

文章编号: 1671-6612 (2021) 06-771-06

# 基于数值模拟的铁路“四电”机房断电热环境分析

王胜男<sup>1,2</sup> 姚景生<sup>1</sup> 吴金文<sup>1</sup> 陶丽<sup>1</sup> 付雷<sup>2</sup> 曹晓玲<sup>2</sup>

(1. 中铁二院工程集团有限责任公司 成都 610031;

2. 西南交通大学机械工程学院 成都 610031)

**【摘要】** 铁路“四电”机房常年运行,设备发热量大,需要不间断的提供冷量维持机房温度。一旦出现紧急断电事故,铁路“四电”机房内的温度将大幅上升,将极大地影响机房内设备的安全运行,甚至可能出现设备损坏,进而影响到整条铁路系统的安全。掌握铁路“四电”机房断电后的热环境对其应急控温有重要意义。采用数值模拟的方法,对铁路“四电”机房断电后的热环境进行研究,结果表明:机房空调系统中断后,“热”通道内的热量将迅速扩散至整个房间,而设备排出的热量也会很快在通道内被“稀释”,不会造成较大的局部热点,“热”通道内的温度也仅比室内空气流动较差处的温度高1℃左右,对于应急控温来说,只要保证最不利温度满足要求即可。

**【关键词】** 铁路“四电”机房;热环境;数值模拟

中图分类号 TU83 文献标识码 A

## Numerical Study on the Thermal Environment of 'Four Major Electrical Machine Rooms' in the Period of Power Failure

Wang Shengnan<sup>1,2</sup> Yao Jingsheng<sup>1</sup> Wu Jinwen<sup>1</sup> Tao Li<sup>1</sup> Fu Lei<sup>2</sup> Cao Xiaoling<sup>2</sup>

(1. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd, Chengdu, 610031;

2. School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031)

**【Abstract】** The railway 'four major electrical machine rooms' ran all the year round, so it needed to provide continuous cooling to maintain the temperature of the machine room. Once an emergency power failure occurred, the temperature in the machine room rose sharply, which greatly affected the safety of the equipment in the computer room, and even damage the equipment, thus affecting the safety of the whole railway system. It was of great significance to master the thermal environment after power failure of railway 'four major electrical machine rooms' for emergency temperature control. In this paper, numerical simulation method was used to study the thermal environment of railway 'four major electrical machine rooms' after power failure. The results showed that: the heat in 'hot' channel quickly spread to the whole room, and equipment of heat soon was diluted within the channel, which did not result in a larger local hot spots, the temperature in 'hot' channel also was only 1℃ higher than indoor air flow. So, it was to ensure the most adverse temperature in emergency temperature control.

**【Keywords】** railway 'four major electrical machine rooms; thermal environmen; numerical simulation

作者(通讯作者)简介:王胜男(1989.03-),女,在读博士研究生,高级工程师, E-mail: wangsn@ey.crec.cn  
收稿日期:2020-11-15

## 0 前言

铁路“四电”机房是指铁路站房通信、电力、

信号、信息四大专业的相关机房。“四电”机房对铁路运输的指挥和安全保障起到至关重要的作用,

而良好的空调和通风又是“四电”机房安全稳定运行的保障<sup>[1]</sup>。“四电”机房全年每天 24 小时运行,室内设备发热量大、散湿量小,防火要求严格,全年四季要求维持室内一定的温湿度范围,对暖通空调设备的可靠性有着较高的要求。我国铁路“四电”机房空调系统设计为了提高机房空调系统的可靠性,常见的方案是采用冗余设计来解决可能出现的空调设备故障等问题。例如对于中小型数据机房一般设计有两套空调系统,其运行策略为每套系统各自按照 50% 的制冷量运行,当一套设备发生故障时,另一套设备则转化为 100% 的制冷量运行。但是该系统只解决了可能出现的设备故障问题,却无法解决设备断电导致空调系统无法运行的情况。例如,当在某些偏远地区或贫困地区建设铁路项目时,空调系统的电力供应受当地的经济发展和社情情况制约,可能存在断电情况。一旦出现紧急断电事故,两套空调系统均无法正常工作,铁路“四电”机房内的温度将大幅上升,这将极大地影响机房内设备的安全运行,甚至可能出现设备损坏,进而影响到整条铁路系统的安全。

机房内的热源包括数据处理设备、程控交换设备、传输设备等机器的散热以及建筑围护结构的传热、太阳辐射热、人体散热、照明装置散热负荷等。但机房内电子设备散热产生的制冷负荷是制冷空调负荷的主要来源,使得冬季时机房内部也存在大量的热负荷,空调系统需要全年运行。机房内几乎没有湿负荷源,只有机房工作人员与外界空气带入的湿负荷。围护结构传热引起的负荷会逐时波动,但总量不大,对室内空调冷负荷影响相对较小<sup>[2,3]</sup>。

据文献<sup>[4]</sup>,机房各月设备总功耗之间的最大波动在 7% 以内,波动范围很小,可以认为机房设备运行稳定。但是不同设备之间的功耗相差较大,功耗最大设备的功耗为功耗最小设备的 3 倍多,机房内部热源分布存在不均匀性,易出现局部过热的情况。机房内局部热点的定位主要根据室内设备(热源,以单个机柜为代表)、气流组织和现有的热环境评价体系判断。比较成熟的热环境评价体系有 Sharma 等<sup>[5]</sup>提出的 SHI (Supple Heat Index)、RHI (Return Heat Index), Herrlin 等<sup>[6]</sup>提出的 RCI (Rack Cooling Index) 和 RTI (Return

Temperature Index)。Bash<sup>[7]</sup>等提出的  $\beta$  以及田浩等<sup>[7]</sup>人提出的 IOM (Index Of Mixing) 不仅是良好的热环境评价体系,更能反映数据中心机房局部热点区域。

合理的气流组织是消除机房热点的关键。按照送风口布置位置和形式的不同,可以将气流组织形式大致分为上送风和下送风。上送风方式先冷却环境温度,再冷却设备,一般气流组织紊乱,不利于消除局部热点,需要将发热量较大的设备布置在送风落点<sup>[8]</sup>。下送风是目前研究和运用最为活跃的一种,一般是在机房内设置架空的活动地板,活动地板下的空间用作空调送风的通道,送风口一般布置在机柜侧或机柜底部,有较好的气流组织。Roger Schmidt 等<sup>[9]</sup>提出了热通道封闭、冷通道封闭和机架排风通道封闭三种方案,来提高机房换热效率,避免冷热气流发生掺混。Jinkyun Cho 等<sup>[10]</sup>对 6 种常见送风方案模拟后发现,地板送风、管道回风、冷通道隔离的方案是最佳的送风方案。魏葵<sup>[11]</sup>在其研究中发现,缩短回风路径,减小空气滞留区,可以显著改善机房内部的温度场分布,降低机房环境温度。

因此,明确铁路“四电”机房断电后的热环境情况是至关重要的。本文基于数值计算方法,对铁路“四电”机房断电后热环境进行分析,为掌握空调系统断电后机房的降温需求并设计降温防护手段提供参考。

## 1 数值模拟方法

机房紧急断电后,为保障列车等工具的正常运行,备用电源或不间断电源往往优先为数据处理设备、程控交换设备等 IT 设备供电,冷水机组、风机等空气调节设备通常不会获得电力供应,此时设计状态下的气流组织将瓦解,形成新的气体流动,房间内的温度也会快速上升。

该模拟验证使用 Fluent 软件进行计算,采用标准  $k-\varepsilon$  模型, SIMPLE 算法进行压力速度耦合, Green-Gauss Node-Based 算法进行梯度离散, PRESTO! 算法进行压力修正,动量和能量方程采用二阶迎风算法进行离散。

为设计出适合该环境的应急控温装置,本文选

取了长宽高为 5m×3m×2.5m 的区域进行空调系统停运期间的机房热环境分析。按照机房设计负荷 300W/m<sup>2</sup> 进行计算可知, 该区域热负荷为 4500W。机柜尺寸参考最小标准机柜 18U 的规格尺寸 600mm×600mm×1000mm, 在该区域内放置 2 排共 4 个该尺寸的机柜, 两排机柜对向排热, 每个机柜热负荷为 1125W, 具体布置见图 1。假设该模拟区域内初始温度为 22℃, 且温度分布均匀, 气流组织合理。

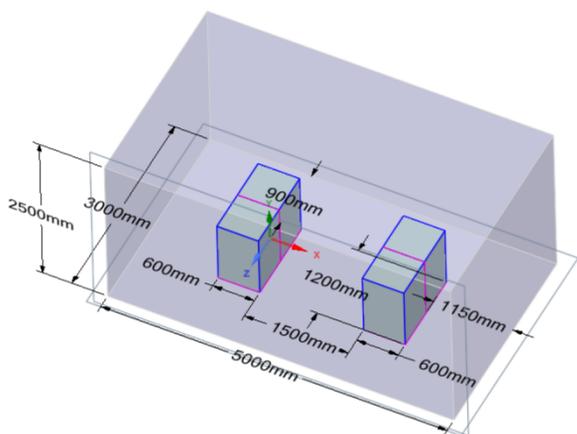


图 1 模拟计算示意图

Fig.1 Schematic diagram of simulation

## 2 热环境分析

温度测点根据《GB/T2887-2011 计算机场地通用规范》进行选取与布置, 理论测点布置如图 2 所示, 测点位置 2、3、4、5 均应选在 A~1、B~1、C~1、D~1 中点附近。由于测点需要与设备保持至少 0.8m 及以上的距离, 因此实际测点位置如图 3 所示。

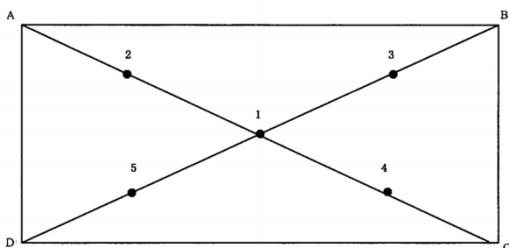


图 2 理论测点分布图

Fig.2 Distribution diagram of theoretical measurement point

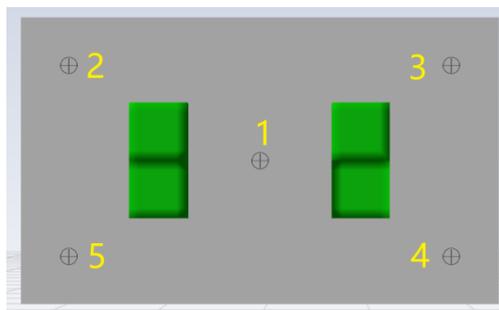


图 3 实际测点分布图

Fig.3 Distribution diagram of actual measurement point

图 4 为机房空调系统停运后测点温度随时间的变化曲线。可以发现, 5 个测点位置的温度差别不大, 其变化曲线也几乎一致, 仅测点 1 的温度在前 20s 内明显高于其余位置温度, 之后测点 1 与其余测点温差均在 1℃ 以下。因此, 可以认为机房在空调系统停运后房间内的温度均匀性较好。

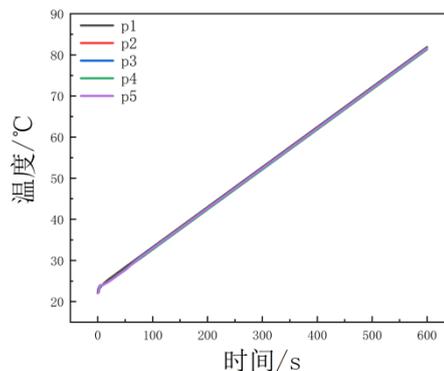


图 4 测点温度变化图

Fig.4 The temperature variation with time

图 5 为机房空调系统停运后 10s、30s、60s、120s 共 4 个时刻, 距离地面 0.8m 平面的温度云图。通过云图可以发现, 空调系统停运后, 通道内的热空气迅速向房间各处扩散, 减小房间各处的温度差异, 并在 30 秒左右形成较为稳定的温度分布。此时最大温差为 1.5℃, 高温点在设备出风口, 低温点在设备两侧。随着环境温度的进一步提高, 设备出风温度也水涨船高, 并且由于设备核心散热温度与环境平均温度的温差减小, 导致最大温差扩大为 1.8℃ 左右。在 120s 时, 设备出风口周围的温度已经超过 35℃。

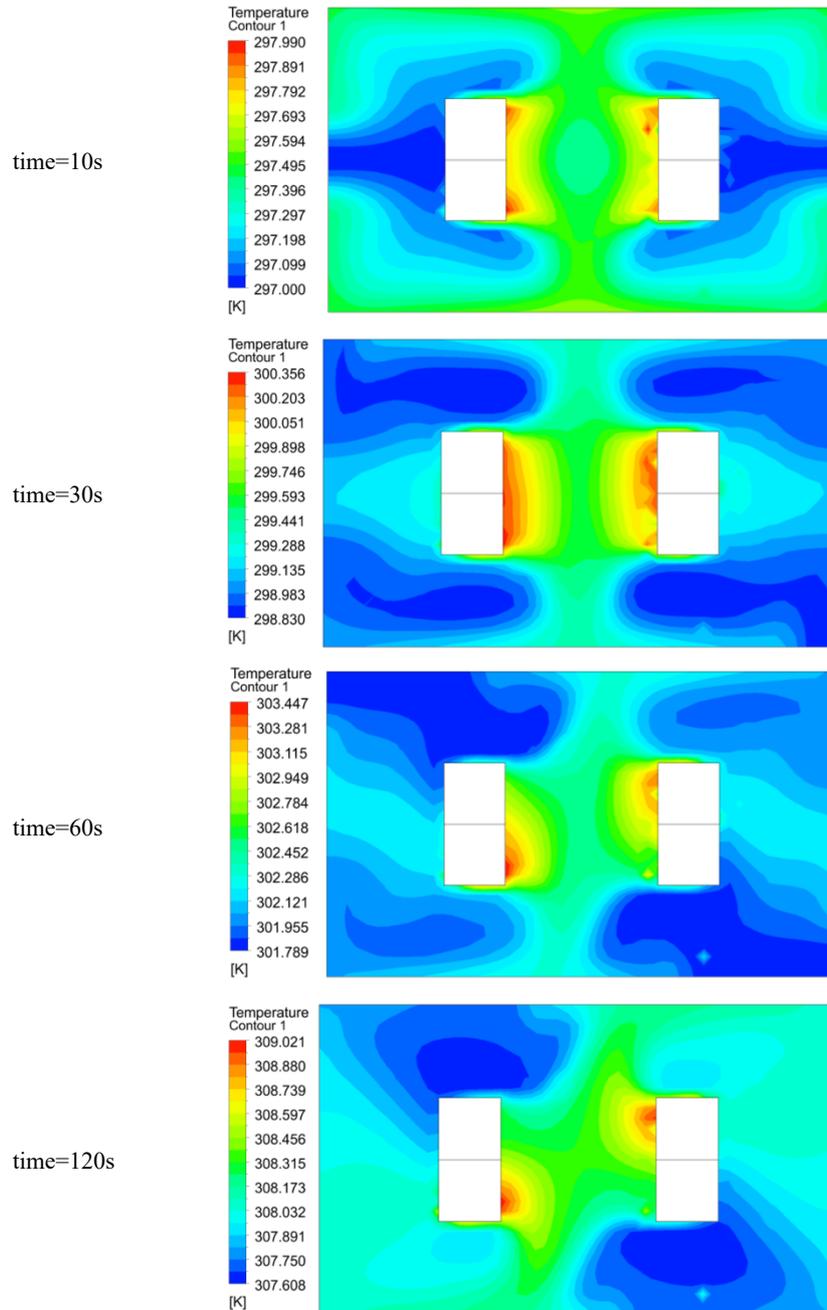
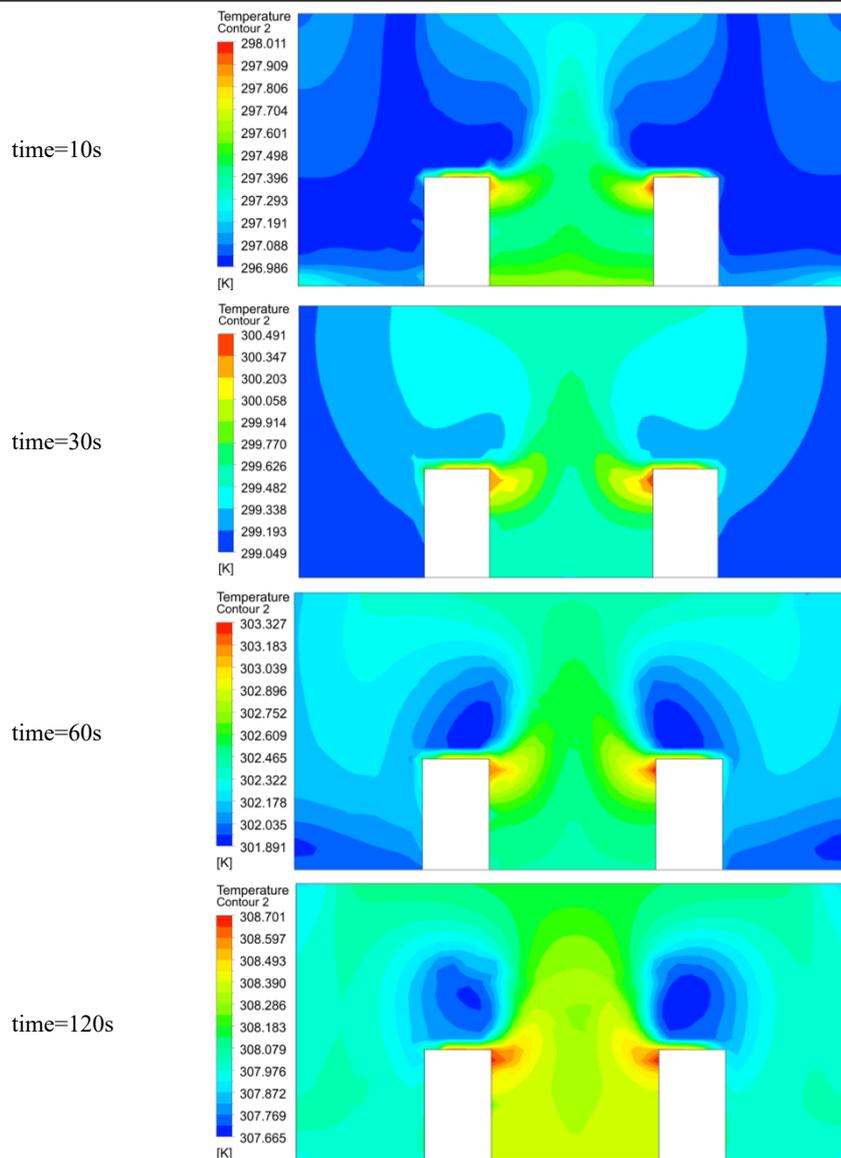


图 5 温度分布图(Z=0.8)

Fig.5 Temperature distribution of temperature filed (Z=0.8)

图 6 为机房空调系统停运后 10s、30s、60s、120s 共 4 个时刻，房间中垂面的温度云图。通过云图可以看到，空调系统中断后，“热”通道内热空气上升后将向四周蔓延，与周围空气进行换热，又由于设备进风口往往处于负压状态，此时“冷”通道上方的空气更易坠下，并进入设备吸收热量，由此室内气体通过机柜形成环形流动，加剧室内空气热交换，同时这也是机柜上形成低温旋涡的原因。

根据施耐德电气对空调系统中断期间数据中心温度变化的研究<sup>[1]</sup>，空调系统电力中断后，房间内的空气温度会快速上升，虽然各机柜排热口处的空气温度会明显高于环境温度，但机柜排出的热空气很快便会与室内空气进行混合，整个房间温度分布并未因此产生较大的不均匀性。

图 6 温度分布图( $Y=1.25$ )Fig.6 Temperature distribution of temperature filed( $Y=1.25$ )

### 3 结论

机房空调系统中断后,“热”通道内的热量将迅速扩散至整个房间,而设备排出的热量也会很快在通道内被“稀释”,不会造成较大的局部热点,“热”通道内的温度也仅比室内空气流动较差处的温度高 $1^{\circ}\text{C}$ 左右,并且对于应急控温来说,只要保证最不利温度满足要求即可,因此,可以认为空调系统中断后的建筑内部空气温度均匀一致。

#### 参考文献:

[1] 沈云.火车站的“四电”机房空调通风设计[J].城市建

设理论研究(电子版),2014,8.

[2] 张飞.数据机房热负荷实验测试及三维数值模拟研究[D].广州:华南理工大学,2011.

[3] 原世杰,谢静.数据中心机房不同封闭方案的热环境仿真模拟与分析[J].电信技术,2017,(8):98-100.

[4] 魏蕤.大型通信机房热环境试验测试及仿真优化研究[D].广州:华南理工大学,2010.

[5] SHARMA R, BASH C, PATEL C. Dimensionless Parameters for Evaluation of Thermal Design and Performance of Large-scale Data Centers; proceedings of the 8th AIAA/ASME Joint Thermophysics and Heat

- Transfer Conference, F 2002-06-24, 2002 [C]. American Institute of Aeronautics and Astronautics: St. Louis, Missouri.
- [6] HERRLIN M K. Airflow and Cooling Performance of Data Centers: Two Performance Metrics[J]. ASHRAE Transactions, 2008,6.
- [7] BASH C E, PATEL C D, SHARMA R K. Efficient Thermal Management of Data Centers—Immediate and Long-Term Research Needs[J]. HVAC&R Research, 2003,9(2):137-52.
- [8] 田浩,李震,刘晓华,等.数据中心热环境评价指标研究[J]. 制冷学报,2012,33(5): 5-9.
- [9] 刘双双,田甜.送风落地点对传输机房热环境的影响及实测分析[J].制冷,2019,38(1):47-52.
- [10] SCHMIDT R, VALLURY A, IYENGAR M. Energy Savings Through Hot and Cold Aisle Containment Configurations for Air Cooled Servers in Data Centers; proceedings of the ASME 2011 Pacific Rim Technical Conference and Exhibition on Packaging and Integration of Electronic and Photonic Systems[C]. American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, 2012/02/14.
- [11] CHO J, KIM B S. Evaluation of air management system's thermal performance for superior cooling efficiency in high-density data centers [J]. Energy and Buildings, 2011,43(9):2145-55.