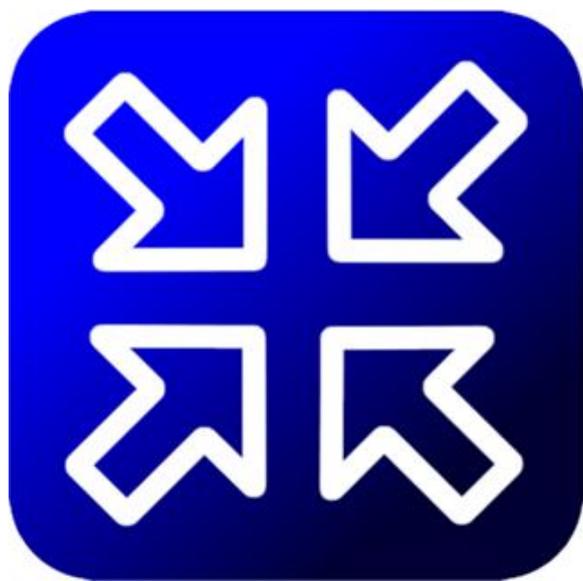


# 什么是有效的数据中心模型

## 校正模型介绍



北京瑞思博创科技有限公司

# 目录

摘要.....	4
介绍.....	4
预测建模 .....	5
为什么要校准? .....	5
校正模型-关键因子 .....	8
建立模型时的艰难决策 .....	8
校准空气送风系统 .....	10
温度测量.....	11
流量测量.....	11
校准.....	12
校准空气输送系统.....	12
高架地板冷却分配系统.....	12
无封闭通道环境中冷却.....	13
封闭通道中的冷却.....	14
校准功率和温度.....	15
审查和修改模型.....	15
结论.....	16

# 什么是有效的数据中心模型？

## 预测建模的校准简介

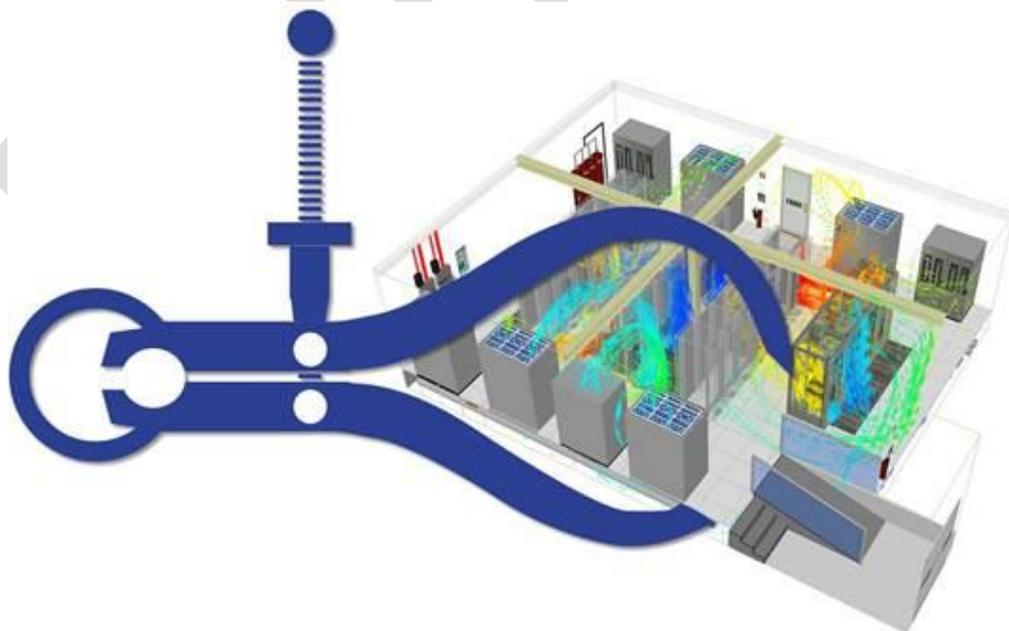
### Future Facilities 的白皮书

FFL-007 修订版 1.0

Mark Seymour 主管

Steve Davies 产品营销经理

“..... 为了避免“垃圾进入垃圾出”并且充分发挥最大化可用性，容量和效率的潜力  
采用系统校准过程至关重要”



## 摘要

本文是为数据中心顾问和业主、运维人员编写的，介绍并概述了使用校准来验证用于预测的数据中心模型的重要性。它突出了一般需要校准的问题，以及创建准确 3D 模型的具体需求。它继续说明为什么，如果没有校准，模拟的结果可能会非常令人误解。最后，它为建模和校准数据中心的送风，气流分布，功率和温度等参数提供了具体指导。

## 介绍

文档介绍了**校准**的必要性，使用仿真（图 1）进行故障排除，使用预测建模对数据中心白色空间—主机房进行运维管理。

在这种情况下，**预测建模**侧重于使用计算流体动力学（CFD）的气流模拟来平衡可用性，物理容量和效率（ACE）。它通过分析向 IT 设备输送的冷却气流，使用户能够以降低每千瓦 IT 成本的方式实现最佳 ACE 平衡的配置。

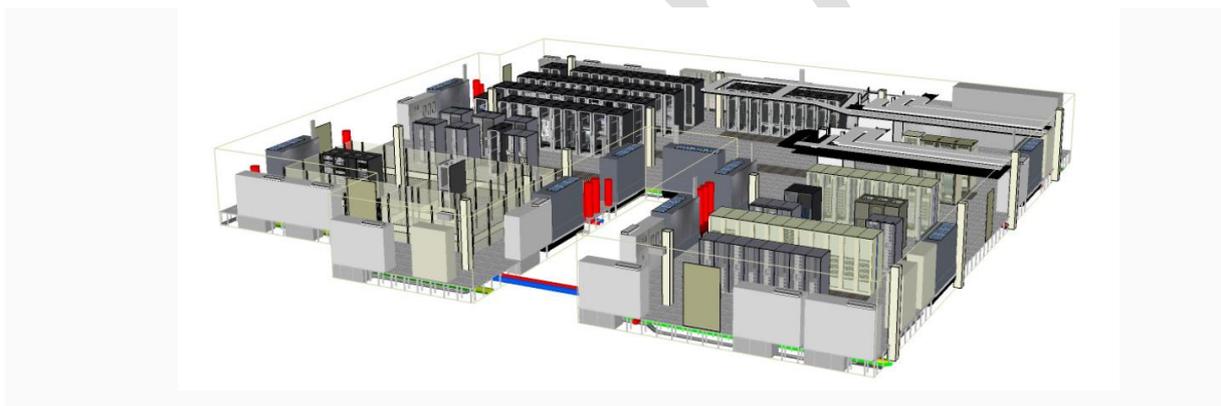


图 1 运营数据中心的示例虚拟设施模型。此完整 3D 模型表示的细节和准确性将直接影响其生成结果的质量。类似这样的模型构成了全球许多领先的数据中心，为业主，运营商的运营决策提供核心帮助

本文档由一系列补充文本提供支持，这些文本深入探讨下面涵盖的主题，提供更多细节，为读者提供更高水平的理解，包括如下方面：

- 测量白色空间中的气流和温度
- 当校准白色空间时确认需要改善模型的什么地方
- 处理白色空间模拟和真实机房之间的差异
- 校准穿孔地板/地板格栅模型
- 关注 IT 机架/机柜建模的关键要素

## 技术术语

### 校准

使用测量数据检查模型判断其是否反映了现实情况以及需要做的任何必要的模型细化

# 预测建模

本文并不是为预测建模提供指导，但为了完整起见，还包括对其用于数据中心“白色空间”的简短描述 - IT 设备所在的房间。

预测建模是一个通用术语，它描述了使用计算机生成的模型来预测系统的行为。对于空白区域，模型通常是单个房间，但有一些明显的例外：

- 有冷却系统的服务通道，并且这些服务通道也构成返回和/或供应气流的一部分
- 与白色空间相邻的空间共享冷却系统的，或者有共用的供气或回气腔体。

在这种情况下，如果计算机资源允许，最好将想连接的空间包含在单个模型中。在相邻空间断开连接的情况下，最好创建单独的模型，以便只对一个空间进行更改时可以独立运行计算。

预测建模可以包括对任何关键容量相关要素的未来预测：**空间，电力，冷却和网络**是主要元素。由于冷却是最复杂的因素，因此它是校准和本文的主题。

对于冷却，预测建模采用计算流体动力学（CFD）的形式来预测整个机房的气流和热量传递。由此可以预测对于选定位置的冷却的可用性，或者实际上现在或将来在某个位置处可能存在的 IT 设备进行评估。

## 为什么要校准？

数据中心是非常复杂的空间，运营数据中心从本质上背离了设计。在设计过程中，空间被假定为具有名义均匀负载。这个假设是在没有考虑真正的 IT 设备部署和它们相关的布线等的情况下做出的。细节（如果包含完整的话）几乎肯定会使 CFD 模型难以处理，因此对商业目的而言是无用的。

关键是尽可能简单地模拟白色空间。这一责任不仅取决于用户（和 CFD 软件供应商的模型库）做出适当的假设，还取决于他们进行尽职调查，以确定该模型实际上是实际机房部署的表述。

*“关键是尽可能简单地模拟白色空间.....并检查该模型具有代表性”*

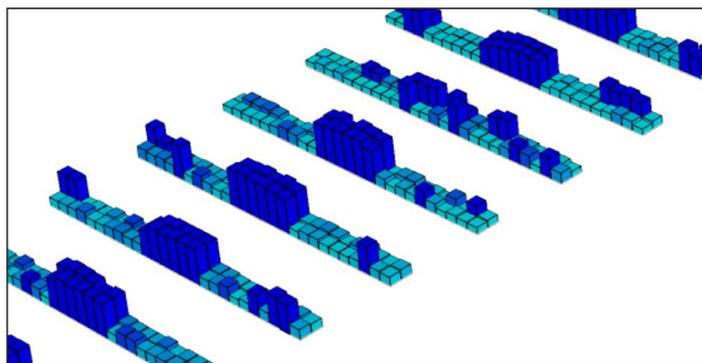


图 2 实测穿孔地板流量

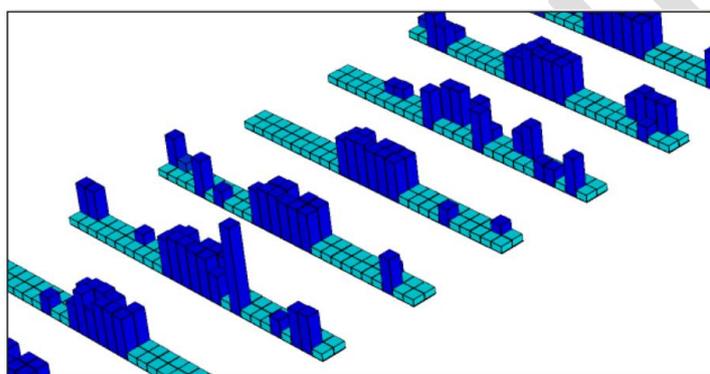


图 3 模拟穿孔地板流量

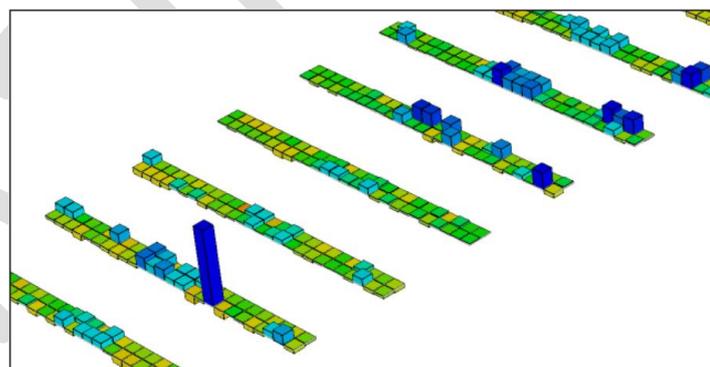


图 4 实测与模拟差值

在设计阶段，无法进行实际测量的情况下，用户必须按照最佳做法进行假设。他们同时从客户那里收集尽可能多的关于他们如何使用空间的信息 - 典型的 IT 设备类型和概念布局，运维经验等。

在操作中，这种尽职调查必须基于对实际部署的审查和测量。为什么？由于设备部署和设计中使用的许多假设并未在现实中得到反映，而且很多元素难以符合要求。例如，

测量穿过穿孔地板的流量（图 2），并将其与模拟值进行比较（图 3）。蓝色代表良好的向上冷却气流，红色表示向下流动。

首先看到图 2 和图 3，它们看起来非常相似。对于未经训练的眼睛来说，表示穿过每个多孔砖的气流的大小的颜色和柱状图的高度可能看起来非常相似。但可以通过绘制差异能够更仔细的查看，如图 4 所示。

现在可以清楚地看到图 4 所示的差异。理想情况下，我们希望所有的差异都在 $\pm 10\%$ 的范围内，这意味着所有格栅都是绿色的。相反，我们可以看到有一些明显的例外，特别是一个大的过度预测。但也有一些系统性差异，沿着中心线的较高流量为过度预测，这是两侧空调的相对流动撞到一起引起的，以及一些空调附近的穿孔板出风量预测不足。

系统误差可能是由于更系统的建模误差（例如低估了穿孔地板流阻或低估了一般布线阻力）。对于局部误差，我们需要查找错误建模的特征（例如不正确的风门设置）或丢失特征（例如地板下阻塞）。



图 5 用于设计的通用服务器机柜与运行期间更典型的设备配置。在最左侧的机柜中是均匀布置的服务器（如设计期间所预期的那样）。右侧的机柜都配备了各种各样的设备-设计期间没有预料到的设备，并且极大地影响了气流和冷却要求

这个简单的例子中可以看到设计与实际部署设备的挑战。设计中使用统一的设备部署，实际上它可能有所不同，如图 5 所示。

用于设计模拟的机柜安装一般前后通风的服务器（图 5，最左侧的机柜），每机架/机柜提供 4.25kW 的负载。但是，运行数据中心的安装设备因机柜而异（图 5，所有其他机柜）负载也不相同。安装此类设备时散热性能可能会有很大差异，如图 6 所示。

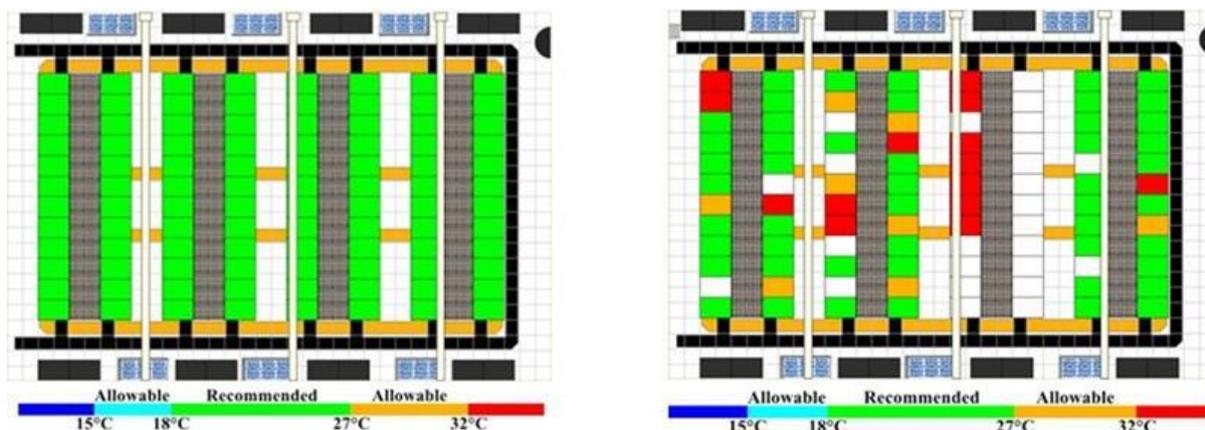


图 6 为包含均匀负载设计（左侧）的白色空间，实际上数据中心会随着时间的推移以不均匀的负载（右侧）填充。对气流的影响是严重的，正如右侧出现红色（过热）和黄色（边缘过热）IT 所示

这种“难以确定”的数据在数据中心的非常普遍，并且这个清单非常可观。它包括风阀设置，电缆穿透开放区域，机柜内泄漏，IT 设备气流等。

如果初始模型未经任何审阅而使用，则结果可能非常容易出错。例如，如果布线被模拟为完全阻塞，而事实上它是开放的，则预测在该附近的流量将完全错误。

但是，经验表明，如果模型基于现有数据中心的调查，则可以使用测量数据来确定模型需要重新更改的位置，这可以使设置得到充分修正，从工程角度获得有用的结果，从而可以做出部署决策。

## 校正模型-关键因子

校准是测量和模型修正的过程。目标是确保模拟结果具有充分的代表性 - 对工程或部署的任何预测决策提供有用的帮助。

为了避免疑惑，模型校正是这样的：修改模型细节以确保模型表示的完整性 - 模拟结果不固定于测量值，这是一些建模者和建模工具已经采用的实践。如果模型是这样的，将结果固定到测量数据用于运营管理，部署或实际改进/升级所需的预测的做法是无用的，因为该模型无法对变化做出响应。

考虑到温度和气流测量的重要性，使用快速读数的工具是有用的，即使只是为了确定更准确的读数。这种工具的一个很好的例子是热成像仪，它提供了一个有用的工具，用于理解温度缺陷以及传感器的放置位置。

## 建立模型时的艰难决策

在创建白色空间模型时，重要的是要考虑设施中的每个元素对于空气输送的影响

。同样重要的是代表白色空间中的热量和气流源，最显著的是 IT 设备。

这提出了相当大的挑战，因为许多功能没有很好的定义。一些障碍物，例如冷却装置下的冷却水管，通常足以显著地表示，图 7。

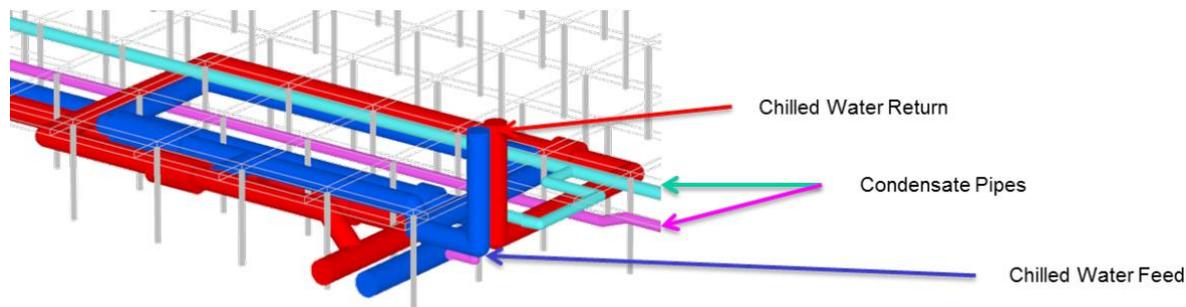


图 7 下送风冷却系统，高架地板下方的冷却管路会阻挡空气流动，需要创建水管对象

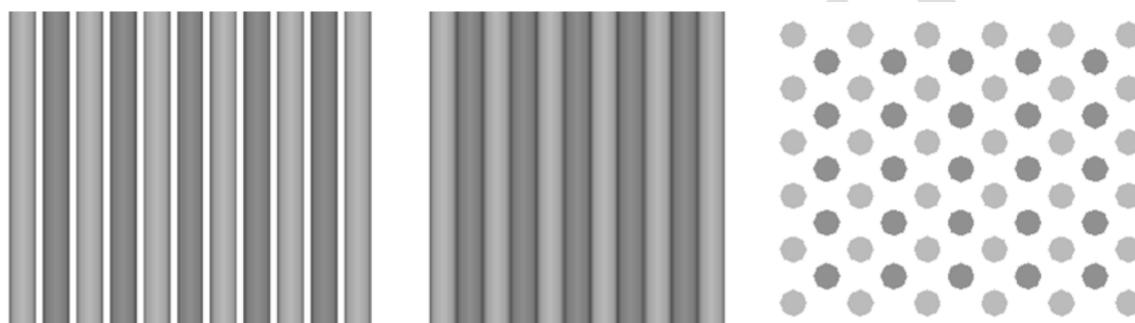


图 8 从侧面（左侧和中间）观察时阻碍气流的电缆经常在从头部（最右侧）观看时发生阻塞的程度要小得多，

但是，也必须考虑代表潜在障碍物的其他结构。管道，电缆和电缆桥架可以用不同程度的简化表示，或者实际上根本不包括在内。建模决策是具有挑战性的，因为选择不仅取决于障碍物的大小，而且还取决于其相对于气流路径和关键气流的位置。

图 8 显示了电缆的视图可能非常具有误导性。想象一下从上面下来的一组松散的电。如果电缆没有绑定在一起，他们没有理由形成紧密的分组。建模者需要描述电缆之间的电缆阻塞是如何定义的。然而，从侧面来看，阻塞的程度是非常令人误解的。

另一个类似的挑战是确定哪些缝隙是显著的，以及它们是否应明确包括，表示为多孔表面，还是根本不表示？缝隙可能发生在许多地方，但其所在位置和大小很关键。例如，分离气流的对象中的缝隙一定要考虑。重要表面的例子是高架地板，封闭通道，以及连接机柜前门和后门的缝隙。

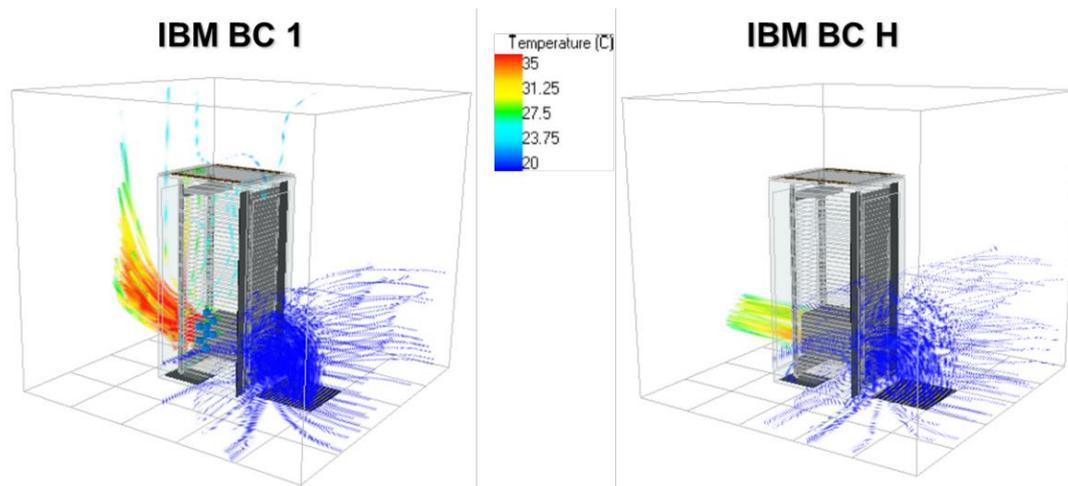


图 9 显示了两个不同的刀片服务器模型，它们使用相同的处理器，运行相同的工作负载，但采用不同的冷却策略，即使用不同的气流。

最后，但绝不是最不重要的，往往难以确定空间中的设备特性，包括基础设施和 IT。对于数据中心的总体设计，需要非常简化的数据：最大散热量或制冷量，标称气流和总体几何尺寸通常就足够了。这些可能与运营中取得的值存在显著差异。图 9 显示了两个不同的刀片服务器模型，它们使用相同的处理器，运行相同的工作负载，但采用不同的冷却策略，即使用不同的气流。

考虑到所有这些不确定性，重要的是要了解构建模型时的潜在不确定性，然后使用测量数据来帮助确定适当的设置。

以下高级概述描述了校准某些关键对象的基础。当然，校准必须考虑总体情况以及校准的各个对象，但这些准则旨在提供一个良好的起点。

## 校准空气送风系统

空调冷却系统很难建模，很大程度上是因为有关它们的已知信息非常有限。这是由于两个主要原因：

制造商提供的数据仅限于几何信息，也限于通过标准方法测试的性能数据，其中不包括模拟中需要的重要的建模细节（例如送风特性）

运行中的性能受安装和运行期间的选择/设置影响，更不用说冷却设备所处的环境影响。

因此，实际性能需要通过现场测量来确定。测量主要限于空气体积流量和送回风温度。

## 温度测量

很容易想象，单次测量可以获得回风温度。但实际情况并非如此：在典型的下送风空调中，温度可能会有很大差异，通常高达 5°C 或更高，如图 10 所示。因此，重要的是在周围和面上多次读取。

在送风侧中测量温度通常更直接。如果回风温度相对均匀，送风侧中的单次测量就足够了。如果有多个送风口并且回风温度存在显著变化，则每个送风口的单次测量也可以识别温度变化。

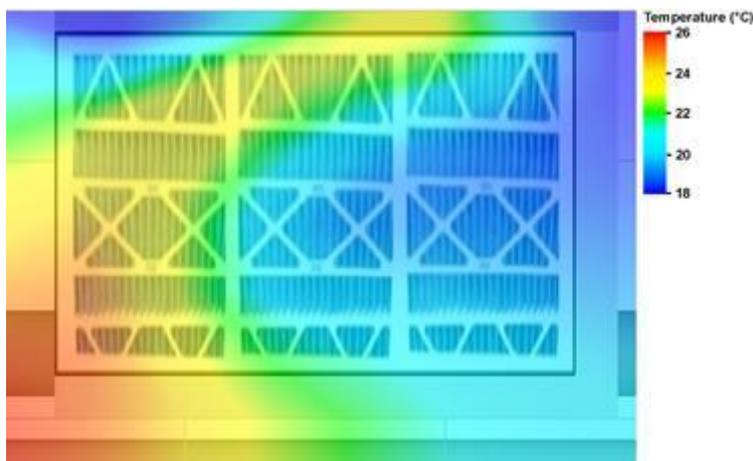


图 10 下送风空调回风过滤器处的典型温度分布。在这种情况下，温度范围从 18 C 到 26 C

## 流量测量

流量测量更具挑战性。

靠近空调送风口空气流速快且湍流强度大，这使得通过测量送风速度来估计流量几乎是不可能的。

另一种方法是测量回风口的流量。如果空调有连接回风管，则需要根据 ASHRAE 提供的方法测量。

如果没有连接回风管，则要特别注意，让测量设备尽可能靠近回风口。这一点很重要，因为吸力会将空气从任何方向吸过来。因此，在周边附近有非常强的交叉速度分量，如果包含这些分量，将会导致气流显著高估。

使用叶片式风速计有助于避免测量这些速度的非垂直分量，但如果风速仪离回风口有任何显著的距离，它几乎肯定会导致侧量的速度偏低。这是因为非垂直流动将简单地绕过叶片并进入回风口。

## 校准

鉴于对流量和温度的良好理解，现在可以开始校准。流量数据和温度值可用于进行适当的设置和/或检查和调整控制。

如果风量固定，则使用测得的风量重置冷却单元的固定流量。如果控制了空气流量，则检查控制器是否达到测量的流量。如果没有，请检查传感器的位置以及传感器是否位于正确的位置，并检查模型以确定该位置的传感变量是否存在显著的梯度。如果没有梯度，则必须确定预测不良的原因。如果存在梯度，传感器位置可能需要略微移动才能达到实测中的读数。

不要忽视这样一个事实，不仅仅是流量，还包括流量分配 - 检查冷却装置送风/送风不同方向上的流速。这在使用局部冷却的冷却系统中很重要，例如列间系统以及周边冷却系统。由于送风气流测量的挑战性，通过使用轻量级拖缆观察方向，以确定测得的风量分布。

*“不要忽视这个事实，不仅是流量，还包括气流分布”*

基于温度的校准是相似的。如果控制器设计为固定的送风温度时，则：

- 检查冷却装置是否有任何原因无法达到设定值
- 如果是这样，请确定模型中包含的限制导致达到极限的物理特性
- 如果没有，调整控制温度以反映实际的控制行为。

如果制冷单元控制回风温度，则考虑上述情况，但也要注意模型中传感器的位置是否为真实传感器的位置，可以根据温度梯度做适当调整。

如果控制器对空白区域内的温度进行测量，则要记住检查局部梯度并调整传感器位置或检查总体预测质量，并根据需要改进模型。

## 校准空气输送系统

空气输送系统的校准通常非常重要 - 如果冷空气分配和热空气移除没有很好地模拟，那么模拟可能根本没用。

校准的关键方面是：

### 高架地板冷却分配系统

- 检查地板下的堵塞物
- 确保穿孔地砖（以及系统中的任何阻尼）具有良好的模型，

- 检查穿过活动地板的空气泄漏路径，例如电缆穿孔。

由于难以建立定量特征，通常会出现差异。例如，上述项目都难以量化 - 如电缆等地板下的阻塞因其潜在的非结构性问题而未得到很好的界定；打开和关闭之类的因素，如阻尼设置可以不断变化；以及电缆穿透堵塞通常来自松散的电缆或密封材料（如密封刷），使开放区域非常难以确定。

确定哪里出现错误的最佳指标是测量通过活动地砖的气流。这并不像看起来那么直截了当。考虑到企业数据中心中的穿孔地板大量存在，活动地板通风道的大体开放特性以及与高流量多孔地板相关的低阻力/压降，将测量设备放置在高起地板上会显著影响流动。

最常见的流量测量方法是使用图 11 所示的流量罩，该流量罩具有背压补偿功能，用于测量管道系统上的空气终端的气流。但是，即使是带有背压补偿的流量罩，也会显著低估穿孔地板气流，需要采用特殊技术。



图 11 数据中心冷空气通道中使用的流量罩用于穿孔地板气流测量。

使用风速计测量穿孔地板表面的速度阵列可能不会影响空气流量。然而，很难整合测量值以获得速度分布非常不均匀的穿孔地板上的总流量。

一旦知道穿孔地板气流的差异，就可以审查不同的风路的影响，以了解导致不准确的地方。

## 无封闭通道环境中冷却

冷却系统显然被设计用于提供冷气流的，在没有封闭通道系统的情况下，这些冷气流会与环境空气混合。对于来自多孔地板的气流也是如此。

因此重要的是要确保气流流动特征正确。来流，方向和相关的动量尤为重要。

在创建模型时，通过与测试数据进行比较来确保这些元素非常重要。在整个房间模型中，测量温度通常是一个关键指标。例如，在选定地板砖上方的垂直线上进行一系列测量，以确定空气射流是否垂直穿透。渗透的极限通常会由一个剧烈的温度梯度来表示，这个梯度在模型中也应该是可见的。

同样，在列间冷却装置送风口的前方垂直向上检查，看看是否以从机柜顶部将热空气吸入冷通道，以及多远的距离。

同样地，可以在该行的最后几个机柜前面的行的末端水平地进行测量，以确定是否存在再循环，并且如果是，确定从通道的末端渗透多远。

## 封闭通道中的冷却

在一个封闭的通道中，挑战有所不同。IT 设备不易受大面积再循环和混合的影响，但仍然可以发生。

当 IT 排风系统发生再循环时，由于它经常是耦合的，再循环的空气更加温暖并且可能更危险。但是，它通常会影响到更少的 IT 设备，如图 12 所示。

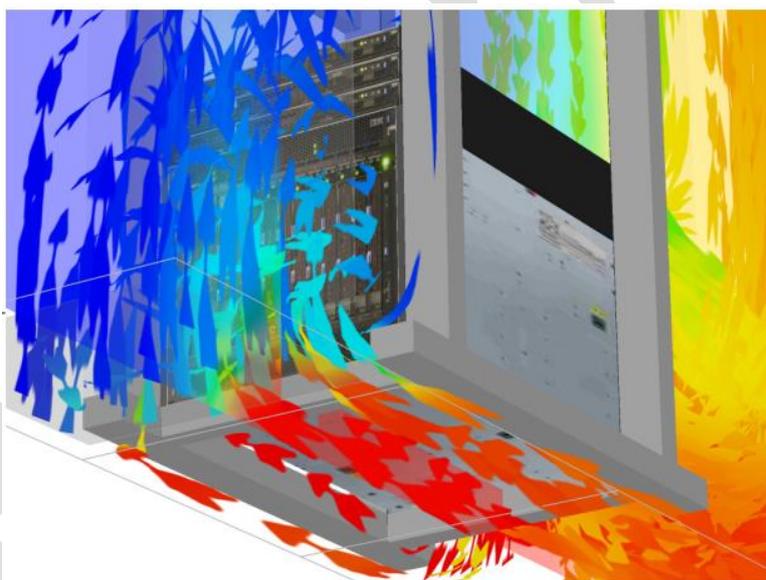


图 12 机柜底部插槽安装的 IT 设备热空气回流图。

再循环主要由四个因素决定：

1. 空气被送到冷通道的方式和位置，封闭通道缝隙处或者机柜周围的速度（特别是在服务器的入口附近）
2. 与 IT 需求流量相比，送到冷通道的空气量是多少以及封闭通道内增加的静压
3. 封闭通道系统和机柜的构造，以及管理泄漏和再循环方式

#### 4. 控制策略及其如何适应变化的环境

测量和校准空气的输送方式与之前描述的没有什么不同。然而，现在了解热通道和冷通道的相对增压以及泄漏路径是非常重要的。如果模型要准确，确保测量压差和模型匹配非常重要。

仔细检查封闭通道和机柜结构的间隙。请务必检查 IT 设备设置流量随 IT 前后的压差而变化，以便他们可以根据情况调整相应的变化。如果对任何 IT 设备模型有疑问，检查 IT 流量的相对简单的方法是测量设备的入口和出口温度，在计算流量。

## 校准功率和温度

你会开始意识到这些测量和校准过程是强相互关联的。

创建一个好模型的核心是了解使用了多少电力，以及在什么位置散发了多少热量。鉴于现代电力监控，可以很容易地检测服务器上的功率。事实上，基于 IP 的管理会在适当的时候为每台服务器提供数据。如果您正在对旧设施进行建模，那么您可能只有 PDU 的功率数据，或者更糟糕的是，在机房级别的电力数据。

无论情况如何，首先要确保 IT 设备的功率与总功率相同。IT 功率越接近测量值，机房模型中热负荷分布越好。

假设功率分布良好，温度是最容易测量的值，为了模型的准确度，也就知道最需要校正模型的哪些地方。

通常，通过查看已经讨论过的项目来实现校准。但是，如果电力分配存在问题并且电力电缆不能被夹紧，那么测量 IT 设备入口和出口空气温度和速度，校正功率设置的有效性。

测量速度可用于估计流量，但在将其转换为流量时需要进行工程判断。已经使用诸如流量罩之类的工具测量了空气流量，但显然这是一项专业任务，因为这种设备不是为此目的而设计的。

*“..... 首先要确保通过设备功率来确保您拥有合适的总功率.....”*

## 审查和修改模型

如果所有测量数据都可用，则可以使用它来帮助确定任何差异的原因，然后相应地更新模型。

例如：

1. 如果来自周边送风空调的流量已被确认，并且.....

2. 模型中的一个空白区域的流速比测量的高，并且...
3. 模型中的另一个空白区域比测量的流速低，然后.....

应该调查一些典型的可能原因：

1. 主要电缆线路的影响评估不准确或实际上被忽视？
2. 在一个区域与另一个区域相比，是否有不同的地板出风口布局策略？也许阻尼的使用方式不同，或者实际上使用的地板出风口类型不止一种，并且这些地板出风口类型没有正确包含在内？
3. 对于不同区域的线缆穿孔管理是否有不同的策略？并且这种影响在模型中得到了解决吗？

这只是一个通常校正过程的例子。面临的问题可能需要具体问题具体分析，比如只有一两个机柜受到影响，在这种情况下，请重新检查柜体结构和 IT 配置，并考虑已经描述过的空气输送模式差异的可能性。

## 结论

讨论了校准的一般方法，并表明如果不进行校准，模拟结果可能会非常具有误导性。

现在很清楚，复杂设施建模仿真的通用流程 1) 建模，2) 校准，确保该模型充分代表所分析的机房。

虽然基础设施非常复杂，但可以单独评估许多单个元素，从而可以诊断初始模型不能充分代表设施的原因（通常不会！）。

鉴于对建立高质量 CFD 预测建模所面临的挑战的这种理解，考虑到通过精确的模型获得的潜在收益，关键是要采用系统校准过程，避免“垃圾进垃圾出”，最大化的挖掘出可用性，容量和效率的潜力。