

《数据中心热环境数值模拟技术细则》解读

汇报公司：中建三局第一建设安装有限公司

2023年12月13日 中国·北京国家会议中心

1. 背景及制定原则

2. 细则主要内容

3. 展望

数据中心高耗能行业 实现双碳目标重点



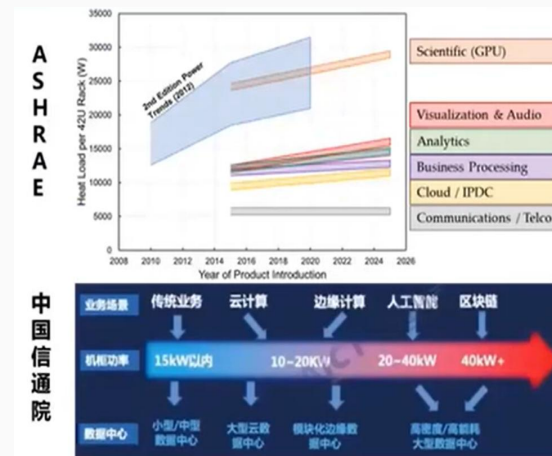
2021年全国数据中心耗电量达2166亿度，约占全国总耗电量的2.6%

数据中心八大枢纽 国家枢纽PUE < 1.25



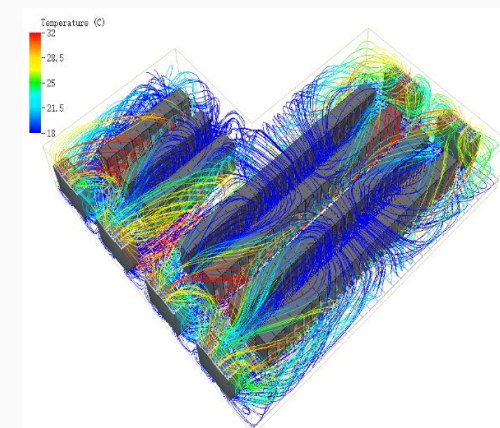
PUE > 1.5的数据中心需改造
全国新建大型PUE < 1.3
国家枢纽PUE < 1.25

IT设备耗电量增大 为热环境带来挑战



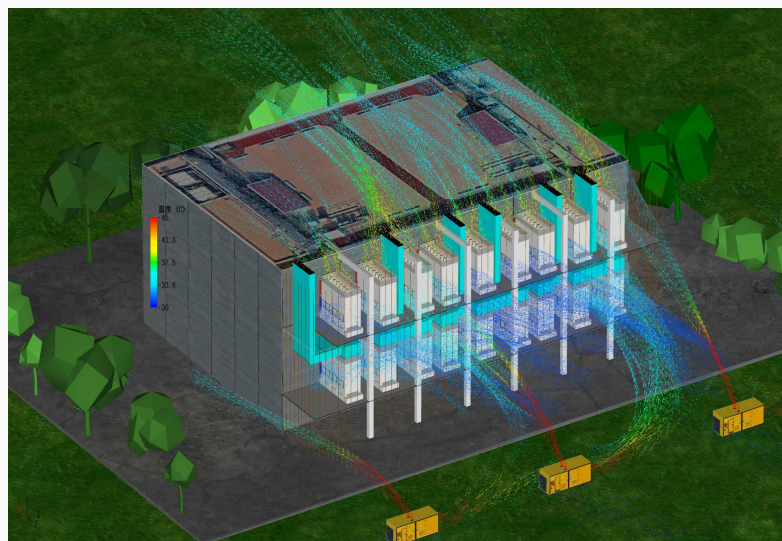
AI训练和推理运算所用的GPU服务器功率密度大幅提升

数据中心热环境 安全运行、节能至关重要



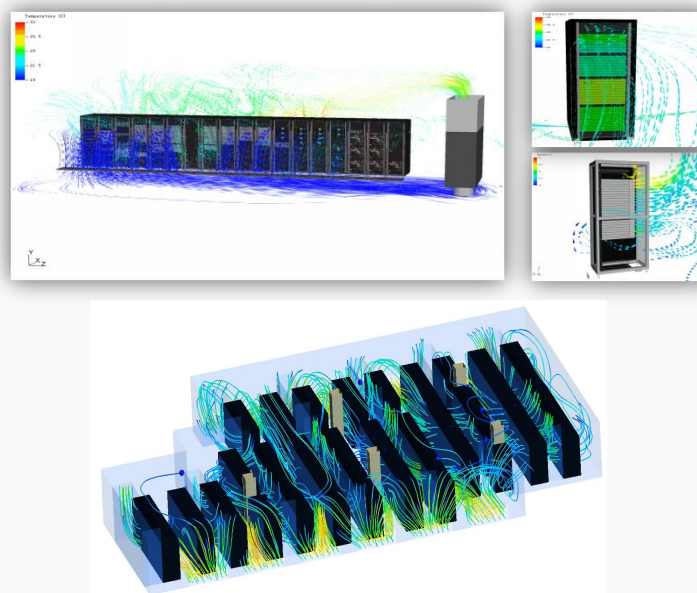
数据中心宕机成本激增
百万美元损失已成常态

数值模拟是一门同工程设计和科学研究密切相关的交叉学科，CFD的应用水平直接影响数据中心的设计能力
数值模拟（主要包括CFD）在数据中心的全生命周期都有着重要应用。



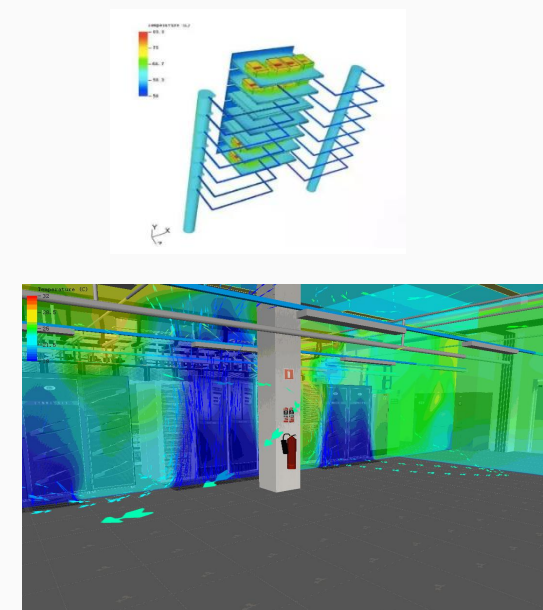
设计选址: 提高效率，保证效果

设备选型、方案必选、布局仿真
PUE计算、水力计算、冷却失效



工程阶段: 模拟验证，节省费用

设备测试、评价指标、方案验证
联合调试、优化布局、健康评估



运维阶段: 降低能耗，保证安全

IT设备变更、IT设备上架、冷却预测
节能改造、容量管理、故障诊断

英国统计学家: George E.P. Box (1919-2013)

"All models are wrong, but some are useful."
所有模型都是错的，但其中有些是有用的

"Remember that all models are wrong;
the practical question is how wrong do
they have to be to not be useful."
记住，所有模型都是错误的：关键的问题是模型错到什么程度就没有用处了。



essentially,
all models are wrong,
but some are useful

George E. P. Box

数值模拟

数据中心热环境数值模拟关键点

01

OPTION

明确数值模拟的场景和内容

02

OPTION

保证模拟结果的一致性

03

OPTION

高效的同时保证一定的精度

清晰性原则

制定的数值模拟细则应明确且无歧义，以便**仿真工程师、数据中心设计师以及数据中心运维人员**参考和使用，为此，应遵循以下编制原则：

- 所规定的范围、内容应力求完整
- 内容应力求清楚和准确
- 规范内容应充分考虑最新技术水平
- 规范能被未参加标准或规范编制的专业人员所理解

实用性原则

- 细则的制定必须有科学依据和有效的工程及实验验证，以确保模拟的可靠性和可操作性
- **本细则不同于科研应用，是工程应用应便于实施**
- 细则的内容应易于被其他的标准规范或文件参考或引用
- 以相应的国家、行业等标准文件为基础并尽可能与其保持一致。

1. 背景及制定原则

2. 细则重点内容解读

3. 展望

1. 数值模拟细则立项

本标准按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分:标准化文件的结构和起草规则》的规则起草。

由中国通讯工业协会数据中心委员会提出。

2. 起草单位：中建三局第一建设安装有限公司、中国通信工业协会数据中心委员会、华为数字能源技术有限公司、北京世纪互联宽带数据中心有限公司、中电系统建设工程有限公司、中山大学、华南理工大学、鹏城实验室、北京数字科智技术有限公司、中国长江三峡集团有限公司、三峡高科信息技术有限责任公司、中国建筑第八工程局有限公司（华北）、四川省天府云数据科技有限责任公司、深圳易信科技股份有限公司、同方股份有限公司、广州市汇源通信建设监理有限公司、深圳拓牛资产管理有限公司、韶关市中科新基建产融研究院、宁夏东数西算产融研究院、青岛东软载波智能电子有限公司。

3. 主要起草人：张俊、魏民、刘波、雒文伯、金和平、黄超、潘建初、杨超、安真、沈鉴、谢鹏、陈顺华、赵荣超、肖国权、张晓雪、郁亮、鄂添绯、杨磊、王润天、周巍、刘金桐、邓曦、许志鹏、曾超、聂道翔、白本通、刘和军、宋召波、张轶东、陈调津、郭文辉、尹航、陈红宇、刘焕礼、彭松坚、王晨光、杨小静

总体相关

- 1. 范围
- 2. 规范引用性文件
- 3. 术语、定义及缩略语

过程相关

- 4. 通用规定
- 5. 数据中心室内外热环境数值模拟: 5.1 室外热环境; 5.2 室内热环境
- 6. 数据中心局部热环境数值模拟: 6.1 电子设备级; 6.2 机柜级
- 7. 数据中心瞬态热环境数值模拟

参考资料

- 8. 附录
- 附录A 数据中心热环境数值模拟报告模板
- 附录B 数据中心热环境评价常用指标

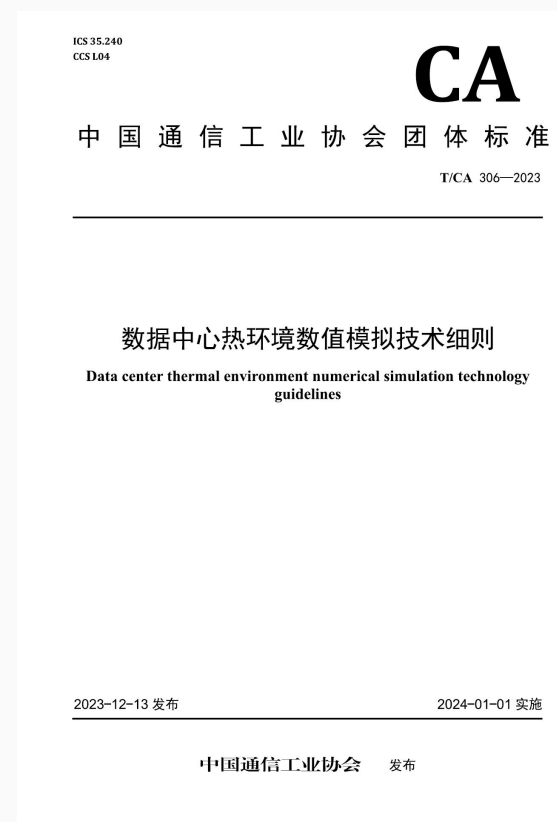
1. 范围

本文件规定了数据中心室内外热环境数值模拟、局部热环境数值模拟、热环境瞬态数值模拟的分析对象、建模要求、网格划分、求解过程、结果分析等。

本文件适用于新建、改建、扩建的数据中心热环境分析、验证及评价。

2. 规范性引用文件

GB/T 34982-2017	云计算数据中心基本要求
GB 40879-2021	数据中心能效限定值及能效等级
GB50019-2015	工业建筑供暖通风与空气调节设计规范
GB50174-2017	数据中心设计规范
GB50243-2016	通风与空调工程施工质量验收规范
GB50462-2015	数据中心基础设施施工及验收规范
DBJ/T 45-081-2019	建筑环境数值模拟技术规程
T/NIISA 003-2019	数据中心气流组织技术规范
T/CEC S487-2017	数据中心制冷与空调设计标准



4.1 应采用计算流体力学（CFD）对主机房气流组织进行模拟和验证，具体按照数据中心设计规范GB 50174-2017执行。

4.2 应采用CFD对室外设备的热环境进行模拟和验证，包括但不限于柴油发电机、冷却塔、空调室外机等。

4.3 应采用CFD对数据机房内电子信息设备进行局部热环境进行模拟和验证，包括但不限于机柜、微模块等。

4.4 应采用CFD对服务器变功率、冷源失效、风机失效等情况进行瞬态热环境模拟和验证。

4.5 采用CFD方法进行数据中心热环境模拟时，宜按图1所示流程进行，可根据软件功能、计算方法、分析对象相对特殊性微调流程。

4.6 应按照实际建筑及设备尺寸1:1构建数据中心几何模型，确保建模精度，宜对数据中心热环境影响较小的细节做适度简化处理，以节省计算资源。

4.7 几何建模可采用两种方式，一种是将CAD设计模型导入数据中心热环境数值模拟分析软件进行建模，另一种是在软件中直接建模。

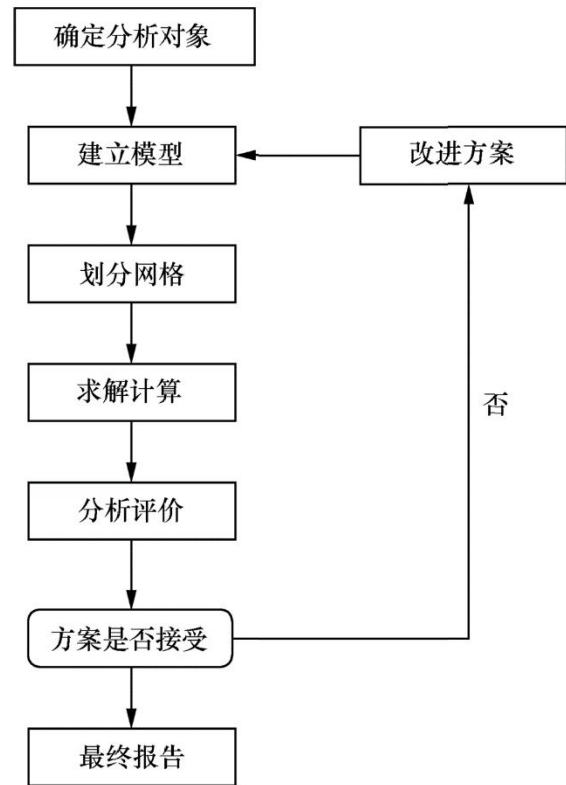


图1 数据中心热环境数值模拟流程

网格划分

4.8 宜对形状规则的分析对象采用结构化网格或者非结构化网格与结构化网格结合的混合网格，形状复杂的分析对象采用非结构化网格。

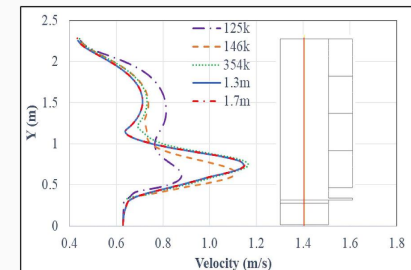
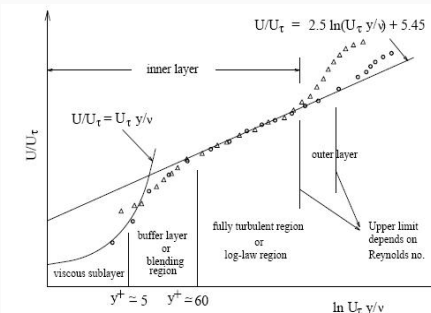
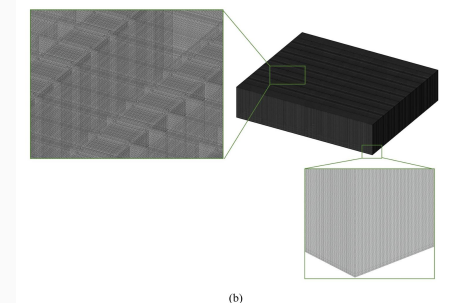
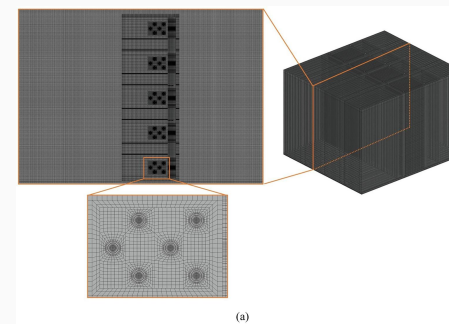
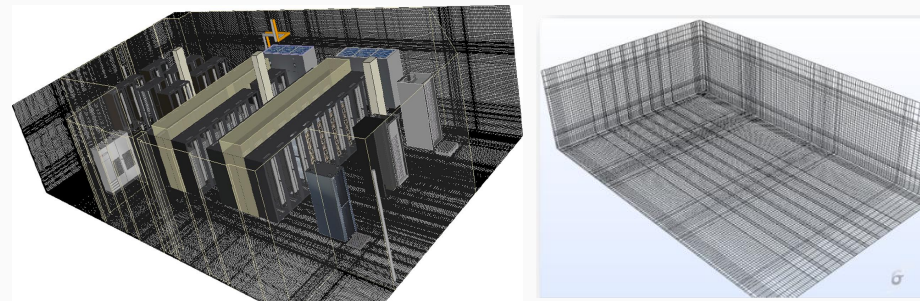
4.9 应在流场、温度场变化平缓的区域划分较疏的网格，在流场、温度场变化剧烈的区域，划分较密的网格，**网格过渡比不宜大于2。**

4.10 边界层和复杂几何形状的分析对象应采用网格加密、自适应网格等方法，**边界层网格应根据所选用的湍流模型及流体介质参数计算最大边界层首层网格大小。**

4.11 应进行网格无关性验证，宜采用**逐渐加密网格的方法**，分析网格数量对计算结果的影响，直至继续加密后计算结果稳定。

4.12 应检查网格的贴体性，如果网格有失真现象存在，应采用区域加密方法，保证网格能够捕捉匹配模型的原始几何形状。

4.13 应检查网格质量，包括并不限于以下指标：**扭曲度、偏斜度、增长率、长宽比、网格体积**，如果**网格体积为负值**，则**必须**对其进行修复纠正。



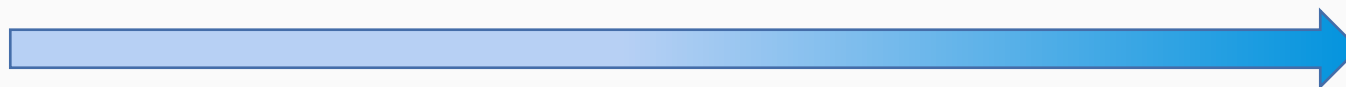
4.14 宜采用**有限体积法**离散求解，湍流模型宜采用k-epsilon模型、Spalart-Allmaras模型、k-omega 模型等。计算精度要求较高时, 可采用更高精度模型如RSM模型、LES模型、DES 模型等。

方法	有限体积法	有限差分法	有限元法	粒子法	格子波尔兹曼
描述	将流体的Euler控制方程在单元控制体内进行积分后离散求解	将微分问题变为代数问题的近似数值解法, 是发展较早且比较成熟的数值方法	把计算域离散剖分为互不重叠且相互连接的单元, 在单元内选择基函数, 用基函数来逼近真解	可分为光滑粒子法、半隐式运动粒子法和有限体积粒子法	通过Boltzmann方程的介观数值模型来再现特征尺度达微、纳米量级的气体流动问题
特点	具有很好的守恒性。更加灵活的假设, 可以克服泰勒展开离散的缺点。	差分方法主要适用于 结构网格 , 网格的步长一般根据实际地形的情况和柯朗稳定条件来决定	采用了逼近函数的方法, 具有很强的适应性和灵活性, 缺点是 计算量大	一种 无网格 方法。用离散的粒子来描述宏观连续分布微观仍为粒子的流体	通过计算 微观粒子 间的streaming和collision两个过程, 从而模拟整体流体的运动行为
适用场景	可以很好的解决复杂的工程问题。 对网格的适应性 很好。	可能会不满足积分守恒	有限元法常应用于电磁力学、结构力学等多场耦合计算	MPS和FVP方法虽然计算速度较慢, 但物理量计算更加准确, 适合于工程场景。	非常适合复杂几何结构的瞬态空气动力学和气动噪声

湍流模型

4.14 宜采用有限体积法离散求解，湍流模型宜采用k-epsilon模型、Spalart-Allmaras模型、k-omega 模型等。计算精度要求较高时，可采用更高精度模型如RSM模型、LES模型、DES 模型等。

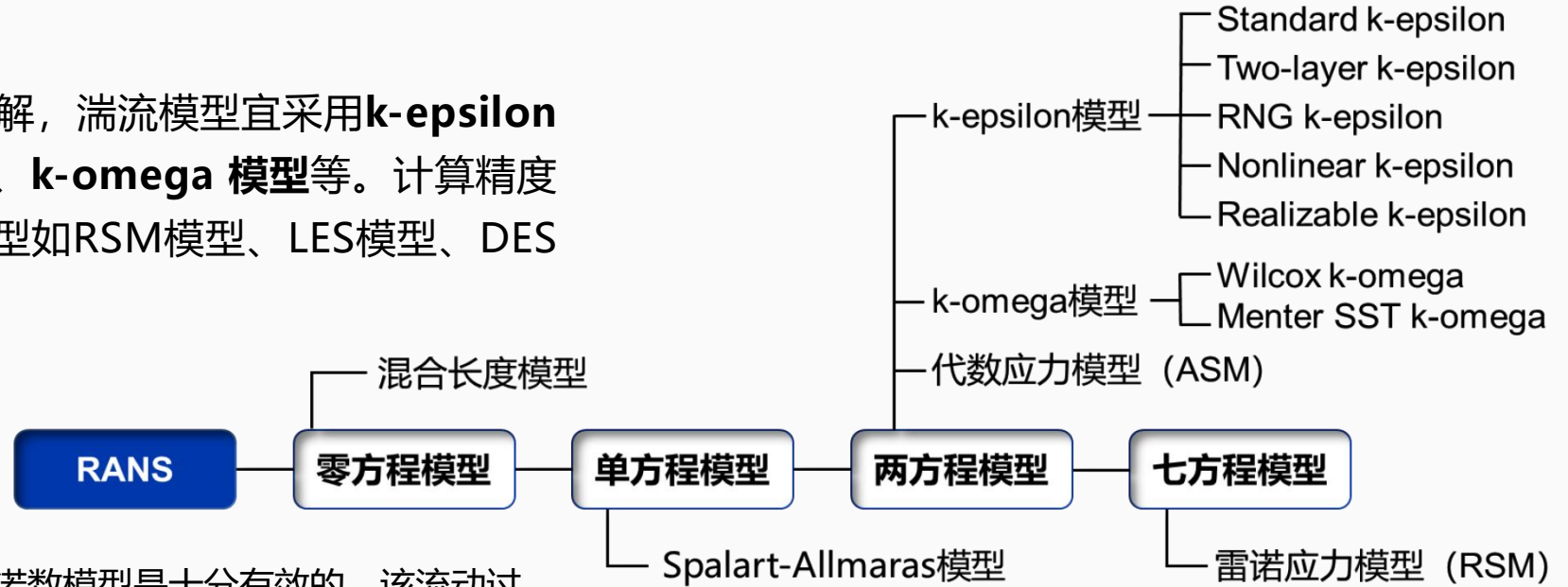
方法	直接数值模拟 (DNS)	大涡模拟 (LES)	雷诺平均 (RANS) (数据中心最常用的方法)
描述	对于流动的控制方程直接采用数值计算求解	把湍流分成大尺度湍流和小尺度湍流，小涡采用雷诺平均法，而大涡采用经过修正的Navier-Stokes方程	把Navier-Stokes方程中的瞬时变量分解为平均量和脉动量
特点	精度高，但计算量大、耗时多、对于计算机要求高	介于两者之间	精度满足工程要求，计算时间和成本相比其他两种最小
适用场合	计算雷诺数较低的简单湍流运动	一般湍流问题均适用	只关注流场平均值的问题



计算精度递减，算例成本递减

4. 通用规定

4.14 宜采用有限体积法离散求解，湍流模型宜采用**k-epsilon模型、Spalart-Allmaras模型、k-omega模型**等。计算精度要求较高时，可采用更高精度模型如RSM模型、LES模型、DES模型等。



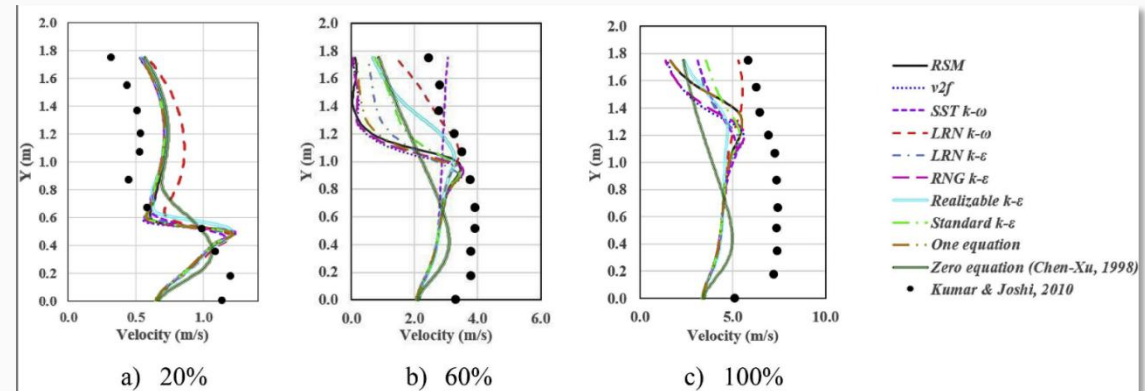
Spalart-Allmaras模型对于预测低雷诺数模型是十分有效的，该流动过程中，边界层中黏性影响的区域能被很好地处理。**Spalart-Allmaras**模型能适用于网格质量较差的工况。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon$$

$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$; $G_k = -\rho \overline{u_i' u_j'} \frac{\partial u_j}{\partial x_i}$; $G_b = \beta g_i \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial x_i}$, where $\beta = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p$; S_k & $S_\varepsilon = \text{user source terms}$;
 $Y_M = 2\rho \varepsilon M_t^2$, where $M_t^2 = \sqrt{\frac{k}{a^2}}$, $a \equiv \sqrt{\gamma R T} C_{1\varepsilon} = 1.44$; $C_{2\varepsilon} = 1.92$; $C_\mu = 0.09$; $\sigma_k = 1.0$; $\sigma_\varepsilon = 1.3$

Standard k-ε 运输方程及模型参数



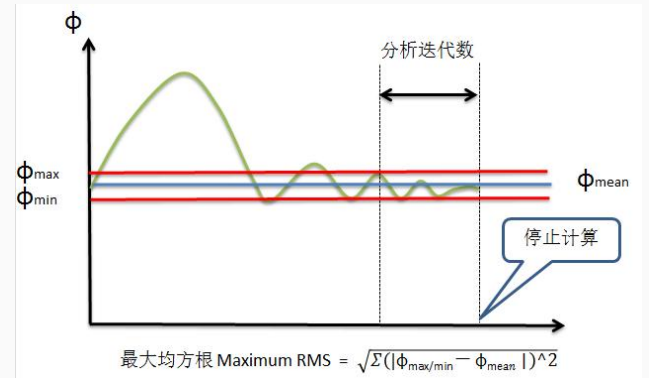
不同气流速率比下的湍流模型验证

4.15 为权衡计算精度和计算速度，可假设空气为不可压缩粘性流体，在空气温度变化不大时宜采用布辛涅司克近似，应在需要时采用更准确地描述空气密度变化的方法。

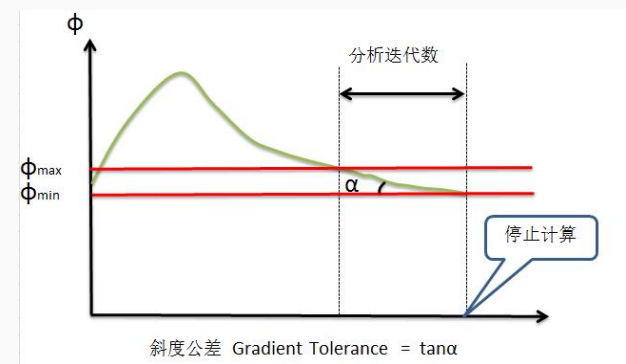
4.16 瞬态数值模拟时间步长的选取宜综合考虑物理特征、数值稳定性、模拟目标、计算资源等因素。在开始模拟之前，宜进行一些初步试验和敏感性分析，以确定合适的时间步长范围，并根据具体情况进行调整和优化。非稳态计算的时间步长不宜大于流体穿过一个网格的时间，宜设定为该时间的**0.75倍**。

4.17 在求解计算过程中，若出现计算收敛性较差或发散问题，可通过降低松弛因子提升稳定性，若问题依旧出现，则应检查模型的网格质量、边界条件以及计算格式，并做出修改。

4.18 采用有限体积法进行数值模拟时，迭代计算应在求解充分收敛的情况下停止，**可根据残差的量级和关键参数的波动范围来判断收敛，如果关键参数变化小于一定范围，同时残差达到一定等级**（如能量的均方根残差小于 $10E-6$ ，除能量以外的变量的均方根残差小于 $10E-3$ ），则可认为求解计算充分收敛。



最大均方根判断依据

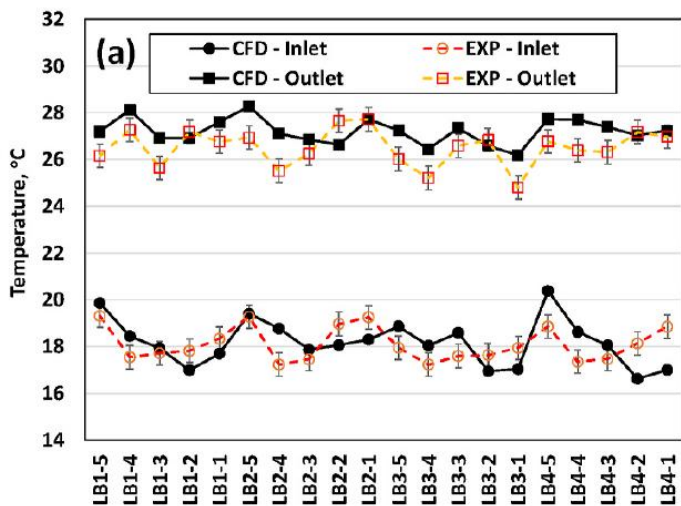


斜度公差判断依据

数值模拟可靠性验证

4.19 应进行数值模拟的可靠性验证，应选择能充分代表数值模拟工况的基准案例或实测数据进行对比，宜选择适当的误差度量标准，如若干关键测量点（如机柜进风口、空调出风口）关键参数（如温度、速度）的平均绝对误差、平均相对误差、最大绝对误差等，**其中平均相对误差不宜大于15%**，同时模拟结果应该能够准确的反映实测数据的变化趋势。其中数据中心室内的温度测量点位置应按照 **GB 50462** 中的相关要求选择，数据中心室外测量点位置应按照 **GB 40879** 中的相关要求选择。

4.20 宜采用并不限于以下指标进行数据中心热环境评价：机柜循环指数MCRI (Mean Cabinet Recirculation Index)、供热指数SHI(supply heat index)、回热指数RHI(return heat index)、机柜冷却指数RCI(rack cooling index)、回风温度指数RTI(return temperature index)和掺混指数IOM (Index of Mixing)，指标的详细描述参见附录B。



5.1.1 分析对象

包括建筑物和室外设备。

- a) 建筑物可分为单栋建筑和园区建筑群。
- b) 室外设备包括但不限于冷却塔、柴油发电机组、风冷冷水机组、风冷冷凝器、间接蒸发冷却空调等。

5.1.2 建模要求

5.1.2.1 模型应包括建筑物和周围环境的几何形状和尺寸、建筑物的材料和热物性参数。具体包括但不限于如下资料：

5.1.2.2 墙体的厚度和材质，门窗的开启情况可忽略，应对实际建筑群进行简化处理。

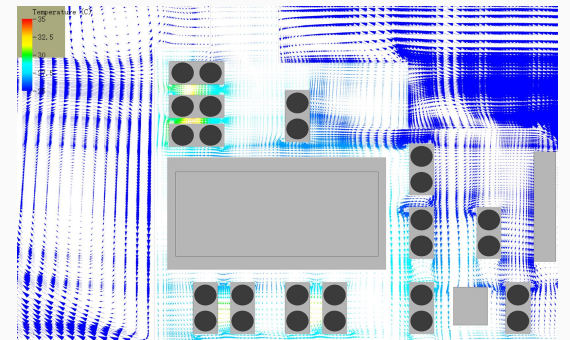
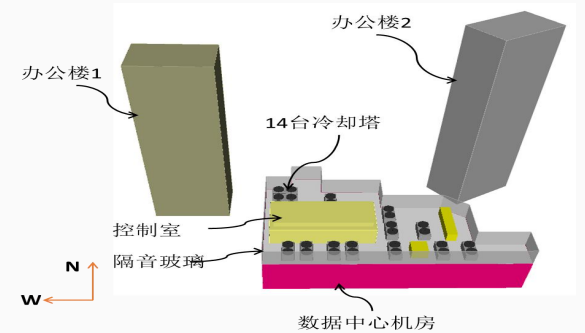
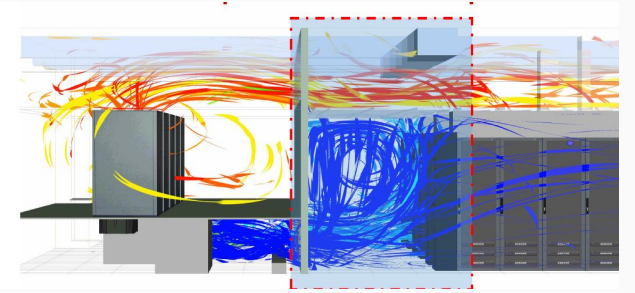
5.1.2.3 室外设备模型宜与其实际尺寸、设备布局、排布方式、设备数量、材料属性、附属构件等保持一致。具体包括但不限于如下：

- a) 排热设备气流。
- b) 发电机排气管。
- c) 发电机进气和排气流量。
- d) 外部安装设备。

5.1.2.4 室外模型应考虑对分析对象的热环境有影响的相邻建筑、设备排热、进风口、排风口等。

5.1.2.5 计算域的设置宜遵循以下原则：

- a) 模型的最高高度为 H_{max} ，计算域高度不宜小于 $4 H_{max}$ 。
- b) 以目标建筑（群）为中心，不宜小于 $5 H_{max}$ 范围内为水平计算区域。
- c) 在来流方向，建筑前方距离计算区域边界宜大于 $2 H_{max}$ ，建筑后方距离计算区域边界宜大于 $6 H_{max}$ 。



5.1.3 网格划分

5.1.3.1 应根据室外整体边界区域、设备尺寸等因素合理设定生成计算网格的尺寸和数量。

5.1.3.2 室外建筑群体之间存在障碍物时，应根据空气流动情况和温度分布等因素选择合理的网格大小和网格加密。

5.1.3.3 宜对室外设备及周围区域进行网格加密。应根据空气流动情况和温度分布等因素，对室外设备的进、出风口周围区域进行网格加密。

5.1.4 求解过程

5.1.4.1 应设置的室外环境参数，包括**主导风向、风速、温湿度、太阳辐射强度**等数据的准确性和可靠性。

5.1.4.2 极端天气下的数值模拟，宜按照**项目当地气象局或ASHRAE 20年**极端干湿球温度设置。

5.1.4.3 室外设备的风量、热源应根据实际情况设置边界条件。

5.1.4.4 有消音装置时，应根据实际测试或者制造商提供的特性曲线设置参数。

5.1.4.5 间接蒸发冷却空调应根据实际情况设置空气的干球温度、湿球温度和入口速度等参数。

5.1.4.6 应分别设置**当地主导风向和静风**两种边界条件，对设备之间进排风的干扰情况进行求解计算。

5.1.5 结果分析

5.1.5.1 应输出室外设备进风口、出风口等关键位置的温度场、速度场、压力场等结果。

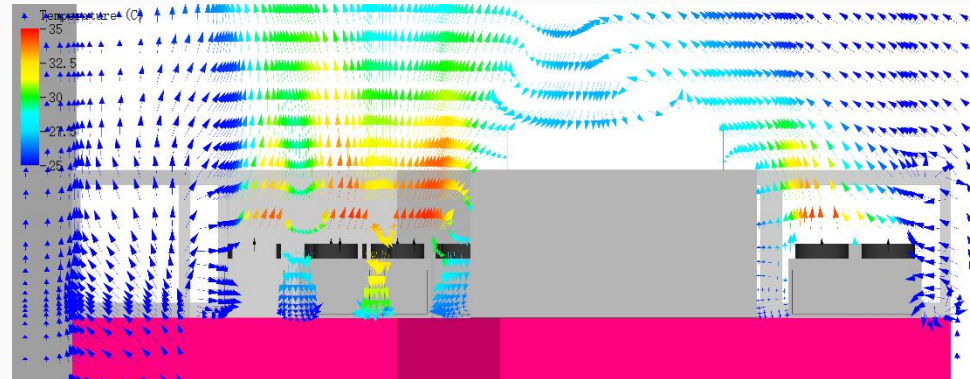
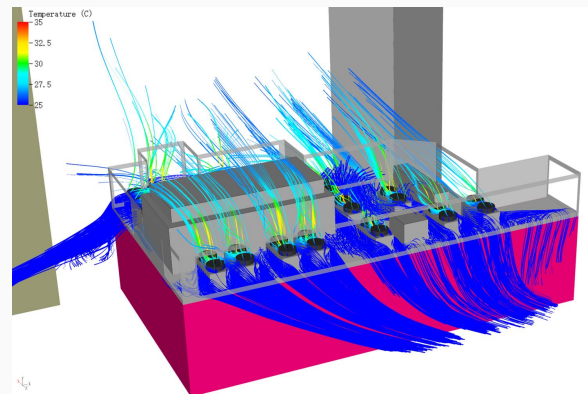
5.1.5.2 应对室外设备进风口最高温度和平均温度进行分析，确认是否满足其工作要求。宜量化分析温度变化对于设备制冷量及能效的影响。

5.1.5.3 宜对室外设备周边的温度分布、温度梯度变化进行分析，判断有无冷热空气掺混、热岛效应等现象。

5.1.5.4 宜对室外设备周边的速度分布、流线分布进行分析，确认是否存在室外设备之间的**回流**、**涡流**等不良影响。

5.1.5.5 宜对室外设备周边的压力分布、压差变化进行分析。确认室外设备的**机外余压**是否满足要求，如不能满足要求宜通过增加排风导流罩、设备布局的调整等方式进行优化。

5.1.5.6 宜根据**掺混指数IOM**，详见附录B，分析室外机、冷却塔、柴油发电机等室外设备的流场、温度场及布局合理性。



5.2.1 分析对象

5.2.1.1 室内热环境数值模拟应以整个单元房间作为分析对象。

5.2.1.2 室内设备包含但不限于**空调制冷机组、服务器机柜、IT服务器、网络机柜、配电柜、电池柜、馈线柜**等。

5.2.2 建模要求

5.2.2.1 室内设备建模时应与实际尺寸、排布方式、数量等保持一致，应准确建模设备类型、数量、热负荷参数和排放位置等。

5.2.2.2 可对机房内线槽、桥架、风管及其他阻碍空气流动的障碍物做适当简化处理。

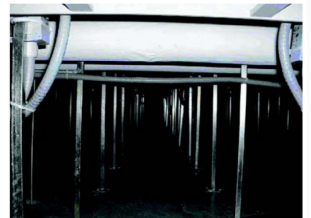
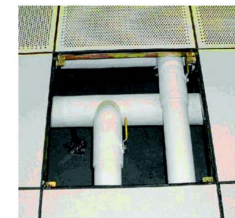
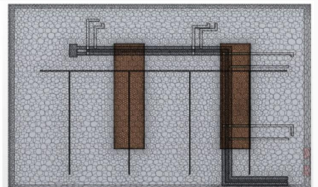
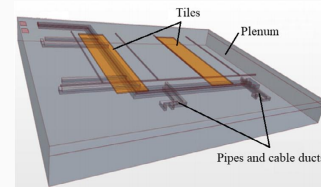
5.2.2.3 可根据情况选择是否对室内墙体、地板、天花板、门窗等的材料和热性质进行建模，包括合理设置热传导系数、密度、热容量等参数。

5.2.2.4 应准确建模冷通道、热通道、机房门窗的位置和数量、风道的尺寸和布局等。

5.2.2.5 机柜应考虑其尺寸、间距、位置布局、内部组件、散热设备等因素，宜考虑漏风率和盲板封堵。

5.2.2.6 **地板下送风，宜对地板下阻碍物体进行建模。**

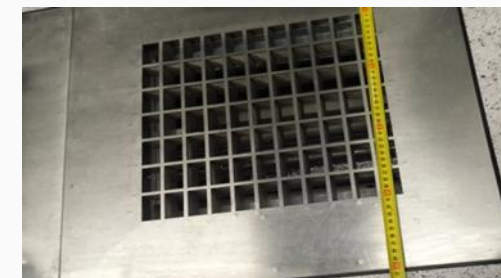
5.2.2.8 可简化处理数据机房内照明、线缆、人员、新风、围护结构散热负荷等。



5.2.2.7 过滤网、孔板等阻力部件，宜根据**部件几何特征**（如厚度、开孔率等）采用**修正的体积力模型或多孔介质模型**进行简化。

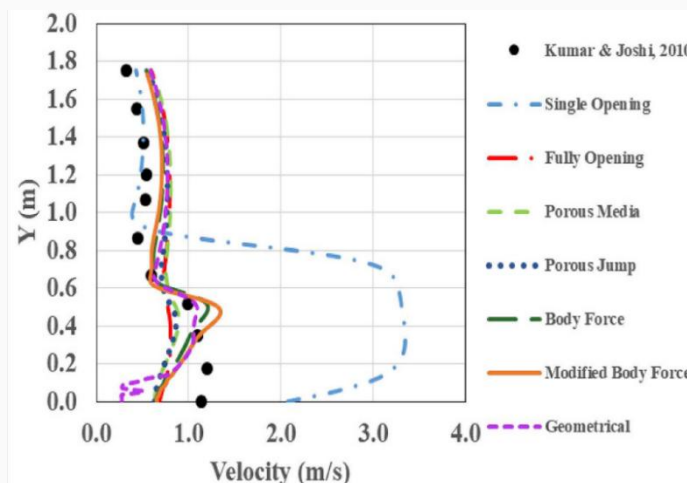
解释：目前关于压差与速度拟合计算方法有：

- 采用达西定律模型（Darcy' s law model）的粘性阻力系数和惯性阻力系数。
- 采用幂律模型（Power law model）的经验系数C0与经验系数C1的值
- 采用多孔阶跃介质的面渗透率和惯性阻力系数。推荐使用体积力模型和多孔介质模型

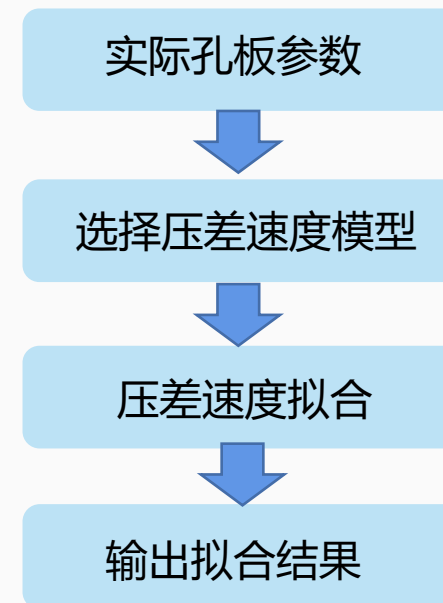


Models	Equations
Porous jump (PJ) model	$\Delta p_{PJ} = K_1 \frac{1}{2} \rho v_{in}^2$ $K_1 = \frac{[1 + 0.5(1-F)^{0.75} + 1.414(1-F)^{0.375}]}{F^2}$
Body force (BF) model	$\Delta p_{BF} = K_2 \rho v_{in} (v_{pore} - v_{in}), v_{pore} = \frac{v_{in}}{F}$ $K_2 = \frac{1}{F^2} \left[\left(\frac{1-F}{2} \right)^{1/2} + (1-F) \right]^2$
Modified body force (MBF) model	$\Delta p_{MBF} = \frac{1}{2} \rho v_{neck}^2 - \frac{1}{2} \rho v_{in}^2$ $v_{neck} = v_{in} (K_2 + 1)^{1/2}$
Refined MBF model	$\Delta p_{RMBF} = \frac{1}{2} \varphi \Delta p_{MBF}$

孔板速度与压损模型



孔板速度与压损拟合曲线



进行孔板仿真简化的流程

5.2.3 网格划分

5.2.3.1 应综合考虑热源分布、空气流动情况以及温度分布等因素进行合理的网格划分和网格加密。

5.2.3.2 为准确描述热源分布情况，宜对设备和机柜等热源区域进行网格加密。

5.2.3.3 为准确描述空气流动情况和散热效率，宜对设备的散热区域，如风扇和散热片等，进行网格加密。

5.2.3.4 应对空调出风口、下送风地板出风口、机柜进出风口等气流组织复杂或存在冷热空气惨混的区域进行网格加密。

5.2.3.5 宜对室内温度梯度较大的特殊区域，如墙壁与地板交界处、顶棚与墙壁交界处等，进行网格加密。

5.2.4 求解过程

5.2.4.1 应根据实际情况设置室内发热设备的功率密度或者热源功率。

5.2.4.2 应根据实际情况设置空调送回风口风速、温度；风口地板、地板漏风率、机柜通风率等边界条件。

5.2.4.3 室内壁面宜设为无滑移边界。

5.2.5 结果分析

5.2.5.1 宜输出但不限于如下结果：

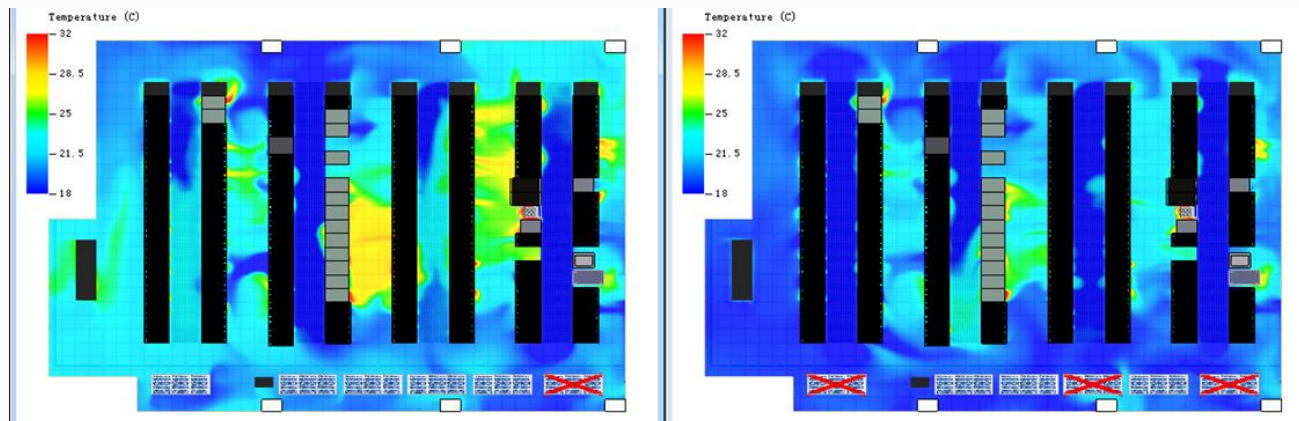
- a) 室内温度场、速度场、压力分布云图。
- b) 空调进出口气流流线图或动画。
- c) 空调送、回风口温度值。
- d) 冷、热通道进、出口温度值。
- e) 机柜进、出风口温度值。

5.2.5.2 应通过数值模拟结果分析：

- a) 室内空调设备热备份运行时机柜进风温度能否满足要求。
- b) 室内空调冷备份运行时空调末端轮巡方案的合理性、冗余空调在不同位置的影响。
- c) 最不利位置冗余空调故障时，机柜进风温度能否满足要求、是否出现局部热点。

5.2.5.3 应分析室内热环境是否存在冷风泄漏、冷空气短路、热空气回流、冷热气流掺混等不良现象，判断室内是否存在局部热点。

5.2.5.4 宜根据MCRI、RCI、RTI、RHI等数据中心机房热环境评价常用指标，详见附录B，分析室内环境冷却效果及空调冷量利用率。



6.1 电子信息设备级热环境

6.1.1 分析对象

有风冷和液冷两种类型，包括但不限于PCB板、芯片、电容、电感、变压器、电阻等主要发热元器件，散热器、风扇、冷板及机壳等散热部件和结构件。

6.1.2 建模要求

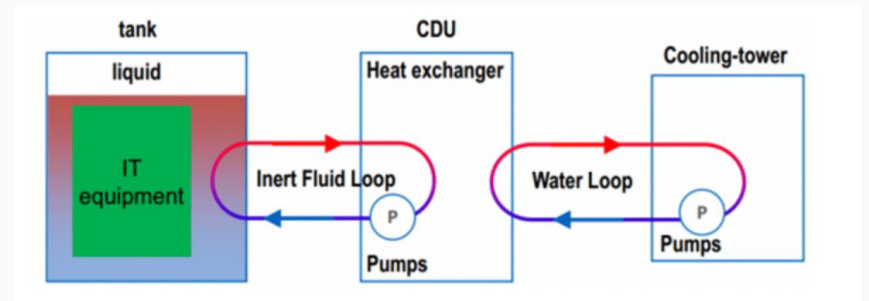
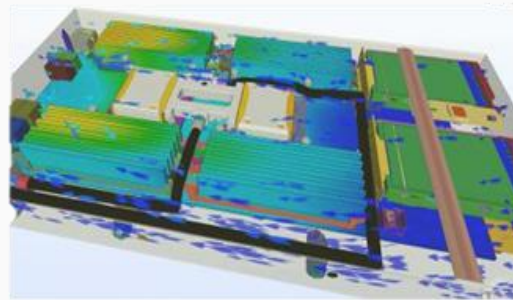
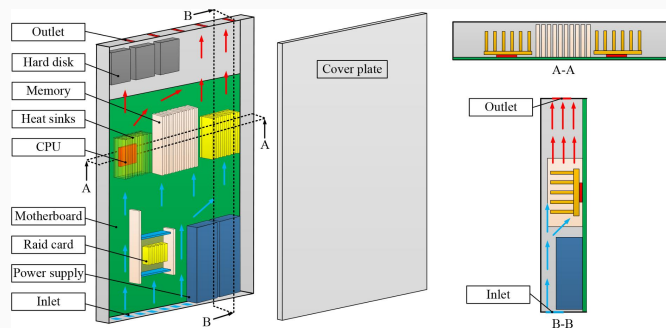
6.1.2.1 模型应根据实际情况设置发热元器件的发热功率、材料的导热系数、密度、热容、热发射率、吸收率和透射率、接触热阻等参数。

6.1.2.2 宜假设芯片及PCB板上元器件均为各向同性材，忽略PCB板焊层中的空隙、缺陷。

6.1.2.3 可忽略芯片上超声引线的传热量，有风扇的散热模型可忽略热辐射散热的影响。

6.1.2.4 应对风扇和泵等动力部件模型设置额定状态下的流量压力曲线及实际控制逻辑。

6.1.2.5 可采用多孔介质模型或者修正的体积力模型简化过滤网、孔板等阻力部件，宜采用流速压力特性曲线描述其流动特性。



6.1.3 网格划分

6.1.3.1 应对发热量大的芯片、电容、电感、变压器、电阻等器件，以及主要传热路径的连接线、散热器、动力设备等进行局部网格加密。

6.1.3.2 应对风冷设备进出风口、液冷设备供回液口的网格进行局部加密。

6.1.4 求解过程

6.1.4.1 采用液冷降温的电子信息设备，应在边界设定供液和回液位置、尺寸，冷却液体的物性参数、以及流量和温度等。

6.1.4.2 求解过程中宜监控主要发热设备的温度收敛过程。

6.1.5 结果分析

6.1.5.1 输出结果应包括但不限于：主要发热元件的最高温度和平均温度、模拟对象的温度场、速度场、压力场云图、流线图及速度矢量图等。

6.1.5.2 应分析主要发热元件的最高温度是否超过允许最高温度值。

6.1.5.3 应分析风冷系统的风扇送风量、风口位置、送回风温度是否满足要求，并根据计算结果给出优化方案。

6.1.5.4 应分析风冷数据中心局部热环境是否存在冷热气流掺混、冷空气短路、热空气回流、局部涡流等现象。

6.1.5.5 应分析液冷系统冷却液的流动情况以及其吸热和排热的效果。

6.2.1 分析对象

6.2.1.1 分析对象可分为**单机柜**、多机柜和微模块。

6.2.1.2 多机柜级模型可包括多个单机柜。

6.2.1.3 微模块级模型应包括配电、空调等设备模型。

6.2.2 建模要求

6.2.2.1 机柜级热环境建模时，不宜对机柜内的芯片级设备、PCB级设备进行详细建模，但对机柜气流组织和热环境有显著影响的设备如空调等应予以建模。

6.2.2.2 微模块级热环境建模时，应考虑泄漏的影响。泄漏的位置应包括封闭通道缝隙、天窗缝隙、通道门缝隙、机柜之间的缝隙、机柜导轨缝隙等。

6.2.2.3 风机、泵等动力部件与孔板等阻力部件应采用固定值或者曲线设置性能参数，当动力部件设置性能曲线时，阻力部件宜设定阻力曲线。

6.2.2.4 风机、泵等动力部件应根据实际控制逻辑设置控制方式，如空调以温度、温差、速度、压差等方式控制风机转速。

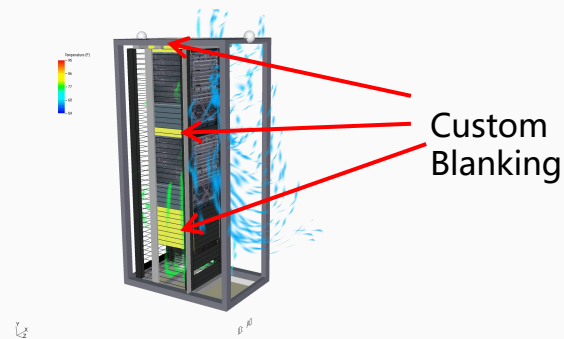
6.2.2.5 空调模型的冷量应定义为随回风温度变化冷量曲线或固定值，冷却形式可定义为直膨式系统、冷冻水系统、间接蒸发冷却空调等。

6.2.2.6 发热功率大于200W的强迫冷却配电设备应设置进出风口尺寸与位置，发热量数值以及散热风量。

6.2.2.7 热管背板模型，应考虑热管背板的阻力特性、进液方向及配置的风机尺寸、位置、风机风量控制设置。

6.2.2.8 通风地板模型，应考虑通风地板的阻力及出风方向。

6.2.2.9 宜根据实际情况简化风机、空调等动力设备，应合理简化模型中的动力部件、阻力部件等。



6.2.3 网格划分

6.2.3.1 宜根据实际工艺水平，对**存在泄漏的缝隙区域**，如机柜立柱缝隙、穿线孔、门缝等单独进行网格加密，网格数量不应小于3个。

6.2.3.2 应加密电子信息设备和空调进出风口所在区域的网格。

6.2.3.3 应对计算域中温度、压力、速度变化剧烈的区域和考虑泄露的区域局部加密网格。

6.2.3.4 应对液冷设备的进液口、出液口以及液冷管道局部加密网格。

6.2.4 求解过程

6.2.4.1 风冷系统应分别设置电子信息设备满载时，**空调全部开启和冗余空调关闭**两种场景的边界条件，并进行模拟计算。

6.2.4.2 机柜内的风冷电子信息设备模型，宜采用**灰箱模型**，应考虑设备的尺寸、进出风口尺寸及位置、发热量及散热所需风量的关系。

6.2.4.3 浸没式液冷电子信息设备模型，宜采用**灰箱模型**，应考虑电子信息设备的尺寸、进出液口尺寸及位置、发热量及阻力特性。

6.2.4.4 浸没冷却模型应设定箱体材料特性参数、供液和回液位置的几何特征、流体物性参数、供液口流量以及温度等边界条件。

6.2.5 结果分析

6.2.5.3 风冷系统热环境分析：

a) 应校核配置的空调机外余压是否大于等于系统的阻力，如果余压小于系统阻力，可考虑调整系统的配置，减小阻力或者选择更大功率的空调机。

b) 应分析机柜的速度场、温度场、压力场，机柜的最高温度、平均温度，计算速度不均匀系数、温度不均匀系数、机柜循环指数、机柜冷却指数等，判断机柜的热环境是否满足要求，如不满足要求，应提出相应的改进措施。

c) 当机柜冷热空气短路时，应优化设计、调整空调温度设置，并进行量化分析。

6.2.5.4 液冷系统热环境分析：

a) 应校验分配到每个电子信息设备的冷却液流量、供液温度、回液温度是否满足设计要求。

b) 应计算液体系统的阻力，校验泵的流量、扬程是否满足要求。

7.1 分析对象

7.1.1 数据中心热环境瞬态模拟包括但不限于**服务器变功率瞬态模拟、冷源失效瞬态模拟和末端风机失效瞬态模拟**等。

7.1.2 服务器变功率瞬态模拟应模拟IT利用率变化的过程中机房内热环境随时间变化的情况。

7.1.3 冷源失效瞬态模拟应模拟数据中心冷源系统完全或部分中断，末端风机仍在运行的时，机房内热环境随时间变化情况。该瞬态模拟应定量分析冷源失效过程中电子信息设备进出风温度随时间的变化过程，获得达到最大允许温度的时间。

7.1.4 末端风机失效瞬态模拟应模拟冷源设备正常运行，末端风机完全或部分停止的数量大于冗余数量时，机房内热环境随时间的变化情况。该瞬态模拟应定量分析不同末端风机失效时，机房内热环境随时间变化情况，预测机房温升速率及获得达到最大允许温度的时间。

7.2 建模要求

7.2.1 冷源失效瞬态模型和末端风机失效瞬态模型应考虑电子信息设备热容、建筑热容、管路制冷剂热容、盘管热容等多个因素对瞬态传热的影响。

7.2.2 服务器变功率瞬态模型应考虑服务器内部CPU、内存、电源等发热元件热量随时间的变化情况。

7.2 建模要求 (续)

7.2.3 服务器变功率瞬态模型宜简化复杂的内部结构，但建模时仍需考虑服务器的阻力特性、热源特性、热容特性、对流传热特性等因素，具体要求：

- a) 服务器主板及芯片等发热元件可简化为带有内热源，外壳不计厚度的平板。
- b) 服务器模型应包含一定的热容，与实际服务器的热容相等。
- c) 热源可设置为体积热源，均匀分布，总发热量与服务器实际发热量相等。
- d) 服务器风扇可简化为平面风扇模型，即不考虑风扇体积。
- e) 模型可不考虑地板、封闭冷热通道顶板的热容。

7.2.4 冷源失效和末端风机失效瞬态模型初始条件和边界条件应包括：

- a) 单台空调末端风机的送风量或者送风速度。
- b) 单台空调末端风机送风温度。
- c) 单台空调末端的制冷量随回风温度变化曲线。
- d) 空调末端风机开启台数及备机台数。
- e) 空调末端风机控制：实际控制方式及设定值，包含但不限于群控或独立控制，温差控制、送风控制、回风控制、PID控制等。

7.2.5 模拟停电或市电切换过程中，电子信息设备的温度随时间变化时，建模应考虑实际电子信息设备特、散热系统、空气流动等多个因素。

7.4 求解过程

7.4.1 数据中心热环境瞬态模拟前，**宜先按初始情况进行稳态模拟**，并将稳态模拟结果作为瞬态数值模拟的初始条件。

7.4.2 服务器变功率瞬态模拟，应考虑服务器风量跟服务器进风温度的对应关系。

7.4.3 部分冷源失效瞬态模拟，应根据冷却系统架构调整空调末端最大冷量值。直膨空调机组，可将X台失效的冷源设备制冷量降至0kW ($0 < X < \text{冷源设备实际运行台数} N$)。冷冻水或者氟泵多联系统，可根据实际失效部件对制冷量的影响情况调整N台空调末端的最大冷量值。蒸发冷系统应考虑室外极端温度下压缩机断电后仅靠芯体换热和喷淋时的最大冷量值。

7.4.4 全部冷源失效瞬态模拟应将运行中的全部冷源设备制冷量降至0kW。

7.4.5 应合理设置模拟时间、时间步长、时间步数以及子步迭代数：

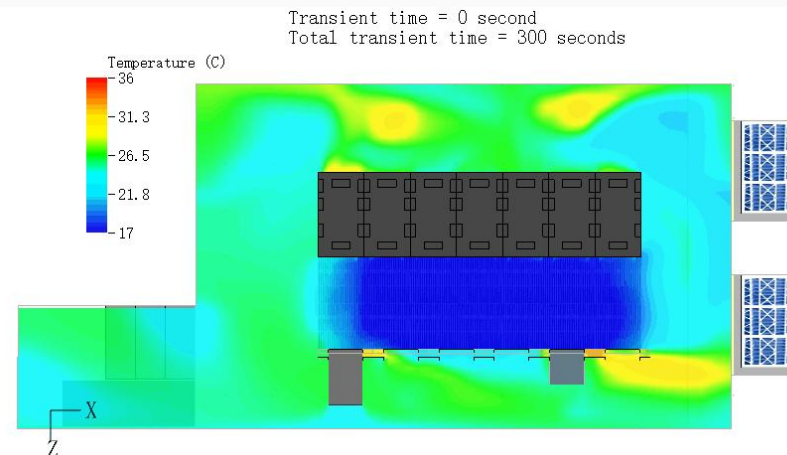
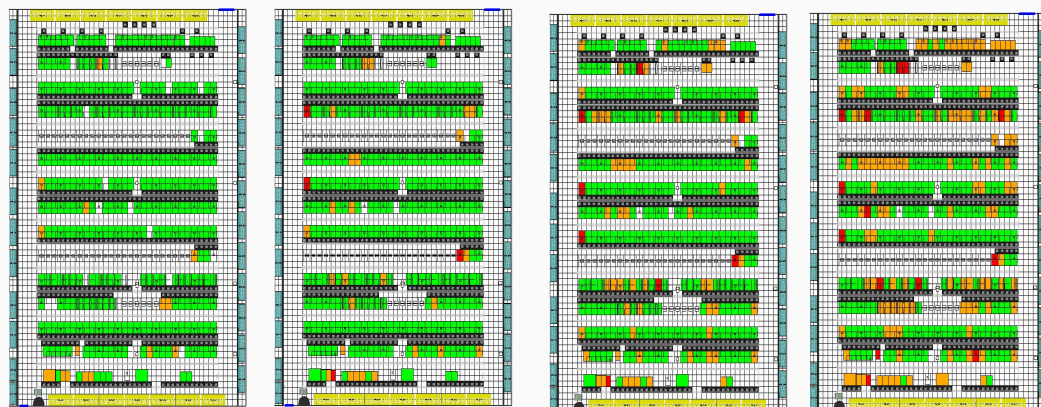
- a) 模拟时间，瞬态过程计算案例的模拟时间应不低于该场景过程的实际时间。
- b) 时间步长，在不影响计算稳定性的前提下可适当放大时间步长，室内热环境数值模拟场景中，**时间步长不宜大于10s**。
- c) 时间步数，应按照计算时间除以时间步长设置时间步数。
- d) 子步迭代数，单个时间步长内进行迭代的次数宜小于稳态迭代次数，可参考稳态下的收敛要求进行子步迭代数设置。

7.5 结果分析

7.5.1 瞬态模拟过程应记录但不限于如下数据:

- a) 机柜进风温度: 机柜上架设备进风口处最高和平均温度。
- b) 机柜出风温度: 机柜上架设备出风口处最高和平均温度。
- c) 机柜极限温度: 执行GB50174-2017中规定的进风温度18°C-27°C、SLA要求、电子信息设备要求的告警温度。
- d) 机柜平衡温度: 机房达到稳定时机柜上架设备进出风口处最高温度。
- e) 极限温升时间: 瞬态模拟初始机柜温度温升至极限温度时间。
- f) 冷源运行极限温度: 冷源设备运行环境保护温度, 或运行停机环境温度。

18 °C  27 °C



7.5.2 瞬态模拟结果分析应包括但不限于如下内容:

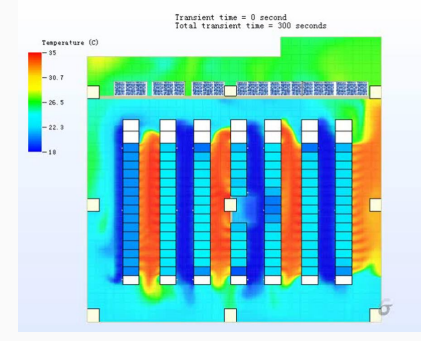
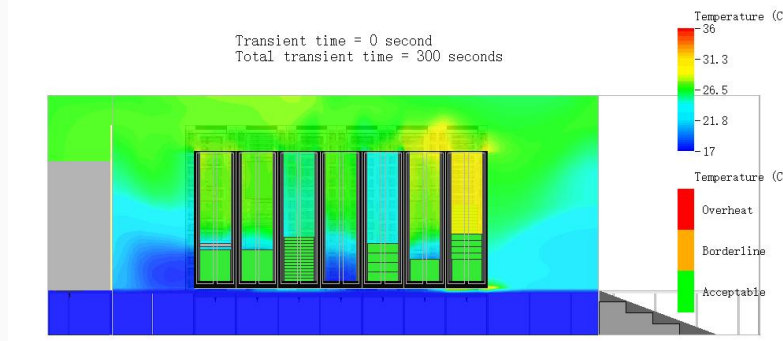
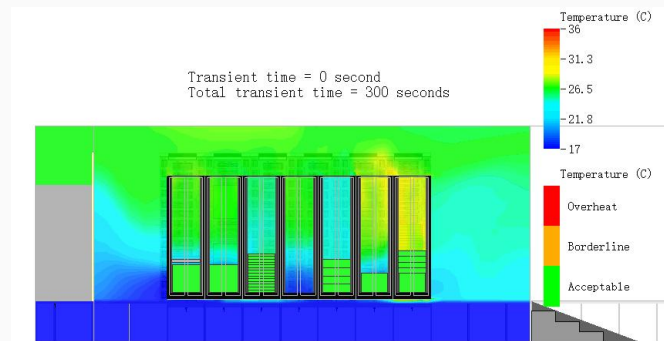
- a) 冷通道达到允许最高温度值的时间。
- b) 热通道达到允许最高温度值的时间。
- c) 冷通道温度最高点位置。
- d) 热通道温度最高点位置。
- e) 机柜最大值和平均值温度随时间变化的曲线。

7.5.3 宜采用专业软件呈现数值模拟结果，分析模拟对象的温度场、速度场、压力场云图、气流流线图及速度矢量图随时间的变化趋势。

7.5.4 应通过计算数据呈现服务器变功率和N个冷却单元转换期间，机架入口的峰值温度变化趋势，分析瞬态条件下空调设备的冷却性能是否满足电子信息设备冷却需求。

7.5.5 应通过计算数据分析服务器变功率、冷源失效和末端风机失效时，数据中心局部热环境、机房内整体热环境随时间的变化趋势，预测局部热点产生位置，确认最佳应急处理时长，提出空调运行策略优化建议。

7.5.6 宜从设备安全、性能稳定性和可靠性等角度评估极端情况对数据中心热环境的影响。



附录A 数据中心热环境数值模拟报告模板

T/CA 306—2023

附录 A 数据中心热环境数值模拟报告模板

1 分析对象及项目介绍

介绍项目的背景、场景要求及仿真目的等信息。

2 建模要求

2.1 仿真软件介绍

2.2 模型概述

介绍模拟对象及相关输入条件来源。

2.3 计算域

定义仿真域的 CAD 图纸和 3D 模型信息。

2.4 模拟工况

可采用表格等形式列出本报告仿真的场景及输入条件。

2.5 模型假设和参数，见表 1。

表 1 数据中心热环境数值模拟报告模型假设及参数

对象	描述
CFD 软件	软件名称和版本
数据中心机房细节	
位置	机房名字、位置等
尺寸	长×高×宽
高架地板高度 (m)	
吊顶高度 (m)	
送风形式	
当地气象参数	
干球温度 (°C)	
湿球温度 (°C)	
主导风向	
太阳辐射强度 (W/m ²)	

15

T/CA 306—2023

表 1 数据中心热环境数值模拟报告模型假设及参数 (续)

对象	描述
机柜信息	
机柜型号	
机柜尺寸	
机柜前后门开孔率 (%)	
机柜数量	
风量需求	
每个机柜的热耗分布	可单独详细介绍
地板漏风板	
尺寸 (m*m)	
开孔率 (%)	
结构介绍 (厚度)	
高架地板下方和上方不同障碍物	
照明散热量 (kW)	
母线槽散热量 (kW)	
槽道热负荷 (kW)	
开关热负荷 (kW)	
地板缝隙 (mm)	
冷通道缝隙 (mm)	

2.5.1 房间尺寸和布局

- 结构柱、活动地板下的障碍物、活动地板上的障碍物均包含在内。
- 灯：计算时应考虑热负荷。
- CRAH 装置：位置符合图纸，容量应考虑符合提供的技术数据表。
- 地板缝隙已纳入模型，地板周边的典型间隙宽度。
- 冷通道隔断起点和终点的门泄漏宽度。

2.5.2 边界条件

- 外墙：外墙被定义为考虑环境热负荷的热边界条件。
- 隔墙：隔墙被定义为考虑环境热负荷的热边界条件。
- 楼板和屋面板：可设置为绝热边界条件。
- 设备/装置边界条件：可根据实际情况设置。

16

T/CA 306—2023

2.6 空调末端性能参数，见表 2。

表 2 数据中心热环境数值模拟空调末端性能参数

描述	类型 1
数量	
型号	
功率输入	
供水温度 (°C)	
出水温度 (°C)	
回风参数 (温度、湿度)	
性能参数	
空调末端	
总冷却能力 (kW)	
净量冷量 (kW)	
额定输入功率 (kW)	
最大输入功率 (kW)	
最大工作电流 (A)	
水流量 (m ³ /h)	
水侧压降 (kPa)	
尺寸 (W×D×H)	
数量	
室内风机性能参数	
空气流量 (CMH)	
风量数量	
机外余压 (Pa)	
加湿器性能参数	
加湿能力 (kg/h)	

2.7 机柜和 IT 设备

2.7.1 采用图的方式列出机柜功率分布图

2.7.2 机柜结构示意图

17

附录A 数据中心热环境数值模拟报告模板

T/CA 306—2023

2.7.3 通风地板开孔率分布图

2.8 电源和 IT 电缆桥架、线槽

2.9 冷冻水供回水管道、阀门和挡水板

2.9.1 空调风管和排气管

2.9.2 泵水箱和照明设备

2.9.3 高架地板底座

2.9.4 SLA 传感器位置

2.9.5 最终模型视图

数据中心的建筑结构、包折梁、柱、墙。

3 网格划分

3.1 模型网格

网格总数，X、Y、Z 方向的网格数量，网格加密示意图。

3.2 网格无关性验证

4 求解过程

4.1 初始条件

4.2 计算参数设置

4.3 收敛过程

4.4 可靠性验证

5 分析评价

5.1 场景 1：稳态模拟

5.1.1 IT 机柜过热结果

5.1.2 SLA 传感器的详细仿真结果

5.1.3 不同列机柜的入口/出口温度

5.1.4 机柜的详细模拟结果

5.1.5 空调末端结果

T/CA 306—2023

5.1.6 空调末端的详细模拟结果

5.1.7 不同位置的温度图

5.1.8 不同位置的压力图

5.1.9 不同位置的速度图

5.1.10 送风地板结果

5.1.11 送风地板的详细模拟结果

5.1.12 数据中心内的流线图

5.2 场景 2：瞬态模拟

5.2.1 冷通道 SLA 传感器和机柜瞬态模拟曲线

5.2.2 第 0 秒、X 秒时的 SLA 传感器温度

5.2.3 机柜入口温度变化曲线

5.2.4 机架在第 0 秒、X 秒时的入口温度

5.2.5 机柜出口温度变化曲线

5.2.6 空调末端瞬态模拟曲线

6 总结和建议

6.1 模拟结果与实际测量数据的对比

6.2 对温度场、速度场、压力场的分析

6.3 相关评价指标计算

6.4 问题识别及改进措施

附录B 数据中心热环境评价常用指标

机柜循环指数

$$MCRI = \frac{V_{rack-return}}{V_{rack-all}}$$

机柜冷却系数

$$RCI_{HI} = [1 - \frac{\sum(T_X - T_{max-rec})_{T_X > T_{max-rec}}}{(T_{max-all} - T_{max-rec}) \times N}] \times 100\%$$

$$RCI_{LO} = [1 - \frac{\sum(T_{min-rec} - T_X)_{T_X < T_{min-rec}}}{(T_{min-rec} - T_{min-all}) \times N}] \times 100\%$$

供热指数

$$SHI = \frac{T_{in} - T_S}{T_{out} - T_S}$$

掺混系数

$$IOM = \frac{T_{in, max} - T_{in, min}}{T_{out} - T_{in}}$$

回风温度指数

$$RTI = \frac{T_r - T_s}{\Delta T_{equip}}$$

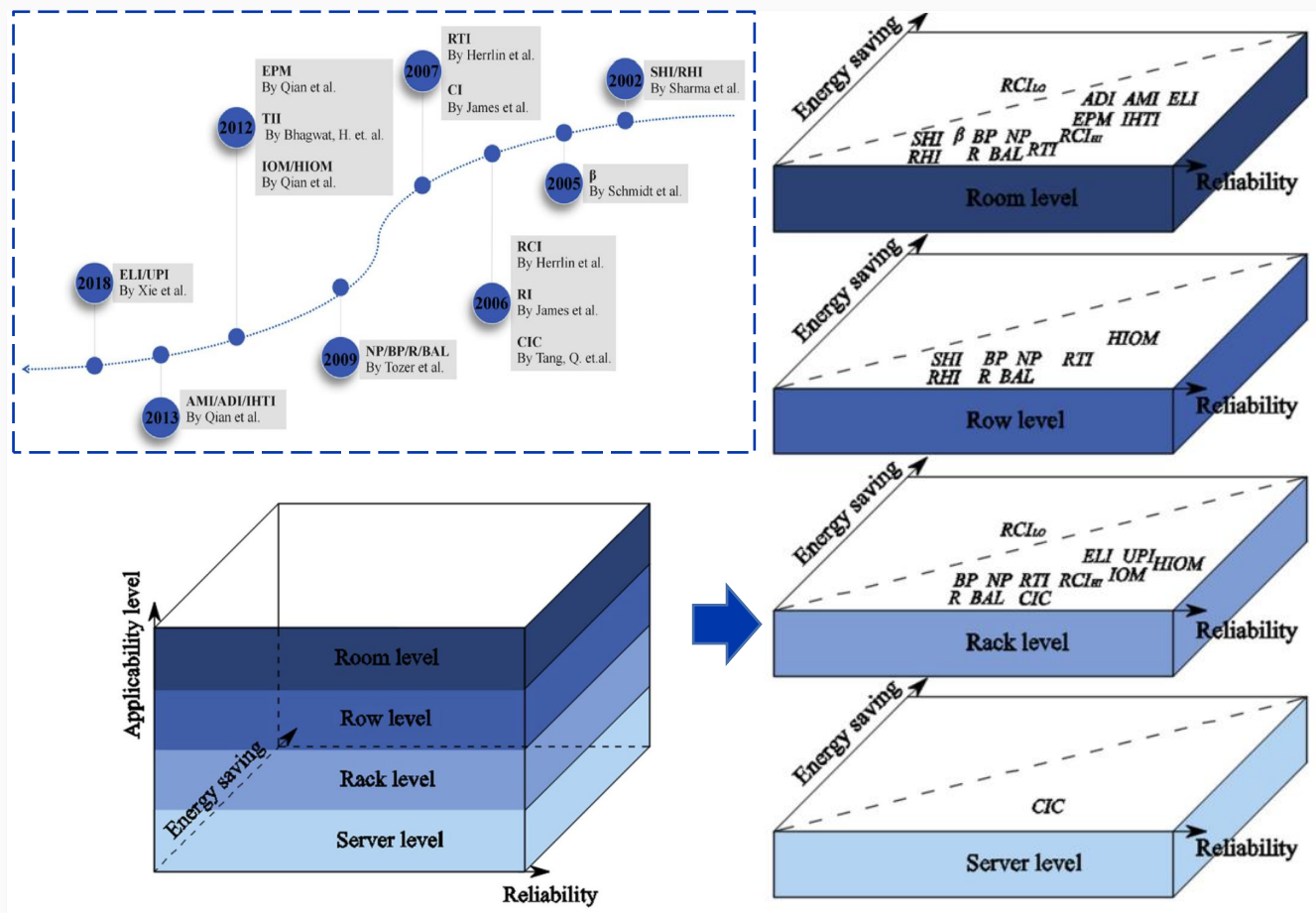
回热指数

$$RHI = \frac{T_{out} - T_{in}}{T_{out} - T_S}$$

空气混合指数

$$AMI = \frac{R_{sys} - R_{nm}}{R_{sys}}$$

还有诸如：空气分布指数ADI、单位比例指数UPI、热加权混合指数HIOM、综合传热指数IHTI、负压比NP等指标，参考论文。



数据中心热性能多层次评价指标框架^[1]

[1] Gong X, Zhang Z, Gan S, et al. A review on evaluation metrics of thermal performance in data centers[J]. Building and Environment, 2020, 177: 106907.

附录B 数据中心热环境评价常用指标

指标	范围	优点	缺点	基准值
ELI	机房级、机架级	一种显示空气混合引起的火用破坏成分的全局指标度量	宏观评价有限	理想0、良好<0.5、可接受0.5 - 0.8、差>0.8
RTI	机房级、列级、机架级	对循环和旁路的定性和定量描述	缺少服务器热性能评价	循环>100% 旁路<100%
RCI	机房级、机架级	包括允许和推荐温度	忽视热源影响	理想100%、良好≥96%、可接受91%-95%、差≤90%
UPI	机架级	描述每个机架的热环境	缺少对局部点的描述	目标值：0
RHI	房间级、列级	旁通空气宏观评价	局部热工性能缺失	目标值：0 好>0.8
IOM	机架级	评估局部热性能	有限的宏观评估	目标值：0
AMI	房间级	冷热气流混合程度	缺乏具体的优化指导	目标值：0
ADI	房间级	冷气流组织	缺乏具体的优化指导,	理想值：1
UPI	机架级	描述每个机架的热环境	缺少对局部点的描述	目标值：0
HIOM	房间级、列别、机架级	评估整体和局部热性能	缺少对局部点的描述	目标值：0
IHTI	房间级	评价综合换热性能	缺乏具体优化指导	理想值：1

1. 背景及制定原则

2. 细则重点内容解读

3. 展望

数据中心热环境数值模拟细则的**完善**

规范的建立不是一蹴而就的，而是一个逐步发展的过程，我们从数据中心最基本、最有把握的应用场景和内容开始，不断完善。随着数据中心冷却技术的不断发展，必然有更多的场景和数值模拟的内容需要逐步完善。

数据中心热环境数值模拟细则的**修订**

数值模拟细则也不是一成不变的，而是一个不断完善的过程，随着计算机和数值模拟技术的发展，当制定的细则不再适应新的技术要求时，需要找出规范的不足和缺陷，对细则进行修订与完善。



中国通信工业协会数据中心委员会
China Communications Industry Association Data Center Committee

THANKS!