



同濟大學
TONGJI UNIVERSITY

硕士学位论文

数据中心空调系统节能研究

姓 名：黄森

学 号：0820030154

所在院系：机械工程学院

学科门类：土木工程

学科专业：供热、供燃气、通风及空调工程

指导教师：潘毅群

副指导教师：

二〇一一年三月



同濟大學
TONGJI UNIVERSITY

A dissertation submitted to

Tongji University in conformity with the requirements for

the degree of Master of Philosophy

**Study on Energy Saving of Data center
HVAC System**

Candidate: HUANG Sen

Student Number: 0820030154

School/Department: Tongji University

/ Mechanical Engineering

Discipline: Civil Engineering

Major: HVAC Engineering

Supervisor: Prof. Pan Yiqun

March, 2011

数据中心空调系统节能研究

黄森

同济大学

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；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：所提交的学位论文，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

摘要

数据中心由于其巨大的能耗越来越成为人们关注的焦点,这使得数据中心节能成为一项十分迫切的任务。而目前围绕着数据中心节能本身存在着各种各样亟待回答的问题:如数据中心能耗问题究竟有多严重?导致其能耗巨大的原因究竟是什么?对于数据中心来说,较为可行且有效的节能措施有哪些?本文的目的正是希望在前人的研究基础上对以上问题进行分析和研究,为后续研究者及决策者提供参考。

在本文中,首先介绍了数据中心这一特殊建筑形式的相关情况,分别就其发展历史、一般组成、主要分类及相关规范等作了相应的讨论,为后文的分析提供背景资料。其次介绍了目前在数据中心能耗方面的研究进展,重点评估数据中心估算方法的精确性并对其未来发展趋势进行了预测;再次在对数据中心能耗特点分析的基础上讨论了其节能潜力,并就相关节能措施对于数据中心空调系统的适用性进行了分析;然后对上海某数据中心进行了现场调研,并测量了其能耗情况、温湿度分布等相关参数,并以此为依据分析了该数据中心存在的一些具有代表性的问题。最后通过估算及模拟的方法,定量分析了数据中心空调系统各种节能措施的节能效果,力图为各技术在数据中心中的实际应用推广提供设计依据和数据支持。

关键词: 数据中心, 能耗, 空调系统, 节能研究

ABSTRACT

Due to the huge energy consumption, Data center (DC) becomes the focus of public attention, which makes DC energy saving a pressing issue. Nevertheless, concerning DC energy saving, many problems demanding prompt solutions exist, such as: How serious is the DC energy saving problem? What reason does DC use so much energy? Which energy conservation measures (ECMs) is effective and feasible for DC? The purpose of this thesis is to answer those questions based on the predecessors' study to provide reference for decision makers and follow up research.

Firstly, a general introduction of DC as a special building type is given and such relevant issues as developing history, main components, classification and standard are discussed as well, which provided background information for the following analysis. Then a literature review about DC energy use research is made. In this review, a selective analysis of current DC energy consumption estimation method and the prediction for future trend of global DC energy use are conducted. Energy saving potential of DC is analyzed based on the feature study of DC energy use and the applicability of various ECMs to DC HVAC system is studied as well. Also, a field investigate was conducted in a DC located in Shanghai and the operation parameter such as energy consumption and indoor temperature and humidity are measured. According to the investigation data, some representative problems of DC are also analyzed in the thesis. Lastly, quantitative analysis on energy-saving effect of ECMs to DC is made via estimation and simulation as to provide technical foundation and data support to the practical application of those ECMs.

Key Words: Data center, Energy consumption, HVAC system, Energy Saving study

目录

第 1 章 绪论	1
1.1 课题背景	1
1.2 论文的研究目的及主要内容	1
1.2.1 论文的研究目的	1
1.2.2 论文的主要内容	2
1.2.3 论文的技术路线与结构框架	2
第 2 章 数据中心概论	3
2.1 概述	3
2.2 数据中心相关规范	4
2.3 数据中心组成	5
2.4 数据中心的分类	9
第 3 章 数据中心能耗相关研究	11
3.1 数据中心能耗定量研究	11
3.1.1 研究历史	11
3.1.2 能耗测量和估算	11
3.1.3 相关研究进展及其分析	12
3.2 数据中心能耗特点与节能潜力分析	19
3.2.1 数据中心能耗分析	19
3.2.2 数据中心节能研究	21
第 4 章 数据中心现场调研测试	27
4.1 调研目的	27
4.2 调研概述	27
4.2.1 选择原则	27
4.2.2 调研目标	28
4.2.3 测试过程简述	30
4.2.3 测试结果与分析	32
4.3 调研小结	39
第 5 章 数据中心环境设定参数对能效的影响	41
5.1 室内设定温度对于数据中心能耗的影响	41

5.1.1 定性分析	41
5.1.2 定量分析	49
5.2 数据中心室内湿度要求与提高数据中心能效	57
5.3 数据中心室内设定参数与气侧节能器	60
5.4 本章小结	63
第 6 章 数据中心空调系统节能措施定量分析	65
6.1 气流组织优化	65
6.2 节能器	68
6.2.1 气侧节能器	68
6.2.2 水侧节能器	72
6.3 小结	78
第 7 章 总结与展望	79
致谢	81
参考文献	82
个人简历、在读期间发表的学术论文与研究成果	85

第1章 绪论

1.1 课题背景

进入21世纪以来随着信息技术的不断发展,在数据业务需求的爆炸式增长及IT技术的迅速发展的共同推动下,数据中心进入迅猛发展时期,大量高性能的IT设备的应用使人们享受到了数字技术所带来的巨大便利。但与此同时数据中心的能耗过大的问题也日益凸显,当前由于建筑节能是世界性的潮流,数据中心受到来自社会各个方面的广泛诟病。不仅如此,由于能耗大而带来的高运行费用(根据Uptime[1]统计的结果,2008年全球的数据中心电力花费在230亿美元)成为阻碍数据中心进一步发展的阻碍。因此无论从能源节省的角度还是从数据中心自身发展的角度,提高其能源利用效率以降低能耗都势在必行。

在数据中心能耗中,空调系统所占的比例是比较大的,而同时它也是数据中心节能潜力最大的部分,因此空调系统节能是数据中心整体节能的重点之一。而另一方面数据中心作为一种特殊建筑类型,其空调系统的节能具有自身的特点,而这些特点对于暖通专业来说是相对生僻的。因此数据中心空调系统节能是重点也更是难点。

综上所述,数据中心能耗过大是目前迫切需要解决的一个问题。空调系统节能对于数据中心整体节能的实现具有重大的意义,同时由于其空调系统相对于常规空调系统的特殊性,具备一定深度,值得深入研究。

1.2 论文的研究目的及主要内容

1.2.1 论文的研究目的

数据中心节能研究目前开展得并不如人意,围绕数据中心节能本身还存在一些亟待解决的问题,如:

数据中心目前的能耗情况到底如何?未来如何发展?

适合于数据中心空调系统的节能措施有哪些?相应的节能效果如何?

本文并不奢求能够在有限的资料和条件下对如上的问题给出较为完整的答案,但希望能够根据已有的研究为以上问题最终得到回答提供参考。

1.2.2 论文的主要内容

- 1) 分析目前数据中心能耗情况和未来的趋势，获得对其的定量描述；
- 2) 分析数据中心能耗特点，分析其对能效贡献最大的因素，并在此基础上分析可能的节能潜力点；
- 3) 介绍数据中心空调系统的相关特点和要求，并在此基础上分析适合于其空调系统的节能措施；
- 4) 分析各节能措施的适用条件并对其节能效果作定量分析，为各节能措施在实际中进一步应用提供参考。

1.2.3 论文的技术路线与结构框架

本文的技术路线与结构框架图如下所示：

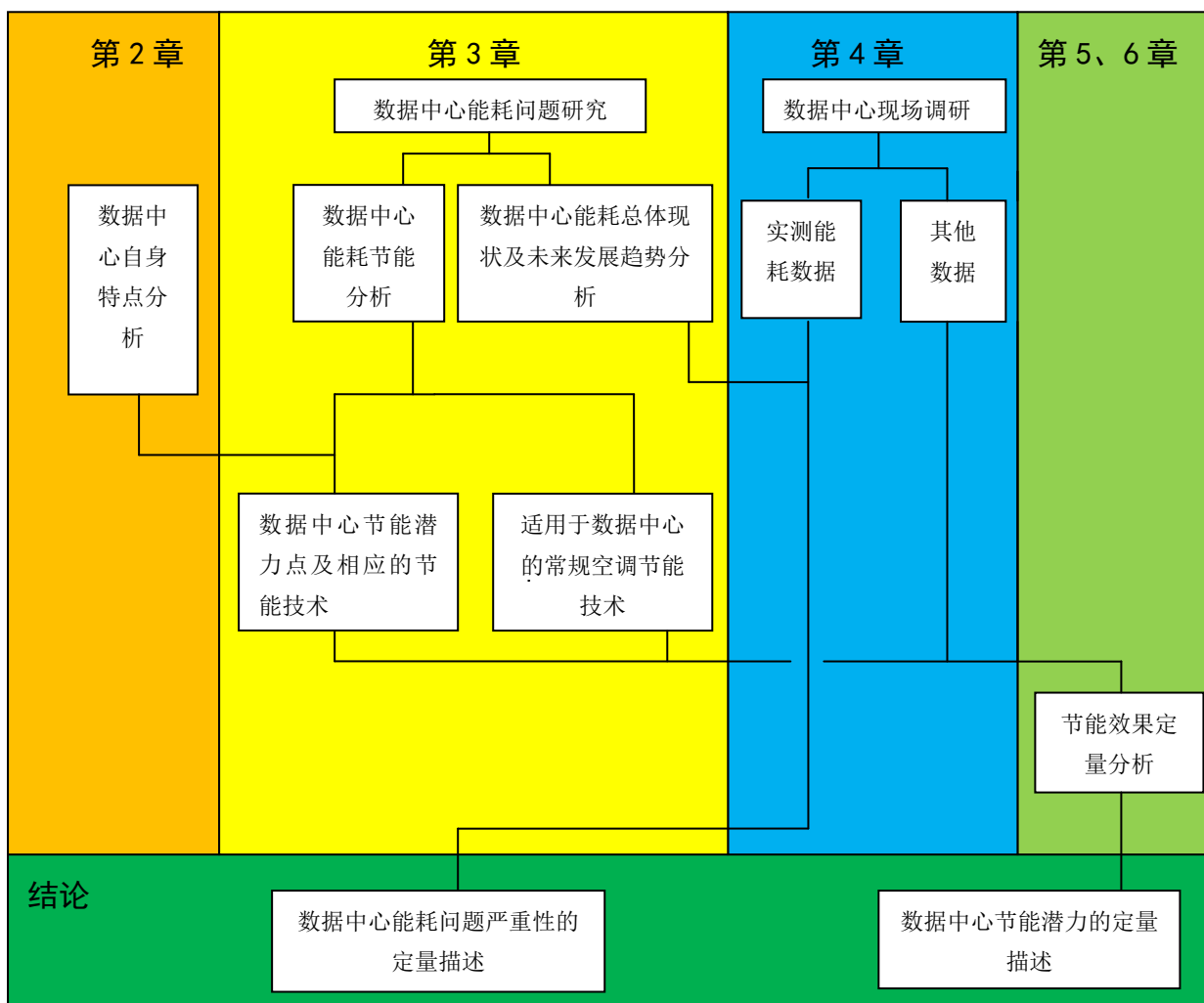


图 1.1 技术路线与结构框架图

第2章 数据中心概论

在讨论数据中心能耗问题之前，有必要对数据中心本身作一点介绍，本章节主要针对围绕数据中心的各方面背景信息作粗略的总结，供读者参考。

2.1 概述

对于数据中心，劳伦斯伯克莱实验室给出了相对较严格的定义[2]：“容纳能够对数据和信息进行存储、管理、处理和交换中的一种或更多操作的集中处理仪器的建筑设施。这里所提到的数据和信息主要应用以下两个方面：一是满足像医院或教育机构等的数据存储及计算的需求；二是为各种数据处理过程如网站维护、因特网及企业网的运行、远距离通信及信息技术提供程序服务及管理。”从以上的定义中可以明确两点：首先数据中心的对象是设备而非人，因此数据中心更接近于工业建筑而非民用建筑，在设计上是不需要考虑人的舒适性的，这也是为什么数据中心往往没有任何窗户且最小新风运行甚至于没有新风的原因；其次，数据中心对于设备的容纳不能简单地理解为提供放置的地点，事实上数据中心是设计为设备正常运行提供各种保证的，这其中就包括：安全监视，稳定电源供应及运行环境保证等。因此数据中心与计算机机房不能简单的划等号，事实上，严格来说数据中心应该是一系列建筑设施的集合。

数据中心是伴随着计算机的诞生而诞生的。世界上第一台现代电子计算机“埃尼阿克（ENIAC）”占地面积达 170 平方米，重量达到了 30 吨，本身一台机器就需要一个房间来放置，而这个房间就可以视为世界上第一个数据中心（图 2.1）



图 2.1 世界上第一台计算机 ENIAC（图来源：文献[3]）

早期的数据中心只是承担放置机器的功能,与一般建筑相比基本没有本质的区别。而随着电子计算机集成化程度越来越高,散热逐渐成为了关系设备正常运行的关键因素而另一方面由于电子设备承担的工作越来越重要,对于电源的稳定供应的要求也越来越高,这两方面的因素都促使一种专门为设备服务的建筑设施的出现。而数据中心也在这种需求的驱动下不断发展,目前来说已趋向于模式化。

2.2 数据中心相关规范

为确保数据中心的标准化,很多国家和相关专业针对数据中心出台了相应的规范,目前国内外与数据中心有关的工程建设标准主要有《电子计算机机房设计规范(GB50174-2008)》[4](以下简称 GB50174)以及《ANSI/TIA-942 – 2005 , Telecommunications Infrastructure Standard for Data Centers (数据中心的通信基础设施标准)》[5](以下简称 TIA-942),它们是数据中心建设定位、功能指标、设计技术、施工工艺、验收标准等的具体技术要求与体现。其中 GB50174 是由中国工业和信息化部主编、经中国住房和城乡建设部于 2008 年 11 月 12 日批准实施的,是该规范的第二版本,第一版本由 1993 年颁布实施。该规范按重要性将数据中心分为了三类:A 类、B 类及 C 类,分别就机房选址、建筑结构、机房环境、安全管理及对供电电源质量要求等方面内容作了相应的要求。TIA-942 是国际上第一部较为全面的以数据中心为对象的技术规范标准,它为现代的机房工程建设提出了新的设计理念、系统构架与技术指标,并给出了许多技术与系统的工程建议与指导。该规范是由美国通信工业协会(TIA) TR-42.2 委员分会制定,并由美国国家标准学会(ANSI)和美国通信工业协会(TIA)于 2005 年 4 月 12 日共同发布,是该标准的第一版本。

另外需要指出的是,美国 ASHRAE(暖通工程师学会)也推出了相应的数据中心标准《2008 ASHRAE Environmental Guidelines for Datacom Equipment(数据中心设备运行环境指南)》(以下简称 ASHRAE 规范)[6]。然而这个规范的地位是非常尴尬:数据中心环境运行要求应该说是设备所决定,而这份规范则是由非设备专业的暖通专业协会所给出的,很难做到强制性;加之它与前面提到的其他两个规范不同,其根本出发点不是设备的安全性而是节能性,与目前数据中心安全第一的思想冲突,因此在实际中很少被采用。

2.3 数据中心组成

典型数据中心通常包含如下部分：电子设备、电源供应系统和机房空调系统（CRAC 或 CRAH）。

首先来看数据中心的电子设备。在数据中心的电子设备往往是若干个设备单元组成机柜(Rack)的形式后成排放置（如图 2.2 和 2.3），每个机柜都分别设有独立的供应电源,不同机柜之间相对独立。



图 2.2 典型数据中心机柜示意图

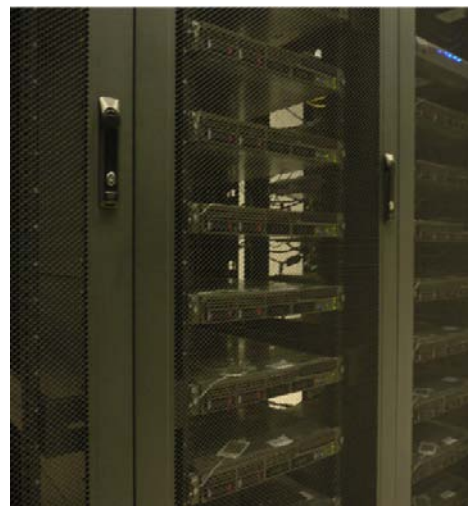


图 2.3 典型数据中心机柜布置示意图

再来看数据中心的电源供应系统。如图 2.4 数据中心的电源供应主要有以下流程：首先外界高压电源被转换器转化为低压后与备用发电机一起连接到一个自动切换开关上，当外界电源供应被切断后该开关会启动备用发电机。随后主电源供应通过两条独立的线路被输送到独立的 UPS 中，两条电源供应线互为备用。在 UPS 中交流电先被转化为直流电再被转化为交流电，这样做的主要目的在于将电源供应与外界电源供应隔离开以获得较为稳定的电源供应。UPS 输出的电能输送到每个 PDU 中，通常在 PDU 中电压进一步下降（UPS 输出电压一般为 480V，而 PDU 则将电压转化为 220V）后直接输送到机柜里的 PSU 中。

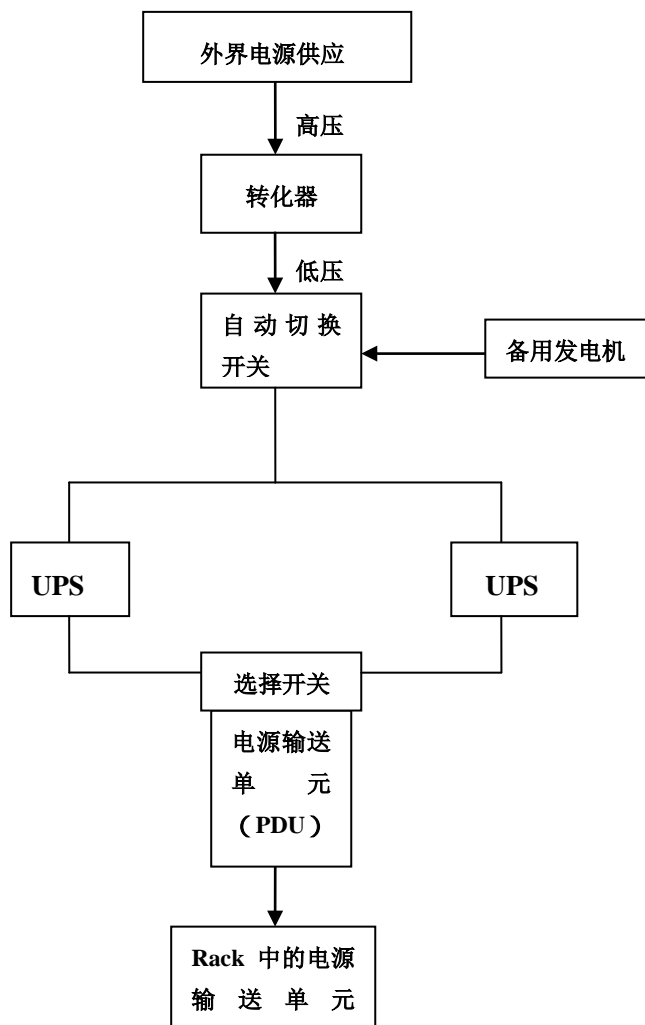


图 2.4 数据中心的电源输送系统示意图

最后来看数据中心的空调系统：

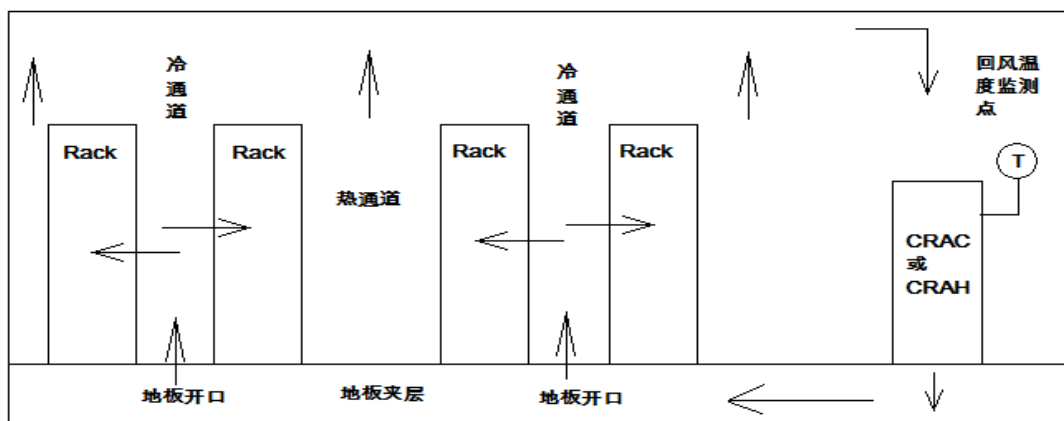


图 2.5 典型数据中心空调系统气流组织示意图

如图 2.5 所示，目前在数据中心中最为常见的是冷热通道地板下送风的空调形式，具体为：机柜成排放置，相邻两排机柜进风侧与进风侧相对而出风侧与

出风侧相对（如图 2.6），两个机柜进风侧之间的空间则被称为冷通道，相对的出风侧之间的空间被称为热通道；空调机组则将冷风送至地板夹层内，再通过地板上的送风口送至各冷通道再分别进入各机柜中，回风则在热通道中聚集最后回到空调机组中。这种空调方式首先利用下送风使得冷风与热源之间得到了充分接触，保证了换热质量；其次冷热通道的方式也可有效地避免送回风短路的问题，提高换热效率。正因为以上的优点，这种空调方式是目前数据中心的空调方式。当然也存在一些其他的空调方式，如图 2.7 中所示，这种空调方式也是通过地板下送风，不同的是地板开口是直接开在机柜正下面，冷风直接从地板下吹入机柜中，气流在机柜上升并发生热交换，最后从机柜上方出口流回空调机组中。

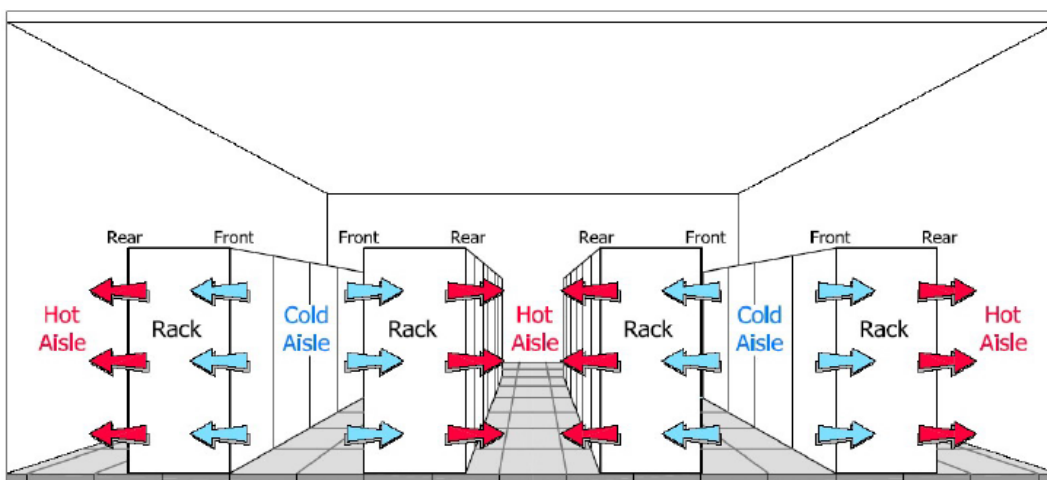


图 2.6 数据机房冷热通道布局（图来源：ASHRAE）

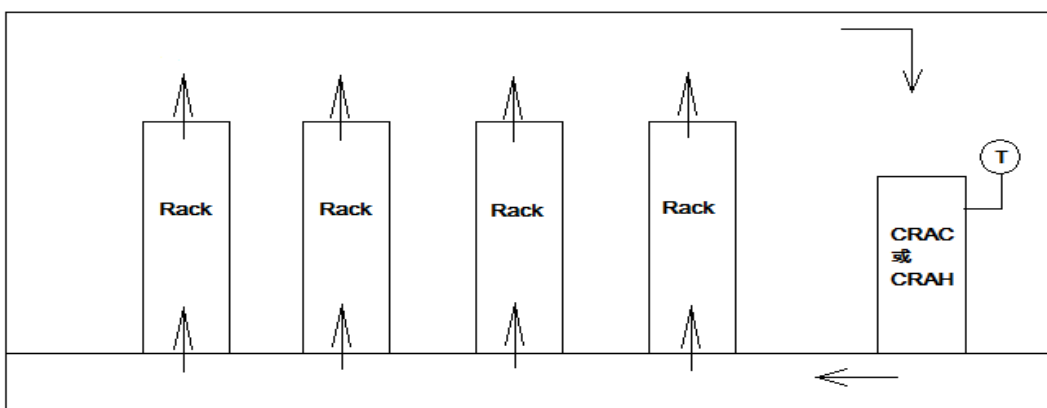


图 2.7 数据机房空调系统送风示意图

除了以上介绍的空调系统气流组织形式外，数据中心空调系统与常规的舒适性空调还有着很多其它的区别：

就其设计要求来说：

- 1) 要求能对室内温湿度及洁净度进行高精度控制。

由于设备对于温湿度及洁净度的要求较为严格（如表 2.1 为各规范对于数据中心环境运行参数的要求）其空调系统应达到对温湿度及洁净度的高精度控制，尽量减少各控制参数的波动。目前数据中心专用精密空调机采用电子控制器或微机控制已经十分普遍，不少生产企业专门开发一系列的控制器作为空调系统的组成部分，有些已经把模糊控制技术应用在数据中心专用空调系统中。

表 2.1 对数据中心环境运行参数各规范的要求

规范类别	温度要求	湿度要求
GB50174	23±1℃（A、B类） 18-28℃（C类）	40-55%（A、B类） 35-75%（C类）
TIA-942	20-25℃（正常设置点 22±1℃）	40-55%
ASHRAE 规范	18-27℃	下限露点温度为 5.5℃ 上限露点温度 15℃，相对湿度 60%

2) 数据中心的空调系统要求能够全年供冷。

由于数据中心 IT 设备散热量非常大，即使在冬季工况下依然需要对其供冷。对于冬季的制冷运行来说，需要解决稳定冷凝压力和其它相关的问题。多数数据中心要求空调系统在室外气温降至-15℃时仍能制冷运行，若采用乙二醇制冷机组，可在室外气温降至-45℃时仍能制冷运行。

就其运行要求来说：

数据中心冷负荷几乎全部来自 IT 硬件、照明设备、支持设备散发的显热，因为人员较少，外部空气有限，物理结构上还往往含有防潮层，相对来说湿负荷比较小，因此用以满足数据中心环境的空调 SHR（显热比）要求非常高，一般要求达到 0.95~0.98。显热比高的特点使得数据中心空调系统可以选取较小的送风焓差，这样就可以使得机组在空气露点以上运行，不必要像舒适性空调机那样为应付湿负荷而不得不使空气冷却到露点以下，这样机组就可以通过提高制冷剂的蒸发温度提高机组运行的效率。另一方面在热负荷一定的条件下较小的送风焓差可以使空调系统选取较大的循环风量来将数据中心的大量热量尽快带走，这对热密度较高的数据中心来说是非常有必要的。因此目前数据中心一般都采用大风量，低焓差的送风方式。加大风量的另一个好处在于可以提高送风距离，使得在数据中心相对较大的内部环境中达到较好的换热效果。

就其冷源形式来说：

目前数据中心较多的是使用末端膨胀式盘管，当然在某些较大的数据中心中也有使用中央冷水机组来提供冷水。由于数据中心室内环境参数要求较高，一般来说数据中心空调系统往往还备有电加热及加湿的装置，一旦监测到回风温湿度的波动则这些电加热加湿装置会自动启动调节相应的送风温湿度，这一点对于常

规舒适性空调来说也是不常见的。

2.4 数据中心的分类

数据中心所容纳的设备按其种类不同大致可分为：服务器、数据储存设备及网络设备，其中服务器能耗占数据中心设备总能耗的比重较大，经统计一般要占设备总能耗的 60%到 80%。而如果按面积来划分，数据中心大致可分为如表 2.2 中所列出的 5 类：

表 2.2 按面积划分的五种数据中心详细列表（来源：文献[7]）

数据中心种类名称	典型面积	容纳 IT 设备描述	辅助设备描述
服务器壁橱	<18.58m ² (200ft ²)	1-2 台服务器； 无外储存器。	UPS 及蓄电池往往是集成在服务器壁橱中；对于环境的要求相对其他类型数据中心不是很严格，空调系统一般与办公空调系统合用。
服务器房间	<46.45m ² (500ft ²)	几台到几十台服务器； 无外储存器。	有外设的 UPS 及蓄电池系统；一般由专用的类似办公空调系统的制冷系统，其效率大致在中等或偏下的水平。
局域级别数据中心	<92.9m ² (1000ft ²)	几十台到几百台服务器； 有外储存器。	有专用的外设 UPS 及蓄电池；一般采用上面介绍过的地板下送风的空调方式，冷源一般采用使用末端膨胀式盘管的 CRAC，其效率由于存在冗余一般较低。
中等级别数据中心	<464.5m ² (5000ft ²)	几百台服务器； 有外储存器。	有专用的外设 UPS 及蓄电池；一般采用上面介绍过的地板下送风的空调方式，冷源一般采用使用中央冷水机组，其效率由于也因为存在冗余一般较低。
企业级别数据中心	>464.5m ² (5000ft ²)	几百台到几千台服务器； 有外储存器。	有专用的外设 UPS 及蓄电池；一般采用上面介绍过的地板下送风的空调方式，冷源一般采用使用中央冷水机组。往往存在较先进的监控系统及各种优化策略。但由于冗余系数是最高的，因此监控系统及优化策略所带来的能耗减少往往会被这种冗余所抵消。

以上所列举的五种数据中心中，第 1、2 种往往不被认为是所谓“典型”的数据中心，这两种一般在教育及科研机构中相对较多；而第 3、4 和 5 种一般在企业中较为常见，也是一般意义上所谓的“典型”数据中心。

第3章 数据中心能耗相关研究

3.1 数据中心能耗定量研究

3.1.1 研究历史

IT(信息)设备消耗电能开始引起人们关注始于20世纪90年代前期美国环保署能源之星项目组对于个人电脑的第一版说明的发行,而对于个人电脑电耗的测量则早在20世纪80年代末期就已经开始(Harris[8]等,1988)。此后的研究在前人的基础上不断深入,如Jonathan[9]等人统计了包含美国包含计算机在内的办公电子设备总的电耗, Lovins[10]等人评价了该部分能源利用效率提高的潜力。这一阶段人们对于IT设备能耗的研究是仅仅局制于个人电脑这个领域,而当20世纪90年代即将结束的时候,人们逐渐意识到一种新级别的IT设备日益增长的重要性——计算机服务器及其辅助设备变得越来越多且能耗密度也不断增加。事实上,促使人们去深入研究数据中心能耗的是一场关于数据中心对于全美能耗贡献率是否偏大的争论。虽然一些学者的研究(Baer[11]. 2002,Kawamoto[12]. 2002, Jonathan [13], 2002, Jonathan [14], 2004, Jonathan[15],1999)最终证明数据中心对于全美电力消耗贡献率没有之前估计的大,但不可否认,这场争论确实促成了对于数据中心能耗测量的开始,而后续的研究工作也正是在以上研究的基础上不断深入细化。

3.1.2 能耗测量和估算

数据中心巨大的能源消耗是促使人们研究其能源利用效率的主要推动力,而讽刺的是对于数据中心的实际能源消耗量,至今还没有任何有信服力的统计结果。造成这种现象的原因很多:一方面,随着信息技术的爆炸式发展,数据中心本身正处于发展期,这不仅体现在数据中心的数量不断增加上,更体现在IT及辅助设备性能不断发展上,这种不稳定在客观上为统计工作带来了困难;另一方面大部分数据中心运行管理人员将数据中心运行数据视为一种商业机密,不愿意公开,主观上为统计工作设置了障碍。

能耗数据的缺乏使得数据中心研究处于一个较为尴尬的地位:一方面一些媒体在各种传说的影响下大肆渲染数据中心能耗问题的严重,迫使决策者和政策制造者需要了解数据中心能耗的现实情况;而另一方面业内却没有任何可供参考

的可靠资料。

很多学者也在为这个问题的解决在做各种努力。一部分学者尝试通过与数据中心运行管理人员沟通来获得现场实测的机会,力图通过分析个体的研究以期反映出总体的特点;而另一部分学者则考虑通过估算来获得对数据中心能耗的宏观掌控。其中前者以Mitchell-Jackson[16]等人的研究为代表。Mitchell-Jackson等人的研究对于数据中心能耗的测量来说是跨时代的,因为他们首次采用对某一数据中心进行实测的方法以获得数据中心能耗密度。之前的研究多是采用经验或估算的方法来统计数据中心的能耗密度的,由于缺乏实测数据修正,所得出的结果往往和实际值偏离较大,如William[17]等人估算的数据中心能耗密度范围为1076–2150W/m²,而Mitchell-Jackson等人实测的结果为355 W/m²。由于是有史以来关于数据中心能耗密度第一份可靠的记录,他们的研究也被大量后续很多学者作为进行数据中心能耗研究的参照基准。而对数据中心能耗的宏观估算则是以Roth[18]等人的研究作为典型。他们主要依据由设备厂商所提供的全球服务器设备每年的保有量来估算出容纳这些服务器的数据中心的全年能耗。应该说这种估算是非常粗糙的,然而这种方法却第一次以定量的形式告诉人们数据中心的能耗现状。后续也有一些学者对这种方法进行了相应的更新及改进:2005年,Ton[19]等人采用了Roth等人相同的分析方法,对服务器实际运行台数及典型服务器能耗值根据最新公布的数据进行了更新;2007年Jonathan[20]等人则主要改进了典型服务器能耗的计算方法并进一步更新了统计数据以期获得更具代表性的能耗数据。其中Jonathan等人的研究还被美国环保署所采用,作为世界上唯一的数据中心能耗官方报告所参考的主要材料。

而对于国内来说,就笔者目前所了解的情况来说,还没有任何组织或个人对中国的数据中心能耗情况做过调查或统计,国内在这个领域上可以说仍是一块空白。

3.1.3 相关研究进展及其分析

对于全球数据中心的能耗来说,目前最新且被广泛应用的估算数据是2007年由Jonathan等人研究中得到的,在这里所参考的也正是他们的研究,这里所说的现状指的是2006年以前的情况。

如图3.1为估算的2000-2005年全球数据中心能耗变化图

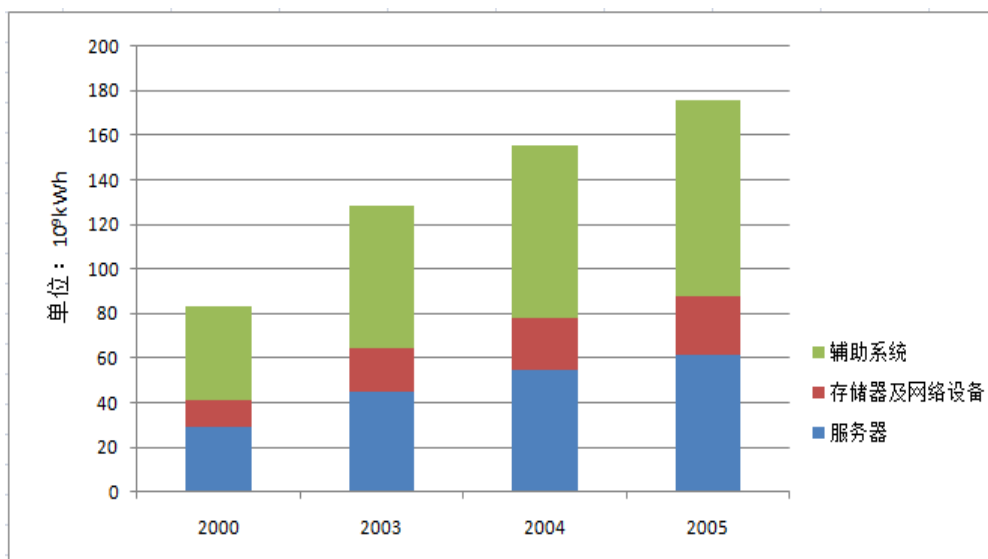


图 3.1 全球数据中心能耗

(在 Jonathan 等人研究中并未包括储存器及网络设备及相应的辅助设备的能耗，本文中这部分是根据如下假设取得：

- a 服务器能耗占总能耗的 60-80% (取平均 70%)；
- b 储存器及网络设备与辅助设备能耗的比值与服务器能耗与其辅助设备能耗比重相同)

如图 3.2 为估算的美国数据中心能耗占全球总能耗比重的变化

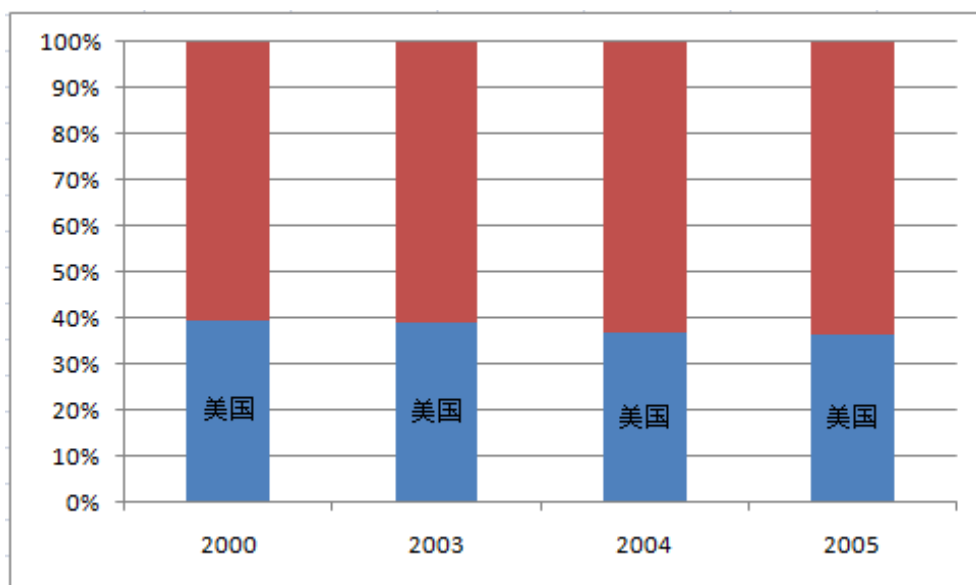


图 3.2 美国数据中心能耗占全球总和的比值

根据图 3.1 我们可以看到, 从 2000 到 2005 年五年间, 全球数据中心总能耗增长了 2.12 倍, 年均增长率为 16.22%。假设该增长率保持不变, 则可估算出 2010 年全球数据中心的能耗为 $3.72 \times 10^{11} \text{kWh}$, 为了让读者对这个数据有较为直观的认识, 笔者在这里列举另外一个数据: 2006 年中国所有公共建筑的能耗总和只有 $2.74 \times 10^{11} \text{kWh}$ [21], 也就是说全球数据中心的总能耗大致和中国公共建筑的能耗在一个数量级上。

而根据图 3.2 我们了解到, 从各国对于全球数据中心总能耗的贡献上看: 美国数据中心的贡献率 2000 年的时候达到了 40%, 这与美国在信息技术方面的地位是相当的; 而到 2005 年时美国的贡献率下降到了 36.5%, 这说明在数据中心的领域某些国家的能耗增加速度上已经超过了美国, 联系到中国目前经济规模及对信息技术的不断增加的需求, 我们有理由相信这些国家中应该包括中国;

从以上分析中, 我们可以得到如下的推论:

- 1) 数据中心能耗从全球整体的情况来看, 总量基本上 5 年就会翻一番;
- 2) 从各国对全球数据中心能耗贡献情况上看, 中国的数据中心能耗增长速度很可能已经超过美国等信息技术发达的国家。

然而在接受这些推论作为我们后面研究的依据之前, 我们首先就需要质疑推论所依据的估算数据是否足够准确。为回答这个问题, 需要仔细研究这些数据得到的途径。

由文献[20]的叙述我们可以了解 Jonathan 等人的对全球数据中心全年能耗的估算其核心在于对服务器本身能耗的估算, 其他部分能耗假设与服务器全年能耗比重为一定值(如辅助设备与服务器能耗比值取 1)。而服务器全年能耗的估算则主要依据 IDC[22]所提供的信息。

IDC 是一家信息技术、电信行业和消费科技市场咨询、顾问和活动服务专业提供商。IDC 将服务器根据售价不同分为三个档次 (volume servers : 价值低于每台 \$25,000; mid-range systems: 每台价值在 \$25,000 到 \$500,000 之间, 及 high-end system 价值超过 \$500,000), 然后会根据市场调研的结果定期的发布有关各 IT 硬件厂商所生产的 IT 设备的保有量, 销售和报废情况等的统计数据, 这些数据对于 IT 业内人士来说是相当权威的, 往往会被当作 IT 市场分析的主要依据 而 Jonathan 等人参考的主要信息如下:

1) 1996-2000 年全球及美国数据中心的各档次服务器的实际安装台数的历史统计及未来预测值;

2) 1996-2000 年全球及美国数据中心的各档次服务器的实际销售台数的历史统计及未来预测值;

3) 1998-2003 年全球及美国数据中心的不同厂家的服务器的实际安装台数的

历史统计及未来预测值；

4)1996-2005 年全球及美国数据中心的不同厂家的服务器的实际销售台数的历史统计及未来预测值；

由以上数据，Jonathan 等人首先获得了 2000、2003、2004 和 2005 年各档次服务器的实际保有量；

再根据各档次服务器市场占有率最高的几种服务器全年能耗的估算值来取各档次服务器的平均年能耗；

再将各档次服务器的实际保有量乘以各档次服务器的平均年能耗，最终可以得到全球服务器年能耗。

最后取辅助设备与服务器能耗比值为 1，这样根据前面算得的全球服务器年能耗就可以得到全球数据中心服务器辅助设备的能耗，最终将其与服务器能耗相加得到数据中心的总能耗。

根据以上的描述，我们可以发现 Jonathan 等人的估算方法存在着以下的问题：

1) 其所选择各档次服务器的所谓典型服务器代表性值得怀疑。

Jonathan 等人选取的所谓市场占有率最高的服务器其在实际安装的服务器中的比重如表 3.1 所示：

表 3.1 估算所采用的典型服务器占实际安装服务器的比重

服务器档次	占 2001 年实际安装服务器总数的比重	占 2003 年实际安装服务器总数的比重
volume servers	18%	16%
mid-range systems	20%	23%
high-end system	21%	31%

由表 3.1 我们可以看出，这些所谓典型服务器占各档次服务器的比重都不是很大，很容易让人产生这样的疑问：这些服务器是否具有代表性？

事实上，由于服务器价格一般比较高，折旧期相对也比较长，因此到目前为止仍有一批较老式的服务器在使用中。老式的服务器与较新式的比起来，集成化要低很多，相应的单台服务器的能耗也要低一些。考虑到所选择的典型服务器均是较为新式服务器，Jonathan 等人在这里简单用所谓市场占有率较高的较新式服务器来代表整个服务器能耗有一定高估的风险。

2) 即使我们认为所选取的典型服务器具有代表性，估算的各档次服务器的平均年能耗计算方法也存在不合理的地方。

每个档次的服务器其典型的服务器平均能耗本身存在着较大的差异，如表 3.2 为各典型服务器的功率对照表（各档次典型服务器排列顺序与所占比重大小相对应）：

表 3.2 各典型服务器能耗对照表

服务器档次	型号	功率(W)	功率最大值与最小值差异
volume servers	HP compaq 1600/ML370	293	3.22
	HP Compaq DL380 G2	150	
	HP Compaq DL360	107	
	HP Compaq DL380 G3	212	
	Dell 2650	178	
	HP Compaq 1600/ML530	345	
mid-range systems	Sun 450	499	9.28
	Sun 420R	183	
	Sun V880	450	
	Sun V480	432	
	HP rp 7400 Series / N CLASS (rp7410)	1700	
	IBM 9406-270	287	
high-end system	IBM p680-S85	1,335	10.08
	IBM p690-681	11,286	
	IBM POWERSERVER S80	1,335	
	Sun 10000 HE	13,456	
	HP rp 8400 Series / V CLASS 2200/2250	2,920	
	IBM SP Mid B9	2,640	

由表 3.2 所示，典型服务器之间功率差异是随着服务器档次提高而不断增加的，最小也在 3 倍多。处于保密性的考虑，IDC 在提供这些数据时只给出了各档次服务器的典型服务器所占的总比重（如表 3.1）和各典型服务器所占比重的排序，而具体到每个型号所占有的比重却没有提高。Jonathan 等人对这个问题的处理方法是直接对各档次中的典型服务器能耗取平均得到各档次的平均能耗。考虑到各档次中能耗较小的服务器所占比重的排序均高于能耗较大的服务器，这种计算方法会导致对平均能耗的高估。

3) 对辅助设备的能耗估计的方法不科学。

数据中心的辅助设备主要指出了 IT 设备以外的设备，主要包括照明及制冷系统等，其中主要以制冷系统为主。Jonathan 等人对这部分能耗的处理相当的粗糙：直接将总的服务器能耗乘以一个比例系数（在 Jonathan 等人的研究中该系数取为 1）得到辅助设备能耗。我们自然要问：这个系数取得有依据吗？是否合理？

根据文献[20]的描述，我们可以发现 Jonathan 等人对于这个系数的选取主要取自文献[23]，在该文献中，学者们实地测试了美国数据中心的能耗情况，获得了数据中心总能耗与 IT 设备能耗的比值，而该参数减去 1 即为前面所提到的比

例参数。然而通过仔细的查阅文献，我们得到了如图 3.3 的结果：

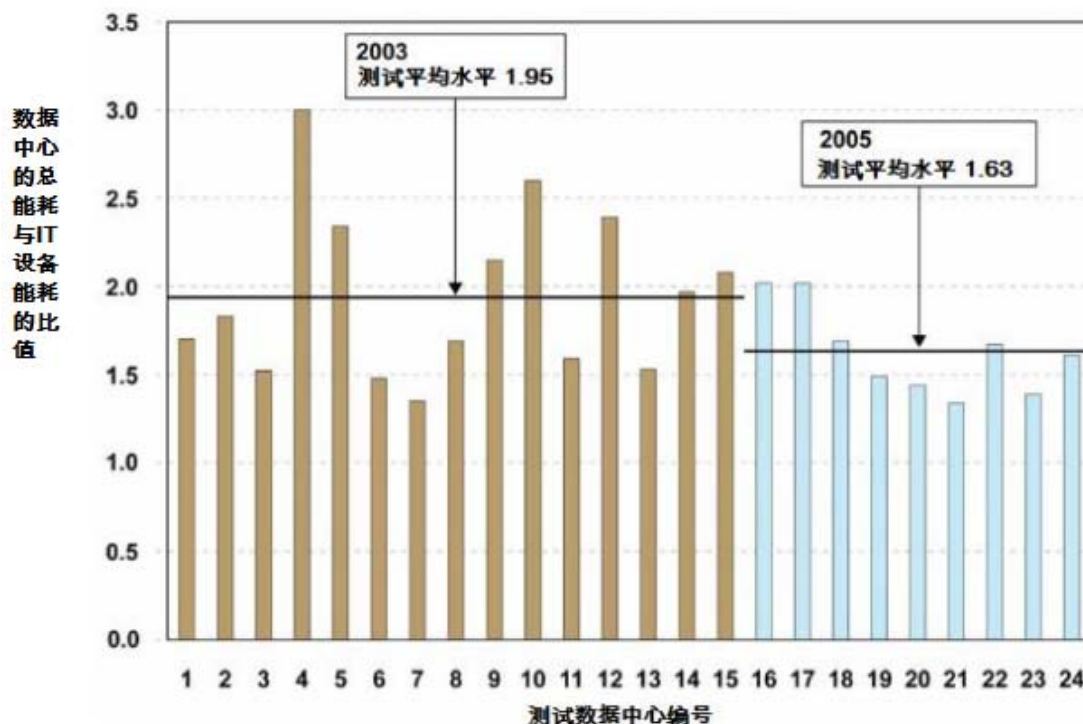


图 3.3 数据中心总能耗与 IT 设备能耗比值的测试值

由图 3.3，我们可以看到数据中心总能耗与 IT 设备能耗的比值首先差异性很大，不同数据中心之间最大的差异将近 2 倍多；其次其平均值随年份变化差异很大，从 2003 年 1.95 到 2005 的 1.63，也就是说辅助设备与 IT 设备能耗的比值在 2003 到 2005 年下降了 33.68%。然而这些因素在 Jonathan 等人的计算中均没有体现。另外需要指出的是文献[23]中所调研的均是所谓“典型”的数据中心，也就是表 2.1 中的局域级别、中等级别以及企业级别的数据中心，并没有包括服务器壁橱及服务器房间，而根据文献[7]我们可以了解 2005 年各档次服务器在各类型数据中心中的分布情况如表 3.3：

表 3.3 2005 年各档次服务器在各类型数据中心分布的比重

服务器档次	服务器壁橱	服务器房间	局域级别数据中心	中等级别数据中心	企业级别数据中心	总和
Volume	17%	20%	17%	15%	30%	100%
Mid-range	0%	5%	16%	14%	65%	100%
High-end	0%	0%	16%	14%	71%	100%

由表 3.3 我们可以了解：2005 年时 37% 的 Volume 服务器与 5% 的 Mid-range 服务器分布在服务器壁橱和服务器房间类型的数据中心中。而由表 2.1 中的描述

我们知道在服务器壁橱和服务器房间中其空调系统往往是和办公室空调系统合用的，对于环境要求并没有像其他三个类型的数据中心那样的严格，而且这些数据中心对于辅助设备一般没有冗余，因此这部分数据中心其辅助系统的能耗要远远低于所谓“典型”数据中心的，将这部分能耗与所谓“典型”数据中心辅助系统能耗采用同样的方法估算显然是一种夸大的估计。而根据图 3.4 我们可以看到

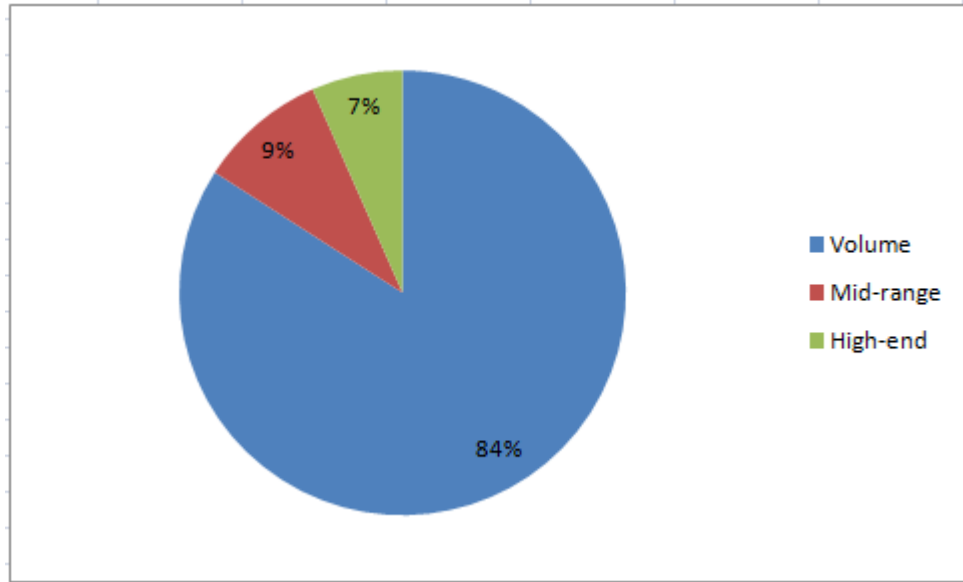


图 3.4 2005 年各档次服务器综合能耗（包括辅助设备）占总能耗比重

在 2005 年 Volume 类型的服务器其综合能耗占到总能耗比重的 84%，因此上述的高估部分能耗会对估算总能耗产生较大的影响。

综合以上的分析，我们可以看到 Jonathan 等人对于全球服务器数据中心能耗的估算在各个环节上均存在着高估的可能，造成这种现象的原因主要是因为相关资料的缺失。也是由于同样的原因，笔者也无法给出这种高估的定量描述，因此基于 Jonathan 等人的研究所得到的推论也无法作为后面研究的基础。对于数据中心能耗现状的掌握还是要依赖更多的研究工作。笔者不认为延续 Jonathan 等人的估算方法是掌握数据中心能耗的最好选择。IT 设备的运行能耗实际上与实际运行中的很多因素相关，只依靠额定的功率来推算整个数据中心的能耗的估算方法其本身的科学性就值得怀疑，笔者认为对数据中心能耗的统计是无法在缺少运行管理人员参与的情况下进行的。但如何使得运行管理人员参与到数据中心能耗统计中则是值得政策制定者及决策者所考虑的一个重要的问题。

而对于数据中心能耗发展的趋势，笔者认为其能耗主要受两个因素的影响：单位面积能耗密度与数据中心面积。就单位面积能耗密度来说，由于设备的集成化程度不断再提高，各种高能源密度的设备不断出现（如比较著名的所谓“刀片式”服务器），因此数据中心机柜能耗密度应该是不断上升的；而另一方面来说，

数据中心日趋集中化,越来越多的服务器壁橱和服务器房间中的服务器设备都被集中于局域或以上级别的数据中心以方便管理,因此机房面积利用效率也会越来越高,单位面积的机柜数会增加,这两方面的因素都会导致数据中心单位面积能耗的增加。对于数据中心面积来说,主要考虑以下三个趋势:第一个趋势也是数据中心集中化、大型化的趋势,机房面积利用效率的提高也很有可能导致总面积的下降;第二个趋势是 IT 设备体积日益缩小,这是由于集成化程度的不断加大,以前需要若干个服务器组才能处理的工作现在可能只需要一个芯片就可以完成,这带来的影响就是新建数据中心的面积相较于以前会不断变小;而第三个趋势是全球经济发展的减速,数据中心其根本使命是为经济发展提供信息服务,而目前从世界范围看除了中国等新兴经济体仍保持较快的经济发展速度外其他对于信息技术要求较高的发达国家的经济发展都相对比较缓慢,因此从这个意义上看全球范围内对于数据中心的总体需求是疲软的。综合以上的考虑和分析,笔者认为数据中心面积在未来增长的可能性相对较小,而减少的可能性却相对较大。而考虑增长的单位面积能耗密度与很可能减小的总面积,在缺乏定量数据支持的情况下很难对于数据中心总能耗的发展趋势作出明确的判断。

3.2 数据中心能耗特点与节能潜力分析

在前面的分析中我们了解到目前对于数据中心能耗的统计是存在高估的可能,那是不是意味着数据中心节能不再有必要了?笔者认为这种观点是不正确的,我们首先来看数据中心单位能耗的实测值,前面提到 Mitchell-Jackson 等人实测的结果为 355 W/m^2 ,是普通办公建筑的几十倍。由此可见数据中心能耗密度很大,而这句话换个说法也就是可节能的空间很大,因此从潜力来说数据中心节能是值得研究的;其次数据中心与一般办公建筑存在很多不同,其节能的实现具有自身特点,因此数据中心不能照搬一般建筑的节能技术和方法,其节能具有作为一个独立研究课题的必要性。

在本小节中将主要在对数据中心能耗特点的分析的基础上试图为目前数据中心节能研究作一下梳理。

3.2.1 数据中心能耗分析

笔者认为之所以数据中心的能耗要远远大于普通办公建筑能耗,主要有以下的原因:

1) 数据中心全年运行

与普通办公建筑不同,数据中心一般是有所谓办公时间的概念的,IT 设

备所承担的业务往往是全年 8760 小时的不间断运行。如果按一般办公建筑每天 8 小时计算，则数据中心的全年运行时间就是其普通办公建筑的 3 倍，考虑节假日的话还会更多。

2) 数据中心由于安全性牺牲了部分的能效；

数据中心与一般的办公建筑不同，任何数据中心其根本的宗旨都是保证 IT 安全可靠长期的运行，节能性在任何时候都只能排在安全性的后面。与办公建筑有时为了节能甚至会牺牲人的舒适性不同，在数据中心的运行中如果要牺牲，那肯定是节能性。这一点从数据中心所承担的工作重要性上看是无可厚非的，但不得不承认这种设置在客观上带来了能源的浪费。

具体来说，安全性对于数据中心能效的影响主要分为以下几个方面

首先，从安全性考虑，数据中心往往对于辅助设备（主要指电力供应及空调系统）采取冗余设计。所谓冗余设计主要是指以下两个方面内容：

a) 辅助设备普遍都需要考虑备用以防止一个设备的故障引起整个数据中心的瘫痪。这种设备的备用在数据中心中是普遍存在的，如在第二章关于供电系统的介绍中我们有提到数据中心的供电线路往往是两条同时运行互为备用。事实上，对于这种备用在数据中心各规范中都有明文规定。如在 GB50174 中就规定：数据中心按承担业务的重要性分为 ABC 三类，其中 A 类与 B 类均有备用设计要求：A 类要求所有的辅助系统均要求设置两套，平时一起运行互为备用；B 类要求所有辅助系统均要求设置两套，平时一用一备。

b) 辅助设备在容量计算时均要考虑较大的安全系数。数据中心由于自身的特殊性，涉及到各个专业，因此在设计中很难做到所谓的整体设计，在实际中往往是不同专业分别设计自身专业相关的内容：如电力专业设计供电系统而暖通专业设计空调系统。每个专业的设计选型都被要求设置相应的安全系数，而事实上各专业之间往往又会有相互影响：如供电系统由于也要散热，因此其容量又会影响到空调系统的负荷，这样导致的结果就是越到设计的下游，其需要取的安全系数就越大。

如上面的分析，冗余设计给数据中心带来的最大问题就是辅助设备容量偏大，因此可以预想这些设备在正常工作的时候都是处于较低的负荷率下。而不管是电力供应系统还是空调系统，一般来说部分负荷下的效率总是要低于满负荷状态，因此冗余设计最终对于能耗的影响就是辅助设备的效率下降。

其次，从安全性考虑，数据中心是采用 UPS 转换外界电源来保证其供电的稳定。从前面的介绍中可以知道 UPS 转化主要是指 UPS 先将外界交流电通过

蓄电池充电的形式转化为直流电，再通过电池放电的形式再次转化为 IT 设备可以使用的交流电，电流形式的转化往往伴随着电能的损耗，因此这种转化也

会使得供电系统能效下降。

3) 数据中心空调系统本身存在一定问题, 导致数据中心供冷能耗较大。空调系统是数据中心辅助设备中能耗大的一项, 而导致供冷能耗较大的原因除了数据中心对于环境运行参数要求很高以外, 空调系统也存在着一些问题导致能耗较大, 具体分析如下:

a) 空调送风量与需求量不匹配的问题。

这个问题本身可以分为两个方面: 第一个方面是数据中心总体上送风量与需求风量不匹配, 较为常见的现象是由于保守的设计使得数据中心空调系统送出的总风量要远大于所需求的总风量而导致部分送风旁通; 而第二个方面是指从局部来说部分机柜可能出现供大于求而同时其他机柜供小于求。局部的送风供需不匹配主要与数据中心目前所采用的地板下送风有关。由于数据中心大多采用地板下送风的方式, 地板夹层实际上是一个静压箱, 每个地板开口是通过自由出流的方式送风, 因此无法保证每个机柜按需分配风量。综合以上两个方面, 我们可以想象出这样一幅情景: 一方面是一部分送风没有经过机柜就回到了空调系统中而另一方面则是部分机柜因送风量过小而导致回风温度过高。这种送风量与需求量不匹配的问题对于能耗方面的影响就是数据中心使用了较高的输送能耗却达不到想要达到的换热效果。

b) “控制冲突”问题

所谓控制冲突主要是指一些数据中心空调机组减湿与另一些数据中心空调机组加湿同时发生的现象, 这种现象显然会带来能源的浪费, 而关于这种现象出现的原因我们将在后续章节中深入讨论, 这里就不再展开。

3.2.2 数据中心节能研究

在分析了数据中心能耗特点的基础上我们来进一步讨论数据中心节能潜力。就前面提到的数据中心能耗大的三个原因中: 第一个原因是数据中心设备运行的要求, 没有改进的余地; 而第二个原因与安全性有关, 正如前面讨论中提到的数据中心的中心安全性是高于节能性的, 也没有太大的改进余地, 因此可以考虑的只有与第三个原因相关的空调系统。而实际上, 目前对于数据中心节能也主要针对于空调系统而言的, 本小节也将着重讨论空调系统的节能。

1) 能效标准

在讨论节能之前, 首先必然要确定能效的基准, 也就是说对能效定量化。只有在能效评价标准明确的情况下讨论节能才有意义。

数据中心配置变化很大, 有一个公司所属的专用数据中心, 也有为很多 IT 设备提供场所的公共数据中心 (通常称为服务器农场或旅馆); 有采用高能量需

要密度的刀片式服务器，也有采用较老式的服务器。因此数据中心中的 IT 设备种类可能不单一；另外不同的数据中心设备放置的密度也可能存在差异。这些非能效因素都会导致不同数据中心单位面积的 IT 设备的散热量存在较大差别。在此背景下，以往用来评价建筑能耗效率的单位面积能耗量 EUI (Energy Using Intensity) 这个参数失去了应有的评判意义，因此需要一个新的指标来评价数据中心的能耗效率。

美国 GreenGrid[24] 提出了 PUE (Power Usage Effectiveness) 和 DCE (Datacenter Efficiency) 两个参数作为数据中心的能耗效率指标，如式 3.1 与 3.2 所示

$$PUE = \frac{\text{TotalFacilityPower}}{\text{ITEquipmentPower}} \quad (3.1)$$

$$DCE = \frac{\text{TotalFacilityPower}}{\text{ITEquipmentPower}} \quad (3.2)$$

其中，TotalFacilityPower 作为数据中心的总能耗有以下部分组成：

- a) 电源输送部分的能耗，包括 UPS、蓄电池等电源设备能耗及输送过程中的能耗损失，同时考虑电源输送系统在低负荷率下的能效下降；
- b) 制冷系统的能耗，包括冷热源、水系统及风系统的能耗；
- c) IT 设备能耗（计算机、网络设备及存储单元等）；
- d) 其他能耗如照明等。

ITEquipmentPower 为 IT 设备能耗，W

PUE 和 DCE 互为倒数，本质上为一个变量，它们的提出为比较不同的数据中心的能耗效率提供了可能。一些相应的研究也随着开展：Belady[25]认为很多数据中心能耗的 PUE 值可能会达到 3.0 或更高，而经过良好的设计，PUE 值有可能会降到 1.6 左右。而美国劳伦斯伯克利实验室[20]对美国数据中心开展的测量显示 PUE 变化范围为 1.3 到 3.0。Patterson[26]则认为 PUE 的下限值应为 2.0。然而目前尚无研究给出标定数据中心是否节能的 PUE 值。

PUE 作为目前被广泛接受的数据中心能效指标，在实际使用中也暴露出一些问题：

a) 某些数据中心的能耗供应往往不是专用的，如在一个大楼中，电源往往是通过一个接入点进入整个建筑，再分配到数据中心及其他办公场所。这就为式 3.2 中的 TotalFacilityPower 的获得设置了障碍，在实际使用中往往是通过测量或估算的方法来获得 TotalFacilityPower 值，不可避免的带来了误差

b) 最新的制冷技术由于强调所谓的精确制冷，往往是和 IT 设备直接集成化，这样制冷能耗和 IT 设备能耗之间的界限变得不再清晰，也为 PUE 的计算带

来了困难。

为提高 PUE 的可使用性, GreenGrid 也提出了相应的修正: 将 PUE 分解, 如式 3.3:

$$PUE = CLF + PLF + 1 \quad (3.3)$$

其中 CLF 为总制冷能耗与 IT 设备能耗的比值而 PLF 则为电源供应系统与 IT 设备能耗的比值。

这种分解主要设计来解决各部分能耗界限越来越模糊的问题。

PUE 参数的提出事实上正反映了目前数据中心节能的基本思路: 主要以减少辅助系统能耗为主, 而将 IT 设备能耗本身排除出节能的范围之外。这种思路在目前的情况下是具有现实意义的, 因为数据中心目前主要的任务就是保证设备安全可靠的运行, 而保证 IT 设备能源供应的富裕则是这其中的重要方面。然而从理论上考虑, 一个系统的能效必然是其输出与输入的比值而不是一部分的输入占总输入的比值, 因此这个能效参数显然是不科学。从数据中心长远的发展来说, PUE 参数只能成为暂时的过渡参数。事实上, 也有学者正在探索更科学的数据中心能效指标, 如 GreenGrid 提出的 DCPE 这一概念性的能效指标, 如式 3.4 所示:

$$DCPE = \frac{\text{UsefulWork}}{\text{TotalFacilityPower}} \quad (3.4)$$

这个指标的提出实质上将数据中心黑箱处理, 只考虑其输入输出量, 相对于 PUE 及 DCE 来说, DCPE 更符合能效的理论定义。而如何来确定所谓 UsefulWork 是阻碍其由概念性定义成为工程应用的指标的障碍。一些学者提出的针对服务器数据中心的 MB/kWh 指标为这个问题的解决提供了一个思路。这个指标实际上是将数据中心的所谓 UsefulWork 直接量化为网络数据流量, 而这对于服务器数据中心是合理的。笔者相信随着 UsefulWork 量化研究的不断开展, 类似 DCPE 参数将成为未来数据中心能效指标的必然选择。

2) 空调系统节能研究

在讨论数据中心空调系统节能以前, 我们先来看看常用的建筑节能方法对于数据中心的适用性。目前常规的建筑节能途径有很多, 其中节能效果较为突出的有如表 3.4 所示的几种技术。

表3.4 常见建筑节能技术汇总表

针对围护结构的节能技术	墙体保温技术
	采用低SC系数的透光围护结构
	遮阳技术
针对空调系统的节能技术	余热回收技术(如空调系统排风的能量再利用、空调机组冷凝热回收等)
	变风量技术
	水泵变频技术
	“免费”供冷(如室外低温空气等)
针对照明系统的节能技术	引入自然光以减少人工照明的使用

我们来具体分析以上所述每一种节能措施在数据中心中的应用潜力。

首先看围护结构的节能技术。

由于数据中心绝大部分的负荷均来自于室内，因此旨在减少室外负荷的围护结构节能技术对数据中心基本没有什么意义。

接着看空调系统的节能技术。

对于余热回收技术来说，由于数据中心本身对新风量要求很少，因此这项技术对于数据中心基本没有什么意义。

对于变风量技术来说，数据中心从本身能耗角度来说由于运行不间断，因此风机能耗相对比较大，而变风量技术主要减少的正是这部分能耗，粗看起来似乎是比较适合，然而当我们联系数据中心本身特点来分析则不一定。由于数据中心的冷负荷主要都来源于设备，而设备的负荷则主要与其工作时间有关。很多数据中心是全年无休的工作，因此这些数据中心冷负荷很可能全年变化都很小，而在负荷变化较小的情况变风量就失去了节能意义；而另一方面，目前数据中心主要都采用地板下送风的气流组织形式，大量的实验和模拟都证明地板下静压箱的气流分布是与送风风量密切相关的，而随意的改变送风量有可能会整个地板下送风偏离设计出现紊乱。因此，笔者的观点是变风量技术并不一定适用于数据中心。

对于水泵变频技术，该技术在数据中心中应用也存在与变风量技术一样的问题：数据中心所需的冷量会不会发生较大的变化？这里也就不再赘述。

对于“免费”供冷，所谓的“免费”供冷主要是指利用外界的较冷空气来为建筑供冷，按其利用的方式主要为水侧节能器和气侧节能器。这种节能方式比较适合于在过渡季节或者冬季也需要供冷的建筑，而数据中心正是需要全年供冷，因此这项技术是比较适合于数据中心空调节能的。

然而在具体应用过程中,两种节能器都存在着一定的问题。水侧节能器对室外湿度的要求较高,一般比较适合于全年室外较干燥的地区。对于气侧节能器来说,由于是直接未经处理的新风送入室内,因此为保证安全,也需要分析在保证目前较为严格的室内温湿度条件下气侧节能器可利用的小时数。

最后看针对照明系统的节能技术。

数据中心室内负荷主要来自于设备负荷,照明负荷所占的比重一般都很小,照明系统的优化对于数据中心本身节能意义有限;另外一般数据中心都不会设外窗,因此日光照明的实现也存在一定困难。

从以上分析可见,数据中心有自身的特点,并不是所有建筑节能技术均可适用,表 3.4 中列举的节能技术中笔者认为具有实际可用性只有“免费”供冷,而其具体的应用也要受到各种因素的制约,需要根据具体情况来分析其实际可行性。

除了常规的建筑节能技术以外,针对前面所提到数据中心送风量与需求风量不匹配的问题,一些学者也在开展相应的研究工作,希望通过优化气流组织来以较小的输送能耗达到需求的制冷效果。

由于气流分配受地板夹层尺寸、地板开口的布置及过流面积、空调机组的布置、送出风量、地板夹层的电线及管道造成阻力等等因素影响,相对比较复杂,学者多依赖于 CFD 方法来研究这个问题。由于通常的 CFD 软件对计算条件要求较高,为尽快获得收敛的结果,研究者们往往需要对该问题作了一定的简化,而这种简化往往又会影响模拟结果的适用范围,这可以说是目前该领域研究所面对的主要问题。Kang[27]等人认为气流分配主要影响因素都在地板夹层中,因此他们选择地板夹层内的气流速度和温度场作为研究对象,同时假定地板夹层中的静压是相同的。这种假设极大地减少了计算的工作量,然而得出的计算结果其实对于研究气流分布不均没有任何意义。R[28]等人也是选择地板夹层内气流速度温度场作为研究对象,在简化上他们忽略夹层在竖直方向的压力分布。这实际上是将气流分布问题简化为了一个二维的问题,所得出的结果显然只适用于地板夹层高度较低的数据中心。Kailash[29]等人则在 R 等人研究的基础上,以地板夹层内的速度温度场作为研究对象同时考虑竖直及水平方向的压力分布,将整个问题抽象为一个三维问题。通过与实测的结果比较,证明 CFD 结果比较符合实际情况,可以作为工程上研究气流分布的依据。

而也有一些学者提出修改现行数据中心环境运行参数,放宽要求以提高数据中心系统的能效。然而对于该问题,究竟数据中心环境运行参数对于其能耗影响是怎样的,目前没有一个明确的结论,关于这个问题,我们将在第 5 章节进行深入讨论。

总结以上分析，我们可以看出：数据中心节能存在自身特殊性，常规建筑节能方法存在适用性的问题；而另一方面数据中心本身也存在一些特有的节能技术。

基于前面的分析，笔者认为对数据中心来说，有节能意义的措施主要有如下几种：

- 1) “免费”供冷；
- 2) 气流组织优化；
- 3) 数据中心环境设定参数优化。

在后续的章节，将重点分析以上各节能技术应用于数据中心的节能潜力以验证笔者的结论。

第4章 数据中心现场调研测试

4.1 调研目的

本次数据中心现场调研的主要目的在于：

1) 希望了解中国数据中心能耗的实际情况；

前面提到了中国目前对于数据中心能耗的定量研究基本上还是一片空白，因此本文希望为这方面的研究贡献一份力量。在本次调研中对于数据中心能耗主要是通过两个参数来定量描述：一个是数据中心单位机房面积的能耗 EUI 而另一个则是前面介绍过的数据中心能效参数 PUE。

2) 通过实地调研的方法来研究数据中心实际运行中在能效方面的一些问题；

通过现场调研，不仅希望验证文献中所记录的数据中心能效的问题，也希望能够发现一些新的问题；

3) 收集实测数据为后续的节能定量分析作基础数据。

4.2 调研概述

4.2.1 选择原则

对于调研目标的选取，主要考虑以下两个因素：

1) 典型性

由于受实际条件限制，无法开展大规模的数据中心现场调研，因此在调研目标的选择上首先考虑了其典型代表性。

所谓典型代表型，主要又体现在以下方面：

首先在冷却方式上，

目前数据中心实际采用的冷却方式按输送冷量的介质不同分为：水冷及空气冷却两种方式，其中空气冷却发展历史较长，应用较广泛；而相对地，水冷是相对较新的技术，目前还没有得到大规模应用。因此从典型代表性角度考虑，调研的目标优先考虑空气冷却的数据中心。

其次在送风布置上，

采用空气冷却的数据中心其送风方式一般可分为上送风与下送风两种，下送风由于冷风更易于与热源进行充分的热交换且不易受较高的机柜影响气流流动而被各种规范所推荐，在实际，尤其是新建数据中心中的应用也相对较广。考虑

这种情况，本次调研中要求目标数据中心是采用冷热通道布置、地板夹层下送风的气流组织形式。

2) 可操作性

数据中心不同于一般类型的办公建筑，其对于安全可靠性的要求很高，因此所有的设备（包括空调、照明系统）供电常常是采用 UPS 系统将外界电源转化后以相对独立的方式提供的，这就为能耗调研带来了一个问题：仅仅凭总能耗数据无法判断各分项能耗的情况。考虑到这一点，为了可以达到之前所提到的调研目标，就要求目标数据中心有分项计量的可操作性。

4.2.2 调研目标

按上述选择原则，本研究中选取了位于上海张江科技园区的某数据机房作为研究目标。

该机房主要为某期货公司提供电子数据业务，全年 24 小时不间断运行。其面积为 300m²(20×15m)(包括 CRAC 所在的空调机房面积)，平面布置图如图 4.1 所示：

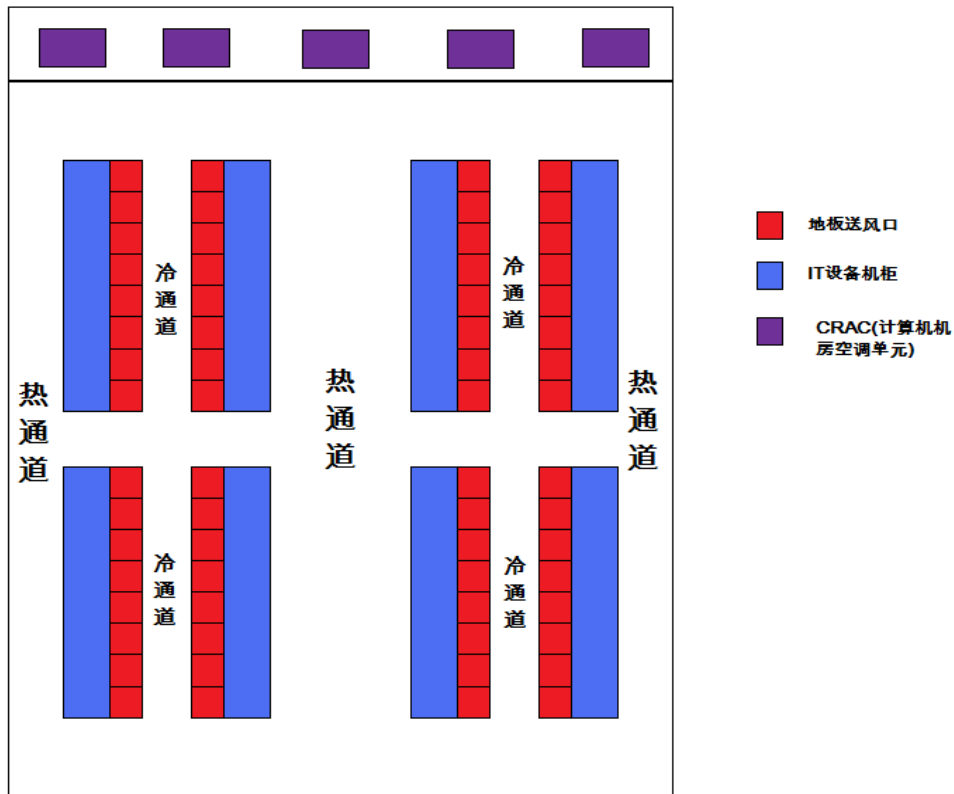


图 4.1 调研数据中心平面布置图

该数据中心的空调系统采用地板下静压箱送风，吊顶回风的送风方式，其气流组织如图 4.2 所示

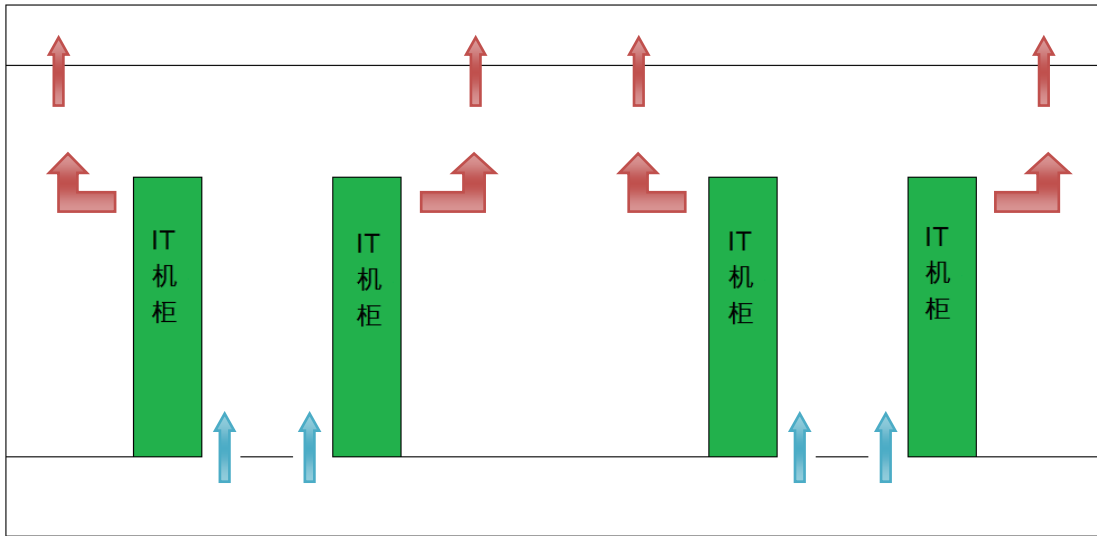


图 4.2 调研数据中心气流组织示意图

该机房的冷量由 5 台精密空调机组提供（4 用 1 备），其性能参数如表 4.1 所示：

表 4.1 调研数据中心精密空调相关参数

设备组置	数量	主要技术参数
压缩机	2	制冷量 30kW；额定功率 6.5kW
送风机	1	风量 17300m ³ /h；额定功率 7.5kW
室外冷凝风机	1	额定功率 4kW

如表 4.1 所示，每个精密空调拥有两个相对独立的压缩机机组以满足送风温度调节的要求，其制冷量有 30kW 与 60kW 两级可供调节，其制冷性能指数 COP 按式 4.1 计算可得：

$$\text{COP} = \frac{Q_{\text{cap}}}{W} \quad (4.1)$$

其中 Q_{cap} 为精密空调的额定容量，W；

W 为精密空调除风机以外的输入功耗，W；

4.2.3 测试过程简述

1) 能耗测量

经现场调研了解到该数据中心精密空调、照明及 IT 设备均有相对独立的 UPS 系统。本次研究中选取连续的两个典型工作日（2011 年 12 月 23 及 24 日）来对数据中心能耗情况进行研究，分别于 23 日的上午 9 时与 24 日的上午 9 时记录各 UPS 电表读数，取每个 UPS 两次读数的差值为该数据中心典型工作日的相应能耗。

2) 温湿度测量

对机房的温湿度测量时段选择 12 月 23 日上午 9 点到 11 点(期货交易高峰时间)，采样周期选择为 10 分钟，将所得数据最终取平均值以消除随机因素导致的误差。而选择在期货交易高峰时间作为测试时间则是力求反映出在极端情况下机房的温度分布。

为反映数据机房温湿度的空间分布特点，测量的具体实现上采用布点测量的方法，即通过在机房中放置若干个温湿度传感器来获得整个数据中心的温湿度场分布情况。在温湿度的测量中使用的工具为 BES-02 温湿度采集记录器（如图 4.3 所示），该仪器由哈工大研制，为纽扣电池供电，设定采集时间后会自动采集所在区域的温湿度并记录于内置存储器中。其较小的尺寸（5.5cm 长、3cm 宽、1cm 厚）及对电子机房设备工作无影响的特性使得其成为理想的计算机机房温湿度记录仪器。



图 4.3 BES-02 温湿度采集记录器

测点的选择则如图 4.4 所示：

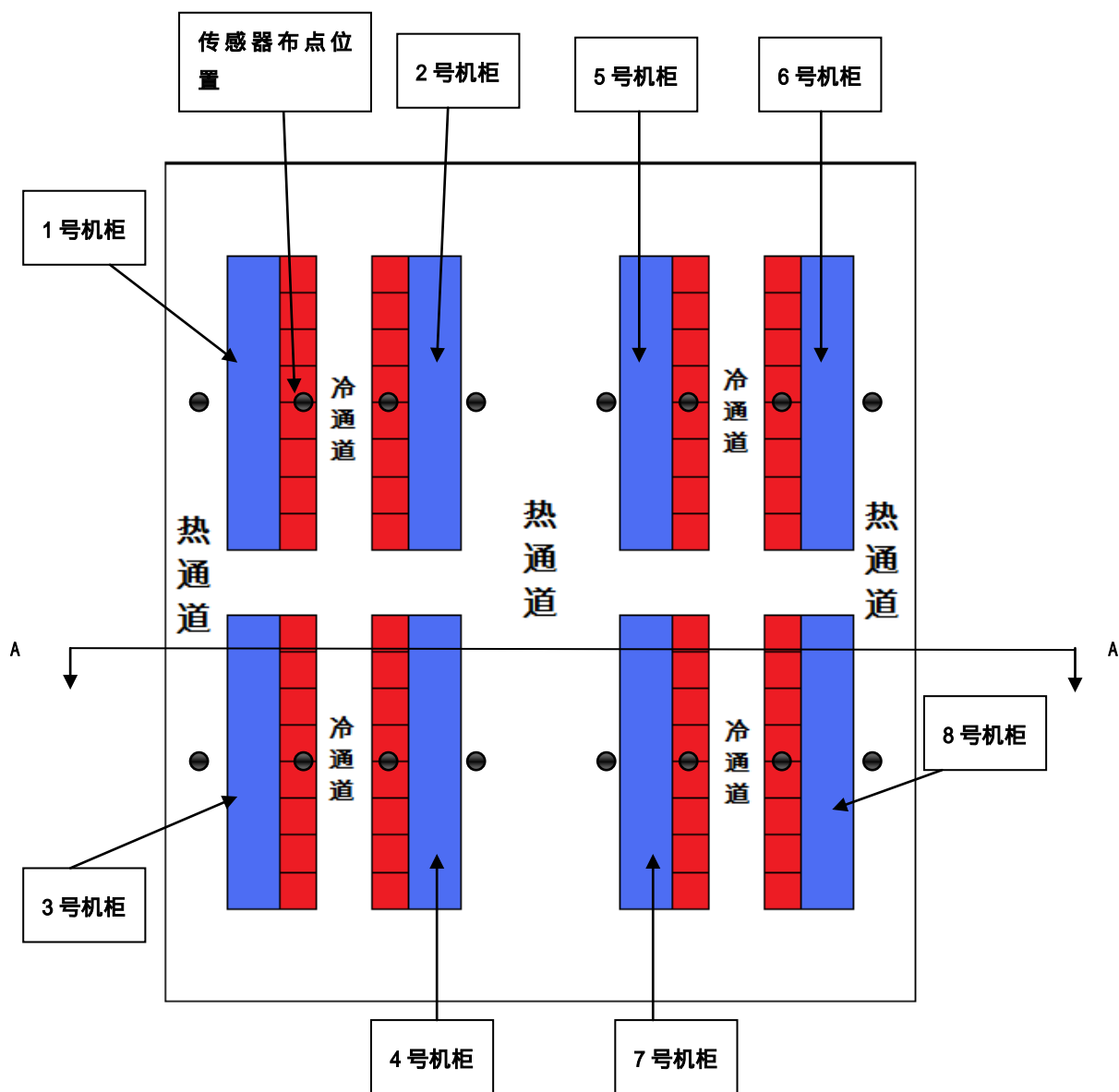


图 4.4 数据中心温湿度传感器布置平面图

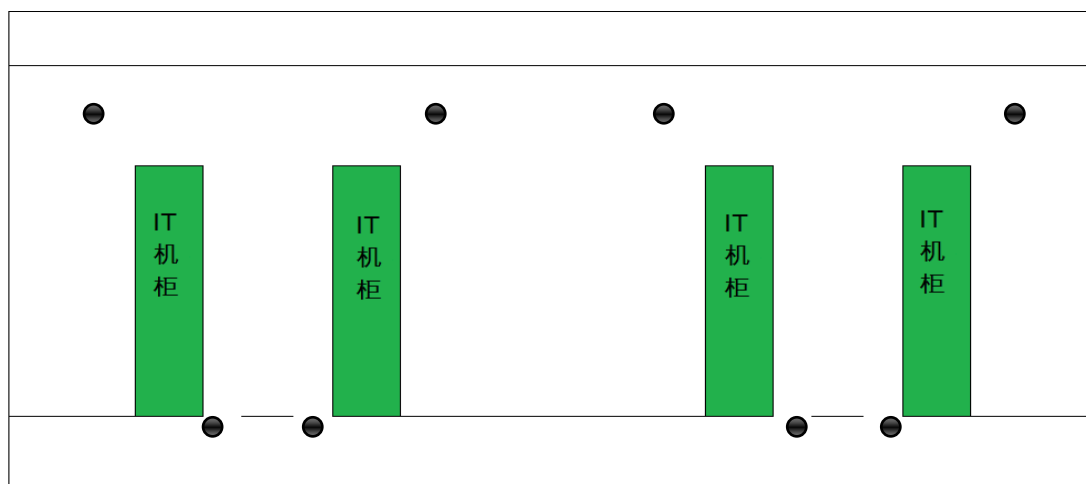


图 4.5 数据中心 A-A 截面示意

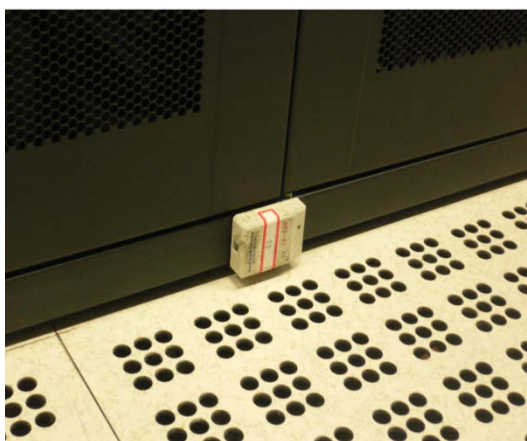


图 4.6 送风入口处温湿度传感器



图 4.7 IT 设备回风侧温湿度传感器

之所以将测点分别在放置在每组 IT 机柜的送风入口处及回风出口侧，主要是考虑到这两点的温度分别为每组机柜所在区域温度分布的理论极值点，在传感器数量有限的情况下得到这些点的温度分布实际上就可以得到该区域温度分布的大致范围，同时这些点的温度值也可反映出各 IT 机柜冷量供给和需求的情况。

4.2.3 测试结果与分析

1) 数据中心能耗测试

表 4.2 为记录的各 UPS 电表读数与差值

表 4.2 数据中心能耗调研数据

类别		第一个工作 日电表读数 (kWh)	第一个工作 日电表读数 (kWh)	读数差值 (kWh)
IT 设备	线路 1	484127	485435	1308
	线路 2	393497	394577	1080
精密空调机 组	机组 1	139060	139640	580
	机组 2	127060	127320	260
	机组 3	172140	172700	560
	机组 4	124280	124800	520
照明		67754	67905	151

由表 4.2 可得该数据中心总能耗为 4459kWh/天，结合机房面积可得该机房 EUI 为 $619.3\text{W}/\text{m}^2$ ，图 4.8 是与其他文献中测量到的数据中心的 EUI 对照；

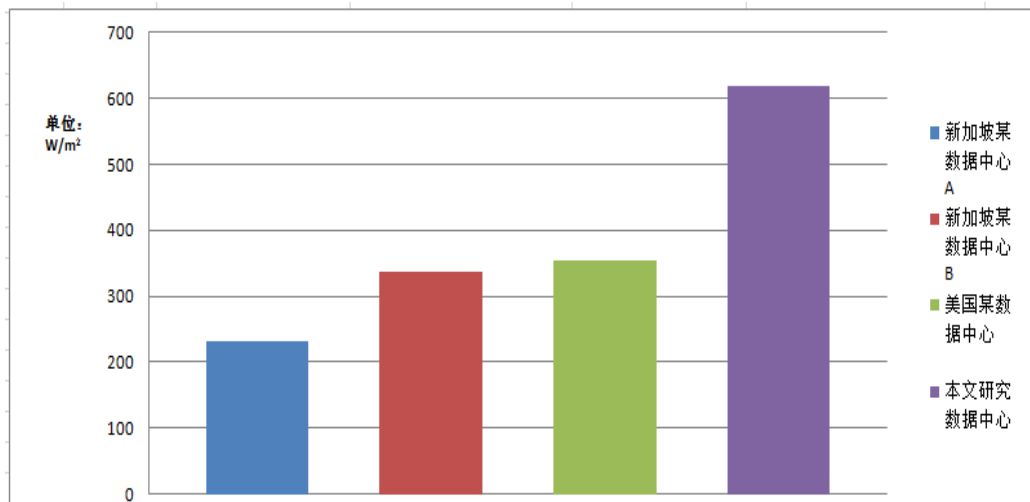


图 4.8 各数据中心 EUI 对照图

(美国数据中 EUI 数据来源数据：文献[16]；新加坡数据中心 EUI 数据来源：文献[31])

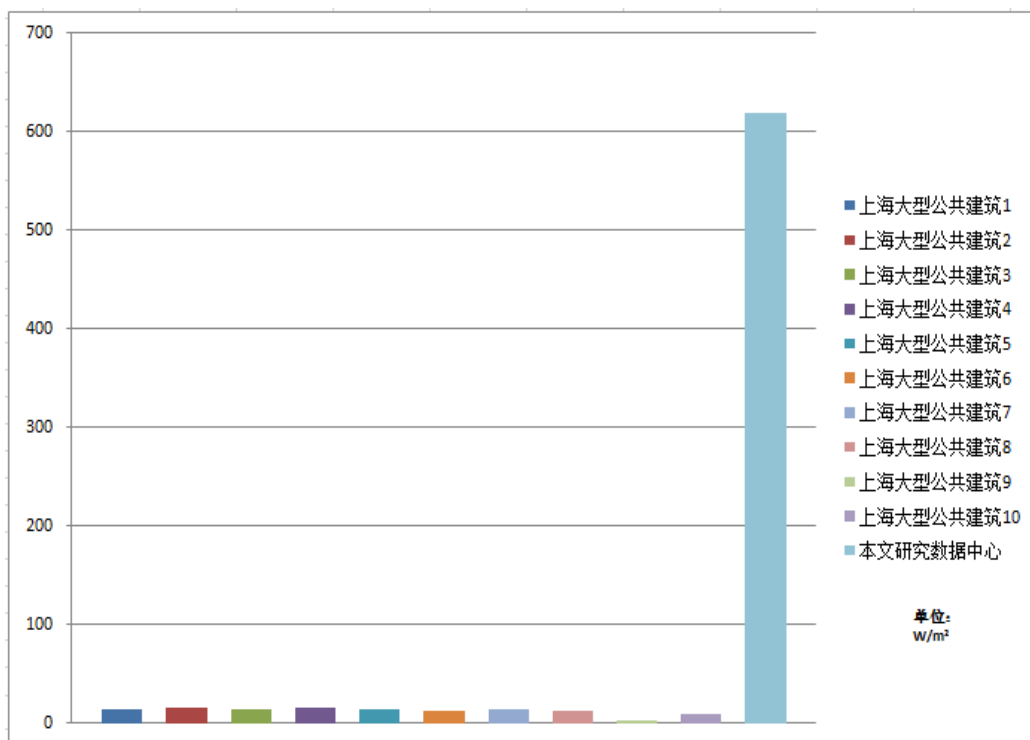


图 4.9 测试数据中心 EUI 值与上海大型公共建筑单位面积电耗对照

(上海大型公共建筑数据来源：文献[32])

由图 4.8 我们可以看出，测试的数据中心 EUI 值要远远高于其他数据中心，

几乎是最低者的三倍。而由图 4.9 可以发现，同样处于上海地区，测试数据中心的单位面积电耗与大型公共建筑之间的差距 60 多倍。

测试数据中心分项能耗比重如图 4.10 如所示：

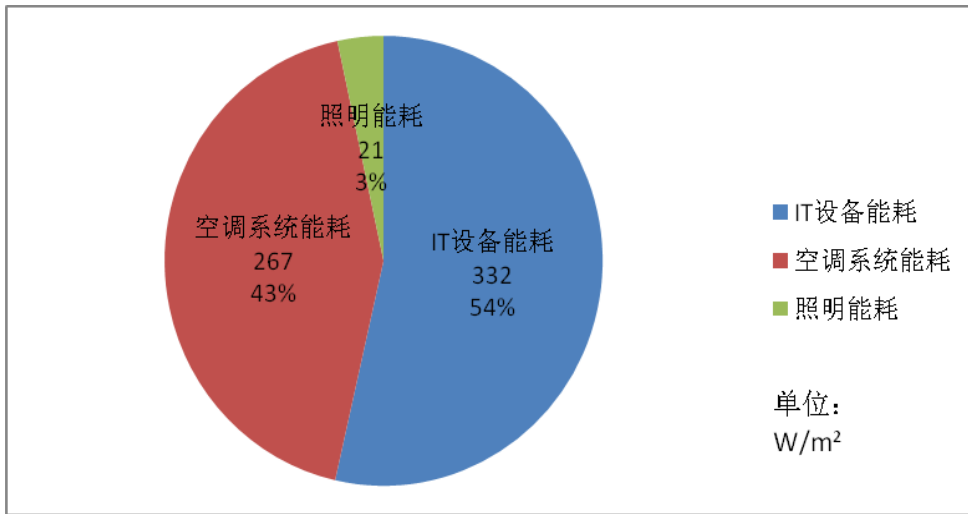


图 4.10 测试数据中心分项能耗饼图

而另外由于风机是定风量运行，因此可根据其实额定功率大致估算出送风机的能耗，由此可得精密空调分析能耗如图 4.11：

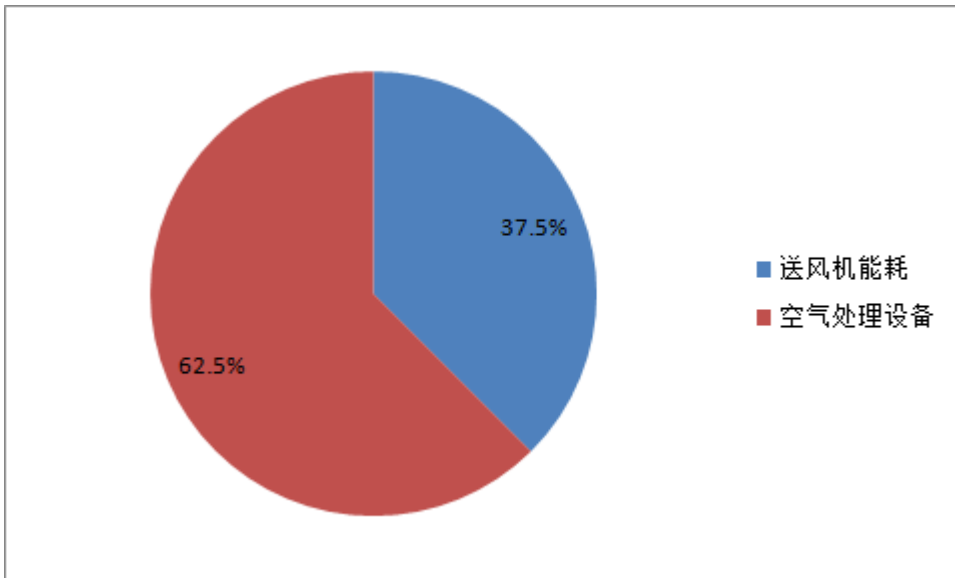


图 4.11 测试数据精密空调能耗分析饼图

由图 4.10 我们可以得到该数据中心 PUE 值为 1.86(由于无法统计供电系统的能耗, 因此这里得到的 PUE 是偏大的), 由于业内目前仍无关于 PUE 的节能标准值, 因此在讨论 PUE 值时只能与其他数据中心 PUE 来作相对比较研究。将测试数据中心 PUE 与美国劳伦斯伯克利实验室所作的数据中心 Benchmark 调研测试中得到的数据中心 PUE 比较如图 4.12。从图中我们可以看出测试数据中心的

PUE 值处于中等偏高的位置，因此其辅助系统（主要为空调）仍有相当的节能空间（最少为 50%）。

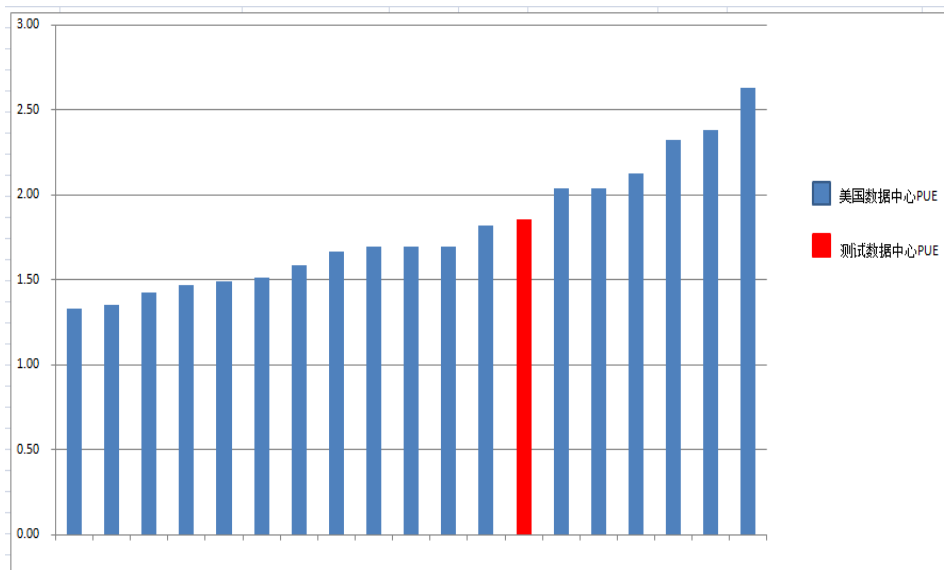


图 4.12 测试数据中心 PUE 与美国测试数据中心比较

（美国测试数据中心 PUE 值来源：文献[23]）

其中空调系统中各精密空调机组的能耗如下：

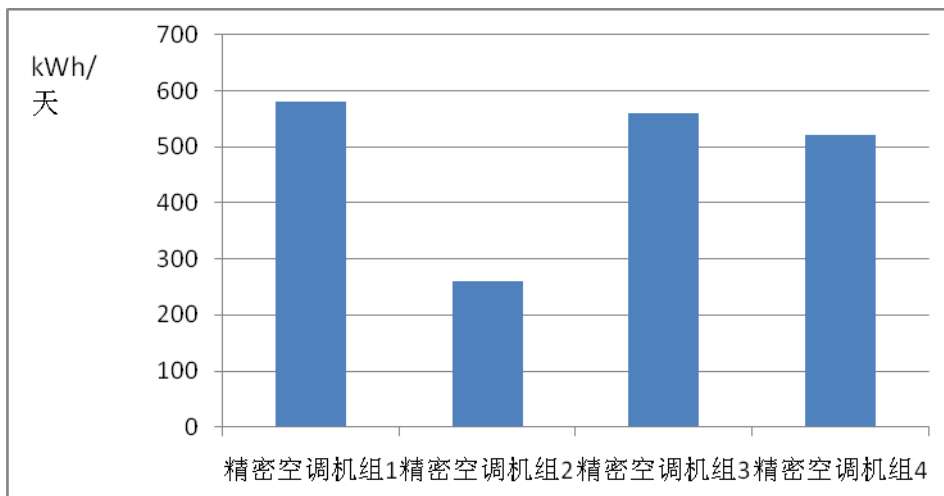


图 4.13 实测数据中心各精密空调机组能耗情况

由表 4.1 可知精密空调机组额定功率为 24.5kW，定义如下变量部分功率比 PPR：

$$\text{PPR} = \frac{\text{Power}}{\text{PowerRated}} \quad (4.2)$$

其中 Power 为精密空调实测功率, W；而 PowerRated 为额定功率, W。

PPR 参数反映的是精密空调实时功率与额定功率之间的比值，是从供给侧反映各机组运行状态的参数，然而供给侧的状态实际上也可侧面反映出需求侧的情况。因此考察机组的 PPR 实际可大致了解机组实际负荷的情况，当然考虑到机组的性能参数随负荷率下降而降低，PPR 可能会略大于机组的负荷率。

由 PPR 参数定义结合图 4.13 可得各精密空调的 PPR 参数如图 4.14 所示：

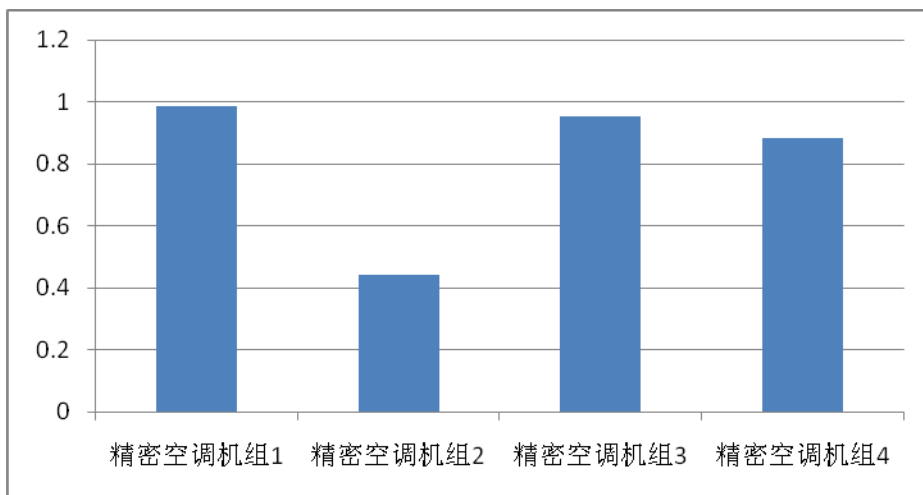


图 4.14 实测数据中心各精密空调机组 PPR 参数

由图 4.14 可知各精密空调机组的 PPR 参数差异较大，最低的机组 2 的 PPR 参数仅为 0.4 左右，由前面的分析我们可以知道该机组实际的负荷率可能会更低，也就说该数据中心存在部分空调机组在非常低的负荷率下运行。通过查阅该数据中心的空调设计说明我们可以知道该中心设计的冷负荷为 $500\text{W}/\text{m}^2$ ，而实际配备的空调系统其容量为 $800\text{W}/\text{m}^2$ ，由此可得其安全系数为 1.6，远远大于一般空调系统设计中所取的 1.2。考虑到该数据中心已配备了一台备用机组，笔者认为这样安全系数选择是没有必要且有悖于节能原则的。

2) 数据中心温度测试

测量的各机柜入口温度平均值如图 4.15 所示：

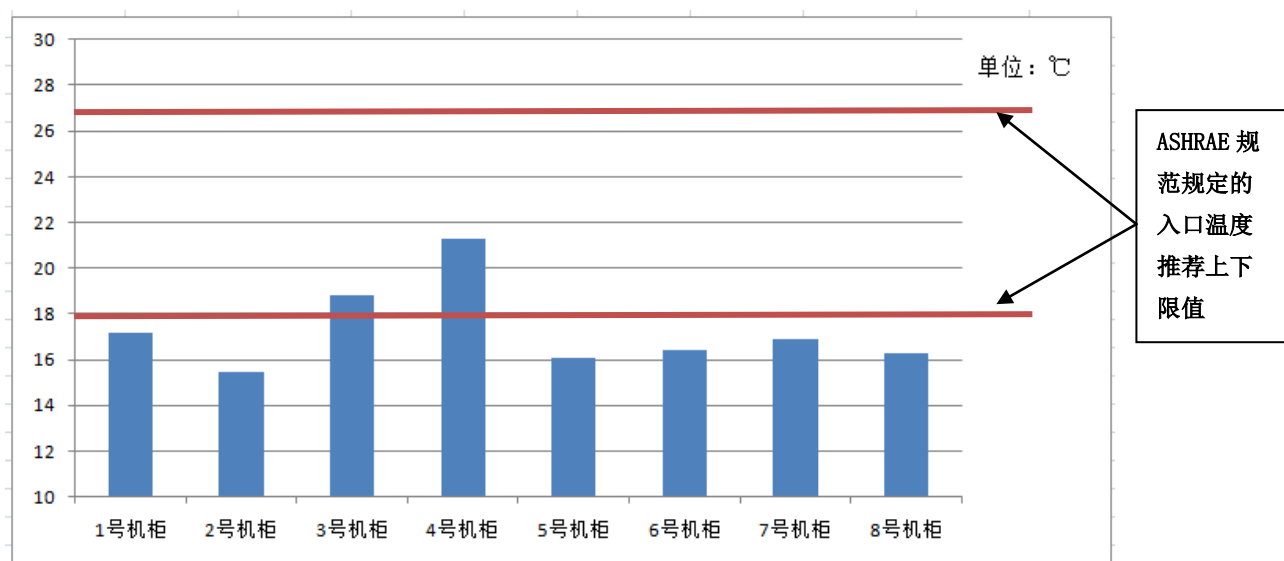


图 4.15 各机柜入口温度测量平均值

由图 4.15 可以看出：

(1) 除了 1 号、3 号及 4 号机柜以外，其他机柜的入口温度均低于 ASHRAE 规定的入口温度推荐下限值。

(2) 1 号、3 号及 4 号机柜的入口温度要明显高于其他机柜，其他机柜之间差距较小（基本在 1°C 之间）。

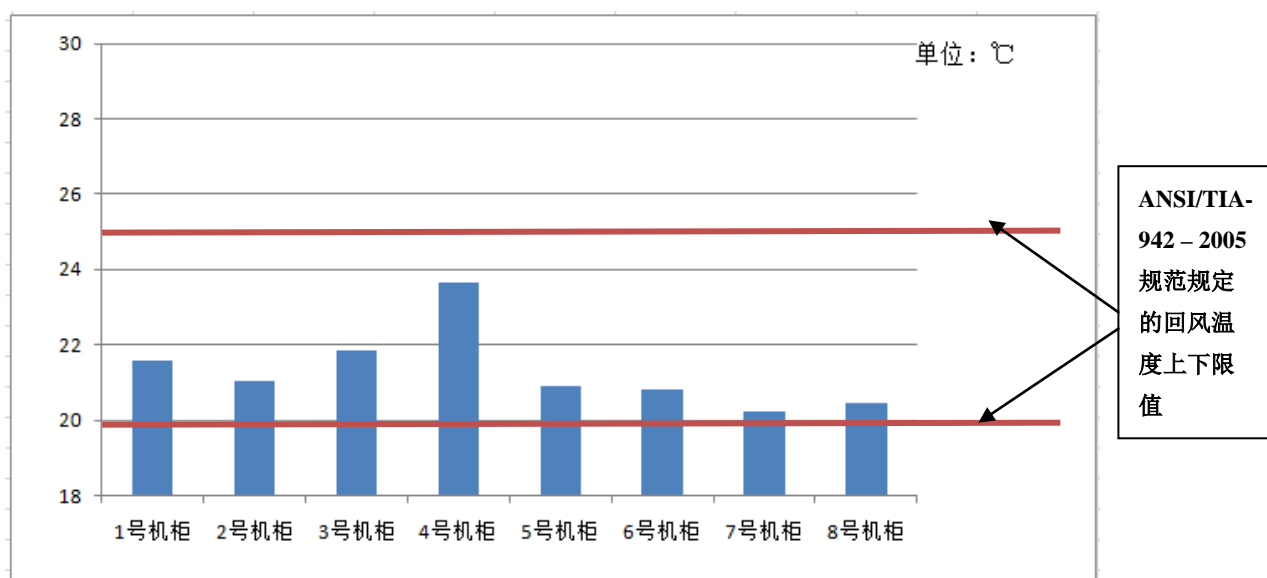


图 4.16 各机柜回风温度测量平均值

由图 4.16 可以看出：

(1) 所有机柜的回风温度均处于 TIA-942 规范规定温度上下限值之内。

(2) 与入口温度类似，1 号、3 号及 4 号机柜的回风温度要明显高于其他机

柜，其他机柜之间差距较小（基本在 1℃ 之间）。

3) 数据中心湿度测试

各机组回风处露点温度与相对湿度如图 4.17 所示：

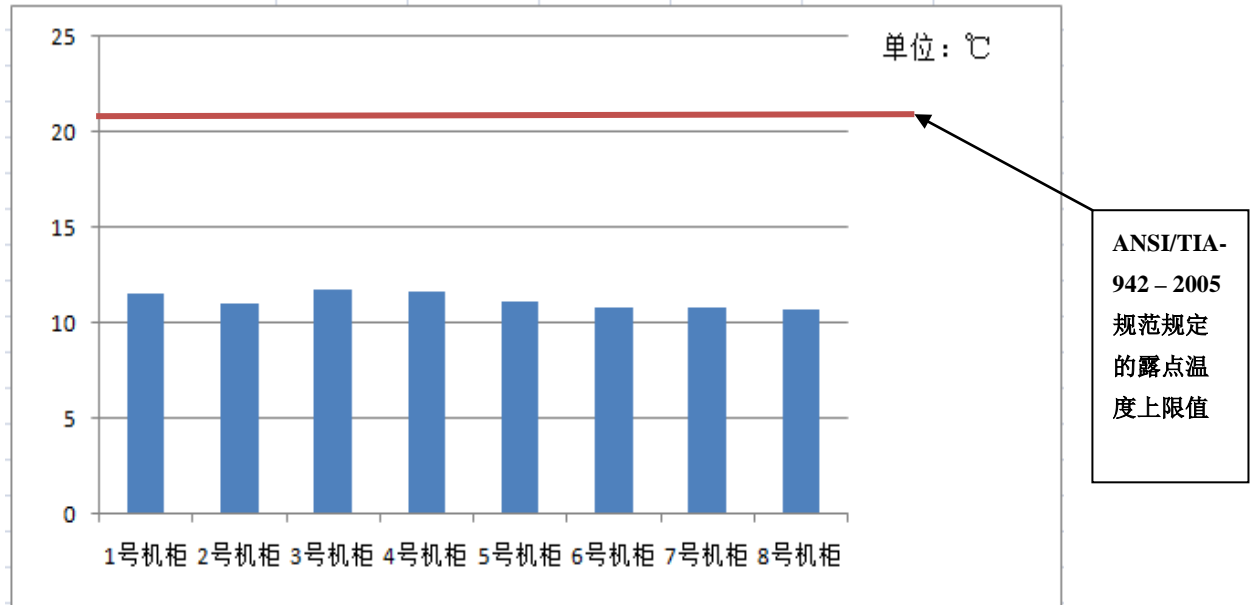


图 4.17 各机柜回风露点温度

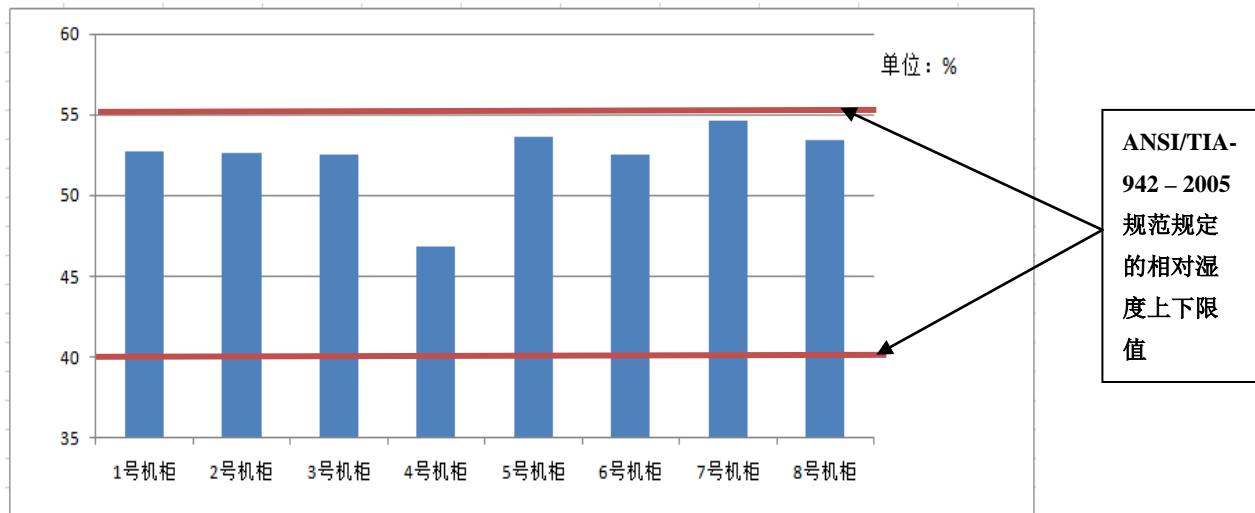


图 4.18 各机柜回风相对湿度

图 4.17 和 4.18 显示该数据中心各机柜的露点温度（绝对湿度）和相对湿度均满足 TIA-942 规范的要求。

从绝对湿度角度来说，整个数据中心湿度较均匀，各机柜的露点温度之差不超过 1℃；而从相对湿度角度来说，整个数据中心则分布较不均匀，其中 4 号机柜与 7 号机柜的相对湿度相差了将近 8%，而 7 号机柜本身的相对湿度接近规范

要求的上限，显示了相对湿度相对于绝对湿度更容易受到干球温度的影响的特性，这也向我们揭示了另一个事实：采用相对湿度作为湿度控制的计量在实际中确实存在造成控制冲突的危险。当然在该数据中心的中心，由于采用了吊顶集中回风的形式，这种危险由于回风的混合而降低了。

4.3 调研小结

综合以上的分析，对于数据中心的现场调研我们可以得到如下的结论：

- 1) 所调研的数据中心其能耗密度 EUI 为 619.3W/m，要远大于国外数据中心能耗水平，为同地区大型公共建筑能耗密度的 60 倍；
- 2) 所调研的数据中心能效参数 PUE 为 1.86，与国外数据中心能效参数相比有进一步提升的实际空间（空调系统至少有一半的节能空间）；
- 3) 所调研的数据中心空调机组在业务高峰时间有部分是在较低负荷率下运行；机组选型安全系数过大；
- 4) 所调研的数据中心各机组入口温度普遍过低；回风温度基本处于规范要求的范围内，但个别机组出现了热点现象；
- 5) 所调研的数据中心各机组的回风绝对湿度分布较为均匀而相对湿度由于受干球温度影响差别较大，提示我们在某些自由回风的数据中心中确实有可能会发现因不同区域的相对湿度差别较大而导致的不同空调机组湿度处理上的控制冲突。

第 5 章 数据中心环境设定参数对能效的影响

近些年来,数据中心的环境设定参数(温湿度)随着数据中心能耗问题的日益凸显而愈发受到人们的关注。从第 2 章中的描述我们可以看出,目前相关规范所规定的数据中心室内设定参数是非常严格的。这种严格也是比较容易理解的:数据中心中的 IT 设备往往承担着可靠性要求很高的数据工作,因此安全可靠性是 IT 设备制造厂商和运行人员所考虑的第一要务,这种严格的环境要求实际上也可以看作是一种安全冗余。但是在目前全世界范围内的节能减排的大背景下,这种安全上的谨慎也自然就成为学者们的众矢之的。一些研究人员指责正是这种过分的谨慎导致了数据中心能耗问题的出现而且也阻碍了节能技术如气侧节能器在数据中心中应用,因此他们要求适当放宽数据中心温湿度设定范围以提高数据中心的能源利用效率。如文献[33]中认为每提高数据中心的设定温度 1F(0.56°C)则可以减少数据中心 5%的能耗,因此当将数据中心的温度设定值从 20°C 提高到 25°C 后,其总能耗将降低 37%。然而作者并没有给出这个结果得出的具体过程,因此正确性无从得知。事实上,由于数据中心相对于其他民用公共建筑的特殊性,目前为止室内环境参数设定值对其能耗的影响研究都没有较为可靠的结果。在这个背景之下,笔者就希望在前人研究的基础上能对数据中心设定参数与能耗的关系上进行一点较深入的讨论,为是否需要放宽数据中心环境要求限制提供一定的参考。

5.1 室内设定温度对于数据中心能耗的影响

5.1.1 定性分析

对于一般建筑来说,室内环境设定温度对于建筑能耗的影响主要有两方面:

1) 直接影响室内的冷热负荷;

对于一般公共建筑来说,冷热负荷中的很大一部分是来自围护结构(墙体、门窗等)的传热负荷及新风带来的室外空气负荷。如图 5.1 为上海地区的某大型公共建筑的峰值冷负荷模拟计算结果,从图 5.1 中我们可以看到该建筑围护结构与新风负荷的和占总负荷的比重达到了 77%。而事实上,不管围护结构负荷还是新风负荷,均与室内设定参数特别是温度参数有关。

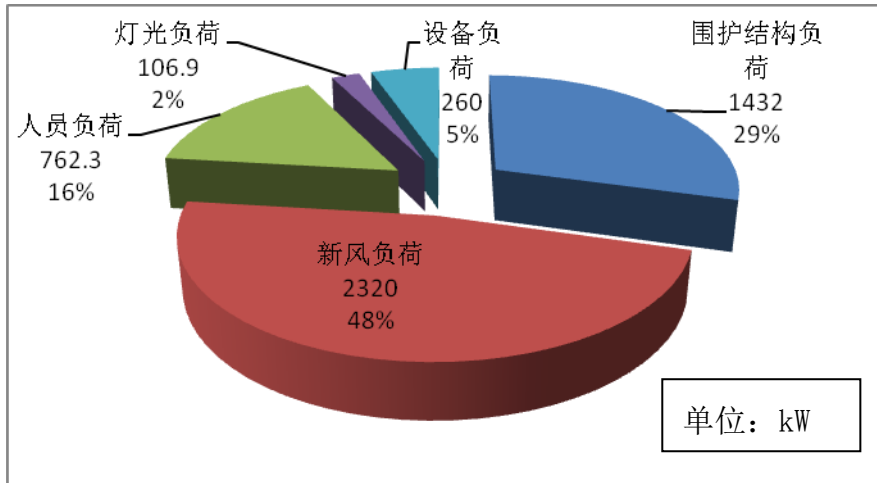


图 5.1 某大型公共建筑峰值冷负荷分项分布图

首先考虑围护结构负荷，我们知道围护结构负荷与室内设定温度及室外设计温度的关系大致如式 5.1 所述：

$$Q_{\text{envelope}} \propto |T - T_{\text{set}}| \quad (5.1)$$

其中 Q_{envelope} 为围护结构负荷，W；

T 为室外设计温度， $^{\circ}\text{C}$ ；

T_{set} 为室内设定温度， $^{\circ}\text{C}$ ；

其次考虑新风负荷，同样新风负荷与室内外环境参数的关系可由式表示：

$$Q_{\text{freshair}} \propto |h - h_{\text{set}}| \quad (5.2)$$

其中 Q_{freshair} 为新风负荷，W；

h 为室外设计焓值， kJ/kg ；

h_{set} 为室内设计焓值， kJ/kg ；

由式 (5.1) 和 (5.2) 可见，在室外设计参数不变的情况下，当室内设计参数放宽（夏季设定温度升高；冬季设定温度降低）时，带来的是负荷的直接减小。

以图 5.1 中的大型公共建筑为例，考虑将其夏季的设定温度由 26°C 提高到 30°C ，室内相对湿度保持 65% 不变；室外设计温度取上海地区夏季设计参数：干球温度 34°C ，湿球温度 28.2°C 。

则由式 5.1 和 5.2 可得围护结构和新风负荷分别减少了 50% 和 46.4%，而联系图 5.1 可计算出总冷负荷减少的比重将达到 36.8%。

2) 影响空调系统的效率

夏季室内设定温度的提高使得空调系统可以以较高的温度送风或送水而同样的冬季设定温度的降低也会降低送风或者热泵的送水温度，而空调系统热力循环的效率是与送水或送风温度是有关系的。

为定量说明，我们考虑夏季制冷工况，从热力学角度分析采用空气冷却的 R22 蒸汽压缩式制冷循环效率与送风温度的关系。如图 5.2 为制冷循环的压焓图。

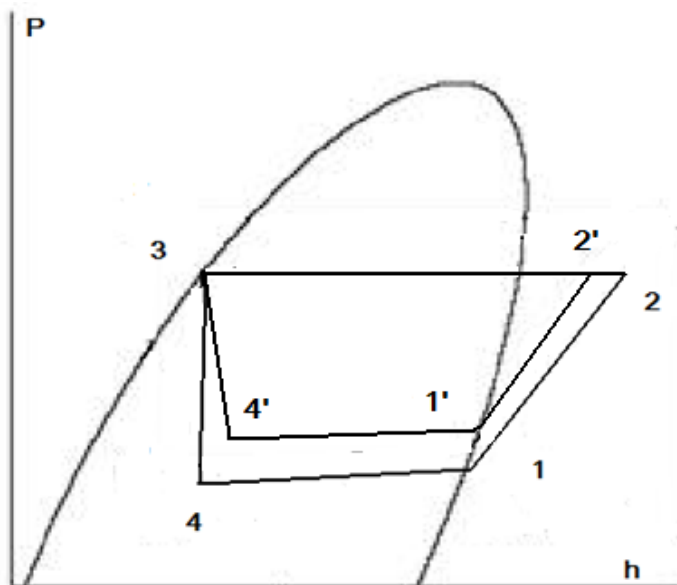


图 5.2 蒸汽压缩式制冷循环压焓图

图 5.2 中 1 点为压缩机入口状态点，2 点为冷凝器入口状态点，3 点为膨胀阀入口状态点，4 点为蒸发器入口点。

为简化计算，这里作如下假设：

- a 压缩过程为绝热过程；
- b 蒸发器和冷凝器冷剂温差均为 4℃；
- c 冷凝过程为定压过程。

考虑初始状态，室内设定温度为 23℃，送风温度为 12℃，室外干球温度为 34℃，则根据以上假设我们可以知道 1 点的温度为 8℃，3 点的温度为 38℃，由此结合 R22 压焓图可得各点对应的焓值。

而机组的制冷性能系数 COP 由式可计算得到：

$$\text{COP} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1} \quad (5.3)$$

式中， h_i 为第 i 点的焓值

当室内设定温度提高 1℃ 时，保持送风温差不变，则送风温度也上升 1℃，

则 1 点的温度上升 1℃ 状态（图 5.2 中的 1' 点）而室外干球温度不变的情况下 3 点状态不发生改变。假设保持制冷量不变，则 1 和 4 点的焓差不变，那么根据 1 点的状态结合蒸发器的冷剂温差就可以确定 4 点的状态（图 5.2 中的 4' 点）。而对于 2 点的状态，由于 1-2 为绝热过程，则由 1 点状态参数可以确定（图中 2' 点）。

按以上思路我们可以得到在室外温度为 34℃ 下制冷量不变的情况时 COP 与室内设定温度的关系如图 5.3 所示（以室内设定温度为 23℃ 时的 COP 为基准值）：

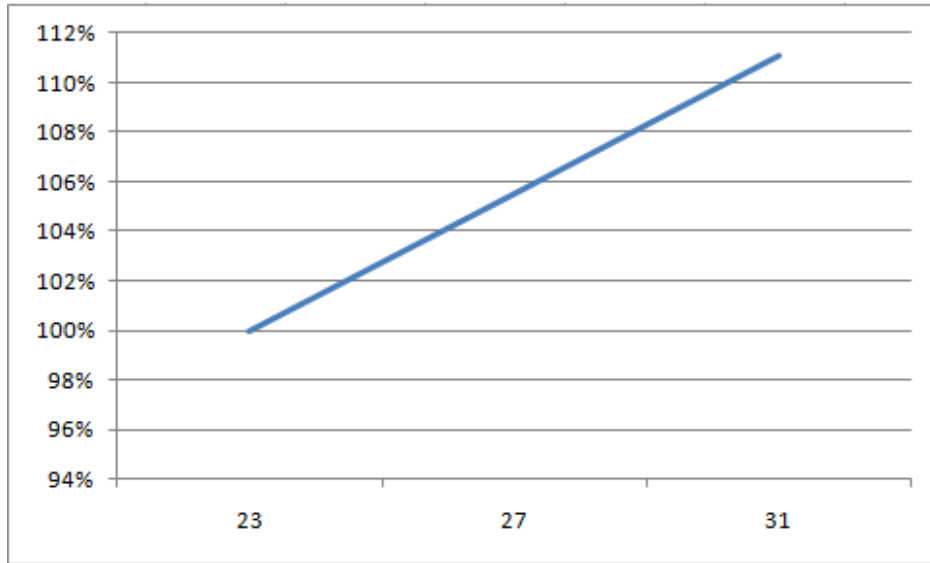


图 5.3 室外温度为 34℃ 时 COP 随室内设定温度变化的变化趋势图

同样我们也可以得到室外温度为 25℃ 时 COP 与室内设定温度的关系如图 5.4 所示：

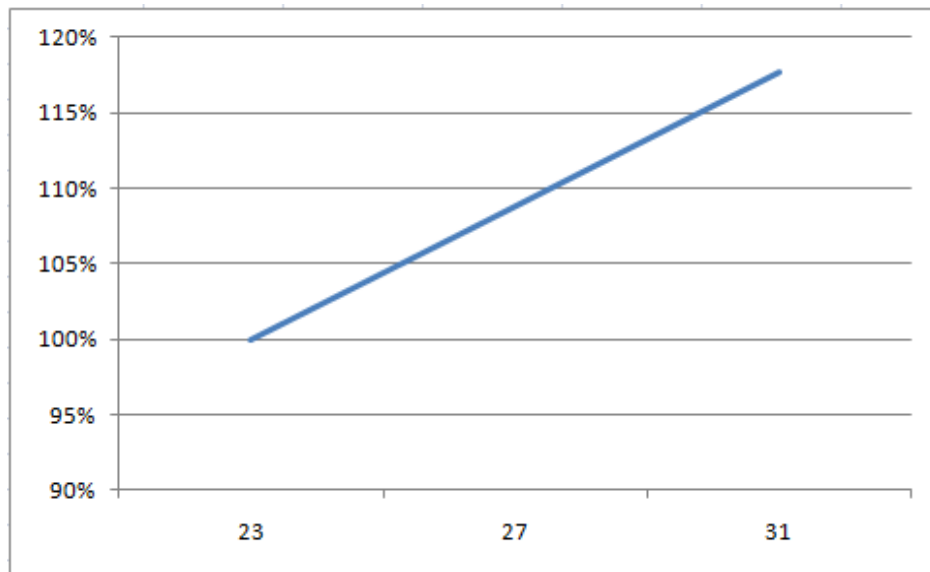


图 5.4 室外温度为 25℃ 时 COP 随室内设定温度变化的变化趋势图

从图 5.3 和 5.4 我们可以看

首先，从总体上看 COP 都是随室内设定温度的提高而提高的；

其次，从室外温度对 COP 提高的影响上看，室外温度越高，COP 提高的幅度约小：室外温度为 34℃时，室内设定温度提升 8℃时，COP 增加为 11%而室外温度为 25℃时则为 17%

以上的分析是从热力学理论的角度分析了 COP 和室内设定温度的关系，而实际的过程要比理论分析的复杂，在工程中往往是采用实验的方式来拟合出 COP 与其他参数的关系。不同种类、不同厂家的设备的效率与送水或送风温度的关系各不相同，在这里我们仅讨论夏季工况，取目前公共建筑常用的水冷冷机机组与末端直接膨胀式机组分别作说明。

首先考虑水冷冷水机组，在实际中，设备厂家往往将实验中得到的 EIR(Electric Input Ratio, 一般可认为是 COP 的倒数)与冷冻冷却水温度的关系拟合成如式 5.4 的二次曲线提供给用户参考：

$$F_{EIR} = a + bT_{cw} + cT_{cw}^2 + dT_{clw} + eT_{clw}^2 + fT_{cw}T_{clw} \quad (5.4)$$

其中 F_{EIR} 为 EIR 根据冷冻冷却水温的修正参数，将其与冷水机组在 ARI 规定条件下的 EIR 值相差即可得到在给定冷冻冷却水温下的机组 EIR 值；

T_{cw} 为冷冻水温度，℃；

T_{clw} 为冷却水温度，℃；

a、b、c、d、e 和 f 均为拟合曲线参数；

式 5.4 所表示的曲线不同厂家、不同的产品均存在一定差异，但都基本上符合下面的规律：即当冷却水温度不变时，EIR 修正参数基本随冷冻水温度升高而增加。在这里为定量说明，我们取能耗模拟软件 EnergyPlus 中自带的冷机 EIR 水温修正曲线，假定冷却水温度保持 29.4℃不变，将 EIR 修正转化为 COP 修正参数后与冷冻水温的对应关系以图 5.5 的形式表示：

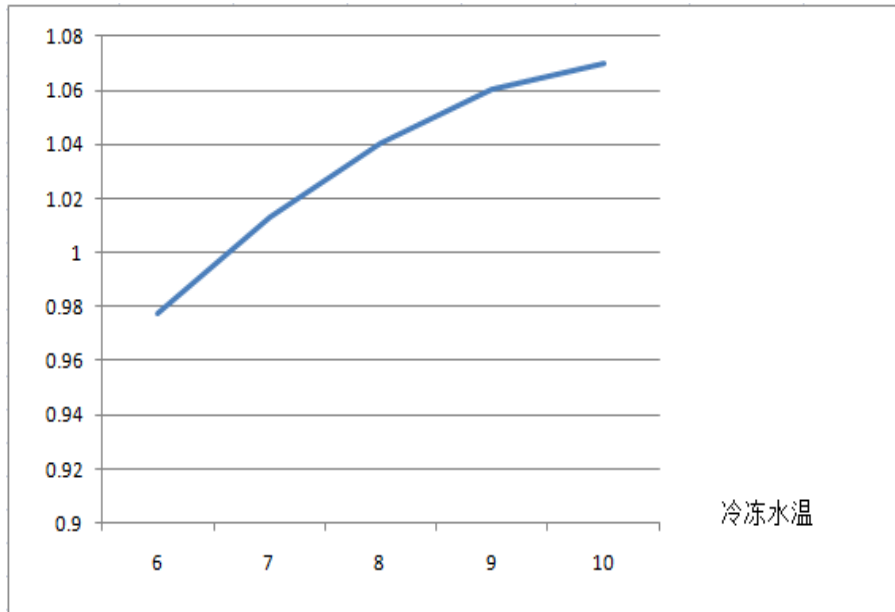


图 5.5 COP 修正参数在冷却水温不变的情况下与冷冻水温的关系

由图 5.5 我们可以看到，当冷冻水温取额定值 6℃时，修正参数基本为 0.977 而水温为 10℃时修正参数为 1.07，也就是说同样负荷情况下冷机能耗降低了 8.6%。当然在实际过程中冷却水的温度也会有变化，因此在具体讨论过程中需要结合冷却水温度变化来分析冷机效率与冷冻水温度的关系。

其次考虑直接膨胀式机组，该机组往往采用气冷的冷却方式，设备厂家提供的制冷效率曲线主要与室内湿球温度和室外空气干球温度有关，由式 5.5 式来表示：

$$F_{DXEIR} = C_1 + bT_w + C_2T_w^2 + C_3T_{dt} + C_4T_{dt}^2 + C_5T_wT_{dt} \quad (5.5)$$

其中 F_{DXEIR} 为直接膨胀式机组 EIR 根据室内湿球温度与室外空气干球温度的修正参数，将其与机组在 ARI 规定条件下的 EIR 值相乘即可得到在室内湿球温度与室外空气干球温度的机组 EIR 值；

T_w 为室内湿球温度，℃；

T_{dt} 为室外空气干球温度，℃；

C_i 等均为拟合曲线参数；

这里同样取能耗模拟软件 EnergyPlus 中自带的单速直接膨胀式盘管的室内温度修正曲线，假定室外干球温度保持上海地区室外夏季设计干球温度 34℃ 不变则将 EIR 修正转化为 COP 修正参数后与室内湿球温度的对应关系以图 5.6 的形式表示：

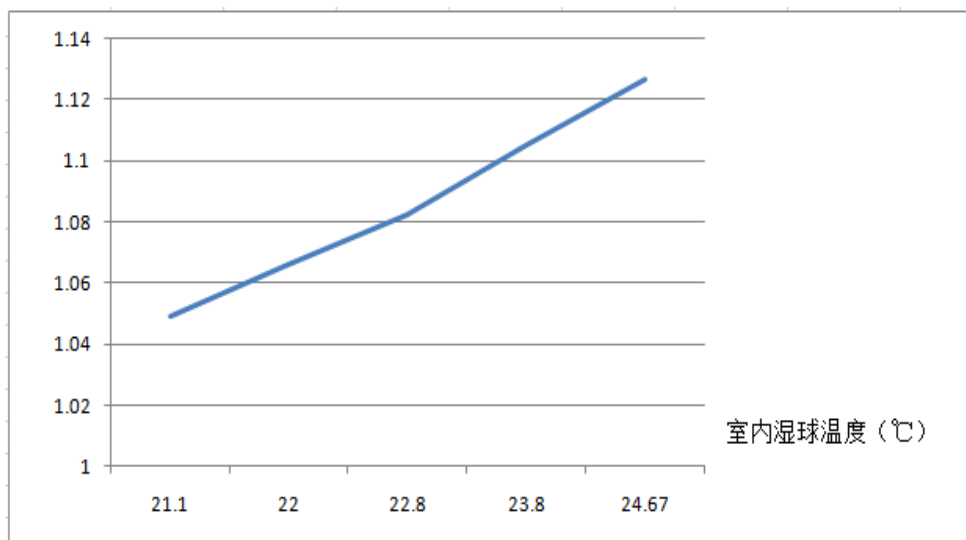


图 5.6 COP 修正参数在室外干球温度不变的情况下与室内湿球温度的关系

假设室内保持相对湿度 65% 不变，则干球温度与湿球温度有一一对应的关系，则图 5.6 可转为图 5.7:

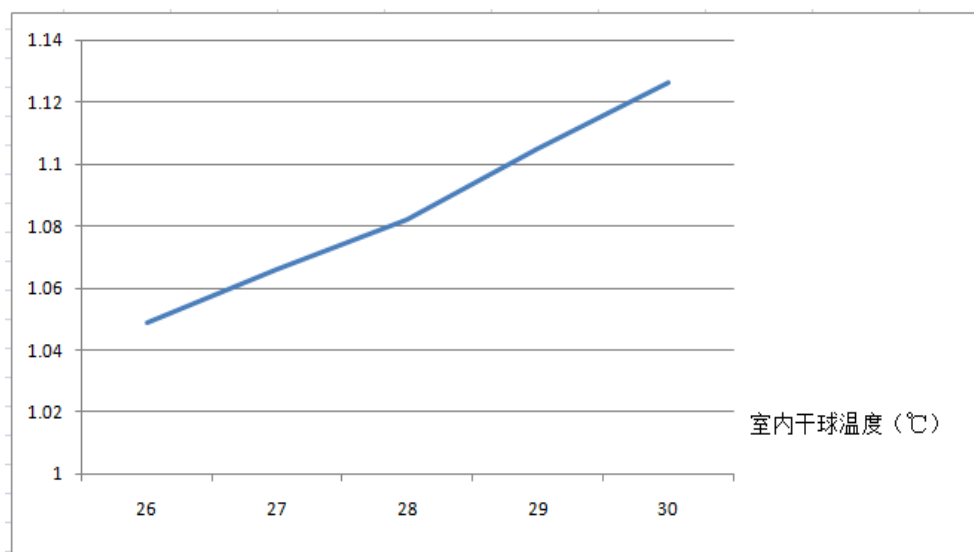


图 5.7 COP 修正参数在室外干球温度不变的情况下与室内干球温度（相对湿度不变）的关系

由图 5.7 我们可以看到当室内设定温度为 26°C 时，COP 修正参数为 1.05，室内设定温度为 30°C 时，COP 修正参数为 1.12，也就是说室内温度提高到 30°C 后同样负荷情况下机组能耗降低了 6.25%。这里同样也要指出的是室外温度在全年变化较大，因此在讨论全年制冷能耗变化时应结合室外参数具体分析。

以图 5.1 中的大型公共建筑为例来综合量化分析提高设定温度对于冷机能耗的影响。假设其室内设定温度从 26°C 提高到 30°C，这样冷冻水温度可以从 6°C 提高到 10°C。从估算的角度我们假定冷却水温度保持不变，这样根据图 5.5 我

们可以得到冷机的 COP 提高量为 9.5%，联系前面计算的负荷减少量则可以得到提高 4℃后冷机能耗的减少量为 42.2%，由此可得对于该建筑来说提高 1℃带来的冷机能耗减少为 12.8%。

对于建筑的制热能耗，降低其设定温度对其影响与制冷能耗相类似，这里就不再赘述。

由以上分析我们量化分析可以发现：室内设定温度对于建筑能耗的影响主要是体现在对于室外负荷的减少上，而对于空调机组的提高来说效果相对不是很明显，因此室外负荷占总负荷比重越大的建筑采用这种方法所能得到的节能效果越好。对于该类建筑来说，如果不考虑人的舒适性的话，放宽设定温度是一种最简单且有效的方法。

而对于数据中心来说，这种方法是否也有效呢？我们来分析一下数据中心的负荷特点：

首先考虑数据中心总负荷特点，

由于数据中心一般来说均是全年运行的，其设备散热量十分惊人，因此除了部分气候较寒冷的地区，一般来说数据中心只考虑冷负荷而不考虑热负荷。

其次考虑数据中心室外负荷占总负荷的比重：

由前面的章节分析我们知道在数据中心，室外负荷和设备负荷相比基本上是可以忽略不计的，因此提高数据中心设定温度值对于其总负荷来说基本可以认为没有影响。

再次考虑数据中心的室内负荷。

在一般的公共建筑中，室内负荷是与室内外设计参数无关而数据中心则不同：由于数据中心的设备一般均为计算机，而计算机其主要耗能部件——CPU（中央处理器）其耗电是与环境温度有关的。

温度对 CPU 能耗的影响主要体现在其对于热诱导泄露（thermal induced leakage）的促进作用。事实上很多文献都讨论过如何通过消除热点来减少热诱导泄露的发生。在 CPU 发展的初期（0.35—0.18 微米时代），这种热诱导泄露引起的能耗损失是占总能耗较小的部分。随着大规模集成化的发展，电子元件的体积愈发地缩小，因而导致泄露通道进一步缩小进而使得热诱导泄露发生愈加频繁。文献[34]指出目前服务器中的 CPU 因泄露导致的能耗已经占到其总能耗的 50%。而文献[35]则认为由于电子元件体积缩小化的不可避免，目前的 CPU 设计人员最大的挑战正是如何将泄露导致的能耗保持或降低到总能耗的 50%。综合以上的分析我们知道 CPU 这部分因为热诱导泄露导致的能耗不容忽视。

而温度与热诱导泄露到底是什么关系呢？对于该问题的深入讨论显然已经超出了本文的研究范围，这里仅仅摘取一些研究人员的研究进展：Fallah[36]提

供的一幅图显示在多处处理器的服务器中温度每升高 1℃，泄露能耗就会增长 2% 而 Mukerjee[37]则宣称其通过降低机柜热点温度 12℃而使得泄露能耗降低了近 12%。由此我们看出热诱导泄露确实与温度有很大的关系，而总体的趋势是温度越高，热诱导效应则越明显。

总结以上的分析结合之前的分析，我们可以看出：

1) 对于数据中心来说，放宽室外设定温度范围主要意味着提高其制冷设定温度；

2) 提高房间设定温度对于数据中心来说并不一定降低总冷负荷，相反还可能提高；

3) 提高房间设定温度对于数据中心来说，唯一可确定积极的影响就是对空调机组制冷效率的提高。

5.1.2 定量分析

为了对提高房间设定温度对于数据中心能耗的影响有较为定量的分析，这里考虑采用能耗模拟的方法来进行研究。

模拟对象选取之前调研的数据中心，模拟工具选用能耗模拟软件 eQuest 3.61e，基本的思路为在实测数据的校正下建立该数据中心的能耗模型作为基准模型，再在基准模型的基础上调整室内设定参数以建立比较模型，最终通过将比较模型的能耗结果与设计模型比较以获得对前者的评价。

5.1.2.1 模拟假设

在建立模型之前，有如下假设：

1) IT 设备能耗全年 24 小时恒定功率运行，其功率取测量得到的平均值；

考虑到目标数据中心为期货交易机房，其期货交易时间为上午 9:00 到下午 3:00，其它时间为待机时间，因此其功率在一天中可能会有变化，然而在缺乏相应数据支持的情况下在本次研究忽略这种变化以方便建模。

2) 认为该数据中心的室外负荷为 0；

之所以会有该假设主要是基于以下的考虑：

首先，在本次模拟中主要考虑的因素是设备和空调系统能耗随着室内设定温度的变化，室外负荷相对来说是一种干扰量。

其次，考虑该数据中心的实际情况：处于建筑内区，四周均为办公空调区域且没有新风系统，因此室外负荷很小，相对于其较大的室内负荷可忽略不计。

3) 室内负荷与温度的关系按如下流程处理：

首先假设该数据中心 UPS 及电源输送系统(PSU)的效率分别为 0.85 和 0.8，且不随温度改变而改变。这样根据实测的数据中心设备能耗按式 5.6 可算出服务

器实际能耗为 $225.78\text{W}/\text{m}^2$

$$Q_{\text{sever}} = Q_{\text{equip}} \eta_1 \eta_2 \quad (5.6)$$

其中 Q_{sever} 为服务器能耗， W/m^2 ；

Q_{equip} 为实测的设备能耗， W/m^2 ；

η_1 为 UPS 效率；

η_2 为 PSU 效率

接着按文献[38]中实测结果取CPU能耗为服务器能耗的 1/3 为，而按文献[2]可得CPU能耗与温度的关系如式 5.7：

$$Q_{\text{CPU}} = \mu Q_{\text{CPUM}} (1 + \beta)^{(T-T_0)} + (1 - \mu) Q_{\text{CPUM}} \quad (5.7)$$

其中 T 为服务器温度，这里取为房间设定温度， $^{\circ}\text{C}$ ；

T_0 为参考温度，这里取测试数据中心的夏季设定温度 25°C ；

μ 为泄露系数，表征 CPU 能耗中泄露能耗占总能耗的比重，考虑到最高可能为 50%，这里取 25%；

β 为泄露能耗随温度上升的变化率，取 0.02；

Q_{CPUM} 为按实测结果计算得到的 CPU 能耗，取 $75\text{W}/\text{m}^2$ ；

Q_{CPU} 为当前服务器温度下的 CPU 能耗；

结合式和，可得设备能耗与温度的关系如下式 5.8：

$$Q_{\text{equ}} = 3 \frac{\mu Q_{\text{CPUM}} (1 + \beta)^{(T-T_0)} + (1 - \mu) Q_{\text{CPUM}}}{\eta_1 \eta_2} \quad (5.8)$$

其中 Q_{equ} 为当前服务器温度下的设备能耗， W/m^2 。

5.1.2.2 模型建立与结果分析

1) 基准模型建立与校正

在以上假设的基础上，建立相应的能耗模拟模型。所建立的模型按实际尺寸设置为 $20 \times 15\text{m}$ 的长方体 zone，为了消除室外负荷的影响，在该房间的上下左右六个面均设置相邻 zone，而该房间与相邻 zone 的内墙均设为绝热。这样实际建立的房间模型为三层建筑，而所研究的房间处于该建筑的二层的内区。如图 5.8 和 5.9 所示：

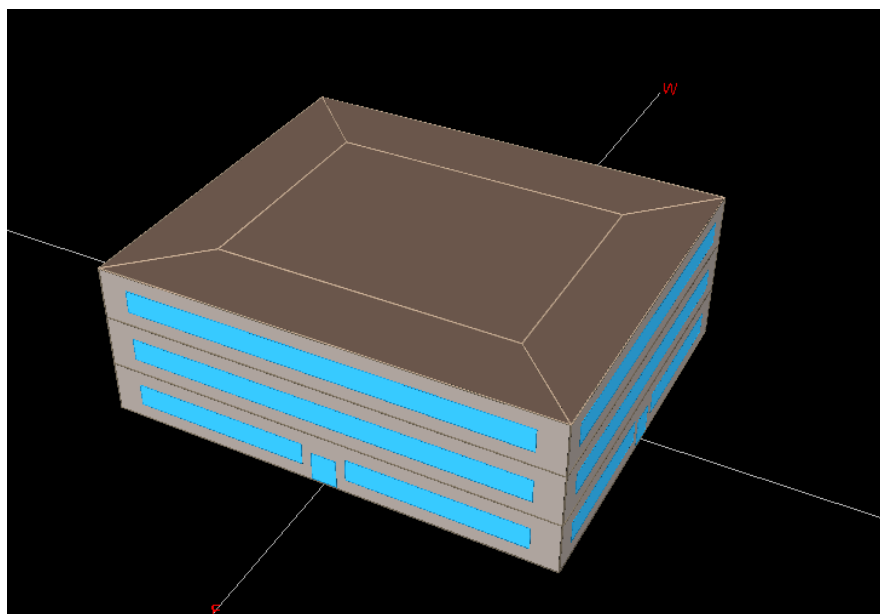


图 5.8 数据中心能耗计算模型的 3 维示意图

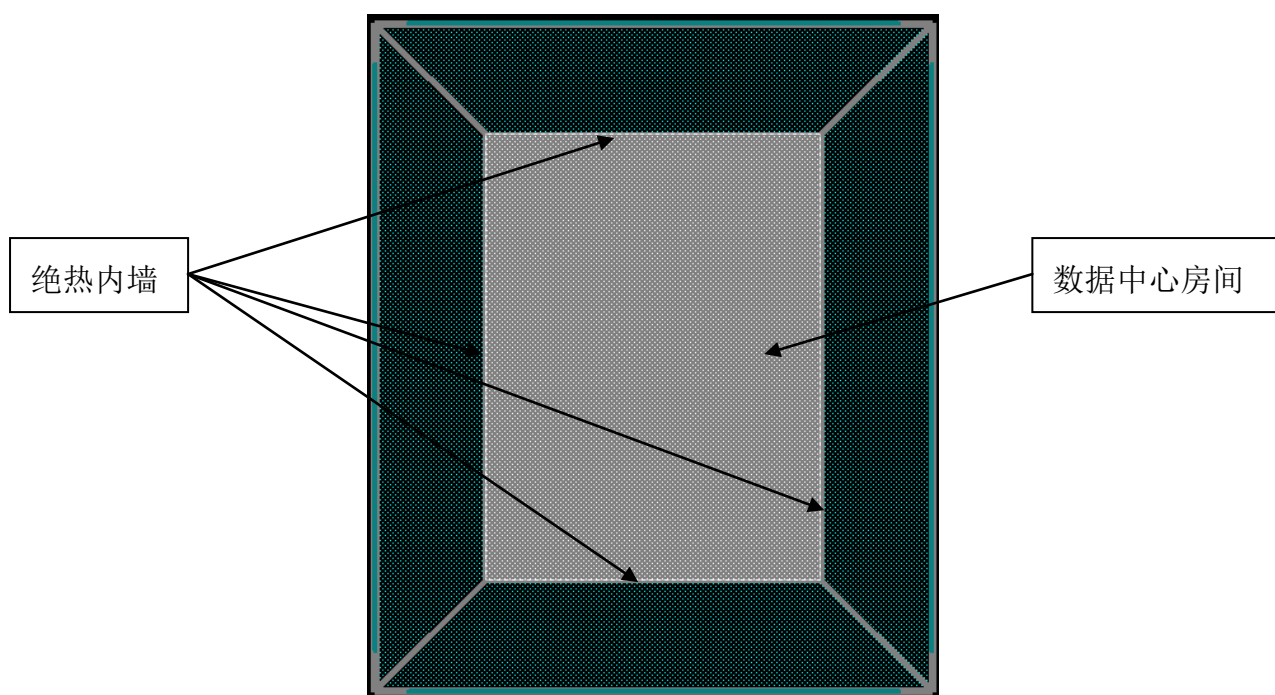


图 5.9 数据中心房间所在二层平面

表 5.1 数据中心能耗计算基准模型输入参数表

类别		说明
围护结构		屋顶、墙等均设为绝热
室内负荷	设备负荷	按实测结果设置为 332W/m ²
	照明负荷	按实测结果设置为 21W/m ²
空调系数	空调类型	选用与精密空调相类似的 Terminal AC 全年运行，各性能曲线取软件默认值
	冷源设置	选取单速直接膨胀式机组，其容量由软件 自动选型并根据与实际结果比较进行调整 后得到
	风机设置	取实际风机风量和功率的额定值，4 台机组 总风量为 69200m ³ /h 而功率为 30kW
设定参数	送风设定温度	12℃
	室内设定参数	23℃

如表 5.1 为基准模型的输入参数，如图 5.7 为模型的计算结果与实测结果的对照：

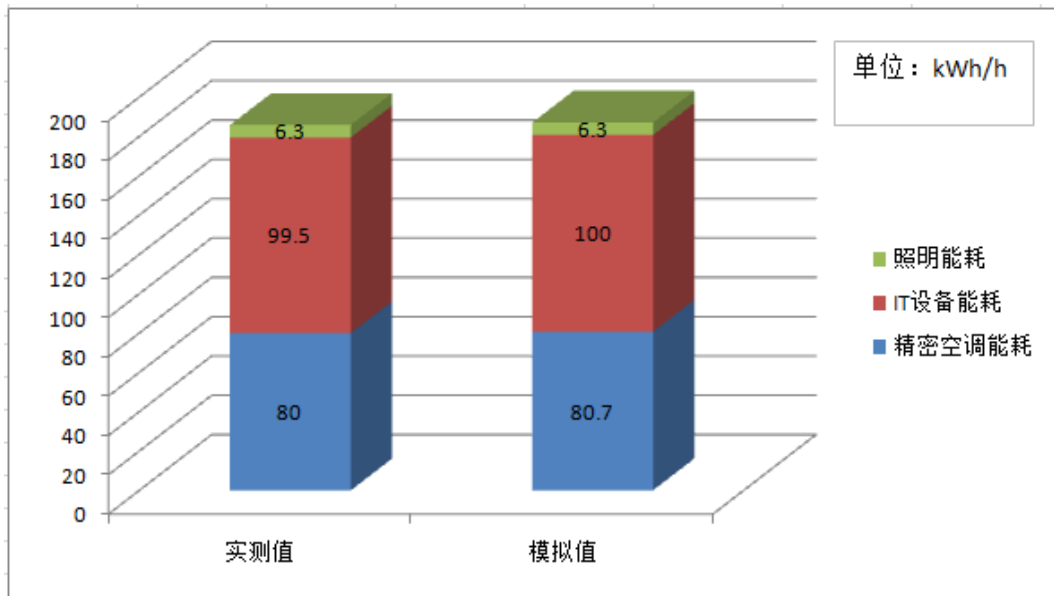


图 5.10 数据中心基准模型结果与实测值对照

如图 5.10，基准模型各部分能耗结果与实测值误差均在 5% 以内，基本达到精度要求，可以将基准模型作为下一步能耗分析的基础。

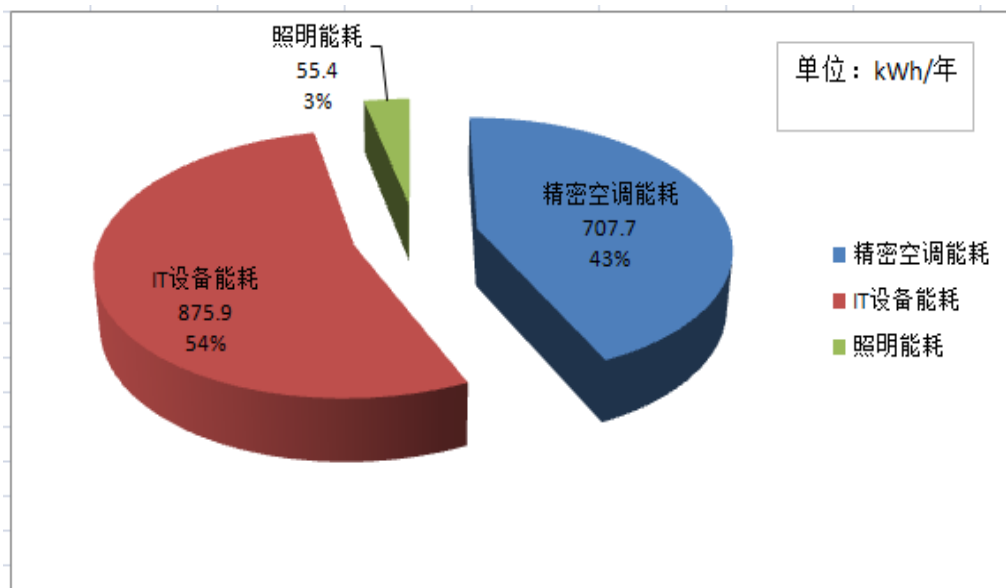


图 5.11 数据中心模拟分项建筑能耗

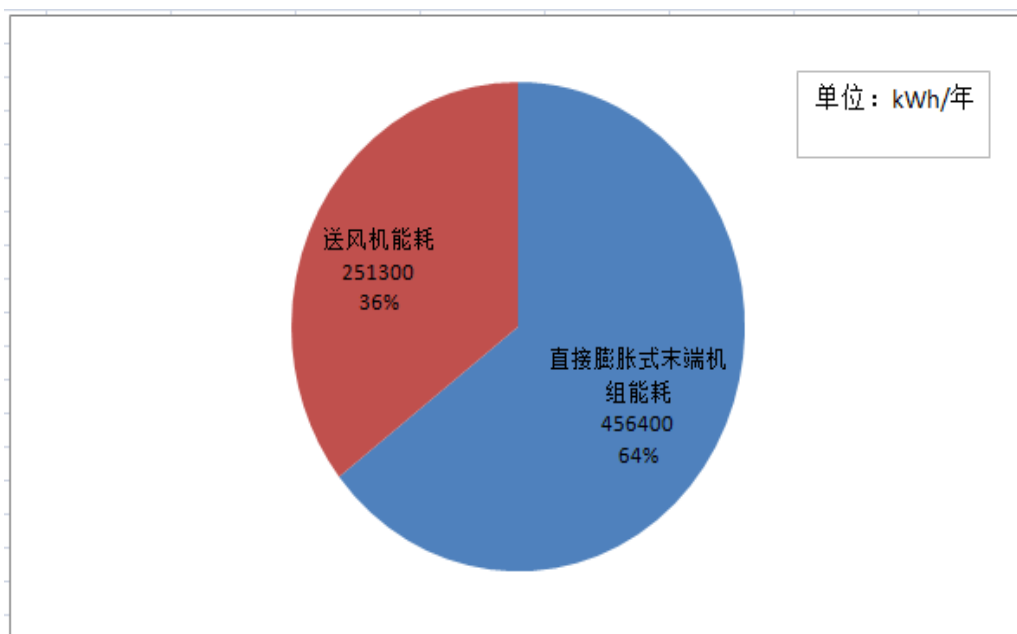


图 5.12 数据中心模拟空调系统分项能耗值

图 5.11 和 5.12 为数据中心全年能耗的情况，模拟得到的 PUE 值为 1.87，与实测的 PUE 值（1.87）相吻合。

2) 比较模型建立

在建立比较模型之前，首先要明确室内设定温度的变化范围，由于数据中心室内设定参数会影响到 IT 设备的工作，因此在讨论提高室内温度设定值之前

需要明确一个前提：不能超出目前规范中要求的温度设定范围，否则以设备工作可靠性作为牺牲的节能对于数据中心来说是没有意义的。

从表 2.1 我们可以看出 TIA-942 规范中要求的数据中心温度设定值是 22℃，可容许的范围为 20-25℃，而 ASHRAE 规范所给出的范围则相对较宽一些，上限为 32℃。在这里我们综合考虑规范的要求和数据中心实际设置，确定本次估算所选取的室内温度设定值范围在 23℃到 31℃（取 1℃的控制精度），其中以 23℃的状态为基准状态。

则比较模型各输入参数汇总如表 5.2 所示：

表 5.2 数据中心能耗计算比较模型输入参数表

类别		说明
围护结构		与基准模型相同
室内负荷	设备负荷	按所取的室内设定温度结合式 4-7 获得
	照明负荷	与基准模型相同
空调系数	空调类型	与基准模型相同
	冷源设置	与基准模型相同
	风机设置	与基准模型相同
设定参数	送风设定温度	保持基准模型中送回温差不变；
	室内设定参数	分别取 24℃、25℃、26℃、27℃、28℃、29℃、30℃和 31℃

根据以上输入可得模拟结果如图 5.13 及 5.14 所示：

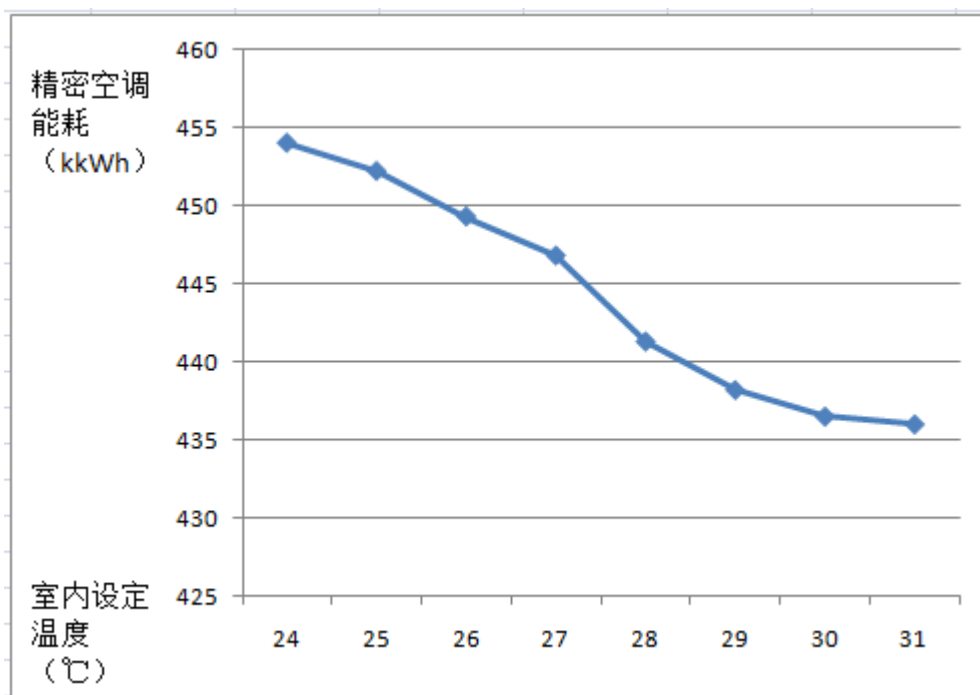


图 5.13 精密空调能耗与室内设定温度的关系

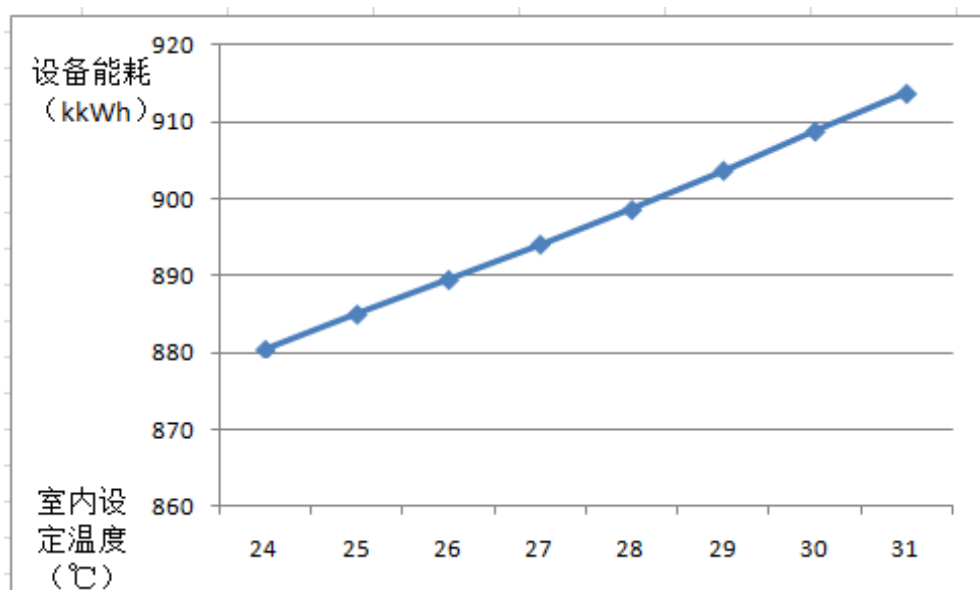


图 5.14 设备能耗与室内设定温度的关系

通过分析图 5.13 和 5.14，我们知道，随着室内设定温度的提高，精密空调的能耗总体的趋势是减少的，然而这种变化率是随着温度的升高而降低的；而另一方面设备的能耗却随着室内设定温度的提高是几乎成线性的关系增加。不管是 IT 设备还是制冷能耗，从相对量上说变化都不是很大，如空调能耗在室内设定温度从 23°C 变化到 31°C 仅仅变化了 4% 而 IT 设备能耗的变化也只有 3.9%，因此提高室内设定温度对于数据中心的能耗来说影响十分有限。

需要说明的是,在此次模拟中由于受到所掌握的资料的限制,在很多环节上均采用简化的方式,比如说 COP 与室内设定参数的关系采用的是软件自带曲线而非精密空调的性能曲线,因此并不能保证在定量上能做到精确。

5.1.3 关于改变数据中心室内设定温度的一些思考

以上的分析仅仅是从能耗的角度对改变数据中心室内设定温度影响进行了分析,而事实上室内设定温度不仅影响数据中心的能效,而且会影响到其他方面,如对电子元件的可靠性的影响。虽然目前还没有得到室内温度与电子元件可靠性关系的确切描述,但文献[34]指出基本上所有有关电子元件可靠性的物理模型均将室内温度作为一个重要的参数,同时工程上的经验显示 8℃ 的温升将带来电池寿命的减半。

因此盲目地提高数据中心的设定温度,不仅对于节能来说意义有限同时对于设备的正常运行也是一种威胁。当然这并不是说数据中心目前的设定温度是合理的,没有进一步改进的余地,就笔者的观点来说,目前数据中心设定温度下限可以考虑降低。

我们知道,IT 设备的电功率是和其承担的负荷相关的,一个 CPU 使用率为 100% 的机柜和一个 CPU 使用率为 10% 的机柜其能耗显然是不一样的,因此数据中心的冷负荷是根据承担的工作量不同而变化的,当然数据中心所承担工作种类不同其负荷变化的幅度也不相同。联系前面章节所提到的期货公司数据中心,在期货业务交易时间(即上午 9 点到下午 3 点)各服务器基本是满负荷运行而在此时间段以外的时间各服务器实际上是处于待机状态。

而另一方面目前全年运行的数据中心为保证气流分布,普遍采用的是定风量的运行方式且一般来说都缺乏无极调供的能力,除了采用使用中央冷水机组提供冷源的机组以外往往都是通过设置多个压缩机的形式来进行部分负荷调节,末端机组对于送风温度的上调一般都是通过电再热的方式。在这种情况下就有可能发生如下情况:一些机柜在部分负荷下散热减小,导致回风温度下降,当低于某个温度时空调机组在缺乏容量调节能力的情况下只能通过再热的方式满足设定参数,这样冷热抵消显然带来了能源浪费。而更令人担心的是由于精密空调是机组独立控制的,在回风自由回流的情况下,有可能会出现加热与制冷的抵消:即当一台 IT 设备回风温度过低导致附近的精密空调加热,而这样会引起其他机柜的送风温度升高进而导致其他机组的回风升高,进而导致其他的精密空调加大制冷量,在相互促进的作用这个问题对于数据中心的能耗必然产生较大的影响。虽然以上描述的情况并没有得到现实的证明,但不可否认在目前的设置情况下确实会有这种现象的发生。

当然，需要承认采用回风混合后再送入机组处理在某种程度上其实可以减少这个问题发生的可能性，但透过这种问题值得我们思考的是 IT 设备环境温度要求的下限需要这样苛刻吗？

对于过低的温度对设备的影响的细节分析显然已超出了本文的讨论范围，就目前的研究结果来说主要是认为低温会对于硬盘、光驱中的电机、读写磁头摆臂，及系统散热风扇轴承等机械部件的启动和运转有着相当大的不利影响，但实际上这种影响在常温范围内（18-20℃）是相对来说比较小的。事实上，对于数据中心来说，温度升高带来的现实危害要远大于温度下降。笔者认为数据中心空调系统设计的主要任务应该是如何尽快地将机柜中散发的热量移除，而较高的温度下限设置却使得空调系统在部分负荷时段采用能源利用效率最低的电加热的方式来对数据中心供暖，这显然是荒谬的。不仅如此，过高的温度下限也不利用机柜的快速散热，而另一方面也极大限制了气侧节能器的使用。事实上这个问题已经引起了相关学者的注意，一些相关工作也在开展中，如 ASHRAE2008 版的 *Environmental Guidelines for Datacom Equipment* 就将 04 版本中规定的数据中心温度下限要求由 20℃ 下降到了目前的 18℃。但这个问题的根本解决还是要依赖 IT 设备厂家对设备运行的环境要求做更进一步的研究以明确其实际的要求而不是简单地给予一个含糊的安全范围，只有需求明确的基础上才能在保证设备安全运行的前提下达到节能要求。

5.2 数据中心室内湿度要求与提高数据中心能效

相对于设定温度，数据中心的湿度设定问题更引人关注，与数据中心湿度处理相关的“控制冲突”问题屡屡出现在各种文献中。在本小节中，笔者将试图就节能的角度对数据中心的湿度控制作一定的分析。

1) 数据中心的湿负荷分析：

在讨论数据中心湿度要求之前，有必要对其湿负荷特点作一定的了解。对于一般建筑来说，湿负荷主要有以下来源：

一部分来自室外，主要分为三种：一种为新风所带来的湿负荷，这部分负荷有可能为加湿也有可能为除湿负荷；一种为室外渗透所带来的湿负荷，这部分基本上与新风的性质相同，只不过新风往往是在空调箱中得到处理而这部分负荷的处理是在房间中。

另一部分来自室内，主要包括人员、建筑设施如游泳池等及设备如烹饪、等的散湿，这部分负荷主要是除湿

而对于数据中心来说，由于数据机房往往处于建筑内区，很多都没有新风系

统，因此基本没有来自室外的湿负荷，另外由于数据中心中人员活动较少，主要放置的设备都没有散湿的需求，所以也不存在一般意义上的室内湿源。实际上，工程上经验显示数据中心可能的湿度来源主要是与相邻房间的渗透导致的湿传递，但部分湿传递的量也相对比较小，在空调选型计算时一般也是忽略不计。也正是因为数据中心这个特点，为效率考虑，数据中心的空调系统往往很强调高显热比，在送风设计也要求低焓差以防止室内空气水分因冷却析出。

综合以上的分析，我们可以知道数据中心相对于普通建筑来说湿负荷很小，理论上正常运行状态下其湿度水平应保持稳定。

2) 数据中心湿度控制

由前面的分析我们知道数据中心基本是不存在室内外湿源的，那为什么还要对其湿度进行控制呢？要解释这个问题，我们首先要了解数据中心目前所采用的湿度控制方法。目前数据中心在湿度方面主要是控制相对湿度，而我们知道相对湿度是与温度相关的。以绝对湿度为 8.25g/kg 为例，如图 5.15 为同一绝对含湿量下不同干球温度时对应的相对湿度。

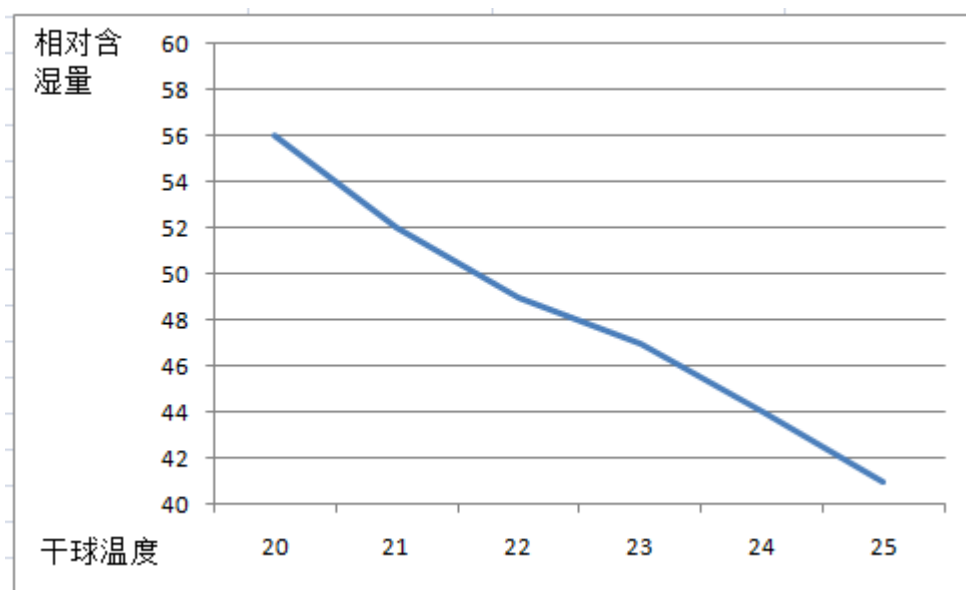


图 5.15 同一绝对含湿量下不同干球温度对应的相对湿度

从图 5.15 中我们可以看到同一含湿量下，干球温度变化 5℃ 的情况下相对湿度从 55% 减低到了 41%。因此当室内温度发生变化的时候，即使房间内绝对湿度没有变化但相对湿度也有可能发生较大的变化，而数据中心空调湿度控制所主要处理的也就是这部分的变化。

之所以数据中心控制相对湿度而不是绝对湿度主要是因为之前的一些研究都表明相对适中的相对湿度对于设备的正常运行十分关键。对于大规模集成电路的大量可靠性试验证明导电阳极丝 Conductive Anodic Filament (CAF) 生成与相

对湿度有密切的联系。所谓导电阳极丝是指当板面两条线路或板中两个镀通孔相距太近时，一旦板材吸收水气较多，相邻铜线或孔壁其正负电极间会顺着玻纤纱的表面出现电子迁移的绝缘不良的现象，这种现象会引起漏电而导致严重的事故。事实上，随着电子元件体积的日益缩小，电子迁移的路径也越来越短，CAF 发生的几率也越来越高，实践证明如果设备附近的空气相对湿度长时间高于 60% 就会导致 CAF 现象的产生。另外较高的相对湿度也更容易在金属表面形成凝结而形成水膜，这种水膜很容易与空气中污染物结合造成对金属的电化学腐蚀，这对于设备的正常运行显然也是非常不利的。而相对湿度太低又容易引起静电产生，相对之前所提到的故障，静电对于设备的危害要更严重，有的时候甚至是完全毁坏设备。正是考虑到以上的情况，工程上一般取 40%-55% 作为可容许的相对湿度的容许的范围。

然而控制相对湿度在数据中心运行实践中有着很多的问题。由于相对湿度与温度的耦合性，当数据中心室内温度分布不均匀时，各处的相对湿度也相应的发生偏差。部分温度较高的地区其相对湿度会发生下降，一旦低于了要求的下限就会引起其附近的精密空调进行加湿处理，加湿处理的结果当然是提高了整个数据中心的相对湿度水平，部分地区可能会达到要求相对湿度上限，这样又会引起这附近的精密空调进行除湿处理，除湿处理又会使得数据中心整体相对湿度下降，又可能使得部分区域相对湿度落到要求的下限以下，于是新一轮加湿和去湿的循环又将开始。这种过程的最终的结果就是导致同一机房部分精密空调一直处于加湿状态而部分则又一直处于去湿状态，这就是所谓的数据中心“控制冲突”，而这种现象正是相对湿度的控制使得数据中心空调系统的控制变得复杂的必然结果。从前面的分析我们知道在不考虑渗透的情况下，数据中心本身是不存在任何室内外湿源的，由于冷却制冷带来的湿度损失，其绝对湿度下降的危险要远大于湿度上升，因此理论上来说数据中心只有加湿的需求，而相对湿度的控制要求却使得数据中心也存在了除湿的要求。而我们知道空调机组在除湿的工况下由于送风温度很低因此效率要远低于显热制冷工况，因此除湿实质上带来机组能耗的增加。综合以上分析，我们可以得出如下的结论：相对湿度的控制方式对于数据中心来说一种既复杂且又耗能的湿度控制方式。

事实上，一些学者已经开始注意到数据中心相对湿度控制在实际中所暴露出来的问题，有些研究人员针对相对湿度随温度变化较大的特点提出将绝对湿度辅助相对湿度控制来调节数据中心湿度水平，这其中的工作以 ASHRAE TC9.9 委员会所作的工作最为突出。该协会在对 2004 版的 ASHRAE Environmental Guidelines for Datacom Equipment 的修订中提出将数据中心湿度下限由相对湿度规定修正为绝对湿度控制而湿度上限则由相对湿度规定改为绝对湿度和相对湿

度共同决定，如表 5.3 所示：

表 5.3 2004 及 2008 版 ASHRAE Environmental Guidelines for Datacom Equipment 湿度要求对比

	2004 版本	2008 修订版本
湿度下限要求	40%RH	5.5°C DP
湿度上限要求	55%RH	60%RH / 15°C DP

其中对于湿度下限的修改主要基于 Montoya[39]的研究发现：静电电压是绝对湿度而非相对湿度的函数。但是 TC9.9 也承认目前对于静电与空气湿度之间关联的机理研究还没有得到令人满意的结果，因此目前给出的结果仅仅能保证设备正常运行而并非技术上的极限。因此笔者认为这个问题的根本性突破仍然要依赖于对 IT 设备运行环境要求的基础研究进一步开展。

总结以上论述，目前数据中心所采用的相对湿度控制是一种很不节能的湿度控制方式，采用绝对湿度或者绝对湿度及相对湿度混合控制是一种较为可能的节能替代方案。

5.3 数据中心室内设定参数与气侧节能器

在本小节，笔者主要试图对中国各个气候区域数据中心不同的室内设计参数下气侧节能器的可利用小时数作定量分析，以期为后续研究提供参考。

1) 典型城市与天气文件选取

在暖通专业中根据是否有采暖或供冷需求将中国各地区分为了严寒地区、寒冷地区、夏热冬冷地区及夏热冬暖地区。在本文中为分析方便在以上各区中各选择一个城市作为代表该区的典型城市，具体如表 5.4 所示：

表 5.4 中国各气候区典型城市表

气候分区	典型城市
严寒地区	哈尔滨
寒冷地区	北京
夏热冬冷	上海
夏热冬暖	广州

另外，在这里同样也选择中国典型气象年气象参数文件来对各城市的干湿球温度的进行统计分析。

2) 数据中心室内设定参数选取

本次研究中主要通过分析不同的数据中心室内设定参数对于节能器全年可利用时间来研究前者对节能器使用的影响，这里选取 TIA-942 规定作为基准模型，将改变其干球温度及湿度设定范围后得到的气侧节能器可利用小时数与基准情况进行比较来评价改变不同的参数后对于节能器可利用小时数的影响，具体如下表 5.5:

表 5.5 气侧节能器可利用性分析模型概述

基准模型	模型 1	模型 2	模型 3	模型 4
室内设定参数按 TIA-942 要求选取	将 TIA-942 规定的房间干球温度上限提高 1℃，其它不变	将 TIA-942 规定的房间露点温度下限降低 1℃，其它不变	将 TIA-942 规定的房间露点温度上限提高 1℃，其它不变	TIA-942 规定的房间干球温度上限提高 1℃，房间露点温度上下限分别拓展 1℃

3) 气侧节能器可利用条件分析

对于气侧节能器来说，由于是将外界空气直接引入室内制冷，因此要求外界空气首先温度至少要低于室内设定温度上限；其次绝对湿度要在设定范围内，结合表 5.5 可得各模型中具体的要求如表 5.6 所示：

表 5.6 不同室内设定参数下数据中心气侧节能器可利用条件

	基准模型	模型 1	模型 2	模型 3	模型 4
温度要求	小于 25℃	小于 26℃	小于 25℃	小于 25℃	小于 26℃
湿度要求	露点温度大于等于 6.1℃且小于等于 15℃	露点温度大于等于 6.1℃且小于等于 15℃	露点温度大于等于 5.1℃且小于等于 15℃	露点温度大于等于 6.1℃且小于等于 16℃	露点温度大于等于 5.1℃且小于等于 16℃

4) 结果与分析

结合典型城市的天气文件及表中要求可得不同室内设定参数下各城市气侧节能器可利用小时数如图 5.13:

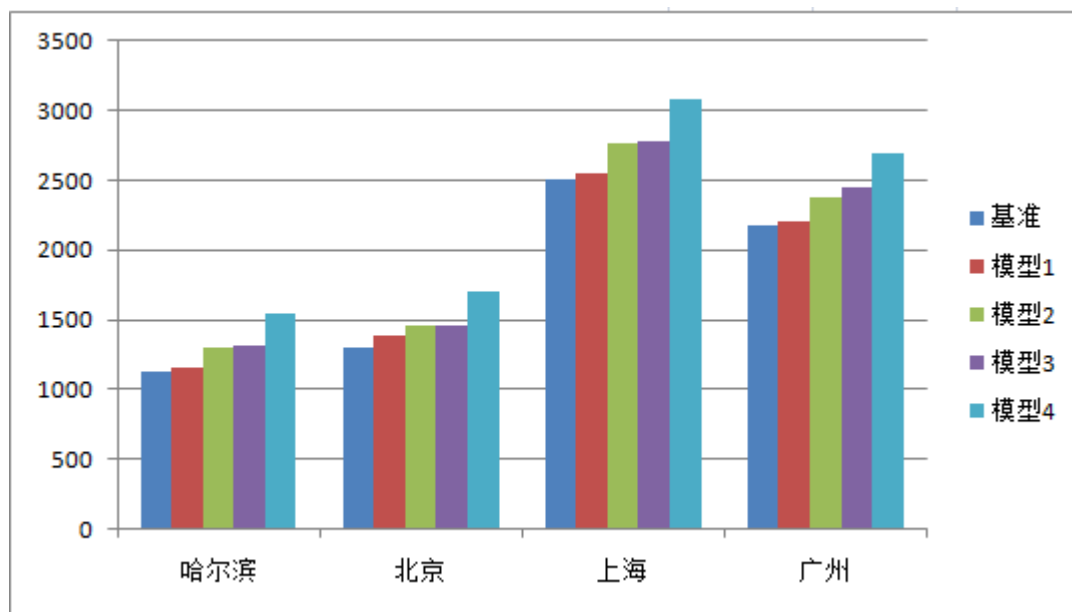


图 5.16 各城市数据中心气侧节能器不同室内设定下全年可利用小时数

通过分析图 5.16，我们可以发现：

1) 在目前的规范要求下，各城市数据中心气侧节能器可使用的小时数分别为 1122、1304、2511 及 2177，分别占全年时间的 12.8%、14.88%、28.66% 及 24.85%；

2) 相对于改变数据中心的湿度设定条件，改变数据中心温度上限要求所带来的气侧节能器可利用小时数的增加要小很多。而比较提高湿度上限和降低湿度下限对气侧节能器可利用小时数的增加的影响可以发现：总体上两者带来的效果基本相同，根据不同的地方略有不同。

当然气层节能器的使用不仅与室外温湿度有关，而且还和洁净度等有关，本文这里仅仅从制冷的角度出发所得到的相关可利用小时数可视为理论上的制冷潜力。

5.4 本章小结

在本章节中主要分析了数据中心室内设定参数对于其能效的影响, 相关结论如下:

1) 提高设定温度对于数据中心能耗影响很小, 节能意义不大, 考虑到温度升高带来的设备可靠性的下降一般不推荐提高; 而适当提高数据中心室内设定温度的下限却有利于改善数据中心的能耗问题;

2) 目前数据中心所采用的相对湿度控制是一种很不节能的湿度控制方式, 采用绝对湿度或者绝对湿度及相对湿度混合控制是一种较为可能的节能替代方案;

3) 气侧节能器的可使用性主要受室内设定参数的影响, 其中在我国的气象条件下受湿度设定参数的影响要更大一些, 就目前 TIA-940 标准的规定来说降低其露点温度下限 1°C 所带来的可利用小时数增加在 9-15% 而提高其露点温度上限 1°C 则在 10-17% 之间。

第6章 数据中心空调系统节能措施定量分析

在本章节主要讨论各种节能措施理论上的节能潜力, 以期为后续的进一步研究作参考。

6.1 气流组织优化

总结第2章对于数据中心气流组织优化的讨论, 目前对于数据中心气流组织的优化从节能方面考虑其根本目标在于尽可能减少气侧的输送能耗。对于输送能耗考虑其定风量运行, 则可以式6.1的形式表示:

$$W = \bar{w}Lt \quad (6.1)$$

其中, w 为输送功耗, j ;

\bar{w} 为输送单位风量的功耗, $w/(\text{m}^3/\text{h})$

t 为运行时间, s

L 为送风量, m^3/h

由式6.1我们可以知道输送能耗其实是由三个因素决定, 第一个因素即为输送的风量, 第二个因素为输送单位风量的功耗, 其三为运行时间。

我们首先考虑输送风量, 当输送的冷量一定的时候, 易知风量可由式6.2表示。

$$L = \frac{Q}{\Delta T C_p \rho} \quad (6.2)$$

其中 L 为输送风量, m^3/s ;

Q 为输送冷量, W

ΔT 为送回风温差, $^\circ\text{C}$

C_p 为空气的定压比热, 这里取 $1.004\text{kJ}/(\text{kg K})$

ρ 为空气的密度, 这里取 $1.293\text{kg}/\text{m}^3$ 。

式6.2中空气的物性参数假设不变, 则可得到输送风量与送回风温差的关系如式6.3:

$$L \propto \frac{1}{\Delta T} \quad (6.3)$$

由式6.3我们可以知道, 当送回风温差取最大值, 输送风量有理论上的最小值。对于送回风温差来说, 显然当回风温度取上限, 而送风温度取下限时其温

差最大。

以第三章中实测的数据中心为例，对于回风温度的上限我们取 TIA-942 所规定的数据中心室内温度上限 25℃而对于送风温度的下限，假设气流组织优化已消除了前面提到的回风短路，此时平均送风温度取排除了出现回风短路的机柜以外的各机柜的入口温度的平均值为 16.73℃。将以上送回风温度信息代入式 6-2 中，则得到对于实测的数据中心来说，在假设其负荷恒定的情况下，气流组织优化可得到的送风风量的下限为 9.268m³/s。

接下来再考虑输送单位风量的功耗，我们知道该值主要与风机静压与风机效率有关，而在这里我们假设气流组织的优化使得风机的静压值降低了 20%。还是以第三章中的测试数据中心为例，其实际的输送单位风量的功耗由式 6.4 计算得到，而优化后输送单位风量功率则由前面分析由式 6.5 计算得到。

$$\bar{w}_{\text{优化}} = \frac{P}{L_0} \quad (6.4)$$

其中，P 为风机的额定功率，w

L₀ 为风机额定风量，m³/s

$$\bar{w}_{\text{优化}} = \bar{w}\mu \quad (6.5)$$

其中， $\bar{w}_{\text{优化}}$ 为优化后的输送单位风量的功耗，w/ (m³/h)

μ 为优化系数，这里取 0.8

最后将计算得到的气流组织优化后的风量与输送单位风量的功耗代入式 6.1 中，得到优化前后的输送能耗对比如图 6.1。假设气流组织优化对数据中心其他能耗没有影响，由此可获得优化前后总能耗的对比如图 6.2。

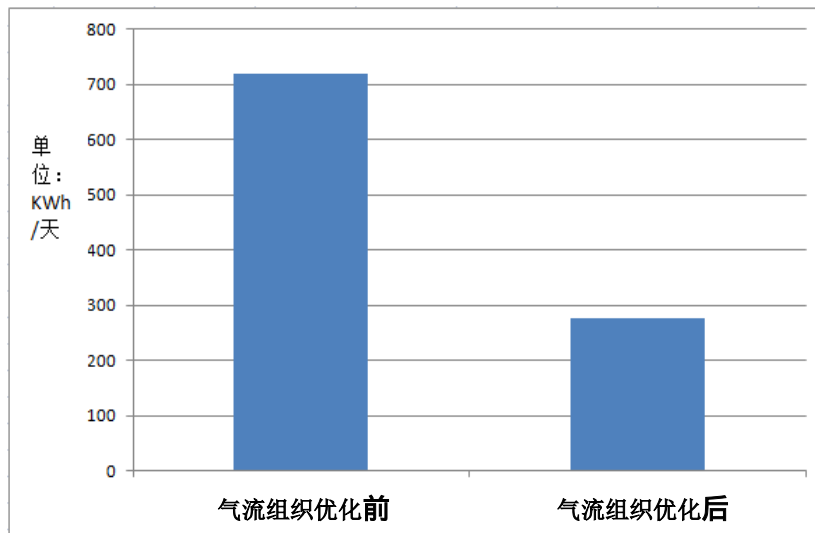


图 6.1 气流组织优化前后的风机能耗估算值

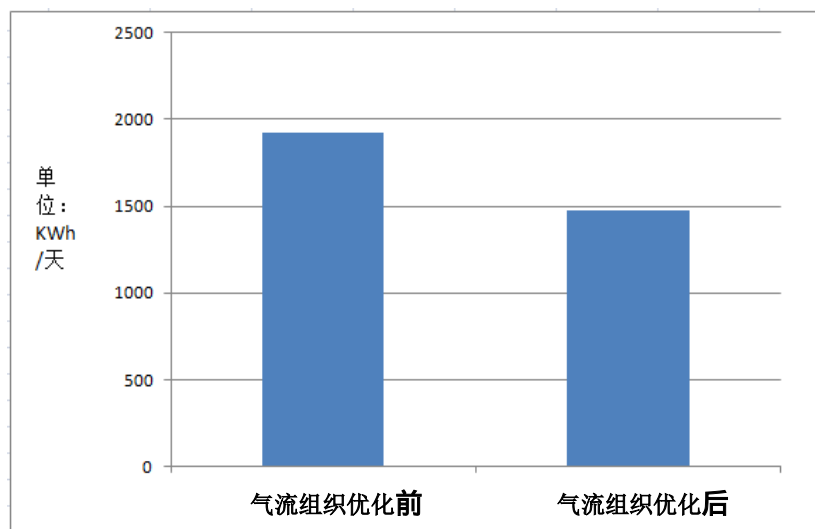


图 6.2 气流组织优化前后数据中心空调系统总能耗

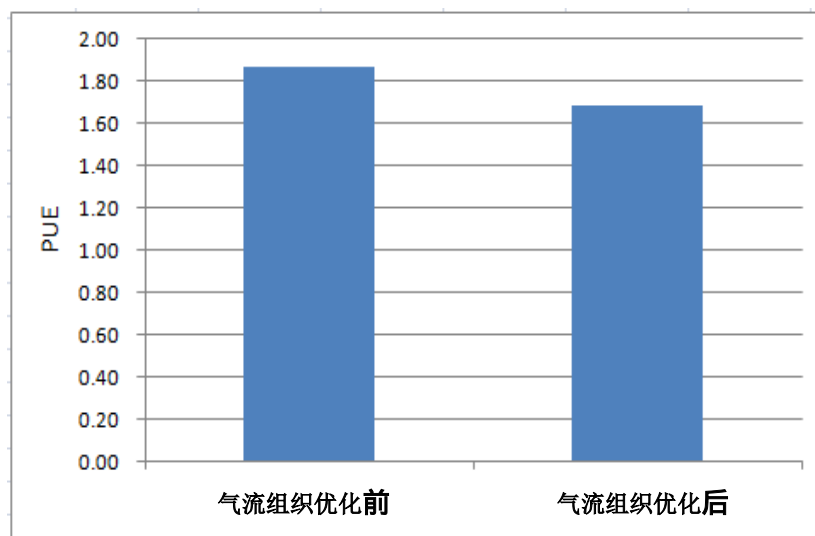


图 6.3 气流组织优化前后数据中心 PUE 参数变化

由图 6.1、6.2 及 6.3 可以发现，气流组织优化理论上对测试数据中心风机能耗、数据中心空调总能耗及 PUE 值的降低分别为 61.4%、23% 及 10%。

6.2 节能器

如前面的介绍，节能器一般分为气侧和水侧节能器，在下面的内容中我们将分别讨论。

6.2.1 气侧节能器

在第 5 章中已经讨论了室内环境设计参数对于气侧节能器可利用小时数的影响，事实上气侧节能器的使用还受到其他因素的影响。

先考虑如下所示的气侧节能器形式：

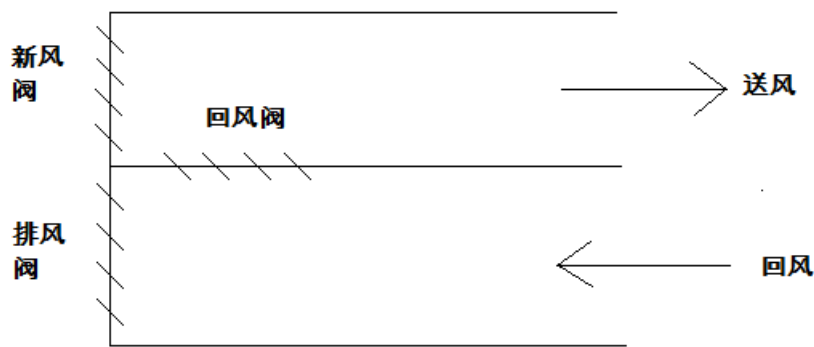


图 6.4 数据中心气侧节能器运行示意图

如图 6.4 所示，该气侧节能器的运行主要由三个风阀控制实现：

当室外空气满足要求时，新风阀及排风阀全部打开、回风阀关闭而空气处理机组关闭，数据中心实现全新风运行；

当室外空气露点温度满足要求而温度过低时，新风阀和排风阀开度变小而回风阀开度变大，新风经与回风混合后送入数据中心中，此时空气处理机组仍然关闭，当新风阀和排风阀开度变小到最小阀位而混风温度仍过低时，彻底关闭新风和排风阀，回风阀保持全开，空气机组开启，数据中心回复正常全回风运行。

当室外空气露点温度不满足要求时，新风和回风阀保持关闭，回风阀保持全开，数据中心全回风空调运行。

在以上分析的基础再来讨论气侧节能器运行对于室外温湿度的要求：

首先考虑湿度，为防止新风可能带来的室内绝对含湿量的变化，根据 TIA-942 要求可得对于室外露点温度的要求为：露点温度大于等于 6.1℃ 且小于

等于 15℃

其次考虑温度，

对于温度上限，当气侧节能器以温度上限全新风送风时，数据中心回风温度达到 TIA-942 要求的上限 25℃，而此时的送风则可由式 6.6 计算得到。

$$T_{\max} = 25 - \frac{Q}{LC_p\rho} \quad (6.6)$$

其中 T_{\max} 为气侧节能器运行要求的室外温度上限，℃

L 为数据中心送风量， m^3/s

Q 为数据中心的冷负荷， W

C_p 为空气的定压比热，这里取 $1.004kJ/(kg K)$

ρ 为空气的密度，这里取 $1.293kg/m^3$ 。

对于温度下限，当气侧节能器新风比最小时，数据中心最终的回风温度达到 TIA-942 要求的下限 20℃，此时可由式 6-7 计算此时新风温度：

$$T_f = T_r - \frac{Q}{\eta LC_p\rho} \quad (6.7)$$

其中 T_f 为新风温度，℃

T_r 为回风温度下限，℃

η 为气侧节能器新风比

其他变量参见式 (6.6)

总结以上分析可得，对于测试数据中心来说气侧节能器运行主要由室内设定参数及最小新风比有关。其中如果最小新风量无下限的话，理论上只要室外空气湿度达到要求且温度低于室内设定温度上限均可用来冷却数据中心。这种情况在实际中显然是不可能实现的，在这里为分析方便假设最小新风比为 0.4。

我们取第三章中的实测数据中心作为对象联系前面的分析来具体讨论气侧节能器对于数据中心空调系统能耗的影响。根据式 6.6 及式 6.7 可得在三种风量下对于室外温湿度的要求如表 6.1：

表 6.1 气侧节能器运行对于室外温湿度要求

温度要求	上限	21℃
	下限	10℃
湿度要求	湿球温度上限	15℃
	湿球温度上限	6.1℃

根据表 6.1 我们考察在中国不同气候区下气侧节能器的运行时间，与第五章相同，这里也依据表 5.4 选取四个主要城市：哈尔滨、北京、上海及广州作为各气候区的代表。分析各自典型气象年气象参数文件可得如图 6.5 的结果：

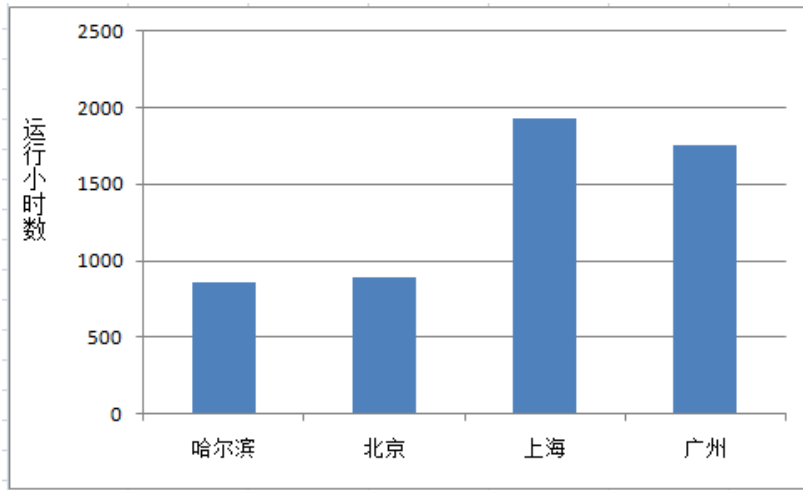


图 6.5 不同城市气侧节能器运行时间

我们考虑假设数据中心全年负荷保持恒定，则空气处理机组（除风机以外的部分）的运行能耗与运行时间的关系可以用式 6.8 来表示：

$$W_{ac} \propto t_{operation} \quad (6.8)$$

其中 W_{ac} 为空气调节机组全年能耗，kWh；

$t_{operation}$ 为空气调节机组全年运行时间，h。

而空气节能器的使用最直接的结果就是减少了空气调节机组运行的时间，根据图 6.5 及式 6.8，我们可估算出使用空气节能器带来的空气调节机组（同上）能耗减少如图 6.6：

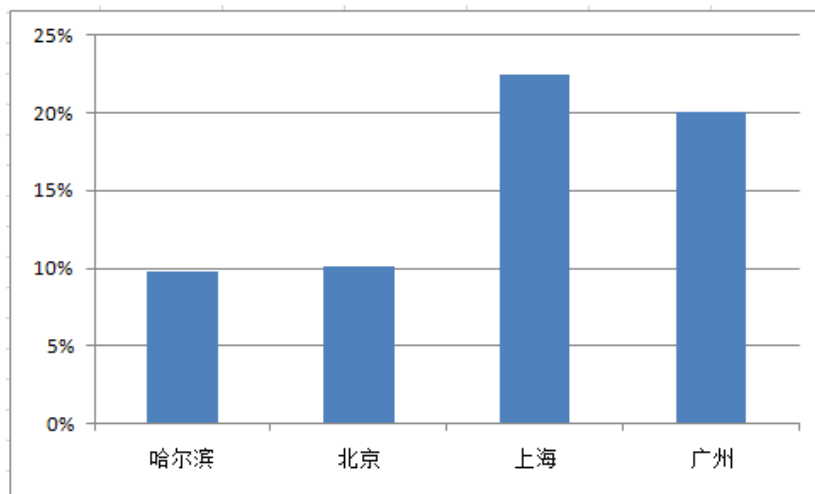


图 6.6 不同城市气侧节能器带来的空气调节机组运行能耗

由于在这里数据中心的送风量保持不变,因此是否使用节能器风机能耗仍保持恒定,联系第三章中的实测数据,我们可以得到精密空调的能耗减少率及 PUE 参数变化如图 6.7 及 6.8:

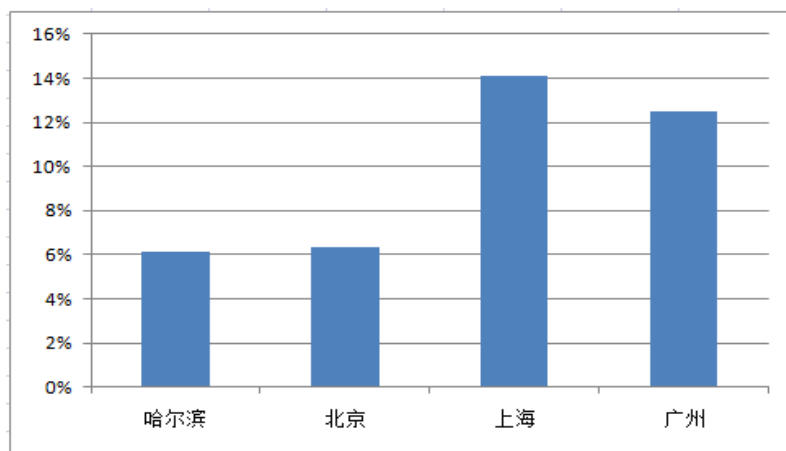


图 6.7 气侧节能器带来的精密空调机组运行能耗减少率

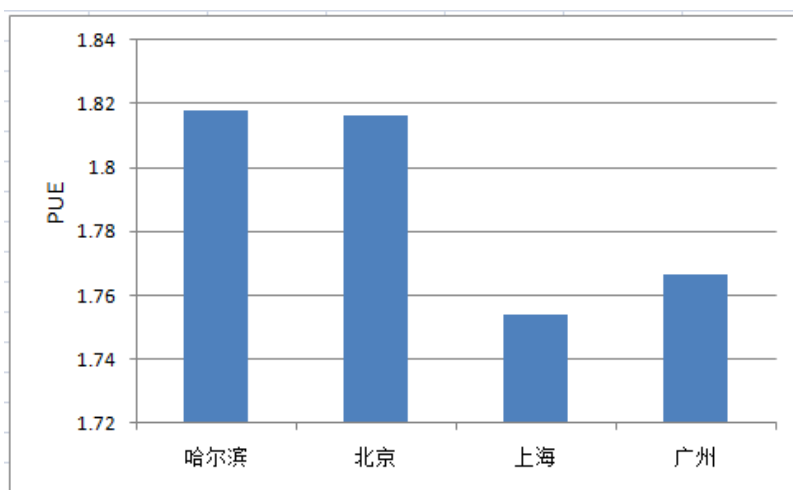


图 6.8 气侧节能器带来的 PUE 参数变化

由图 6.7 及 6.8 可以发现,

- 1) 气侧节能器所带来的节能效果各地差异较大,最理想的地区为上海为代表的夏热冬冷地区,最差的地区为以哈尔滨为代表的严寒地区;
- 2) 在输送风量不变且最小新风量为 0.4 的情况下,对于测试数据中心来说,气侧节能器所能带来的空调能耗减少率最大为 14%。

6.2.2 水侧节能器

6.2.2.1 概述

所谓水侧(冷却水侧)节能器是指当室外空气湿球温度达到一定条件时,可以关闭水冷式制冷机组,以流经冷却塔的循环冷却水直接或间接向空调系统供冷,国外一般将其称之为 **Water-Side Free Cooling** 或者 **Tower Cooling**。

与气侧节能器类似,水侧节能器也不是绝对意义上的免费,而只是相对意义上的免费。它免的只是制冷机组的制冷能耗而没有免甚至有可能会增加的是冷却塔、水泵等部件运行所需的电能,由于一般来说冷机的制冷能耗减少量一般都要大于冷却塔及水泵的运行能耗增加量,因此水侧节能器从净的意义上来说是一种免费供冷的方式。

水侧节能器供冷系统按照冷却水供往末端设备的方式主要可分为直接供冷系统和间接供冷系统,下面将分别予以介绍。

首先介绍直接供冷系统,如图 6.8 为其示意图:

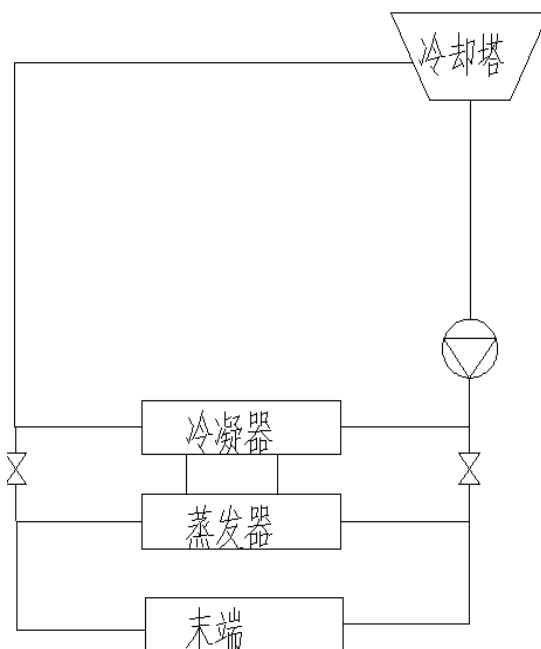


图 6.8 水侧节能器直接供冷系统示意图

如图 6.8,水侧节能器直接供冷系统是通过简单的旁通管路将冷却水和冷冻水环路连通,在外界条件满足的情况下可以直接将冷却水通过冷冻水管道送到末端设备中。

这里需要指出的是由于冷却水系统是直接与外界空气相连的,易被污染,为防止管路腐蚀、结垢和阻塞,一般需要在冷却塔和管路之间设置过滤装置;而另一方面,当冷却塔的高度低于冷冻水系统高度时,利用原有冷却水泵供冷时就会

由于扬程不够而无法实现，因此还需要酌情配置新的水泵。

接下来再来介绍间接供冷系统，如图6.9为其示意图：

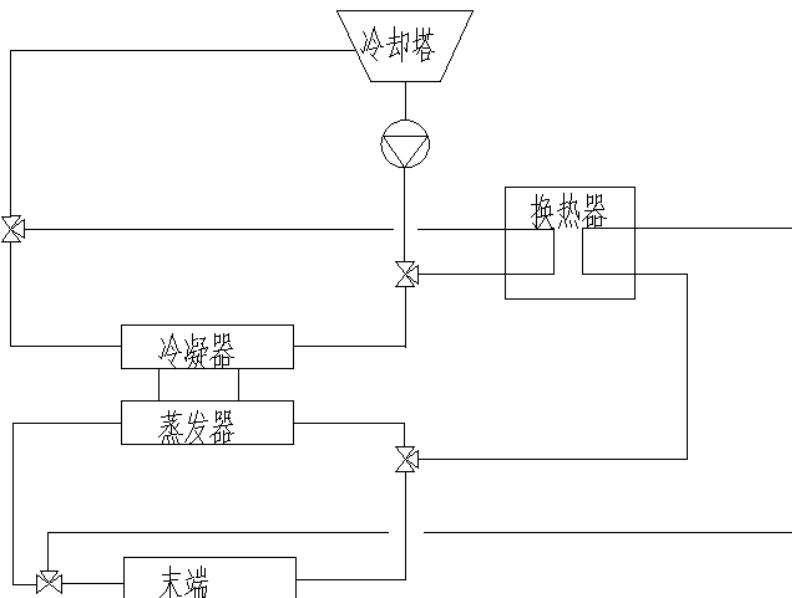


图 6.9 水侧节能器间接供冷系统示意图

如图6.9所示，水侧节能器间接供冷系统主要是在原系统中增设了一个热交换器（通常会使用板式换热器）与制冷机组并联，冷却水通过板式换热器与封闭的冷冻水循环进行热交换，冷却水循环与冷冻水循环保持相互之间的独立性，并不直接接触，从而避免了冷冻水管路被污染、腐蚀和堵塞问题。需要指出的是，由于存在一个换热器作为中继，因此间接供冷系统相较于直接供冷系统其换热效率要相应的差一些。

虽然从换热效率上说间接供冷系统要比直接供冷系统差，但由于其保持了冷却与冷冻水环路的独立性，因此在实践中使用较多的仍是间接供冷系统。

6.2.2.2 节能潜力分析

对于水侧节能器来说，数据中心由于全年均存在冷负荷是其最佳的应用对象，更重要的是水侧节能器与气侧节能器相比较而言，受室内参数要求的影响较小，因此水侧节能器与数据中心的结合可以说是最佳搭配。

作为一种利用自然冷源的供冷方式，水侧节能器的使用很依赖于所在地区的气候状况，特别是与室外湿球温度关系较为密切。冷却塔对于冷却水的降温作用是一种典型的热湿交换过程，它的出口水温很大程度上是由室外空气湿球温度决定的，当然室外风速、以及冷却水的流量、其携带的负荷热量也有一定影响。然而定性地说，对于一种结构已确定的冷却塔而言，在一定的流量下，冷却水理论上能降低到的极限温度为当时室外空气的湿球温度。当然以上的结论是在假设冷

却水与空气充分换热，热质交换达到动态平衡的前提下成立的，在实际中如果要求冷却水出口温度达到室外湿球温度则冷却塔中的换热面积传热传质应为无穷大，这显然是不可能的。一般来说，冷却水出口温度总是要比室外湿球温度要一些，工程上往往用冷幅（approach）这个专有名词来描述这个差值。冷幅是冷却塔运行的一种重要参数，一般来说冷却塔的体积越大，则其中的填料提供的气水换热越充分，冷幅就越小。另外冷幅与室外湿球温度也有关系，如图6.10所示为是通过冷却塔选型计算程序BAC Cooling Tower Selection Program所计算得出的在一定负荷下运行，冷却塔的冷幅与室外湿球温度的变化关系。

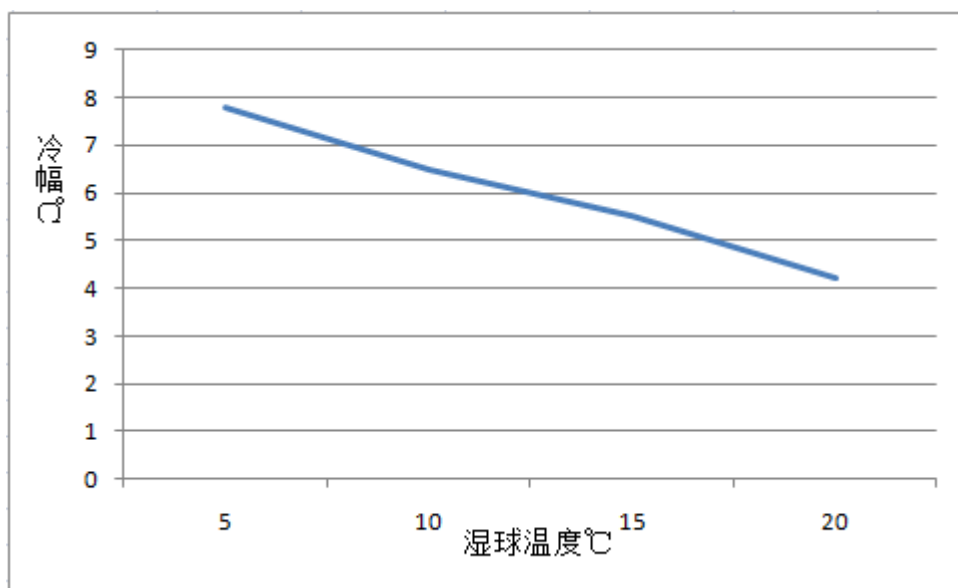


图6.10 冷幅与室外湿球温度的关系（图来源:文献40）

从图6.10我们可以看出：在负荷一定的情况下，冷幅基本与室外温度成线性关系。虽然图6.10只是描述的是某一特定的冷却塔的特性，但它们的形状具有代表性，因此以上所得出的冷却塔冷幅和湿球温度的变化规律普遍适用于其他型号的冷却塔，对于不同的冷却塔来说曲线不同之处可能就在于其斜率。而文献则认为在过渡季节，冷幅的大致变化范围为3-10°C。

在使用水侧节能器进行供冷时，首先就要求冷却塔的供水温度达到一定要求因此冷却塔只有在室外湿球温度小于某个温度值或是达到某个温度范围时才能开始作为替代制冷机组的冷源。这便引出了水侧节能器供冷切换温度这一概念，也就是从制冷机组供冷形式切换到水侧节能器供冷模式时的室外空气湿球温度。切换温度体现了室外气象参数对冷却塔供冷系统使用的限制。然而需要指出的是切换温度并不是一个固定值，在水侧节能器实际使用需要根据实际情况具体分析。事实上，不同地区不同的气候条件、不同的冷却塔供冷系统的类型(直接或间接供冷)、不同的冷却塔的性能参数，末端供冷温度的变化、室内设定的温、

湿度要求,都会对切换温度造成影响,其中冷却塔自身的性质对于切换温度的影响最大。具体来说,若采用直接供冷系统,由于不存在板式换热器作为中间媒介使冷冻水和冷却水进行换热,故其切换温度一般要比间接供冷系统高;而在相同的室外气象条件下,可以通过调节冷却塔风机的运行状态,取得不同的冷却塔出水温度,反之,若对于相同的出水温度要求,在不同的室外湿球温度下,冷却塔也可能过风机调节来满足水温要求。这样,切换温度对于同一型号的冷却塔也是可变的。那么,如何确定这一水侧节能器的切换温度呢?在实际的水侧节能器的设计和运行时,一般都需要先确定过渡季节和冬季时室内的冷负荷,进而选取适当的冷冻水供水温度,根据所需冷冻水的温度确定冷却水的温度,对于直接供冷的水侧节能器而言,冷冻水温度就可作为所要求的冷却水温;而对于间接供冷的水侧节能器,还需增加一个板式换热器的换热温差。最后再根据所需冷却水的温度,依照冷却塔的处理能力确定冷却塔供冷的切换温度。

式6.9表达了切换温度的确定通式:

$$T_{\text{ex}} = T_{\text{cs}} - \Delta T - T_{\text{approach}} \quad (6.9)$$

其中 T_{ex} 为切换温度, °C;

T_{cs} 为冷冻水供水温度, °C;

ΔT 为换热器温差,对于直接供冷系数取0, °C;

T_{approach} 为冷幅, °C

具体到数据中心这一特殊的建筑类型来说,由于全年的冷负荷受室外参数影响不大,因此过渡季节和冬季的冷负荷与其他时间段基本没有太大差异,因此对于冷冻水的供水温度要求基本和正常供冷需要的差不多,在这里为分析方便取为空调冷冻水常用的设计温度7°C;对于换热器温差,文献中给出的参考值为1-3°C,这里取为2°C;而对于冷幅则参考前面的分析,取3°C。将以上分析值代入式6.9中则可得到对于数据中心来说的水侧节能器切换温度为4°C(对于直接供冷系统)和2°C(对于间接供冷系统)。

为进一步分析在我国的气象条件下数据中心可利用的潜力,与气侧节能器的分析类似,这里也根据不同的气候区域分别选择相应的典型城市结合以上对于水侧节能器切换温度的分析来具体讨论。

这里仍然选择哈尔滨、北京、上海及广州作为典型城市,分析其典型气象年参数可得图6.11:

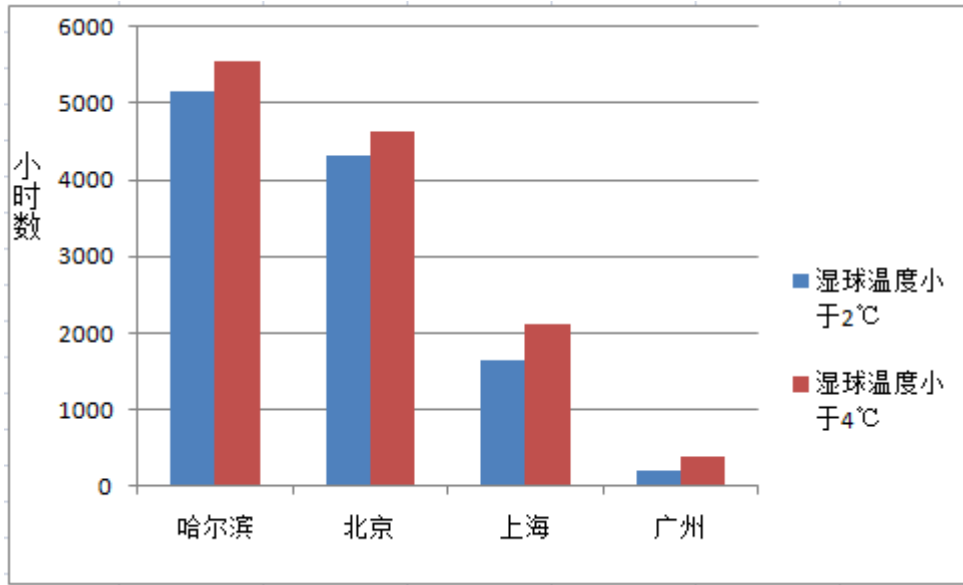


图6.11 各典型城市全年湿球温度小于2及4°C小时数分布情况

根据前面的分析我们可以知道实际上就是数据中心水侧节能器可使用的小时数。分析图6.11我们可以发现：

- 1) 从地域上说，自北向南，水侧节能器在数据中心中的可利用小时数变化很大：对于严寒地区的哈尔滨和寒冷地区的北京来说不管是直接还是间接统，其可利用小时数都超过或接近全年运行时间的一半；而相对的，夏热冬冷地区的上海和夏热冬暖地区的广州则要少得多，特别是广州，间接和直接系统的可利用小时数都在200以下，基本上已不具备使用水侧节能器的工程可能性。
- 2) 就间接和直接水侧节能器的比较来说，从全年各城市的情况来看相差均不是很大（基本都在500小时以内），反映出在中国的气象条件下，直接式系统在节能方面的优势相对于间接式不是很明显。

以上我们分析了数据中心水侧节能器理论上的可使用小时数，而水侧节能器的理论可利用小时数供冷时数同时也就是指系统在理论上可以停开制冷机组的小时数，从这个意义上说侧节能器的理论可利用小时数就可以视为是水侧节能器相对于制冷机组供冷系统“免费”的指标。按照这种思路，冷却塔供冷系统的节能潜力就可以表示为其供冷时数的函数，该函数可以表示为式6.10的形式：

$$W_{\text{save}} = AP_{\text{chiller}} t \quad (6.10)$$

其中 W_{save} 为水侧节能器相对于冷水机组制冷的节能量，kWh；

A 为系数，主要用来描述空调系统运行时间与全年时间的比值，对于数据中心来说，该参数为1；

P_{chiller} 为制冷机的能耗，需要说明的是，该值应是指在水侧节能器供冷的负

荷条件下,若使用制冷机组供冷相应的制冷机即时功率,并不一定是其额定功率;

t 为水侧节能器的理论可使用小时数;

为方便定量分析,在这里假设数据中心全年负荷恒定,则制冷机运行能耗也恒定不变,由此结合式6.10可得到各城市理论上制冷机能耗的减少率如图6.12所示:

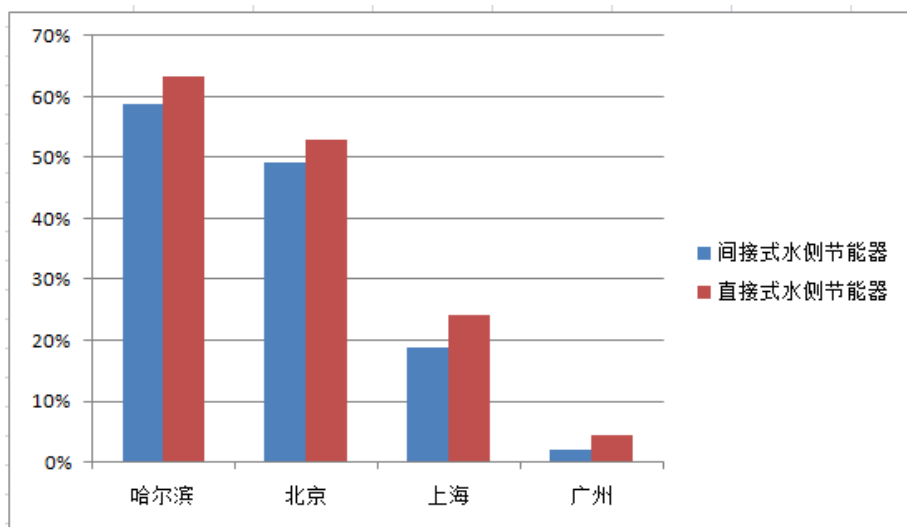


图6.12 水侧节能器理论上对于制冷机能耗的减少率

为进一步分析水侧节能器对于数据中心总能耗的影响,这里作以下两个假设以简化假设:

1) 制冷机能耗按文献取数据中心空调能耗的45%;

2) 由于水侧节能器的使用可能带来的冷却塔风机能耗和水泵增加忽略不计。

根据以上假设,可得到理论上水侧节能器可减少的数据中心空调系统能耗参数如图6.13:

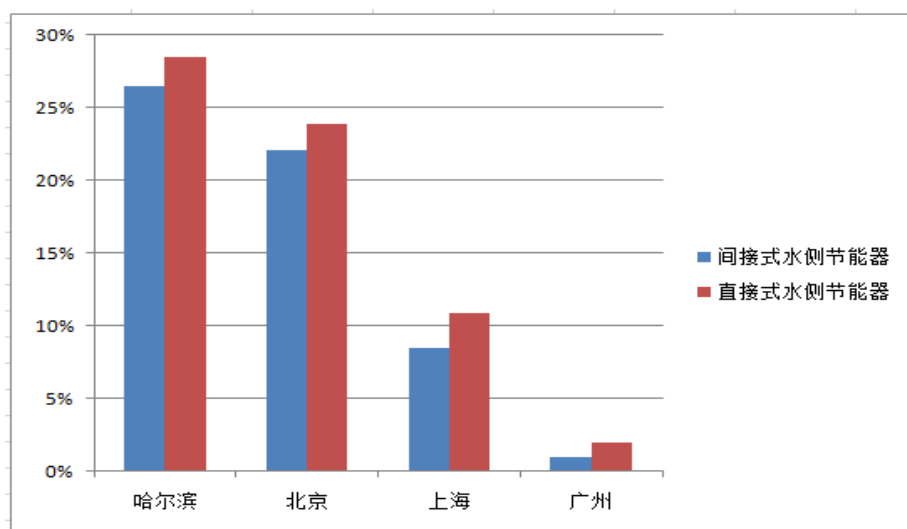


图6.13 水侧节能器理论上对于数据中心空调总能耗的减少率

从图6.12和6.13我们可以看出，

1) 水侧节能器的节能率与室外参数是紧密相关的，其中以哈尔滨和北京为代表的严寒和寒冷地区应用水侧节能器可至少降低近一半的冷机能耗，并有望将数据中心空调总能耗至少降低20%。而相对地，以上海和广州为代表的夏热冬冷和夏热冬暖地区水侧节能器的节能前景相对要小很多，其中广州地区基本不具备应用的潜力；

2) 从节能上看直接式水侧节能器相对于间接式节能器的优势并不明显，考虑到直接式存在的一些弊端（如前面描述），笔者推荐使用间接式节能器为数据中心提供冷却。

6.3 小结

从以上的分析中，我们可以得到如下的结论：

1) 通过合理的数据中心气流组织配置，有可能极大地降低目前数据中心的气侧输送能耗（如测试数据中心的风机能耗可减少约60%），但由于本身风机能耗占空调系统总能耗的比例相对不大（如测试数据中心的风机能耗占空调系统总能耗越为37%），因此对于总能耗来说节能潜力相对不大；

2) 对于数据中心的节能器来说，其节能潜力与其可运行的时间基本上都呈正比的关系；

而就气侧节能器来说，由于受室内设定参数影响较大，在目前的要求情况下节能潜力相对比较小（以测试数据中心为例，在气候条件最适宜的上海地区估算对于空调处理机组的节能率在20%左右，而对于总空调能耗的减少率只有14%）。

而就水侧节能器来说，首先在不同的气候区域其节能效果差异很大，基本的趋势是自北向南节能率不断下降，而其对于冷机能耗的减少最高可达到60%以上；其次从水侧节能器具体实现形式上来说，直接供冷式相对于间接供冷式的节能方面的优势并不明显。

第7章 总结与展望

本文主要就数据中心这一特殊的建筑类型的能耗问题结合现场调研进行了深入而广泛的分析,并在此基础上讨论了数据中心的节能点和可行的措施,最后针对各节能措施的节能潜力进行了量化分析。具体的工作与结论总结如下:

1. 分析了数据中心作为一种建筑类型总的能耗情况与发展趋势;
 - 1) 通过分析前人的研究发现:目前对于数据中心能耗尚未有令人信服的量化数据,一些学者对其的估算有高估的可能;
 - 2) 对于数据中心能耗未来的发展,就目前所掌握的数据来说很难定性的判断。
2. 对上海某数据中心进行了实测;
 - 1) 结果发现该数据中心单位机房的能耗密度达到了 $619.3\text{W}/\text{m}^2$,是同地区一般大型公共建筑的近 60 倍;
 - 2) 另外通过调研也发现该数据中心存在疑似回风短路而引起的局部热点和存在湿度控制冲突的危险。
3. 在前人研究及现场调研的基础上分析了数据中心能耗的特点;
 - 1) 通过分析,笔者认为数据中心能耗大的主要原因有三个:其一为运行时间长;其二为为安全性牺牲了部分能效性;其三为数据中心空调系统本身存在能效过低的问题。
 - 2) 联系数据中心这一特殊建筑的要求,笔者认为在以上所述的三个原因中一和二没有改进以的余地,数据中心空调系统节能是数据中心节能的重中之重。
 - 3) 结合数据中心特点,笔者认为数据中心空调系统可行的节能措施主要有:放宽目前数据中心的环境运行要求;气流组织优化及采用免费冷却的方式对数据中心进行供冷。
4. 量化分析了各节能措施的节能潜力;

通过分析发现:

 - 1) 提高数据中心设定温度对于能耗的影响不大,考虑到温度上升对于 IT 机柜设备的寿命的影响,这里并不推荐采用;而适当地降低数据中心温度设定的下限可以避免不必要的加热能耗;
 - 2) 目前数据中心所采用的相对湿度控制是造成控制冲突的主要原因,采用绝对湿度或者绝对湿度及相对湿度混合控制是一种较为可能的节能替代方案;
 - 3) 通过合理的数据中心气流组织配置,可以明显地降低目前数据中心的气侧输送能耗(如测试数据中心的风机能耗可减少约 60%);

4) 气侧节能器的可使用性主要受室内设定参数的影响, 其中在我国的气象条件下受湿度设定参数的影响要更大一些。在目前的要求情况下气侧节能器节能潜力相对比较小(选择气候条件最适宜的上海地区对测试数据中心的估算显示空调处理设备的节能率在 20%左右, 而对于总空调能耗的减少率只有 14%。定量分析显示降低目前设定露点温度下限 1℃所带来的可利用小时数增加在 9-15%而提高其露点温度上限 1℃则在 10-17%之间;

5) 而对于水侧节能器来说, 首先对于中国气象条件来说, 基本的趋势是自北向南其利用率不断下降, 对于冷机能耗的减少最高可达到 60%以上; 其次由于直接供冷式节能器相对于间接供冷式的节能方面的优势并不明显, 考虑到前者在水质污染及水泵运行方面的问题, 推荐使用后者。

本论文进一步的工作与展望:

1. 对于数据中心能耗现状由于受目前可参考的资料限制目前仍没有令人信服的数据, 希望在未来的研究能够解决这一尴尬的问题。
2. 目前数据中心设备对于环境参数要求不仅对数据中心能耗有很大影响而且也是限制气侧节能器使用的主要原因, 希望未来 IT 设备工作与环境温湿度关系的研究能够进一步开展以改进现有设定要求, 为数据中心能效提高服务
3. 在本文中对于数据中心种种节能措施的分析都是完全基于理论分析, 这里也希望未来的研究也能更关注实验研究, 以尽快地将想法变为实际, 切实地为数据中心节能作出贡献。

最后, 目前国内对于数据中心的节能研究相对国外而言非常的少, 也希望笔者的研究能作为砖能引出更多的玉, 使得更多的专家及同仁关注数据中心这一节能潜力巨大的建筑类型。

致谢

这篇论文的最终形成应该说是相当不容易，从最初立意到框架构想乃至整个写作过程都是一波三折，如果没有来自各个方面的指导和帮助，完成想来是不可能的，在这里特别希望借这个机会对这些帮助表示最真挚的谢意。

感谢导师潘毅群教授，潘先生对我的影响是广泛而深远，在她的耳提面命之下我不仅对本专业的认识比以前有了质的提高，更重要的是学会了做事情的方法。而在本篇论文的写作过程中，潘先生也给予非常非常多的帮助：不仅指导了论文的写作思路，更积极地为论文中调研创造客观环境，使得我的论文得以顺利进行。

感谢许鹏教授，作为论文的指导老师，许先生渊博的知识，灵活而又有原则的学术态度深深地让我折服。虽然平时很忙，但许先生总能抽出时间来关心我的学习研究进度并给予及时的指导，每当论文进度出现问题时，又总是会不厌其烦为我指明思路，给了我顺利完成课题的信心。

感谢课题组的黄治钟老师，黄先生一直都是全师门所有人的偶像，在论文的写作过程中，黄先生丰富的知识储备量、跳跃的思维不仅使我能够以较为全局的视野来分析问题，也对最终论文思路形成发挥了重要的作用。

感谢上海期货大厦的王新经理在论文现场调研过程中给予的极大配合。

感谢师姐李玉明和张洁，是你们带我进入了建筑模拟这一奇妙的世界；感谢师兄左明明和林兴斌，左师兄永远是师门的传奇而林师兄我不会忘记和你一起做设计的日子；感谢同门姚远，是你让我知道了什么叫同门之间的关爱；感谢周芮锦、花莉、朱明亚、徐哲恬、秦业美、王龙、刘羽岱，你们使得本来寂寞的嘉定永远都这么热闹。

感谢同学张洁，在最寂寞的时候能和我抬杠；感谢老同学马国杰，一路走到现在不容易；感谢同学王仕慧，你的鼓励我至今记得；感谢同学陈鑫，和你讨论问题总是不会感觉单调……

最后也是最重要的是感谢我的父母，没有你们心血付出也没有儿子今天的成绩，在我论文攻关最繁忙的时候你们总是为我带来最温暖的关爱，希望以后能用更多的进步来回报你们无私的爱。

语言总是苍白，谢意往往难尽，千言万语化为一句话：谢谢大家。

2011,3

参考文献

- [1] The Uptime Institute. "Heat Density Trends in Data Processing, Computer Systems and Telecommunication Equipment," www.uptimeinstitute.org, 2000 (访问日期: 2008,12).
- [2] William Tschudi, Tengfang Xu, Dale Sartor, Jay Stein. Roadmap for public interest research high-performance data centers. Lawrence Berkeley National Laboratory, 2003.
- [3] 钟景华. 数据中心建设标准与规范. 首届数据中心经理年会暨2009数据中心运维论坛, 2009.
- [4] 电子信息系统机房设计规范[R]. 中国计划出版社, 2009.
- [5] ANSI/TIA-942 – 2005 Telecommunications Infrastructure Standard for Data Centers. TIA, 2005.
- [6] Environmental Guidelines for Datacom Equipment. ASHRAE, 2008.
- [7] Report to Congress on Server and Data Center Energy Efficiency Public Law 109-431. U.S. Environmental Protection Agency ENERGY STAR Program, 2007.
- [8] Jeff Harris, J. Roturier, L.K. Norford, A. Rabl. Technology Assessment: Electronic Office Equipment. Lawrence Berkeley Laboratory, 1988.
- [9] Jonathan Koomey, Mary Ann Piette, Mike Cramer, Joe Eto. "Efficiency Improvements in U.S. Office Equipment: Expected Policy Impacts and Uncertainties." Energy Policy. vol. 24, no. 12, 1996.
- [10] Lovins, Amory, H. Heede. Electricity-Saving Office Equipment. Competitek/Rocky Mountain Institute, 1990.
- [11] Baer, Walter, Scott Hassell, Ben Vollaard. Electricity Requirements for a Digital Society. RAND Corporation. MR-1617-DOE, ISBN 0-8330-3279-8. 2002.
- [12] Kawamoto, Kaoru, Jonathan Koomey, Bruce Nordman, Richard E. Brown, Maryann Piette, Michael Ting, Alan Meier. "Electricity Used by Office Equipment and Network Equipment in the U.S.". Energy—The International Journal (also LBNL-45917). vol. 27, no. 3, 2002.
- [13] Jonathan Koomey, Chris Calwell, Skip Laitner, Jane Thornton, Richard E. Brown, Joe Eto, Carrie Webber, Cathy Cullicott. "Sorry, wrong number: The use and misuse of numerical facts in analysis and media reporting of energy issues." Annual Review of Energy and the Environment, 2002.
- [14] Jonathan Koomey, Huimin Chong, Woonsien Loh, Bruce Nordman, Michele Blazek. "Network electricity use associated with wireless personal digital assistants." The ASCE Journal of Infrastructure Systems (also LBNL-54105). vol. 10, no. 3, 2004.
- [15] Jonathan Koomey, Kaoru, Bruce Nordman. Initial comments on "The Internet Begins with Coal". Berkeley, CA: Lawrence Berkeley National Laboratory. LBNL-44698, 1999.
- [16] Mitchell-Jackson, Jennifer, Jonathan Koomey, Michele Blazek, Bruce Nordman. Data Center Power Requirements: Measurements From Silicon Valley. Energy—The International Journal. vol. 28, 2003.
- [17] William Tschudi, Tengfang Xu, Dale Sartor, Bruce Nordman, Jon Koomey, Osman Sezgen. Energy efficient data centers. Final Draft Rep., Lawrence Berkeley National Laboratory, 2003.

- [18] Roth, Kurt, Fred Goldstein,Jonathan Kleinman. Energy Consumption by Office and Telecommunications Equipment in Commercial Buildings--Volume I:Energy Consumption Baseline. Washington, DC: Prepared by Arthur D. Little for the U.S. Department of Energy, 2002.
- [19] Ton,Brian Fortenbery. Server Power Supplies. Berkeley CA: Report to Lawrence Berkeley National Laboratory by Ecos Consulting and EPRI Solutions, 2005.
- [20] Jonathan Koomey. Estimating total power consumption by servers in the u.s. and the world,2007.
- [21] 清华大学建筑节能研究中心. 中国建筑节能年度发展研究报告2008[R]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- [22] <http://www.idc.com/prodserv/subservices.jsp?headerFilter=Infrastructure Hardware> (访问日期:2010,12).
- [23] Steve Greenberg, Evan Mills, Bill Tschudi, Peter Rumsey,Bruce Myatt. Best Practices for Data Centers: Results from Benchmarking 22 Data Centers. Proceedings of the 2006 ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings, 2006.
- [24] Green grid metrics: Describing Datacenter Power Efficiency. Green Grid,2007.
- [25] Christian Belady. How to Minimize Data Center Utility Bills. E-Business News,2006.
- [26] Patterson, Costello, Grimm, Loeffler. A Comparison of High-density and Low-density Spaces. THERMES, 2007.
- [27] Kang, R.Schmidt, K. Kelkar, A. Radmehr, S. Patankar. A Methodology for the Design of Perforated Tiles in Raised Floor Data Centers Using Computational Flow Analysis. THERM Proceedings Vol. 1,2000.
- [28] R.Schmidt. Thermal Management of Office Data Processing Centers, Interpack'97,1997.
- [29] Kailash C Karki, Amir Radmehr, Suhas V. Patankar.Use of Computational Fluid Dynamics for Calculating Flow Rates Through Perforated Tiles in Raised-Floor Data Centers.International Journal of Heating, Ventilation, Air-Conditioning, and Refrigeration Research, Volume 9, Number 2, 2003.
- [30] Michele Blazek, Huimin Chong,Woonsien Loh,Jonathan Koomey. Data Centers Revisited: Assessment of the Energy Impact of Retrofits and Technology Trends in a High-Density Computing Facility. journal of infrastructure systems, 2004.
- [31] H.S. Sun , S.E.Lee. Case study of data centers' energy performance,Energy and Buildings, 38 (2006) 522-533, 2006.
- [32] 杨晓敏.上海地区公共建筑能耗现状与节能分析:[硕士学位论文].上海:同济大学机械工程学院,2007.
- [33] <http://www.processor.com.Going Green In The Data Center, Practical Steps For Your SME To Become More Environmentally Friendly, 2007>.
- [34] International Technology Roadmap for Semiconductors. Semiconductor Industry Association, 2006.
- [35] Michael Patterson.The Effect of Data Center Temperature on Energy Efficiency.11th IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems, 2000.
- [36] Fallah, Pedram.Standby and Active Leakage Current Control and Minimization in CMOS VLSI Circuits. IEICE Transactions on Electronics, 2005.

- [37] Mukherjee ,R. Peak.Temperature Control and Leakage Reduction During Binding in High Level Synthesis.ISLPED '05,2005.
- [38] 洪钊峰. 看戴尔绿色IT如何释放数据中心潜能.
<http://server.it168.com/server/2008-03-26/200803262355042.shtml>
(访问日期: 2011,2).
- [39] Montoya.<http://ismi.sematech.org/meetings/archives/other/20021014/montoya.pdf>.
Sematech Electrostatic Discharge Impact and Control Workshop, Austin Texas, 2002.
- [40] 李竞.过渡季节冷却水的节能应用研究:[硕士学位论文].上海:同济大学机械工程学院,2007.

个人简历、在读期间发表的学术论文与研究成果

个人简历:

黄森, 男, 1987年7月生

2008年7月毕业于东华大学 建筑环境与设备专业 获学士学位

2008年9月入同济大学攻读硕士学位

已发表论文:

[1] 黄森, 潘毅群. 某车站候车大厅热环境 CFD 模拟研究. 2009年全国暖通空调专业委员会空调模拟分析学组学术交流会.

[2] Yiqun Pan, Qiqiang Li, Hui Zhou, Joe Huang, Sen Huang, Zhizhong Huang, Zongjie He. Development of an interactive graphical user interface (GUI) for EnergyPlus. Proceedings of the ASME 2010 International Mechanical Engineering Congress & Exposition, 2010