

行级制冷系统在高热密度数据中心制冷中的应用探讨

廖霄, 吴劲松

(中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663)

摘要: 本文对数据中心常用的两种制冷架构进行了研究和分析, 从理论和实践两方面对比了两种制冷模式的优点、成本和能耗。通过对比分析, 阐述行级制冷将是高热密度数据中心的优选制冷解决方案。

关键词: 房级制冷; 行级制冷; 高热密度; 数据中心

中图分类号: TU831

文献标志码: A

文章编号: 2095-8687-(2015)S1-0172-06

Discussion on Application of Row-based Cooling Used in High Power-density Data Center

LIAO Xiao, WU Jinsong

(China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

Abstract: In this paper, two kinds of cooling solutions for data center are studied and analyzed from the comparison of the theoretical and practical aspects of the advantages, cost and power consumption. In the end, the paper expounds that the row-oriented cooling will be the optimal solution for the high power-density data center through comparative analysis.

Key words: room-based cooling; row-based cooling; high power-density; data center

随着信息技术的不断升级和发展, 客户对计算能力需求的日益增长, 服务器作为数据中心主要承载的 IT 设备, 经历了从塔式、机架式向刀片式、定制化服务器演进的发展过程, 数据中心单机柜功率密度也随之呈现跳跃式增长, 从发展初期的单机柜能耗 1~5 kW 之间逐步向 6 kW、10 kW、20 kW 到 50 kW 甚至更高迈进。随着刀片服务器和虚拟化技术等的大规模应用, 现代 IT 设备的更新换代, 数据中心的功率密度会越来越高^[1-3], 可以预测, 在未来, 数据中心中高热密度的机柜会继续逐步增大, 这对数据中心机房制冷系统提出了更高的技术要求。

和过去单纯追求机房内部整体环境温度的降低不同, 高热密度机房强调的是有效带走每个设备的散热量^[4]。数据中心机房在高热密度运行模式下, 如何有效地解决数据中心的制冷问题, 将成为数据中心建设者们面临的严峻挑战之一^[5-8]。

1 房级制冷系统

机房的制冷系统主要承担两项功能: 一是提供总制冷量, 二是将冷空气传递给机房内的 IT 负载设备^[1,9]。

数据中心自诞生起, 就广泛采用房级制冷方式^[5]。在房级制冷架构中, 空调机组与机房相关联, 由一台或多台机房空调并行工作以应对机房的总体热负荷, 吸取机房环境中较热的空气^[9], 见图 1。

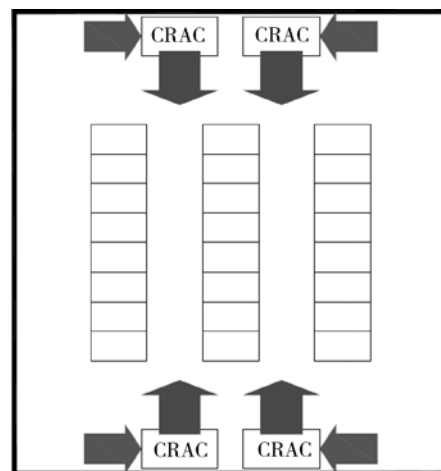


图 1 房级制冷系统架构图

Fig. 1 Room-based Cooling System Architecture Diagram

收稿日期: 2015-11-13

作者简介: 廖霄(1980), 女, 江西樟树人, 工程师, 硕士, 主要从事数据中心、通信信息机房等基础环境配套工作。(e-mail) liaoxiao@gedi.com.cn。

根据 GB 50174《电子信息系统机房设计规范》第 7.3.2 要求,“对机柜或机架高度大于 1.8 m、设备热密度大、设备发热量大或热负荷大的主机房,宜采用活动地板下送风、上回风的方式”^[10]。据此设计规范要求,采用房级制冷架构时,空调机组部署在数据中心主机房的周围,经空调机组送出的冷空气从活动地板下方经地板孔送出或通过上吊顶风管送出,进入主机房和机柜,为 IT 设备提供所需制冷量^[5],气流组织是一种“先冷却环境后冷却设备的”气流组织,容易造成靠近空调的设备一侧冷,远离空调一侧的设备热的现象,出现局部过热和热岛现象^[11]。该系统架构下,空调机组送出的冷风是在整个机房范围内与设备排出的热风进行混合,制冷效果还容易受机房物理特性的影响,如机房净高、机房形状和尺寸、天地面障碍物、机柜和空调的部署方式等,因而对机房气流组织的设计要求较高。当某些因素设计不合理时,容易造成空调送出的部分冷风绕开 IT 设备直接回到空调,导致空调的制冷能力没有得到充分利用,制冷效率降低。

此外,房级制冷模式下,空调机组布置在机房的四周,造成送风距离较长,空调机组送出的冷风在长距离风道中不可避免地会与 IT 设备产生的废热发生混合,进一步造成制冷效率的降低^[5]。当机柜功率密度增大时,还容易在机房内产生“局部过热点”,为消除局部热点,一方面可以通过改造送回风系统解决,但系统复杂性必然加大;另一方面,可增大空调机组的送风量,这必然会增加压缩机和风机的负载和功耗,带来制冷系统投资和能源成本的增加。面对这些难题,是加大空调机组制冷量继续沿用一直广泛使用的房级制冷系统,抑或是对现有制冷系统进行变革或创新?紧靠热源的行级制冷系统应运而生。

2 行级制冷系统

相比房级制冷系统,行级制冷系统对空调机组的部署位置进行了变革,创新性地将空调机组位置从远离负荷中心的机房周围移至靠近 IT 设备机柜的列间,主要定位于为高热密度的数据中心提供行级散热解决方案^[9]。

在行级制冷系统中,机房空调机组部署在成行机柜之间,与机柜行相关联,以针对特定行机

柜提供制冷为设计目的^[12],系统架构参见图 2。该制冷模式下,送风方式一改房级制冷架构下的下送风或上送风方式,而是采用全新的水平送风方式。空调机组送出的冷风由多个小风扇水平送出,由于空调机组与 IT 设备机柜紧密安装在一起,水平送出的冷风和服务器后部的风扇形成一个有效的气流循环,冷风水平送出后被机柜内的服务器吸入对服务器进行有效冷却,热交换后的气流被排出服务器,最后再被空调机组吸入,如此往复循环^[2]。

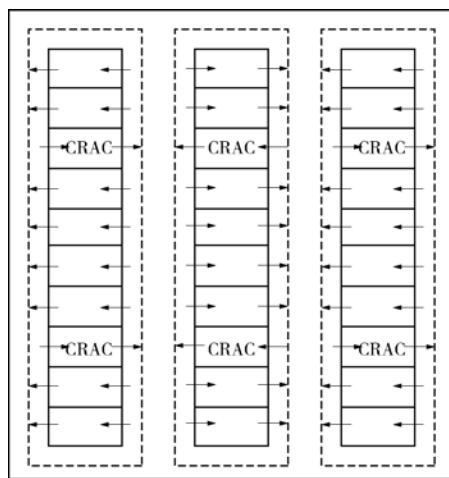


图 2 行级制冷系统架构图

Fig. 2 Row-based Cooling System Architecture Diagram

从图 1 和图 2 的制冷系统架构图不难看出,与房级制冷系统相比,行级制冷系统的送风路径更短,具有以下几大创新优势:

1) 支持更高负载密度

行级制冷系统“紧靠热源”部署,保证较短的气流通道,空调机组的额定制冷量能够得到有效充分利用^[13],与房级制冷系统相比,同等额定制冷量下可以实现更高的负载密度^[1]。这个优点非常重要,因为对于许多负载较小的数据中心来说,空调机组的风机功率损耗就会超过 IT 负载总功耗^[9]。

2) 最大限度消除局部热点

行级制冷系统采用水平送风方式,能有效降低机柜正面垂直温度梯度,有数据显示当采用密闭通道送风式机柜正面温度梯度可降低到 1 K 以下,有效降低局部热点风险。此外,短路径送风,空调机组的送风温度与机柜的进风温度基本相同,整体温度场更为均匀。

3) 缩短送回风路径

行级制冷系统“紧靠热源”部署，大为缩短送回风距离，使送出的冷风在传输过程中风阻减少，风压降低少，可以大幅降低风机功耗。这种与生俱来的系统架构优势是房级制冷系统所不具备的，能带来能效方面的收益^[5]。

4) 减少冷量损失

随着制冷与热源距离的缩短，冷热空气混合的可能性降至最低，冷量可用性提高^[14]，所需配送的冷风风量会减少。由于风机的风量与转速的一次方成正比，风压与转速的二次方成正比，而功率与转速的三次方成正比，所以空调机组的风机可以根据风量降低转速，达到节能的效果^[5]。此外，冷热风混合减少，可以设定更高的空调机组送风温度，送风温度与机柜前的进风温度更为接近，可避免为了补偿由于冷热风混和所损失的冷量而设定较低的机房空调送风温度，压缩机需要提供的冷量也会降低，带来成倍的能耗节约^[5]。

5) 高显热比

较高的送风温度，可使制冷系统在露点温度以上的工况下运行^[13]，减少被动除湿和补偿除湿对行级空调机组冷量的消耗，空凋制冷能力能更多地用于冷却 IT 设备的显冷量^[6]，通过合理设计显热

比可高达 100%，有效降低机房整体加湿和除湿能耗^[15]。系统显热比提高，意味着系统也就越节能。

6) 高匹配性和灵活性

由于行级制冷系统“紧靠热源”，其与负载或热负荷的匹配就更紧密和精确^[5]。制冷系统可根据相关特定机柜行的实际需求，有针对性地确定制冷容量和冗余^[9]，在同一主机房内还可同时支持高中低功率密度机柜的混合部署，面对制冷需求的变化，也可更为游刃有余且有效地面对^[12]。

7) 初期投入低

房级制冷系统一般是根据终期总制冷量需求需在数据中心建设初期一次性投资建设，当初期 IT 设备上架率和负载率较低时容易造成资金浪费；而行级制冷系统与特定行机柜关联，可考虑与微模块系统结合，按业务发展分期投资建设部署，减少初期投资压力。

与房级制冷系统相比较，行级制冷系统除了制冷能力、节能和扩展能力的显著提升外，对机房物理条件的要求也没有那么高，如：

1) 机房几何形状

行级制冷系统与特定行关联，架构简单且预先确定的几何布局使得制冷性能可以预测，相对而言受机房几何形状约束更少^[9]。

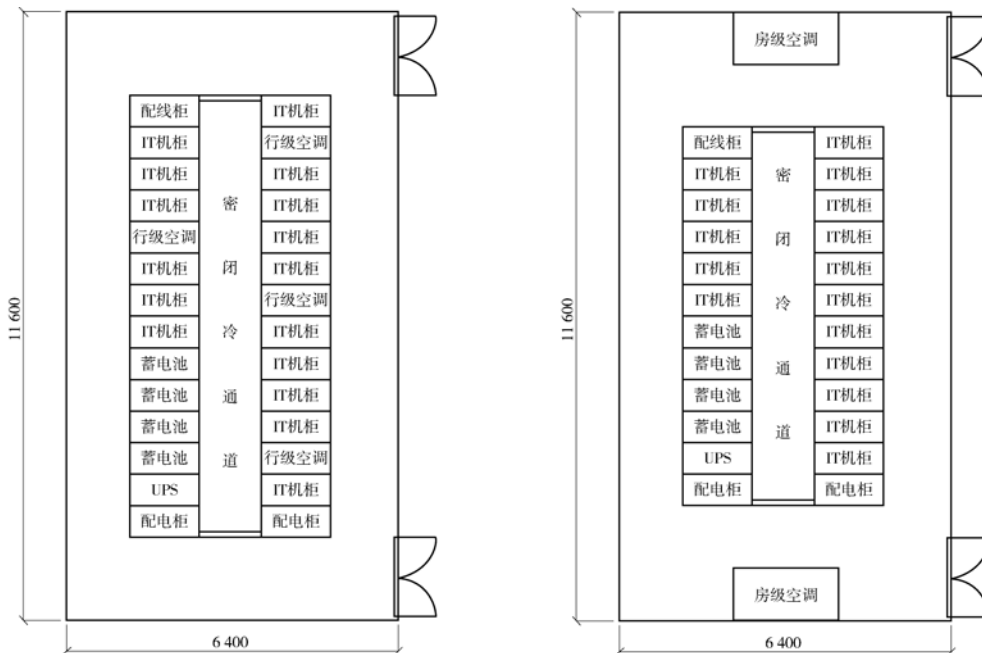


图3 某数据中心机房平面布置设计方案

Fig. 3 Room Layout Design for a Data Center Computer Room 105 kW.

2) 无需活动地板

行级制冷模式下, 空调机组布置在机柜间, 无需依靠高架空地板或送回风管实施制冷, 这点对于高热密度应用极其具有优势。通常在房级制冷模式下, 要解决高热密度应用问题, 需设计 1 000 mm 或更高的架空地板高度, 这对机房层高提出了较高的约束条件^[9,16]。

3 案例分析

以广州某国有企业数据中心机房为例, 该机房面积 74 m², 机房高度约 4.5 m, 配置 16 个服务器机柜和 1 个网络配线柜, 机柜尺寸统一为 600 × 1 100 × 2 000 mm, 配置密闭冷通道, 服务器机柜功率密度为 5 kW/机柜, 考虑到机房内服务器、配电设备、照明装饰散热和环境热负荷等, 机房总热负荷约供配电设备采用 1 台模块化 UPS, 单模块 40 KVA, 功率模块 3 + 1 冗余配置, 蓄电池组按后备时间 15 min 配置。针对上述需求, 笔者分别提供了房级制冷和行级制冷两种方案(参见图 3)进行供冷系统设计, 并就这两种供冷架构下机房的总体建设方案、投资、能耗、制冷效率等进行了分析对比。

3.1 CAPEX、OPEX 和 TCO 对比

表 1 机房基础设施建设方案(房级制冷 VS. 行级制冷)

Table 1 Comparison of two Infrastructure Construction Schemes for a Data Center Computer Room (Room-based Cooling vs. Row-based Cooling)

专业系统	房级制冷	行级制冷
装修工程	天、地、墙防水防尘处理, 需配置下送风架空地板	天、地、墙防水防尘处理
机柜系统	24 个机柜位密闭冷通道, 其中 16 个服务器机柜和 1 个网络配线架机柜	28 个机柜位密闭冷通道, 其中 16 个服务器机柜和 1 个网络配线架机柜
供配电系统	模块化 UPS, 单模块 40KVA, 功率模块 3 + 1 冗余配置, 蓄电池组按 15 分钟配置	模块化 UPS, 单模块 40KVA, 功率模块 3 + 1 冗余配置, 蓄电池组按 15 分钟配置
空调系统	配置 105KW 下送风风冷房级空调, 1 + 1 冗余配置	配置 35KW 水平送风行级空调, 3 + 1 冗余配置
综合布线系统	强弱电线缆一批	强弱电线缆一批
综合监控系统	机房动环监控系统一套	机房动环监控系统一套

该数据中心机房工程建设资本性支出和主要运行费用如下:

表 2 机房建设资本性支出(房级制冷 VS. 行级制冷)

Table 2 CAPEX Comparison of a Data Center Computer Room Infrastructure Construction (Room-based Cooling vs. Row-based Cooling)

专业系统	建设资本性支出/元	
	(房级制冷)	(行级制冷)
装修工程	133 200	185 000
机柜系统	184 000	192 000
供配电系统	700 000	700 000
空调系统	440 000	600 000
综合布线系统	80 000	80 000
综合监控系统	120 000	120 000
合计	1657 200	1 877 000

据该数据中心机房日常运营数据统计, IT 设备负载率约 80%, 105 kW 下送风风冷型房级空调单机日常运行耗电约 19.5 kW(定频压缩机和 EC 风机), 35 kW 行级空调单台空调日常运行耗电约 5.5 kW(变频压缩机和 EC 风机设计)。按年平均运行天数 365 天, 用电价格按 0.8 元/kWh 计算, 得出两种制冷模式下年度运行成本如下:

表 3 机房年度运行成本对比(房级制冷 VS. 行级制冷)

Table 3 OPEX Comparison of a Data Center Computer Room Infrastructure Construction (Room-based Cooling vs. Row-based Cooling)

制冷架构	总负荷/kW	年度耗电量/kWh	年度运行成本/元
房级制冷	103	902 280	721 824
行级制冷	86	753 360	602 688

综上所述, 机房在两种制冷系统建设模式下, 机房建设运行总成本为:

表 4 机房建设运行总成本对比(房级制冷 VS. 行级制冷)

Table 4 TCO Comparison of a Data Center Computer Room Infrastructure Construction (Room-based Cooling vs. Row-based Cooling)

费用项	房级制冷	行级制冷	行级/房级/%
建设资本性支出/元	1 657 200	1 877 000	113
年度运营费用/元	721 824	602 688	83
总成本(第 0 年)/元	1 657 200	1 877 000	113
总成本(第 1 年)/元	2 379 024	2 479 688	104
总成本(第 2 年)/元	3 100 848	3 082 376	99

由表 4 数据分析可知, 行级制冷模式下机房建

投资本性支出是房级制冷的113%，但行级制冷模式下的机房年度运行成本仅为房级制冷的83%，在投产运行正常起的第2年行级制冷模式的建设运行总成本即可低于房级制冷模式的总成本，随着运行年限的增加，两种制冷模式的建设运行总成本将逐步增大，行级制冷节能优势越发明显。

3.2 制冷效率对比

在制冷效率比较上，经实际测量，房级制冷模式下，该案例中机柜垂直面上下（机柜顶部1900 mm出处和机柜底部100 mm处）温度差达到2.0 K，而在行级制冷模式下，机柜垂直面同样位置的温度差仅为0.8 K。由上述数据证实，采用行级制冷可以获得相对更均匀的温度场，有效降低局部热点风险。

制冷系统最主要的功能就是按机房内IT设备的总计发热量提供相应的冷风量，并保证所需的冷风量能够按照合理的路径送入机柜内用以冷却设备。根据空气的比热，我们可以得到IT设备热量公式^[16]：

$$Q(W) = 1.232 \times L/S \times (T_2 - T_1) \text{ } ^\circ\text{C} \quad (1)$$

式中： L/S 为制冷装置的送风量； $T_2 - T_1$ 为制冷装置的送回风温度差。

对于该案例，不同制冷模式下，IT设备数量和型号没有发生变化，IT设备热量不变；但是由于送风路径和距离的不同，两种制冷模式下空调机组的送风温度存在差别。根据该国有企业机房运维管理办法要求，结合运行IT设备的环境要求：运行温度范围5~35℃，相对湿度10%~90%（无冷凝），本案例中该数据中心机房的环境温度设置为24℃，房级制冷模式下空调的回风温度为24℃，送风温度为14℃， $(T_2 - T_1)$ 值为10℃；行级制冷模式下空调的回风温度为24℃，送风温度仅为16℃， $(T_2 - T_1)$ 值为8℃，行级空调机组的送风量仅需为房级空调机组的80%。上述数据证实，在IT设备热量一定的前提下，达到同样的环境温度，行级制冷模式下空调风机送风量低于房级制冷模式，风机功耗降低，能耗相应降低；反过来也可以理解为，两种制冷模式下，空调机组的有效送风量一致时，行级制冷可以达到更高的制冷效率。

3.3 行级制冷应用局限

虽然行级制冷架构非常适用于高热密度数据中心，但在具体的项目实施中，还有几点仍需建设方

格外注意。

1) 故障点有所增加

行级空调支持的最大单机制冷量低于房间级空间，采用行级制冷时会需要更多数量的空调机组，空调故障点增加，因此在选择行级空调时建议尽可能选用较多应用案例的知名厂家成熟产品。

2) 管路系统设计更为复杂

采用水冷型行级空调机组时，因行级空调布置在机柜行之间，空调冷冻、冷凝和加湿水管需引入并布置在机柜行下方，漏水隐患较大，而房间级空调因为空调布置在机房四周，可以采用防水围堰将空调水管漏水隔离在机房机柜区域之外，因此选用行级空调时需做好各级漏水监测，强弱电布线采用上走线方式，一来不影响漏水监测或检修，二则当发生漏水时不会影响到其他管线。

4 结论

紧靠热源的行级制冷系统的制冷效率更高，可以有效节约数据中心运行成本，随着数据中心运行年限和机柜功率密度的不断升高，行级制冷系统带来的成本节约将更为可观。对于新建的数据中心来说，可优先考虑高效、灵活和易用的行级制冷系统。

参考文献：

- [1] 刘婷婷. 含高热密度机柜的IT机房空调的节能措施[J]. 制冷与空调, 2013(2): 84-87.
LIU Tingting. Energy Conservation Measures of Air-conditioner for IT Computer Room with High Heat Density Cabinets[J]. Refrigeration and Air-condition, 2013(2): 84-87.
- [2] 陈钢. 机房高热密度机柜空调解决方案[J]. 华南金融电脑, 2010(8): 47-49.
CHEN Gang. Room Air Conditioning Solution for High Heat Density Cabinet [J]. Financial Computer of Huanan, 2010(8): 47-49.
- [3] 华嵩. 高热密度机房空调的两种设计方法[J]. 制冷空调与电力机械, 2010(2): 30-34.
HUA Song. Two Design Methods of High Heat Density Data Room Air Condition [J]. Refrigeration Air Conditioning & Electric Power Machinery, 2010(2): 30-34.
- [4] 程序, 张万里. 高热密度通信机房的空调解决方案[J]. 邮电设计技术, 2008(5): 61-64.
CHENG Xu, ZHANG Wanli. Solutions on Air Conditioning System of High Heat Density Communication Equipment Room [J]. Designing Techniques of Posts and Telecommunications,

- 2008(5): 61-64.
- [5] JOHN Bean, KEVIN Dunlap. Energy Efficient Cooling for Data Centers: A Close-Coupled Row Solution [J]. American Society of Heating Refrigerating and Air conditioning Engineers (ASHRAE) White Paper, 2008(10): 36-42.
- [6] JOHN Niemann, KEVIN Brown, VICTOR Avelar. 热通道与冷通道气流遏制对数据中心的影响[EB/OL]. APC 白皮书第 135 号, 2008.
- [7] NEIL Rasmussen. Cooling Strategies for Ultra-High Density Racks and Blade Servers [EB/OL]. American Power Conversion White Paper 46, 2005.
- [8] HANNAFORD P. Ten Steps to Solve Cooling Problem Caused by High Density Server Deployment [EB/OL]. American Power Conversion White Paper 42, 2007.
- [9] KEVIN Dunlap, NEIL Rasmussen. 数据中心房间级、行级和机柜级制冷方式的选择 [EB/OL]. APC 白皮书第 130 号, 2014.
- [10] GB 50174—2008, 电子信息系统机房设计规范 [S].
- [11] 辛建华. 基于气流组织优化技术的数据中心机房节能减排运用 [J]. 广东通信技术, 2015(2): 49-54, 59.
- [12] 翁振邦. 从某机房能耗评估浅谈如何有效降低在用机房 PUE 值 [J]. 邮电设计技术, 2015(1): 12-15.
- [13] 郑贤清, 葛昌荣. 某高密度数据中心散热解决方案设计 [J]. 电子质量, 2015(8): 35-37, 41.
- [14] APC. 利用 InRow 精确制冷解决方案最大限度提升效率 [J]. 通信世界, 2009(23): B14.
- [15] 深圳市英维克科技有限公司. 数据中心制冷解决方案探讨 [J]. 智能建筑与城市信息化, 2013(11): 35-36.
- [16] JIM V G, WENDY T. 仅使用行级制冷方式对整个数据中心进行制冷 [EB/OL]. APC 白皮书第 139 号, 2014.

(责任编辑 林希平)

(上接第 146 页 Continued from Page 146)

供氢系统是采用汽机槽车减压至氢气贮存罐, 然后减压输送到发电机组, 也因属于短期运行, 故采用在供氢车间内就地控制。

启动锅炉由于属于短期运行, 故在启动锅炉房内就地控制; 灰库卸灰在灰库内控制。

该电厂“辅助车间集中监控、就地无人值班”的成功实现, 说明除了优化辅助车间控制网(BOP网)的网络结构之外, 还必须优化辅助车间的运行、管理模式, 将部分与单元机组有关的辅助系统的控制操作交由单元机组 DCS 系统或 DCS 系统间的公用网络控制, 由单元机组运行值班员负责监控, 使得 BOP 网络的监控范围缩小, 减少辅助车间全能运行值班员的压力, 使之更容易适应新的岗位要求。

4 结论

辅助车间及辅助系统监控方案的优化不仅需要依靠科技进步和设计转变思想, 还需要电厂转变思想实行新的运行和管理模式。本介绍的优化方案, 使全厂整体生产过程的监控全部集中, 单元机组和辅助车间的控制网络结构上完全分开, 优化后的辅助车间控制网结构简单、投资省及安全可靠, 既将为电厂的自动化水平大大提高了一

步, 而控制网络又得到了简化, 能给电厂带来较大的经济效益, 特提供火力发电厂在辅助车间自动化方面作参考。

参考文献:

- [1] 孙瑜, 张金祥, 刘明佳, 等. 国产 DCS 在 600 MW 超临界机组辅助车间控制一体化中的应用 [J]. 中国电力, 2008, 41(8): 76-79.
- SUN Yu, ZHANG Jinxiang, LIU Mingjia, et al. Application of Domestic DCS in the Integrated BOP Control System of 600 MW Supercritical Power Units [J]. Electric Power, 2008, 41(8): 76-79.
- [2] 杨金芳, 张玉柱, 徐同社. 火电机组辅控一体化集中监控网络方案及配置 [J]. 电力勘测设计, 2012(4): 33-37.
- YANG Jinfang, ZHANG Yuzhu, XU Tongshe. Network Plan and Assignment of Integrative Centralized Control of Auxiliary Control in Heat-Engine Units [J]. Electric Power Survey & Design, 2012(4): 33-37.
- [3] 夏俊利. 300 MW 火电机组辅助系统控制网络的组建 [J]. 现代电力, 2005(2): 30-35.
- [4] 钱培峻. 超超临界机组主辅控一体化控制的设计研究 [J]. 华东电力, 2010(7): 21-25.
- [5] 耿晓峰, 刘卫国. 辅助车间集中控制网在发电厂中的应用 [J]. 浙江电力, 2010(11): 36-39.

(责任编辑 张春文)