

同济大学机械工程学院

硕士学位论文

多区独立新风+冷辐射顶板系统控制策略研究

姓名：左明明

申请学位级别：硕士

专业：供热、供燃气、通风与空调工程

指导教师：潘毅群

20090301

摘要

十多年来,独立新风系统(Dedicated Outdoor Air System:DOAS)在国内得到了不断的发展和实际应用,但是DOAS必须结合其他的显冷设备共同承担房间负荷。本论文着眼于多区独立新风+冷辐射吊顶系统,研究该复合系统协调运行的控制策略,以期推进该复合系统的进一步应用。本文首先研究了能够避免顶板发生结露的顶板极限进口水温,通过基于THERM的有限元分析模型,结合实际实验台上进行的六个结露实验,得到在顶板尺寸、材料物性和冷冻水流态一定的情况下,顶板进口水温与顶板表面最低温度之间的温差为一个定值。在该极限进水温度研究基础上,本文进一步研究了三种冷顶板进口水温控制策略:室温跟踪法、水温跟踪法及冷凝水保护环路的顶板进水温度控制法,通过对这三种控制策略调节过程的讨论,分析了它们存在的优点和不足。在分析和比较了最不利参数法及允许波动区法这两种多区参数选择法的基础上,本文分别提出并讨论了独立新风系统的温湿度闭环控制策略及湿度开环控制策略,通过分析两种控制策略的调节过程,比较了这两种多区独立新风系统控制策略的优点及不足。

在本文提出的多区独立新风+冷辐射顶板复合系统控制策略的基础上,在独立新风+冷辐射顶板实验台上搭建了该复合系统的控制系统并进行了多组复合系统的控制实验。在实验中,首先分析了最不利参数法对房间湿度的控制过程,实验结果表明该方法能够有效保持多区空调系统内各分区的相对湿度。其次,通过多个具有不同送风温度的实验过程,可分析得出本文提出的控制策略能够有效根据送风温度的差异对房间温度进行调节。再有,通过对该复合系统全天控制过程的分析,说明了本文提出的极限进水温度的控制策略有效地避免了系统运行时可能发生的结露问题,同时能够将多区空调房间的温度参数控制在了其设定值 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 范围内,并保证每个空调区的相对湿度都处于其设定值的 $\pm 10\%$ 。这些实验结果说明本文提出的控制策略不仅能够有效防止结露问题,还可以有效控制多区空调系统的温湿度参数,能够实现对多区独立新风+冷辐射顶板空调系统的有效控制

关键词:独立新风 冷辐射顶板 PLC控制系统 结露

ABSTRACT

DOAS (Dedicated Outdoor Air System) has been developing increasingly and getting more applications in decades around the world. DOAS has to be combined with such sensible cooling systems as fan coil, radiant cooling panel and so on to meet the cooling load for spaces. This thesis focuses on the study of the controlling strategies of multi-zone DOAS +radiant cooling panel system, intending to promote the further development and application of this hybrid system. Firstly the allowed minimum inlet water temperature of radiant cooling panels is investigated based on finite element modeling and condensation experiments on test bed, finding out that the difference between inlet water temperature and the minimum surface temperature of radiant cooling panels keeps constant on condition that their geometrical size and thermal properties and the chilled water flow pattern in the panels are the same. Three panel inlet water controlling strategies - room air temperature tracking, inlet water temperature tracking and anti-condensation circulation- are studied and their strengths and shortcomings are examined. Meanwhile, Two controlling parameter selection methods for multi-zone HVAC system – Critical Zone method and Allowed Fluctuating Band method are analyzed and then the close-loop temperature and humidity controlling strategy and open-loop humidity controlling strategy of multi-zone DOAS system are proposed and discussed, both of which are not only aimed at proper control of room air temperatures but also take accounts of room humidities in multi zones.

On the basis of the studies on the controlling strategies of radiant cooling panel and multi-zone DOAS, a PLC control system are set up on a multi-zone DOAS + radiant cooling panel system test bed. A hybrid control strategy consisting of inlet water temperature tracking strategy, and closed-loop temperature and humidity DOAS controlling strategy are written into the control system, which is tested and studied by dozens of experiments on typical summer days in Shanghai. Critical Zone method for selecting multi-zone parameters is first investigated and its capability in

maintaining multi-zone humidity is proven by the experiments. Moreover, the stability and effectiveness of this hybrid control strategy are validated by analyzing the experimental results for different supply air temperatures and those for a whole day. It is concluded that the controlling strategies proposed and studied in this thesis are able to keep room air temperature and relative humidity of each zone within the range of $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ and $\pm 10\%$ around their setting points respectively, without any occurrence of condensation on the surfaces of radiant cooling panel, therefore the effective controlling of multi-zone DOAS + radiant cooling system can be achieved by these strategies.

Key Words: DOAS, Radiant cooling panel, PLC control system condensation

学位论文版权使用授权书

本人完全了解同济大学关于收集、保存、使用学位论文的规定，同意如下各项内容：按照学校要求提交学位论文的印刷本和电子版本；学校有权保留学位论文的印刷本和电子版，并采用影印、缩印、扫描、数字化或其它手段保存论文；学校有权提供目录检索以及提供本学位论文全文或者部分的阅览服务；学校有权按有关规定向国家有关部门或者机构送交论文的复印件和电子版；在不以赢利为目的的前提下，学校可以适当复制论文的部分或全部内容用于学术活动。

学位论文作者签名：

年 月 日

同济大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师指导下，进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本学位论文的研究成果不包含任何他人创作的、已公开发表或者没有公开发表的作品的内容。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本学位论文原创性声明的法律责任由本人承担。

学位论文作者签名：

年 月 日

第1章 概述

1.1 背景介绍

随着我国城市化的飞速发展，建筑能耗所占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。建筑能耗中，暖通空调设备的能耗占有比较大的比例，特别是常规空调耗电量大，很多地区在夏季高温期间因空调用电出现电力负荷的高峰期，我国电力系统负荷的峰谷差不断拉大，电网的安全运行受到威胁。另一方面，随着空调的广泛使用，随之而来的室内健康问题也越来越引起关注。尤其是经过SARS危机，人们普遍关心的问题是：空调是否会对居住者的健康有负作用？

目前使用较广的常规空调系统难以适应不同热湿比的变化条件，因为基于冷凝去湿的工作原理，即靠降温使空气冷却到其露点以下而实现除湿，因此降温与除湿必然同时进行。这种集中处理的送风具有相同的温度和含湿量参数，但在实际建筑中，各个空调分区所具有的热湿状况相差非常大，在目前实际系统设计中常常采用末端再热的方式来提高冷却除湿后的送风温度以适应各空调分区的显热负荷变化。使用这种集中处理的送风满足了温度要求就很可能无法将室内的湿度控制在要求的范围或满足了湿度要求就无法满足温度控制，从而只能在各种不同类型的建筑中根据建筑的使用功能来确定一个优先规则，如在舒适性空调中优先控制温度，而在洁净室或医院手术室等对空气湿度要求较高的场合则采用湿度优先的控制策略并使用末端再热的方式来承担显热负荷。这两种控制策略无疑都是以室内环境的某一部分作为代价而舍弃，这种舍弃不仅对室内环境带来了隐患，还有可能增加能源的消耗。

可见，目前的常规空调系统难以实现对室内温度和湿度同时进行有效的控制，尽管当前使用较为广泛的风机盘管加独立新风系统能够部分解决这种温湿度参数需要同时控制的问题，但是其室内盘管湿工况运行所引发的问题还是层出不穷，而且在多区温湿度控制的问题上仍然无法实现可行的控制策略，因此，在保证室内空气品质和节能的前提下开发新型的空调系统形式或空调系统的控制策略就显得尤为必要。

目前普遍认为温湿度独立控制系统可能是一个能够有效解决空调房间温度和湿度参数同时控制的方法。所谓独立新风系统（DOAS）是指新风系统独立，它具备以下特点：

a) 新风机组采用低温送风机组，机组出风温度低于 7°C ，新风机组除了承担新风负荷外，还承担室内全部潜热负荷和部分显热负荷；

b) 室内剩余显热负荷由其他显冷设备承担，这些显冷设备可以是辐射冷顶板、风机盘管机组等；

c) 由于采用独立新风系统时，排风的温度和含湿量将明显低于室外，因此新风和排风之间采用全热交换器可以进一步降低能耗；

d) 由于送入的新风温度等于或低于 7°C ，为了防止送风口表面凝露，同时保证室内合理的换气次数，需要采用诱导比较大的诱导风口。

上述特点 b) 中提及的众多显冷设备中，无疑辐射顶板与 DOAS 配套使用时，相对其它末端设备具有舒适和节能等优势。独立新风+辐射顶板空调系统有着良好的舒适性、安全性、健康性以及经济性，应该在进一步我国得到推广使用。目前 DOAS 和辐射顶板技术都已成熟，DOAS+辐射顶板系统也越来越受到专业人士和用户的欢迎，但是辐射顶板结露问题却未能很好的解决，阻碍了该系统的进一步应用，因此有必要对冷辐射顶板+独立新风这一复合系统在防止结露和多区控制的问题上进行深入的研究，为该复合系统的进一步应用奠定基础。

1.2 文献综述

DOAS 研究重点早期主要集中在如何解决全空气变风量系统的新风问题以及如何执行 ASHRAE 62 的各项要求上。世纪之交，西方主要工业发达国家陆续出台的绿色建筑评估体系则促进了 DOAS 的进一步发展。2001 年 9 月 11 日发生震惊世界的恐怖事件后，建筑物内部的安全问题成为全球关注的大问题，被称之为“反恐空调”的 DOAS 自然成了各种建筑物健康与安全设计指南中的空调系统“明星”。2003 年肆虐全球的 SARS 疫情对集中空调提出了严峻的挑战，无回风的 DOAS 更是获得了包括普通用户、业主以及专业人士的青睐。这一系列的事件，大大超出了最初的研究者的意料，DOAS 的应用范围迅速扩展，成了美国暖通空调界最近十几年的热门研究课题。

国内外对独立新风结合辐射顶板系统的研究较多集中在其能耗问题上，更

多的是比较该系统与 VAV 系统的特点及耗能。Jeong 等以宾夕法尼亚州立大学的一间工作室为对象, 全年逐时能耗模拟显示 DOAS+CRCP 系统比过渡季使用全新风免费供冷的 VAV 系统节电 42%^[3]; Conroy 等以费城的一栋建筑物为对象分析得出 DOAS+CRCP (Dedicated outdoor air system + Ceiling radiant cooling panel) 系统全年的运行费比常规的 VAV 系统节省 29%^[6]; Zhang 等对冷辐射顶板与通风系统共同承担室内负荷进行了一系列的模拟, 并对房间的平均空气温度、平均含湿量、顶板表面最高的相对湿度及不同通风策略进行了研究, 该研究指出在炎热潮湿的气候条件下应用该复合系统时有必要在人员进入前进行一些通风预除湿。文献[16]选择了美国 11 个城市(从北纬 30-47.60, 涵盖美国九个气象分区, 基本能代表美国本土的各种气候), 以办公楼为对象进行模拟表明, 独立新风+辐射顶板系统相对于 VAV 系统的节能量从 17%-42%不等, 平均节能量为 30%, 并且气候严寒干燥地区的节能效果优于阴冷潮湿的地区^[7]。

2002 年下半年开始湖南大学的殷平教授首次将 DOAS 这一新概念引入到我国的空调工程中, 并对独立新风系统做了一系列的研究。2004 年殷平对低温送风独立新风系统的组成及全热交换器、新风机组、末端设备、风道的设计计算进行了介绍, 分析了其热湿平衡^[9]; 2005 年殷平分析了以风机盘管机组为空调显冷末端装置, 以普通冷水机组为冷源的独立新风空调系统的特点, 并结合设计实例, 介绍该空调系统的设计方法, 详细说明了如何实现风机盘管的干工况运行^[10]; 肖益民等分析了利用相关标准规定的最小风量来承担室内潜热负荷的可行性, 分析结果表明影剧院、商店等新风量标准较低或实验室、计算机房这类体力活动较强的建筑, 最小设计新风量不能完成除湿任务, 而在阅览室、会议室及办公室等类型房间中, 当选用适当的室内设计参数, 最小新风量能够满足房间爱你除湿任务的要求^[11]; 2004 年天津大学李建兴等人对独立新风系统运行的进行能耗分析, 并与变风量系统的运行进行了能耗对比, 他们认为独立新风系统不仅可以有效防止建筑内交叉污染, 而且具有较低的运行费用; 独立新风系统由于需要独立处理和双转轮设置, 较常规全空气系统投资稍大, 其增量投资可从运行费用 and 安全性方面获益^[12]。清华大学狄洪发等在一个密闭的实验房间内测试了辐射吊顶夏季供冷和动机供暖的热工性能, 并将实验测得的辐射吊顶供冷和供热能力与传统的肋片理论计算结果进行了比较, 该研究结果表明辐射供冷和供热能够提供较好的热舒适感觉, 同时肋片理论可以用来预测顶板在不同进水温度下的供冷和供热能力^[13]。此外, 江亿等对温湿度独立控制进行了

大量的研究，特别是具有溶液除湿功能的独立新风处理系统，他们对一具有溶液除湿新风机组和风机盘管干工况运行的实际空调系统进行了测试，通过对测试结果的分析，他们得出与传统电压所制冷系统相比，当电热价比为 3 时，湿度独立控制的空调系统在将室内相对湿度控制在 40%-60%之间的同时可减少 20%的运行费用^[14]；在上述溶液除湿新风机组基础上，他们进一步将热泵技术应用于溶液除湿过程，根据相关测试结果，新风机组夏季性能系数为 6.3-7.3，冬季性能系数为 4.7-5，与改进前的溶液除湿新风机组相比，整体效率提高了近 10%^[16]。

从国内外所做的独立新风系统的分析，目前大都集中在对独立新风和其他显热末端共同构成的空调系统与 VAV 系统或其它常规空调系统的能耗对比分析，但是对于独立新风结合辐射顶板的控制问题，直到 2005 年 Mumma 教授才对单一区域进行研究，其提出的多区控制策略则需要进行末端再热，显然冷热抵消的结果必然是系统运行能耗的提高，而在国内目前对这方面问题还很少有人涉及。

1.3 本文的研究目的和主要工作

考虑到目前冷辐射顶板+独立新风系统在实际应用中的一些问题，以及国内一些应用于盘管+独立新风系统的实际工程的成败，本文以冷辐射顶板+独立新风系统为研究对象，研究目的是确定影响冷辐射顶板结露问题的关键参数，在此关键参数的基础上制定能够实现多区温湿度独立控制的冷辐射顶板+独立新风系统控制策略，为该系统的进一步应用做一些探索性工作。

为了实现上述目标，本文的主要研究工作如下：

1. 分析前人对于冷辐射顶板结露问题的研究，建立冷辐射顶板的有限元传热模型，研究各种参数如保温外侧空气温度和房间空气温度等对顶板表面温度的影响，并分析顶板表面温度和顶板进口水温的关系，在分析了这种关系的基础上进一步研究如何有效避免顶板表面发生结露。

2. 分析冷辐射顶板系统的运行特点，并根据其运行的特点制定出几种合理的冷辐射顶板进口水温控制策略，分析和比较这些控制策略的优缺点。

3. 分析空调系统多区控制的特点，提出适用于多区控制的控制参数选择方法，在此基础上提出适于多区独立新风系统控制的策略，并分析和比较这些控制策略所具有的优点及存在的不足。

4. 在多区域冷辐射顶板+独立新风空调实验台上进行多区域控制系统的构

建，从硬件和软件层次上实现所制定的多区域控制策略。

5. 进行多工况的多区域冷辐射顶板+独立新风系统的实验研究，通过对不同工况下实际系统的运行参数来分析既定的控制策略在不同工况下的可靠性和有效性，验证其是否能够实现多区域的温湿度控制。

第 2 章 冷辐射顶板进口水温控制策略研究

冷辐射顶板系统的控制主要需要从两方面着手考虑，一方面是如何防止冷辐射顶板表面在工作过程中发生结露；另一方面是如何根据房间对象的调节过程和状态来建立合理的顶板进口水温控制策略。第一点是应该在空调系统运行过程中尽量避免的问题，运行过程中顶板表面发生哪怕只是一次结露都有可能造成不良的影响，因此不论采用何种进口水温的控制策略，防止冷辐射顶板结露始终都是应用冷辐射顶板所必须要考虑的问题。在防止冷辐射顶板表面发生结露的基础上就应该探究如何制定合理的顶板进口水温控制策略，使顶板在保证系统运行过程稳定的情况下，不仅能够跟踪房间的干球温度而且还可以发挥其供冷能力。本章将首先通过理论和实验相结合的方法来分析冷辐射顶板进口水温极限值与房间状态的关系，这里称该进水温度的极限值为极限进水温度。在对极限进水温度的研究基础之上，本章将根据冷辐射顶板系统的运行特点来研究顶板进口水温的控制策略，并分析各种策略的优缺点。

2.1 极限进水温度的理论分析和实验研究

为了更准确地分析实验中所使用的冷辐射顶板表面温度分布，有必要根据实际顶板的尺寸和物性分析顶板内部的传热过程和顶板表面温度的最不利点。由于目前与毛细管管内流动特性相关的成熟理论还比较少，本文主要以金属顶板作为极限进水温度的分析对象。

为了对辐射顶板建立传热过程分析模型，本文使用美国劳伦斯伯克莱 (LBNL) 开发的建筑部件二维传热过程模拟分析软件 Therm，根据顶板的实际尺寸建立二维稳态传热模型。该传热分析软件是建立在有限元法基础上，能够模拟较为复杂的建筑部件，而且该软件可以计算空气层内各表面的角系数以准确计算空气层内各表面间的辐射换热。此外该软件具有较为简单的用户界面，能够利用在 CAD 中画好的几何尺寸进行建模。对于本文所要研究的辐射顶板部件，其传热过程不仅有热流向下传入房间这个过程，同时热量还会透过保温材料传递至顶板上部空间，因此这里不是仅仅以辐射顶板为研究对象，而是以辐射板、保温材

料以及它们之间的空气间层作为研究对象进行分析。

实验中所用辐射顶板的实际尺寸如图 2.1 所示，冷辐射顶板结构由金属顶板及覆盖于其上的保温材料构成，图中所示各种材料的物性参数见表 2.1。

表 2.1 顶板各组成材料导热系数

材料名称	保温材料	空气层	铝板
导热系数 (W/m ² ·K)	0.061	0.0517	237

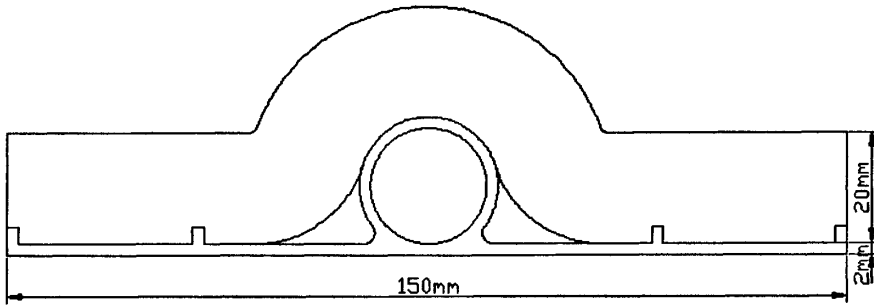


图 2.1 冷辐射顶板的结构和尺寸

进行传热过程分析计算时，其管内对流换热系数引用文献^[17]中推荐的管内流动对流换热系数计算公式如下所示：

管内对流换热系数计算式：

当 $Re < 2300$ 时，

$$Nu = 3.657 \quad (2.1)$$

当 $Re \geq 2300$ 时，

$$Nu = \frac{(f/8)(Re - 1000) \cdot Pr}{1 + 12.7\sqrt{f/8} \cdot (Pr^{\frac{2}{3}} - 1)} \quad (2.2)$$

其中：
$$f = \frac{1}{(1.82 \cdot \log_{10} Re - 1.64)^2}$$

根据 Helmut 等推荐的辐射顶板下表面的复合换热系数（包括自然对流换热系数和辐射换热系数）为 $9 \sim 12 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ^[20]。显然如果顶板下表面的对流系数越大，那么顶板表面温度和空气温度的差距就越小。考虑到夏季制冷工况下室内

温度要高于顶板表面温度，因此在顶板表面复合对流换热系数越大的情况下，顶板表面的温度也就会越高，随之结露的可能性也就减小。为了研究顶板在较为不利的情况下的传热过程，这里采用 $9W/(m^2 \cdot K)$ 为顶板表面的复合对流换热系数。

辐射顶板上侧覆盖的保温材料表面边界条件可能会随着室外气象条件的变化而变化较大，本文将在改变该表面温度和对流换热系数的情况下分别比较其对冷辐射顶板下表面的最低温度的影响。

依据上述讨论的各种条件建立的二维稳态传热模型如图 2.2 所示：

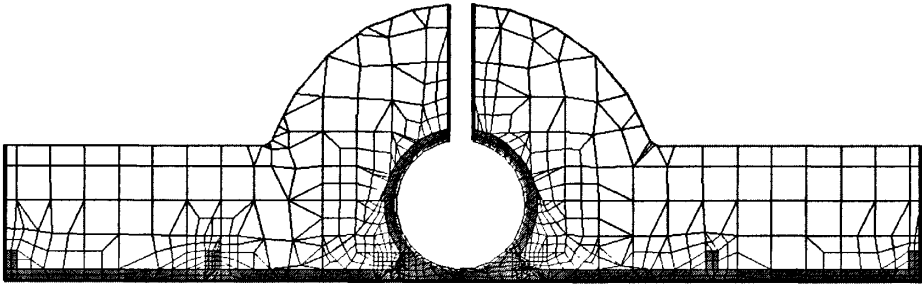


图 2.2 冷辐射顶板 Therm 模型网格划分

考虑到保温材料外表面和辐射顶板下表面的边界条件、进水水温和进水量等几种条件都可能影响顶板表面可能出现的最低温度，本文将这些条件进行组合，分别建立了 18 个传热计算模型，这些模型的几何尺寸和材料的物性都是相同的。18 个模型的计算结果根据房间空气温度和顶板进水水温的不同分别统计在表 2.2、2.3 和 2.4 中。

从三个表中的数据可以看出，在没有引起流态变化时，尽管冷辐射顶板管内流量发生变化，但是板面的最低温度相差并不是很大，基本都是在 0.1°C 。而当流态发生变化时，特别是从紊流转化为层流状态后，板面的最低温度大幅升高，比紊流状态下的板面最低温度高了近 2°C 左右。

分析表 2.2 和 2.4 的结果，室内温度对于进水水温和板面最低温度之间的差值影响非常小，室温下降了 2°C 后，该温度差只是变化了 0.1°C ，因此基本可以忽略室内温度变化所可能带来的板面最低温度的变化。同样，保温材料外表

面无论是对流换热系数变化还是空气温度变化也基本对该温度差影响较小，故也完全可以忽略其对板面最低温度的影响。

顶板进水水温对板面最低温度的影响非常显著，但是从表 2.2 和表 2.3 的比较中可以看出，不管水温是否变化，相同流态下的顶板表面最低温度和进水水温的差基本都保持一致，层流状态下大约为 2℃，紊流状态下大约为 0.4℃。

表 2.2 室内温度为 26℃冷辐射顶板进水水温为 16℃时各工况下

顶板表面最低水温

模型序号	保温外侧空气温度 (℃)	保温材料表面对流换热系数 (W/(m ² *K))	进水水温 (℃)	顶板水量 (L/h)	流态	顶板表面对流换热系数 (W/(m ² *K))	室内空气温度 (℃)	顶板表面最低温度 (℃)
一	30	2	16	100	层	9	26	18.2
二	30	2	16	250	紊	9	26	16.4
三	30	2	16	300	紊	9	26	16.3
四	33	2	16	100	层	9	26	18.3
五	33	4	16	250	紊	9	26	16.4
六	33	4	16	300	紊	9	26	16.3

表 2.3 室内温度为 26℃冷辐射顶板进水水温为 14℃时各工况下

顶板表面最低水温

模型序号	保温外侧空气温度 (℃)	保温材料表面对流换热系数 (W/(m ² *K))	进水水温 (℃)	顶板水量 (L/h)	流态	顶板表面对流换热系数 (W/(m ² *K))	室内空气温度 (℃)	顶板表面最低温度 (℃)
一	30	2	14	100	层	9	26	16.6
二	30	2	14	250	紊	9	26	14.4
三	30	2	14	300	紊	9	26	14.4
四	33	2	14	100	层	9	26	16.7
五	33	4	14	250	紊	9	26	14.5
六	33	4	14	300	紊	9	26	14.4

表 2.4 室内温度为 24℃冷辐射顶板进水水温为 16℃时各工况下

顶板表面最低水温

模型序号	保温外侧空气温度 (℃)	保温材料表面对流换热系数 (W/(m ² *K))	进水水温 (℃)	顶板水量 (L/h)	流态	顶板表面对流换热系数 (W/(m ² *K))	室内空气温度 (℃)	顶板表面最低温度 (℃)
一	30	2	16	100	层	9	24	18.2
二	30	2	16	250	紊	9	24	16.3
三	30	2	16	300	紊	9	24	16.3
四	33	2	16	100	层	9	24	18.3
五	33	4	16	250	紊	9	24	16.3
六	33	4	16	300	紊	9	24	16.3

综合上述模拟结果和分析可以得到如下结论：

1. 冷辐射顶板进口水温和顶板表面最低温度之差基本上不受顶板上下表面的对流换热系数和空气温度影响；

2. 冷辐射顶板内水流的流态变化对该温度差影响比较大，但是当流态不变时，流量变化的影响则非常小；

3. 当冷辐射顶板结构和材料特性一定时，在特定流量下冷辐射顶板进口水温和顶板表面最低温度差基本不受进水温度变化的影响，基本保持一个相对恒定的差值。在本实验使用的顶板结构和材料特性下，该温度差为 0.4℃。

上述分析是针对房间的温湿度参数分布比较均匀的情况下进行的，但是在下送风的空调房间中其热湿参数的分布往往具有一定的不均匀性。文献^[13]对下送风形式下房间内的温度和湿度分布进行了大量的讨论，该研究中指出下送风房间内，靠近顶板区域的空气含湿量相对较高，特别是在室内人员停留的位置。文献^[18]中则给出了一些欧洲的研究人员进行的与防止冷辐射顶板结露相关的研究结果，部分研究认为顶板表面的温度可以比房间内的露点温度低 1-2℃，但是根据前文冷顶板传热过程分析可以看出顶板进口水温如果低于室内空气露点 1℃甚至更低的时候，顶板表面就有可能结露。因此考虑到室内湿度垂直分布的特点，结合文献[16]和[21]的研究结果，冷辐射顶板进水水温高于房间露点温度 1℃时既能有效防止结露的发生，又可以充分发挥冷辐射顶板的冷却能力。基

于上文二维传热分析的结论,针对本文所研究的冷辐射顶板特性,顶板进口水温 and 顶板表面最低温度其实还有一个差值 0.4°C ,因此实际进水水温可以降至仅高于房间露点 0.5°C ,也就是说实际进水极限温度应该是高于房间露点温度 0.5°C 所对应的水温。

为了验证上述分析确定的进水温度极限值,根据进水温度和房间内传感器测得的露点温度之差分别进行了6次试验。实验房间为 $2.8 \times 5.34\text{m}$,层高为 2.7m 的矩形房间,送风通过四个对称布置的地板旋流风口送入房间,吊顶除周边留有宽度约为 150mm 的石膏板吊顶外均覆盖冷辐射顶板,详细的布置位置见图 4.3。温湿度传感器^[24]布置于实验室内离地 1.1 米左右,根据该温湿度传感器测得的空气干球温度和相对湿度利用文献[36]中给出的计算公式计算出相应的空气露点温度,并将其与该房间供水管水温传感器^[22]所测得进口水温进行比较,得到相应的露点温度和顶板进水水温温差。在这6次试验中,选择的露点温度和进水水温差分别为 0.5°C , 0.5°C , -1°C , -2°C , -2°C , -3°C ,如表 2.5 所示,在每一次试验中,这一温差都将保持到冷辐射顶板结露或是实验时间达到 100 分钟,这六次实验过程中水温和房间温度的变化可见附录 D:金属顶板极限进水温度实验数据。

表 2.5 冷辐射顶板进水温度极限值实验

实验序号	$\Delta T (^{\circ}\text{C})$	实验时间 (min)	结露时间 (min)
一	0.5	130	/
二	0.5	150	/
三	-1	80	80
四	-2	70	70
五	-2	100	/
六	-3	50	10

尽管测量顶板表面电阻能够更准确的分析顶板表面是否有凝露现象,但是由于缺乏相应的测量设备,本文所采用肉眼观察的手段来判别顶板是否发生结露。

图 2.3 给出了顶板进水温度仅比房间露点温度高出 0.5°C 时的水温和房间露点温度变化的关系,该实验一共进行了 130 分钟,在实验进行的过程中,顶板

表面均保持干燥，没有出现任何结露现象，因此高出房间露点 0.5°C 的温度作为冷辐射顶板的进水水温是安全的。

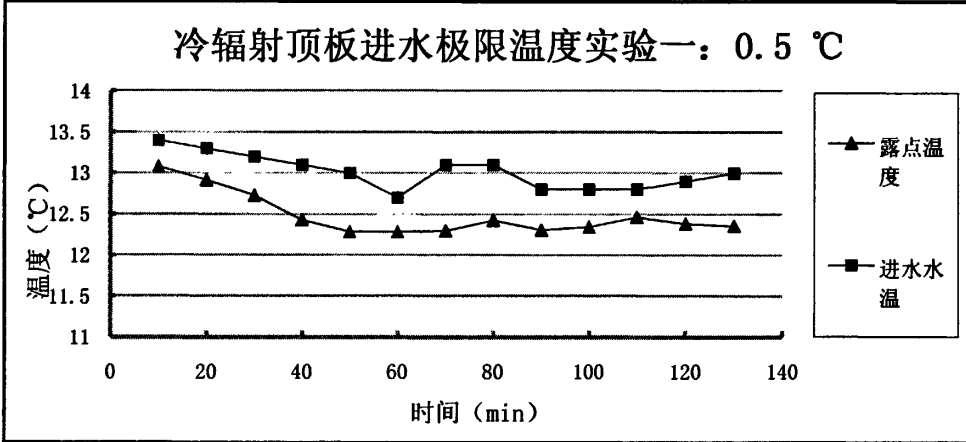


图 2.3 冷辐射顶板进口水温和露点温度温差为 0.5°C 的水温变化

为了进一步验证冷辐射顶板进口水温与房间露点温差为 0.5°C 时是否会引起顶板表面发生结露，实验二仍然采用该温差并适当延长了实验的时间。从图 2.4 中可以看出以 10 分钟为采样周期的顶板进口水温和房间露点温度，显然这两个温度在这一过程中基本保持了 0.5°C 的温差，且从实验过程中的观察发现尽管实验时间有所延长，但是顶板表面依然没有任何结露的迹象。

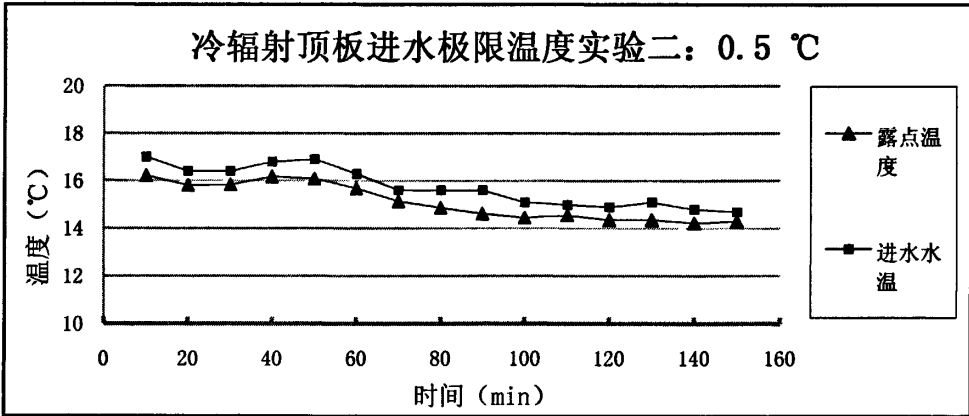


图 2.4 冷辐射顶板进口水温和露点温度温差为 0.5°C 的水温变化

为进一步说明顶板进口水温和结露现象的关系，实验三将水温调至露点温

度下 1℃，如图 2.4 所示。根据前文的模拟结果，实质上冷辐射顶板板面最低温度比相应的房间露点温度低 0.5℃左右，随着实验时间达到 80 分钟左右的时候，顶板表面出现了非常少量的结露。

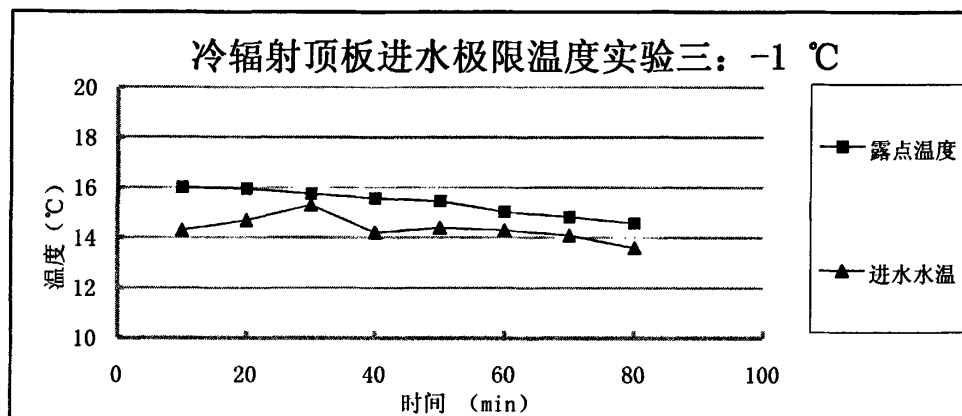


图 2.5 冷辐射顶板进口水温 and 温度差为-1℃的水温变化

图 2.6 和 2.7 给出了两次进水温度低于室内露点温度 2℃的实验数据，但是图 2.7 给出的数据显示一直到实验时间达到 100 分钟，顶板表面都没有任何结露的现象，图 2.6 所进行的实验则在实验进行到 70 分钟左右的时候，冷辐射顶板就已经出现了明显的结露现象，而且在实验进行到 80 分钟左右的时候，顶板表面已经出现了大片的水迹，这在冷辐射顶板运行过程中是绝对不允许出现的。

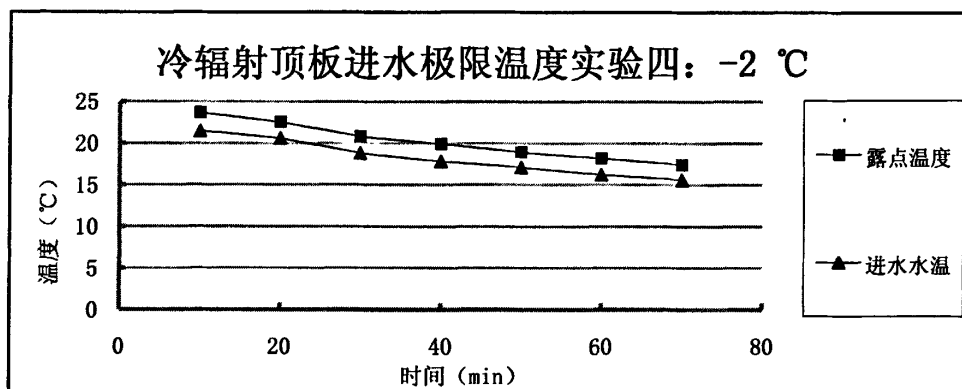


图 2.6 冷辐射顶板进口水温 and 温度差为-2℃的水温变化

尽管实验四和实验五中顶板进口水温和房间露点温度之间的温差是相同的，但是分析两次实验顶板的进口水温可以发现，实验四的顶板进口水温相对于实

实验五平均高出 4℃，因此实验五顶板表面的温度也就相应的比实验四低，这样由温度引起的冷辐射顶板表面附近空气的密度就会有所差异。考虑到空气密度一定程度上与其温度成反比，因此实验五中靠近顶板附近的空气密度较大，随之形成的下降气流的流速也就相对较大，这样人员驻留区散发的湿量就相对难以达到顶板附近，从而有可能保证顶板表面附近的空气的露点温度仍然低于顶板表面最低温度，从而没有发生结露；另一方面，实验四顶板表面附近空气向下流速较小，人员驻留区的散湿就能够顺利进入到顶板附近，从而使得顶板附近空气的露点温度相对较高，从而发生结露。

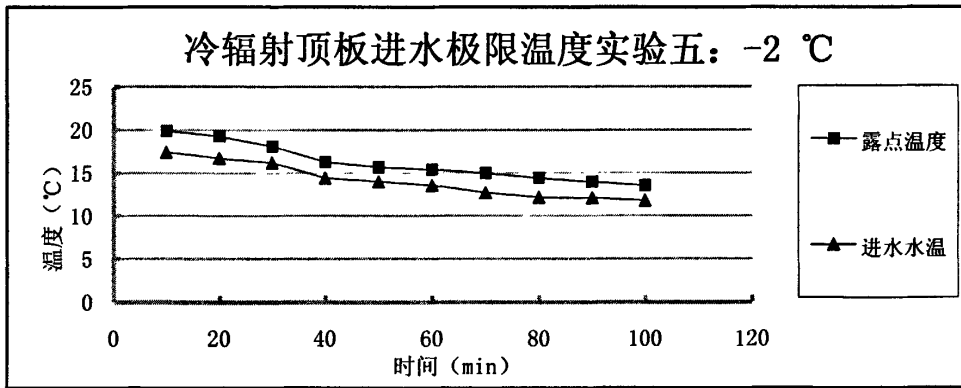


图 2.7 冷辐射顶板进口水温 and 温度差为-2℃的水温变化

实验六中冷辐射板的进口水温调至房间露点温度下 3℃，如图 2.8 所示，实验开始后 10 分钟左右顶板表面就出现了结露，在随后的时间里，一块块小的湿表面迅速扩展为大面积的水迹，与其他实验相比，很明显较低的水温导致了较快的结露速度。

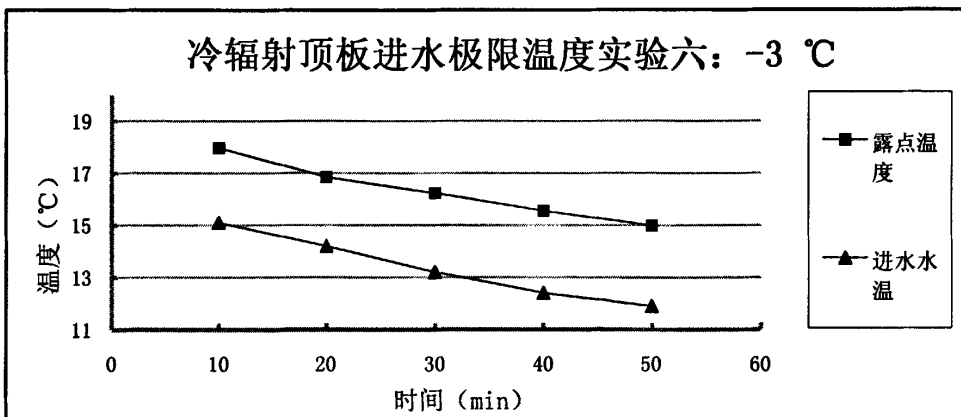


图 2.8 冷辐射顶板进口水温和温度差为 -3°C 的水温变化

从上述六个实验的结果可以看出冷辐射顶板进口水温高于房间空气露点温度 0.5°C 时,冷辐射顶板表面不会出现任何结露现象,但是更低的进水温度如比露点低 1°C 则在一个半小时左右就会形成可以观察的结露现象。这样的试验结果证实了之前得到的关于防止结露的极限进水温度的研究,同时试验结果还说明结露过程的时间与进口水温和房间露点温度的差值相关,进口水温越低,结露过程所需要的时间就越短,在该差值达到 -3°C 时,基本上 10 分钟以内就会形成大片结露。

2.2 冷辐射顶板进口水温的控制策略研究

目前有许多研究者针对冷辐射顶板进口水温的控制提出了各自的控制方法,如有研究者根据室外温度进行重置进口水温,并根据各个房间状态的反馈对各房间的进口水温进行再调节的控制方法。本文将基于定流量变水温的冷辐射顶板系统,依据控制策略的构成和着眼点来进行分析,并且这里假定调节顶板进口水温的三通阀阀位越大,相应回水水量也就越大,顶板的进口水温也就越高。在后文中将分别讨论室温跟踪控制法、水温跟踪控制法及带冷凝水保护环路的顶板进口水温控制法。此外当冷辐射顶板与独立新风系统协调运行过程中,由于独立新风的送风温度相对较高且其风量也较小,独立新风系统的供冷能力相对较小,因此在制定冷辐射顶板的进口水温控制策略时有必要尽量使顶板的进口水温接近房间状态所对应的极限进水温度或是冷冻水系统供水水温(取其高者)。

2.2.1 室温跟踪控制法

定流量变水温的冷辐射顶板系统中可以进行调节的变量就是顶板进口水温,需要控制的参数就是房间的干球温度,因此最直接的思路就是以房间的干球温度作为控制目标通过 PID 控制器来调节进口水温以达到控制室内温度的目的。但是根据 2.1 节中关于极限进水温度的讨论可以看出,以房间干球温度作为目标参数来调节进口水温时,顶板的进口水温会受极限进水温度的限制,为了防止冷辐射顶板表面发生结露,顶板的进口水温不能太低。该进口水温的最低值

就是房间当前状态所对应的极限进口水温。在上述分析的基础上，可以得到相应的控制策略如下：

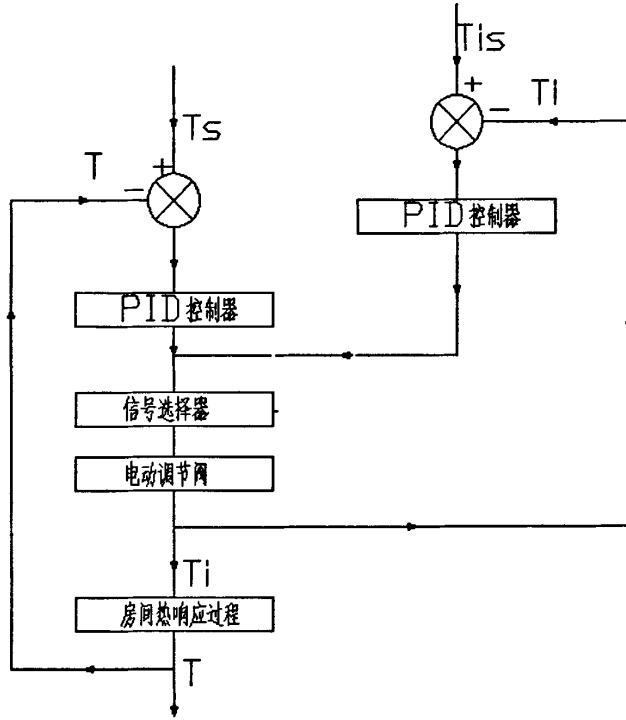


图 2.9 冷辐射顶板进口水温室温跟踪控制法示意图

从室温跟踪控制法示意图中可以看出，在该控制策略中有两个 PID 控制器，图中左侧的 PID 控制器（下面称其为房间温度 PID）的功能为跟踪房间的干球温度，并根据房间的干球温度变化来调节顶板进水三通阀的开度；图中右侧的 PID 控制器（下面称其为露点追踪 PID）的功能则是跟踪房间冷辐射顶板的极限进口水温。显然，电动调节阀在不同的控制状态下有可能会接受不同的控制器的阀位信号，因此就有必要通过一个信号选择器来对控制对象的状态进行判断，以决定应该采用房间温度 PID 控制器的输出信号还是露点追踪 PID 控制器的输出信号。

首先分析简单的高值选择器能否作为信号选择器用于该控制策略。假定在开始时，进口水温高于极限进口水温，露点追踪PID为了满足进水温度跟踪极限进口水温度的要求，需要增加冷冻水的流量，即关小三通阀。这时在两个控制

器的输出中，露点追踪的输出较小，不被高值选择器选中。随着时间的增加，由于进口水温与露点温度加0.5度之间的偏差一直没有得到纠正，这一偏差将在积分器中不断累加，不用多久，就会使得露点追踪PID的输出为零或负最大值（根据PID算法而定）。这样，即使进口水温低于露点温度加0.5度时，高值选择器也无法正确切换，因此高值选择器很可能无法完成预期的信号切换，不能使用在该控制策略中。

要制定合理的信号转换器就需要对在室温跟踪控制法下房间温度的调节过程进行分析。当房间温度高于其设定值时，顶板的冷却能力小于房间的冷负荷，这时设定值与房间温度之间的负向偏差就会驱使顶板进口水温下调，如果在顶板水温还高于房间极限进水温度的时候，房间温度就已经降至其设定值或略小于设定值的话，顶板进口水温就无需进一步下调，这样在调节房间干球温度的同时也不会发生任何结露，这个调节过程完全可以通过房间温度 PID 控制器来实现。但是如果房间温度一直下降且降至接近极限进水温度后，如果水温进一步降低就有可能发生结露，这时为了防止顶板结露就需要顶板的进口水温跟踪房间的极限进水温度，由于房间对象和顶板进口水温调节的过程特性差异较大，所以就需从房间温度 PID 切换至露点追踪 PID。在转入跟踪房间极限进水温度后，露点追踪 PID 就需要开始工作，尽管在工况转换的时候顶板进口水温会有一定波动，但这样协调房间温度 PID 控制器和露点追踪 PID 控制器就可以确保房间温度得以正确控制的同时，保证控制器之间可以可靠的切换。根据上述分析过程该控制策略中的信号选择器可以表示为图 2.10:

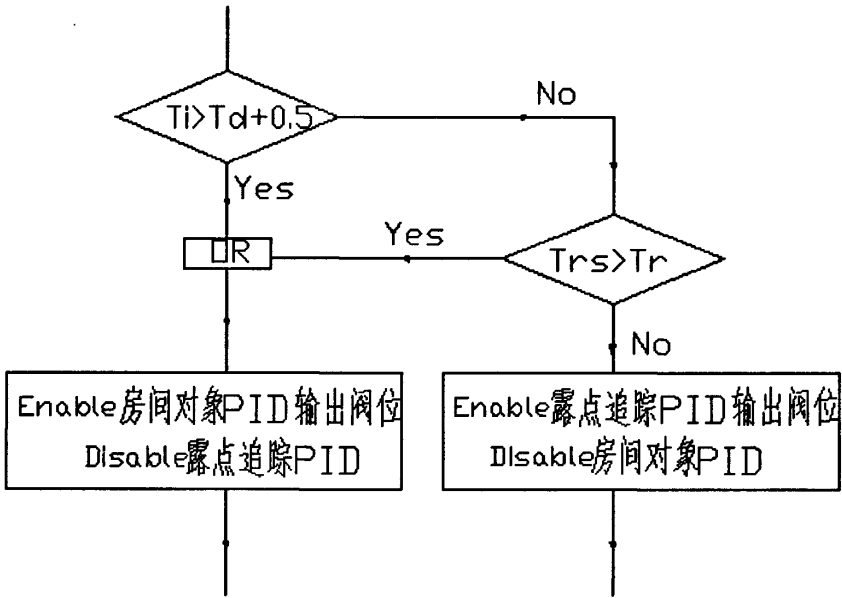


图 2.10 室温跟踪控制法信号转换器示意图

从图 2.10 中可以看出，该信号选择器不仅具有信号选择的功能还具有 Enable/disable 的信号输出作为激发和去能 PID 控制器的功能，也就是说，当其中一个 PID 控制器被使能(enable)开始工作后，另一个 PID 控制器就会被去能(disable)并恢复初始状态。从信号选择的过程来看，该信号转换器首先判断顶板的进口水温是否达到了极限进口水温，如果已经达到该温度，那么就比较当前的室温 and 相应的设定值，如果室温已经达到甚至略低于其设定值，那么就说明已不需要顶板提供最大的供冷能力，这时就可以切换至房间室温 PID 控制器控制三通阀阀位；如果室温仍然是高于其设定值，为了防止进水温度进一步下降而导致顶板结露，应当将控制模式切换到追踪顶板极限进水温度，这样在保证不发生结露的情况下仍然可以保证为房间提供最大的冷量。显然这样的切换不仅保证了顶板进口水温不断下降至极限进水温度后可以准确切换至露点追踪 PID 控制器，还可以在房间温度下降至其设定值后重新从露点追踪 PID 控制器切换回房间温度 PID 控制器。

除了在信号转换的过程中顶板进口水温可能会有一定波动外，该控制策略

中需要同时整定房间温度 PID 和露点追踪 PID 两个控制器的控制参数，控制系统整定调试的工作量较大，但是该控制策略能够较好的控制房间温度，能够避免房间温度发生较大的波动。

2.2.2 水温跟踪控制法

考虑到室温跟踪控制法容易引发水温波动和整定工作量较大这两方面因素，显然如果能够在控制过程中只使用一个 PI 或 PID 控制器就能够实现对房间温度和顶板进口水温的控制，那么无论是从控制系统调试的工作量和可靠性来考虑，还是从房间温度调节来考虑都能够实现本节开始时所提出的控制要求。

与双 PID 控制器相比，单 PID 控制器只能准确跟踪一个过程变量，但是在冷辐射顶板进口水温控制过程中，尽管需要调节的变量是房间的干球温度，但是顶板进口水温在某些情形下也需要控制在极限进水温度。由于房间温度的调节过程相对而言时间常数较大，其温度变化过程相对缓慢，而顶板进口水温变化过程相对而言较快，如果不对其进行准确控制的话，顶板进口水温就可能降到极限进水温度以下，造成顶板结露。因此如果要使用单 PID 控制器的控制策略，PID 控制器的控制变量必然是顶板的进口水温。以顶板进口水温作为 PID 控制器的控制变量，进口水温的控制问题就得到了解决，但是作为冷辐射顶板供冷系统调节的对象是房间，房间的温度能否得到很好的控制才是最终衡量控制策略是否合理和可行的依据。

分析房间可能具有的状态，当房间的温度高于设定温度时，当然希望冷辐射顶板能够具有较强的供冷能力，能够最大限度的承担冷负荷，也就是这种情况下冷辐射顶板的进口水温应比较低，但是最低不能低于房间状态所对应的极限进水温度；当房间温度低于设定温度的时候，这时房间的冷负荷已经小于顶板当前的供冷能力，无需冷辐射顶板发挥全部供冷能力，因此就应该将冷辐射顶板的进口水温上调，直至房间温度达到设定值，这里定义上调后水温的设定值为重置进口水温。因此以房间设定温度和实际室温之间的逻辑关系作为冷辐射顶板进口水温的调节依据就能够通过调节进口水温来实现对房间温度的调节。

通过上述分析可以看出单 PID 控制器完全有可能在保证进口水温按照要求进行调节的同时保证房间的温度得到很好的控制。由于该法主要依靠跟踪房间顶板的进水温度来实现房间温度的控制过程，因此也称该法为水温跟踪控制法，

该控制策略可以表示如下：

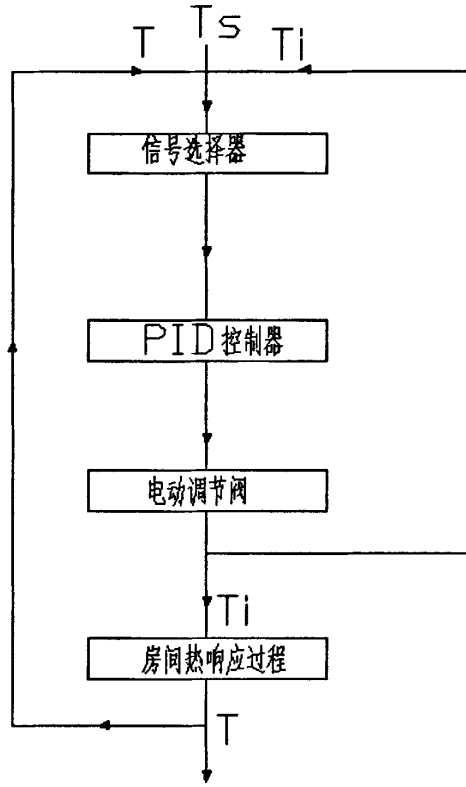


图 2.11 水温跟踪控制法示意图

从房间状态和所要求的冷辐射顶板进口水温变化可以看出，该控制策略中信号选择器要能够根据输入的温度参数进行一系列的逻辑甚至重置运算。如果以 20°C 作为重置进口水温的话，那么在房间温度高于其设定值时，冷辐射顶板进口水温就应该尽量跟踪极限进水温度；当房间温度低于其设定值时，冷辐射顶板的进口水温就应该逐渐上调至重置进口水温。根据这一逻辑可以制定如图 2.12 所示的信号选择器。

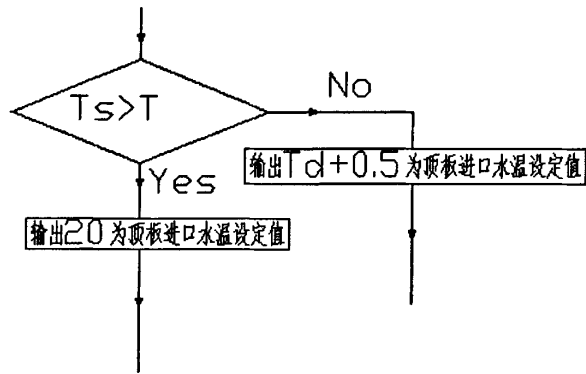


图 2.12 水温跟踪控制法信号选择器示意图

从图 2.11 和图 2.12 可以看出，该控制法相对比较简单，只使用了一个 PID 控制器，控制系统整定和调试的工作量也大为减小，但是相对于室温跟踪控制法而言，该控制策略主要是基于房间设定温度和实际温度的关系来确定不同工况下的进口水温，因此房间的温度可能会有一定的波动，本文在接下来的试验中将对该控制策略可能造成的房间温度波动进行分析。

此外，除了房间温度可能会有一定的波动之外，重置进口水温的设定也可能对房间温度的控制过程有一定的影响。如图 2.11 所示，当顶板重置进口水温为 20°C 的时候，如果此时房间的设定温度为 26°C ，那么考虑到水温沿管程上的温升等因素，顶板表面和房间空气之间的温差就有可能为 4°C 左右，根据文献^[2]中表 5.3 给出的参考冷量，在 4°C 左右温差时顶板的供冷量大约为 $40\text{W}/\text{m}^2$ ，显然在房间负荷较小的时候，如果采用固定的重置温度，那么势必会造成房间的过冷。为了克服这一问题，最直接的方法就是采用可变的重置进水温度，即在冷辐射顶板进口水温跟踪当前重置进水温度时，如果房间发生过冷，就调高当前的重置进口水温。

从前文的分析可知，为了克服固定重置进口水温所引起的过冷问题需要采用可变重置进口水温，要变化重置进水温度的时候必然是房间发生了过冷，因此有必要首先对房间过冷的状态进行分析。房间过冷的一个显著特征就是房间的温度低于其设定温度值，其次结合水温跟踪控制策略而言，当重置进口水温为一定值的时候，房间过冷的另一个特征就是冷辐射顶板的进口水温已经上调至预先设定的重置进口水温。即使顶板进口水温为重置进口水温，顶板的供冷

能力或顶板与独立新风的混合系统的供冷能力仍然有可能大于房间的冷负荷。也就是说房间温度与其设定值为负偏差和顶板进口水温达到重置进口水温就是水温跟踪法造成的房间过冷所具有的两个特征，这两个特征可以用来辨识房间的状态是否进入了过冷。

因此如果可以根据房间过冷特征对房间状态进行判断后，一旦发现房间出现过冷并且冷辐射顶板的进口水温已经达到了重置进口水温，那么就使用一个更高的重置进口水温来代替目前的设定值，这里称该较大的重置进口水温为高值重置进口水温，与此相对应的，小于高值重置进口水温的重置进口水温就称为低值重置进口水温，而在房间从过冷状态变化到房间干球温度基本为房间温度设定值后，则将房间的重置进口水温重新设定为低值重置进口水温，这样顶板的进口水温调节过程就有利于避免发生反向的积分饱和。为了保证顶板重置进口水温的调节过程不至频繁改变，可以每隔一固定的时间($\Delta\tau$)判断一次房间是否过冷，而在该时间段内，顶板进口水温的设定值保持不变，该可变重置进口水温的算法如图。

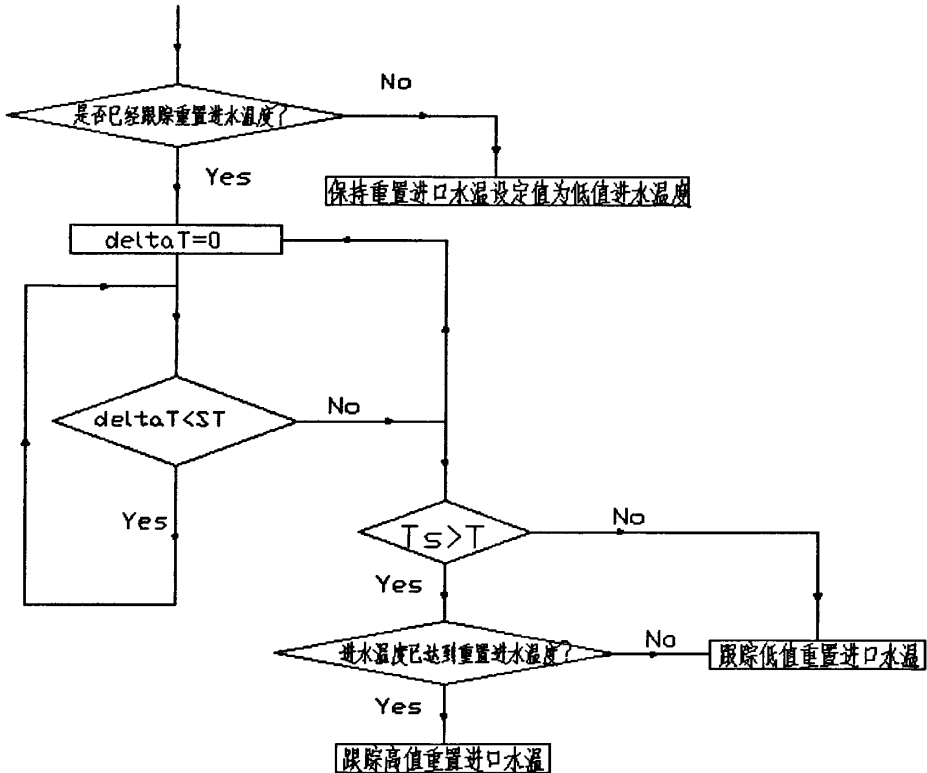


图 2.13 水温跟踪法可变重置进口水温算法示意图

水温跟踪控制法只使用一个 PID 控制器，其控制系统的整定和调试工作量大幅减少，同时基于房间状态的判断来改变水温调节工况不仅保证了顶板进口水温都工作在允许的范围内，而且还能够很好避免顶板进口水温发生不必要的振荡，特别是接近极限进水温度时的振荡。当然该方法的缺点就是重置进口水温的设定有可能引起房间过冷，房间温度跟踪有波动。

2.2.3 带冷凝水保护环路的进水温度控制法

随着 2003 年 SARS 的肆虐，国内进行了许多以干盘管技术为主要内容的研究，文献^[31]提出了带冷凝水保护环路的风机盘管，该风机盘管与常规的风机盘管相比多了一个循环小水泵及电动三通阀，其相应的控制逻辑是：比较室内露点温度和风机盘管冷冻水进水温度，当房间露点温度高于冷冻水进水温度时，电动三通阀关断一次冷冻水，采用全回水作为顶板的供水，小水泵为该全回水工况提供动力，显然由于冷冻水仍然在盘管内流动及风机也仍然在运转，全回水工况下的顶板进口水温也就会逐渐升高并逐渐高于房间的露点温度。

显然冷辐射顶板防结露的控制也可以采用这样一种方法，冷辐射顶板其实也就是一种比较特殊的干盘管，因此使用于干工况风机盘管的冷凝水保护环路的控制方法也同样适用于冷辐射顶板的防结露控制。根据冷凝水保护环路这一思想，冷辐射顶板的进口水温仍然主要是受到房间温度的控制，也就是说以房间温度作为控制目标，利用 PID 控制器，根据房间温度相对其设定值的变化来调节冷辐射顶板进口水温。在 2.2.1 关于室温跟踪法的讨论可以看出，这样的调节过程有可能使顶板进口水温降至房间的露点温度以下，与室温跟踪法的思路不同，冷凝水保护环路法就是在这种不利情况发生后，迅速调节三通阀关闭一次冷冻水的供水，从而采用全回水作为顶板的供水，通过这种循环温升来使顶板的进口水温升至房间露点之上。

当顶板的进口水温重新升高至极限进水温度之上后，顶板进水温度的调节就重新转由跟踪房间温度的 PID 控制器进行调节，这样就完成了一个带冷凝水保护环路的冷辐射顶板进水水温调节控制过程，该控制策略如图 2.14 所示。

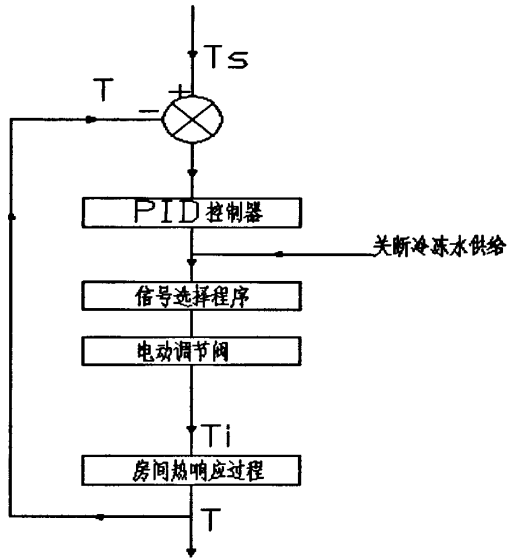


图 2.14 带冷凝水保护环路的进水温度控制法示意图

冷辐射顶板的进水三通阀位信号可能是房间室温 PID 控制器的输出，也可能是控制系统检测到顶板进口水温低于房间极限进水温度后输出的关闭一次冷冻水的信号。为了准确实现这种信号选择，图 2.12 中的信号选择器可以表示为如图 2.13 所示：

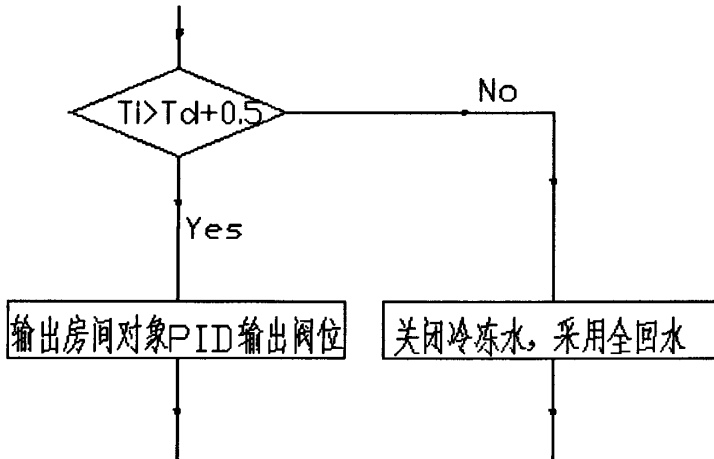


图 2.15 带冷凝水保护环路法信号选择程序示意图

图 2.15 中给出的信号选择器判断工况转换的依据就是水温传感器测得的顶板进口水温和当前房间的露点温度，一旦测得的进口水温低于房间的露点温度时，信号选择器就会迅速输出关闭冷冻水的阀位信号。

冷凝水保护环路法在正常运行过程中利用 PID 控制器来控制房间顶板的进口水温以控制房间的干球温度，一旦顶板进口水温低于房间极限进水温度后就立刻进入全回水的闭式循环以防止顶板表面发生结露，因此该法与室温跟踪法的原理较为接近，利用关断供水采用全回水这一方式代替了室温跟踪法中利用 PID 控制器跟踪房间极限进水温度的做法。此外与前两种控制方法相比，带冷凝水保护回路这一方法相对更加简单，它具有水温调节法的控制系统调试简单和工作量小的优点，同时它也能够较为准确的跟踪房间的温度变化。当然，该法也有一些明显的缺点，那就是顶板进口水温经过全回水工况，顶板进口水温升至房间露点温度之上后，随即转入由房间温度 PID 调节三通阀的阀位，在冷冻水供水温度相对较低的系统，以及在冷负荷比较大的时候，这种工况的转换可能会使顶板的进口水温很快就重新低于房间的露点温度，从而马上又转入全回水工况，这样，进水三通阀的阀位会频繁地进行调节，可能大幅缩短其寿命。

2.3 本章小结

本章对冷辐射顶板供冷系统的极限进口水温和控制方法进行了研究，通过有限元传热模型和结露实验对各种影响冷辐射顶板表面温度的因素进行了分析，并在此基础上提出了可以防止顶板表面发生结露的极限进水温度。在关于极限进水温度的研究基础上，针对冷辐射顶板进口水温和房间温度调节过程提出了室温跟踪控制法、水温跟踪控制法及带冷凝水保护环路的顶板进水温度控制法，并分析和比较了各种控制方法的优缺点。

第3章 多区独立新风系统控制策略研究

独立新风系统是一种采用新风作为全部送风的空调系统，正是由于该系统的送风均来自于经过处理的室外新风，考虑到处理新风所需要的能耗，其送风量必然不可能如常规的全空气系统采用那么大的风量。文献^[11]针对各种类型的建筑的特点讨论了利用最小新风量承担室内湿负荷的可能性，显然使用最小新风量在多数情况下完全可以消除室内的潜热负荷，但是该类型的系统必须结合其他一些显热设备如冷辐射顶板系统等一起来承担房间的显热负荷和潜热负荷，因此在研究多区独立新风系统的控制策略时，不仅需要考虑该系统自身的运行，还需要考虑它与显热设备协调运行的可能性。

独立新风系统主要承担的是空调房间内部的潜热负荷，但是由于送风温度通常会比室内温度低，因此独立新风系统必然也会承担一部分显热负荷。由于在冷辐射顶板+独立新风系统中，辐射顶板在房间温度为 26℃和进口水温为 16℃的情况下，其制冷量约在 70W/m²左右，可以承担正常办公房间的大部分冷负荷，因此独立新风系统完全可以承担房间内的潜热负荷，同时承担部分显热负荷。也就是说独立新风系统的控制策略应首先着眼于控制房间内的相对湿度。本文所使用的独立新风空调箱只考虑夏季供冷状况下的运行特性，风量按室内最大新风需求确定，独立新风空调箱的控制主要集中在如何设定控制器来控制表冷器的进水两通阀。

既然独立新风系统要承担全部潜热负荷并兼顾部分显热负荷，那这种兼顾不仅仅意味着送风温度应低于房间的设定温度而承担部分显热负荷，还意味着冷辐射顶板的进水温度已降低到极限进水温度却仍无法使房间的温度降至其设定值时，独立新风系统就有必要转变为以房间温度为控制目标承担更多的显热负荷，这种控制目标的转换还有利于继续除湿以降低房间的露点温度，从而允许顶板提供更大的冷量。这一点与常规空调系统中只控制干球温度的做法有所差别，这也是独立新风+冷辐射顶板系统的控制系统和常规全空气系统有所差异的一个地方。

根据前述讨论，本章就将首先讨论可以用于多区独立新风系统的控制参数选择方法，并在次基础上分别讨论可以应用于多区独立新风系统的温湿度闭环

控制方法和湿度开环控制方法。

3.1 多区独立新风系统控制参数的选择方法

为了说明多区独立新风系统控制参数选择方法的重要性，就有必要比较单区独立新风系统和多区独立新风系统送风参数控制过程的差异。对于单区独立新风系统而言，其控制参数只有一个来源，那就是它所服务的空调区，不论采用何种控制策略，单独新风系统的控制参数要么是该区的相对湿度，要么是该区的干球温度。一般说来，采用独立新风系统的空调系统，其显冷设备一般是冷辐射顶板或干盘管风机盘管等，这些设备的正常工作对房间湿度有一定的要求。因此，独立新风系统的控制首先应当以室内湿度为控制参数，防止显冷设备发生结露，保证其制冷能力。而在这些显冷设备制冷能力不足时，独立新风系统还应承担一部分制冷负荷。这时独立新风系统的控制参数需要在室内相对湿度和室内干球温度之间进行选择，这已经有很多成熟的方法可以采用。

但是上述单区控制策略推广到多区后，那就必须面临一个问题：多区系统控制参数选择。多区独立新风系统需要同时服务多个具有不同热湿状态的空调房间，而通常该系统能够控制的也就是独立新风系统的送风温湿度，也就是说最终只能根据多个房间状态参数来确定一个送风状态，使之能兼顾到尽可能多的房间的要求，而无法根据每一个房间的需求来确定多个送风状态。以相对湿度为例，很可能在一些空调区的相对湿度高于其允许上限的时候，另一些空调区的相对湿度接近甚至低于其允许下限，这时确定应该以哪一个房间的参数作为独立新风系统的控制参数就成为必须解决的问题。

因此就有必要根据独立新风系统所服务的多个房间的参数利用一定的规则和算法来实现控制参数的选择，从而利用选中的控制参数来对独立新风系统的送风参数进行控制。

目前最常用的多区参数选择方法是动态最不利参数法，思路是分别采集所有区域的相对湿度参数，通过比较，选择高于各区域设定相对湿度最大的相对湿度作为独立新风控制系统的湿度输入参数；与此同时，采集所有区域的温度参数，并通过比较选择偏离各自区域设定温度最大的温度参数作为独立新风控制系统的温度输入参数。

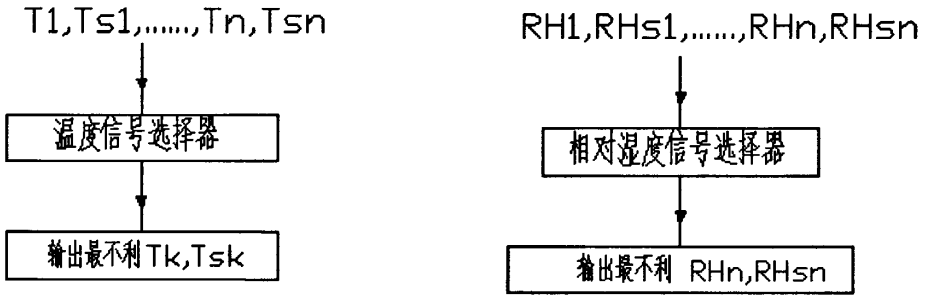


图 3.1 最不利参数选择示意图

图 3.1 中给出的最不利参数选择示意图中的信号选择器如图 3.2 所示，这里以房间湿度为例进行说明，从该图中可以看出该信号选择器首先要将输入的各空调区的实际湿度和相应的设定值相减，计算后的结果就是一个可负可正的数值。如果该数值为正那就说明该房间的相对湿度高于房间相对湿度设定值，如果以该房间的参数作为控制参数就需要更低的送风含湿量；如果该数值为负那就说明房间空调系统提供的除湿能力过大，送风含湿量无需继续降低。对所有的差值进行比较后，选取其中数值最大的房间作为控制目标，所谓数值最大也就意味着如果该房间存在湿负荷，那么以该房间的参数作为控制目标能够使送风含湿量能以最快的速度降低；另一方面，如果该房间的相对湿度已经低于设定相对湿度了，那么以该房间的参数作为控制目标的话就可以使送风相对湿度以最慢的速度升高，从而可以使各房间的相对湿度不会突然迅速上升，有利于各房间湿度参数的稳定，因此以差值数值最大的房间参数作为控制参数不仅可以较快的克服负荷还有利于房间参数的稳定。

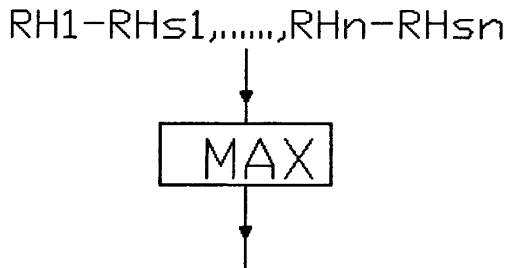


图 3.2 最不利参数信号选择器

最不利参数法原理简单可行，但是该法有一个缺点就是有可能使所有房间

的相应控制参数都降至相应设定值之下，而在舒适性空调中，室内参数是否合理不是以一个点参数来衡量，而是以一个区间来衡量，这就是所谓的“室内温湿度允许波动区”。根据这一理念，如果所有空调区的参数都已经落至允许波动区时，空调系统完全可以保持当前的调节状态，而无需将房间参数调节至某一个点，这也有利于减少空调系统的能耗。

如图 3.3 所示的湿度允许波动区示意图，室内允许波动区法的选择算法相对于最不利参数的选择算法要稍显复杂，要经过多种情况的选择和判断才会形成选择信号。

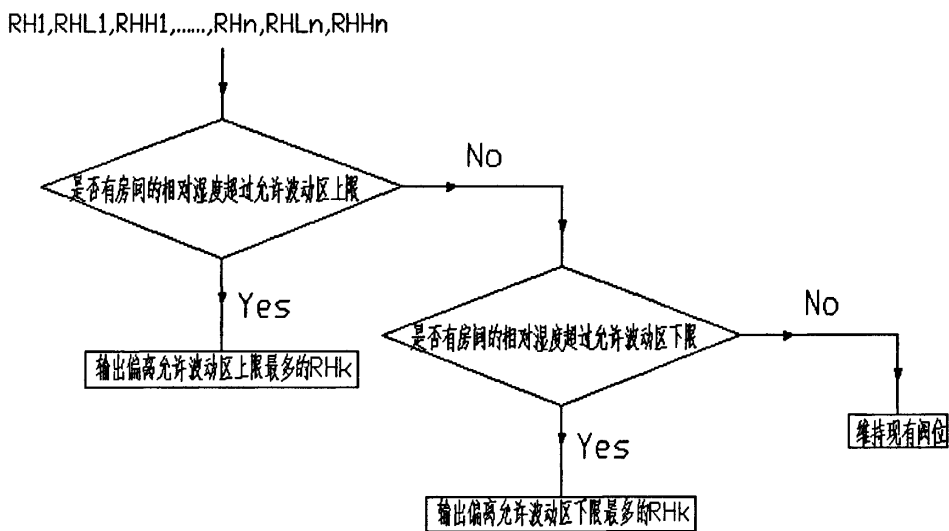


图 3.3 湿度允许波动区法示意图

为了进一步说明该方法的选择过程，这里以图 3.3 为例。首先读取所有房间的相对湿度及相应的湿度允许上限和允许下限。由于高湿度对人体的舒适性影响较大，因此比较房间的相对湿度及其允许上限，如果有多个房间的相对湿度高于其允许上限，那么就以这些房间中相对湿度减去其允许上限的差值最大的房间作为关键房间进行控制；如果经过比较房间湿度和其允许上限后，发现所有房间的相对湿度都低于其允许上限，那么就立刻转入判断是否有房间的相对湿度低于其允许下限，如果存在这样的房间，那么就以所有房间中相对湿度低于其允许波动区下限最多的房间为最不利的房间，作为湿度控制的关键房间；当然如果发现经过前述两次比较后发现所有房间的相对湿度都处于湿度允许区

时，那么就说明此时所有的房间湿度参数都是可以接受的，送风参数无需作出任何调整。

显然，相对于最不利参数法而言，室内温湿度允许波动区法不会将房间的温湿度参数竭力控制到设定值之下，而是将相应的参数控制在一个允许的区间范围内，不管温湿度参数是高于还是低于其设定值，只要均在相应的区间内，控制系统便无须作出任何改变。

3.2 多区独立新风系统闭环控制策略

目前空调处理箱中的表冷器控制通常都采用以房间参数为控制目标的闭环控制方法，在独立新风控制系统中，两通阀的阀位直接受到控制器的输出信号控制，这种阀位信号有两种产生的方式：一种是两种控制参数通过其各自的PID控制器产生两个不同的阀位信号，然后通过一个信号选择器来选择输出阀位信号，如图 3.4 所示；另一种是两种控制参数通过某一种算法直接连接到同一个PID控制器产生一个阀位信号来控制两通阀，如图 3.5 所示。

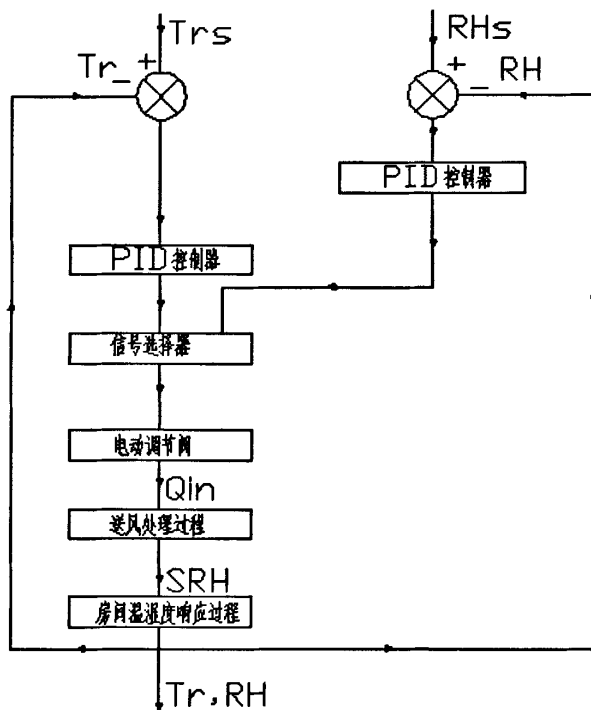


图 3.4 独立新风系统两通阀控制方式一

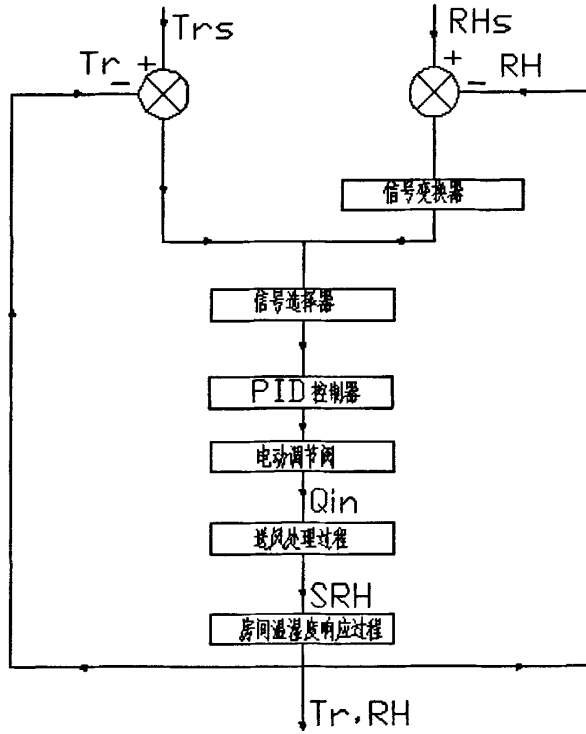


图 3.5 独立新风系统控制方式二

分析控制方式一，从图 3.4 可以看出，湿度控制所对应的 PID 控制器和干球温度所对应的 PID 控制器都会产生一个阀位信号，因此控制方式一中的信号选择器与冷辐射顶板的室温跟踪控制法中所使用的信号选择器原理大致相同，考虑到冷辐射顶板+独立新风系统中独立新风主要承担房间内的潜热负荷，因此该信号选择器必须也要能够体现这一目的，为此，首先分析一下实际空调系统的运行过程可能会出现多种不同工况组合，如表 3.1 所示：

表 3.1 房间运行工况组合

工况序号	干球温度	相对湿度
1	$>T_s$	$>RH_s$
2	$>T_s$	$<RH_s$
3	$<T_s$	$>RH_s$
4	$\leq T_s$	$\leq RH_s$

注： T_s 为房间设定温度， RH_s 为房间设定相对湿度

分析工况 1，这种情况下如果相对湿度是独立新风系统控制的目标参数，显然独立新风系统应根据此时房间内的相对湿度调节表冷器两通阀的开度以降低送风的含湿量。如果系统所处工况为 2，此时相对湿度满足要求，房间的不利参数是干球温度，独立新风系统的控制策略已无需为满足相对湿度进行任何调节，但是为了让房间的干球温度快速的降至设定温度值，表冷器的两通阀仍然应该继续开大以提供相对更低一点的送风温度。在这一调节过程中，表冷器的机器露点必然也会随着两通阀开度增大而降低，房间内的相对湿度必然也会下降，房间内空气的露点温度也必然随之降低，这就意味着冷辐射顶板的进口水温可以达到的最低水温又有了下降，冷辐射顶板可以承担的显冷负荷就会增加，冷辐射顶板冷量的增加必然可以进一步的加快室内空气的干球温度降至设定值。对于工况 3 和 4，显然控制系统的目标参数就是房间内的相对湿度，所不同的只是工况 3 下控制系统应根据相对湿度去开大表冷器的两通阀，工况 4 时控制器则会关小表冷器的两通阀。从上述分析可以得到该控制策略下信号选择器的算法如图 3.6 所示：

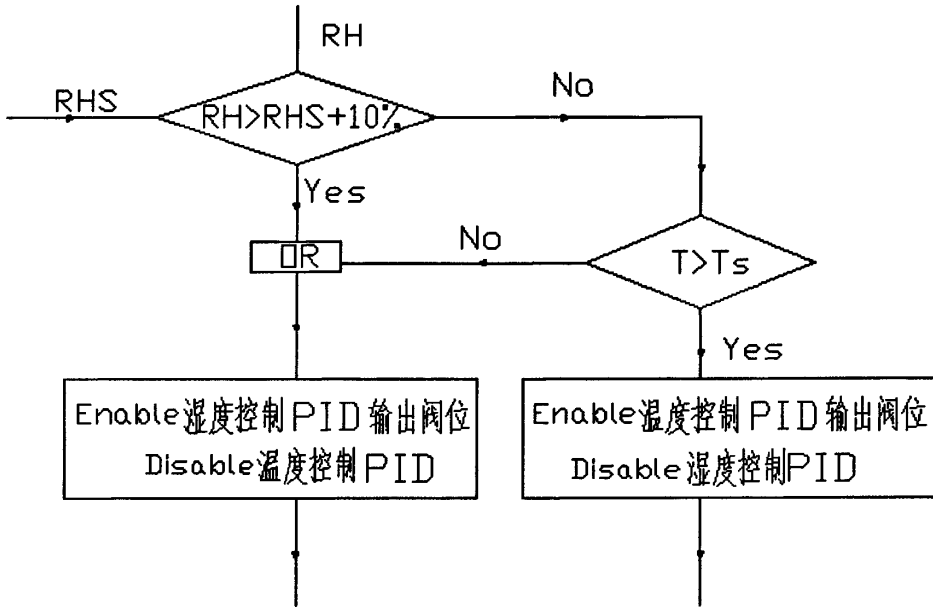


图 3.6 独立新风系统双 PID 控制策略算法示意图

该控制方式的优点是不需要对两个不同特性的控制参量（在空调工况下，相对湿度变化范围通常为 30%到 80%，温度的变化范围通常为 20℃到 40℃）进行变换而产生具有可比性的阀位信号，但是其缺点是需要整定 2 个 PID 控制器的参数，调试工作量有所增加。

和控制方式一相比，控制方式二中只有一个 PID 控制器，其参数整定的工作量有所减小。图 3.5 中的信号选择器无需人为设定，其实它代表着控制系统信号的采集、传递和传送过程中的信号转换。

对于控制方式二中的信号选择器，在不同的工况下控制器所控制的目标参数会有所变化，由于控制方式二和控制方式一都是为了实现相同对象的控制，因此控制方式二中在工况 1、工况 3 和工况 4 的情况下，空调箱的控制器都应该以空调房间的相对湿度作为控制过程的目标参数，而在工况 2 的情况下，空调箱控制器则应以空调房间的干球温度作为控制过程的目标参数。根据上述分析控制方式二的信号选择器则可以表示为：

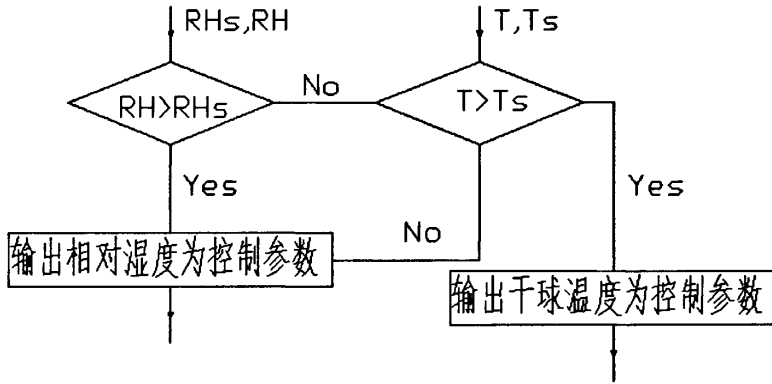


图 3.7 独立新风系统单 PI 控制策略信号选择器算法示意图

当然，使用单 PID 控制器有一明显的问题那就是同一个控制器需要在将湿度参数控制在要求范围内的同时兼顾温度控制，控制器的参数难以准确确定。如果多区独立新风系统是独立运行时，这种难以准确确定的控制器参数很可能会引起房间温湿度参数的波动，但是当该多区独立新风系统与其他显冷设备如冷辐射顶板系统一起使用时，由于房间温度的调节过程不仅仅是通过独立新风系统进行调节，而是两个子系统的综合作用，因此在独立新风+冷辐射顶板系统中，独立新风 PID 控制器的参数可以根据房间的湿度相应过程进行整定，尽管这样的控制器参数对房间温度的调节不是很准确，但是显然可以通过冷辐射顶板控制系统进行补偿，从而实现单 PID 控制器的独立新风系统对多区房间的温湿度控制。此外这种策略的优点是可以快速降温，但是由于新风与顶板对房间温度的传递函数（包括各自的制冷能力、滞后时间、换热的热惯性等因素）各不相同，两个控制器、两个操作量同时针对一个变量进行控制，有可能会造成房间温度的长时间波动。

3.3 多区独立新风系统湿度开环控制策略

3.2 节提出了两种基于 PID 控制的独立新风系统控制策略，显然这两种控制方法都有一些不足，如双 PID 控制策略需要同时整定湿度控制 PID 和温度控制 PID，控制系统的整定和调试工作量都比较大；单 PID 控制策略虽然相对于双 PID 控制策略的控制系统工作量有所减少，但是由于其单 PID 控制只能准确跟踪一

个参数，在准确跟踪湿度的同时无法准确对房间的温度进行准确跟踪。同时如同 3.1 节中关于最不利参数选择法和室内温湿度允许波动区法的讨论中提及的，室内湿度参数只要处于一个可以接受的区间就可以，没有必要对其进行太过准确的跟踪。此外房间的湿度参数的变化过程相对较为缓慢，完全可以通过简单的开环控制来实现将房间的湿度参数控制在相应的允许波动区，但是考虑到室内温度的允许波动范围较小，使用开环控制很难找到一个相对稳定的阀位，因此在对房间湿度进行开环控制的同时，对房间温度的控制仍然应该采用闭环控制。

利用开环控制方式来调节房间湿度参数，其开环算法的选择尤为重要，如果使用常规的双位控制或是比例控制，则系统很可能在短时间出现内出现较大的阀位变化，调节过程发生较为严重的震荡。为了减小开环控制有可能引发的空调房间内的湿度震荡，本文参照变风量空调系统中变静压系统的风机控制方法，将控制阀的整个行程划分为 N 个等分，房间参数变化后一定时间内控制阀只变化一个等分的行程，随着时间变化逐渐改变阀位，显然这样的调节方法相对之前提到的双位控制等会相对平稳。

由于该开环控制策略是着眼于将房间的湿度参数控制于相应的允许波动的区间，因此在该方法运用到多区控制过程时，允许波动区法的特点相比最不利参数法就显的更加合理。为了将允许波动区法应用到该开环控制策略中，本文将允许波动区法根据开环控制过程的特点进行了改进，如图 3.7 所示：

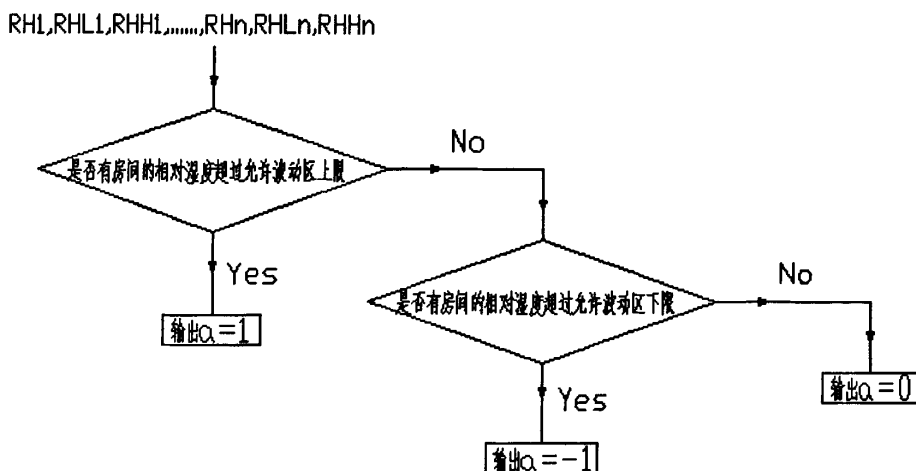


图 3.7 开环控制用室内湿度允许波动区参数选择模块

从图 3.7 可以看出, 开环控制过程所使用的允许波动区模块输出的参数不再是一个特定房间的湿度参数, 而是控制阀位增大还是减小的一个单位信号。当存在房间的相对湿度高于其允许波动区的上限时, 该参数选择模块就会输出 1, 这样表冷器的两通阀就会相应增加一个等分的阀位; 当不存在房间的相对湿度高于波动区上限但个别房间的相对湿度参数低于其允许波动区的下限时, 该参数选择模块就会输出-1, 从而要求表冷器两通阀减小一个等分的阀位。当通过比较发现所有房间的相对湿度参数都处于其允许波动区时, 则输出 0, 保持现有阀位。

结合改进后的允许波动区参数选择法及相应的开环控制策略的分析, 可以得到该开环控制策略如图 3.8 所示。ST 为计时器的设定值, Δt 是计时器的当前记录时间, 当 $\Delta t < ST$ 时, 计时器继续计时且不激发该开环控制程序, 表冷器的两通阀保持当前的阀位; 一旦 Δt 达到 ST 后, 复位 Δt 的同时马上激活开环控制程序判断阀位是否需要变化并输出相应的阀位, 这里的 f 、 f_0 、 Δf 分别表示调整后的阀位信号、当前阀位信号及阀位单位等分。

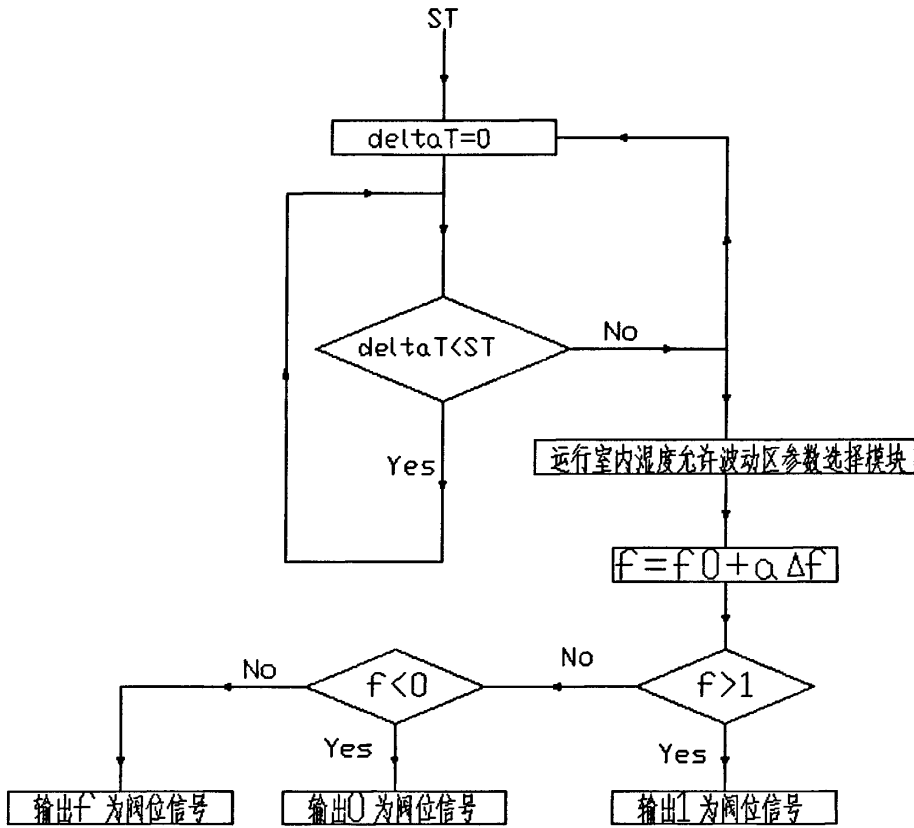


图 3.8 多区独立新风系统开环控制策略

在该多区独立新风系统湿度开环控制策略中，温度闭环控制和湿度的开环控制之间的工况转换则仍然可以使用双 PID 控制策略中图 3.6 所示的工况转换算法，也就是说当各空调区的相对湿度都低于其相应的湿度波动区上限时，如果有一个或多个空调区的温度高于其温度允许波动区的上限值，那么此时独立新风系统就进入温度闭环控制的模式，并使用前文提出的最不利参数法来确定控制参数，除该工况外的其他工况则均运行湿度开环控制策略。

与 3.2 节提出的两种闭环控制算法相比，本节提出的湿度开环控制策略不需要相应的 PID 控制器，控制系统调试的工作量有所减小，同时，该算法基于允许波动区的理念来确定调节过程，而且还设有一个固定的主程序激发周期，因此其对湿度参数的调节精度相对而言不如前文提出的闭环控制算法。

3.4 本章小结

本章分析了多区空调房间的温湿度参数变化的特点，提出了可用于多区独立新风系统控制参数选择的最不利参数法和允许波动区法，在此基础上更进一步的提出了多区独立新风系统闭环控制的双 PID 控制策略和单 PID 控制策略，并重点说明了单 PID 控制策略应用过程中的一些问题。此外，结合房间湿度参数变化过程较为缓慢的特点，本文还提出了一种与常规空调控制策略有较大差异的多区独立新风系统湿度开环控制策略，该方法基于允许波动区参数选择方法，结合温度闭环控制和湿度开环控制，提供了一套较为简单可行的多区独立新风系统控制策略。

第 4 章 多区独立新风+冷辐射顶板实验研究

多区域独立新风+冷辐射顶板复合系统的控制不仅需要合理的冷顶板进口水温控制策略，还需要合理的多区域独立新风系统控制策略与之相协调。考虑到实际房间的变化情况比较复杂，而且冷辐射顶板系统和多区域独立新风系统之间的相互影响也较为复杂，因此就有必要通过实验来验证本文提出的一些控制策略，通过实验的结果来分析复合系统调节过程的特点及控制策略是否合理。因此本章在多区独立新风+冷辐射顶板实验平台上对该复合系统控制策略进行了实验和分析。

4.1 多区独立新风+冷辐射顶板实验平台

本实验所使用的冷辐射顶板+独立新风试验台为坐落于同济大学嘉定校区 H 楼 104 和 101 的空调实验室。101 为冷冻机房，该房间内安装有一台风冷式冷水机组作为整个空调系统的冷源，其起停温度为 12°C 和 7°C ，冷冻水集中送至一个分水器，通过这个分水器将冷冻水分配给空调箱的表冷器及各个房间的冷辐射顶板，该实验台水系统图如图 4.1 所示：

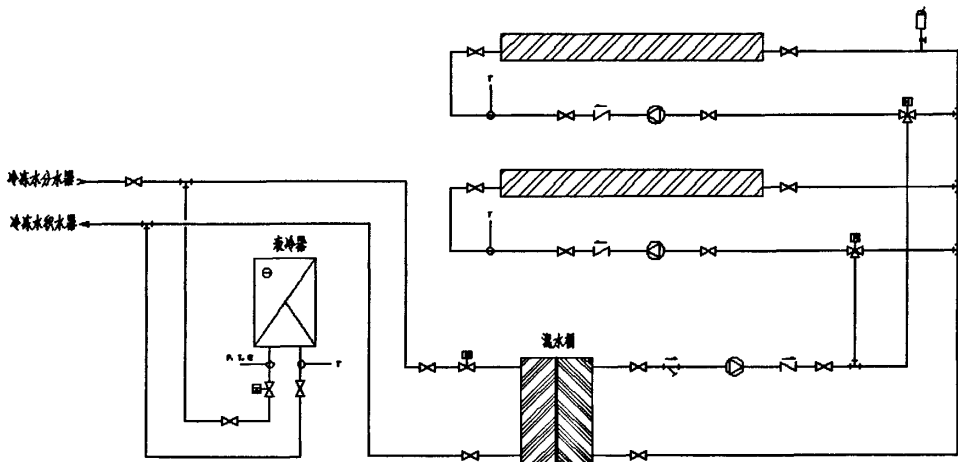


图 4.1 多区独立新风+冷辐射顶板系统试验台水系统图

H104 为空调机房和实验房间，其平面图如图 4.2 所示：

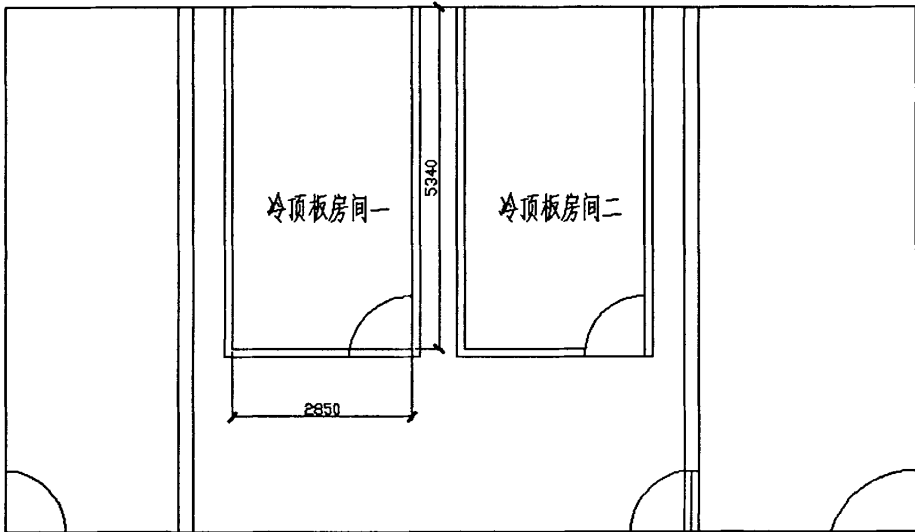


图 4.2 冷辐射顶板+独立新风实验室平面图

从图 4.2 可以看出，实验室内共布置了两个尺寸相同都为 $5.34\text{m} \times 2.85\text{m} \times 2.7\text{m}$ 的房间，本实验中分别称这两个实验房间为冷顶板实验房间一和冷顶板实验房间二。

每一个实验房间的顶板都由一个独立的定流量水泵提供冷冻水，并通过改变电动三通阀开度来调节供水水温。每一个实验房间的新风都通过隔壁空调机房的空调箱集中处理后经由地板静压箱通过设置于地面上的四个旋流风口送入室内。房间的温度通过一个定位于东墙的温湿度传感器测量，旋流风口的布置位置及温湿度传感器在房间剖面中的位置见图 4.3 和图 4.4 所示：

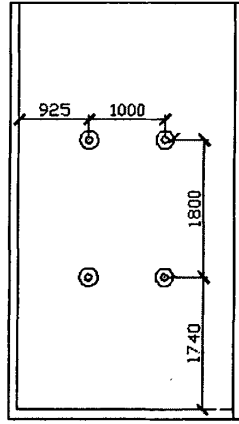


图 4.2 地板旋流风口平面布置图

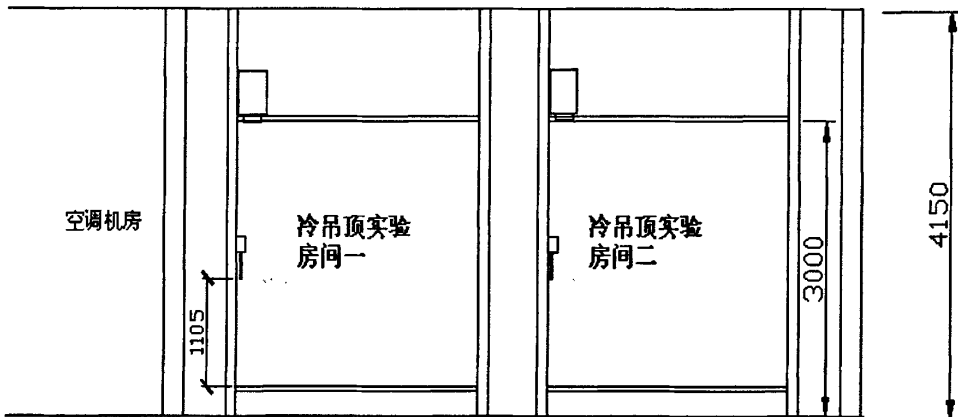


图 4.3 实验房间剖面图

本实验平台中的新风空调箱结构图如图 4.4 所示。该空调箱中布置了三个显热回收器，第一级显热回收器回收排风中的冷量，预冷室外新风，减少表冷器承担的显冷负荷，增强表冷器除湿能力；第二级和第三级热回收器则是用回风预热送风。如图所示，在箱体安装了一个八排管的表冷器，同时在其后还安装了一台用窗式空调器改装的后冷器，两级冷却设备的串联能够进一步降低送风温度，加强空调系统的除湿能力。

此外，在空调箱上还安装了 4 个温湿度传感器和两个温度计，4 个温湿度传

传感器是分别用来测量新风、直膨冷盘管后的空气、及送回风的温湿度值，其位置如图中所示。两个水银温度计则是用来测量供回水水温。

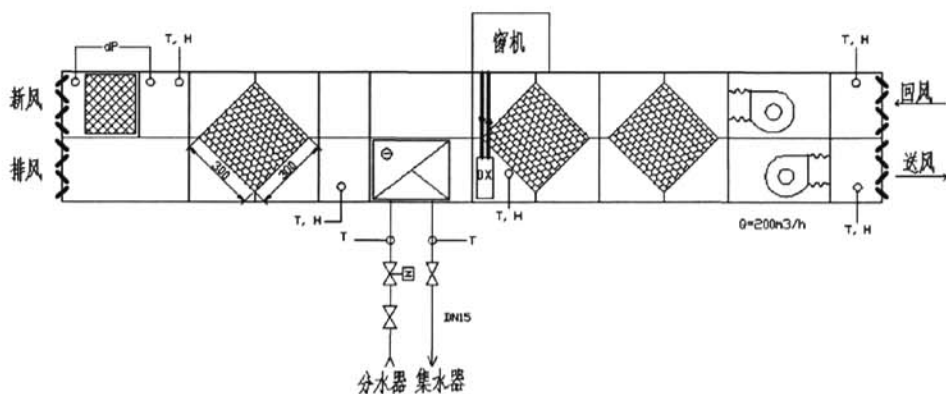


图 4.4 独立新风空调箱结构示意图

4.2 实验平台相关控制系统

本文所使用的实验台中以 PLC (Programmable Logic Controller) 作为控制系统的基础对独立新风空调箱和冷辐射顶板进行运行调节。该实验台所用的控制系统为双层结构控制系统，如图 4.5 所示，PLC 控制器通过通信网络将过程数据传输给具有人机界面的上位机，同时 PLC 接受从上位机发送过来的修改参数或其它指令；除了与上位机进行通信之外，PLC 控制器还要和各个传感器进行通信，读取传感器中的电流或电压信号，并将控制信号如阀位等传递给电动调节阀。

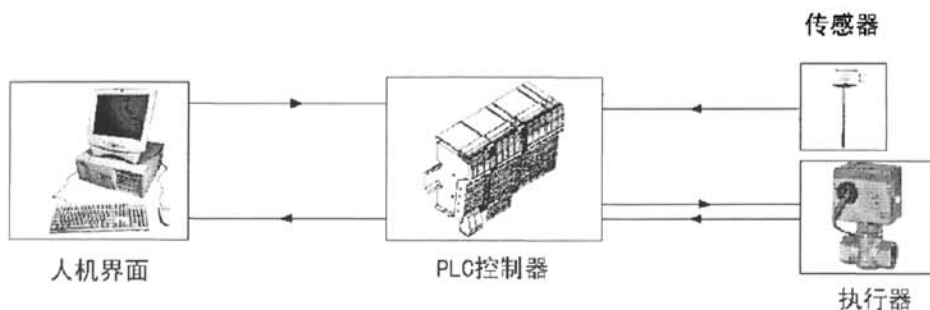


图 4.5 控制系统结构及信号流程示意图

该控制系统中所使用的 PLC 为德国 Phenix Contact 公司生产的 ILC 350 ETH 系列，由一个 24V 的独立电源为其供电，在 PLC 的面板上利用 PLC 自带的变压部件为传感器提供所需的 DC 24V 电源，同时通过一个外部电源为电动调节阀提供 AC 24V 的电源。

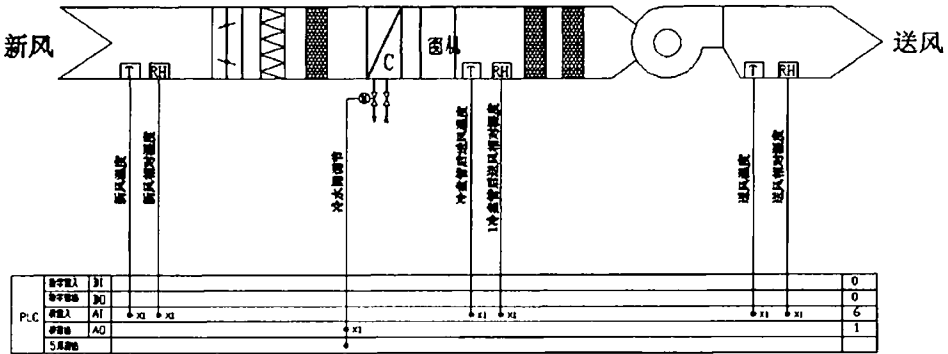


图 4.6 独立新风系统控制原理图

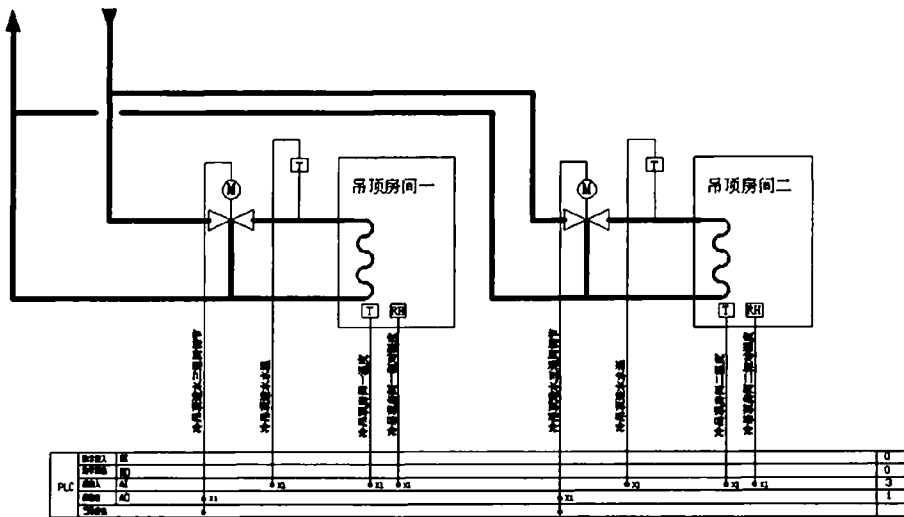


图 4.7 冷辐射顶板控制系统原理图

该控制系统中所用到的各种传感器类型如表 3-1 所示，该表中给出的 1 至 5

的传感器为温湿度传感器为西门子 QFM3160, 其测量精度为湿度 $\pm 2\%$ 和温度 $\pm 0.6\text{K}$ 。该传感器采用电容湿度传感器, 利用电容随温度的变化来输出 0-10V 之间的信号, 其温度传感器为热电阻传感器。6 和 7 为 RTD 传感器, 在 -10°C 到 $+20^{\circ}\text{C}$ 温度范围内的测量精度为 $\pm 0.5\text{K}$ 。

序号为 8-10 的三个部件为电动三通调节阀, 该类型阀门从全开到全闭需要 120s, 且阀门开启或关闭的速度与当前所处阀位无关。

表 4.1 实验传感器和执行器及部分参数汇总

序号	控制参数名称	传感器类型	输出信号类型	工作电压	其他
1	房间一 TH	QFM3160	0-10 V	DC 10 V	2%, 0.6K*
2	房间二 TH	QFM3160	0-10 V	DC 10 V	2%, 0.6K
3	室外新风 TH	QFM3160	0-10 V	DC 10 V	2%, 0.6K
4	送风 TH	QFM3160	0-10 V	DC 10 V	2%, 0.6K
5	二次盘管 TH	QFM3160	0-10 V	DC 10 V	2%, 0.6K
6	房间一进水 T	QAE2120.010	/	/	LG-Ni 1000
7	房间二进水 T	QAE2120.010	/	/	LG-Ni 1000
8	一次冷盘管冷水阀 M	SQX 62	/	AC 24V	/
9	房间一 顶板进水三通	SQX 62	/	AC 24V	/
10	房间二 顶板进水三通	SQX 62	/	AC 24V	/

* 2%和 0.6 K 分别指 QFM3160 的相对湿度测量精度为 2%, 温度测量精度为 0.6K

PLC 控制系统的控制程序基本都是利用厂家自己开发的与其产品配套的编程环境进行开发, 本控制系统所采用编程环境是 Phoenix Contact 公司开发的专门用于编写 PLC 控制程序的 PC Worx 5, 其编程环境的界面如图 4.6 所示。

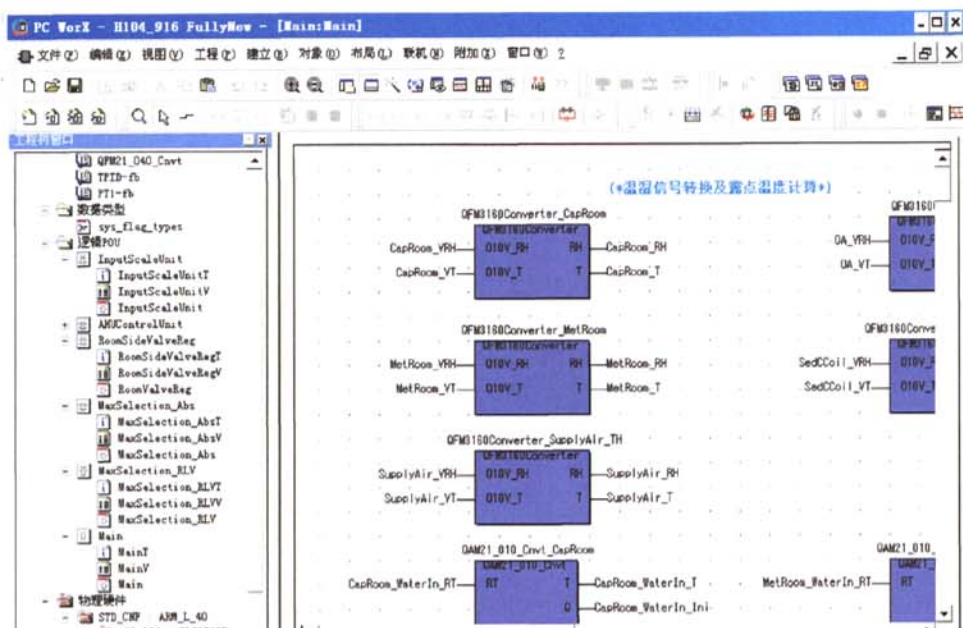


图 4.8 PLC 编程环境 PC Worx

尽管各种 PLC 厂家的控制程序开发环境都有所差别，但是目前基本每一个厂家的编程环境基本都支持国际电工协会推荐的一种或多种编程语言。IEC1131-3为 PLC 制定了5种标准的编程语言，包括图形化编程语言和文本化编程语言。图形化编程语言包括：梯形图（LD—Ladder Diagram）、功能块图（FBD—Function Block Diagram）、顺序功能图（SFC—Sequential Function Chart）。文本化编程语言包括：指令表（IL—Instruction List）和结构化文本（ST—Strutured Text）。

继电器梯形图语言是 PLC 首先采用的编程语言，也是 PLC 最普遍采用的编程语言。梯形图编程语言是从继电器控制系统原理图的基础上演变而来的，与继电器控制系统梯形图的基本思想是一致的，只是在使用符号和表达方式上有一定区别，显然梯形图编程具有逻辑清晰，能够方便简单的进行各种逻辑运算的优点。

功能块图采用类似于数字逻辑门电路的图形符号，逻辑直观，使用方便，它有梯形图编程中的触点和线圈等价的指令，可以解决范围广泛的逻辑问题，同时功能块图可以通过将不同的指令组合在一起形成某一种固定的算法并将之仍然当作一个功能块进行调用，以功能模块为单位，从控制功能入手，使控制

方案的分析和理解变得容易,因此不仅整个程序的界面显得更加清晰易读,而且很方便的将一个较大规模的控制程序,合理的分解为一个个相对独立的具有特定功能的程序集合,从而使整个程序更加容易进行编写、调试和维护。

本文将使用 PC Worx 内嵌的梯形图和功能块图编制控制程序。考虑到梯形图程序的执行方式以及其编程元件的特性,其主要被用来进行一系列的逻辑判断,而功能块图具有较强的算法编制能力,能够封装成独立的模块,因此功能块图主要被用来进行程序主体,也就是控制策略的编制。

控制系统的控制程序编写就是要将既定的控制策略通过一定的算法和接口,读取现场传感器测得的各种参数,并将这些参数以一定的格式和精度变成可供程序开发人员调用的数据,这一部分是控制程序的数据读取和处理段,具体的程序及相关细节见附录 A。在读取了各种过程数据后,控制程序就必须对这些数据进行分析,如分析目前的各房间内的温湿度参数,并经过一系列的逻辑运算后选择最不利参数,经过 PI 控制器将最不利参数反应到阀位信号的变化,最终来控制水阀的调节。

经过了数据读写程序段的处理后,一些过程数据及信号就需要分别传送到冷辐射顶板进口水温控制程序及多区独立新风系统控制程序中进一步处理以得到具体的控制信号,并将其输出至相应的执行器。这里需要注意的是由于 PID 是通常用于为了较快达到设定值而不发生过大超调的场合,但是在 HVAC 系统中,平稳过渡到设定值是通常会遇到的情况,本文中冷顶板进口水温的调节也是一个平稳的调节过程,快速降低水温反而会有可能超调,因此既然 PI 控制器能够较好的实现这一目标,在接下来的编制的控制程序中也均使用 PI 控制器来进行调节。具体的控制程序见附录 B 和附录 C。

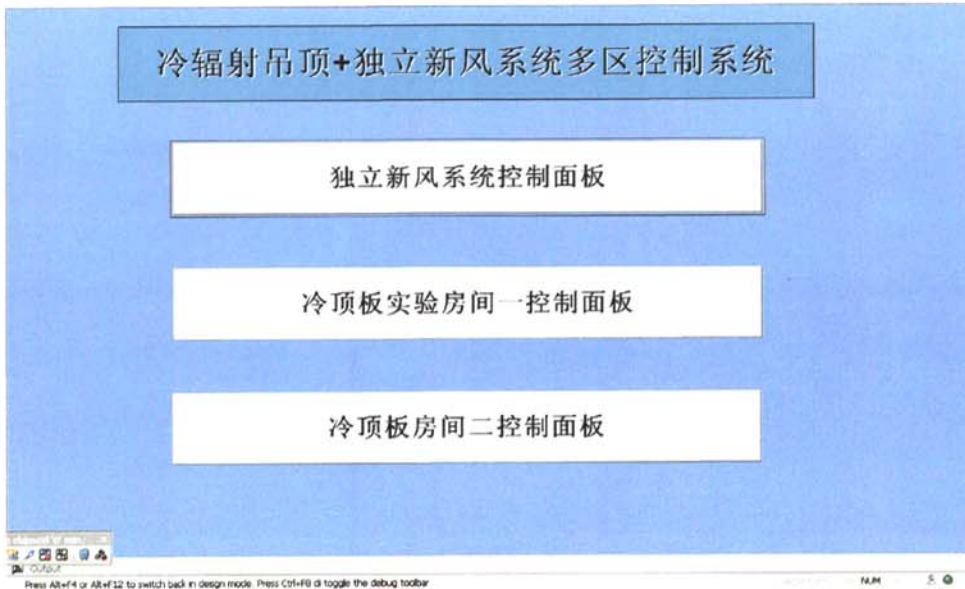


图 4.9 冷辐射顶板+独立新风多区控制系统主控制界面

编写控制策略的程序相对比较复杂且可读性也较差，为了方便读取实验过程的数据，本文利用 Phoenix contact 公司开发的 Visu+开发了该多区独立新风+冷辐射顶板系统的人机界面，通过该界面体系不仅可以很清楚的了解整个控制系统的结构，更是可以直接通过人机界面来监控和调整控制系统的参数。图 4.9 为上位机的主控制界面，进入该界面后有三个按钮，通过这三个按钮就可以很方便的从主界面切换到独立新风系统控制面板、冷顶板实验房间二控制面板和冷顶板实验房间一控制面板。

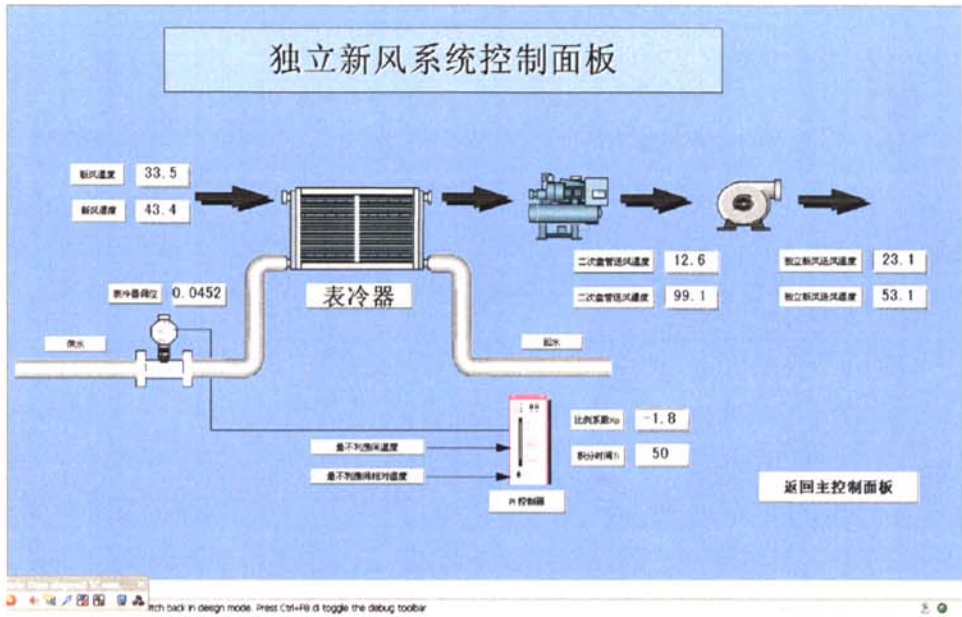


图 4.10 独立新风系统控制界面

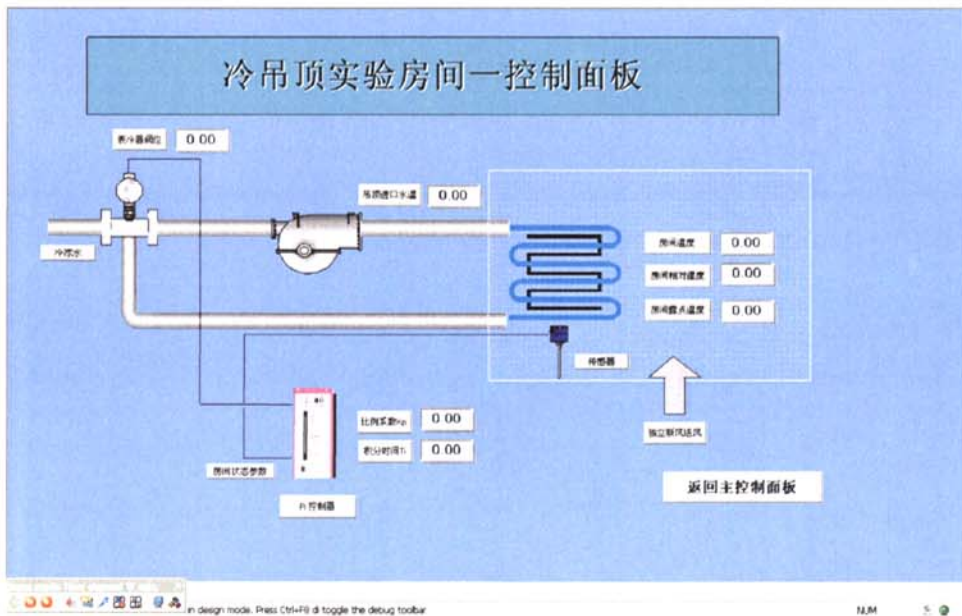


图 4.11 冷辐射顶板实验房间一控制面板

由于本实验中有两个冷辐射顶板房间，因此在上位机中需要分别监测这两

个房间的温湿度及其他的一些参数的变化，图 4.11 和 4.12 给出了冷辐射顶板房间的监控面板示意图。该控制面板实时给出了冷辐射顶板的进口水温及房间状态所对应的露点温度，可供随时监测冷辐射顶板的进口水温是否低于极限进水温度。

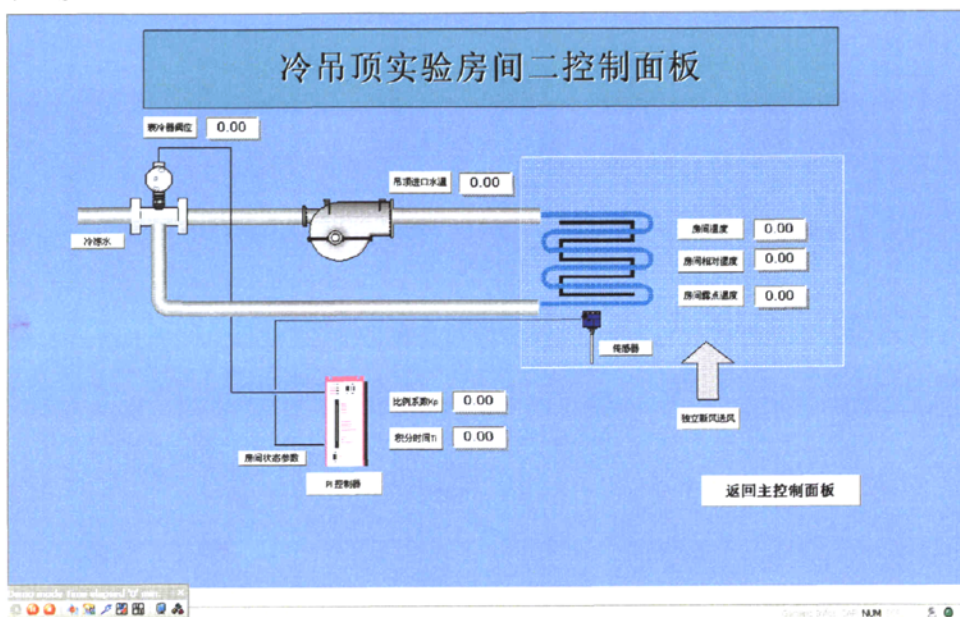


图 4.12 冷辐射顶板实验房间二控制面板

4.3 多区独立新风+冷辐射顶板复合系统控制策略实验

首先对于冷辐射顶板和独立新风这两个子系统而言，冷辐射顶板系统能否得到广泛应用的一个重要条件是能否防止顶板表面结露。尽管之前对于冷辐射顶板的极限进口水温进行了一系列的模拟、实验和分析，但是实际运行过程可能会与这些具有特定目的测试有所差别，因此进一步通过实际正常运行的系统验证前文所得到的极限进口水温是否有利于避免顶板表面发生结露就显得非常必要。此外，就冷辐射顶板而言，在保证顶板不结露的基础上，除了要考察本文所建立的控制算法是否能够保证顶板在实际运行过程中将实际房间对象的干球温度控制在可以接受的范围内，由于控制策略还存在工况转换的信号选择器，因此在实验过程中还要审视控制算法中所采用的信号选择器能否适应实际

房间对象的负荷变化及在转换过程中保证冷辐射顶板进口水温平稳变化。就独立新风系统而言，其控制系统着眼于湿度，同时还要兼顾房间温度变化，因此在实际的多区实验中，还应该分析这种控制策略对不同房间的相对湿度和温度变化的影响。

为了考察本文所提出的控制策略和编制的控制程序能否实现上述几个控制要求及分析该控制策略还有什么不足，本文一共在 4.1 中提及的多区独立新风+冷辐射顶板实验室中进行了 4 天完整的实验，这些实验都是通过基于冷辐射顶板的水温跟踪控制法与多区域独立新风单 PID 控制器法的控制系统进行调节。下文将对这些实验数据进行分析和讨论，并用以评价实验采用的复合系统控制策略。

表 4.2 实验条件设定表

实验序号	平均气温/最高温度(℃)	天气状况	房间一室内参数设定			房间二室内参数设定		
			温度(℃)	相对湿度(%)	内热源	温度(℃)	相对湿度(%)	内热源
一	27.96/31	阴雨	27	50	2P2C	27	50	2P2C
二	29.8/36.3	晴朗	27	50	2P	27	50	2P
三	29.3/35	阴转晴	26.5	50	1P1C	26.5	50	1P1C
四	25.9/31.5	晴朗	26	55	1P1C	26	55	1P1C

*P 是指一个人，C 是指一台电脑，如 2P1C 是指两个人一台电脑

表 4.2 中所列的四个实验中，实验一主要是为了分析多区独立新风系统使用最不利参数法时对房间湿度控制过程的影响，因此该试验中独立新风系统不考虑房间温度的控制，只对两个实验房间的相对湿度进行控制；实验二至实验四则是在复合控制策略的调节下进行，所不同的是实验二中独立新风系统的新风送风温度均在 22℃ 左右，而在实验三和实验四中独立新风送风温度则是 16℃ 左右。

下面本文就通过分析最不利参数法和不同送风温度的影响基础上对该复合系统在上海地区典型的气象条件下的全天运行性能进行详细分析和讨论。

4.3.1 最不利参数法对房间湿度参数的影响

从 3.1 节中关于最不利参数法的讨论中可以看出, 使用了最不利参数法的多区独立新风系统始终根据所控参数中最不利的参数(与其设定值相减得到的数值最大的参数)来调节送风的状态。对于具有最不利参数的房间而言, 控制系统作出的调节动作可以促使该房间的参数逐步靠近设定值, 但是对于其他非最不利房间而言, 这样的动作有可能是不必要的, 甚至可能会使该房间的状态偏离允许波动的区间。因此为了分析最不利参数法在实际系统中的调节特性, 这里就分别分析实验一和实验三中基于最不利参数法的多区湿度调节过程。

图 4.13 给出了实验一中两个实验房间的湿度变化过程。从前文的说明中, 可以知道, 在实验一中独立新风系统始终调节该多区空调系统的相对湿度, 而不会考虑房间的温度变化, 这一点将有利于更清楚的分析最不利参数法在多区控制过程中的特性。

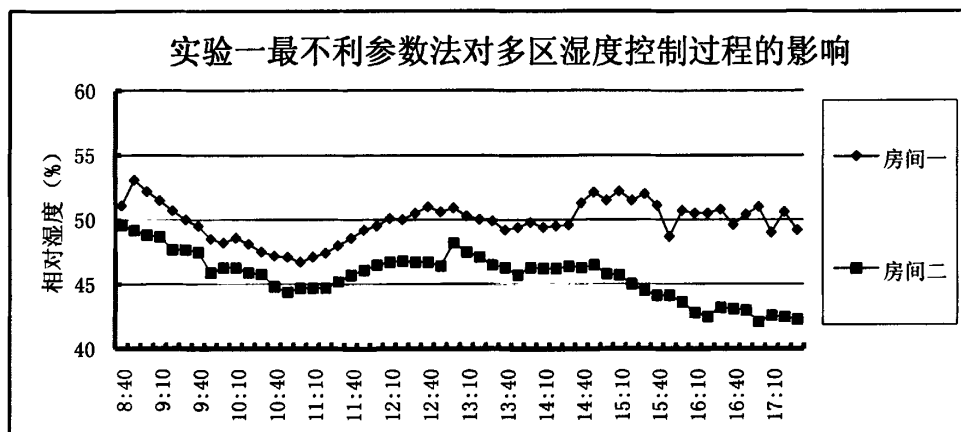


图 4.13 实验一最不利参数法对多区湿度控制过程的影响

实验一中两个房间的相对湿度设定值都是 50%，每个房间都有两个室内人员，因此两个实验房间的室内湿源及其相对湿度变化的比较基准都大致相同。分析图 4.13 可以看出, 房间一的相对湿度整个实验过程中都要比房间二相对湿度大, 由于两个房间的湿度设定值相同, 因此根据 4.1 节关于最不利参数法的讨论, 房间一的相对湿度是独立新风系统湿度调节过程中的最不利参数, 因此送风的参数就将根据该房间的相对湿度来调节送风状态。

由于本实验中所使用的空调系统为间歇性空调系统, 为了在每一次实验开始(9 时)前就将房间内的相对湿度控制在要求的范围内, 实验正式开始前都会进行前期除湿。由于该前期的除湿过程时间较长且一直处于单向偏差, 因此独

立新风系统的 PID 控制器很可能会发生积分饱和或是接近积分饱和。正是由于这一原因，独立新风系统将房间一的相对湿度调节至设定值（50%）后，控制系统需要逐步的抵消前期除湿过程对 PID 控制器的影响，考虑到此时房间相对湿度和其设定值之间的偏差较小，控制系统需要较长的时间才能够完成这一抵消过程。从图 4.13 可以看出，9 时 30 分左右房间一的相对湿度降至 50%后仍然会缓慢降低，经过了近 2.5 小时才重新回到 50%并保持这一数值。从实验数据可以看出尽管克服前期除湿过程的影响需要的时间较长，但完成这一过程后，控制系统能够很好的将房间的相对湿度控制在其设定值左右。

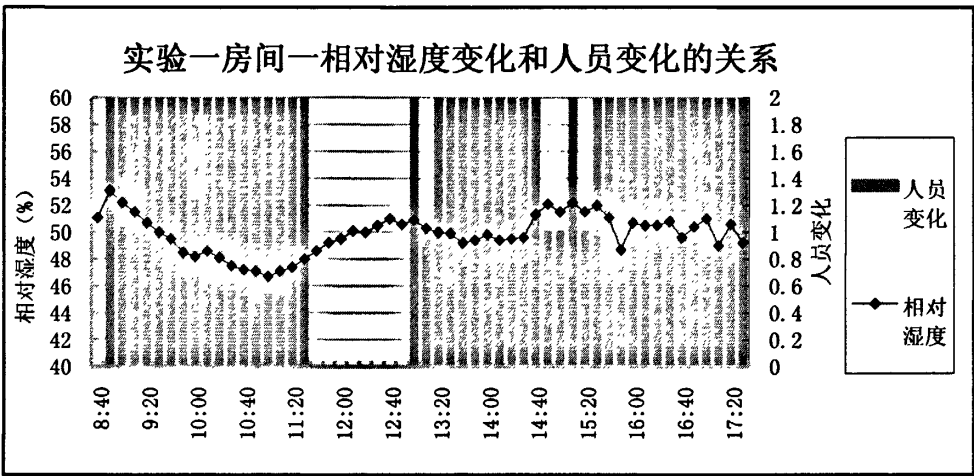


图 4.14 实验一房间一相对湿度变化和人员变化关系

比较图 4.13 中两个房间的相对湿度变化趋势，在 14 时 30 分之前两个房间的相对湿度变化趋势及它们之间的差距也基本保持相同，但是在这一时间之后，房间一突然上升并逐步保持在设定值，相比之下，房间二的相对湿度则有一个缓慢降低的趋势。比较图 4.14 和图 4.15 中给出的人员变化趋势可以看出，14 时 30 分后房间二的室内人员仍然保持为 2 人，而在房间一中，该时刻之后的一段时间内室内人员已经减少为 1 人。分析试验过程，房间一在 14 时 30 分左右由于人员进出频繁，因此该时刻之后的房间一相对湿度升高的原因很可能就是人员进出所引起的室外湿度较高的空气流入室内，从而使房间一的相对湿度即使是在室内湿源减小的情况下仍然有所升高。

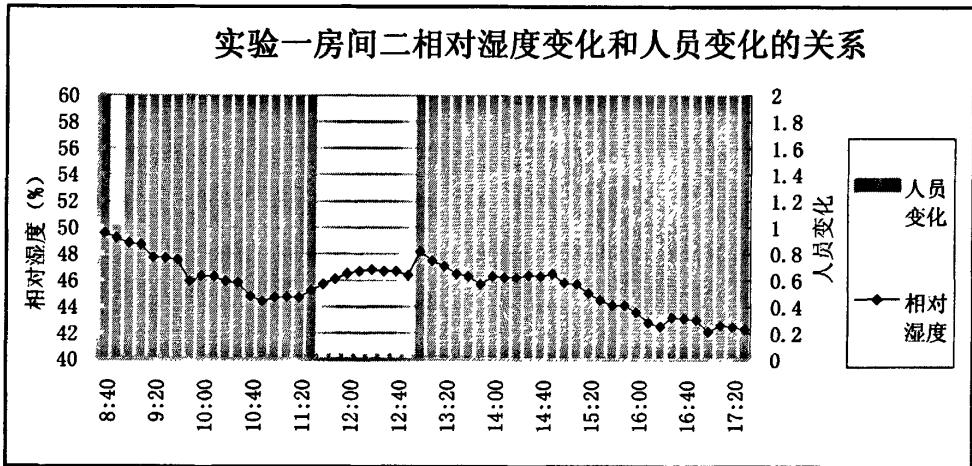


图 4.15 实验一房间二相对湿度变化和人员变化关系

从实验一全天基于最不利参数法的湿度调节过程可以看出，在没有人员进出的影响下，最不利房间和非最不利房间的相对湿度参数均保持相同的变化趋势，并且两者之间湿度参数的差距也基本保持不变。而在该实验的后期由于人员进出的影响，最不利房间的相对湿度有所升高，为了保证最不利房间的相对湿度保持在设定值，独立新风系统的送风含湿量就会有所降低，因此对于作为非最不利房间的房间二来说，由于其湿源强度没有变化，所以该房间的相对湿度就会随之降低，两个实验房间湿度参数的差距也缓慢增大，但是值得注意的是非最不利房间的相对湿度最终达到 42.3%，并没有低于要求的湿度下限(40%)。

实验一中相对湿度的控制过程并没有兼顾温度控制的需要，而在复合系统的控制策略中，多区独立新风系统控制过程需要兼顾温度控制，因此就有必要进一步分析最不利参数法在复合系统中的运行特点。

从图 4.16 可以看出，在 12 时 10 分之前独立新风系统都在消除前期除湿过程的影响，这一点与实验一的情况相同，但是在经过 12 时 10 分至 13 时 40 分这一段稳定的时间后，两个房间的相对湿度都开始缓慢下降，显然这一情况是前述不兼顾温度的多区湿度控制过程中不具有的特点。

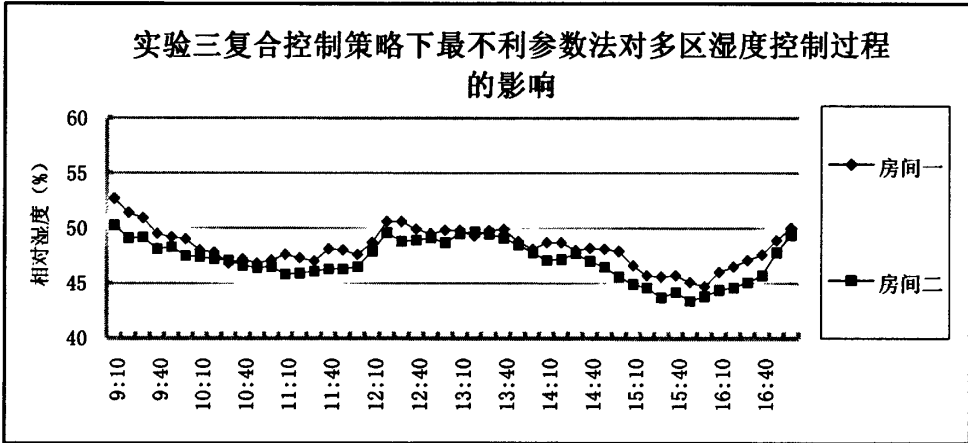


图 4.16 实验三复合控制策略下最不利参数法对多区湿度控制过程的影响

从图 4.17 中可以看出 13 时 40 分之后房间温度在不断高于相应房间的设定温度，并有一段时间一直都高于其设定值。结合 3.2 节关于多区独立新风系统闭环控制策略的分析和讨论，当各空调区的相对湿度已经处于规定的范围时，独立新风系统的控制参数就有可能从相对湿度转化为房间内空气温度。显然，实验三中两个空调房间的相对湿度在 13 时 40 分后都已经基本控制在其设定值 50% 左右，而此时房间温度不断高于其设定值，因此此时独立新风系统的控制参数转变为空调房间的干球温度，表冷器的两通阀不断开大以得到更低的送风温度和送风相对湿度，因此房间一和房间二的相对湿度出现了不断降低的情况。

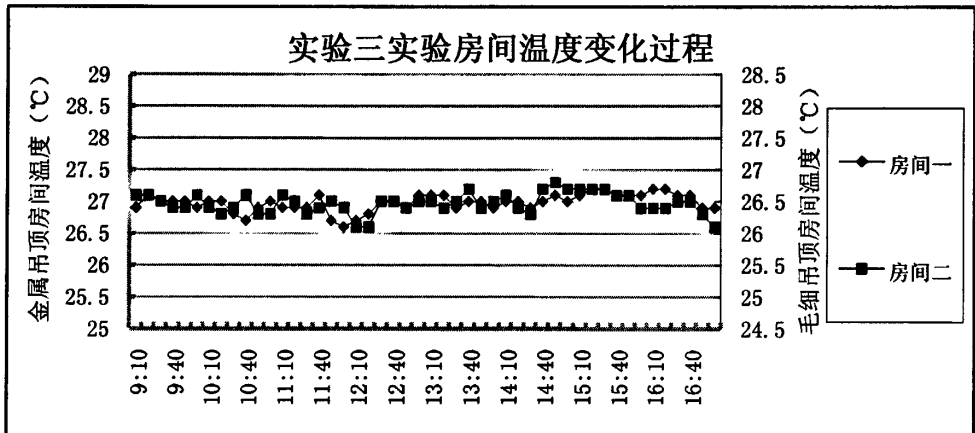


图 4.17 实验三房间温度变化过程

从图 4.17 可以看出，15 时 40 分后房间的温度逐步降至设定值后，独立新风系统的控制参数重新转变为房间的相对湿度，两个实验房间的相对湿度均不断的重新上调，直至达到设定值，实现了从温度控制工况转变为湿度控制工况。

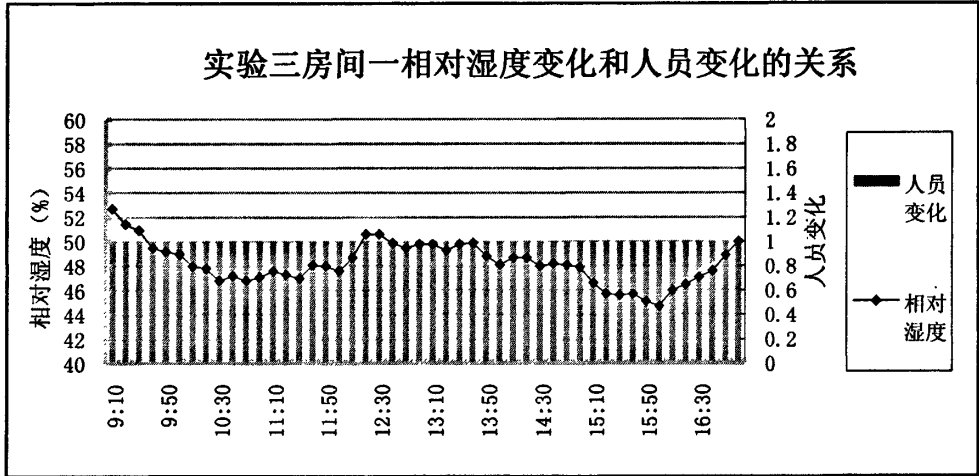


图 4.18 实验三房间一相对湿度变化和人员变化关系

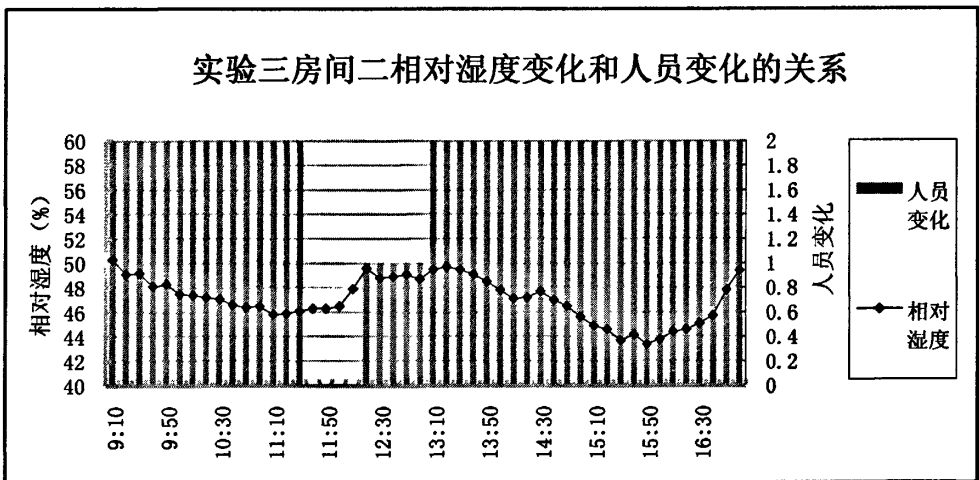


图 4.19 实验三房间二相对湿度变化和人员变化关系

图 4.18 和图 4.19 给出了两个实验房间中人员变化和房间相对湿度变化的关系，显然从这两图中可以看出尽管房间二在中午左右出现了较大的人员变化，但是由于房门开启并不是很频繁且关闭都较为迅速，并没有引起该房间的相对

湿度发生太大的变化，从这一点也可以看出人员变化对房间湿度的影响远小于从室外流向室内湿度较高的气流对房间湿度的影响。

综合上述分析可以看出基于最不利参数法的多区独立系统闭环控制策略能够有效的控制各房间的相对湿度。通过湿度参数调节过程的分析可以看出室外高湿气流对房间湿度的影响远大于房间内人员变化的影响，这种特性在使用最不利参数法时有可能会进一步加大最不利参数房间和非最不利参数房间之间的参数差异，使非最不利参数房间的相对湿度下降较多。当然通过对实验一和实验三及附录中给出其他实验的相对湿度数据可以看出，尽管部分情况下最不利参数法会促使非最不利房间偏离允许波动区，但是所有时刻中两个实验房间的相对湿度基本都保持在40%和60%之间。

4.3.2 送风温度对复合系统控制过程的影响

由于本文中采用的独立新风系统采用定风量运行，因此送风温度的高低一定程度上就衡量了独立新风系统在复合系统中所承担的负荷大小。为了进一步分析本实验中所采用的复合控制策略在独立新风系统承担负荷比率不同时的调节性能及控制系统在送风温度发生变化时的调节性能，本节将分别针对各种不同送风温度来分析复合系统的控制过程。

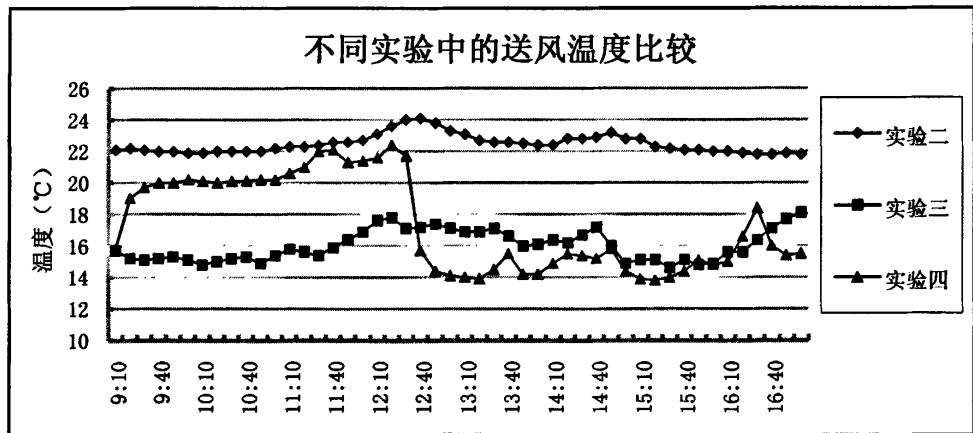


图 4.20 不同实验中的送风温度比较

图 4.20 分别给出了实验二、实验三和实验四中全天的独立新风系统送风温度变化情况。从该图可以看出，实验二全天的送风温度都保持在 22°C 左右，实

实验三则基本保持在 16℃左右，实验四则在 12 时 30 分左右送风温度突然从 22℃降低至 15℃左右。这三个实验除了送风温度有所不同外，其他系统运行参数都形同。

根据该复合系统控制策略来分析图 4.20 中一天的送风温度变化，在独立新风机组构成一定时，独立新风系统的送风温度会受到两个空调房间的相对湿度和温度参数的影响。新风系统刚刚投入运行时，由于该系统间歇运行，人员进入前的前期除湿过程必然会持续降低各空调区的相对湿度，并在人员进入前将房间温度和相对湿度调节至允许的波动范围。根据多区独立新风系统的闭环控制策略，独立新风系统必然会继续以最不利房间的相对湿度作为控制参数，此时最不利房间的相对湿度很可能是略低于其设定值，这种较小的湿度偏差就会通过 PID 控制器不断的关小表冷器两通阀的开度，这样送风温度也就会缓慢的上升，从图 4.20 可以看出三个试验中 12 时之前送风温度基本都是处于缓慢上升的过程。而在午后，各空调房间内的湿源并没有什么变化，因此各空调区的相对湿度并不会偏离其允许波动区，但是各空调区的温度有可能会随着太阳辐射得热的增加及室外温度的持续升高而升高，根据独立新风系统的温湿度闭环控制策略，新风系统就有可能在室温升高时转为控制最不利房间的温度，因此就会要求表冷器两通阀不断开大以提供更低的送风温度，从而提供更多的送风温度，同时也为冷辐射顶板提供更低的极限供水温度。

首先比较三个试验在独立新风系统具有不同送风温度的情况下房间一和房间二的温度调节过程。从复合控制系统原理来分析独立新风系统和冷辐射顶板系统在不同送风温度下的温度调节过程，从前文的分析可以看出独立新风系统的送风温度全天都在不断的变化，这样独立新风系统所承担的房间冷负荷也就会跟着变化。一旦冷辐射顶板系统监测到房间的温度受到新风送风温度变化而产生波动后，复合控制系统就会调高或调低顶板的进口水温以补偿送风温度变化所引起的室温波动，也就是说控制系统能够适应独立新风和冷辐射顶板两个子系统之间参数的变化以达到控制房间温度参数的目的。

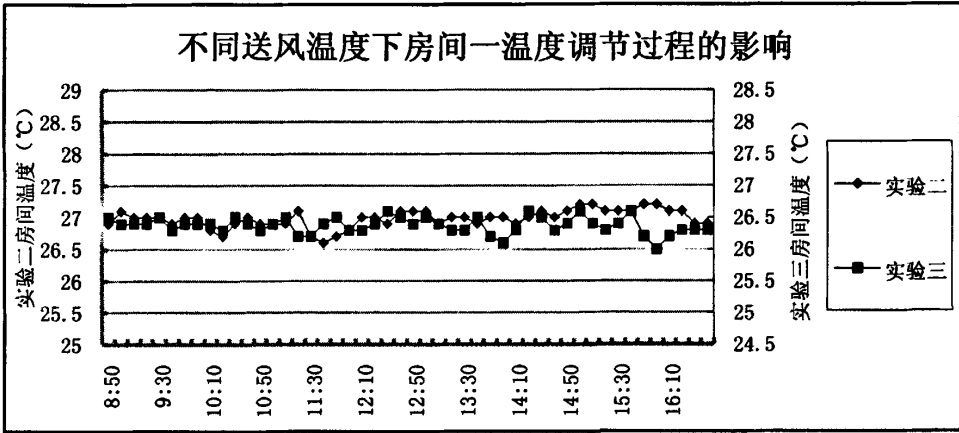


图 4.21 实验二和实验三房间一房间温度调节过程比较

图 4.21 和图 4.22 分别给出了实验二和实验三及实验三和实验四中房间一的温度调节过程。显然从两图中可以看出无论独立新风系统送风温度怎么变化，三个实验中房间一的温度都很好的控制在各自的设定值左右，这些实验也进一步证实了之本文之前对复合控制系统调节过程的分析。

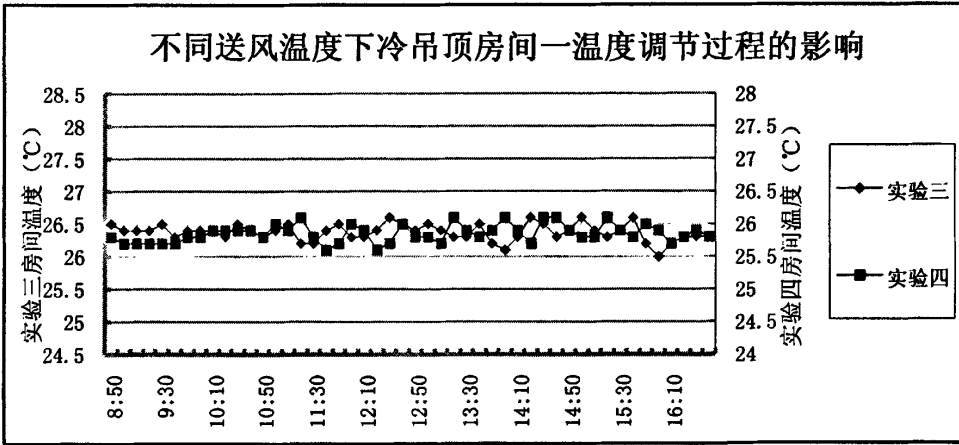


图 4.22 实验三和实验四房间一温度调节过程比较

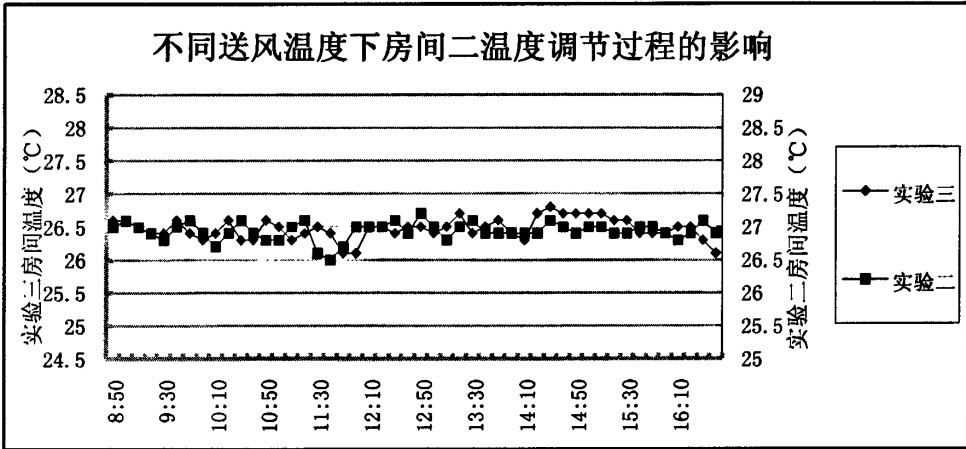


图 4.23 实验二和实验三房间二温度调节过程比较

图 4.23 和图 4.24 中给出的实验二、实验三和实验四中房间二温度变化过程也进一步说明了独立新风系统送风温度的变化基本不影响复合系统的温度控制过程。

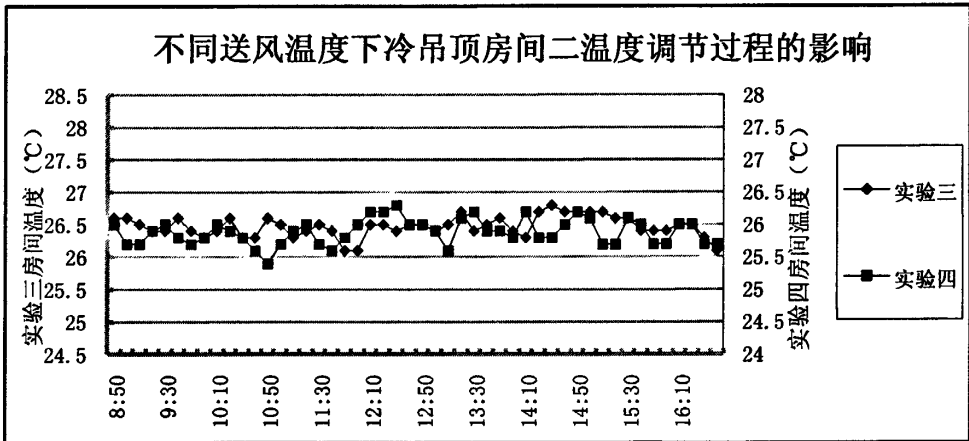


图 4.24 实验二和实验三房间二温度调节过程比较

为了进一步分析送风温度变化对顶板进口水温调节过程的影响，图 4.25 和图 4.26 给出了实验二和实验三中两个房间顶板进口水温的调节过程。

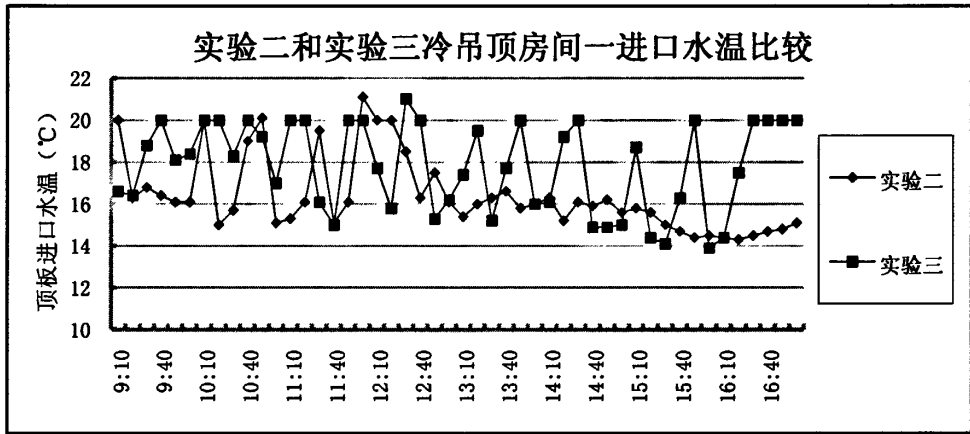


图 4.25 实验二和实验三房间一顶板进口水温比较

比较实验二和实验三中的冷辐射顶板进水温度变化特点，可以发现实验三中两个实验房间的冷辐射顶板进口水温一直在波动。尽管实验二中房间二的水温也呈现出全天波动，但是其波动的幅度比实验三小，全天波动的时间也要短，根据图 4.25，房间一的进口水温更是全天都处于波动之中。考虑到实验二和实验三两个房间室外气温大致相同，且本文中的实验房间都是南向房间，其在 9 时至 12 时这段时间中受太阳辐射影响不大，因此房间所具有的冷负荷在两个实验中相应的时段冷负荷相差不大，通过分析这一时段内顶板水温的波动就可以更清楚发现送风温度对顶板进口水温变化的影响。由于在实验三中采用更低的送风温度，因此独立新风承担了更多的冷负荷，冷辐射顶板控制系统监测到房间温度有波动而下调水温的过程中，水温略微下调就可以和独立新风系统一起承担房间的冷负荷，冷辐射顶板系统的信号选择器监测到这一情况后就会开始重新上调水温至重设进水温度，因此在实验三中这一时段的顶板进口水温基本是在重置进口水温或是略低于重置进口水温；相比之下，实验二中独立新风系统较高的送风温度导致其无法承担较大的冷负荷，因此冷辐射顶板进口水温控制系统为了补偿独立新风系统无法承担的冷负荷而不断的将顶板进口水温下调甚至调节至极限进水温度，从图 4.25 和 4.26 中可以明显的发现这一趋势。因此独立新风系统承担的冷负荷比率提高，整个复合系统的调节特性没有发生明显的影响，复合控制系统能够不断调节冷辐射顶板的进口水温以补偿送风温度的变化而引起的房间温度波动，因此房间的温度也能够基本稳定于设定值。不同送风温度下，顶板平均进水温度会有所差异，从图 4.25 和图 4.26 给出冷辐

射顶板全天进口水温变化来看，从 9 时至 11 时 30 分，房间二实验二时的平均进水温度为 16.1℃，实验三的平均进水温度为 16.4℃；房间一实验二的平均进水温度为 17.1℃，实验三的平均进水温度为 18.6℃。

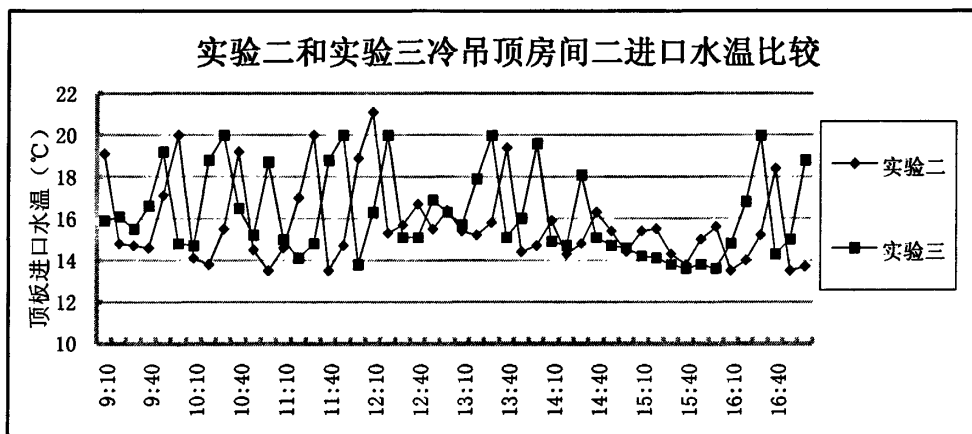


图 4.26 实验二和实验三房间二顶板进口水温比较

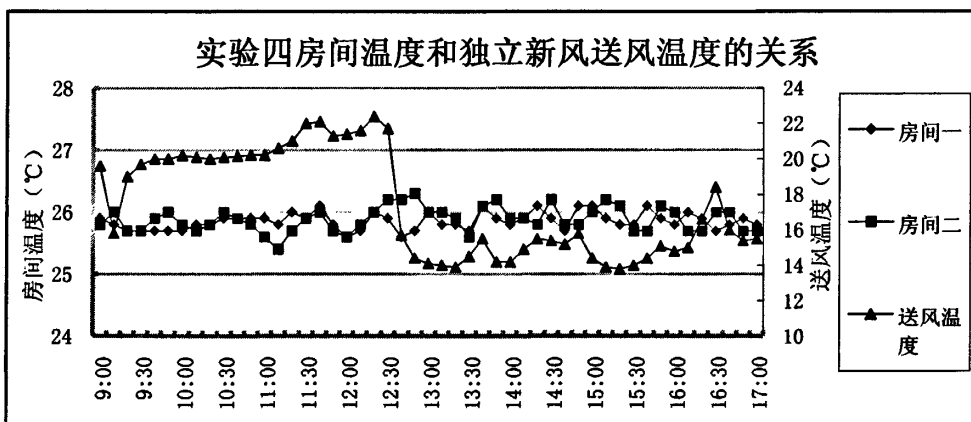


图 4.27 实验四房间温度和独立新风送风温度变化关系

为了进一步分析控制系统的稳定性，实验四中将送风温度突然从 22℃度降至 15℃以考察复合系统的多区控制策略能否及时调整以防止房间的温度发生过多的波动。从图 4.27 可以看出尽管独立新风系统承担的冷负荷突然增大了近一倍，但是房间的温度几乎未发生明显的波动。由于室内外条件在这一时间内均未发生太大改变，只是房间二人数增为三人，房间一无人，显然即使是对于没有人员在室内的房间一，由于顶板供水水温的迅速调节，送风温度的突然降低

也没有引起明显的温度波动，因此这进一步说明了本文提出的控制策略能够快速地对各参数变化做出反应，具有很好的稳定性和可靠性。

综上所述，独立新风系统和冷辐射顶板承担的冷负荷比率大小不影响本文提出的多区域控制策略的控制性能，该比率大小影响的只是冷辐射顶板的平均进水温度高低。独立新风系统承担的冷负荷比率较大时，冷辐射顶板的进水平均温度就会相应升高；独立新风系统承担的冷负荷比率较小时，冷辐射顶板的进水平均温度就会自动降低以控制房间的干球温度，即使是两个系统承担的负荷比率突然发生改变，控制系统也能够通过调节相关的参数迅速调节以维持房间的温度参数。此外，当独立新风系统送风温度较低承担复合较大时，顶板的进口水温可能会调节的更加频繁，水温变化显示出波动更加频繁特点。

4.3.3 复合系统全天运行过程分析

如表 4.2 所示，从该表中可以看出实验二的室外温度条件在上海地区夏天较为普遍，接下来本文就以实验二的实验结果为例进行分析和讨论，探究本实验中采用的复合控制策略能否实现预期的目标。实验二是依靠冷辐射顶板的水温跟踪控制法与多区域独立新风单 PI 控制器法为基础的控制对房间温湿度进行运行调节和控制，下文将对该控制策略下房间温湿度参数的调节及控制系统特性进行分析和讨论。实验二的全天室外温度变化及室外总辐射强度变化如图 4.28 所示，由于实验当天处于多云且有风的状态，全天的最高温度为 35.8℃，平均气温为 30℃左右，同时云层的遮挡也使总辐射时高时低，室外气象条件所造成的冷负荷有一定的波动。此外该次实验中室外空气全天平均露点温度为 25.3℃，显然其室外空气的含湿量较高，这是一种不利于使用冷辐射顶板系统的气象条件。

为了更加清楚的分析复合系统控制策略在全天的控制性能，下面就按照冷辐射顶板进口水温、房间温度和相对湿度的顺序对该天的实验数据进行分析。

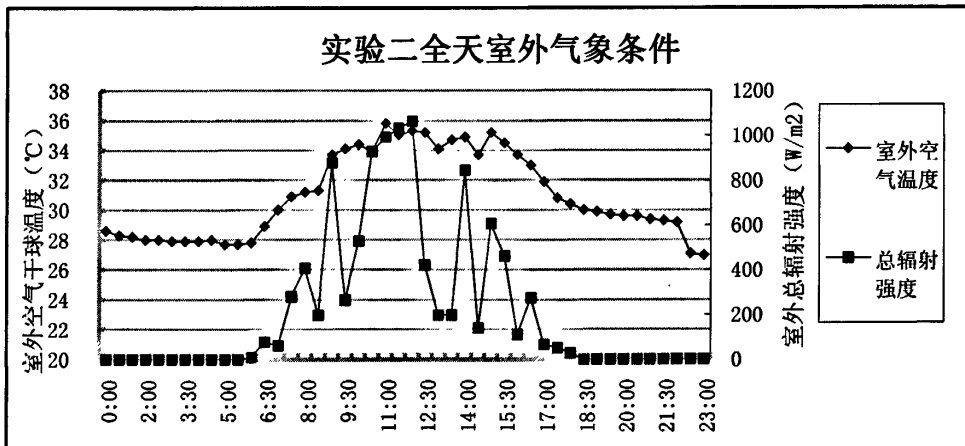


图 4.28 实验二全天室外气象条件变化

由于应用多区独立新风+冷辐射顶板系统的前提是冷辐射顶板系统的表面不发生任何结露，因此首先分析实验二全天 2 个实验房间的进口水温相对于房间露点温度的变化趋势。

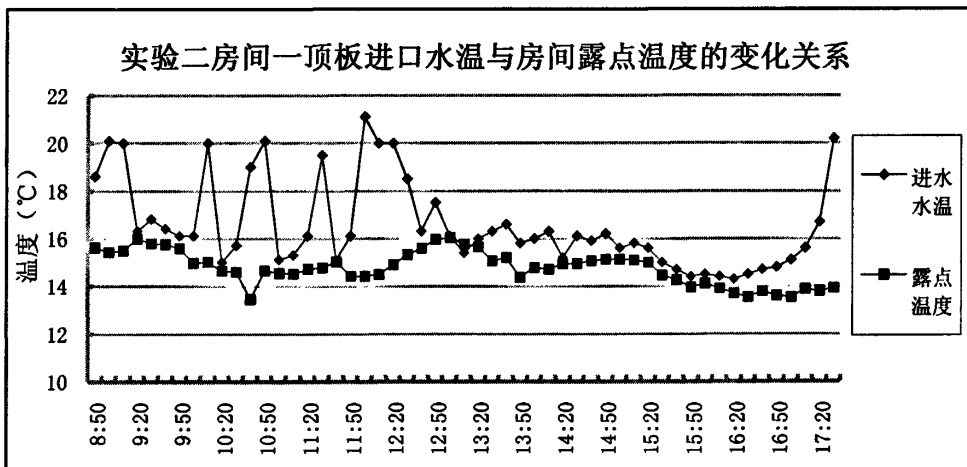


图 4.29 房间一顶板进口水温与房间露点温度的变化关系

图 4.29 和图 4.30 分别给出了房间二和房间一全天顶板进口水温及房间露点温度的变化过程。从图中可以看出，使用水温跟踪法作为冷辐射顶板进口水温的控制策略的一个结果就是顶板进口水温全天都在调节。除了午后冷负荷较大的时刻需要长时间跟踪房间状态所对应的极限进水温度外，其他时刻进水温

度基本都处于跟踪露点和跟踪重置进口水温的工况之间变化，进口水温变化比较大，但是一个非常明显的优点就是几乎在所有的时刻两个房间的顶板进口水温都能很好的保持在房间露点温度之上，也就是说采用水温跟踪法尽管会使进水温度变化相对频繁，但是的确能够很好的防止控制器发生积分饱和，有效的防止了顶板表面发生结露。

分析 4.29 和 4.30 的水温变化趋势可以看出，由于本实验的两个实验房间都是南向的房间，因此早上太阳辐射得热相对较小，房间的冷负荷也就相应较小，所以在上午的几个小时里顶板进水温度变化幅度较大，而在午后由于太阳辐射得热的持续增加，两个房间的顶板进口水温的平均温度都明显低了很多，房间一的顶板在部分时段几乎都一直处于跟踪房间极限进口水温的工况。这种水温的变化差异可以说明水温跟踪控制法能够很好的适应房间负荷的变化，能够可靠的根据条件来改变顶板的供冷能力。

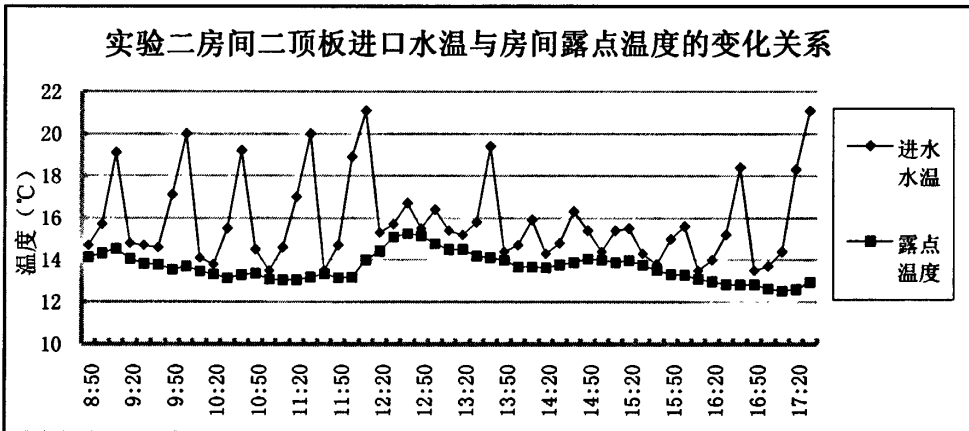


图 4.30 房间二顶板进口水温与房间露点温度的变化关系

尽管水温跟踪控制法中极限进水温度和重置进口水温是两个固定的设定值，但是顶板的进口水温并不是非此即彼的保持在这两个温度，而是能够根据复合的需要在这两个温度之间平稳地变化，这是由于顶板进口水温能够根据房间温度的变化迅速做出反应，这也说明了相应的信号选择器的有效性。从进口水温变化过程可以看出，水温降至极限进水温度后，房间温度缓慢降低，一旦房间温度低于设定值后顶板进水温度就会缓慢调高，相对于顶板进水温度降低的速度，顶板进口水温升高的速度要慢很多，从房间温度变化的趋势来分析水温变化速度这一特性，室温变化趋势从一个温度波峰到下一个温度波峰之间的温度

变化近似为一个对称的曲线，也就是说顶板进口水温较快降低引起的房间温度下降速度和顶板进口水温缓慢升高引起的房间温度上升速度基本相同，有利于稳定房间的温度，使其不至于由于水温升高过快引起房间温度短时间内发生较大超调和控制过程发生震荡。

衡量冷辐射顶板+多区独立新风系统的复合控制策略优劣的指标除了顶板进口水温的调节性能外，显然房间的温度变化过程也是一个非常重要的指标。

图 4.31 和图 4.32 分别为房间一和房间二的温度及相应的室内人员变化。

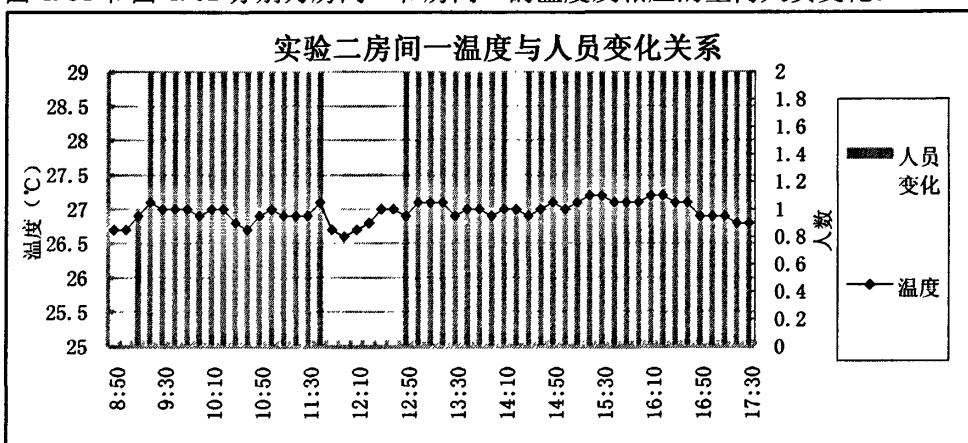


图 4.31 实验二房间一温度与人员变化的关系

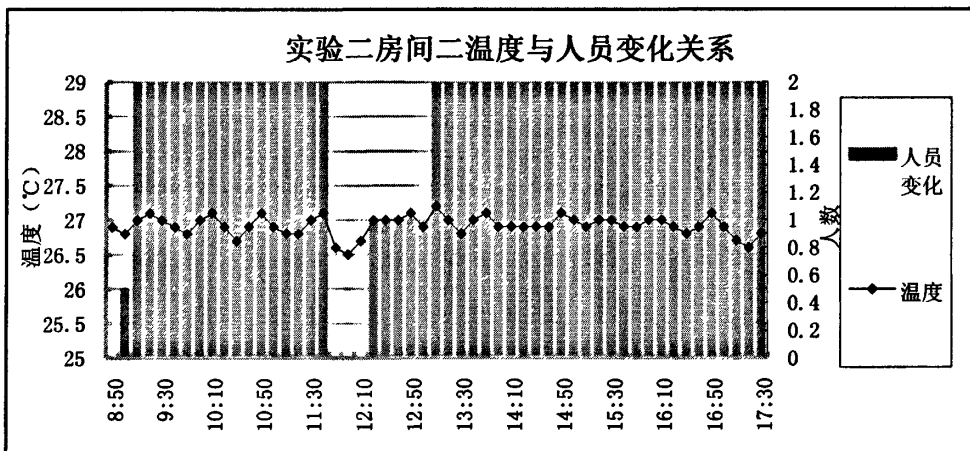


图 4.32 实验二房间二温度与人员变化关系

从两个实验房间全天室温变化过程来看，两个房间的温度基本都非常准确

的跟踪着设定温度。从节 2.2.2 的分析中可知,利用水温跟踪法控制房间的温度时会导致房间温度发生一定的震荡,但是从图 4.31 和图 4.32 中给出的室温变化趋势来看,这种由于水温调节工况变化所导致的房间温度震荡并不严重,尽管受到各种室内外扰量的影响,室温都能保持在设定值的 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 以内,对于舒适性空调而言,这样的温度波动范围完全可以接受。

为了分析独立新风系统送风温度对房间温度调节过程的影响,图 4.20 给出了实验四当天独立新风系统全天的送风温度变化过程。显然尽管本实验台表冷器后的出风温度比较低,但是由于送风需要和回风通过显热回收器进行一定的热交换,考虑随后的风机得热,最终的送风温度有了很大的提高,从图中可以看出全天送风温度基本都保持在 22°C 左右,只是在中午室外温度较高时温度有所提高。分析该试验中的送风温度,显然独立新风系统承担负荷的能力比较小,因此可以认为在该复合系统中不断变化调节以克服冷负荷变化的冷辐射顶板起着主导作用。该结论和全天房间的温度变化更加有力的说明水温跟踪控制法虽然会导致房间的温度发生震荡,但是这种震荡的幅度非常小,完全可以满足调节过程的需要。

此外,对比图 4.31 和图 4.32 中给出的人员变化和室温变化可以看出冷辐射顶板+多区独立新风系统的复合控制策略能够很好的避免人员变动引起的冷负荷变化。

冷辐射顶板的进口水温和房间温度的调节过程都说明了本文提出的复合控制策略能够在防止顶板发生结露的同时有效的调节房间的温度。为了更进一步的说明该复合控制策略对房间状态的调节过程,图 4.33 和图 4.34 分别给出了房间一和房间二的相对湿度全天变化过程。从表 4.2 可以知道,实验当天两个房间的相对湿度设定值都是 50%。比较图 4.33 和图 4.34 中给出的相对湿度变化过程可以发现两个实验房间的相对湿度基本处于或低于其设定相对湿度,全天都在设定值的 $\pm 10\%$ 以内,显然都满足了相对湿度的调节要求。

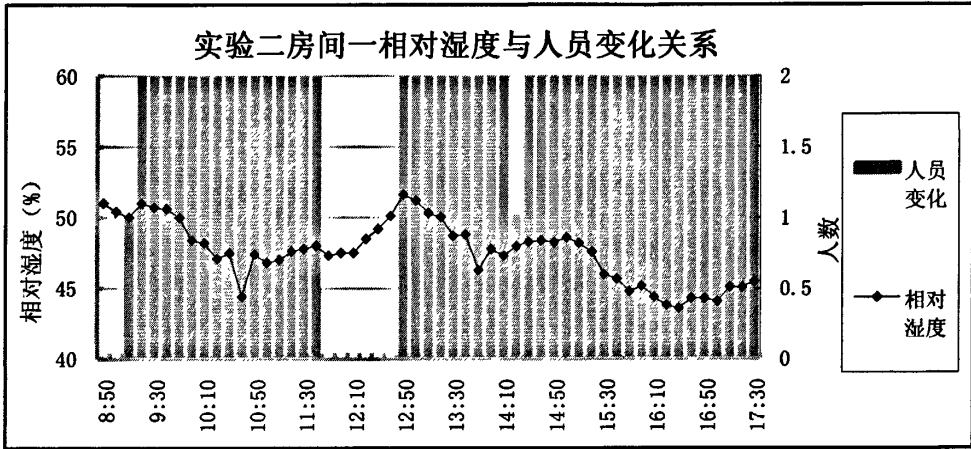


图 4.33 房间一相对湿度和人员变化的关系

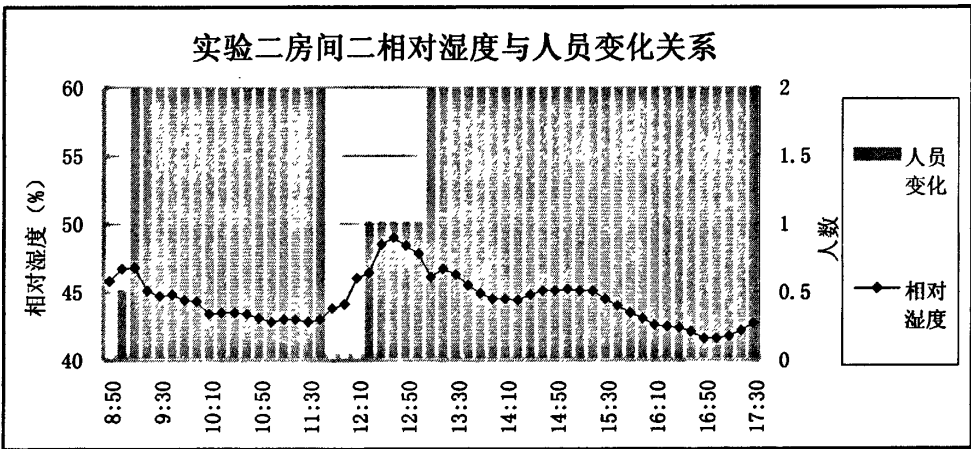


图 4.34 房间二相对湿度和人员变化关系

分析两个房间的相对湿度变化趋势发现，房间一的相对湿度要高于房间二，因此房间一的相对湿度将作为最不利参数来调节独立新风系统的送风状态。从图 4.33 可以看出房间一的相对湿度在下午 15 时之前基本都能够较为准确的跟踪设定相对湿度，但是在 15 时之后此时的相对湿度却在不断的降低。分析本实验所采用的复合控制策略，独立新风系统的控制参数有两个：房间的温度和相对湿度，显然 15 时左右两个实验房间的相对湿度都是要略低于设定值，因此此时相对湿度降低不是根据相对湿度和其设定值之间的差异调节的，而是根据房

间的温度进行调节。从图 4.31 和 4.32 中给出的室温变化过程可以看出, 15 时左右房间一的室温一直都高于其对应的设定温度, 根据复合系统的控制策略, 这时独立新风系统的目标控制参数应该为房间一的室温, 由于房间一的温度持续高于设定值, 因此送风温度就应该不断降低以满足该房间的冷负荷, 从图 4.20 给出的全天送风温度变化趋势可以清楚的看到这种送风温度降低的趋势。在送风温度降低的同时, 房间内空气的露点温度也相应降低, 这样就为冷辐射顶板发挥更大的冷量提供了有利条件, 因此独立新风系统在转向控制空调房间的温度后, 它就会与冷辐射顶板形成一种协同作用, 不断增强复合系统的总的供冷能力。

值得注意的是, 在独立新风的送风温度降低后, 作为非温度最不利房间的房间二其温度并没有出现任何明显的波动, 而是通过冷辐射顶板进口水温的自动调节实现了保持室温的稳定, 这也进一步说明了本实验中采用的复合控制策略能够非常准确的控制多个空调区的温度参数, 如图 4.35 所示。

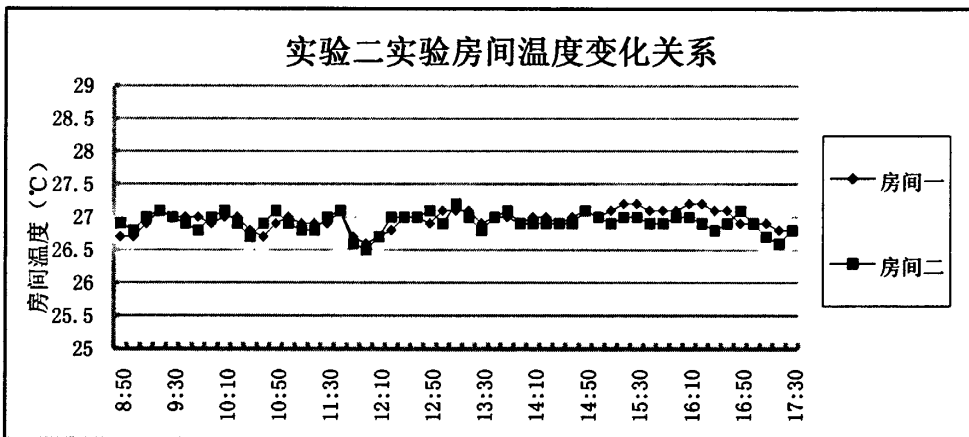


图 4.35 两个实验房间温度变化关系

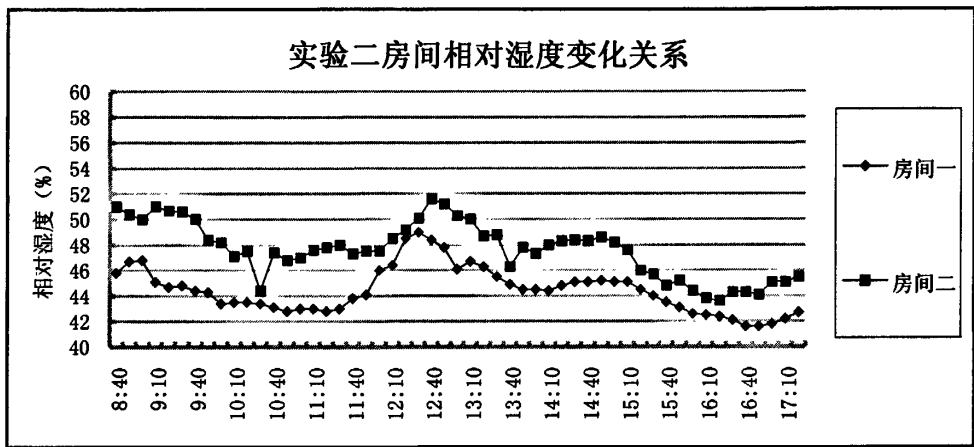


图 4.36 两个实验房间相对湿度变化关系

从图 4.35 和 4.36 给出的两个实验房间的温度和相对湿度变化过程可以看出本实验中所采用的多区控制策略不仅能够非常准确的控制各空调房间的温度，还能够有效的控制房间的相对湿度使其保持在要求的范围内，成功的实现了冷辐射顶板+独立新风系统的多区控制。

4.4 本章小结

本章利用既有的冷辐射顶板+多区独立新风系统实验平台，开发了基于冷辐射顶板水温跟踪控制法和闭环单 PI 控制的复合控制策略的控制程序，并在控制程序的基础上制作了用于监控系统控制过程的人机界面。通过对该系统进行的一些列实验充分说明了本实验平台所采用的复合控制策略能够有效防止冷辐射顶板的表面发生结露，且在准确控制多区系统的各房间的室温的同时能够有效的控制房间的相对湿度。通过分析最不利参数法和送风温度变化对复合控制系统调节特性的影响，得出本实验平台所使用的控制策略能够有效的对新风系统送风温度变化做出反应，得到一个相对平稳的温度控制过程，房间的相对湿度也能够均保持在要求的范围内。

第 5 章 结论和展望

5.1 研究结论

本文对冷辐射顶板+独立新风系统的控制策略进行了研究并将单区的复合系统控制策略扩展到了多区的空调系统，通过分析和实验得到了如下结论：

1. 本文通过建立冷辐射顶板的有限元分析模型，分析了在不同进口水温 and 冷冻水流量时冷辐射顶板进口水温与顶板表面最低温度之差的关系，研究结果表明保温材料表面的传热参数及房间空气的温度对这一温度差的影响并不大，在顶板水管内流态不发生改变的情况下，冷辐射顶板进口水温和其表面最低温度的差为一定值。

2. 在极限进水温度的研究结果基础上，本文提出了三种冷辐射顶板进口水温控制策略：室温跟踪法、水温跟踪控制法及带冷凝水保护环路的进水温度控制法，通过对三种控制策略的特点的分析说明了各种控制方法所具有的优点和不足。

3. 为了实现多区控制过程提出了两种有效的多区控制系统控制参数选择方法：最不利参数法和允许波动区法，并对这两种参数选择方法所可能造成的多区控制过程的问题进行了分析。

4. 根据独立新风系统的特点提出了基于多区参数选择方法的多区独立新风闭环控制策略，针对双 PID 控制策略易发生积分饱和的问题提出了相对简单的单 PID 控制策略；提出了基于多区室内温湿度允许波动区控制参数选择法的多区域独立新风系统开环控制策略，提供了一种控制系统整定工作量小且相对简单的控制策略，并定性分析了该控制策略的可行性。

5. 实际复合系统控制实验表明该论文提出的的多区冷辐射顶板+独立新风系统控制策略的控制下，实际多区空调系统不仅未发生结露现象，而且在多种扰量作用下仍然保持两个实验房间的温度参数和相对湿度参数，从实验的角度证实了本文提出的多区控制策略能够实现多区温湿度控制。

5.2 研究展望

本文的研究工作虽然已经取得一些关于冷辐射顶+独立新风系统多区控制的结论和成果，但是有一些问题仍然有必要在今后的工作中进一步加以研究：

1. 本文的实际控制过程中房间的温度参数采用的是房间的干球温度，而已有的许多研究工作推荐采用操作温度作为房间温度的控制参数，因此需要进一步研究当操作温度作为多区控制的温度参数时，本文提出的多区控制策略的性能。

2. 本文针对实验中采用的冷却顶板提出了极限进水温度的概念，对于不同形式的顶板形式和结构，需要进一步研究其极限进水温度的规律。

3. 本文提出了多种冷辐射顶板控制策略及多区独立新风系统的开环和闭环控制策略，尽管已经对各种控制方法的优缺点进行了一定的分析和比较，但是仍然有必要对不同控制方法组合而成的复合系统控制策略进行实验分析。

致谢

光阴如梭，不知不觉中在同济度过了 2 年多的时间，初来乍到的新奇已经成为让人回味的过往，时间磨砺了我这个曾经浮躁无知的青年，不断的学习引领着我人生的方向。写了致谢也许就意味着以后我无法再以一个学生的身份出现在同济的校园，意味着以后再遇到问题时无法再到培训楼各个办公室里寻找老师的意见，一段让我深深感激和珍惜的美好时光也许到这里就会有一个标点，一个我不愿意划下的标点。

在同济遇到了潘老师和黄老师，我觉得自己很幸运，呵呵，尽管经常被他们“骂”，但是我很开心，因为我犯的低级错误越来越少。潘老师在这两年多的时间里无论在专业上还是生活上都给了我很大的帮助，对建筑模拟技术的热爱也正是受到潘老师的影响，她对专业问题的见解和洞察力让我受益良多。黄老师对我做人做事的态度影响很大，说到这，不由想起和他一起在上海南站席地而坐讨论专业问题，想起他耐心的帮我分析一些系统控制问题。此外，还得感谢我的同门们，玉明、张洁、林兴彬、姚远和黄森，和他们一起研究问题，一起聊天真的很开心，他们真是一群可爱的人！

左明明
2009 年 3 月

参考文献

- [1] Richard D.Watson, Kirby S.Chapman. Radiant,Heating and Cooling Handbook. The McGraw-Hill Company,2004.
- [2] 低温辐射供热与辐射供冷,机械工业出版社,2004.
- [3] Jae-Weon Jeong, Stanley A. Mumma, William P.Bahnfleth. Energy conservation benefits of a dedicated outdoor air system with parallel sensible cooling by ceiling radiant panels. ASHARE Transaction, 2003, 109 (2): 627-636.
- [4] Corina Stetiu. Energy and peak power savings potential of radiant cooling systems in US commercial buildings.Energy and Buildings,30(1999): 127-138.
- [5] Stanley A. Mumma, Jae-Weon Jeong. Direct digital temperature,humidity, and condensate control for a dedicated outdoor air-ceiling radiant cooling panel system. ASHRAE Transaction, 2005, 111(1).
- [6] Christopher L. Conroy, Stanley A. Mumma. Ceiling radiant cooling panels as a viable distributed parallel sensible cooling technology integrated with dedicated outdoor air system. ASHRAE Transaction, 2001,107(1).
- [7] L.Z.Zhang, J.L.Niu. Indoor humidity behaviors associated with decoupled cooling in hot and humid climates. Building and Enviroment,38(2003):99-107
- [8] 殷平, Mumma S A.独立新风系统 (DOAS)研究 (1): 综述.暖通空调, 2003, 33 (6): 44-49
- [9] 殷平.独立新风系统 (DOAS)研究 (2): 设计方法.暖通空调, 2004, 34 (2): 37-43
- [10] 殷平.独立新风系统 (DOAS)研究 (3): 常规风机盘管独立新风系统.暖通空调, 2005, 35 (3): 69-76
- [11] 肖益民 付祥钊. 冷却顶板空调系统中用新风承担湿负荷的分析. 暖通空调, 2002: 32(3): 15-17.
- [12] 李建兴,于振峰,屠光备. 独立新风系统运行的能耗分析. 燃气与热力, 2004: 24(6): 337-339.
- [13] 狄洪发,王威,江亿,葛庆昆. 辐射吊顶的实验研究. 暖通空调,2000,30(4):5-8.
- [14] 陈晓阳,江亿,李震. 湿度独立控制系统的工程实践. 暖通空调,2004,34(11):26-29.
- [15] 刘晓华,李震,江亿. 溶液全热回收装置与热泵系统结合的新风机组. 暖通空调,2004,24(11):98-102.
- [16] Atila Novoselac, Jelena Srebric. A critical review on the performance and design of combined cooled ceiling and displacement ventilation systems. Building and

- Enviroment,34(2002):497-509.
- [17] Yizai Xia, Stanley A. Mumma. Ceiling Radiant Cooling Panels Employing Heat-Conducting Rails: Deriving the Governing Heat Transfer Equations. ASHRAE Transaction, 2006,112(2): 34-41.
- [18] 章熙民, 任泽霏, 梅飞鸣. 传热学, 中国建筑工业出版社, 2001.
- [19] LBNL-37371. Therm 2.0: A PC program for analyzing the two-dimensional heat transfer through building products.
- [20] Helmut E. Feustel, Corina Stetiu. Hydronic radiant cooling--preliminary assessment. Energy and Building, 22(1995):193-205.
- [21] S.B. Riffat, X. Zhao, P.S. Doherty. Review of research into and application of chilled ceilings and displacement ventilation systems in Europe. International Journal of Energy Research, 28(2004):257-286.
- [22] F. G. Shinsky. 过程控制系统——应用、设计与整定, 北京:清华大学出版社, 2004
- [23] 赖艳红. 辐射冷顶板换热机理与试验研究, 硕士学位论文, 2008.
- [24] 西门子(中国)有限公司. 风管式传感器—QFM3160.
- [25] 西门子(中国)有限公司. 风管式传感器—QAM21.
- [26] Phoenix Contact. Data Sheet 5564AC01:IB ILAI 2/SF. 2001.
- [27] ASHRAE Handbook --Fundamentals. 2005.
- [28] 赵荣义, 钱以明, 范存养, 薛殿华. 简明空调设计手册. 中国建筑工业出版社, 1998.
- [29] Yin, Y., Zhang, X., Chen, Q. Condensation risk in a room with high latent load and chilled ceiling panel and with air supplied from liquid desiccant system. HVAC&R Research.
- [30] Muhsin Kilic, Gokhan Sevilgen. Modelling airflow, heat transfer and moisture transport around a standing human body by computational fluid dynamics. International Communication in Heat and Mass Transfer, 35(2008):1159-1164.
- [31] Shuzo Murakami, Shinsuke Kato, Jie Zeng. Combined simulation of airflow, radiation and moisture transport for heat release from a human body. Building and Environment, 35(2000):489-500.
- [32] Timothy Moore, Fred Bauman, Charlie Huizenga. Radiant cooling research scoping study. Internal Report, 2006.
- [33] Tiberiu Catalina, Joseph Virgone. Dynamic simulation regarding the condensation risk on a cooling ceiling installed in an office room. Building simulation 2007.
- [34] R.K. Strand, K.T. Baumgartner. Modeling radiant heating and cooling systems: integration

- with a whole building simulation program. *Energy and Building*, 37(2005):389-397.
- [35] 沈晋明 聂一新. 洁净手术室控制新技术:“湿度优先控制”. *洁净与空调技术*: 2007(3):17-19, 31.
- [36] 沈德强 沈晋明. 医院病房防 SARS 抗菌干盘管空调系统研究. *暖通空调*, 2004(5).
- [37] 王红朝, 对《医院病房防 SARS 抗菌干盘管空调系统研究》一文的质疑, *暖通空调*, 2004(8)
- [38] 同济大学, 上海新晃空调设备有限公司, 多用途隔离病房及其无凝水空调末端与系统研发报告, 2004 年 4 月
- [39] 赵荣义 范存养 薛殿华 钱以明. *空气调节*. 北京: 中国建筑工业出版社, 1994.

附录 A 数据读写程序段

要对冷辐射顶板+独立新风系统进行控制,就必须首先将当前房间的温湿度状态变化、冷顶板进口水温及其他各种过程参数转化成控制程序可以进行比较和判断的数值,这个过程就涉及传感器的信号转换和 PLC 的端子如 AO、AI 和 RTD 的接入传感器后的初始化,同时由于缺乏直接测量露点温度的传感器,程序中还需要将特定温湿度传感器传递过来的温湿度信号转化为特定房间的露点温度以便将之用于顶板进口水温的控制。由于不同的传感器就有可能需要连接到不同类型的 PLC 模块,因此这里就对本实验中使用的两种传感器的数据读取程序进行讨论。

本实验中用于房间温湿度测量的是西门子 QFM3160,其温度测量量程使用其出厂设置 0-50℃,相对湿度测量范围为 0-100%,两种参数满量程时,传感器的信号输出均为 10V。QFM3160 测得相应的温度和相对湿度后,按照测得的实际值占满量程的大小输出相应比例的电压信号。根据 Phoenix Contact 提供的技术指南^[26],其生产的 AI 模块接收到电压信号后将其转化为一个 WORD 类型的变量,且 10V 是此时的最大输入信号,对应着的 WORD 类型变量的值为 7530,将其转化为实型变量就是 30000,因此将 QFM3160 接入 AI 通道后必须进行一定的处理才会得到相应的温度和相对湿度值,其转化程序见图 A.1。

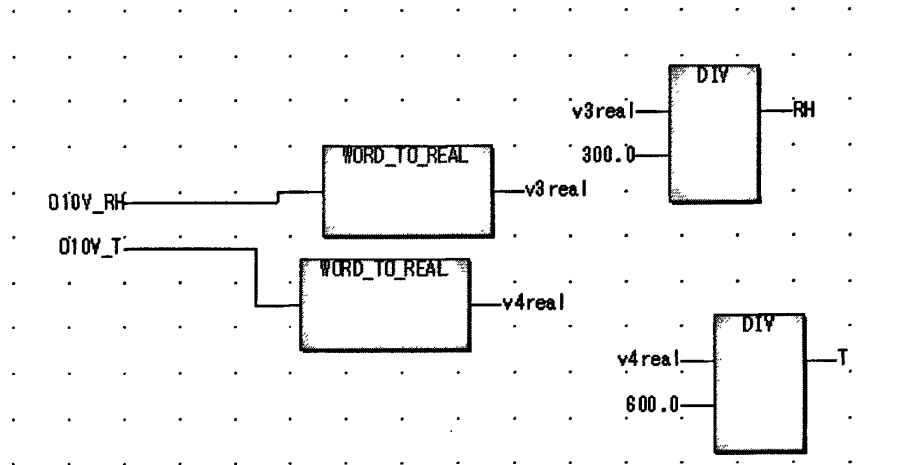


图 A.1 QFM-3160 信号转化程序

图 A.1 中 010V_RH 和 010V_T 分别为传感器传送给 AI 通道的电压信号所对应的 WORD 类型的变量，将其转化为实型变量后除以相应的系数就可以得到实际房间的温度和相对湿度数值。

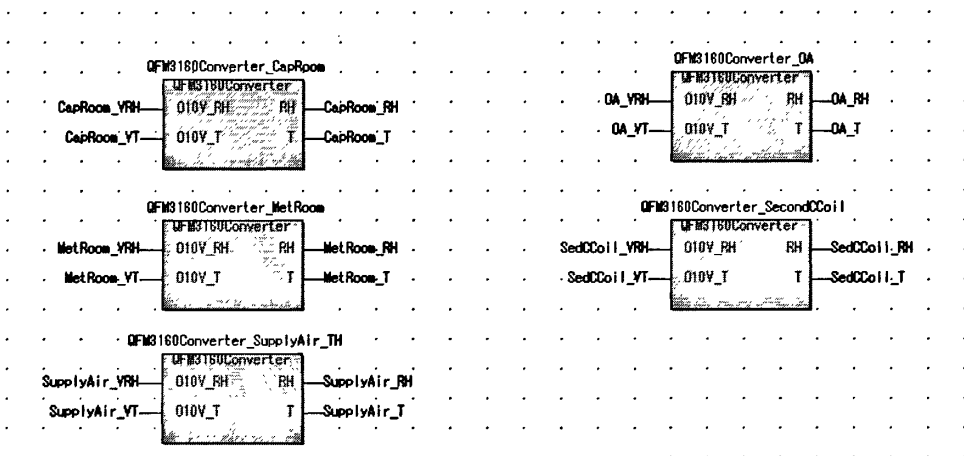


图 A.2 QFM-3160 信号转化程序实例

将图 A.1 中的转化程序封装成一个专门的程序块后，就可以需要使用时直接调用该封装后的程序块，如图 A.2 所示，这种封装技术将用于后续的几乎所有程序编写中。

由于在接下来的冷辐射顶板进水温度控制程序中还要使用房间露点温度作为参考变量，但是由于缺乏相应的露点温度传感器，本实验中就利用 QFM3160 测得的温度和相对湿度参数计算出露点温度。从相关的技术文档可以知道，该传感器用于测量流动空气的温度和相对湿度时具有相同的时间常数，都是 20s，也就是说该传感器用于测量这两个不同的参数时反应时间基本一致。

从图 A.1 可以看出，PLC 编程不可能像高级语言那样进行太复杂的运算，因此根据干球温度和相对湿度计算露点温度所使用的方法只能是相对简单的数学运算，也就是说只能使用经验公式来计算露点温度。湿空气在一定范围内的状态计算公式有很多^[39]，由于计算湿空气的露点温度时需要用到水蒸汽分压力，因此在计算露点温度之前，还需要计算饱和蒸气压力，这样才能结合相对湿度计算出水蒸汽分压力。

根据文献^[39], 饱和蒸汽压力的计算公式为:

$$\ln p_{pb} = \frac{C_8}{T} + C_9 + C_{10}T + C_{11}T^2 + C_{12}T^3 + C_{13} \ln T \quad (\text{A. 1})$$

其中, T 为干球温度所对应的绝对温度值, K;

其他各参数为常数,

$$C_8 = -5800.2206, \quad C_9 = 1.3914993,$$

$$C_{10} = -0.048640239, \quad C_{11} = -0.00041764768$$

$$C_{12} = -1.4452093 \times 10^{-8}, \quad C_{13} = -1.4452093 \times 10^{-8}$$

$$C_{13} = 6.5459673$$

根据式 A. 1 进行编制的饱和蒸汽压计算程序见图

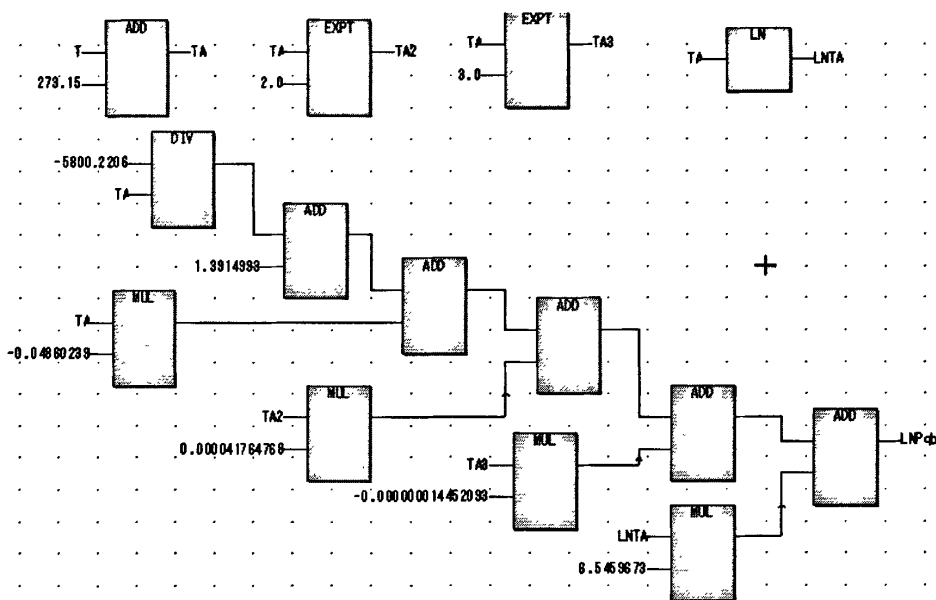


图 A. 3 饱和水蒸汽分压力功能块图计算程序

得到了饱和蒸汽压力和相对湿度的基础上, 水蒸汽分压力可以按下式计算:

$$P_p = \varphi \cdot P_{pb} \quad (\text{A. 2})$$

式中, φ 为相对湿度。

根据文献^[18]中的露点温度计算公式有：

$$t_d = -35.957 - 1.8726 \cdot \ln p_p + 1.1689 \cdot (\ln p_p)^2 \quad (\text{A. 3})$$

则基于式 (A. 1), (A. 2) 和 (A. 3) 露点温度的计算程序编制如图

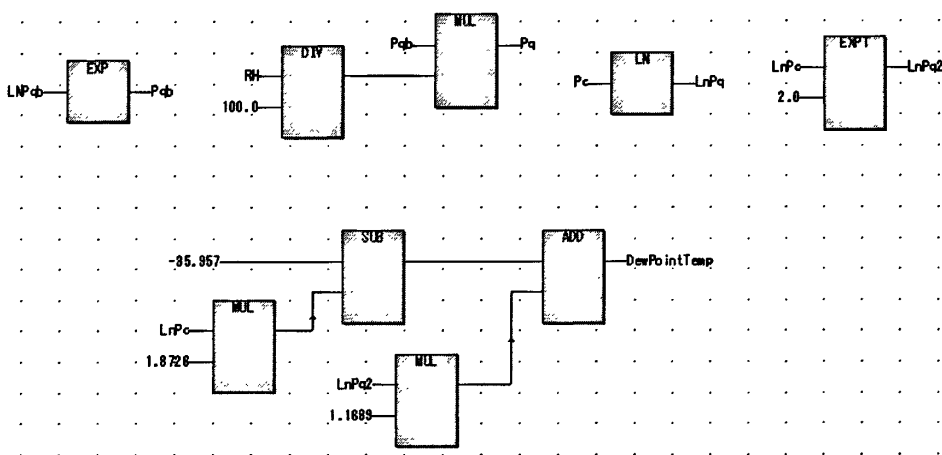


图 A. 4 露点计算功能块程序

将图 A. 3 和图 A. 4 的程序封装于一个功能块中便成为输入干球温度和相对湿度参数就可以进行精确计算露点温度的功能块程序了，其实例化后可见图 3. 9 所示的第二行实例功能块。

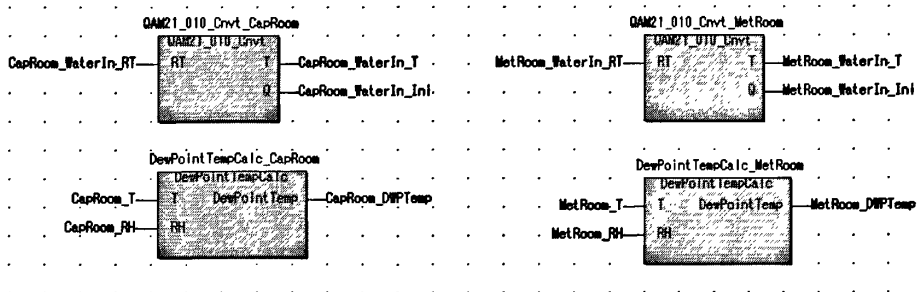


图 A. 5 QAM21 转化程序和露点计算功能块实例

本实验中用于测量冷辐射顶板进口水温的是西门子 QAM2110. 010, 该传感器采用的是 Li-Ni1000, 因此在对 PLC 的 RTD 模块进行初始化后进行温度信号的读取和变化, 相应的转化模块如图 A. 6 所示。

附录 A 数据读写程序段

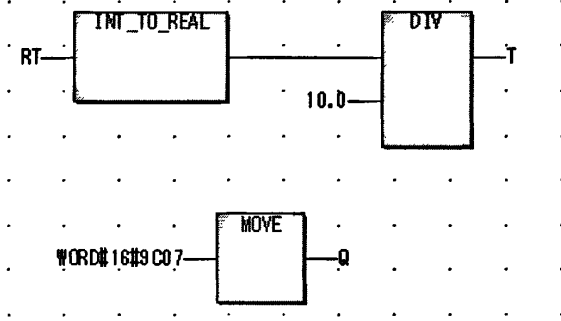


图 A.6 QAM-2110.010 号转化程序

附录 B 冷辐射顶板进水温度控制程序

冷辐射顶板进水温度控制主要就是要通过房间干球温度和设定值进行比较来决定顶板的进口水温设定值是极限进水温度还是重设进水温度，因此，首先需要完成的就是对冷辐射顶板运行的工况进行选择，如图 B.1 第二行程序。如果房间实际温度高于设定值，那么第二行程序便会返回 `Flag_outDEW` 为 0，相反则会返回 1，因此通过对 `Flag_outDEW` 的判断就可以分别此时冷辐射顶板应该属于何种运行工况。

为了使程序的控制逻辑更加清楚，本文使用梯形图作为区分工况的工具，如图所示，以 `Flag_outDEW` 为信号源的常开触点和常闭触点分别联系着两种不同的工况，当 `Flag_outDEW` 为 1 时，序号为 001 的程序段使能项复位，该程序段不执行，序号为 002 的程序段则激发，将重设进水温度和实际进水温度输出作为顶板进口水温 PI 控制器的设定值和实际值。当 `Flag_outDEW` 为 0 时，序号为 002 的程序段使能项复位，该程序段不执行，序号为 001 的程序段则激发，将极限进水温度和实际进水温度输出作为顶板进口水温 PI 控制器的设定值和实际值。

附录 B 冷辐射顶板进水温度控制程序

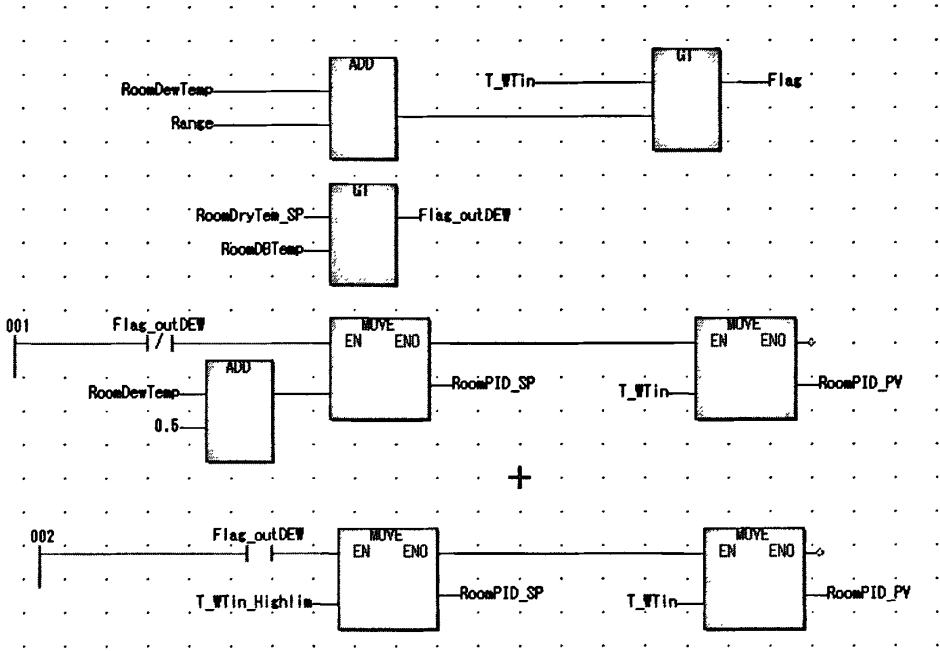


图 B.1 冷辐射顶板工况选择及不同工况下的设定值赋值

将上述程序段及相应的 PI 控制器封装为一个独立的具有工况选择及跟踪极限进水温度和重设进水温度的冷辐射顶板进水温度控制模块，该程序模块的实例可见图 B.2。本文采用同济大学黄治钟老师编制的 PI 控制器算法。

附录 B 冷辐射顶板进水温度控制程序

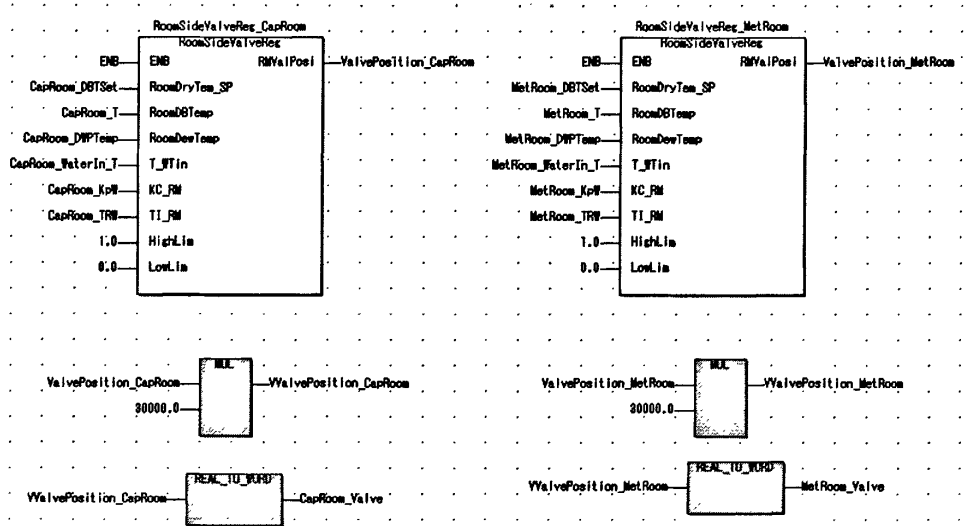


图 B.2 冷辐射顶板进口水温程序模块实例

附录 C 独立新风系统控制程序

新风系统控制程序的编写主要需要完成最不利参数选择器、工况选择器、等精度湿度转化器及具有 PI 控制器的完整控制模块的封装。

根据 3.1 中讨论的最不利参数选择器的算法，且实际试验台中只有两个房间，因此首先需要读入两个房间的设置值和实际值，如图 C.1 第一行程序所示：

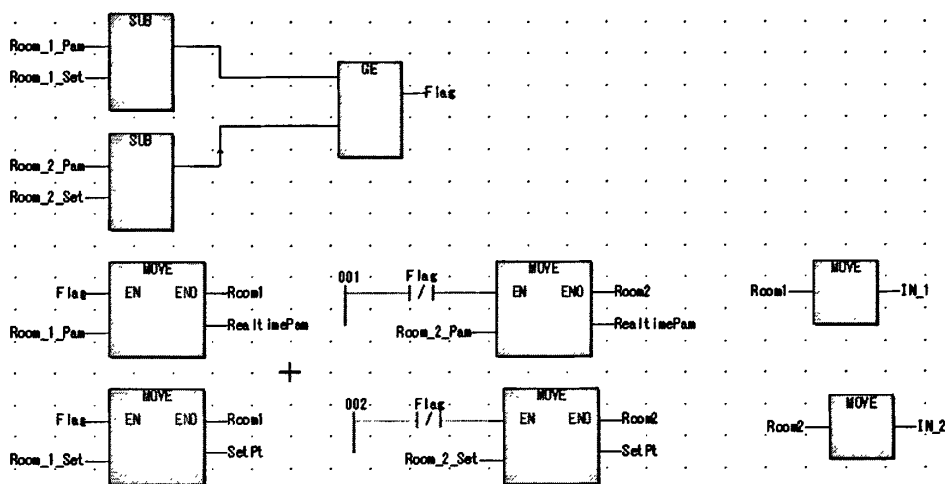


图 C-1 最不利参数选择器程序

通过两个 SUB 模块获得了相应的参数偏差后将其进行比较，如果第一个房间的参数偏差较大，则采用顶板进口水温参数赋值相同的方法，将第一个房间的设定值和实际值输出作为 PI 控制器的该参数的设定值和实际值。由于实际系统需要在控制房间相对湿度的基础上兼顾房间的温度，因此必须采用上述算法分别找出湿度最不利房间的湿度参数和温度最不利房间的温度参数。

通过最不利参数选择器输出的相对湿度参数需要依据等精度原则进行变化以有利于 PI 控制器在温湿度参数之间进行平稳的转换。

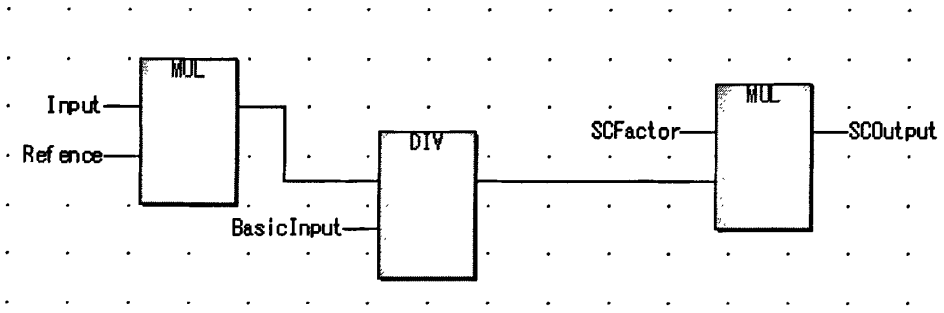


图 C.2 等精度相对湿度转换模块

如图 C.2 所示，Input 即为输入的相对湿度，Reference 是预期的温度控制精度，BasicInput 为预期的相对湿度控制精度，SCFactor 是一个权重因子，它可以根据实际控制过程的要求进行调整，这里取其为 1。

在完成了所有的参数选择和转换后，还需要对已经获得的温度和湿度参数进行选择以决定此时应该以温度作为控制参数还是以相对湿度作为控制参数。进行工况选择就必须比较温度和相对湿度与其设定值的关系，同时在比较这种关系的过程中还必须考虑控制精度，也就是说如果某一个参数要比其设定值大，但是他们之间的差值又小于控制精度的话，就认为这一参数仍然是符合控制要求的无需调节。

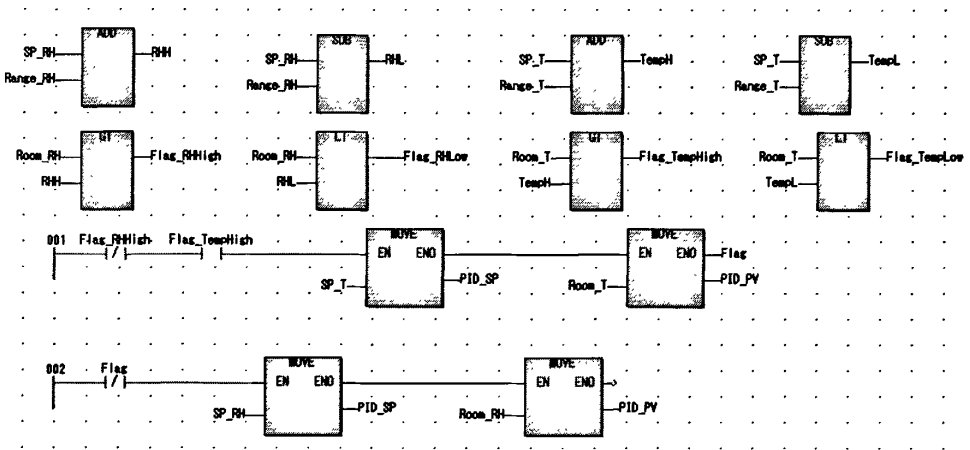


图 C.3 工况选择器及控制参数赋值模块

基于这点考虑，如图 C.3 的第一行和第二行程序，首先将各参数与其设定值及控制精度构成的各参数上下限进行比较，这里最重要的比较结果就是相对湿度的设定值和湿度上限的比较结果及温度和温度上限的比较结果，这两个参数将作为判断工况的依据。根据第三章中指定的多区控制策略，只有两种情况同时具备时才以温度作为控制参数，这两种情况是相对湿度低于湿度上限而温度值又高于温度上限，因此将上述条件用一个常闭触点和一个常开触点形成“且”的逻辑作为激发该工况的条件。显然如果以温度参数为控制参数时绝不可能同时以湿度参数作为控制参数，因此将温度参数赋值程序及图 C.3 中 001 的程序段的开关状态作为相对湿度参数赋值程序的开关参数就可以实现湿度控制参数赋值程序，显然这一点可以通过 001 程序段的开关状态所对应的常闭触点来实现。

将上述程序封装后就形成了如图 C.4 所示的独立新风系统多区控制程序。

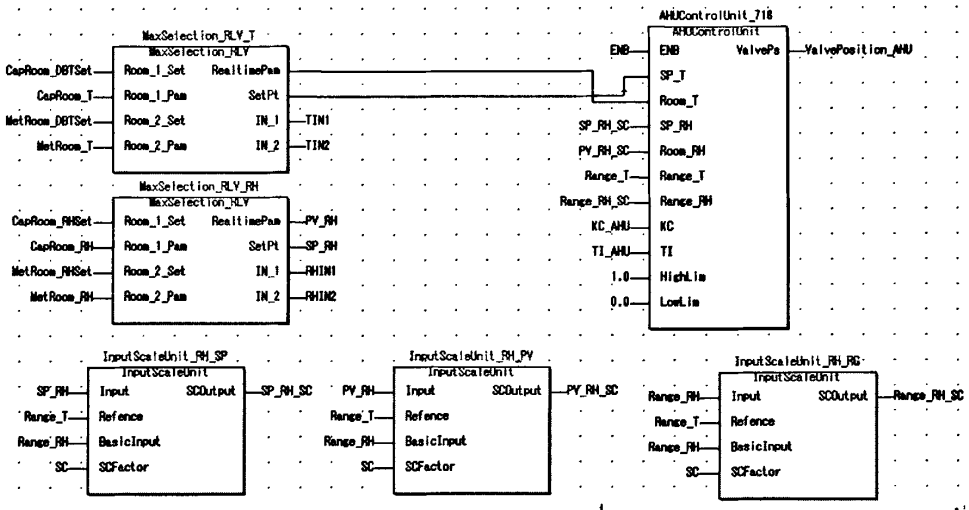


图 C.4 独立新风系统多区控制程序

附录 D 金属顶板极限进水温度实验数据

表 D.1 冷辐射顶板进水极限温度实验一

时间 (min)	10	20	30	40	50	60	70
相对湿度 (%)	41.8	41.1	40.6	39.8	39.2	39.2	39
露点温度 (℃)	13.1	12.9	12.7	12.4	12.3	12.3	12.3
进水水温 (℃)	13.4	13.3	13.2	13.1	13.0	12.7	13.1
时间 (min)	80	90	100	110	120	130	/
相对湿度 (%)	39.1	38.8	38.9	39.2	39	38.7	/
露点温度 (℃)	12.4	12.3	12.3	12.5	12.4	12.4	/
进水水温 (℃)	13.1	12.8	12.8	12.8	12.9	13.0	/

表 D.2 冷辐射顶板进水极限温度实验二

时间 (min)	10	20	30	40	50	60	70	80
相对湿度 (%)	47.7	46.2	46	47	46.5	45.3	43.5	43
露点温度 (℃)	16.2	15.8	15.8	16.2	16.1	15.7	15.1	14.9
进水水温 (℃)	17	16.4	16.4	16.8	16.9	16.3	15.6	15.6
时间 (min)	90	100	110	120	130	140	150	/
相对湿度 (%)	42.3	42.1	42.4	42.1	42.1	42	42.4	/
露点温度 (℃)	14.6	14.4	14.6	14.4	14.4	14.2	14.3	/
进水水温 (℃)	15.6	15.1	15	14.9	15.1	14.8	14.7	/

附录 D 金属顶板极限进水温度实验数据

表 D.3 冷辐射顶板进水极限温度实验三

时间 (min)	10	20	30	40	50	60	70	80
相对湿度 (%)	55.2	55	54.3	54	53.6	53.1	52.4	52.8
露点温度 (°C)	16.0	16.0	15.8	15.6	15.5	15.0	14.8	14.6
进水水温 (°C)	14.3	14.7	15.3	14.2	14.4	14.3	14.1	13.6

表 D.4 冷辐射顶板进水极限温度实验四

时间 (min)	10	20	30	40	50	60	70
相对湿度 (%)	76.9	72.6	67.7	65.2	62.8	61.4	59.2
露点温度 (°C)	23.7	22.5	20.8	19.9	18.9	18.2	17.4
进水水温 (°C)	21.5	20.6	18.8	17.8	17.1	16.2	15.6

表 D.5 冷辐射顶板进水极限温度实验五

时间 (min)	10.0	20	30	40	50	60	70	80	90	100
相对湿度 (%)	60.6	59.3	56.9	52.8	51.8	51.6	51	50.1	49.2	48.4
露点温度 (°C)	19.9	19.2	18.1	16.2	15.7	15.4	15.0	14.4	13.9	13.5
进水水温 (°C)	17.4	16.7	16.2	14.4	14.0	13.6	12.7	12.2	12.1	11.8

表 D.6 冷辐射顶板进水极限温度实验六

时间 (min)	10	20	30	40	50
相对湿度 (%)	59.2	56.8	55.3	53.9	52.6
露点温度 (°C)	18.0	16.8	16.2	15.5	15.0
进水水温 (°C)	15.1	14.2	13.2	12.4	11.9

个人简历 在读期间发表的学术论文与研究成果

个人简历:

左明明, 男, 1983年5月生。

2006年7月毕业于南京工业大学建筑环境与设备工程专业 获学士学位。

2006年9月进入同济大学攻读硕士研究生。

已发表论文:

- [1] 左明明, 潘毅群. 某大型公共建筑全能耗模拟和节能潜力分析. 建筑热能通风空调, 2008, Vol. 27 (6) :84-89

多区独立新风+冷辐射顶板系统控制策略研究

作者: [左明明](#)
学位授予单位: [同济大学机械工程学院](#)

本文读者也读过(10条)

1. [左涛, ZUO Tao](#) [独立新风结合吊顶冷辐射板\(DOAS+CRCP\)空调系统的应用](#) [期刊论文]-[制冷空调与电力机械](#) 2006, 27(5)
2. [寿青云](#) [辐射供冷空调方式能耗与控制的研究](#) [学位论文] 2009
3. [左涛, 万嘉凤, 许宏祺, Zuo Tao, Wan Jiafeng, Xu Hongxi](#) [独立新风加吊顶冷辐射板空调系统的节能性及与气候的相关性](#) [期刊论文]-[暖通空调](#) 2008, 38(6)
4. [焉丽霞, 施秀琴, 王术香, 郭亮](#) [温湿度独立控制系统新风除湿机的研制](#) [会议论文]-2007
5. [赵恒, 赵彬](#) [温湿度独立控制系统气流组织的比较](#) [会议论文]-2006
6. [朱鸿志](#) [独立新风与吊顶冷辐射板相结合的新型空调系统研究](#) [学位论文] 2009
7. [夏学鹰, 张旭, 蔡宁, 王子介, Xia Xueying, Zhang Xv, Cai Ning, Wang Zijie](#) [地板辐射供冷/独立新风系统的技术分析](#) [期刊论文]-[制冷学报](#) 2008, 29(4)
8. [何婧, 沈晋明, 寿青云, 谌小玲, He Jing, Shen Jinming, Shou Qingyun, Chen Xiaoling](#) [独立新风与辐射冷系统防结露问题探讨](#) [期刊论文]-[暖通空调](#) 2008, 38(6)
9. [熊帅](#) [与辐射冷吊顶相结合的独立新风系统的研究](#) [学位论文] 2007
10. [张科, 吴兆林, 周志钢, ZHANG Ke, WU Zhao-lin, ZHOU Zhi-gang](#) [一种节能型空调系统的设计思路和计算方法探讨](#) [期刊论文]-[流体机械](#) 2009, 37(9)

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Thesis_Y1449830.aspx