

常宁居：贵州避暑房微气候调控系统

贵州避暑房最凉的时候也最潮：九市州夏季夜间相对湿度普遍在 83% 至 94%，最该开窗降温的时候，外面的空气最湿。本项目把自然通风与空调放进同一个决策器，结合户型、逐时气象与居住者的舒适偏好，滚动计算出每个房间该开窗、该除湿还是该开空调，并把结论直接下达给设备。系统一年解三个问题：夏季除湿、冬季无集中供暖下的采暖择优、以及业主离开后长达六到九个月空置期的防霉值守。整套方案零施工、可后装到存量房，面向旅居出租与精装新交付房源。

项目信息	内容
项目名称	常宁居：贵州避暑房微气候调控系统
副标题	基于环境感知与气象预测的全屋自然通风优先温湿度调控系统
作者	蒋伟博 Ark、骨灰 Ashen
一句话	让房子自己判断此刻该开窗、该除湿，还是该开空调——老人不用遥控器，也不用学任何东西
应用场景	贵州避暑康养旅居房源；夏季有人住、冬季有人住、六至九个月空置期三态
核心技术	多区气流网络 + 模型预测控制 + 跨户共享的偏好学习
数据底座	自建户型库 16 个楼盘、125 个带毫米级尺寸标注的户型图；九市州逐小时气象各 23208 条
部署形态	零施工后装：红外 + 门窗磁 + 温湿度 + 反馈面板。直控空调与除湿机，门窗只发建议
政策依据	黔府办发〔2025〕22 号避暑房专项方案；《贵州省旅居地产设计导则》7.1.3「被动措施优先、主动措施优化」
关键词	避暑康养旅居 · 自然通风优先 · 微气候调控 · 多区气流网络 · 模型预测控制 · 适老无感交互 · 空置期防霉

目录

常宁居：贵州避暑房微气候调控系统

目录

一、背景

1.1 需求来源

1.2 问题分析

全年三态

决策空间与信息差

典型场景

1.3 相关工作

WindowMaster 的控制律

1.4 创新点

① 范围：自然通风与空调第一次进同一个决策器，而且是后装的

② 目标：一个目标函数同时装下住户的感受与运营方的账

③ 交互：不让用户控制工具，只让他表达感受

④ 场地：气象、户型与政策在贵州同时成立

⑤ 实证：数据可核，基准公平，结论可复算

1.5 结果一览

1.6 项目定位

一句话愿景

落点是「无感」

1.7 系统总览

二、状态与动作的分档

2.1 状态阶梯

2.2 计算与测量

2.3 动作阶梯

2.4 可观测与可控制

2.5 两梯的搭线规则

三、状态之一：房屋

3.1 户型库与字段提取

判据先立在政策原文上

字段提取全自动，不靠人工读图

3.2 拓扑分类与建模取值

拓扑必须可计算地定义

C 类庭院的定向核查

卧室通风能力是连续量，不是有无

建模取值

政策背书

3.3 开口尺寸与设备配置

开口面积不做计算机视觉

设备配置是静态状态，也是仿真的扫描维度

3.4 房屋的可观测量

周边环境的空白

3.5 房侧参数

四、状态之二：气象

4.1 要哪些量

4.2 数据源与质量核验

4.3 贵州气候特征

「避暑房」这三个字的量化依据

「凉而潮」被数据坐实

4.4 风向与入射角

南北轴主导，且频率优势在能量上被放大

入射角才是自变量

三条由此得到的推论

4.5 冬季与空置期的气象边界

集中供暖门槛

湿冷的湿不是绝对湿度高——冬季不需要除湿，反而偏干

冬季通风在物理上是个死结，除非做潜热回收

热泵在冬季有四成时间工作在最差工况

4.6 霉菌风险窗口

判据用模型，不用拍脑袋的阈值

空气相对湿度判据会得出完全错误的结论

按有没有人住拆开，这才是对生意有意义的切法

空置期冬季不是湿的问题，是冷的问题

论证边界

五、人的舒适感建模

5.1 人体热平衡的六个量

5.2 判据来源

5.3 自适应舒适带

5.4 风的净价值

5.5 哪些维度进目标函数

六、人的建模

6.1 个体差异的轴

6.2 五个人设与时相权重

6.3 分房间分配与共享空间裁决

七、正向模型

7.1 多区气流网络

核心假设有四条，而质量守恒不在其中

装了窗口风速传感器之后，方程组不再闭合——而这是好事

7.2 边的模型

缝隙渗透用幂律，这一条不能省

7.3 压差来源

通风工况分流

7.4 热平衡、水汽输运与组分耦合

水汽输运

二氧化碳与表面温度节点

7.5 执行器模型

空调不是一个功率数，是一个工作点

风扇不在这条方程里，而且不该在

新风的定位是兜底，不是主力

三条必须认下来的现实约束

7.6 体感层

7.7 参数标定与残差修正

八、反向求解

8.1 动作空间

每个动作在物理上是什么，决定它怎么进方程

三类动作：直控、建议、不可及

空调有四个旋钮，一个都不能省

「关门睡觉」是典型场景的物理瓶颈

冬季采暖是三类设备，不是一个「地暖」

动作空间是户相关的

8.2 目标函数

目标函数里必须有分时电价

优化的量与报数的量不是同一组

8.3 可行集

8.4 绕过房间的执行器

8.5 滚动时域求解

8.6 求解规模与慢快变量分层

8.7 下发前的限幅

九、人的反馈

9.1 三个循环与速率差

9.2 干预信号的性质

干预不是奖励信号，是对偏好的约束
信号是删失的，「干预次数下降」要分层看
带原因的反馈比裸指令高一个数量级

9.3 双层按钮

三组必须靠第二层拆开的歧义
面板：6 键 × 3 选项
三条设计约束

9.4 反馈到维度的归因

反馈落在够不到的维度时，三步走
反馈还能暴露认知偏差

9.5 学习器

目标函数就是预期抱怨率
跨户共享的低维流形
分母比分子重要
模型外的随机实验

9.6 冷启动与破冰期的控制交接

但入住第一天不该直接跑优化器
干预后的行为设计，比「怎么学」更直接决定信任
传感器失效怎么办
共享空间的偏好冲突要裁决
可解释性是降低干预率的手段，不是体验加分项

十、对照基准设计

10.1 三层参考系

10.2 规则控制器基准

10.3 指标

报数三件套，缺一不可
有两笔账，而且它们不是零和的
一个把两笔账合成可比量的指标
能耗对比必须在同一舒适约束下
舒适指标用外部标准，不用自定义量

10.4 比较协议

10.5 预注册

十一、实验与结果

11.1 最小实现与代码仓

11.2 标定顺序与可调参数

11.3 验证层次

三项解析基准，以及它们抓到的那个错

十个阶段跑出了什么

11.4 夏季结果

11.5 冬季结果

11.6 空置期结果

11.7 在线实时性

十二、局限与路线

12.1 待验证假设

已判定，不再是开放问题

仍然开放，且按优先级排

12.2 硬件侧的关键前置

12.3 暂缓清单

附录一：市场与商业化

附1.1 政策依据

附1.2 需求侧

附1.3 供给侧与企业结构

附1.4 分档产品与物料清单

成本压缩靠砍结构，不靠砍单价

附1.5 成本、收益与回本周期

三个战场的收益性质不同，不能相加成一个电费数

年运维与回收期

除湿机是 A 档里回报最高的一件硬件

报数规则

附录二：计算流体力学

附2.1 在计算与测量之间的位置

附2.2 室外绕流与风压系数

附2.3 室内流场与射流衰减系数

附2.4 工况定义、规模与算力

附录三：工程实现与部署

附3.1 状态契约与接口形态

附3.2 时延、缓存与流式推送

附3.3 服务器配置与部署形态

附录四：推导与实现细节

附4.1 边的本构与压差

大开口用孔口方程

大开口的双向流

风压

热压的显式密度形式

两条不由压差决定的边

附4.2 符号约定与接口契约

一组必须写死的符号约定

一组接口契约，不写死会静默出错

附4.3 时间积分与守恒前提

时间步与三层嵌套循环

一条必须自觉的前提

附4.4 空调的能力上限与限幅

能力上限与限幅

附4.5 学习器的模型阶梯与仿真用途

模型阶梯

仿真的三个用途，与一条禁令

附4.6 户型图字段提取管线

附4.7 气象取数的静默错误

附4.8 结论边界与已知缺陷

一、背景

1.1 需求来源

项目脱胎于贵州正在推的**避暑房**。省级有专项方案（黔府办发〔2025〕22 号），九市州 2025 年政府工作报告中至少 8 个有明确表述，安顺是唯一给「避暑房」挂了量化外销目标的那份。

这件事表面是能源问题，底下叠着**银发经济**。避暑房本身就凉快，大部分时间不需要空调；但住进去的老人仍有需求——更新鲜的空气、更合适的温度、更亮堂的光线。

影响这个决策的因素不止温度。

因素	说明
温度	最直接，但不是主导
风	取决于选址（建得高、四周钢筋水泥则风小）与户型通风（穿堂风；多房间多窗户时气流不是一对一关系）
房间隔热	决定热惯性，也决定预冷预热能转移多少负荷
光线	老人白天喜欢亮堂——眼部视觉细胞退化需要更强光刺激
居住者健康状况	风湿、高血压等对空调各有趋向性要求
时段	夜间风偏干燥、更好入睡；但老人睡眠浅、易起夜，睡着后切换通风状态存在风险

目标房源不是全省存量住房。全省城镇每百户空调保有量 2022 年末为 50.86 台，意味着多数房子没有空调；但本项目面向的是**旅居出租、精装新交付**的房源，那里有空调是常态。这个区分带来两条硬约束：

- 1. **空调降级成可选设备**——没有空调的房源也要能跑；
- 2. **空调在贵州存在的理由是冬天**（全省无集中供暖），我们接管的这台机器**冬天也在**。

系统的终态目标一句话：**不用遥控器、不用小爱同学，房间里所有跟气温相关的设备都被系统接管**。接管，不是提供一个更高级的遥控器。

1.2 问题分析

这套系统一年要面对三个不同的问题，其中有一个小时最难；而这三个问题住户自己都算不清。

全年三态

这套系统一年要解三个不同的问题，**决策器不变，变的是目标函数里各项的权重与符号**。

	夏季	冬季	空置期（6-9 个月）
自由变量	风	换气时机	湿度
风的权重	正——免费的冷量	负——开窗就是放走热量	中性，只服务防霉
主要矛盾	凉而潮	无集中供暖，全靠电	长时间无人，霉变
该证明什么	不该开的时候别开	开得准	守住不发霉

夏季的问题不是热。安顺 2025-07-01~08 共 168 小时的实算里，**偏热时数为 0**——房子一次都没热过，却有 57 小时偏冷。所以夏季能省的不是制冷电，是**别把空调开起来**；真正的全天候需求是除湿，夜间相对湿度 83-94%，九个市州全部如此。

冬季窗户不是不用开，是「**开得贵**」。换气需求（CO₂、湿度、霉变）冬天照样存在，密闭反而更严重——决策问题非但没消失，还更难了。贵州无集中供暖，冬季绝对能耗远大于夏季，节能空间主要来自设备选型与热回收，其次才是控制。

空置期是唯一不用和聪明用户比的战场——那段时间用户根本不在场。贵州旅居是半年生意，业主一年来 3 个月、社区空置 9 个月。**我们的系统是少数在那 9 个月里仍然在工作的东西。**

空置的是哪几个月，由客群决定。目标客群是**跨省候鸟**：夏季从重庆、成都、广东来贵州避暑，住约三个月，其余时间回客源地——客源地与目的地是成对的（重庆↔贵州、广东↔贵州、成都↔贵州）。这一条决定了三件事：

- **空置不是零散的，是春、秋、冬三季连续**——所以空置期的风险窗口要按季拆开算，而不是取全年均值；
- **入住与离开是已知变点，不需要检测**，系统可以按日历切换模式；
- **冬季那一档要分房源看**：纯候鸟房源冬天根本没人，冬季的采暖择优只对旅居出租与本地长住的房源成立；对纯候鸟房源，冬天要解的仍是防霉。

三个战场因此是：**除湿（夏）、供暖（冬）、空置期防霉（6-9 个月）**。前两个竞品都做，第三个没有人做。

一年三种模式，同一个决策器。夏天风是免费的，冬天风是要付费的，它替你算这笔账。

决策空间与信息差

普通房间没得选，避暑房有得选，「有得选」才值得建模。

	普通房间	贵州避暑房
目标	把温度压下来	保留 原生态居住体验
控制策略	规则极简：室外超过 30 度就开空调	要综合判断—— 有穿堂风时还要不要开？怎么控？
建模复杂度	低，几乎没得选	高，是一个多因素决策问题

这句话有数据支撑：全国城镇每百户空调保有量 150.6 台，而贵州城镇 50.86 台——空调在别处是背景设施，在贵州才是一个选项。贵州正处在「开与不开之间」的中间地带。

而「有得选」还不足以说明「算不清」。真正让它算不清的，是我们凭什么赢：

用户不知道的	后果
室外含湿量	体感「凉快」就开窗——而 21 度、相对湿度 90% 时开窗是把湿气灌进屋
未来两小时会不会下雨	安顺夏季降水时数近四分之一，开了窗要跑回来关
邻室温度与全屋换气量	分不清该开哪间的窗
自己房间的实际换气次数	「感觉不闷」不等于二氧化碳达标

不是我们比人聪明，是人拿不到那些数据。贵州「凉而潮」让常识规则系统性失效——这是我们的楔子。

典型场景

贵州最凉的时候也最潮。

九个市州夏季夜间相对湿度全部在 83% 至 94%，而最凉的六盘水与黔西南恰恰最潮，都是 94%。最该开窗降温的时候，外面的空气最湿。

这个场景还有第二重不利，来自建筑本身：户型库的不变量是「卧室一律单侧通风」。白天人在客厅，穿堂风策略有效；夜里人在卧室，那间房物理上没有穿堂风，只能开窗或开空调。而单侧通风主要靠热压驱动——白天温差小时几乎不工作，夜里温差大时才有效，正好对上避暑房的夜间场景。

第三重不利来自手上能用的设备：室外凉而潮时，温度早已达标、空调不该开机，于是唯一的除湿手段用不上；而开窗降温又会把湿气一起灌进来。开窗、开空调，两条路都到不了「凉且干」这个落点。

三重不利叠在同一个小时里，这就是典型场景。而这一小时最容易做错的事不是设备不够，是动作下反了。设想一个判断力不错的住户：他知道贵州夏天凉快，所以凉快就开窗，热了才开空调，人不在就关掉。这已经是常识能给出的最好策略，也是全文的主对手。但他判断「热」用的是空调遥控器上那个数——二十六度就该开机了。

而自然通风建筑的舒适上沿要宽得多：按自适应舒适带，安顺七月是 27.9 度（见 5.3）——他以为热的那些小时，其实不热。实算 168 小时，房子的偏热时数为 0，他却花了 3.19 度电去制冷，把偏冷小时从 57.2 拉长到 71.5，超标度时数（室温偏出舒适带的幅度乘以时间再累加，越小越好）是 83.1——比什么都不做的 62.5 还差（见 11.4）。

问题不在花不花电，在电花去做什么。同一段 168 小时，三种做法的耗电几乎一样，结果差很远：

电花在哪		耗电	超标度时数	偏冷小时
什么都不做	—	0	62.5	57.2
精明住户	制冷（按遥控器上的设定值判「热」）	3.19	83.1	71.5
我们	除湿	3.21	58.3	50.7

制冷降的是一个本来就不高的温度，所以它没有解决不适，只是把 57 小时的偏冷拉长成 71.5 小时。而凉而潮的难受来自湿，不来自温：把湿度拿掉、温度不动，超标度时数就落到 58.3。

同样三度多电，用来制冷是在解一个不存在的问题，用来除湿才解在点上。这一小时要判断的正是这件事——而判断要用到的数（室外含湿量比屋里高还是低、两小时后会不会下雨），住户拿不到。

1.3 相关工作

「该开窗还是该开空调」这件事，在这个交叉点上没有成熟商业方案，但相邻五个赛道各自都很成熟，且每个都只覆盖了问题的一部分。

赛道	代表	已经做到什么	留下的空白
商用建筑混合通风	WindowMaster (丹麦)	「开窗还是开机械通风」的联合决策，已商业化多年，含冬季模式	专用电动窗 + 楼宇自控；不进住宅、不管分体空调、不管空置期
住宅自动开窗	VELUX ACTIVE	把「什么时候开窗」自动化，下雨自动关	只管自家天窗；不控空调、不做多房间联合决策
空调后装智能化	Sensibo、 tado°	红外后装接管分体空调已可商用；tado 靠温湿度骤变推断开窗并停机	被动：发现开窗就关机，不主动决定该不该开窗
短租运营	PointCentral、 Minut	商业模式已验证：运营方已在为远程温控与空置期监测付费	卖监测与远程开关，不是决策；不碰自然通风
国内配件生态	领普、Aqara、 涂鸦	电动配件与后装网关是货架商品，开启比例可调	只做「设备 + 场景联动」，没有多因素联合决策

tado 的开窗检测本身就说明「窗与空调要协同」是被市场承认的真需求，只是没有人往前再走一步。空白的准确位置：没有任何一家把「自然通风 + 空调 + 占用 + 空置期值守」放进同一个决策器，并做成住宅可后装的形态。有联合决策的不进住宅，有住宅开窗的不管空调，有空调后装的对窗被动，有商业模式的不做决策，有硬件的没有大脑。

WindowMaster 的控制律

它是目前能拿到的、与我们最像的一套工业级控制逻辑。以下拆解来自官方数据表、终端用户手册与设施管理员操作指南。

- **双模态状态机，不是一条公式。** 夏季模式越热开越大；冬季模式开暖气阀、窗只偶尔短开换气。切换判据是「室内温度越过设定点 ± 死区」且「室外温度越过低温阈值」，另有低室内温度阈值强制留在冬季模式。
- **设定点是「基准 + 偏移」。** 基准设定点叠加供暖偏移与通风偏移（待机 / 夜间各一套），另有最小通风设定点兜底。
- **二氧化碳不是独立回路，而是改写设定点。** 浓度越高，实际通风设定点被下调，窗开得更大。
- **冬季脉冲通风。** 由二氧化碳阈值触发，开度由二氧化碳与湿度相对各自阈值决定，并被**冬季最大换气次数硬性限幅**；低于室温阈值不脉冲——冷了就不换气，宁可二氧化碳高。若多次脉冲仍不降，自动切换为持续微开的涓流通风。
- **建筑状态机：** 占用 / 安防 / 空置，叠加夜间，每个状态对应不同的最大开窗位置，由周计划表切换。
- **安全限位取最严。** 舒适上限、安防上限、风速上限、雨天上限、占用状态上限并存，永远以最严格的那条为准。
- **手动覆盖 30 分钟后自动回到自动模式。**

这套控制律没有强化学习也没有模型预测控制，全套是**阈值 + 状态机 + 计划表**的规则控制，而它已经卖进从幼儿园到购物中心。由此得到两条判断：**规则控制在这个问题上是很强的对手**；**「我们上了强化学习」本身不构成优势**。真正的基线必须是一台调优过的规则控制器，而不是 PID 这种稻草人。

这是个利基市场，不是大赛道。 这家 1990 年成立、2020 年上市的领导者做了 35 年，2025 年营收仍只有约 2.7 亿人民币量级、税后净利接近于零（详见附1.3）。它同时给出两个问题的答案：**为什么大玩家不进住宅**（单点价值低、渠道成本高、楼宇自控形态落不了地），以及**我们凭什么进得去**——中国有货架级的低价电动配件与后装网关，而我们的买单方是集中管理成百上千套房的旅居运营方，渠道成本被摊掉了。这两条缺一不可。

1.4 创新点

空白的位置很准，但不是「没人做过」：

商用建筑有人做联合决策，住宅有人管开窗、有人管空调、有人管远程运营——四块拼图都存在，但没有人把它们拼起来装进中国的避暑房。

五条，按**决策的范围、目标、交互、场地、证据**排列。

① 范围：自然通风与空调第一次进同一个决策器，而且是后装的

相邻五个赛道各自成熟，空白的位置很准：有联合决策的不进住宅，有住宅开窗的不管空调，有空调后装的对窗被动，有商业模式的不做决策，有硬件的没有大脑。**联合决策与后装形态是同一个空白的两面**——做联合决策的那家要专用电动窗与楼宇自控，落不进存量房。

所以形态上的判据是**精度随传感器密度单调上升，而不是装齐了才能用**：零传感器时用通用先验与仿真给装修前的配置建议；门窗磁加温湿度就能闭环跑多区气流网络；再加窗口风速风向传感器，孔口方程、流量系数、风压系数、风速廓线换算整条链被跳过，方程组由恰定变超定，残差可自校验。**存量房不会为了一套控制系统先装修一遍。**

② 目标：一个目标函数同时装下住户的感受与运营方的账

家电行业的默认假设是「空调是工具、用户是操作者」——工具不需要知道谁在用它。而一旦不建模人，「该不该开」这个问题根本不存在，也就不需要任何决策，只剩执行。所以第一步是把人放进目标函数：个体差异写成可计算的几条轴（温度偏移、风速与直吹敏感度、双向的湿度敏感、洁净度、温差冲击、垂直温差），落成人设，再分房间分配、对共享空间显式裁决。

第二步是把账也放进同一个目标函数。同类产品要么卖运营方的省电与远程运维，要么卖住户的舒适——**两个受众各自有产品，没有一个把两者写进同一个代价函数。**我们的报数是三件套：能耗（按分时电价折成钱）、同带宽下的超标度数、动作次数。

这两笔账不是零和的，而这正是复合目标的价值所在：舒适只有一维时，提升舒适的唯一办法是把温度推得更狠，必然费电；舒适一旦是多维的，就存在「某一维变好、能耗还降了」的方向，而单维控制器结构上表达不出那个方向。目标函数里每多一个舒适维度，帕累托改进的区域就长大一块。

同一套模型还能反过来做装修前的配置推荐——该装几台空调、装哪间、要不要吊扇——**那是给物业与开发商的决策，不需要任何用户数据**，客单价与决策权都高于住户侧控制器。

③ 交互：不让用户控制工具，只让他表达感受

智能家居这些年的交互演进，从遥控器到 App 到语音到场景联动，**本质都是同一件事：把下达指令这个动作做得更方便。**用户仍然要知道自己想要什么参数、并把它说出来。

我们把这件事反过来：用户唯一要做的是表达「我现在哪里不舒服」，剩下的由系统观察与推断。反馈走一块 18 格面板（6 键大类 × 3 键归因），先把一次抱怨定位到维度与方向，再进学习器改写权重。**控制器跟踪的不是设定值，是预期抱怨率**——传统反馈把测量值送回控制器、温度偏了就纠正，回去的是误差；我们回去的是人的感受。

这条范式换得成立，是因为通风是意图无关场景的典型。用户对「该开多大窗」没有意图，只有对结果的偏好；而「放什么歌」「开哪盏灯」用户有明确意图，所以那些场景里语音与 App 成立。**在意图无关的场景里，任何要求用户表达意图的交互都是负担，终局形态只能是无感接管。**

「无感」在本文里是可检验的约束，不是口号：直控只有空调与除湿机、门窗只发建议、手动覆盖后 30 分钟自动回收、夜间卧室禁动、最小动作间隔、干预无条件立刻服从。

成功标准不是老人会用它，而是老人根本不需要意识到它存在。

④ 场地：气象、户型与政策在贵州同时成立

气象——问题在这里最难，自然通风也在这里最有用。九个市州夏季夜间相对湿度全部落在 83% 至 94%，而最凉的六盘水与黔西南恰恰最潮，都是 94%：最该开窗降温的时候，外面的空气最湿。风的一侧则是运气：南北朝向住宅夏季夜间的正吹率贵阳 85%、安顺 80%，按风能计权后贵阳一个南向扇区就占八成风能，静风时数不到 3%——主导风向恰好就是有效风向。同时降水时数占 15% 至 27%，安顺夏季 24%，开了窗要跑回来关的概率接近四分之一，这正是规则控制器处理不了而前瞻式优化天然能处理的一类事件。冬季反过来：全省无集中供暖，热量全走电表，而贵阳 43%、安顺 39% 的冬季时数落在热泵结霜窗口，室外含湿量只有 4.5 克每千克、加热到 20 度后相对湿度仅剩 31%。

户型——不利的那一面才是问题本身。自建户型库 16 个楼盘、125 张毫米级标注的户型图给出一条不变量： $\leq 90\text{m}^2$ 的目标户型里，卧室一律单侧通风。白天人在客厅、穿堂风策略有效；夜里人在卧室，那间房物理上没有穿堂风。而单侧通风主要靠热压驱动——白天室内外温差小时几乎不工作，夜里温差大时才有效，正好对上避暑房的夜间场景。主力是三室两厅（占 45%），意味着老人与年轻同住者的冲突发生在不同房间，正好对上分房间的动作空间。

政策——窗口正在打开，而且导则点到了我们这一格。省级有避暑房专项方案（黔府办发〔2025〕22 号），九市州 2025 年政府工作报告中至少 8 个有明确表述，安顺是唯一挂了量化外销目标的那份。省住建厅《贵州省旅居地产设计导则》7.1.3 要求节能设计遵循「被动措施优先、主动措施优化」，6.3.2 要求户内门窗位置宜有利于自然通风，8.3.4 要求宜设室内环境监测传感器并与机电设备联动。我们做的就是**把 7.1.3 这条原则自动化**——而导则 8.3.1 要的还只是「一键节能或度假模式」，创新点正好立在这一格的差距上。

这三件事在别处不同时成立。而同一个决策器换套参数就能复制到重庆、云南、利川——重庆已建同类项目 210 余个、约 2300 万平方米，因地制宜与可复制不冲突。

⑤ 实证：数据可核，基准公平，结论可复算

数据底座可核。自建户型库 16 个楼盘、125 张带毫米级尺寸标注的户型图，尺寸链提取拿早前人工录入值当验证集，**128 条真值命中 118 条，92%**；气象是九市州逐时全年各 23208 条公开再分析数据——同一份输入，任何人都能复现。

基准公平，结论可复算。参考系分三层，主对手是调优过的规则控制器而不是 PID 稻草人：给基线的调参预算不少于给自己的，且只有赢过参数网格里最好的那一组才算赢。报数三件套（能耗、同带宽下的超标度时数、动作次数）缺一不可——只报能耗的节能数字是要流氓，关掉空调最省电。判据在跑之前就预注册，所有对比共用同一个模拟器、同一段气象、同一套占用日程，只报相对量——这组数可以被第三方重跑。

而 18 格反馈面板同时是状态阶梯的分层验收清单，每升一档状态都必须有格子能消费它——从真实用户抱怨设计出来的东西，独立地生成了同一张建模路线图。

护城河的位置：不在算法，在后装形态、在中国住宅户型库、在旅居空置期这个别人不碰的场景。

1.5 结果一览

三笔账都跑在安顺的真实气象上，用标准的长期评价准则计分——夏季取 7 月 1 至 8 日的 168 小时，冬季取 1 月 5 至 20 日的 360 小时，空置期算全年。风压系数尚未经本地实测标定，因此只报相对量，不引绝对值。

战场	对手	结果
夏季	精明住户：凉快开窗、热了开空调	超标度时数 58.3 对 83.1 ，能耗 3.21 对 3.19 kWh—— 四档里唯一边际回报为正 ，对主对手是干净的帕累托改进
冬季	同上，冬季与恒温常开重合	省 19.4% 的电 ，超标度时数差 6 倍；每度电买到的舒适多 19%
空置期	无竞品	霉菌暴露段（连续 ≥ 72 小时）全年 1160 小时，空置段占 575 小时 ；除湿机覆盖 55% ，缺口全在冬季那 166 小时

三条必须跟着数一起报的话：

- **夏季省的不是制冷电**。168 小时里偏热时数为 0，房子一次都没热过——**能省的是「不该开的时候别开」**，以及避免无谓的冷凝除湿。
- **冬季那一档是「省钱优先」的落点，不是最优舒适**。往哪边走取决于能耗权重，而那个权重目前是拍的（详见 11.5）。
- **空置期不省电，是花电买防霉**。多数业主的实际做法是「全关不管」，相对它我们多耗一百多度电，收益是避免家具布草莓变——**这条线不并进节能率**。

1.6 项目定位

常宁居：贵州避暑房微气候调控系统

基于环境感知与气象预测的全屋自然通风优先温湿度调控系统

常宁即常年安宁，「居」点明对象是这间屋子，不是老人，也不是系统——**这个场景的价值词是「安静」**。

定位句里的每个限定词都对应一项能力：

修饰语	依据
环境感知	传感基线：温湿度 + 门窗磁 + 占用
气象预测	规则控制器结构上做不到前瞻——相对基线最硬的一条预期赢
全屋	多区气流网络。竞品按区独立，跨房间穿堂风不在其模型里
自然通风优先	行业空白的准确位置——第一次把自然通风与空调放进同一个决策器
温湿度	不能只说温度，湿度是唯一的差异场景
调控	门窗只能建议、不能直控，说「控制」是过度承诺

一句话愿景

让房子自己判断该开窗还是开空调——老人什么都不用学，什么都不用管。

「判断」不是「执行」。基础档免施工，窗与门是建议动作，直控只有空调与除湿机。愿景说的是它替你想清楚，不是它替你动手开窗。

它对三类使用者分别意味着什么：

受众	一句话
总述	贵州最凉的时候也最潮——这间房子自己算得清，此刻该开窗、该除湿，还是该开空调。
运营方	一年里有大半年没人住——这间房子自己顾着通风、除湿、别发霉。
老人 / 家属	不用遥控器，不用喊话，房子自己知道该开窗还是该开空调。

落点是「无感」

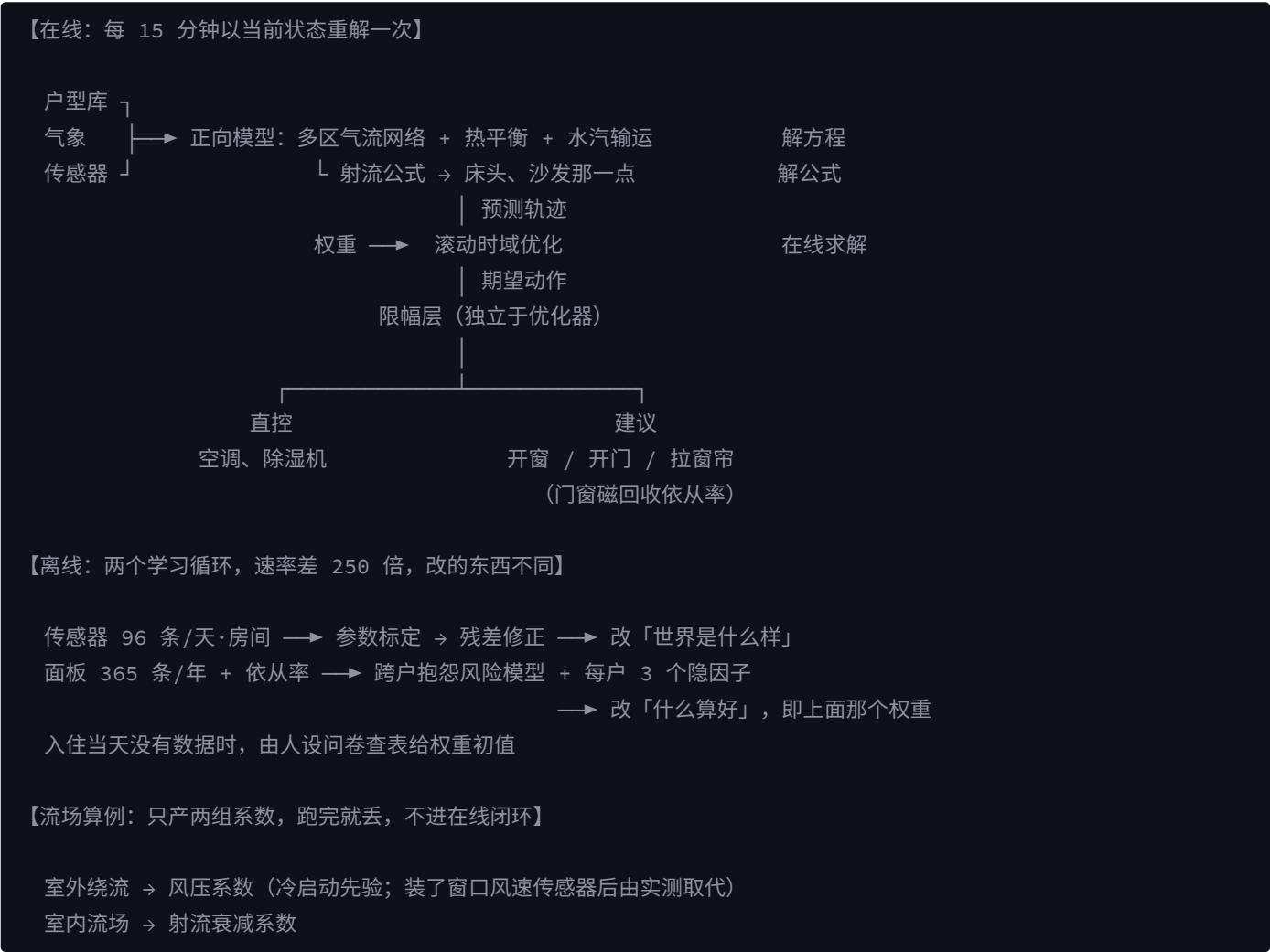
语音交互不是答案。老人对人工智能没有体感，跟音响说「帮我开空调」，他的反应是「我还不如自己拿遥控器」——他不是不愿意动，是不想把事情弄复杂。语音仍然是一次操作，而这个场景要取消的正是操作。

系统的成功标准不是老人会用它，而是老人根本不需要意识到它存在。

1.7 系统总览

系统分四层，两条学习通路贯穿其中：物理侧从传感器学这套房子的真实参数，偏好侧从反馈学这户人的权重。

层	做什么	用什么	数据从哪来
房间层	各房间温湿度与换气轨迹	多区气流网络（房间为节点、开口为边）+ 能量守恒	每房间每天 96 条传感数据在线标定
体感层	床头、沙发那一点的风速与温度	射流公式 + 少量流场算例标定	流场算例与床头实测
决策层	每房间的开窗度、门、空调	模型预测控制，滚动时域优化	每 15 分钟以当前状态重解
偏好层	这一户人的偏好权重	跨户抱怨风险模型 + 每户 3 个隐因子	面板反馈与依从率，跨住户累积



结构静态、参数慢变、状态每步重解。学习不在控制回路里，而在它两侧：物理侧改「世界是什么样」，偏好侧改「什么算好」，两者喂给同一个优化器但永不交叉（分工见 9.1）。

二、状态与动作的分档

系统的能力由两个阶梯决定：**状态阶梯**说模型能表示什么，**动作阶梯**说能下达什么。两者不是各自独立地往上爬——它们**必须成对推进**，本章最后一节给出那条约束。

2.1 状态阶梯

档	内容	解锁什么
S0	单区集总——整户一个温度、一个含湿量	—
S1	多区集总：每房间温度、含湿量 + 气流网络	分房间温湿度、换气量
S2	加二氧化碳、加表面温度与露点。 仍是集总	新风动作、结露
S3	加房间内粗分布：占据点风速、垂直温差	风扇、直吹、脚冷
S4	流场	标定风压系数

现状在 **S1**，而 **S1** 已经够用。它能算出每个房间逐时的温度、含湿量与换气量，这覆盖了夏季除湿、冬季供暖、空置期防霉三个战场的全部主要动作。S2 与 S3 各自解锁一批新的可控设备，但都不是主线的前提。

2.2 计算与测量

每一档状态都有两条获得路径——算，或者测。两条互为替代。

档	「算」	「测」	谁赢
S1 边界流量	气流网络 + 风压系数	窗口风速风向传感器	测
S2 组分	输运方程	二氧化碳、表面温度传感器	互补
S3 房间内分布	射流公式 + 衰减系数	床头风速计	算
S4 全场	流场计算	粒子图像测速	算，但在线用不上

(S1 与 S3 的「算」都需要流场算例先标定系数；S4 的「测」是实验室级手段。)

判据不是「能不能测」，是该档传感器的成本与侵入性。S1 那一档要的门窗磁与窗口风速计便宜、隐蔽、本来就要装——测赢；S3 那一档要的床头风速计贵、扰人，而且**低速段精度最差**，偏偏夜间就在低速段——算赢，但不是永远。

窗口风速风向传感器改变了一件大事。 流场计算存在的唯一硬理由是风压系数，而装了这个传感器之后，这个理由在两种通风场景里分别失效：单侧通风的卧室是典型场景，实测热压占 64.6%、风压仅 14.3%（736 个夜间小时的中位数），**本来就不需要风压系数**；穿堂通风的公共区风压主导，但那里是单向流、流速较高，**洞口测速直接给出流量**。

更关键的是它绕过了整条参数链。窗开着时，流量 = 洞口平均流速 × 面积——孔口方程、流量系数、风压系数、风速廓线换算全部被跳过。山地地形下那条廓线换算的不确定性可能比风压系数本身还大，这一条也一并消失。

由此，气流网络从「求解」升级为「求解 + 校验」：部分边的流量成为实测值，方程组超定，残差不为零就说明模型错了。这是本项目长期缺乏地面真值的直接解药——原来只有二氧化碳衰减法的两个点，现在是逐时、逐窗的连续锚点。

流场计算因此只是冷启动先验，不是精度上限：首栋楼装传感器之前用它，未装传感器的楼盘用它，以及 S3 的射流衰减系数仍然只能靠它。详见附录二。

S1 与 S3 之间是串联，不是并列：



S3 那一档有两个并列的量：射流衰减系数管动量（人被吹到多大风），换气效率管传质（进来的空气有没有真换到人待的地方）。两者由同一批室内算例一起产出。

2.3 动作阶梯

术语：下文的执行器指系统能直接下令、且下了令就一定生效的设备——空调、除湿机、风扇这类插电即可远程控制的。手动门窗不算：系统只能建议人去开，开不开由人决定（见 2.4）。

档	内容
A0	全屋一个开关
A1	每房间窗开度（理想化，真实存量房不成立，见 2.4）
A2	加门
A3	加空调分房间 / 设定温度 / 模式 / 风速
A4	加除湿机
A5	加风扇
A6	加遮阳、新风、地暖

把动作放到「可控性 × 建模难度」两根轴上：

建模难度低（S1 够）		建模难度高（需 S2/S3）
可控制	空调（红外，现成）——唯一两轴都通的	风扇（插座极便宜，但需 S3 才有收益）
可观测	窗、门、遮阳——贴磁即可，升到可控要施工	辐射采暖、地暖、新风

建模最容易的三个动作——门、窗、遮阳——恰好都卡在「可观测但不可控」：能算准影响、能知道状态，就是不能自己动手。

除湿机排在风扇前面，尽管风扇更便宜。除湿机是继空调之后第二个「两轴都通」的动作——含湿量已经在 S1 的状态里，插座即可控；而且它是「凉而潮」工况下现实可得的解耦执行器：窗把温度与湿度物理耦合在一起，空调只在制冷时除湿，而「凉而潮」时空调根本不该开机。风扇要等状态升到 S3，除湿机不用等。

2.4 可观测与可控制

真实避暑房里窗是手动的、门是手动的、地暖多半没装。「想控什么就能控什么」这个假设不成立。

所以门窗只设两档，且两者完全同构：

档	在模型里是	成本	是否默认
可观测	外生输入——已知边界条件	贴一个磁传感	基线，所有可开启门窗默认具备
可控制	决策变量——进优化候选	要施工	可选，业主 / 精装版才有

「不知道开着还是关着」不作为一个档位——传感器本来就要装一批，多贴一个门窗磁的边际成本接近于零。

这两档横跨状态与动作的边界，因此是独立于前两个阶梯的第三根轴：可观测是认识问题，可控制是干预问题。它有序，可控蕴含可观（控制器至少知道自己下了什么令），反之不然。

它带来一个很实的推论：建议动作从第一天起就是闭环的。系统建议「开窗」，门窗磁立刻知道人有没有照做——依从率第一天可测。这是同类产品普遍缺失的一环：只发建议而不知道建议有没有被采纳，就无从谈优化。

电动房门不做——防火疏散、夹伤老人、成本，三条都不划算。窗也在建议一侧：电动开窗器要施工，而本项目的定位是无需专用电动窗、可后装到存量房。

2.5 两梯的搭线规则

一个动作值得加入，当且仅当当前状态档能预测它带来的差异。

这一条约束定所有搭线，两条推论：

推论	说明
动作分辨率 ≤ 状态分辨率	不能对模型分不清的房间下达独立动作
状态可领先，动作不可领先	领先的状态仍有价值（预警、建议、可解释）；领先的动作是纯负收益——模型只看得见它的成本、看不见它的收益，优化器永远不会选它

据此得到搭线表：

动作增量	最低状态档	状态不够会怎样	能否单独加
门、空调分房间 / 设定温度 / 制冷除湿模式、遮阳	S1 （已有）	—	可以
新风模式	S2 ，需二氧化碳	只剩「耗电 + 带进湿热」， 纯负收益	不行
升表面温度除结露	S2 ，需表面温度	只能降空气湿度， 对结露无效	不行
风扇	S3 ，需占据点风速	只剩耗电、换气量不变， 纯负收益	不行
地暖	S3 ，需垂直温差	与空调制热在模型里完全等价，无从区分	不行

验收判据是硬的：每升一档状态，反馈面板上必须有格子能消费它。面板共 6 键 × 3 选项 = 18 格，正好构成分层验收清单——S1 消费 6 格，S2 再加 3 格，S3 再加 6 格，剩下 3 格是纯规则响应。面板是从真实用户抱怨设计出来的，却独立地生成了同一张建模路线图；不是我们想建什么，是用户会按什么。

由这条约束反推，产品形态只有两档——区分它们的只有两件事：要不要施工、状态档到哪。

档	直控动作	建议动作	状态	前置
A 档·免施工	空调（先只主卧）+ 除湿机	开窗 / 开门 / 拉窗帘	S1	红外 + 门窗磁 + 温湿度 + 面板， 零施工
B 档·装修期	加电动窗 / 电动窗帘 / 新风	—	S1	要施工，业主决策

A 档的直控只有空调与除湿机——而这两个恰好是仅有的能把温湿度解耦的执行器。 二氧化碳传感器、毫米波、吊扇都是随时可加的单品，不构成一次采购决策，因此不设档。

三、状态之一：房屋

房屋这一侧要回答的是：**这套房子在模型里长什么样**——房间怎么连、开口有多大、装了什么设备、哪些量能被测到。数据底座是一个自建的户型库：**16 个楼盘、125 个带毫米级尺寸标注的户型图**。

3.1 户型库与字段提取

判据先立在政策原文上

《安顺市促进房地产市场止跌回稳十五条措施（试行）》里，90 平方米出现两次，**含义不同，不能混用**：一处是**项目级比例**——设计方案中单套建面 $\leq 90\text{m}^2$ 的套数占比须达 60% 以上，才可能被认定为避暑康养旅居项目；一处是**户型级门槛**——认定后，每户建面 $\leq 90\text{m}^2$ 的车位配比降至 0.5。

所以 90m² 不是准入上限。项目只要 $\leq 90\text{m}^2$ 的套数占 60%，剩下 40% 可以任意大； $> 90\text{m}^2$ 的户型完全可以是旅居产品。据此，户型级只分三档，**没有「排除」档**——面积大不构成排除理由：

档位	定义	主库数量
激励型	$\leq 90\text{m}^2$ 且 两室两厅及以上 且 使用面积达导则下限	22
小户型	$\leq 90\text{m}^2$ ，但房型或使用面积不足下限	13
大户型	$> 90\text{m}^2$	90

楼盘级只出证据等级，不下认定结论。认定需要套数占比、土地时点、政府裁量三件事，本库一件都拿不到，因此只标注证据强度：政府点名或公示为 E1（3 个），代理占比达标为 E2（0 个），含 $\leq 90\text{m}^2$ 户型为 E3（13 个）。**开发商自称「康养/旅居」不作为证据**。

样本单位是户型，不是楼盘。一个 $\leq 90\text{m}^2$ 的两室两厅户型本身就是有效样本，与所在盘是否被认定无关。

一条供给事实：全库 342 个抓到的户型里 $\leq 90\text{m}^2$ 的只有 35 个，占 10%，**全省只有一个盘的代理指标过 60% 线**。这解释了政策为什么要专门出优惠「鼓励房开企业量身打造」——**目标房源现在是稀缺品，不是存量品**。

字段提取全自动，不靠人工读图

户型图不是效果图，**房间网格可按毫米还原**——开间链与进深链首尾相加能对上，标注是自治的。全库走原生文字识别批量提取，**121 张图中 105 张抽到完整尺寸链，耗时 162 秒**；拿早前人工录入的 9 个户型做验证集，**128 条真值命中 118 条，准确率 92%**。同一批图人工逐张读只能读约 20 张、耗时 15 分钟。

印刷体信息一律走自动识别，人工读图只留给识别拿不到的东西——墙线、窗洞位置、房间拓扑。

一条直接可用的意外收获：**采光面长度就是外墙开窗立面的总长度，是物理模型第一层要的量，而开发商已经算好印在图上了，不用量像素。它与建筑面积不正相关——80m² 的户型采光面 11.2 米，反而大于 99m² 的 9.5 米，由面宽进深比决定，必须单独作为特征。**

列表页与户型图对不上时，一律以图为准。 库里已发现多起源站标签错误——把「三室两厅两卫」写成一卫、把 113.13m² 漏掉首位写成 13.13m²、把 D1 户型标成 D4。全部按图修正并留痕。

识别管线本身（档位约束、旋转轮次、包围盒聚类、质量检查的两条判据）见附4.6。

3.2 拓扑分类与建模取值

拓扑必须可计算地定义

目测归纳的「客厅对流 + 卧室全单侧」在 125 张图上并不成立。拓扑必须有可计算的定义：

房间.立面数 = 该房间开口所在的不同立面数 1 = 单侧 ≥2 = 可对流

拓扑类 = (客厅立面数, 卧室立面数多重集)

A 客厅≥2 且 卧室全=1 B 客厅≥2 且 至少一间卧室≥2

C 户内有庭院/入户花园 D 客厅=1 (全单侧)

按此定义，**A、B、C 三类在库里都有实证**。其中两条要紧——太阳谷 80m²、恒力 84m² 的楼层平面图显示它们位于楼板端头，**这是 ≤90m² 的建模目标，不是大平层**。端头户在建模目标里占比不低，A 类不能当唯一拓扑写死。

C 类庭院的定向核查

自动识别一次扫出 **17 条庭院类标记**，横跨 5 个盘，其中包括一个 80m² 的激励型户型。定向抽图核查了全部四种产品形态：

形态	位置	给谁开口
入户花园	入口侧，紧邻玄关、厨房、餐厅	玄关、餐厅
空中院馆	外墙侧，玻璃围合的半室外小房间	客厅
前庭 / 后院 / 中院	户型两端	两端房间，本质同双阳台

17 条里，被房间三面包围的真·内天井一个都没有。 三种形态没有一个给卧室提供第二个开口——它们全部挂在公共区或户型两端。

因此得到整轮拓扑排查的净结论：

- 对 ≤90m² 的建模目标，「卧室单侧」可以当作不变量处理。
- 物理模型里，C 类只是在客厅或餐厅节点上多挂一个半室外缓冲区节点，不改变卧室的接线。
- 真正给卧室第二个开口的只有 B 类端头户，目前只确认 1 条，且不在建模目标区间。

这条不变量有一个直接而致命的推论：**白天人在客厅，穿堂风策略有效；夜里人在卧室，那间房物理上没有穿堂风，只能开窗或开空调。典型场景恰好落在拓扑最不利的那间房里——这不是缺陷，这是问题本身。**

规范从反面印证了它：设计导则只要求「卧室、起居室、厨房应有直接采光」，**只要求每间有一个窗，从未要求卧室双侧通风**。卧室单侧是规范允许的常态，不是个别设计缺陷。导则同时建议「小卧室、大厅室」——**对流的客厅更大、单侧的卧室更多，拓扑被政策进一步强化。**

卧室通风能力是连续量，不是有无

单侧通风的有效进深上限约为净高的 2 至 2.5 倍，按净高 2.7 米算约 6.75 米。星火家园 9 个户型的最大单跨实测在 3.90 至 4.90 米之间，折合 1.44 至 1.81 倍净高——**9 个全部通过，余量很大**。所以卧室通风能力应建成进深与净高之比的连续函数，而不是能不能通风的布尔量。

单侧通风主要靠热压驱动：白天室内外温差小时几乎不工作，夜里温差大时才有效——**正好对上避暑房的夜间场景。**

建模取值

- **面积**：以 22 个激励型户型为主目标
- **层高**：导则要求公寓 ≥ 3 米、净高 ≥ 2.4 米；实测某盘层高 3.0 米
- **得房率**：0.78（实测 0.79 至 0.83，取保守值）

样本量仍小，结论按「方向可信、参数待补」使用。

政策背书

省住建厅《贵州省旅居地产设计导则》7.1.3 明确要求旅居地产节能设计遵循「**被动措施优先、主动措施优化**」，充分利用天然采光与自然通风；6.3.2 要求户内门窗位置**宜有利于自然通风**；8.3.4 要求户内**宜设室内环境监测传感器，与相关机电设备联动**。

我们做的就是**把 7.1.3 这条原则自动化——让房子自己判断什么时候该用被动、什么时候必须上主动**。导则 8.3.1 要的是「一键节能或度假模式」，而我们做的是无感接管，**创新点正好立在这一格的差距上。**

导则条款多用「宜」，非强制；且它印发时间晚于库中多数楼盘，**不能拿它倒推已建成楼盘的实际参数。**

3.3 开口尺寸与设备配置

开口面积不做计算机视觉

开口面积是孔口方程里唯一的可控量——「开多大窗」这个动作就是它。但不走视觉检测：户型图是彩色渲染图不是工程线稿，各开发商画法不同，跨盘做稳健的窗洞检测投产比不划算。

改用**开间反推**：尺寸链已经给出毫米与像素的标定关系，房间开间已知，按规范取窗台高 0.9 米、窗高 1.5 米，配合房间功能与朝向即可参数化出开口面积。**这是近似，误差边界写在物理模型一章。** 回头做视觉检测的触发条件是：标定后残差中，开口面积的贡献超过其他参数——在那之前不做。

物理模型要的几何量，以及每个量有多硬：

几何量	从哪来	性质
房间开间与进深	尺寸链，105 张图已提取	实测——毫米级标注，人工真值验证 92%
房间体积	尺寸链还原多边形 × 净高	实测 × 规范取值
开口面积（每扇窗/门）	开间反推：窗台高 0.9 米、窗高 1.5 米，配合房间功能与朝向	参数化近似——绝对值有系统误差，所以只报相对量
开口高差	图上没有，按规范取	假设
房间邻接与门宽	图上门洞	人工读图（识别拿不到墙线与拓扑）
外墙长度 / 朝向	开发商已算好印在图上	实测，直接可用
净高	导则下限 + 详情页实测	规范 + 实测

这张表是附4.8 那几条结论边界的来源：开口面积与开口高差是全表最软的两项，所有对比因此共用同一套开口参数，只报相对量。

设备配置是静态状态，也是仿真的扫描维度

有的房间有空调，有的没有。这类量运行时是常量，仿真时是要遍历的维度。哪些配置进状态，用状态阶梯的分辨率判据来判：

配置维度	S1 能分辨吗	进不进
空调台数 + 装在哪个房间	能，热源挂在哪个节点	进——它同时定义了动作空间
窗是否电动、门是否常开	能	进
有无风扇	不能，S1 无风速	等 S3
空调挂哪面墙 / 送风角度	不能，集总模型无空间分布	不进，等 S3

「空调位置」在 S1 下不可分辨，现在放进状态是自欺——状态里不该有模型分辨不了的量，它只增加维度、稀释数据，不改变任何决策。

主力配置分四档：无空调 / 仅客厅 / 客厅加主卧 / 全屋。它与户型、城市**正交**，作为仿真的扫描维度。由此得到一个额外的产品形态：**仿真可以反过来做配置推荐**——「这套房该装几台空调、装哪间、要不要吊扇」。这是给物业与开发商的、装修前的采购决策，不需要任何用户数据，客单价与决策权都高于住户侧控制器。

3.4 房屋的可观测量

全项目的传感需求合成一张表，这就是**传感基线**：

传感器	对应哪个状态	为什么必需
温湿度（每房间）	S1 的温度与含湿量	状态变量本身
门窗磁（每扇可开启门窗）	每条边的开度	气流网络的边界条件 ——没有它，多区模型的输入是猜的
占用（毫米波或红外）	是否有人、是否清醒	暴露量的分母 ，反馈统计的信息量大半在这里
二氧化碳（至少客厅 + 主卧）	S2	解锁新风动作与面板「闷」那一格
窗口风速风向（每扇可开启窗内外）	洞口流量	绕中风压系数与风速廓线换算 ；单侧洞口需上下两个测点
表面温度	S2	结露判据；红外或接触式，可选
室外气象	边界条件	不必自建 ，用公开数据

三室两厅约 17 个点位。

门窗磁比马达更该先买。 它一次给三样东西：气流网络的边界条件、建议动作的依从率、以及**非删失的隐式反馈**——人睡着了不会按按钮，**但睡前关不关窗一定留下记录。**

传感基线还有一个自检副产品：**气流网络可以反演**——温湿度轨迹能倒推总开口面积。反演值与门窗磁读数长期不符，就说明参数标定有问题。

低速段选型要小心。 满开的穿堂洞口流速在 0.6 米每秒量级，而机械杯式风速计的启动阈值恰好就在这附近，**选型必须走超声或热线**，成本与功耗待核。

周边环境的空白

楼间距与邻栋遮挡目前完全没有进模型。 气流网络的边只有拓扑邻接，**不带长度**；流场算例的几何是单栋楼加立面细节，没有邻栋。

这是个真缺口，不是可以忽略的精度问题——**需求侧点过名**：影响决策的因素清单里，选址是明确一条，「建得高、四周都是钢筋水泥则风小，空旷地带则风大」。需求要它，特征清单里一个变量都没有。现有特征里只有楼层与总层数这个垂直维度，水平维度是空白。

补它的成本可能很低：库里有两个盘的图带航拍规划总图并含指北针，**楼间距与邻栋相对方位在总平图上可直接量**，与尺寸链标定是同一套方法。**先做便宜档**——把遮挡做成开阔 / 半遮挡 / 密集三档的离散特征，或用楼间距与楼高之比作连续量，直接并进已有的敏感性扫描，**看它对换气次数的影响量级。扫描之前不投入邻栋几何。**

3.5 房侧参数

有一类参数既不属于人，也不是几何常量：**它属于这套房子，需要在运行中标定，且跨住户累积**。风压系数是最典型的一个——它不是状态，是**房侧资产**。

先验因此必须拆成房侧与人侧，而房侧今天就能算：

参数	是什么	先验来自	今天有没有
基线抱怨率	这个房子在这个气候下多容易出问题	户型 + 气象，可仿真	今天就能算
个体敏感度	这个人多敏感	人设问卷	需要真人

同样是「怕潮」的老人，住单侧通风卧室与住端头户，抱怨率天差地别——**差的是房子不是人**。而**121 张户型 × 9 个市州 × 23208 小时气象**，可以离线全算，零用户数据。

索引是四维的，其中「城市」承载两件事：气温湿度降水序列，以及**风玫瑰**。朝向经**正吹率**这一个标量与城市耦合，压成标量后可插值，查表规模从三万多格回落到四千多格。

避暑房在这里有一个结构红利。房子季节性租住，同一套房一年住两三拨人：

稳定性		数据积累
房子	常年不变	跨住户累积 ——100 套房跑三年，约等于别的场景 300 户
人	每次入住重置	每人从头

住户更替是已知变点，不需要检测。而房侧数据属于物业方，是可谈判的资产——这既是数据优势，也是商业筹码。

四、状态之二：气象

气象是这套系统的边界条件，**不必自建站点，用公开数据即可**。数据集是九个市州、逐小时、2024-01-01 起各 23208 条。这一章的后半部分不是数据工程，而是**这批数据对项目讲了什么**——其中三条直接决定了技术选型。

4.1 要哪些量

边界条件需要八个量：

量	谁要
干球温度	热平衡主驱动
相对湿度	「凉而潮」里的潮
太阳辐射	窗户得热， 必须拆直射与散射
风速	气流网络风压项的参考风速
风向	索引风压系数表；给流场工况加权
降水	下雨是开窗的硬约束
气压	空气密度 → 流量
露点	直接给出除湿负荷，比相对湿度更好用

其中三项容易被漏掉，各有硬理由：

- **风速风向不可省**。风压项是 $\text{风压系数} \times \frac{1}{2}\rho U^2$ ，**没有参考风速整条通路就空转**；风压系数表按风向索引，没有风向频率就只能均匀跑八个方向，浪费一半以上算力。
- **辐射必须拆直射与散射**。窗户得热要按入射角算，两者的角度依赖完全不同，合成的水平面总辐射算不出来。多数免费源只给总辐射——这是选定主数据源的主要理由之一。
- **气压不能取标准值**。贵州各市州海拔 350 至 1830 米，**贵阳实测地面气压 873.7 百帕**，而标准大气压是 1013。**空气密度差 14%，直接影响孔口方程的流量**。

必须抓全年，不能只抓夏季。冬季是湿冷且无集中供暖，**问题方向反过来**；春秋是过渡季，对应导则说的「完全关空调、依赖自然风」。

4.2 数据源与质量核验

主源选 Open-Meteo 的再分析归档：无需密钥、覆盖 1940 年至今、逐小时，且**直接给出分离的直射与散射辐射**。

取数有四类静默错误，都不报错而下游全错（单位、时区、地方太阳时、默认年份），已全部写进自检断言，详见附 4.7。核对后九个市州的辐射峰值都落在 13 时，与真太阳正午差不到半小时。

而季节平均被拉后的真实原因，本身就是一条气候特征：

贵州上午多雾、下午转晴——实测上午与下午的辐射比只有 0.31 至 0.43。

一条必须标注的边界：再分析不等于实测。数据是模式同化产物，空间分辨率约 30 公里，而贵州山地小气候复杂，局地真实值可能有差。要标定模型时应设法拿实测。

4.3 贵州气候特征

「避暑房」这三个字的量化依据

夏季九市州概览：

市州	温度均/最高	夜间温度	夜间湿度	静风占比	降水时数占比
六盘水	20.3 / 28.4	17.7	94%	1.4%	20.6%
安顺	22.0 / 30.2	19.8	92%	0.9%	24.0%
贵阳	22.4 / 32.0	20.1	92%	0.5%	22.3%
遵义	24.6 / 34.9	22.2	85%	2.1%	15.3%
黔东南	25.1 / 36.1	22.9	88%	2.7%	17.0%
铜仁	28.5 / 39.6	26.1	83%	5.7%	17.0%

这张表本身就是「避暑房」的量化依据，同时也是一条警告：全省内部夜温差 8 度以上，「贵州凉快」这句话对铜仁并不成立。

「凉而潮」被数据坐实

九个市州的夜间相对湿度全部在 83% 至 94%，而最凉的六盘水、黔西南恰恰最潮，都是 94%。

这正是项目的核心矛盾：最该开窗降温的时候，外面的空气最湿。仿真所用的工况（凌晨 20 度、相对湿度 90%）与实测的安顺夜间均温 19.8 度、均湿 92% 几乎一致，该工况成立。

另一条对控制策略有直接影响的：降水时数占 15% 至 27%。安顺夏季降水时数 24%，意味着开了窗要跑回来关的概率接近四分之一。这是规则控制器和人都处理不好、而前瞻式优化天然能处理的一类事件。

4.4 风向与入射角

南北轴主导，且频率优势在能量上被放大

按 45 度不重叠分组统计夏季夜间风向，南向在贵阳占 47%、安顺 39%。更重要的是，南风不但最频繁，还最快——中位风速 3.4 至 4.0 米每秒，而西风只有 0.7 至 1.0。通风量随风速非线性放大，按风能计权后，贵阳夏季夜间一个南向 45 度扇区就占 81% 的风能，安顺 68%。

西向几乎不存在：贵阳、安顺全年西风只占 1% 至 2%，且中位风速不足 1 米每秒。

但三个市州是例外，不能用一套风玫瑰打全省：遵义南风仅 13%、西北 20%，铜仁东风 23%，黔西南西北 27%。这三地的自然通风潜力必须单独评估。

入射角才是自变量

风压系数的自变量是来流与立面法向的夹角，不是绝对方位。 贵州住宅绝大多数南北朝向，于是：

入射角	立面处境	两侧压差	穿堂风
正吹（小于 45 度）	迎风 +0.6~0.8 / 背风 -0.2~-0.4	大	强
掠过（大于 67.5 度）	两侧都在侧风区，均约 -0.2~-0.5	小	弱

南北风都是有效风向，东西风都是无效风向。 南北朝向住宅在夏季夜间的正吹率：

市州	正吹率
贵阳	85%
安顺	80%
六盘水	68%
遵义	52%
铜仁	44%

贵州的主导风向恰好就是有效风向。南北朝向的住宅八成时间被正吹——这是运气不是设计，但它让「自然通风优先」这个产品前提在贵阳、安顺、黔南站得住。

铜仁只有 44%，同样朝向的楼在那里自然通风潜力明显更差。这是一条装修前就能交付的选址与朝向评估结论，不需要任何用户数据。

三条由此得到的推论

1. 工况按入射角跑三档，不按绝对方位跑八到十六个。正吹 0 度、斜吹 45 度、掠过 90 度，乘以主力楼栋数。同一套工况可复用到任何朝向的楼。
2. 「用流场计算补稀有风向」这个说法是错的。稀有的正是东西向，而东西向掠过侧墙、压差小、通风贡献小——稀

有和不重要是同一批风向。

3. 静风时数普遍低于 3%，风压项在绝大多数时段都在起作用。但这与「单侧通风卧室以热压为主」不矛盾——单侧通风不吃立面压差。

4.5 冬季与空置期的气象边界

集中供暖门槛

用逐小时数据实算日均气温 ≤5 度的天数，贵阳三年分别是 45、42、21 天，与流传的「贵阳冬季最冷时段约 38 天」同一量级。但集中供暖的门槛是累年日均 ≤5 度且 ≥90 天，九个市州没有一个达到，最高的六盘水也只有 53 天——流传的「全省仅毕节和水城符合集中供暖标准」在这三年的数据里不成立。

真正该盯的不是「冷」，是「湿冷」——六盘水冬季 62.9%、毕节 60.8% 的时数处在 ≤10 度且相对湿度 ≥80% 的状态。这才是「旅居是半年生意」的物理原因：不是冻着了，是又冷又潮。

湿冷的湿不是绝对湿度高——冬季不需要除湿，反而偏干

「四季相对湿度都高，所以除湿设备全年都在用」不成立。相对湿度是温度的函数，冷空气本来就装不下多少水：

	室外含湿量	室外相对湿度	加热到 20 度后的相对湿度
安顺 1-2 月	4.5 克每千克	80%	31%
安顺 7 月	15 以上	90%+	—

同一份冬季室外空气加热到 20 度，相对湿度只剩 30%，低于舒适下限 40%。所以夏季通风进来的是湿负荷，需要除湿；冬季通风进来的空气一加热就偏干，需要的是保湿。

「湿冷」难受的是低温下的高相对湿度贴在皮肤上，不是绝对湿度高。解法是升温，不是除湿。

同一批空气能读出三个相对湿度。贵州冬季室外 5 度、相对湿度 80%，含湿量约 5 克每千克：

在哪里	温度	相对湿度	判定
室外空气	5℃	80%	—
空置房的冷墙表面	3℃	92%	霉菌风险
有人住、供暖 20 度、关窗	20℃	48%	舒适
↑ 同一房间的冷墙表面	11℃	87%	霉菌风险
有人住、供暖 20 度、换气到二氧化碳达标	20℃	32%	偏干

对霉菌（长在冷表面上）是湿的；对人（呼吸室温空气）供暖后是干的；论绝对含水量很低。三句话说的是同一批空气。

由此得到一条贯穿全项目的纪律：状态量必须取含湿量，相对湿度只在给人看时换算。冬季相对湿度 80% 只有 5 克每千克，夏季相对湿度 80% 有 25 克——差 5 倍。

冬季通风在物理上是个死结，除非做潜热回收

关窗时房间并不干——干是换气换出来的。有人住且关窗时，人呼出的水汽会把含湿量顶到 8 克每千克，空气相对湿度 48%，不干。但那时另外两项不合格：二氧化碳浓度超国标一倍多，墙面相对湿度 87% 会长霉。一换气这两项同时解决，代价是空气相对湿度掉到 32%。

换气量	二氧化碳	空气相对湿度	墙面相对湿度
关窗渗透	2670 ppm 不合格	48% 合格	87% 不合格
提到二氧化碳刚达标	1001 ppm 合格	32% 不合格	58% 合格
同上 + 全热交换	1001 ppm 合格	40% 合格	73% 合格

二氧化碳与含湿量在卧室里是同一个变量的两个刻度——源都是人，汇都是换气。所以靠通风这一个执行器，只能在「闷」和「干」之间选一个，没有哪个换气量能两项都达标。

全热交换的潜热回收是唯一让三项同时合格的手段。这是它独立于「显热回收省热损失」的第二条理由，而且更硬——显热回收是省钱，潜热回收是让冬季通风这个动作在物理上合法。

热泵在冬季有四成时间工作在最差工况

热泵制热在 -5 至 7 度且相对湿度 ≥80% 时室外机结霜，需周期性除霜，实际能效比显著低于铭牌。贵州冬季恰好长期落在这个窗口：贵阳 43%、安顺 39%、遵义 37% 的冬季时数在结霜窗口内。

贵州冬季有近四成时间，热泵在它效率最差的工况下工作。这直接削弱「空调制热一度电产三到五倍热量」这个论断——那是铭牌值，本地实际要打折。冬季能耗测算必须用带除霜修正的能效比。

4.6 霉菌风险窗口

这是空置期那条收益线的气候侧依据。

判据用模型，不用拍脑袋的阈值

采用 VTT 模型，临界相对湿度是温度的函数，不是固定的 70% 或 80%：

温度	0℃	5℃	10℃	15℃	20℃	25℃
临界相对湿度	100%	88%	82%	80%	81%	80%

「低于 10 度霉菌几乎不长」不成立。模型的适用温区是 0 至 50 度，低温只是要求更高的相对湿度——10 度时 82% 就够，而贵州冬季室外相对湿度常年 80% 以上。冬季的霉菌风险是真实的。

空气相对湿度判据会得出完全错误的结论

以安顺为例，比较两种判据：

判据	超临界总时数	连续 ≥24 小时	连续 ≥72 小时
空气相对湿度	4128 小时/年	247 小时	0 小时
表面相对湿度	3652 小时/年	2369 小时	1160 小时

总时数差不多，持续性天差地别。

这就是机理。霉菌指数在不利期是衰减的：空气相对湿度昼夜波动，每天掉下来一次，指数每天被清零一次，长不起来；而表面温度有热惯性、不跟着昼夜走，表面相对湿度连续几天不掉，指数才能累积。

所以用空气相对湿度判据会得出「贵州不长霉」的结论，而实地观察到的春秋霉变是真的。判据必须用表面相对湿度，而表面相对湿度需要表面温度节点——那个节点不是锦上添花，是这条业务线的前提。

按有没有人住拆开，这才是对生意有意义的切法

连续 72 小时以上的暴露段，安顺全年 1160 小时。按占用状态拆开：

	时数	除湿机可用	属于哪条线
有人住（夏）	584 小时	100%	「凉而潮」，走反馈面板那一整套
空置（春秋冬）	575 小时	55%	空置期值守

必须按占用状态分开报：空置期这条线上除湿机的覆盖率是 55%，缺口全在冬季那 166 小时——压缩机式除湿机只在 15 至 40 度工作，冬季这个执行器不存在。全年均值会被夏季的 100% 拉高，不能代表空置期。

空置期冬季不是湿的问题，是冷的问题

那 166 小时的含湿量只有 5 克每千克，是夏季的五分之一。表面相对湿度之所以到 92%，纯粹因为表面冷。

而且**通风在空置期除不了湿**：没人就没有湿源，室内含湿量等于室外含湿量，落差为零。**通风能除湿的前提是屋里比屋外湿，而这只在有人住时成立。**

四个选项：接受风险、上转轮除湿、间歇供暖后再除湿——**前三个都在跟湿度较劲，而湿度本来就不高**；第四个是**只提高表面温度，不除湿**：含湿量已经很低，把墙面顶高一到两度，表面相对湿度就掉到临界以下。

第四个直接打在真正的病因上。但幅度算不准——阈值恰好落在 3.1 度附近，结论对墙面温度的假设极其敏感。真正的结论是：这道题卡在表面温度节点上，不是卡在设备选型上。没有那个节点，连「墙面现在几度」都答不出来。

论证边界

已论证：用模型判据加表面相对湿度，春秋确实存在持续暴露；**空气相对湿度判据会漏掉整个现象——这解释了「看数据觉得没事、实地却发霉」。**

未论证：没有做霉菌指数的完整积分，只用「超临界持续时长」作代理，**持续 72 小时不等于一定长霉；没有损失金额。**

我们证明了风险窗口存在、集中在哪、除湿机能覆盖多少；没证明会损失多少钱。

四条必须标注的边界：滑动平均只是表面温度的粗代理，真实墙体热惰性更大，**春季风险很可能被低估**；用室外相对湿度代表空置房室内，在低换气条件下约 2.5 小时跟上，成立；模型原针对木材，涂料与布草的敏感等级不同；以及上面说的指数积分未做。

五、人的舒适感建模

这一章回答的是：**什么算舒服**。它决定了优化的目标函数长什么样——没有这一章，「省电」就会变成唯一的目标，而关掉所有设备是最省电的。

5.1 人体热平衡的六个量

终端节点是人，房间只是中间层。舒适判据需要六个量，它们不是随手挑的，它们是人体热平衡方程的六个位置：

产热
代谢率

=

对流散热

+

辐射散热

+

蒸发散热

对流系数·(皮温 - 气温)

辐射系数·(皮温 - 辐射温度)

看水汽排不排除

└──────── 三条路径全被服装热阻削弱（衣服串在中间） ─────────┘

量	是什么	谁产出	现状
空气温度	干球温度	热平衡方程	在用
含湿量	贵州夏季室外 15、冬季 4.5 克每千克	水汽输运方程	在用
服装热阻	1 单位约等于一套西装	—	折进人设的温度偏移，不可单独调
代谢率	1 单位约等于静坐	—	同上
平均辐射温度	周围各表面按立体角加权	表面温度节点	未做
占据点风速	人所在那一点的风速	占据点节点	未做

三条防误用的判据：

- ① **状态量取含湿量，不取相对湿度**。相对湿度是含湿量与温度的导出量——空气降温时含湿量不变而相对湿度飙升，守恒的是水汽质量。相对湿度只在给人看时换算。
- ② **平均辐射温度不等于空气温度**。20 度的房间配 12 度的冷墙，温度计感觉不到，人感觉得到。这一条在夏季可以忽略（无辐射源、围护温度接近气温），**冬季不能忽略**：

空气	墙面	操作温度	差
20°C	12°C	16°C	-4 K
18°C	10°C	14°C	-4 K

用空气温度判舒适，冬季会系统性高估 2 至 4 度——模型以为达标了，人还是冷的。

这一条同时给出了两个现象的机制：**贵州人冬天买电烤火桌而不是空调**，因为烤火桌几乎不升空气温度，但大幅抬高辐射温度——它优化的正是我们没建模的那一半；以及「**上身不冷、脚凉**」是一条独立抱怨，因为地面辐射温度低于空气温度，局部操作温度更低。

③ **操作温度不是第七个量**，它是两条干散热路径的合并写法，在低风速下成立。

两个未做的量，恰好对应两个待补的节点：房间侧的表面温度节点、人侧的占据点节点。两个节点加完，这六个量就齐了。**表面温度节点一个解决三件事**——结露判据、霉菌判据、辐射温度；**占据点节点一个解决五件事**——风扇收益、烤火桌收益、直吹、垂直温差，以及「换个位置坐」这类零成本建议（它现在**根本不存在**）。

5.2 判据来源

三套权威框架，各取一部分：

框架	结构	本项目取用
室内环境品质	热环境 / 空气品质 / 声环境 / 光环境	提示补回「光」
《健康建筑评价标准》T/ASC 02-2021	每类含控制项 + 评分项	目标函数二分结构的来源
《老年人居住建筑设计规范》GB 50340-2016	适老专用	全文待获取

其余具体公式的出处：自适应舒适、风速抵偿、自主控制豁免出自 ASHRAE 55；吹风感公式、标定区间与分级出自 ISO 7730；二氧化碳限值 1000 ppm、人均新风 30 立方米每小时出自 GB/T 18883。

必须分清规范与假设。 上述公式与阈值出自规范；而人设表里那些权重系数是拍的。两者分开标注，不得混作同等可信。

光的处置写明白，不让它无声消失：照度与遮阳共用同一个执行器缺口——装了电动窗帘才同时变成可控，那是装修档的事。光不进目标函数，也不进反馈面板，只作为「拉一下窗帘」的建议动作输出。

5.3 自适应舒适带

自然通风建筑用自适应模型，舒适温度随室外滑动平均温度走：

$$\text{舒适温度} = 0.31 \times \text{室外滑动平均温度} + 17.8$$

80% 可接受带 $\pm 3.5\text{ K}$

适用区间是室外滑动平均 10 至 33.5 度，**区间外夹紧，不外推。**

这条模型带来的差别比想象的大。安顺 2025 年夏季 2208 小时实算：

	舒适带	带宽	室外落在带外的时数
固定设定值	24–26°C	2.0 K	86%
自适应	20.9–27.9°C	7.0 K	54%

自适应带宽是固定设定值的 3.5 倍，固定设定值高估空调需求 32 个百分点。换句话说，「贵州夏天需要开空调」这个印象，有一大半是固定设定值这个建模选择造出来的。

放宽舒适带省下来的电不是控制省的，是换了判据省的。这两笔账必须分开报。

比较的对象是操作温度，不是空气温度（见 5.1 之②）。现有实现用的是房间空气温度，改成操作温度会改变所有已有的舒适度结论——夏季几乎不变，冬季会变差。此项尚未改。

5.4 风的净价值

风不是越大越好，也不是越小越好——它是非单调的。

收益一侧，风速抵偿：0.8 米每秒约折合 2.2 度、1.2 米每秒约折合 3 度，且仅在操作温度 25 度以上计入——以下算吹风，不算凉爽。

代价一侧，吹风感：

$$\text{吹风感} = (34 - \text{空气温度}) \cdot (\text{风速} - 0.05)^{0.62} \cdot (0.37 \cdot \text{风速} \cdot \text{湍流度} + 3.14)$$

(34 - 空气温度) 这一项就是非单调性的来源：室温越高，吹风越不构成抱怨。

两侧合成（正值为凉爽收益，单位为等效温度）：

室温	0.5 米每秒	0.8 米每秒
22°C	-1.16	—
26°C	+0.33	+2.20
28°C	+1.10	+2.20

同一阵风，24 度是受凉，28 度是凉快。临界室温在 25 至 26 度之间。

吹风感公式不得外推。它的标定区间是空气温度 20 至 26 度、风速 0.05 至 0.5 米每秒，针对的是空调建筑里的非期望冷吹风。外推会得出「0.8 米每秒一律不可接受」的荒谬结论——而标准自己的最宽一级也才 30%。**ASHRAE 55** 明确规定：居住者能自主控制风速时（开窗、风扇），吹风限制不适用。实现上，超出区间直接返回空值，由调用方决定，不做静默外推。

5.5 哪些维度进目标函数

舒适维度要过两道独立的门槛才能进目标函数：能不能建模，和有没有执行器。这两件事不相关。

层	维度	卡在哪	处置
A 已建模	温度、湿度、自适应舒适带、风的净价值、动作稳定性	不卡	进目标函数
A'	太阳辐射得热	得热项早已在热平衡里、气象数据也带辐射，但遮阳不在动作空间	只能预测与提示，不能优化
B 能建未做	二氧化碳、温差冲击、怕干、表面结露	都不卡，只是还没做	按顺序补
C 够得到边	占据点风速、照度	状态够不到	只作粗略约束
D 够不到	噪音	不是建不了模，是不该测	规则响应，不进目标函数
D'	直吹、垂直温差	有执行器，卡的是状态	暂只作设计建议

两条要重点说：

噪音留在 D 层的理由是隐私。测噪音要放麦克风，而麦克风在老人卧室是隐私问题。所以噪音只做规则响应加面板归因，不进传感基线。它同时给「最小动作间隔」这条硬约束添了一条独立依据：稳态运行噪音是助眠资产，启停切换的噪音是负债。

表面结露是独立的一维。面板上「被子衣服潮 / 地板墙面潮」说的不是空气湿度，是露点温度高于表面温度。当前只建了空气侧，没有表面温度节点——所以除湿对空气有效、对结露未必，正确的动作是升表面温度。

扩维度的顺序是定死的：风速 → 二氧化碳 → 温差 → 怕干 → 表面结露 → 占据点节点。全上会让权重标定变成玄学，而我们没有任何实测能验证。

六、人的建模

上一章说什么算舒服，这一章说不同的人不一样在哪，以及这个差异怎么表示成一组数。

6.1 个体差异的轴

轴	依据	来源类型
代谢率 / 着装	老人代谢率低、穿得多 → 舒适温度上移 1 至 2 度	规范
风速敏感度	随年龄上升	规范
直吹敏感度	颈、膝、踝最敏感；医嘱一致指向「避开风口」	真实抱怨
湿度敏感度（双向）	关节炎与风湿怕潮；相对湿度低于 40% 黏膜防御力下降 → 怕干	真实抱怨 + 导则
新鲜度 / 洁净度	哮喘、慢阻肺对二氧化碳、霉菌、颗粒物敏感	规范 + 真实抱怨
噪音敏感度（双向）	老人睡眠浅；但稳态白噪音助眠	真实抱怨
温差冲击耐受度	「温差过大易感冒、关节痛」	真实抱怨
垂直温差	老人下肢循环差，「上身不冷、脚凉」是独立抱怨，不是整体偏冷	真实抱怨

两条轴是双向的——湿度和噪音都不是「越低越好」。这一点在只做单侧惩罚的模型里表达不出来，而它对应的是真实的抱怨。

6.2 五个人设与时相权重

人设 = 这些轴上的一组取值，不是人物卡。

人设	温度偏移	风速代价	湿度	洁净度	直吹	噪音	温差
基准老人	+1.5 K	1.0	怕潮 1.0	1.0	1.5	1.0	1.5
怕风型	+1.5 K	2.5	1.0	0.8	3.0	1.2	2.0
风湿型	+2.0 K	1.5	怕潮 2.5	0.8	2.0	1.0	2.5
呼吸型	+1.0 K	1.2	怕干 2.0	2.5	1.5	1.0	1.5
年轻同住者	0	0.5	0.8	1.0	0.5	0.8	0.8

前四列落在已建模层，可直接施加；斜体三列落在够不到的层，进不了目标函数，但有明确的消费者——这些维度上的反馈计数被当作硬件需求清单：该不该加导风板、该不该换静音机型。

温度偏移有生理依据；其余数值是先验假设，不是规范也不是实测。这一点必须标注。

时相是所有人设共有的，不是某类人的属性：

时相	特征
白天·清醒	风的正价值最大；温度带最宽；对噪音不敏感
夜间·睡眠	风的代价陡增；温度带收窄；稳态噪音有益、切换噪音有害；信号删失——睡着了不会起来按按钮
夜间·起夜	温差冲击风险最高；照度需求上升

人设表本身就是待学的对象。六个权重不是六个自由数——怕风的人往往也怕温差，它们躺在一个低维流形上。这张五人设表，就是我们手工猜的载荷矩阵和它的几个聚类中心。户数够了之后把载荷矩阵学出来，人设就从假设变成实测。表不作废——它是先验和初值。

6.3 分房间分配与共享空间裁决

屋里常常不止老人。户型库数据显示避暑房主力是三室两厅，占 45%，两室只有 8%。老人怕风、年轻人要凉，冲突发生在不同房间——正好对上「每房间独立开窗」的动作空间。

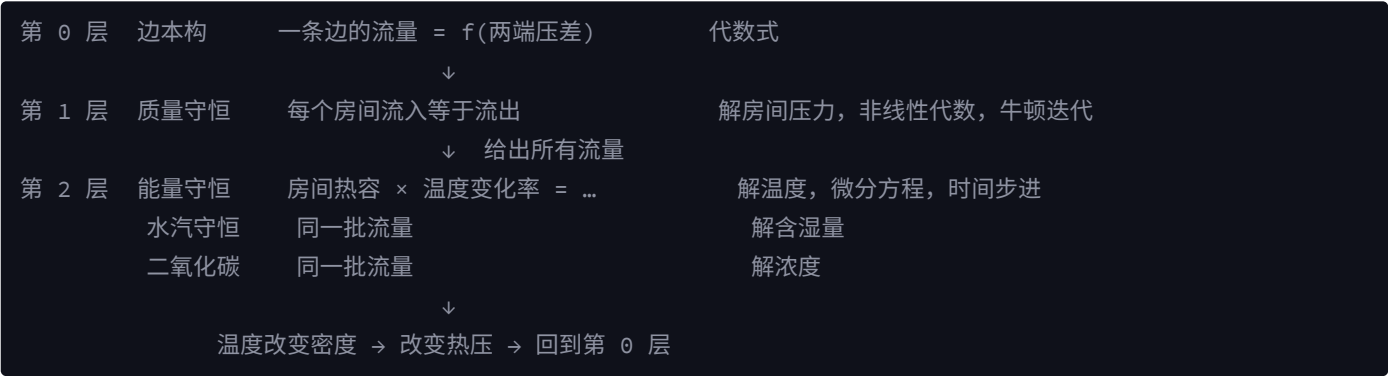
客厅按同住者偏好，主卧按老人偏好。分房间分配人设，不是全屋一套。

但共享空间要裁决，不能只挑一个人。卧室可以各按各的，客厅只有一套状态。这里的处理是：共享空间的权重不是某个人的权重，而是一个显式的合成规则——按占用时长加权，并对敏感度最高的那一维取保守侧。这条规则必须写明，否则系统会表现为「总是照顾某一个人」，而这在多人同住的场景里是最快招致不信任的行为。

七、正向模型

正向模型回答的是：**给定一组动作，这套房子接下来会怎么演化。** 它的结构是守恒律，参数由实测标定——**结构解方程，参数靠数据。**

模型分三层，先看清哪一层在算什么：



第 0 层是边的本构，第 1、2 层是节点的守恒。 而这三层构成一个环，这个环就是「热压驱动通风」的全部内容。

7.1 多区气流网络

把住宅当成节点一边的水力网络求解：**节点是房间**（外加室外与半室外缓冲区），状态量是节点压力；**边是开口**（窗、门、缝隙），流量由两端压差决定。未知量是各房间压力，方程是每个房间的质量守恒。

这是一组关于压力的**非线性代数方程**，用牛顿迭代解，规模是房间数三到六个，**一次求解毫秒级——这是它能进在线滚动优化的前提。**

核心假设有四条，而质量守恒不在其中

质量守恒是定律，不是假设。完整式子的左边有个积累项，写成「流入等于流出」等于把它扔掉。**扔得掉，因为房间对气体来说是个极硬的容器：**往 32 立方米的卧室里多塞 1 千克空气，密度升 2.6%，**产生约 2600 帕反压——而典型风压只有 3 帕、热压 0.3 帕，差两到三个数量级。** 任何不平衡毫秒级就被抹平。实际误差在关窗渗透工况下占 1.4%，开窗工况下占万分之七。

真正的四条假设是：

#	假设	破在哪
1	准稳态——气流响应秒级，远小于 15 分钟控制步	阵风脉动、开门瞬间。 本来就不建模秒级
2	不可压缩	建筑尺度上不破
3	房间内均匀混合	最强的一条 ，也是给不出「床头风速」的原因
4	用一个流量系数替代动量方程	最深的一条

第 4 条才是这个模型比流场计算便宜三个数量级的原因：流场计算解每个网格的动量方程，气流网络直接放弃动量方程，把它压缩成孔口方程里的一个经验系数。

气流网络 = 精确的守恒律 + 经验的本构关系。它不是简化版的流场计算，是另一类模型。

既然不可压缩、密度不变，热压那一项的密度差哪来的？——不可压缩说的是「密度不随压力变」，热压用的是「密度随温度变」，两件事不冲突，这叫 Boussinesq 近似：只在浮力项里保留密度变化，其余当常数。

装了窗口风速传感器之后，方程组不再闭合——而这是好事

部分边的流量成为实测值，方程从「N 个未知、N 条方程」变成超定：

求解模式		产出
无实测边	N 个压力，N 条守恒	只有解
有实测边	未知量少于方程	解 + 残差

残差不为零就是模型错了。用法分两种，不能混：在线把实测流量作为边界条件直接代入，减少未知量，解更稳；离线用残差反演参数，那是标定。

7.2 边的模型

大开口用孔口方程，质量流量 = 流量系数 × 有效开口面积 × 符号(压差) × $\sqrt{(2\rho|\text{压差}|)}$ ，而有效开口面积里的开窗度就是动作变量。流量系数按窗型分档——推拉窗 0.65、平开与上悬窗 0.45，贵州户型飘窗普遍而飘窗多为平开或上悬，这个系数的不确定度不是 ±10% 而是可能 ±50%。判据一条：开口面积超过房间流通截面 40% 时孔口方程失效，而阳台推拉门全开就会撞上。推导与误差表见附录四。

门洞与全开窗必须用双向流，不能用单向孔口。开口高度大时压差沿高度变号，中和面以下进、以上出；内门的净压差只有 0.004 帕而热压梯度是 0.2 帕每米，所以中和面几乎永远落在洞内，单向才是例外。漏掉的量不是几个百分点：两室温差 2 度时交换流量 512 m³/h，对 32 立方米的卧室相当于每小时 16 次换气，而单向模型给出的净流量约等于零。

这一条撑着两个结论：客厅一台空调开着门能给卧室送约 340 瓦冷量——用单向模型，模型会说这扇门什么都没传，于是「三室两厅要装四台空调」；以及夜间单侧卧室开门借客厅冷量那条路径，只有双向流算得出来。

实现上只写双向那一套（净压差大时它自动退化成单向），但判据必须写清楚——不写清楚，实现的人会以双向只是精度修正而随手用单向近似，那会静默地把开门的收益归零。数学形式见附录四。

缝隙渗透用幂律，这一条不能省

关窗不等于不通风。门缝、窗缝、外墙渗透用幂律式，指数约 0.65。三条理由：

① **它是实测物理。** 渗透率是建筑领域测量最充分的量之一，鼓风门试验是全球标准做法，指数与系数来自数百万栋楼的实测。**中国城镇住宅自然渗透换气次数典型 0.2 至 0.5，不是 0。**

② **取零会推出荒谬的数。** 32 立方米卧室、两人、睡 8 小时，若换气次数为零，**一夜后二氧化碳 9400 ppm**；而实测卧室关门关窗的典型峰值是 1500 至 3000。反推落在 2500 需要换气次数约 0.53，**正好在鼓风门实测区间内。**

③ **最关键：空置期的湿气正是经渗透进来的。** 空关的房子没有内部湿源，以换气次数 0.4 算，**室内含湿量约 2.5 小时就跟上室外。**

没有这一项，模型会说「空关的房子永远保持关门那一刻的干燥」→ 算不出发霉 → 结论变成「空置期不需要除湿」→ 空置期这条收益线整个消失。

渗透项不是防止优化器学坏的补丁，是空置期这门生意的物理前提。

一条反直觉的判据：回南天通风会加重结露。室外又暖又湿、露点高，而墙面地面还是冬天的冷——**一通风就把湿空气引到冷表面上，直接结露。所以回南天正确做法是关窗。**

7.3 压差来源

总压差由三部分构成：房间之间的压力差、风压、热压。

风压 = 风压系数 $\times \frac{1}{2}\rho U^2$ ，而驱动穿堂风的是两个立面的系数之差。迎风面 +0.6~+0.8、背风面 -0.2~-0.4、侧风面 -0.4~-0.7；其中背风面是分离流尾迹，**分散度是迎风面的两到三倍，这是全模型最大的不确定性来源。**但它的重要性被结构性消掉了：**精度需求最高的工况（窗开着、换气次数可达 100）恰好是能直接测流量、绕过这个系数的工况（见 2.2）。**系数表、雷诺数无关性、接口契约与传感器上线后的三种改法见附录四。

热压 = (室外密度 - 室内密度) $\times$ 重力加速度 $\times$ 开口形心高差，**这一项完全不依赖流场计算。**它的等价温度形式有两个量纲陷阱（用摄氏度会差 11.5 倍、密度与分母温度配错会产生固定比例偏差），**所以实现一律用显式密度形式——它从形式上就配不错对。**详见附录四。

通风工况分流

判据只有一条，而且不看房间，看拓扑：从这个房间出发，沿开着的边能不能走到另一个开向室外的开口。

#	卧室窗	卧室门	客厅窗	机制	用什么方程	要风压系数吗
A	开	关	—	单侧	双向流（热压部分）+ 湍流修正项	几乎不吃
B	开	开	开	穿堂	孔口方程，三条边串联，网络求解	必需
C	关	开	开	间接，靠门的双向交换	门走双向流	看客厅
D	开	开	关	单侧 + 门的双向交换	两条边都算	不吃

B 行正是那条头条结论：卧室不是先天单侧的，是被门关成单侧的。**用单侧模型算 B，会把整条贯通流漏掉。**

正确的实现不是写条件分支，是换边模型。 单侧通风的经验关联式是房间级的，**不是边模型——它在网络里不能组合。**而单侧通风的物理其实是两部分：

项	夜间占比	谁能算
热压	65%	双向流，机理性地算得出
风 + 湍流脉动	35%	双向流算不了，只能靠经验项

把外窗也建成双向流边，主导的那 65% 就自动算出来了，而且它在网络里天然组合——门一开，求解器自己找到贯通路径，流态从单侧变成穿堂，一个条件分支都不用写。

经验关联式因此只承担那 35% 的湍流修正。**注意不要两处重复计热压，否则双计。**

由此得到三条结论：

- ① **夜间卧室场景不吃风压系数。** 风压只占 10%，系数错一倍这个场景也几乎不受影响。**所以流场计算没做完时，典型场景已经能跑。**
- ② **场景必须分流，不能一套公式打天下。** 三种驱动机制不同，**不是同一个公式的三档参数。**
- ③ **「关门与开门」是两个离散工况之间的切换，不是一个参数的连续变化。** 串联阻力实算：全开约等于没有门（阻力增加 14%），10 厘米缝只剩 22% 的通流能力，关上只剩 1%。门是二值开关。

7.4 热平衡、水汽输运与组分耦合

气流网络给出各房间换气量后，接一个集总参数热网络：

房间热容 × 温度变化率 = 围护与相邻房间传热

+ 净流换热

+ 交换流换热 ← 双向流边贡献

+ 太阳得热 + 人体设备得热

+ 空调

耦合接口必须传两个量，只传净流量是错的。双向流边的净流为零、交换流不为零：

场景	净流量	交换流量	只传净流时热平衡看到
单侧通风的卧室	≈ 0	几十 m³/h	零通风换热
开着的内门（温差 2 度）	0	512 m³/h	零热传递

后者直接推翻「门决定装几台空调」那个结论——模型会说客厅的空调对卧室毫无作用。

约定：净流量进质量守恒，交换流量只进热平衡与水汽、二氧化碳输运（它在质量守恒里自相抵消）。

水汽输运

湿度是项目的核心矛盾，而它不在热平衡里。含湿量的输运方程与热平衡同构，用的是同一批流量，只换源汇项：人体散湿约每人每小时 50 克、厨卫事件散湿、空调冷凝除湿、除湿机。

人体散湿这一项还有第二个用途：它是占用软传感的前提——靠湿度上升速率反推有没有人，没有这一项就无从反演。

触发除湿必须用含湿量，不能用相对湿度。用相对湿度会失控——制冷降温抬高相对湿度，反过来加大除湿功率，实测把客厅从 26 度一路压到零下 1.4 度。

二氧化碳与表面温度节点

二氧化碳与水汽是同一套输运方程，源项换成人体呼出即可。用途是解锁 S2 档、面板上「透不过气」那一格、以及新风动作的判据。

时间步取 15 分钟，积分用后向欧拉——开窗时房间热时间常数掉到约 3 分钟，显式格式在这里会失稳，而后向欧拉在开窗的慢瞬态与开窗的准稳态两个极限上都正确（见附录四）。

表面温度是另一类节点，不是输运——加一个壁面节点接在房间空气节点上，结露判据是露点温度高于表面温度。

它必须有的两个理由，第二个更硬：面板上「被子衣服潮 / 地板墙面潮」两格不是空气湿度，是表面结露，降空气湿度对它未必有效，动作是升表面温度；而没有这个节点，霉菌风险会被系统性算错——空气相对湿度判据下连续超临界 72 小时的时段是 0，表面相对湿度判据下是每年 1160 小时。这个节点是空置期那条收益线的前提，不是精度改进。

7.5 执行器模型

空调不是一个功率数，是一个工作点

家用分体空调只有一套蒸气压缩循环，所谓「模式」不是加了新部件，而是同一套硬件跑在不同工作点上：

模式	压缩机	室内风机	蒸发器表面温度	结果
制冷	持续高负荷	中高风速	常低于 5°C	快速降温，除湿是副产品
常规除湿	间歇启停	固定低风速，约额定的三到四成	维持 12-16°C	温降只有 2-4 度
恒温除湿	持续运行	低风速	低	冷却后的空气再加热回原温度，室温几乎不变
制热	四通阀换向	—	蒸发器变冷凝器	低温高湿时需除霜中断
送风	停	开	—	只搅动空气

除湿模式的物理不是「多制冷」，而是降低风量：风量下降，单位空气在蒸发器上停留更久，更多空气被降到露点以下，冷凝水析出更多；但总制冷量反而下降，室温降得慢。这就是「除湿模式降温慢」的原因——不是压缩机偷懒，是刻意用小风量换大焓差。

贵州「凉而潮」正是恒温除湿的靶心工况——温度已达标，只想除湿不想降温。但这恰恰是成本最高的那种除湿：便宜的常规除湿会顺带把温度再拉低 2 到 4 度，在 21 度的室外条件下会过冷。

因此接口必须是一个六字段的工件点，而不是一个标量：模式、显热功率、潜热功率、再热功率、新风量、电功率。

为什么六个字段一个都不能省：

- 再热功率——恒温除湿靠它把温度顶回去。省掉它，显热就无法为零，恒温除湿在模型里退化成常规除湿，而那正是靶心工况；
- 新风量——唯一进流网的字段。省掉它，新风只剩焓负荷，换气量与二氧化碳全看不见。

显热比按模式取三档（制冷 0.75、常规除湿 0.55、恒温除湿 0.50），不写死一个常数。真实关系是蒸发温度、进风温湿度与风量的函数，三档常数是**最小可用近似**，不需要完整换热器模型。

五种模式代入实际参数后的对照，说明了钱花在哪：

模式	显热功率	除湿量	电功率	除湿能效
制冷	-1125 W	0.55 kg/h	443 W	1.24
常规除湿	-550 W	0.66 kg/h	218 W	3.03
恒温除湿·电加热	0 W	0.73 kg/h	718 W	1.02
恒温除湿·热回收	-500 W	0.73 kg/h	218 W	3.37

电加热再热让功率从 **218 瓦** 涨到 **718 瓦**——再热一项占七成的电。所以「独立除湿设计成本高」的量化含义是：**值钱的不是能不能恒温，是再热靠不靠废热。**

这张表还澄清了一个表面矛盾。有实测说「空调除湿耗电是除湿机的两到四倍」，但按每度电除多少水算，**空调常规除湿档并不比除湿机差：**

它差在「顺带把房间弄冷了 550 瓦」——而在凉而潮工况下那不是收益，是损失。那个两到四倍的机理是「过冷加再热」，不是「压缩机效率低」。

凉而潮时该用除湿机，理由是这一条。而家用除湿机本质就是一台恒温除湿热回收机：空气先过蒸发器冷凝、再过冷凝器复温，净显热略为正——在凉而潮工况下这点微热还是好事。

两条能力边界：制冷能力随室外温度变，贵州夏季室外 25 度时比 35 度额定工况高约 10%——这是「避暑房空调很少满载」的一半原因；以及一步内不得越过设定值的限幅必须有，没有它一步 15 分钟能升温 10.5 度、冲过设定值再回摆（见附录四与 8.7）。

风扇不在这条方程里，而且不该在

房间内均匀混合的假设意味着：**风扇是内循环、净换气为零、不改变房间的质量、水汽或二氧化碳总量——它在热平衡里唯一的痕迹是内部得热多出一项风机发热，是净加热，不是冷源。**

它的全部价值在人体表面的对流换热系数上，那需要占据点风速——一个集总模型没有的量。空调进这条方程是因为它改变房间状态；风扇不改变房间状态，只改变人对它的感受。

辐射采暖（烤火桌）同理：它改的是平均辐射温度，不是空气温度。**两者都属于「不经过房间」的那一路，**处置见 8.2。

新风的定位是兜底，不是主力

新风不是同一套制冷循环的另一个工作点，而是加了一路独立的进风。一组必须知道的数字：

量	数值
国标人均新风量	$\geq 30 \text{ m}^3/\text{h}\cdot\text{人}$
主流 1.5 匹新风空调	$30\text{--}60 \text{ m}^3/\text{h}$
开一条窗缝	$100\text{--}150 \text{ m}^3/\text{h}$

一组实测：一台标称 60 立方米每小时的新风空调，在密闭卧室开启两小时，二氧化碳浓度仅下降 **18%**；而开一条窗缝的换气量是它的两到三倍。

新风空调不能替代开窗，只能在开不了窗时兜底——而「开不了窗」恰恰是本项目最关心的场景。所以它的定位是约束条件下的备选通路，不是主力。

但要选全热交换，不选单向流。贵州冬季室外含湿量仅 4.5 克每千克，加热到 20 度后相对湿度只剩 30%——单向流新风会把室内抽干；全热交换能回收湿度，冬夏两季都在工作。

三条必须认下来的现实约束

- ① 厂商不开放这一层接口。家用空调的红外或无线接口通常只有模式、设定温度、风速几个离散档，拿不到压缩机频率、膨胀阀开度、显热比。所以模型再细，动作空间仍受限于厂商暴露的那几个档。
- ② 标称值与实际值差距大。新风量标 60 装到家里会打折，制冷量标称值是特定工况下的。模型参数应按实测标定，不按铭牌。
- ③ 独立除湿贵。若最终要推荐设备，「有没有独立除湿」比「几匹」更值得问。

7.6 体感层

集总模型给不出「床头那一点的风速」。补这一层用的是射流公式，不是流场计算。

穿堂风进房间，物理上是一股受限射流，有解析解：

窗口出流速度 = 流量 ÷ 开口面积

← 流量由气流网络给出

轴心速度衰减（圆口） = 衰减系数 × 当量直径 ÷ 距离

床或沙发的位置 ← 户型图上直接量

做法是射流公式 + 10 至 20 个流场算例标定系数，在射流主导区准确且可解释。它把室内流场的算力需求压掉一个数量级——流场计算的角色是标定器，不是数据生成器。

唯一真损失：射流公式在房间角落与回流区不准。要判断「墙角那把椅子舒不舒服」还得回去做流场计算。但床和沙发通常在射流路径上或明确远场，两端都还行。

这一层有两个并列的量：衰减系数管动量（人被吹到多大风），换气效率管传质（进来的空气有没有真换到人待的地方）。两者由同一批算例一起产出。

它大概率不需要流场计算的第二条路子：床头贴一个风速点，直接测。这和窗口风速传感器绕过风压系数是同一个手法——在关键点上测，比在全场上算便宜。区别只在于那次测的是房间边界，这次测的是人所在的那个点。

7.7 参数标定与残差修正

正向模型的参数必须被标定，而标定完仍剩一层残差。这一层是全系统两个学习循环中的物理侧：数据源是传感器，每房间每天 96 条，速率是天到周，改的是「世界是什么样」。

顺序不能反：先标定物理参数，标定完仍剩的残差才交给网络。

① 标定物理参数（流量系数、可开启比例、渗漏当量面积、房间热容、风压系数）
↓ 可解释、可迁移
② 剩余残差 → 残差网络，在正向模型输出上加一项

反过来做，网络会把「参数没标准」一起吸收，变成不可解释、不可迁移的黑箱补丁。

残差模型不是代理模型，两者方向相反：

	拟合什么	图什么	天花板
代理模型	正向模型的输出	速度	正向模型
残差模型	正向模型与现实的差	精度	现实

方向相反，可叠加。而代理模型目前不需要——在线求解余量有四个数量级，速度不是瓶颈。

哪些参数能标定，需要什么硬件：

参数	怎么标定	需要什么
能效因子	实测电功率与推算热量之比	计量插座
显热比	实测温度与含湿量轨迹之比	温湿度传感器，已在基线内
制冷能力上限	观测到的最大温升率乘热容	同上
除霜损失	冬季制热时电功率的周期性尖峰	计量插座

除两项外都不需要额外硬件。但空调模型的标定需要计量插座，部署清单里应至少每户留一个。

还有一类残差不该交给网络，而应该改模型。当用户在短时间内给出方向相反的反馈（先说热、五分钟后说冷），那不是两条独立抱怨，而是控制振荡。它有三个可能的原因，其中一个正属于本节：物理模型的增益本身就错了——这一类有上万条每月的数据支撑，该走残差学习；另外两个原因（代价函数缺过冲项、速率容忍度随状态变）数据稀缺得多，归第九章。

八、反向求解

正向模型回答「做了会怎样」，反向求解回答「该做什么」。这一章按优化问题的标准结构展开：决策变量、目标函数、可行集、够不到的维度、求解方法、求解规模、下发前的限幅。

一条先立下的判据：对象模型里不能嵌策略。三样东西必须分开写：

动作	=（哪几间开，模式，设定温度，风速）	← 外生输入，优化器的决策变量
对象模型	: 施加动作后，状态变成什么	← 只回答「会怎样」，不含任何「该不该」
策略	: 给定状态，选哪个动作	← 基线才需要；优化代替它

若对象模型里嵌了策略——比如温控函数自己判断「温度超了就制冷、湿度超了就除湿」——那么所谓「动作」就退化成「要不要允许那条规则运行」的一个布尔量，优化器优化的是许可，不是动作。

判据：写状态转移时，凡出现「如果状态满足 X 就施加动作 Y」，就是把策略写进了对象。对象只能写「施加了 Y，状态变成什么」。

两个后果都不报错：动作空间塌缩成开关；以及推演与执行不一致——嵌进去的规则若有一支在推演里没启用，该动作在推演中效果恒为零，永远不会被选中，而执行时它其实有效。

8.1 动作空间

每个动作在物理上是什么，决定它怎么进方程

动作	物理上是什么	进哪个方程
窗开度（每房间连续）	一条边的导纳	气流网络
房门开合	改变流网连通性，不是改一条边	气流网络
空调（分房间 × 设定温度 × 模式 × 风速）	房间热与湿方程的源汇项	热平衡 + 水汽
新风	强制流量边——唯一真正搬运空气的	气流网络
除湿机	纯湿汇	水汽方程
电阻或热泵采暖	显热源项	热平衡
风扇 / 辐射采暖	不进房间方程——改占据点风速与辐射温度	占据点节点
遮阳 / 窗帘	改太阳得热	热平衡；但无执行器

前六行改变房间状态，后两行只改变人对房间的感受。这条分界线决定了动作阶梯的顺序——改房间的先做，改感受的要等状态升档。

三类动作：直控、建议、不可及

类别	例子	特点
直控	空调（红外）、除湿机 / 风扇 / 电暖器（插座）	下发即生效
建议	窗、门、窗帘、加衣	依从率低于 100%，而依从率本身要学
不可及	地暖、新风——没装就是没有（装了则是直控）	不进模型

空调有四个旋钮，一个都不能省

#	可控量	省掉它就丢了什么
1	哪几间开	「只开主卧不开客厅」——分房间人设的动作基础
2	设定温度	自适应舒适带宽 7 度，整段带宽的价值
3	模式（制冷/常规除湿/恒温除湿/制热/送风/关）	「凉而潮」时的恒温除湿档
4	风速	第二个显热比杠杆

厂商只暴露这四个——动作空间的上界由接口定，不由物理定。

风速档不是「舒不舒服」的小旋钮，是第二个显热比杠杆。风量下降，空气在蒸发器上停留更久，出风更接近蒸发器表面温度，显热比随之下降。

模式换的是工作点，风速换的是同一工作点上「降多少温」与「除多少湿」的配比。

新风不是空调的一个模式——它是独立进风管路加风机加滤网，与制冷循环无关。在流网里它是一条强制流量边，其余五档都不是边。

「关门睡觉」是典型场景的物理瓶颈

拓扑不变量「所有户型卧室都是单侧通风」隐含了「门是关的」。开着卧室门、客厅窗开着，卧室就有了第二个开口。

卧室不是先天单侧的，是被门关成单侧的。建筑改不了，门能开——这是绕过拓扑限制的唯一免费手段。

代价（隐私、客厅噪音传入、冷量外泄）至今未量化，这是典型场景的核心待办。

冬季采暖是三类设备，不是一个「地暖」

贵州无集中供暖，且城镇每百户空调仅 50.86 台——冬季的执行器多数不是空调。物理上分三类：

类	设备	能效	S1 里可见
热泵对流	空调制热	3.5-4.7	可见
电阻对流	暖风机、油汀	严格等于 1	可见
辐射局部	电烤火桌、小太阳	等于 1，但有效加热体积极小	看不见

空调制热在电费上完胜（同一工况下每月 13 元对 45 元），但这答不完整。买电暖器的五条理由里三条是体感：初装成本差十倍、老房子没空调、空调吹热风又干又直吹、结霜期制热中断、以及挂机制热的脚冷。

挂机与柜机能效一样，垂直温差相反：挂机高位送风，制冷时冷空气自然下沉是对的，制热时热空气浮在上层，头热脚冷；柜机落地送风，制热时热空气从低位上升，垂直温差小。

挂机制热在物理上就是不利的——浮力方向与送风高度反了。这是「南方人冬天宁可烤火」里唯一能被物理模型验证的那条理由。

油汀与暖风机在电表上一样，在动作空间里是两个执行器：暖风机时间常数分钟级、强制对流、对老人有直吹与噪音问题；油汀十几分钟、自然对流、无风感静音。同为能效 1，差别在动态与体感，不在能效。

地暖仍不优先：时间常数小时级，远超最小动作间隔；需要预装，改造成本最高。正确形态是「地暖做基础负荷、空调调峰」的分层控制，不再扔一个候选进枚举。

动作空间是户相关的

有的房间有空调，有的没有。没装空调的房间，空调动作根本不存在。

把所有房间当同质、给每间都生成同一组候选动作，对真实住宅不成立。动作空间必须按户实例化。

按改造成本排序的最小可行动作集：直控是空调加除湿机，门窗做建议、靠门窗磁闭环。风扇虽然最便宜，但它需要状态升到 S3，否则在模型里是纯耗电，因此属于加装件而非基础档。

除湿设备按季节分工，不是二选一：夏季与空置期用除湿机，冬季用全热交换新风——冬季室外含湿量仅 4.5 克每千克，引室外空气进来本身就是除湿，而那正是压缩机除湿机失效的温区。但新风接不了空置期那 166 小时：没人就没湿源，室内外含湿量相同，通风除湿量为零。

8.2 目标函数

目标函数按「控制项 + 评分项」二分，这个结构沿用健康建筑评价标准，与「硬约束 vs 代价项」同构：

内容		去哪
控制项（不满足即不合格）	下雨关窗、夜间卧室禁动、最小动作间隔、含湿量上限	8.3 可行集
评分项（满足后加分）	自适应温度带、风的净价值、湿度区间、二氧化碳	本节

评分项一侧的权重来自第六章的人设，并由第九章的学习循环更新。**权重不是六个自由数**——它们躺在一个低维流形上。

目标函数里必须有分时电价

贵州分时电价：高峰在平段基础上上浮 60%、低谷下浮 60%。

看得见电价吗	
规则控制器（阈值 + 状态机）	结构上看不见这一维
滚动时域优化	写进目标函数即可

这是相对规则基线最容易赢、也最好讲的一条，而且它不依赖任何新硬件——纯软件，今天就能算。

它与热惯性天然配对：有效热容决定了**低谷预冷或预热能转移多少负荷**。

能耗权重必须是逐时电价序列，不是一个常数——当前实现仍是常数，列在 12.1 的待办里。

优化的量与报数的量不是同一组

目标函数里写的是优化什么，第十章定义的是拿什么报数，两者不一定是同一组量。

8.3 可行集

可行集裁剪不是加惩罚项，是从候选集里删掉违反的候选。

这是模型预测控制相对强化学习的关键差别：约束被保证，不是被鼓励。

进可行集的是上一节的控制项：

- 下雨关窗——最高优先级硬约束。安顺夏季降水时数 24%，这一条在四分之一的时间里生效；
- 夜间卧室禁动——依据是启停切换的噪音，不是体感；
- 最小动作间隔——同上；
- 含湿量上限——防止「开窗降温把湿气灌进屋」。

这两条约束只作用于慢变量。它们的依据是启停切换的噪音，**不含功率微调**——冻结整个候选集会把已开机空调的调功率一起冻上，那是过度约束。

8.4 绕过房间的执行器

上一节定义了目标函数，现在可以说清一件事：**有一类执行器，物理上有效、硬件上最便宜，但目前推不动目标函数。**

终端节点是人，房间只是中间层。 执行器按「打哪个变量」分两路：

执行器	直接改的量	路径
空调制冷 / 除湿 / 制热	空气温度、含湿量	经房间（源汇项）
新风	空气温度、含湿量、二氧化碳	经房间（强制流量边）
窗、门	同上	经房间（改流网结构）
电阻对流（暖风机、油汀）	空气温度	经房间
辐射局部（烤火桌）	辐射温度，且只在人周围	半绕过
风扇	占据点风速	完全绕过
加衣建议	服装热阻	完全绕过
换个位置坐	辐射温度与风速的局部取值	完全绕过

风扇连「风的净价值」这一项都推不动——那一项标的是房间平均风速，而房间平均风速由换气量推出，**风扇的净换气恰好是零。**

不是收益被低估，是目标函数写在房间变量上、而这类执行器不作用于房间。这是类别错误，不是参数误差。

而这两个恰好是全部执行器里最便宜、最免施工的——都是插座。卡住它们的是状态模型，不是硬件。

均匀混合假设到这里不再免费。它意味着「人坐在哪」信息量为零；一旦有风扇或烤火桌，「坐在哪」立刻携带大量信息。

解法是一个占据点节点，它带四个量：该点的操作温度、风速、服装热阻、代谢率。**加它一次解锁五件事：**风扇的收益、烤火桌的收益、直吹、垂直温差，以及「换个位置坐」这类零成本建议——它现在根本不存在。

与表面温度节点对称：房间侧一个节点解决三件事，人侧一个解决五件事。两个节点加完，舒适判据要的六个量就齐了。

8.5 滚动时域求解

每一步解一个有限时域最优控制问题：以当前状态为初值，用正向模型把每个候选动作序列推演若干步，按目标函数打分，取最优的那个序列，**只执行第一步**，下一个控制步重新解。

这是在线优化：每一步都以当前状态重解一个有限时域最优控制问题，而不是把状态喂给一个已经固化的策略。结构静态、参数慢变、状态每步重解。

滚动优化、强化学习与 PID 各自的位置：

- 强化学习在温控主环上不必要——我们有模型。它的正确位置是偏好层，那里没有模型；
- PID 是无模型的单变量控制，问题是多变量、带硬约束、需要前瞻；它保留为兜底交付；
- 世界模型不需要——房间层的物理模型已经充当了那个角色。

建议动作要用情景优化。门窗没有执行器，只能建议，依从率低于 100%，而标准的滚动优化假设动作确定生效。做法是情景优化：对「照做」与「没照做」各算一次，选一个两种情况下都不坏的直控策略。候选数翻倍，实现简单，而且它保证一件事——

系统不会因为人不听话而失效。

推演与执行必须用同一套对象模型。推演里不限幅、执行里限幅，等于让决策依据的模型比现实更「有力」，会系统性高估空调候选的效果，选出根本做不到的动作；同理，如果推演模型认为「制热」不存在，冬季就永远不会选到供暖动作。

8.6 求解规模与慢快变量分层

动作空间的笛卡尔积会炸：门有十六种组合、空调分房间四档五次方、风扇三档五次方。

分层的界线是物理的：

	改变什么	数学后果	切换成本
慢变量：门、窗	流网结构	系数矩阵变，必须重解网络	有——噪音、隐私、最小动作间隔
快变量：空调档、风扇档	源项	只改右端项	几乎没有

门窗改的是矩阵，空调风扇改的是右端项。

做法是：慢变量用十几个有物理意义的工况模板枚举——夜间穿堂、闭窗除湿、分区独立、单侧夜通风；快变量在给定拓扑下局部求解。候选数回到十几个量级，而动作表达能力大幅提升。

分层的理由不是「算得动」。实测每控制步 23 毫秒，而控制周期是 900 秒，余量约四万倍；候选数涨一百倍每步也才 2.3 秒。

所以分层不是为了算得动，是为了避免在慢变量上频繁切换——噪音、隐私、最小动作间隔。

同一条实测也把神经网络代理模型推后了：余量四万倍，速度不是瓶颈，代理模型暂不需要。真要上，顺序也是先结构后速度：分层降维之后仍超时，才用模仿学习蒸馏策略——结构没理顺就上蒸馏，蒸的是一个本来就该更小的问题。

8.7 下发前的限幅

优化器输出的是期望动作，不是最终动作。中间隔一个独立的限幅层：

偏好权重 → 滚动优化 → 期望动作 → 限幅层 → 执行器

↑

可行集裁剪

独立于优化器的上限

层	干什么	为什么必须分开
代价项	评分，可学	来自抱怨风险
可行集裁剪	从候选集里删掉违反的候选	约束被保证，不是被鼓励
限幅层	对输出再裁一次	优化器有 bug 时它还在。防夹伤老人在这一层。

可行集裁剪在优化器里面，限幅层在优化器外面。只有前者是「优化时避开」，只有后者能挡住优化器本身出错。

限幅层的结构照抄工业界成熟做法：舒适上限、安防上限、风速上限、雨天上限、各占用状态上限**并存，永远取最严的那一条。**

还有一条人机细节属于这一层：手动覆盖后 30 分钟自动回到自动模式。这对老人尤其重要——他自己动了窗或遥控器之后，系统不能立刻抢回去。这一条直接服务于「无感」这个硬约束。

九、人的反馈

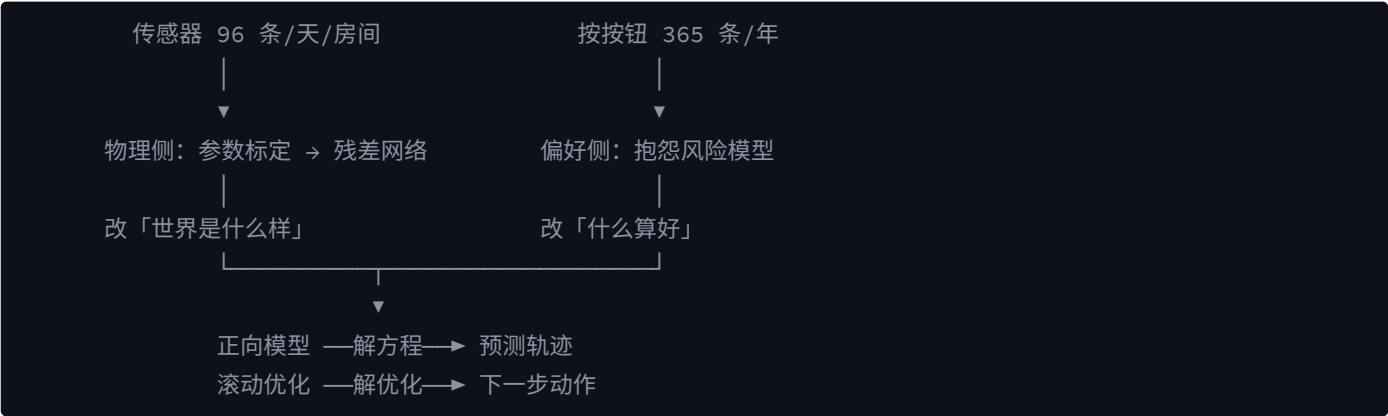
前面八章讲的是给定一组权重，系统怎么算出该做什么。这一章讲那组权重从哪来、怎么更新——这是系统里学「什么算好」的那一层。

主线只有一条：人按了一次按钮 → 这一次按下说明了什么 → 它该改哪一维的权重 → 而在他还没按过任何按钮的第一周，系统靠什么运行。五节依次回答这四个问题，最后一节兜住冷启动。

节	回答什么	到哪一步了
9.1	学习放在哪一层、更新多快	架构已定；物理侧那一环已在参数标定中走通（7.7、11.2）
9.2	一次干预携带多少信息，为什么必须带归因	已被实验验证——11.3 第 5 阶段的负结果正是「输入没有归因信息就学不出」
9.3	归因怎么采集：6 键 × 3 选项的面板	设计完成、已出实物图，未经真人测试
9.4	反馈落到模型够不到的维度上怎么办	设计，未验
9.5	权重具体怎么更新：抱怨风险、隐因子、暴露量	机制在合成数据上收敛，接进闭环未通过；跨户模型尚未实现
9.6	第一周没有任何数据时靠什么运行	规则控制器已实现并作为基线跑过（11.1）；交接判据未验

这一章的状态要说清楚：偏好学习这一层做过一次闭环实验，结果是负的。机制在合成数据上干净收敛，接进完整闭环跑三十天却学不出，根因是可达工况点过窄加输入无归因信息（详见 11.3）。本章后面的设计，大半是从那次失败反推出来的——双层按钮解的是「无归因」，主动探索解的是「工况点过窄」。

9.1 三个循环与速率差



循环	更新什么	数据源	速率
在线求解	什么都不更新	—	每 15 分钟
物理侧	模型的准确度	传感器，每房间每天 96 条	天-周
偏好侧	权重与隐因子	按按钮，每年 365 条	月-季

两个学习循环改的是不同的东西：一个改「世界是什么样」，一个改「什么算好」。它们喂给同一个优化器，但永不交叉。而优化器与物理模型本身不在任何循环里，是消费者。

物理侧那一环写在 7.7，本章只讲偏好侧。两者的数据量差 250 倍，这个差本身就决定了两边该用什么方法。

偏好侧要学的是 5 到 7 个权重，而一天只有 0 到 3 次反馈。这个量级决定了方法的选择：端到端的深度强化学习需要百万级交互，而一户一年只有 365 条，差三到四个数量级——所以这一层要的不是更大的网络，是能在小样本上收敛且带不确定度的模型。

但「每户一个模型」也是错的。单户一年约 365 条反馈，摊到 6 个维度是每维 60 条。正确形态是一套跨户共享的模型加每户 3 个隐因子，即一个推荐系统。

9.2 干预信号的性质

干预不是奖励信号，是对偏好的约束

一次干预说的是「在这个状态下你选的动作是错的，我要那个动作」——人在揭示效用函数，不是环境在发奖励。问题类型是从修正中学习，不是强化学习。

信号是删失的，「干预次数下降」要分层看

为什么收不到信号	影响
睡着了不会起来关窗	夜间几乎无信号，而夜间正是典型场景
不在家	无信号
忍耐度高的人不适但不动	无信号

「干预次数下降」可能是系统变好，也可能只是人睡着了、出门了、放弃了。必须按占用状态分层统计，不能只看总数。

带原因的反馈比裸指令高一个数量级

反馈形式	信息量	问题
裸指令（按开关）	「这个动作错了」——不知错在哪一维	状态五维以上而修正是标量，归因无解
带原因（「太闷了」）	直接锁定维度与方向	归因问题当场消解

一句「太闷了」把五维反演降成一维，顶几十次按开关。

这也是多臂老虎机在闭环里学不出偏好的直接原因之一——不是方法不行，是输入里根本没有归因信息。五个臂之间只差权重向量，而可达工况点太窄，落点几乎相同，后验全挤在一起。

反馈带坐标，就不该用老虎机。 不适度函数对权重是线性的，有梯度可用却去枚举五个权重档，等于把回归降级成选择题。

9.3 双层按钮

不做语音。 反馈走双层按钮：第一层 6 键选大类，第二层 3 键选归因。

第二层问「为什么」，不问「多难受」——强度靠反馈频率推断，不靠按键表达；而归因推断不出来，只能问。

三组必须靠第二层拆开的歧义

「闷」的三种归因指向三个相反的动作：

第二层	真实原因	动作
透不过气	二氧化碳高	开窗换气
潮闷	湿度高	开窗会更糟（贵州夜间室外相对湿度 90%）→ 除湿
没风	风速为零	要风不要换气

「冷」分环境冷与吹到冷，动作相反：一直冷则升温；吹到才冷则挡风，不该升温。

「吹」分开能优化的与够不到的：风太大则降开度；吹头吹腿则只记录并建议改导风板。

面板：6 键 × 3 选项

第一层	①	②	③
热	一直热	刚进屋才热（温差冲击）	太阳晒（能预测，无执行器）
冷	一直冷	吹到才冷（挡风）	脚冷（垂直温差）
闷	透不过气	潮闷	没风
潮	身上黏（体感）	被子衣服潮（表面结露）	地板墙面潮（结露，非空气）
吹	风太大	吹头脖子	吹腿脚
吵	空调声音	外面吵	忽大忽小（变频切换噪音）

这 18 格同时是状态阶梯的验收清单：S1 能消费 6 格，S2 再加 3 格，S3 再加 6 格，剩下 3 格是纯规则响应（见 2.5）。

三条设计约束

- ① 第一层按下就必须有动作。 要按两次才有反应，老人按一次没动静就会放弃，连粗归因都拿不到。第一层按下即立刻执行动作，且已构成一条有效反馈；第二层可选，不按不丢失反馈。配套是第二层 10 秒超时返回，且必须有「算了」。
- ② 强度由反馈频率表达。 重复本身就是强度信号，两个时间尺度各有用途：一个不应期内重复同一项表示强烈，用于加大动作幅度；跨天在相似状态下反复表示这是纠正型而非临时型，用于更新权重。
- 不应期不是固定五分钟，按动作的见效时间常数走——开窗分钟级、制冷十几分钟、除湿小时级。除湿场景里五分钟后再按不是「强烈」，是机器还没起效。
- ③ 「吵」上第一层是因为它有真动作。 我们对噪音本身无能为力，但两个第二层选项都对应真能做的事：空调声音就降风速，外面吵就关窗。它的可动作空间比其他维度窄，但不是空的。

面板位置是床头加墙面。 床头那块直接解决夜间信号缺失——夜间干预门槛越低，删失越轻；墙面覆盖白天在客厅的场景。

9.4 反馈到维度的归因

若支持语音，语言模型在这里有一个窄而扎实的角色：做六分类，不做决策。

```
「太闷了」    → {新鲜度,    +, 中}
「有点吹头」 → {直吹,      -, 弱}
「腿冷」      → {局部温度, -, 中}
```

反馈落在够不到的维度时，三步走

「有点吹头」归到直吹，而直吹是模型够不到的维度。不得硬塞进能建模的维度——把「吹头」当成「风速大」去降风速是答非所问。正确做法：

1. **立刻执行**人的指令；
2. **记录**这条反馈及其维度；
3. **诚实上报**：「这个我调不了，建议调整导风板角度或换个位置。」

够不到的维度不是不收集，是收集了但不假装能优化。这些记录是最有价值的产品反馈——它告诉硬件该改什么。

还有一类：**维度建得出来、但没有执行器**。「太阳晒」就是——太阳得热在热平衡里是一等项，气象数据也带辐射，但遮阳不在动作空间。这类连第一步「立刻执行」都做不到，只能预测加提示：「等下两点太阳会晒进来，拉一下窗帘。」它跟前一类的区别是：前者是不知道，这类是知道但没有手。

反馈还能暴露认知偏差

若有人按了「潮」却同时想开窗，说明他以为开窗能除潮——而贵州夜间这是反的。系统由此获得一个教育窗口：「外面比屋里还潮，开窗会更闷，先帮你除湿好吗？」

「意图与物理相反」的反馈价值可能高于正确反馈——它既是最强的学习信号，也是可解释性最该发挥作用的地方。

9.5 学习器

目标函数就是预期抱怨率

每个维度建一个自激点过程：

抱怨强度 = $\exp(\text{基线} + \text{敏感度} \times \text{该维度的近期暴露}) + \text{历次抱怨的衰减余项}$
评分项 = $\sum \text{各维抱怨强度} + \text{能耗项}$ 单位：次 / 占用清醒小时

三条判据：

1. 控制项来自规范不可学，评分项来自抱怨风险可学；
2. 规范做的地板不能撤——只最小化抱怨会学成「只满足会按按钮的人」，把那些忍耐度高、不适但不动的人优化没了；
3. 人设就是基线与敏感度的先验，而先验强度是一个显式的旋钮。

其中近期暴露必须取按下前 10 到 30 分钟的指数加权平均，不取瞬时值。人体热感觉的时间常数是十几到几十分钟，用瞬时值会把标签系统性配错状态——空调刚开、温度已开始降的那一刻按下的「热」，会被记成「在 25 度时抱怨热」。

自激项处理「抱怨引发抱怨」，每维两个参数，时间常数学出来，不需要人为定去重窗口。

跨户共享的低维流形

这户的权重 = 共享均值 + 载荷矩阵 $\times$ 这户的 3 个隐因子

每户要估的从 6 个降到 3 个，冷启动时间大致减半。而五个人设就是手工猜的载荷矩阵与它的几个聚类中心——户数够了把载荷矩阵学出来，人设从假设变成估计量，可证伪。这比省几个月冷启动值钱。

这里没有共同物品：每户户型、朝向、气象、空调都不同，唯一的公共坐标系是那些物理量。所以必须走基于特征的混合推荐，不能走纯用户协同过滤。

分母比分子重要

每维每年约 60 条抱怨，而占用清醒小时约 5800——

99% 的信息量来自「人在、醒着、没抱怨」这一小时。

暴露量算错等于模型报废——删失在这个形态下就是似然函数的分母。毫米波雷达首先是暴露量的分母传感器，睡眠分期是次要用途。

分母还有第二维：状态空间覆盖度。我们只能观测到策略实际产生过的状态——优化器从不让房间超过 26 度，就永远学不到这个人在 28 度时的反应；而且它自我强化：越保守则探索越少，探索越少则学得越少。

这是推荐系统里的曝光偏差，本质是因果推断问题。同样 5800 小时，全挤在 24 到 26 度对估计敏感度几乎没有信息。

所以主动探索是消除选择偏差的必要条件，不是加速项。探索的目标函数要写成状态空间覆盖度，不是「多试几次」。

模型外的随机实验

模型内可以用预测残差自监督，但残差变小不等于人更舒服——它只证明模型更准，不证明代价函数写对了。

「拟合对不对」不能靠拟合本身回答，得靠一个独立的实验回答。

做法是随机分配「开或不开残差修正」，以抱怨率为指标。三条护栏挡住三种钻空子的方式：把动作压到零不会赢，因为动作太保守则纠正慢、同向抱怨持续——抱怨率对动作强度是 U 形的，有内点最优；一直开空调压温度不会赢，因为代价函数里有能耗项；而「让人放弃按按钮」这一条最危险，对策是用率不用次数，并把依从率当哨兵——依从率下降就是用户在放弃，这是独立于抱怨率的告警。

样本量比想象的小：检出 15% 的率差约需每臂 2 户·年，十几户跑一个夏天就够比一次。

9.6 冷启动与破冰期的控制交接

阶段	控制依据	学什么
入住当天	问卷 → 人设 → 先验权重	不学，纯物理
第 1-4 周	先验 + 按离线计划主动探索	更新 3 个隐因子
第 2 月起	后验	被动学习 + 变点应对换季

冷启动敢上线，是因为控制项永远来自规范、不可学——隐因子错得再离谱也越不过硬约束。

但入住第一天不该直接跑优化器

那一刻残差网络为空、风压系数是通用值、流量系数是默认值——模型最不准的时候，恰恰交给了最依赖模型的控制器。

期	控制器	切换判据
保守期（约前两周）	规则控制器	—
正式期	滚动优化	预测残差降到阈值以下（模型标定够了才交权）

规则控制器一物三用：对照基线、保守期控制器、失效降级。

干预后的行为设计，比「怎么学」更直接决定信任

#	规则	理由
1	无条件立刻服从	不服从摧毁信任；信任没了人就把系统关掉，那样什么都学不到
2	服从后进入人工模式 30 分钟，期间只记录不动作	否则人开窗、优化器下一步又关，就是打架。30 分钟取自工业界已验证的手动覆盖回收时长
3	区分纠正型与临时型，只有前者更新权重	「每天下午都嫌热」是纠正型；「今天来客人开窗透气」是临时型

判据是重复性：单次不更新，在相似状态下反复发生才更新。统计判据，不需要人解释。

先验强度必须是一个显式参数，不能隐含在算法里：太弱会被单次异常干预带偏，太强则用户觉得「它不听我的」。

传感器失效怎么办

要装进老人家里的东西，必须先回答「坏了怎么办」：

失效	后果	降级
门窗磁没电或掉线	边界条件失真，预测全错	该房间退回渗透假设并提示换电池；连续多步失联则整户降级
温湿度传感器漂移	状态错	与邻室、室外交叉校验，偏差超阈值即弃用该点
占用传感器误判	暴露量分母错，学歪	该时段不计入暴露量，宁可少学不可学错
网络中断	云端模型拿不到	边缘设备用本地缓存的隐因子加纯物理模型继续跑

共享空间的偏好冲突要裁决

「客厅按同住者偏好、主卧按老人偏好」这条规则，**在客厅同时坐着老人和年轻人时没有答案**——而三室两厅占 45%，客厅是共享空间。

这在推荐系统里是群体推荐问题，聚合方式**取最小痛苦**：对在场每个人取最坏值，**让最难受的那个人尽量不难受**。

它天然偏向老人——老人的容忍带更窄，最坏值通常由他产生。**这是有意的偏向，不是副作用**——规则须显式写明，不作中立处理。

前提只是知道客厅里有几个人，占用传感器给人数即可，**不需要身份识别**。识别不出是谁时，退回「基准老人加年轻同住者」两个人设取最坏。

可解释性是降低干预率的手段，不是体验加分项

当人问「为什么关着窗」，系统能答：**「外面湿度 90%，开窗会让屋里更潮。」**端到端的神经网络没有这个能力。

对老人来说，不理解才会去按开关。而干预成本正是优化目标，所以可解释性直接服务于目标函数。

这条反过来支撑技术选型：选滚动优化不只因为它能处理硬约束，还因为它的每一步决策都能给出可陈述的理由。

十、对照基准设计

只报能耗的节能数字是要流氓——关掉空调最省电。这一章定的是：跟谁比、比什么、怎么比才算数。

10.1 三层参考系

状态分被动与主动：被动是不施加任何执行器动作、房子在环境下自行演化；主动是有人或算法下了动作。**两者都要有基准**，否则分不清「设备带来的」与「控制带来的」。

B-1	被动	能耗 0，舒适最差	← 原点，不是对手
└─	B1/B2/B3/B4	人的策略 / 规则控制器	← 真正的对手
└─	我们		
B0	傻瓜主动	舒适买满，能耗上界	← 天花板，不是稻草人

档	策略	谁在用	用途
B-1	完全被动：不动窗、不开机	—	原点
B0	空调 24 小时恒温常开	没人	能耗上界
B1	有人才开、离开就关	大多数人	参考
B2	B1 加「凉快开窗、热了开空调」，按固定设定值 24-26 度判「热」	精明的老人	主对手
B3	B2 加定时器预冷	会用智能插座的	参考
B4	调优过的规则控制器（阈值 + 滞环）	商业楼宇自控的实际水平	技术对照

B2 是真实用户：策略方向正确，但「热」的定义来自遥控器而不是自适应舒适带——这就是「信息不足」的具体形式。**B4 是技术上限**：信息充足但没有预测。

两档的定位要说准。**B-1 是原点，不是对手**：没有它就无法回答「主动操作到底带来了多少」。**B0 是天花板，不是稻草人**：没人真那么用，但它回答了另一个必须回答的问题——把舒适买满要花多少钱。

报「赢了多少」时，报占「原点到天花板」这段可争夺空间的比例，而不是相对某一个基线的百分比。

10.2 规则控制器基准

基准必须被真正实现并调优过，否则「赢了基线」不成立。 而它一鱼四吃：

对照基线 + 模仿学习的初始策略 + 失效降级 + 入住保守期控制器。

控制律照抄成熟产品的公开结构：双模态状态机加死区、低室外温度阈值、二氧化碳改写设定点、冬季脉冲通风加换气次数限幅、占用状态最大开度、安全限位取最严。结构是公开的，缺的只是出厂默认数值——所以才需要下一节的网格扫描。

基线取网格扫描出的最优配置，不用出厂默认值。

10.3 指标

报数三件套，缺一不可

每个对比必须同时给出：能耗（按分时电价折成钱）+ 同带宽下的超标度时数 + 动作次数。

后两项同时是第二笔账的读数。

有两笔账，而且它们不是零和的

只算能耗那一笔，这个产品在数学上是勉强的——年运维与年省电是同一量级。第二笔账是它成立的另一半。

经济效益		体感效益
单位	度电、元	超标度时数、干预次数、面板反馈计数
谁在乎	业主、物业	住的那个人
量具	计量插座	18 格反馈面板

为什么它们不是此消彼长：舒适只有一维时，提升舒适的唯一办法是把温度推得更狠，所以它必然费电。一旦舒适是多维的，就存在「某一维变好、能耗还降了」的方向——而那个方向单维控制器结构上表达不出来，因为它的目标函数里没有那一维。

一个实例：冬季关窗开一整夜暖气，在三个维度上同时把体验拉低，而温控器一个都看不见——二氧化碳后半夜必然超国标一倍多；室外含湿量加热后相对湿度只剩 31%，低于怕干下限；室温过冲实测占 48% 的步数超过 27 度。

帕累托改进区域的大小，等于目标函数里舒适维度的个数。只建温度，那片区域是空的；加上二氧化碳、湿度、垂直温差、占据点风速，它一直在长大。

A/B/C/D 那张分层表因此是一份改进路径清单：还没打开的每一维，都是一条帕累托方向。

两笔账分开列，不合成一个「综合节能率」。合成的数没法查证。

一个把两笔账合成可比量的指标

主动操作的边际回报 = (被动超标度时数 - 该策略超标度时数) ÷ 该策略能耗

单位：度·小时 / 度电

分子是体感，分母是经济，而且不需要给舒适定价。

能耗对比必须在同一舒适约束下

放宽舒适带省的电不是控制省的。固定设定值 24 至 26 度与自适应带 20.9 至 27.9 度的带宽差 3.5 倍（见 5.3）——如果基线用前者而我们用后者，那不是控制更好，是标准更松。

所有能耗对比必须在同一舒适约束下报告。自适应带宽是一场标准之争，有规范依据，但必须与控制之争分开列，不得混算进节能百分比。

舒适指标用外部标准，不用自定义量

舒适侧一律用标准的长期评价准则：超标度时数与超标比例，配自适应舒适带。两者都是越小越好——超标度时数记偏离的幅度与时长，超标比例记有多少小时落在带外。自定义的无量纲「不舒适度」无法与外部比较，用标准指标是为了让这组数可被第三方复算。

10.4 比较协议

不定死协议，赢了也没人信。

#	规则	不这么做会怎样
1	公平调参预算：给基线的调参次数与验证集不少于给我们自己的	「赢了一组没调过的参数」等于稻草人
2	参数网格加上包络：对基线的死区、二氧化碳阈值、换气次数上限、脉冲时长、低温阈值做网格扫描，只有赢过网格里最好的那组才宣称赢	同上
3	结论只能写成「赢过调优后的最佳规则控制器（N 组配置）」，不能写成赢过某一组	
4	同一个模拟器、同一段气象、同一套占用日程、同一组限位；只报相对量	开口面积是参数化近似，绝对值有系统误差；共用参数才能抵消

模型先被标定，再谈百分比。每一个百分比都必须挂在一个说得出标定误差的模型上：在换气次数误差与温度误差已知的模型里，相对调优后的规则基线，在同一舒适约束下改善多少。

「用流场计算验证了模型」是漏洞；「用流场计算与传感器标定参数、用实测验证模型」才闭合。

验证路径三条，从便宜到贵：借现成的公开锚（成本为零）；离线仿真（成本为零，几天，冬季工况比夏季好建，因为没有穿堂风的气流耦合）；一间房两周实测，这是唯一的硬证据——计量插座加温湿度记录仪，总共不到两百元，但必须交替日配对或两间同朝向同时对照，用「这周基线下周策略」会被天气差异吃掉结果。

10.5 预注册

写在跑之前，防止事后挑数据。

预期赢（规则控制器结构上做不到）	为什么
分时电价	最容易赢的一条，而且不依赖任何新硬件
预测与前瞻	规则是纯反应式的；贵州山风谷风昼夜换向可预测
热惯性预启停	规则按当下误差动作；我们能提前用夜间冷量预冷
多房间耦合	竞品按区独立，跨房间穿堂风不在其模型里
不规则占用	竞品靠周计划表；旅居房是「9 个月空置加不规则到达」
湿度作为目标	竞品只把湿度当脉冲开度的辅助；空置期防霉他们不做

预期会输或打平：天气平稳、无可预测事件、单房间、平价电价。这些工况下规则控制器已接近最优。

某一工况输了就如实报告，不靠调参掩盖；主张改为：

同等性能、十分之一成本、无需楼宇自控、无需专用电动窗、可后装到存量房，而且多做了他们完全不做的空置期防潮。

十一、实验与结果

11.1 最小实现与代码仓

先跑通一个户型：安顺星火家园 A1A2。选它的理由是尺寸链 14 条全对（全库唯一满分）、拓扑逐间人工看过、是基准形态。

```
节点：主卧 / 次卧×2 / 客厅餐厅（合并） / 厨房 / 卫生间 / 室外
边   ：每房间一组窗 + 房间与客厅之间的门 + 缝隙
输入：室外温湿度、风速风向、太阳辐射，逐小时
动作：直控 = 空调（分房间 + 设定温度 + 模式）+ 除湿机
      建议 = 每房间开窗度 4 档 + 卧室门开关
输出：各房间温湿度轨迹、换气量、能耗
```

先用通用风压系数跑起来，不要等流场计算——典型场景本来就不吃它。

动作分两类，仿真里必须分开处理：窗与门没有执行器，只能建议，依从率低于 100%，要按「照做 / 没照做」双分支求解，不能当成确定生效的决策变量。

门在仿真里取二值，依据是 7.3 的串联阻力实算：全开约等于没门，10 厘米缝只剩 22% 通流能力，关上只剩 1%。

代码仓：2637 行，13 个功能模块加 2 个测试，**30 项自检全过、3 项解析基准全过**。

11.2 标定顺序与可调参数

全模型最不确定的两个数是可开启比例与流量系数，它们一起决定通风量的绝对尺度。因此把它们留成配置项，真机标定时先调它们，别去动几何——几何来自尺寸链，是硬的。

流量系数按窗型分档给初值，不要全库用一个数：推拉窗 0.65，平开窗与上悬窗（飘窗主力）**0.45**。这是全模型最大的单点不确定性之一——这个数从 0.3 摆到 0.65，意味着通风量差一倍以上。

但窗口风速传感器把这一条连同大容器假设、串联公式一起变成了非问题：洞口直接测流量，流量系数、风压系数、风速廓线换算全部不参与。所以这些不确定性只影响「装传感器之前」和「未装传感器的楼盘」。

标定顺序不能反：先参数，后残差。有了逐时逐窗的实测流量之后，会有人想直接上一个网络学残差——反过来做，网络会把「参数没标准」一起吸收，变成一个不可解释、不可迁移的黑箱补丁。

残差网络必须带三条护栏：决策感知的不对称损失、迭代重训、以及不确定时退回纯物理。最后一条必须做，否则优化器会去利用残差网络在未访问区域的伪最小值。

11.3 验证层次

层次	怎么验	判据
单边	手算一个开口的孔口流量，对代码	完全一致
单房间	关窗时换气次数应落在 0.3 至 0.8	数量级
全户	全开窗对流时应远超规范最低值	定性
对标	与成熟软件同算例比对	偏差小于 20%
实测·两点	二氧化碳衰减法：关窗一次、开窗一次	换气次数的绝对锚
实测·连续	窗口风速传感器给的逐时逐窗流量与预测比对	残差不为零即模型错

三项解析基准，以及它们抓到的那个错

算例	偏差
纯热压双开口	0.17%
纯风压对流	0.00%
中和面方向	低进高出且等量，通过

热压函数曾同时存在两个相互抵消的错误——分母取错加符号反了。**30 项自检全过，只有解析基准抓到：**表现是恒定的 +1.36% 偏差，而那个比值恰好等于分母取错时的开方值。

单元测试测不出系统性偏差。恒定比例的偏差会让「A 比 B 大」「符号正确」「量级合理」这类断言照样全过。必须有闭式解析基准。

处置是把热压改用显式密度形式，从形式上就配不错对。

十个阶段跑出了什么

#	阶段	结果
1	气流网络最小实现	三类边 + 带阻尼牛顿求解器
2	热平衡耦合	端到端算例，隐式积分
3	解析对标 + 水汽平衡	修正热压公式中两处互相抵消的错
4	接入决策层优化	最小动作间隔与夜间卧室禁动做成硬约束， 全天仅 5 次切换
5	多臂老虎机学个体偏好	机制通过但闭环学不出——根因是可达工况点过窄且反馈无归因信息
6	接真实气象	降水做成最高优先级硬约束； 修复除湿档用相对湿度触发导致的失控正反馈
7	用真实气象逐条校核	三条结论全部成立， 热压主导与夜间关窗两条比单点假设时更强
8	冬季工况	按热容限幅根治制热过冲； 数据推翻「冬季需除湿」的预期
9	通风能耗账	开窗与新风风量差两个数量级
10	自适应舒适与风的净价值	风由负转正的临界室温 25 至 26 度 ；自适应带宽使室外落带外时数从 86% 降到 54%

第 5 阶段是一个负结果：机制在合成数据上干净收敛，接进完整闭环却学不出。根因是可达工况点过窄加输入无归因信息，对策是**双层按钮与主动探索**。

11.4 夏季结果

安顺 2025-07-01 至 07-08，计分 168 小时，用标准的长期评价准则，自适应带 20.9 至 27.9 度：

档	能耗 kWh	超标比例	超标度时数	偏冷 h	偏热 h	边际回报
B-1 被动	0	34.0%	62.5	57.2	0.0	—
B0 傻瓜主动	2.85	35.8%	66.2	60.2	0.0	-1.3
B2 被动优先	3.19	42.6%	83.1	71.5	0.0	-6.5
我们	3.21	30.2%	58.3	50.7	0.0	+1.3

三条读数：

① **偏热时数为 0——168 小时里房子一次都没热过，却有 57 小时偏冷。** 这把「避暑房夏季的问题不是热」从定性判断变成了数据。夏季该证明的不是省了多少制冷电，是「**不该开的时候别开**」。

② 主对手比什么都不做还差。B2 的超标度时数 83.1，而完全被动是 62.5——它只会制冷，而房子从不过热。一个只会制冷的执行器，在一个从不过热的房子里，不可能用电换到舒适。

③ 我们是唯一边际回报为正的档。相对主对手是干净的帕累托改进：能耗与超标度时数两项同时更好。

夏季省在除湿，不在制冷。机理拆开看：免费冷源替代机械制冷是真的，但上限受可开窗时数限制，降水锁死一半以上的小时；自适应舒适带不算进节能；避免无谓的冷凝除湿才是主项。

而这个主项有一个已被实测打出来的前提：

执行器	能否把温度与湿度分开调
窗	不能——开大了同时带进凉气和湿气，物理上耦合
空调	能——冷凝除湿可解耦，但只在制冷时才除湿

室外凉而潮时，温度早已达标、空调不该开机，于是唯一的除湿手段用不上。

没有独立除湿设备，「夏季节能」这笔账算不出来——因为省电的那条路径（不开制冷）与达标的那条路径（要除湿）是同一台机器。这决定了物料清单。

还有一个必须避开的自伤：用相对湿度触发除湿会失控——制冷降温使相对湿度升高，反过来加大除湿功率，实测把客厅从 26 度一路压到零下 1.4 度。必须按含湿量触发并设温度下限。这条不改，任何能耗数字都不可信。

11.5 冬季结果

安顺 2025-01-05 至 01-20，计分 360 小时：

档	能耗 kWh	超标比例	超标度时数	偏冷 h	边际回报
B-1 被动	0	100%	4727.5	360.0	—
B0 傻瓜主动	236.1	19.8%	42.0	71.3	+19.8
B2 被动优先	236.1	19.8%	42.0	71.3	+19.8
我们	190.4	47.9%	259.3	172.3	+23.5

这组数按原样读：省 19.4% 的电，舒适差 6 倍，每度电买到的舒适多 19%。

这是帕累托前沿上的另一个落点，不是 bug——往哪边走取决于能耗权重，而那个权重现在是拍的。

B2 与 B0 完全相同，因为冬季通风倾向天然退化成不通风，剩下的就只有供暖——冬季的 B2 是个空档位。

冬季省在设备，其次才是控制。 三项来源不可相加：脉冲通风替代持续换气约 22%，但对上调优过的规则基线基本清零，因为它本来就有冬季脉冲通风；分时电价省钱 5 到 8%、省电 0%，但这一项保留，因为规则控制器结构上看不见；分房间占用感知部分保留。

必须分开报的两件事：空调制热替代电暖器省 71%、全热交换回收 65% 的换气热损——这是换机器省的，不是算法省的。我们的贡献是告诉用户什么时候用哪台，在贵州这有意义（每百户仅 50.86 台空调，手边常同时有电暖器与空调），但把设备差报成算法收益是虚报。

冬季反而更适合做量化论证：贵州无集中供暖，全部电耗可计量，不像有暖气的地方分不清；冬季气象波动比夏季平缓，模型误差小。冬季算例因此是第一笔可报的节能账。

11.6 空置期结果

这是唯一不用和聪明用户比的战场——那段时间用户根本不在场。 目标不是舒适，是维持防霉所需的最低电耗，加防冻管，加值守。

基线在这里是两个极端，都很差：全关不管则家具布草莓变返潮；除湿机常开则电费白烧六到九个月。我们做的是按露点与霉菌风险的间歇除湿加间歇通风。

风险窗口已用霉菌模型在真实气象上实算，必须按有没有人住拆开：

	时数	除湿机可用
有人住（夏，旺季）	584 小时	100%
空置（春秋冬）	575 小时	55%（春 84% / 秋 72% / 冬 0%）

三条会改变结论的边界：

- 1. 判据必须用表面相对湿度——空气相对湿度判据下连续超临界 72 小时的时段是 0，会得出「不长霉」的错误结论；
- 2. 空置期的除湿机覆盖率是 55%，不能用全年均值代替（全年均值被夏季的 100% 拉高），缺口全在冬季那 166 小时；
- 3. 论证只到「风险窗口存在」，没到「损失多少钱」——只算了超临界持续时长，没跑霉菌指数的积分。

空置期那 50% 到 85% 不并进全年控制节能率。 它相对的是「除湿机常开」，而多数业主的实际做法是「全关不管」——

对上「全关不管」，我们不省电，是花一百多度电买防霉。那条线的收益是避免损失，不是省电费。

它的价值也不只是电费：避免家具布草莓变与上门跑腿，这一项可能大于电费；而且决策方是物业与业主，不是住户，客单价与决策权都更高。

以上三段结果共同的适用边界，以及三个已定位并给出判据的实现缺陷，列在附4.8。

11.7 在线实时性

安顺 2025 年 7 月整月算例：

控制步（15 分钟一步）	2976 步
总耗时	69 秒
每控制步	23 毫秒
折合气流网络求解	约 24 万次，单次约 0.3 毫秒
相对 900 秒控制周期的余量	约 4 万倍

（该耗时含三条策略对比，其中只有我们这一档做推演，所以 23 毫秒是保守上界。）

两条推论：

1. 神经网络代理模型暂不需要——余量四万倍，速度不是瓶颈；
2. 慢快变量分层不是为了算得动（候选数涨一百倍每步也才 2.3 秒），是为了避免在慢变量上频繁切换。

十二、局限与路线

12.1 待验证假设

本节分两类：已经判定的，和仍然开放的。

已判定，不再是开放问题

问题	判定
强化学习在温控主环上是否必要	不必要——我们有模型，用滚动优化。 它的正确位置是偏好层
世界模型是否需要	不需要——房间层的物理模型已经充当了那个角色
对照基线选谁	不是 PID （稻草人），是调优过的规则控制器
风的传感方案	每扇可开启窗内外装风速风向传感器，它同时把流场计算从「唯一来源」降为冷启动先验
气象数据从哪来	已完成，九市州逐小时全年

「世界模型」这个词底下是三件被混叫的东西：学出来的潜空间动力学、代理模型、离线数字孪生。我们需要第三件，而它已经有了；第二件当前不划算；第一件不适用。

不适用的第一条理由：学出来的模型，天花板就是给它打标签的那个模型。用物理模型生成数据去训练，学出来的最好等于它、实际必然更差；用真实数据训练，一间房一整年只有一两万步，而潜空间动力学通常需要十万到百万量级——更致命的是季节是超低频变量，要让它见过各种冬天，得采好几年。这不是算力问题，是时间不可压缩。

第二条：它擅长的那个难点这里不存在——学习式世界模型的真正价值是感知压缩，把像素压成潜向量，因为你写不出那堆像素下一帧的方程。而我们的状态是二十来个标量，没有像素，没有感知问题，动力学是质量守恒加孔口方程加热平衡。这是拿解决一个问题的工具去解另一个问题。

行业实践也在同一侧：建筑暖通控制的主流基准平台清一色用物理仿真器，没有一个用学出来的世界模型。

准确的说法是：我们用的是白盒世界模型——物理气流网络。在动力学已知的问题上，它比学出来的世界模型样本效率高几个数量级，而且能被实测标定。世界模型该用在动力学未知、观测高维的地方，不是用在一栋有一百年成熟方程描述的房子。

仍然开放，且按优先级排

#	待办	为什么卡在这里
1	修推演与执行不一致的两处漏传	影响所有已有结论，成本极低，必须先做
2	换气次数实测（衰减法，关窗一次开窗一次，几百元）	所有「相对改善多少」的表述都以它为前提
3	独立除湿设备选型与采购	没有它偏好学习空转，且空置期主力动作就是它——优先级最高的采购项
4	可辨识性预检	用已知真值造抱怨看估计器能否恢复。纯离线、无外部依赖、部署前必做
5	接分时电价序列、把二氧化碳接进不舒适度	跑冬季算例之前必须先做，否则体感仍只有温度一维
6	舒适判据改用操作温度	会让冬季结论变差，但现在的冬季数是高估的
7	找一到两家实际运营方验证买单意愿	商业侧唯一的硬缺口
8	空置期霉变的损失金额	那条唯一算得过账的收益线，分子是空的
9	表面温度节点与占据点节点	两个节点补齐舒适判据的六个量
10	量化「开门睡觉」的取舍	典型场景的核心问题，至今未量化

还有一类数字必须先核到一手来源再使用：典型是「智能控制节省 20% 到 30%」——它撑着财务账，核不到就不用。

12.2 硬件侧的关键前置

独立除湿是被仿真闭环推出来的硬件需求，不是设计推演。偏好学习的机制在合成数据上干净收敛，接进完整闭环跑三十天却学不出来，五个臂的后验挤在一起。根因不在算法，在执行器：任何权重组合都到不了「凉且干」那个落点。

它同时补上了创新点的一角：「凉而潮」是贵州避暑房特有的问题，而这台设备是解它的必要条件。

12.3 暂缓清单

放进这里的都不是「以后再说」，而是「有明确触发条件、条件不到就不做」。

项	触发条件
代理模型 / 降阶模型	要做实时空间分布体感；或跨户型在线泛化使工况数涨两个量级；或流场计算从标定器变回数据生成器。 当前在线求解余量四万倍，被替代对象成本接近零，收益也就接近零
策略蒸馏	慢快变量分层降维之后 仍然超时 。结构没理顺就上蒸馏，蒸的是一个本来就该更小的问题
神经网络接管评分函数	15 到 20 户·年 启用加性模型；再往上按户数阶梯走。门槛是户数不是算法
邻栋与遮挡进流场几何	先做便宜档——把遮挡做成三档离散特征并进已有的敏感性扫描， 看它对换气次数的影响量级；扫描之前不投入邻栋几何
计算机视觉提取窗洞	有实测通风量且需把几何误差压到 10% 以内；或户型库扩到几百个且渲染风格收敛；或拿到工程源文件（那时也不必做了）
地暖进动作空间	正确形态是「地暖做基础负荷、空调调峰」的分层控制， 不是再扔一个候选进枚举
候鸟 / 社会尺度模拟	不进控制闭环

附录一：市场与商业化

附1.1 政策依据

省级有专项方案，九市州 2025 年政府工作报告中至少 8 个有关于避暑房或避暑康养旅居的明确表述，**安顺是唯一给出量化外销目标的那份**。省住建厅另有《贵州省旅居地产设计导则》，其中 7.1.3 要求节能设计遵循「被动措施优先、主动措施优化」，**这是本项目立意的官方背书**。

「避暑房」不是贵州独有的提法，旅居也不是贵州独有的省级重点。相邻的重庆、云南、湖北利川都有同类资产。这一条正好支撑「可复制」：**同一个决策器换套参数就能装过去，而贵州是最需要它的那个市场**。

同时要知道一条泼冷水的判断：**贵州旅居是半年生意，跨省候鸟一年来三个月、社区空置九个月**。这不是场景问题，是资产结构问题。**而我们的系统恰好是少数在那九个月里仍然在工作的东西——不是把夏天做得更好，而是让不能用的那大半年不至于变成纯成本**。

附1.2 需求侧

全省存量住房与本项目的目标房源是两回事。城镇每百户空调保有量 50.86 台，多数房子没有空调；**而目标房源是旅居出租、精装新交付的，有空调是常态**。

由此得到两条硬约束：**空调降级成可选执行器；空调在贵州存在的理由是冬天**。

附1.3 供给侧与企业结构

现有企业结构有几个共同问题：卖设备不卖决策、按项目制交付难以规模化、面向商用建筑而非住宅后装。**我们的定位由此确定为三条：住宅可后装、面向存量房、买单方是集中管理成百上千套房的运营方而不是单个业主**。

一手对照样本是全球这个细分的领导者：它 1990 年成立、2020 年上市，2025 年营收约 2.7 亿人民币量级、同比下降 8%，**息税折旧摊销前利润率 10.4%，税后净利接近于零**，平均员工 146 人，毛利率约 47%。收入结构是整体解决方案加服务合同加三十五年装机量的翻新改造，**公司明确把服务合同称为「稳定的经常性收入」**。

四条比数字本身更重要的启示：

1. **这是个利基市场，不是大赛道**。做了 35 年仍是这个体量，**天花板是明确的**。
2. **他们的钱主要来自项目工时与服务合同，不是卖算法**。对我们的含义是：**一次性卖硬件必然低毛利，可持续的形态是订阅加存量翻新**。
3. **他们几乎不碰住宅，这既是机会，也是我们要自己回答的那个问题**。我们凭什么进得去——**中国有货架级的低价执行器与后装网关；而我们的买单方是运营方，渠道成本被摊掉了。这两条缺一不可**。
4. **毛利 47%、利润率 10% 是这类硬件加服务混合模型的现实天花板**，做财务测算时别把毛利拍到 70%。

附1.4 分档产品与物料清单

产品只有 A 档（免施工）与 B 档（装修期）两档，划分见 2.4。

A 档·免施工，控制侧合计 ¥440。 单价是 2026-08-28 的实际询价，不是估值：

件	单价	数量	小计	服务于什么
Zigbee 网关	¥70	1	¥70	组网；滚动优化在云端，它只做执行与缓存
红外空调网关	¥60	1（主卧）	¥60	唯一的直控执行器——典型场景是夜间卧室
温湿度	¥30	3	¥90	状态变量，兼占用软传感的输入
门窗磁	¥20	8	¥160	气流网络边界条件 + 依从率 + 非删失反馈，一件三用
场景面板	¥30	2（床头 + 客厅）	¥60	唯一的显式偏好信号

B 档·装修期：加电动窗、电动窗帘、新风或除湿预装，只有装修时才谈。

加装件（随时可加，不构成一次采购决策，因此不设档）：

件	价	买到什么
二氧化碳 ×1	¥150	解锁面板「闷·透不过气」那一格与新风动作
红外网关 +1	¥60	客厅也能直控
毫米波 ×1	¥65	暴露量的分母 + 睡眠代理 + 跌倒检测
吊扇 ×2	¥500	需先升到 S3 ，否则模型里是纯耗电
除湿机	¥1230	凉而潮除湿与空置期防霉的唯一执行器，它自己就回本，见附 1.5

成本压缩靠砍结构，不靠砍单价

从 ¥1110 砍到 ¥440 分两步。**第一步是实价核对，两项被高估三到五倍：**网关按定制单板估 ¥300，现成 Zigbee 网关 ¥65 至 75；反馈面板按定制估 ¥120，而**双层按钮是软件行为，现成的 4/6 键场景开关 ¥18 至 35 就能承载，不必定制**——这是最容易被漏掉的一笔省钱。同批核价里除湿机反而比原估贵 ¥330。

第二步是四条结构性削减，¥730 → ¥440：

#	做法	省	依据
1	占用改用湿度上升速率软传感	¥130	人体散湿约 50 克每小时，水汽平衡方程反过来用就是占用探测器 (7.4)
2	红外网关只保主卧	¥60	不能全砍——砍完系统退化成纯建议
3	温湿度只装主力房间	¥60	厨卫由模型推，但要留够观测点校正
4	计量插座移出部署清单	¥40	它是测试仪器不是部署件，归入标定预算 (7.7)

占用软传感的诚实边界：慢（几十分钟）、分不清一人还是两人、窗大开时湿气被冲掉即失效。但暴露量本来就是小时级的量，慢是可接受的。

两项不能砍：门窗磁 ¥160——它是气流网络的边界条件，且不可推算，反演是病态的，只能给出全屋聚合开口面积、分不清是哪一间；反馈面板 ¥60——唯一的显式偏好信号，砍了整个学习循环没有入口。

最大的单项不在我们的物料清单里——除湿机、新风机本体是业主既有或另购的，我们卖的是控制与决策。这既降低物料成本，也意味着不能把设备节省算成我们的收益。

附1.5 成本、收益与回本周期

回本测算是整个项目最脆弱的一环，结论如实列出。

三个战场的收益性质不同，不能相加成一个电费数

按第十一章的实算：

战场	电费	体感	真正的收益
夏季	≈ 0 (3.21 对 3.19 kWh)	超标度时数 降 30%	舒适
冬季	省 45.7 kWh, -19.4%	超标度时数变差	电费
空置期	净支出，多耗一百多度电	—	避免霉变损失

「一次安装、三季有活干」成立，但那是三种不同的收益，不是三段电费之和。

独立的年度测算给出同一结论：夏季按 30 个制冷日、日运行 4 小时算，年耗电约 144 度、电费 72 至 100 元，即使按行业口径的 20% 至 30% 节能率也只省 15 至 30 元每间每年——买不起一个传感器；冬季按 90 个取暖日、日运行 6 小时算，年耗电约 810 度、电费 405 至 567 元，省 80 至 170 元，高一个数量级。

在贵州，「夏天省空调电费」这个卖点在财务上不存在——房子本来就凉快，本来就没开几天空调。能算过账的是冬天与空置期。

年运维与回收期

年运维（A 档）	
门窗磁电池（8 只，1.5 年一换）	¥16
云服务与流量	¥40
传感器年故障更换（按 5%）	¥22
合计	≈¥78 / 间·年

BOM	成本	年运维	仅电费	电费 + 避免损失
原估	¥1110	¥112	12.6 年 ~ 永不回本	0.9-4.4 年
实价核对后	¥730	¥92	6.8 年 ~ 永不回本	0.6-2.7 年
A 档定版	¥440	¥78	3.6-25.9 年	0.3-1.5 年

两条要一起读。成本砍掉 60% 之后，仅电费口径第一次在乐观端进入 4 年以内；但结构结论没有变——主要收益仍在空置期的避免损失，而那个金额（估算区间 350 至 1350 元每间每年）从未验证，列在 12.1 的第 8 项。

这条收益线有一个政府口径的锚：重庆市政府公开文章指出，一套 70 平方米的避暑房淡季持有成本一年超过 5000 元。空置期值守要证明的，是它能在这 5000 元里占住一块。

除湿机是 A 档里回报最高的一件硬件

它常被当成额外成本，但按实算它自己就回本：

年除湿运行时数	相对空调除湿档的电费差	¥1230 回本
500 h	¥288-402	3.1-4.3 年
1000 h	¥575-805	1.5-2.1 年
1500 h	¥862-1208	1.0-1.4 年

安顺全年需除湿 3443 小时（占全年 39%），取其中三成实际运行约 1000 小时是保守估计。功率差有两个独立来源互证：中国家用电器研究院实测除湿机 250 至 450 W 对空调除湿档 1300 至 1800 W，20 至 25 度中温高湿下空调除湿耗电是除湿机的 2 至 4 倍；本项目 85%→60% 的对照测试是 0.82 度对 3.15 度，3.8 倍。

而且空调那条路在贵州多数时候根本走不通：那 3443 小时里，**2838 小时（82%）**室外温度低于 **25 度**——此时室温 21 至 24 度，早已落在自适应舒适带内（老人的舒适下沿是 22.4 度），**空调不该开机；真开了除湿档，会把室温再拉到 17 至 22 度。**

除湿机 1.5 至 2.1 年回本，比整套控制系统的电费回本期还短。它不是额外成本，是 A 档里回报最高的一件硬件——没有它，那 82% 的除湿工况我们只能眼看着不动手。

报数规则

两笔账分开列，不合成一个「综合节能率」。 经济账报绝对值，体感账报改善量与帕累托前沿。**合成的数没法查证。**

三个数在引用前必须标明地位：电价 0.5 至 0.7 元每度是区间估计；「智能控制节省 20% 至 30%」尚未核到一手来源；空置期避免损失是纯估算。**前两个影响冬季那笔账的大小，第三个决定整个回本结论。**

附录二：计算流体力学

附2.1 在计算与测量之间的位置

流场计算在本项目里只干一件事：标定系数。它是标定器，不是数据生成器，也不是验证工具。

流场计算不是风压系数的唯一来源：典型场景（单侧通风的卧室）本来就不吃风压系数，实测热压占 64.6%、风压仅 14.3%；穿堂通风的公共区虽然风压主导，但那里是单向流、流速较高，窗口风速风向传感器的洞口测速直接给出流量。

它的定位是冷启动先验，不是精度上限：

何时仍需要它	说明
首栋楼装传感器之前	冷启动值
未装传感器的楼盘	新盘、投标与装修前的配置推荐——那里根本没有传感器
室内射流衰减系数	洞口流速给的是入口条件，给不出床头那一点的风速

当前阶段不跑流场计算：用通用关联式起步，传感器在线标定列入路线图。

附2.2 室外绕流与风压系数

产出是一张表，就这些：立面 × 入射角 → 风压系数。

索引必须是入射角，不是绝对方位。工况因此从八到十六个绝对方位收缩到三档：正吹 0 度、斜吹 45 度、掠过 90 度，乘以主力楼栋数。同一套工况可复用到任何朝向的楼。

「用流场计算补稀有风向」这个说法是错的：稀有的正是东西向，而东西向掠过侧墙、压差小、通风贡献小——稀有和不重要是同一批风向。而且锐边钝体的风压系数与雷诺数无关，低风速实测可以外推到大风，「大风样本少」也不构成问题。

几何上有三条不能省的：

- 工况是「楼栋 × 风向」，不是「轮廓 × 风向」——同一个户型在不同楼栋、不同楼层的处境不同；
- 立面不能简化成光滑长方体——库里飘窗 30 例、双阳台 19 例、凹口 14 例，这些细节正是分离流的起点；
- 户内拓扑在建模目标区间内不必分支——「卧室单侧」是不变量，庭院类只是在公共区多挂一个缓冲区节点。

取值有两个静默陷阱：某些求解器存的是运动学压力而非压力，忘了乘密度整张表偏 1.2 倍且不报错；以及参考点必须取计算域入口同高度处的静压，参考点不一致则整表偏移。

附2.3 室内流场与射流衰减系数

产出只有一个量是必需的：射流轴心衰减系数，外加一个并列的换气效率。两者由同一批算例一起出。

选定的做法是「射流公式加十到二十个算例标定系数」，**它把室内这一侧的算力需求压掉一个数量级**，且结果可解释。

唯一真损失：射流公式在房间角落与回流区不准，要判断墙角那把椅子还得回去做流场计算；床与沙发通常在射流路径上或明确远场，两端都还行。更便宜的替代路径见 7.6。

附2.4 工况定义、规模与算力

优先级是室外绕流优先、室内流场降级，理由不是算力，是可替代性——室外那一侧产生的风压系数无可替代（在未装传感器的场景里），而室内那一侧有射流公式这条替代路径。

跑不跑的判据是「要解锁哪一档状态」。室内流场解锁的是 S3，而 S3 对应的动作（风扇、直吹、脚冷）都还没有进目标函数——**在那之前跑室内流场是无处消费的**。

本机与云的分工、时间预算与软件选型按标准做法处理。**这一整块的产出只是两组系数，跑完就丢，不进在线闭环**。

附录三：工程实现与部署

附3.1 状态契约与接口形态

服务端要回答的是：给定一组状态，这套房子在基线策略与优化策略下分别会怎样。

输入是五组状态，全部枚举，不接受自由文本：户型与楼栋、城市站点、时段（用旬到代表日的映射）、设备配置、人设与占用。枚举的好处是请求本身就是缓存键。

代表日取「最像该旬平均的那一天」，而不是取平均值——平均会把昼夜波动抹平，而昼夜波动正是这个问题的驱动力。

接口形态是基线走缓存、优化现算：基线策略的结果与用户偏好无关，可以离线全量预计算；优化策略依赖权重，必须现算。

响应结构里概要与逐时同时给，不做二选一——概要用于卡片展示，逐时用于画图，两者的定义必须一致，且都要带上前面定的报数三件套。

附3.2 时延、缓存与流式推送

本机实测每控制步 23 毫秒，整月算例 69 秒。云上要打折，但余量足够。

加速有三个方向，按性价比排：缓存基线、缩短推演时域、并行化候选评估。代理模型不在这个列表里——被替代对象的成本本来就接近于零。

一条体验上的关键改进是流式推送：整月算例要几秒，但用户不需要等全部算完才看到东西。逐步推送把首屏时延从秒级降到毫秒级。这是体验问题，不是性能问题。

要不要换语言，要分开看传输层与计算层。计算层的瓶颈是数值求解，换语言收益有限；传输层如果真的成为瓶颈，那是另一个问题。在余量四万倍的前提下，两者都不急。

附3.3 服务器配置与部署形态

负载画像是「低频、突发、计算密集」——不是高并发场景。

部署形态由学习机制决定：模型云端训、本地跑（见 9.5）。边缘设备跑优化器加共享模型加本地隐因子，云端只聚合那三个隐因子。房侧参数跨住户累积、属于物业方，是可谈判的商业资产。

最后一条：网络中断时系统必须继续工作。边缘设备用本地缓存的隐因子加纯物理模型继续跑——这不是可选的容错，是「装进老人家里」的准入条件。

附录四：推导与实现细节

本附录收的是正文各章的推导、公式与接口契约。读结论不必读它；要复算或复刻才需要。

附4.1 边的本构与压差

大开口用孔口方程

质量流量 = 流量系数 × 有效开口面积 × 符号(压差) × √(2 × 密度 × |压差|)

有效开口面积 = 窗洞宽 × 窗洞高 × 可开启比例 × 开窗度

开窗度就是动作变量。流量系数取 0.65、可开启比例取 0.40，两者都留成可调参数。

流量系数有解析解打底。理想伯努利给 1，实际小于 1 是因为缩流断面；二维薄壁锐边缝的解析值是 $\pi/(\pi+2) \approx 0.611$ ，乘速度系数后约 0.60。这个数是理论值，不是拟合凑的。

但它强烈依赖开启方式：

窗型	有效流量系数
推拉窗（开口是干净矩形洞）	0.6–0.65，接近理论值
平开窗 / 上悬窗	0.3–0.6，分散极大——窗扇挡在气流路径上，既可能阻流也可能导流

贵州户型飘窗普遍，而飘窗多为平开或上悬。所以这个系数的不确定度不是 ±10%，可能是 ±50%。因此实现上按窗型分档：推拉 0.65、平开与上悬 0.45，全库用一个数是错的。

孔口方程隐含一个大容器假设：上游必须近似静止。严格式子要带速度趋近修正，误差取决于开口面积占气流路径横截面的比例：

开口占流通截面	误差
18%（普通窗）	+1.7%，可忽略
42%	+10%，失效阈值
61%（阳台推拉门全开）	+26%

判据：开口面积超过房间流通截面的 40% 时，孔口方程失效。

这不是抽象的免责声明——户型库里阳台是普遍配置，阳台推拉门全开是会撞上的工况。

大开口的双向流

这一类是上面的例外，不能混用。开口高度大时，压差沿高度会变号：中和面以下进、以上出。

内门几乎永远是双向流。压差沿高度的梯度就是热压：两室温差 5 度时约 0.2 帕每米。而内门的实际净压差有多大？一个 1.8 平方米的门洞就算过 360 立方米每小时的流量，净压差也只有 **0.004 帕**——远小于 **0.2 帕**，所以中和面几乎永远落在洞内，单向才是例外。

漏掉的量有多大？不是几个百分点，是「16 次换气还是 0」：

两室温差	交换流量	对 32 立方米卧室
0.5 K	256 m³/h	8 次/小时
2 K	512 m³/h	16 次/小时

而单向模型给出的净流量约等于零。

这一条撑着两个结论：

- 「门决定装几台空调」是个物料清单结论。客厅开空调、卧室不开、门开着，靠的是冷空气贴地进卧室、暖空气贴顶回客厅——净流量为零，交换流几百立方米每小时，按 2 度温差算能搬运约 340 瓦冷量。用单向模型，气流网络会说这扇门什么都没传，于是结论变成三室两厅要装四台空调。
- 「关门睡觉是典型场景的物理瓶颈」。穿堂路径单向能算，但夜间单侧加开门借客厅冷量那条，只有双向流算得出来。

实现上合并，文档上分开。数学上双向是一般式，单向是它的极限，且解析式存在，成本与单向相当——所以代码里只写双向那一套，净压差大时它自动退化成单向。但文档必须分开写，因为不写清判据，实现的人会以为双向只是精度修正，随手用单向近似，而那会静默地把开门的收益归零。

风压

风压 = 风压系数 × ½ × 空气密度 × 参考风速²

立面处境	风压系数
迎风面	+0.6 ~ +0.8
背风面	-0.2 ~ -0.4
侧风面	-0.4 ~ -0.7

驱动穿堂风的是两个立面的系数之差。

这个系数和流量系数不是同一类数：

位置	值	是什么
驻点	精确等于 1.0	纯理论——伯努利
迎风面平均	+0.6 ~ +0.8	实测拟合，无解析解
背风 / 侧风	-0.2 ~ -0.7	纯实测，且是分离流尾迹—— 流体力学的经典未解问题

模型用的是两个立面之差，而不确定度最大的那个数直接进驱动压差。背风面的分散度是迎风面的两到三倍。这就是它被称为全模型最大不确定性来源的原因。

但有一条真正的理论结果撑着它：**锐边钝体的风压系数与雷诺数无关**。对方盒子建筑，超过一定雷诺数流态就不再变——分离点被棱角几何地钉死了（对比圆柱，分离点随雷诺数移动，还有阻力危机）。这一条支撑三件事：**风洞小模型可以外推到实楼**（否则整个建筑风工程都不成立）、**低风速实测可以外推到大风**（所以「大风样本少」不构成问题）、**流场计算不必扫雷诺数**。

装了窗口风速传感器之后，按窗的状态分三种改法，不是一种：

窗状态	传感器给什么	公式怎么变
开着	洞口流速	整条链跳过 ：流量直接等于流速乘面积
关着	窗外来流速度	廓线换算消失 ，但风压系数仍需要
历史累积	多小时的流量、速度、面积、温差	反演出这栋楼自己的风压系数 ——含地形与邻栋效应，通用数据库没有

测速度不等于测压力。窗外风速计测的是局部来流速度，不是立面表面静压；近立面处气流在减速、分离，两者不是简单的动压关系。**风压系数不会因为装了风速计就消失**，只是从「查通用数据库」变成「可被本楼实测反演」。

但它的重要性被结构性消掉了：

窗状态	换气次数	系数错一倍的后果
开着	可达 100	严重——但这时能直接测流量
关着	0.3-0.5	幂律衰减后换气次数只差 1.57 倍， 后果小得多

精度需求最高的工况，恰好是能绕过它的工况。

热压的显式密度形式

$$\text{热压} = (\text{室外密度} - \text{室内密度}) \times \text{重力加速度} \times \text{开口形心高差}$$

这一项完全不依赖流场计算。

温度形式是它的等价改写，但有两个陷阱：

陷阱一：温度必须是绝对温度。 夏夜典型工况下，用摄氏度会让结果差 **11.5 倍**；接近零度时分母趋零，负温还会翻号。

陷阱二：密度与分母的温度必须配对。 提室外密度就配室外温度，反之亦然；配错会产生一个**固定比例的偏差**，而这类偏差不会被单元测试抓到（实例见 11.3）。

两条结论：

1. **显式密度形式从形式上就配不错对**——这是实现采用它的原因；
2. **单元测试测不出系统性偏差。** 恒定比例的偏差会让所有「A 比 B 大」「符号正确」「量级合理」的断言照样通过。**必须有闭式解析基准那一层。**

两条不由压差决定的边

有两条边的流量是**外部给定的**，不能用孔口方程，要作为已知量直接进守恒方程：**厨房抽油烟机**（排 300 至 500 立方米每小时）与**新风机**（送约 60）。

两者同类：都是「泵」不是「孔」，都造成真正的质量不平衡。

新风是空调工作点里唯一进流网的字段。 制冷、除湿、制热、送风都不搬运空气进出房间，**只有新风搬。**

附4.2 符号约定与接口契约

一组必须写死的符号约定

三个「有效面积」两个同名不同义、第三个惯例相反：单个开口的可开启几何面积、串联等效面积，这两个**都不含流量系数**（系数单独乘在方程外）；而渗漏当量面积在文献惯例里**通常已经把流量系数折进去了**。

在某处把系数折进面积而别处没折，流量差 0.65 倍且不报错。

一组接口契约，不写死会静默出错

约定	不约定的后果
参考风速取 10 米 气象站高度，与气象数据同基准	建筑风工程常用建筑高度。27 层楼按廓线换算 两者差 2.4 倍 ，通风量差 1.5 倍， 且不报错
系数取开口洞口面积上的面平均，不是形心点值	飘窗洞口高，角部梯度大，点值系统性偏
索引是「立面 × 入射角」，不是「立面 × 绝对风向」	按绝对方位查表会错位；按入射角查， 同一套表可复用到任何朝向的楼
每张表必须标注它是以哪个参考风速反演的	传感器上线后基准从「气象站」变成「窗口实测」， 两个基准算出的数值完全不同 ，新旧混用会静默出错
反演产出的是立面之差，不是绝对值	拿它去和通用数据库对比会以为差了一个常数偏移而去「修正」它—— 而那个偏移是基准不同，不是误差

附4.3 时间积分与守恒前提

时间步与三层嵌套循环

循环	在迭代什么	尺度
牛顿迭代	同一时刻内 解质量守恒，因为孔口方程含根号，非线性	不涉及时间
时间步进	解一次气流 → 得流量 → 步进热、湿、二氧化碳 → 新温度改变下一步的密度	15 分钟一步
滚动优化	每个控制步把候选动作各推演若干步	见第八章

第二层内部是交替，不是联立：用步初温度算这一步的流量，再用这一步的流量更新温度，**一次通过，不迭代**。够用的理由是时间尺度分离——气流秒级、热小时级。

但开窗时这个分离会破。换气次数 100 时房间空气 36 秒换一次，考虑蓄热后热时间常数掉到**约 3 分钟**，不再远大于 15 分钟步长。

这就是必须用后向欧拉的原因——显式格式在这里会失稳：

工况	热时间常数	后向欧拉给出
关窗	小时级	正确的慢瞬态
开窗	约 3 分钟	准稳态解 ——物理上也正是对的

两个极限它都对，所以后向欧拉是必需的。

一条必须自觉的前提

热平衡写成温差形式，以质量守恒成立为前提。不平衡时，用摄氏度和用开尔文算出的焓变化率差 19 倍——因为它依赖零度设在哪，而物理不能依赖坐标原点。质量平衡时两种基准给出同一个数，基准无关了才是对的。

推论：抽油烟机的强制排风是真正的质量不平衡，那时不能套温差形式，必须回到一般形式，把补风的焓显式写出来。

附4.4 空调的能力上限与限幅

能力上限与限幅

制冷能力随室外温度变。额定工况是 35 度，贵州夏季室外 25 度，制冷能力比额定高约 10%——这是「避暑房空调很少满载」的一半原因。

温降速率由房间热容决定，不由空调单独决定。必须加一条限幅：一步内不得越过设定值。没有这条限幅，比例增益乘以偏差会算出两千瓦，一步 15 分钟升温 10.5 度，冲过设定值再回摆——冬季实测 48% 的步数室温超过 27 度。

附4.5 学习器的模型阶梯与仿真用途

模型阶梯

广义线性点过程 神经加性模型 双塔网络 全序列注意力

16 参数 每维一个小网络 加交互项与户嵌入 全序列

升级不是替换，是放松约束。任一档跑不通都能退回上一档，退回来的是同一模型的受限版本，先验不必重标。

户数·年	模型	参数量
约 0.3（4 个月）	每户独立的线性点过程	16
5-15	神经加性模型，跨户共享	约 200
50-200	加户嵌入	约 300
≥1000	全序列模型	约 10 ⁴

单户上通用神经网络需要 10 到 35 年——门槛是户数不是算法。但加性模型只需 15 到 20 户·年，不必等到几百户。

神经网络要真正成为超集，必须显式保留五样东西：暴露量与删失（损失用点过程似然，不是均方误差）、不确定性、单调与符号约束、先验、可解释性。

其中单调约束不是保守，是安全边界：曝光偏差保证状态空间必有未覆盖区域，而优化器会主动去找模型的最小值，包括外推出来的伪最小值。

加性结构顺带解决了这一条——它的每个分量是一维函数，单调约束在一维上是平凡的，可解释性也是精确的而非事后的。加性模型不是折中，是这个问题的正确形态。

网络接管的是评分函数，不是约束。硬约束由可行集裁剪与限幅层保证（见 8.3、8.7），网络负责「什么算好」，安全边界不交给它——这是把神经网络放进居家控制系统的前提。

仿真的三个用途，与一条禁令

仿真不能造偏好标签——按人设采样权重生成合成抱怨再拿去训练，只会复现我们自己的假设。它的三个合法用途是：

- 1. 可辨识性预检——用已知真值造抱怨，看估计器能否恢复、要多少天。恢复不了合成数据就一定恢复不了真实数据，部署前必做；
- 2. 探索调度——算出哪些工况点区分度最高，离线排出探索计划；
- 3. 代理模型的训练数据——这一侧数据无限。

神经网络用在物理侧，不用在偏好侧。一边数据无限，一边是全项目最稀缺的资源。

附4.6 户型图字段提取管线

户型图不是效果图，房间网格可按毫米还原。以安顺星火家园 A1A2（122.49m²）为例，开间链与进深链首尾相加能对上，说明标注是自洽的。

提取通路走 macOS 原生 Vision。一条已写进自检断言的约束：识别档位必须传 accurate——fast 档只支持拉丁语系，会把中文识别成拉丁乱码而不报错，实测识别行数从 62 掉到 16，字段全空。

尺寸链提取靠包围盒位置聚类，不靠猜。Vision 给出每个文本的位置，尺寸标注沿户型四边成行成列排布，于是把纯数字按纵坐标聚成行、按横坐标聚成列，最上行是顶部开间链，最左列是左侧进深链，以此类推。三个必须的处理让召回一路提高：

处理	不做的后果	做了之后
放大到 3000 像素	原图多为 600×900，尺寸数字太小	单张召回 9/14 → 14/14
加转 90 度一轮	左右两侧标注是竖排，正向读不到	80% → 82%
再加转 270 度一轮	左右两侧竖排字朝向相反，只转一个方向会整列丢失	82% → 92%

验证拿人工录入值当真值。星火家园 9 个户型的尺寸链是早前人工读图录入的，正好做验证集——128 条真值命中 118 条，92%。全库 121 张图中 105 张抽到尺寸链，耗时 162 秒。

每条链自带可信度标记。质量检查有两条判据必须写对，否则会把正常户型误判成漏读：

- 1. 不能用「上下两条开间链之和是否相等」判对错。户型多为凹形、L 形、Z 形，上下两条边的总宽本来就不同，按矩形假设做检查会误报大批偏差。

2. 分母必须是套内面积，不是建筑面积。 建面含公摊，而外接矩形只覆盖套内加阳台。

文字字段同样批量抽取。做法是先把全库的识别全文缓存下来，对「约X米+名词」这类措辞做词频统计，**再按真实措辞补正则，而不是照着几张样本猜**。这一步把阳台面宽从 4 条提到 17 条。**采光面长度直接可用**——它就是外墙开窗立面的总长度，是物理模型第一层要的量，而**开发商已经算好印在图上了**，不用量像素。

一条反直觉的观察：**采光面与建筑面积不正相关**——80m² 的户型采光面 11.2 米，反而大于 99m² 的 9.5 米。**它由面宽进深比决定，不是面积的函数，必须单独作为特征**。

两条通路的效率对比说明了方法选择：

路径	覆盖	耗时
逐张人工读图	约 20 张	约 15 分钟
原生识别批量跑	125 张全覆盖	约 3 分钟

印刷体信息一律走自动识别。人工读图只留给识别拿不到的东西——墙线、窗洞位置、房间拓扑。

列表页与户型图对不上时，一律以图为准。库里已发现多起源站标签错误——把「三室两厅两卫」写成一卫、把 113.13m² 漏掉首位写成 13.13m²、把 D1 户型标成 D4。全部按图修正并留痕。

附4.7 气象取数的静默错误

取数过程中有四类静默错误——都不报错，下游看着正常其实全错，全部已写进自检断言：风速单位默认是公里每小时而非米每秒，**差 3.6 倍**；不显式指定时区则返回世界时，整条日变化错位；某备用源的小时数据默认是地方太阳时，**实测错 7 小时**，同一时刻两源温度读数差 5 度以上、辐射差近 8 倍；以及把默认年份写死，跑起来是两年前的数据。

时区核对必须用最晴的那一天，不能用季节平均。用季节平均找辐射峰值会误报「时区可疑」；改用总辐射最大的单日后，九个市州的峰值全部落在 13 时，与真太阳正午差不到半小时。

附4.8 结论边界与已知缺陷

三个在重算中抓到的缺陷，全部已定位：

#	缺陷	表现	判据
1	推演漏传制热参数	制热功率恒为 0，与「全关」代价相同，一千步一步不供暖	推演与执行必须用同一个对象模型
2	初值固定 26 度	一月算例从 26 度起步，开头 5.5% 的步在制冷	初值取首小时室外温度，丢弃预热期
3	除湿与制热抢同一温区	除湿分支在前，一触发即返回制冷，制热到不了	温度下限不得低于制热设定点，这是约束不是参数

缺陷 1 与 3 是同一个病：需求函数同时是策略与对象模型，制冷除湿自动触发、制热要显式批准——这个不对称在两个季节各犯了一次错，方向相反。根因就是 8.1 开头那条判据：对象模型里不能嵌策略。

必须标注的结论边界：

- 风压系数仍未经本地标定，绝对值不作引用，只引相对次序与边际回报；
- 开口面积是参数化近似，绝对值有系统误差，所以只报相对量，且各策略共用同一套开口参数以抵消误差；
- 舒适判据目前用房间空气温度，未用操作温度。改成操作温度后夏季结论几乎不变，冬季结论会变差；
- 推演漏传的两处（制热与能力上限）影响所有已有结论，其中制热已在分析脚本里验证有效但仓库未改。这一项应最先修。