

基于仿真的不确定性分析 在空调风系统调适中的应用初探

潘毅群

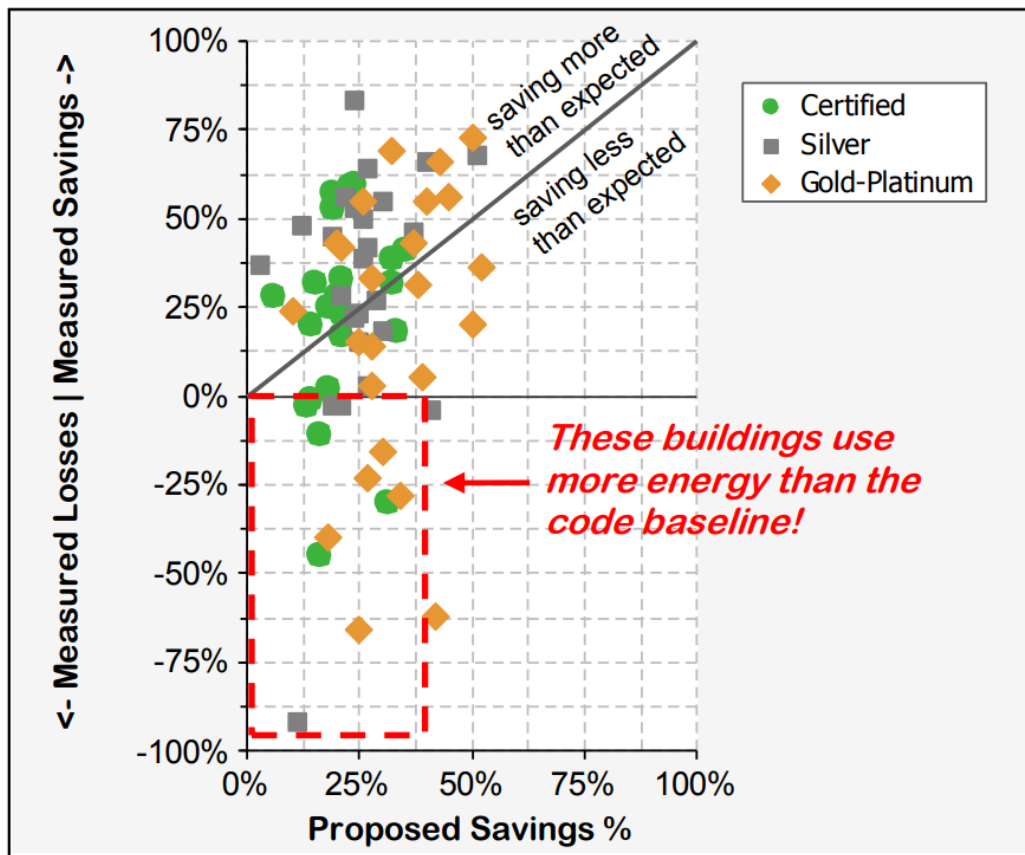
2018.03.30

主要内容

- 课题背景
- 技术问题
- 研究方法
- 案例分析
- 结论总结



课题背景



Cathy Turner, Mark Frankel. Final Report of Energy Performance of LEED for New Construction Buildings. 2008



LEED BD+C: New Construction | v4 - LEED v4

Enhanced commissioning

Possible 6 points

Option 1. Enhanced systems commissioning (3-4 points)

- Path 1: Enhanced commissioning (3 points) or
- Path 2: Enhanced and monitoring-based commissioning (4 points)

And/Or

Option 2. Envelope commissioning (2 points)

课题背景

- 调适 (Commissioning)

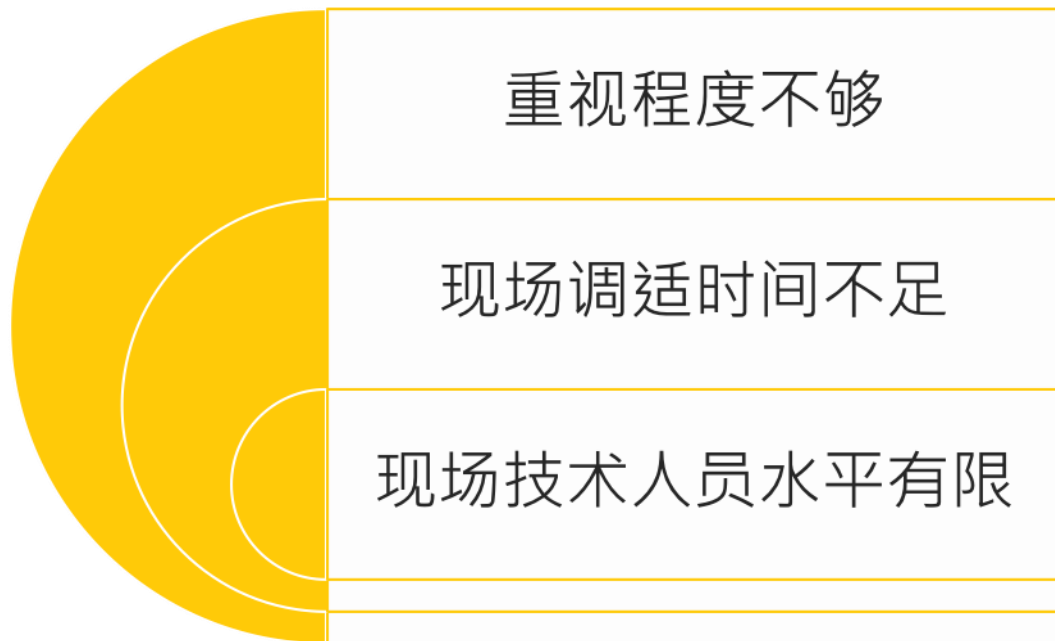
“一种使得建筑各个系统在方案设计、图纸设计、安装、单机试运转、性能测试、运行和维护的整个过程中确保能够实现设计意图和满足业主的使用要求的工作程序和方法”

-----ASHRAE Guideline 1.1-2007

课题背景

• 空调风系统调适现状

- 管道漏风严重
- 风系统风量不平衡
- 压力传感器脏堵故障
- 控制方式或参数选择不合理
- 自控系统接线错误
- ...



课题背景

• 离线仿真  现场操作



• 基于仿真结果调适的可行性

- 仿真软件精度及计算速度的提高

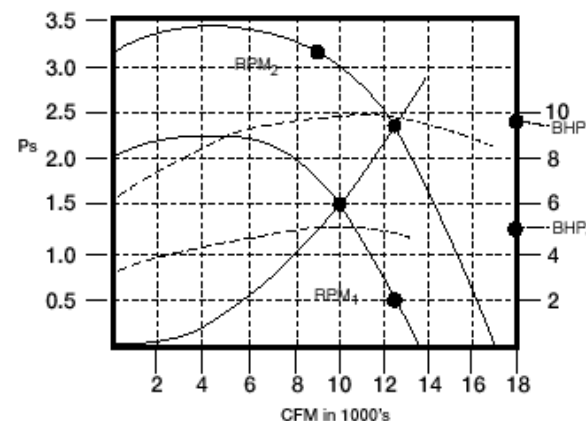
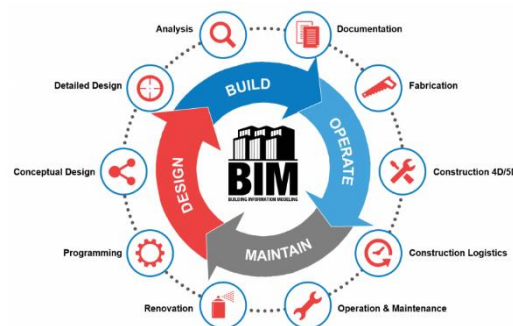
- 模型输入参数可靠性的提升

- 图纸信息与实际现场之间差距的缩小

- BIM

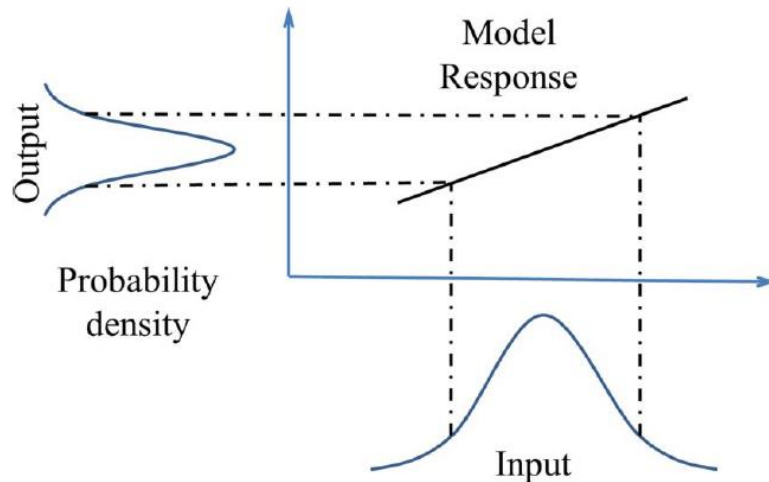
- 装配式建筑

- 产品性能参数可靠性/一致性的提升



课题背景

- 基于仿真结果调适的可行性
 - 不确定性分析
 - 模型输入参数的不确定性



不确定性来源

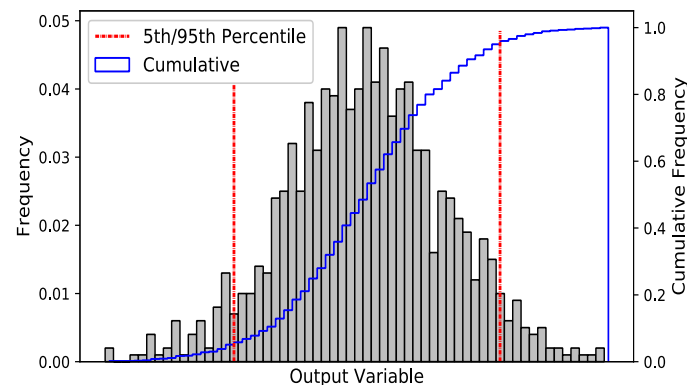
- 量化输入
变量分布

大规模仿真

- 统计抽样
算例设计

不确定性结果

- 解释输出
变量分布



技术问题

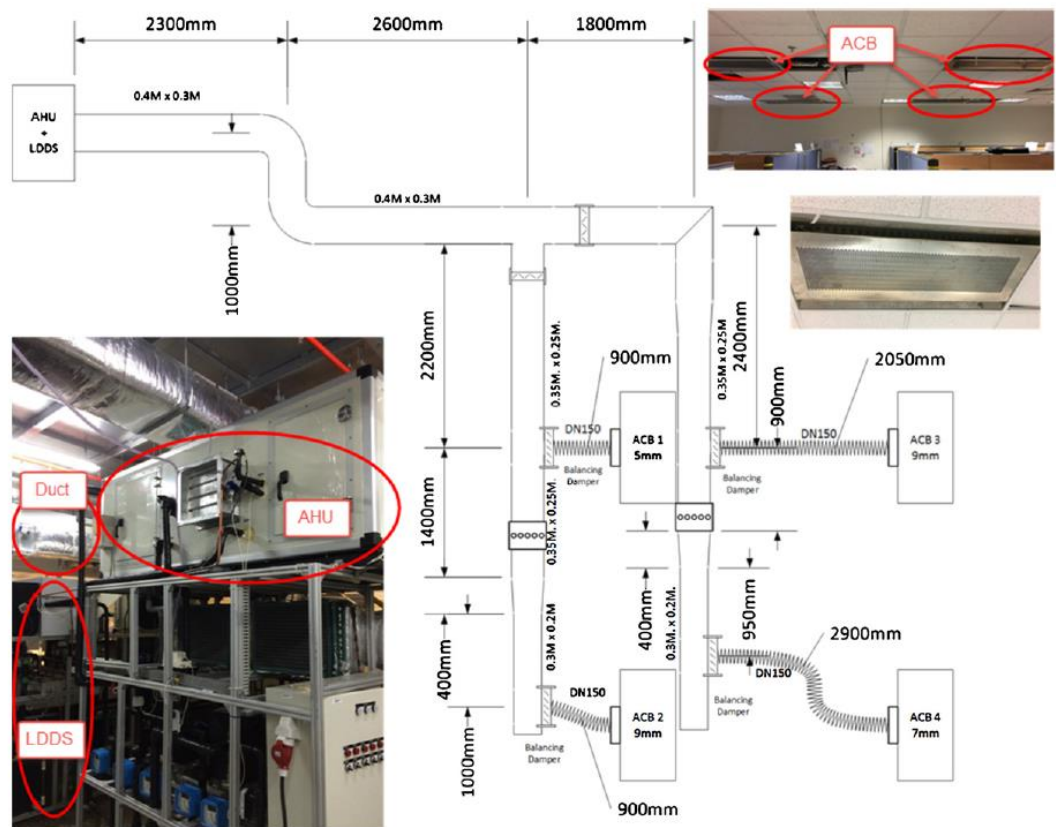
• 基于仿真的空调风系统调适

1. 风机选型校核

- 确保设计系统总风量

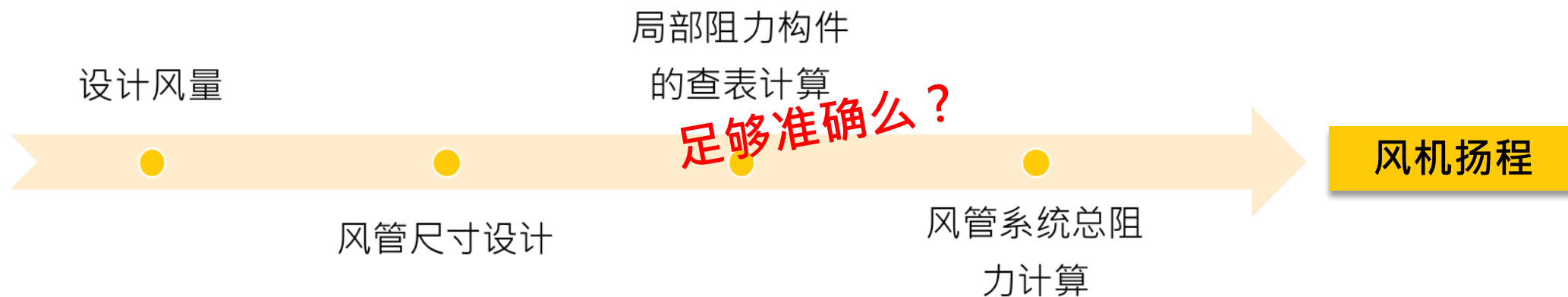
2. 风系统管网调平

- 确保各末端所得风量



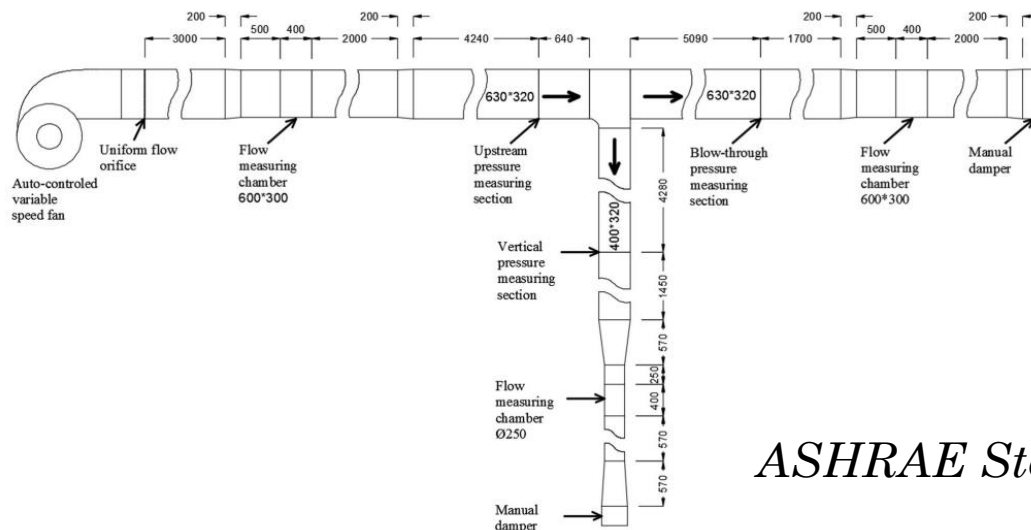
技术问题

- 风机扬程的确定



- 局部阻力查表值的确定

- 孤立的测量
- 实际**近距离连接**的误差
- 局部阻力系数的**不确定性**

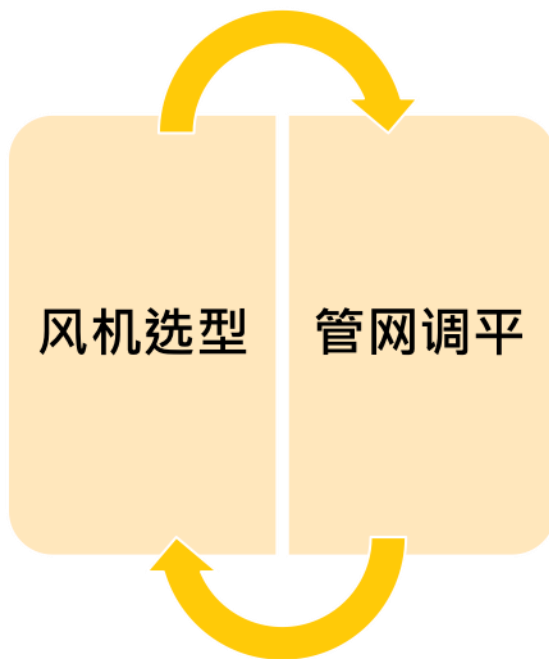


ASHRAE Standard 120

技术问题

- 内在的耦合性

- 暖通设计师完成
- 不合理的风机选型会对后续调平产生不利影响



- 建安/调适团队完成
- 平衡阀的调整会改变风系统总阻力特性，进而改变所需风机扬程

需要一种**统筹的**工作流程来指导风机选型和管网调平

- 充分考虑局部阻力系数的**不确定性**
- **简化并加速**现场的调平工作

仿真调适

研究方法

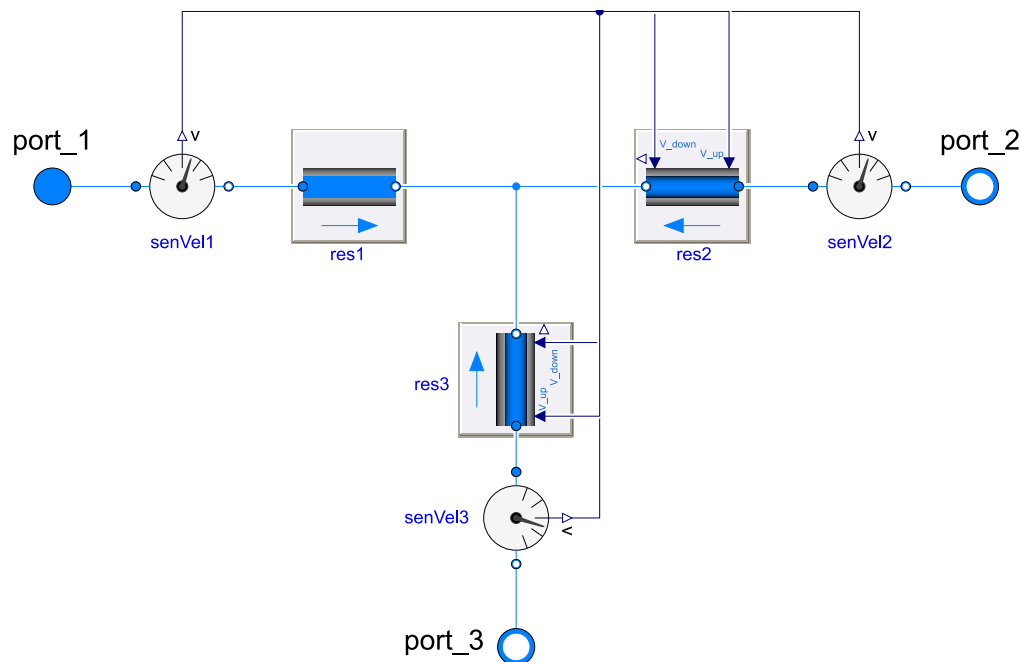
• 离线仿真 → 现场操作

1. 基于Modelica的系统建模与仿真
2. 基于Python脚本的自动调平
3. 不确定性分析
 - 超拉丁方抽样
4. 敏感性分析



研究方法

- 基于Modelica的系统建模与仿真
 - Modelica Buildings Library (LBNL)
 - 变局部阻力系数三通模型的开发



原定值模型: $m = k\sqrt{\Delta P}$



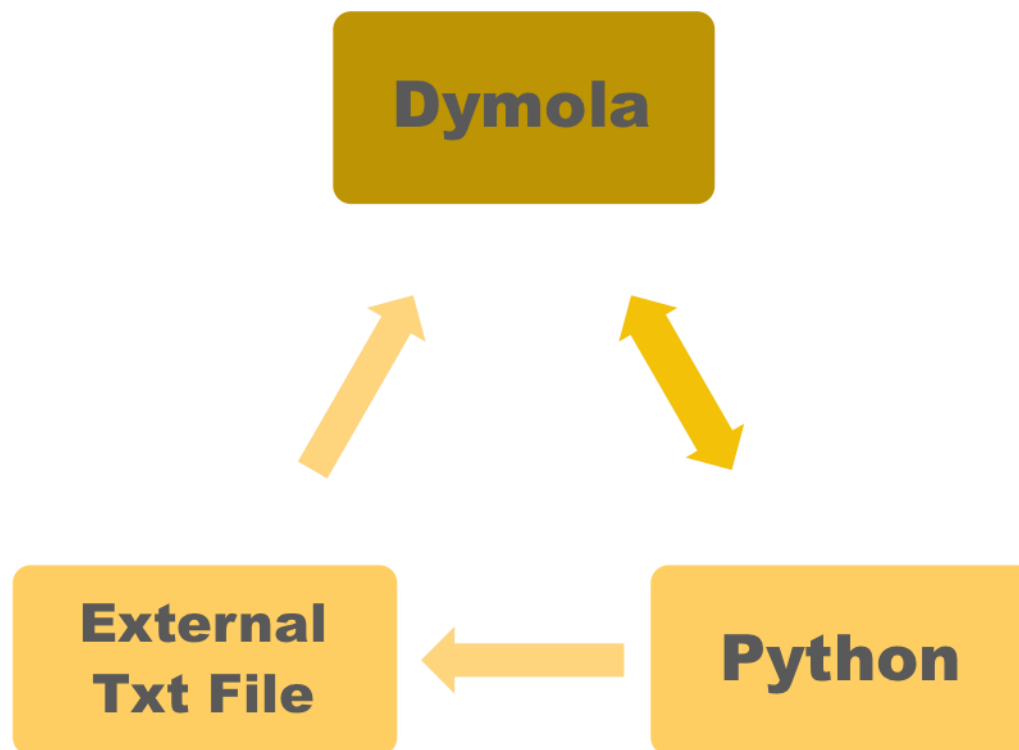
新多项式模型 $R = \frac{V_{downstream}}{V_{upstream}},$

$$PLC = a_0 + a_1 \times R + a_2 \times R^2 + a_3 \times R^3 \dots,$$

$$\Delta P = PLC \times DP_{upstream},$$

研究方法

- 基于Python脚本的自动调平
 - 比例调节法 (Proportional method)



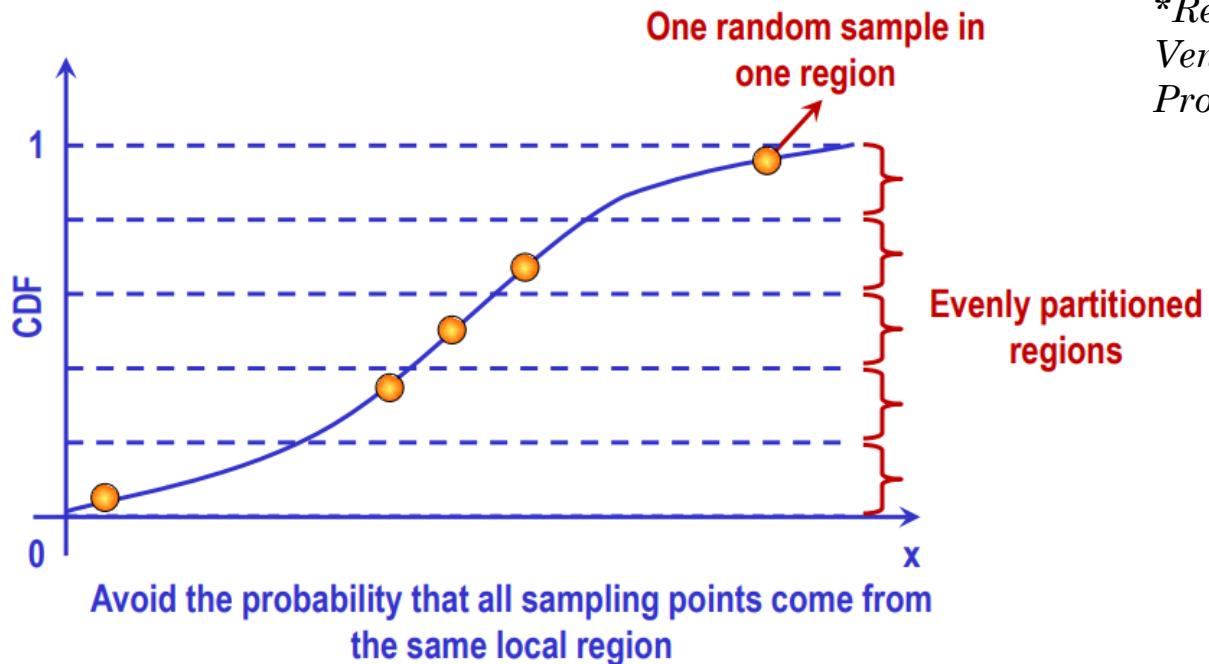
研究方法

- 不确定性分析
 - 量化输入变量不确定性
 - 近距离连接影响下的局部阻力系数误差
(-40% ~ +40%)
 - 输出变量不确定性释义
 - 置信区间
 - 概率最大值

| Studies | Fitting types | Difference from the non-coupled value |
|---------------------------------|---|---------------------------------------|
| Gan and Riffat (1995) | Bend elbow | -10% ~ 0 |
| Mumma, Mahank, and Ke (1997) | Pyramidal transition, 2 types of bend elbows | 0 ~ +27% |
| Atkin and Shao (2000) | Bend elbow | -5.4% ~ +8.1% |
| Sami and Cui (2004) | Bend elbow | -35% ~ 0 |
| Mylaram and Idem (2005) | 6 types of bend elbows | -4.8% ~ +37.4% |
| Lakshmiraju and Cui (2006) | Bend elbow | -18% ~ 0 |
| Ai and Mak (2013) | Damper-like fitting | -36.8% ~ -2.0% |
| Salehi, Idem, and Sleiti (2017) | Bend elbow | -24.35% ~ +11.74% |

研究方法

- 超拉丁方抽样(Latin Hypercube Sampling, LHS)
 - 分层抽样方法
 - 最少算例数量要求： $4k/3^*$, k 为问题自变量维数



**Ref: Uncertainty and Sensitivity Analysis of Natural Ventilation In High-rise Apartment Buildings. Proceedings: Building Simulation 2007.*

研究方法

- 敏感性分析

- 探究平衡阀开度以及风机扬程对各局部构件阻力系数的敏感性
- Spearman Rank order Correlation Coefficient (SRCC)

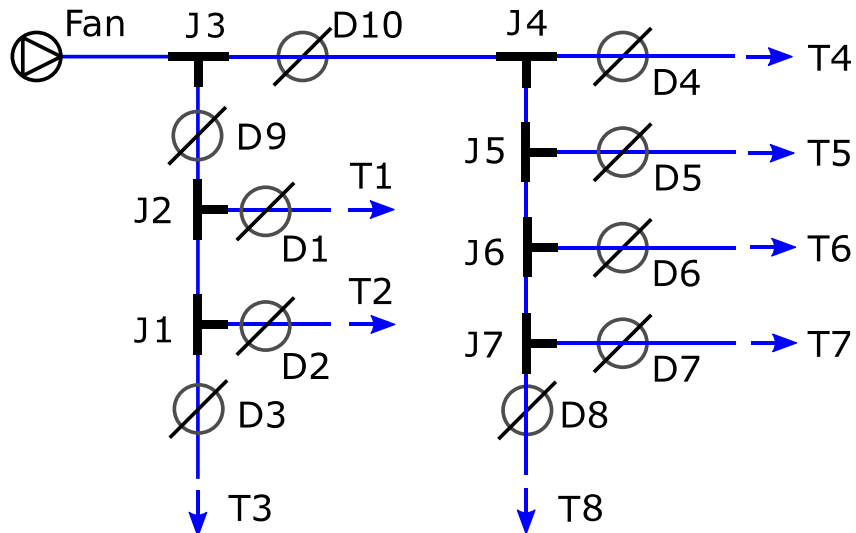
$$SRCC = 1 - \frac{6 \sum d_i^2}{n(n^2 - 1)}$$

- 分组别 (Grouped) SRCC
 - 三通局部阻力系数 (直通管/垂直管)
 - 风阀局部阻力系数

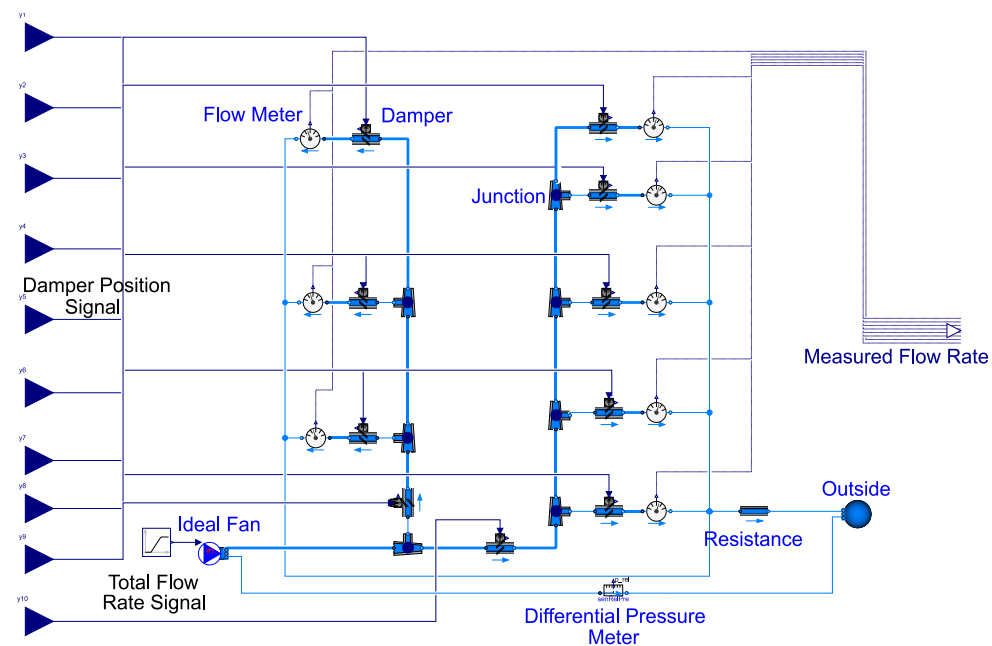
案例分析

• 系统描述

- 支状风系统, 7个三通 (各有2个局阻系数), 10个风阀 (各有1个局阻系数)
- 共有**24**个不确定的局阻系数值



系统示意图



Modelica模型示意图

案例分析

- 不确定性分析情景设置

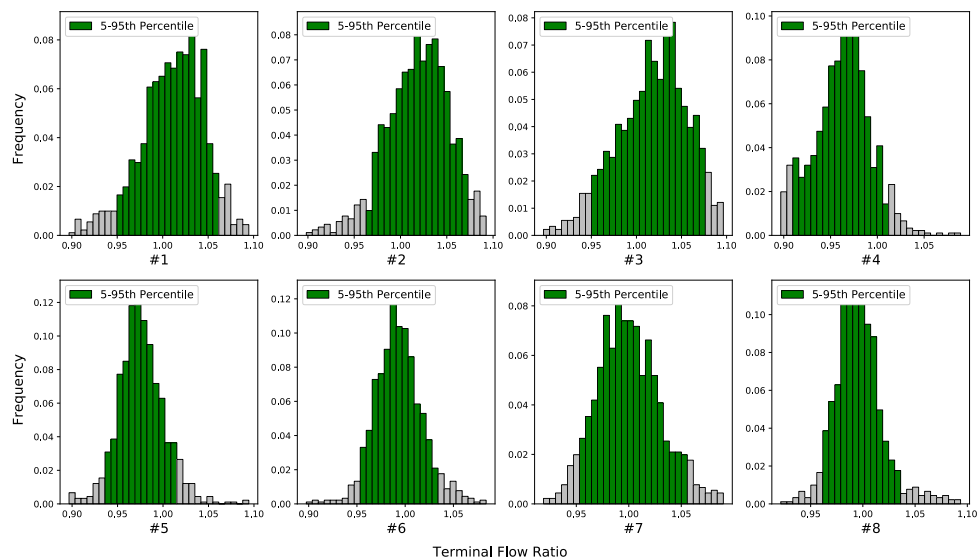
| 情景 # | 三通局阻系数 | 风阀局阻系数 |
|------|-------------|-------------|
| A | -40% ~ +40% | -40% ~ +40% |
| B | -40% ~ +40% | -20% ~ +20% |
| C | -40% ~ +40% | -10% ~ +10% |

案例分析

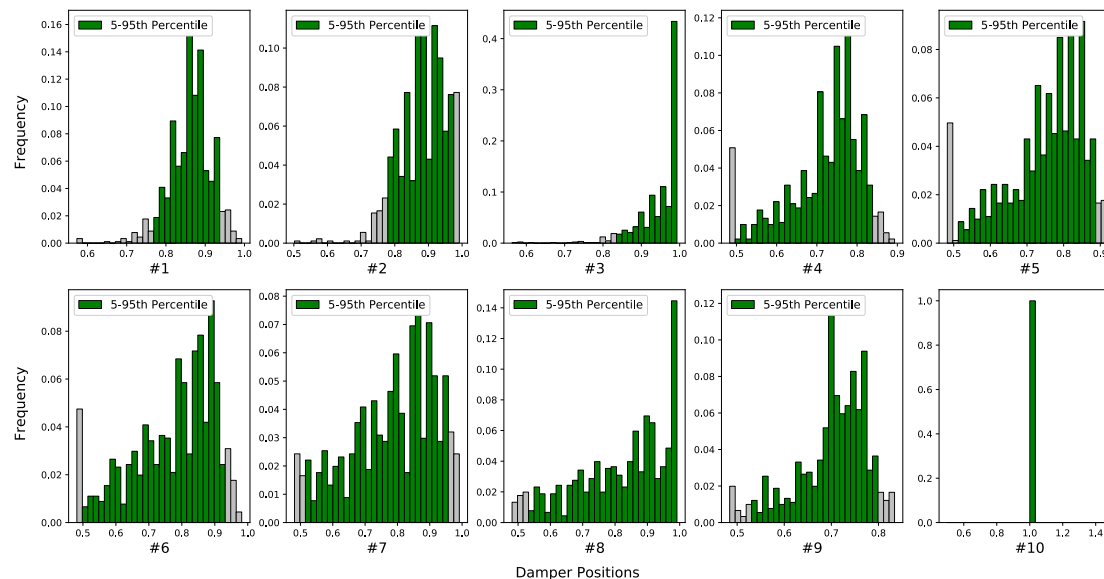
2018/3/28

| 情景 # | 三通局阻系数 | 风阀局阻系数 |
|------|-------------|-------------|
| A | -40% ~ +40% | -40% ~ +40% |
| B | -40% ~ +40% | -20% ~ +20% |
| C | -40% ~ +40% | -10% ~ +10% |

情景A下的不确定性分析结果



各末端实际/设计风量比
满足 $\pm 10\%$ 误差范围



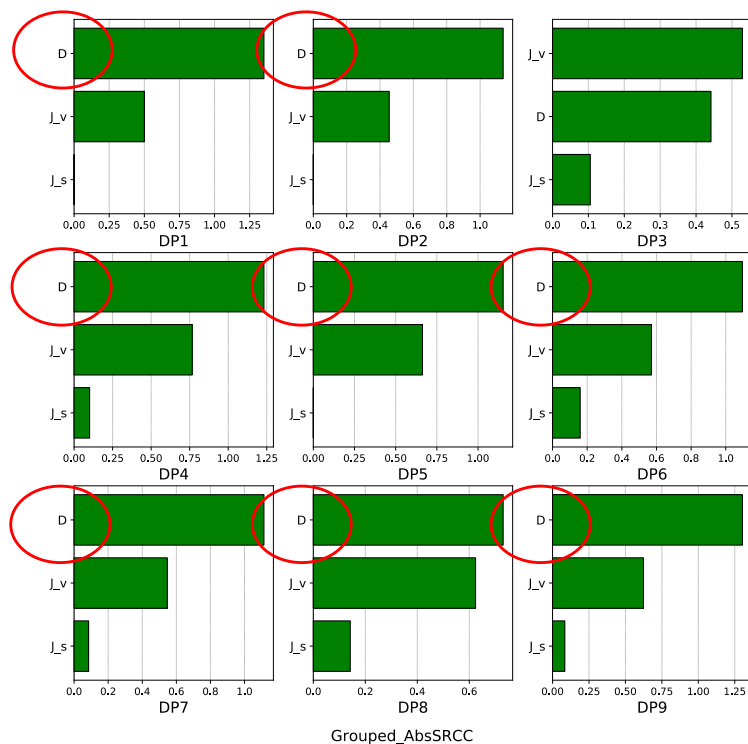
调平结束后的平衡阀开度值

范围过宽，很难用于提供实质性指导

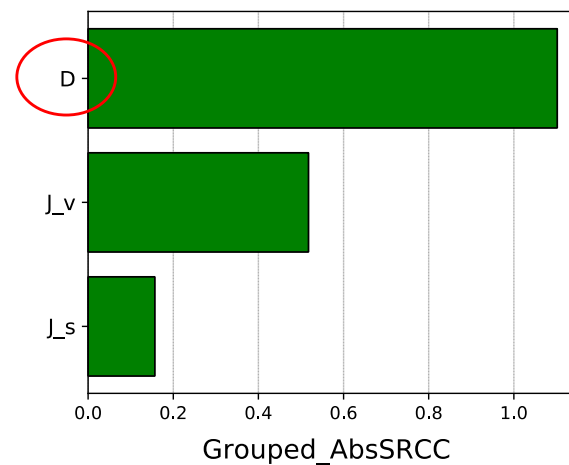
案例分析

| 情景 # | 三通局阻系数 | 风阀局阻系数 |
|------|-------------|-------------|
| A | -40% ~ +40% | -40% ~ +40% |
| B | -40% ~ +40% | -20% ~ +20% |
| C | -40% ~ +40% | -10% ~ +10% |

情景A下的敏感性分析结果



平衡阀开度的敏感性因子排序



所需风机扬程的敏感性因子排序

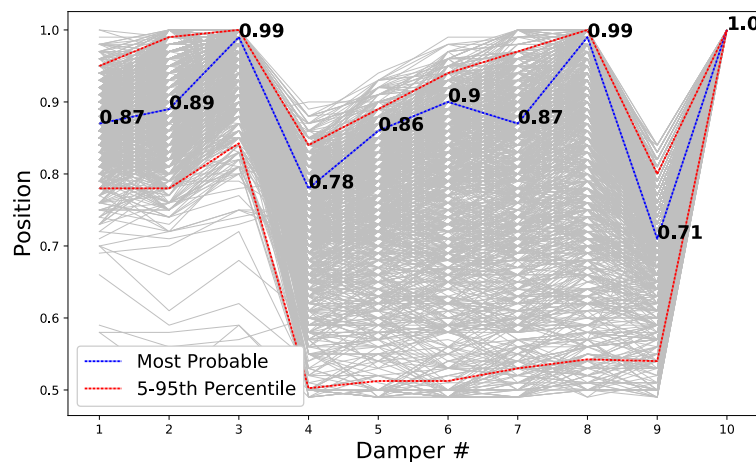
提高该方法的实用性可优先从降低风阀阻力系数模型不确定性着手！！

案例分析

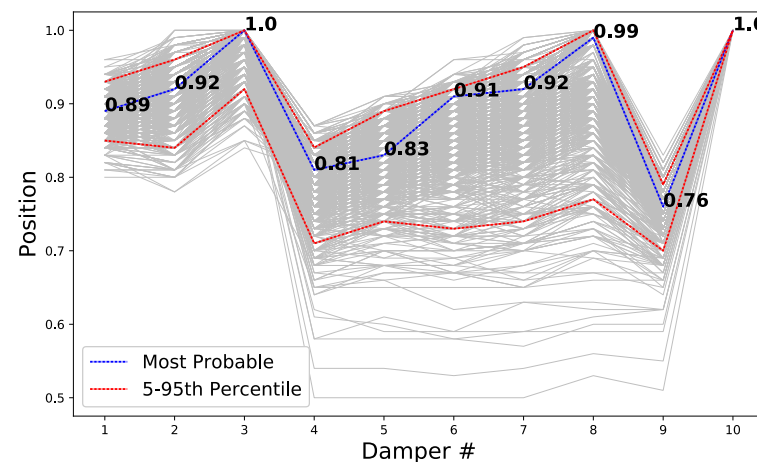
2018/3/28

| 情景 # | 三通局阻系数 | 风阀局阻系数 |
|------|-------------|-------------|
| A | -40% ~ +40% | -40% ~ +40% |
| B | -40% ~ +40% | -20% ~ +20% |
| C | -40% ~ +40% | -10% ~ +10% |

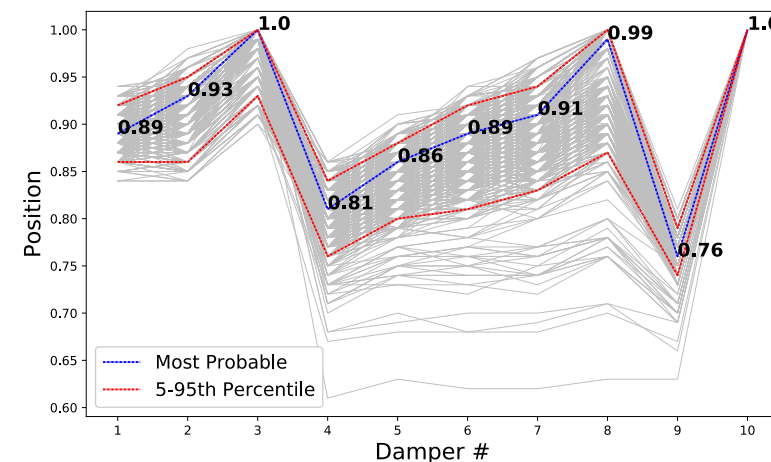
- 情景A, B, C之间的横向对比



A



B



C

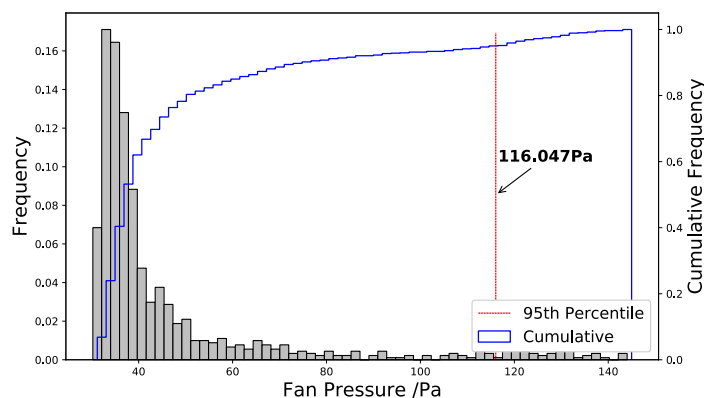
平衡阀开度

当风阀局阻系数误差范围降低到 $\pm 20\%$ ，模拟得到的平衡阀开度不确定范围较窄，可为实际的调整提供具有实际意义的指导

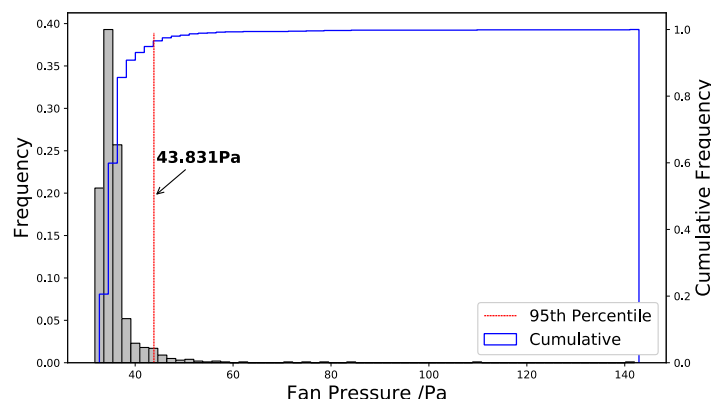
案例分析

| 情景 # | 三通局阻系数 | 风阀局阻系数 |
|------|-------------|-------------|
| A | -40% ~ +40% | -40% ~ +40% |
| B | -40% ~ +40% | -20% ~ +20% |
| C | -40% ~ +40% | -10% ~ +10% |

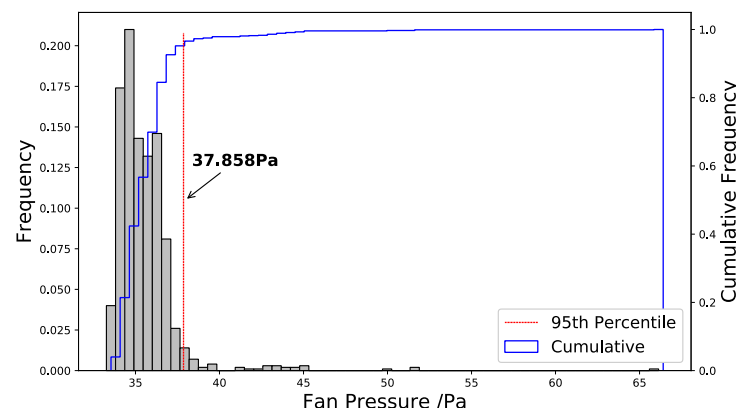
- 情景A, B, C之间的横向对比



A



B



C

所需风机扬程

模拟可**定量地**评估风机选型过大或过小的风险。给予甲方**充分的自由度**在初投资规模和选型过小的风险之间做权衡。当风阀局阻系数的不确定度降低时，所需风机扬程会进一步降低，从而**降低初投，减少设备冗余，提高运行能效**。

结论总结

- 实用价值：

- 基于该方法, 可采用平衡阀开度模拟结果中的概率最高值以及置信区间范围来实现
离线模拟指导现场调平
- 基于该方法, 可**定量地评估风机选型过大或过小的风险**, 便于甲方在初投资规模和选型过小的风险之间做权衡

- 局限性：

- 目前所考虑的不确定自变量范围有限
- 尚需探究近距离连接对局部阻力系数影响的相关研究，以降低风阀局阻系数的不确定度，从而提高该方法的实用性。

谢谢,

欢迎批评指正！