



引用格式:李育文,周美娟,刘建秀,等.煤矿户外双层智能柜的高温性能设计与分析[J].轻工学报,2016,31(2):81-86.

中图分类号:TB24 文献标识码:A

DOI:10.3969/j.issn.2096-1553.2016.2.011

文章编号:2096-1553(2016)02-0081-06

# 煤矿户外双层智能柜的高温性能设计与分析

## Design and analysis of high temperature performance of coal mine outdoor double intelligent cabinet

李育文,周美娟,刘建秀,王胜永

LI Yu-wen, ZHOU Mei-juan, LIU Jian-xiu, WANG Sheng-yong

郑州轻工业学院 机电工程学院, 河南 郑州 450002

College of Mechanical and Electrical Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China

### 关键词:

煤矿户外双层智能柜;高温性能;有限元模型

### Key words:

coal mine outdoor double intelligent cabinet; high temperature performance; finite element model

**摘要:**针对煤矿户外双层智能柜在运行中易发生高温故障甚至爆炸的问题,以计算流体动力学CFD为基础,运用Fluent软件进行分析,根据煤矿户外双层智能柜的结构、工作条件等,建立有限元模型,设置边界条件.通过正交试验设计模拟方案,对影响柜内温度的风机排风量 $Q$ ,百叶窗排数 $N$ ,智能组件的安装位置 $C$ 三因素进行分析,得出诸因素对柜内影响的显著性大小依次为: $Q > N > C$ ,并从中选取最优设计方案,可使柜内最高温度控制在 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,从而满足国家电网的温控要求.数值模拟与试验结果之间的误差为 $4.2\%$ ,验证了有限元模型的正确性,为户外双层智能柜的高温性能设计分析提供了参考.

收稿日期:2015-03-10

基金项目:河南省国际科技合作项目(134300510019);郑州市普通科技攻关项目(141PPTGG346);郑州轻工业学院研究生科技创新基金资助项目

作者简介:李育文(1961—),女,河南省武陟县人,郑州轻工业学院教授,主要研究方向为机械设计制造.

**Abstract:** For coal mine outdoor double intelligent cabinet is easy to have high temperature breakdown problems and even explode in operation, based on the computational fluid mechanics, using Fluent software analysis was made. According to the coal mine outdoor double layer structure and the working conditions etc, the finite element model was set up, and the boundary conditions were set. By orthogonal experiment, a simulation scheme was designed, the effect factors of temperature inside cabinet (exhaust air fan  $Q$ , shutter row number  $N$  and intelligent component layout  $C$ ) were analyzed. It was concluded that the factors' influence on cabinet of significance was as follows:  $Q > N > C$ . The optimal design scheme was selected to make that the highest temperature of the cabinet was  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ , thus meeting the requirement of temperature control of State Grid. The error between the numerical simulation and experimental results was  $4.2\%$ , which verified the correctness of the finite element simulation and provided a reference for design and analysis of high temperature performance outdoor double intelligent cabinet.

## 0 引言

随着煤炭工业的发展,智能化控制设备越来越普及.在户外无遮挡的情况下,夏季环境温度一般达到  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,甚至会更高,加上太阳辐射及元件的发热,有可能使密闭机柜内部的温度超过允许范围.装置长时间地在超负荷高温下运行,会使电器元件的性能降低,产生故障影响系统的正常运行,甚至爆炸<sup>[1-3]</sup>.

关于户外智能柜的温控,朱云霄等<sup>[4]</sup>研究了户外智能柜的热设计,阐述了户外智能柜机柜散热和保温设计,特别是对热设计中最常用的风机散热应考虑的问题及风机的选型做了较详尽的论述,但是没有从户外智能柜的结构上进行分析.张洋等<sup>[5]</sup>对不同的散热方式做了简单的阐述,重点研究了风机散热的方案,为户外控制柜的散热方案选型提供了依据,但是没有对其他影响因素做详细的分析.

煤矿户外双层智能柜的工作环境恶劣,要求户外双层智能柜具有防尘、防水和防太阳辐射的功能<sup>[6]</sup>.如何控制好户外智能柜内部的温度,给设备提供良好的运行环境,是户外双层智能柜设计及系统稳定运行的关键所在.本文拟通过模拟试验,主要研究风机排风量、百叶窗排数、智能组件的安装位置3种因素对柜内温度的影响规律,以期户外双层智能柜的高温性

能设计分析提供参考.

## 1 户外双层智能柜的温度边界条件

户外双层智能柜内装有4台40W的智能组件,柜体顶部装有两个大功率的风机.左室为传统室,传统室里面放置端子与排线槽,发热元件很少.右室为智能室,安装4台智能装置.主要的发热量集中在智能室,即发热主要是由户外智能组件带来的.双层柜的结构见图1,空气流通示意图见图2.

户外双层智能柜的空气流通主要有两个途径:途径一如图2a)所示(其中1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12为温度测试点),空气从侧板下面的百叶窗流进,流经外侧和内侧板的缝隙,从

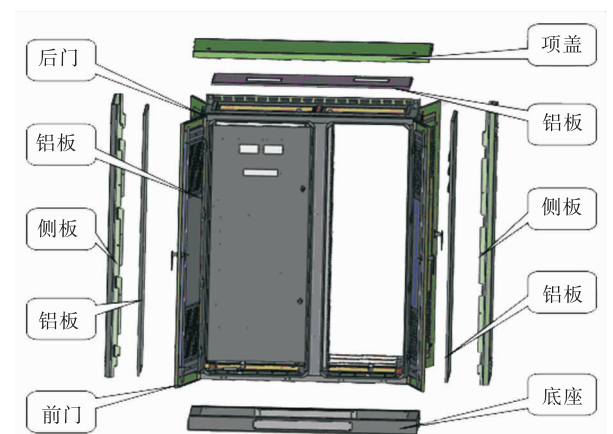


图1 户外双层智能柜的结构

Fig. 1 The structure of outdoor double intelligent cabinet

侧板上面的百叶窗流出,流动的方式为自由对流;途径二如图 2b)所示,空气通过门板的百叶窗进入柜内,途经智能组件,然后被顶部的两台风机排出,其流通方式属于强制对流。

考虑到侧板处的空气流通方式为自由对流,柜内外的压力差很小,侧板处的空气流通可忽略不计,故主要考虑门板上百叶窗的空气流通(强制对流)。利用 Gambit 软件建立有限元模型,节点数 1 181 709,见图 3。

计算选用 Simple 算法,采用三维不可压缩

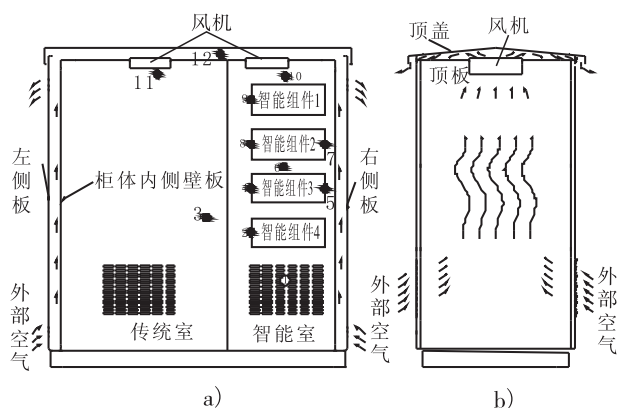


图 2 空气流通示意图

Fig. 2 The air flow diagram

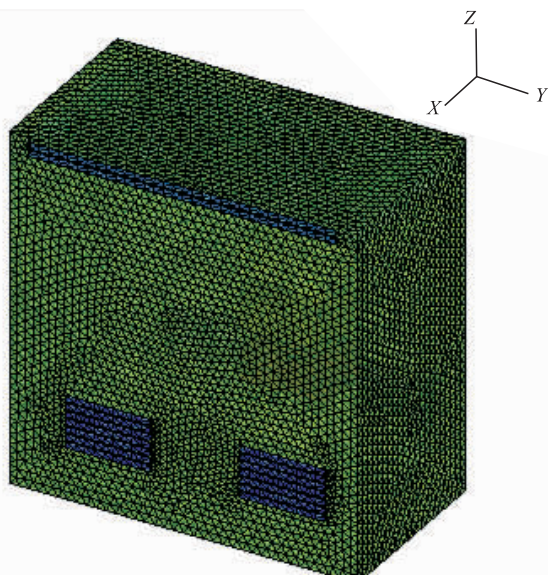


图 3 户外双层智能柜的有限元模型

Fig. 3 The finite element model of outdoor double intelligent cabinet

流动,且满足 Boussinesq 假设,湍流、稳态模型,忽略黏性耗散。残差、连续方程、湍流参数和动量方程的收敛标准为  $10^{-3}$ ,能量方程的收敛标准<sup>[7]</sup>为  $10^{-6}$ 。其控制方程如下。

连续方程:

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial x_j} = 0$$

动量方程:

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \frac{\partial u_j}{\partial x_j} \right) - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right] - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i}$$

能量方程:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i c_p T) =$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \lambda \frac{\partial T}{\partial x_i} \right] + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_j} \right) - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right]$$

式中,  $\rho$  为空气密度;  $\lambda$  为空气导热系数;  $c_p$  为空气比热;  $u_i, u_j, u_k$  分别为  $i, j, k$  方向的速度;  $x_i, x_j, x_k$  分别为  $i, j, k$  方向的坐标;  $\mu$  为动力黏度;  $p$  为平均压力;  $T$  为热力学温度差。

在 Fluent 软件<sup>[8]</sup>中,户外双层智能柜体边界条件如下:根据设计要求户外环境温度为  $40^\circ\text{C}$ ,试验测得户外双层智能柜壁温为  $45^\circ\text{C}$ 。柜内有 4 块  $40\text{ W}$  的智能组件,其边界条件是热源。按国标太阳辐射强度为  $1\ 120\text{ W}/\text{m}^2$ 。进口选用速度进口,给定速度和温度,进口温度为  $40^\circ\text{C}$ 。出口选用 outflow,设置其热流密度  $q/(\text{W} \cdot \text{m}^{-3})$ 。

## 2 数值模拟方案及影响因素分析

### 2.1 模拟方案

采用正交试验法设计模拟方案,其目的主要是考查风机排量  $Q$ ,百叶窗排数  $N$  和智能组件的安装位置  $C$  对户外双层智能柜内温度的影响规律。智能组件的布置情况分为图 4a) b) c) 3 种情况。

通常情况下,夏季温度较高时,环境温度为  $40^\circ\text{C}$ ,甚至更高,户外双层智能柜内部的智能

组件在高温情况下运行易出故障,甚至爆炸. 因此综合考虑影响柜内温度的诸因素,在各个因素水平的基础上进行优化配置. 试验的因素及水平见表 1.

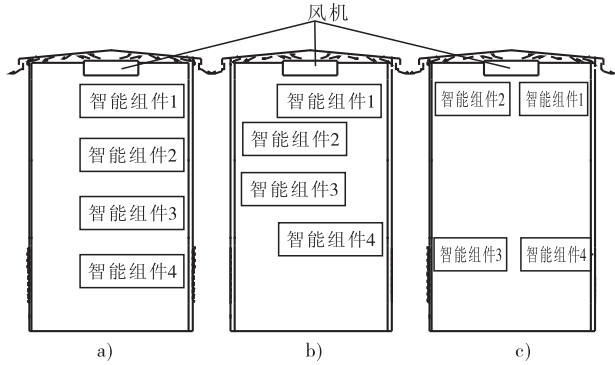


图 4 智能组件安装位置示意图

Fig. 4 Intelligent component installation schematic diagram

表 1 模拟因素及水平

Table 1 Simulation factors and levels

水平	风机排风量 $Q$ $/(m^3 \cdot min^{-1})$	百叶窗排数 $N$	智能组件的安装位置 $C$
1	10	5	图 4a)
2	12	7	图 4b)
3	14	9	图 4c)

### 2.2 模拟结果分析

从表 2 中的极差分析可知,对户外双层智能柜内温度影响显著性大小依次为:风机的排风量  $Q >$  百叶窗排数  $N >$  智能组件的安装位置  $C$ . 其中风机排风量  $Q$  的大小对柜内的温度影响最为显著. 在风机排风量  $Q$  的 3 个水平中,  $Q_3$  对应的温度最低.

图 5 为在装配百叶窗的排数  $N$  及智能组件的安装位置  $C$  不变的情况下,改变风机的排风量  $Q$  得到的温度曲线图. 可以看出,风机的排风量  $Q$  的 3 个水平中,  $Q_3$  与其他两种风机相比,柜内温度相应较低. 但因为考虑风机的功率要适当,以满足工程要求为标准,选用排风量  $Q_2$  的风机较为合适.

图 6 为在智能组件的安装位置  $C$  及风机排

表 2 正交法模拟方案及模拟结果

Table 2 Orthogonal simulation scheme and simulation results

试验编号	$Q/(m^3 \cdot min^{-1})$	$N$	$C$	最高温度/K
1	$Q_1$	$N_1$	$C_1$	327.5
2	$Q_1$	$N_2$	$C_2$	326.6
3	$Q_1$	$N_3$	$C_3$	329.3
4	$Q_2$	$N_1$	$C_2$	325.1
5	$Q_2$	$N_2$	$C_3$	323.1
6	$Q_2$	$N_3$	$C_1$	328.4
7	$Q_3$	$N_1$	$C_3$	325.3
8	$Q_3$	$N_2$	$C_1$	324.7
9	$Q_3$	$N_3$	$C_2$	326.8
$K_1$	983.4	977.9	980.6	$K_j$ 对应各考查因素 ( $j = Q, N, C$ ) 与 3 个水平的温度之和
$K_2$	976.6	974.4	978.5	
$K_3$	976.8	984.5	977.7	
$k_1$	327.8	325.9	326.8	$k_j$ 对应各考查因素 ( $j = Q, N, C$ ) 与 3 个水平的温度平均值
$k_2$	325.5	324.8	326.1	
$k_3$	324.33	328.1	325.9	
极差	3.47	3.3	0.9	
优组合	$Q_2 N_2 C_3$			

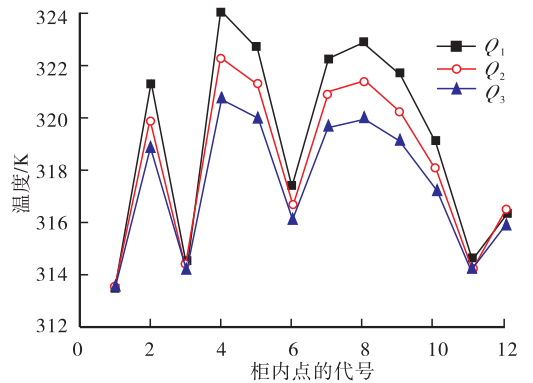


图 5 风机排风量  $Q$  对温度的影响

Fig. 5 The influence of the fan exhaust air  $Q$  on the temperature

风量  $Q$  不变的情况下,改变百叶窗排数  $N$  和温度变化得到的曲线图. 可以看出,百叶窗排数  $N_2$  的曲线在最下方,显示的温度最低,循环散热的效果最好.

图 7 为在风机排风量  $Q$  及百叶窗的排数  $N$  不变的情况下,改变智能组件的安装位置  $C$  得

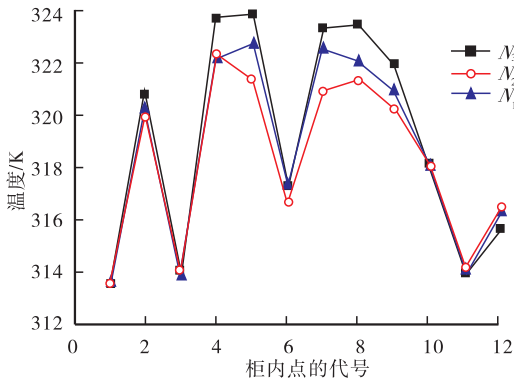


图6 百叶窗排数  $N$  对温度的影响  
Fig. 6 The influence of shutter row number  $N$  on temperature

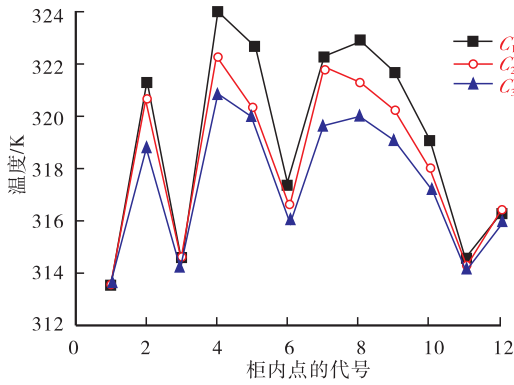


图7 智能组件安装位置  $C$  对温度的影响  
Fig. 7 The influence of intelligent component location  $C$  on temperature

到的温度曲线图. 可以看出, 智能柜对称布置  $C_3$  比  $C_1$  和  $C_2$  的散热效果好, 柜内的温度低. 对称布置  $C_3$  有利于散热, 能更好地避免气流短路.

根据模拟方案, 对  $Q_2N_2C_3$  优组合方案进行数值模拟, 结果如图8和图9所示<sup>[9]</sup> ( $x$  和  $y$  是户外双层智能柜的截面). 可以看出, 户外双层智能柜内部的平均温度为  $43\text{ }^\circ\text{C}$ , 智能组件壁面的最高温度为  $323\text{ K}$  ( $50\text{ }^\circ\text{C}$ ), 可满足国家电网的温控要求 ( $-10\sim 50\text{ }^\circ\text{C}$ ), 说明  $Q_2N_2C_3$  方案是可行的. 在柜内选取图2a)中1,2,3,4,5,6,7点进行试验, 把试验与数值模拟的结果对比分析, 结果如图10所示. 可以看出, 模拟结果与试

验有误差, 误差为  $4.2\%$ .

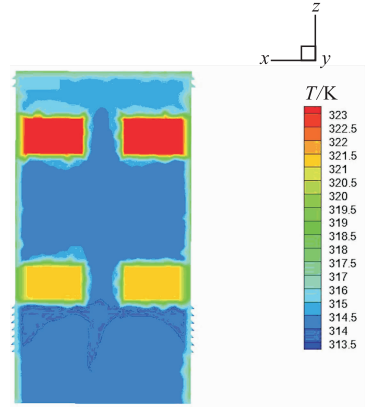


图8 温度场分布截面图 ( $x = 270\text{ mm}$ )

Fig. 8 Temperature field distribution section ( $x = 270\text{ mm}$ )

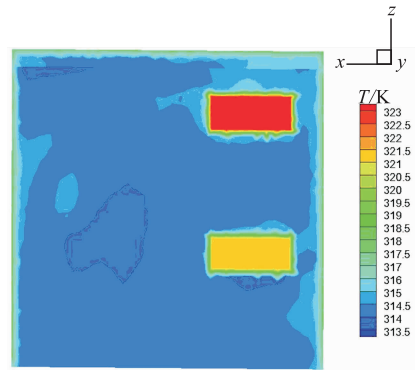


图9 温度场分布截面图 ( $y = 480\text{ mm}$ )

Fig. 9 Temperature field distribution section ( $y = 480\text{ mm}$ )

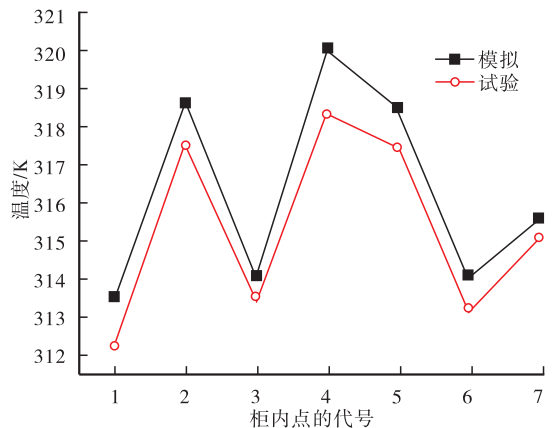


图10 模拟与试验对比

Fig. 10 Comparison of simulation and experimental results

### 3 结论

根据国家电网的温控指标,煤矿户外双层智能柜内最高温度不得超过 55 ℃. 为满足这一要求,对其内部温度影响因素进行研究. 得出以下结论.

1) 运用 Fluent 软件,根据户外双层智能柜的结构以及工作环境,建立有限元模型,设置边界条件. 对影响柜内温度的因素(风机排风量  $Q$ ,百叶窗排数  $N$ ,智能组件的安装位置  $C$ ),通过正交试验法设置数值模拟方案,得出影响户外双层智能柜内温度的诸因素的显著性大小依次为:  $Q > N > C$ ,并得出最优的设计方案  $Q_2N_2C_3$ .

2) 针对  $Q_2N_2C_3$  方案模拟,得出户外双层智能柜内部的平均温度为 43 ℃,智能组件壁面的最高温度为 50 ℃,达到了较好的通风散热效果,其温度满足国家电网的温控要求,可保证户外双层智能柜正常工作.

3) 将数值模拟与试验结果作对比分析,结果显示两者之间的误差为 4.2%,验证了有限元模型的正确性. 该设计为户外双层智能柜的高温性能设计分析提供了参考.

#### 参考文献:

[1] 国家电网公司. 智能变电站智能控制柜技术规范: Q/GDW 430—2010 [S]. 北京: 中国电

力出版社, 2010.

- [2] 国家电网公司. 智能变电站合并单元技术规范: Q/GDW 426—2010 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [3] 张斌,倪益民,马晓军,等. 变电站综合智能组件探讨[J]. 电力系统自动化, 2001, 34(21): 91.
- [4] 朱云霄,朱云灿,严华. 智能变电站户外智能控制柜热设计[J]. 电子机械工程, 2013, 29(6): 18.
- [5] 张洋,严华,张永峰. 智能变电站户外控制柜风机散热研究与仿真分析[J]. CAD/CAE 与制造业信息化, 2012, 10: 49.
- [6] 唐亦敏. 电气控制柜设计与施工探讨[J]. 电源技术应用, 2014(2): 295.
- [7] 朱云霄,朱云灿,严华. 智能变电站户外智能控制柜热设计[J]. 电子机械工程, 2013, 30(6): 18.
- [8] EBERLINC M, SIROK B, HOCEVAR M, et al. Numerical and experimental investigation of axial fan with trailing edge self-induced blowing [J]. Forsch ingenieurwes, 2009, 73: 129.
- [9] GE Y T, TASSOU S A, HADAWAY A. Simulation of multi-deck medium temperature display cabinets with the integration of CFD and cooling coil models [J]. Applied energy, 2010, 87(10): 3178.