

1 GW AI数据中心冷却系统热力学建模与优化项目执行框架

第一部分：战略框架与系统定义

此初始阶段对于确立项目的坚实基础至关重要。所有后续的计算和模型都将建立在此处所做决策之上。

1.1 1 GW AI数据中心热挑战的解构

项目任务书明确指出，需要处理一个1吉瓦(GW)的IT热负荷，这相当于1,000,000千瓦(kW)¹。这是整个冷却系统必须排散的总热量。此热负荷被划分为两部分：

- 90%(900 MW)来自必须采用液体冷却的GPU集群。
- 10%(100 MW)来自其余可通过空气冷却的设备。

这种划分决定了建筑物内部需要设计两个截然不同的冷却环路。项目的核心挑战不仅在于排散如此巨大的热量，更在于以最高的能源和水资源效率来完成这一任务。系统的效率将通过电源使用效率(PUE)和用水效率(WUE)这两个关键指标进行量化评估²。

1.2 设定基准：GPU选型与热负荷特性分析

项目要求使用“NVIDIA H100或更佳”的GPU作为热源¹。因此，团队的首个关键决策是选择并论证所使用的具体GPU型号。

- 相关数据点：
 - NVIDIA H100的热设计功耗(TDP)最高可达700W⁴。
 - NVIDIA B100的TDP为700W⁶。

- NVIDIA B200的TDP为1000-1200W⁷。
- NVIDIA GB200超级芯片的TDP高达2700W⁸。
- 推荐选型：建议选择NVIDIA B200，并采用其1.2 kW的TDP值进行计算。这一选择不仅紧扣“现代数据中心”的主题，而且相较于H100，其更高的功率密度也带来了更严峻的热流密度挑战，更能体现项目的复杂性和前沿性。
- 基础计算：
 - 总液冷热负荷： $Q_{LC} = 1 \text{ GW} \times 90\% = 900,000 \text{ kW}$
 - 所需B200 GPU数量： $N_{GPU} = 900,000 \text{ kW} / 1.2 \text{ kW/GPU} = 750,000$ 个

选择更高性能的GPU(如B200或GB200)意味着在达到1 GW总功率时，所需的GPU单元数量会减少，但这会导致热量更加集中。例如，GB200芯片的热流密度超过50 W/cm²，在热点区域甚至可以达到150 W/cm²⁸。如此高的热流密度直接影响到系统中“液冷芯片表面”这一组件的设计，它要求冷板必须具有极低的热阻，并且流经芯片的冷却剂温升必须非常小。GB200的技术资料表明，其GPU的温升限制在30°C以内⁸，这比项目任务书中给出的40°C冷却水出口温度上限更为严格。这暗示了流经单个GPU冷板的冷却水温差(ΔT)必须被控制在很小的范围内。因此，选择一款“更佳”的GPU使得项目更具现实复杂性，它迫使团队对一次冷却环路进行更精细的分析，并为采用大流量、小温差的液冷方案提供了充分的理由，这完全符合项目对于“复杂”和“基层level计算”的要求。

1.3 系统边界定义与热力学状态点

基于项目任务书中的系统图¹，必须为水环路定义一套标准化的编号状态点。这对于构建结构化的Python模型至关重要。

- **冷冻水环路 (Chilled Water Loop, CWL):**
 - 状态点1: 离开冷水机组蒸发器的水(例如, 10°C)。
 - 状态点2: 经过建筑热交换器后的水。
 - 状态点3: 经过计算设备热交换器后的水。
 - 状态点4: 返回冷水机组蒸发器的水。
- **GPU冷却剂环路 (GPU Coolant Loop, GCL):**
 - 状态点5: 离开计算设备热交换器的水(例如, 15°C)。
 - 状态点6: 流经液冷GPU集群后的水(必须 $\leq 40^{\circ}\text{C}$)。
 - 状态点7: 返回计算设备热交换器的水。
- **冷却水环路 (Condenser Water Loop, CDWL):**
 - 状态点8: 离开冷水机组冷凝器的水。
 - 状态点9: 经过冷却塔后的水。
 - 状态点10: 返回冷水机组冷凝器的水。

此状态点地图将作为仿真的核心数据结构。每个状态点对象都将包含温度(T)、压力(P)、焓(h)和

质量流量 (\dot{m}) 等属性。

1.4 核心假设与物理常数

建立一个正式的假设参数表是展现项目严谨性的关键步骤，它清晰地界定了模型的适用范围和局限性。

表1: 关键系统假设与参数

参数	数值	理由 / 来源
总IT热负荷	1 GW	1
液冷负载比例	90%	1
风冷负载比例	10%	1
选定GPU型号	NVIDIA B200	7
GPU TDP	1.2 kW	7
GPU冷却剂最高温度	40°C	1
环境空气最高温度	25°C	1
设计环境湿球温度	25.5°C (78°F)	典型的ASHRAE设计条件 [10]
工作流体 (所有环路)	水	1
水的比热容 (c_p)	4.186 kJ/kg·K	标准物理性质
水的密度 (ρ)	997 kg/m ³	标准物理性质

第二部分：组件级热力学与性能建模

本部分将详细阐述系统图中每个组件的物理模型。在Python仿真中，每个组件都将被实现为一个独立的类(Class)。

2.1 热源：GPU机架（液冷与风冷）

- 功能：模拟IT设备向冷却环路输入的热量。
- 液冷模型 (900 MW):
 - 控制方程： $\dot{Q}_{LC} = \dot{m}_{GCL} \cdot c_p \cdot (T_6 - T_5)$ 。
 - 该模型将接收入口水温(T_5)和流量(\dot{m}_{GCL})作为输入，并基于900 MW的固定热负荷计算出口水温(T_6)。
 - 约束检查：模型必须内置一个检查机制，确保计算出的 T_6 始终满足 $T_6 \leq 40^{\circ}\text{C}$ 的约束。这将反过来决定GCL环路所需的最小质量流量 \dot{m}_{GCL} 。
- 风冷模型 (100 MW):
 - 控制方程： $\dot{Q}_{AC} = \dot{m}_{air} \cdot c_{p,air} \cdot (T_{air,out} - T_{air,in})$ 。
 - 这部分热量被传递到建筑物的空气中，随后由建筑热交换器(Building HXer)移除。假定机房内的空气入口温度被恒定维持在 25°C ¹。

2.2 一次排热：冷水机组系统

- 功能：利用制冷循环将热量从冷冻水环路(CWL)转移至冷却水环路(CDWL)。
- 热力学模型：
 - 蒸发器热负荷： $\dot{Q}_{evap} = \dot{m}_{CWL} \cdot c_p \cdot (T_4 - T_1)$ 。此负荷必须等于CWL从计算设备和建筑热交换器吸收的总热量。
 - 冷凝器热负荷： $\dot{Q}_{cond} = \dot{Q}_{evap} + \dot{W}_{comp}$ 。
 - 压缩机功耗： $\dot{W}_{comp} = \dot{Q}_{evap} / \text{COP}$ 。
- 性能模型：性能系数(COP)并非一个常数，而是部分负荷率(PLR)和冷却水入口温度(T_{10})的函数。
 - $\text{PLR} = \dot{Q}_{evap} / \dot{Q}_{rated}$ 。
 - $\text{COP} = f(\text{PLR}, T_{10})$ 。这个函数关系将通过拟合真实商用设备的性能曲线来建立。

- 数据集成：将采用ASHRAE Standard 205 / 90.1 Appendix J的数据集来构建模型¹¹。对于大型离心式冷水机组(>600冷吨)，可以选择如'G'或'U'等曲线集。这些数据集为描述性能的双二次多项式方程提供了系数：
 - 制冷量修正函数： $\text{CapFunT} = a_1 + b_1 T_{\text{chws}} + c_1 T_{\text{chws}}^2 + d_1 T_{\text{cwe}} + e_1 T_{\text{cwe}}^2 + f_1 T_{\text{chws}} T_{\text{cwe}}$
 - 能耗比修正函数(温度)： $\text{EIRFunT} = a_2 + b_2 T_{\text{chws}} + c_2 T_{\text{chws}}^2 + d_2 T_{\text{cwe}} + e_2 T_{\text{cwe}}^2 + f_2 T_{\text{chws}} T_{\text{cwe}}$
 - 能耗比修正函数(负荷)： $\text{EIRFPLR} = a_3 + b_3 \text{PLR} + c_3 \text{PLR}^2$
 - 其中， T_{chws} 是冷冻水出水温度， T_{cwe} 是冷却水进水温度，而EIR(能量输入比)是COP的倒数，即 $1/\text{COP}$ 。
- **Python实现目标**：创建一个Chiller类，该类接收 Q_{evap} 和 T_{10} 作为输入，并返回所需的压缩机功耗 W_{comp} 以及排向冷凝器的热量 Q_{cond} 。
- 部分负荷性能的重要性：数据中心的IT负载并非恒定在100%，它会随计算需求波动。一个简化的模型可能会使用一个固定的COP值，例如6.0¹⁵，这将导致计算出的PUE是一个常数。然而，真实的冷水机组在低负荷下效率会显著降低¹⁶。性能曲线显示，当PLR低于约25%时，COP会急剧下降。因此，通过模拟一个变化的日间IT负载曲线，一个动态的仿真将揭示出PUE并非恒定不变的；在IT活动低谷期，PUE会升高(即效率变差)。这是一个关键且不直观的结论，只有通过实现基于ASHRAE和设备商数据的真实性能曲线模型才能捕捉到，这极大地提升了项目分析的深度和复杂度。

2.3 二次排热：水冷却塔

- 功能：将来自CDWL的热量(Q_{cond})主要通过水的蒸发排向大气。
- 热力学模型：
 - 控制方程： $Q_{\text{cond}} = \dot{m}_{\text{CDWL}} c_p (T_8 - T_9)$ 。
 - 冷却塔的性能由其将水从 T_8 冷却到 T_9 的能力定义。这取决于所谓的“冷却塔逼近度”(Approach)，即出水温度与环境湿球温度(T_{wb})之差。
 - 逼近度 = $T_9 - T_{\text{wb}}$ 。更小的逼近度意味着更优的冷却效果，但这需要更大、风机功率更高的冷却塔。
 - 此性能将通过制造商(如SPX Marley)的性能曲线¹⁸或使用CTI性能曲线的默克尔方法进行建模²⁰。在系统级模型中，可以假设在设计工况下有一个固定的逼近度(例如4°C)，并将风机功率建模为热负荷和 T_{wb} 的函数。
- 水耗模型(用于WUE计算)：总补水量 $\dot{m}_{\text{makeup}} = \dot{m}_{\text{evap}} + \dot{m}_{\text{drift}} + \dot{m}_{\text{blowdown}}$ 。
 - 蒸发损失 (\dot{m}_{evap})：这部分损失与排热量直接相关。
 - 理论公式： $\dot{m}_{\text{evap}} \approx Q_{\text{cond}} / h_{\text{fg}}$ ，其中 h_{fg} 是水的汽化潜热。
 - 经验公式：冷却范围每升高10°F(约5.5°C)，约有1%的循环水量被蒸发²¹。一个更精确的公式是 $E = \Delta T(^{\circ}\text{C}) \times R \times 0.00153$ ²³。

- 漂水损失 (\dot{m}_{drift}): 被气流带走的水滴。
 - 该值是循环水量 \dot{m}_{CDWL} 的一个百分比。
 - 采用高效除水器的现代冷却塔漂水率极低, 通常在0.0004%到0.005%之间²⁴。模型中将假设为0.001%。
- 排污损失 ($\dot{m}_{\text{blowdown}}$): 为控制水中矿物质浓度而主动排掉的水。
 - 该损失由“浓缩倍数”(Cycles of Concentration, COC)决定, COC定义为排污水中溶解性固体浓度与补水中该浓度之比²⁸。
 - 计算公式: $\dot{m}_{\text{blowdown}} = \dot{m}_{\text{evap}} / (\text{COC} - 1)$ ²⁶。
 - 典型的COC值在4-6之间, 但通过水处理可以达到更高值²⁸。基准模型将假设COC为5。
- **Python实现目标:** 创建一个CoolingTower类, 接收 Q_{cond} 和环境 T_{wb} 作为输入, 返回风机功耗(W_{fan})和总补水率(\dot{m}_{makeup})。

2.4 内部热交换: 计算设备与建筑热交换器

- 功能: 在不同水环路之间传递热量而不混合流体。计算设备热交换器(Compute HXer)将热量从GCL转移到CWL。建筑热交换器(Building HXer)将热量从建筑空气转移到CWL。
- 性能模型: 将采用效率-NTU(Effectiveness-NTU)方法进行建模。
 - $Q_{\text{actual}} = \epsilon \cdot Q_{\text{max}} = \epsilon \cdot C_{\text{min}} \cdot (T_{\text{h,in}} - T_{\text{c,in}})$ 。
 - 其中, ϵ 是热交换器效率, C_{min} 是冷热两种流体中较小的热容率($\dot{m}c_p$)。
- 数据集成: 板式换热器是此应用场景的理想选择, 因其效率高, 通常超过90%³⁴。
- 假设: 对于高性能的逆流板式换热器, 可以合理地假设一个恒定的效率值, 例如 $\epsilon = 0.92$, 作为模型的起点。
- **Python实现目标:** 创建一个HeatExchanger类, 接收冷热两侧流体的入口温度和流量作为输入, 并计算各自的出口温度以及实际传递的热量 Q_{actual} 。

2.5 辅助组件: 水泵与风机

- 功能: 驱动流体在环路中循环, 以及驱动空气流过冷却塔。它们的功耗是PUE计算的关键组成部分。
- 水泵功耗模型: $W_{\text{pump}} = (\dot{m} \cdot g \cdot \Delta H) / \eta_{\text{pump}}$, 其中 ΔH 是环路的总压头损失, η_{pump} 是水泵效率。
 - 对于系统级模型, 精确计算压降过于复杂。将采用简化方法: 基于行业数据, 假设一个固定的单位流量功耗(例如, X kW / 1000 gpm)。此参数将在假设表中明确列出。
- 风机功耗模型: 冷却塔风机功耗是热负荷和环境条件的函数。可以利用制造商数据表(例如

SPX Marley NC系列¹⁸) 来创建一个简化的性能曲线: $W_{fan} = f(Q_{cond}, T_{wb})$ 。

表2: 组件模型构建概要

组件	控制方程	关键参数	Python类方法	来源
GPU热负荷	$\dot{m}c_p \Delta T$	Q_{IT} , \dot{m}_{GCL} , T_{in}	calculate_Tout(Tin, m_dot)	[1, 7]
冷水机组	$W_{comp} = Q_{evap} / \text{COP}$	Q_{evap} , $T_{cond,in}$, PLR	get_power(Q_load, T_cond_in)	[11, 12, 15, 17]
冷却塔	$\dot{m}_{makeup} = \dot{m}_e + \dot{m}_d + \dot{m}_b$	Q_{cond} , T_{wb} , COC, Drift %	get_performance(Q_load, Twb)	[23, 24, 26, 29]
热交换器	$\dot{m} \epsilon C_{min} (T_{h,in} - T_{c,in})$	ϵ , \dot{m}_h , \dot{m}_c , $T_{h,in}$, $T_{c,in}$	solve_states(...)	[36, 37]
水泵/风机	$W = f(\dot{m}, \Delta P)$	\dot{m} , $\eta_{pump/fan}$	get_power(m_dot)	(基于行业数据的假设)

第三部分: 集成系统仿真与控制策略

本部分描述如何将独立的组件模型组装成一个协同工作的整体仿真系统。

3.1 基于Python的系统模型架构: 面向对象方法

- 系统将被建模为一组相互作用的对象(在第二部分中定义的类的实例)。
- 一个主DataCenter类将包含Chiller, CoolingTower, HeatExchanger等组件的实例。
- 组件之间的连接将通过在对象之间传递状态点数据(温度、流量)来管理, 传递顺序遵循物理管路的逻辑。

3.2 变负荷下的准稳态仿真

- 为了满足项目对“动态计算”的要求¹, 仿真将不仅仅求解一个设计点工况。
- 将定义一个24小时的数据中心IT负载变化曲线(例如, 工作时间100%负载, 夜间60%负载) 以及一个相应的24小时环境湿球温度变化曲线。
- 仿真将在一个循环中运行, 计算并记录一天中每个小时的系统稳态性能(温度、功耗、水耗)。这将产生PUE和WUE的动态变化曲线。

3.3 基准控制策略的实现

- 冷冻水环路控制: 冷水机组的制冷量(及其PLR和COP)将被调节, 以维持状态点1处恒定的供水温度($T_1 = 10^{\circ}\text{C}$)。这是楼宇冷却的标准控制逻辑。
- 冷却水环路控制: 冷却塔风机将被调节, 以维持进入冷水机组冷凝器的水温(状态点9, T_9)恒定。该温度通常设定为比当前环境湿球温度高一个固定的“逼近度”(例如, $T_9 = T_{wb} + 4^{\circ}\text{C}$)。此控制逻辑确保冷水机组在有利的条件下运行, 同时最小化风机能耗。
- 流量控制: 在基准模型中, 假设所有环路中的水流量恒定, 其值根据100%设计负载条件确定。

3.4 数据流与状态变量管理

- 由于系统包含闭合环路, 一个组件的出口状态是另一个组件的入口状态, 因此仿真需要一个迭代求解器。
- 求解算法:
 1. 用估计值初始化所有状态点。
 2. 从热源(GPU)开始, 沿水流方向计算下游各点的温度。
 3. 将计算出的温度依次传递给热交换器、冷水机组和冷却塔模型。
 4. 计算得到的返回环路起点的温度将与初始估计值不符。

5. 计算误差, 并使用一个数值求解器(例如, 简单的松弛迭代法或scipy.optimize库中更稳健的求解器)来调整初始猜测值, 直到整个系统收敛到一个稳定的能量平衡状态。
6. 存储该时间步的收敛结果, 然后进入下一个小时的计算。

第四部分: 性能评估与系统优化

仿真模型建成后, 本部分将专注于分析结果并提出改进方案。

4.1 计算电源使用效率 (PUE)

- 定义: $PUE = \text{数据中心总能耗} / \text{IT设备能耗}^2$ 。
- 计算: 在每个时间步长中, $PUE = (Q_{IT} + W_{comp} + W_{pumps} + W_{fans}) / Q_{IT}$ 。在此分析级别, 可以合理地假设IT设备的电能输入完全转化为热负荷 Q_{IT} 。
- 最终结果将是一条24小时的PUE变化曲线和一个日平均PUE值。

4.2 计算用水效率 (WUE) 与社会影响

- 定义: $WUE = \text{年总用水量 (升)} / \text{IT设备年总能耗 (千瓦时)}^3$ 。
- 计算: 在每个时间步长中, 计算总补水流量 \dot{m}_{makeup} (单位: 升/小时)。将其除以IT设备功率 Q_{IT} (单位: 千瓦), 得到瞬时WUE(单位: 升/千瓦时)。
- 最终结果将是一条24小时的WUE变化曲线和一个日平均WUE值。
- 社会影响讨论: 报告的讨论部分必须探讨大规模数据中心用水对地方水资源的压力, 尤其是在干旱地区。这是项目任务书的一项明确要求¹。计算出的WUE值应与行业基准(例如, 平均值为1.8 L/kWh³)进行比较, 以评估设计的性能水平。

4.3 优化目标的确定: 冷却塔子系统

- 项目要求确定一个组件进行“实质性优化”¹。
- 选择理由: 冷却塔是系统与外部环境进行能量(通过风机)和物质(通过补水)交换的直接接口。在三种水损失中, 排污损失是可控性最强且节水潜力最大的部分。减少排污直接改善

WUE, 并降低与水与化学处理相关的运营成本。

4.4 优化方案:通过最大化浓缩倍数 (COC) 实现动态排污控制

- 基准方案: 基准模型假设一个固定的COC值, 为5。
- 优化策略: 实施一种控制逻辑, 动态调节排污率, 以使某种限制性溶解固体(例如, 二氧化硅)的浓度维持在其溶解度极限以下。
 - 冷却塔水中允许的二氧化硅最高浓度通常在150-200 ppm左右³⁰。
 - 仿真将假设补水中的二氧化硅浓度(例如, 25 ppm)。
 - 因此, 最大目标COC可以计算为 $\text{COC}_{\max} = 150 \text{ ppm} / 25 \text{ ppm} = 6$ 。
 - 控制系统将调节排污阀, 以维持这个目标COC。
- 分析: 仿真将运行两次: 一次使用基准的固定COC, 另一次使用优化的动态COC。通过比较两次结果, 量化排污水量、总补水量的减少百分比, 以及日平均WUE的改善程度。
- 冷却塔运行中的水-能源-成本权衡: 提高COC以节约用水是直接目标。然而, 更高的COC意味着所有溶解固体的浓度都更高, 这增加了结垢和腐蚀的风险²⁹。为了在更高的COC(例如8或10)下安全运行, 需要更先进、更昂贵的化学水处理方案或预处理系统(如软水器), 这会增加运营成本。因此, 存在一个经济平衡点, 在该点上, 通过进一步提高COC来节约一升水的成本超过了水本身的价格。这是一个非常适合展开可选“经济分析”³¹的议题。团队可以进行一个简化的成本效益分析, 比较节约的补水成本与预估增加的化学品成本, 从而展示对现实世界工程问题的多维度深刻理解。

第五部分:项目执行:任务分配与工作量管理

本部分为团队提供一个可操作的工作分解计划。

5.1 详细项目任务分解

1. 第一阶段:基础与建模 (第1-4周)
 - 任务1.1: 最终确定所有基准假设(GPU选型、设计温度等)。
 - 任务1.2: 开发Python的类结构和状态点框架。
 - 任务1.3: 研究并实现冷水机组的性能模型。
 - 任务1.4: 研究并实现冷却塔的热力与水耗模型。
 - 任务1.5: 实现热交换器及辅助组件的模型。
2. 第二阶段:集成与仿真 (第5-7周)

- 任务2.1:将所有组件模型集成到主DataCenter类中。
- 任务2.2:开发并调试用于系统收敛的迭代求解器。
- 任务2.3:实现基准控制策略下的24小时准稳态仿真循环。
- 任务2.4:生成并验证基准性能结果(PUE、WUE)。
- 3. 第三阶段:优化与分析 (第8-9周)
 - 任务3.1:实现冷却塔的优化COC控制策略。
 - 任务3.2:运行优化策略下的仿真。
 - 任务3.3:分析并比较基准与优化结果, 量化改进效果。
- 4. 第四阶段:报告撰写 (第10-12周)
 - 任务4.1:起草引言和系统模型开发部分的报告。
 - 任务4.2:为结果部分创建所有图表。
 - 任务4.3:起草结果和讨论部分, 包括社会影响分析。
 - 任务4.4:撰写摘要、结论, 并按期刊论文格式排版整个报告。
 - 任务4.5:团队最终审查并提交。

5.2 推荐的角色分配

- 对于3人团队:
 - 成员A (系统架构师与主建模师): 负责整体Python架构、迭代求解器、系统集成和最终仿真运行。主导任务1.2, 2.1, 2.2, 2.3。
 - 成员B (冷水机组与热交换器专家): 深入研究冷水机组和热交换器, 负责实现Chiller和HeatExchanger类。主导任务1.3, 1.5。
 - 成员C (冷却塔与分析专家): 深入研究冷却塔和可持续性指标, 负责实现CoolingTower类, 主导优化任务, 并起草报告的分析与讨论部分。主导任务1.4, 3.1, 3.2, 4.3。
- 对于4人团队:
 - 可将成员C的角色拆分。**成员C (冷却塔与优化专家)**专注于冷却塔模型和优化代码。
 - **成员D (主分析师与报告撰写人)**负责运行仿真、生成图表, 并作为最终报告的主笔, 确保报告风格统一。

5.3 工作量估算

表3: 详细任务分配与工作量估算

任务ID	描述	负责人 (3人团队)	估算人时
------	----	------------	------

1.1	最终确定假设	团队	10
1.2	Python架构设计	A	25
1.3	冷水机组模型开发	B	30
1.4	冷却塔模型开发	C	30
1.5	热交换器及辅助设备模型	B	20
2.1	系统集成	A	25
2.2	求解器开发	A	20
2.3	基准仿真运行	A	15
2.4	基准结果验证	团队	10
3.1	优化模型开发	C	20
3.2	优化仿真运行	C	10
3.3	结果比较分析	C	15
4.1	报告起草 (引言/方法)	B	20
4.2	图表生成	A	15
4.3	报告起草 (结果/讨论)	C	25
4.4	最终报告整合	团队	15
4.5	最终审查	团队	10

总计			315
----	--	--	-----

此工作量估算(315人时) 对于一个3人团队而言, 意味着每人约105小时。在一个12周的学期中, 相当于每人每周投入8-9小时, 这对于一个研究生级别的工程项目来说是合理且符合预期的。

第六部分: 最终报告蓝图

此部分为您最终提交的、格式为期刊论文的报告提供一个结构模板。

- **6.1 摘要 (Abstract):** 简明扼要地总结整个项目: 问题(1 GW数据中心冷却)、方法(基于Python的系统模型)、关键结果(基准PUE/WUE)、实施的优化方案及其效果, 以及核心结论。
- **6.2 引言 (Introduction):** 介绍数据中心能耗的背景。基于项目任务书¹陈述问题。概述系统架构。总结建模方法和项目目标。
- **6.3 系统模型开发 (System Model Development):**
 - 展示带有状态点标注的系统图。
 - 详细阐述每个组件(冷水机组、冷却塔等)的控制方程和性能模型, 并引用用于参数化的数据来源¹¹。
 - 包含关键假设表(表1)。
- **6.4 结果: 基准性能分析 (Results: Baseline Performance Analysis):**
 - 展示基准控制策略下的24小时仿真结果。
 - 用图表展示每小时的PUE和WUE。
 - 报告日平均PUE和WUE, 并与行业基准进行比较。
 - 讨论观察到的动态行为(例如, PUE如何随IT负载变化)。
- **6.5 讨论: 系统优化与影响 (Discussion: System Optimization and Implications):**
 - 描述所选的优化策略(动态COC控制)及其原理。
 - 展示优化后的仿真结果, 并与基准结果进行直接比较。使用表格清晰地展示在用水量和WUE方面的改进百分比。
 - 讨论数据中心用水的社会影响。
 - 可包含关于水-能源-成本权衡的可选经济分析。
- **6.6 结论与未来工作 (Conclusion and Future Work):**
 - 总结项目的主要发现。
 - 重申所提出的优化方案的有效性。
 - 提出未来工作的可能方向(例如, 实现更高级的控制策略、模拟瞬态行为、引入蓄冷技术等)。
- **参考文献 (References):** 列出所有引用的文献和数据来源。
- **附录 (Appendix):** 附上带有良好注释的完整Python代码。

引用的著作

1. MEEN 615 project statement.pdf
2. What is PUE and how is it Calculated? - Nlyte, 访问时间为 十月 30, 2025, <https://www.nlyte.com/blog/data-center-energy-efficiency-pue-dcie/>
3. What Is Water Usage Effectiveness (WUE)? - Sunbird DCIM, 访问时间为 十月 30, 2025, <https://www.sunbirdcim.com/glossary/water-usage-effectiveness-wue>
4. NVIDIA H100 Power Consumption Guide - TRG Datacenters, 访问时间为 十月 30, 2025, <https://www.trgdatacenters.com/resource/nvidia-h100-power-consumption/>
5. NVIDIA H100 Tensor Core GPU Datasheet - OpenZeka, 访问时间为 十月 30, 2025, <https://openzeka.com/en/wp-content/uploads/2023/10/NVIDIA-H100-Tensor-Core-GPU-Datasheet.pdf>
6. NVIDIA B100 Blackwell AI GPU - Vipera Tech, 访问时间为 十月 30, 2025, <https://viperatech.com/product/nvidia-b100-blackwell-ai-gpu>
7. B100 vs B200: Which NVIDIA blackwell GPU is right for your AI workloads? - Northflank, 访问时间为 十月 30, 2025, <https://northflank.com/blog/b100-vs-b200>
8. Deep Dive into NVIDIA GB200 Liquid Cooling Plate Design - KenFa Tech, 访问时间为 十月 30, 2025, <https://www.kenfatech.com/gb200-liquid-cooling-plate-design/>
9. Deep Dive into NVIDIA GB200 Liquid Cooling Plate Design: Advanced Liquid Cooling for AI Chips - FiberMall, 访问时间为 十月 30, 2025, <https://www.fibermall.com/blog/nvidia-gb200-liquid-cooling-plate.htm>
10. Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings - ASHRAE, 访问时间为 十月 30, 2025, https://www.ashrae.org/file%20library/technical%20resources/standards%20and%20guidelines/standards%20addenda/90_1_2019_bd_20220531.pdf
11. ASHRAE Standard 205 Resource Files, 访问时间为 十月 30, 2025, <https://data.ashrae.org/standard205/examples.html>
12. ASHRAE Standard 205 Resource Files, 访问时间为 十月 30, 2025, <https://data.ashrae.org/standard205/>
13. READING AND WRITING STANDARDIZED HVAC PERFORMANCE DATA: AN EARLY IMPLEMENTATION OF ASHRAE STANDARD 205P - IBPSA Publications, 访问时间为 十月 30, 2025, https://publications.ibpsa.org/proceedings/simbuild/2018/papers/simbuild2018_C049.pdf
14. Centrifugal Chiller Maximizing Year-round Efficiency, Mitsubishi Heavy Industries Technical Review Vol.45 No.2(2008), 访问时间为 十月 30, 2025, <https://www.mhi.com/technology/review/sites/g/files/jwhtju2326/files/tr/pdf/e452/e452032.pdf>
15. Determining chiller COP - Johnson Controls - LIT-12011575 - Software Application - CPO: Central Plant Optimization, 访问时间为 十月 30, 2025, <https://docs.johnsoncontrols.com/bas/r/Johnson-Controls/en-US/Johnson-Controls>

[Is-Central-Plant-Optimization-10-Application-Note/Setup-and-commissioning/Chiller-Coefficient-of-Performance-COP/Determining-chiller-COP](#)

16. Where are the default chiller curve coefficient coming from in OS? - Unmet Hours, 访问时间为 十月 30, 2025,
<https://unmethours.com/question/10240/where-are-the-default-chiller-curve-coefficient-coming-from-in-os/>
17. specifications - SPX Cooling Technologies, 访问时间为 十月 30, 2025,
<https://spxcooling.com/pdf/SPEC-NC-19.pdf>
18. cooling tower, 访问时间为 十月 30, 2025,
https://spxcooling.com/wp-content/uploads/sea_NX-TS-23.pdf
19. Cooling Tower Performance Curves Cooling Tower Institute Cti | PDF - Scribd, 访问时间为 十月 30, 2025,
<https://www.scribd.com/document/820928381/cooling-tower-performance-curves-cooling-tower-institute-cti>
20. Engineering Practice Cooling Towers: Estimate Evaporation Loss and Makeup Water Requirements, 访问时间为 十月 30, 2025,
https://files.engineering.com/download.aspx?folder=3a104dfc-af11-4e02-bcc0-606e9268691c&file=Cooling_Towers_Calculation.pdf
21. How Do You Calculate Water Loss in a Cooling Tower?, 访问时间为 十月 30, 2025,
<https://deltacooling.com/resources/faqs/how-do-you-calculate-water-loss-in-a-cooling-tower>
22. Cooling Tower Basic Calculations - Yamatho Supply LLC, 访问时间为 十月 30, 2025,
<https://www.yamathosupply.com/blogs/news/cooling-tower-basic-calculations-2>
23. Drift Loss in Cooling Towers Brings Many-Sized Problems, 访问时间为 十月 30, 2025,
<https://towertechusa.com/blog/towertech-blog/drift-loss-in-cooling-towers-brings-many-sized-problems>
24. www.epa.gov, 访问时间为 十月 30, 2025,
https://www.epa.gov/system/files/documents/2023-05/ws-commercial-watersense-at-work_Section_6.3_Cooling_Towers.pdf
25. Understanding Cooling Tower Water Loss for Profitability, 访问时间为 十月 30, 2025,
<https://www.innovek.co.th/blog/1746/cooling-tower-water-loss->
26. What does “drift rate” mean? - Brentwood Industries, 访问时间为 十月 30, 2025,
<https://www.brentwoodindustries.com/resources/learning-center/cooling-tower/what-does-drift-rate-mean/>
27. 5.2 Cooling Towers Applicability Description, 访问时间为 十月 30, 2025,
<https://www.twdb.texas.gov/conservation/BMPs/Ind/doc/5.2.pdf>
28. Best Management Practice #10: Cooling Tower Management - Department of Energy, 访问时间为 十月 30, 2025,
<https://www.energy.gov/femp/best-management-practice-10-cooling-tower-management>
29. Understanding Cycles of Concentration (COC) - Chemstar WATER, 访问时间为 十月 30, 2025,

<https://www.chemstarwater.com/educational-content/understanding-cycles-of-concentration-coc/>

30. Chapter 31 - Open Recirculating Cooling Systems - Veolia Water Technologies & Solutions, 访问时间为 十月 30, 2025,
<https://www.watertechnologies.com/handbook/chapter-31-open-recirculating-cooling-systems>
31. Understanding Cooling Tower Cycles of Concentration - Guardian Chemicals, 访问时间为 十月 30, 2025,
<https://guardianchem.com/articles/what-are-cycles-of-concentration-in-cooling-systems/>
32. Water Use and Cycles of Concentration (COC) in a cooling tower | iCAP Portal, 访问时间为 十月 30, 2025,
<https://icap.sustainability.illinois.edu/project-update/water-use-and-cycles-concentration-coc-cooling-tower>
33. Plate and Frame Heat Exchanger - How It Works | RasMech, 访问时间为 十月 30, 2025,
<https://www.rasmech.com/blog/plate-and-frame-heat-exchanger-how-it-works/>
34. Maximizing Efficiency with Plate and Frame Heat Exchangers: Applications and Advantages, 访问时间为 十月 30, 2025,
<https://alfaheating.com/blogs/news/maximizing-efficiency-with-plate-and-frame-heat-exchangers-applications-and-advantages>
35. Plate heat exchanger principle, 访问时间为 十月 30, 2025,
<https://www.heat-exchangers.uk/principle/>
36. Water usage effectiveness - Wikipedia, 访问时间为 十月 30, 2025,
https://en.wikipedia.org/wiki/Water_usage_effectiveness
37. Water Usage Effectiveness (WUE) - Electronics Representatives Association, 访问时间为 十月 30, 2025, <https://era.org/glossary/water-usage-effectiveness-wue/>