

冰上场馆热湿环境营造

张 涛

清华大学 建筑节能研究中心

2021年4月

1 需求

2 进展

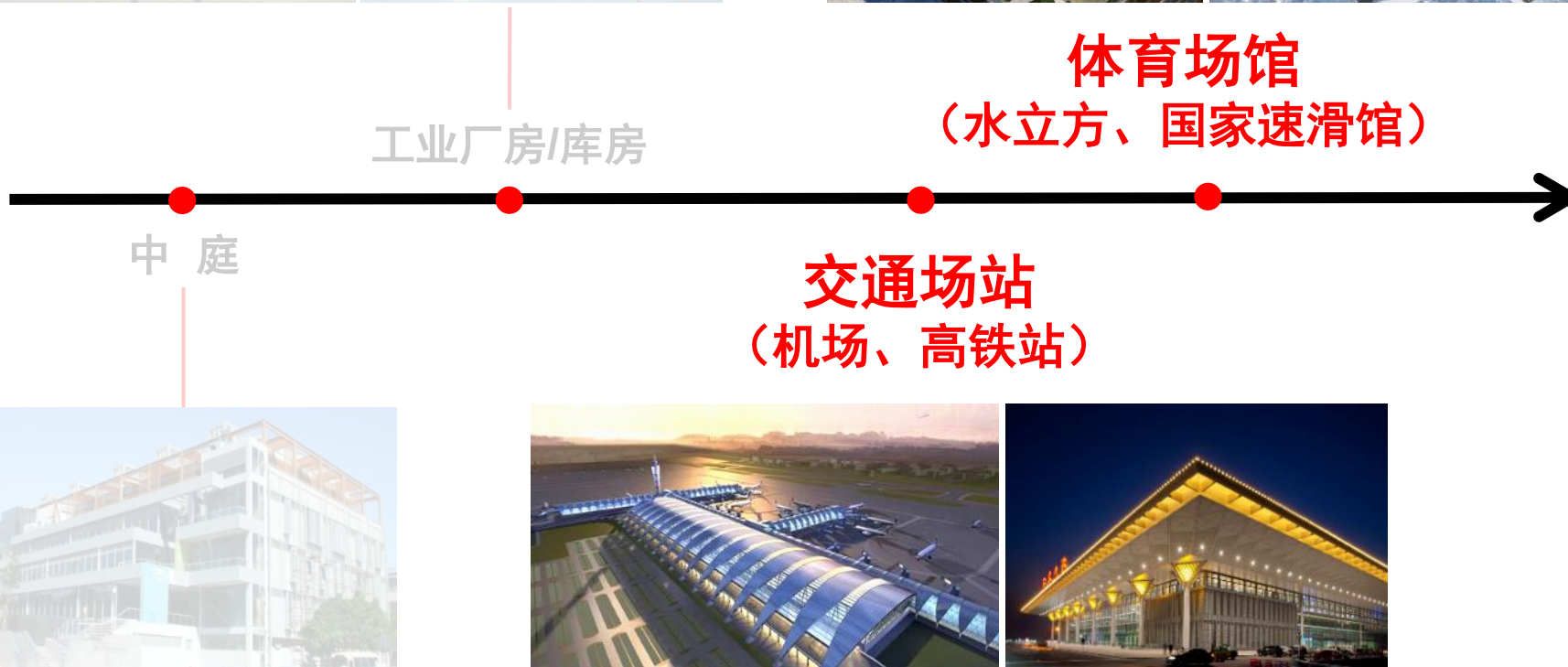
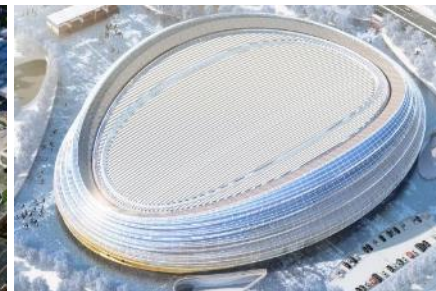
3 思考



1. 背景

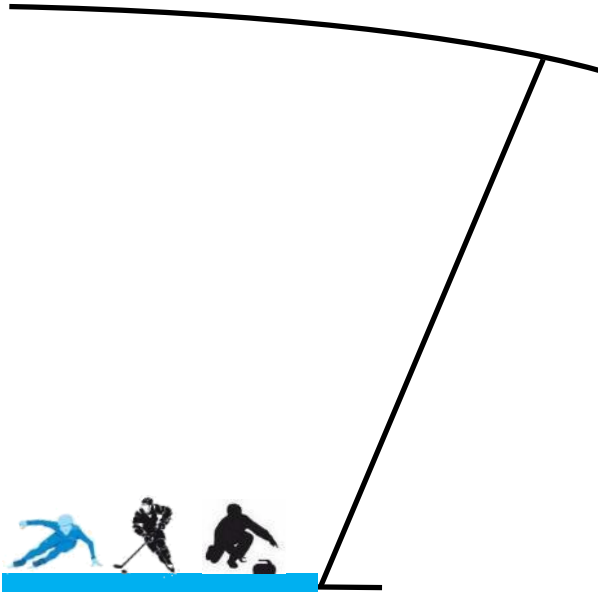


► 课题组高大空间建筑研究的延续



1. 目标需求

运动/场馆类型		冰面 温度(°C)	冰面附近 风速(m/s)	室内空气 温/湿度
普通竞技	冰球	-7~ -6	1.0	10~ 15°C
	速滑	-7~ -5	1.5	
	花滑	-5~ -3	0.7	
	冰壶	-5~ -4	1.0	
专业比赛	冰球	-5	/	赛场6°C/70%; 观众席15°C
	冰舞	-4	/	赛场12°C/60%; 观众席15°C
	冰壶	-8.5	0.2	赛场10°C, 露点温度<- 4°C

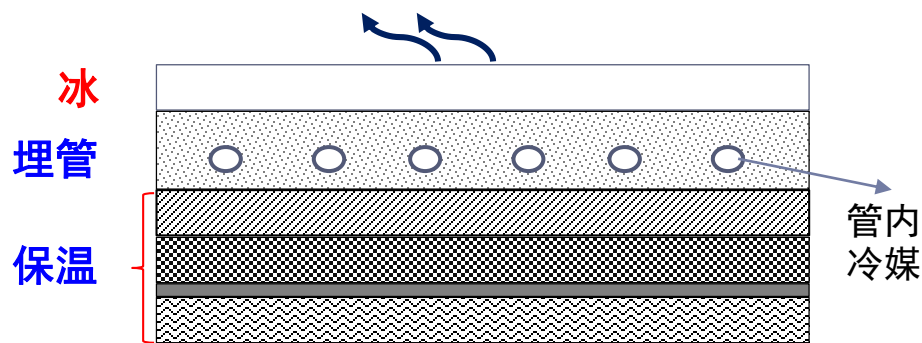


冰上运动场馆有**严苛的室内环境控制要求**

1. 目标需求

► 冰面与辐射地板的异同

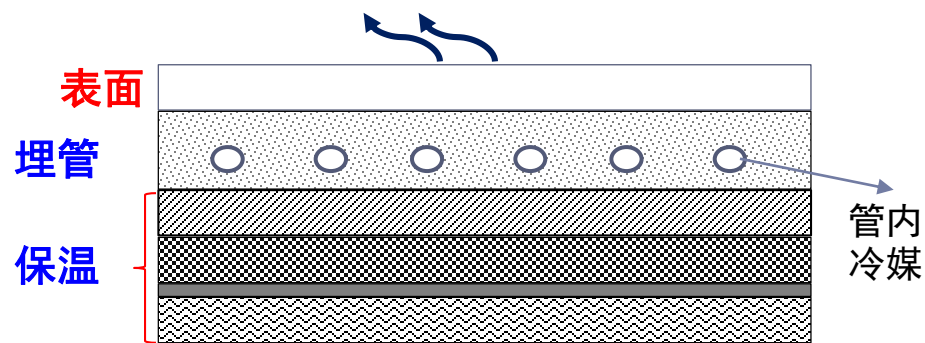
- 传热：辐射、对流
- 传质：升华与凝华



冰层结构示意图

$-10^{\circ}\text{C} \sim -4^{\circ}\text{C}$

- 传热：辐射、对流
- 传质：结露



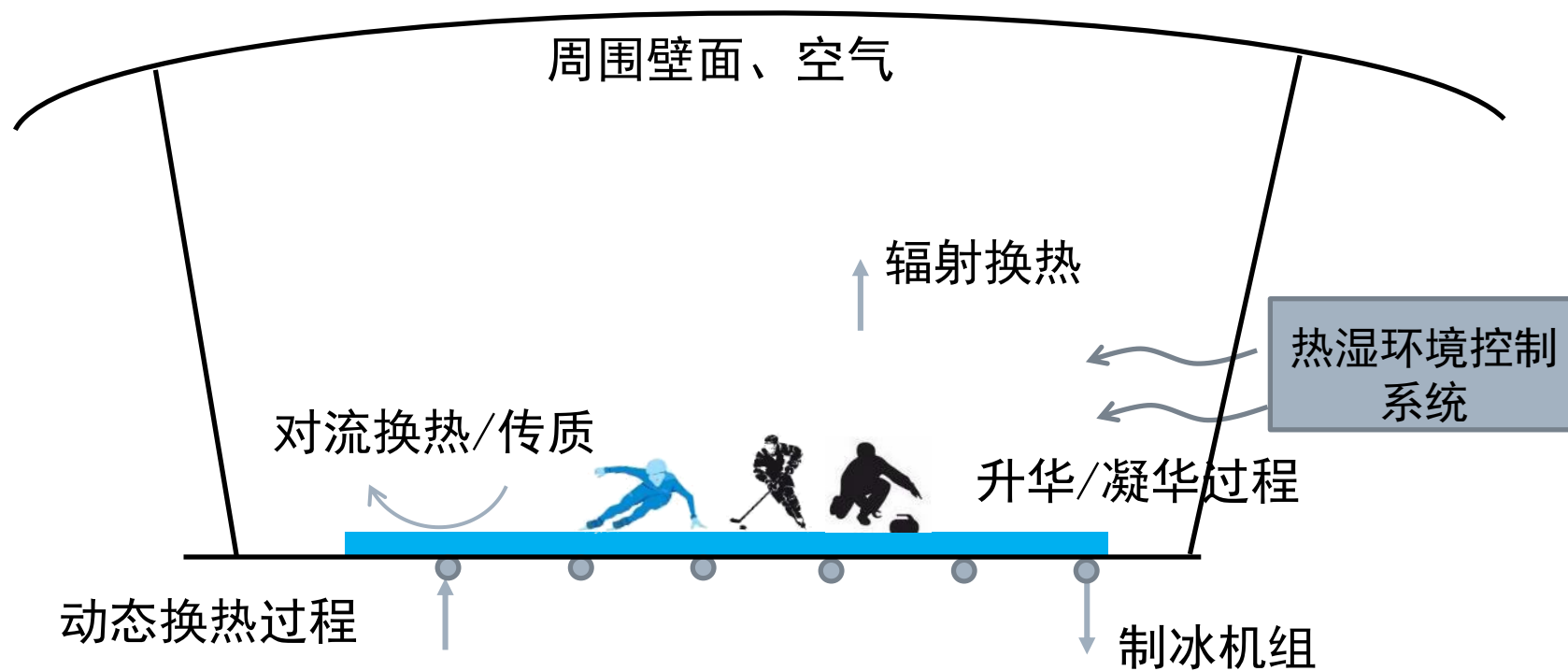
辐射板结构示意图

$16^{\circ}\text{C} \sim 20^{\circ}\text{C}$

1. 目标需求



► 冰面存在带来的影响

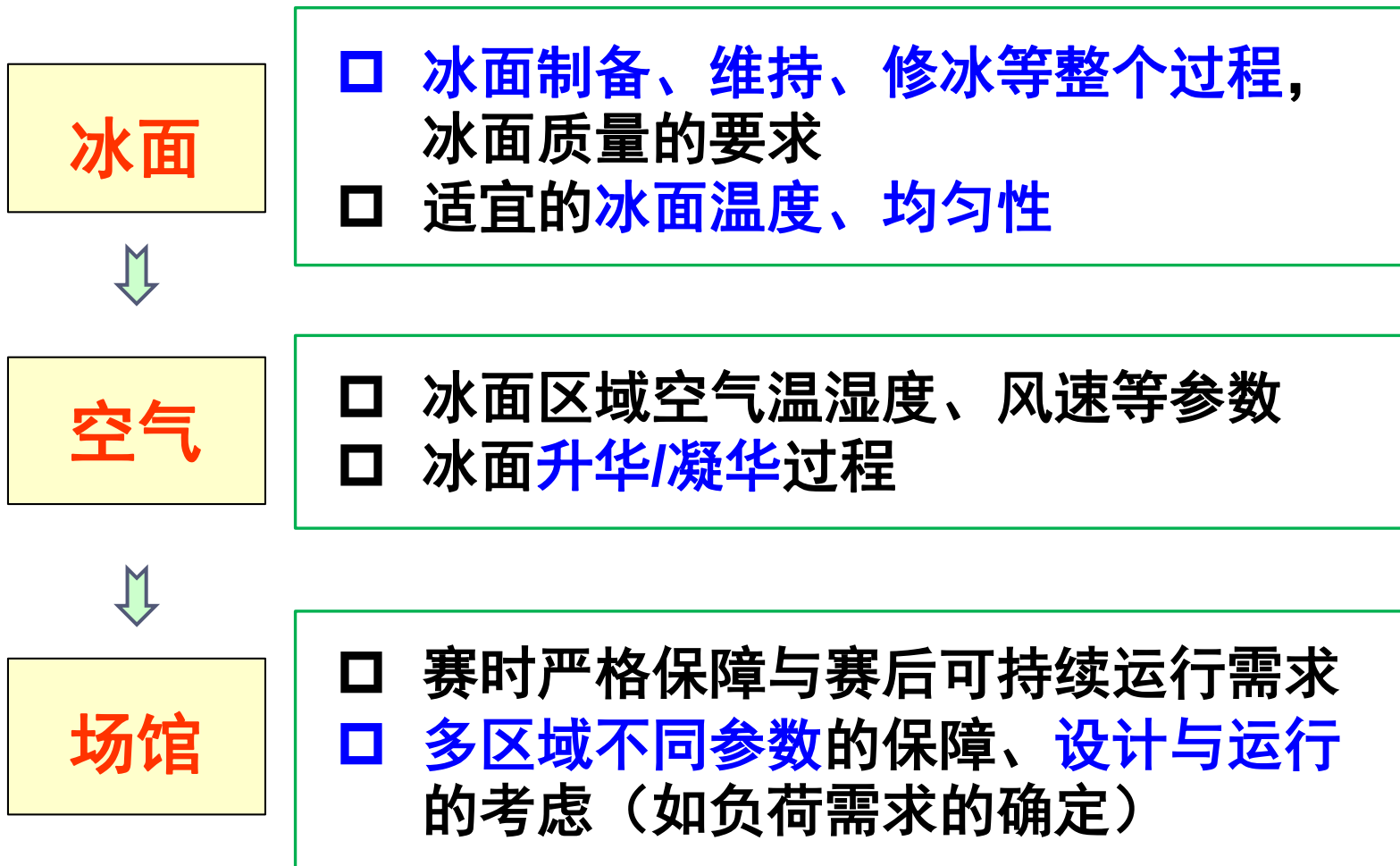


“伺候冰面”

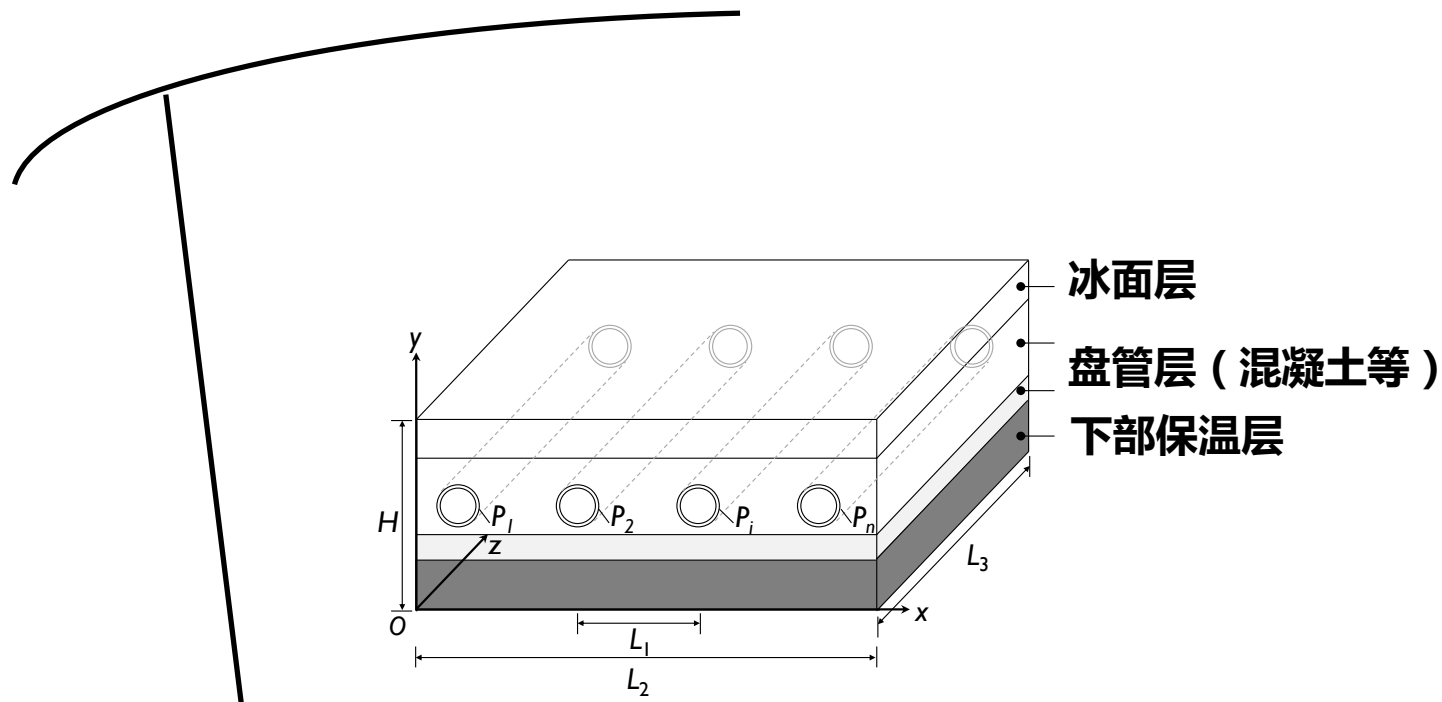


1. 关键问题

► 冰场环境控制的关键问题



2. 冰面



稳态分析

- 冰面温度差 1°C 所需制冷剂温差
- 冰面所需制冷量、均匀性等
- 不同管道排布形式、冰层结构影响

动态分析

- 浇冰、修冰的动态过程
- 稳定时间、制冷量变化
- 环境变化的影响

2. 冰面



► 制冰流程

架设盘管



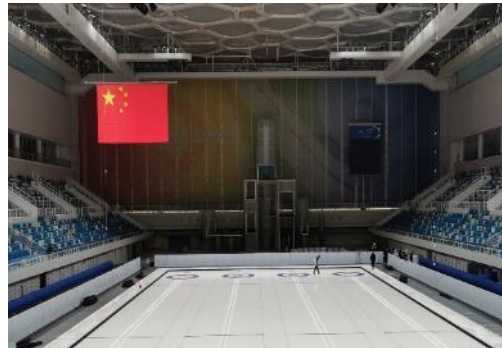
制底冰



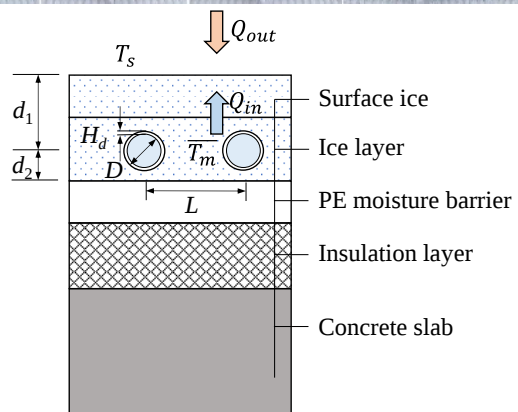
完成冰面



喷冰漆, 修整平面



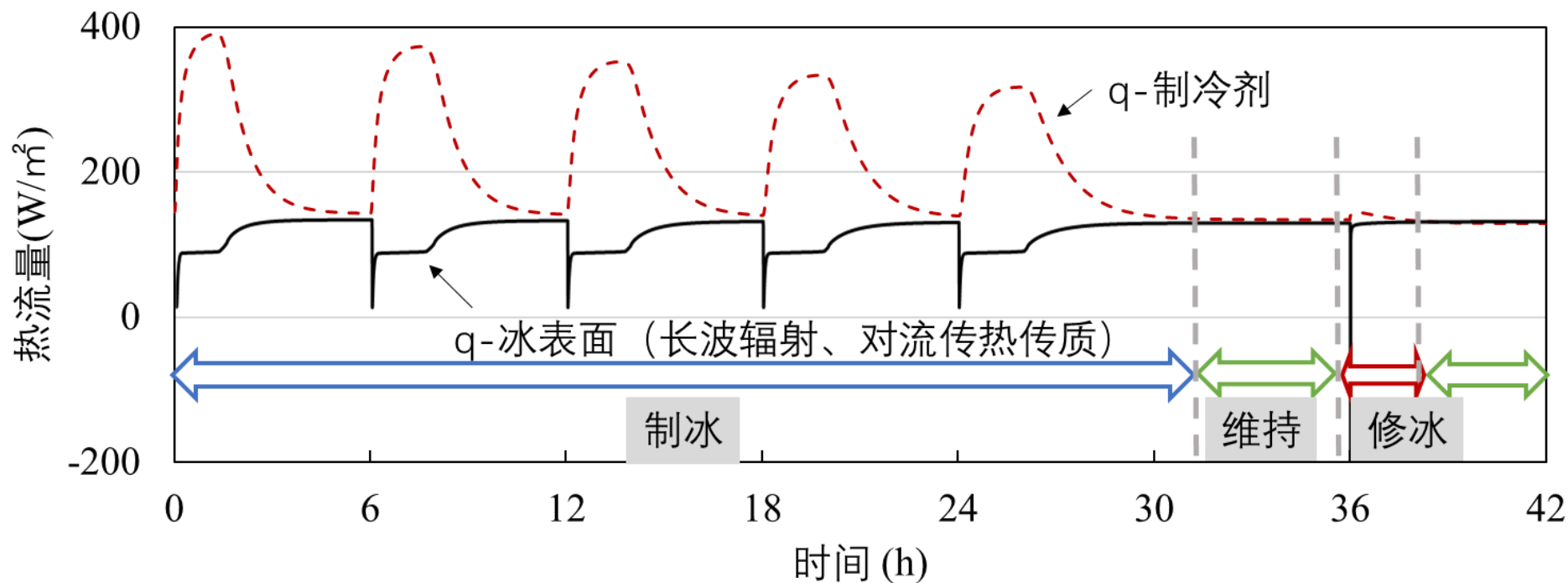
铺地毯, 完成冰面



2. 冰面



► 冰面形成过程



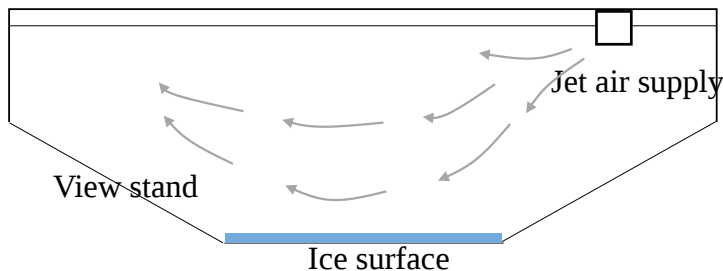
制冰全过程

- 多层浇冰：表面侧换热量vs. 载冷剂侧换热量
- 冰面维持、修冰过程，需求冷量变化较小

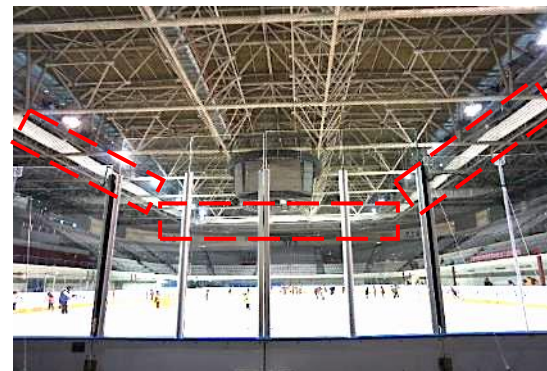
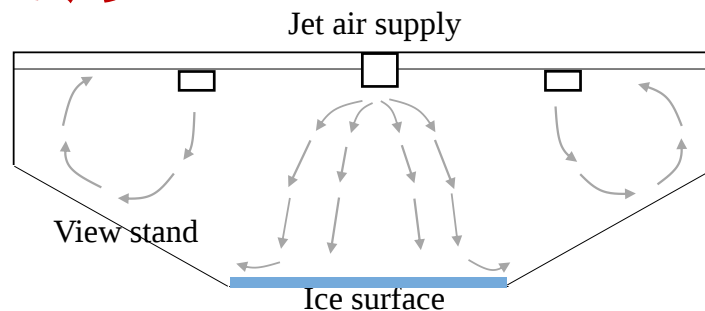
2. 空气



► 传统冰上运动场馆——全空间空调



韩国江陵室内滑冰馆
哈尔滨理工大学滑冰馆



德国Inzell速滑馆
上海三林冰上运动中心

全空间环境控制带来**巨大能耗**：场馆年能耗可达**700kWh/m²**^[1]

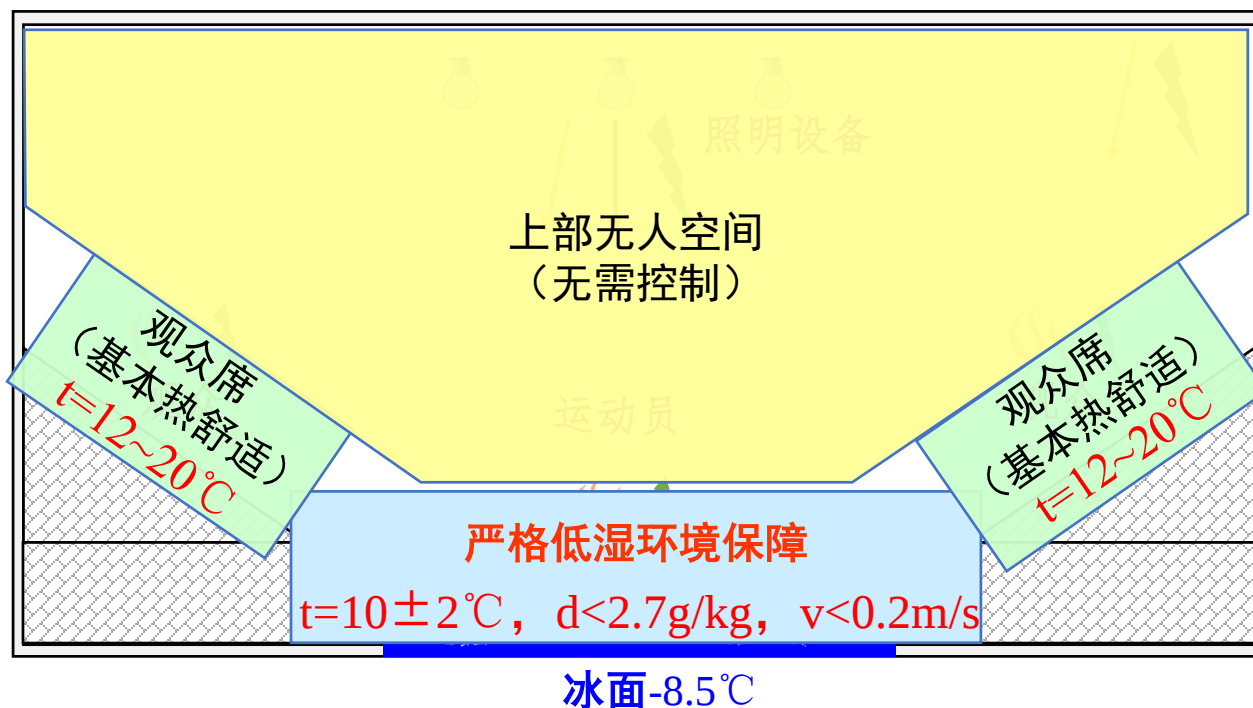
[1]. M. Krarti. Energy audit of building energy systems: an engineering approach. 2nd ed. Boca Raton, FL: Francis and Taylor; (2010).

2. 空气



► 冰上运动场馆：分区控制的空调方案

► 长约120m，宽约70m，高约30m



根据不同区域的不同需求，采取不同环境营造方案

[1]. Li L., et al. *J. Build. Eng.* 2020, 101691.

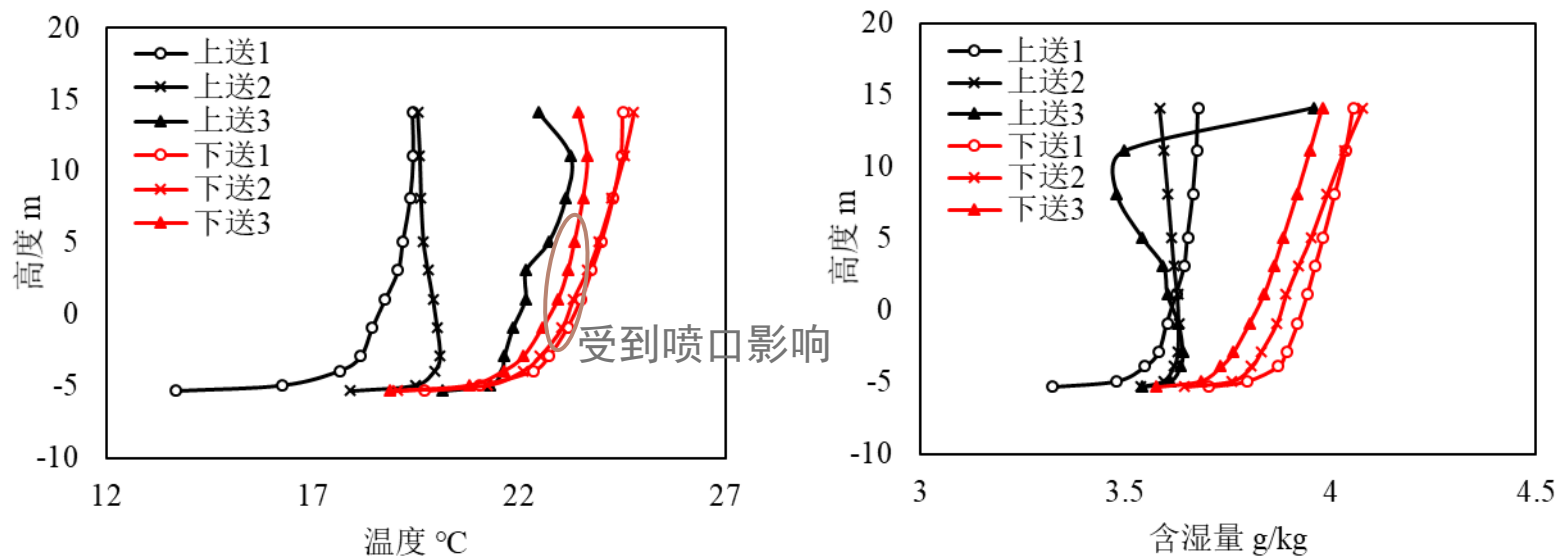
[2]. Li L., et al. *Build. Environ.* 2020, 186: 107391.

2. 空气



► 冰上运动场馆：分区控制的空调方案

- 模拟结果**
- 温度整体比上送高约 $0.3/3/5^{\circ}\text{C}$ ，更节能；
 - 顶部湿度梯度更明显，各点温度梯度较一致

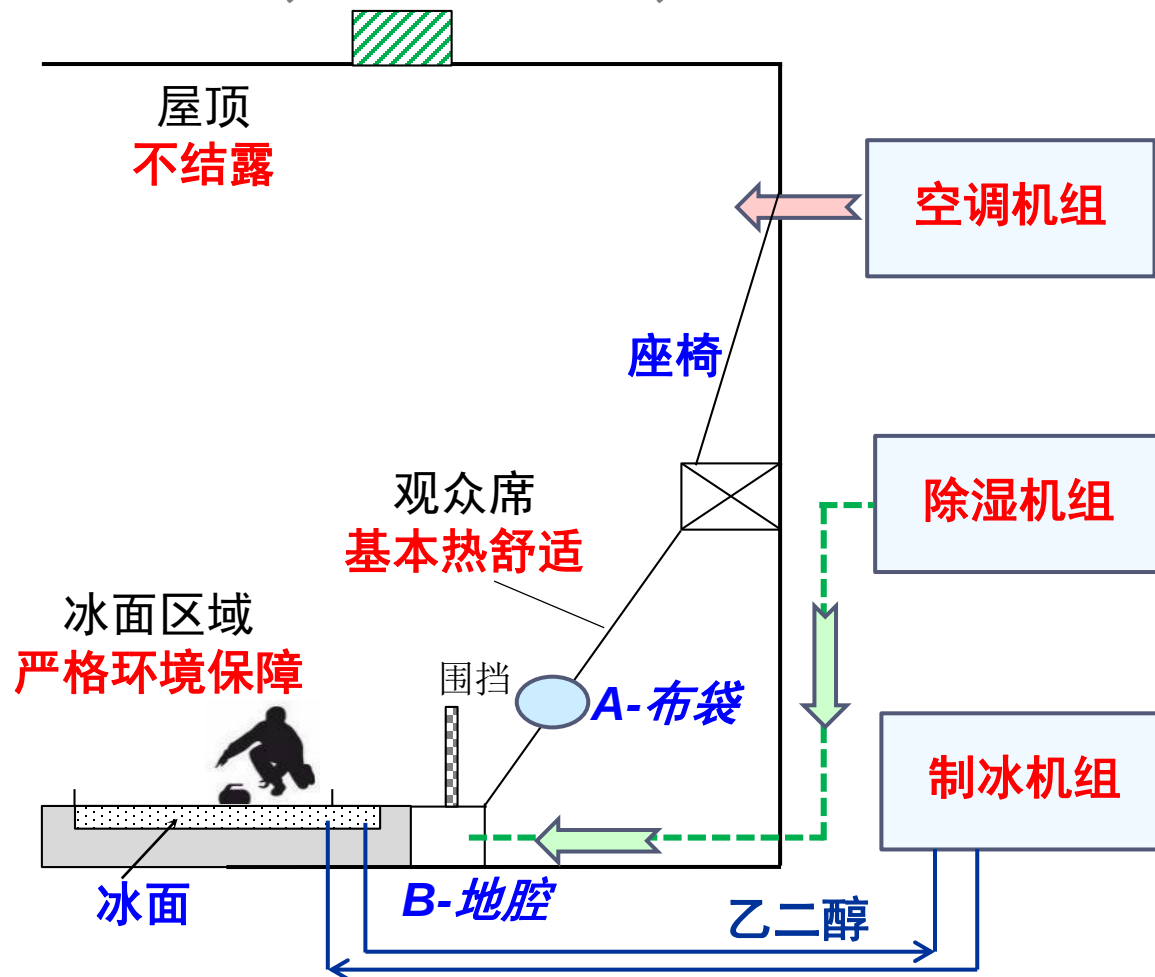


分区控制vs. 全空间控制，节能潜力更大

2. 场馆

▶ “冰立方” 冰壶比赛场馆：分区控制的空调方案

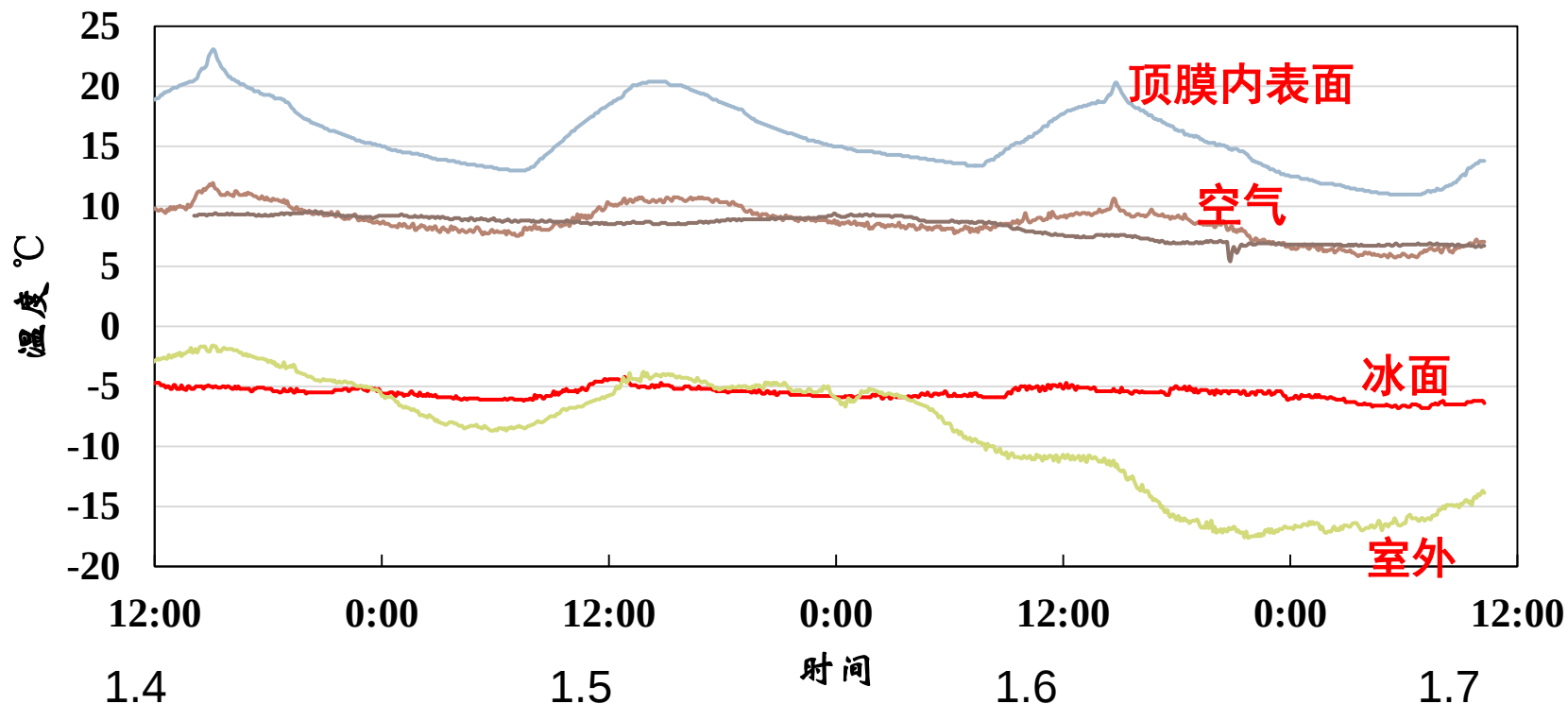
▶ 长约120m，宽约70m，高约30m



2. 空气



▶ 场地控制效果



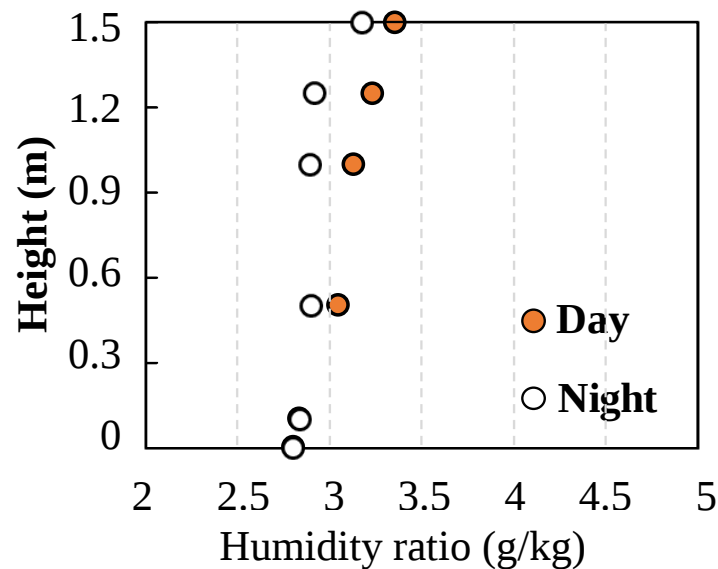
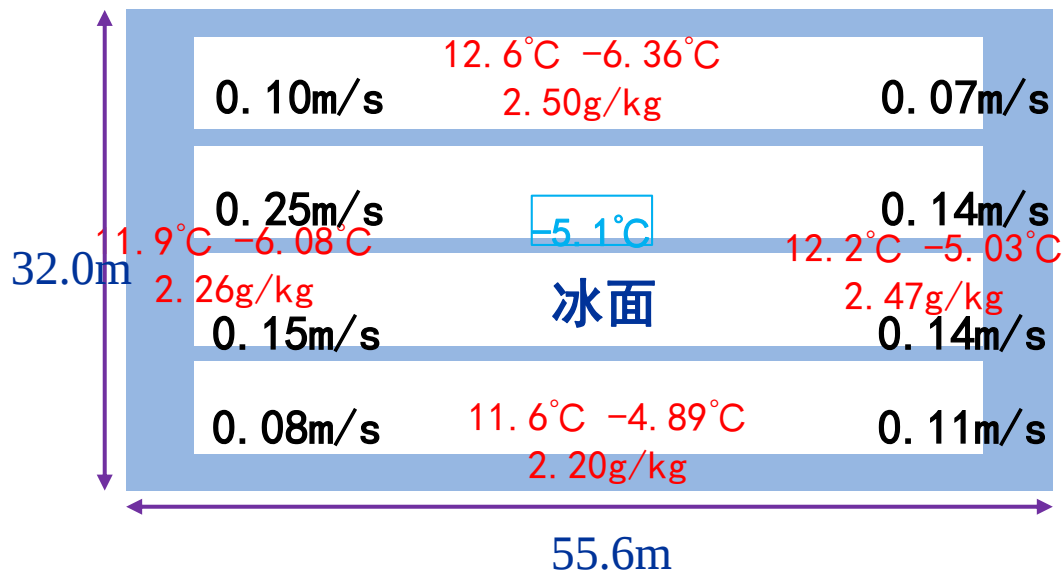
- 实际**冰面温度**：稳定在-5°C左右，冰面附近**空气温度**~10°C左右
- 内表面顶部温度随室外温度变化而变化，影响辐射换热部分

2. 空气



▶ 场地控制效果

设计: 1.5m高, $10^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, $<2.7\text{g/kg}$

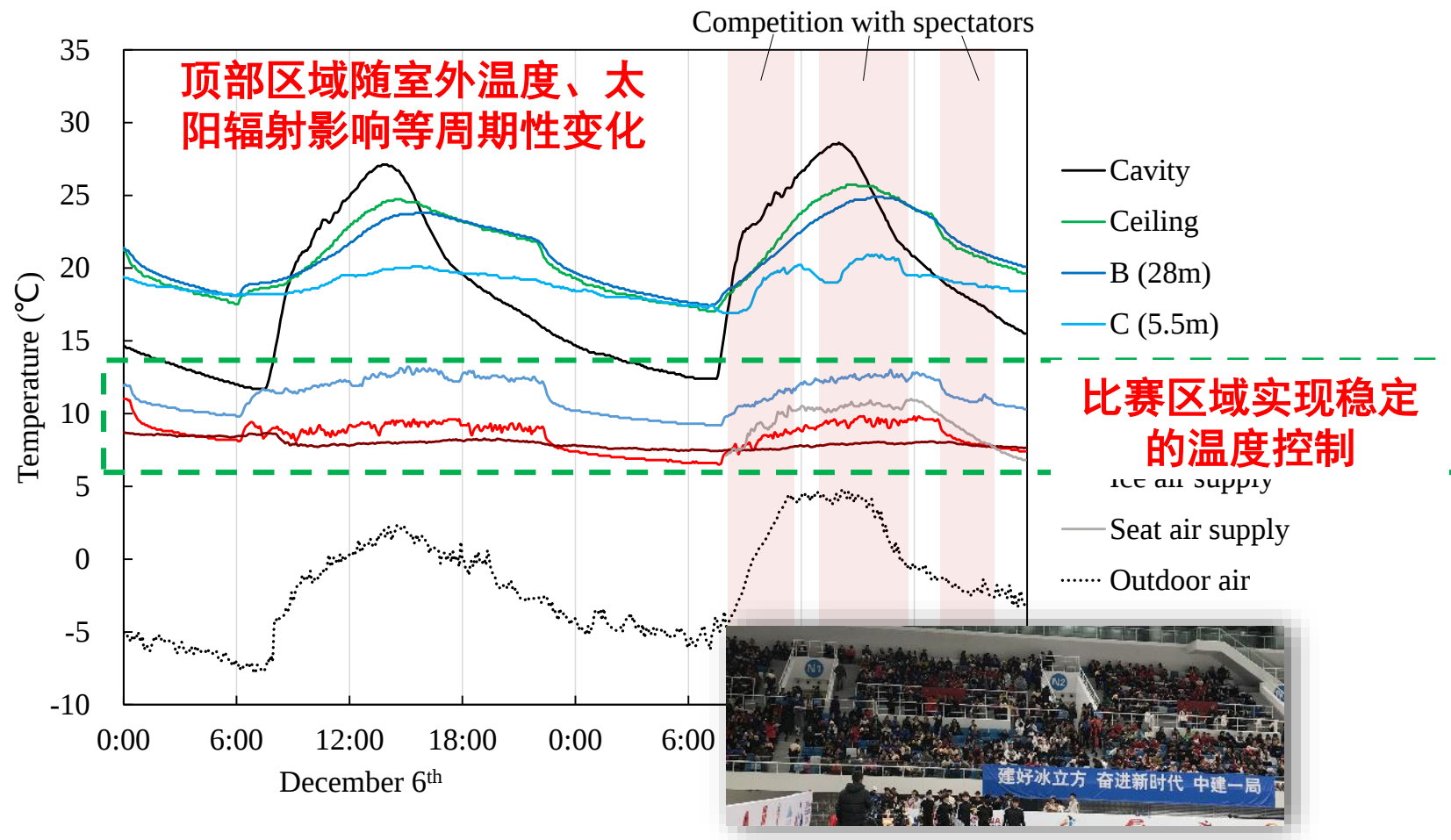


- 1.5m以下区域: 空气温度稳定在 10°C 左右, 近冰面处温度梯度大
- 空气湿度: 梯度较小, 与冰面处等效含湿量水平 ($\sim 2.7\text{g}$) 相近

2. 空气



► 垂直方向温度分布



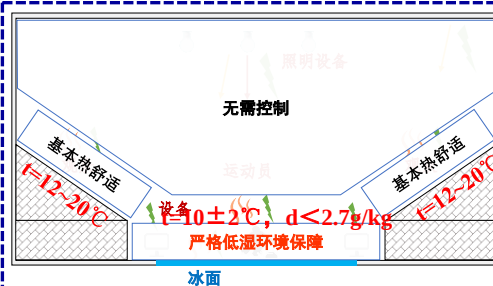
2. 场馆



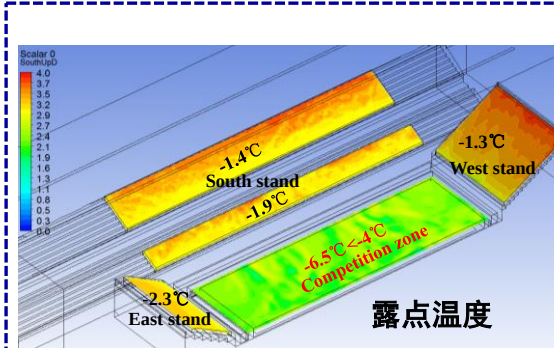
“冰立方” “冰丝带” 热环境保障



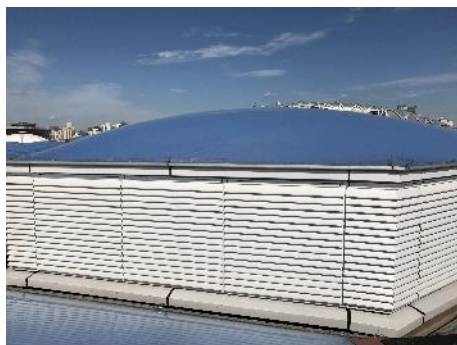
气密性改造



分区控制方案



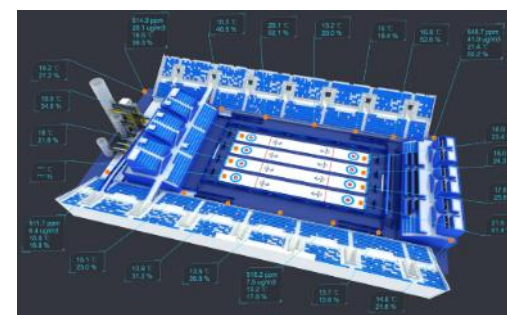
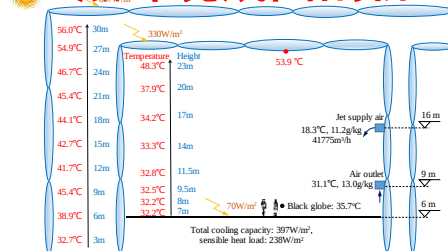
气流组织模拟



自然通风改造

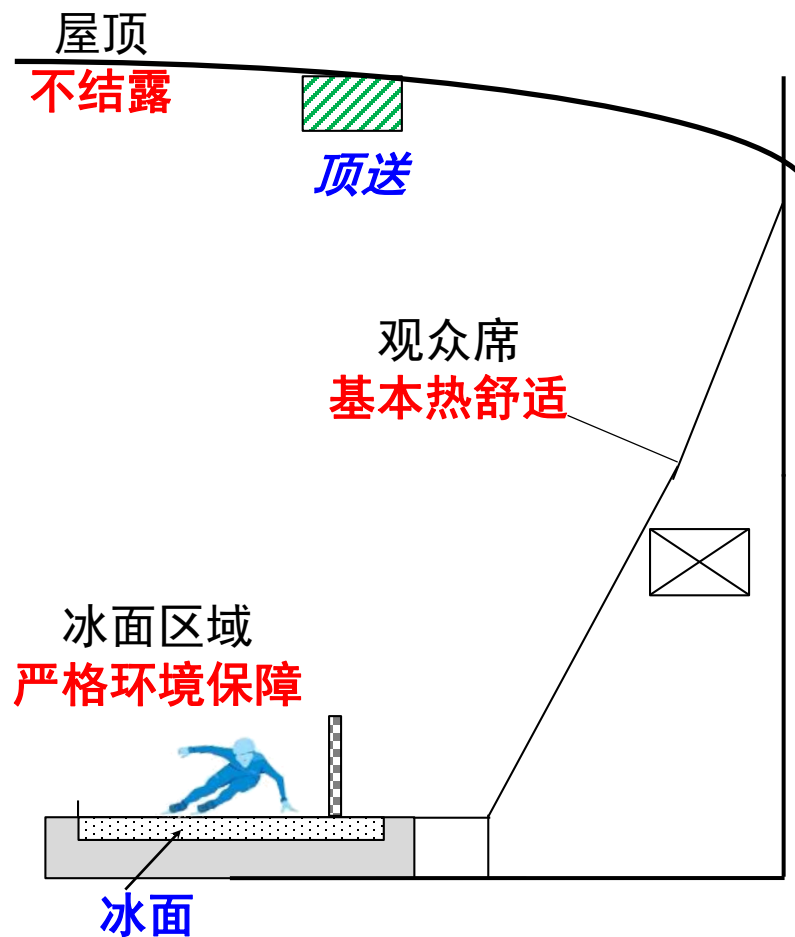
“冰立方” 场馆环境营造

热环境成因剖析



群智能控制系统

3. 思考——负荷



- 分区控制方式下的负荷关系

空调负荷

$$Q = Q_{\text{观众}}$$

除湿负荷

$$Q = Q_{\text{人员}} + Q_{\text{传质}} + Q_{\text{渗风}}$$

制冰负荷

$$Q = Q_{\text{长波}} + Q_{\text{短波}} + Q_{\text{对流}} + Q_{\text{传质}}$$

3. 思考——需求



Curling Ice and Arena Requirements for Olympic and World Curling Federation Competitions

- 赛场区域热湿环境

空气温度

$T_a=10^{\circ}\text{C}$ ($h=1.5\text{m}$)

露点温度

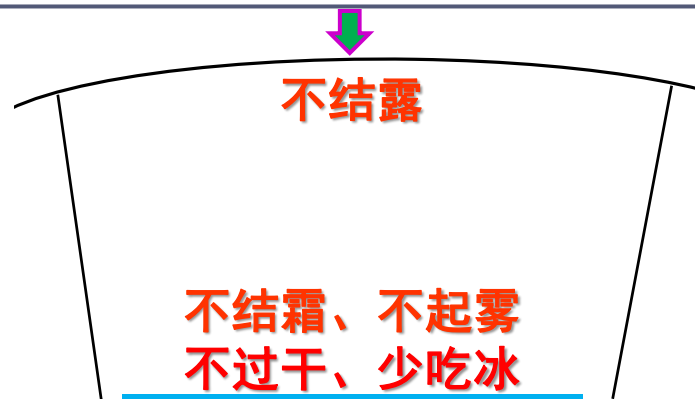
$T_d<-4^{\circ}\text{C}$ (即含湿量 $\omega<2.7\text{g/kg}$)

风速

$v_a<0.2\text{m/s}$ (near the ice)

冰面温度

$T_{ice}=-8.5^{\circ}\text{C}$



科学知识vs.技艺手艺

理解真实的需求



谢谢!