

## 汇川技术课题分享

Digital twin and downstream applications in buildings: from model-centric to data-centric

以数据为核心的数字孪生构建及其在建筑运行中的应用

詹思成

[szhan@u.nus.edu](mailto:szhan@u.nus.edu)

2016.06 浙江大学学士 能源与环境系统工程

2017.12 卡内基梅隆大学硕士 Advanced Infrastructure System

2022.08 新加坡国立大学博士 建筑环境与科学

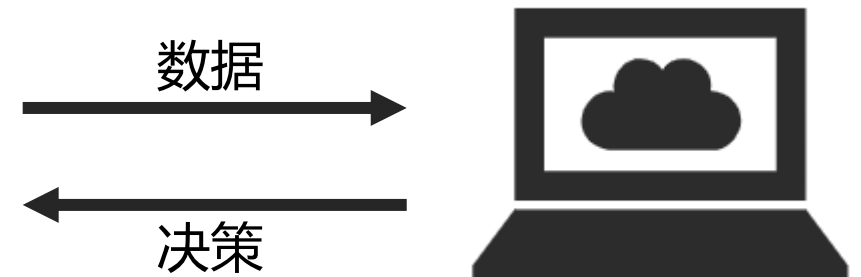
# 行业现状及存在问题



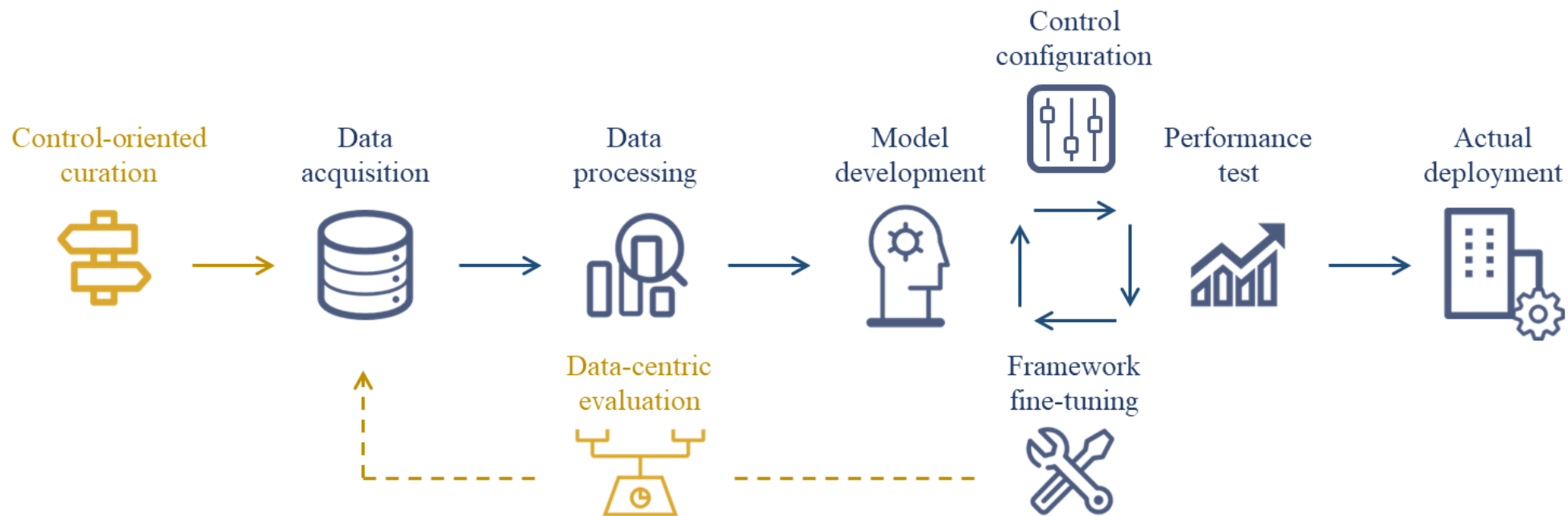
## 现有数字孪生解决方案

- 3D BIM 模型
- 数据可视化
- 可交互面板
- 能耗预测及评价

定义：在虚拟环境中代表实际建筑的模型，可通过较低成本的模拟计算，获得现实中难以获得的信息，从而**支持某种特定的决策**



# 行业现状及存在问题：模型预测控制(MPC)



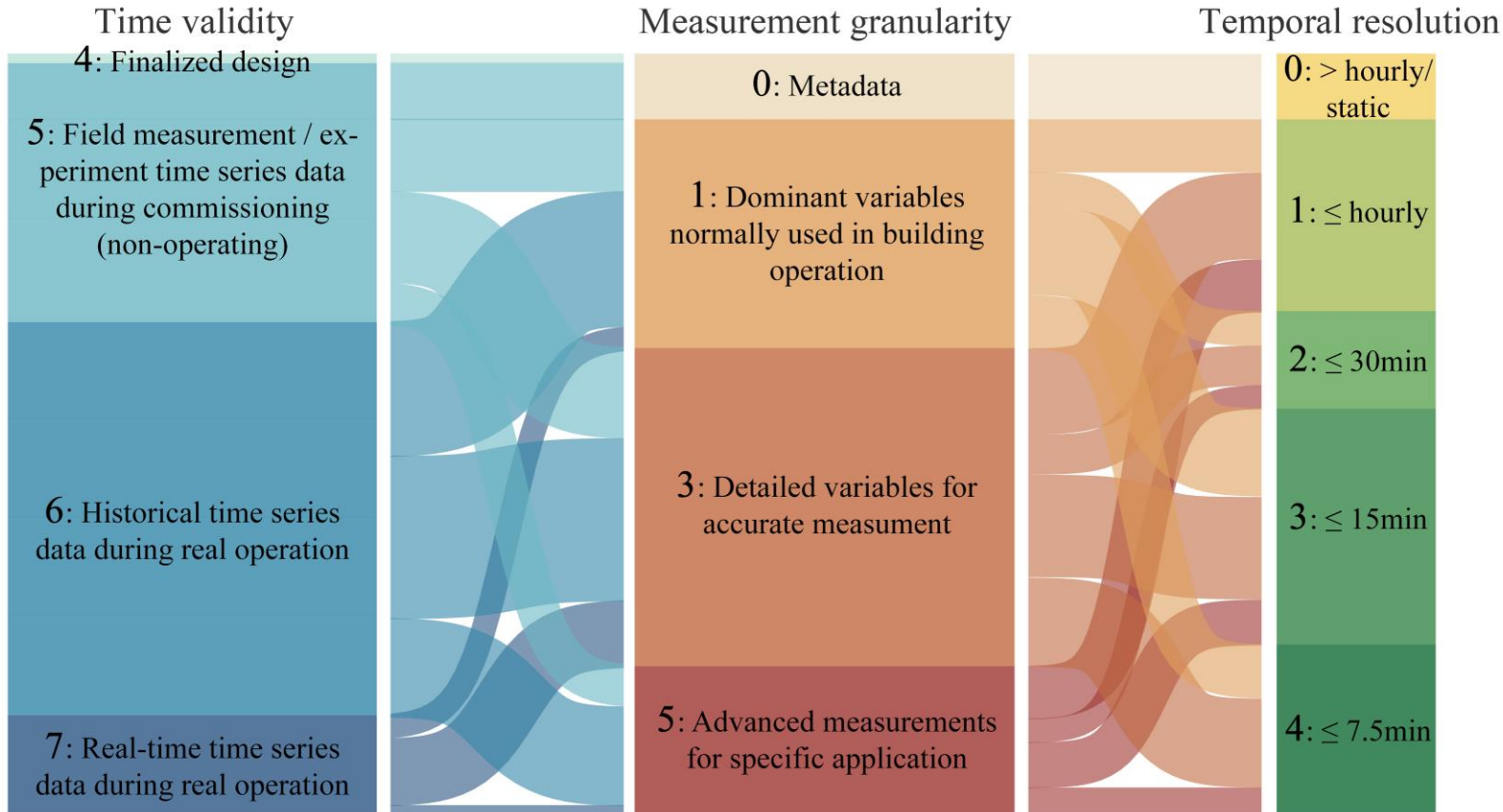
以模型为中心(model-centric)的开发流程

- 一次性，无目的的数据获取
- 大量试错的模型及控制调试
- 曾经成功的经验无法广泛复制
- 实际运行的效果难以预知
- 关键数据缺乏同时大量数据浪费

以数据为中心(data-centric)的开发流程

- 系统性地获取对控制有价值的数据
- 对应可控的模型及控制流程
- 可快速应用于同一类型的建筑
- 数据完备性决定控制效果
- 基于对数据价值的系统性理解

# 描述建筑数据多样性的统一量化框架



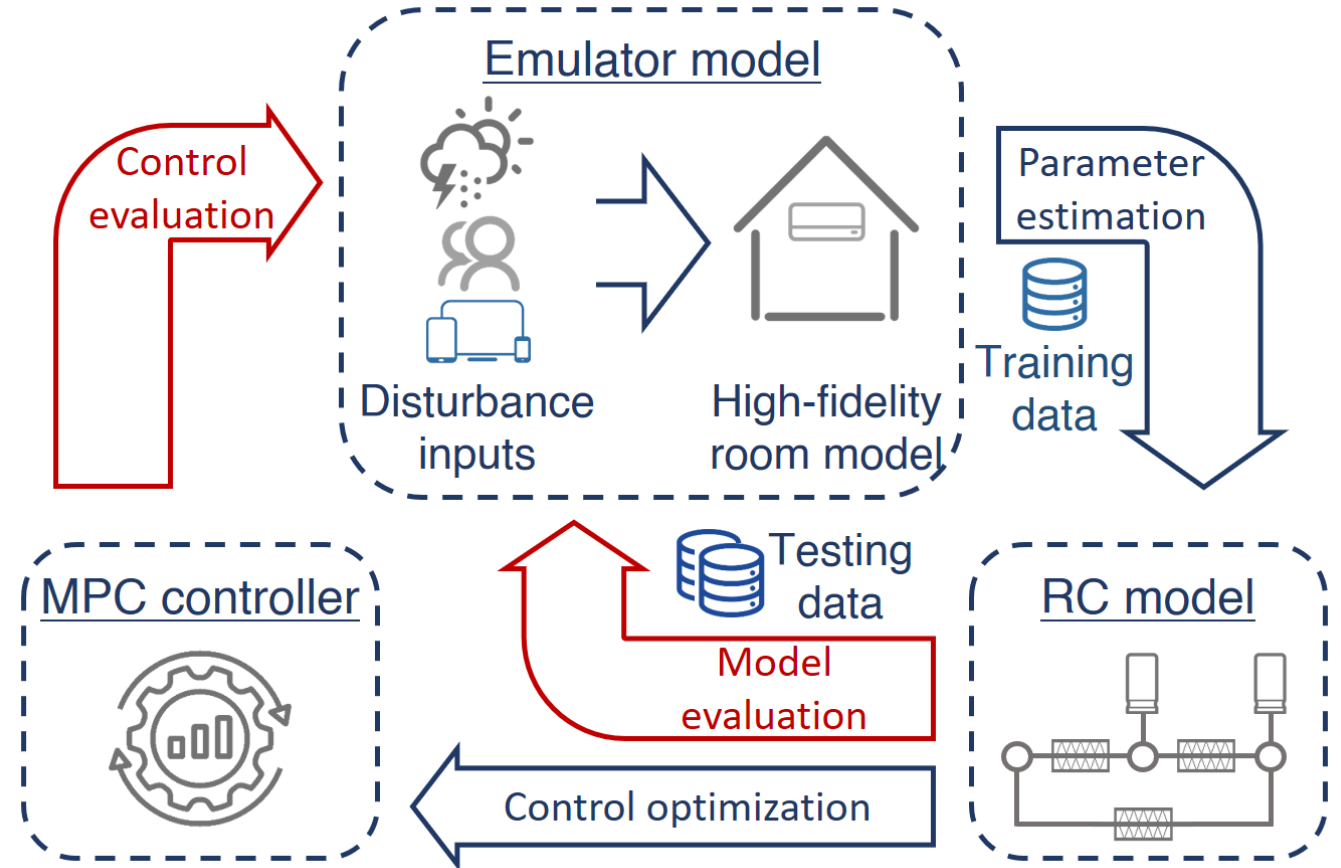
- 从时效性，测量颗粒度，时空分辨率三个维度描述某个建筑运行数据完备性
- 对现有文献进行系统性分析：缺乏对数据要求的认知
- 构建以数据为中心的研究框架

Zhan, S., & Chong, A. (2021). Data requirements and performance evaluation of model predictive control in buildings: A modeling perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 142, 110835.

# Data-centric performance evaluation for MPC applications

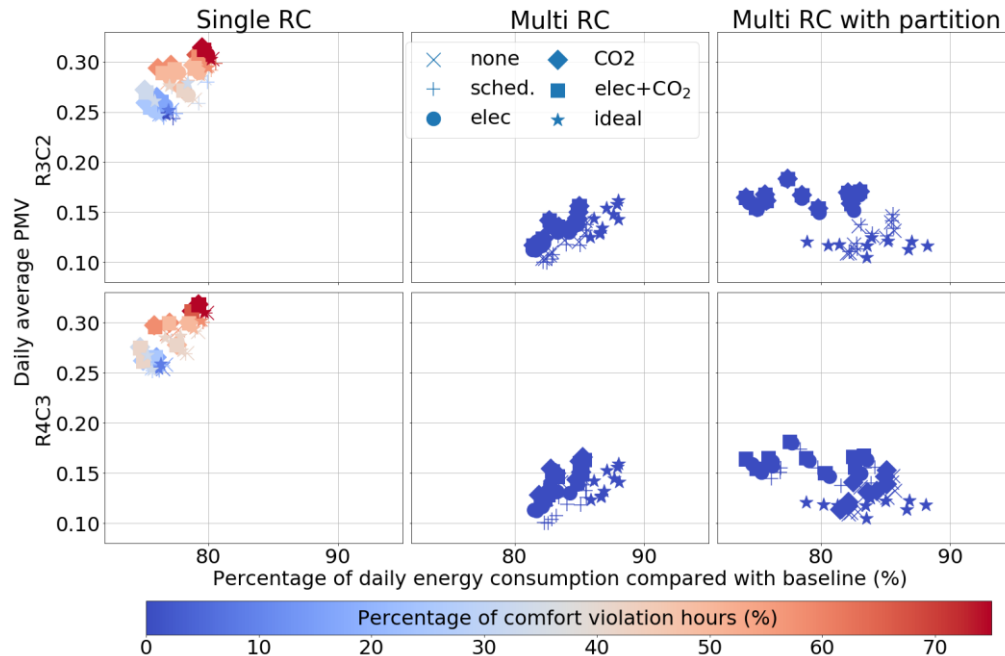
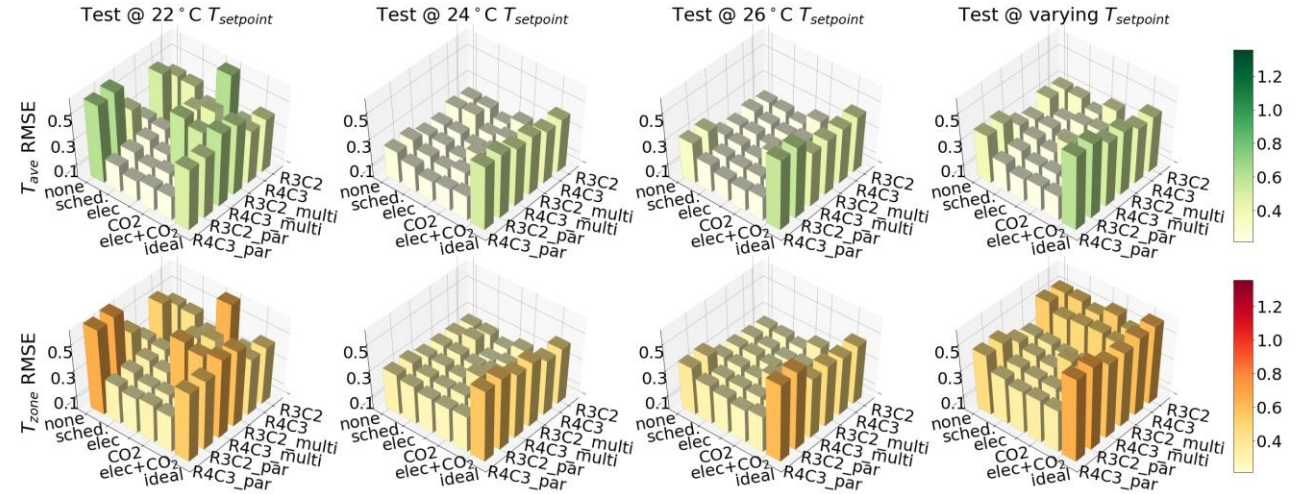
## 以数据为中心的MPC效果评估

- 利用基于Modelica的高还原度模型进行MPC项目的全过程模拟
- 测试不同级别数据完备性对控制效果的影响
- 厘清数据影响下游模型及控制效果的作用机理



# 人员相关数据在典型MPC问题中的影响

- 不同精度的人员相关数据，结合不同的模型复杂度，全面对比模型及控制效果
- 实时的人员相关数据对模型准确度及控制效果没有显著增益(皆可节能10-20%)

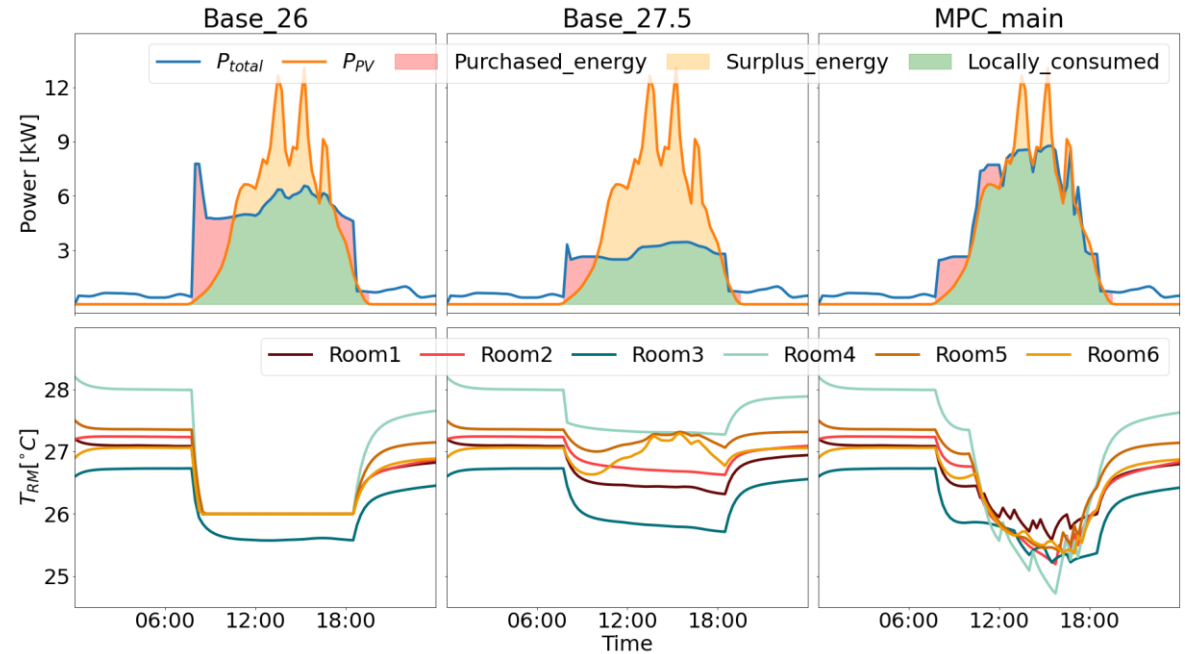
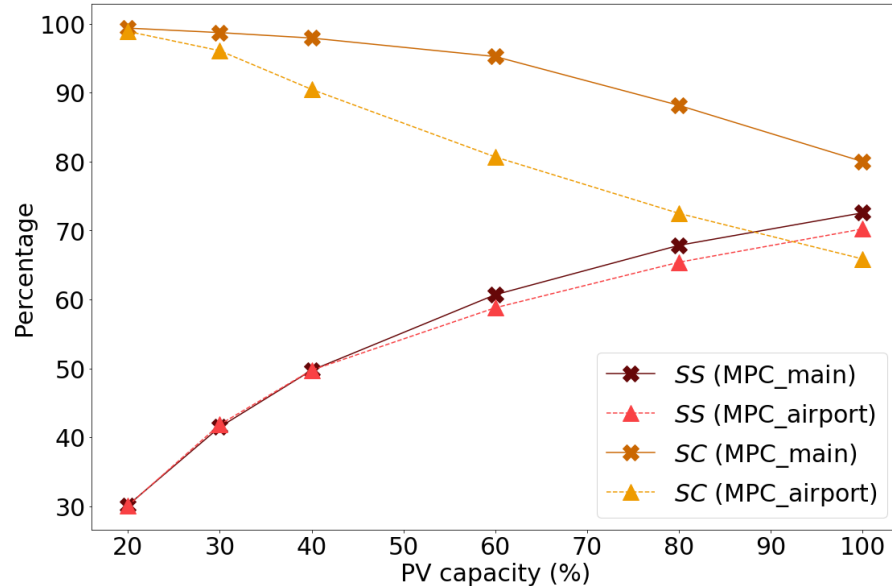


- 预测准确度和控制效果对模型(digital twin)能力的要求有明显差异，应用中需区别对待
- 模型复杂度(adequacy)应与可用数据的精度相匹配

Zhan, S., Lei, Y., Jin, Y., Yan, D., & Chong, A. (2022). "Impact of occupant related data on identification and model predictive control for buildings". *Applied Energy (accepted)*

# 多个类别数据对能源灵活性控制的影响

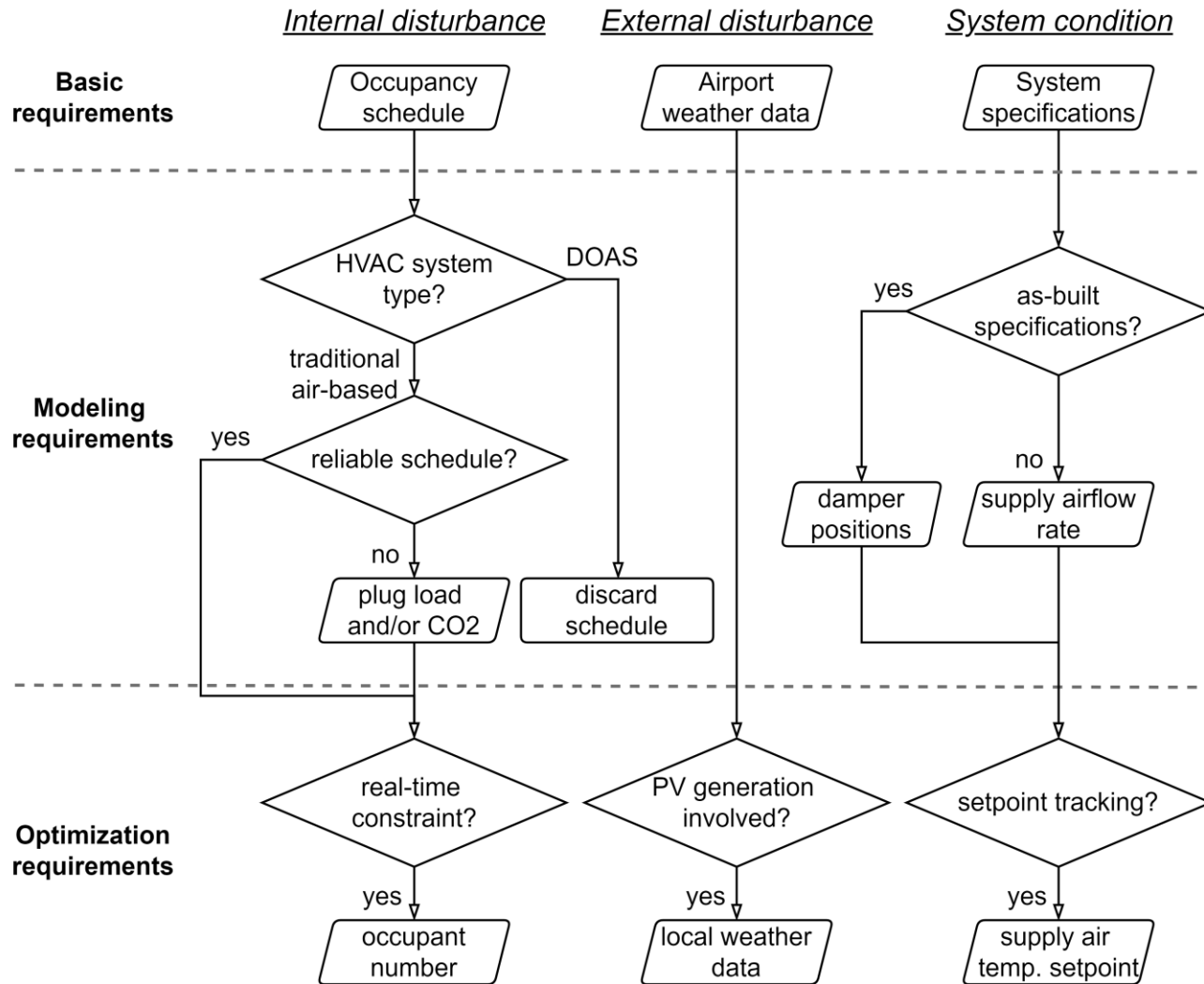
- MPC根据未来太阳能发电量调控空调送风量，在热舒适范围内减小与电网交互
- 太阳能自用率提高约20%，能源自给率提高约10%



- 明确各类别数据的最低要求，及其受建筑特性的影响
- 如当地气象站仅在太阳能发电量占年总用电量耗超过20%的情况下有增益

Zhan, S., Dong, B., & Chong, A. (2022). "Improving energy flexibility and PV self-consumption for a tropical net zero energy office building". *Energy and Buildings (under review)*.

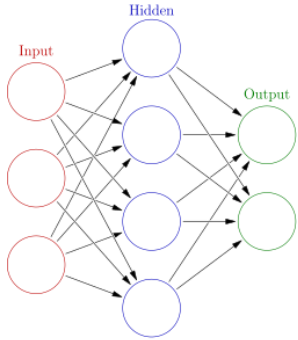
# 基于研究结果的数据获取决策框架



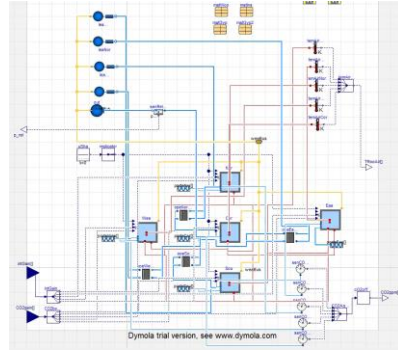
- 根据建筑特性及数据用途决定是否采集特定数据点
- 对应于数据集的模型配置及控制效果预测



# 机器学习/人工智能在数字孪生中的应用



VS



机器学习  
(黑箱模型)

物理模型  
(白箱模型)

## 物理模型的优点

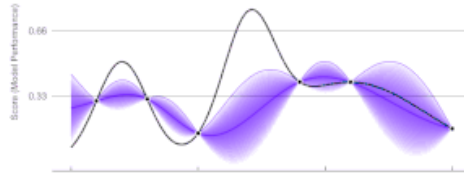
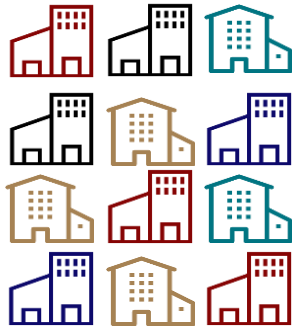
- 具有可解释性，更高的可靠性和可接受度
- 更准确地预测训练数据之外的现象(extrapolation)

## 机器学习/人工智能的用处

- 辅助物理模型的构建和校准，减小其与实际建筑的偏差
- 提升数据的利用效率，降低相关计算成本

# 基于元学习和贝叶斯优化的数字孪生校准

Previous calibration runs:  
**source tasks**



Calibration by Vanilla-Bayesian Optimization with Gaussian Process



Training data storage

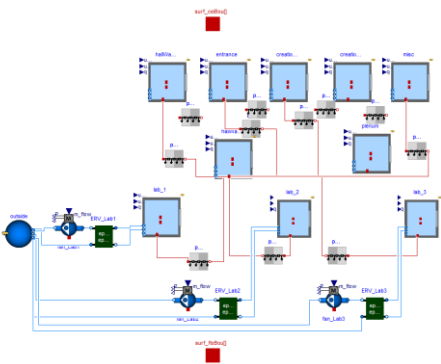
Source task data archived in the cloud: training set

	$\theta_1$	$\theta_2$	...	$\theta_m$	$J$
1	$\theta_{1,1}$	$\theta_{2,1}$	...	$\theta_{m,1}$	$J_1$
2	$\theta_{1,2}$	$\theta_{2,2}$	...	$\theta_{m,2}$	$J_2$
...	...	...	...	...	...
n	$\theta_{1,n}$	$\theta_{2,n}$	...	$\theta_{m,n}$	$J_n$

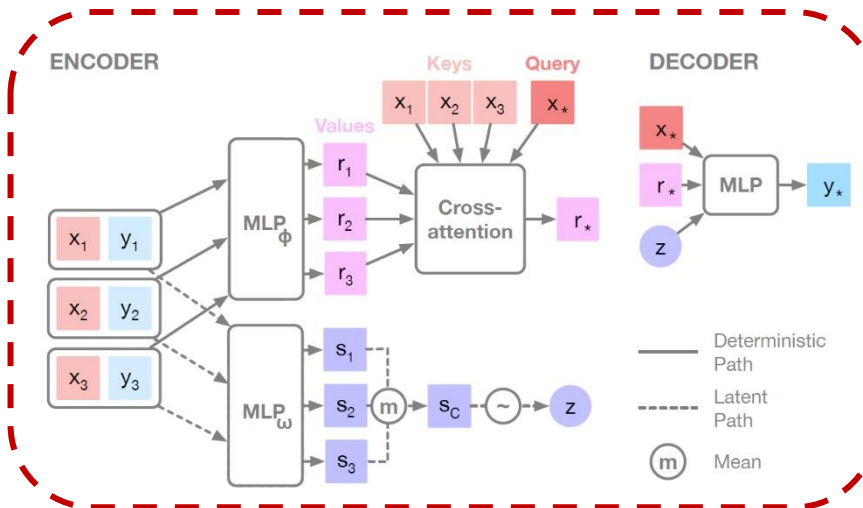
Meta-train

- 元学习(meta-learning): 从以往同类建筑的校准数据中提取关于建筑物理的隐藏信息
- 降低新建筑的模型校准难度
- 校准所需运算量减少50%

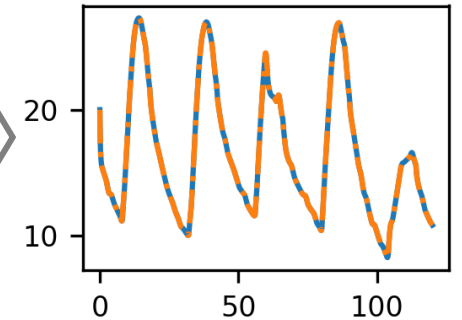
Previously unseen building data and model: **target tasks**



Data-driven initialization



Meta-ANP-BO



## 进一步研究方向

- 完善用于data-centric框架的量化指标，加强配置流程的自动化
- 基于主动学习(active learning)设计适用性更强的模型构建及校准方法

**谢谢!**

[szhan@u.nus.edu](mailto:szhan@u.nus.edu)