



# 热设计和沙戈荒电气柜散热技术介绍



# 目录

---

01

热设计基础

02

计算流体动力学介绍

03

沙戈荒电气柜散热技术介绍

04

沙戈荒电气柜热仿真案例分享



01

# 热设计基础



# 为什么要掌握热设计技术

因为：

- 产品体积缩小，功率增加，热流密度急剧上升
- 热设计是器件、设备和系统可靠性设计的一项主要内容
- 散热问题是制约设备小型化的关键问题



对于大部分电子器件，失效率 and 温度之间的关系为

$$F = Ae^{-E/KT}$$

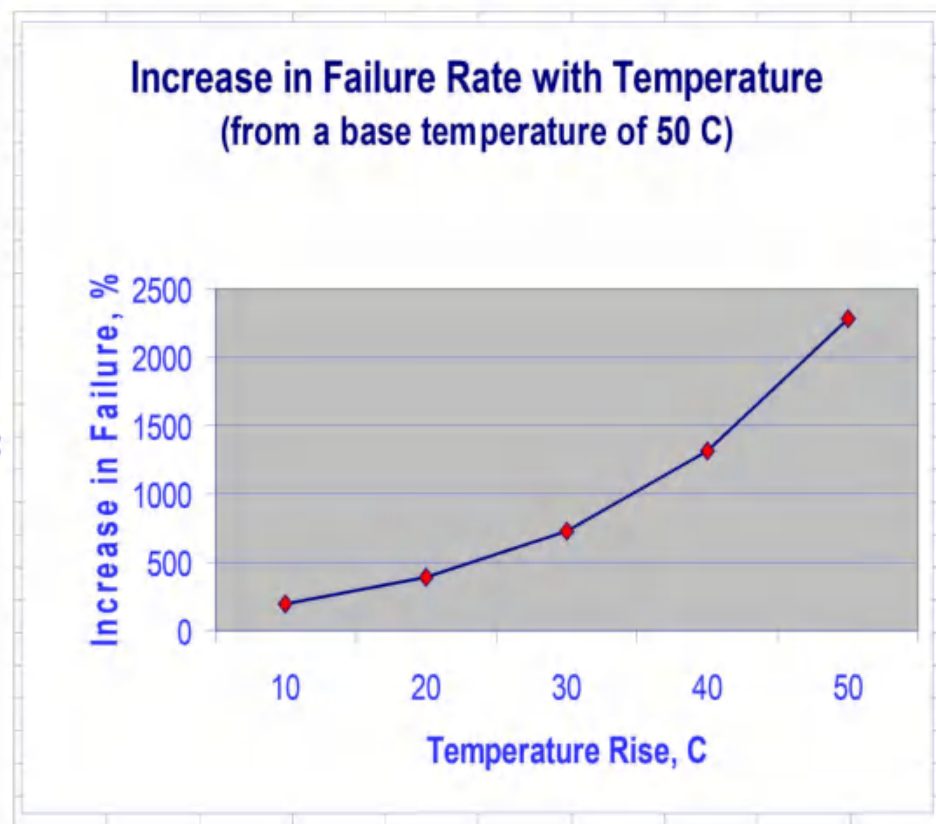
式中：

F = 失效率，为常数；

E = 电子激活能量 (eV)；

K = 波尔兹曼常数 ( $8.63 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$ )；

T = 节点温度，K。





➤ 热设计的两个基本目的:

① 预计各器件的工作温度，包括环境温度和热点温度；

② 使热设计最优化，以提高可靠性。

➤ 热流量、热阻和温度是热设计中的重要参数  
温度差与热源功率之间的比值

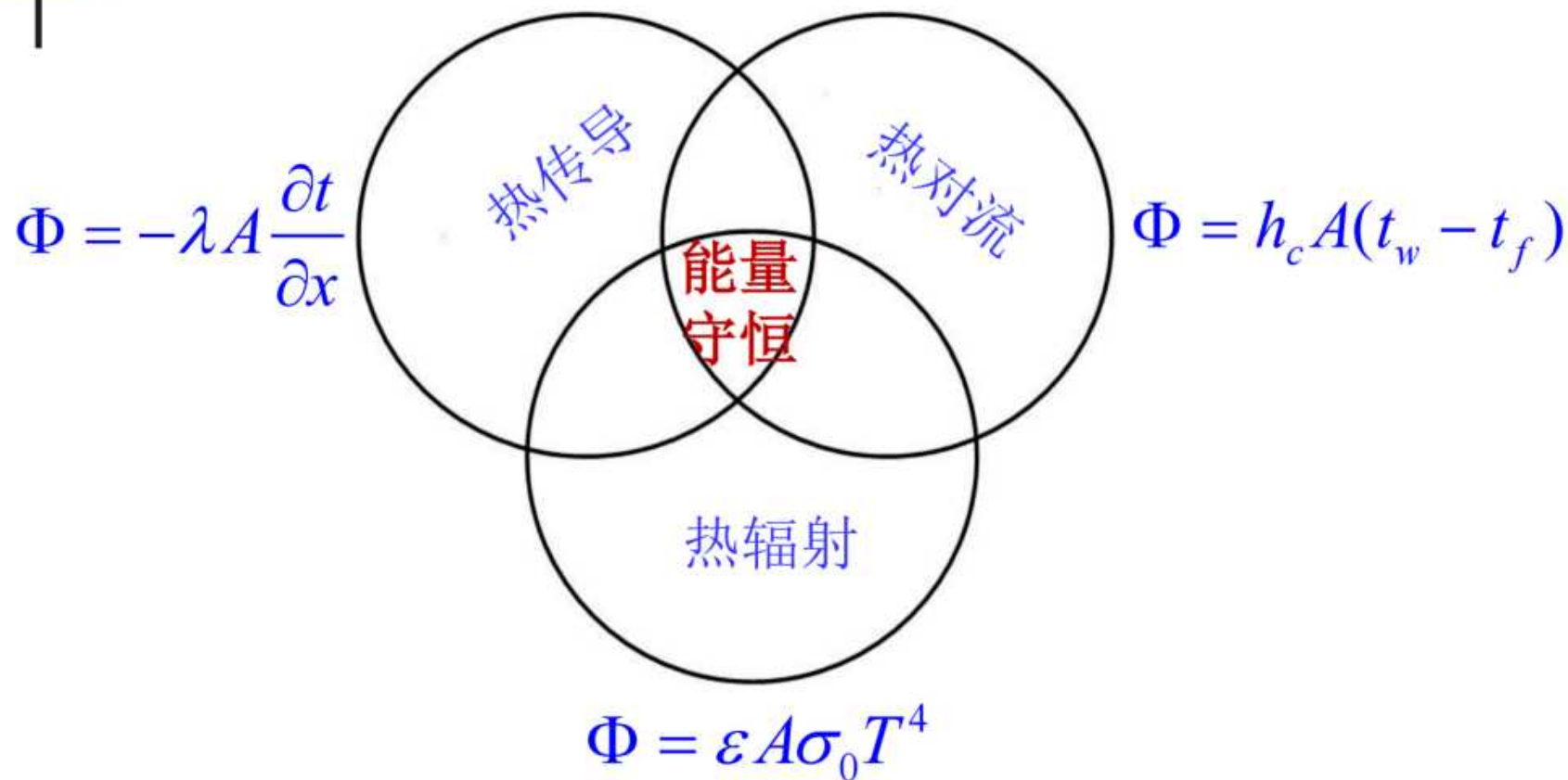
热阻的定义： $R_t = \frac{\Delta t}{\Phi} [^{\circ}\text{C} / \text{W}]$

### 减小导热热阻的方法

**1. 缩短路径    2. 增大面积    3. 提高导热系数**



# 三种散热方式





# 热传导

## ➤ 导热的微观机理

气体的导热是气体分子不规则运动时相互碰撞的结果；金属导体中的导热主要靠自由电子的运动完成；非导电固体中的导热是通过晶格结构的振动来实现；液体中的导热主要依靠弹性波。

## ➤ 导热基本定律——傅立叶定律

$$\Phi = -\lambda A \frac{\partial t}{\partial x}$$

式中：  $\Phi$  —— 热流量，W；

$\lambda$  —— 导热系数，W/(m·°C)；

$A$  —— 垂直于热流方向的横截面面积，m<sup>2</sup>；

$\partial t / \partial x$  —— x方向的温度变化率，°C/m。

负号表示热量传递的方向与温度梯度的方向相反。



# 热对流

- 可分为自然对流和强迫对流两大类
- 对流换热采用牛顿冷却公式计算

$$\Phi = h_c A(t_w - t_f)$$

式中：  $h_c$  —— 对流换热系数，  $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ ；

$A$  —— 对流换热面积，  $m^2$ ；

$t_w$  —— 热表面温度，  $^\circ C$ ；

$t_f$  —— 冷却流体温度，  $^\circ C$ 。



# 热辐射

- 辐射能以电磁波的形式传递
- 任意物体的辐射能力可用下式计算

$$\Phi = \varepsilon A \sigma_0 T^4$$

式中： $\varepsilon$  —— 物体的表面黑度（表面辐射率）；

$\sigma_0$  —— 斯蒂芬—玻尔兹曼常数， $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ ；

$A$  —— 辐射表面积， $\text{m}^2$ ；

$T$  —— 物体表面的热力学温度， $\text{K}$ 。

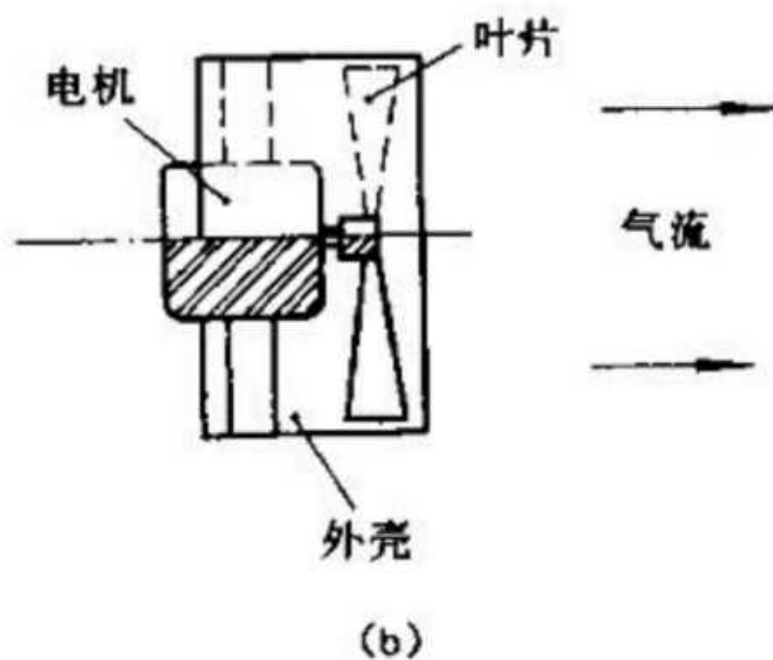
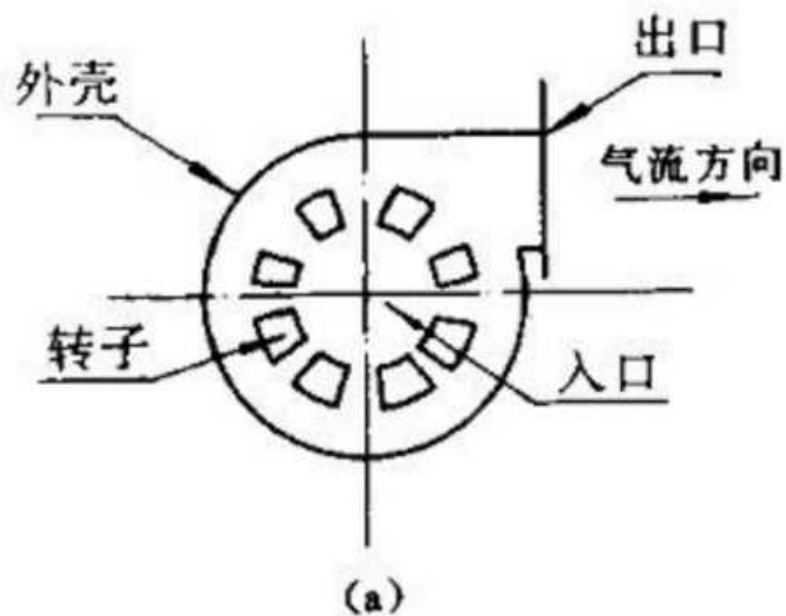
## 减小辐射热阻的措施

1. 表面辐射率要高；
2. 辐射体与吸收体之间要无障碍；
3. 辐射面积要大。



# 风机

通风机可分为离心式（下图(a)）和轴流式下图(b)两类。

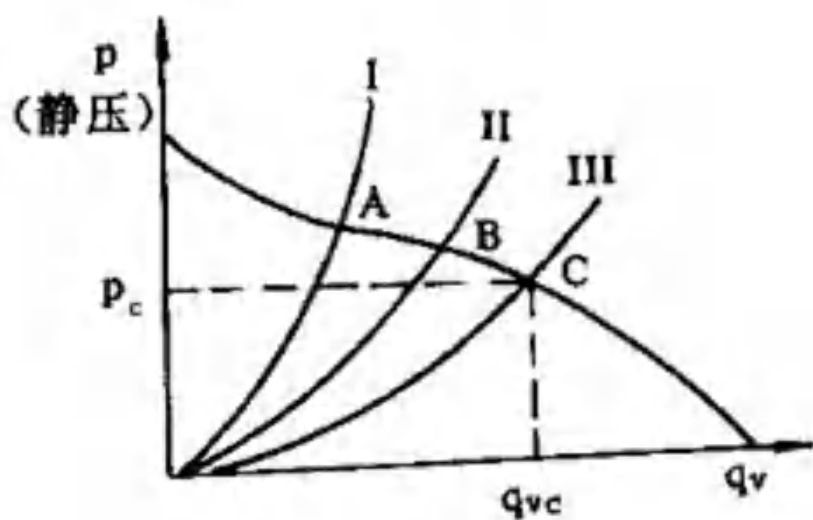




## 系统阻力特性与通风机工作点的确定

通风机的总压力是用来克服系统（或通风管道）的阻力的，并在出口处形成一定的速度头。系统（或通风管道）的阻力曲线是通风冷却系统的静压与空气流量的特性曲线，与流量的平方成正比。

右图中，I、II、III三条曲线分别代表不同系统（风道）的特性曲线。系统（阻力）特性曲线与通风机的特性曲线的交点就是该通风机的





# 热设计流程



- 1、确定设备器件热约束条件
- 2、计算主要器件的热损耗
- 3、确定主要器件的冷却途径
- 4、确定设备整体冷却方式（自然散热、强制风冷、水冷散热等）
- 5、热仿真模拟
- 6、样机热测试





## 02 计算流体力学介绍



# 计算流体力学

CFD是通过计算机数值计算和图像显示，对包含有流体流动和传热等相关物理现象的系统所做的分析。

➤ 有限差分法 (Finite Difference Method, FDM)

最早、最经典的CFD方法。将求解区域划分为差分网格，然后用差商来代替微商。

➤ 有限元法 (Finite Element Method, FEM)

20世纪80年代开始应用的一种数值解法，它吸收了有限差分法的离散处理内核，又采用了变分计算中选择逼近函数对区域进行积分的合理方法。在有限元法的基础上，又提出了边界元法和混合方法等。

➤ 有限体积法 (Finite Volume Method, FVM)

有限体积法的关键是在导出离散方程的过程中，需要对界面上的被求函数本身及其导数的分布作出某种形式的假定。FVM导出的离散方程可以保证具有守恒特性，且离散方程系数物理意义明确。



# CFD的求解过程

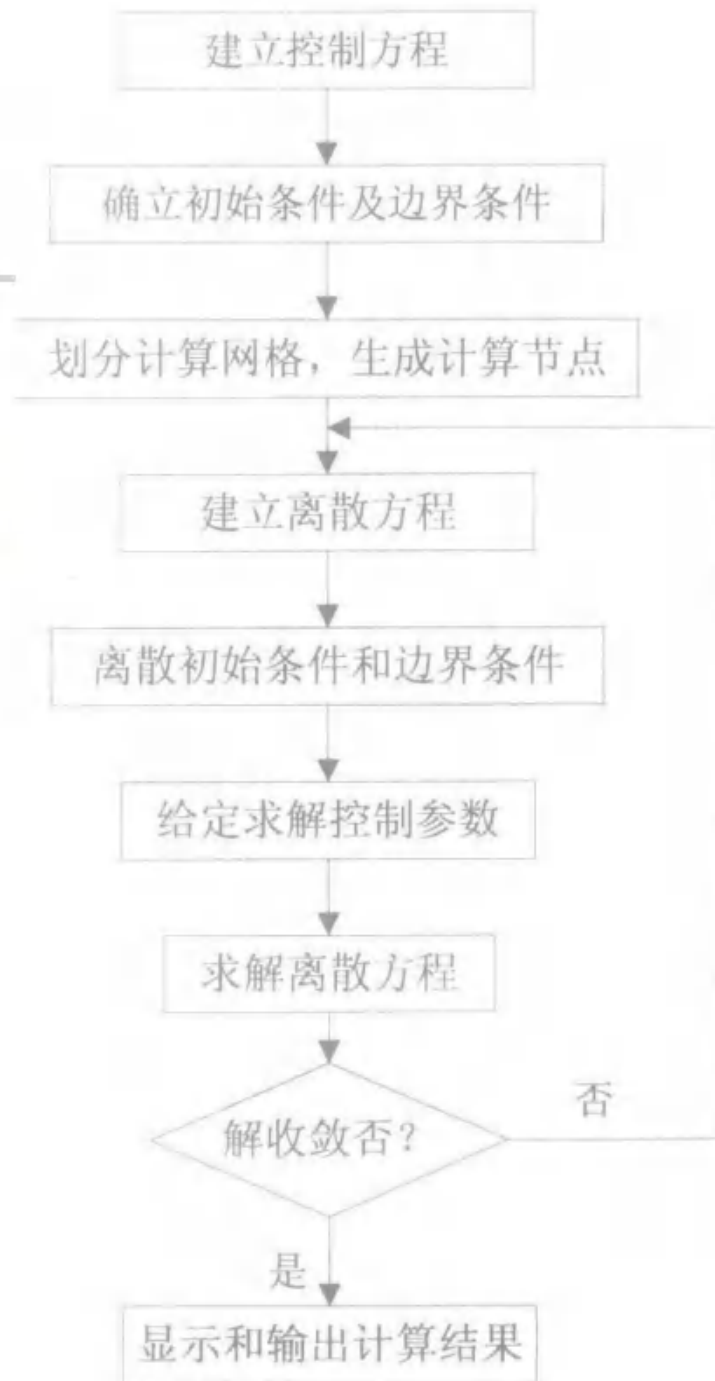
一、建模

二、确定边界条件与初始条件

三、计算网格划分

四、求解离散方程

五、显示和输出计算结果





# 常用的CFD商用软件

## 一、Flotherm

世界上第1套计算流体动力学与传热学商用软件。

## 二、Fluent

独特的动网格技术，流场仿真功能强大。后被ANSYS公司收购。

## 三、Icepak

美国ANSYS公司旗下的热仿真软件模块，基于有限元法。



# 6sigma-ET

**最适合结构、电气工程师的热仿真软件！**

- 复杂模型直接导入，无须清理的非常“干净”，保留物体的原始几何外形不失真，保留群组关系及名称。
- 自带的高效、自动化的网格剖分器，划分几千万的网格也只需要几分钟，网格量级可过亿。
- 多核CPU并行效率高，配合GPU计算显著缩短计算时间，极佳的收敛性。
- 丰富的后处理系统，各种动画、报告。

**简单易学、结果精确！**



03

## 沙戈荒电气柜散热技术介绍



## 环境因素

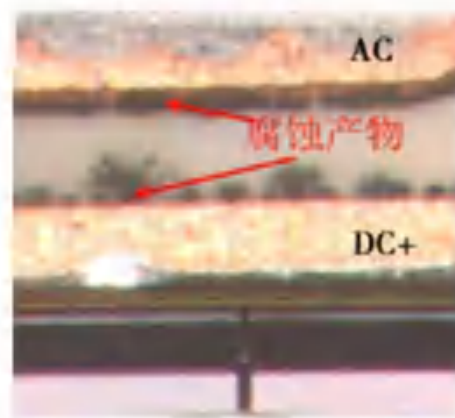
沙戈荒地区通常指的是**沙漠、戈壁和部分荒漠**等地区，**海拔相对较高**，浮尘日、雷暴日、沙尘暴较多。气温夏季高、冬季低，季节性温差变化较大，同时**昼夜温差大**，沙漠边缘地区夏季最高气温超过40摄氏度。



沙漠



海上



IGBT模块腐蚀



# 政策支持

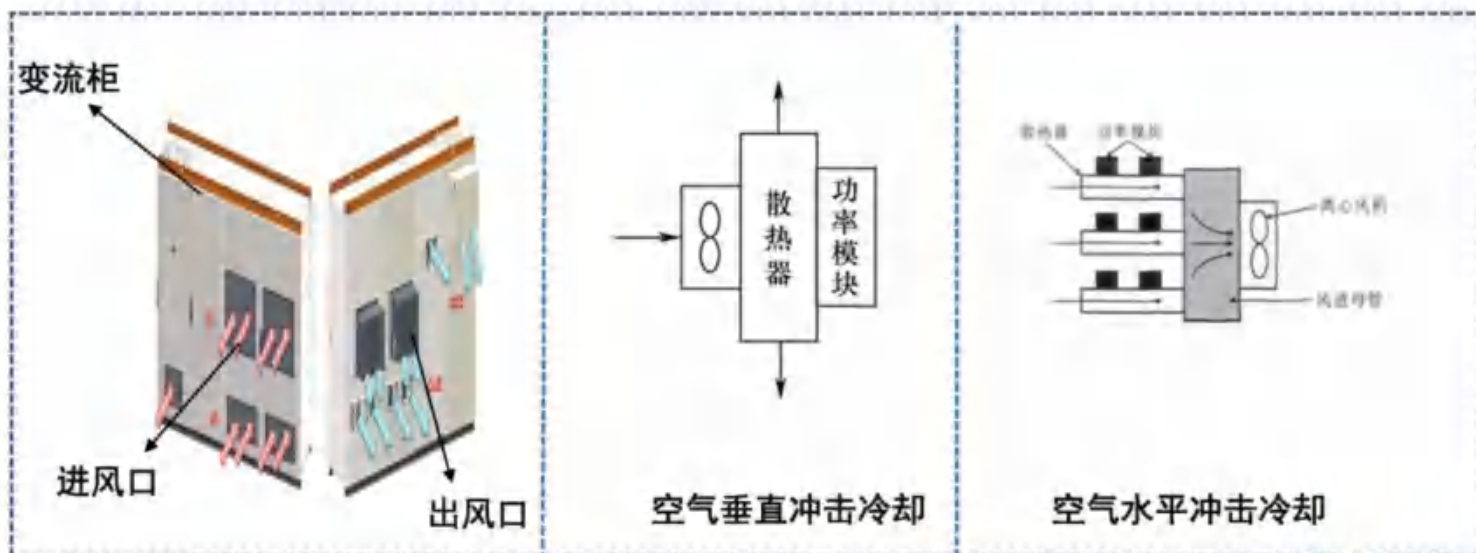
国家重视沙戈荒地区的开发，并在《“十四五”可再生能源发展规划》明确，以“沙戈荒”地区为重点的大型风电光伏基地总规模达到4.55亿千瓦，相当于20座三峡水电站的装机容量。截至2023年11月底，我国风电光伏基地建设进展顺利，第一批已建成并网**4516万千瓦**。





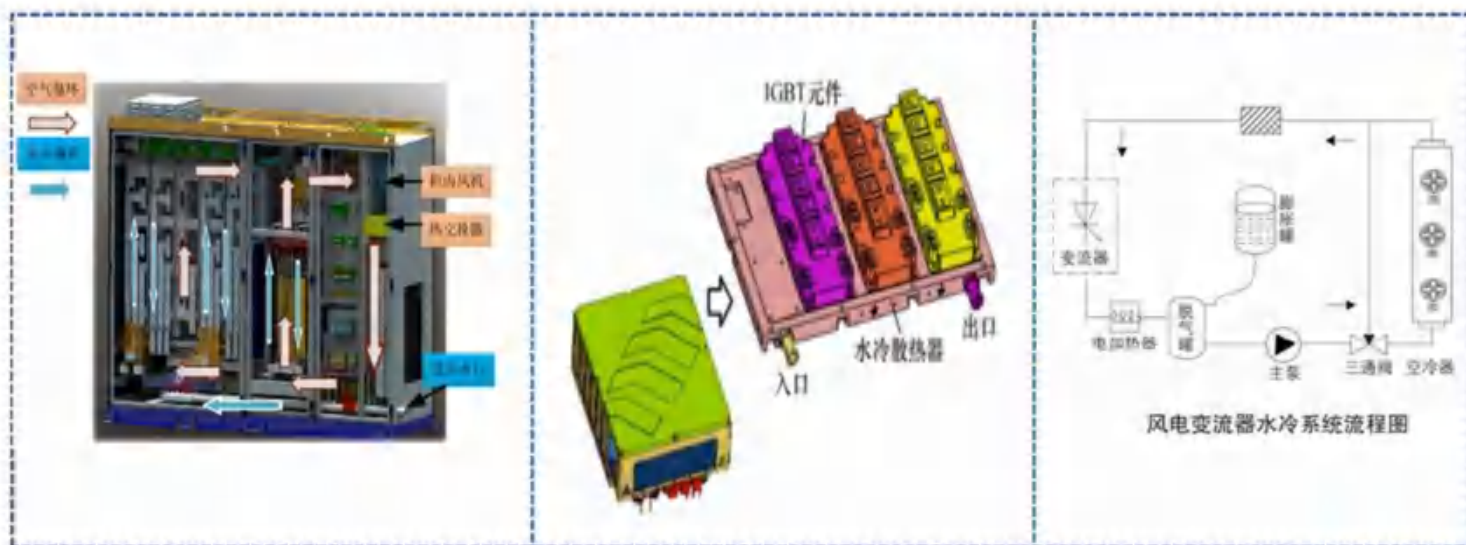
## 技术现状分析：空冷技术（单相）

- ❑ 技术原理：空冷技术一般是采用自然风或者风机控制气流，由空气的流动将电气柜运行产生热量转移到外部环境。
- ❑ 技术特点：整个柜子内外空间相连，并非完全封闭。在沙漠戈壁特殊环境下，沙粒极易进入柜体内部，对电子器件造成物理损伤，同时增加电气故障的风险。



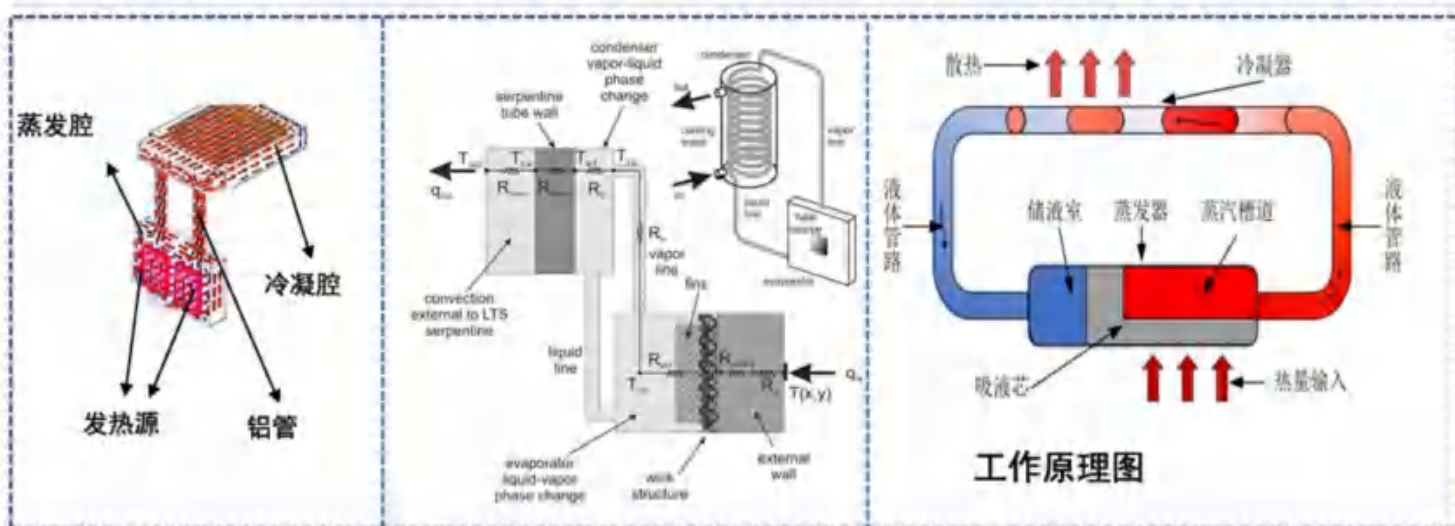
# 技术现状分析：水冷技术（单相）

- ❑ **技术原理：**水冷技术一般是当电气柜产生热量时，水冷却系统会通过循环水将这些热量从设备内部转移到外部，从而实现冷却的效果。
- ❑ **技术特点：**这种结构比较复杂，维护相对困难，运维成本也更高。



# 技术现状分析：全密闭气液两相冷却

- ❑ **技术原理：**将热源、蒸发器等部件封闭在电气柜内部，通过汽液两相自然循环流动将热量传递到柜体外部冷凝器，最后由风机排放至空气中。
- ❑ **技术特点：**全密闭式冷却可以达到IP56防护等级，减少电气故障风险。但是换热能力有瓶颈，结构复杂。





# 冷却技术对比

|          | 汽/液单相冷却技术                  |                                                              | 气液两相冷却技术（制冷剂）                               |                                                |                                          |
|----------|----------------------------|--------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|------------------------------------------------|------------------------------------------|
|          | 空冷技术                       | 水冷技术                                                         | 自然循环                                        | 泵驱两相流                                          | 压缩制冷                                     |
| 热流密度     | 受环境温度、空气流速等因素影响，热流密度最低     | 水的热导率远高于空气，能更有效地带走热量，热流密度较高                                  | 重力自然对流驱动汽液相变分离循环，流量较小，热流密度较高                | 通过泵驱动工质流动，相变潜热来高效转移热量，热流密度高                    | 压缩机驱动大流量制冷剂，汽液相变换热能力强，热流密度最高             |
| 热阻       | 空气的对流换热系数低，热阻相对较高          | 水对流换热系数是 $3000 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$ ，约空气的30倍，热阻相对较低 | 制冷剂流动沸腾换热系数高，热阻相对较低                         | 制冷剂强迫流动和沸腾换热总换热系数高，热阻更低                        | 制冷剂强迫流动和核态沸腾换热总换热系数高，热阻最低                |
| 温控能力和均匀性 | 受空气流动分布影响，可能存在局部过热点，最高温度最高 | 水作为冷却介质能更均匀地分布热量，均匀性较好，最高温度控制得较低                             | 均匀性受自然对流影响，不同高度器件存在温度梯度，但同一器件温度均匀性较好，最高温度较低 | 利用工质相变可以快速、均匀地带走热量，有助于减少局部过热现象，温度更均匀，最高温度控制得更低 | 通过优化设计和制冷剂循环来实现的最优的温度均匀性，最高温度控制得最低       |
| 能效性      | 空气显热换热能力较小，效率低             | 水显热热容较大，泵的功耗高，能效较低                                           | 无需额外的动力，具有节能优势，能效最高                         | 制冷剂相变潜热大，所需的流量较小，系统压损小，泵功耗小，系统能效高              | 制冷剂流量大，压缩机功耗大，系统能效不高                     |
| 系统复杂性    | 系统相对简单，主要由风扇和散热器组成         | 系统较复杂，包括水泵、换热器等多个部件和控制装置                                     | 系统较为简单，依赖于重力自然对流，属于被动冷却方式                   | 系统较为复杂，包括泵、储液罐、换热器等，且需考虑工质相变                   | 系统复杂，包括压缩机、冷凝器、蒸发器等多个部件，设计难度较大           |
| 维护成本     | 维护相对简单，主要关注风扇和散热器的可靠性      | 维护较复杂，需要定期检查水泵、水管等部件，并处理结垢、腐蚀等问题                             | 无机械旋转部件不消耗电，系统压力低，运行成本低，维护较为简单              | 有低速选择部件，维护性适中，需要关注泵的運行状态和工质的补充与更换              | 需要消耗大量电力，需要定期检查压缩机等部件，并处理制冷剂泄漏等问题，维护性较高， |

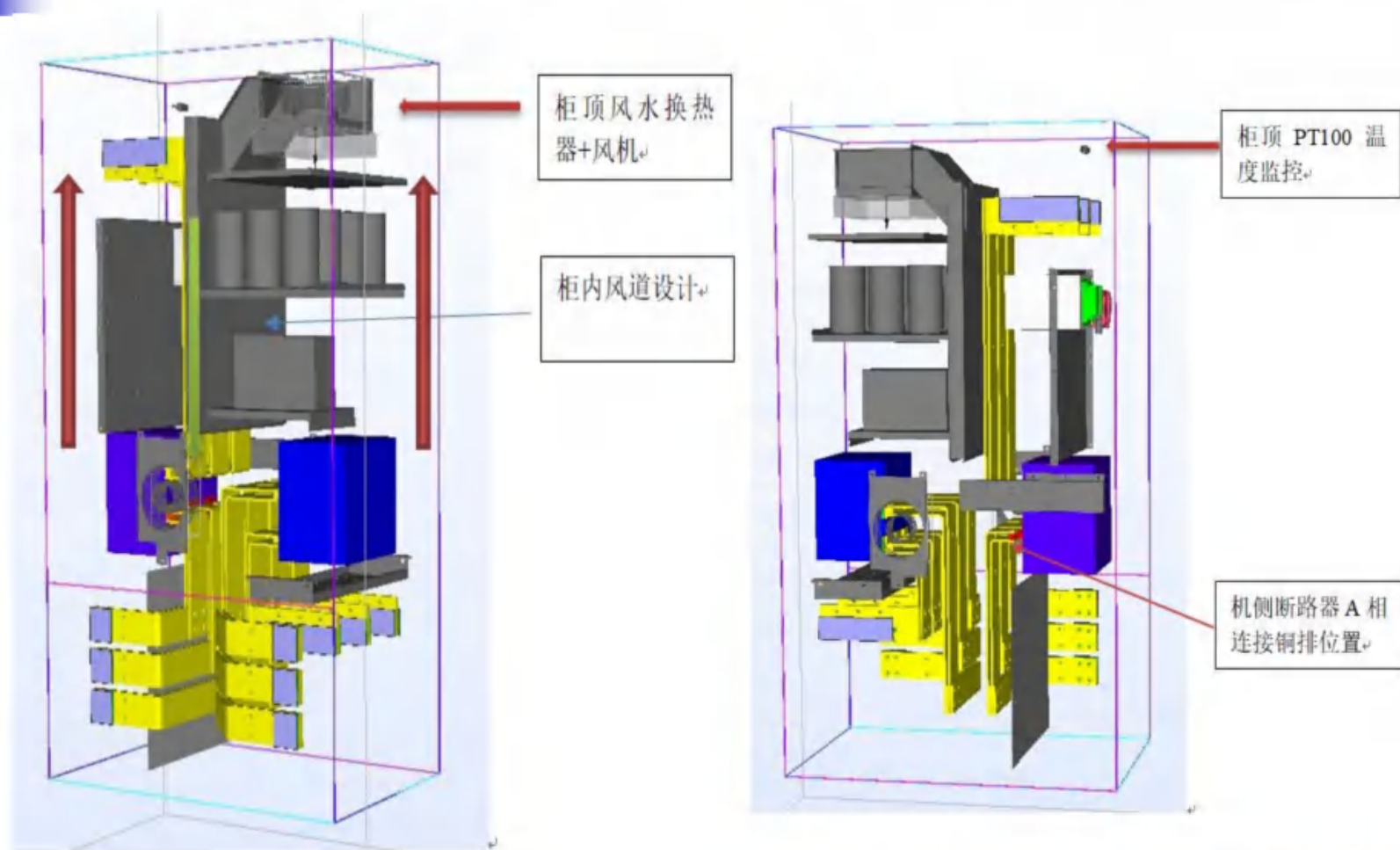


04

## 沙戈荒电气柜热仿真案例分享



# 例1—电气柜热仿真



整柜散热风道

温度监控点



## 1. 输入条件

柜体环境温度设定为现场实测温度：35℃

机侧铜排电流输入3400A

网侧铜排电流输入2700A

源文件为stp格式

## 2. 模型简化

1) 柜体：用软件自带的Chasis物件替代原柜体模型，用VentOpening替代原柜门上的通风窗。也可在在CAD软件中预先实现。

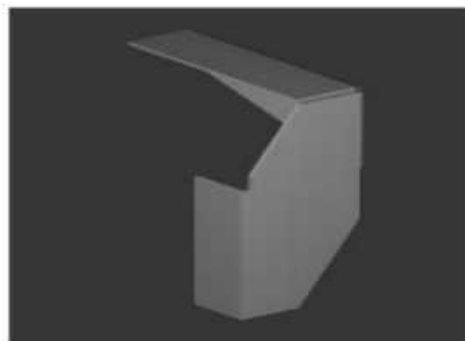




## 2) 结构件: CAD/CAE软件, 去除工艺细节

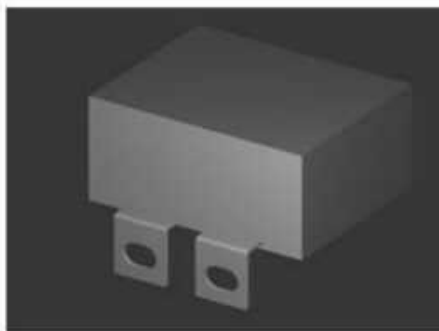


(a) 简化前



(b) 简化后

## 3) 电气件: 采用长方体、圆柱体进行替代



(a) 简化前

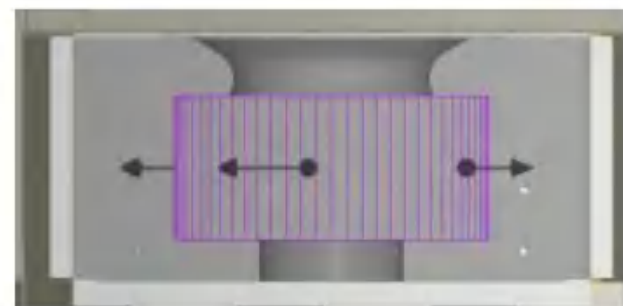


(b) 简化后



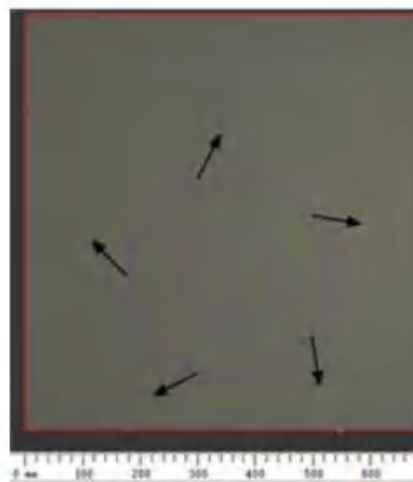
### 3. 风机处理

1) 风机替换为软件自带的风机模型，更改自带模型的几何和风机PQ曲线性能参数模拟实际风机。



2) 离心风机导风圈保留。

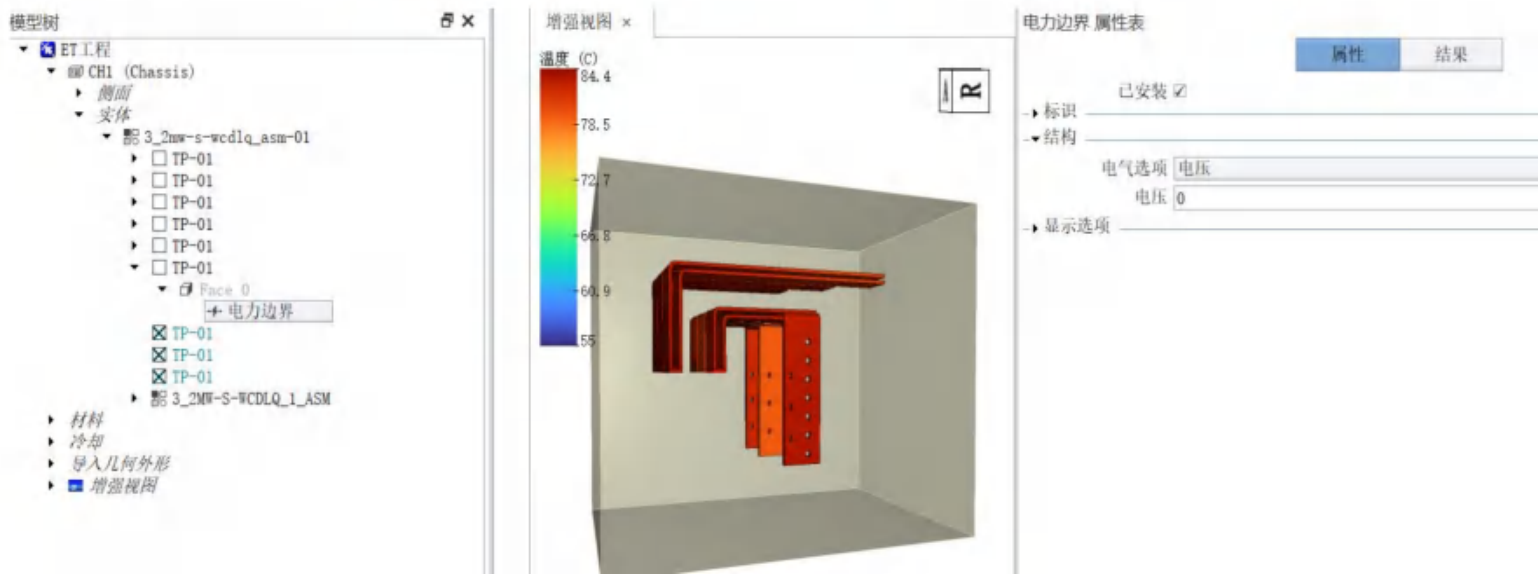
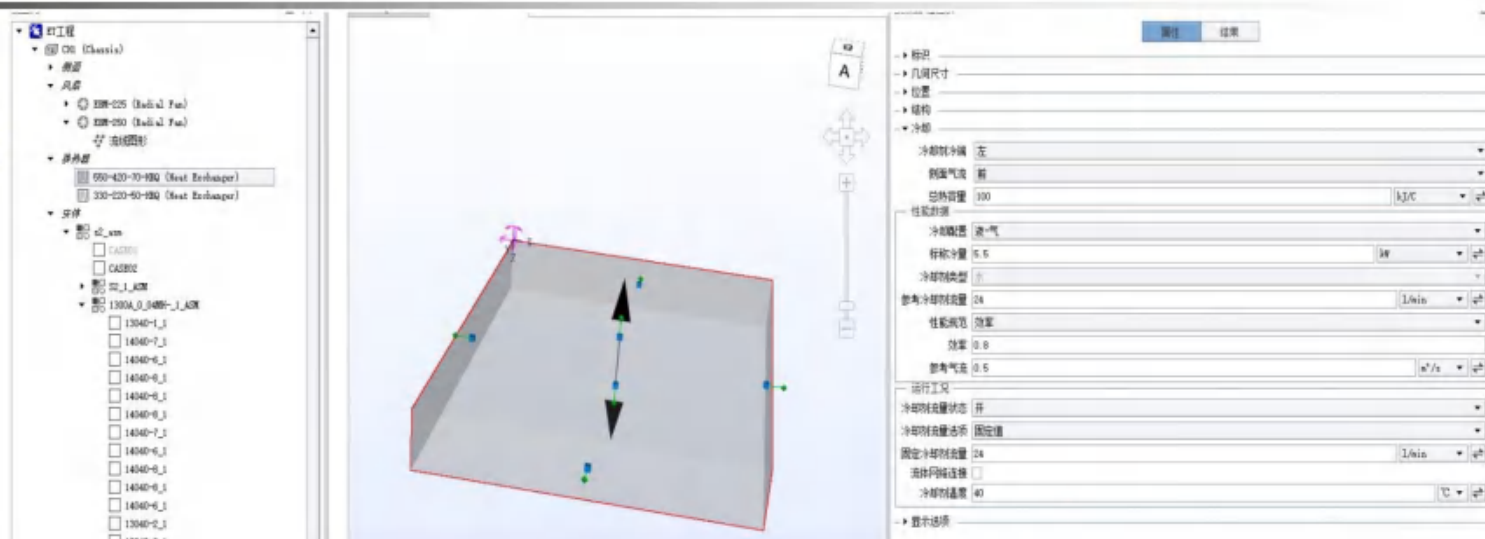
3) 离心风机出风角度--设置Swirl Angle 来模拟这个角度，取35度。





## 4. 风水换热器处理

## 5. 铜排电流输入

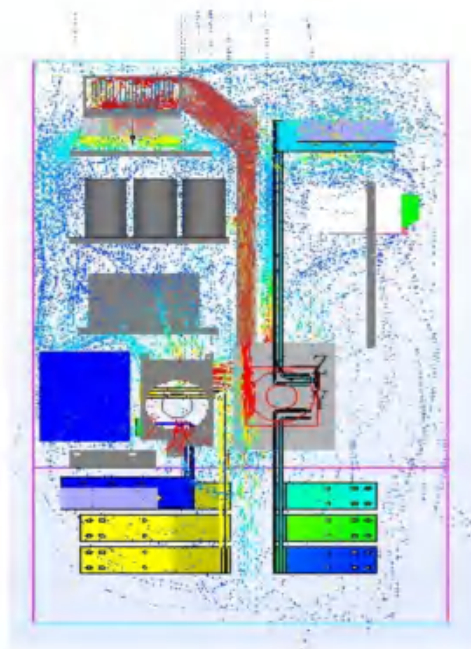
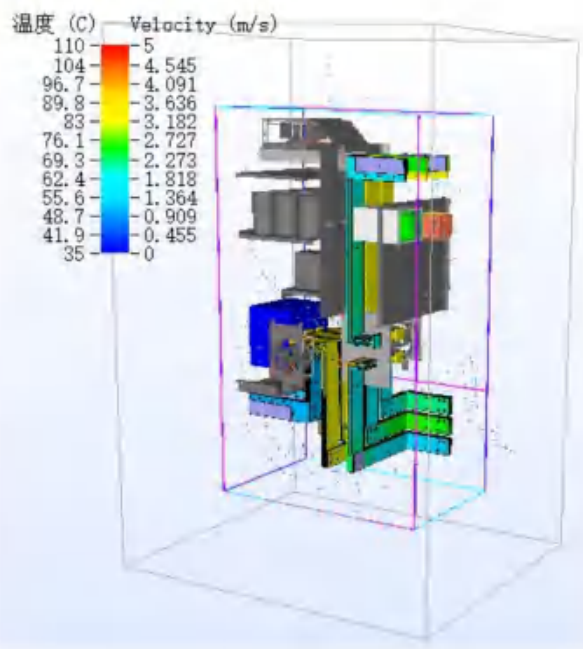




## 6. 网格划分与计算

使用默认的“GridRules.csv”网格化方法，生成的最终网格数约为8000万个。

## 7. 结果分析





| 位置         | 实测温度 | 仿真结果  | 偏差    |
|------------|------|-------|-------|
| 机侧A相下和主断接口 | 93℃  | 94.9℃ | +1.9℃ |
| 柜内PT1100   | 51℃  | 47.3℃ | -3.7℃ |

## 8. 结论

- 1) 使用6sigma软件对进行整柜级的仿真是可行的
- 2) 整柜的stp模型直接导入6sigma，在进行适当的简化和优化后，将网格总数控制在数千万级别，单次流场计算时间为3-5个小时。
- 3) 6sigma软件仿真精度很高。



本次讲座到此结束

谢谢！