

数据中心设计——ASHRAE 数据中心系列丛书介绍

华东建筑设计研究院有限公司 杨国荣☆

摘要 ASHRAE 技术委员会 9.9 是一个系统化研究数据中心设计及运营管理的研究团队。ASHRAE 数据中心系列丛书是该团队的研究成果。简述了该系列丛书的基本架构、各书概况,以及数据中心设计、运营管理的基本要求和重点内容。

关键词 数据中心 计算服务器 计算机房空调器 ASHRAE 丛书

Data centre design—introduction to ASHRAE datacom series

By Yang Guorong★

Abstract The ASHRAE Technical Committee 9.9 is a systematic research team of data centre design, operation and management. ASHRAE datacom series are the research results of the team. Outlines the basic framework and overview of the series. Presents briefly the basic requirements and key points of the data centre design, operation and management.

Keywords data centre, compute server, air conditioning unit of computer room, ASHRAE, series of book

①

0 引言

伴随计算机和网络技术的飞跃进步,数据处理业务的需求呈现了爆炸式增长,银行、保险、证券等金融行业,交通运输、医疗卫生、电力、通信等大型企业 and 政府机构相继建设了许多数据中心。进入 21 世纪后,在数据处理业务和 IT 技术的共同推动下,我国的数据中心建设已进入了高速发展时期。随着云计算时代的到来,业务量、信息量和用户量快速增加,作为互联网发展和信息技术应用的数据中心,面临着巨大的挑战和变革。数据中心应能满足云计算需求,具有按需配置、动态升级、易维护、绿色节能、高效等特点。在机房设计方面,作为基础设施建设的重要部分,供电和供冷的可靠性更为突出。数据中心复杂程度的增加、虚拟化应用的普及、服务器性能的提升,单个机架或机架局部单位面积的发热量急剧增加,一些新型服务器的热密度已达 20~30 kW/机柜,常用的空调冷却系统难以满足这类高密度机房的冷却要求。

过去 10 多年来,业界十分关注数据中心的能耗问题。据文献[1]报道,2006 年美国数据中心消耗的电能约占美国用电量的 1.5%,根据其发展趋势,到 2011 年,数据中心的用电量将达到美国用电量的 2.9%。对于将节能减排作为国策的我国,如何设计、运行、营造绿色节能的数据中心,数据中心设备制造商、运营商和设计人员面临严峻的挑战,迫切需要对数据中心进行全面的研究与探讨,从数据中心规划、设计、设备选择、运营管理等各方面提出指导。

1 ASHRAE 技术委员会 9.9 与数据中心系列丛书

1.1 ASHRAE 技术委员会 9.9

ASHRAE 于 2001 年成立了研究数据中心的技术小组,该小组早期称为 TG9HDEC,2003 年后改名为技术委员会 9.9(简称 TC9.9)。

TC9.9 是一个由数据通信设备生产商、数据设备终端用户的业主与管理人员以及政府机构、咨询机构、研究机构和测试实验室的专家组成的专业研究团队。该团队用数年时间对数据中心的重要设施、技术要求、电子设备及系统进行了细致的研究和总结。其研究成果陆续在《ASHRAE Journal》杂志上发表,编入 ASHRAE 手册后,作为一份完整的研究报告,由 ASHRAE 出版机构出版了 ASHRAE TC9.9 数据中心系列丛书。

1.2 ASHRAE 数据中心系列丛书简介

ASHRAE TC9.9 数据中心系列丛书共 10 本,2009 年,ASHRAE 对其中 3 本书进行了修订,出了第 2 版。

ASHRAE TC9.9 的数据中心丛书从不同方面论述数据中心。该套丛书独立成册、内容详实、全面,代表了当今数据中心的最新研究成果。各书之间内容又相互关联与交叉。通读丛书,读者可系统地掌握现代数据中心的设计和运营管理知识,也可根据需要从其中某一册书中获取所需。因此,ASHRAE 数据中心丛书对我国数据中心从业者具有较好的参考作用。

以下简要介绍数据中心系列丛书各本书的主要内容。

1) 《数据处理环境热指南》(《Thermal guidelines for data processing environments》)[2]

该书提出了 4 个级别的设备运行环境要求、设施温度与湿度测试(用于评估数据中心“健康”状况)、设备布置与气流流型(推荐冷通道、热通道布置方式)、设备制造商的热负荷与风量要求公布值。该书为 IT 硬件设备制造商(计算机、服务器和存储产品等制造商)与数据中心设计师、设施运营和管理者之间协作提供了一个框架。该书的第 2 版主要更新了数据中心设备运行环境要求(热包络区),扩大了数据中心设备运行推荐和允许环境参数范围。

2) 《数据通信设备功率趋势与冷却应用》(《Datacom equipment power trends and cooling applications》)[3]

该书论述了规划数据中心设施时应注意的问题,预测了数据中心负荷趋势,给出了磁带存储器、独立工作站、服务器和磁盘存储系统及通信设备的功率趋势图。该书还对数据中心各种风冷设备、液冷设备及其各种形式进行了详细论述。

3) 《数据通信设备中心设计研究》(《Design considerations for datacom equipment centers》)[4]

该书分别从设计标准、空调负荷、计算机房概

①☆ 杨国荣,男,1957 年 6 月生,硕士,教授级高级工程师,总工程师

200002 上海市江西中路 246 号 6 楼华东建筑设计研究院有限公司机电技术研究与发展中心

E-mail:guorong_yang@ecadi.com

收稿日期:2013-05-20

论、空气分布、液体冷却、辅助房间、污染、噪声、结构与抗震、火灾探测与灭火、调试、可利用性和冗余、节能等诸方面对数据中心设施空调系统设计方法及运行管理要求进行了详细描述。该书的第2版更新了数据中心的环境参数包络区,扩大了数据中心设备运行推荐和允许环境参数范围。该书内容全面,深入浅出,对从事数据中心的空调设计人员有较大的指导作用。

4)《数据通信设备中心液体冷却指南》(《Liquid cooling guidelines for datacom equipment centers》)[5]

该书分别从数据中心设施冷却装置、管路系统、数据通信设备液冷方法、冷水系统基本要求、液冷基础设施对工艺冷却系统的要求等方面对高密度数据中心液冷系统设计方法及要求进行了详细论述。

5)《数据通信设备中心结构与抗震指南》(《Structural and vibration guidelines for datacom equipment centers》)[6]

该书概括了数据中心设计的最佳实践,包括新建和改建的建筑结构的推荐内容,介绍了数据中心新结构和既有结构的设计,详细讨论了建筑基础设施、建筑基础设施结构、架空可检视地板系统和振动源及其控制,描述了冲击与振动测试、地震锚固系统和数据通信设备。对设计人员在各种有抗震要求的地区设计数据中心提供了设计指导。

6)《数据通信设施节能最佳实践》(《Best practices for datacom facility energy efficiency》)[7]

该书是一本全面论述数据中心节能设计的专著,从环境标准、机械设备和系统、风侧经济器循环、气流分布、控制与能量管理、电力输配设备、数据通信设备效率、液体冷却、应急技术、新兴及未来技术以及设施调试、运行和维护等各方面对数据中心设施系统的节能及能量管理进行了详细叙述。

7)《高密度数据中心案例研究与最佳实践》(《High density data centers case studies and best practices》)[8]

该书通过对9个架空可检视地板与2个非架空可检视地板高密度数据中心的案例研究,详细论述了数据中心布局,数据中心内设备功率,风量、温度测试,数据中心架空可检视地板静压箱和平顶高

度要求,架空可检视地板布置与配置。通过大量实测,揭示了数据中心设计和系统运行可能出现的问题,提出了解决方案。

8)《数据通信环境中颗粒物与气体污染》(《Particulate and gaseous contamination in datacom environments》)[9]

该书介绍了颗粒物与气体污染物的定义,概括了行业规程和指南中已公布的颗粒物限值,探讨了污染物的测试与分析方法,提出了污染物预防与控制方法,对数据中心采用空气侧经济器运行模式时应注意的诸多问题提出了建议。

9)《数据中心实时能耗》(《Real-time energy consumption in data centers》)[10]

该书论述了数据中心实时能耗检测。从数据中心测试基础,空调机组、水泵、冷水机组、冷却塔、换热器测试,电力分布系统、不间断电源、计算机房变压器及电力分布单元测试,计算机及存储系统、网络系统的测试等方面给出数据中心实时能耗的检测方法。

10)《数据中心绿色技术》(《Green tips for data centers》)[10]

该书以节能减碳的角度从数据中心能量管理、环境状况、空调气流管理、供冷站房、IT设备电力输配、照明以及IT设备等诸方面探讨了节能问题。

1.3 数据中心系列丛书中文版情况介绍

ASHRAE TC9.9的数据中心丛书对我国从事数据中心规划设计、施工安装、运营管理的人员均有较大的指导意义和参考作用。为了将此丛书介绍给国内同行,美国商业机器(IBM)全球(中国)有限公司购买了该丛书中前7本书的中文版版权。华东建筑设计研究院有限公司与IBM公司的专业技术人员组成了翻译组,对该套丛书进行翻译。丛书中的前7本书已于2010年至2011年陆续出版^[11-17]。丛书中另外3本书,IBM公司表示将与ASHRAE继续洽谈中文版的版权。

2 ASHRAE 数据中心丛书重点内容介绍

2.1 扩大热环境参数推荐包络区

2008年,ASHRAE对原有的数据处理机房热环境参数进行了修订,扩大了数据中心热环境参数推荐包络区范围,修订前后的热环境参数包络区推荐数据比较见表1。扩大热环境参数包络区的目

表 1 2004 年与 2008 年热环境参数包络区推荐数据比较

	2004 年	2008 年
低端温度/ $^{\circ}\text{C}$ ($^{\circ}\text{F}$)	20(68)	18(64.4)
高端温度/ $^{\circ}\text{C}$ ($^{\circ}\text{F}$)	25(77)	27(80.6)
低端相对湿度/%	40	露点温度 5.5 $^{\circ}\text{C}$ (41.9 $^{\circ}\text{F}$)
高端相对湿度/%	55	69, 露点温度 15 $^{\circ}\text{C}$ (59 $^{\circ}\text{F}$)

的是使数据通信高度可靠和高效运行。扩大的热环境参数推荐包络区是所有 IT 设备制造商一致接受的热环境范围,IT 设备运行在此环境参数范围内不会降低其整体可靠性。热环境参数范围是指数据中心内各种设备进风口处的进风参数,即使在 IT 设备机架的顶部也能获得合适的进风工况。

干球温度低限推荐值从 20 $^{\circ}\text{C}$ 改为 18 $^{\circ}\text{C}$ 的一个主要原因是通过不需要与热回风混合来保持原先推荐的 20 $^{\circ}\text{C}$ 限值来扩大经济器系统的控制范围。对于无经济器的供冷系统,较低限值会增加冷水机组的运行时间,当取空调机组的回风温度作为房间温度设定值时,也不应直接应用推荐的温度范围,该低端温度范围会使直接膨胀系统增加盘管被冻坏的危险性。

提高高端温度限值的理由是可增加经济器每年使用的时间。对于无经济器运行的冷却系统,提高送风温度或冷水温度的设计值也可提高制冷系统运行能效。

降低湿度限值的动力是每年获得大量无需加湿(涉及能耗)的时间。ASHRAE 推荐的低限值在焓湿图上是一条从干球温度 18 $^{\circ}\text{C}$ 、露点温度 5.5 $^{\circ}\text{C}$ 到干球温度 27 $^{\circ}\text{C}$ 、露点温度 15 $^{\circ}\text{C}$ 的直线,相对湿度大约从 25% 变化到 45%。

2.2 数据通信设备功率趋势

IT 行业需要满足客户的需求,提供速度更快、数据容量更大、带宽更宽、密度更高、基底面积/体积更小、更加开放和成本更低的产品。过去 10 多年间,数据通信设备的功率呈快速增大趋势,设备体积缩小导致负荷密度提高。一方面电力消耗在增加,另一方面压缩技术的突飞猛进使得设备单位基底面积的功率以更快的速度增长。

图 1 为 ASHRAE 提供的功率扩展趋势图。该图显示了极高密度通信设备、高密度通信设备、1U、刀片式、定制计算服务器、 $\leq 2\text{U}$ 计算服务器、存储服务器、独立工作站及磁带存储系统的功率趋势。这些数据模拟了未来全配置产品可能的耗电量,它作为一种预示、规划的工具,为未来采用各种

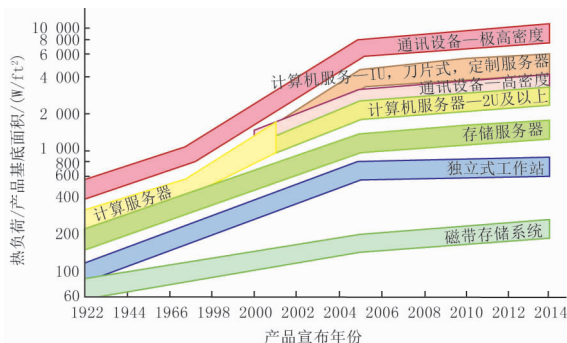


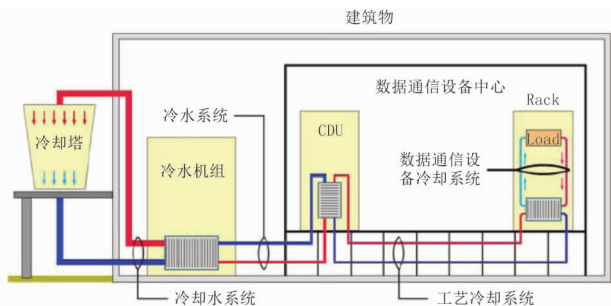
图 1 ASHRAE 提供的功率扩展趋势图

硬件提供了参考。

数据中心建筑本身的寿命周期在 25 年以上,数据通信设施(空调器、水泵、冷水机组等)的寿命周期为 10~20 年,而数据通信设备的产品周期一般仅为 1~3 年。应用数据通信设备功率趋势图可预测设施或机房中未来负荷,指导数据中心设施的规划、设计、施工与运行,避免无效消耗、设施过早报废、发生无谓的费用或投资。

2.3 数据通信设备液体冷却

数据中心内 IT 设备一般采用风冷方法冷却。随着机架热负荷逐渐上升,数据中心提供足够风量或足够冷量的能力趋于极限,需要对数据通信设备实施液体冷却。图 2 为一典型的液冷系统。该系统主要由数据通信设备冷却系统(机架之内)、工艺冷却系统(IT 机房内)、冷水系统(数据中心与制冷机房之间)、冷却水系统(制冷机房与冷却塔之间)组成。冷水系统与冷却水系统属设施冷却系统。



CDU 液冷分配装置 Rack 机架 Load 机架内需冷却的设备负荷

图 2 典型的数据中心液冷系统

设施冷却系统应具有灵活性,可扩展性,安装、调试、运行简单,维护与故障排除便捷,高可利用性与可靠性的特点。数据中心设施冷却系统设计时应从空间及布管、基本管路布置、集中站房分布、水处理及抗震保护等几方面考虑。在站房、管路分布

与末端管径确定时,应权衡投资与运行费用的关系。冷水管路的规划与设计,必须使数据中心在增加更多计算机设备时能保持可运行性。

液冷系统一般使用水或水加添加物。数据中心冷水供水温度通常为 4~16 ℃(推荐 10 ℃),实际水温可根据运行要求设定。数据通信设备或液体分配装置入口处的冷水供水温度的变化率每 5 min 内不应超过 3 ℃。冷水温差一般为 5~10 ℃。工艺冷却系统和通信设备冷却系统回路最高允许水压应不大于 690 kPa。冷水系统回路配管时,应控制冷水流速,确保系统在寿命周期内性能的完善性。表 2 为每年运行 8 000 h 的系统中冷水管道的最大流速。

表 2 冷水管管道最大流速要求	
管道尺寸	最大流速/(m/s)
>7.6 cm(3 in)	2.1
3.8~7.6 cm(1.5~3 in)	1.8
<2.5 cm(1 in)	1.5
各种柔性管	1.5

2.4 数据通信环境颗粒物与气体污染控制

数据中心业主和管理人员一般将注意力集中于数据通信环境的架构和性能上,而常忽视数据中心内颗粒物和气体污染。数据中心环境是一个动态环境,有许多定期维护操作、基础设施升级和 IT 设备变更活动。在这些活动期间,有害于电子设备的空气污染物会进入运行环境。空气侧经济器、为保持正压和人员换气的新风、有目的进入数据中心内部的室外空气会带进污染物。工作人员的头发、纤维、衣服和鞋袜上的其他污染物也会被带进数据中心内。颗粒物和气体污染将导致数据中心间歇性设备故障与重要系统非计划性停运。预防和减小污染物威胁是长期保持数据通信设备可靠性和可利用性的根本。

暖通空调系统是数据中心基础设施的一部分,也是数据中心重要的颗粒物和气体污染源。

为了实现空气侧经济器运行、保持数据中心内的正压和满足人员的卫生要求,需要从室外吸取新风。如新风未经适当过滤和处理,数据通信设备会受到新风中所有污染物的污染,这将是灾难性的。

根据数据中心热环境要求,绝大多数设施需要加湿。加湿时应注意水质与所选加湿器的水处理设备的匹配。水中含有颗粒物、细菌、非溶解性固体物和各种化学物,当水变为水汽时,许多物质会

留在水中。因此,对加湿水应进行水处理。

空气过滤可从空气中去除颗粒和气体污染物,数据通信环境需要一定的过滤器级别。表 3 给出了 ASHRAE 标准 52.2 中的过滤器效率值。颗粒

表 3 ASHRAE 标准 52.2 中过滤器效率值				
MERV	粒径/ μm			捕集效率/%
	3~10	1~3	0.3~1	
1	<20			<65
2	<20			65~70
3	<20			70~75
4	<20			>75
5	20~35			80~85
6	35~50			>90
7	50~70			>90
8	<70			>95
9	<85	<50		>95
10	<85	50~65		>95
11	<85	65~80		>98
12	>90	>80		>98
13	>90	>90	<75	>98
14	>90	>90	75~85	>98
15	>90	>90	85~95	>98
16	>95	>95	>95	>98
17	>99	>99	>99	>99
18 ¹⁾	>99	>99	>99	>99(0.3~1 μm)
19 ¹⁾	>99	>99	>99	>99
20 ¹⁾	>99	>99	>99	>99

1) 过滤病毒和炭尘。

物过滤效率 MERV8 是计算机房空调机组推荐的最低效率值,MERV11 或 MERV13 过滤器应使用于空气侧经济器或新风机组。当数据中心所在区域室外空气中的颗粒物粒径超过 PM10 时,所有空调机组冷却盘管的上游应采用 MERV6 空气过滤器。过滤器应定期检查、更换或清洗,以减小气流阻力。若数据中心内 VOC 的浓度较大,可采用活性炭或基于高锰酸钾的过滤器,使环境中的 VOC 降低到可以接受的程度。

2.5 数据中心节能设计要求

数据中心是单位建筑面积能耗较大、运行时间最长的建筑物。数据中心节能设计应从环境标准、冷却设备与系统、经济器和循环、气流分布、自动控制与能量管理、电力输配、数据通信设备等各方面考虑。

1) 环境标准

放弃“越冷越好”的想法,设备运行在 ASHRAE 热指南书中推荐的范围内。提高制冷循环热效率和增加经济器运行时间可节省大量能量。

2) 冷却设备与系统

根据具体项目确定最佳的部件和系统,使系统和部件既能在部分负荷工况下高效运行,也能在满负荷工况下高效运行。以显热冷量而不是以全热冷量选择计算机房空调机组。选择初始压力降较小的过滤器且定期维护,保持过滤器能量损失较小。尽可能采用变频驱动装置。集中制冷站应在全年基础上用各种设施负荷进行模拟,确定满负荷和部分负荷运行时最高效的部件组合。

3) 经济器循环

经济器循环为数据中心提供大量节能机会。经济器循环最主要的节能贡献是减少了机械冷却。确定经济器时应考虑以下因素:根据气候环境、冷却方式,确定风侧经济器、水侧经济器或集成式经济器。提高数据通信设施送风温度设定值对增加经济器使用时间、减小制冷机房能耗具有积极意义。

4) 气流组织

采用 CFD 模拟技术分析气流分布方式。送风通道与回风通道之间应有良好分隔。采用热通道/冷通道设计方式。如采用下送风空调机组,应将机组设置在热通道的端头。尽量选择较高、能为数据通信设备提供充分冷却的送风温度,以最大可能提高供冷设备效率和增加经济器可利用时间。选择高效风机、风机电动机和变频装置,使风机能耗最小。

5) 自动控制与能量管理

酌量加大温度和湿度死区,消除相邻机组之间的“争斗”。应避免计算机房空调机组中采用再热盘管或同时进行加热与供冷的其他方法。采用露点控制方法实现数据中心对加湿和除湿的控制。利用合理的判断方法确定经济器运行控制。由于数据通信设施冷负荷的不确定性,集中供冷站房应制定有效的部分负荷运行策略。

6) 电力输配

选择小负载下能高效运行的 UPS,对主回路干扰提供可接受的灵敏度。不应过度设置冗余度,过多冗余会使系统效率降低。选择阻抗较小、谐波最小的变压器,计算故障电流并安装合适的过电流保护装置。配电装置尽可能设置在离机架负载近的位置,将导线长度限制在数据通信设备最低利用电压范围内。

7) 数据通信设备

采用高效设备替代较落后设备。安装有功率修正系数的高效电源。在设备输入电压额定范围内,向设备输送可能获得的最高输入电压。提供变速风扇或风机,优化控制或与建筑系统协调。在有要求的情况下采用电源管理系统或能源管理系统。

8) 液冷设施

高密度的数据通信设备应采用液冷方式,选择合理的液体冷却供冷架构,确定合适的液体。考虑冷水机组效率最高、经济器运行时间最长和循环泵输送功率最小。制订能适应这种变化的液冷运行策略,适应未来 10~15 年的负荷变化。

2.6 数据中心设计最佳实践

在架空可检视地板送冷风、回风口设置在吊顶上或在墙的上部以及吊顶送冷风、地板上或墙的底部设置回风口的两种方案中,前者较佳。将设备和机柜的热排风直接向上排进吊顶回风静压箱比简单地设置高吊顶回风好。

数据中心内布置机柜时,应遵循冷通道/热通道布置原则。当设备排列方向存在灵活性时,计算机房空调机组设置在热通道端头比设置在其他位置好。

地板静压箱架空高度小于 0.3 m 的数据中心,不应将数据通信设备置于靠近计算机房空调机组处,该地点的穿孔地板块的送风量较小、甚至出现气流倒流现象。采用不同开孔率的地板块调节送风量,较高开孔率的地板可增大送风量,较小开孔率的地板可减小送风量。在架空可检视地板下可安装隔板来引导气流流向所需要的区域。地板下障碍物对穿孔地板块的送风均匀性影响较大,冷水管道与电缆应远离计算机房空调机组的送风口。当计算机房空调机组与计算机机架设备通道平行时,平行于热通道与冷通道的障碍物的影响比垂直于通道长度的障碍物的影响小。

计算机房空调机组应面向热通道而不是冷通道布置。如计算机房空调机组在架空可检视地板上平行排列,每排计算机房空调机组的送风方向应使整个地板下静压增加,而不能使气流卷流,造成这些区域内的静压下降。所有计算机房空调机组以同一方向出风时,穿孔地板块下的气流分布将较均匀。

高密度数据通信设备机架应置于静压较高的地板位置上,使邻近设备的冷通道中有足够的送风

量。一般情况下,最高静压出现在远离计算机房空调机组处,或出现在两台或多台计算机房空调机组送风气流相互碰撞处。

为了保持给定的入口温度,通过穿孔地板块的冷风量应随机架风量的增加而增加。机架区域内的计算机房空调机组的容量应大于等于处理机架热点处的局部热负荷。

3 结语

ASHRAE TC9.9 数据中心丛书代表了国际数据中心行业的最新研究成果,这些成果对我国数据中心设计及运营管理人员有较大的指导、参考作用。我国的技术人员应吸取其成功经验,利用其科学的研究结果,应用于我国的数据中心建设,在实践中不断探索、不断创新,提升我国在此领域的工程设计、科学研究和能量管理的能力与水平,为建设绿色节能的数据中心作出贡献。

参考文献:

- [1] ASHRAE. Real-time energy consumption in data centers[M]. ASHRAE, 2011
- [2] ASHRAE. Thermal guidelines for data processing environments[M]. 2nd ed. ASHRAE, 2009
- [3] ASHRAE. Datacom equipment power trends and cooling applications[M]. ASHRAE, 1995
- [4] ASHRAE. Design considerations for datacom equipment centers[M]. 2nd ed. ASHRAE, 2009
- [5] ASHRAE. Liquid cooling guidelines for datacom equipment centers[M]. ASHRAE, 1995
- [6] ASHRAE. Structural and vibration guidelines for

datacom equipment centers[M]. ASHRAE, 1995

- [7] ASHRAE. Best practices for datacom facility energy efficiency[M]. 2nd ed. ASHRAE, 2009
- [8] ASHRAE. High density data centers case studies and best practices[M]. ASHRAE, 1995
- [9] ASHRAE. Particulate and gaseous contamination in datacom environments[M]. ASHRAE, 2009
- [10] ASHRAE. Green tips for data centers [M]. ASHRAE, 2011
- [11] ASHRAE. 数据处理环境热指南[M]. 2 版. 沈添鸿, 杨国荣, 陈巍, 等, 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010
- [12] ASHRAE. 数据通信设备功率趋势与冷却应用[M]. 陈巍, 沈添鸿, 杨国荣, 等, 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010
- [13] ASHRAE. 数据通信设备中心设计研究[M]. 2 版. 杨国荣, 胡仰耆, 沈添鸿, 等, 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010
- [14] ASHRAE. 数据通信设备中心液体冷却指南[M]. 杨国荣, 胡仰耆, 沈添鸿, 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010
- [15] ASHRAE. 数据通信设备中心结构与抗震指南[M]. 陈亮, 沈添鸿, 杨国荣, 等, 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011
- [16] ASHRAE. 数据通信设施节能最佳实践[M]. 2 版. 任兵, 杨国荣, 陈亮, 等, 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010
- [17] ASHRAE. 高密度数据中心案例研究与最佳实践[M]. 沈添鸿, 杨国荣, 陈亮, 等, 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010