



清华大学

Tsinghua University

数据驱动的工业用户 用能可行域降维方法

吕睿可

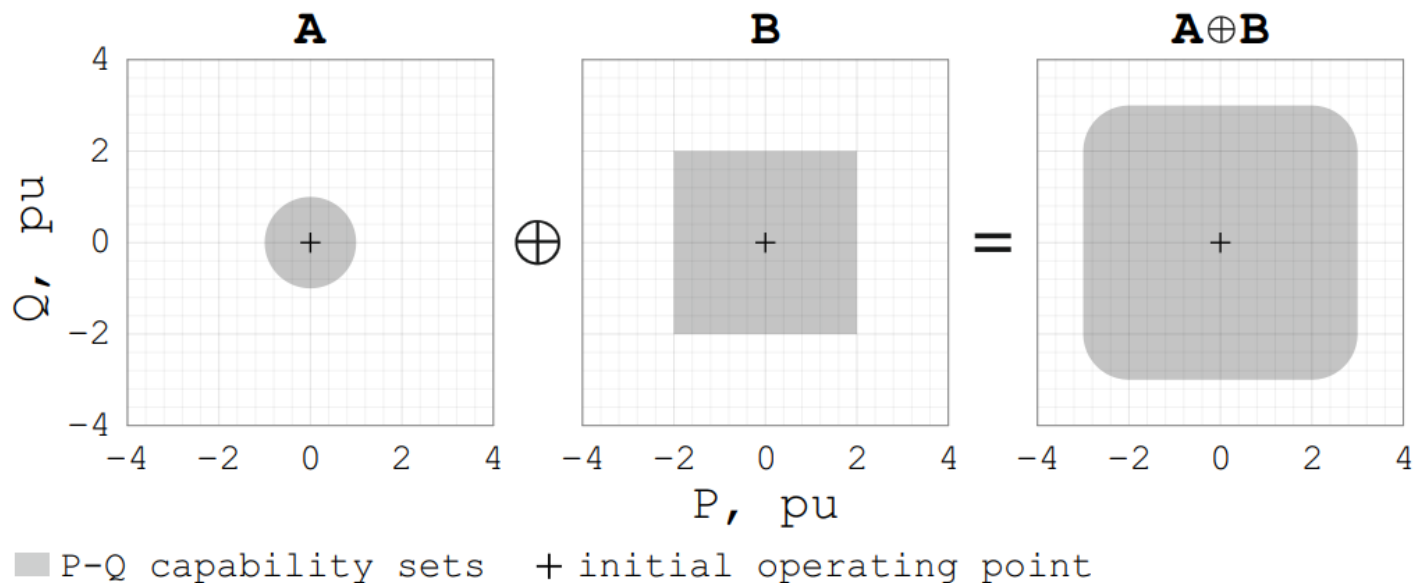
清华大学电机系

R. Lyu, H. Guo, G. Strbac and C. Kang, "Data-Driven Dimension Reduction for Industrial Load Modeling Using Inverse Optimization," in IEEE Transactions on Smart Grid, doi: 10.1109/TSG.2025.3545339. ¹



科学问题：如何以低维线性约束近似高维非凸可行域？

由于工业用户调控约束维度较高，无法像传统机组那样直接由调度中心集中处理，而是需要先实现调控约束降维，从而使得含多个工厂的源荷互动优化在**计算上更高效**。



为什么闵可夫斯基和很难？

A: 设备a的调节范围；B: 设备B的调节范围

工厂：设备a+设备b（实际上更复杂，因为A和B可能是耦合的）



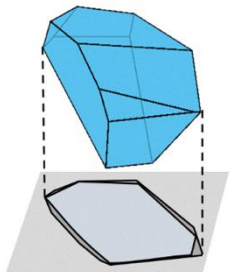
研究现状：灵活性资源调控约束降维

现有研究：解析化方法**自适应性**较差，数据驱动方法自适应性可能更强，但尚无实用路线。

解析化方法无法适用非凸/混整约束

- 根据物理特性将多种灵活性资源分类聚合^[5]
- 推导出灵活性资源聚合约束的数学表达式^[6]
- 约束降维内近似和外近似方法...

大量灵活性资源的约束条件
所构成的高维可行域



降维投影
+
形状模板
收缩内接

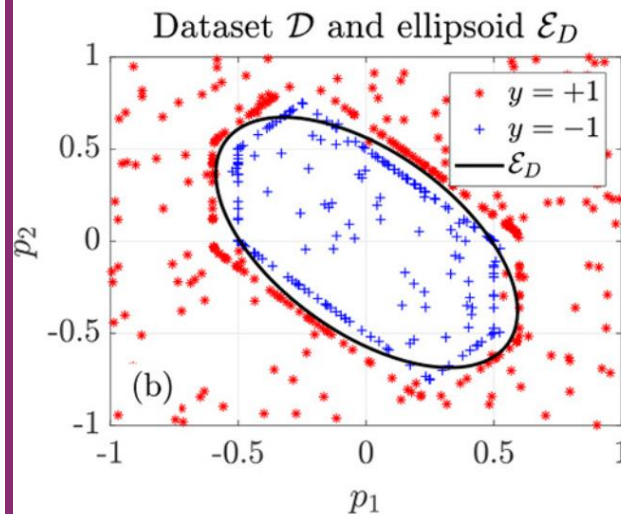
表示聚合等效设备灵活性的
较低维可行域空间

基于等效发电机和等效
储能模型的降维投影^[5]

$$\underline{\phi}_l \triangleq \begin{cases} \text{The number of non-zero nodes on } l \text{ is odd :} \\ \sum_{i \in \mathcal{N}} \max \left\{ \underline{e}_i(\tilde{s}_l) - \Delta T \langle \mathbf{1} - \mathbf{u}_l, \bar{\mathbf{p}}_l \rangle_{[s_l:r_l-1]}, \right. \\ \quad \left. \Delta T \langle \mathbf{u}_l, \mathbf{p}_l \rangle_{[s_l:r_l-1]} + \underline{e}_i(\tilde{r}_l + 1) \right\}, \\ \text{The number of non-zero nodes on } l \text{ is even :} \\ \sum_{i \in \mathcal{N}} \max \left\{ \underline{e}_i(\tilde{s}_l) - \bar{e}_i(\tilde{r}_l + 1) - \Delta T \langle \mathbf{1} - \mathbf{u}_l, \bar{\mathbf{p}}_l \rangle_{[s_l:r_l-1]}, \right. \\ \quad \left. \Delta T \langle \mathbf{u}_l, \mathbf{p}_l \rangle_{[s_l:r_l]} \right\}, \end{cases}$$

灵活性资源调控约束
的解析化表达式^[6]

数据驱动方法仅有概念，远未实用



仅有的研究(Taheri, et al. 2022):

1. 随机生成运行数据
2. 利用原始约束打标签
3. 训练凸二次分类器
4. 用训练好的分类器近似原始高维约束

利用凸二次分类器
近似原始约束^[7]

问题：样本生产和训练**复杂度**随时段个数**指数上升**

[5]王思远,吴文传.灵活性资源聚合参考模型与量化指标体系[J].电力系统自动化,2024,48(3):1-9.

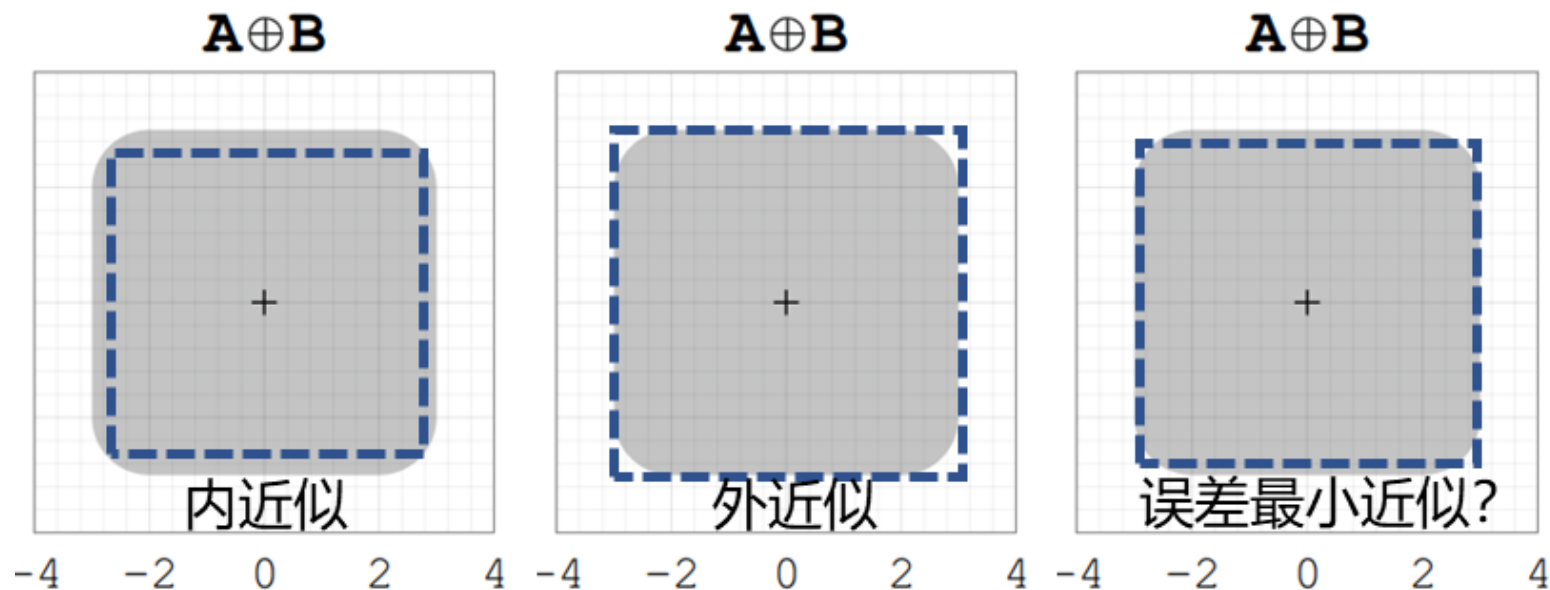
[6]文艺林: 灵活资源可行域的精确聚合与近似模型(Y. Wen, Z. Hu, S. You and X. Duan, "Aggregate Feasible Region of DERs: Exact Formulation and Approximate Models," in IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 13, no. 6, pp. 4405-4423, Nov. 2022)

[7] S. Taheri, V. Kekatos, S. Veeramachaneni and B. Zhang, "Data-Driven Modeling of Aggregate Flexibility Under Uncertain and Non-Convex Device Models," in IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 13, no. 6, pp. 4572-4582, Nov. 2022



动机：抛弃传统精确内近似的框架

为什么可以“抛弃”内近似？因为负荷侧资源不需要像发电机组一样完全精确控制，**在市场参与中通常允许10-20%的误差**；在工业负荷建模情景下，我们想验证这个想法的可行性（近似误差小于10%），从而为解决涉及整数变量的复杂约束降维和近似提供全新的思路。



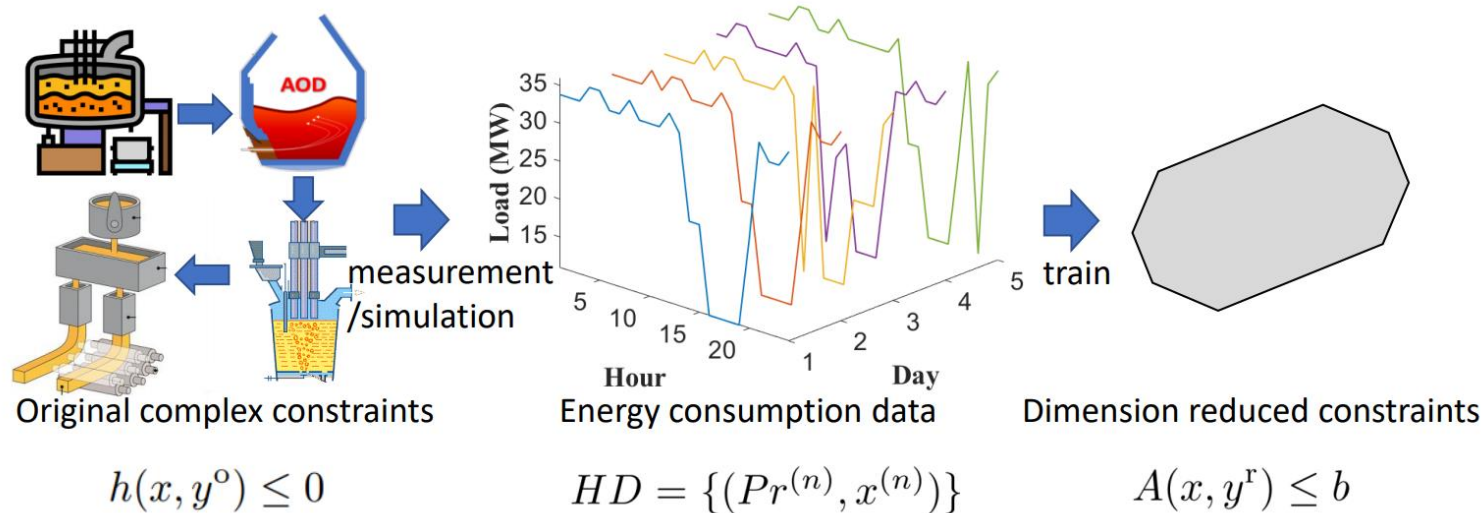
Jesse: 需求侧参与电网互动先解决『0到1』的问题。



方法：数据驱动的工业用户调控约束降维

□解决思路：数据驱动参数规划

首先利用原始高维约束生成不同边界条件下的最优用能数据，再利用数据逆向拟合低维约束的最优参数(设计损失函数和训练算法)。所得低维约束可近似原始的用户集群高维可调空间。



数据驱动的约束降维框架。h：高维约束；HD：历史数据集；A：低维约束。



思想：首先根据需要确定低维约束的形式(比如线性约束: $Ax \leq b$)，然后利用用能数据拟合参数。



方法的直观理解：如何合理『拍』低维约束参数？

目标：首先根据需要确定低维约束的形式(比如线性约束: $Ax \leq b$)，然后利用用能数据拟合参数。

子问题1：何为合理？近似程度高。何为近似程度高？

定义损失函数：在各种场景下最优解的平均误差

$$\min_{A,b} J = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \|x^{(n)} - x_n\|^2 \quad (2a)$$

$$\text{s.t. } x_n = \operatorname{argmin}.\{Pr^{(n)\top} x_n : A(x_n, y^r) \leq b\}, \forall n \quad (2b)$$

n : 场景编号

$x^{(n)}$: 基于真实约束的最优解

x_n : 基于近似约束的最优解



方法的直观理解：如何合理『拍』低维约束参数？

目标：首先根据需要确定低维约束的形式(比如线性约束: $Ax \leq b$)，然后利用用能数据拟合参数。

子问题2：低维约束长什么样？

- 原理上，可以长任何样子，但是计算过于复杂。

解决思路：引入先验知识，『应该长什么样』？

- 思路1：工业用户的灵活性应该长什么样？（用户特点）

目前：可调负荷集群



捕捉：时段耦合、生产平移、设备构成

- 思路2：电力系统灵活性需求应该长什么样？（系统需求）

未来：爬坡、启停、成本

The RC_s in the form of an ALF are then:

$$x_t = \sum_{i=1} p_{t,i} \Delta t, \quad \underline{P}_i \leq p_{t,i} \leq \overline{P}_i : \underline{\mu}_{t,i}^P, \overline{\mu}_{t,i}^P, \forall t \quad (3a)$$

$$\underline{E}_i \leq \sum_{t=1}^T p_{t,i} \Delta t \leq \overline{E}_i : \underline{\mu}_i^E, \overline{\mu}_i^E \quad (3b)$$

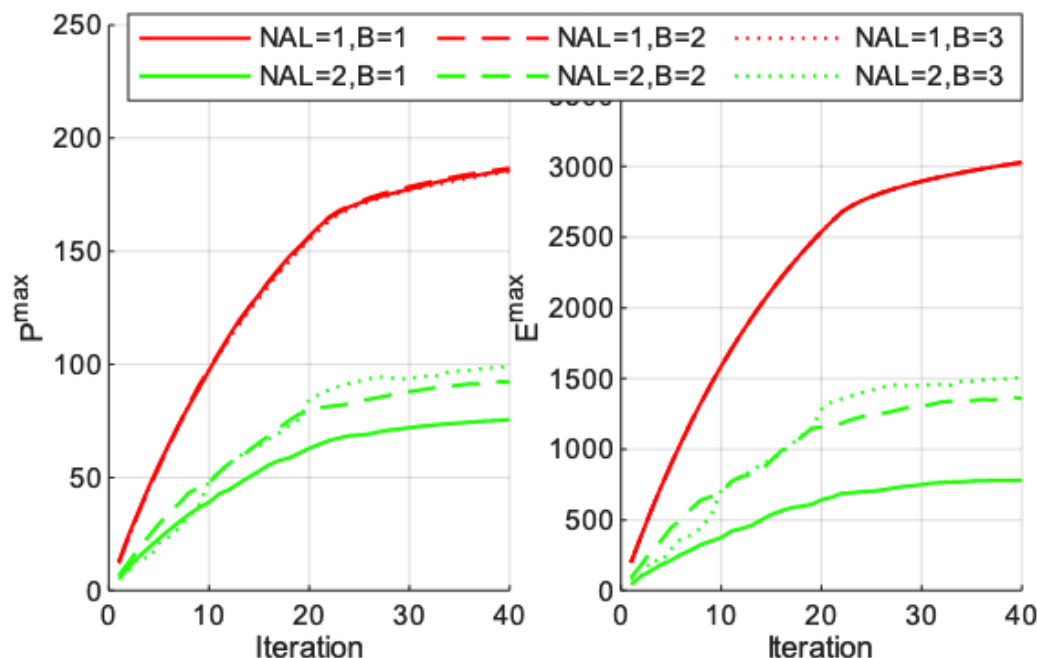


方法的直观理解：如何合理『拍』低维约束参数？

目标：首先根据需要确定低维约束的形式(比如线性约束: $Ax \leq b$)，然后利用用能数据拟合参数。

子问题3：能否高效求解？

- 子子问题1：逆向优化带非线性约束->转化为MILP
- 子子问题2：场景数太多：batch-based 零阶随机梯度下降



参数训练的收敛过程

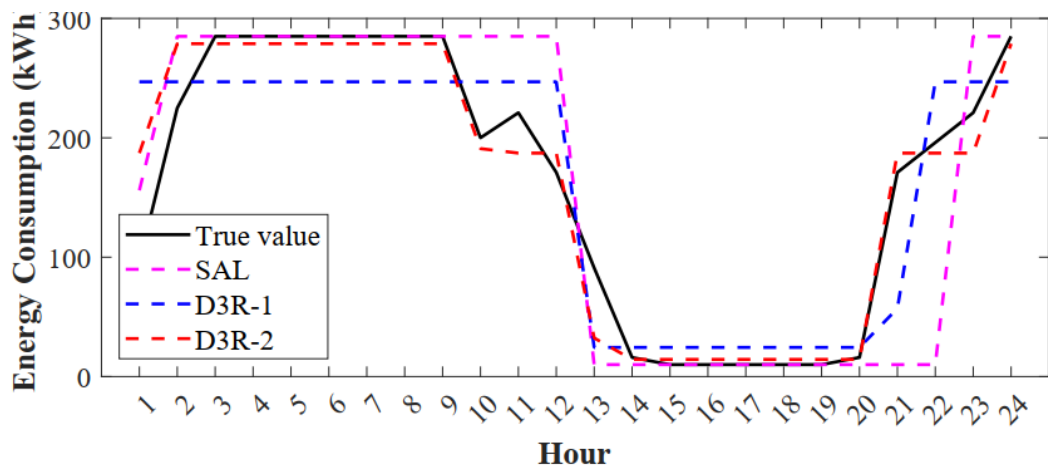
<https://github.com/Rick10119/Data-DrivenDimension-Reduction>



结果：部分牺牲误差，大幅降低复杂度

我们测试了所提方法在**水泥、钢粉和炼钢厂**的表现，选择可调负荷模型作为低维约束形式，以**4%~10%误差**替代复杂约束，显著降低模型维度：**完全消除0-1变量，连续变量少1个数量级。**

注意：三个工厂的模型和参数完全不一样，但是我们的方法是自适应的，无需调整！



基于降维约束的最优用能结果
与基于原始精确模型的对比

TABLE II
NUMBER OF VARIABLES IN THE MODELS

Continuous (integer)	Cement plant	Steel powder manufactory	Steelmaking plant
Original Model	196(288)	490(720)	0(10208)
D3R-1	24(0)	24(0)	24(0)
D3R-2	48(0)	48(0)	48(0)

表2 算例中原始约束和降维后约束的连续和离散变量个数统计。D3R-1/2：使用1/2个可调负荷模型近似



Insight: so what?

未来方向：1、探索“为什么行”，提供理论解释；2、近似后最优解怎么还原？3、推广约束种类。

思考：如果我们可以用低维约束很好近似原始约束，这意味着什么？

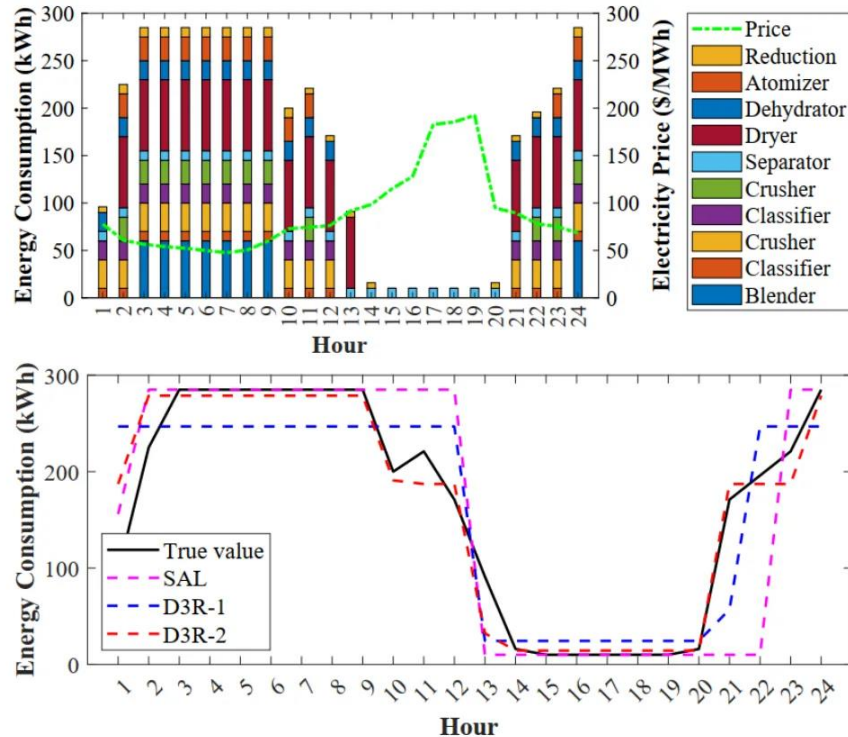
- 1、**标准化建模**：时段耦合+平移能力就已经刻画了工业用户的90%以上灵活性
- 2、**评估用户侧灵活性潜力**：用简单模型评估全域各子行业的各个维度灵活性
- 3、**市场机制设计**：能用一个简单约束抓住灵活性特征，是否可以设计投标机制？

*Simplicity is the
ultimate sophistication.*

LEONARDO DA VINCI

Simplicity is the ultimate sophistication

- 1. Model/data: **simpler models** are good enough (~5% error) with properly set parameters



The steel powder plant case*

Evidence:

Optimized electricity consumption with the complex model (MILP with 1k+ variables)

V.S.

Optimized electricity consumption with the reduced model (LP with 24/48 variables)

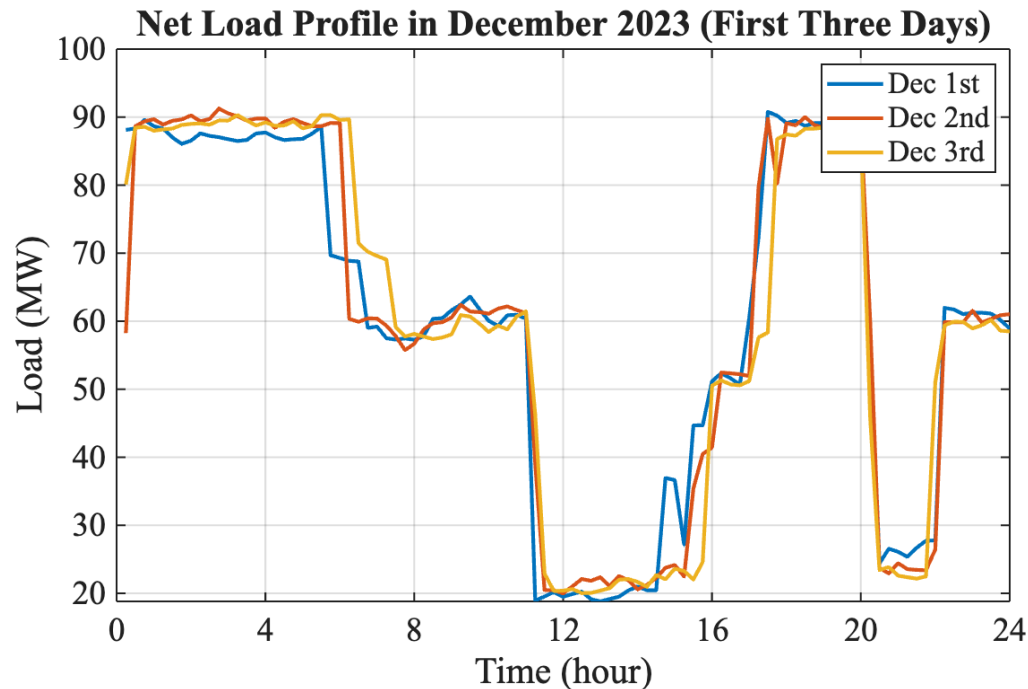
Interpretation: optimality, process design...

* R. Lyu, H. Guo, G. Strbac and C. Kang, "Data-Driven Dimension Reduction for Industrial Load Modeling Using Inverse Optimization," in IEEE Transactions on Smart Grid, in press.

Simplicity is the ultimate sophistication

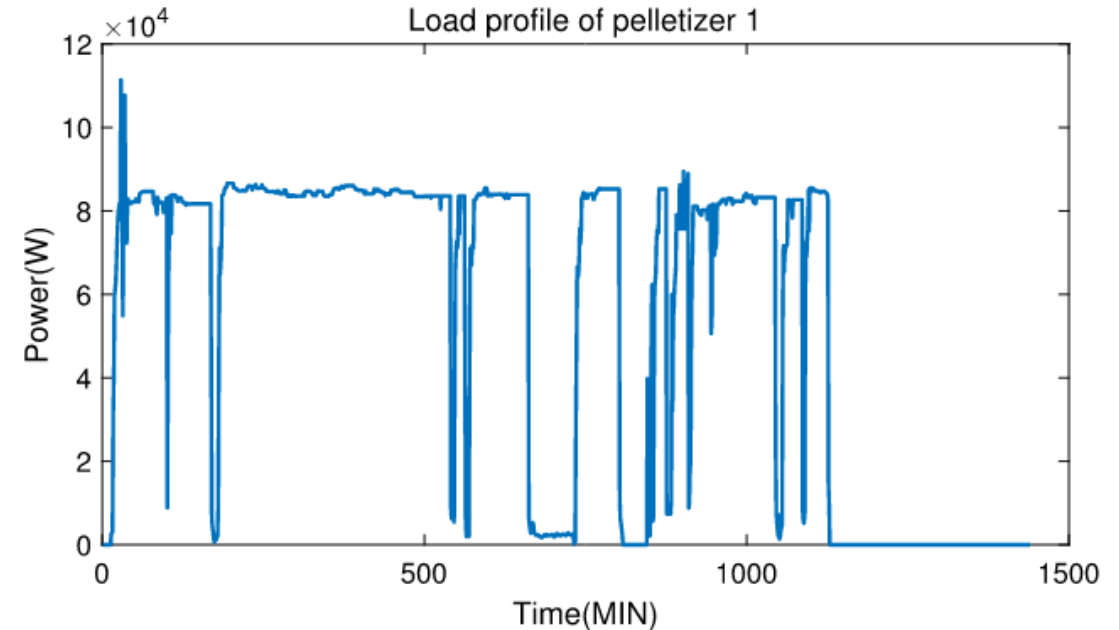
- **1. Model/data:** **simpler models** are good enough (~5% error) with properly set parameters
- **2. Economics:** there is a **simpler strategy**: to produce or not to produce

Evidence: BYD: 60MW almost each hour



Load profile of BYD (with 30/40MW battery)

A poultry feed factory in Brazil: shut down by 8 p.m.



Li, Chuyi, et al. "A mixed-integer programming approach for industrial non-intrusive load monitoring." *Applied Energy* 330 (2023): 120295.

Simplicity is the ultimate sophistication

- **1. Model/data:** **simpler models** are good enough (~5% error) with properly set parameters
- **2. Economics:** there is a **simpler strategy**: to produce or not to produce

Evidence: BYD: 60MW almost each hour

A poultry feed factory in Brazil: shut down by 8 p.m.

For China, GPD/electricity consumption:
 $\$18T/9.6B(MWh) \approx 2000 \text{ \$/MWh}$

For Brazil, per ton poultry feed cost/electricity consumption:
 $\$100/0.15(MWh) \approx 600 \text{ \$/MWh}$

And avg electricity price is less than 100 \\$/MWh!

Electricity price can be 250 \\$/MWh!

<5%

≈40%