



许鹏 教授 博士 博导

机械工程学院

Peng Xu Professor, PhD, PE, MBA

College of Mechanical Engineering

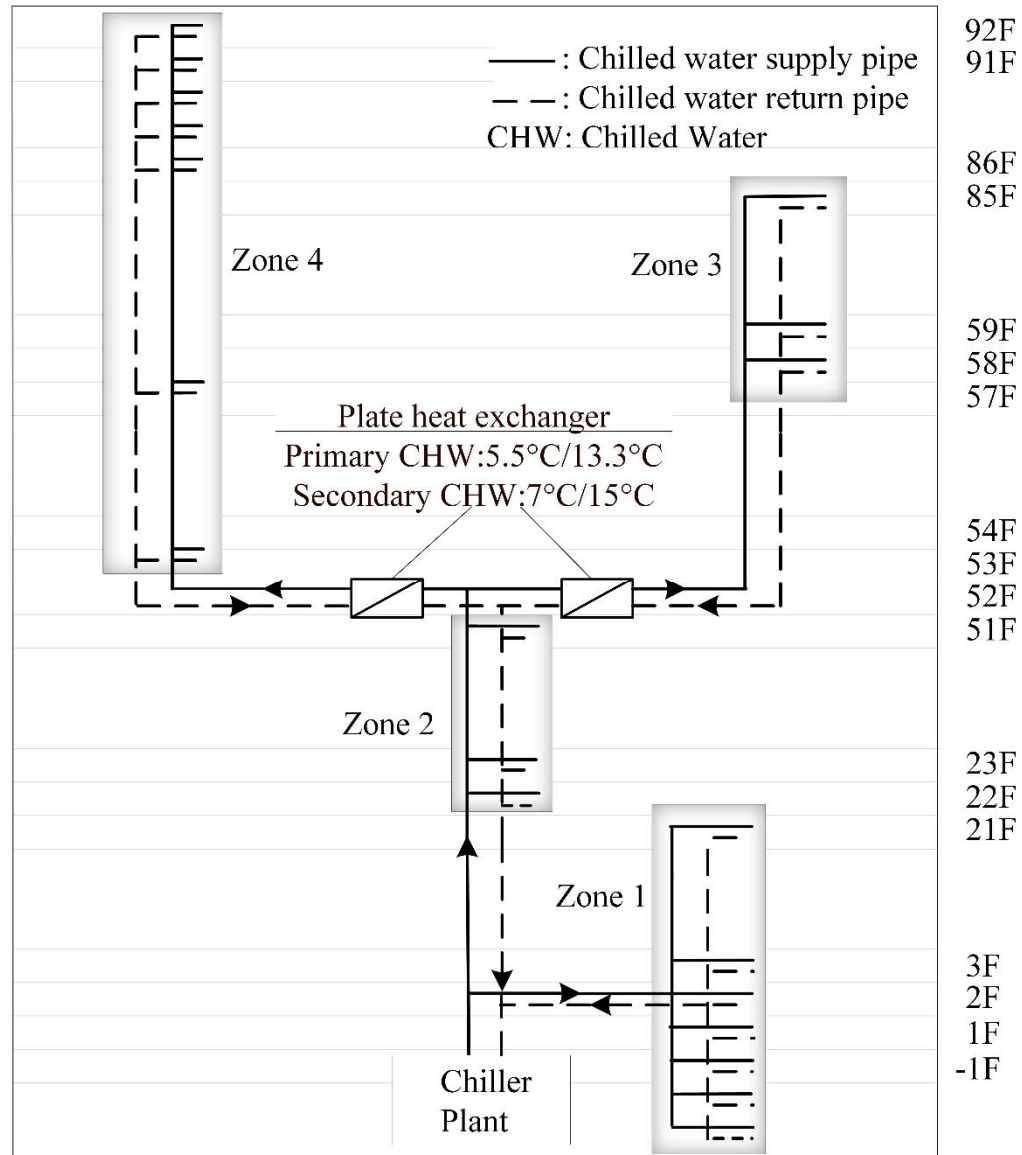
超高层建筑空调水系统拓扑 结构优化模拟

内容纲要

- 1 超高层水系统设计背景
- 2 空调水系统配置设计优化问题
- 3 优化算法与软件开发
- 4 案例分析
- 5 结论与展望

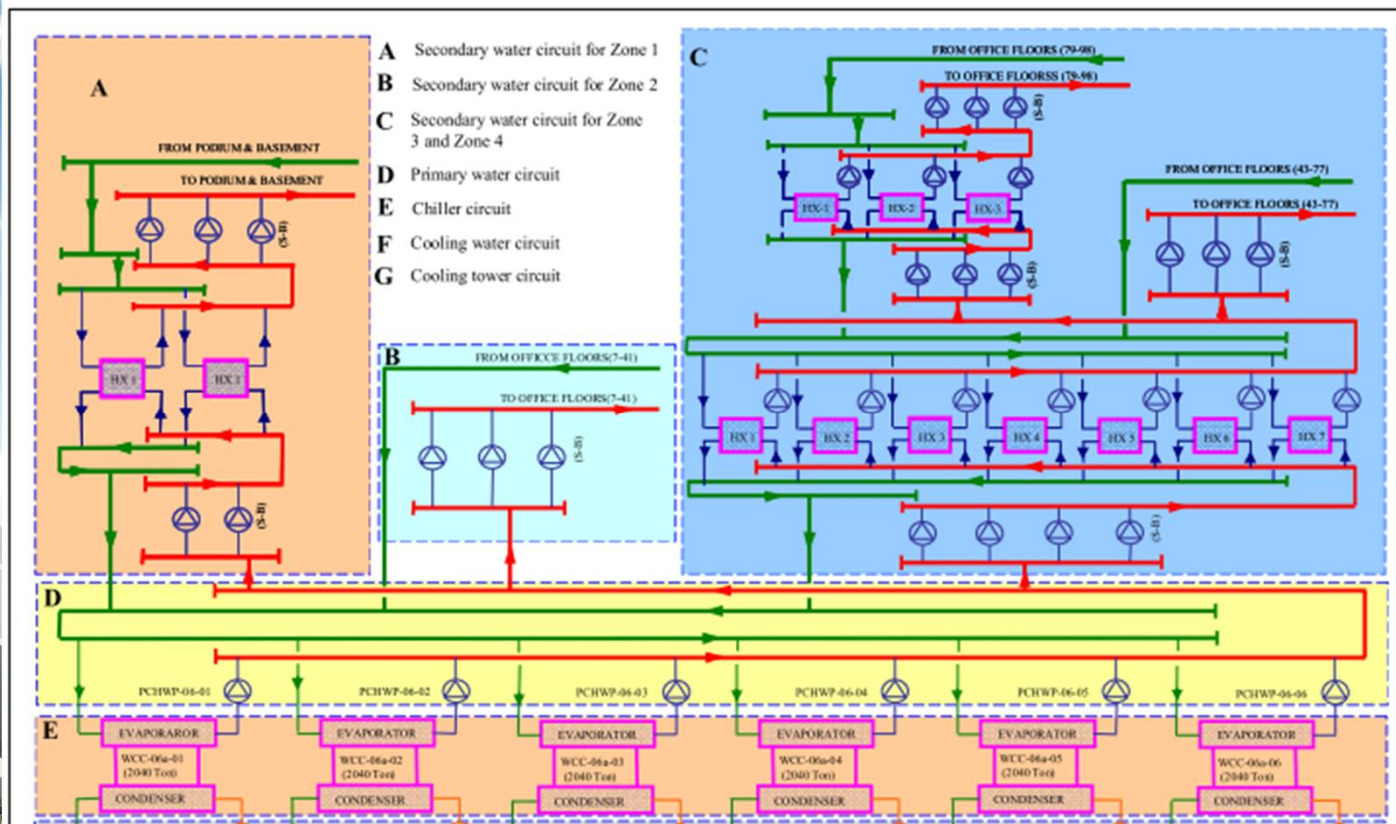
一、背景

超高层建筑空调系统案例1：金茂大厦



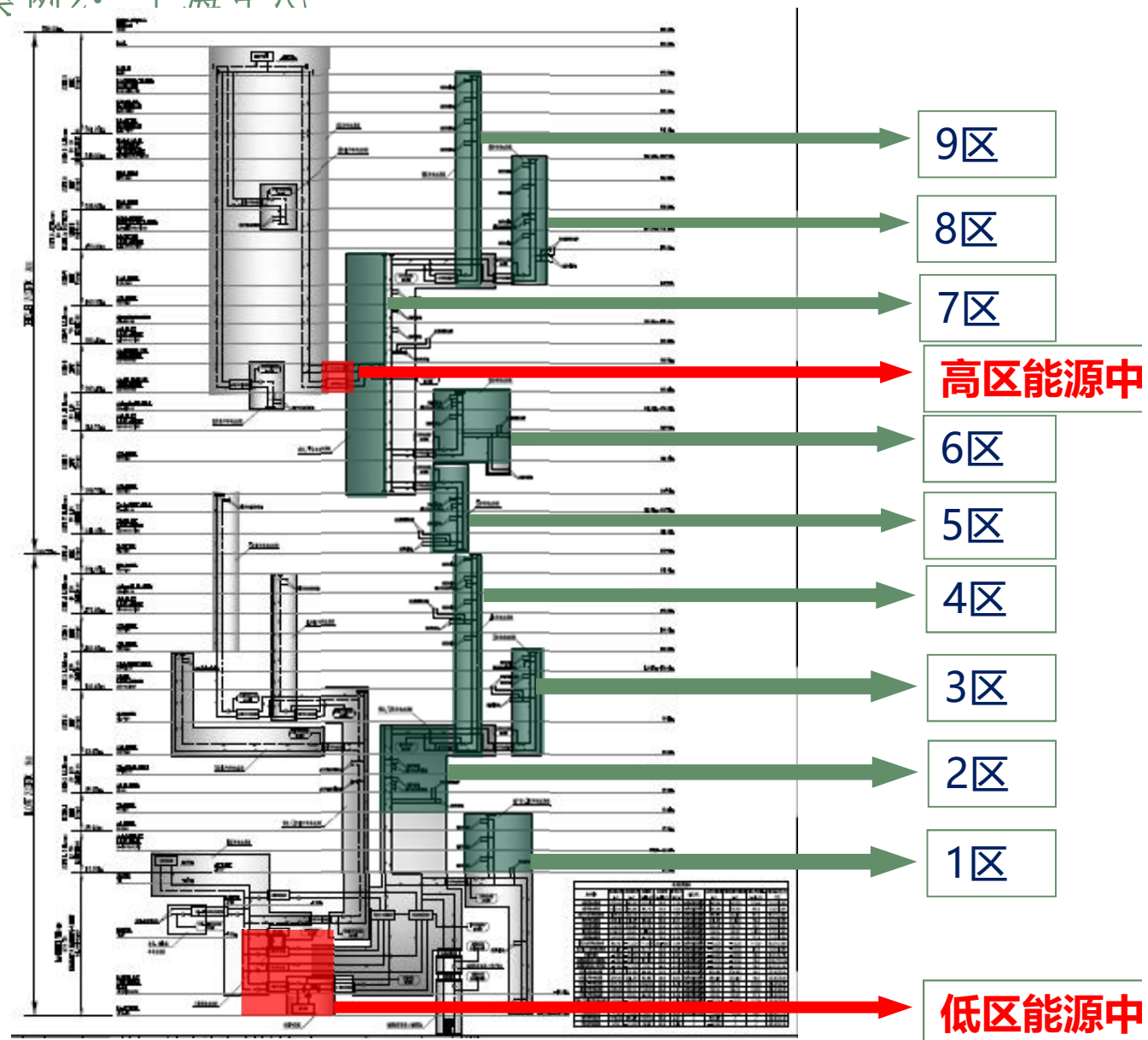
一、背景

超高层建筑空调系统案例3：环球贸易中心（香港）



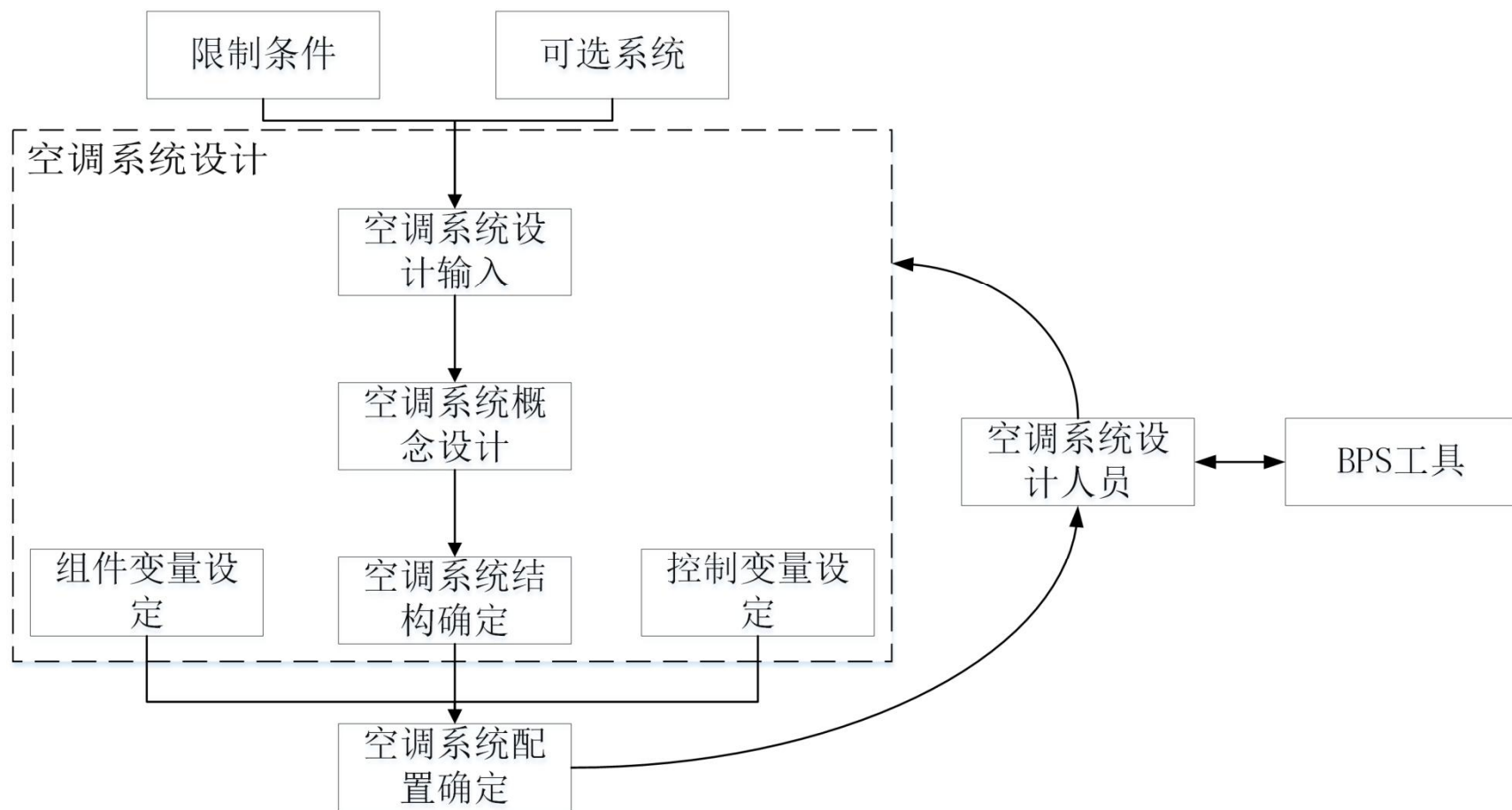
一、背景

超高层建筑空调系统案例2. 上海中心



一、背景

基于经验的空调系统设计方法



一、背景

传统暖通设计带来的一序列问题

(1) 次优化的空调系统配置

- 单一的优化目标函数
- 次优的系统结构

(2) 不合理的选型计算

(3) 待验证的冷热源结构

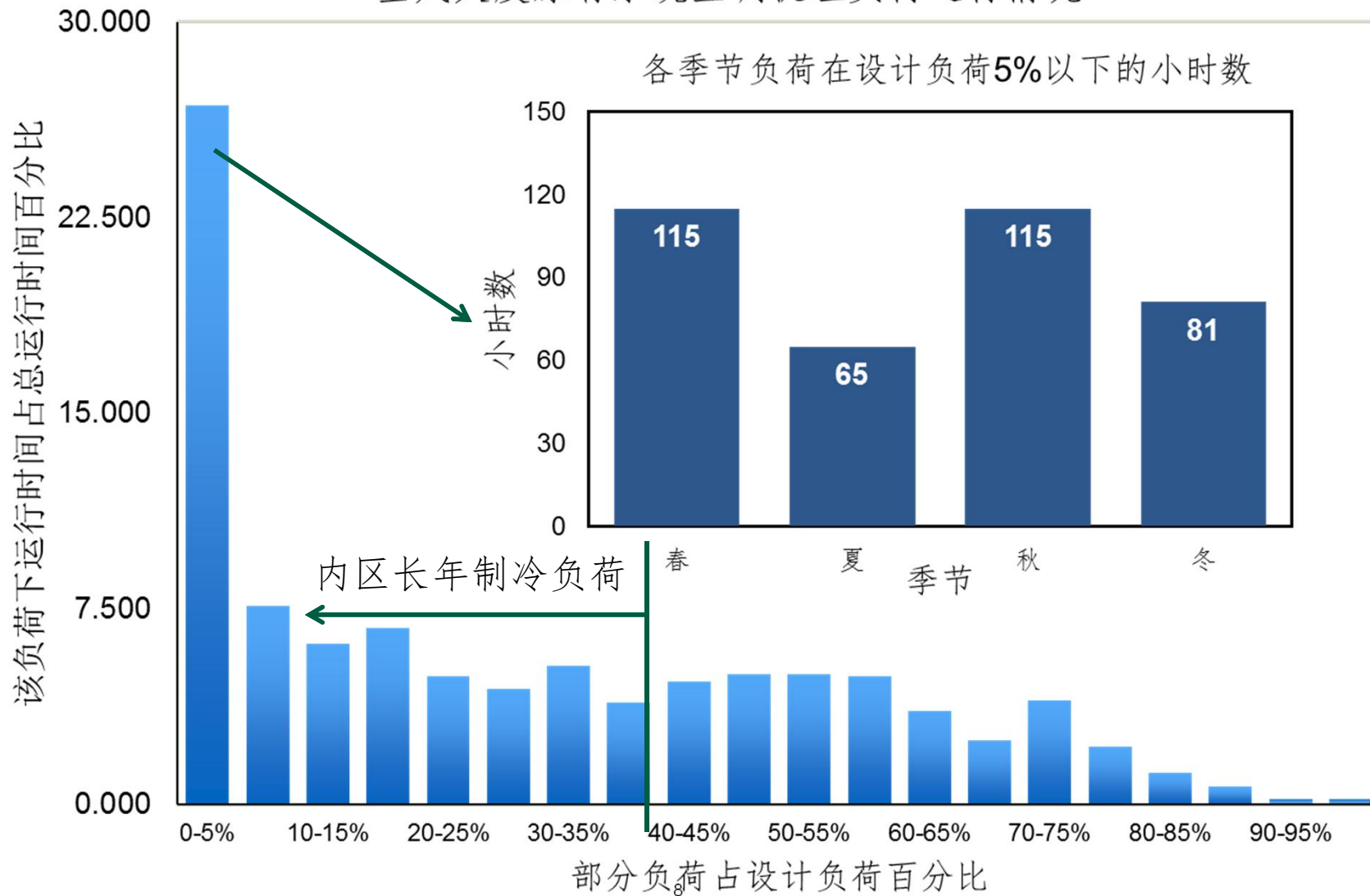
(4) 过大的集中系统能耗

	金茂大厦 (kW.h/m ²)	公建单位面积电耗调查结果 (kW.h/m ²)
办公区域	193	67~167
酒店区域	402	63~203

一、背景

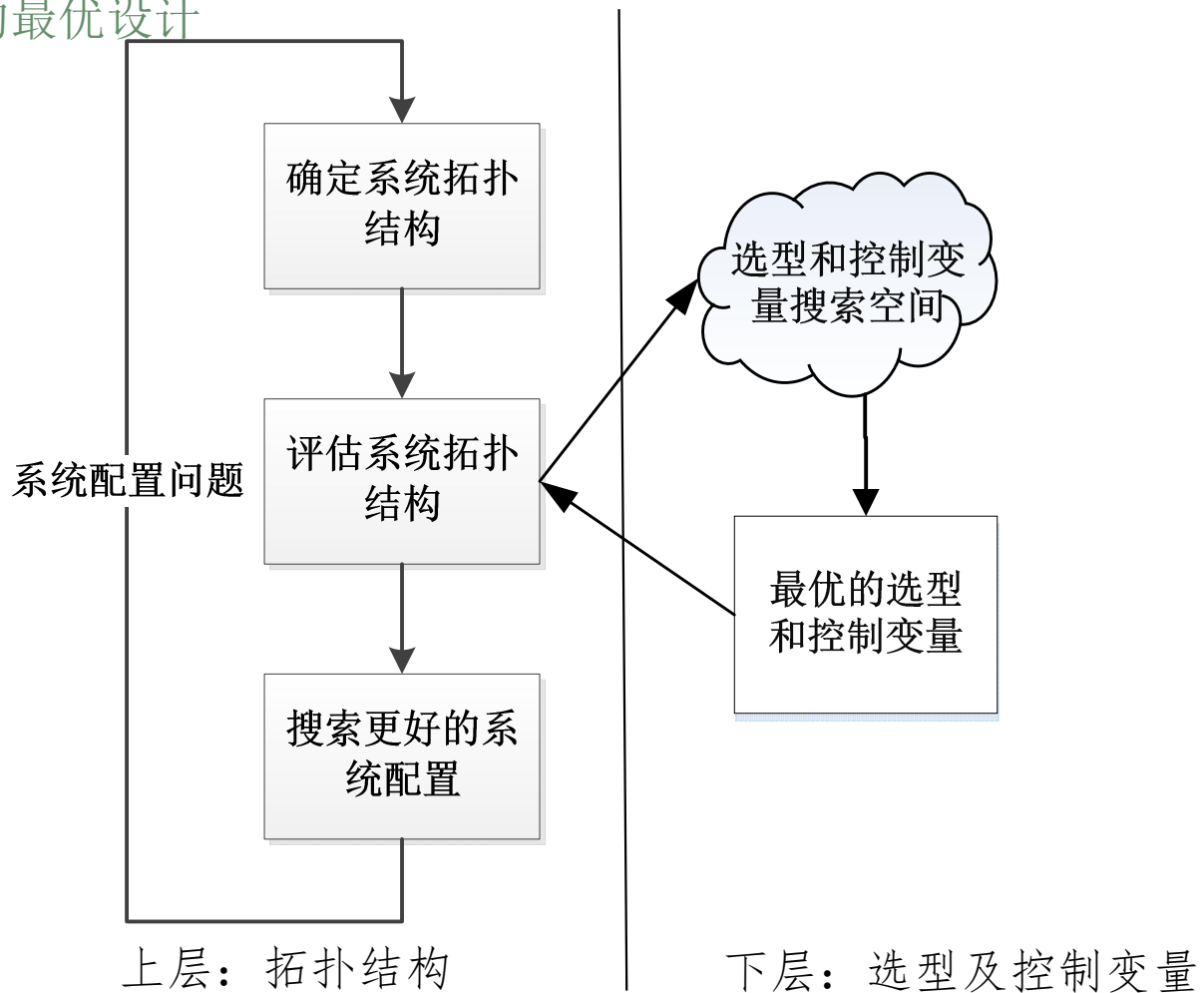
内区常年负荷是高能耗一个原因

金茂大厦原有系统空调机组负荷运行情况



一、背景

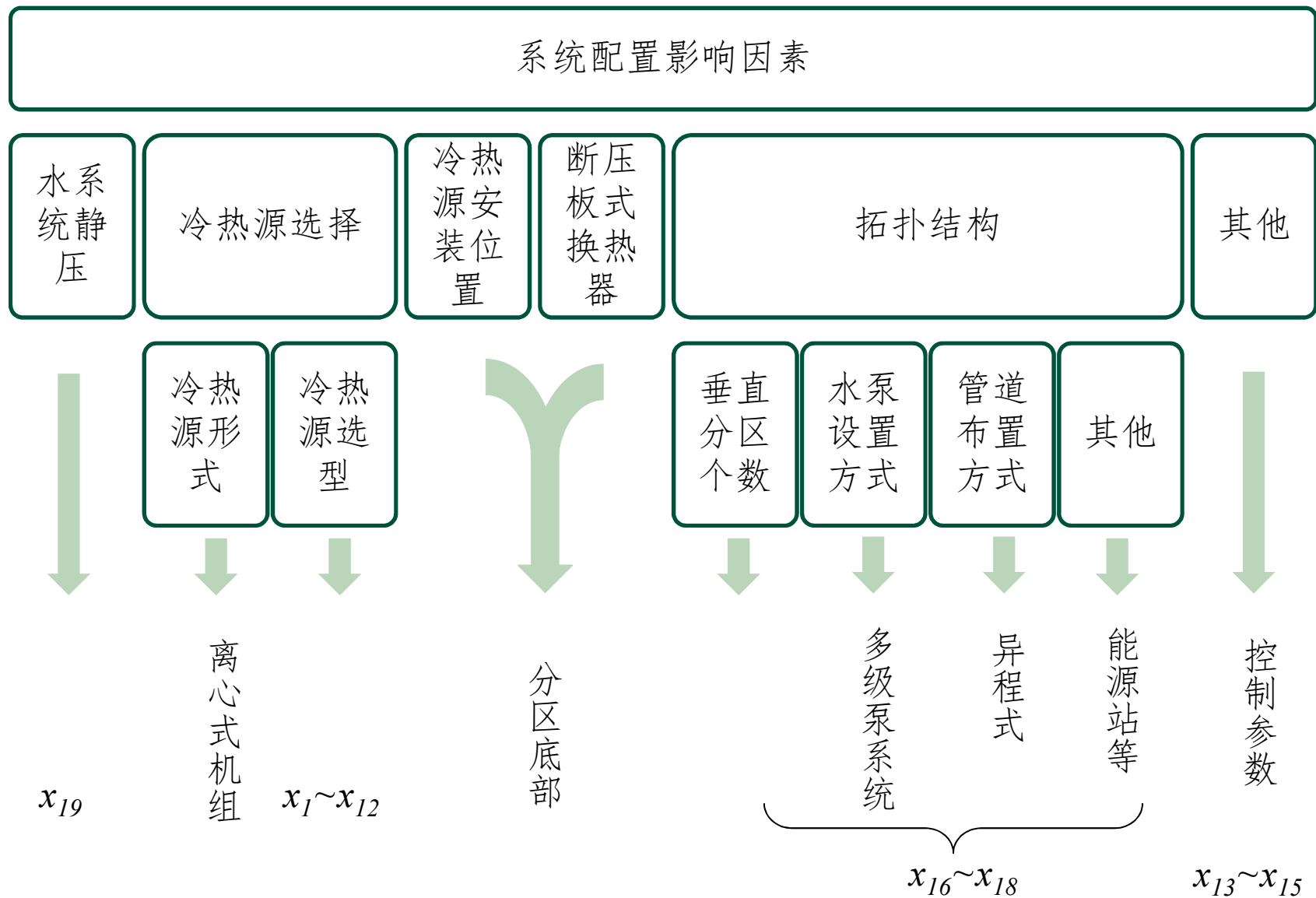
系统层次的最优设计



多层次、组合式、优化变量众多

二、空调水系统配置设计优化问题的建立

1. 系统配置影响因素 → 优化变量



二、空调水系统配置设计优化问题的建立

两步编码法：

模块的选择



模块的连接

主要模块：

能源站

断压换热器

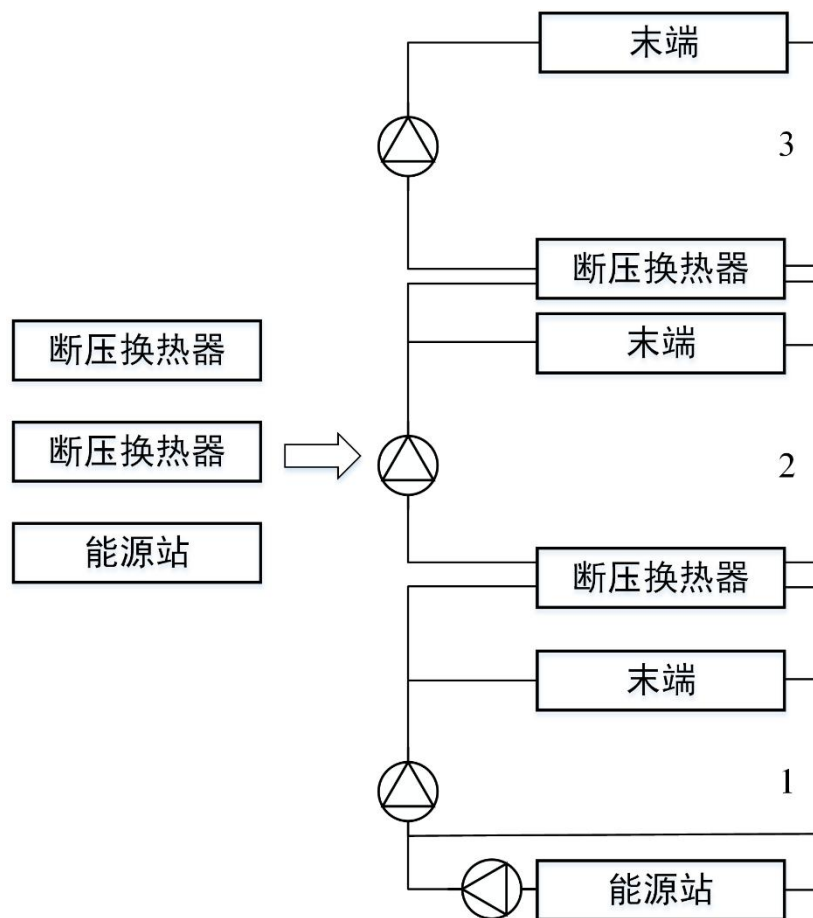
辅助模块：

冷冻泵

空调末端

备注：

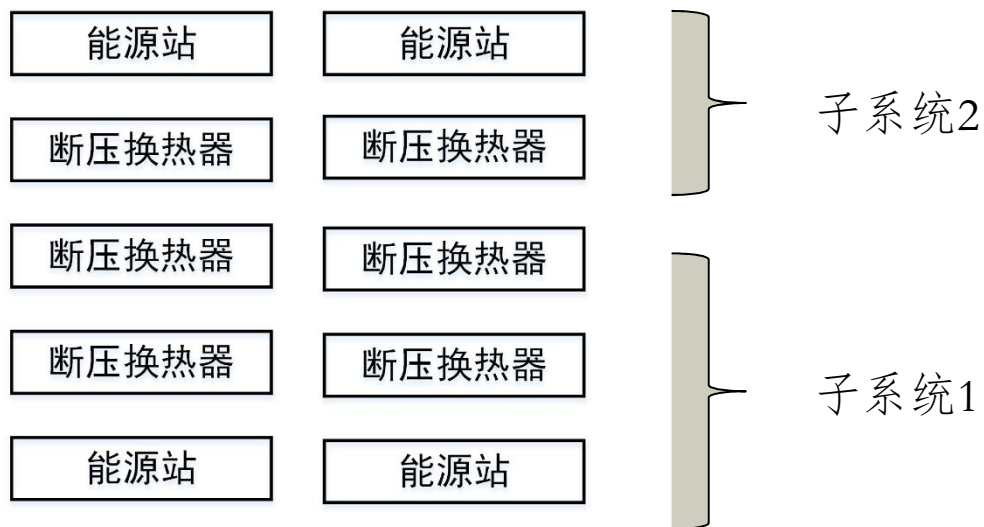
每个主要模块会生成一个冷冻水环路，然后加上辅助模块之后使得这个环路功能完整。



二、空调水系统配置设计优化问题的建立

限制：

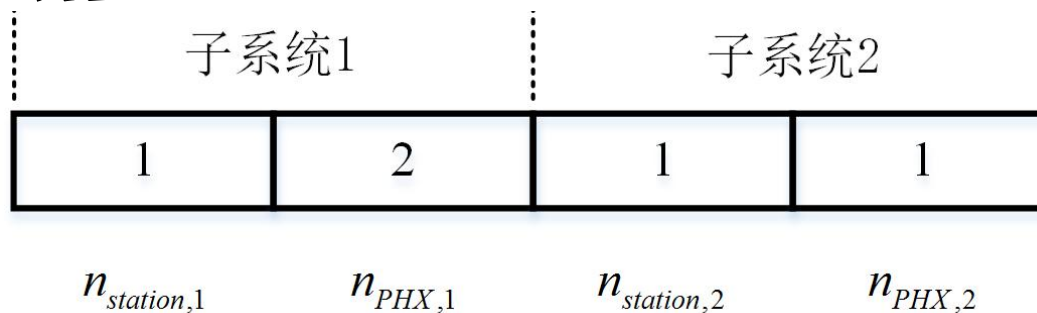
1. 能源站的个数不超过2个；
2. 每个能源站所对应的断压换热器不超过2个；



×不可行

✓可行

编码的数据结构: 4-变量



二、空调水系统配置设计优化问题的建立

运行控制策略

- 简化Supervisory Controller，设定运行控制设定点（AHU出风温度、冷冻水供水温度、冷却塔出水温度）；
- 冷水机组序列控制
- 变频泵变频控制及序列控制
- 板式换热器序列控制
- 定频泵、冷却塔序列控制

二、空调水系统配置设计优化问题的建立

变量类型	序号	优化变量	取值范围&步长	变量属性
组件选型变量	x_1	(能源站1)小机组容量	[100,500], 步长100	整数
	x_2	(能源站1)中机组容量	[600,1000], 步长100	整数
	x_3	(能源站1)大机组容量	[1100,2000], 步长100	整数
	x_4	(能源站1)小机组容量	[0,6]	整数
	x_5	(能源站1)中机组容量	[0,6]	整数
	x_6	(能源站1)大机组容量	[0,6]	整数
	x_7	(能源站2)小机组容量	[100,500], 步长100	整数
	x_8	(能源站2)中机组容量	[600,1000], 步长100	整数
	x_8	(能源站2)大机组容量	[1100,2000], 步长100	整数
	x_{10}	(能源站2)小机组容量	[0,6]	整数
	x_{11}	(能源站2)中机组容量	[0,6]	整数
	x_{12}	(能源站2)大机组容量	[0,6]	整数
运行控制变量	x_{13}	冷冻水出水温度设定值	[5,9], 步长0.1	离散值
	x_{14}	冷却塔出水温度设定值	[28, 35], 步长0.1	离散值
	x_{15}	AHU送风温度设定值	[13, 16], 步长0.1	离散值
拓扑结构变量	x_{16}	最小垂直分区个数	[1,6]	整数
	x_{17}	能源站个数	[1,2]	整数
	x_{18}	系统形式	[1,3]	整数
	x_{19}	设计压力	[1,5]	整数

二、空调水系统配置设计优化问题的建立

2. 优化目标

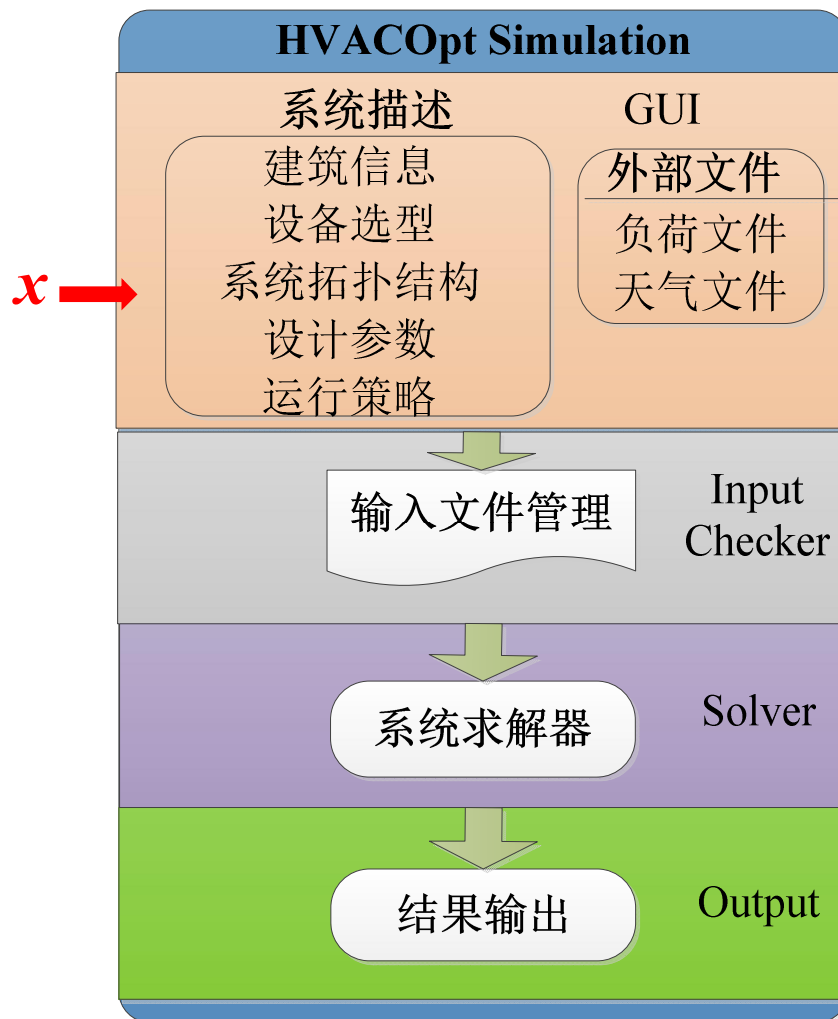
(1) 空调系统能耗 J_1

$$J_1 = f_1(X_{comp}, Y_{topo}, Z_{set}) = \sum_i \sum_{comp} P_{comp,i}$$

(2) 空调系统初投资 J_2

$$J_2 = f_2(X_{comp}, Y_{topo}, Z_{set}) = \sum_{comp} C_{comp}$$

$$[J_1, J_2] = BPS(x)$$



二、空调水系统配置设计优化问题的建立

3.约束条件

- C1: 供冷量不满足小时数需小于设定值;

$$H_{unmet,2} = \sum_{i=1}^{8760} I(T_{air,sup,i} > T_{air,sup,sp})$$

- C2: 系统拓扑结构必须是可行性结构;
- C3: 冷水机组选型需满足设计负荷需求;

$$L_{design} \leq C_{real} \leq \alpha \cdot L_{design}$$

三、优化算法

1. 设计优化问题的特征

- 设计变量：变量多（搜索空间大）、混合整数规划（整数+离散）
- 约束条件：非线性、不等式
- 目标函数：多目标、非单峰函数、目标函数很复杂
- 优化流程：多层次

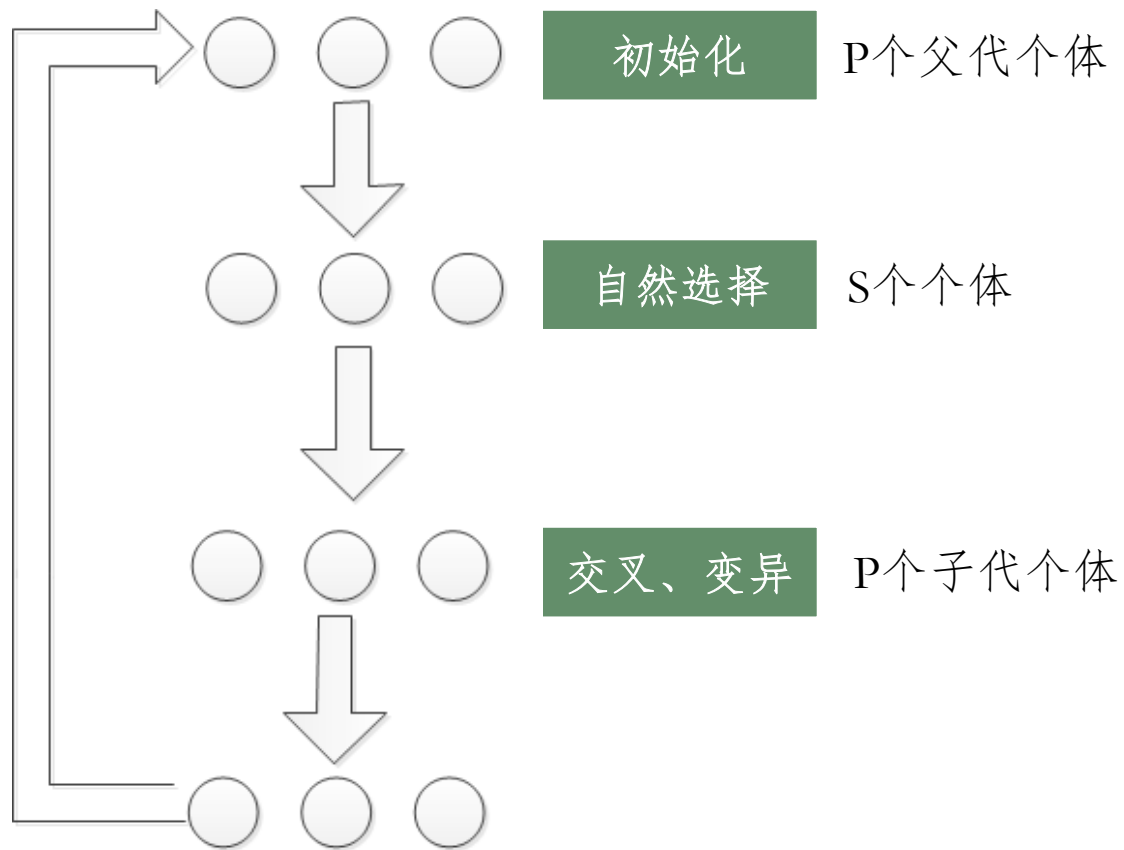
混合整数非线性规划
(MINLP)



进化算法-genetic algorithm (GA)

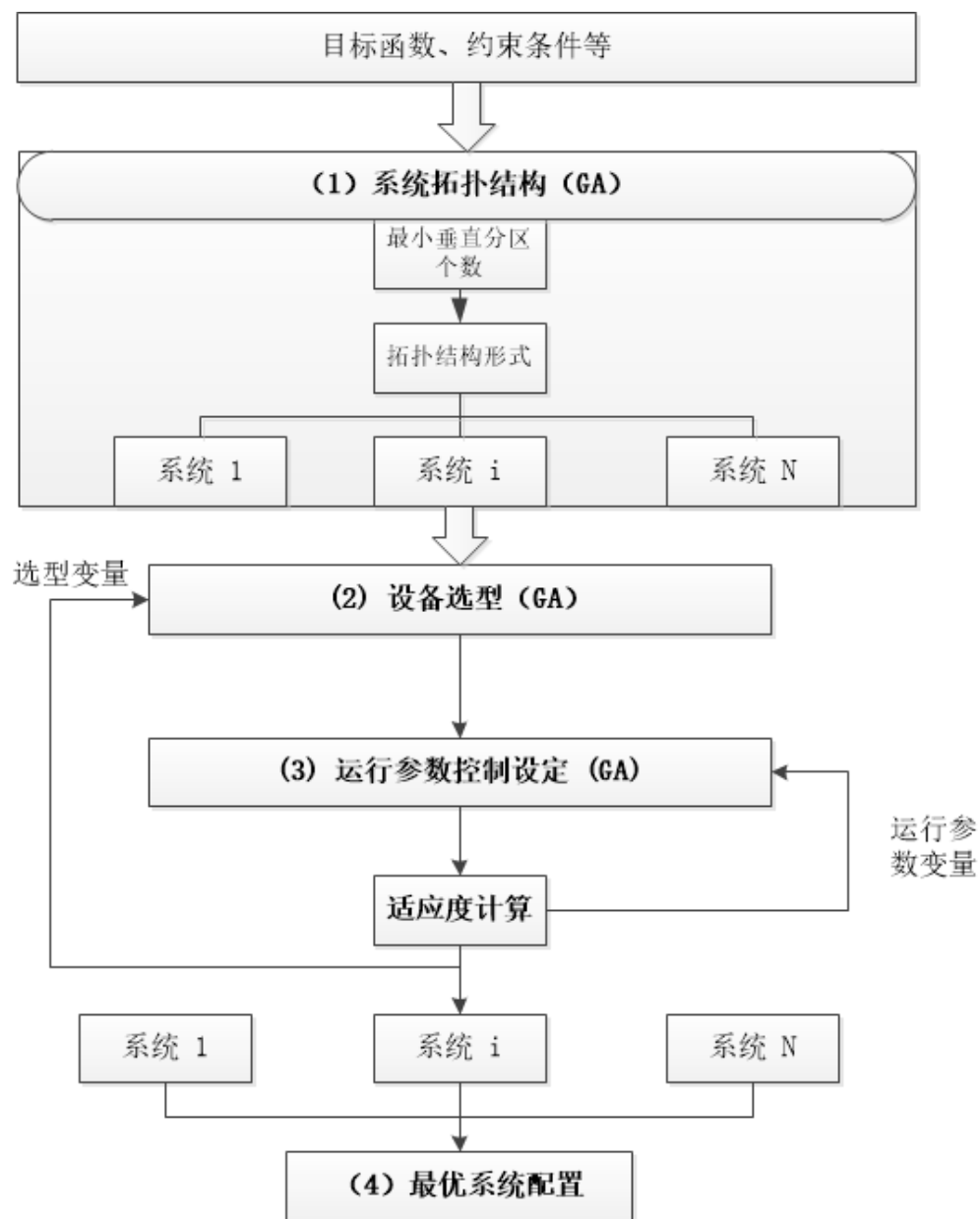
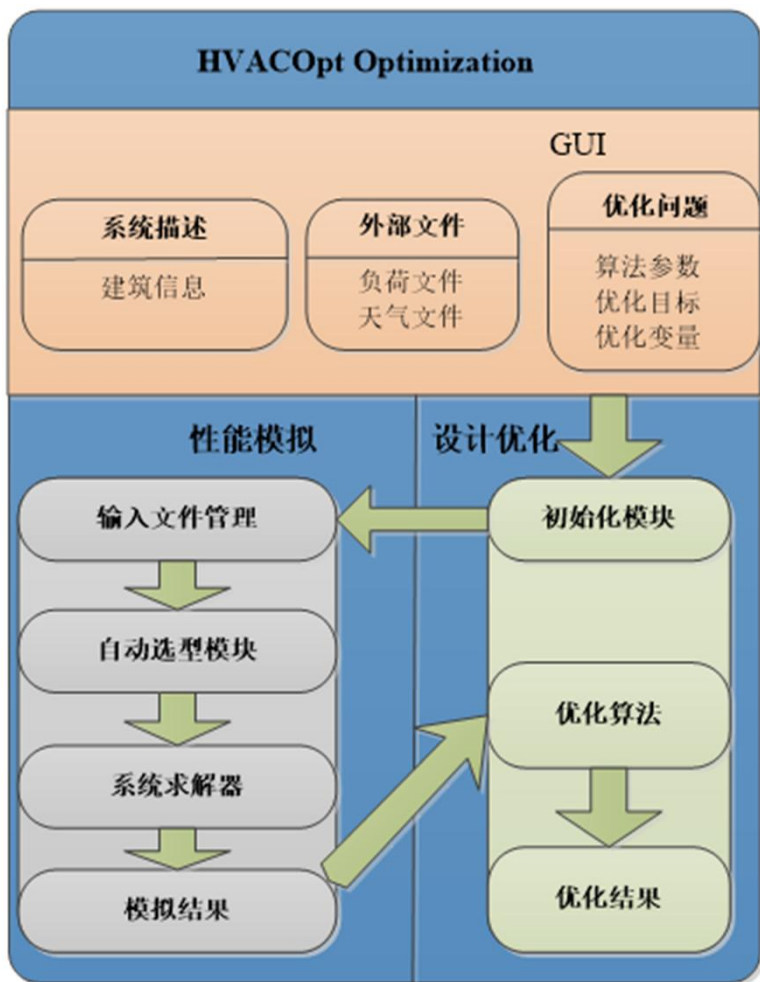
三、优化算法

2. 单目标/多目标优化: GA



二、空调水系统配置设计优化问题的建立

4. 优化流程



主界面

输入参数

建筑信息

建筑层数

层高 m

设备层 如1,3,5

分区数 个

能源站个数 个

说明：分区数和能源站个数确定后再进行设备信息选择！

设计信息

系统参数

新风比 %

冷冻水设计温差 °C

冷冻水供水温度 °C

空调热水设计温差 °C

空调热水供水温度 °C

冷却水设计温差 °C

冷却水回水温度 °C

AHU送风温度 °C

系统设计压力 MPa

室外参数

城市选择

室内参数

典型层数

设计干球 °C

输出结果

耗电情况

总耗电量 kWh

各分项耗电量

AHU耗电量 kWh

冷水机耗电量 kWh

水泵耗电量 kWh

冷却塔耗电量 kWh

基于matlab超高层建筑能效模拟系统



Optimization type

Optimization Objective

Please select

Design Variable

Tchw

Tcw

Tahu

Minimum Vertical Zone

Energy Station Number

Topology Range

Design Pressure Index

Algorithm

Generation

Population

Objective Building

Typical FloorNum

Design DryTem °C

Design RH %

City Select

Floor Number

Floor Height m

Floor Equipment eg:1,12,30

Typical Floor 1

Floor To

Typical Floor 2

Floor To

Typical Floor 3

Floor To

Typical Floor 4

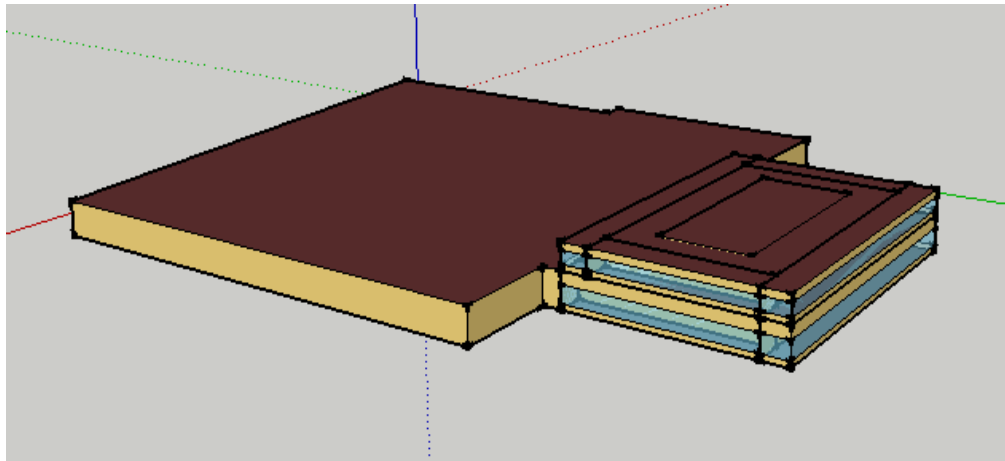
Floor To

四、优化案例-金茂大厦

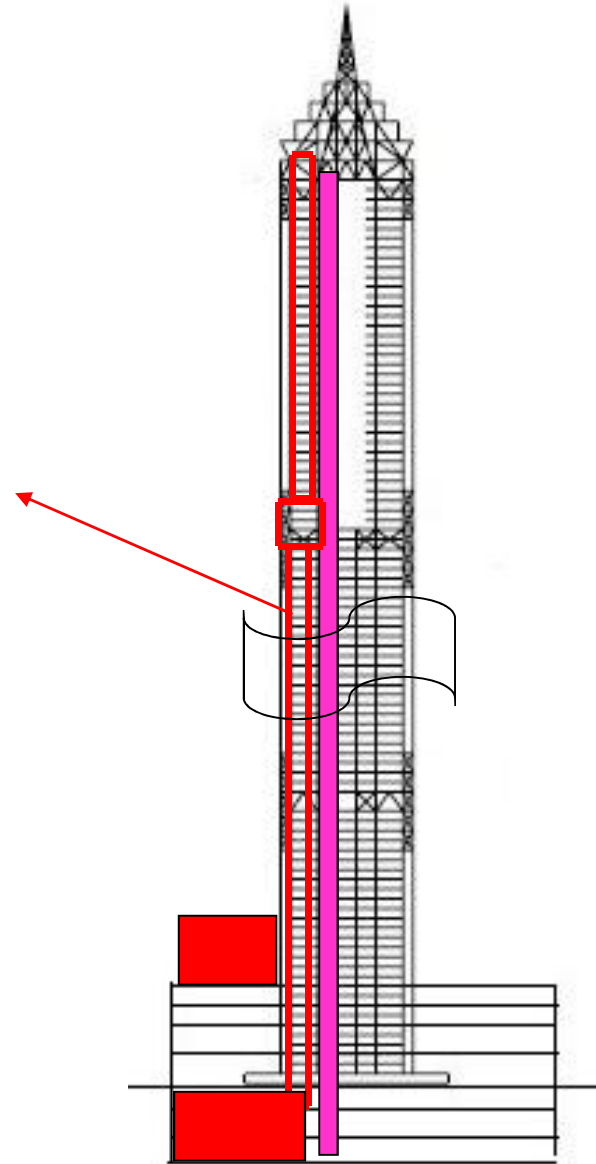
案例	目标函数	目的
Case 1	能耗	单目标优化
Case 2	能耗+初投资	多目标优化
Case 3	能耗+初投资	建筑功能、建筑位置及建筑高度对空调系统配置的影响

四、优化案例-金茂大厦

建筑模型:Energyplus

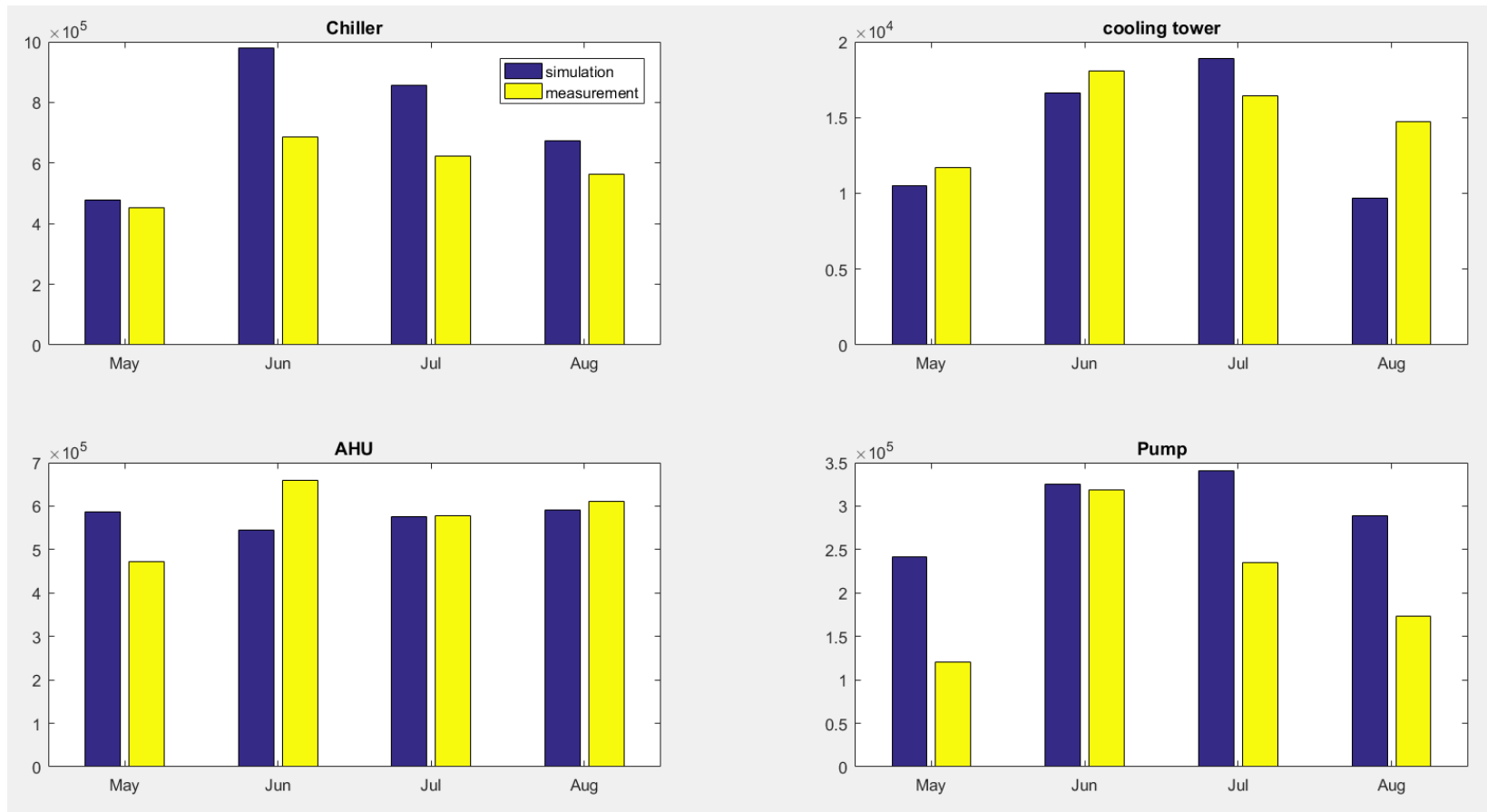


单层的建筑模型



四、优化案例-金茂大厦

建筑模型:Energyplus



模型精度

四、优化案例-金茂大厦

Case 1

	x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7	x8	x9	x10	x11	x12	x13	x14	x15	x16	x17	x18	x19
基准系统	4	6	12	2	0	6	1	6	11	0	0	0	5.5	32	16	2	1	1	5
优化系统	1	6	15	1	5	0	1	6	20	6	2	1	8.3	32.3	13	2	2	1	3

结果： x_{16} 说明两个系统都有两个垂直分区；

x_{17} 说明基准系统只有一个能源站，而优化系统有两个能源站。

x_{19} 基准系统的承压能力为**2.8Mpa**，优化系统的承压能力为**2.0Mpa**

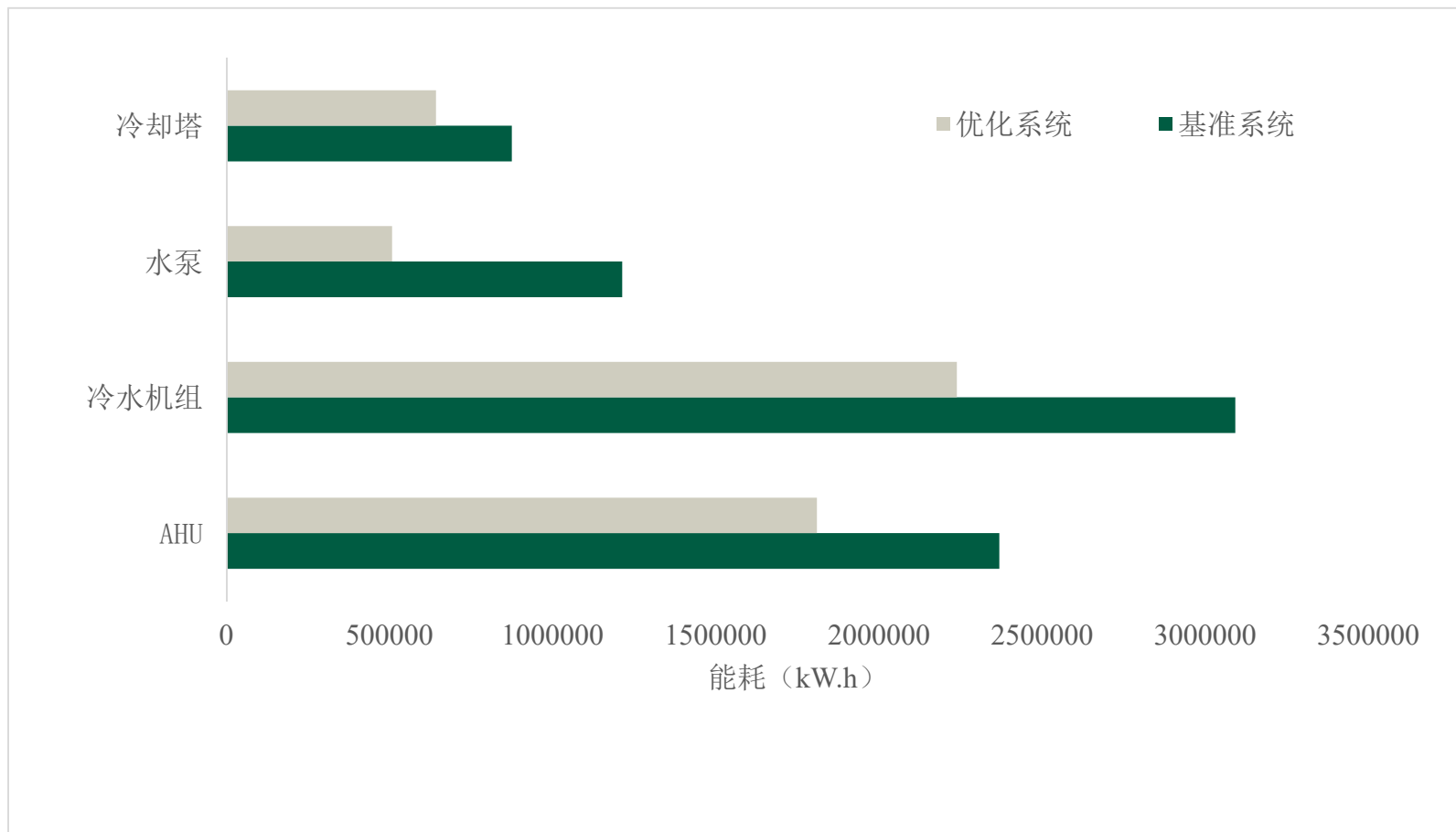
两个系统所选冷机的总的额定制冷量为

基准系统：**4,800冷吨**

优化系统：**4,900冷吨**

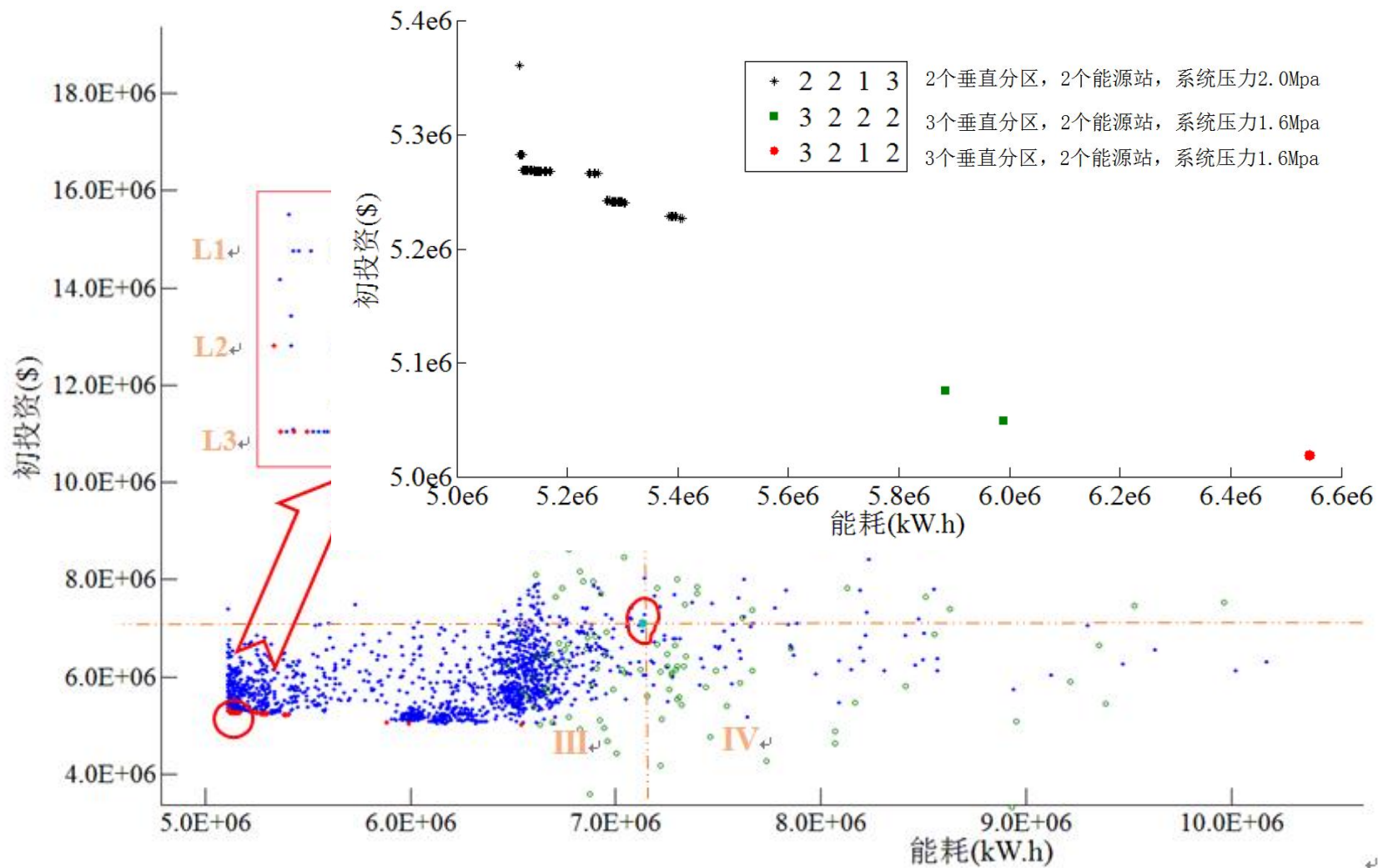
四、优化案例-金茂大厦

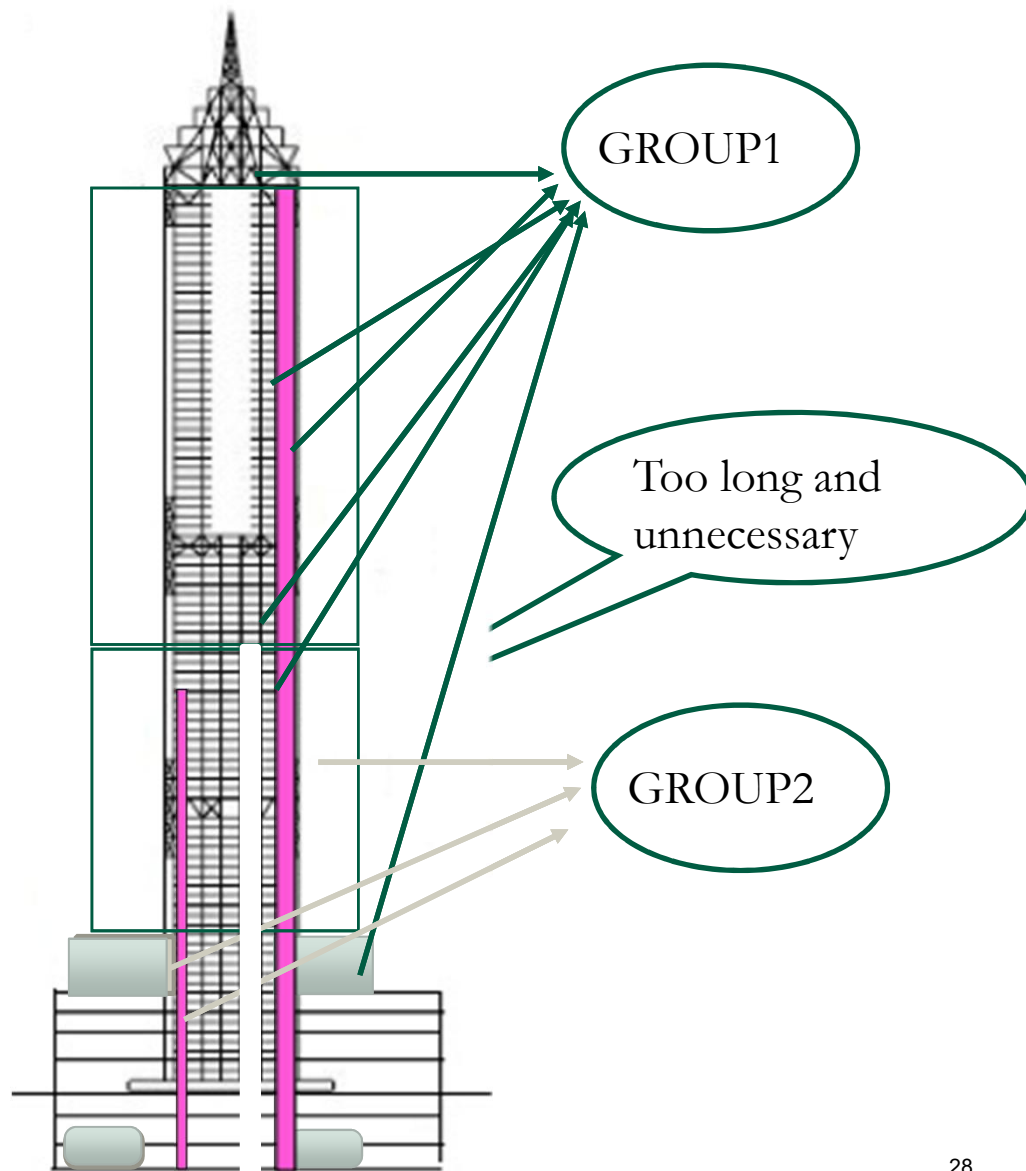
Case 1



四、优化案例-金茂大厦

Case 2





- 如左图所示，原始系统包括了两部分分别负责金茂大厦低区和高区的供冷。
- 显然第一组的水输配系统管道过长且没有必要，大量能量消耗在了输配过程中；
- 将第一组的冷水机组移动至51层设备层，冷却塔移动至金茂大厦顶层；
- 经过这样调整之后，管路变短，输配能耗下降。

四、优化案例-金茂大厦

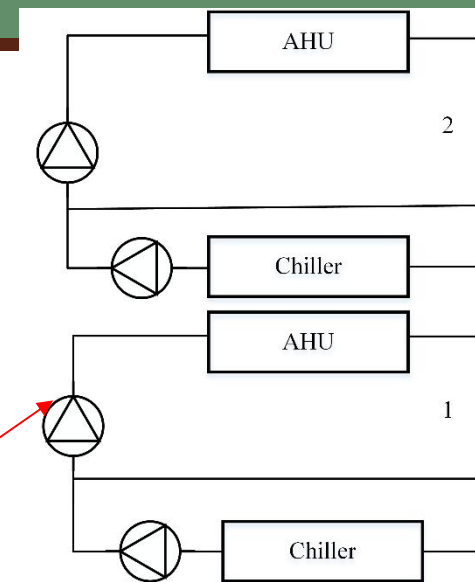
Case 3、参数分析

参数名称	变量取值
建筑功能	办公/酒店(O/H)、办公(O)、酒店(H)
建筑位置	上海(SH)、广州(GZ)、新加坡(SIN)
建筑高度	300m、400m、600m

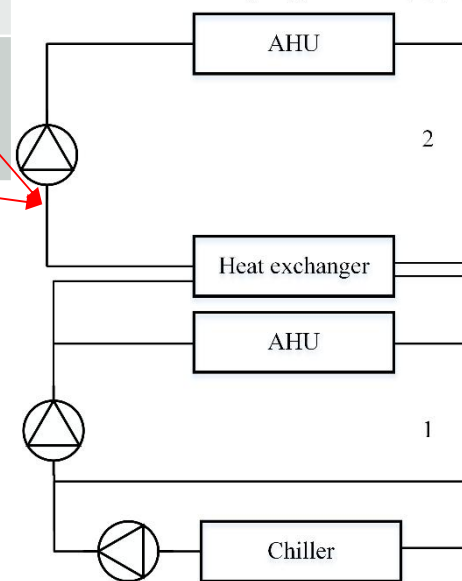
四、优化案例-金茂大厦

1) 建筑功能对优化结果的影响

建筑功能	拓扑结构	备注
办公/酒店	[2 2 1 3]	2个最小垂直分区，2个能源站，设计压力2.0MPa
办公	[2 1 1 3]	2个最小垂直分区，1个能源站，设计压力为2.0MPa
酒店	[2 1 1 3]	2个最小垂直分区，1个能源站，设计压力为2.0MPa



Topology variable:[2,2,1]

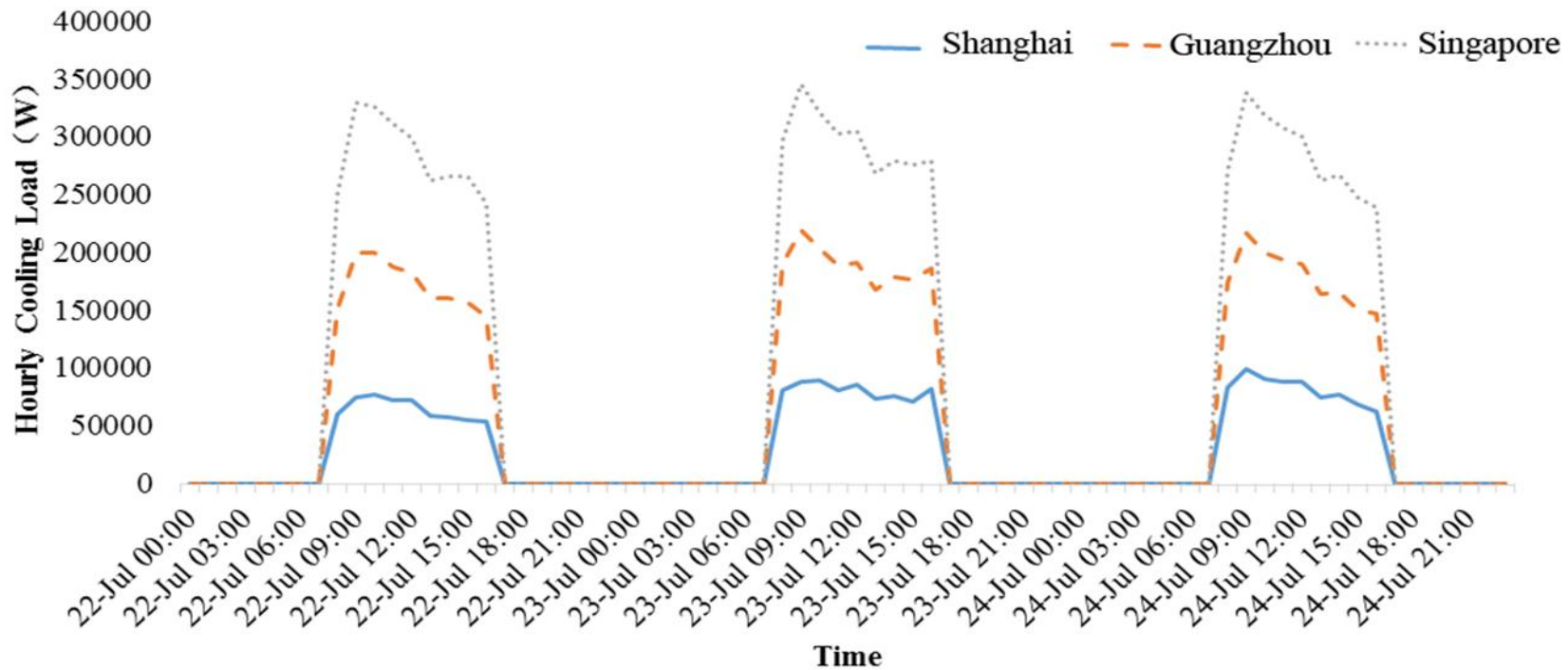


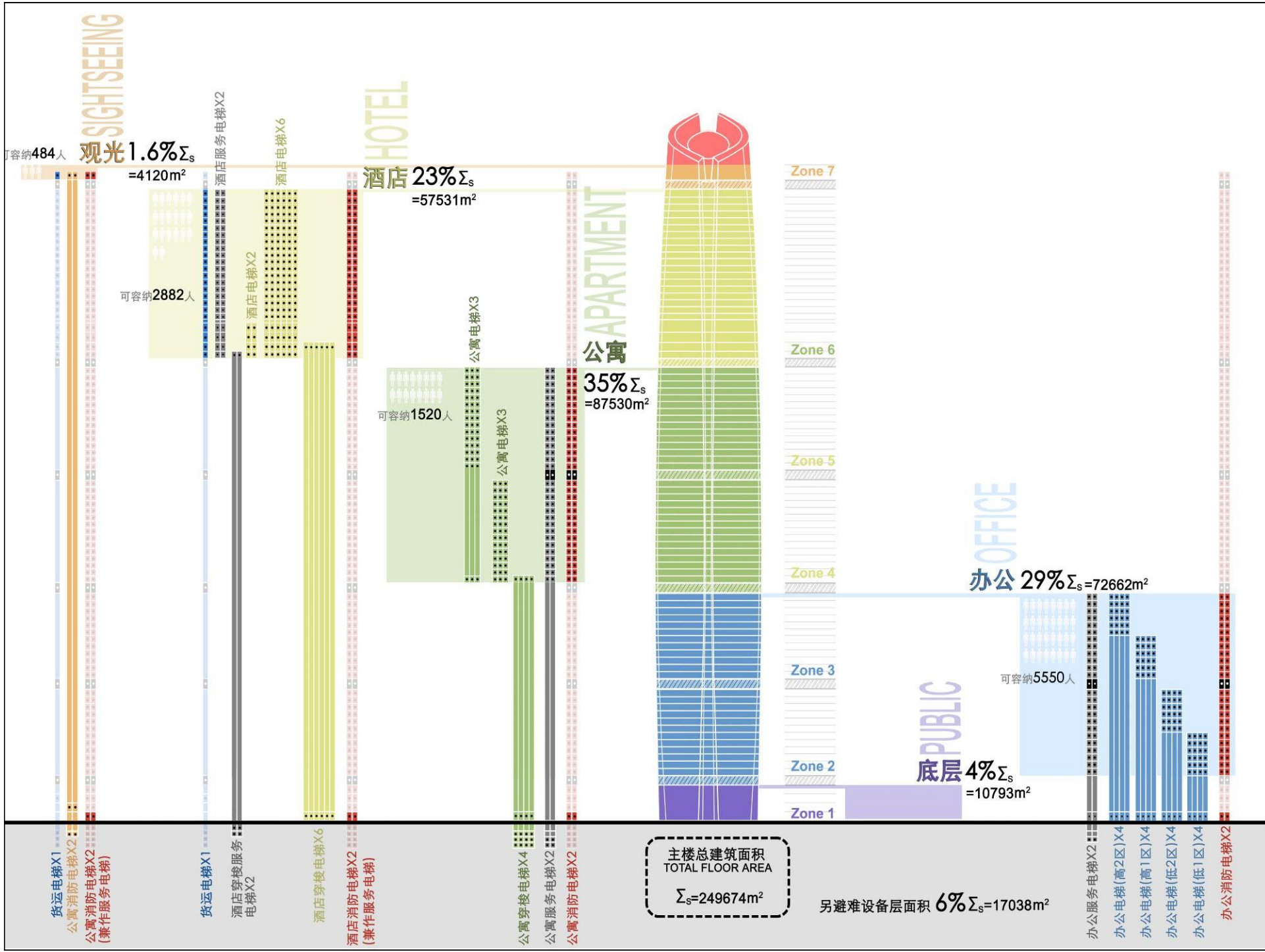
Topology variable:[2,1,1]

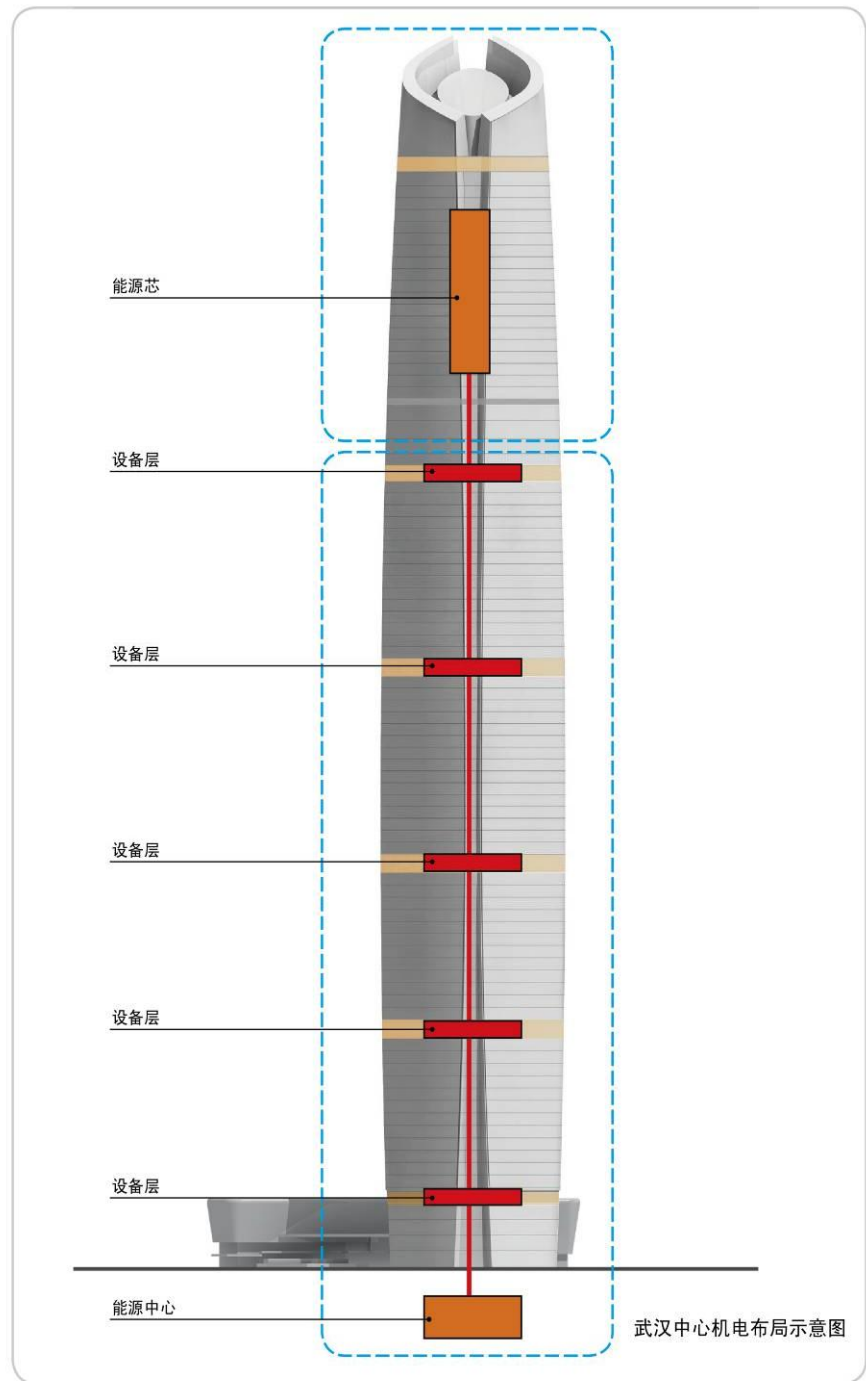
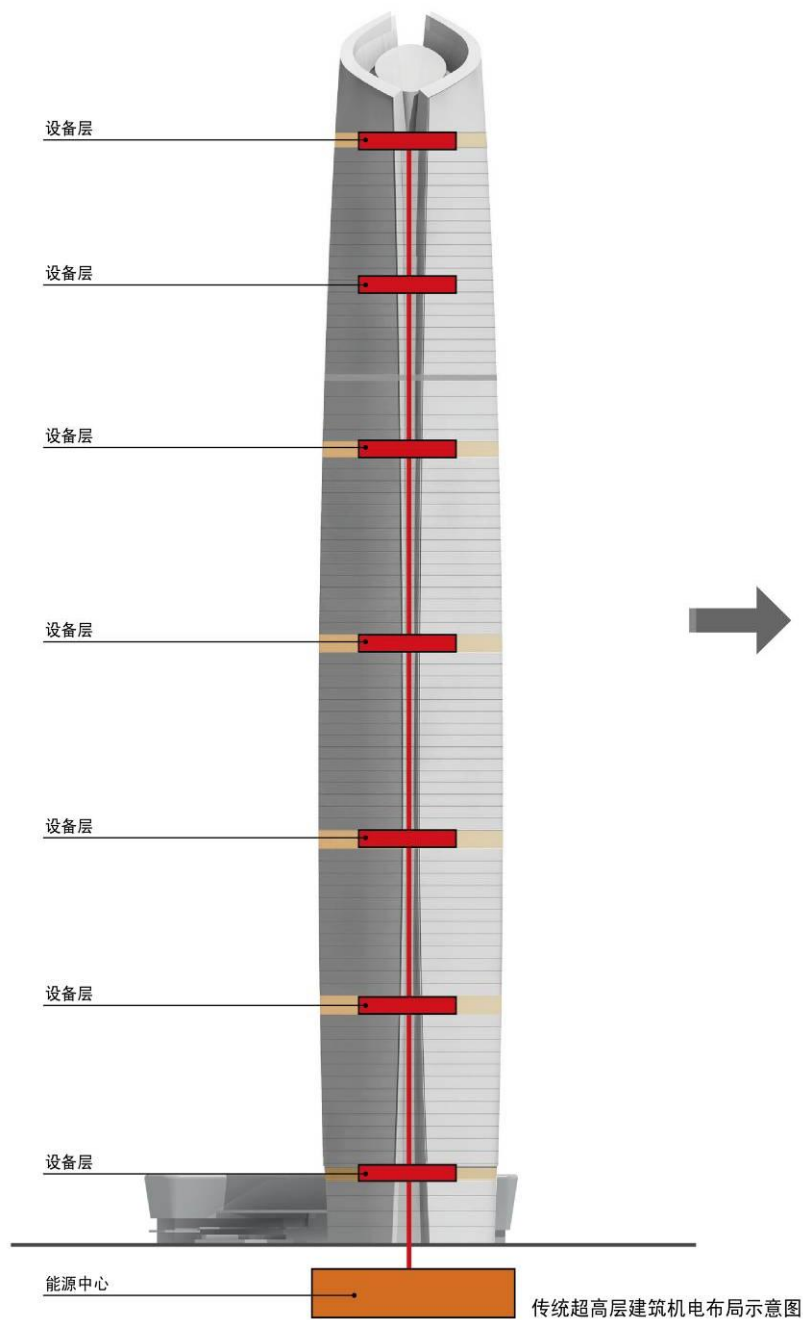
四、优化案例-金茂大厦

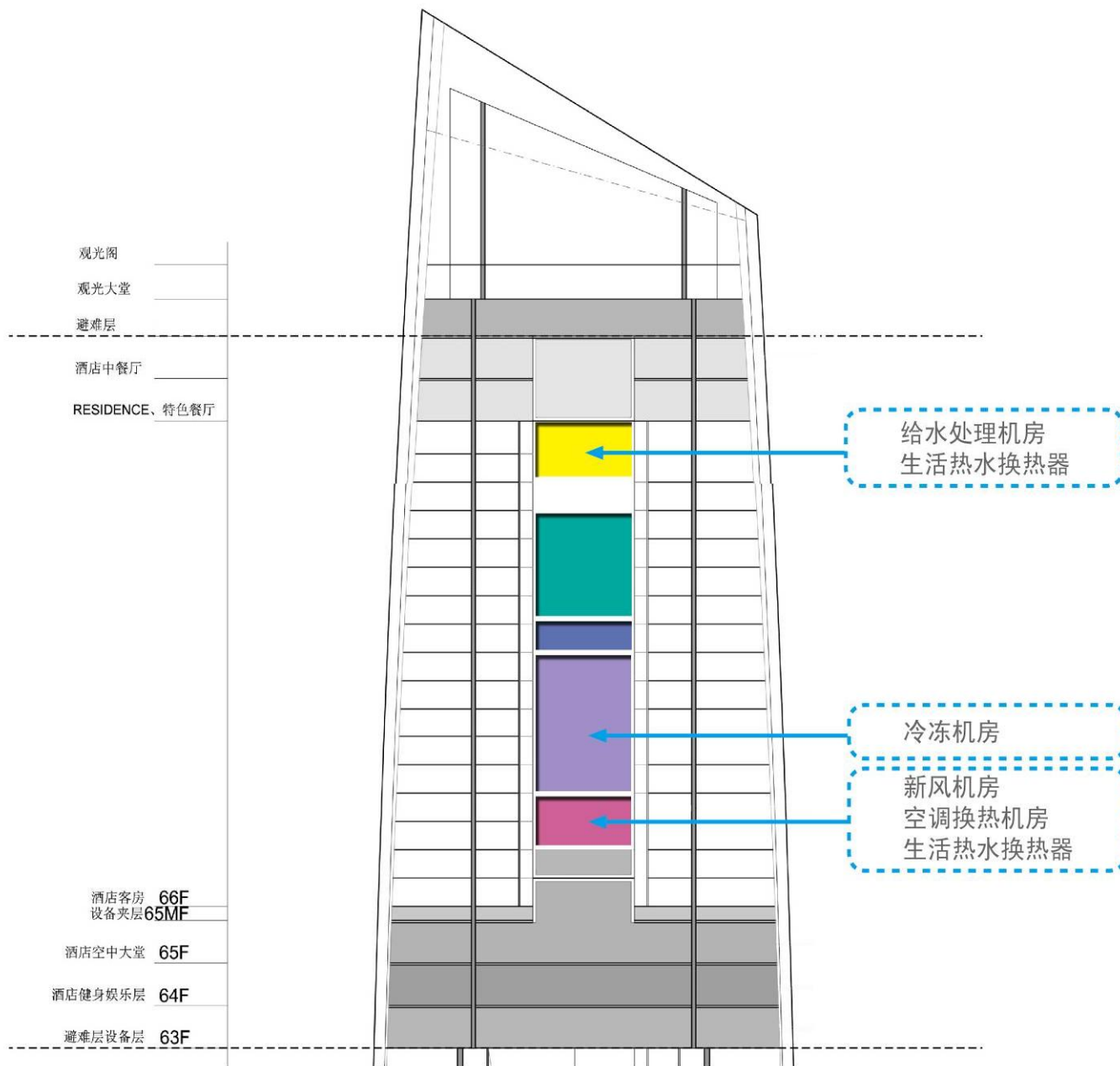
2) 气象参数对优化结果的影响

三个地点：上海、广州、新加坡









五、结论

1. 超高层水空调系统配置不能只凭工程经验；
2. 可以通过模拟计算实现超高层水系统配置的设计优化问题；
3. 提出基于SVR的NSGA-II适应度近似算法，加速传统遗传算法的求解过程；
4. 开发集建筑性能模拟与设计优化于一身的开源计算软件HVACOpt；
5. 通过单、多目标优化计算，均可找到比当前设计方案更加的设计方案；
6. 通过多组优化实验，可得出最优系统与建筑功能、建筑地理位置及建筑高度的关系。



THE END

