

[变电站]

变电站开关室温度分布模型及数值仿真

文/国网上海市电力公司市北供电公司 李顺道 韩浩江 胡海涛 罗巍浩

在室内变电站开关室内安装测温探头容易受到高压设备的影响，排线距离、探头安装高度受到设备安全距离限制，只能通过插值等方法对测温点范围外的区域进行估计，因为温度的变化为非线性，造成了实际温度与估计的温度差值较大，为了弥补该误差，采用了计算空气动力学中的Navier-Stroke方法。

普通工业空调系统温度传感器为负温度系数热敏电阻，简称NTC。其阻值随温度的升高而降低，25℃时的NTC阻值为标称值。空调系统常用的负温度系数热敏电阻有：室内环温度NTC、室外盘管NTC和压缩机NTC。温度使NTC阻值发生变化，空调温度处理控制器根据NTC的电压决定空调系统的运行状态。空调系统对于复杂的环境（室内环温度NTC靠近热源体空调系统始终处于负荷运行状态，房间过于狭长送风不足造成局部地区过热过冷）容易发生运行状态异常。



图1 温度传感器

为了解决空调系统测温的距离局限性，在现场增加辅助测温探头，如图1所示。对于较大空间的开关室内（大于100 m²的大型空间），可以大幅改善空调系统的测温范围和测温准确度。但是在室内变电站开关室内安装测温探头受到高压设备的影响，排线距离、探头安装高度受到设备安全

距离限制，只能通过插值等方法对测温点范围外的区域进行估计，因为温度的变化为非线性，造成了实际温度与估计的温度差值较大。为了弥补该误差，采用了计算空气动力学（Computational Fluid Dynamics, CFD）中的Navier-Stroke方法，获得变电站开关室的气流速度的数值解，使其更符合现场控制的要求。如图2所示。

Navier-Stroke方法具体步骤实施

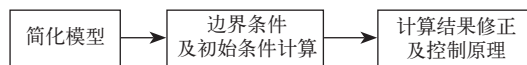


图2 实施步骤参考图

简化空间模型、简化数值模型

1. 简化模型

开关室简化模型，获得CFD网格模型，并以此进行离散化处理。

2. 简化方程

先把该CFD问题转换成气流的传导问题， $u(x, t)$ 满足1维的Navier-Stroke方程为

$$\frac{\partial u}{\partial t} + cu \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

式中， $u(x, t)$ 为温度关于X轴（气流传播方向）和时间的二元函数； $\partial u / \partial t$ 为 $u(x, t)$ 关于 t 的偏导数； $\partial u / \partial x$ 为 $u(x, t)$ 关于 x 的偏导数； x 为沿气流传播方向离开初始位置的距离，m； t 为波的传播时间，s； c

为传播速度, m/s。

从偏导数的定义出发, 获得 $\partial u/\partial t$ 和 $\partial u/\partial x$ 的离散公式为

$$\begin{aligned}\frac{\partial u}{\partial x} &\approx \frac{u(x+\Delta x)-u(x)}{\Delta x} \\ \frac{\partial u}{\partial t} &\approx \frac{u(x+\Delta t)-u(x)}{\Delta t}\end{aligned}\quad (2)$$

式中, Δx 、 Δt 是极限形式下的步长, 当 Δx 、 Δt 都非常小时, $\partial u/\partial t$ 和 $\partial u/\partial x$ 可以被上述两组公式替代, 替代后形成方程为

$$\frac{u(x+\Delta x)-u(x)}{\Delta t} + cu(x,t)\frac{u(x+\Delta x)-u(x)}{\Delta x} = 0\quad (3)$$

可以获得式(3)的差分形式

$$\frac{u_i^{n+1}-u_i^n}{\Delta t} + cu_i^n \frac{u_i^n-u_{i-1}^n}{\Delta x} = 0\quad (4)$$

可以用式(5)计算出 $u_i^{(n+1)}$ 的值

$$u_i^{n+1} = u_i^n - cu_i^n \frac{\Delta t}{\Delta x} (u_i^n - u_{i-1}^n)\quad (5)$$

式中, u_i^n 是数值解; n 、 $n+1$ 是一个计算步长两个相邻的间隔的序号; i 、 $i+1$ 是 X 坐标轴两个相邻的离散坐标。

边界条件及初始条件计算

对已有测温点温度代入Navier-Stroke离散方程的边界条件, 包括空调系统出风口温度 u_0 及其他各测温点的实测温度, 可以计算出在 X 轴方向上气流的传导速度的数值解, 根据气流的传导速度计算该点的估计温度, 为下一步骤修正计算步长做准备。

计算结果修正及控制原理

通过与测温点温度比较修正模型的误差, 一般来说当误差很小时正常进行模拟计算, 当误差超过设定的上限时, 则缩短每次模拟的时间间隔。

修正结果, 因为每次获取实时温度的周期大概需要40~50 s(采样时间), 一般情况下进行2~3次Navier-Stroke公式计算就可以达到需要的数值结果, 满足实时计算的要求。

实施例子

1. 简化空间模型、简化数值模型

简化空间模型、简化数值模型如图3~图6所示。

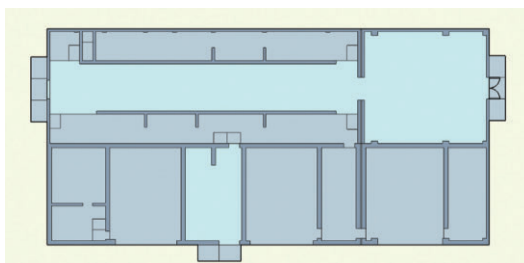


图3 35 kV江场变电站1层平面图



图4 35 kV江场变电站1层平面网格图
(未简化, 难以离散化处理, 计算量巨大)

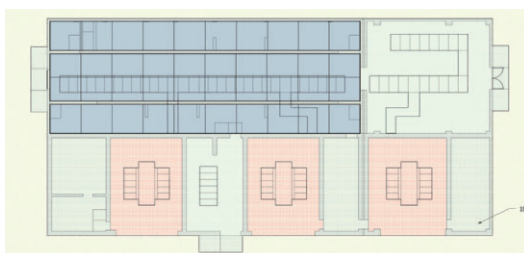


图5 35 kV江场变电站经简化后1层平面网格图

30	29	28	27	26	25	24	23	22	21
10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
20	19	18	17	16	15	14	13	12	11
40	39	38	37	36	35	34	33	32	31

图6 35 kV江场变电站1层网格图

2. 边界条件及初始条件计算

其中, 网格单元在横向位置联通, 如网格单元30、网格单元29; 网格单元1、网格单元11、网格单元21和网格单元31在纵向位置联通; 网格单元10、网格单元20、网格单元30和网格单元40在纵向位置联通, 其余方向不连通; 在网格单元3, 网格单元8安装有测温模块, 出风口位置为单元格1位置, 当风向固定的情况下(始终向左), 该问题可以简化成1维Navier-Stroke问题。

边界条件设定

$u_i^n = u_j^n$ (i, j 为单元格的编号, 如果 i, j 在同一行)

$$u_1^n = u_{11}^n, u_{10}^n = u_{20}^n$$

$$u_{10}^n = u_{30}^n, u_1^n = u_{21}^n$$

$$u_{31}^n = u_{21}^n, u_{11}^n = u_{31}^n$$

u_3^n 、 u_{39}^n 是热源位置, t_s 是恒定值; u_0^n 是出风口温度; t_0 是环境温度。

$$u_i^{n+1} = u_i^n - cu_i^n \frac{\Delta t}{\Delta x} (u_i^n - u_{i-1}^n) \quad (6)$$

式中， u_i^n ， $u_i^{(n+1)}$ 是第*i*个位置*n*与*n*+1步的温度； $\Delta t=0.25\text{ s}$ ； $\Delta x=60/40=1.5\text{ m}$ ；*C*是风速，3 m/s。

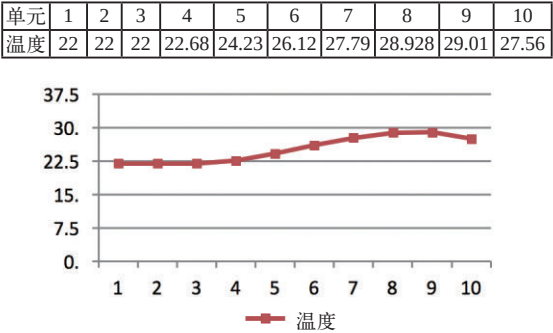


图7 计算结果修正

当计算结果与测温结果误差较大，大于1℃时，减少 Δt 的值重新计算，可缩小误差值的大小。[EA](#)

3. 计算结果修正及控制原理
根据在网格单元3，网格单元8安装有测温模块，计算1为 $\Delta t=0.25\text{ s}$ ；计算2为 $\Delta t=0.20\text{ s}$ 。如图7所示。

单元	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
计算1	22	22	22	22.68	24.23	26.12	27.79	28.928	29.01	27.56
计算2	22	22.6	23.1	22.98	24.43	26.33	27.81	28.928	29.15	27.63
测温			23.4					29.3		

(收稿日期：2020.03.10)
(编辑：朱金凤)

(上接第61页)

当开关频率 $f_s=100\text{ kHz}$ 时，磁心选型PC40EER35，可得到损耗随输出电压的变化曲线如图5所示，输出电压提高，磁感应强度*B*减小，铁损减小；(1-*D*)减小，二极管的损耗减小； U_{DS} 减小，开关管的开关损耗减小。故随着输出电压的增大，电路损耗减小。如图5所示。

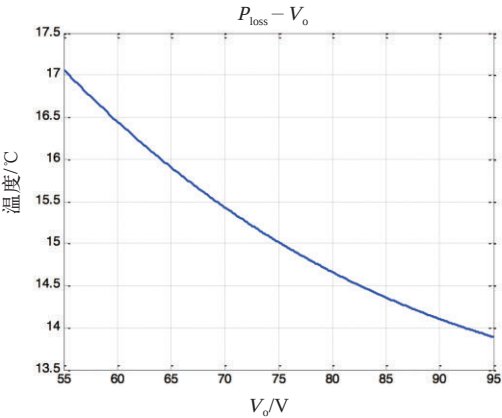


图5 总损耗—电池电压曲线

电池充电模块实物测试

本文搭建了电池充电模块的样机，经过测试验证，在输入电压100 V，充电电流13 A时，

不同电池电压下的转换效率如表2所示，和理论分析基本相符，由于样机测试数据包含控制电路损耗、滤波电容损耗等，实测损耗要比理论计算稍大。

输出电流 /A	输出电压 /V	输入电流 /A	输入电压 /V	损耗 /W
13.12	60.1	8.18	99.4	24.6
13.11	70.2	9.48	99.2	20.1
13.12	80.1	10.8	99.1	19.4
13.11	90.1	12.11	99.1	18.9

结束语

本文以SUPERBUCK拓扑为对象分析了开关电源的损耗组成，并建立了以开关频率为变量的损耗模型，利用磁心截面积与电感传输功率的关系，创新性地提出了按开关频率分段选型磁心尺寸的方法，并按照电池充电模块的实际工况参数计算出了损耗数据，得到了损耗和开关频率的关系曲线，通过实物样机测试，验证了计算的准确性，形成了以损耗最小、效率最优的开关电源开关频率的设计方法。[EA](#)

(收稿日期：2020.02.26)
(编辑：朱金凤)