



清华大学

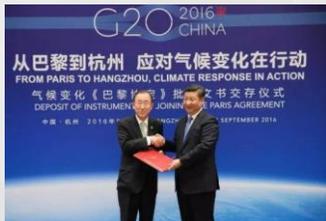
Tsinghua University

运行数据驱动空调系统高效节能调控

清华大学, 邓杰文, 博士

上海, 2021年中国制冷展

意义重大：持续增长的用能需求与低碳发展目标的共赢



- 1. 全球变暖问题严峻，绿色低碳发展需求迫切：2030年碳排放达峰，2060年实现碳中和
- 2. 能源安全问题：石油、天然气对外依存度高
- 3. 大气污染问题

零碳能源愿景



扎实推动**京津冀**协同发展、**长江经济带**发展、**粤港澳大湾区**建设、**长三角一体化**发展、**黄河流域**生态保护和高质量发展，高标准、高质量建设**雄安新区**。

“优化区域经济布局，促进区域协调发展”

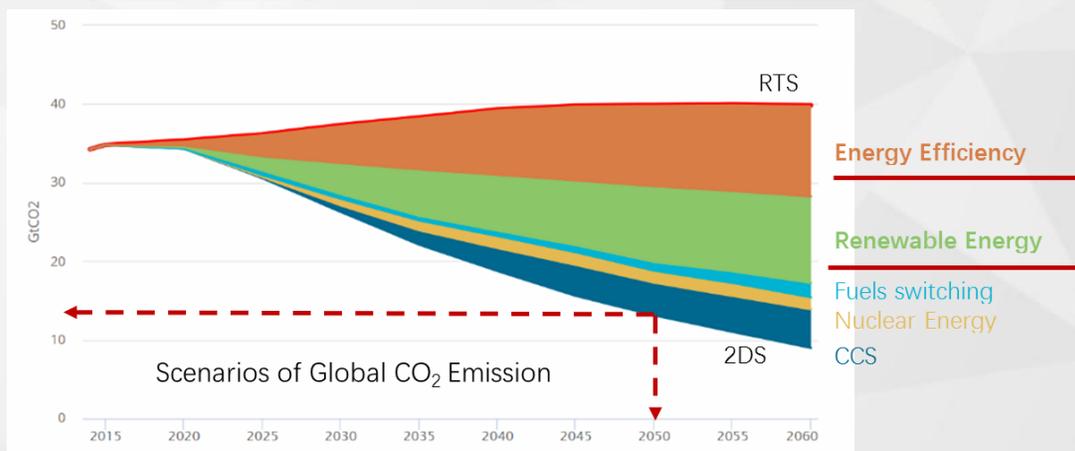
“推动绿色发展，促进人与自然和谐共生”



持续改善环境质量，**基本消除重污染天气和城市黑臭水体**。落实2030年应对气候变化国家自主贡献目标。加快发展方式**绿色转型**，协同推进经济高质量发展和生态环境高水平保护，**单位国内生产总值能耗和二氧化碳排放分别降低13.5%、18%**。

公共建筑实际运行能耗高，特别是空调系统能耗高，占据半壁江山；

Energy Efficiency 提高机电(能源)系统运行效率是公共建筑实现零碳发展的重要环节



巴黎协定全球碳排放目标 (数据来源于IEA)

> 1.0 数据大爆炸的时代，给了我们最有力的调控工具

3

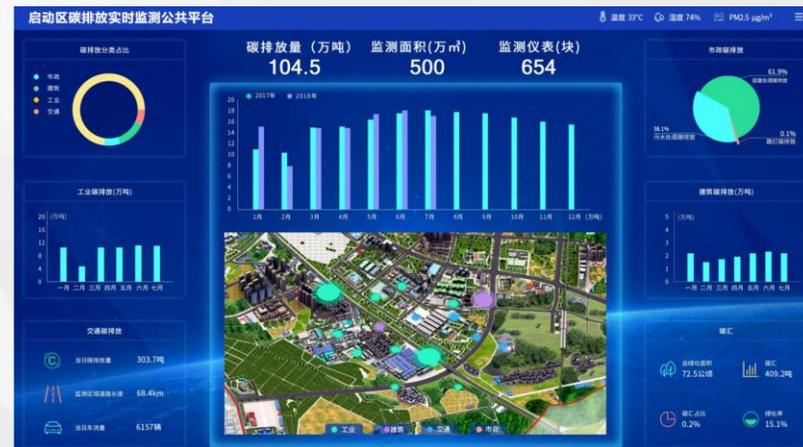
- 空调系统体量、形式、功能更加**复杂**、运行调控**难度更大**；
- 与此同时，**监测数据更为齐全**，监控系统更加**智能化**：**监测+分析+调控**，给了我们更深一层次认识系统的方式和机会，以及更加**及时、准确、有力**的手段和工具；

□ 用好数据，是实现系统高效运行的关键：

- 指标驱动：多维度认识空调系统，实现更客观的评价
- 系统耦合：从末端到冷源，优化调适贯穿空调系统
- 全过程高效：从跳高思维到跳远思维的转换，关注多工况



能效提升节能监控系统

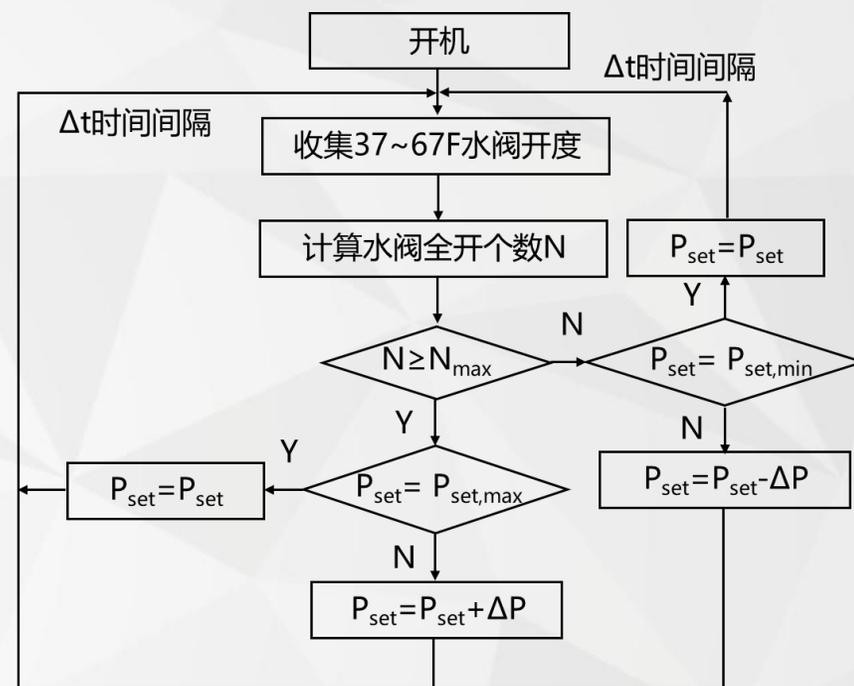


大数据及可视化展示平台

> 1.1 案例分享1：末端水系统需要关注什么？

4

- 某办公项目，三十层共60台AHU，水系统实现全自动调控；
- 基础条件：在水力最不利末端设置压差传感器；
- 判断：统计末端所有AHU水阀开度，并根据**达到100%开度的空调箱水阀个数调整压差设定值**；
- 行动：根据实际压差，与压差设定值的差别，调节水泵频率；
- 实际运行是否实现高效？

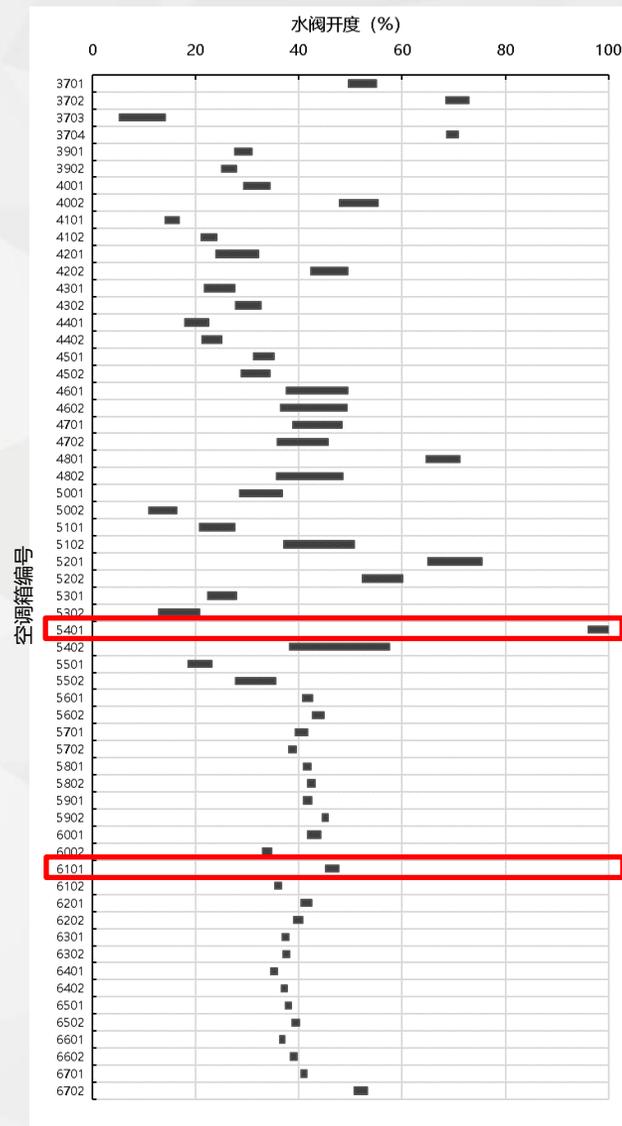
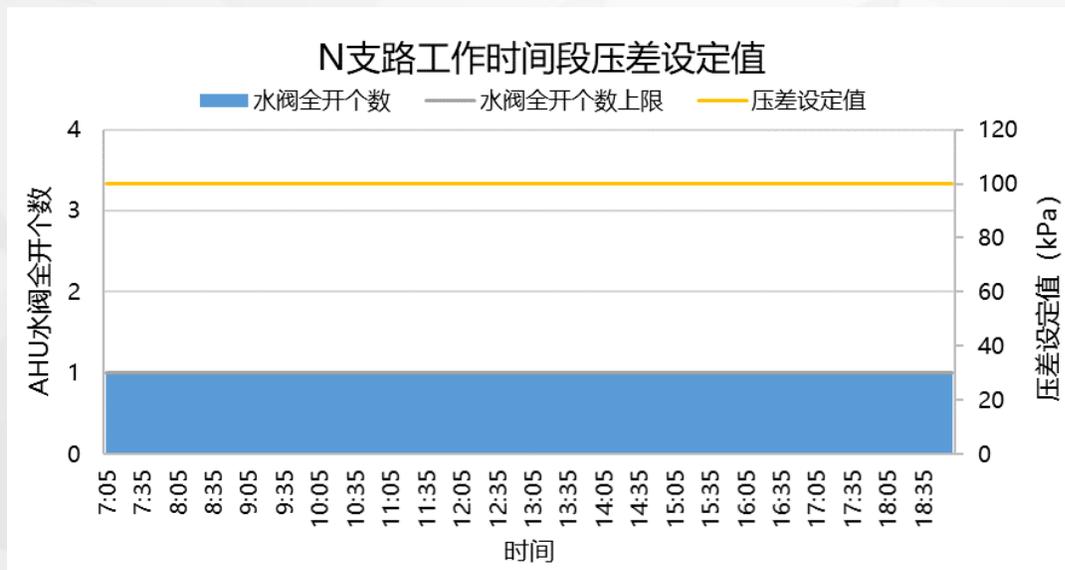


- N_{max} - 最大水阀开度个数容忍上限，工作时间为1个，夜间为3个
- $P_{set,max}$ - 最大压差设定值，现为100kPa
- $P_{set,min}$ - 最小压差设定值，现为40kPa

1.2 观测：连续调节的水系统末端（空调箱）水阀开度

5

- 某项目60个AHU冷冻水阀门开度，可以看出集中在40%左右（左为24小时变化，右为24小时统计）
- 所谓的水力最不利末端水阀开度仅为45%左右（最高层）；
- 存在个别末端（AHU-5401）水阀开度长期为100%，影响着整个系统的压力设定值；
- 压差设定值长期处于上限（100kPa），水泵高频运行；



测试时间：2018/6/28

1.3 如何分析：从评价指标出发，分析影响因素

- 冷水系统输送系数 (WTF) 表示单位泵耗输送的冷量，常用于评价冷水系统运行性能， WTF 越高表明系统运行性能越好

$$\begin{aligned} WTF_{ch} &= \frac{Q}{W_{pump}} = \frac{Q}{\frac{G * g * H}{\eta}} = \frac{Q * \eta}{G * g * S * G^2} = \frac{Q * \eta}{g * S * G^3} \\ &= \frac{Q * \eta}{g * S * \frac{Q}{c * \Delta t}} = \frac{c^3 * \Delta t^3 * \eta}{g * S * Q^2} = \frac{c^3}{g * Q^2} * \frac{\Delta t^3 * \eta}{S} \end{aligned}$$

- 在供冷量确定后，影响冷冻水系统的关键参数

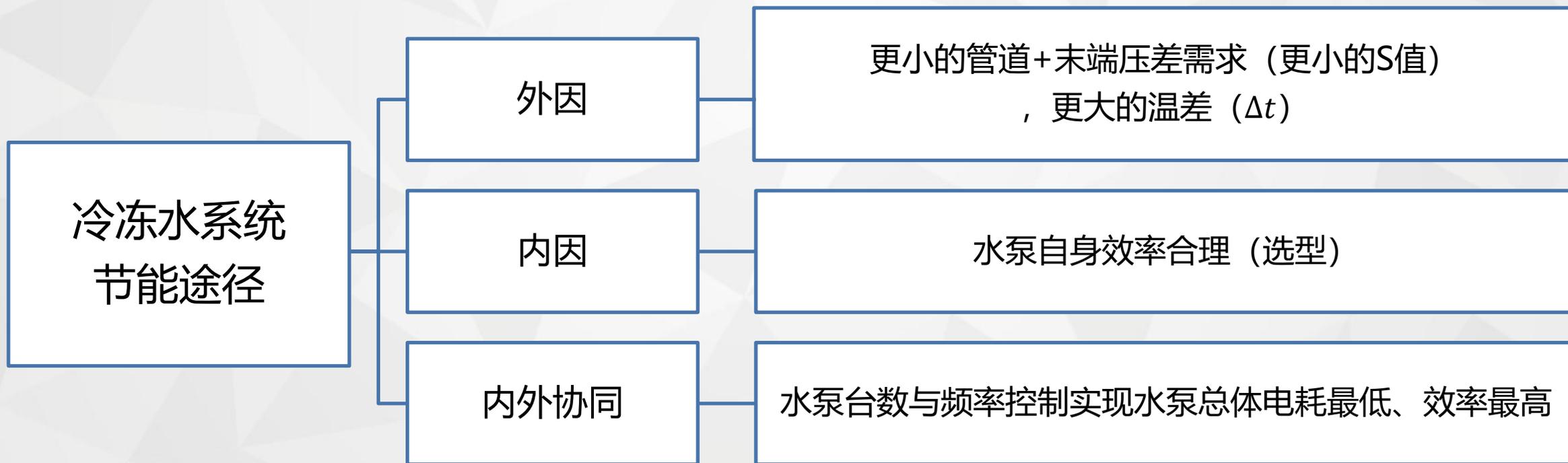
- Δt — 系统供回水温差, K \longrightarrow Δt 在满足供冷需求的前提下越大越好;
- S — 末端阻力系数, $mH_2O/(m^6/h^2)$ \longrightarrow S 越小越好;
- η — 水泵效率, % \longrightarrow η 越高越好;

1.3 如何分析：从评价指标出发，分析影响因素

在供冷量确定后，影响冷冻水系统的关键参数

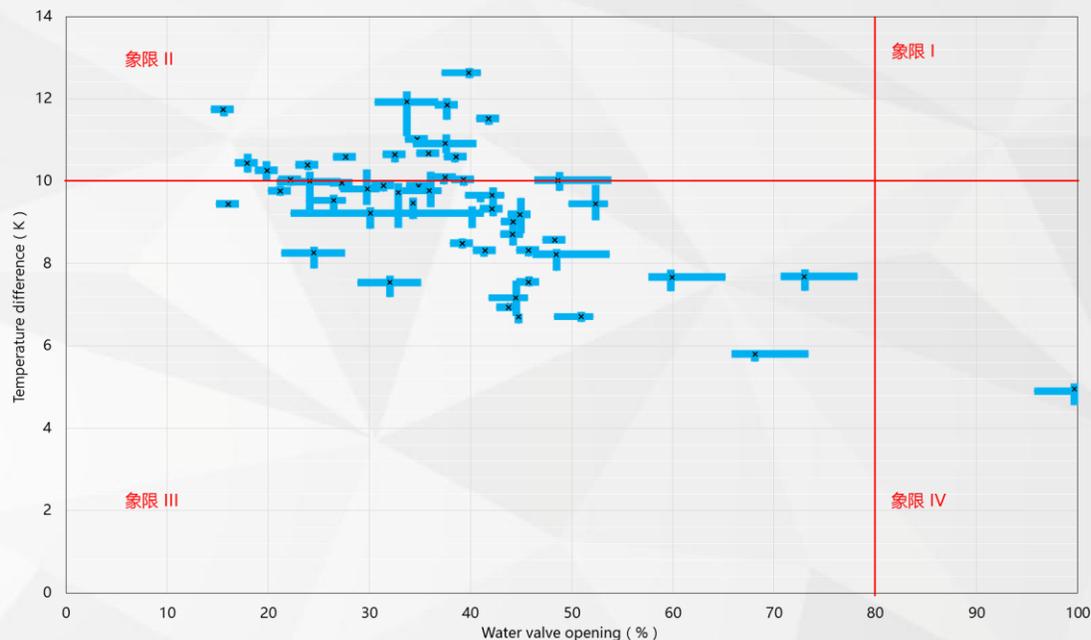
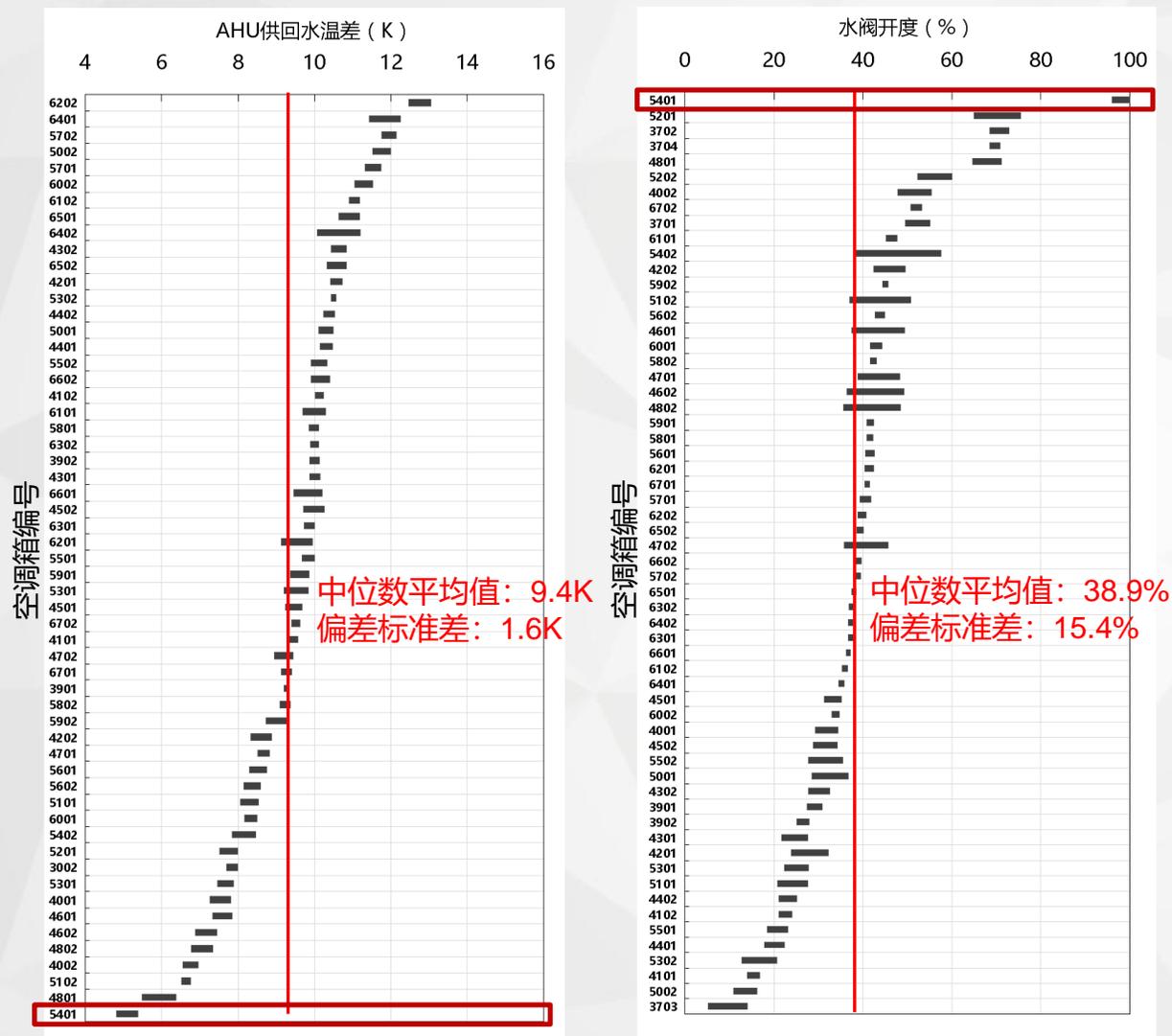
- Δt — 系统供回水温差, K
 - S — 末端阻力系数, $\text{mH}_2\text{O}/(\text{m}^6/\text{h}^2)$
 - η — 水泵效率, %
- 外因, 表示设备或系统工
作的外部环境
- 内因, 水泵自身效率

内外协同, 在确定外部环境下,
通过水泵频率-台数调节, 提升
整体运行效率



1.4 用好数据：多一维度评价分析（供回水温差，水阀开度），判断真实需求

8



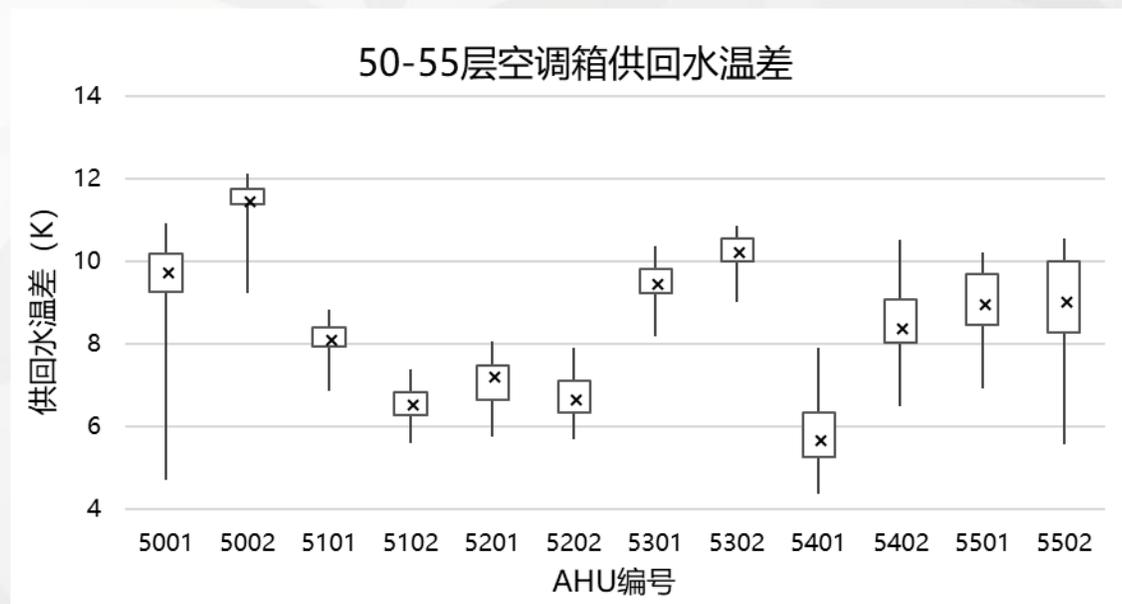
- 象限I: 大 Δt , 小 S ; \checkmark
- 象限II: 大 Δt , 大 S ;
- 象限III: 小 Δt , 大 S ; \times
- 象限IV: 小 Δt , 小 S ;

■ 少数AHU水阀全开（象限IV）将会导致大量AHU运行在象限III，系统处于大 S 值，小 Δt 运行状态，增加水系统能耗

➤ 1.5 怎么办：第一步排查个别状态异常“淘气”的末端

9

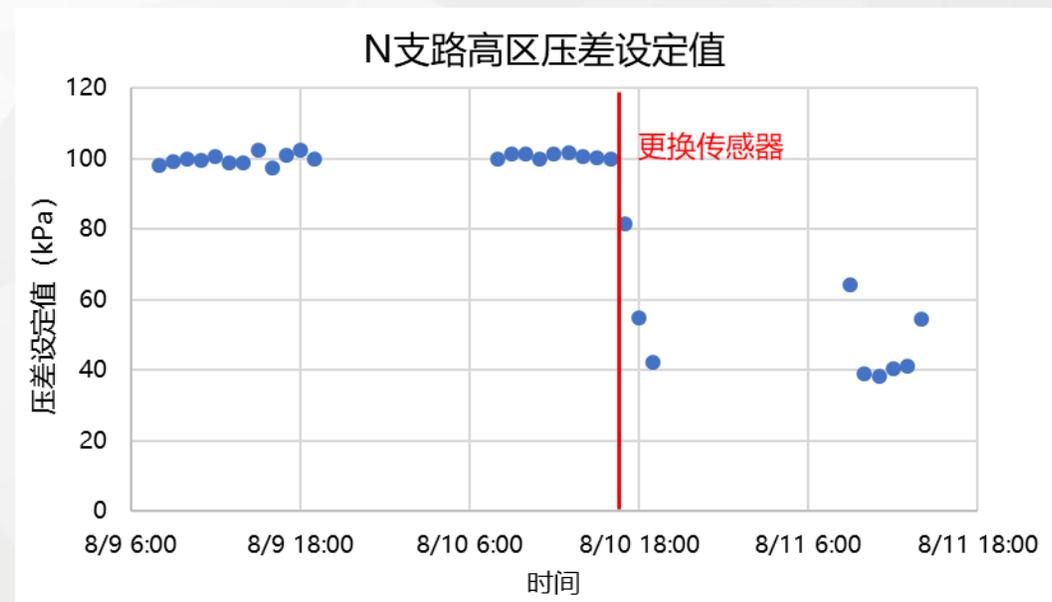
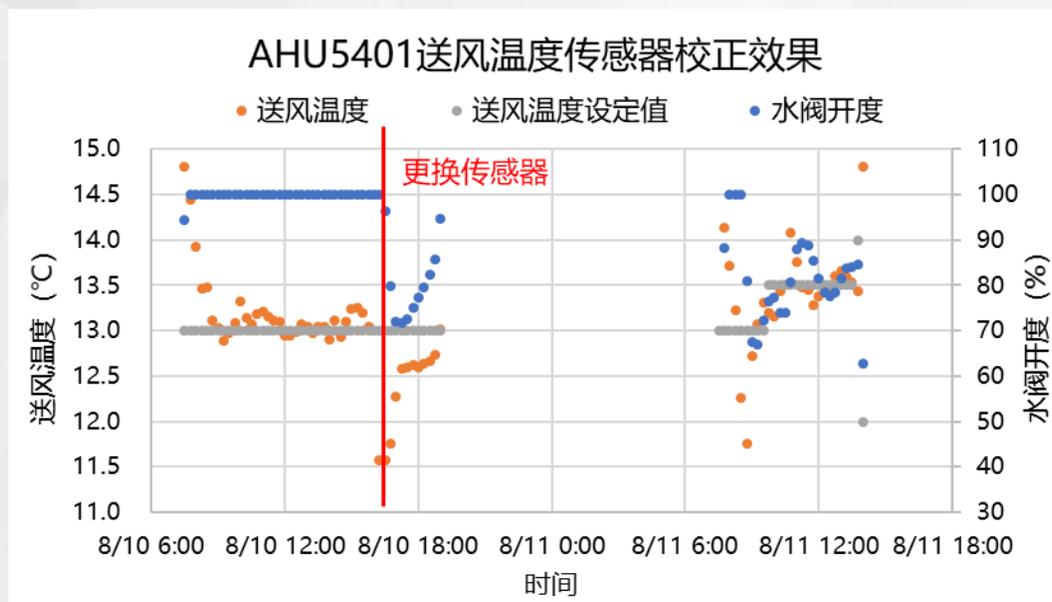
- AHU-5401供回水温差小，仅6K左右，远低于其他AHU，说明并非供冷量不足；
- AHU-5401水阀长期处于100%开度，对比同层AHU-5402，后者开度仅为35.1%；
- 两台AHU并联运行，理论上负荷相当；



1.6 排查个别状态异常“淘气”的末端：问题在传感器

10

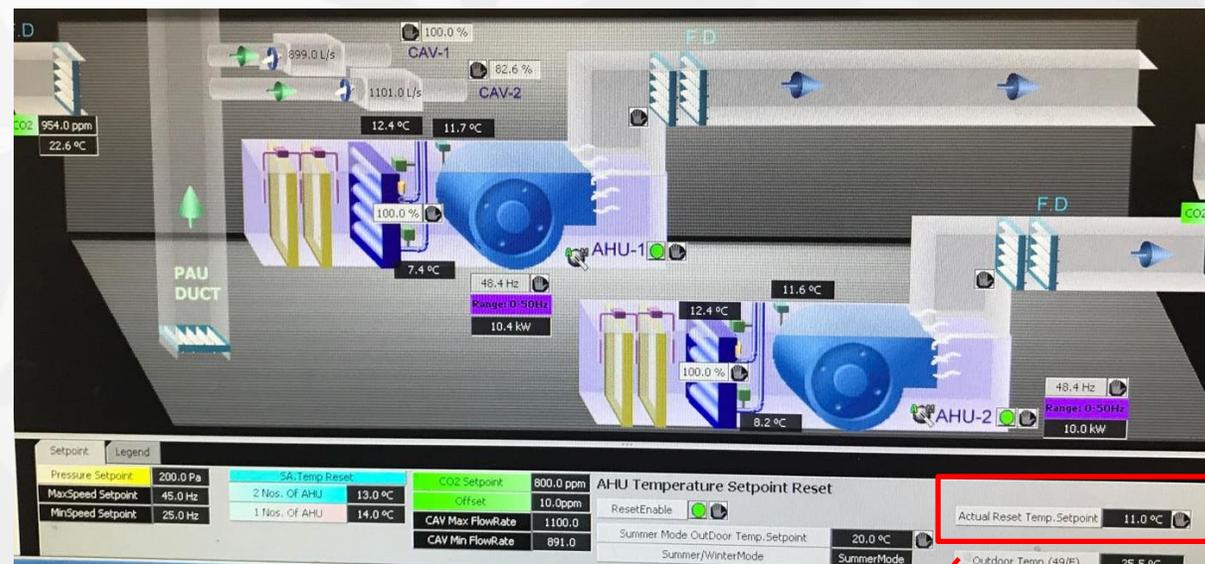
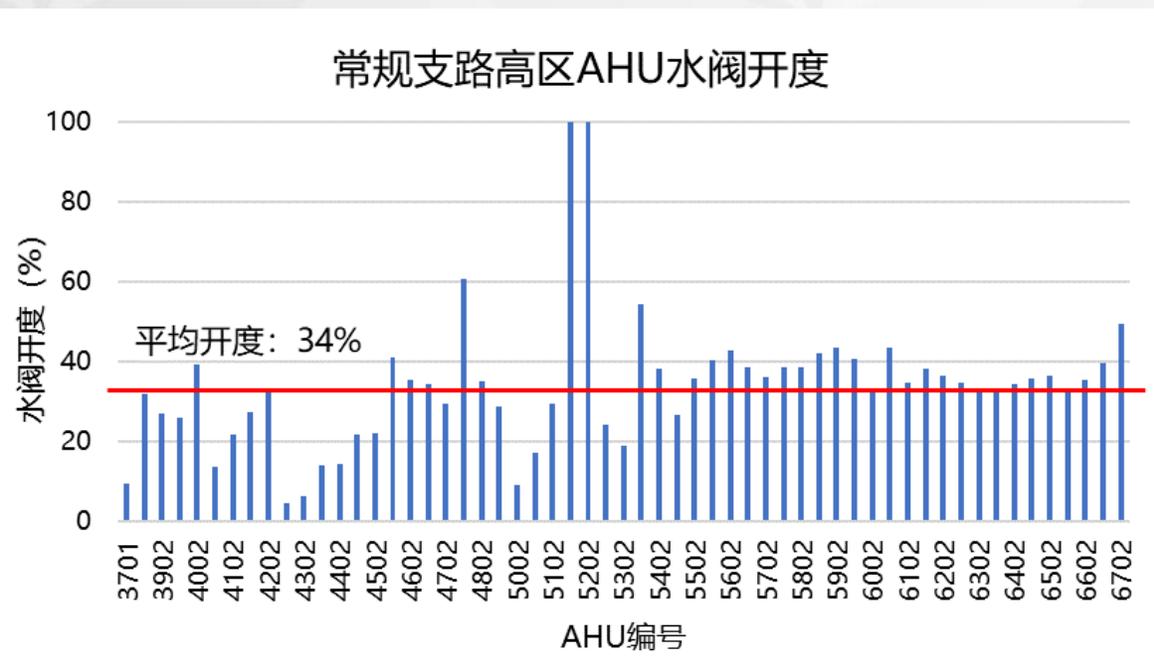
- 对送风温度传感器进行校核，发现送风温度监测值较实际值偏高2K，导致水阀全开（左图）；
- 更换送风温度传感器后，AHU5401水阀开度恢复正常，系统压差设定值和实际值由上限100kPa逐渐降低至下限40kPa（右图）；



1.7 好景不长：涌现出新的“淘气”末端

11

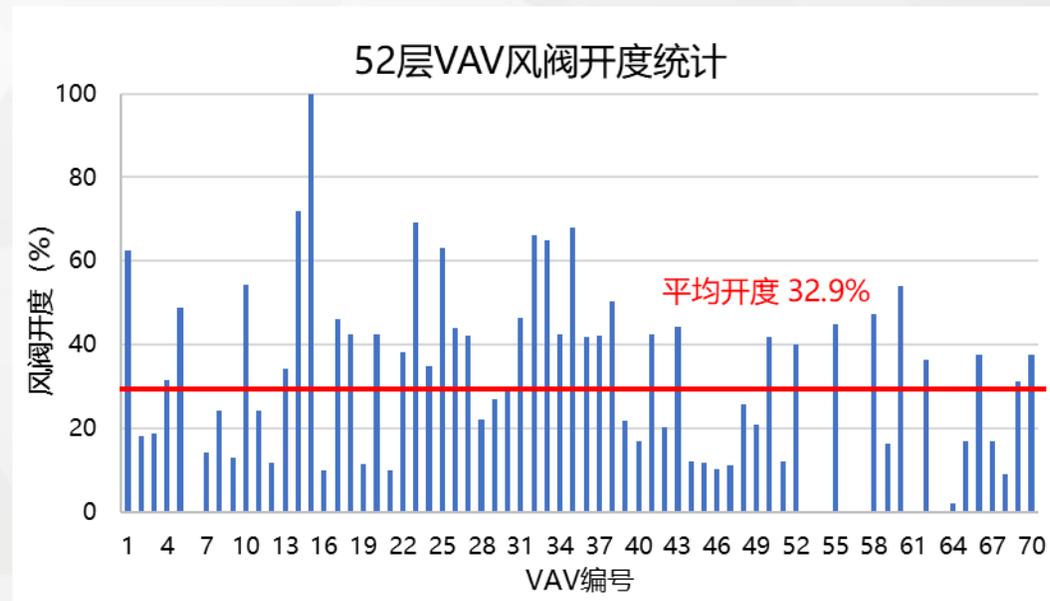
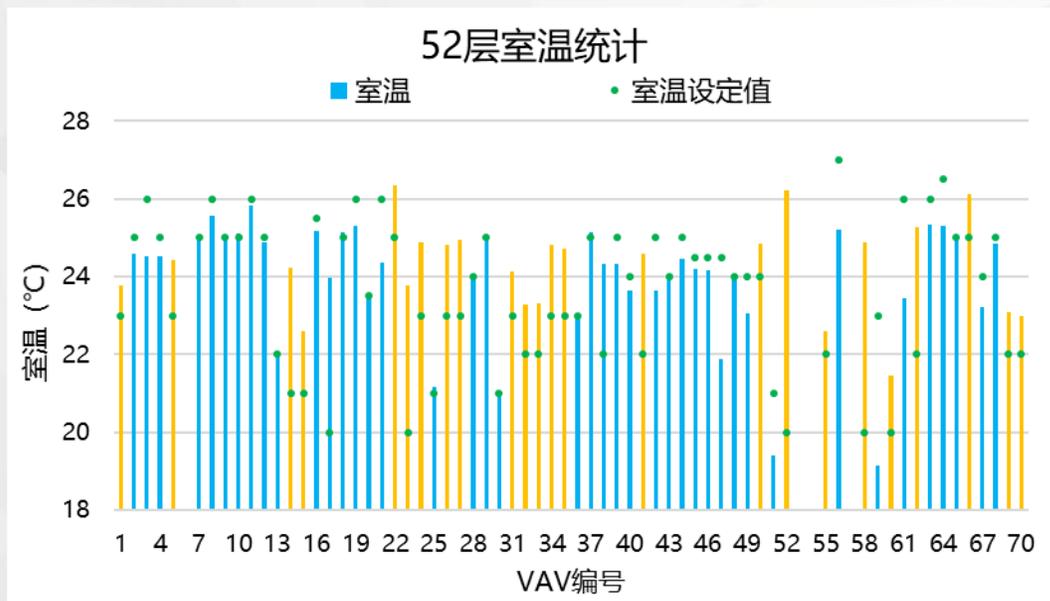
- 然而，好景不长，AHU5401恢复正常后，AHU5201、5202出现水阀全开的情况，导致水系统压差设定值再次升高并维持在上限（100kPa）；
- 再次排查，发现主要原因为52层AHU送风温度设定值过低，仅为11°C，导致水阀全开；



➤ 1.8 从水系统到风系统：送风温度设定值过低，是因为风侧反映“过热”

12

- 选取8/20 11:00 对52层各66个VAV末端状态点进行分析：
- 仅15#VAV风阀全开，主要原因为室温设定值过低（ 21°C ），VAV风阀平均开度仅为32.9%；
- 30个VAV末端处于过冷状态，占比45.5%；
- 22个VAV末端处于过热状态，占比33.3%，其中设定值 $\leq 23^{\circ}\text{C}$ 为20个，占过热末端90.9%；
- 由此可见，送风温度设定值 11°C 过低，建议提高（风侧的控制，反过来会影响到水泵的调节，好似“蝴蝶效应”）



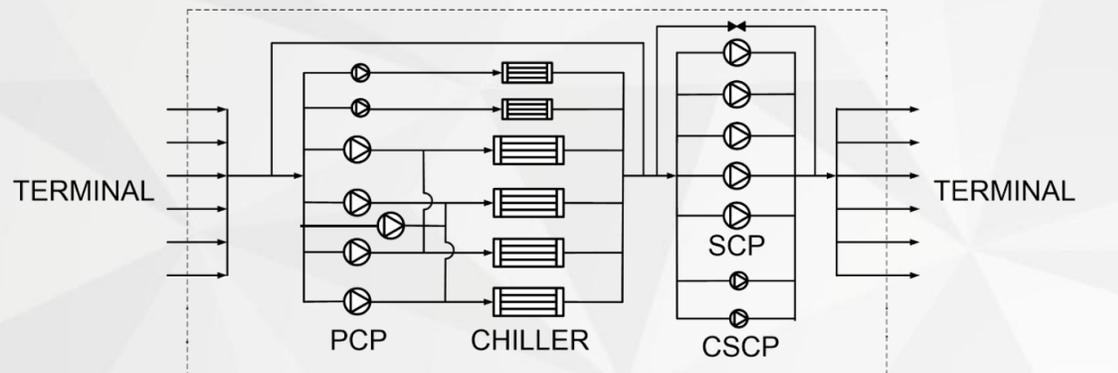
1.9 从末端到冷源，优化调适不再只关注单个系统

- 为了避免个别“淘气”末端的异常运行影响水系统运行调节，于是建议将水阀全开个数容忍上限设置为3个，高区压差设定值由100kPa降至40kPa，实测水泵功率降低34.7%；

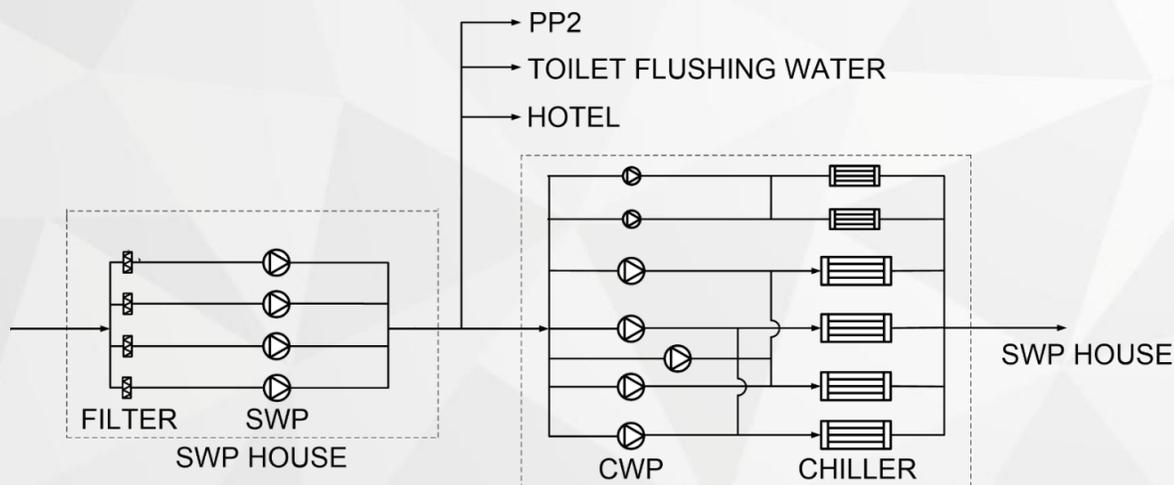
	水阀全开个数	压差设定值下限 (kPa)	水泵总功率 (kW)	节能百分比	水阀平均开度 (%)
调适前 (容忍个数为1)	2	100	22.2	/	34.1
调适后 (容忍个数为3)	2	40	14.5	34.7%	54.2

- **水力最不利末端，不一定是热力最不利末端；热力最不利末端即使水阀全开，室内环境也不一定过热；**
- **风系统运行不当（传感器误差、送风温度设定值不合理）**都会影响水系统运行调控；
- 空调系统从末端到冷源相互影响、相互耦合，**调适优化要贯穿空调系统各个环节；**

2.0 案例分享2：冷站水系统需要关注什么？ 二次泵逆向混水，水泵整体调节



	额定冷量 (RT)	额定COP	速
CH1~2	400	5.95	定
CH3~6	1000	6.75	定



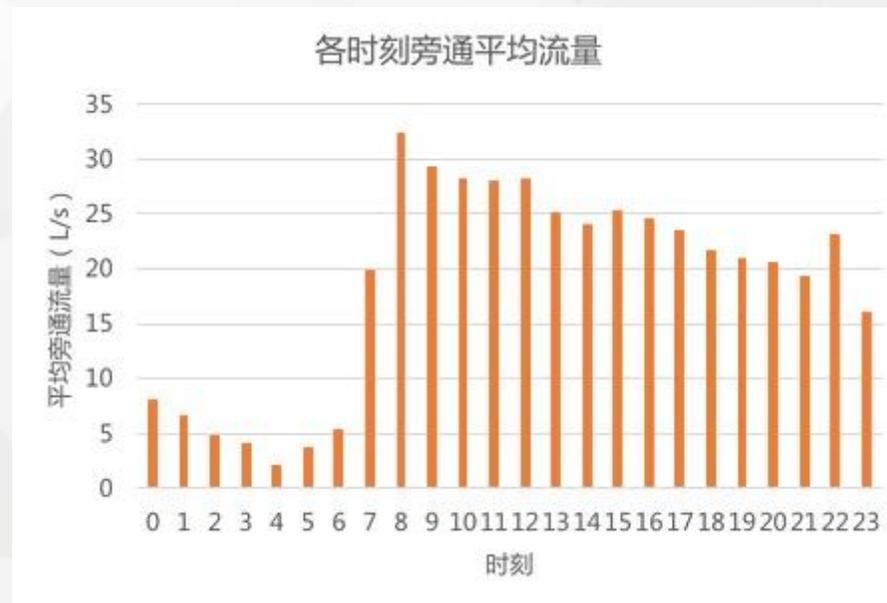
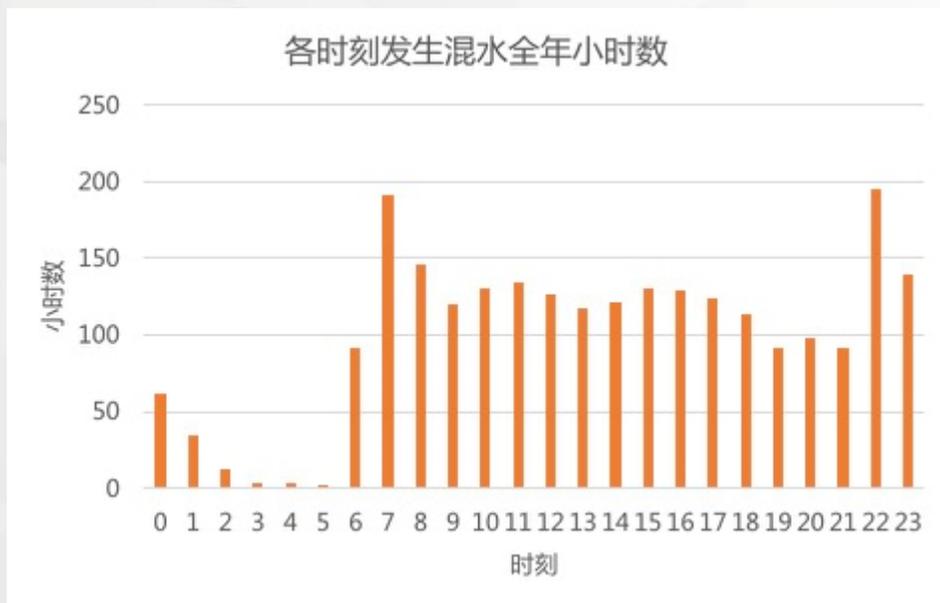
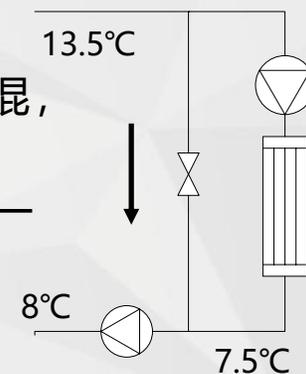
	流量 (m ³ /h)	效率	扬程 (m)	功率 (kW)	速
PCP1~2	181.8	0.7	14	10	定
PCP3~7	453.6	0.79	14	22	定
SCP1~5	543.6	0.87	35	60	变
CSCP1~2	181.8	0.78	35	22.7	变
CWP1~2	242.28	0.88	10	7.6	定
CWP3~7	604.8	0.8	10	20.8	定

- 对于一二次水系统，旁通管设计为正向混水，保证一次侧流量足够，不影响冷机换热性能；

2.1 一直没有解决的问题：二次泵系统旁通混水

- 根据冷机运行记录，分析各个时刻发生二次侧回水与一次侧掺混现象的全年小时数，以及各个时刻的平均掺混流量，全年接近2000小时存在混水情况，混水量接近100m³/h；
- 问题：二次侧供水温度升高，为了维持供冷效果，需要降低冷机出水温度，降低冷机运行能效；

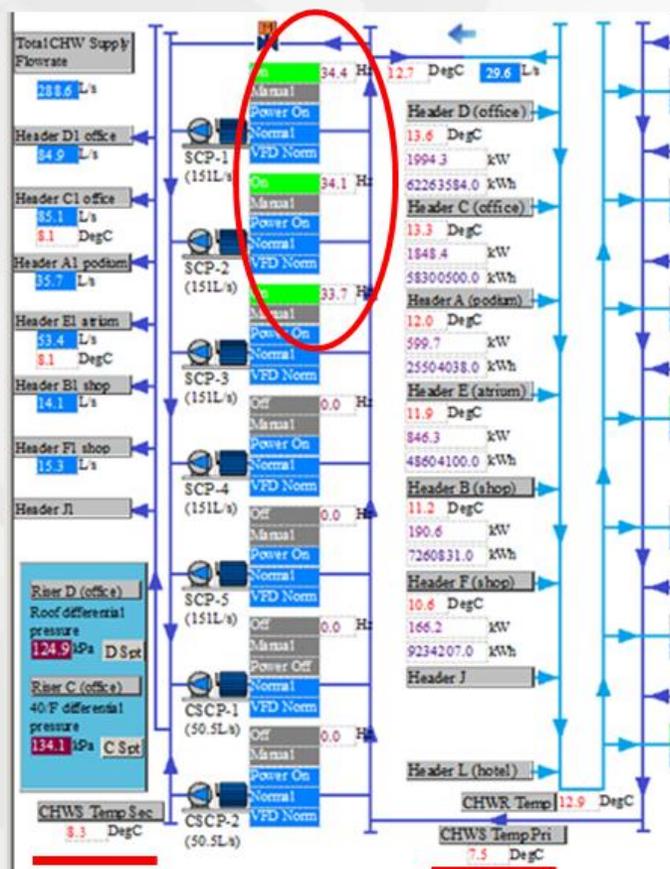
二次侧回水与一次侧掺混，导致实际供水温度过高，本质是二次侧流量大于一次侧。



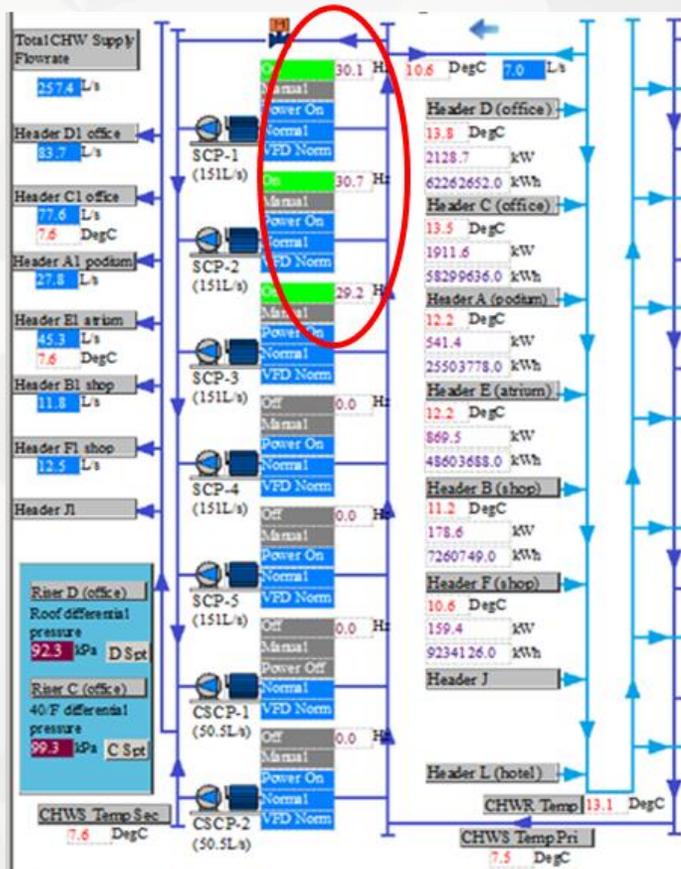
2.2 运行中消除混水的措施：二次侧降频匹配一次侧流量

- 调适前：次级泵3台34Hz运行，旁通水量24.6L/s，一次侧供水温度7.5°C，二次侧供水温度8.3°C，温升达0.8K；
- 调整次级泵频率直至30Hz，使得一二次侧供水温度一致，二次侧供水温度最终稳定在7.6°C；
- 由于调整后供水温度为7.5°C，师傅将冷机设定供水温度提高至7.8°C，**不仅降低水泵电耗，还能提高冷机COP；**

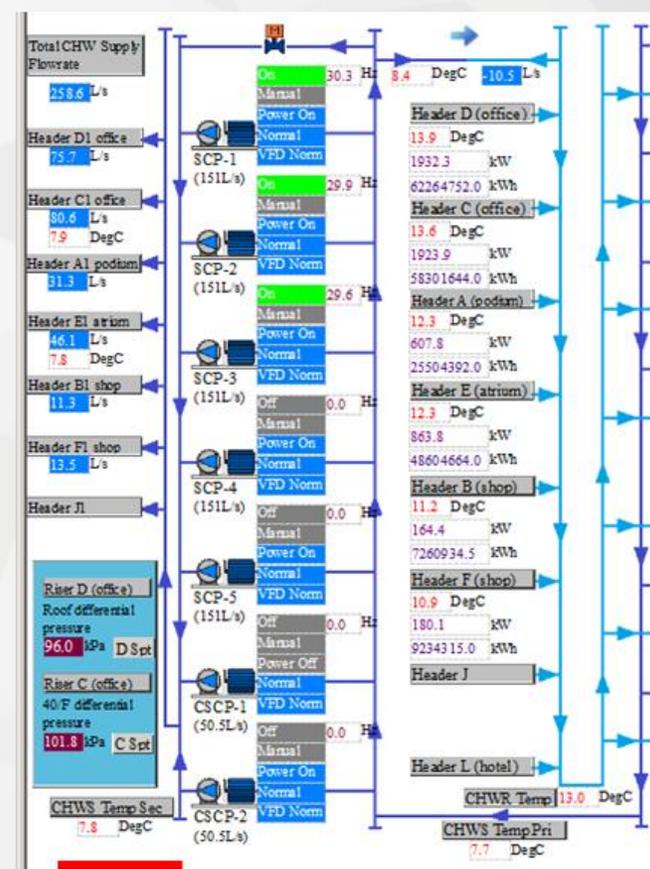
调试前



调试后



提高冷机出水温度



■ 关键点1：需要明确水泵工作性能曲线及最佳工作点

内因

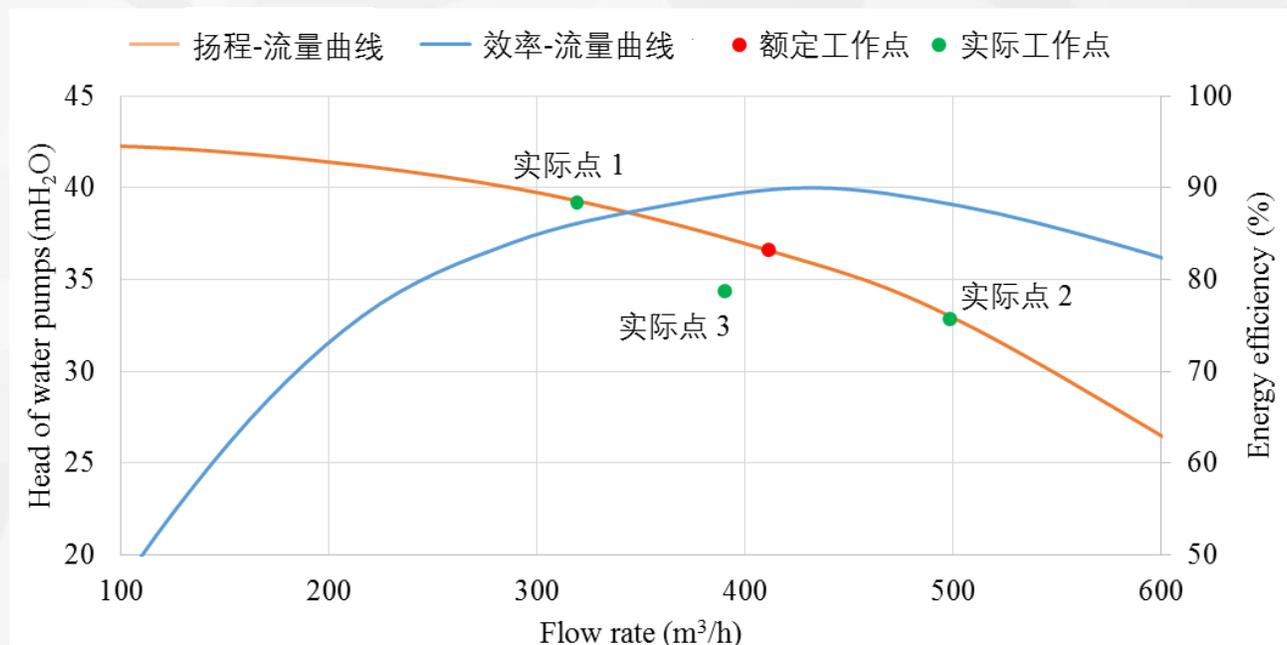
水泵自身效率合理（选型）

■ 评价指标与额定对标

$$\eta = \frac{G \cdot H \cdot g}{3600 \cdot W_{pump}}$$

$$G_{p,a} = \frac{F_r}{F_p} \cdot G_p ,$$

$$H_{p,a} = \left(\frac{F_r}{F_p} \right)^2 \cdot H_p ,$$

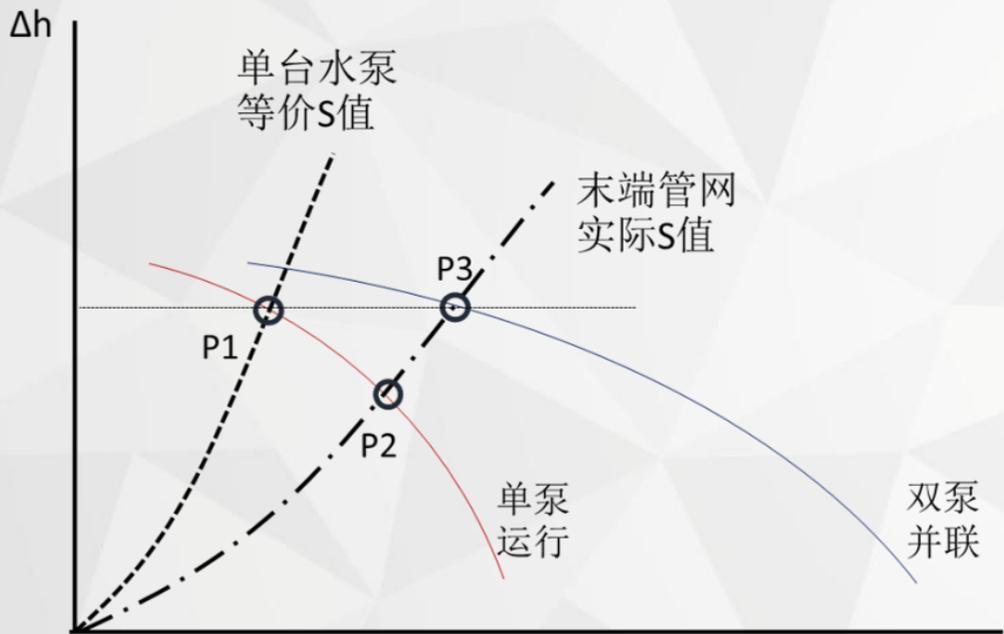


- 实际点1：末端阻力偏大导致工作点左偏，需排查不合理阻力以增加水泵流量，同时提高水泵效率；
- 实际点2：水泵扬程选型偏大导致工作点右偏，建议降频运行至设计流量，降低水泵电耗；
- 实际点3：水泵自身存在问题，导致工作点不在性能曲线上，需要厂家进行排查维护；

3.1 关键点：需要明确水泵并联运行，工作点如何变化

18

- 传统设计、施工验收调试、设备样本参数，重点关注尖峰工况或者额定工况够不够（跳高思维）；
- 但空调系统在实际长期运行过程中更重要的在于多工况高效运行（跳远思维），重点在变；



- 水泵实际运行工作点由自身性能曲线与管网阻力系数共同决定，
- 水泵并联运行，单台水泵实际工作点左偏，对应等价阻力系数增大；
- 根据末端实际阻力系数以及水泵高效区对应的阻力系数上下限来判断需要开启水泵的台数；
- 对于工作点右偏的水泵，建议多台低频运行，使得每台水泵的工作点左偏，进而回到高效区；
- 对于工作点已经左偏的水泵，建议尽可能减少水泵开启台数，使得每台运行水泵的工作点向右偏移，回到高效区；

$$H_1 = S_1 \times G_1^2,$$

$$H_2 = S_2 \times G_2^2,$$

$$H_3 = S_2 \times G_3^2,$$

$$H_1 = H_3, G_3 = 2 \times G_1$$

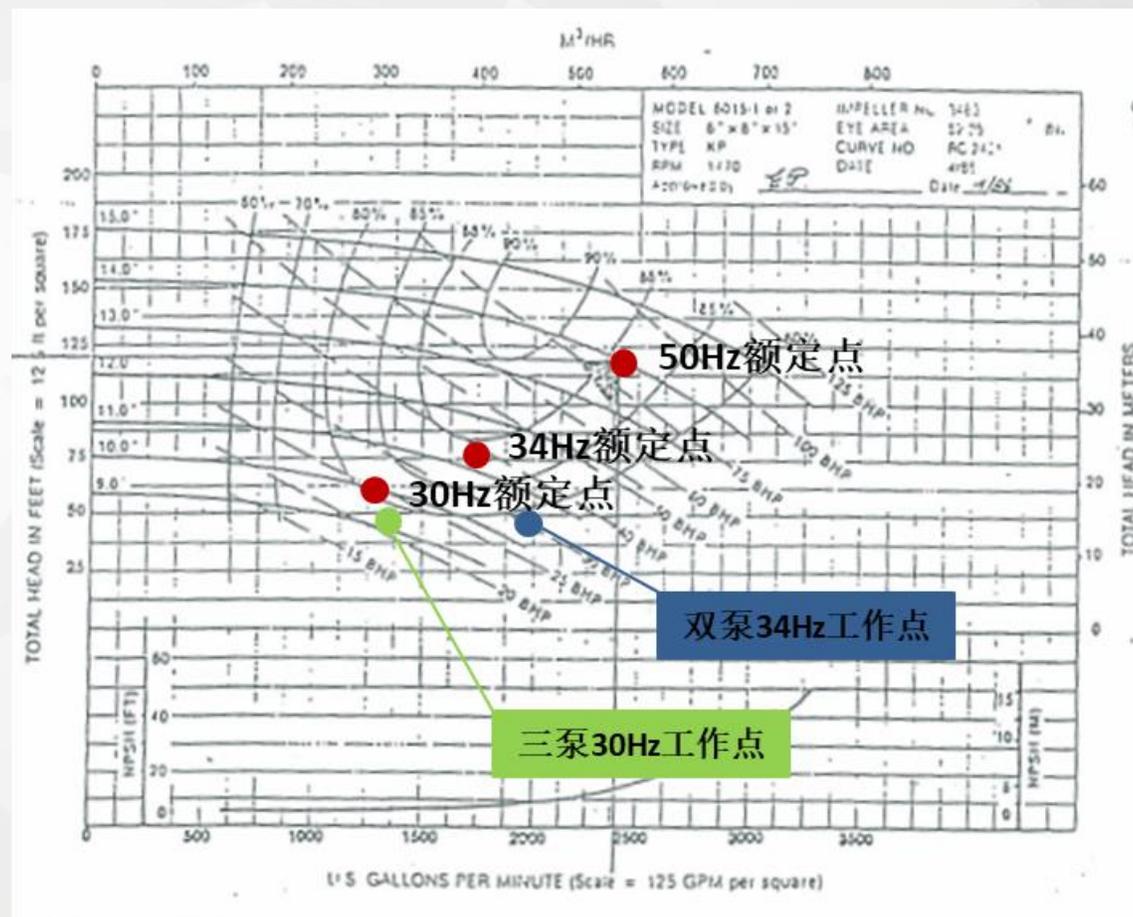
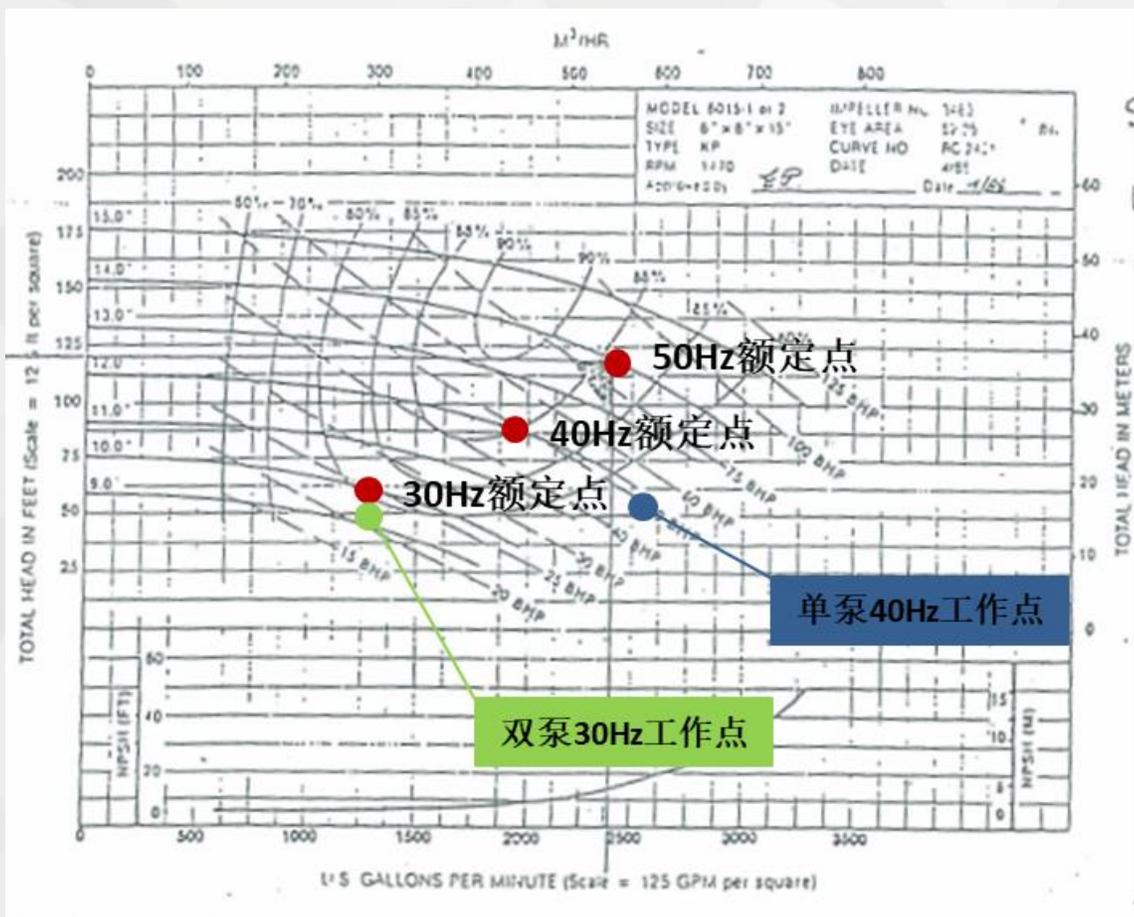
$$S_1 = \frac{H_1}{G_1^2} = \frac{4 \times H_3}{G_3^2} = 4 \times S_2,$$

3.2 节能的原因：多台水泵并联时，将“右偏”的工作点“推回来”

19

- 原因：原有水泵往往扬程过大，工作点右偏，并联降频后靠近额定工作点，效率高

$$WTF = \frac{Q_c}{W} = \frac{C * m * \Delta t}{\frac{m * g * h}{\eta}} = \frac{C * \Delta t * \eta}{g * h}, \text{ 效率提高, 扬程降低, 能效比提高}$$



▶ 3.3 效果验证：水泵工作点回到高效区，实现明显节能效益

20

▶ 运行中的实验验证：

一次侧：4、6#大冷机开启，并开启对应初级冷冻泵

二次侧：开启2、4#次级冷冻泵，频率36Hz

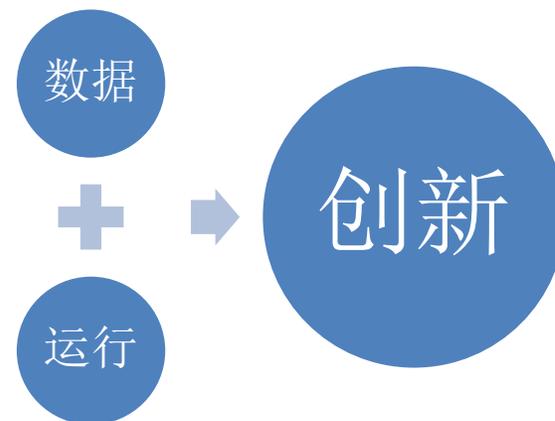
具体操作：

将2台次级泵36Hz运行更改为3台次级泵30Hz运行

实施效果：

水泵方案	扬程 m	流量 m ³ /h	功率 kW	效率 %	供冷量 kW	WTF_{SCP} -	WTF_{ch} -	节能率 %
2台泵 36Hz	16.5m	891.7	57.0	70.2	4717.9	82.8	43.6	27.2
3台泵 30Hz	14.5m	843.5	41.5	76.9	4472.7	103.3	48.8	

冷站监控面板显示：末端压差下降，回水温度未超过控制要求（室内无投诉）。



思考

越是复杂的设备、“新技术”，往往越需要“数据”帮助，而且需要更加“细致”的数据，才能把“好技术用好”，实现真正的节能减排效益！

运行数据驱动空调系统高效节能调控



谢谢

清华大学，邓杰文，博士
上海，2021年中国制冷展