#3、#4 号机年增产值 1074 万元，按税率 17% 计算，新增利税 1074 万×17%=182.58 万元，经济效益十分显著。	
应用单位（盖章） 2009 年 2 月	

应用证明	
项目名称	汽轮机配汽方案优化设计技术
应用单位	哈尔滨汽轮机厂
通讯地址	哈尔滨市动力区三大动力路 343 号（150046）
应用成果起止时间	
经济收益（万元）	
年 度	2003
新增产值（产量）	
新增利税（纯收入）	
新增节约支总额	
应用情况及社会效益：	
300MW 汽轮机配汽系统优化设计方案的指导思想、理论依据充分，计算结果正确，方案可行，对新机组的设计具有参考价值。	
采用新的阀门管理策略后，机组在整个负荷段内均可得到提高，在 160MW 左右的低负荷区调节效率提高约 12%，机组运行经济性约 13812（元/小时），折合标准煤 0.685 g/(kW·h)；在 200MW 左右的中低负荷区调节效率提高约 6%，降低煤耗约 0.2 g/(kW·h)，折合标准煤 0.327 g/(kW·h)。可见新的阀门管理策略对提高机组运行经济性的效果是显著的，对调峰运行的机组运行经济性的提高也具有重大意义，因此该阀门管理策略也适用于调峰运行的机组运行经济性。	
该成果已应用于新机组的设计中，为 300MW 机组的改进设计提供了理论指导，为提高汽轮机的生产和制造水平提供了技术支持。	
应用单位（盖章） 2003 年 12 月	

应用证明																															
项目名称	汽轮机配汽方案优化设计技术																														
应用单位	吉林省各发电厂																														
通讯地址																															
应用成果起止时间	1995-2004																														
经济收益（万元）																															
年 度																															
新增产值（产量）	2105																														
新增利税（纯收入）	358																														
新增节约支总额	2105																														
应用情况及社会效益：																															
从 1995 年开始分别对吉林省部分电厂机组进行配汽方案改造，总计 6 个电厂 9 台机组，总装机容量 12100W，改造后机组安全性和经济性都得到提高。 应用经济效益如下表所示： <table border="1"> <thead> <tr> <th>电厂名称</th> <th>机组情况</th> <th>每台机组年增发电量（万千瓦时）</th> <th>新增产值（万元）</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>吉林长山热电厂</td> <td>2 台 200MW</td> <td>857</td> <td>514</td> </tr> <tr> <td>吉林热电厂</td> <td>1 台 200MW</td> <td>857</td> <td>257</td> </tr> <tr> <td>长春第二热电厂</td> <td>1 台 200MW</td> <td>857</td> <td>257</td> </tr> <tr> <td>浑春发电厂</td> <td>2 台 100MW</td> <td>800</td> <td>480</td> </tr> <tr> <td>浑江发电厂</td> <td>2 台 100MW</td> <td>800</td> <td>480</td> </tr> <tr> <td>长春第一热电厂</td> <td>1 台 500MW</td> <td>390</td> <td>117</td> </tr> </tbody> </table> 合计年增产值约 2105 万元，按税率 17% 计算，新增利税约 358 万元，经济效益十分显著。				电厂名称	机组情况	每台机组年增发电量（万千瓦时）	新增产值（万元）	吉林长山热电厂	2 台 200MW	857	514	吉林热电厂	1 台 200MW	857	257	长春第二热电厂	1 台 200MW	857	257	浑春发电厂	2 台 100MW	800	480	浑江发电厂	2 台 100MW	800	480	长春第一热电厂	1 台 500MW	390	117
电厂名称	机组情况	每台机组年增发电量（万千瓦时）	新增产值（万元）																												
吉林长山热电厂	2 台 200MW	857	514																												
吉林热电厂	1 台 200MW	857	257																												
长春第二热电厂	1 台 200MW	857	257																												
浑春发电厂	2 台 100MW	800	480																												
浑江发电厂	2 台 100MW	800	480																												
长春第一热电厂	1 台 500MW	390	117																												
 吉林科学 院 2004 年 5 月																															

7) 国华锦界电厂#2-#4 机组 8) 哈汽厂配汽优化设计应用证明 9) 吉林 6 个发电厂

[illegible]

12) 大唐野马寨电厂#2 机组

[illegible]

15) 华电能源哈热电厂

部分用户使用效果证明