

2024开放计算中国峰会

2024开放计算中国峰会

2024开放计算中国峰会

2024开放计算中国峰会

数据中心冷源和末端的高效协同优化研究

2024开放计算中国峰会

2024开放计算中国峰会

2024开放计算中国峰会

李震 清华大学

2024开放计算中国峰会

2024开放计算中国峰会

2024开放计算中国峰会

2024开放计算中国峰会

2024开放计算中国峰会

目录



散热环节的协同匹配

冷却系统协同运行

目录

散热环节的协同匹配

✓ 末端与热源协同匹配

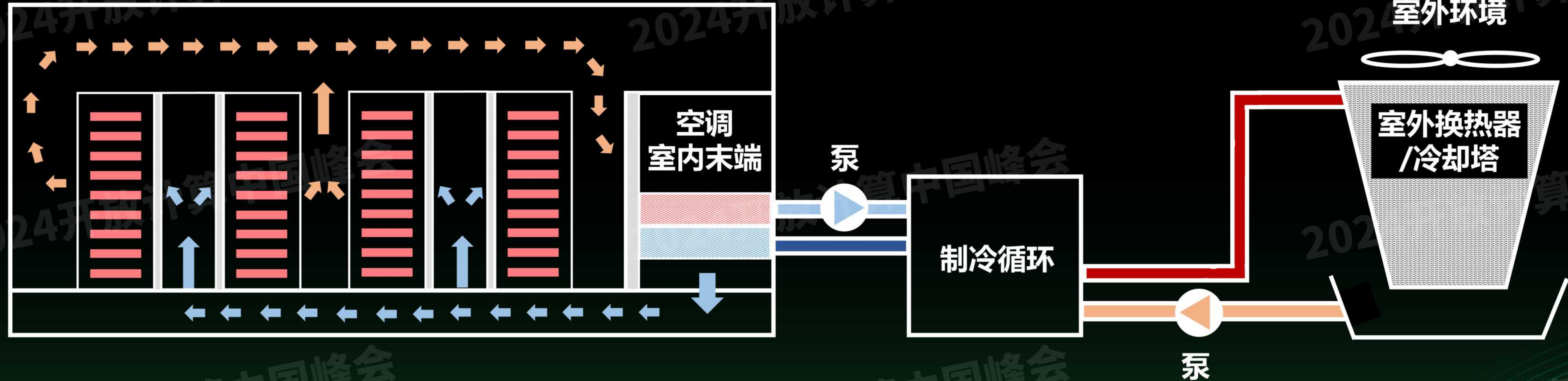
✓ 末端与冷源协同匹配

✓ 冷源与环境协同匹配



散热环节协同匹配

■ 数据中心典型冷却系统构成



✓ 末端与热源协同匹配

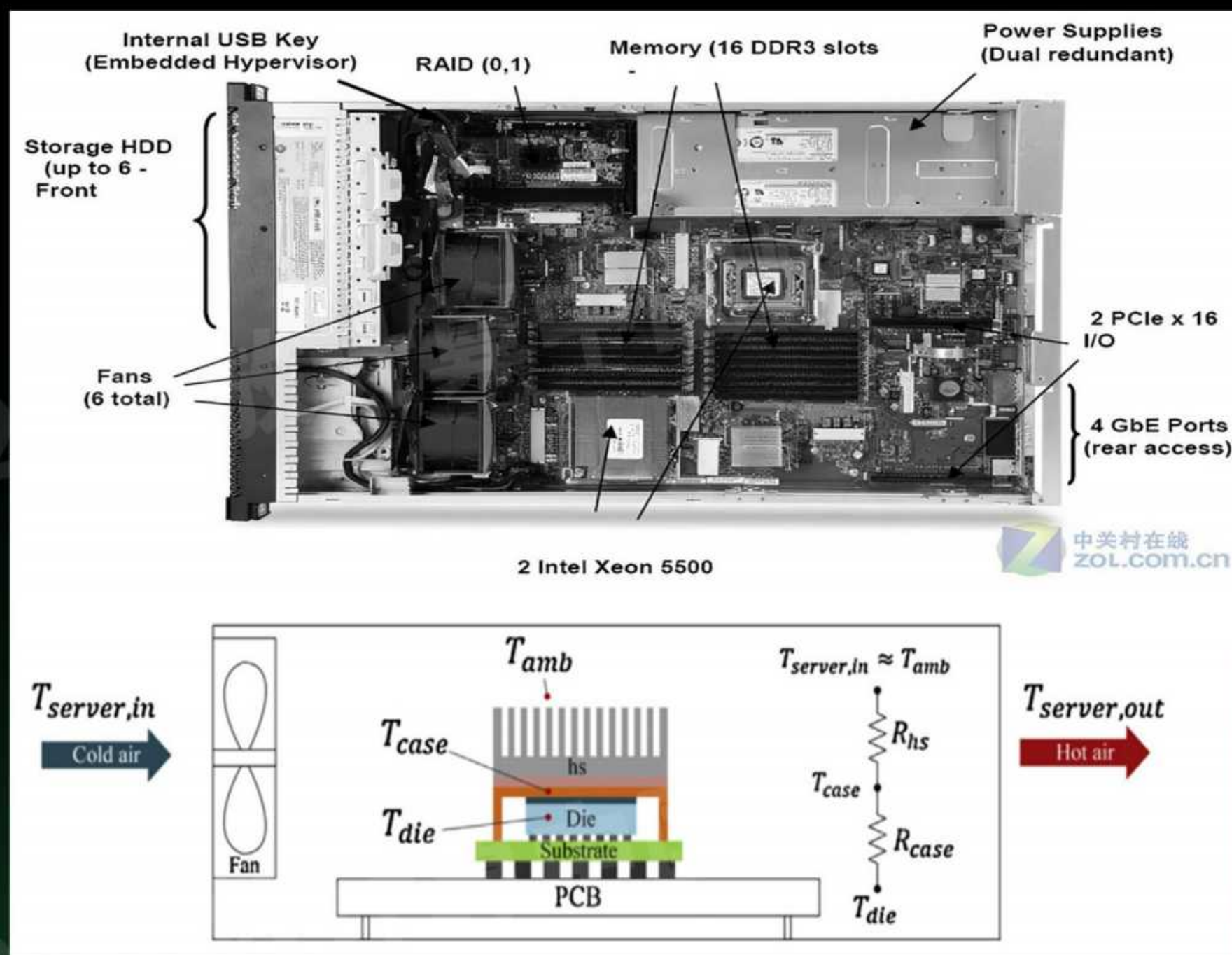
✓ 末端与冷源协同匹配

✓ 冷源与环境协同匹配

散热环节协同匹配

■ 末端与热源协同匹配

不同服务器工作负载类型对应的传热特性不同

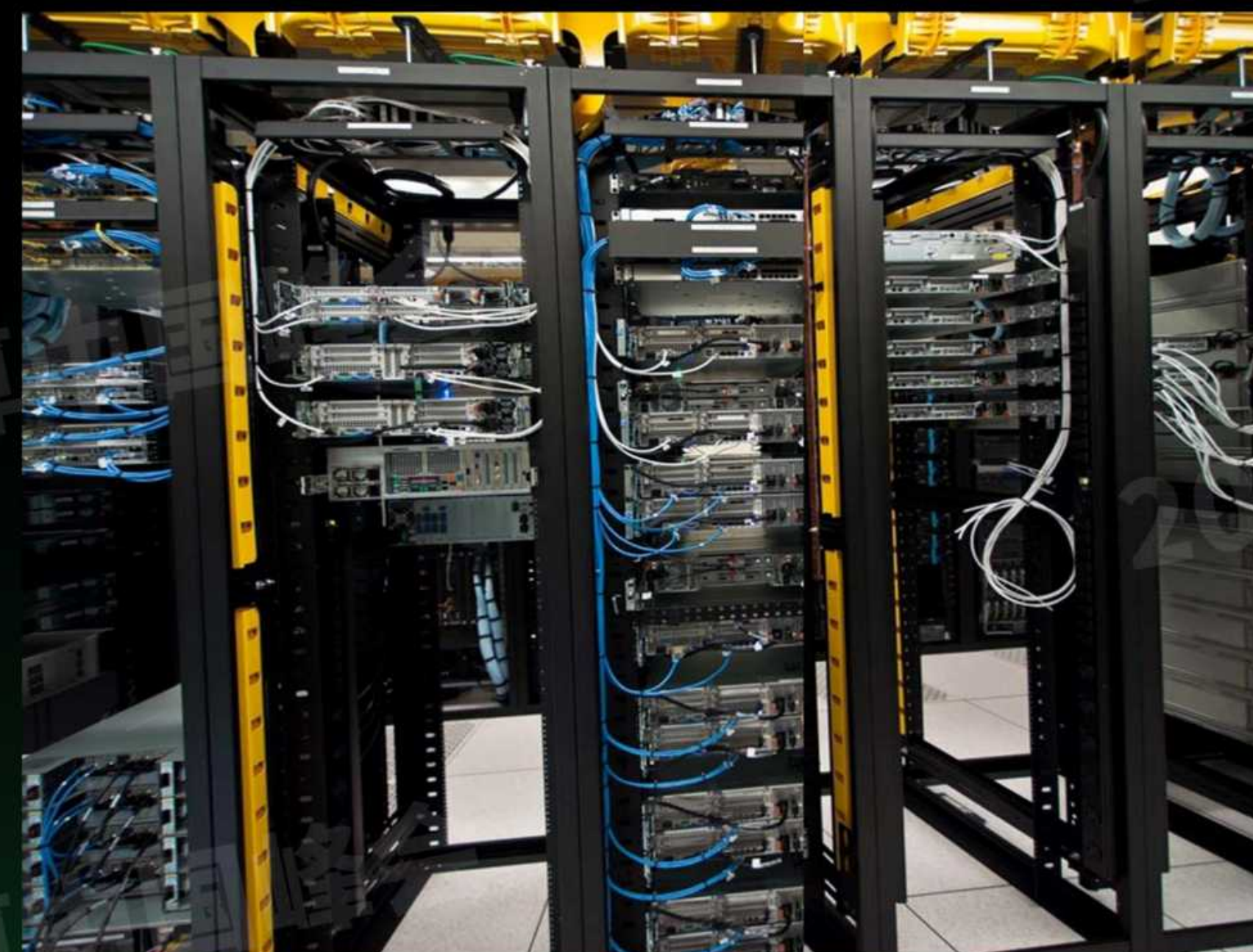
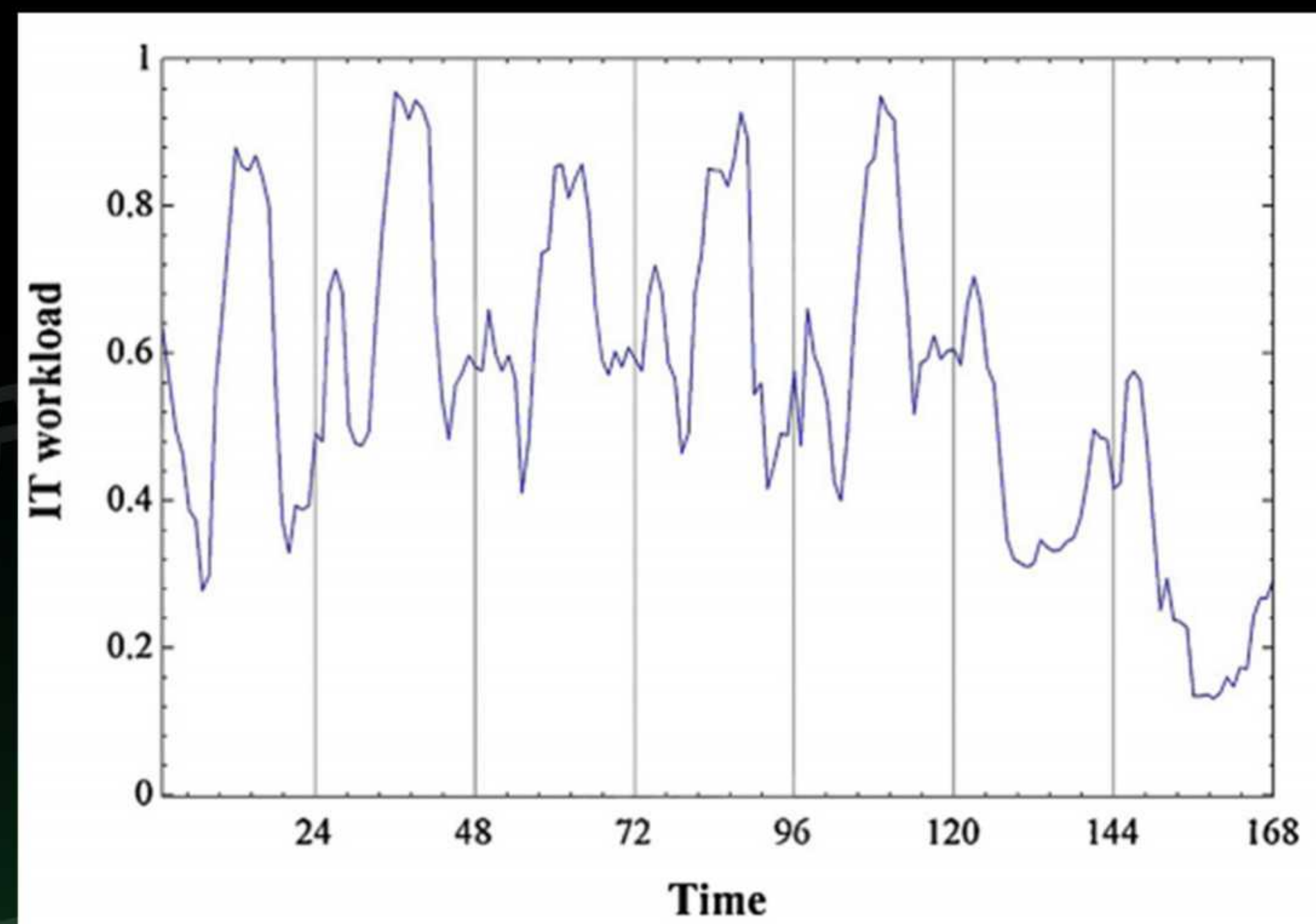


服务器工作负载类型	CPU	内存	I/O	硬盘
大数据分析、深度机器学习	高	中-高	中-高	中
政府、银行等管理、运营业务	中-高	中-高	中-高	中-高
云计算/互联网	中	中	中	低
通信/电信	中	中-低	中	低
存储	低	低	中	高

散热环节协同匹配

■ 末端与热源协同匹配

不同数据中心的服务器类型、运行模式、上架率、规模等不同，导致其冷负荷特征不同



散热环节协同匹配

■ 末端与热源协同匹配

数据中心常见室内末端类型

风冷室内末端

房间精密空调末端



列间空调末端



背板空调末端



液冷室内末端

冷板式液冷末端



浸没式液冷末端



风液协同室内末端

冷板式液冷末端
+
风冷末端

散热环节协同匹配

■ 末端与热源协同匹配

数据中心室内末端应与室内热源特征协同匹配

房间精密空调末端

- ✓ 成本低, 易维护
- ✓ 易出现区域热点
- ✓ 单机架**5kW**以下

列间空调末端

- ✓ 冷气均匀, 精准冷却
- ✓ 占据机柜位置
- ✓ 单机架**3-10kW**

背板空调末端

- ✓ 精准冷却, 节省空间
- ✓ 可能分液不均
- ✓ 单机架**6-50(75)kW**

冷板式液冷末端

- ✓ 局部冷却, 散热能力强
- ✓ 成本高, 难维护
- ✓ 单机架**20-70kW**
- ✓ 需配置辅助冷却

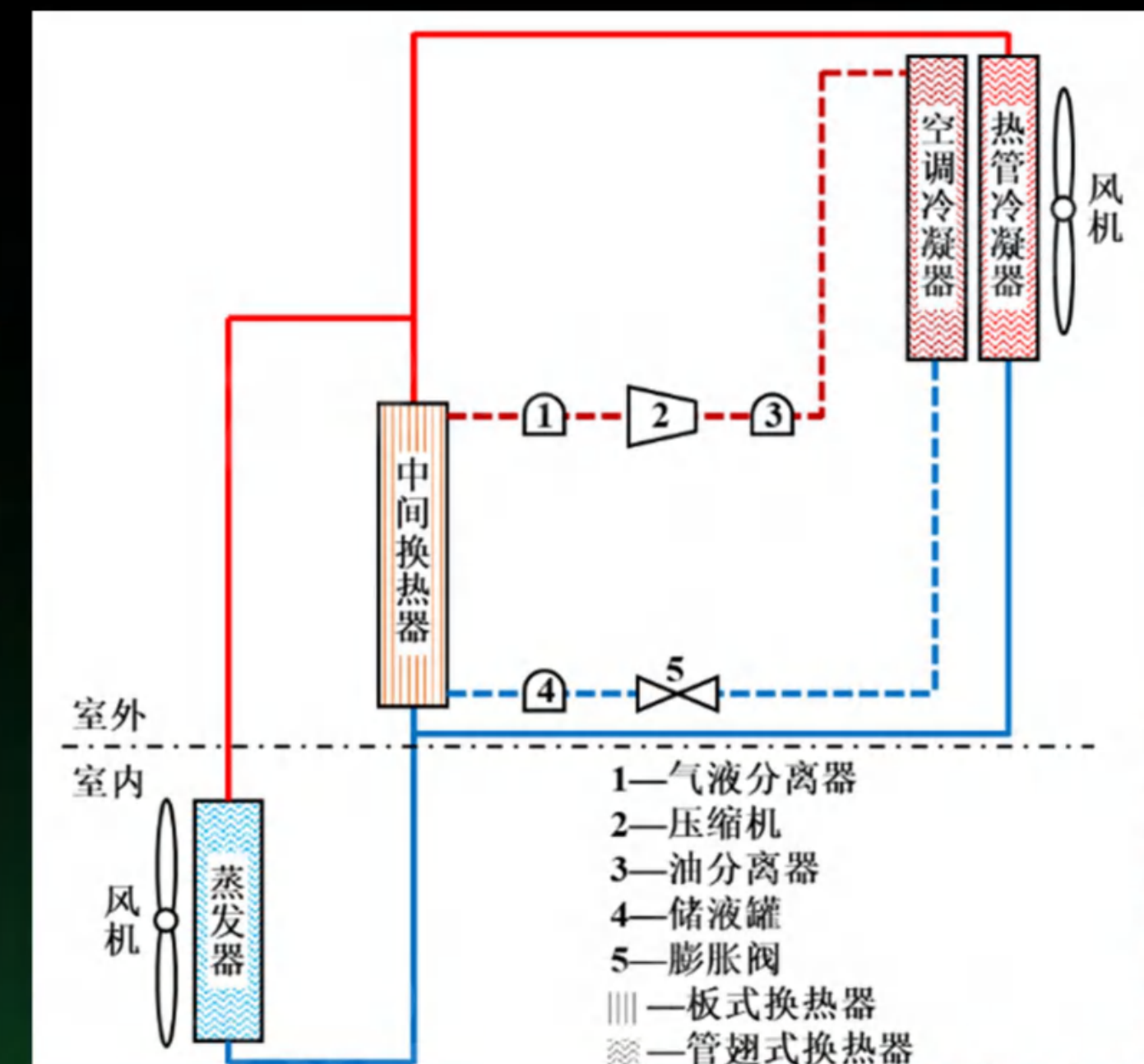
浸没式液冷末端

- ✓ 散热密度更高
- ✓ 成本高, 难维护
- ✓ 单机架大于**50kW**

散热环节协同匹配

■ 末端与冷源协同匹配

- ✓ 传统开式冷却塔耗水量大，对于水资源匮乏地区，应设计专用的节水冷却塔，或使用氟系统取代传统水系统进行冷却。
- ✓ 输配系统能耗主要为泵耗，对于有可利用高差的数据中心，可选用重力驱动的系统，取消氟泵的运行维护消耗。



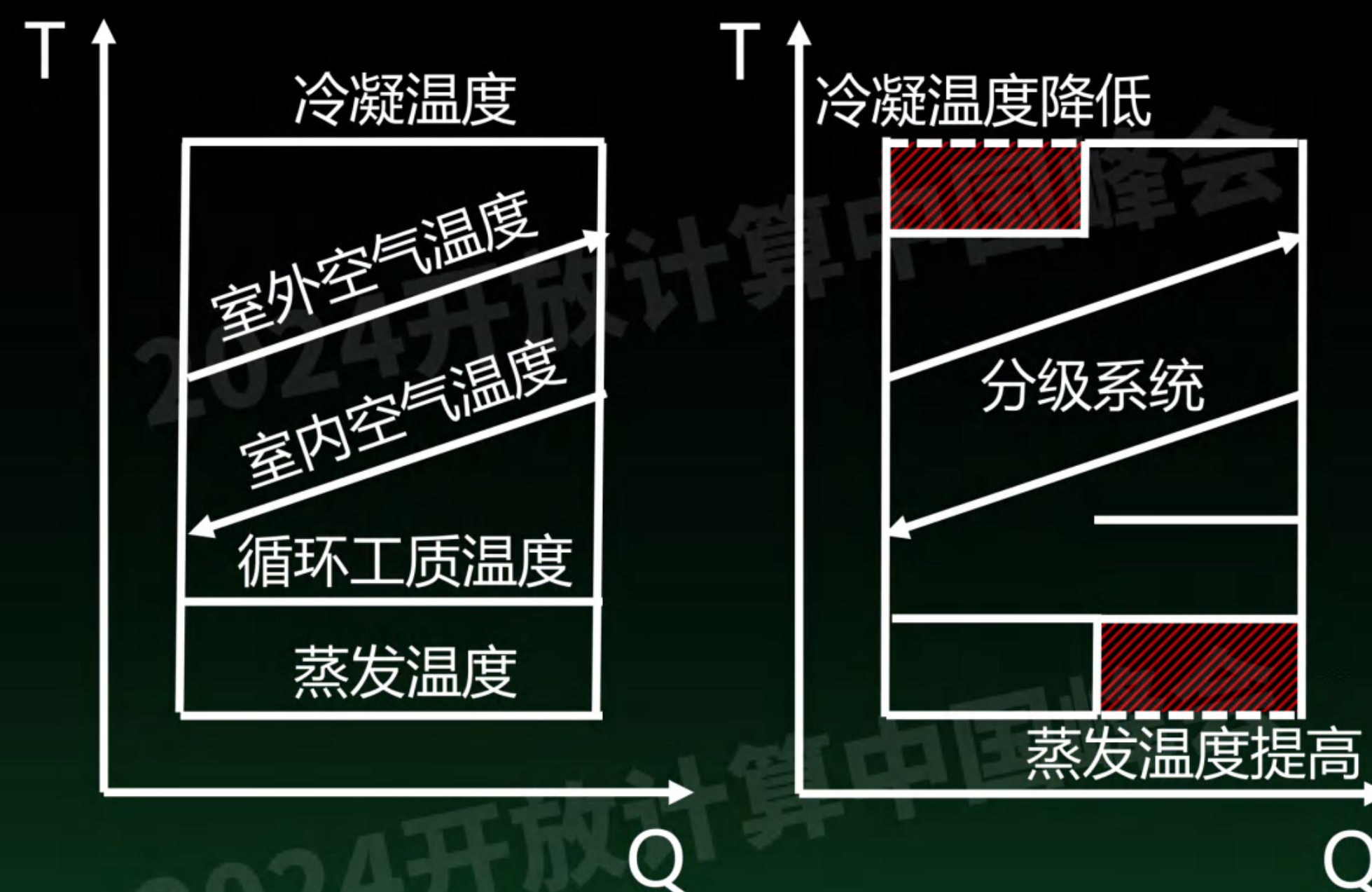
散热环节协同匹配

■ 末端与冷源协同匹配

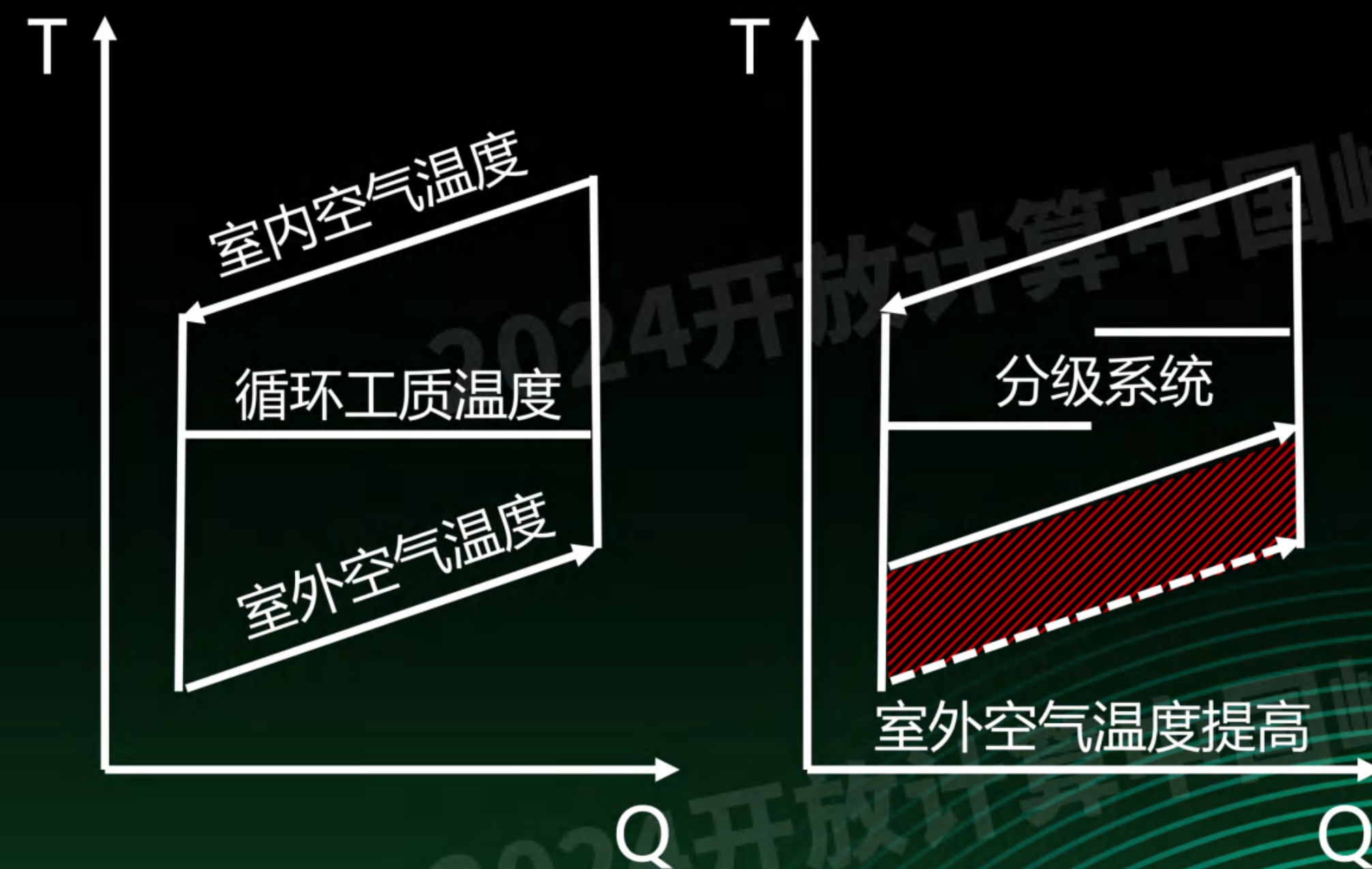
- ✓ 数据中心风冷系统服务器侧温升 **15°C左右**，而与其进行换热的相变换热器温度恒定，这就会不可避免的**出现不匹配温差损失**，即使换热面积无穷大系统在这个环节也会有15°C的换热温差。
- ✓ 如何在两相回路系统中**减少不匹配温差**是提高系统能效的关键。

使用分级系统前后系统T-Q图变化

机械制冷循环



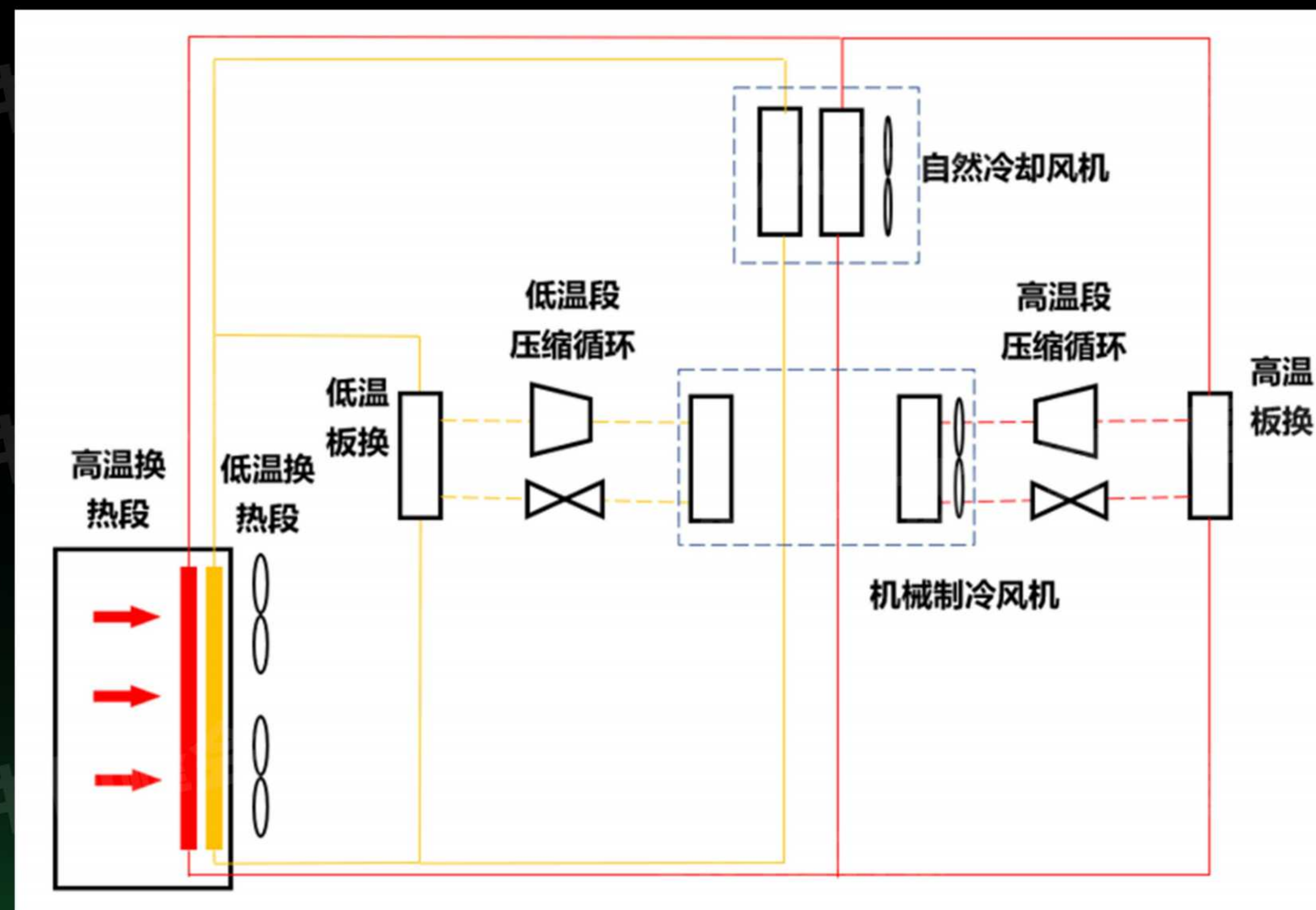
自然冷却循环



散热环节协同匹配

■ 末端与冷源协同匹配

- ✓ 将低温和高温段分开，压缩系统在不同的蒸发温度下运行，提高热传递过程的温度匹配度。
- ✓ 分级前 $CLF_{Beijing,ave} = 0.121$ ，分级后 $CLF_{Beijing,ave} = 0.085$

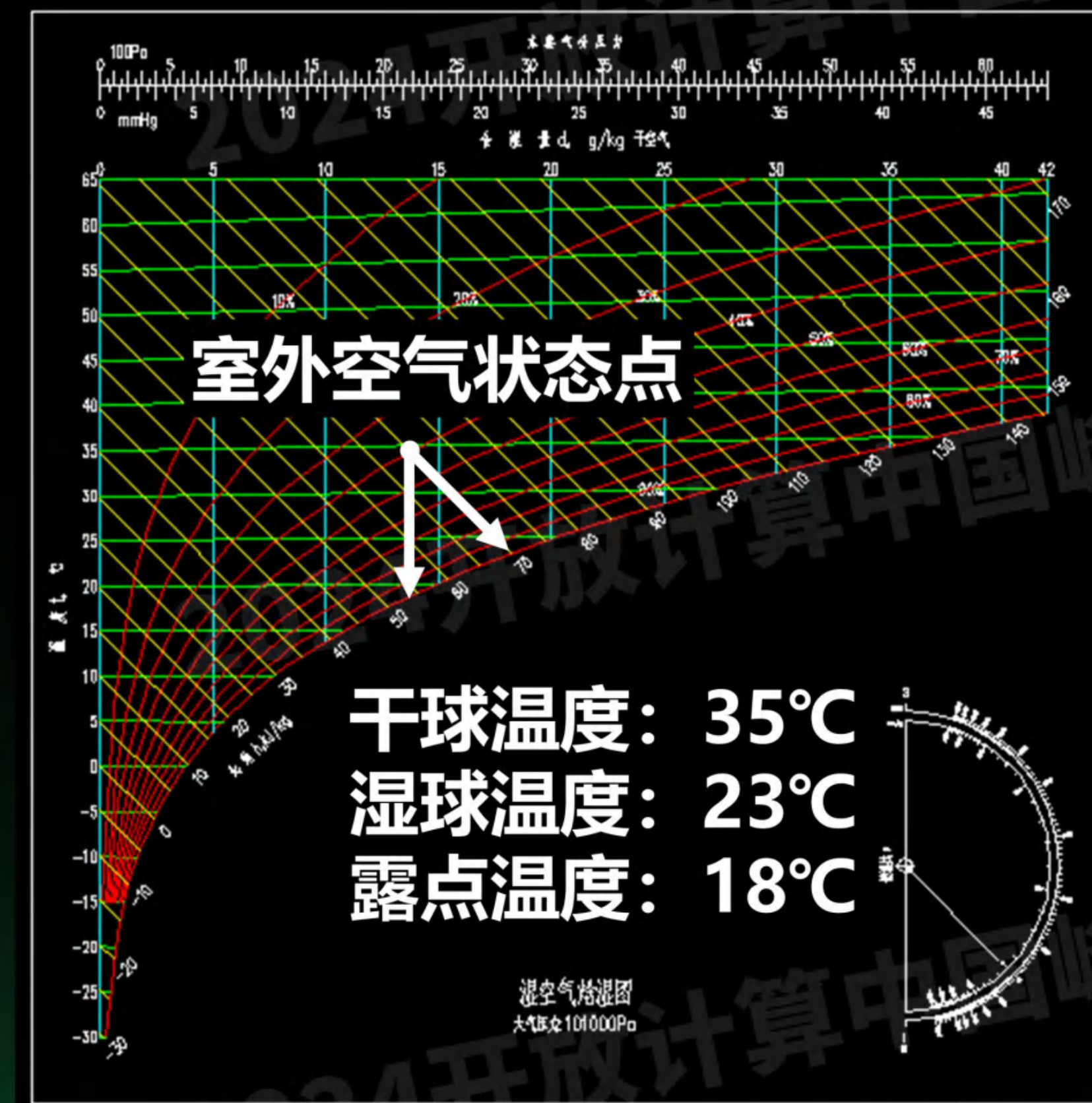
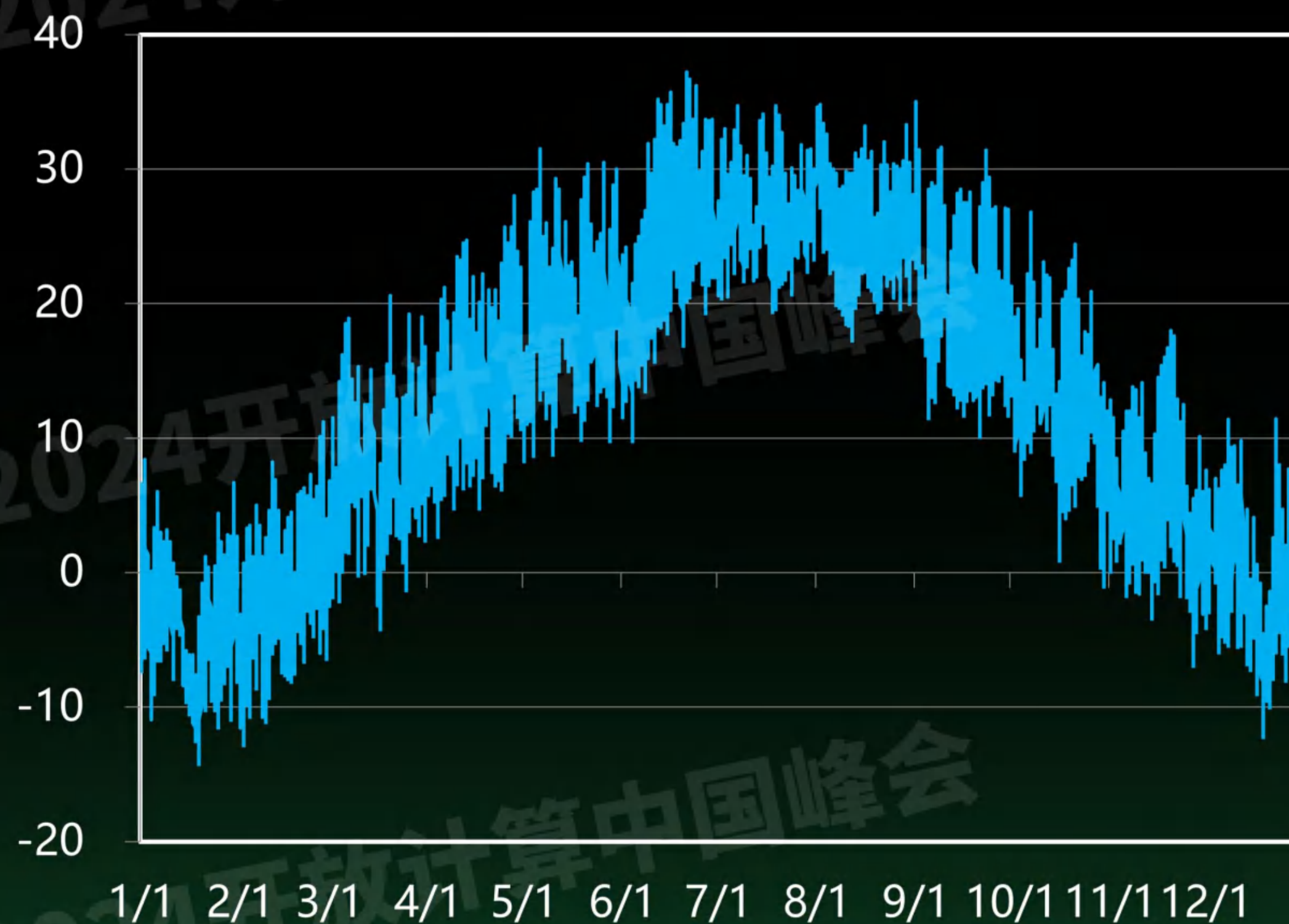


散热环节协同匹配

■ 冷源与环境协同匹配



北京逐时干球温度 (°C)



散热环节协同匹配

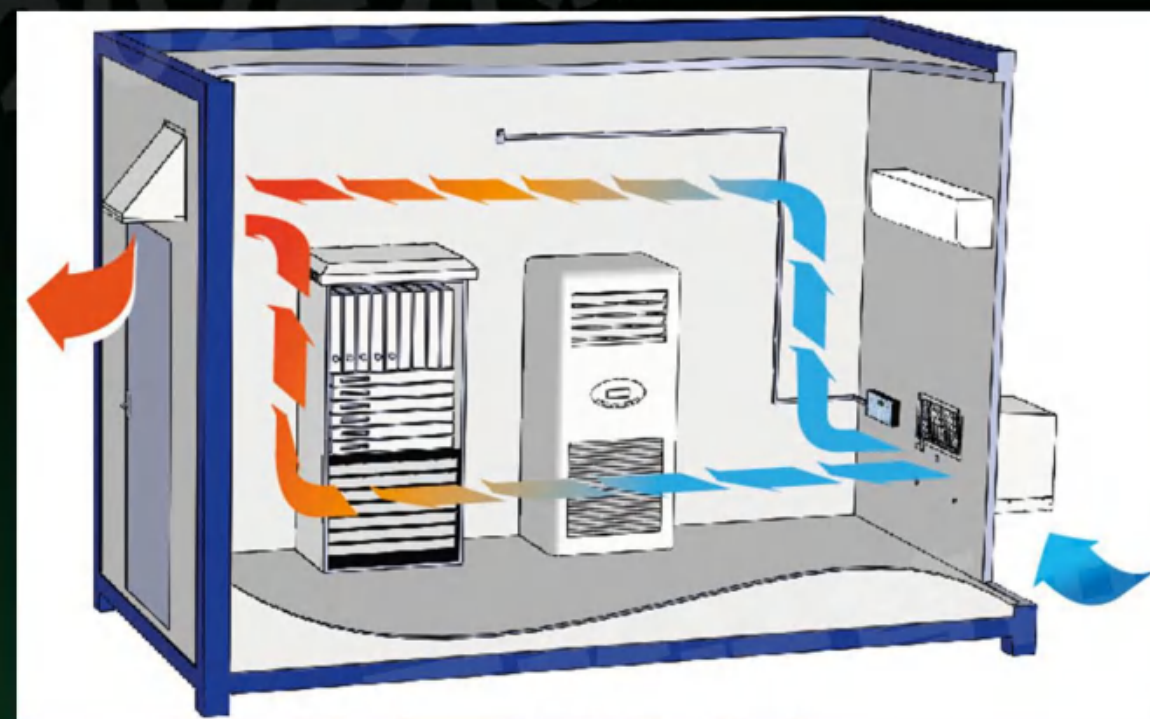
■ 冷源与环境协同匹配

自然冷源利用手段

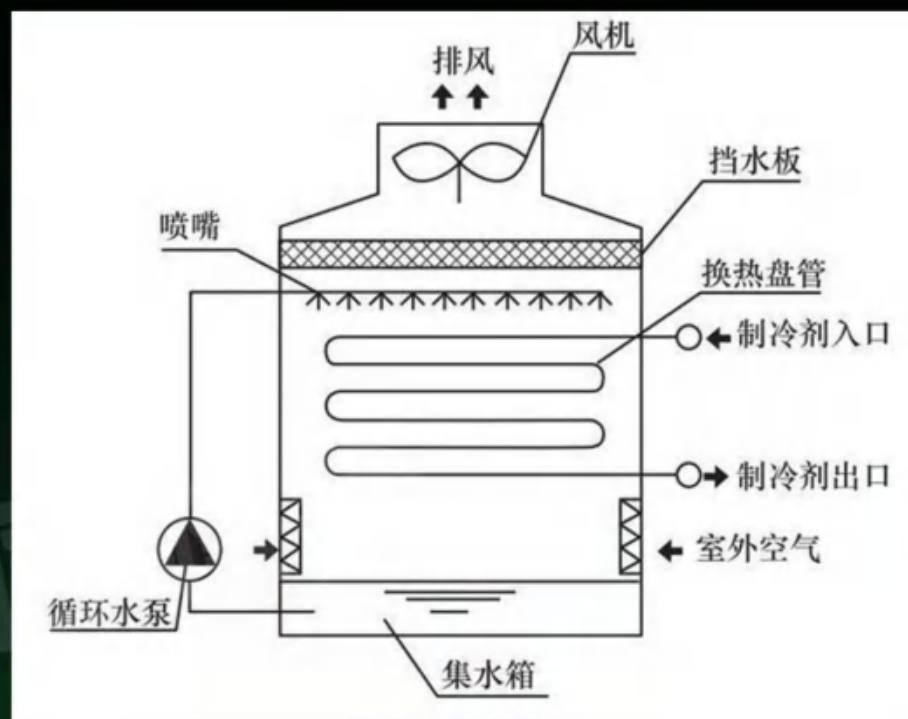
利用室外空气

利用其他冷源

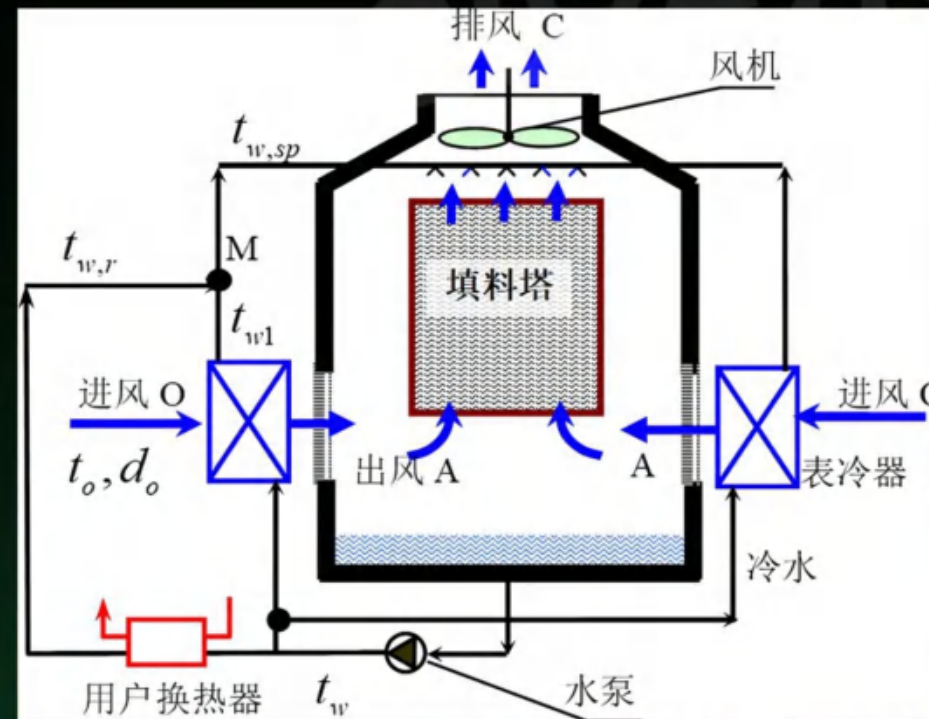
直接利用新风



直接蒸发冷却



间接蒸发冷却



利用低温空气



利用水库等低温水源



利用海底低温水源



散热环节协同匹配

■ 冷源与环境协同匹配

直接蒸发冷却

- ✓ 成本低，易维护，北方需解决防冻。
- ✓ 适合气候温暖干燥的地区，在高湿度环境中，效果会大打折扣。

间接蒸发冷却

- ✓ 成本适中，同地理位置可得更低温冷源。
- ✓ 适合气候干燥的地区，在高湿度环境效果会大打折扣。

利用冷风

- ✓ 成本适中，低能耗，依赖地理条件，建设周期长。
- ✓ 适用于平均气温低的地区。

利用水库水

- ✓ 成本适中，能耗低，稳定性高，依赖水源
- ✓ 适用于靠近水库或大型水体的地区。

利用海底水

- ✓ 成本高，难维护，能效高，冷源温度低。
- ✓ 适合于沿海有洁净海域的地区。

目录

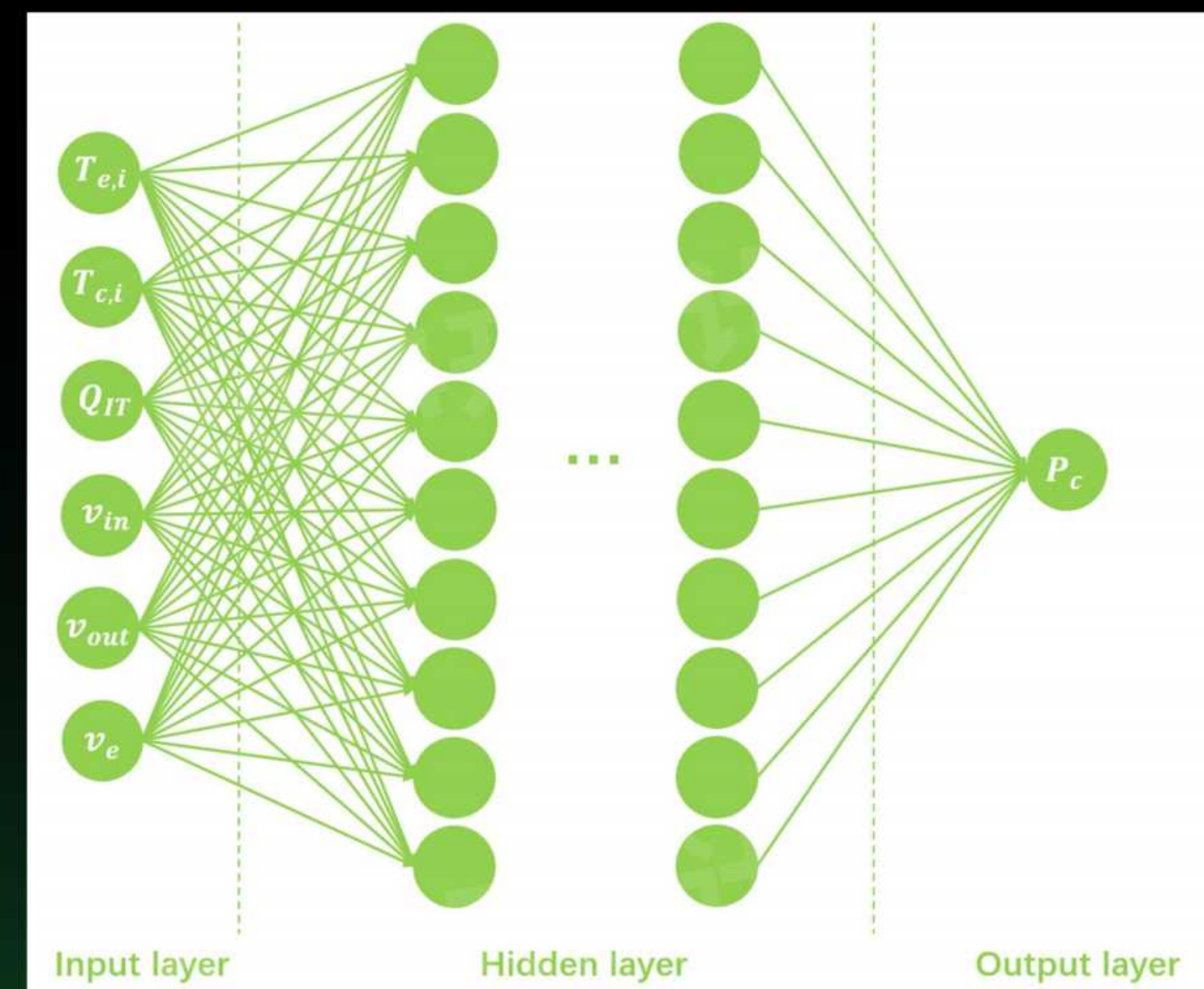
冷却系统协同运行

- ✓ 系统运行与环境协同
- ✓ 同类设备协同运行
- ✓ 不同设备协同运行

冷却系统协同运行

■ 系统运行与环境协同

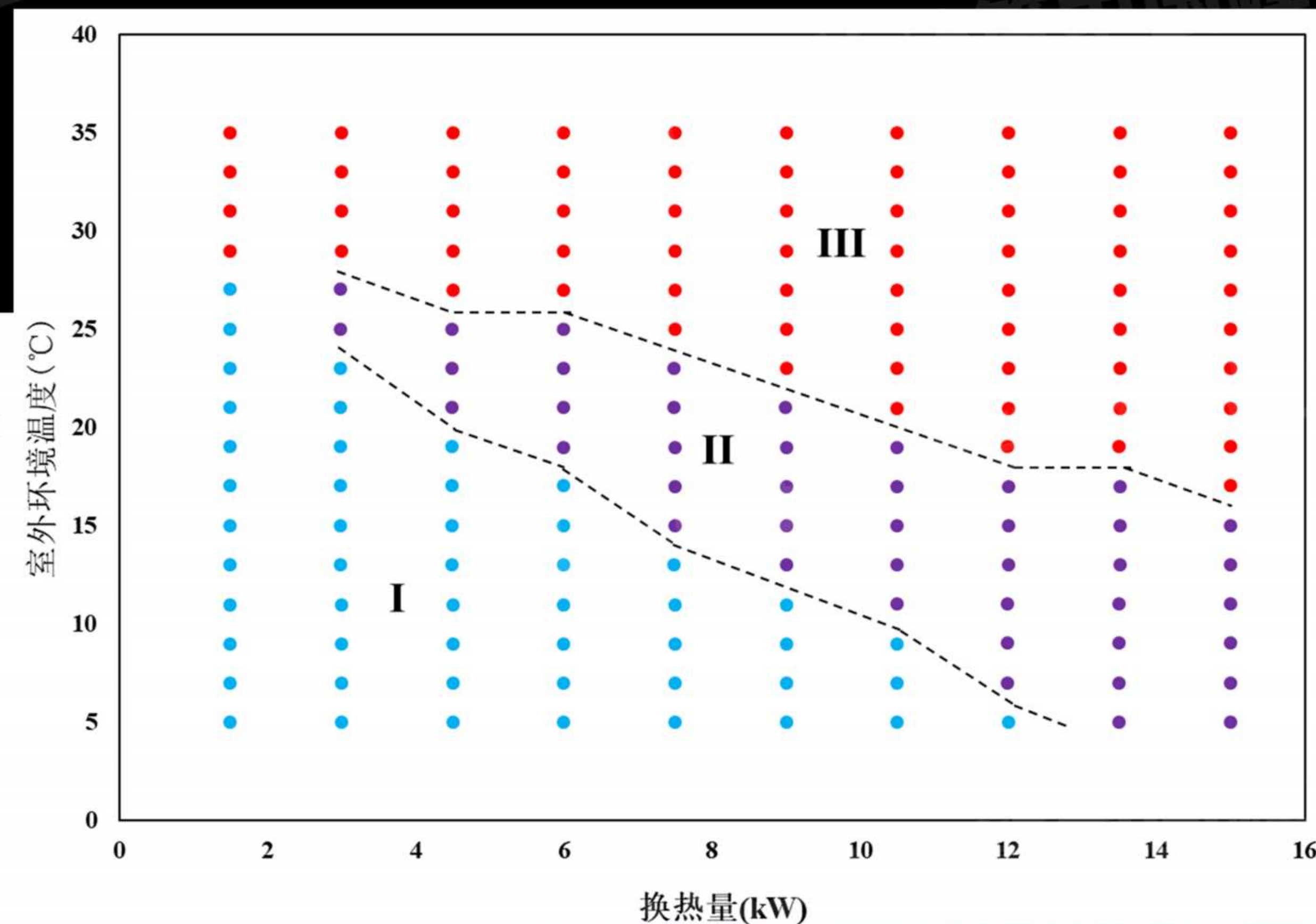
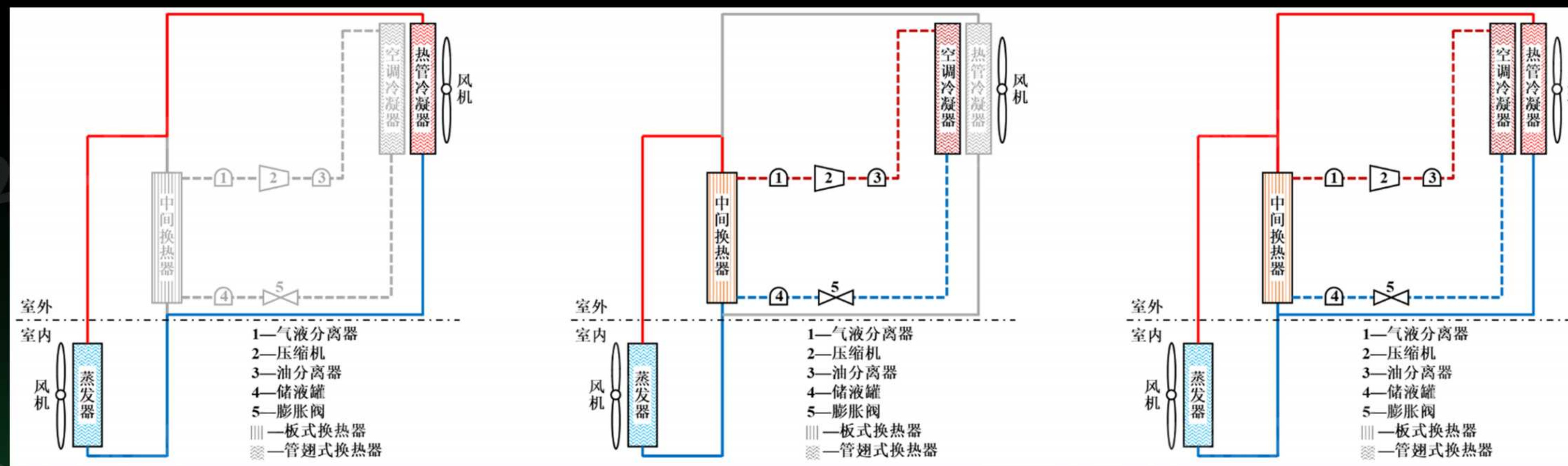
部署先进的**动环监控系统**，实时跟踪数据中心内部和外部的温度、湿度能耗数据，结合机器学习等手段对系统运行状态进行**预测**，根据预测结果对系统进行实时调整优化。



冷却系统协同运行

■ 系统运行与环境协同

对于包含多种运行模式的冷却系统，需根据室外环境及室内复合的变化动态调整系统的工作模式，有限使用自然冷却，降低系统能耗。



冷却系统协同运行

■ 同类设备协同运行

- ✓ 对于中型及以上数据中心，往往存在多台**同种设备联合运行**的情况。
- ✓ **同种设备存在个体差异，同种设备摆放的相对位置不同。**
- ✓ 如多台冷机联合运行，只通过专家经验或物理模型难以直接厘清各冷机之间、介质流场之间存在复杂的耦合关系。
- ✓ 神经网络擅长拟合复杂的函数关系，可使用**神经网络**对多台冷机联合运行的冷机开启方案进行拟合寻优。

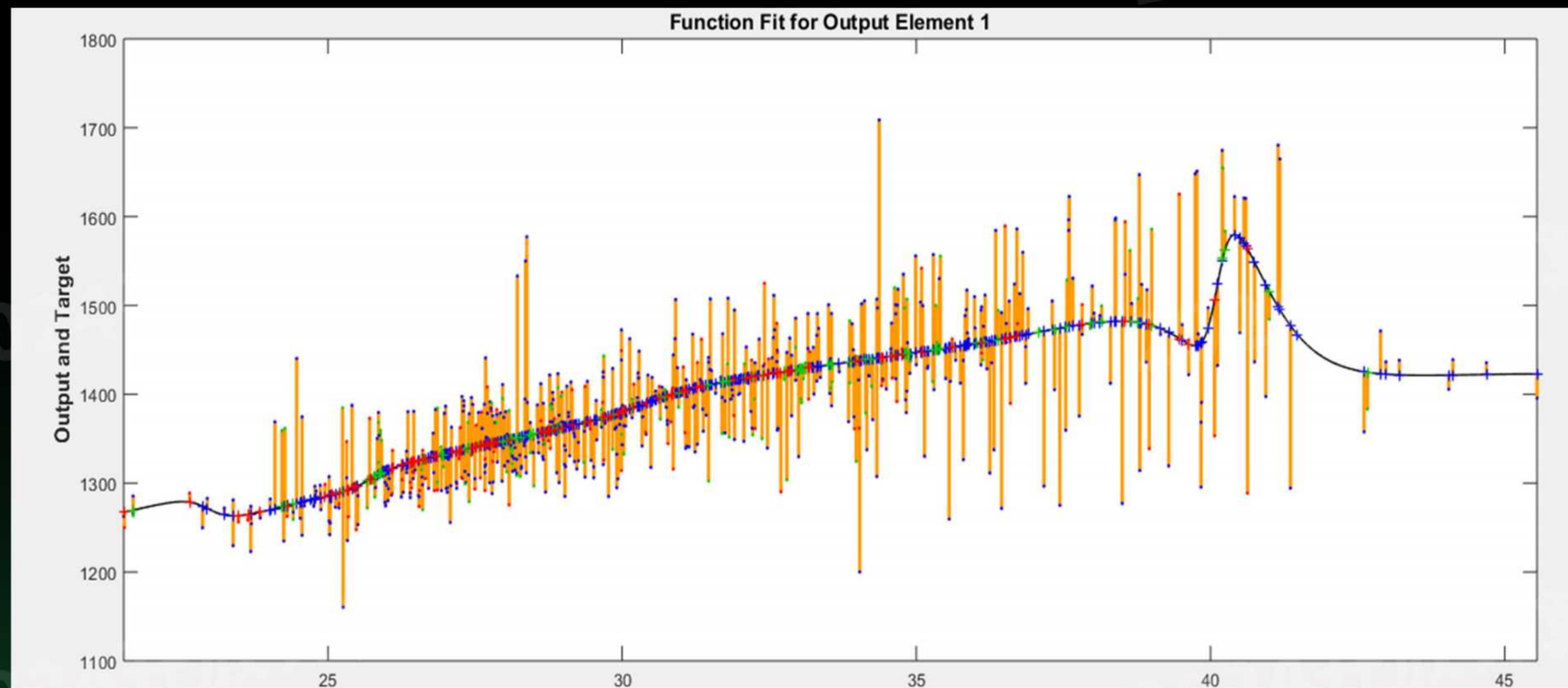


机房冷站系统形式示意图

冷却系统协同运行

■ 同类设备协同运行

使用神经网络拟合不同外部条件及不同冷机开启方案下的**平均PUE**

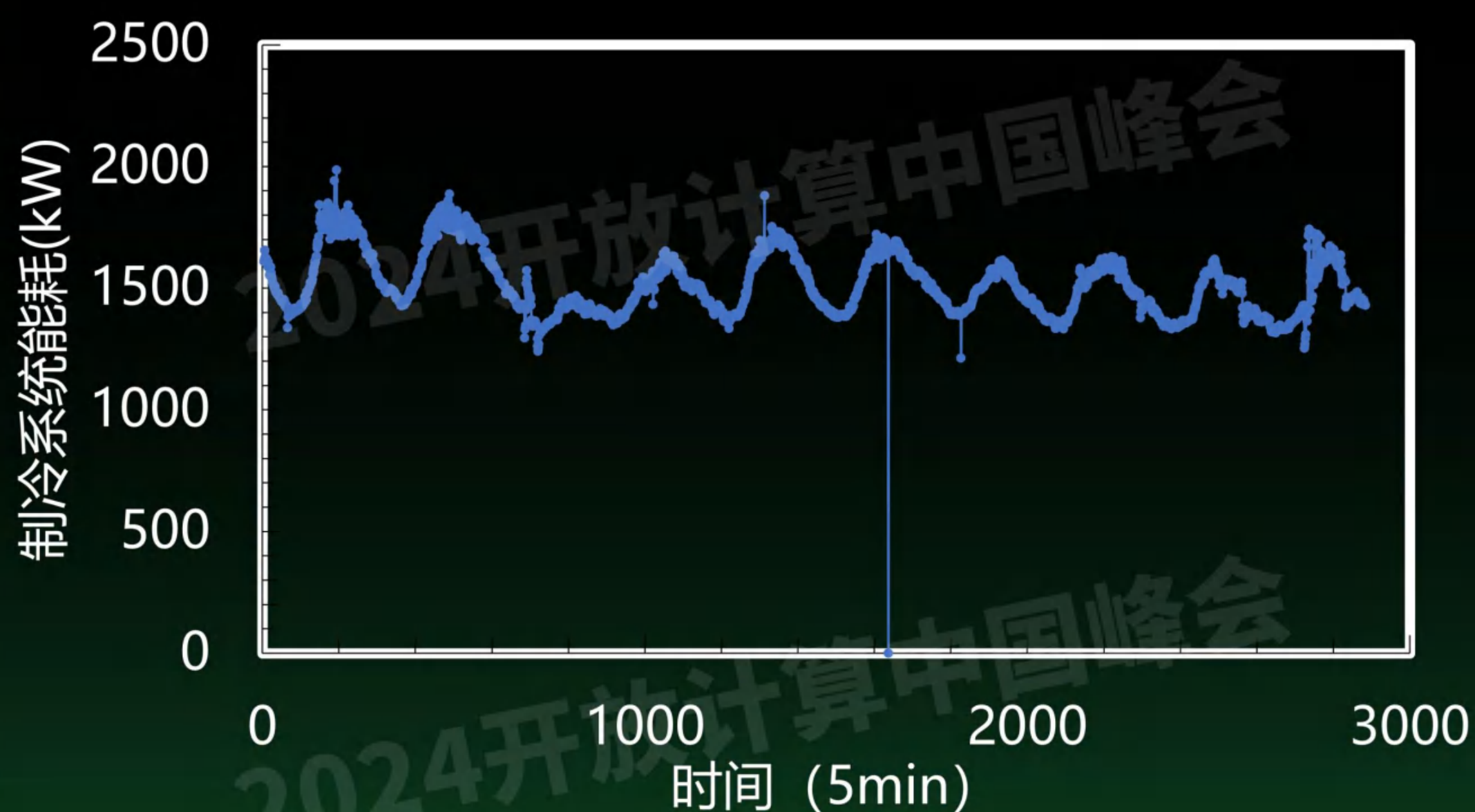


北侧冷机开启情况	南侧冷机开启情况	预测PUE
0 0 1 1 0	1 0 1 1 0	1.88
1 0 0 1 1	1 0 0 1 1	1.89
1 0 0 1 0	1 0 1 1 0	1.90
1 0 0 1 1	0 1 1 1 0	1.92
0 1 0 1 1	0 1 1 1 0	1.93
1 1 0 1 0	0 1 1 0 1	1.93
1 1 1 1 0	0 1 1 0 1	1.95

冷却系统协同运行

■ 同类设备协同运行

将拟合得到的最优方案并入动环监控平台，**调控冷机开启方案**，实际验证结果显示，优化前系统平均能耗为1546kW，优化后系统平均能耗为1476kW。

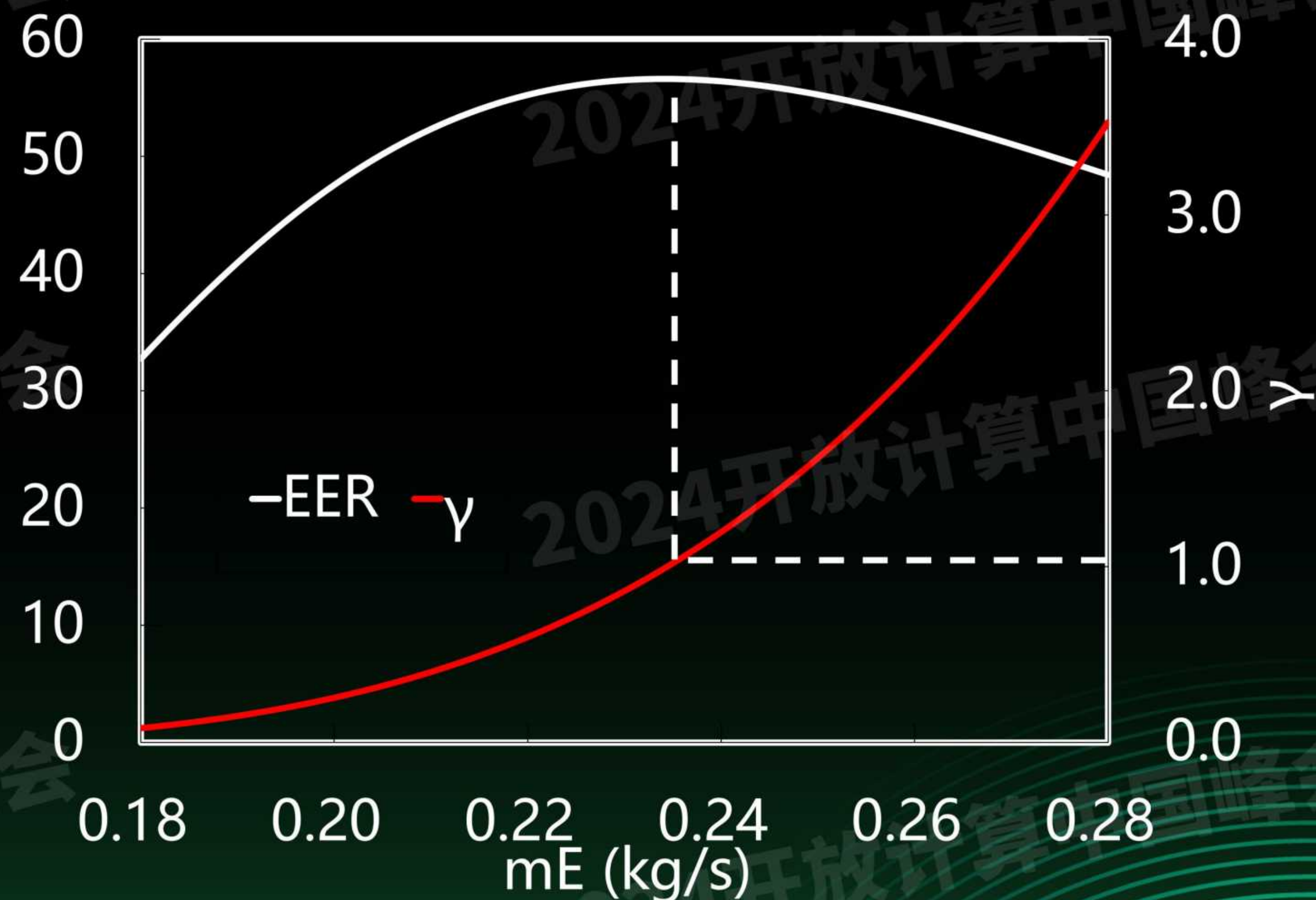
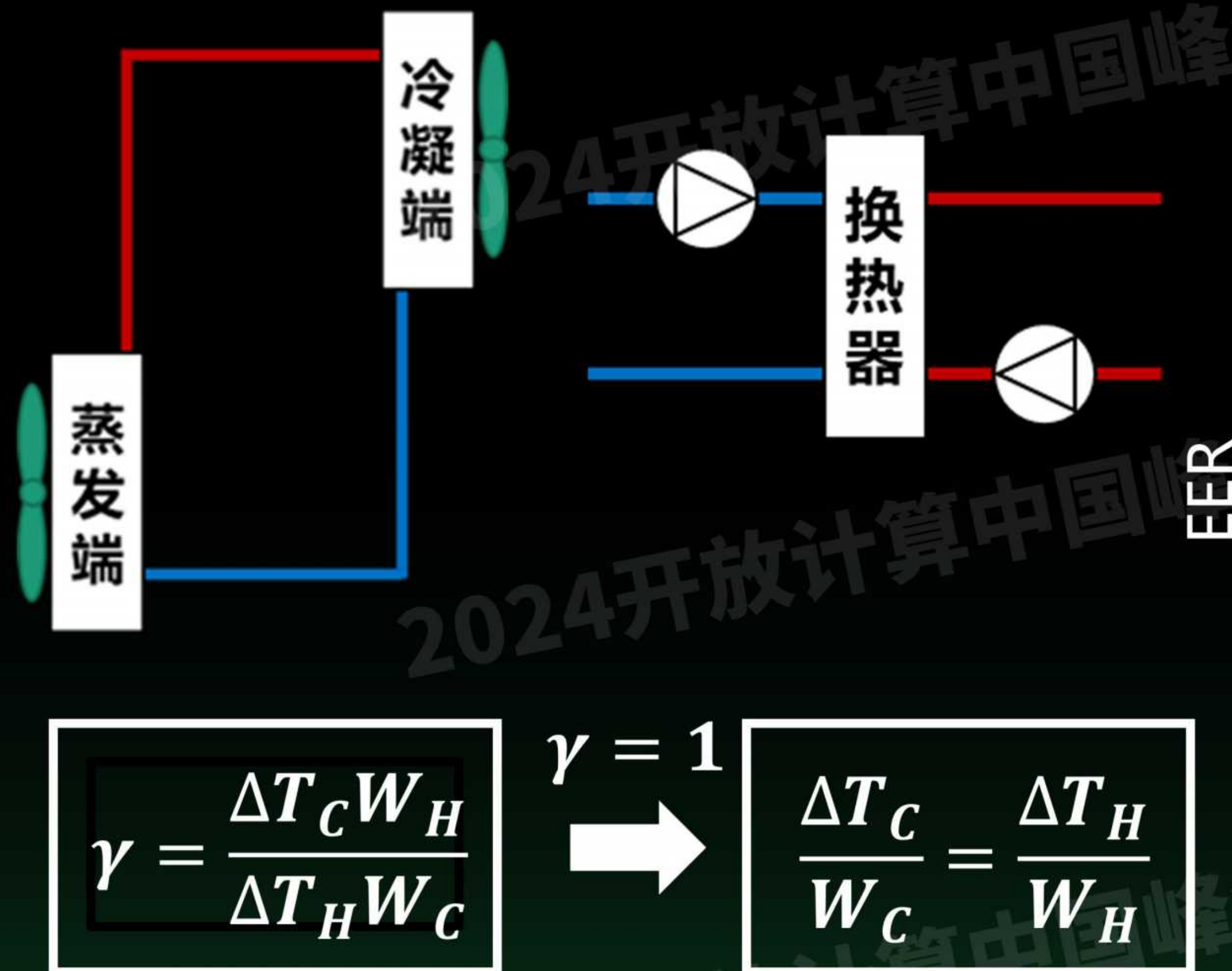


日期	Ta变化范围(℃)	RH变化范围(%)
5月24日	24-38	21-57
5月25日	24-40	27-49
5月26日	19-30	45-89
5月27日	19-32	14-44
5月28日	20-37	17-40
5月29日	23-38	17-40
5月30日	23-36	12-44
5月31日	20-37	10-26
6月1日	21-34	26-63
6月2日	21-36	33-50

冷却系统协同运行

■ 不同设备协同运行

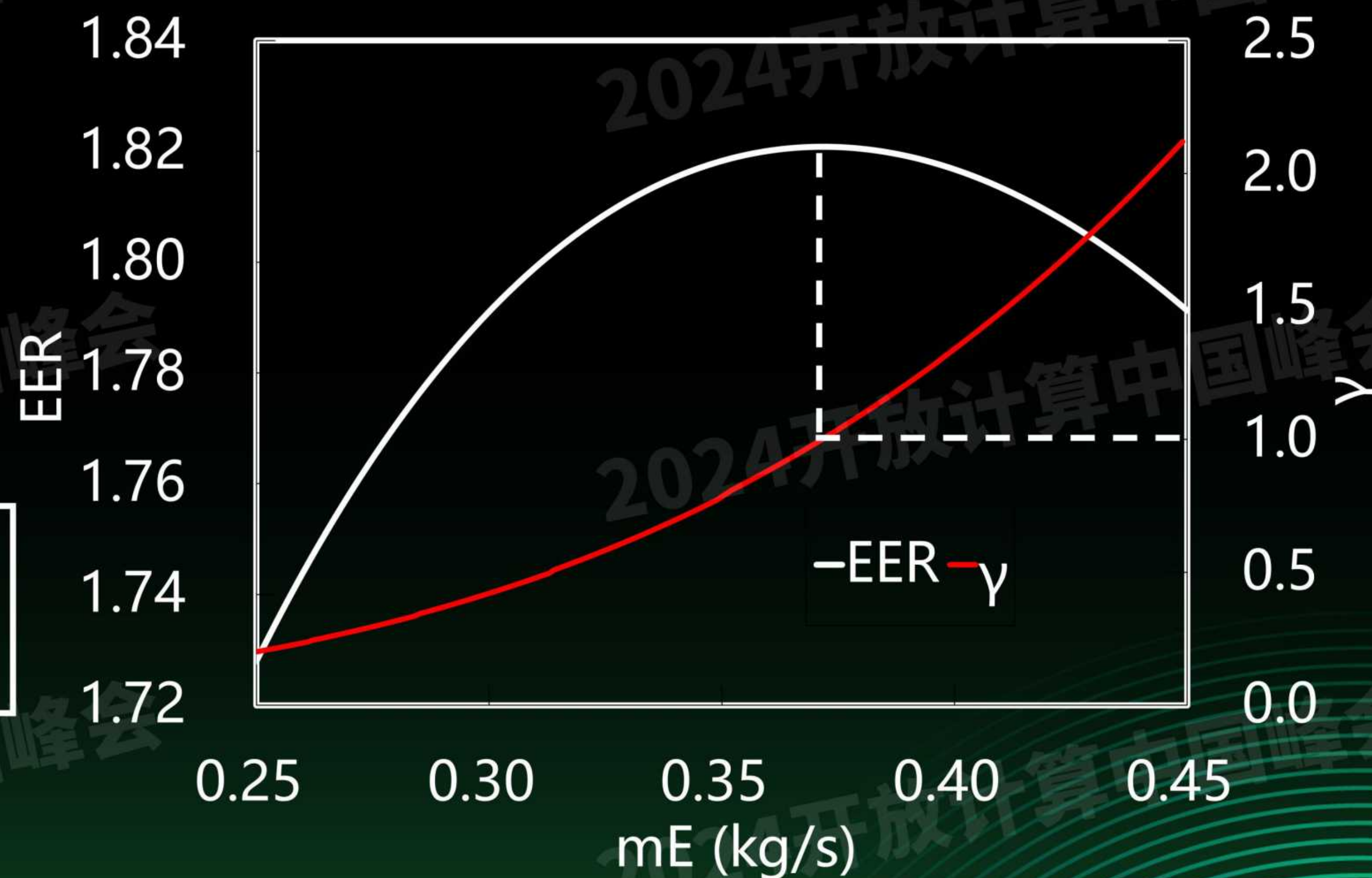
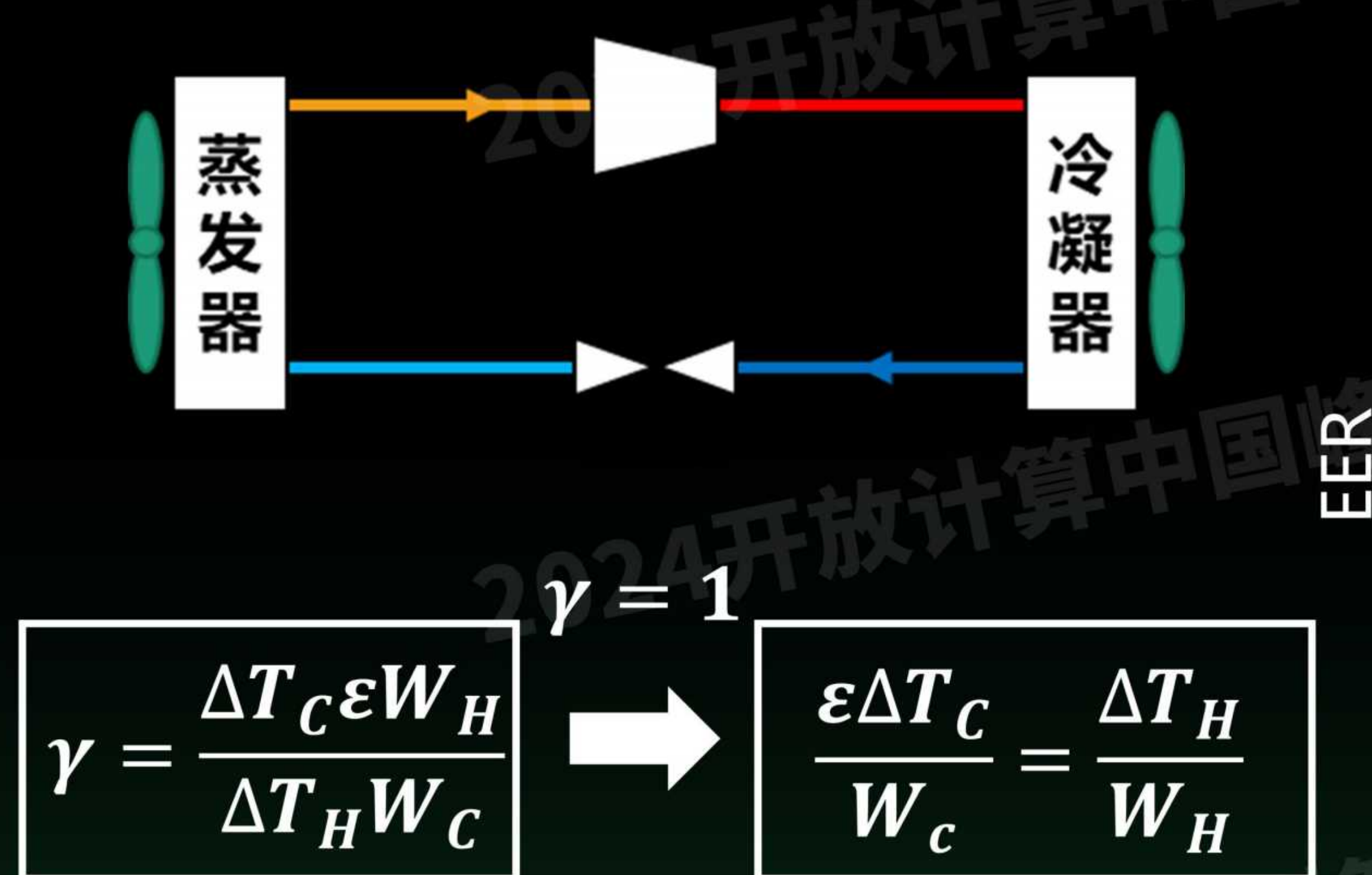
- ✓ 自然冷却模式下，仅包含风机/水泵驱动下的**热量交换过程**。
- ✓ 构建**拉格朗日泛函**，以系统能效最高为目标分析功耗与运行参数之间的协同关系，得到协同因子 γ ， $\gamma = 1$ 时系统能效最高。



冷却系统协同运行

■ 不同设备协同运行

- ✓ 蒸气压缩模式下，包含**换热过程与热功转换过程**。
- ✓ 结合风机能耗模型、压缩机能耗模型、换热器传热过程模型可建立系统总能耗模型。



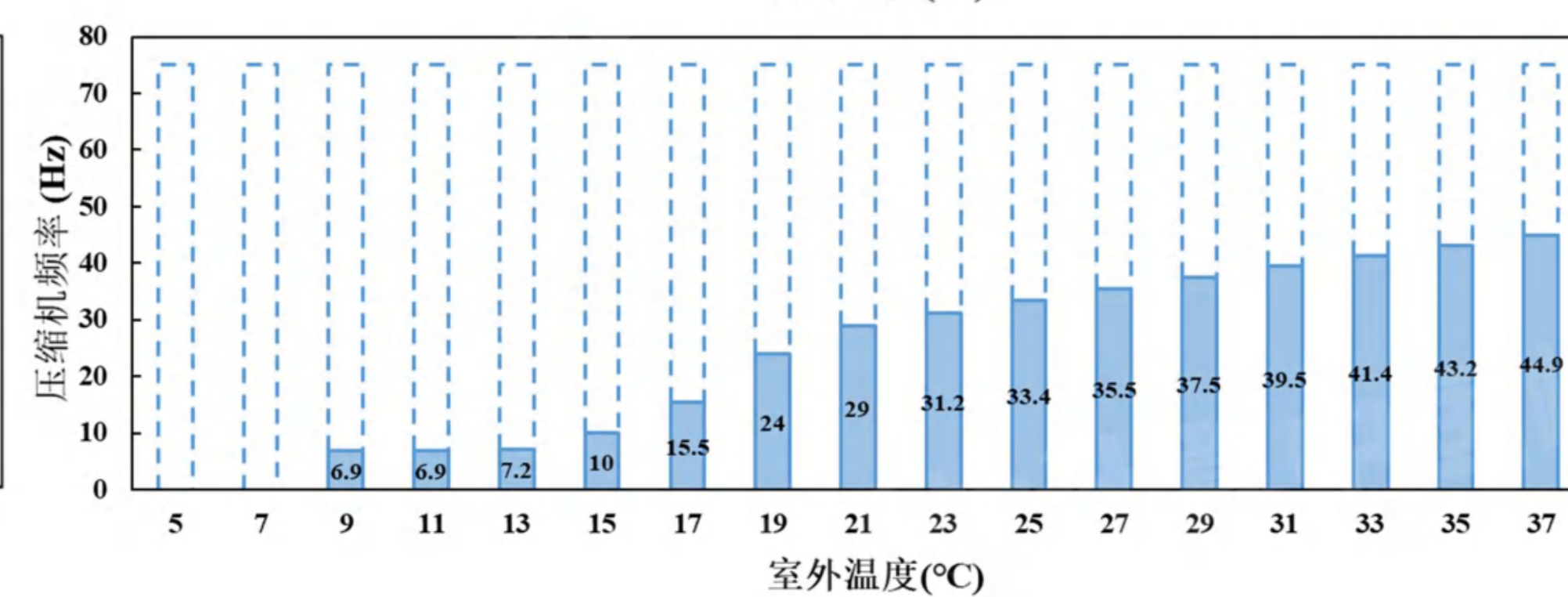
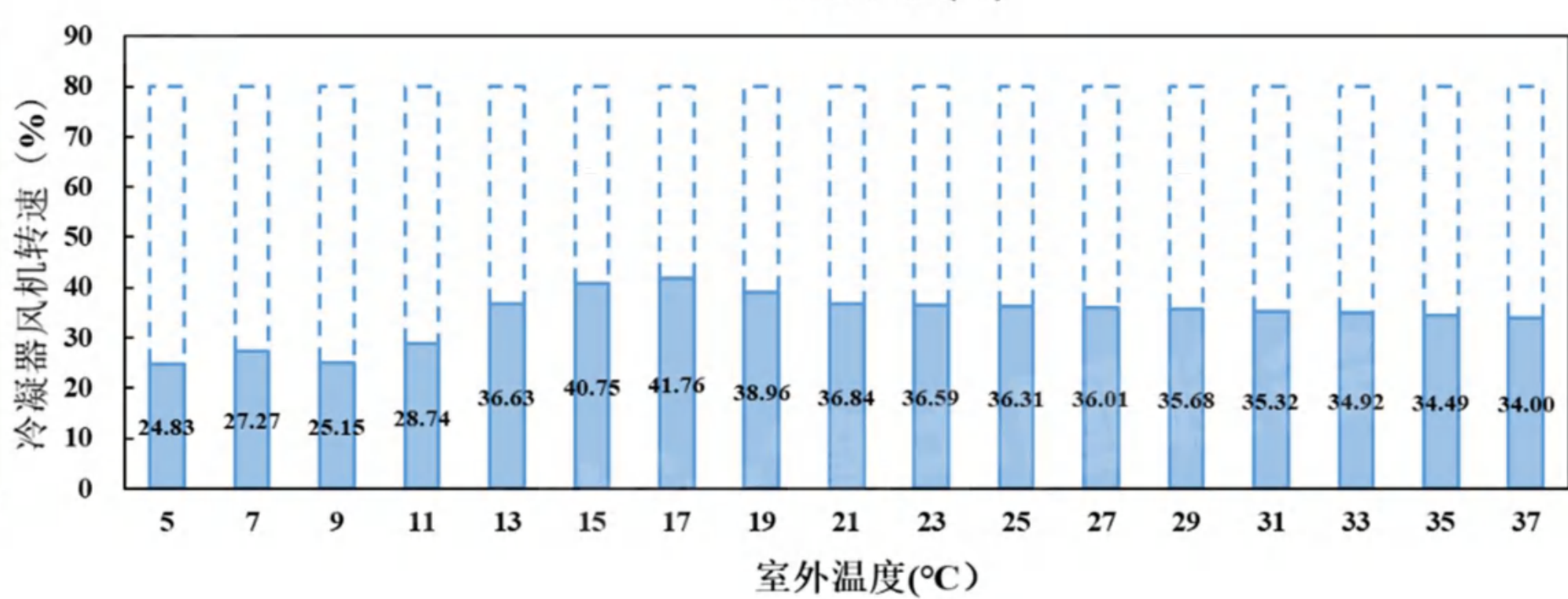
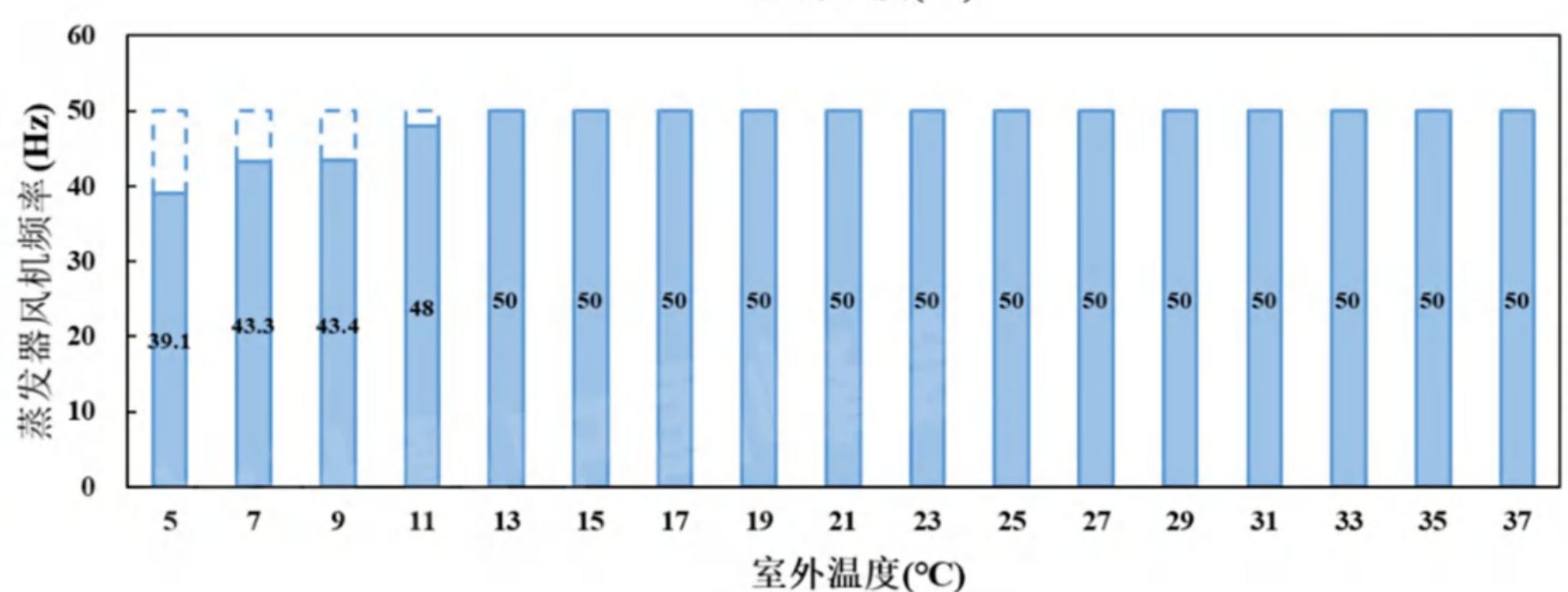
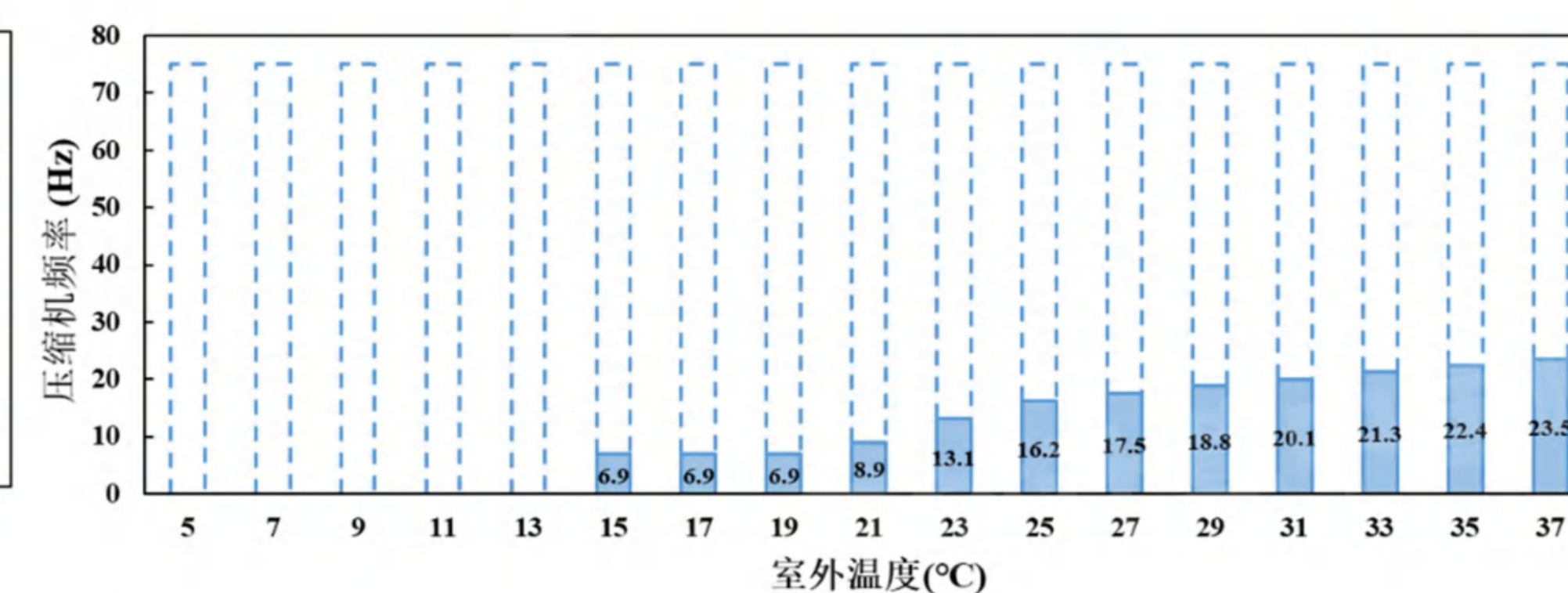
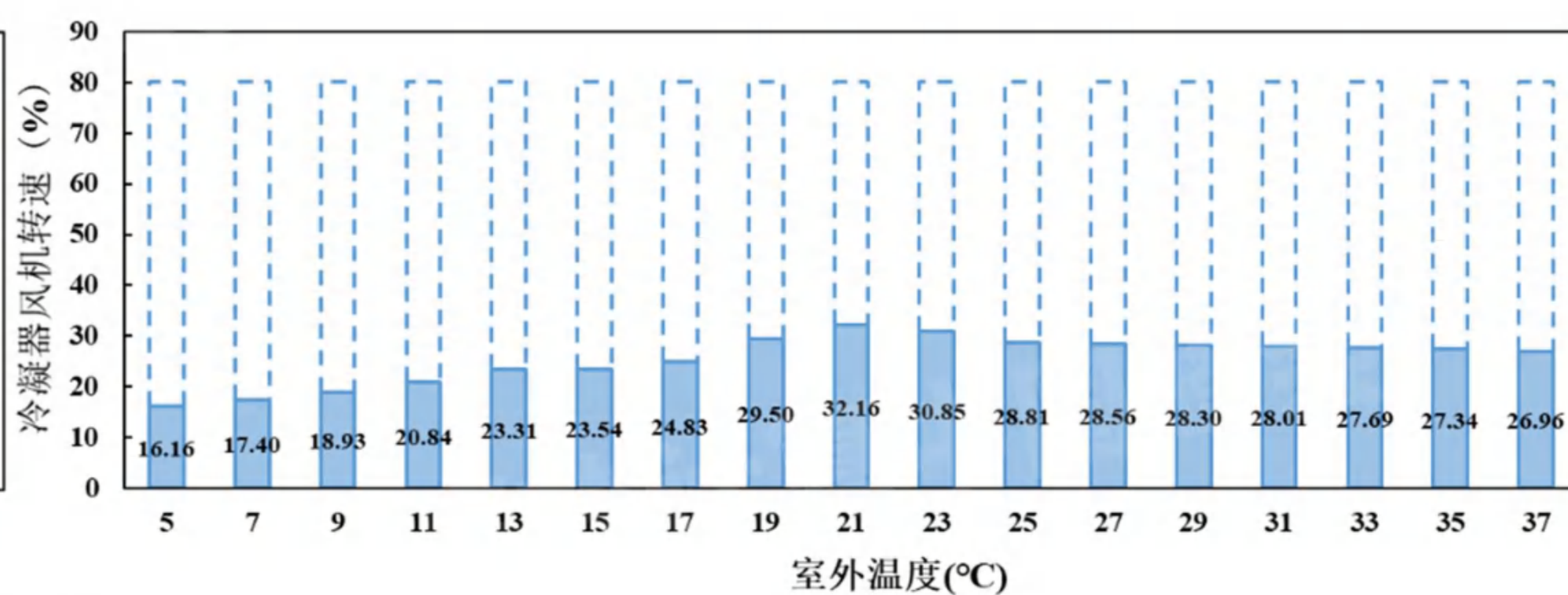
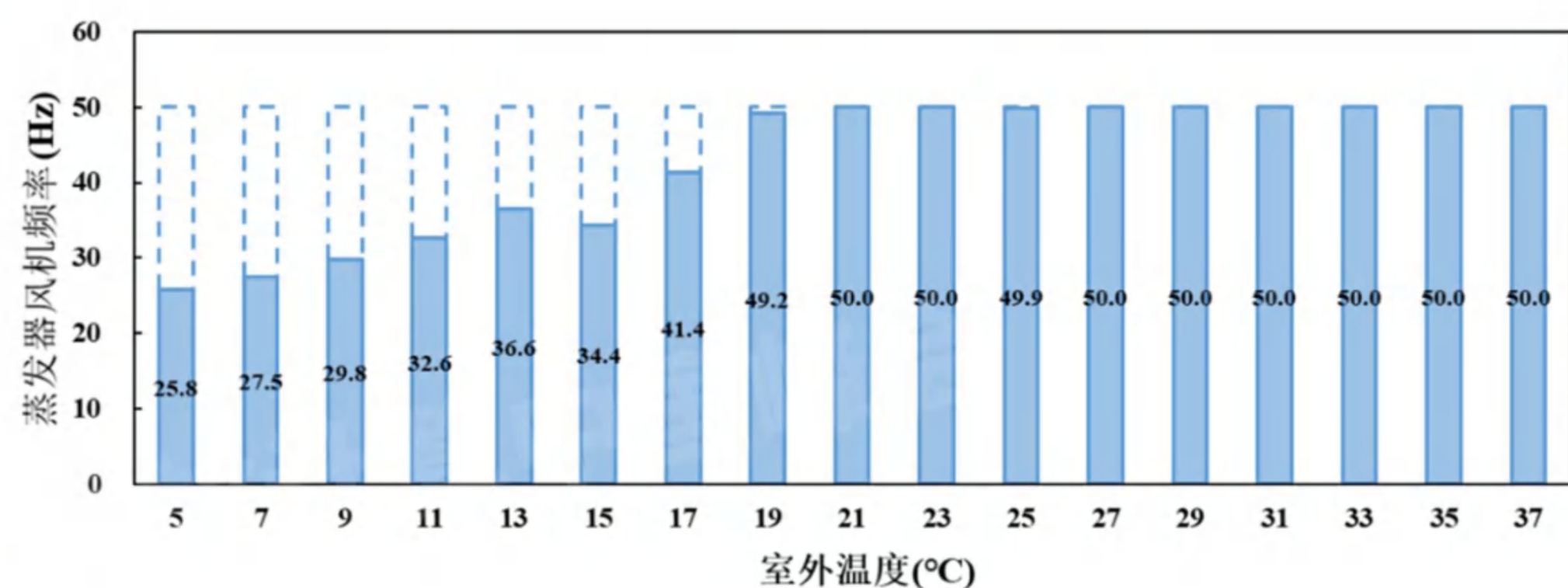
冷却系统协同运行

■ 不同设备协同运行

结合协同因子，对系统**部分负荷**的运行状态进行优化

50%负荷率

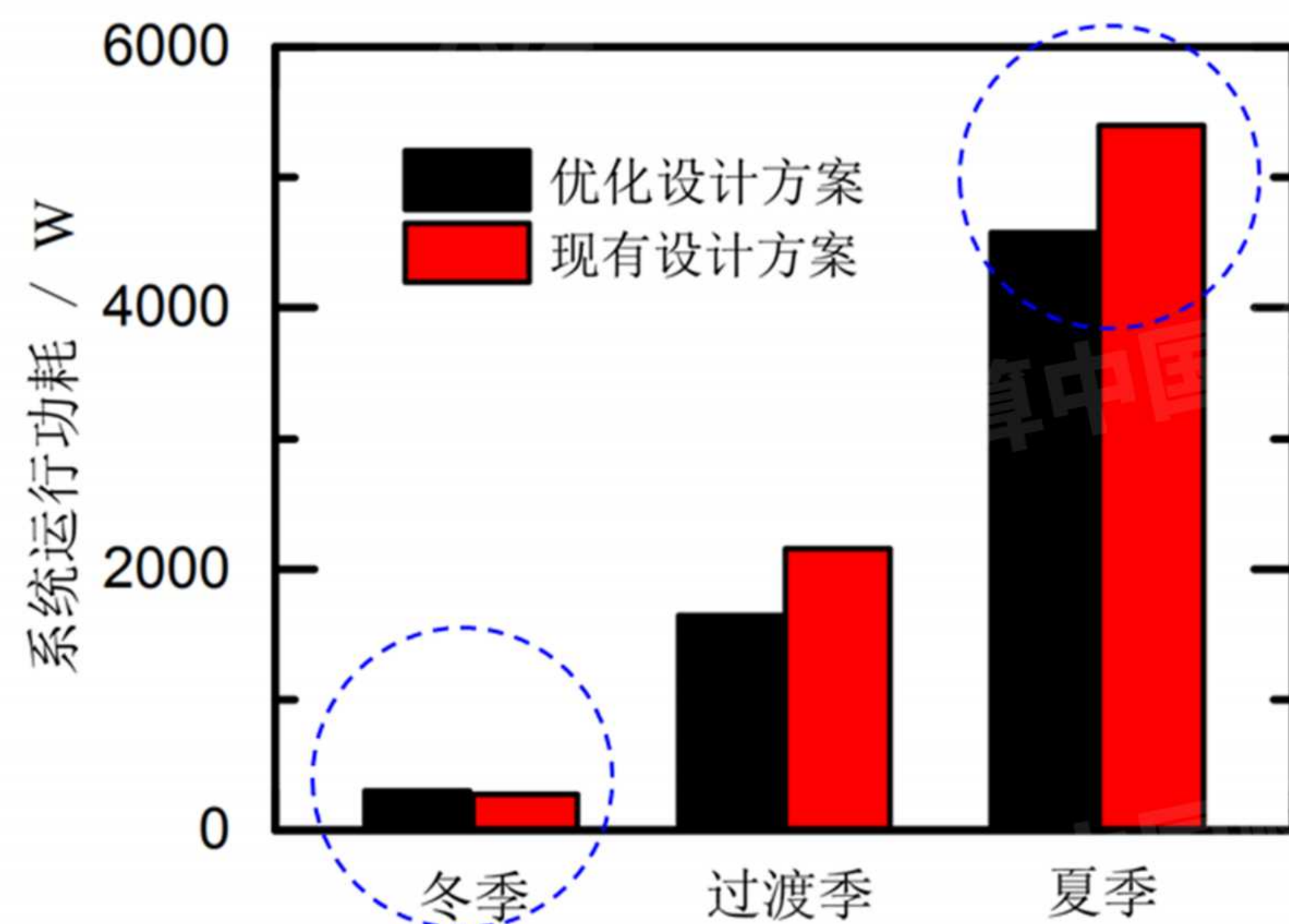
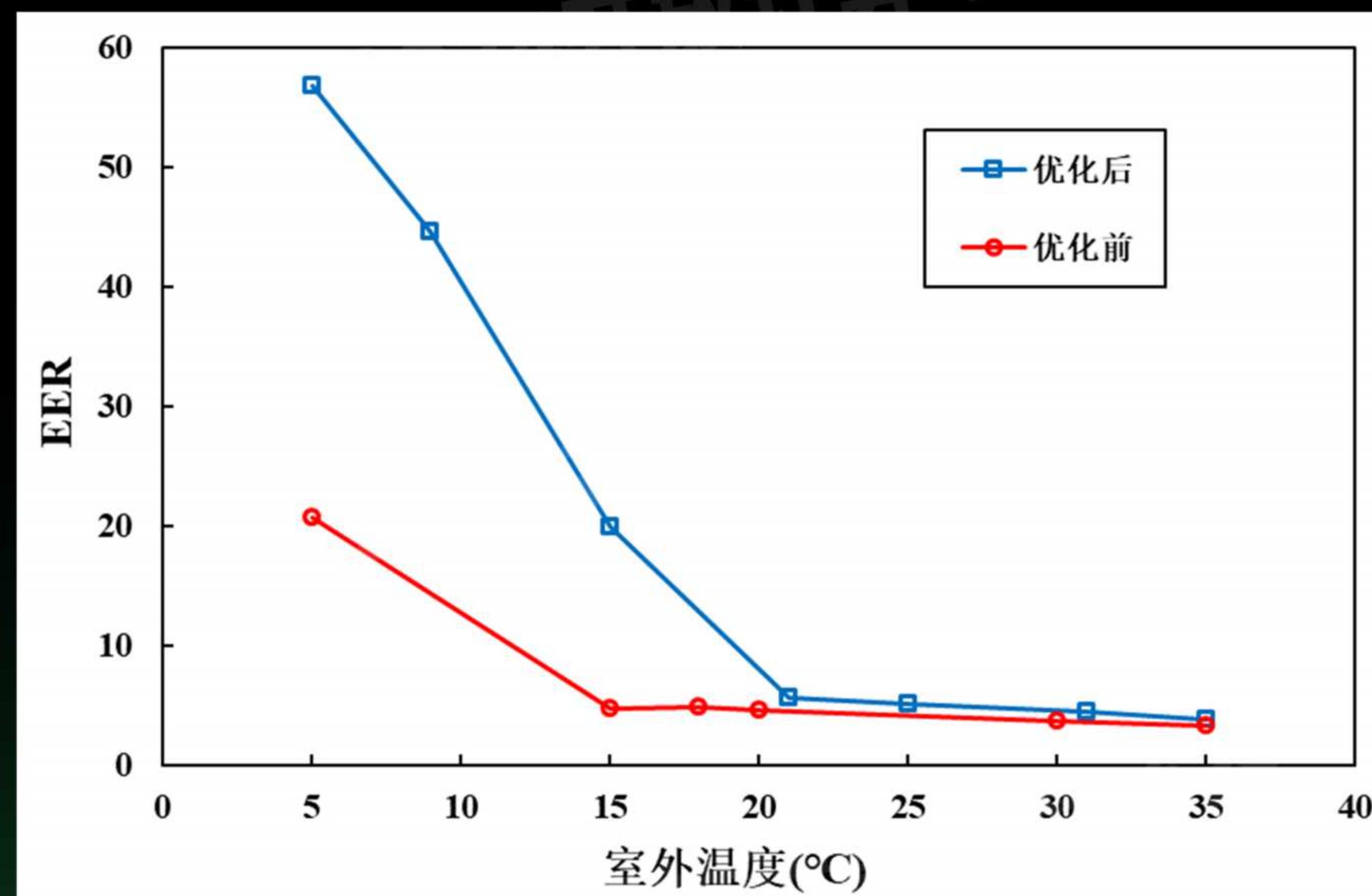
75%负荷率



冷却系统协同运行

■ 不同设备协同运行

- ✓ 采用全局优化理论对热管-蒸汽压缩联合循环系统的设计参数和运行参数进行了优化;
- ✓ 运行优化后, **系统运行能效(EER)**在自然冷却和复合制冷模式下**最多可提升约4倍**;
- ✓ 设计优化后, **全生命周期成本下降约10.1%**。



总结

散热环节协同匹配

- ✓ 根据发热密度确定末端形式
- ✓ 降低输配能耗，匹配介质温差
- ✓ 根据自然条件选择冷源方式

冷却系统协同运行

- ✓ 系统运行与环境协同-变工况寻优
- ✓ 同类设备协同运行--机器学习找到最佳联合运行方案
- ✓ 不同设备协同运行--全局优化、协同运行因子

2024开放计算中国峰会

2024开放计算中国峰会

2024开放计算中国峰会



2024开放计算中国峰会

THANKS!

2024开放计算中国峰会

2024开放计算中国峰会

lizh@tsinghua.edu.cn

2024开放计算中国峰会

2024开放计算中国峰会

2024开放计算中国峰会

2024开放计算中国峰会