

国家自然科学基金专著出版基金资助项目
上海交通大学学术著作出版基金资助

下送风空调原理与设计

连之伟 马仁民 著

上海交通大学出版社

序

人类在从古代的穴居走到今天的现代化建筑的漫长岁月中,逐渐认识到了健康、适宜的室内环境不仅对降低建筑物能耗具有重大意义,而且有助于人体健康,提高人们的工作效率。创造舒适健康的室内环境除了需要良好的室外环境和使用对人体无害的建筑材料等方法外,室内的空调方式也很重要。

下送风空调方式以其良好的室内空气品质、明显的节能效果、灵活的调节方式和与建筑及其他气流组织形式方便的配合形式等优点,具备了很好的发展潜力。然而,该种空调方式本身存在的诸如送风处理不好容易给室内人员带来风感等问题却限制了它的应用。迄今,国内外对此领域的研究,有的是偏向于具体实际工程的应用和使用效果的预测、分析上,有的只进行了某一方面的理论研究,而本书则是作者对此领域主要问题的全面、系统的研究总结,因此,基于国家自然科学基金三次资助下取得的成果而撰写成的本书,应该非常适应当前本学科国内外空调整能和室内空气品质改善的研究热点的形势。本书的出版对推动下送风空调在国内的广泛应用将起重要作用,因此它的出版既有很好的理论意义,又有重要的实际应用价值。

目前国内已出版的关于空调系统方面的书籍虽然很多,但它们均是针对全室性空调方式,系统完整地阐述下送风空调原理和设计方法的书籍还未见到。本书在充分阐述下送风空调原理的基础上,对比常规空调的设计思路来说明下送风空调的设计方法,并配之于几种实际工程应用的例子供参考,论述深入浅出,相信对从事本专业及相关专业的科研、教学和设计人员有很好的参考使用价值。

本书作者马仁民是西安建筑科技大学教授,曾在东北大学共同筹建了全国第一个暖通空调本科专业并任教,长期以来一直从事暖通空调领域的教学与科研工作,是国内下送风空调研究方向的奠基人;连之伟博士是上海交通大学教授、博士生导师,曾师从于马仁民教授,也一直从事下送风空调的研究,在该领域也取得了显著的成果。他们两人均担任了关于下送风空调的国家自然科学基金项目的负

责人,经过他们 20 年的努力,在该项目上取得了一系列的研究成果。相信本书会对从事相关工作的同仁有良好的借鉴意义。也希望他们再接再厉,在下送风空调领域取得更大成果。

中国工程院院士

清华大学教授



2006 年 2 月

前 言

随着现代房屋紧密度的提高和大量高分子化合物应用于室内装修,造成了大量的病态建筑物。世界卫生组织(WHO)的调查材料显示,目前全世界有 20%~30%的建筑物为病态建筑物。同时,为了节能,空调房间的密封性不断增强,而新风量的供给却呈下降趋势,致使房间内不能形成良好的空气品质。因此,空调节能及室内空气品质改善问题,目前已经成为本学科国际上的两个重要研究热点。而空调房间的下部送风就是一种既节能又能提高室内空气品质的空调送风方式。这种送风系统有三类形式:送风口位于地面上的地板送风,送风口位于房间下侧部的水平平推流送风,以及送风口与椅背、桌面等相结合的局部送风系统。这种送风方式将经过处理的新鲜空气首先送入人们的呼吸区,然后被污染和被加热的空气从房间上部排出,因而大大提高了送风利用率,可以实现空调整能。据统计,它可比传统的全室性空调方式节省 20%~50%的能量。特别是当满足送风速度小到一定程度等条件时,无论是地板送风,还是房间的下侧部的水平推流送风,极易形成“活塞流”以“置换”室内污浊的、热的空气,创造出具有良好空气品质和热舒适的室内环境。

然而,遗憾的是,这样一种良好的空调方式在国内却并不像它在国外那样得到广泛应用,究其原因,主要是缺乏设计的基础数据和系统的设计方法。为此,从 20 世纪 80 年代初开始,在国家自然科学基金委员会的三次资助(59808010, 59378340, 5880335)下,我们先后经过 20 年的努力,对这种空调方式进行了系统深入的研究,取得了良好的成果。现将这些研究成果汇集撰写成书,以期为下送风空调在国内的全面深入研究和推广应用奠定重要基础。

本书在介绍下送风空调基本原理和特点的基础上,详细阐述了采用此种送风方式时室内的温度、速度及浓度的分布,人员热舒适状况及室内热舒适的评价方法,设计下送风空调时的负荷计算和气流组织计算方法,同时介绍了常用的末端装置,列举了设计下送风时易出现的问题及解决办法,最后介绍了几种实际工程

应用的例子供参考。

本书所用资料部分参考国内外的同类研究成果,同时为了使本书体系完整,对于与本书相关的起补充作用的成果也予以部分引用。为此,对引用成果的作者表示诚挚的谢意!本书绝大部分资料来源于作者 20 年来的自主研究成果,作者所指导的研究生对此做出了重要贡献,限于人数众多,在此不一一列名,谨对他们表示衷心的感谢!最后对清华大学江亿院士在百忙之中为本书作序表示深深的谢意!

参加本书撰写的作者虽然分别都是关于下送风空调国家自然科学基金项目的负责人,且一直从事该方面的研究,但限于作者的知识面和水平,书中错漏在所难免,欢迎读者批评指正。

连之伟 马仁民
2006 年 1 月

目 录

1 概述	(1)
1.1 下送风空调的提出	(1)
1.2 下送风空调的定义	(2)
1.3 下送风空调的特点	(3)
参考文献	(5)
2 下送风空调房间的热分布机理	(6)
2.1 下送风房间空气温度分布特点	(6)
2.1.1 温度分布概况	(6)
2.1.2 房间垂直温度分层基本概念	(7)
2.2 下送风房间的垂直温度分布	(10)
2.2.1 热源总体布局对垂直温度分布的影响	(10)
2.2.2 局部热源对垂直温度分布的影响	(12)
2.2.3 垂直温度分布的预测	(19)
2.3 热分层高度的确定	(28)
2.3.1 点热源(紧密热源)对流气流流量与上升高度	(28)
2.3.2 面热源对流气流流量与上升高度	(30)
2.3.3 高出地面热源对流气流流量与上升高度	(32)
2.3.4 热源自然对流流量的另一种算法	(34)
2.4 热分布系数	(39)
2.4.1 热分布系数基本概念	(39)
2.4.2 热分布系数最小值 α_{\min}	(42)
2.4.3 最佳风量的确定	(44)
2.4.4 工作区侧送风热分布系数	(45)
2.4.5 热分布系数其他研究简介	(47)
2.5 下送风房间空气流动与速度分布	(48)
2.5.1 低速下侧送风的分层流型及速度分布	(49)

2.5.2	地板送风室内空气分布	(57)
	参考文献	(63)
3	下送风空调的热舒适及其评价	(65)
3.1	热舒适概论	(65)
3.2	下送风空调热舒适的影响因素	(67)
3.2.1	热舒适的环境影响因素	(67)
3.2.2	下送风气流组织效果的影响因素	(68)
3.3	各影响因素的实验结果	(69)
3.3.1	热舒适的正交实验设计	(69)
3.3.2	实验装置及测定过程	(74)
3.3.3	实验结果	(80)
3.4	实验结果与分析	(82)
3.4.1	实验结果的一般分析	(82)
3.4.2	方差分析	(84)
3.4.3	实验结果的回归分析	(86)
3.4.4	综合分析	(87)
3.5	下送风空调热舒适的模糊评价	(89)
3.5.1	热舒适评判中模糊概念的引入	(89)
3.5.2	热舒适模糊评判模型的建立	(93)
3.5.3	热舒适模糊评判算例及分析	(99)
3.5.4	小结	(100)
3.6	基于神经网络的评判方法	(101)
3.6.1	人工神经网络简介	(101)
3.6.2	基于 BP 神经网络的热舒适评判模型	(102)
3.6.3	小结	(107)
	参考文献	(107)
4	下送风空调的负荷计算	(110)
4.1	热源散热量中对流热与辐射热的确定	(110)
4.1.1	问题的提出	(110)
4.1.2	理论分析	(112)
4.1.3	实验方案	(116)
4.1.4	结果及分析	(118)

4.1.5	小结	(122)
4.2	热源辐射散热在各壁面分配比例的确定	(123)
4.2.1	问题的提出	(123)
4.2.2	辐射热分配比例的计算方法	(124)
4.2.3	辐射热分配比例的影响因素	(126)
4.2.4	辐射热分配比例两种计算方法的比较	(129)
4.2.5	各种室内热源的辐射热分配比例计算结果	(130)
4.2.6	小结	(132)
4.3	下送风空调负荷的数值算法	(134)
4.3.1	概述	(134)
4.3.2	物理模型	(135)
4.3.3	数学模型	(136)
4.3.4	计算程序	(141)
4.3.5	数值解的实验验证	(143)
4.4	基于传递函数系数法的负荷计算方法	(151)
4.4.1	传递函数系数简介	(151)
4.4.2	传递函数系数的实验解	(152)
4.4.3	小结	(154)
4.5	下送风空调负荷的修正系数法求解	(154)
4.5.1	分项修正法	(154)
4.5.2	整体修正法	(155)
	参考文献	(156)
5	下送风空调气流组织设计	(159)
5.1	下送风气流组织设计的特点	(159)
5.2	下送风气流组织设计的方法	(159)
5.2.1	下送风气流组织设计方法之一——按因素重要性 次序	(160)
5.2.2	下送风气流组织设计方法之二——按照最佳舒适性	(162)
5.2.3	下送风气流组织设计方法之三——按照置换通风 原理	(163)
5.2.4	三种设计方法的比较	(168)
5.3	下侧送风气流组织设计	(168)
5.3.1	按热舒适要求计算送风量	(169)

5.3.2	按空气品质要求计算送风量	(171)
	参考文献	(174)
6	下送风空调的末端装置	(175)
6.1	概述	(175)
6.1.1	下送风空调对末端装置的要求及研究现状	(175)
6.1.2	下送风空调末端装置的分类	(177)
6.2	旋流风口气流流动的理论分析	(178)
6.2.1	定义与假定	(178)
6.2.2	平面速度场	(179)
6.2.3	轴向速度场	(181)
6.2.4	压力分布	(182)
6.3	地板送风的末端装置	(184)
6.3.1	DY, DY II 型旋流风口的结构	(184)
6.3.2	影响 DY 型风口诱导性能和压力损失的几何因素	(185)
6.3.3	DY III 型旋流风口的提出与设计	(187)
6.3.4	DY III 型旋流风口的实验设计	(191)
6.3.5	DY III 型旋流风口的效果与分析	(195)
6.3.6	小结	(212)
6.4	工作区水平送风的末端装置	(213)
6.4.1	与墙体结合的平壁送风口	(214)
6.4.2	半圆柱型(180°角)靠墙送风口	(215)
6.4.3	置换送风诱导器	(218)
6.5	座椅送风的末端装置	(218)
6.5.1	座椅送风的现状	(218)
6.5.2	座椅送风风口	(219)
6.5.3	对座椅送风风口的讨论	(222)
	参考文献	(222)
7	下送风空调设计注意事项	(224)
7.1	应用场合对室内环境的特殊要求	(224)
7.2	应用下送风空调容易出现的主要问题	(226)
7.3	对出现的问题的应对措施	(228)
	参考文献	(229)

8	下送风空调实际工程举例	(230)
8.1	体育馆下送风空调设计实例	(230)
8.1.1	概述	(230)
8.1.2	深圳宝安体育馆主场馆下送风空调设计	(232)
8.1.3	北京木樨园体育馆空调设计	(237)
8.1.4	广州市新体育馆主场馆比赛大厅空调设计	(238)
8.2	机房下送风空调设计举例	(241)
8.2.1	概述	(241)
8.2.2	北京某网络机房下送风空调设计	(242)
8.2.3	上海某通信机房下送风空调设计	(249)

1 概 述

1.1 下送风空调的提出

近年来,随着工业及科学技术的发展,世界范围内能源危机的日益加剧以及人们对室内空气品质(Indoor Air Quality, IAQ)要求的逐渐提高,空调技术人员认识到,采取有效的气流组织形式,并保持一个良好的室内热环境,不但有助于人体健康、提高工作效率,而且对降低建筑物能耗也具有重大意义。在各科学领域,科学家及技术研究人员在探求高效节能的技术措施。在暖通空调行业,下送风空调——这种古老但未普及的空调送风方式,以其明显的节能效果及可以提高室内空气品质的优越性,引起了空调技术人员的关注。20世纪70年代,随着建筑物空调系统的普及,在某些建筑中出现了“空调病”。虽然这些建筑物室内温、湿度均满足要求,但它们提供的室内空气品质却较差,使室内人员身体产生不适。这一问题使研究人员开始注重空气品质这一较新的课题。20世纪80年代以来,一类新型建筑物——智能建筑(Intelligence Building)逐渐兴起。它集现代办公、通讯、自控等技术于一体,要求内部必须具备清新、高效、舒适的环境,这类建筑对室内环境的更高要求是对暖通空调行业的一个挑战^[1]。下送风在改善室内空气品质方面具有独特的优越性,所有这些均使得下部送风空调系统再次受到各国研究人员的青睐。

下送风实际上是最早的空调送风方式之一,早在17世纪的北欧国家就有了应用实例,德国在20世纪60年代初即在一些像计算机房、程控机房这样一些产热高、人员少的房间采用了地板送风,处理的负荷高达 $200\sim 1\,000\text{ W/m}^2$ ^[2]。前苏联也曾有过高架地板应用实例^[3]。20世纪70年代欧洲国家开始将其引用到办公用房,特别是20世纪80年代以来,随着智能建筑的涌现和发展,更是给下送风的推广提供了应用空间。智能建筑的特点是室内办公设备多、发热量大,而且有许多低浓度污染物,同时它要求电缆线随意地接入计算机等办公设备。下送风具备良好的热力分层特性,改善工作区空气品质的同时,还可利用OA(Office Automation,办公自动化)电缆和通讯线路铺设时架空的地板,作为下送风安装风

道的空间和送风静压箱,其特点和优越性使下送风受到了广大研究设计者的重视。因此,瑞典、意大利、澳大利亚都开始了这方面的研究实践。特别是20世纪80年代中期,英国伦敦的Lloyd's大楼和香港汇丰银行地板送风设计的成功,引起了各国空调技术界的关注。日本在近十几年内,有20所建筑空调设备工程公司和大学为此建立了实验室,设计了典型工程,广泛开展这方面的研究^[4]。我国在下送风空调的机理、室内温度场与速度场的分布、负荷的确定、气流组织的设计及相关末端设备的开发等方面,也做了深入的探讨。近年来,国内有些工程,特别是引进工程,也采用了下送风空调这种方式。

1.2 下送风空调的定义

传统的混合式通风(上送风)一般是根据整个房间的热湿负荷,将一定量处理过的空气通过风道,由设在房间上部的送风口送出。具备一定初速度的送风气流,基于射流原理,在整个房间里形成回旋运动。在此过程中,吸收室内的全部余热余湿量,经充分混合后,再由回风口排除。所以房间上下各部分温度趋于一致,基本上可以使房间排风状态的焓值接近于工作区(居住区)空气的焓值。

下送风空调系统是根据室内工作区的热湿负荷,将一定量处理过的空气送入空调房间的活动地板下或下部送风口,由风口向上或水平送出。由此,送出的气流首先进入工作区,通过诱导作用与室内空气混合,吸收工作区的热湿负荷,然后在室内热(污)源的对流流动带动下,向上移动。进入非工作区以后,借助设备及人体的热对流作用得以强化,再由设在吊顶上的回风口排除。下送风符合因空气密度差所形成的热气流上升和冷气流下沉的原理,而室内热浊气流由于浮力作用而不断上升,并不断卷吸周围空气,这样由于热浊气流上升过程的卷吸作用,加上送风静压的推移及排风口的“抽吸”作用,送入室内的新鲜空气也缓慢向上移动,当送风速度较低时,可以形成类似活塞流的气流运动。因而其室内形成温度分层和浓度分层,室内下部空间的温度和污染物浓度均低于上部,送入气流在室内的停留时间及室内热浊气流的转移时间,都比上送风要短,所以,下送风空调系统具有较高的通风效率。

下送风与上送风之间的区别可用图1-1来表示。

下送风空调系统包含有三类形式:送风口位于地面上的地板送风,送风口位于房间下侧部的水平推流送风,和送风口与椅背、桌面等相结合的局部送风系统。当满足送风速度小到一定程度等条件时,无论是地板送风,还是房间的下侧部的水平推流送风,都可以形成活塞流,以“置换”室内污浊的和热的空气,创造出具有良好空气品质和热舒适的室内环境。这三种形式均可独立实施,也可分别与吊

2. 较大的节能潜力与经济价值

下送风空调重新受到人们的重视,最直接的原因就是它具有的节能性。在下送风时仅考虑室内工作区的热湿负荷,也只需维持工作区的环境参数,无需顾及房间上部的热环境,因此,相当于提高了室内空气的平均温度,使室内负荷减小,实现了节能。研究表明^[7],在相同的送风参数下,维持工作区环境参数时,下送风较上送风可节省 $(1-\alpha)G$ 的风量。其中, G 为上送风时所需的风量, α 为工作区热分布系数(其详细介绍请见第2章2.4节)。由于风量减少,送风口风速较低,系统阻力较小,故可以节约空气输送动力。很多资料表明,下送风空调较之传统形式的空调可节能 25%~50%^[4,7,8]。

从施工安装角度讲,由于下送风一般不考虑设置风管,而是将风口与地板结合成一体,省去了大量的管道制作工程量,同时与其他管线无空间上的矛盾,安装速度快,便于推广工业化施工。据日本经验,劳动力可节约 32%^[4]。

此外,下送风空调夏季送风温度比传统方式有所提高,因此制冷机蒸发温度可以相应提高,制冷效率高。同时送风温度高,过渡季节利用自然能源——新风制冷的时间比传统空调方式长,故制冷机运行时间可较短。

3. 灵活的调节方式

由于地板送风一般不考虑设置风管,而是利用架空的活动地板输送空气,所以地板可以按照模数铺设,便于变更;送风口与地板组成一个整体,使风口的位置可以根据需要变化,并适应办公室布置、装修、用途等方面的变化。地板送风空调可以方便地与其他送风方式相结合,作为可调节的个人空调,由办公室工作人员根据自身的需要进行调节,充分满足人体需求,达到最佳舒适状态。

此外,随房间办公机器的变化,可以独立地增设地板送风的柜式空调机组,进行灵活的调节,以适应负荷的变化。

4. 方便的配合形式

由于现代化的办公楼中,都配备了许多通讯设备,有很多的线缆及复杂的网络布线。为了便于线缆与设备的接入接出联结,很大一部分需利用架空的地板进行铺设,而地板送风空调可以利用架空的地板设置送风管道或送风静压箱。因此,二者可以很方便地配合在一起,不会造成与其他管路在空间上的矛盾。相比于其他全空气的送风系统,下送风无须对吊顶高度提出任何要求,从而很容易与建筑配合。而相对于盘管系统,下送风没有了盘管及别的配管,免除了管道穿越建筑的麻烦,也没有了凝水和渗漏水会随时危及室内办公设施和装修的烦扰,也不存在维修不便等方面的问题。

下送风空调也有一些缺点。由于下送风的风口距人体较近,处理不当常给人以吹冷风感;并且送风量大时,风口数量过多,难以布置。它的缺点及当时对于该送风方式缺乏进一步的认识与研究影响了它的应用。随着国内外对下送风空调方式的重新认识和研究的进一步深入,其应用将会愈来愈广泛。

参 考 文 献

- [1] 龙惟定,刘冰. 智能化大楼—对暖通空调的挑战. 暖通空调,1996,26(6):3-12
- [2] Sodec F, Craig R. The underfloor air supply system — the European experience. ASHRAE Trans., 1990,96(2):690-695
- [3] 马仁民. 地板送风技术条件与舒适条件的研究. 暖通空调,1995,25(6):45-47
- [4] 范存养. 办公室下送风空调方式的应用. 暖通空调,1997,27(4):30-39
- [5] Hodder S G, et al. Thermal comfort in chilled ceiling and displacement ventilation environments: vertical radiant temperature asymmetry effects. Energy and Buildings, 1998,27(2):167-173
- [6] Xing H, Hatton A, Awbi H B. A study of the air quality in the breathing zone in a room with displacement ventilation. Building and Environment, 2001,36(7):809-820
- [7] 马仁民. 论下部送风空调节能及其适用条件. 暖通空调,1983,13(3):5-10
- [8] 马仁民. 置换通风的通风效率及其微热环境评价. 暖通空调,1997,27(4):1-7

2 下送风空调房间的热分布机理

一般速度分布、温度分布与浓度分布都是同时存在、相互影响的。下送风空调房间特别在垂直方向存在着明显的热力分层现象,因此,其竖向的温度、速度与浓度分布会有较大的差别。本章主要讨论房间内的垂直温度分布和速度分布规律,考虑到热质交换存在较好的类别性,相应的浓度分布规律仅简单论之。

2.1 下送风房间空气温度分布特点

2.1.1 温度分布概况

许多研究认为下送风房间在水平方向的温度分布是比较均匀的,而垂直方向则表现明显温度分层现象,即温度随高度增加而增加。图 2-1(a)是作者对一尺寸为 $5.0 \times 2.9 \times 3.4$ (m^3) 的气流实验室中地板送风时的实测温度场的示例,图 2-1(b)是文献[17]在一尺寸为 $10 \times 7 \times 6$ (m^3) 房间贴地热源下侧送风时房间某断面等温线数值模拟示例。

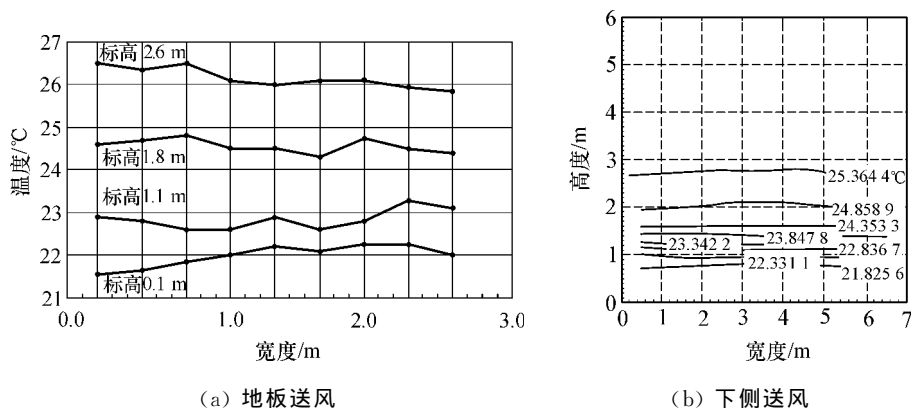


图 2-1 下送风房间空气温度分布

从以上两图可见,垂直方向存在明显的温度分层,水平方向的温差则较小。作者对地板送风和下侧送风多种工况下的测试数据统计表明,不同标高水平各测点温差值一般不超过 $0.3\sim 0.5^{\circ}\text{C}$,而垂直方向的温度增高随多种因素的不同存在很大差异。本章主要讨论房间垂直温度分布的规律,包括浓度分布的规律。

2.1.2 房间垂直温度分层基本概念

在室内具有余热且热污染源比较集中的条件下,若由房间下部送入低于室温的空气,则受热后向上浮升,由上部排风口排出,并出现上部空间温度、浓度均高于下部的热分层现象。

让我们观察一下当只有一个热源时下部送风的室内热力分层现象是如何发生的^[2]。由图 2-2 可见,根据连续性原理,在下送风房间内任意水平断面上,气体流量均等于送风量,即

$$L_0 = L_r + L_s - L_x$$

式中: L_0 为送风量; L_r 为对流气流流量,在一定条件下它是随上升高度而增加的变量; L_s 为通过该平面的上升气流量,亦为相应的变量; L_x 为通过该平面的下降气流量,也是变量。

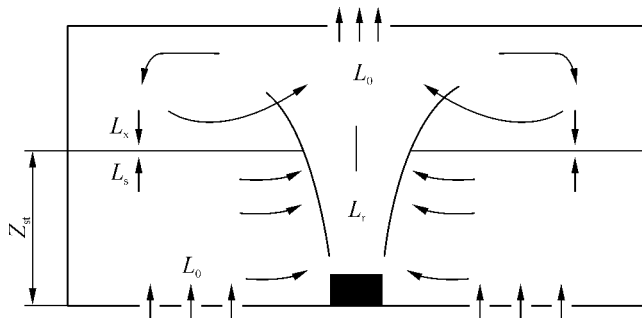


图 2-2 下送风示意图

由图 2-2 可见,送入房间的空气经过热源

表面后形成一个向上升起的自然对流热气流,在初始阶段对流气流流量很少, $L_r < L_0$,于是回返气流量 $L_x = 0$,由于对流流量 L_r 是随上升高度而增加的变量,而送风量是一定值,那么必将在上升到某一平面时出现对流气流流量与送风量相等,即 $L_r = L_0$,这时热气流回返量仍为零。就是说在此平面上垂直风速为 0,在稳定状态下,此平面即为热分层的界面,其所在高度称为分层高度 Z_{st} ;在该平面以上,由于 $L_r > L_0$,热射流靠其自身的部分回返量来补充其自身卷吸所需的增量,故分界面以上是热射流循环区,热污染区;在分界面以下由于 $L_r < L_0$,热射流卷吸量完全取自送风量,不需要上部热气流回返,所以在分界面以下为送风控制区,温度较低的清洁区,这就是所谓的双区模型。

实际上正如文献^[3]中所提到,分界面也即向上的气流与向下的回返气流相