

数据中心 节能技术应用指南

SHUJU ZHONGXIN
JIENENG JISHU YINGYONG ZHINAN

上海市建筑建材业市场管理总站 编
上海市建筑科学研究院

中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



数据中心 节能技术应用指南

SHUJU ZHONGXIN
JIENENG JISHU YINGYONG ZHINAN

上海市建筑建材业市场管理总站 编
上海市建筑科学研究院



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书由上海市建筑建材业市场管理总站与上海市建筑科学研究院组织数据中心行业内资深专家及工程技术人员编写，系统地总结了目前数据中心领域较为成熟的技术。全书共 10 章，包括数据中心的现状与发展趋势、数据中心建筑与围护结构节能技术、供配电系统节能技术、空调系统节能技术、自然冷却技术、高热密度设备冷却技术、IT 设备节能技术、可再生能源应用与绿色照明技术、数据中心节能运行管理及节能技术应用案例。

本书具有较强的实用性和参考性，适用于数据中心行业技术人员、建设单位的设计和施工人员以及高校相关专业的师生作为参考读本。

图书在版编目（CIP）数据

数据中心节能技术应用指南 / 上海市建筑建材业市场管理总站，上海市建筑科学研究院编. —北京：中国电力出版社，2019.4
ISBN 978-7-5198-2966-7

I. ①数… II. ①上… ②上… III. ①数据管理 IV. ①F279.23

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2019）第 029222 号

出版发行：中国电力出版社
地 址：北京市东城区北京站西街 19 号（邮政编码 100005）
网 址：<http://www.cepp.sgcc.com.cn>
策 划：周 娟
责任编辑：杨淑玲（010-63412602）
责任校对：黄 蓓 闫秀英
装帧设计：王英磊
责任印制：杨晓东

印 刷：北京博海升彩色印刷有限公司
版 次：2019 年 4 月第一版
印 次：2019 年 4 月北京第一次印刷
开 本：787mm×1092mm 16 开本
印 张：11
字 数：205 千字
定 价：68.00 元

版 权 专 有 侵 权 必 究
本书如有印装质量问题，我社营销中心负责退换

编 委 会

主 任 马 燕 徐 强

副 主 任 张德明 蒋利学

执行主编 白燕峰 冯 君 张蓓红 何晓燕

委 员 (以拼音排序)

包琚予 曹 蓁 戴卓莹 黄文琦 李昊天 阮丽新

田晓峰 王 峻 王士军 刑万山 徐雯娴 朱明言

朱园园

参编单位

上海宝信软件股份有限公司

上海交大慧谷信息产业股份有限公司

上海银欣高新技术发展股份有限公司

上海华东电脑股份有限公司

江苏达海智能系统股份有限公司

上海思创华信信息技术有限公司

上海格瑞特科技实业股份有限公司

克莱门特捷联制冷设备(上海)有限公司

启控电子科技(上海)有限公司

依米康科技集团股份有限公司

前言

以大数据、云计算为代表的新兴信息技术，已全面融入社会生产、生活和治理，并将深刻改变全球经济格局、利益格局及安全格局。数据中心是实现经济转型的重要基础设施，是实现智能制造、物联网、云计算、大数据等技术和应用的基础保障。数据中心主要用于存放服务器和其他联网的计算机设备，这些设备在保存着互联网海量数据的同时，也为云计算提供必须的算力。数据中心全年不间断运行，产生大量的热量，为了使数据中心安全稳定运行，需要全年制冷降温，其能耗使用密度超过普通办公建筑数倍以上。数据中心高速发展导致消耗大量的能源资源，产生大量的温室气体排放，成为了当前公共建筑能耗的大户之一。据有关资料统计，2016 年中国数据中心总耗电量超过 1108 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$ ，约占全社会用电量的 1.8%；2017 年达到 1200 亿~1300 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$ ，约占全社会用电量的 2%。

节能降耗是我国可持续发展的基本国策之一，对于数据中心需要通过节能设计和高效运营管理来提高能源使用效率，实现绿色可持续发展。上海作为全国大数据集聚地之一，有关部门对数据中心能耗高度关注，国家及上海市对于公共建筑的节能降耗工作虽已颁布了多部规范、标准、指南等指导性文件，但尚未有系统性的数据中心节能技术指导文件出台。2017 年，上海市建筑建材业市场管理总站会同上海市建筑科学研究院开展了“数据中心节能技术应用指南”课题研究，组织业内具有丰富的数据中心工程实践经验和理论基础的工程技术人员组成研究团队，深入调研国内外各类数据中心的应用技术和标准，分析造成机房能效差异性的原因和影响因素，提出了数据中心的节能内容与应用技术。本书在课题研究成果基础上，从专业性和科普性角度进行了提炼和扩展。

数据中心的节能是涉及多专业的系统工程，本书力求深入浅出，全面阐述数据中心在空调系统、供配电系统、绿色照明、自然冷却、液冷、建筑围护结构、可再生能源应用和运营管理等方面节能应用技术，希望对数据中心行业技术人员、建设单位以及感兴趣的读者有所帮助，从而共同推动数据中心节能技术的进步，这也是我们编写此书的初衷和目的。

本书编写团队成员来自于不同专业，在数据中心及建筑节能行业积累了丰富的理论和实践经验，第 1 章由何晓燕完成，第 2 章由白燕峰、冯君完成，第 3 章由包珺予完成，第

4、6 章由黄文琦完成，第 5 章由田晓峰、阮丽新完成，第 7 章由曹蓁、李昊天完成，第 8 章由戴卓莹、王士军完成，第 9 章由朱明言、王峻完成，第 10 章由何晓燕、徐雯娴、朱园园完成。编写过程中团队做了大量的调研和总结，并开展了多次研讨、交流和思想碰撞，力求内容严谨，内涵丰富。历时近一年的编写过程虽然艰辛，但大家乐在其中。成书的过程中，包顺强、陈众励、程大章、程玉宝、顾牧君、何焰、吴雪芳、叶海东和张永炼等审稿专家们给予了大量无私的指导和帮助，提出了非常宝贵的意见，在此均谨深致谢意。

目 录

前言

第 1 章 数据中心的现状与发展趋势 1

1.1 数据中心的基本概念	1
1.1.1 数据中心的组成	1
1.1.2 数据中心的分类	2
1.1.3 数据中心的用能特点	3
1.2 数据中心的建设模式	3
1.3 数据中心的建设等级标准	5
1.3.1 数据中心信息安全等级划分	5
1.3.2 数据中心基础设施建设等级划分	5
1.4 数据中心基础设施的部署模式	7
1.5 数据中心的发展趋势	11
1.5.1 数据中心的业务发展趋势	11
1.5.2 数据中心的能耗发展趋势	12
1.5.3 数据中心的能源利用效率发展趋势	13

第 2 章 数据中心建筑与围护结构节能技术 15

2.1 合理布局数据中心	15
2.2 建筑与结构设计	16
2.3 提高围护结构性能	16
2.4 设计全封闭型数据中心	17
2.5 合理设置分区与层高	18

第3章 数据中心供配电系统节能技术..... 19

3.1 配电系统节能19

3.1.1 数据中心供配电系统架构调整对节能的意义19

3.1.2 数据中心负荷计算20

3.1.3 数据中心供电电压等级选择22

3.1.4 提高功率因数与节能的关系24

3.1.5 谐波治理与节能的关系25

3.1.6 其他措施28

3.2 数据中心电力变压器节能29

3.2.1 变压器损耗分析29

3.2.2 非晶合金变压器的应用30

3.2.3 数据中心“2N”变压器的合理使用31

3.3 数据中心不间断电源系统节能32

3.3.1 工频 UPS 与高频 UPS 的应用32

3.3.2 模块化 UPS 的应用34

3.3.3 高压直流供电（HVDC）的应用40

3.4 数据中心配电线路节能41

3.4.1 数据中心负荷运行特性、线路节能原则及其措施41

3.4.2 按经济电流选择配电线路导体截面42

3.4.3 数据中心“2N”系统负载均衡与节能的关系43

第4章 数据中心空调系统节能技术..... 45

4.1 空调系统的冷负荷计算方法45

4.2 选择合理的空调冷源形式48

4.2.1 风冷直接蒸发式空调系统48

4.2.2 水冷直接蒸发式空调系统49

4.2.3 水冷冷冻水空调系统50

4.2.4 风冷冷冻水空调系统52

4.2.5 双冷源空调系统53

4.2.6 不同空调冷源形式的分析比较54

4.3 采用磁悬浮技术提升压缩机能效56

4.4 改善机房空调系统气流组织58

4.4.1	采用 CFD 技术对机房气流组织进行模拟	58
4.4.2	合理布置冷热通道和机房空调	61
4.4.3	采用封闭冷/热通道技术隔离冷/热气流	63
4.4.4	选用气流导向性的变风量送风地板和带有变风量风机的送风地板	65
4.4.5	提高架空地板的高度	67
4.4.6	冷/热通道封闭机房的建设	67
4.5	提升数据中心空调系统能效的措施	70

第 5 章 数据中心自然冷却技术 72

5.1	AHU 风墙节能技术	72
5.1.1	AHU 风墙工作原理	72
5.1.2	AHU 风墙的工作模式	73
5.1.3	AHU 风墙群控	75
5.1.4	AHU 风墙的适用范围	76
5.2	氟泵型机房风冷精密空调	76
5.2.1	氟泵型风冷精密空调工作原理	76
5.2.2	氟泵型风冷精密空调特点	77
5.2.3	氟泵型风冷精密空调适用范围	78
5.3	冷水空调系统的自然冷却技术	79
5.3.1	风冷冷水机组自然冷却工作原理	79
5.3.2	水冷冷水机组自然冷却工作原理	81
5.3.3	冷水空调系统自然冷却适用范围	82
5.4	蒸发冷却技术	83
5.4.1	直接蒸发冷却工作原理	84
5.4.2	间接蒸发冷却工作原理	85
5.4.3	蒸发冷却技术的适用范围	86
5.5	乙二醇自然冷却技术	87
5.5.1	乙二醇自然冷却工作原理	87
5.5.2	乙二醇自然冷却工作模式	88
5.5.3	乙二醇自然冷却适用范围	88

第 6 章 数据中心高密度设备冷却技术 89

6.1	数据中心高密度设备的散热措施	89
-----	----------------	----

6.2	封闭冷/热通道的高密度机柜解决方案	90
6.2.1	区域强送风解决方案	90
6.2.2	行间空调解决方案	90
6.3	使用液冷等新技术进行高密度设备柜散热	92
6.3.1	水冷机柜	92
6.3.2	热管冷却技术	93
6.3.3	高密度封闭机柜	96
6.3.4	芯片级管道液体冷却	97
6.3.5	浸入式水冷技术	98
6.3.6	浸没式矿物油冷却技术	99

第7章 数据中心 IT 设备节能技术 101

7.1	服务器节能	101
7.1.1	服务器节能问题分析	101
7.1.2	服务器节能规划	102
7.1.3	服务器节能技术	104
7.2	存储设备节能	107
7.2.1	存储设备节能问题分析	107
7.2.2	存储设备节能规划	108
7.2.3	存储设备节能技术	108
7.3	网络设备节能	110
7.3.1	网络设备节能问题分析	110
7.3.2	网络设备节能规划	110
7.3.3	网络设备节能技术	110
7.4	虚拟化技术	112
7.4.1	虚拟化技术概述	112
7.4.2	虚拟化架构	115
7.5	软件定义数据中心	115
7.5.1	SDDC 的架构	116
7.5.2	SDDC 促进数据中心的运营转型	117
7.5.3	SDDC 对数据中心基础设施的影响	119

第 8 章 数据中心可再生能源应用与绿色照明技术 121

- 8.1 水源热泵 121
 - 8.1.1 水源热泵节能技术工作原理 121
 - 8.1.2 水源热泵节能技术特点 121
 - 8.1.3 水源热泵节能技术适用范围 122
- 8.2 光伏发电 123
 - 8.2.1 光伏发电节能技术工作原理 123
 - 8.2.2 光伏发电节能技术工作模式 124
 - 8.2.3 光伏发电节能技术适用范围 126
- 8.3 绿色照明 126
 - 8.3.1 数据中心照明节能原则 126
 - 8.3.2 数据中心照度水平及功率密度值（LPD） 127
 - 8.3.3 照明节能技术概述 128
 - 8.3.4 LED 照明节能技术 128
 - 8.3.5 照明控制节能技术 130

第 9 章 数据中心节能运行管理 131

- 9.1 建立完善的节能管理体制 131
- 9.2 节能运行策略 132
 - 9.2.1 冷水机组群控 132
 - 9.2.2 冷冻水大温差小流量控制 133
 - 9.2.3 冷冻水出水温度控制 134
 - 9.2.4 变频控制 136
- 9.3 数据中心能效测量方法 136
 - 9.3.1 PUE 评价方法的局限性 136
 - 9.3.2 数据中心电能能效定义与测量方法 137
 - 9.3.3 数据中心电能能效测量方法 140
 - 9.3.4 影响数据中心电能使用效率（EEUE）的因素 141
- 9.4 建立机房能效管理平台 143
 - 9.4.1 能源消耗统计 143
 - 9.4.2 能源消耗分析 144
 - 9.4.3 能源消耗评估 145

第 10 章 数据中心节能技术应用案例 147

10.1 北方某高寒地区云计算数据中心 147

10.1.1 项目介绍 147

10.1.2 项目特色及节能技术应用 147

10.2 华东地区某在建数据中心 151

10.2.1 项目介绍 151

10.2.2 项目特色及节能技术应用 151

10.3 某机房节能改造案例 155

10.3.1 项目介绍 155

10.3.2 项目特色及节能技术应用 156

10.3.3 节能改造效果 160

参考文献 161



第1章

数据中心的现状与发展趋势

1.1 数据中心的基本概念

1.1.1 数据中心的组成

数据中心是为集中放置的电子信息技术提供运行环境的建筑场所，可以是一栋或几栋建筑物，也可以是一栋建筑物的一部分，包括主机房、辅助区、支持区和行政管理区等。主机房主要用于数据处理设备的安装和运行，包括服务器机房、网络机房、存储机房等功能区域。辅助区用于电子信息技术和软件的安装、调试、维护、运行监控和管理，包括进线间、测试机房、总控中心、消防和安防控制室、拆包区、备件库、打印室、维修室等区域。支持区为主机房、辅助区提供动力支持和安全保障，包括变配电室、柴油发电机房、电池室、空调机房、动力站房、不间断电源系统用房、消防设施用房等。行政管理区用于日常行政管理及客户对托管设备进行管理，包括办公室、门厅、值班室、盥洗室、更衣间和用户工作室等。

数据中心除了 IT 设备之外，还包括机电系统、消防系统、安防系统及装潢系统等基础设施，系统种类多、专业性强，数据中心基础设施物理框架如图 1-1 所示。

1. 空调系统

空调系统包括为数据机房、变配电室、消防控制室、管理人员办公室及公共环境（走廊等）进行空气调节的系统，空调调节包括温度、湿度控制（制热、制冷、加湿、除湿等）及通风（送新风、排风）等。

2. 电气系统

电气系统包括变电系统、配电系统（配电箱、配电柜、列头柜及电缆、母排等）、柴油发电机组、UPS 及照明系统等。

3. 消防系统

包括灭火系统（气体灭火系统、水喷雾系统、水喷淋系统等）、报警系统（烟感探测

器、温感探测器、报警控制设备等）及空气采样系统等。

4. 弱电系统

弱电系统包括视频监控系统、周界报警系统、出入口管理系统（门禁系统、停车管理系统等）、巡更系统等、楼宇自动控制系统（水系统、通风系统、柴油输送系统、报警联动系统等）、电力监控系统、环境监控系统及网络通信系统等。

5. 装潢系统

主要包括机房装潢、办公自动化装潢及配套设备装潢等。

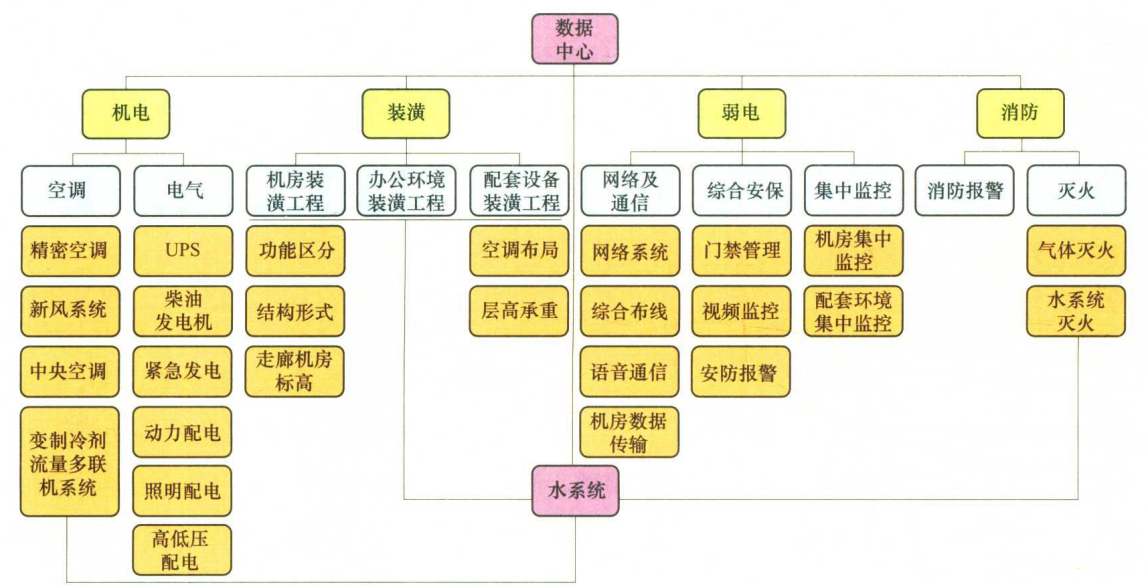


图 1-1 数据中心基础设施物理框架

1.1.2 数据中心的分类

通常数据中心包括政府数据中心、企业数据中心、金融数据中心、互联网数据中心、云计算数据中心、外包数据中心等从事信息和数据业务的数据中心等。总体来说，根据数据中心服务的对象，基本可分为互联网数据中心（Internet Data Center，IDC）和企业级数据中心（Enterprise Data Center，EDC）两大类。

1. 互联网数据中心（IDC）

互联网数据中心是电信业务经营者利用已有的互联网通信线路和带宽资源，建立标准化的电信专业级机房环境，通过互联网向客户提供服务器托管、租用以及相关增值等方面的全方位服务。它可以为各类应用和客户提供大规模、高质量、安全可靠的专业化服务器托管、空间租用、网络批发带宽以及应用服务提供商（Application Service Provider，ASP）业务。通过使用 IDC 服务，企业或政府单位不需要再建立自己的专门机房、铺设昂贵的通

信线路，也无需建立专门的网络工程师队伍。

2. 企业级数据中心（EDC）

企业级数据中心是由企业或机构构建并所有，服务于企业或机构自身业务的数据中心，是一个企业数据运算、存储和交换的核心计算环境，它为企业、客户及合作伙伴提供数据处理、数据访问等信息及应用支持服务。同时，对于信息系统、数据安全、保密或者其他特殊要求的行业或企业，通常会建设自己管理运行的数据中心，比如银行、保险、政府、大型企业等。

1.1.3 数据中心的用能特点

数据中心具有“良好的安全性能，可靠而且不能间断”的特点，数据中心机房除 IT 设备耗能之外，主要的能源消耗在满足环境要求的空调、配电、照明等数据中心机房的配套设施上，空调系统在数据中心是耗能大户，数据中心空调系统需要具备全年不间断制冷，系统必须稳定、可靠运行。

机房能耗主要由三部分组成，即机房主机能耗、机房空调能耗和其他能耗，根据统计数据显示，在能耗比例方面，机房主机能耗及空调能耗两部分占据了总能耗的 80% 以上。由于动力环境集中监控系统和机房消防设备对于机房的安全稳定运行有着至关重要的作用，其设备投入及能耗不可随意降低，而机房照明设备的总用电量相对于前两部分能耗可以忽略不计，所以机房节能的核心部分应该是机房主机节能和机房空调整能。

1.2 数据中心的建设模式

数据中心建设模式可分为自建、共建、托管和租赁四种方式。

1. 自建

自建指的是企业独自享有数据中心基础设施的建设和使用权，并由自身团队来进行运行与运维管理，拥有对整个数据中心的控制权和指挥权。但自建一座数据中心需要花费大量的时间和大笔的投入，还需要具有数据中心各类专业技术人才，中小企业显然没有实力去做这样的建设。一般银行、大型国企、政府、互联网等行业的大型企业才有实力去自己建设数据中心。

优势：

1) 可以对数据中心进行任意调整和扩容。

2) 按照自己企业的发展业务来部署数据中心设备，随时可以自我决定进行调整，对数据中心的未来发展有决定权。

3) 数据中心安全度最高, 信息泄露、受攻击的可能性大为减少。

4) 拥有数据中心的所有产权, 数据中心是企业财富的重要部分。

缺点: 自建数据中心要耗费大量的人力物力, 一个数据中心从选址建设到投入运营一般要花费几年的时间。

2. 共建

共建指的是多个企业共同出资完成数据中心的建设, 建设完成后按照比例分享数据中心的使用权。这种方式适用于那些资金和技术不足, 但又想拥有自己数据中心的企业。当然这种方式由于多个企业都拥有数据中心的使用权和控制权, 往往容易引起纷争, 不利于数据中心的发展。在实际中, 这种共建数据中心的方式几乎没有, 只是在理论上存在。

3. 托管

托管指的是对于一些管理制度比较健全的企业, 通过选择第三方专业服务商, 替代内部资源来承担数据中心的规划、建设、运营、管理和维护。一般是由电信运营商或者第三方专业供应商提供, 托管方式是当前最为广泛的应用。

优势:

1) 企业使用运营商的数据中心场地, 由运营商提供场地、供电、通风、监控、消防等数据中心基础设施服务, 企业只需要将自己的 IT 设备放入到数据中心中就可以使用。

2) 业务部署快, 可以较快上线运行, 企业只需要关心自己设备的运行情况, 对数据中心的其他方面不用关心, 这样可为企业节省大量的人力和物力。

缺点: 托管的企业对基础设施及设备无权做出更改, 只有自己带来的设备是自己的, 为此托管的企业在这种方式中处于弱势地位, 对自己任何的设备和业务调整还都需要同基础设施运营方进行协商, 当数据中心供电、冷源、空调、消防等设施出问题给企业业务造成损失而难以维权。

4. 租赁

租赁指的是完全租用别人的数据中心使用, 只需要提供自己需要多少服务器、多大带宽、多少存储等这些技术指标, 然后由数据中心提供, 租赁的企业只需要将自己的应用业务挂到数据中心设备上即可。现在的阿里云、电信云、百度云等都是这种运营方式, 向广大中小企业提供租赁服务。

优势:

1) 企业只需关心自己的应用业务, 不用关心数据中心的运营, 这样企业也不需要拥有数据中心方面的技术人才, 减少了人力成本的支出。

2) 投入资金小, 不需要时可以不租, 没有任何损失。这不像自建和托管时要有大量设备的投入, 将来关闭不用时不会产生大量的损失。

缺点：企业自主权较弱，对故障难以直观发现，高安全性业务不适用于租赁方式。

不管采用哪种方式，最终的目的都是支撑企业的业务发展，只有采用与自身企业相适应的数据中心建设方式，才能减轻企业运营负担，为企业创造更多的利润。

1.3 数据中心的建设等级标准

数据中心根据运行的安全性与可靠性需求划分为信息安全措施和基础设施可靠性措施两大类，其中每类措施又划分不同的等级。

1.3.1 数据中心信息安全等级划分

数据中心信息安全等级保护划分为 5 个监管等级，见表 1-1。

表 1-1 2.0 体系下定义要素与完全保护等级的关系

受侵害的客体	对客体的侵害程度		
	一般损害	严重损害	特别严重损害
公民、法人和其他组织的合法权益	第一级	第二级	第三级
社会秩序和公共利益	第二级	第三级	第四级
国家安全	第三级	第四级	第五级

由于本书以数据中心基础设施节能管理为重点，信息安全有关内容详见国家标准《信息安全技术 网络安全保护等级基本要求》2.0 版本。

1.3.2 数据中心基础设施建设等级划分

1. 数据中心设计的依据和标准

目前国内外与数据中心有关的工程建设标准主要有《数据中心设计规范》（GB 50174）、美国通信工业协会（TIA）发布的《Telecommunications Infrastructure Standard for Data Centers》（ANSI/TIA-942），这些标准对数据中心建设定位、功能指标、设计技术、施工工艺、验收标准等都提出具体技术要求。其中 ANSI/TI1A-942—2005 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，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，并给出了许多的技术与系统的工程建议与指导，该标准所说的数据中心可以是政府或企业自有数据中心，也可以是运营商用于租赁服务的公用数据中心，标准描述了各类数据中心对通信基础设施提出最起码的和最低的要求。

下面以表格的形式简介 GB 50174 与 ANSI/TIA-942 标准各级等级的特征、要求和对照。