

# 第六届 全国低温与制冷工程大会 会议论文集

2003年11月30日—12月3日·西安

主编 厉彦忠

编者 曹小林 黄东 蒲亮



西安交通大学出版社  
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS

# 第六届 全国低温与制冷工程大会 会议论文集

2003年11月30日~12月3日·西安

主编 厉彦忠

编者 曹小林 黄东 蒲亮



西安交通大学出版社

XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS

· 西安 ·

## 内 容 提 要

本论文集收集了来自全国 50 多所高等院校及研究所等单位提供的 105 余篇论文, 论文内容涉及到低温、制冷、空调、传热、热力学及多相流等领域的最新研究成果及研究动态。

本论文集可以供低温、制冷、空调、传热等行业的研究人员及工程技术人员参考。

### 图书在版编目 ( CIP ) 数据

第六届全国低温与制冷工程大会会议论文集 / 厉彦忠主编.  
—西安: 西安交通大学出版社, 2003.11  
ISBN 7-5605-1360-3

I. 第... II. 厉... III. ①低温工程—学术会议 -  
文集 ②制冷工程 - 学术会议—文集 IV. TB6-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 ( 2003 ) 第 102713 号

|      |                                                                    |
|------|--------------------------------------------------------------------|
| 书 名  | 第六届全国低温与制冷工程大会会议论文集                                                |
| 主 编  | 厉彦忠                                                                |
| 出版发行 | 西安交通大学出版社                                                          |
| 地 址  | 西安市兴庆南路 25 号 ( 邮编: 710049 )                                        |
| 电 话  | ( 029 ) 2668315 2669096 ( 总编办 )<br>( 029 ) 2668357 2667874 ( 发行部 ) |
| 印 刷  | 陕西省轻工印刷厂                                                           |
| 字 数  | 1093 千字                                                            |
| 开 本  | 890mm×1240mm 1/16                                                  |
| 印 张  | 33.625                                                             |
| 版 次  | 2003 年 11 月第 1 版 2003 年 11 月第 1 次印刷                                |
| 书 号  | ISBN 7-5605-1360-3/Z·48                                            |
| 定 价  | 185.00 元                                                           |

---

版权所有 侵权必究

第六届全国低温与制冷工程大会  
会议论文集

2003 年 11 月 30 日~12 月 3 日

西 安

主办单位: 中国制冷学会第一专业委员会、第二专业委员会  
协办单位: 陕西省制冷学会  
承办单位: 西安交通大学

会议组织委员会(秘书处)

秘 书 长: 厉彦忠

副秘书长: 田怀璋    袁秀玲    俞炳丰

委      员: 陈纯正    吴业正    吴裕远    朱瑞琪    冯全科    李连生  
            张华俊    何雅玲    林明峰    张玉文    何茂刚    侯   予

            王   瑾    晏   刚    张兴群

秘      书: 曹小林    黄   东    蒲   亮

赞助单位: 约克空调冷冻设备有限公司

烟台冰轮股份有限公司

泰豪科技股份有限公司

上海第一冷冻机厂

西安联合超滤净化设备有限公司

# 前 言

全国低温与制冷工程大会是中国制冷学会第一专业委员会和第二专业委员会联合举办的系列会议，始发于 1978 年。迄今为止已举行了五届会议，本次为第六届。25 年来，中国乃至世界领域内低温与制冷技术的发展迅猛异常，基础研究的进步、设备性能的改善、系统性能的提高、新型设备的问世等都标志着低温与制冷技术的巨大进步和飞速发展，反映了广大科技工作者的辛勤努力和卓越成就。如今，低温与制冷技术及其应用学科之间的关系更加密切，如航天、冶金、化工、气体、核科学、电子等工业领域，也与人们的日常生活息息相关，如农业、食品、交通、贮藏等。人类对居住和工作环境的舒适要求促使空调制冷技术的迅速发展，也给科技工作者提出了更多的研究和开发课题。可以肯定地说，低温与制冷技术已渗透到现代科技的各个领域，成为现代人类社会文明必不可少的技术支撑。

回顾中国低温与制冷技术的进步和发展，凝聚了几代人的劳动和心血。全国低温与制冷大会就记录着广大科技人员所取得的成就，也反映了低温与制冷技术进步的足迹和发展史。1978 年以来的五次大会，虽然会议规模有所不同、讨论的主体有所差异，但会议内容切题、学术气氛活跃，并且都取得了圆满的成功。第一届大会于 1978 年在浙江的莫干山举行，承办单位为杭州制氧机研究所；第二届于 1984 年在武汉举行，承办单位为华中科技大学；第三届于 1993 年在兰州召开，承办单位为航天 510 研究所。此前每次会议的间隔较长，时间也不固定，应广大与会者的要求，希望增加会议次数，专业委员会明确此后每两年召开一次。到 1999 年在上海举行了第四届大会，由上海交通大学承办，2001 年在大连召开了第五届会议，由大连光明所承办。后两次会议主要交流内容为低温技术以及相关学术和工程应用问题。

按照计划安排，2003 年组织召开第六届全国低温工程大会，由西安交通大学承办。考虑到学科内部各个研究方向的融合与交叉，吸引更多的科技工作者对大会的关注与支持，经由上级主管部门的批准，特将本次大会主题内容扩展，包含低温制冷技术、普通制冷技术、空调制冷技术以及相关的应用、材料和测试等领域。为了加强科研单位、设计制造单位以及相关技术应用单位的联系，并扩大学术交流的范围，本次大会以低温与制冷技术为主题，涵盖多个方面的内容，使其成为全国范围内的低温与制冷技术及其相关领域的学术研究、技术开发、产品研制和技术应用方面的科技学术大会，其目的是促进中国低温与制冷技术的学术交流和科技进步。

本次大会是由中国制冷学会一专和二专委员会联合主办，陕西省制冷学会协办、西安交通大学承办的全国性学术大会。从 2003 年 4 月开始筹划安排，到 2003 年 11 月底的会议召开，历时 8 个月时间。此间经历了非典疫情的传播和肆虐时期，会议安排受到一定的影响并有所推迟。在会议筹备期间，会议秘书组得到了第一专业委员会和第二专业委员会有关领导的悉心指导和帮助，得到了陕西省制冷学会的大力宣传和协助，同时也得到了部分企业的赞助和支持，加上广大筹备组工作人员的热情投入和勤奋工作，使本次会议能够圆满顺利地举行。承办单位希望本次大会能够为全国低温与制冷技术领域的广大科学技术人员提供一个相互交流、相互学习和进行学术探讨的机会，共同促进低温与制冷技术及其相关学科的进步和发展。

预祝大会取得圆满成功！

祝愿各位代表身体健康！

祝愿中国的低温与制冷技术蓬勃发展、蒸蒸日上！

第六届全国低温与制冷工程大会秘书长

2003 年 11 月 30 日

# 目 录

## 第一部分 低温技术

|                                                                  |                      |
|------------------------------------------------------------------|----------------------|
| 热声制冷机的工程优化设计 .....                                               | 张晓青 陈宇 (3)           |
| 80K2W 斯特林制冷机的实验研究 .....                                          | 刘冬毓 吴亦农 府华 (8)       |
| 新型换热器式 G-M 制冷机 .....                                             | 梁文清 龚领会 张亮 (14)      |
| 脉冲管制冷机中交变流动阻力测量实验台的建立 .....                                      | 王希龙 赵密广 蔡京辉等 (18)    |
| 空间双驱动微型热开关技术研究 .....                                             | 尤建钢 (23)             |
| 航天斯特林制冷机系统 .....                                                 | 纪国林 吴亦农 王彪等 (28)     |
| $^3\text{He}$ 气液饱和密度方程 .....                                     | 黄永华 陈国邦 李祥仪 (33)     |
| $^3\text{He}$ 为工质的二级脉管制冷性能研究 .....                               | 蒋宁 陈国邦 黄永华等 (37)     |
| 氦氢混合工质二级脉管制冷实验研究 .....                                           | 甘智华 程章展 黄永华等 (43)    |
| 热声制冷的研究及发展 .....                                                 | 杜维明 徐明仿 王从飞 (47)     |
| 单级脉管制冷时序特性研究 .....                                               | 程章展 甘智华 刘华钊等 (51)    |
| 大冷量单级 G-M 型制冷机研制 .....                                           | 方志春 苏小陶 龚领会等 (55)    |
| $\text{He-H}_2$ 混合工质与 $\text{Er}_3\text{NiH}_x$ 填料强化脉管制冷性能 ..... | 陈国邦 汤珂 黄永华等 (59)     |
| LNG 汽车发展及其关键技术 .....                                             | 鲁雪生 顾安忠 张武高 (64)     |
| 反应堆冷中子源氦制冷系统 .....                                               | 郑洲 胡春明 沈文德等 (69)     |
| 脉冲管制冷机中用对称喷嘴替代小孔阀门的实验研究 .....                                    | 王希龙 蔡京辉 梁惊涛 (73)     |
| 115K 热声驱动脉管制冷机 .....                                             | 汤珂 陈国邦 孔博 (79)       |
| 平面旋转阀配气的二级脉管制冷机实验研究 .....                                        | 汤珂 甘智华 程章展等 (83)     |
| 气动分置式斯特林制冷机的实验研究 .....                                           | 吴亦农 陈永生 张武 (88)      |
| 阳光对地球同步轨道辐射制冷器制冷性能的影响 .....                                      | 陆燕 张玉林 胡彭钧 (94)      |
| 脉管制冷技术的研究及应用 .....                                               | 邱利民 蒋彦龙 甘智华等 (98)    |
| 辐冷器中隔热屏的最优化设计 .....                                              | 徐红艳 董德平 王维扬 (103)    |
| 行波热声发动机驱动的脉管制冷机实验研究 .....                                        | 孙大明 邱利民 严伟林等 (107)   |
| 高频同轴脉冲管制冷机研究 .....                                               | 杨鲁伟 G. Thummes (112) |
| BEPC II 超导磁体冷却系统的数值模拟 .....                                      | 杜宏鹏 王莉 肖斐 (116)      |
| HTS 电缆过冷液氮冷却系统 .....                                             | 范宇峰 龚领会 徐向东等 (121)   |
| 青钢内压缩万立制氧机建设与运行总结 .....                                          | 史作询 (126)            |
| 热声系统谐振频率的模拟分析 .....                                              | 金滔 范理 陈国邦等 (132)     |
| 中科院上海技术物理研究所空间制冷技术的最新进展 .....                                    | 王维扬 董德平 纪国林等 (137)   |
| 脉管制冷系统中的计算机数据采集系统 .....                                          | 孔博 甘智华 程章展等 (142)    |
| 影响微型同轴脉管制冷机性能因素的实验研究 .....                                       | 丁文静 黄鹏波 刘迎文等 (147)   |
| 小型逆布雷顿循环低温制冷机的研制 .....                                           | 侯予 熊联友 陈纯正 (152)     |
| 脉管制冷机的壁面温度分布特性的实验研究 .....                                        | 刘迎文 黄竞 何雅玲 (156)     |

## 第二部分 制冷技术

|                                                     |              |       |
|-----------------------------------------------------|--------------|-------|
| 离心式冷水机组系统的优化控制策略 .....                              | 王盛卫 崔景潭      | (163) |
| 以 R23+R32+R134a/DMF 为工质对的新型吸收制冷循环实验研究 .....         | 何一坚 陈光明 孟祥锋  | (169) |
| 迎风面积对空调器性能的影响及家用空调器的发展趋势 .....                      | 周俊杰 陶文铨      | (174) |
| 冰箱冷冻室内温度场、流场的仿真与优化 .....                            | 吴小华 曹小林      | (179) |
| 跨临界二氧化碳汽车空调系统的有效能分析 .....                           | 石润富 姜培学 徐轶君  | (183) |
| 家用中央空调制冷量测量与计算方法探讨 .....                            | 饶荣水 蔡咏鸿 申建军等 | (188) |
| 热力膨胀阀开启度对热泵系统性能影响的实验研究 .....                        | 饶荣水 蔡咏鸿 申建军等 | (193) |
| 溴化锂制冷机的两个典型应用 .....                                 | 张光焱 冯胜勇      | (197) |
| 家用热泵结霜工况下机组性能的模拟研究 .....                            | 孙宗鑫 陈蕴光 徐正本等 | (202) |
| 固液相变蓄能三种数学模型研究比较 .....                              | 陈林辉 田怀璋 梁俊杰等 | (207) |
| 磁流体的特性与应用 .....                                     | 曹小林 晏刚       | (214) |
| 制冷 / 制热潜能储存技术 (1) ——工作原理 .....                      | 徐士鸣 李维仲 张莉等  | (219) |
| 制冷 / 制热潜能储存技术 (2) ——以氨 / 水为工质的潜能储存系统工作特性<br>.....   | 徐士鸣 李维仲 张莉等  | (225) |
| 制冷 / 制热潜能储存技术 (3) ——以水 / 溴化锂为工质的潜能储存系统工作特性<br>..... | 徐士鸣 李维仲 张莉等  | (230) |
| 制冷与空调技术的若干进展 (一) .....                              | 吴业正 马贞俊 曹小林等 | (235) |
| 制冷与空调技术的若干进展 (二) .....                              | 马贞俊 曹小林 吴业正等 | (240) |
| 水源热泵机组计算机自动监测软件的开发 .....                            | 韩俊华 高峰 安连生   | (246) |
| 家用电冰箱的能耗分析及节能研究 .....                               | 赵志军 李红旗      | (251) |
| 无泵溴化锂热水型吸收式制冷系统设计 .....                             | 李跃智 吴裕远 孙韶华等 | (256) |
| 液化天然气 (LNG) 冷能回收系统仿真设计 .....                        | 殷秀妮 厉彦忠 王强   | (260) |
| 基于车体外表面温度的空调客车车体热负荷计算 .....                         | 龚德谷 周晋 曹小林等  | (266) |
| 风冷热泵冷热水机组的逆循环除霜性能 .....                             | 黄东 袁秀玲 张波等   | (270) |
| 商用冷库温度场的实验研究 .....                                  | 蒲亮 张华俊       | (275) |

## 第三部分 暖通空调

|                                        |              |       |
|----------------------------------------|--------------|-------|
| 数码多联式空调及其节能技术分析 .....                  | 蔡卫东          | (283) |
| 房间空调器开机过程动态研究 .....                    | 陈爱玲 袁秀玲      | (288) |
| 智能学习型制冷空调系统设计软件的若干功能扩充开发 .....         | 彭夷 姚寿广 路诗奎   | (294) |
| TiO <sub>2</sub> 在空调环境空气净化中的应用前景 ..... | 刘艳华 介江斌 袁琪等  | (299) |
| 标准散湿源实验系统研究 .....                      | 李亚奇 刘顺波 郑可鸣等 | (304) |
| 与冰蓄冷相结合的低温送风系统 .....                   | 李莉 朱彩霞       | (308) |
| 直接蒸发式空调机中不同填料的性能对比 .....               | 文力 颜苏芊 黄翔等   | (313) |
| 基于 32 位嵌入式系统的空调制冷机组自控系统的应用探讨 .....     | 文力 黄翔 刘刚     | (318) |
| 金属氢化物空调模拟样机设计与性能 .....                 | 李刚 刘华军 李来凤   | (323) |
| 制冷系统与空调房间的匹配动态特性 .....                 | 解国珍 王瑞祥 申江   | (327) |

|                                  |           |
|----------------------------------|-----------|
| 寒冷地区建筑采暖的 ASHP 的若干技术问题及其处理 ..... | 王瑞祥 (331) |
|----------------------------------|-----------|

## 第四部分 热力学及传热

|                                                            |                    |
|------------------------------------------------------------|--------------------|
| 磁流体热力学系统的热力学分析 .....                                       | 曹小林 晏刚 赵春风 (339)   |
| 喷淋蒸发翅管式冷凝器传热传质研究 .....                                     | 王铁军 刘达新 唐景春 (344)  |
| 超临界 CO <sub>2</sub> 在微细圆管中对流换热实验研究 .....                   | 徐轶君 姜培学 石润富等 (349) |
| 可燃制冷剂抑爆方法 .....                                            | 徐明仿 杜维明 晏刚 (355)   |
| 新型双级混合制冷剂循环液化天然气流程理论分析 .....                               | 石玉美 顾安忠 汪荣顺等 (359) |
| 改善板翅式换热器封头流场分布的一种措施 .....                                  | 文键 厉彦忠 (364)       |
| 细圆管内流动凝结换热的尺度效应 .....                                      | 李俊明 王补宣 安刚 (368)   |
| 低温真空下固体界面间接接触热导实验分析 .....                                  | 李志伟 徐烈 孙恒等 (373)   |
| 添加纳米颗粒强化微小通道内对流换热 .....                                    | 陈骁 李俊明 戴闻亭等 (378)  |
| 饱和液体系统中泄出口的漏斗形旋涡及防治 .....                                  | 谢雪梅 陈国邦 (383)      |
| 纳米介质对矿物基冷冻机油 /HFCS 工质的相溶性作用机理初步研究 ...                      | 邹德宝 王瑞祥 (389)      |
| 倾斜来流下表面式蒸发器性能数值研究 .....                                    | 陈楠 徐烈 申江 (395)     |
| 板翅式换热器物流分配的研究概述 .....                                      | 张哲 厉彦忠 许箐 (401)    |
| 板翅式换热器矩形通道二次表面换热性能理论计算 .....                               | 米廷灿 厉彦忠 (405)      |
| NH <sub>3</sub> -H <sub>2</sub> O-LiBr 三元混合溶液性能的实验研究 ..... | 孙韶华 吴裕远 李跃智等 (410) |
| 泡状流中含气率分布的影响因素分析 .....                                     | 文婷 车得福 (414)       |
| 超临界压力下管内层流流动特性的数值模拟 .....                                  | 徐峰 郭烈锦 白博峰 (418)   |
| 超临界压力下管内层流换热的数值模拟 .....                                    | 徐峰 郭烈锦 白博峰 (424)   |
| 金属氢化物制冷系统的热力学分析 .....                                      | 肖跃雷 傅秦生 鲁立平等 (430) |
| 压力传感器的温度特性及其校验系统 .....                                     | 厉彦忠 苏林 王江等 (438)   |
| 液氮窄缝沸腾传热特性实验研究 .....                                       | 尤国春 任欣 张鹏等 (443)   |
| 开缝位置对开缝翅片性能的影响 .....                                       | 程永攀 屈治国 陶文铨等 (448) |
| 制冷剂在管内蒸发换热过程的数值仿真 .....                                    | 伍志辉 田怀璋 高原等 (453)  |

## 第五部分 其它

|                                                   |                    |
|---------------------------------------------------|--------------------|
| 惯性约束核聚变用低温冷冻靶燃料层厚度的确定 .....                       | 刘源 朱玉群 周刚等 (461)   |
| 陶瓷基复合材料旋转配气阀的研制 .....                             | 苏小陶 方志春 龚领会等 (466) |
| 大功率氦气压缩机系统的研制 .....                               | 雷刚 龚领会 张亮 (470)    |
| 改性环氧树脂低温冲击力学性能研究 .....                            | 黄传军 张以河 付绍云等 (473) |
| 低温工程高分子复合材料研究进展 .....                             | 付绍云 张以河 李来凤 (478)  |
| 低温拉伸夹具的设计与应用 .....                                | 潘勤彦 付绍云 黄传军等 (481) |
| 热泵用涡旋压缩机可靠性研究 .....                               | 赵远扬 李连生 束鹏程 (485)  |
| 二氧化硅含量对聚酰亚胺 / 二氧化硅纳米杂化薄膜低温 (77K) 拉伸性能的影响<br>..... | 李艳 张以河 付绍云 (489)   |
| 我国气体轴承低温透平膨胀机的重要进展 .....                          | 陈纯正 侯予 王瑾等 (493)   |

涡旋压缩机动力模型的研究 ..... 唐甜甜 汪军 束鹏程 (498)  
 空调用滚动转子式压缩机的变工况特性研究 ..... 赵军朋 王智忠 束鹏程 (503)  
 新型冷凝器毛细三角管内两相流动流型与阻力特性 ..... 郭亚军 毕勤成 陈听宽 (508)  
 脉动热管运行机理的可视化及传热特性研究 ..... 曹小林 周晋 晏刚等 (512)  
 汽车空调两级制冷系统的性能试验研究 ..... 张兴群 黄东 袁秀玲 (520)  
 动态送风柜机的实验研究 ..... 孙淑凤 丁容仪 赵荣义 (524)

# 第一部分 低温技术



# 热声制冷机的工程优化设计

张晓青 陈 宇

(<sup>1</sup> 清华大学物理系 北京 100084)

**摘要** 本文介绍了热声系统无因次化的工程优化设计数学模型,描述了热声系统的优化算法,并对声驱动的热声制冷机的板叠进行了优化设计计算,得到了热声板叠的性能曲线,优化确定了板叠的结构参数,对影响热声板叠性能的因素进行了分析与讨论。本文为热声系统的工程优化设计和性能预测提供了一种有效的方法。

**主题词** 热声系统 工程优化设计 热声板叠

## 1 引言

热声是关于热学与声学的一门交叉学科,热声系统的硬件结构虽然较为简单,但描述热声系统工作过程的微分方程却是高度非线性的复杂关系,这给热声系统的工程设计和性能预测带来困难。目前大部分热声系统及元件的设计采用的都是经验设计,这使设计带有一定的盲目性和对结果的不可预知性,性能和结构也不可能是优化的。本文介绍的热声系统的工程优化设计算法,为设计工作提供了一种有效方法,由于影响热声系统性能的参数和因素非常之多,有结构参数、工质热力参数和工况条件,使全局优化变量数高达 19 个之多,而且,热与声间的复杂耦合关系,使得保证热声系统正常工作的参数约束条件也是复杂的,这些情况给全局优化设计工作带来了较大的困难,使全局优化工作是件不容易的事情。本文以热声核心元件板叠或回热器为优化的对象,因为热声板叠决定了热声系统效率的上限,通过对热声板叠的优化来对热声系统进行部分优化设计,本文所介绍的优化设计思想和算法适用于一般的热声系统的工程优化设计和性能预测。

## 2 热声板叠的工程优化设计数学模型

设计变量、目标函数、约束条件,是优化设计数学模型的三个要素。下面我们来讨论和确定热声板叠的优化设计三要素。为了预估和优化热声板叠,这里应用热声装置的简化线性模型,即我们熟知的热声短板边界层近似<sup>[1]</sup>,此线性模型虽已简化,适用于数值计算,但对工程的应用却是足够复杂的,不能直接应于热声板叠的设计和优化。本文将介绍一种能应用此线性模型进行设计和优化的算法。

### 2.1 优化设计变量

利用线性热声的边界层假设和理想气体条件,使描述热声的工作方程,涉及到的独立变量有满足热声系统要求的运行参数:制冷量 $Q_c$ 、制冷温差 $\Delta T$ 、平均温度 $T_m$ 、平均压力 $p_m$ 、声压幅值 $p_1$ 、运行频率 $f$ ;热声工作流体和固体材料的热物性参数:流体力质的热导率 $K$ 、声速 $a$ 、动力粘性 $\mu$ 、压缩指数 $\gamma$ 、板叠材料的平均密度 $\rho_c$ 、比热 $c_s$ ,热导率 $K_s$ ;以及几何设计参数:板叠长度 $L_s$ 、板叠中心位置 $x_c$ 、板叠间隙 $2y_0$ 、板叠厚度 $2l$ 、板叠横截面面积 $A$ 或直径 $D$ 。热声板叠工作共涉及有 18 个独立变量。通过对这些变量无因次化,可减少独立设计变量数。表 1 概括了无因次化的独立设计变量<sup>[2, 3]</sup>。

此外,无因次焓流: $H_n = \dot{H}/p_m a A$ ,无因次声功: $W_n = \dot{W}/p_m a A$ 和无因次的温度梯度: $\Gamma = \nabla T_m / \nabla T_{crit} = \Delta T_{mn} \tan(x_n) / (\gamma - 1) B L_{sn}$ 是相关变量,这里列出是为了在无因次化方程时使用,

表中  $k = 2\pi/\lambda$  为波数。

表 1 无因次化的热声设计变量

| 设计运行参数                                 | 热声工质参数                                               | 板叠几何参数                                 |
|----------------------------------------|------------------------------------------------------|----------------------------------------|
| 制冷量: $Q_{cn} = \dot{Q}_c / p_m a A$    | 流体工质: 普朗特数 $\sigma$ , 压缩指数 $\gamma$                  | 板叠长度: $L_{sn} = k L_s$                 |
| 驱动比: $Dr = p_1 / p_m$                  | 板叠材料: 板叠热容修正系数                                       | 板叠中心位置: $x_n = k x_c$                  |
| 温差: $\Delta T_{mn} = \Delta T_m / T_m$ | $\varepsilon_s = \sqrt{\rho c_p K / \rho_s c_s K_s}$ | 板叠间隙: $\delta_{sn} = \delta_s / 2 y_0$ |
|                                        |                                                      | 板叠的孔隙率: $B = y_0 / (y_0 + l)$          |

对于板叠的结构设计与优化, 运行参数一般是作为设计条件给定的, 工质参数也是设计中选定的, 那么独立设计变量就只是板叠的几何参数了。这里我们将无因次的板叠长度  $L_{sn}$ 、板叠中心位置  $x_n$  (离最近的压力反节点端的距离), 板叠间隙  $\delta_{sn}$ , 板叠的孔隙率  $B$  确定为优化设计的独立变量。

## 2.2 优化目标函数

目标函数确定为板叠的性能系数, 即板叠冷端的制冷量与板叠所消耗的声功率之比, 如果不计板叠两端换热器所消耗的声功, 则无因次化的性能系数为:

$$COP = Q_{cn} / W_n = |H_n| / |W_n| \quad (1)$$

为简化计算, 将板叠看作是理想材料, 则可忽略板叠热容的影响, 即  $\varepsilon_s = 0$ , 且不计板叠的纵向导热, 由于他们的影响较小, 所作的简化对工程设计是合适的<sup>[2]</sup>, 利用表 1 中的无因次变量, 将 Swift 热声近似的焓流和功流方程<sup>[1]</sup>无因次化, 可得如下无因次化的焓流和声功的表达式。无因次化的焓流:

$$H_n = -\frac{\delta_{sn} Dr^2 \sin(2x_n)}{8\gamma(1+\sigma)\Lambda} \left( \frac{\Delta T_{mn} \tan(x_n)}{(\gamma-1)BL_{sn}} \frac{1+\sqrt{\sigma}+\sigma}{1+\sqrt{\sigma}} - (1+\sqrt{\sigma}-\sqrt{\sigma}\delta_{sn}) \right) \quad (3)$$

板叠所消耗的无因次的声功:

$$W_n = \frac{\delta_{sn} L_{sn} Dr^2}{4\gamma} (\gamma-1) B \cos(x_n)^2 \left( \frac{\Delta T_{mn} \tan(x_n)}{BL_{sn}(\gamma-1)(1+\sqrt{\sigma})\Lambda} - 1 \right) - \frac{\delta_{sn} L_{sn} Dr^2}{4\gamma} \frac{\sqrt{\sigma} \sin(x_n)^2}{B\Lambda} \quad (4)$$

式中,  $\Lambda = 1 - \sqrt{\sigma}\delta_{sn} + \frac{1}{2}\sigma\delta_{sn}^2$

将式 (3) 和式 (4) 带入式 (1) 中, 即确定了热声制冷机板叠无因次的优化目标函数。

## 2.3 优化约束条件

约束条件是对设计变量的取值范围进行限制和对变量的独立性进行约束的条件, 它规定了寻优的范围, 式 (3) 与式 (4) 是相关变量的等式约束条件, 以下介绍的是不等式的约束条件。

对板叠长度的约束: 板叠长度一般不超过  $\lambda/8$ , 即对无因次的板叠长度的约束为

$$0 < L_{sn} < 0.785$$

但此范围过于宽松, 在我们的计算中发现, 在接近上下限的范围, 有时会出现不合理的计算结果, 诸如负制冷负荷的出现, 准确的上下限应在计算中确定, 将不合理的计算结果舍弃。

对板叠中心位置的约束: 最显著的热声效应产生在声波的压力反节点和速度节点之间<sup>[1]</sup>, 据现有的热声系统, 一般取离压力反节点  $\lambda/8$  的范围内, 也即

$$0 < x_n < 0.785$$

无因次板叠间隙（或热渗透深度）：根据文献[1]中的介绍,板叠间隙一般在 2 至 4 个热渗透深度时,热声效应较为显著，因此有

$$0.25 < \delta_{kn} < 0.5$$

板叠的孔隙率：热声板叠的孔隙率的大小，需要在热声效应所需的固体边界面积、驻波所需的相移和声功的耗散之间进行折衷，根据目前热声热机的不同，采用的数值有如下的经验范围

$$0.3 < B < 0.9$$

以上介绍了热声板叠优化设计的数学模型。

### 3 热声板叠优化设计算法和程序实现

确定了优化数学模型后，选择合适的优化算法是求解模型的关键。这里涉及的目标函数是关于设计变量的复杂隐式非线性关系，由于优化变量不等式的上下限是一些经验值，尤其对板叠长度变量的范围，如不合理有可能使程序不能正常运行，鉴于以上原因，我们不采用常用的优化计算方法，如单纯形法。本文介绍的算法是，在目标函数中保留两个待确定的变量，其余变量作为输入参数给定，如在设计阶段，可将运行参数和工质参数作为已知参数，目标函数中保留两个独立变量  $x_n, L_{sn}$ ，将其中一个作为自变量，另一个为参变量，通过对目标函数的优化计算来确定此两变量，对热声板叠间隙和孔隙率，可根据对热渗透深度的计算结果和取值经验范围，在程序运行时人工选定，作为已知参数输入，这样可简化程序的实现。板叠长度和中心位置确定后，可根据制冷量的大小来匹配所需的板叠横截面面积或直径，具体的程序框图如下。

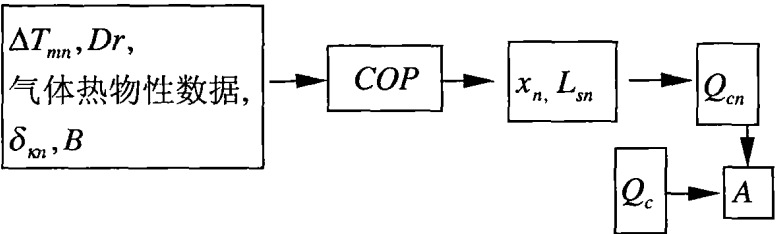


图 1 板叠结构优化设计程序框图

利用相同的程序，也可实现运行工况和工质的优化，保留两个独立设计变量，如温差与板叠长度，或不同工质与板叠长度。这里应说明的是，本文的局部优化是在假设变量对目标函数的影响是独立的前提下进行的，此假设不是特别严格，如板叠长度与位置，平均压力与板叠间隙在一定程度上是相关的，但该假设的使用在系统设计初期，对工程优化设计和性能的预测是合适的。

### 4 优化结果讨论与分析

利用以上的优化算法，我们对一声驱动的热声制冷机进行了优化设计计算。表 2 是制冷机计算算例中输入的运行参数，流体工质为氮气，板叠材料是 Mylar。

表 2 声驱动的热声制冷机的运行参数

|                        |                       |                      |                      |
|------------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|
| $p_m=10.0(\text{Bar})$ | $T_m=273.0(\text{K})$ | $f=130.0(\text{Hz})$ | $Dr(p_1/p_m)=0.0800$ |
| $Th=303.0(\text{K})$   | $T_c=243.0(\text{K})$ | $Q_c=20.0(\text{W})$ |                      |

图 2 显示了在不同参变量时，制冷机性能系数与板叠长度的关系曲线，称为性能曲线。从图

2(a)中可看出, 对每一给定的板叠位置, 存在一优化的板叠长度, 使制冷机的性能系数最大, 此优化长度的存在主要是由于热声效应和声功的耗散均与板叠长度成正比。从计算结果也可看出, 制冷机  $COP$  的最大值向声驱动器端增大, 而相应的板叠长度在减小, 这个结果是因为: 在离声驱动端愈近, 声压愈大, 产生的温差愈大, 但微粒振荡速度愈小, 使得温度梯度愈大, 对制冷机来说, 温度梯度愈接近临界温度梯度, 效率愈高。

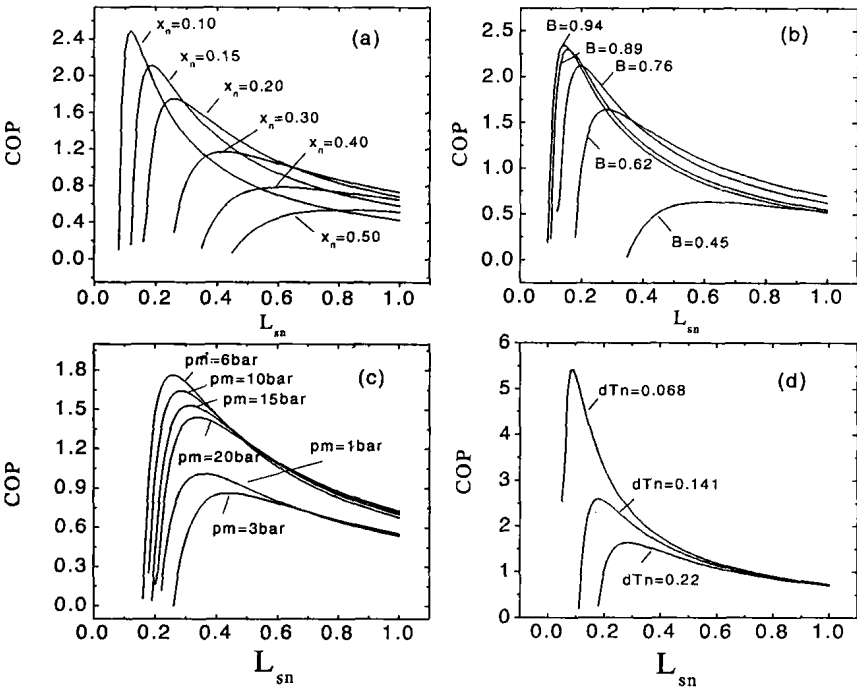


图 2 不同参变量下的热声制冷机性能曲线  
(a)板叠中心位置  $X_n$ ; (b) 板叠孔隙率  $B$ ; (c) 平均压力  $p_m$ ; (d) 板叠两端温差  $dT_n$

一般对板叠位置的选取, 要在效率与实际安装位置间进行折衷, 我们选取无因次板叠位置为 0.2, 表 3 是相应的优化结果。

表 3 无因次板叠位置  $X_n=0.2$  时制冷机的优化结果

|                          |                        |                     |
|--------------------------|------------------------|---------------------|
| $D=38.2(\text{mm})$      | $L_s=107.2(\text{mm})$ | $X=82.5(\text{mm})$ |
| $2y_0=0.2721(\text{mm})$ | $2l=0.1340(\text{mm})$ | $B=0.6701$          |
| $Q_c=20.00(\text{W})$    | $W=11.45(\text{W})$    | $COP=1.7499$        |

在  $X_n=0.2$ ,  $p_m=10\text{bar}$ , 其他条件与表 2 中相同的情况下, 我们研究了板叠孔隙率对性能的影响, 图 2(b)中的计算结果表明对驻波热声系统中使用的板叠, 增大孔隙率可提高性能系数, 这是因为驻波热声正常工作需要相位延迟, 孔隙率增加也减小了粘性耗散。

我们对平均压力的影响也进行了研究, 在  $X_n=0.2$  和与表 2 中其他条件相同的情况下, 改变平均压力进行计算, 图 2(c)显示了不同压力下, 制冷机的  $COP$  随板叠长度的变化曲线。从图中可以看出, 平均压力过大或过小均会使性能系数降低, 存在一优化的均压。

此外, 也对制冷机温差的影响进行了计算, 图 2(d)显示板叠两端的温差愈小, 性能系数愈高。此结论是显而易见的, 因温差大使传热不可逆损失大。

## 5 结论

本文介绍的热声板叠的优化设计程序和算法具有简单实用的特点,适用于热声制冷机板叠的工程优化设计,可优化确定板叠在声场中的位置、板叠长度和板叠所处位置的横截面直径等结构参数,本算法也能对工程设计中热声系统的性能进行预测,通过优化计算所得出的性能曲线,可分析板叠孔隙率、板叠位置、板叠长度等结构参数和平均压力、板叠两端温差等运行参数对制冷机性能的影响,从而为热声系统的结构参数、运行参数和工质在内的局部优化设计提供方向。

## 6 致谢

本论文的工作得到了武汉市科技局的支持,项目号:W121003

## 参考文献

- 1 G W Swift. Thermoacoustic engines. J. Acoust. Soc. Am.,1988, 84:1145~1180
- 2 Martin Wetzel, Cila Herman. Design optimization of thermoacoustic refrigerators. Int J. Refrig. 1997, 20(1):3~21
- 3 张晓青. 热声热机系统的仿真与优化研究: [博士学位论文]. 武汉:华中科技大学, 2001

# ENGINEERING OPTIMIZATION DESIGN OF THERMOACOUSTIC REFRIGERATORS

Zhang Xiaoqing    Chen Yu

(Department of Physics, Tsinghua University, 100084)

**ABSTRACT** The normalized thermoacoustic equations for engineering optimization design has been introduced in this paper. An algorithm for the stack optimization has also been described. An optimization calculation is carried out on thermoacoustic refrigerators driven by sound. The performance curves of stack are obtained, and from those curves the optimum structure parameters of stack are determined. The effect factors on stack performance are analyzed and discussed as well. The present paper provides an effective method for the engineering design optimization and the prediction of performance of thermoacoustic refrigerators.

**KEYWORDS** Thermoacoustic refrigerator, Engineering optimization design, Thermoacoustic stack