



建筑节能技术与实践丛书

江 亿 主编

温湿度独立控制空调系统

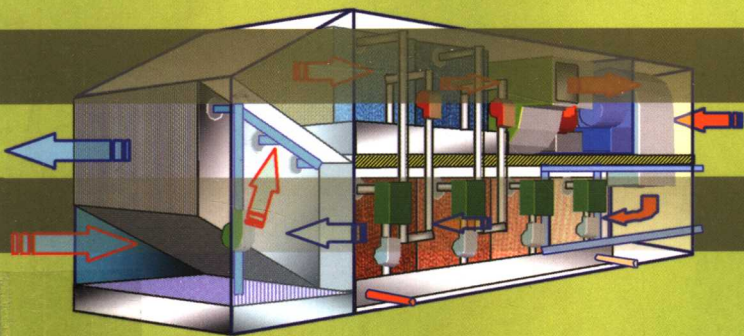
刘晓华 江 亿 等著

Building Energy Efficiency

Technology and

Application

中国建筑工业出版社



建筑节能技术与实践丛书

Building Energy Efficiency Technology and Application

江 亿 主编

温湿度独立控制空调系统

Temperature and Humidity Independent Control
Air-conditioning System

刘晓华 江 亿 等著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

温湿度独立控制空调系统/刘晓华, 江亿等著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2005

(建筑节能技术与实践丛书)

ISBN 7-112-07840-7

I. 温... II. ①刘... ②江... III. ①建筑—温度—空气调节系统: 控制系统②建筑—湿度—空气调节系统: 控制系统 IV. TU831.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 128040 号

建筑节能技术与实践丛书

Building Energy Efficiency Technology and Application

江 亿 主编

温湿度独立控制空调系统

Temperature and Humidity Independent Control

Air-conditioning System

刘晓华 江 亿 等著

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

新华书店经销

北京嘉泰利德公司制版

北京建筑工业印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 24¼ 字数: 430 千字

2006 年 1 月第一版 2006 年 1 月第一次印刷

印数: 1—3,000 册 定价: **62.00** 元

ISBN 7-112-07840-7

(13794)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

本社网址: <http://www.cabp.com.cn>

网上书店: <http://www.china-building.com.cn>

总 序

能源是中国崛起的动力。要贯彻十六大报告里全面建设小康社会的历史任务、保证中国经济 2020 年比 2000 年翻一番，就不得不先解决能源问题。不容置疑的是，中国能源发展正面临着越来越严峻的挑战，能源供不应求和末端低效利用的矛盾越来越突出。而长期以来受“先生产、后生活”的计划经济思想影响，我国政府一直偏重于工业节能，而忽略了建筑节能。据统计，到 2000 年底，能够达到建筑节能设计标准的建筑累计仅占全部城乡建筑总面积的 0.5%，占城市既有供暖居住建筑面积的 9%，绝大部分新建建筑仍是高能耗建筑。

需要注意的是，伴随着我国城市化的飞速发展，建筑能耗所占社会商品能源总消费量的比例也持续增加，对国民经济发展和人民的正常工作生活的影响日益突出。例如，我国空调高峰负荷已经超过 4500 万 kW，相当于 2.5 倍三峡电站满负荷出力。由于这期间工业结构调整导致电力消费持续下降，空调负荷的增加才没有使得电力供应不足的问题过于凸现。然而，随着工业结构调整的完成和经济的继续增长，工业生产能耗的降低将难以补足建筑能耗的飞速增加，建筑能耗增加导致能源短缺的问题将更加突出。据统计，目前建筑能耗所占社会商品能源总消费量的比例已从 1978 年的 10% 上升到 25% 左右。而根据发达国家经验，随着我国城市化进程的不断推进和人民生活水平不断提高，建筑能耗的比例将继续增加，并最终达到 35% 左右。因此，建筑将超越工业、交通等其他行业而最终成为能耗的首

位,建筑节能将成为提高全社会能源使用效率的首要方面。

建筑节能的经济效益和社会效益无疑是十分重大的,然而长期以来单纯依靠建筑节能设计标准中强制性条文实施却难以得到推动,这既有政策法规的原因,也与缺乏深入地开展科学建筑规划与设计、加快节能新技术的开发及应用有关。

20世纪90年代以来,清华大学建筑技术科学系在优化建筑规划设计(从小区微气候模拟预测优化到建筑单体节能模拟设计优化)、加强新型建筑围护结构材料和部品应用与开发、高效通风与排风热回收装置、热泵技术、降低输配系统能耗、新型空调供暖方式开发(如湿度温度独立控制系统)、区域供热与能源规划研究、建筑式热电冷三联供系统研究等领域开展了全面的科研和实践工作,并得到了国家自然科学基金委、科技部、建设部、北京市科委、北京市政管委、北京市发改委等各级部门的大力支持,完成了大量理论成果和应用成果。本系列丛书即是这些成果的纪录。

清华大学近年来承担的与建筑节能相关的大型项目

项目名称	项目来源	期限
住区微气候的物理问题研究	自然科学基金委重点项目	1999 ~ 2004
与城市能源结构调整相适应的采暖方式综合比较	建设部	2001 ~ 2003
北京市采暖方式研究	北京市政府科技顾问团项目	2002 ~ 2004
新建建筑能耗评估体系与超低能耗示范建筑的建立与实践研究	北京市科委	2002 ~ 2004
区域性天然气热电冷联供系统应用研究与示范	北京市科委	2002 ~ 2004
绿色奥运建筑评估体系及奥运园区能源系统综合评价分析	北京市科委	2002 ~ 2003
奥运绿色建筑标准研究	科技部奥运十大科技专项之一	2002 ~ 2003
SARS 在空气中的传播规律	自然科学基金委	2003 ~ 2003
湿空气处理过程的热力学分析及应用	自然科学基金委	2003 ~ 2005
溶液除湿空调系统应用研究与示范	北京市科委	2003 ~ 2004

续表

项目名称	项目来源	期限
天然气末端应用方式研究	中国工程院咨询项目	2004 ~2005
降低建筑物能耗的综合关键技术研究	科技部“十五”科技攻关项目	2004 ~2006

建筑节能是一个系统的工程,应该立足于我国不同建筑的用能特点和建筑的全生命周期过程,在规划、设计、运行等各个阶段通过技术集成化的解决手段,降低建筑能源需求、优化供能系统设计、开发新型能源系统方式、提高运行效率。基于此,本丛书对相应的技术方法、要点进行了系统全面地阐述。其中既包括前沿基础技术研究成果的综述与探讨,也提供了工程应用背景强的技术成果总结;既突出了先进技术研究在建筑节能中的指引作用,也注重对一些经验性成果进行总结和罗列来直接指导工程设计。特别地,还通过“清华大学超低能耗楼”这一集成平台,把各种技术的集成应用给予了示范。

本套丛书能顺利出版,得到了中国建筑工业出版社张惠珍副总编和姚荣华、田启铭、石枫华编辑的大力支持,在此表示深深的谢意。

衷心希望本丛书的出版能对我国建筑节能工作的全面开展有所助益。

江 亿

2005 年 3 月

前言

室内的温度、湿度控制是空调系统的主要任务。目前，常见的空调系统都是通过向室内送入经过处理的空气，依靠与室内的空气交换完成温湿度控制任务。然而单一参数的送风很难实现温湿度双参数的控制目标，这就往往导致温度、湿度不能同时满足要求。由于温湿度调节处理的特点不同，同时对这二者进行处理，也往往造成一些不必要的能量消耗。温湿度控制的本质是什么？完成这一控制任务热力学意义上需要的最小做功是多少？从热力学意义上看现行的空调方式的效率如何？什么样的空调系统构成才可能最好地接近热力学最小功方式？25年前我在清华大学做研究生时，在彦启森教授的指导下，就多次与当时也做研究生的何鲁敏（亚都加湿器的开创者）探讨这一系列的问题，但一直不得要领。多少年来为其所惑，成为经常思考的问题之一。10年后何鲁敏开始了加湿器的研究，20年后我和我的几位学生也沉浸于新的除湿方法研究中。与通常的热系统相比，空气调节的特殊性就在于其过程中同时存在湿度的变化。以湿度为突破口，换一个角度重新考察建筑环境控制和空调过程控制问题，就会得到全新的认识。

25年前，针对我们当时热衷于基于传热学开展对建筑环境控制系统的研究，我的硕士生导师王兆霖教授曾对我说，如果你们能从热力学方面也作这样研究，意义就不一样了。这句话25年来在我头脑里回味过无数次。开始根本就不得其要领，近年来，不断重读热力学的原著，理解热力学基

本原理,尝试着按照热力学的方法,建立室内热湿环境控制的热力学分析框架,并尝试着由此出发,具体分析解决一些实际工程问题,慢慢尝到了甜头。热力学可以帮助我们错综复杂的事物中抓到其本质,从而从整体上、从宏观上把握研究对象。目前的工作仅是在此方向上的初步尝试,然而大门似乎已敲开,大量的宝藏正等待挖掘和收获。

1995年,美国 UTRC (美国联合技术公司研发中心) 的 James Frihaut 博士来访,与我们探讨 “humidity independent control” (湿度独立控制) 的想法,并委托我们研究利用一种高分子透湿膜除湿的可行性。这开始了我们持续至今的独立除湿研究。感谢美国 UTRC 融洪研究基金,清华大学基础研究基金,国家自然科学基金以及北京市科委的科研经费的大力支持,使这一研究得以持续,并产生理论和应用的丰硕结果。

承担这一持续研究的是清华大学建筑技术科学系的“除湿小组”。陆续参加其中工作的有:张寅平教授、张立志博士 [他们的成果已在张立志编著的“除湿技术”(化学工业出版社,2004) 中全面反映]、袁卫星博士、李震博士、刘晓华博士研究生、陈晓阳硕士、曲凯阳博士、谢晓云博士研究生、刘拴强博士研究生、张伟荣硕士研究生、李海翔硕士研究生和一些陆续加入该组的新同学。相关工作还得到清华大学建筑技术科学系的其他教师和研究生的大力支持与协助,并有绍兴吉利尔公司袁一军等热衷于湿度控制的许多人士的参与和支持。“除湿小组”形成的良好的学术研究环境是这一工作能持续进展,不断有新的成果出现,不断培养出新的研究人才的基础。

从 1996 年起开始基本理论的探讨,并走了很大的弯路后,10 年来主要取得的进展如下:

- 湿空气焓分析方法,尤其是零焓点的确定方法 (见附录 D)。这奠定了湿空气热力学的基础,澄清了我们多年不清楚的问题。
- 对温湿度环境控制的本质的认识 (见第 2 章)。得到排出余热余湿所需的最小功,接近最小功的可能途径等。这为评价各种空调方式,探寻

新的可能的空调方式奠定了基础。

- 温湿度独立控制系统的设想（见第2章）。提出用干燥新风通过变风量方式调节室内湿度，用高温冷水通过独立的末端（辐射或对流）调节室内温度的方案。这可能是近百年来延续至今的空调方式在整体思路上的突破。

- 研制出基于液体吸湿剂的空气全热回收装置和新风处理装置（第5、6章）。使空气可以等温地减湿，加湿；使同一装置可对空气进行热回收，减湿，加湿，调温等各种处理，它成为实现温度湿度独立控制的关键设备。

- 研制出新的间接蒸发冷却装置（第7章）。不通过制冷装置，在湿球温度 22°C 的新疆石河子通过间接蒸发冷却，制备出 17°C 的冷水。用工程实例证实焓分析方法的有效性。

2003年SARS猖獗，适逢我们在溶液除湿研究上有所突破。为使当时非典重灾区北京人民医院急诊病房能安全的再度开业，在绍兴吉利尔公司，清华同方人工环境设备公司的支持下，我们日夜奋战，一周内研制出集热泵、溶液全热回收和溶液除湿技术于一体的新风处理机（见第6章），其性能完全达到预测值。这是“除湿小组”完成的第一台采用液体除湿技术的整机，也是由于抗击“非典”的形势所迫而逼出来的。如果说“非典”给我们什么收益的话，这可能也是其中的一项。

感谢北京市科委的大力支持和北京市热力集团的大力协助，我们在北京双榆树供热厂 2000m^2 办公楼建成了第一个完整意义上的“温湿度独立控制”系统。这一系统两年来运行良好，室内环境舒适宜人。陈晓阳硕士和马学桃师傅承担了全部的设计、施工、调试和运行工作，从工程全过程全面实践了“温湿度独立控制系统”。

感谢新疆绿色使者公司于向阳先生敢于第一个“吃螃蟹”的精神，投资建造了第一个间接蒸发冷却式冷水机组，并建成基于这样冷源的温度湿度独立控制空调。目前这一系统良好运行，这为新疆这类干燥炎热地区的环境控制问题给出一条能够大幅度节能的新途径。

本书是“除湿小组”近年部分成果的总结，也是近年来我们对室内热湿环境控制的理解的初步总结。我提出全书的写作方案，各章的完成者分别为：

第1章 刘晓华、江 亿

第2章 江 亿、刘晓华、魏庆芃、李 震

第3章 魏庆芃、赵 彬、欧阳沁、刘晓华

第4章 刘晓华、张伟荣

第5章 江 亿、刘晓华、李 震

第6章 陈晓阳、刘晓华、李 震、江 亿

第7章 石文星、刘晓华、谢晓云、谢晓娜

第8章 刘晓华、陈晓阳、刘拴强、谢晓云、张永宁、江 亿

本书的许多提法和结论是基于我们的初步研究结果第一次尝试性提出，很可能有很多不妥之处。衷心希望各界同仁能批评指正，提出更好的建议，共同推进温湿度独立控制系统的发展。当前，建筑节能正在被全社会广泛重视。空调是建筑能耗的主要部分。温湿度独立控制系统应该是降低能耗，改善室内环境，与能源结构匹配的有效途径。希望这种方式能更快、更广泛的推广开，为建筑节能事业发挥其应有的作用。

江 亿

于清华园

2005年7月31日

目 录

第 1 章	目前空调系统形式及其特点	1
1.1	目前室内环境的处理方法	1
1.1.1	现有空调系统的处理方式	1
1.1.2	室内温湿度环境的控制策略	2
1.1.3	典型的空气处理过程	2
1.2	现有空调系统存在的问题	3
1.2.1	温湿度联合处理的损失	3
1.2.2	难以适应温湿度比的变化	4
1.2.3	对环境及室内空气品质的影响	5
1.2.4	能源供给与品位问题	6
1.2.5	室内末端装置	8
1.2.6	输送能耗	8
1.3	对新空调方式的要求	10
第 2 章	室内环境控制策略	13
2.1	室内环境控制系统的任务	13
2.2	排除余热的方法	15
2.2.1	余热的来源与特点	15
2.2.2	排除余热的思路	17
2.2.3	排除余热的理想效率	18
2.2.4	实际空调系统排热效率分析	20
2.3	排除余湿的方法	23
2.3.1	余湿的来源与特点	23
2.3.2	理想除湿理论效率	27
2.3.3	实际除湿装置的效率分析	32

2.4	排除 CO ₂ 与异味的方法	34
2.4.1	CO ₂ 和异味的来源	34
2.4.2	所需的新风量要求	35
2.5	温湿度独立控制的核心思想与基本形式	36
2.5.1	去除余湿与 CO ₂ 要求新风量的一致性	36
2.5.2	温湿度独立控制系统与组成形式	39
2.6	温湿度独立控制系统要求的装置和需要解决的问题	40
2.6.1	余热消除末端装置	40
2.6.2	送风末端装置	41
2.6.3	高温冷源	41
2.6.4	新风处理方式	42
第3章	末端装置	43
3.1	余热去除末端装置 I——辐射板	43
3.1.1	辐射末端装置的特点	43
3.1.2	辐射末端装置的结构形式	45
3.1.3	辐射冷却方式下室内余热排出过程	49
3.1.4	室内长波辐射场原理及应用	54
3.2	余热去除末端装置 II——干式风机盘管	76
3.2.1	干式风机盘管的结构与特点	76
3.2.2	传热能力计算	80
3.3	送风末端装置 I——置换通风	83
3.3.1	技术原理和特点	83
3.3.2	基于温湿度独立控制的置换通风系统设计	87
3.4	送风末端装置 II——个性化送风	97
3.4.1	工作原理与末端装置	97
3.4.2	基于温湿度独立控制的个体化送风系统设计	100
第4章	盐溶液处理空气的基本原理	109
4.1	盐溶液的吸湿性能	109
4.1.1	用于除湿系统的盐溶液期望的性质	109
4.1.2	常用溶液除湿剂的性质	112
4.2	典型的除湿—再生过程分析	114
4.2.1	除湿—再生基本循环	114
4.2.2	影响除湿/再生效果的主要因素	116

4.3	与其他除湿方式的比较	121
4.3.1	其他除湿方式	122
4.3.2	溶液除湿与其他除湿方式的比较	124
4.4	溶液除湿空调系统的蓄能能力	126
4.4.1	蓄能的相关研究	126
4.4.2	蓄能能力的计算	127
4.5	对室内空气品质的作用	128
4.5.1	过滤除尘作用	128
4.5.2	去除空气中的污染物	129
4.5.3	溶液带液问题检测	130
4.6	以前的工程应用及存在的问题	131
第5章	盐溶液处理空气的基本模块与装置	135
5.1	可调温的单元喷淋模块	135
5.1.1	理想可逆过程的实现条件	135
5.1.2	可调温的单元喷淋模块	141
5.1.3	多个单元模块的串联处理过程	143
5.2	溶液为媒介的全热回收装置	145
5.2.1	现有全热回收装置及存在的问题	145
5.2.2	单级溶液式全热回收装置	146
5.2.3	多级溶液式全热回收装置	150
第6章	基于盐溶液除湿系统的新风处理方式	155
6.1	各种利用溶液为媒介的新风处理流程	155
6.1.1	统一提供浓溶液方式	155
6.1.2	独立的带有热泵的新风机组	159
6.2	热泵驱动的溶液热回收型新风机组	160
6.2.1	工作原理	160
6.2.2	冬夏性能测试	162
6.2.3	全年性能分析	165
6.3	热水驱动的溶液热回收型新风机组（形式Ⅰ）	166
6.3.1	工作原理	166
6.3.2	夏季性能测试与分析	169
6.3.3	冬季性能测试与分析	172
6.4	热水驱动的溶液热回收型新风机组（形式Ⅱ）	173

6.4.1	工作原理	174
6.4.2	夏季性能分析	175
6.4.3	冬季性能分析	178
6.5	溶液式新风机的优势与特点	179
6.5.1	对能源系统的影响	179
6.5.2	对室内空气品质的影响	181
第7章	高温冷水的制备	185
7.1	土壤源换热器	185
7.1.1	工作原理与分类	185
7.1.2	国内外研究现状	190
7.1.3	性能的影响因素	191
7.2	深井回灌	197
7.2.1	工作原理与分类	197
7.2.2	国内外研究现状	200
7.2.3	性能的影响因素与注意的问题	202
7.3	间接蒸发冷却制备冷水	204
7.3.1	工作原理	204
7.3.2	性能分析	205
7.3.3	间接蒸发冷却供冷装置的应用分析	209
7.4	人工冷源	210
7.4.1	高温冷水机组节能的基本原理	211
7.4.2	高温冷水机组的系统形式及其性能改善措施	212
7.4.3	高温冷水机组的开发案例	226
7.4.4	全年运行的冷热水机组	230
第8章	温湿度独立控制系统工程案例	235
8.1	城市热网驱动的温湿度独立控制空调系统	236
8.1.1	示范建筑与系统设计	236
8.1.2	系统运行调节	243
8.1.3	系统的性能测试	246
8.1.4	小结	251
8.2	热泵驱动的温湿度独立控制空调系统	252
8.2.1	示范工程与系统设计介绍	252
8.2.2	新风处理装置和室内送风末端装置	256

8.2.3	热泵和余热去除末端装置	256
8.2.4	系统运行分析	258
8.3	楼宇热电联产系统驱动的温湿度独立控制空调系统	266
8.3.1	示范建筑的热电冷负荷分析	267
8.3.2	复合系统的构成	269
8.3.3	复合系统的运行模式	271
8.3.4	经济性分析	278
8.3.5	小结	279
8.4	土壤源换热器与溶液除湿系统结合的温湿度独立控制系统	280
8.4.1	建筑概况及空调设计方案	280
8.4.2	地下热平衡校核	283
8.4.3	新风系统与末端装置	286
8.4.4	小结	287
8.5	间接蒸发冷却制冷的温湿度独立控制系统	288
8.5.1	建筑概况及空调设计方案	289
8.5.2	负荷计算方法	289
8.5.3	冷源及冷水流程设计	291
8.5.4	余热去除末端	292
8.5.5	新疆其他地区、不同建筑温湿度独立控制系统设计	292
附录 A	角系数的求解	297
A.1	室内设备、人员等热源与围护结构之间的角系数求解	297
A.2	室内设备、人员等热源之间的角系数求解	311
附录 B	吸湿盐溶液物性	321
B.1	溴化锂溶液	321
B.2	氯化锂溶液	323
B.3	氯化钙溶液	328
附录 C	除湿/再生单元模块性能测试	335
C.1	单元模块的构成	335
C.2	热质交换性能的测试	336
C.3	流体力学性能的测试	342

附录 D 湿空气处理过程的焓分析	345
D. 1 湿空气的零焓点	346
D. 2 焓分析方法的应用	351
参考文献	359

第 1 章 目前空调系统形式及其特点

1.1 目前室内环境的处理方法

1.1.1 现有空调系统的处理方式

对于空调系统，按照承担室内热湿负荷所用介质的不同，可以分为全空气系统、空气—水系统、全水系统和制冷剂直接蒸发系统。其中，全水系统是指不向房间供给新风的风机盘管空调系统，全部负荷均由风机盘管承担，卫生条件较差。制冷剂直接蒸发系统是指自带冷源的窗体空调器、分体空调器和柜式空调器等，统称为房间空调器。以下介绍常用的全空气系统和空气—水系统。

全空气系统：利用空气作为承担室内负荷的介质，即将经过处理的空气送入空调房间内。在夏季，同时消除室内的余热余湿后，使室内的温湿度保持在一定范围内；在冬季，在消除室内余湿的同时，向室内补充热量。由于空气的比热容较小，为消除余热、余湿所需的送风量大，风道的断面尺寸大，需要占有较多的建筑空间。

空气—水系统：同时利用空气和水作为承担室内负荷的介质，即利用空气、水向室内输送冷量或热量，如风机盘管加新风系统等。风机盘管设在空调房间内就地处理空气。夏季供给风机盘管冷媒水，对空气进行降温除湿处理，向房间送冷风；冬季供给风机盘管热媒水，对室内空