



华中科技大学
HUAZHONG UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

天地协同-绿意盎然

武汉某低碳写字楼设计与运维 项目执行方案



参赛人员：师王涛，程浩冉，党元曦，马晶晶，王艳辉

指导老师：邓杰文，王飞飞，徐新华

华中科技大学环境科学与工程学院

2024年12月27日

目录

1. 工程概况	3
1.1 项目基本信息介绍	3
1.2 改造运维亮点工作	3
2. 问题分析	4
2.1 改造前围护结构传热系数高, 冷负荷需求大	4
2.2 常规冷热源系统, 能耗较高	5
2.3 缺乏智慧调控系统, 运行维护成本高	6
3. 改造思路	7
4. 亮点工作详细分析	9
4.1 围护结构改造降低冷热需求	9
4.2 冷热源系统优化提升运行性能	16
4.3 温湿度独立控制实现品位匹配	20
4.4 建设光伏系统实现可再生能源利用	23
4.5 采光及通风系统改造提升舒适性	27
5. 智慧能源管控系统实现高效运行	47
5.1 智慧能源管控系统实施架构	47
5.2 能源系统控制逻辑	49
5.2.2 空调冷热源系统	51
6. 节能减排效益分析	56
6.1 围护结构改造降低冷热需求	56
6.2 冷热源系统优化提升运行性能	57
6.3 温湿度独立控制系统实现品位匹配	57
6.4 建设光伏系统实现可再生能源利用	57
6.5 园林绿化增加碳汇	58
7. 总结与展望	59
8. 参考文献及标准	59

1. 工程概况

1.1 项目基本信息介绍

本项目位于湖北省武汉市洪山区，项目所处位置地势平坦开阔，遍布绿植，毗邻某大型湖泊水系。设计改造目标建筑是一座以科研办公为主要功能，兼顾展示、餐饮、休闲等配套功能的综合性办公建筑。项目总用地面积 16375 平方米，地上总建筑面积 11182 平方米，地下建筑面积 5193 平方米。建筑地上 4 层，地下 1 层；建筑总高度 20.1 米。属于二类公共建筑。

该办公建筑设计独特，外立面大多为玻璃幕墙结构，既增强建筑整体的可识别性又兼具保温、隔热、遮掩、通风四大功能，但经过长期以往的使用，通过对该建筑的历史使用数据分析并结合使用者的体验反馈，发现该建筑在节能减排等方面存在着一系列的问题。对此，我们选择对其进行绿色改造，在保障使用者舒适性的同时，减少能耗，提升节能效率。

本次改造主要体现在办公建筑运行维护上，基于办公建筑已有的设备设施以及建筑构造，合理改造铺设新型材料、优化空调系统、采用温湿度独立控制、优化运行管理系统，以解决办公建筑高耗能、空气品质差等问题。通过改造，建筑年均碳排放减少 18.62%，建筑能耗减少 14.61%，室内有机物、颗粒物浓度均满足评价要求。

1.2 改造运维亮点工作

本次改造以建筑设计、运行维护为抓手，通过以下六个方面的改造设计，大幅提升节能减排效率，竭力实现“天地协同，绿意盎然”。

1) 围护结构改造降低冷热需求。根据《建筑节能与可再生能源利用通用规范》GB55015—2021，《绿色建筑评价标准》GB/T50378-2019 优化围护结构至绿建三星标准，主要措施为增大保温层厚度，降低围护结构（外墙、外窗、玻璃幕墙等）传热系数，提升建筑本身保温隔热性能，降低冷暖需求，从而降低冷热源系统能耗。

2) 冷热源系统优化提升运行性能。项目毗邻某大型湖泊水系，存在大量可利用的湖水，因地制宜发展湖水源热泵，既能减少化石能效消耗，同时可提升冷热源系统能效，节能减排。

3) 温湿度独立控制系统实现品位匹配。湖水源热泵单独处理显热负荷可采用较高供水温度，蒸发温度增加，提升热泵机组 COP，冷源系统能耗进一步降低，同时温湿度独立调节既能提升室内环境热舒适性，同时送风更加洁净，环境更加健康。

4) 建设光伏系统实现可再生能源利用。屋面与立面存在大量平面区域，加之武汉具有一定量的太阳辐照资源，因此可铺设光伏板，建立光伏源系统，通过光伏发电，提升可再生能源利用率，同时满足建筑部分能耗需求，达到节能减排目的。

5) 采光及通风系统改造提升舒适性。由于项目毗邻某大型湖泊水系，周边开阔，环境质量高，因此可考虑提升自然采光与自然通风的利用率，不仅能提升室内热舒适性，同时可一定程度上降低照明、通风能耗。

6) 园林绿化增加碳汇。绿色植物光合作用可吸收大量二氧化碳，因此保证园区绿化率能够吸收建筑全生命周期中的大量二氧化碳，增加项目碳汇，相对降低了项目全生命周期中的碳排放量。

7) 智慧能源管控系统实现高效运行。暖通空调、照明采光等系统应当设置实时监控设备，根据末端需求情况自动调节，提升舒适性同时降低能耗；同时应当实时监测分析各设备用电情况，优化能源分配结构，并根据电网电价，灵活机动启停/切换设备。

2. 问题分析

2.1 改造前围护结构传热系数高，冷负荷需求大

《公共建筑节能设计标准 GB 50189-2015》自 2015 年 10 月 1 日起实施，取代了原有的 GB 50189-2005 标准。标准中对围护结构的保温隔热性能、建筑设备及系统的能源利用效率、可再生能源利用率等进行了规定。发现时隔十年，该标准中对围护结构的限制无法满足当下节能建筑、绿色建筑的要求。

与国家最近提出的《绿色建筑评价标准》GB/T50378-2019 对比，绿建三星传热系数更是在《建筑节能与可再生能源利用通用规范》GB55015—2021 的基础上降低 10%-20%，以下表格对比来看更加明显。

综上对比来看，在建筑设计与改造过程中应当主动实现高传热系数，低换热

热量的目的。相关建筑设计标准也应当与时俱进。

表 2.1-1 不同规范之间参数要求对比

	15 年国标	21 年国标+绿建三星
屋顶传热系数 K [W/(m ² · K)]	<=0.5	<=0.32, 0.3
外墙传热系数	<=0.8	<=0.64, 0.62
楼板传热系数	<=0.7	<=0.56, 0.54
外窗气密性等级	>=6	-
外门气密性等级	>=4	-
幕墙气密性等级	>=3	-
外窗有效通风换气面积比	>=0.1	-
东向外窗		
窗墙比	<=0.7	-
传热系数	<=2.2	<=1.68, 1.66
外窗太阳得热系数	<=0.35	<=0.24
可见光透射比	>=0.4	-
西向外窗		
窗墙比	<=0.7	-
传热系数	<=2.2	<=1.68, 1.66
外窗太阳得热系数	<=0.3	<=0.20
可见光透射比	>=0.4	-
南向外窗		
窗墙比	<=0.7	-
传热系数	<=2.4	<=1.76, 1.66
外窗太阳得热系数	<=0.35	<=0.24
可见光透射比	>=0.4	-
北向外窗		
窗墙比	<=0.7	-
传热系数	<=2.4	<=1.76, 1.66
外窗太阳得热系数	<=0.4	<=0.28
可见光透射比	>=0.4	-

2.2 常规冷热源系统，能耗较高

该项目采用传统水冷-螺杆式冷水机组+冷却塔形式供冷，额定制冷量 300kW，额定 COP5.0，共 4 台；用户侧、源侧采用定频单速水泵，4 用 1 备，冷却水泵额定功率 4.9kW，冷冻水泵额定功率 5.9kW，冷却塔耗电比 0.1kWh/m³。供暖期采用燃气锅炉供暖，额定容量 0.6MW，锅炉热效率 78%，共 1 台；热水泵采用定频单速水泵，2 用 1 备，额定功率 5.9kW。

冷水机组运行工况如表 1-2 所示，燃气锅炉循环水泵运行工况如表 1-3 所示。供冷期机组累计电耗 11.37 万 kWh，水泵与冷却塔电耗合计 5.21 万 kWh，热水

泵累计电耗 0.43kWh, 总计电耗为 17.01kWh, 占全年建筑能耗 19%, 比重较大。此外冬季采用燃气锅炉供热, 存在化石能源燃烧导致的直接碳排放问题, 需要进行优化改造。

表 2.2-1 冷水机组运行工况

负荷区间 (%)	区间负荷 (kWh)	运行时长 (h)	制冷机组 (kWh)	平均性能系数(COP)	冷却水泵 (kWh)	冷冻水泵 (kWh)	冷却塔 (kWh)
0~20	26558	235	4725	5.62	1152	1387	1175
20~40	104892	285	18675	5.62	2793	3335	2850
40~60	251273	411	44748	5.62	6042	7234	6165
60~80	248724	309	44284	5.62	6056	7262	6180
80~100	6975	7	1264	5.52	137	165	140
>100	0	0	0	—	0	0	0
合计	638422	1247	113695		16180	19381	16510

表 2.2-2 燃气锅炉循环水泵运行工况

负荷率 (%)	锅炉负荷 (kW)	供暖水泵功率(kW)	热水输送能效比 EHR	区间负荷 (kWh)	区间时长 (h)	供暖水泵电耗(kWh)
20	120	5.9	0.0492	20911	351	2071
40	240	5.9	0.0246	44340	255	1505
60	360	5.9	0.0164	23453	81	478
80	480	5.9	0.0123	12835	31	183
100	600	5.9	0.0098	7978	14	83
综合				109517	732	4319

2.3 缺乏智慧调控系统, 运行维护成本高

本项目目前机电能源系统仍采用人工控制的运行模式, 未建设智慧调控系统, 导致项目运营阶段各系统协同调控不足、运行性能偏低、运维成本较高, 具体体现在:

(1) 建筑内部暖通空调、照明、安防等系统未设置自控调节: 末端未安装相应传感器, 空调、照明等无法根据末端实际需求自动调节, 同时部分闲置区域全负荷运行, 造成了一定的能源浪费;

(2) 各系统及设备缺乏实施监控及自诊断功能: 缺乏相应自诊断逻辑与硬件设置, 导致检修维护仅能通过定期安排人员巡检与检测报告实现问题渐缩, 延迟了故障检修, 增加了人力资源成本;

(3) 冷热源机组、照明等设备启停机械化，缺乏灵活的控制逻辑：仅靠人员手动启停/切换设备，无法根据实时需求及时响应控制，或难以满足多样化末端环境需求。

3. 改造思路

针对上述问题，本项目采用如下思路（如图 3-1 所示）开展节能改造工作：首先，优化围护结构至绿建三星标准，通过改善围护结构保温隔热性能降低冷热需求；优化冷热源系统配置，因地制宜选取湖水源热泵进行供冷供热，提升系统运行性能；考虑夏季武汉高温高湿天气，采取温湿度独立控制，灵活调节末端环境，同时进一步降低供冷时期冷源系统能耗；利用平整屋面铺设光伏板，提升可再生能源利用率，同时满足部分建筑能耗需求；除温湿度独立控制外，优化项目采光通风系统，进一步提升室内热舒适性；完善园区绿化，美化环境，增加碳汇；最后配合完备的智慧调控系统，通过实时监控与自动调节实现建筑各系统的高效运行，提升项目的经济效益。



图 3.1-1 节能改造思路

1) 围护结构改造降低冷热需求。根据《建筑节能与可再生能源利用通用规

范》GB55015—2021,《绿色建筑评价标准》GB/T50378-2019 优化围护结构至绿建三星标准,主要措施为增大保温层厚度,降低围护结构(外墙、外窗、玻璃幕墙等)传热系数,提升建筑本身保温隔热性能,降低冷暖需求,从而降低冷热源系统能耗。

2) 冷热源系统优化提升运行性能。项目毗邻某大型湖泊水系,存在大量可利用的湖水,因地制宜发展湖水源热泵,既能减少化石能效消耗,同时可提升冷热源系统能效,节能减排。

3) 温湿度独立控制系统实现品位匹配。湖水源热泵单独处理显热负荷可采用较高供水温度,蒸发温度增加,提升热泵机组 COP,冷源系统能耗进一步降低,同时温湿度独立调节既能提升室内环境热舒适性,同时送风更加洁净,环境更加健康。

4) 建设光伏系统实现可再生能源利用。屋面与立面存在大量平面区域,加之武汉具有一定量的太阳辐照资源,因此可铺设光伏板,建立光伏源系统,通过光伏发电,提升可再生能源利用率,同时满足建筑部分能耗需求,达到节能减排目的。

5) 采光及通风系统改造提升舒适性。由于项目毗邻某大型湖泊水系,周边开阔,环境质量高,因此可考虑提升自然采光与自然通风的利用率,不仅能提升室内热舒适性,同时可一定程度上降低照明、通风能耗。

6) 园林绿化增加碳汇。绿色植物光合作用可吸收大量二氧化碳,因此保证园区绿化率能够吸收建筑全生命周期中的大量二氧化碳,增加项目碳汇,相对降低了项目全生命周期中的碳排放量。

7) 智慧能源管控系统实现高效运行。暖通空调、照明采光等系统应当设置实时监控设备,根据末端需求情况自动调节,提升舒适性同时降低能耗;同时应当实时监测分析各设备用电情况,优化能源分配结构,并根据电网电价,灵活机动启停/切换设备。

4. 亮点工作详细分析

4.1 围护结构改造降低冷热需求

4.1.1 改造前后传热系数规定

1) 《公共建筑节能设计标准》GB50189-2015

该标准自 2015 年 10 月 1 日起实施, 取代了原有的 GB 50189-2005 标准。标准中对围护结构的保温隔热性能、建筑设备及系统的能源利用效率、可再生能源利用率等进行了规定。以下表格中是在阅读学习该标准时统计的围护结构传热系数的有关规定, 发现时隔十年, 该标准中对围护结构的限制无法满足当下节能建筑、绿色建筑的要求。

表 4.1-1 公共建筑节能设计标准 GB50189-2015 中的参数要求

公共建筑节能设计标准 GB 50189-2015		
屋面传热系数及太阳得热系数SHGC		
围护结构部位	传热系数K [W/(m ² · K)]	太阳得热系数SHGC (东、南、西向/北向)
屋面	围护结构热惰性指标D≤2.5	≤0.40
	围护结构热惰性指标D>2.5	≤0.50
屋顶透光传热系数及太阳得热系数SHGC		
围护结构部位	传热系数K [W/(m ² · K)]	太阳得热系数SHGC (东、南、西向/北向)
屋顶透明部分(屋顶透明部分面积≤20%)	≤2.6	≤0.30
外墙传热系数及太阳得热系数SHGC		
围护结构部位	传热系数K [W/(m ² · K)]	太阳得热系数SHGC (东、南、西向/北向)
外墙(包括非透光幕墙)	围护结构热惰性指标D≤2.5	≤0.60
	围护结构热惰性指标D>2.5	≤0.80
楼板传热系数及太阳得热系数SHGC		
围护结构部位	传热系数K [W/(m ² · K)]	太阳得热系数SHGC (东、南、西向/北向)
底面接触室外空气的架空或外挑楼板	≤0.70	—
外窗、幕墙传热系数及太阳得热系数SHGC		
围护结构部位	传热系数K [W/(m ² · K)]	太阳得热系数SHGC (东、南、西向/北向)
单一立面外窗(包括透光幕墙)	窗墙面积比≤0.20	≤3.5
	0.20<窗墙面积比≤0.30	≤3.0
	0.30<窗墙面积比≤0.40	≤2.6
	0.40<窗墙面积比≤0.50	≤2.4
	0.50<窗墙面积比≤0.60	≤2.2
	0.60<窗墙面积比≤0.70	≤2.2
	0.70<窗墙面积比≤0.80	≤2.0
	窗墙面积比>0.80	≤1.8

2) 《建筑节能与可再生能源利用通用规范》GB55015—2021

基于 15 年国标中规定的传热系数, 在 19 年国家对于不同气候区进一步提出更高的限制要求。对比统计的两张表格来看, 发现在新规范中关于屋顶、外窗、幕墙的传热系数都进行了一定程度的提高。

对于国家近期强调的绿建三星建筑, 传热系数更是在通用规范的基础上降低

10%-20%。以达到高传热系数，低换热热量的目的。

表 4.1-2 建筑节能与可再生能源利用通用规范 GB55015—2021 中的参数要求

《建筑节能与可再生能源利用通用规范》GB 55015-2021		
屋面传热系数及太阳得热系数SHGC		
围护结构部位	传热系数K [W/(m ² · K)]	太阳得热系数SHGC (东、南、西向/北向)
屋面	≤0.40	
屋顶透光传热系数及太阳得热系数SHGC		
围护结构部位	传热系数K [W/(m ² · K)]	太阳得热系数SHGC (东、南、西向/北向)
屋顶透明部分 (屋顶透明部分面积≤20%)	≤2.2	≤0.30
外墙传热系数及太阳得热系数SHGC		
围护结构部位	传热系数K [W/(m ² · K)]	太阳得热系数SHGC (东、南、西向/北向)
外墙(包括非透光幕墙)	围护结构热情性指标D≤2.5 围护结构热情性指标D>2.5	≤0.60 ≤0.80
		—
楼板传热系数及太阳得热系数SHGC		
围护结构部位	传热系数K [W/(m ² · K)]	太阳得热系数SHGC (东、南、西向/北向)
底面接触室外空气的架空或外挑楼板	≤0.70	—
外窗、幕墙传热系数及太阳得热系数SHGC		
围护结构部位	传热系数K [W/(m ² · K)]	太阳得热系数SHGC (东、南、西向/北向)
单一立面外窗(包括透光幕墙)	窗墙面积比≤0.20 0.20<窗墙面积比≤0.30 0.30<窗墙面积比≤0.40 0.40<窗墙面积比≤0.50 0.50<窗墙面积比≤0.60 0.60<窗墙面积比≤0.70 0.70<窗墙面积比≤0.80 窗墙面积比>0.80	≤3.0 ≤2.6 ≤2.2 ≤2.2 ≤2.1 ≤2.1 ≤2.0 ≤1.8
		≤0.45 ≤0.40/0.45 ≤0.35/0.40 ≤0.30/0.35 ≤0.30/0.35 ≤0.25/0.30 ≤0.25/0.30 ≤0.20

3) 《绿色建筑评价标准》GB/T50378-2019 绿建三星

对于国家近期强调的绿建三星建筑，传热系数更是在通用规范的基础上降低10%-20%。以达到高传热系数，低换热热量的目的。

表 4.1-3 一星级、二星级、三星级绿色建筑的技术要求

	一星级	二星级	三星级
围护结构热工性能的提高比例，或建筑供暖空调负荷降低比例	—	围护结构提高 5%，或负荷降低 3%	围护结构提高 10%，或负荷降低 5%
严寒和寒冷地区住宅建筑外窗传热系数降低比例	5%	10%	20%
外窗气密性能	符合国家现行相关节能设计标准的规定，且外窗洞口与外窗本体的结合部位应严密		
围护结构热工性能的提高基准、严寒和寒冷地区住宅建筑外窗传热系数降低基准均为现行强制性工程建设规范《建筑节能与可再生能源利用通用规范》GB 55015 的要求。			
各场所的照度、照度均匀度、显色指数、统一眩光值应符合现行国家标准《建筑照明设计标准》GB/T 50034 的规定；			

屋顶和外墙应进行隔热性能计算，透光围护结构太阳得热系数与夏季建筑遮阳系数的乘积还应满足现行国家标准《民用建筑热工设计规范》GB50176 的要求。

4) 对比两个标准对传热系数的规定

基于以上标准的学习，在本项目中，以 15 年国标规定的传热系数标准作为改造前围护结构的传热系数，结合通用规范与绿建新标准作为改造后围护结构的传热系数。

如下图所示，展示了具体到外墙、屋顶、楼板、外窗等围护结构的传热系数，后续计算搭建建筑模型时以此为参考。

表 4.1-4 不同规范之间参数要求对比

	15 年国标	21 年国标+绿建三星
屋顶传热系数 K [$W/(m^2 \cdot K)$]	$<=0.5$	$<=0.32, 0.3$
外墙传热系数	$<=0.8$	$<=0.64, 0.62$
楼板传热系数	$<=0.7$	$<=0.56, 0.54$
外窗气密性等级	$>=6$	-
外门气密性等级	$>=4$	-
幕墙气密性等级	$>=3$	-
外窗有效通风换气面积比	$>=0.1$	-
东向外窗		
窗墙比	$<=0.7$	-
传热系数	$<=2.2$	$<=1.68, 1.66$
外窗太阳得热系数	$<=0.35$	$<=0.24$
可见光透射比	$>=0.4$	-
西向外窗		
窗墙比	$<=0.7$	-
传热系数	$<=2.2$	$<=1.68, 1.66$
外窗太阳得热系数	$<=0.3$	$<=0.20$
可见光透射比	$>=0.4$	-
南向外窗		
窗墙比	$<=0.7$	-
传热系数	$<=2.4$	$<=1.76, 1.66$
外窗太阳得热系数	$<=0.35$	$<=0.24$
可见光透射比	$>=0.4$	-
北向外窗		
窗墙比	$<=0.7$	-
传热系数	$<=2.4$	$<=1.76, 1.66$
外窗太阳得热系数	$<=0.4$	$<=0.28$

可见光透射比	>=0.4	-
--------	-------	---

4.1.2 模型具体围护结构构造

1) 屋顶构造对比

如下两表格展示了改造前后屋顶构造，其中组成材料相同，改造后通过将硬泡聚氨酯板厚度从 33mm 增加到 69mm，来保证传热系数变为原来的 60%。

表 4.1-5 屋顶构造改造前组成材料表

材料名称 (由上到下)	厚度 δ	导热系数 λ	蓄热系数 S	修正系数	热阻 R	热惰性指标
	(mm)	W/(m.K)	W/(m ² .K)	α	(m ² K)/W	D=R*S
面砖	10	1.000	0.009	1.00	0.010	0.000
水泥砂浆	45	0.930	11.370	1.00	0.048	0.550
卷材防水层	6	1.000	0.009	1.00	0.006	0.000
轻骨料混凝土 ($\rho=1760-1850$)	300	0.890	7.882	1.00	0.337	2.657
细石混凝土(钢筋混凝土)	40	1.740	17.200	1.00	0.023	0.395
硬泡聚氨酯板、喷涂硬泡聚氨酯	33	0.024	0.540	1.10	1.250	0.743
水泥砂浆	20	0.930	11.370	1.00	0.022	0.245
钢筋混凝土	200	1.740	17.200	1.00	0.115	1.977
石灰、水泥、砂、砂浆	20	0.870	10.750	1.00	0.023	0.247
各层之和 Σ	674	—	—	—	1.834	6.814
传热系数 $K=1/(0.15+\sum R)$	0.50					

表 4.1-6 屋顶构造改造后组成材料表

材料名称 (由上到下)	厚度 δ	导热系数 λ	蓄热系数 S	修正系数	热阻 R	热惰性指标
	(mm)	W/(m.K)	W/(m ² .K)	α	(m ² K)/W	D=R*S
面砖	10	1.000	0.009	1.00	0.010	0.000
水泥砂浆	45	0.930	11.370	1.00	0.048	0.550
卷材防水层	6	1.000	0.009	1.00	0.006	0.000
轻骨料混凝土 ($\rho=1760-1850$)	300	0.890	7.882	1.00	0.337	2.657
细石混凝土(钢筋混凝土)	40	1.740	17.200	1.00	0.023	0.395
硬泡聚氨酯板、喷涂硬泡聚氨酯	69	0.024	0.540	1.10	2.614	1.553
水泥砂浆	20	0.930	11.370	1.00	0.022	0.245

钢筋混凝土	200	1.740	17.200	1.00	0.115	1.977
石灰、水泥、砂、砂浆	20	0.870	10.750	1.00	0.023	0.247
各层之和 Σ	710	—	—	—	3.198	7.624
传热系数 $K=1/(0.15+\sum R)$			0.30			

2) 外墙构造对比

如下两表格展示了改造前后外墙构造，其中组成材料相同，改造后通过将岩棉板厚度从 15mm 增加到 30mm，来保证传热系数从 $0.8W/(m^2.K)$ 降低到 $0.62W/(m^2.K)$ 。

表 4.1-7 外墙构造改造前组成材料表

材料名称 (由外到内)	厚度 δ	导热系 数 λ	蓄热系 数 S	修正 系数	热阻 R	热惰性 指标
	(mm)	$W/(m.K)$	$W/(m^2.K)$	α	$(m^2 K)/W$	$D=R*S$
抹面层	5	1.000	0.009	1.00	0.005	0.000
岩棉板	12	0.040	0.750	1.20	0.250	0.225
聚合物砂浆 (网格布)	15	0.930	11.306	1.00	0.016	0.182
加气混凝土、泡沫混凝土 ($\rho=700$)	200	0.200	3.027	1.25	0.800	3.027
石灰、水泥、砂、砂浆	20	0.870	10.750	1.00	0.023	0.247
各层之和 Σ	252	—	—	—	1.094	3.682
传热系数 $K=1/(0.15+\sum R)$			0.80			

表 4.1-8 屋顶构造改造后组成材料表

材料名称 (由外到内)	厚度 δ	导热系 数 λ	蓄热系 数 S	修正 系数	热阻 R	热惰性 指标
	(mm)	$W/(m.K)$	$W/(m^2.K)$	α	$(m^2 K)/W$	$D=R*S$
抹面层	5	1.000	0.009	1.00	0.005	0.000
岩棉板	30	0.040	0.750	1.20	0.625	0.563
聚合物砂浆 (网格布)	15	0.930	11.306	1.00	0.016	0.182
加气混凝土、泡沫混凝土 ($\rho=700$)	200	0.200	3.027	1.25	0.800	3.027
石灰、水泥、砂、砂浆	20	0.870	10.750	1.00	0.023	0.247
各层之和 Σ	270	—	—	—	1.469	4.019
传热系数 $K=1/(0.15+\sum R)$			0.62			

3) 挑空楼板构造对比

如下两表格展示了改造前后外墙构造，其中组成材料相同，改造后通过将岩

棉板厚度从 58mm 增加到 78mm, 来保证传热系数从 $0.7W/(m^2.K)$ 降低到 $0.54W/(m^2.K)$ 。

表 4.1-9 挑空楼板构造改造前组成材料表

材料名称 (由上到下)	厚度 δ	导热系 数 λ	蓄热系 数 S	修正 系数	热阻 R	热惰性 指标
	(mm)	W/(m.K)	W/(m ² .K)	α	(m ² K)/W	$D=R*S$
钢筋混凝土	120	1.740	17.200	1.00	0.069	1.186
岩棉板	58	0.040	0.750	1.20	1.208	1.088
聚合物砂浆 (网格布)	10	0.930	11.306	1.00	0.011	0.122
抹面层	—	—	—	—	0.000	—
各层之和 Σ	188	—	—	—	1.288	2.395
传热系数 $K=1/(0.15+\sum R)$	0.70					

表 4.1-10 挑空楼板构造改造后组成材料表

材料名称 (由上到下)	厚度 δ	导热系 数 λ	蓄热系 数 S	修正 系数	热阻 R	热惰性 指标
	(mm)	W/(m.K)	W/(m ² .K)	α	(m ² K)/W	$D=R*S$
钢筋混凝土	120	1.740	17.200	1.00	0.069	1.186
岩棉板	78	0.040	0.750	1.20	1.625	1.463
聚合物砂浆 (网格布)	10	0.930	11.306	1.00	0.011	0.122
抹面层	—	—	—	—	0.000	—
各层之和 Σ	208	—	—	—	1.705	2.770
传热系数 $K=1/(0.15+\sum R)$	0.54					

4) 外窗构造对比

如下表所示, 对比外墙、屋顶的传热系数, 发现外窗的传热系数明显要高, 因此, 有效降低改造前后外窗传热系数对建筑冷负荷降低有明显的改善。在该项目中, 改点被有效实施: 改造前后外窗、幕墙的传热系数, 从改造前的 $2.3W/(m^2.K)$ 变为改造后的 $1.66W/(m^2.K)$ 。

表 4.1-11 外墙构造改造前组成材料表

序号	构造名称	传热系数	窗遮阳系数	可见光透射比
1	60 系列平开(遮阳型 6Low-E 双银 +12A+6 暖边)(隔热条宽 20mm)	2.300	0.285	0.550

2	60 系列平开(遮阳型 6Low-E 双银 +12A+6 暖边)(隔热条宽 20mm)	2.300	0.285	0.550
---	---	-------	-------	-------

表 4.1-12 外墙构造改造后组成材料表

序号	构造名称	传热系数	窗遮阳系数	可见光透射比
1	75 系列平开(遮阳型 6Low-E 双银 +12Ar+6+12Ar+6 充氩气 暖边)(隔热条宽 34mm)	1.660	0.230	0.500
2	75 系列平开(遮阳型 6Low-E 双银 +12Ar+6+12Ar+6 充氩气 暖边)(隔热条宽 34mm)	1.660	0.230	0.500

4.1.3 需求侧供冷、供暖对比

1) 模拟周期

为对比围护结构对于建筑冷负荷的影响，该项目中，控制变量。模拟全年负荷，供冷期 5.15-10.15；供暖期 11.30-2.28。

2) 全年冷暖需求

我国一直强调建筑节能，在 2020 年提出于 30 年实现碳达峰，60 年实现碳中和，以及根据 2022 年中国节能报告中的数据，在 20 年建筑总量达到 660 亿 m²，二氧化碳排放达到 22 亿 t，建筑运行阶段碳排放占比 19%，可见降低公共建筑碳排放对节能减排具有重要意义。

从本项目中通过模拟发现围护结构传热系数的有效降低对于建筑供暖、供冷都有显著影响。节能的最终目标是降低耗电量，绿建软件很好的衡量了改造前后的耗电指标：供冷、供暖指标分别下降 1.54(kWh/m²·a)、1.82(kWh/m²·a)。从侧面反映随着时间的推移，标准也应该进行实时的更新。

表 4.1-13 优化外围护结构前的建筑冷热需求

系统名称\负荷	供暖需求 (kWh)	供暖指标 (kWh/m ² ·a)	供冷需求 (kWh)	供冷指标 (kWh/m ² ·a)
建筑总计	84939	5.19	721206	44.04

表 4.1-14 优化外围护结构前的建筑冷热需求

系统名称\负荷	供暖需求 (kWh)	供暖指标 (kWh/m ² ·a)	供冷需求 (kWh)	供冷指标 (kWh/m ² ·a)
建筑总计	55235	3.37	695984	42.50

3) 负荷分项统计

以上是对全年指标的对比分析。对比改造前后的耗热分项，新风与渗透占据较大一部分，但是考虑到室内空气的洁净度，人员的安全，保证最小程度的通风换气是必须的，因此可以考虑到后续安装回热装置，对进入室内的新风进行预热，减少建筑热负荷。

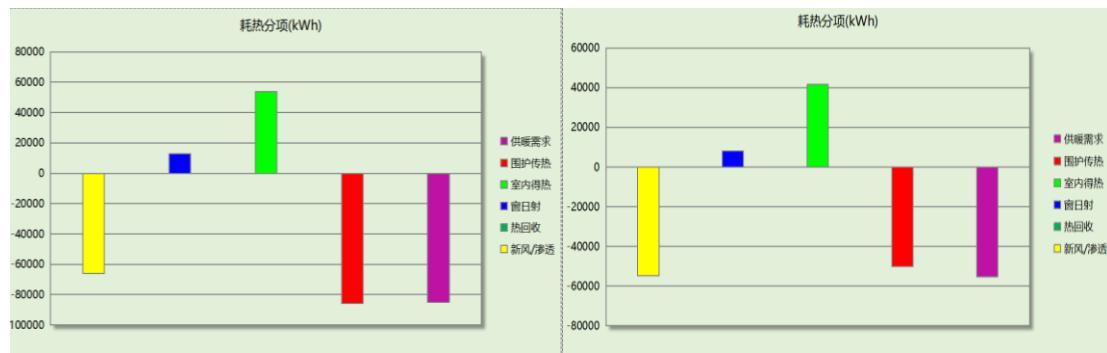


图 4.1-1 优化外围护结构前后的建筑耗热分项

4) 逐月负荷表

对比负荷峰值，发现与室外空气密切相关，供冷负荷峰值在 8 月份，不同的改造后的峰值会低一点。

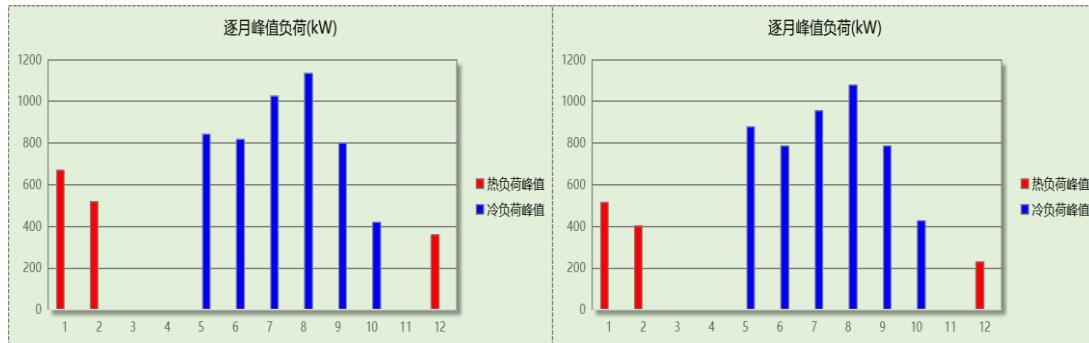


图 4.1-2 优化外围护结构前后的建筑逐月峰值负荷

4.1.4 总结

综上所述，降低围护结构的传热系数可以从需求侧减少供供暖需求。在建筑设计、建筑改造中，依据现有标准进行围护结构传热系数的调整、模拟帮助更好的节能减排。

4.2 冷热源系统优化提升运行性能

由于项目毗邻某大型湖泊水系，存在可利用的湖水源，因此针对冷热源的节能优化为采用湖水源热泵进行供冷供热。

不同负荷情况机组 COP 计算由 Matlab 编程实现，热泵模型代码逻辑如图 4.2-1 所示，以供暖工况为例，通过输入供热量与冷凝侧供水温度等参数，同时

假定 COP，以此计算得到冷凝温度与蒸发温度，计算实际 COP，通过判定误差是否满足要求从而实现整个热泵系统模型的计算。代码模型编写完成后，输入建筑逐时负荷与建筑负荷率数据，可计算得到机组 COP、热泵功耗、水泵功耗等数据，相应平均可求得不同负荷率下机组平均性能及能耗。

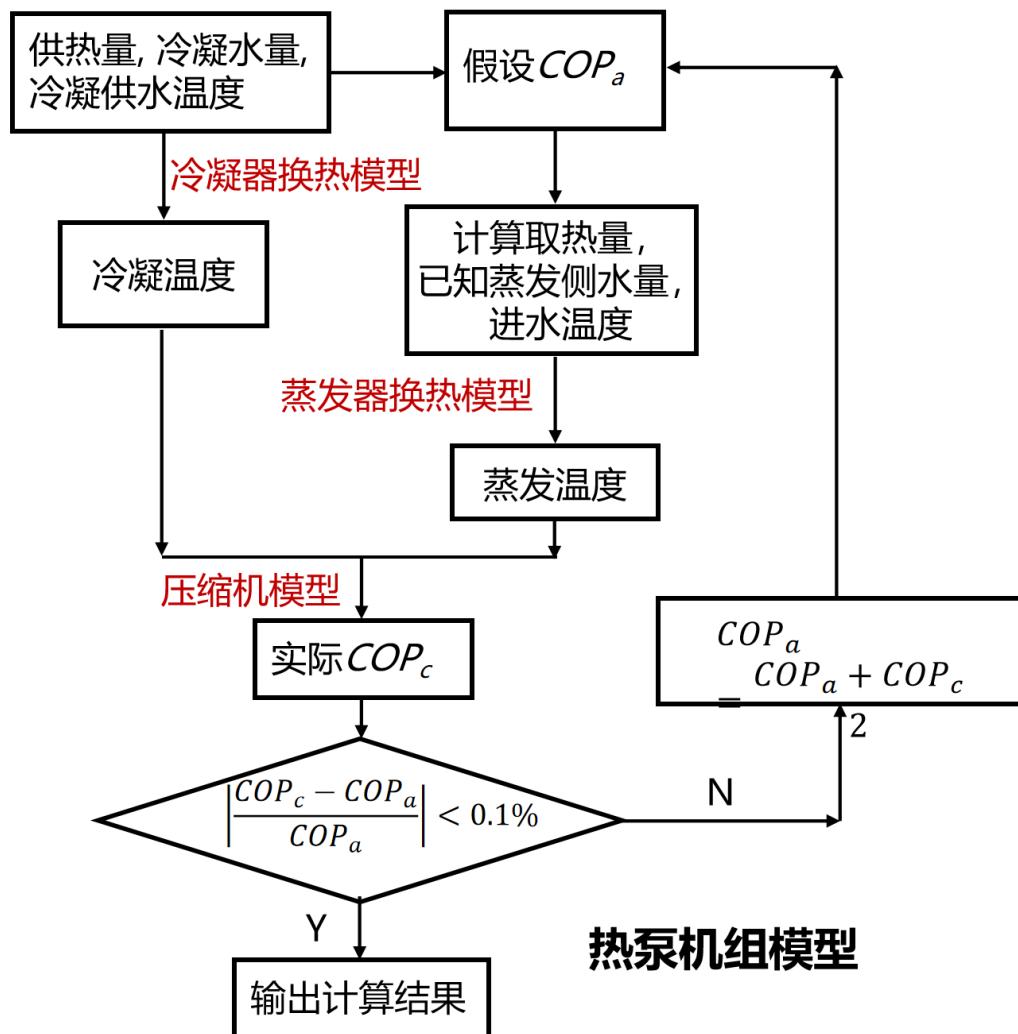


图 4.2-1 热泵运行代码逻辑（供暖）

计算得到机组在负荷率为 20%、40%、60%、80%、100%的情况下，机组供冷 COP 分别为 9.5、8.9、8.1、7.7、8.2，供热 COP 分别为 4.7、6.1、5.1、5.5、5.0。输入代码模拟结果至绿建斯维尔能耗计算 BESI2024 软件，设置对应冷热源参数，具体参数设置如图 4.2-3、4.2-4 所示。

系统设置 4 台 300kW 等容量热泵机组，供冷期常开 4 台热泵，供暖期常开 2 台。用户侧、水源侧各设置 4 用 1 备变频水泵，水泵先并联、随后与热泵机组串联，供冷期常开 8 台，供暖期常开 4 台。

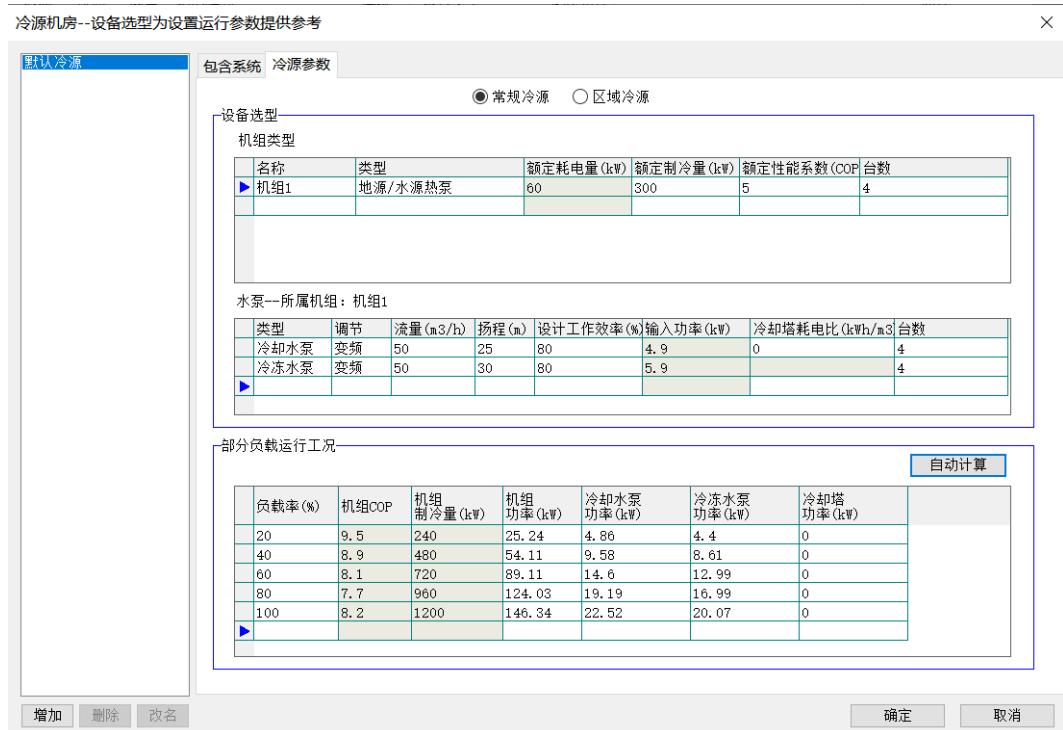


图 4.2-2 冷源机房参数设置

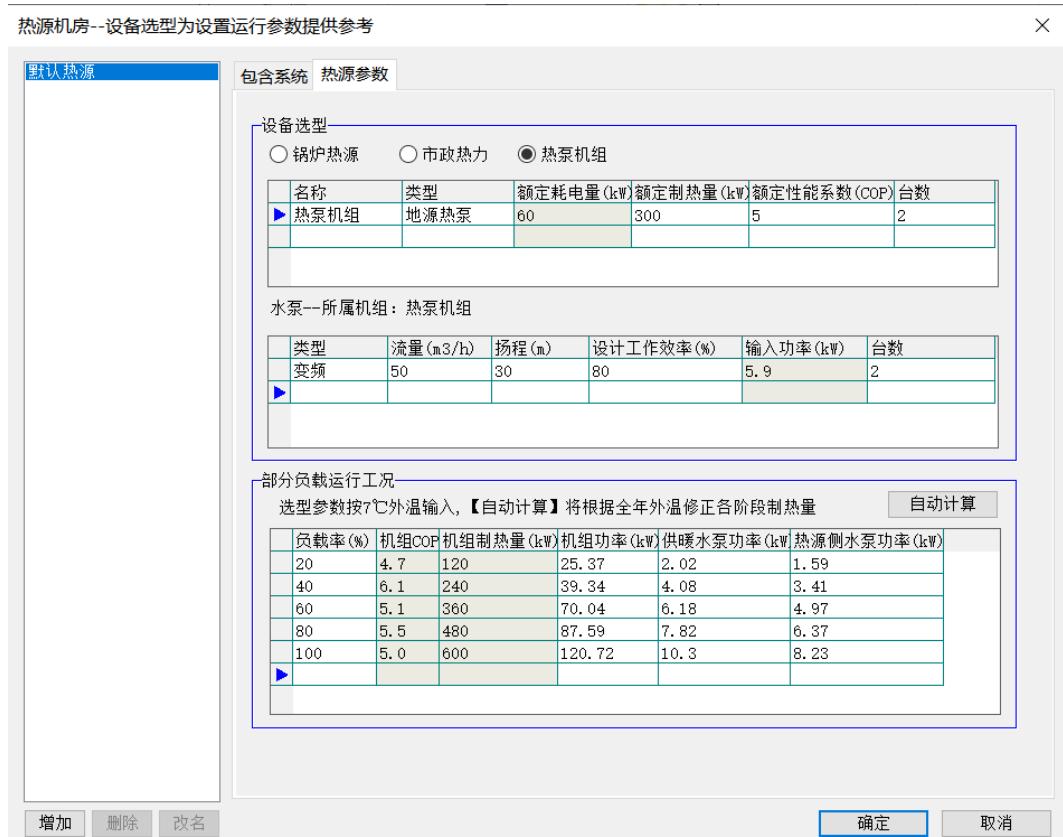


图 4.2-4 热源机房参数设置

在优化围护结构的基础之上进一步进行能耗计算, 计算得到全年各类单位能耗结构如表 4.2-1、图 4.2-5 所示。

表 4.2-1 全年单位能耗分项统计结果-采用湖水源热泵

能耗分类	能耗子类	设计建筑 (kWh/m ²)	备注
建筑负荷	耗冷量	37.08	
	耗热量	4.68	
	冷热合计	41.76	
热回收	供冷	0.00	
	供暖	0.00	
	冷热合计	0.00	
供冷电耗 (Ec)	中央冷源	4.39	
	冷却水泵	0.94	
	冷冻水泵	0.84	
	冷却塔	0.00	
	多联机/单元式空调	0.00	
	供冷合计	6.17	
供暖电耗 (Eh)	中央热源	0.91	
	供暖水泵	0.13	
	热源侧水泵	0.11	
	多联机/单元式热泵	0.00	
	供暖合计	1.14	
空调风机电耗 (Ef)	新排风	1.56	
	风机盘管	0.05	
	全空气系统	0.00	
	风机合计	1.61	
照明电耗(El)		9.47	
插座设备电耗(Ej)		30.31	
其他电耗(Eo)	电梯	1.83	
	独立排风机	0.00	
	生活热水	12.74	扣减了太阳能热水
	其他设备	0.00	
	其他合计	14.57	
可再生发电 (Er)	光伏发电(Ep)	0.00	
	风力发电(Ew)	0.00	
	合计	0.00	
建筑总能耗(E1): 电耗(kWh/m ²)		63.28	$E1=Ec+Eh+Ef+El+Ej+Eo-Er$

其中，插座设备电耗占比 48%，供冷供暖及空调风机合计 14%，照明电耗占

比 15%，全年总能耗 103.62 万 kWh。

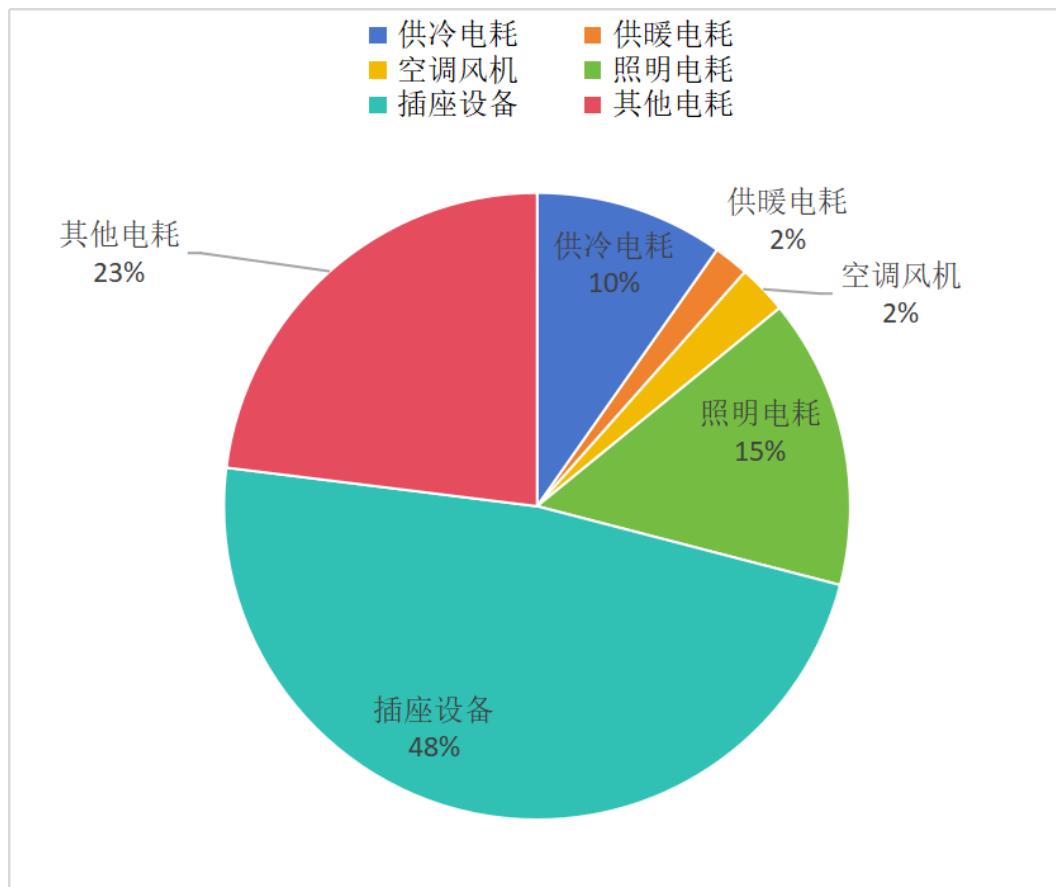


图 4.2-5 全年总能耗构成-优化冷热源系统

相比仅优化围护结构，能耗进一步降低 $4.85\text{kWh}/\text{m}^2$ ，下降了 6.98 个百分点，合 7.94 万 kWh。同时相比常规冷热源系统，湖水源热泵系统没有冷却塔电耗支出与燃气费用，在节能减排上具有更大的优势。

4.3 温湿度独立控制实现品位匹配

温湿度独立控制作为暖通空调系统中的先进技术，通过独立控制室内温度与湿度，实现对室内热湿环境的更精确调控，提升末端环境热舒适性，满足个性化末端环境需求。

利用温湿度独立控制，通过湖水源热泵处理显热负荷，降低负荷峰值，同时可适当放宽用户侧供水温度，增加蒸发温度，从而提升机组 COP，提升系统能效；通过溶液除湿系统处理潜热负荷，虽然会带来一定的再生负荷，但溶液除湿设备简单，便于维护检修，同时能减少风机盘管内霉菌滋生，提供更洁净的送风环境，保持末端健康环境。

由于绿建斯维尔软件暂无相关软件，本项目仍采用 Matlab 模型编程计算温

湿度独立控制方案能耗，热泵模型计算逻辑同湖水源热泵。输入参数方面，仅输入夏季显热负荷及其负荷率，计算得到机组 COP、功耗等数据，计算结果及与原湖水源热泵系统对比结果如表 4.3-1 所示。

表 4.3-1 湿湿度独立控制与原湖水源系统运行性能对比

	常规运行	温湿度独立控制系统
建筑面积 m ²	16375	
供冷指标 GJ/m ²	0.15	
供冷指标 W/m ²	42.51	
累计显热供冷量 GJ	1594.97	
累计潜热供冷量 GJ	910.83	
累计供冷量 GJ	2505.80	
累计显热供冷量 万 kWh	44.30	
累计潜热供冷量 万 kWh	25.30	
累计供冷量 万 kWh	69.61	
热泵装机容量 kw	300	
热泵台数 台	4	3
热泵机组电耗 万 kWh	8.50	2.99
用户侧水泵电耗 万 kWh	1.39	0.88
源侧水泵电耗 万 kWh	1.56	0.94
溶液除湿电耗 万 kWh	/	3.61
风机电耗 万 kWh	2.64	0.96
总电耗 万 kWh	14.08	9.39
热泵机组 COP	8.38	15.98
用户泵 WTF	50.17	50.17
源侧泵 WTF	50.15	50.16
溶液除湿 COP	/	7
系统 EER	6.17	7.42
ICOP	12.32	23.50
DCOP	0.68	0.68

由表 4.3-1 数据可以看出，对比原有系统，温湿度独立控制系统所需的热泵装机台数减少，热泵初投资相应减少，同时由于其更高的用户侧供水温度，蒸发温度较高，因此 ICOP 更高，机组 COP 更高，系统能效更好，尽管增加了溶液除湿的再生功耗，但热泵机组整体功耗大幅下降，因此系统总能耗仅为 9.39 万 kWh，相比原湖水源热泵能耗降低了 4.69kWh，下降了 33.31%。

而从整个系统来看，采用温湿度独立控制后，全年能耗分项统计结过如表

4.3-2、图 4.3-1 所示。

表 4.2-5 全年单位能耗分项统计结果-温湿度独立控制

能耗分类	能耗子类	设计建筑 (kWh/m ²)	备注
建筑负荷	耗冷量	37.08	
	耗热量	4.68	
	冷热合计	41.76	
热回收	供冷	0	
	供暖	0	
	冷热合计	0	
供冷电耗 (Ec)	中央冷源	1.82	
	冷却水泵	0.54	
	冷冻水泵	0.58	
	冷却塔	0	
	多联机/单元式空调	0	
	供冷合计	2.94	
供暖电耗 (Eh)	中央热源	0.91	
	供暖水泵	0.13	
	热源侧水泵	0.11	
	多联机/单元式热泵	0	
空调风机电耗 (Ef)	供暖合计	1.15	
	新排风	2.46	
	风机盘管	0	
	全空气系统	0	
	风机合计	2.46	
照明电耗(EI)		9.47	
插座设备电耗(Ej)		30.31	
其他电耗(Eo)	电梯	1.83	
	独立排风机	0	
	生活热水	12.74	扣减了太阳能热水
	其他设备	0	
	其他合计	14.57	
可再生能源 (Er)	光伏发电(Ep)	0	
	风力发电(Ew)	0	
	合计	0	
建筑总能耗(E1): 电耗(kWh/m ²)		60.9	$E1=Ec+Eh+Ef+EI+Ej+Eo-Er$

其中，插座设备电耗占比 50%，供冷供暖及空调风机合计 11%，照明电耗占比 15%，全年总能耗为 99.72 万 kWh。

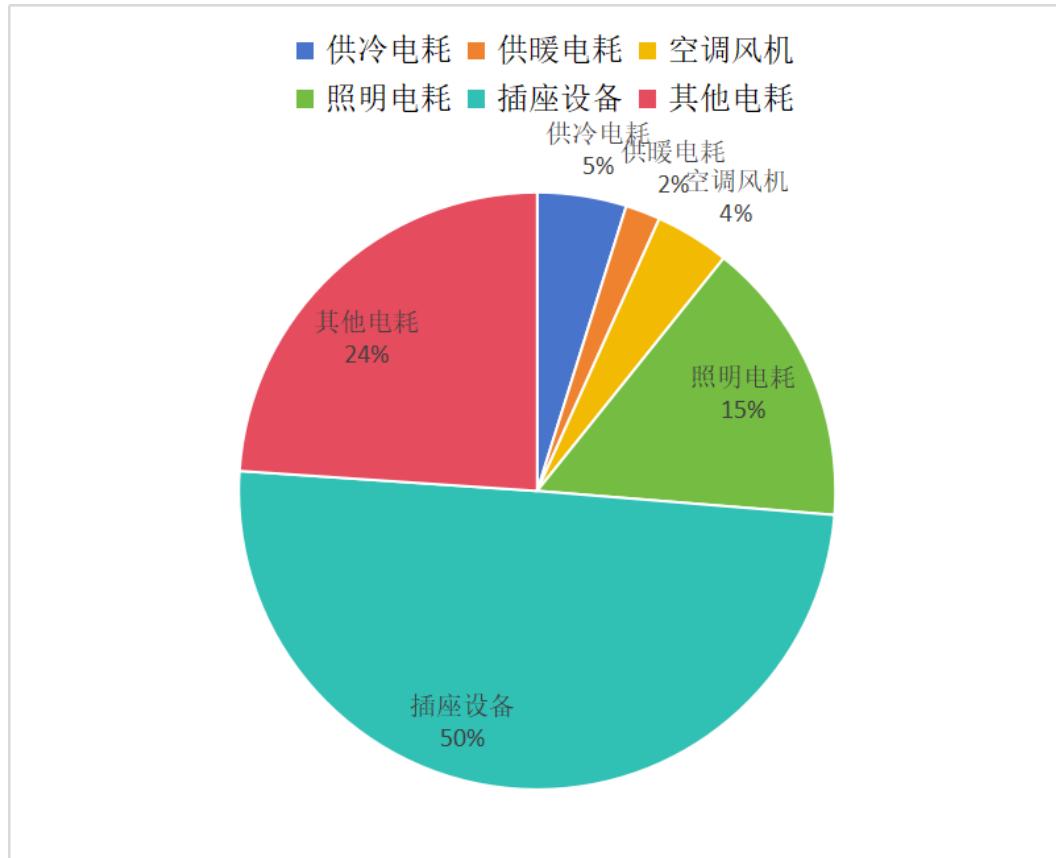


图 4.3-1 全年总能耗构成-温湿度独立控制

采用温湿度独立控制，相比原湖水源热泵系统，能耗进一步降低 2.38kWh/m^2 ，下降了 3.42 个百分点，合 5.60 万 kWh，同时独立控制温度与湿度能够进一步提升末端热舒适性，满足个性化环境需求。

4.4 建设光伏系统实现可再生能源利用

太阳能作为一种辐射能，清洁并取之不尽，是极佳的可再生能源。考虑本建筑屋面具有较大平顶空间，同时该地具备一定太阳辐照资源条件，因此我们选择在办公楼表面铺设光伏板，通过光伏发电满足建筑本身部分能耗需求。

4.4.1 光伏板铺设

根据武汉气象条件，我们首先对办公楼进行辐照分析计算，以便于确定光伏板铺设位置。日照时数设置选择对 2001 年进行分析计算。具体设置参数如图 4.4-1 所示。根据计算结果如图 4.4-2，我们可以知本项目的南侧立面的辐照强度最为可观，而建筑立面原设计采用玻璃幕墙可以替换为单晶硅组件与玻璃幕墙结合，组成光伏建筑一体化，同时，在五楼屋顶布置单晶硅光伏阵列板。光伏铺设结果

如图 4.4-3 所示。



图 4.4-1 日照时数设置

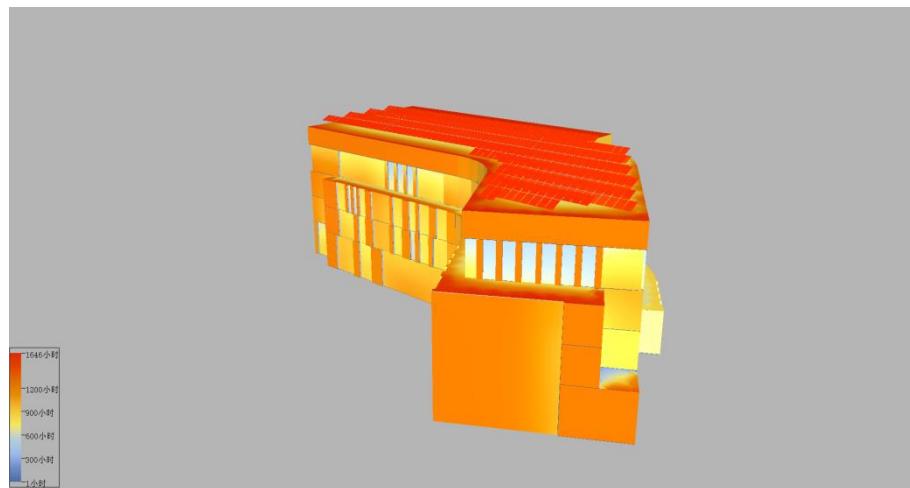


图 4.4-2 辐照分析结果图

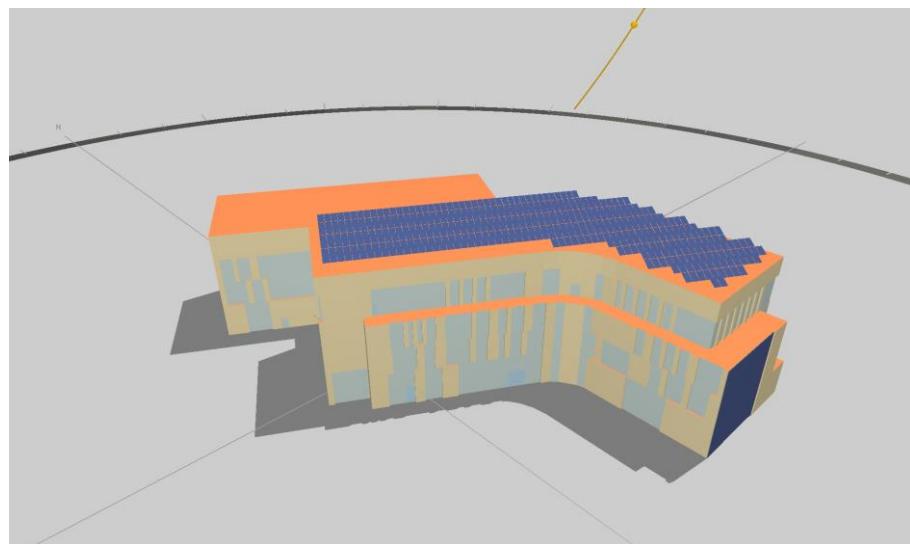


图 4.4-3 光伏铺设结果

4.4.2 光伏组件选择及参数设置

武汉太阳能资源丰富、辐射量大、光照强度高，因此我们选择在屋顶平面铺设单晶硅光伏组件，在南立面铺设多晶硅光伏组件，光伏组件参数如表 4.4-1 所示。

表 4.4-1 光伏组件参数

序号	尺寸 mm	类型	数量	峰值功率 Wp	每瓦成本元	温度系数	标准工作温度	首年衰减	其它年衰减
1	1640×992	多晶硅	122	255	3	0.5	25°C	5%	0.7%
2	1640×992	单晶硅	460	260	3	0.5	25°C	5%	0.7%

光伏系统的发电效率受多方面的影响，总效率应包含光伏组件效率、逆变器效率、交流并网效率等。各影响因素参考值如表 4.4-2 所示。

表 4.4-2 光伏系统计算参数表

光伏系统信息			
组件类型	见组件详表	组件数量	582
总装机量	119.855kW	组件安装方式	固定集成
组件面积	946 m ²	逆变器效率	98.5%
逆变器功率	22.5kW	线路损耗效率	1%
材料表面污染效率	1%	修正系数	1%
系统综合效率		88.2%	

4.4.3 光伏发电量

光伏参数设置完成后，首年发电量计算结果如表 4.4-3 和图 4.4-4 所示。

表 4.4-3 单晶硅光伏发电板首年发电量

月份	太阳能总辐照量 kWh/m ²	交流发电量 MWh	占全年百分比%
1月	53.8	5.79	5.3
2月	60.0	6.63	6.1
3月	81.7	8.87	8.1
4月	89.7	9.72	8.9
5月	104.3	11.36	10.4
6月	102.8	11.02	10.1
7月	128.2	13.47	12.4
8月	116.8	12.03	11.1
9月	92.9	9.51	8.7
10月	77.8	7.96	7.3
11月	65.9	6.69	6.1
12月	54.6	5.74	5.3
全年	1028.5	108.787	100
年总发电量		108.8MWh	



图 4.4-4 首年发电量

从计算结果得知, 光伏系统首年发电量为 108.8MWh, 而该办公楼全年总能耗为 788.6MWh, 通过铺设光伏, 能耗下降至 679.7MWh。光伏发电被办公楼全部消纳, 不需要接入公共电网。光伏发电量得到充分利用, 既可以节约能源利用, 又可以降低办公楼的电费支出, 提高其经济效益。

4.4.4 经济效益分析

光伏发电的经济性分析是指对太阳能光伏发电系统的成本和效益进行定量或定性的评价。光伏发电的经济性受到多种因素的影响, 如系统本身的投资、技术、可靠性, 以及应用地区的环境、资源、需求等。经济效益分析如表 4.4-4 所示。

表 4.4-4 经济效益分析表

成本		收益	
总装机量 (kW)	119.86	首年发电量 (MWh)	108.79
每瓦成本 (元)	见组件详表	25 年发电量 (MWh)	2399.4
组件占总投资比例(%)	40	电价 (元/度)	0.55
总投资 (万元)	90.02	总收益 (万元)	131.96

4.4.5 减排效益分析

光伏发电的节能减排计算对太阳能光伏发电系统的环境影响和节约能源的效果进行评价。项目建成后, 根据光伏发电工程发电量, 与传统火电项目相比, 可计算出节约化石能源总量, 及对应减排温室气体和其他污染物总量。根据《中国电力行业年度发展报告 2022》中统计的单位火电发电量 CO₂、SO₂、氮氧化

物等排放量进行计算，计算结果表 4.4-5 所示：

表 4.4-5 减排效益分析

参数	换算数值	换算单位	年均值	25 年	单位
发电量	-	-	95.97	2399.36	MWh
标准煤	0.3015	kg/kWh	28.94	723.40	吨
电力烟尘	0.0022	kg/kWh	0.21	5.28	吨
CO2	0.828	kg/kWh	79.47	1986.65	吨
SO2	0.0101	kg/kWh	0.97	24.23	吨
NOX	0.0152	kg/kWh	1.46	36.48	吨

4.4.6 光储直柔

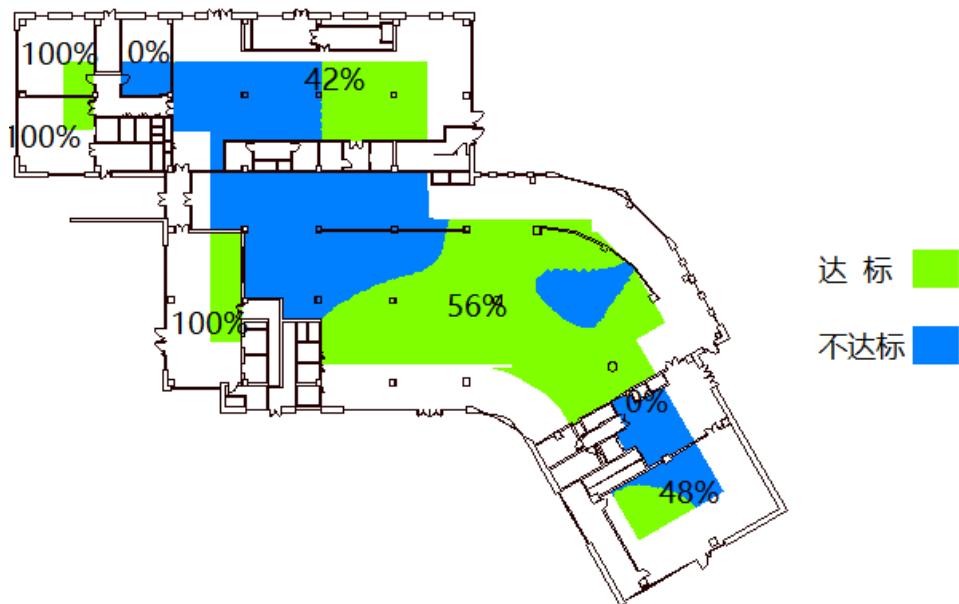
“光储直柔”系统可以优化调度和使用电力，降低能源消耗和碳排放。太阳能的利用在很大程度上受到天气的影响，在阴天、雨天和冬季等光照不足的情况下，太阳能的发电效率会显著降低。根据此特点，在晴朗天气太阳能充足时，光伏发电量有所剩余，可以利用储能装置将电能转化为其他形式的能量先进行储存，在阴雨天气等发电量有所降低的情况下，将储存的其他形式的能量转化为直流电供给办公楼内用电设备使用。

4.5 采光及通风系统改造提升舒适性

4.5.1 内区采光

天然光环境是人们长期习惯和喜爱的工作环境，天然光相较于人工光更有利于工作、生活、保护视力和提高劳动生产率，因此我们通过绿建斯维尔对办公楼室内采光进行检测。

通过对项目中内区主要功能房间采光系数的计算，求得内区中各个主要功能房间的达标面积，统计全部达标面积除以建筑内区主要功能房间的总面积，最终得到建筑内区采光面积达标比例，各层采光达标区域如下图所示：



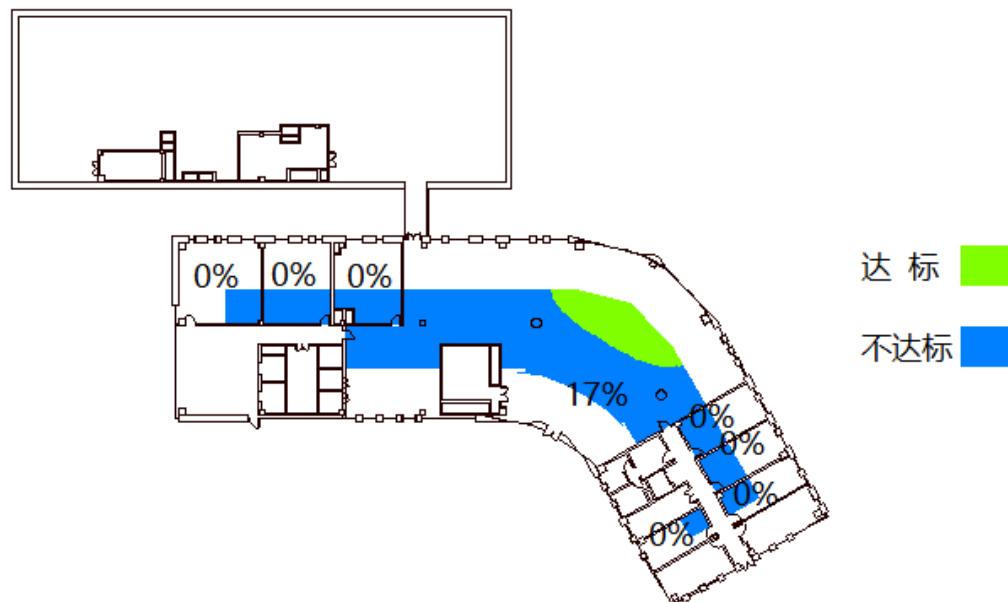
4.5-1 一层采光达标区域



4.5-2 二层采光达标区域



4.5-3 三层采光达标区域



4.5-4 四层采光达标区域

根据《绿色建筑评价标准》GB/T 50378-2019 要求，需统计公共建筑内区采光达标面积比例作为得分依据。

表 4.5-1 本项目中建筑内区采光情况统计

内区总面积 (m ²)	达标面积 (m ²)	面积比例 R _A (%)	得分
3306.61	831.39	25	0

4.5.2 动态采光

动态采光评价指标与传统的静态评价指标的先进之处在于将建筑周围随着天气状况发生变化的天然光的不同时节、不同日期的变化与特征进行考虑。基于

天然光气候数据的建筑采光全年动态分析，考虑了天空类型多样化、建筑朝向、地理位置以及遮阳、采光辅助系统的应用，能更真实全面的反映室内天然采光状况。

项目中主要功能房间内进行逐时照度计算，统计全年照度达标的时间，满足时长要求的区域即可参与达标统计，如下图所示：

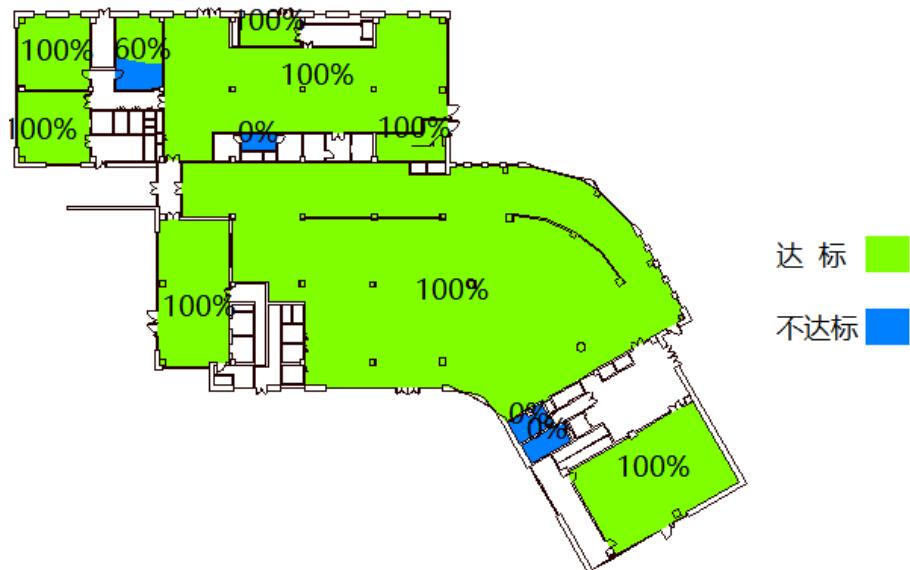


图 4.5-5 一层满足全年照度达标时长要求的区域图

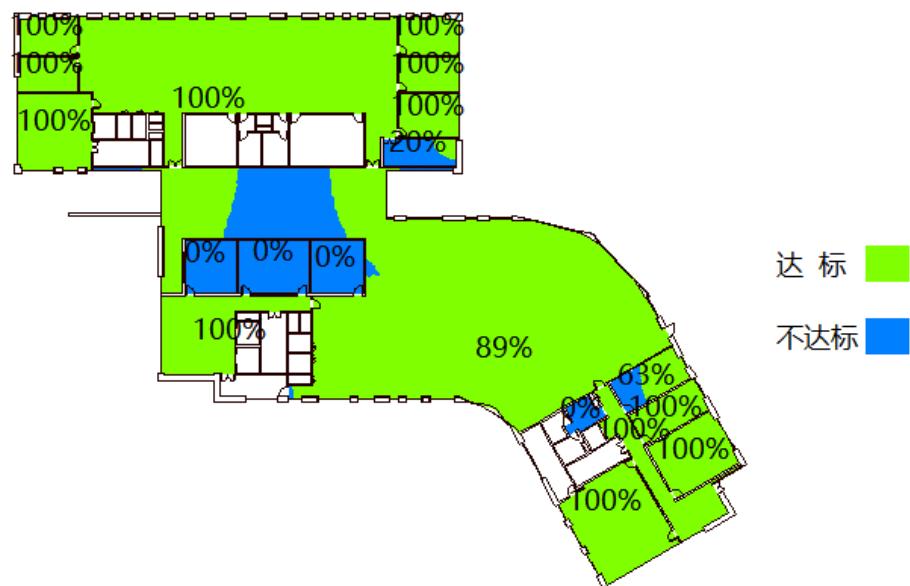


图 4.5-6 二层满足全年照度达标时长要求的区域图

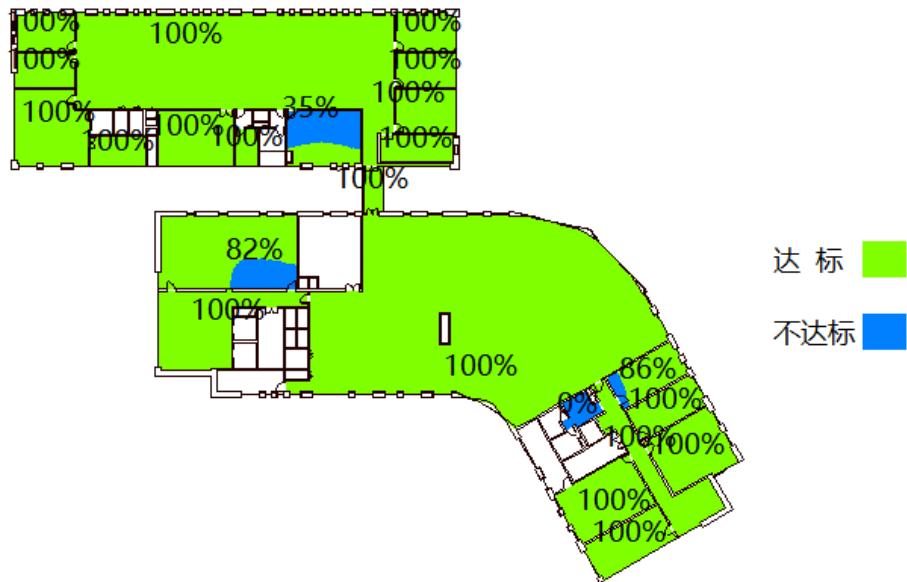


图 4.5-7 三层满足全年照度达标时长要求的区域图

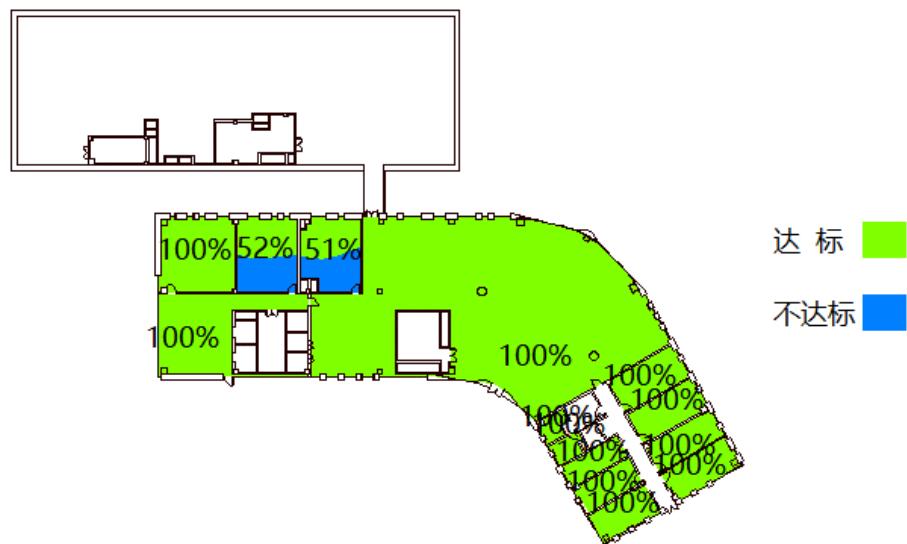


图 4.5-8 四层满足全年照度达标时长要求的区域图

《绿色建筑评价标准》GB/T 50378-2019 的 5.2.8 条对公共建筑主要功能房间的动态采光作出要求。本项目通过对建筑室内空间进行全年动态采光分析，可知此项得分情况，如下表所示：

表 4.5-2 本项目全年动态采光得分

采光总面积 (m ²)	达标时数 (h/d)	标准要求 (h/d)	得分
7881.38	6.0	4	3

4.5.3 建筑通风节能设计理念

在降低系统能耗方面，我们还希望采用自然通风，依靠室外风力造成的风压和室内外空气温度差造成的热压，促使空气流动，使得建筑室内外空气交换，降

低部分能耗，达到节能效果。

具体控制则通过：处于工作时段时，当室外焓值低于送风状态焓值时，采用全新风进行自然冷却；当室外焓值高于送风状态焓值时，保持最小新风量运行；当处于非工作时段时，若室内外温差值超过 2°C ，则开启外窗，消除室内余热；否则，保持外窗关闭。流程图如下：

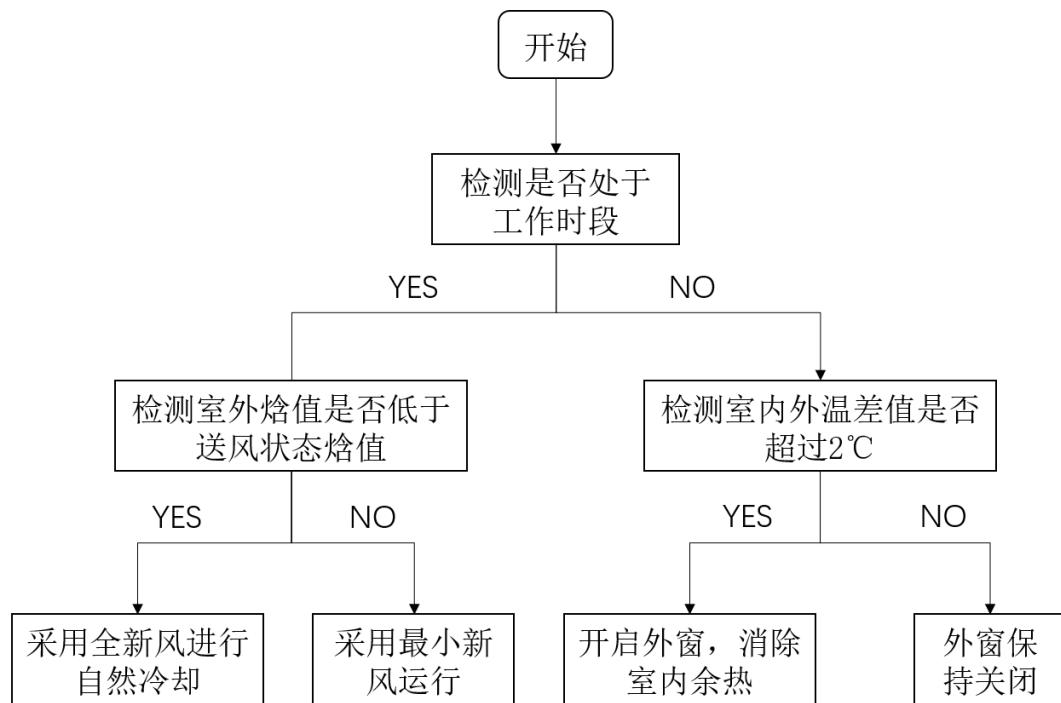


图 4.5-9 建筑通风控制逻辑框图

4.5.3 建筑通风节能具体做法

在室外通风模拟中，我们优化了室外人活动区域和乔木林地区域的布置，主要目的是利用树林对来风进行遮挡，形成回流，消除人活动区域的无风区，同时由于室外区域区域开阔，不会形成涡旋区，满足设计标准。

下图为改造前后对比，能够明显发现室外风场分布更加合理，基本在人活动区不会出现风速过高和过低的情况出现。

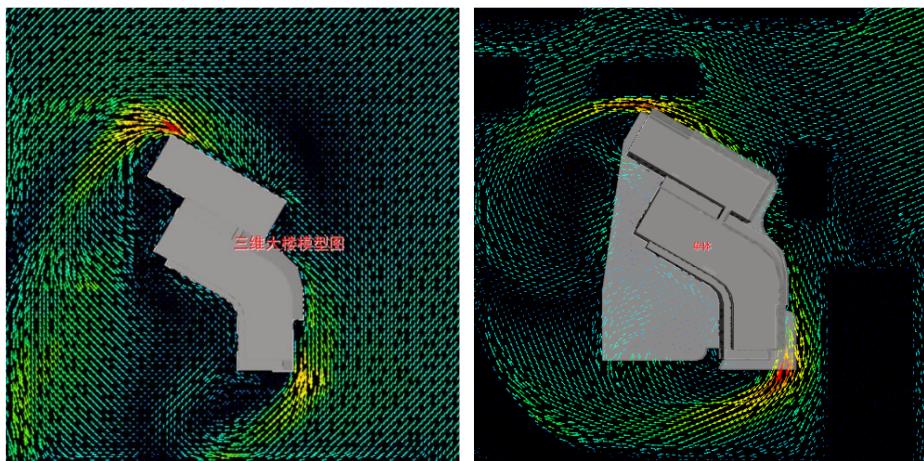


图 4.5-10 改造前后室外风场分布

而在室内通风及空气质量方面，我们优化了窗口结构和室内建材，使 97% 以上主要功能房间的换气次数满足最高标准，确保在实行上述自然通风消除室内余热时能够做到全覆盖。同时换气次数和建材的优化使室内空气品质远远优于绿建三星最高标准，通过输入室外大气颗粒物信息，通风净化措施，房间渗透风量，对室内颗粒物的浓度进行计算，其中室内颗粒物和有机物含量最大值浓度均低于最高标准的 50% 以上。以下是具体结果：

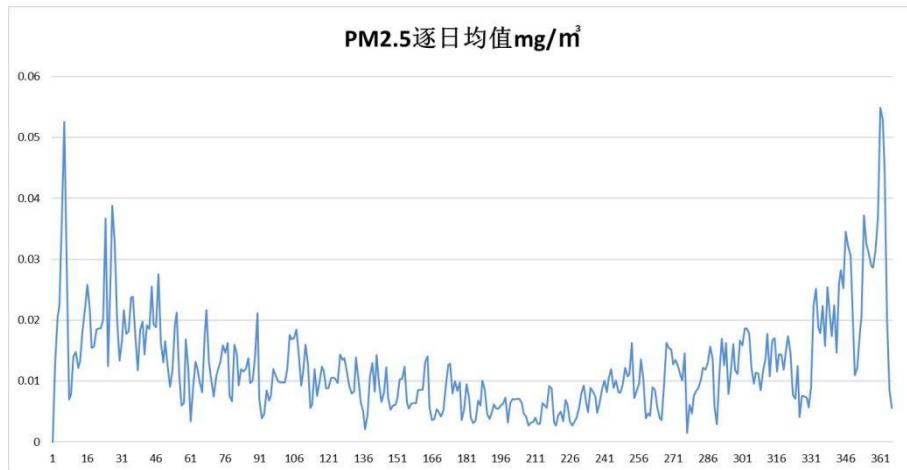


图 4.5-11 室内 PM2.5 逐日平均值变化图

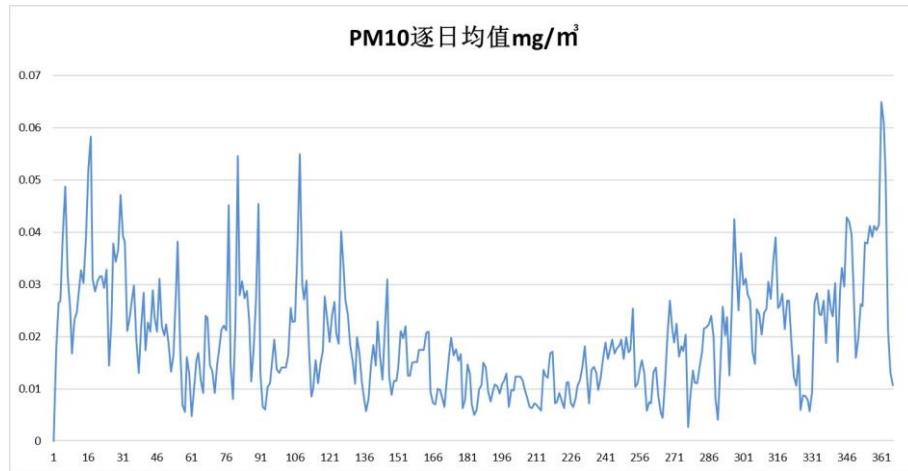


图 4.5-12 室内 PM10 逐日平均值变化图

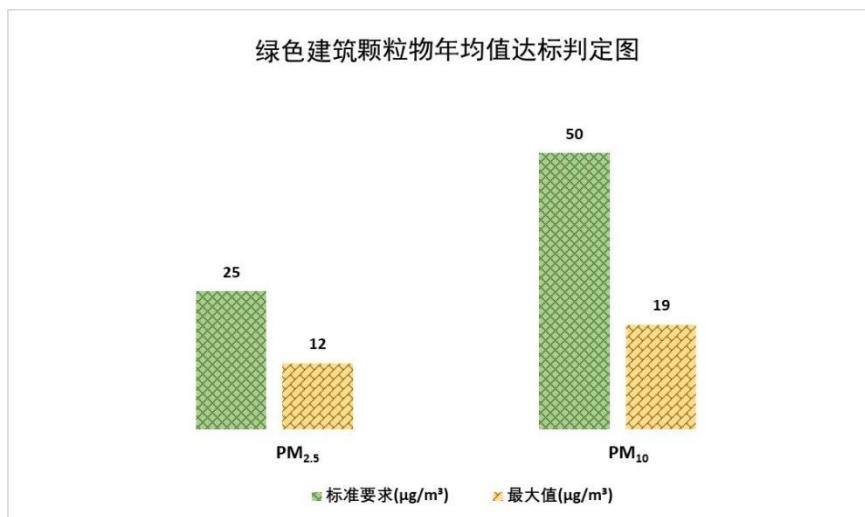


图 4.5-13 绿色建筑颗粒物年均达标判定图

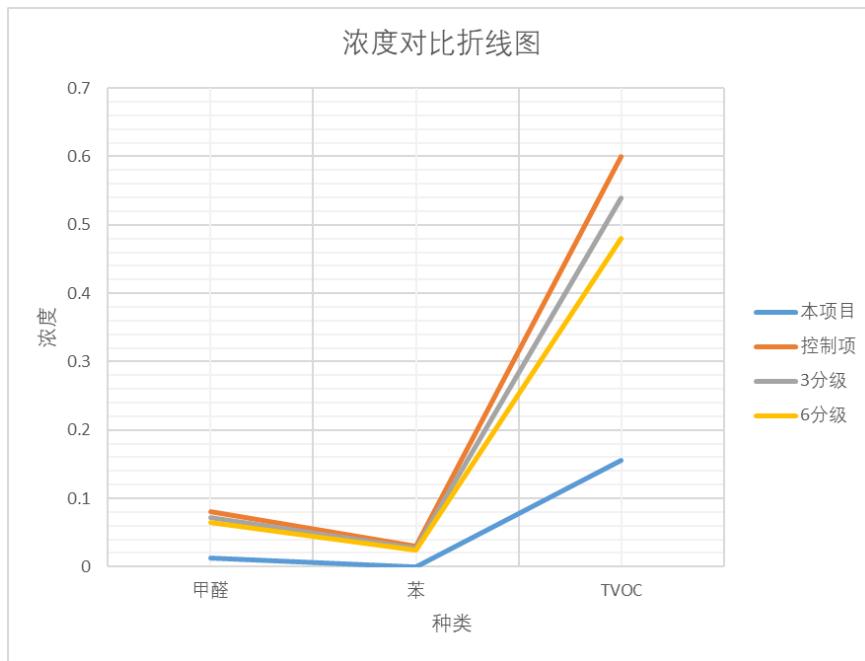


图 4.5-14 室内不同颗粒物浓度折线对比图

4.6.1 室内热舒适

室内热舒适对于人们的健康、工作效率和生活质量至关重要。一个适宜的温度环境能够预防疾病、提高工作效率，并带来更好的居住体验。因此，我们选择对办公楼的室内热舒适进行评价。

我们通过绿建斯维尔软件检测办公楼内各主要功能房间的室内热舒适，并生成各楼层对应的 PMV-PPD 及影响热舒适的各参数云图，结果如下图所示。通过室内热舒适软件计算，我们得出办公楼主要功能房间热湿环境评价指标 PMV 和 PPD 达到整体评价 II 级的面积比例为 99.25%，根据绿标 5.2.9，应得 8 分。

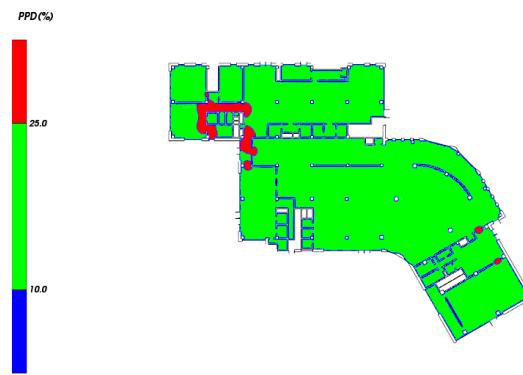
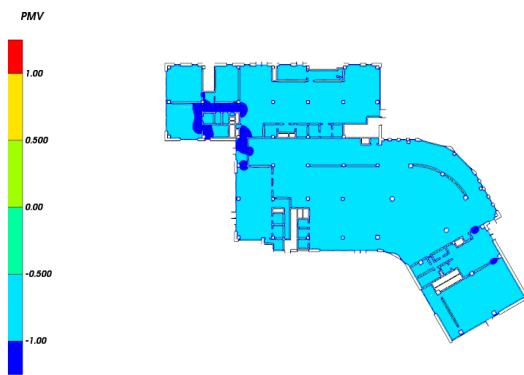
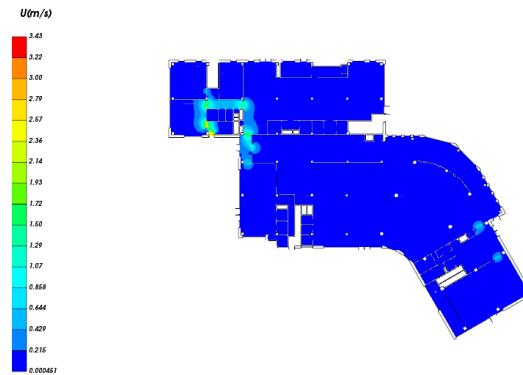
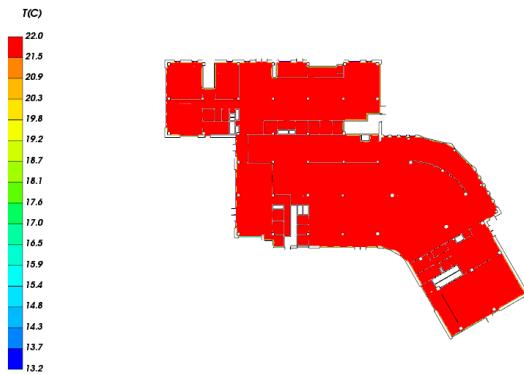


图 4.6-1 冬季一层室内热舒适相关图

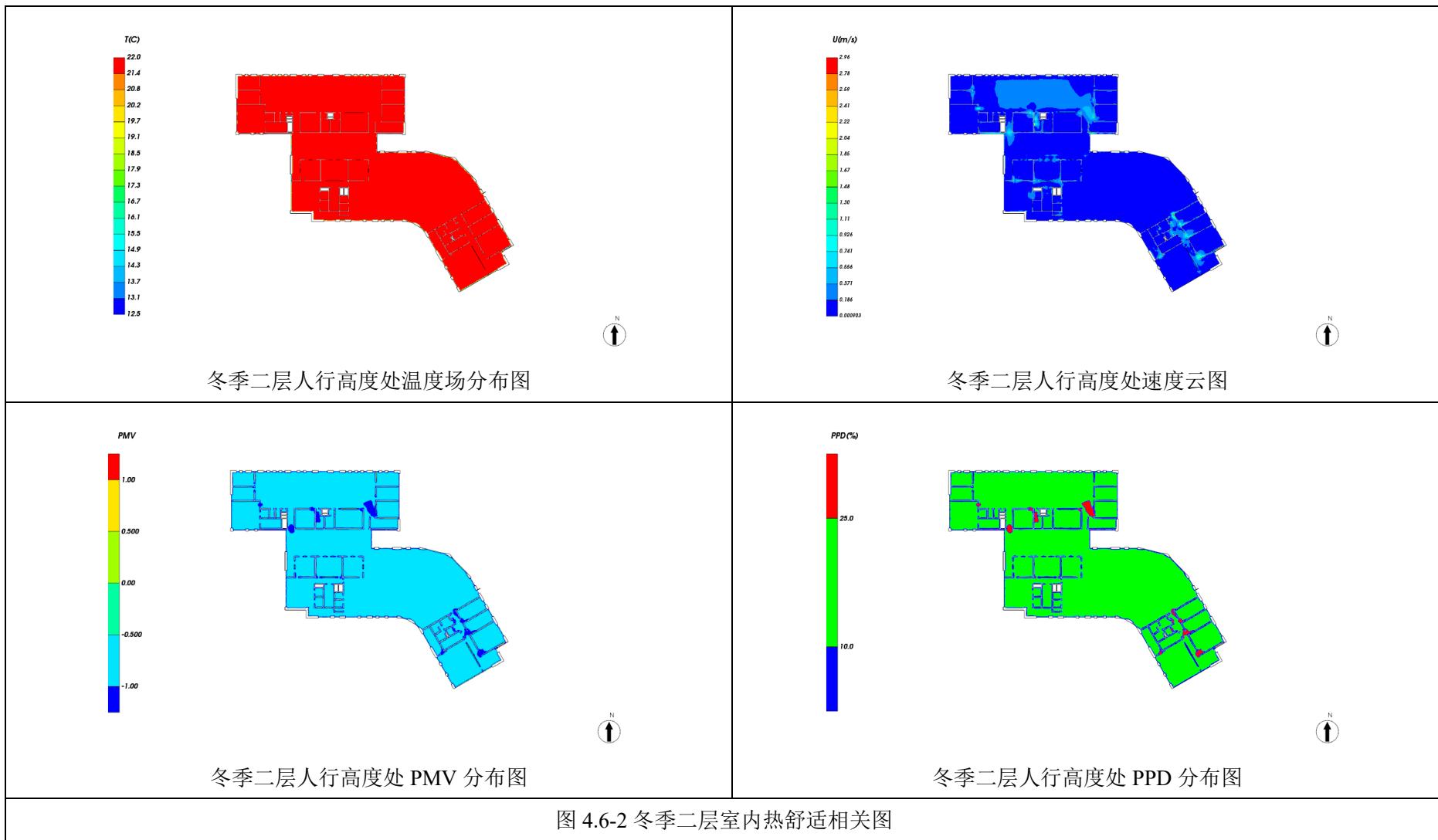


图 4.6-2 冬季二层室内热舒适相关图

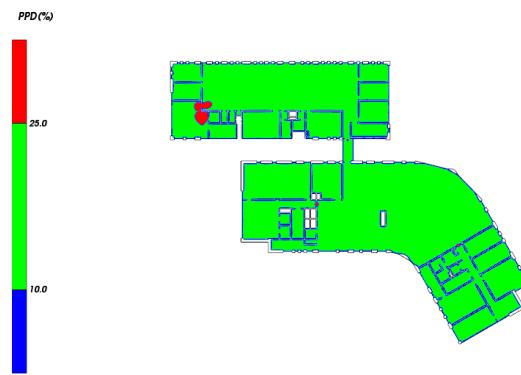
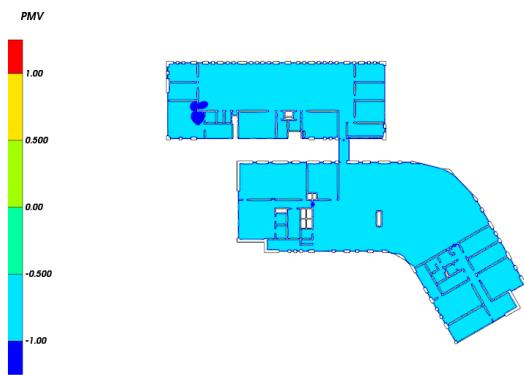
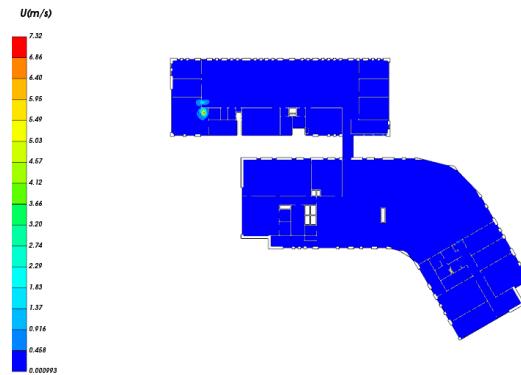
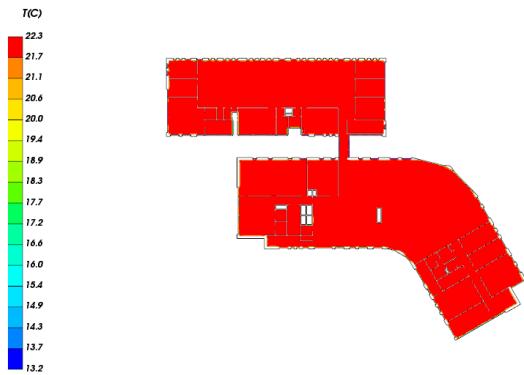


图 4.6-3 冬季三层室内热舒适相关图

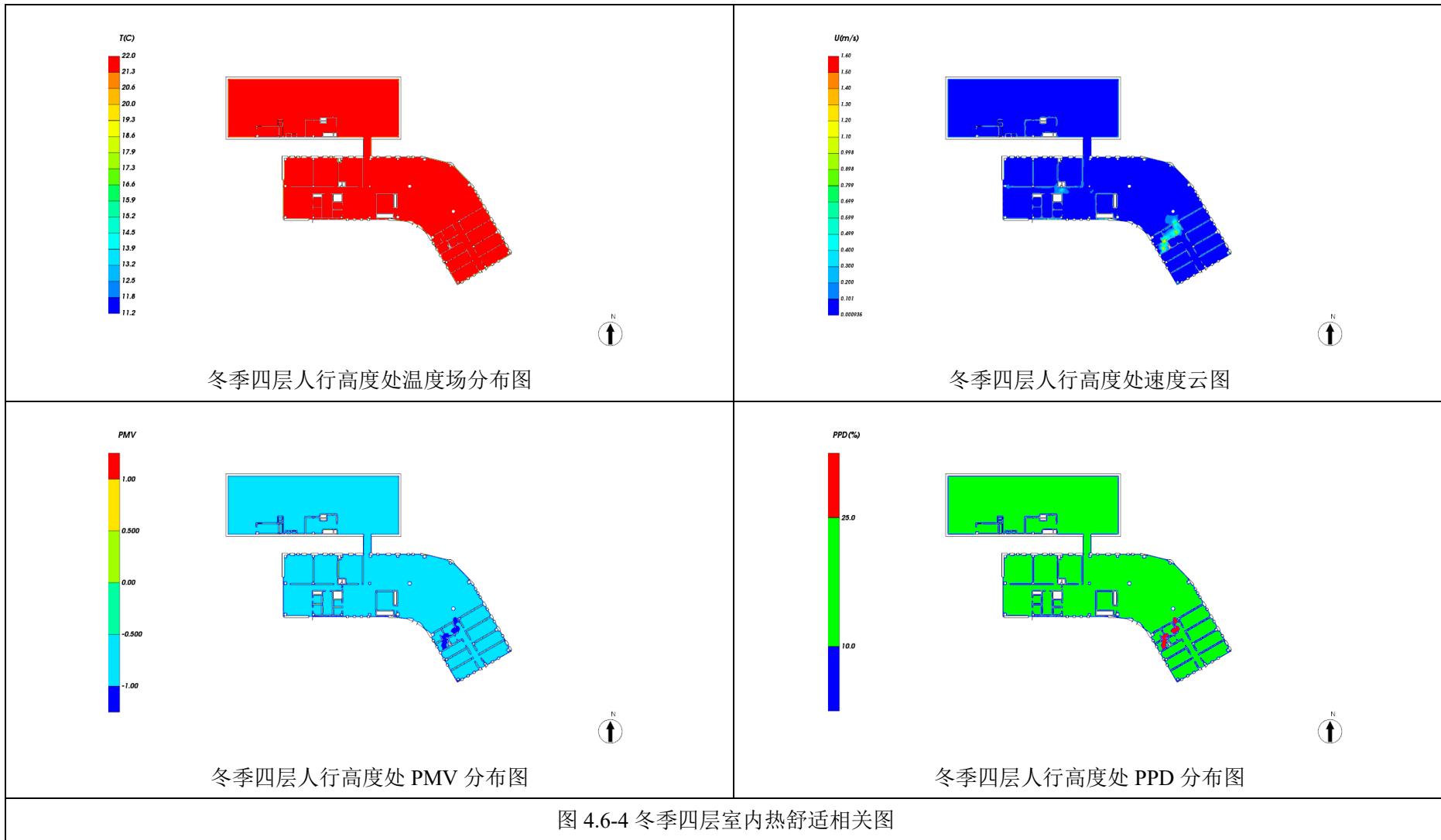
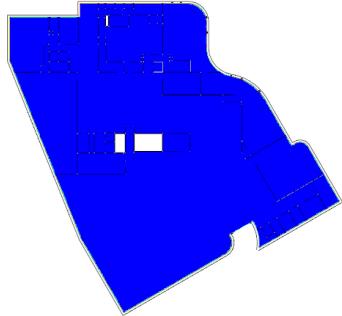


图 4.6-4 冬季四层室内热舒适相关图

T(°C)

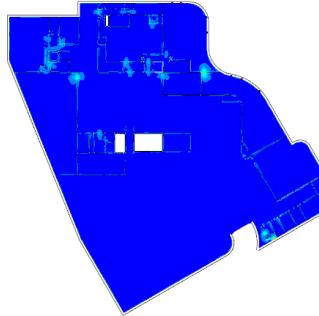
27.3
27.1
26.9
26.7
26.5
26.3
26.1
25.9
25.7
25.5
25.2
25.0
24.8
24.6
24.4
24.2
24.0



夏季负一层人行高度处温度场分布图

U(m/s)

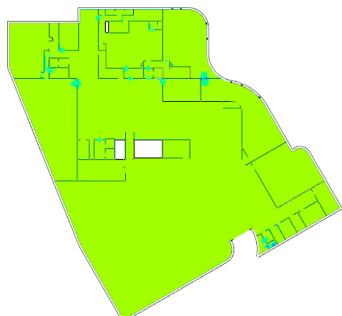
2.03
1.91
1.78
1.65
1.52
1.40
1.27
1.14
1.02
0.890
0.763
0.636
0.509
0.382
0.256
0.129
0.00164



夏季负一层人行高度处速度云图

PMV

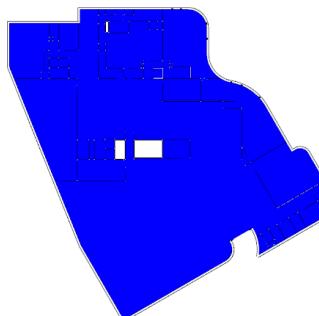
1.00
0.500
0.00
-0.500
-1.00



夏季一层人行高度处 PMV 分布图

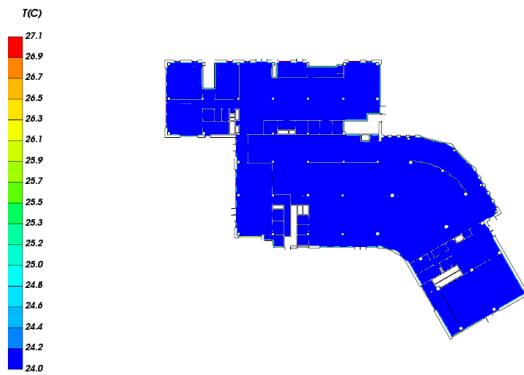
PPD(%)

25.0
10.0

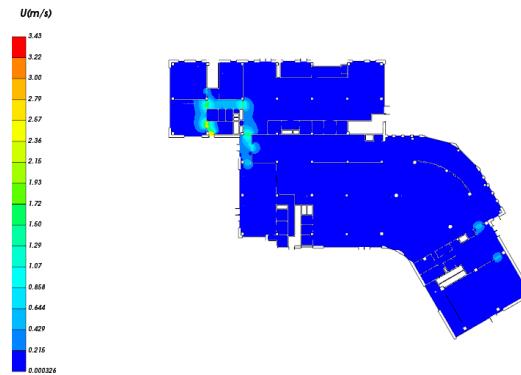


夏季负一层人行高度处 PPD 分布图

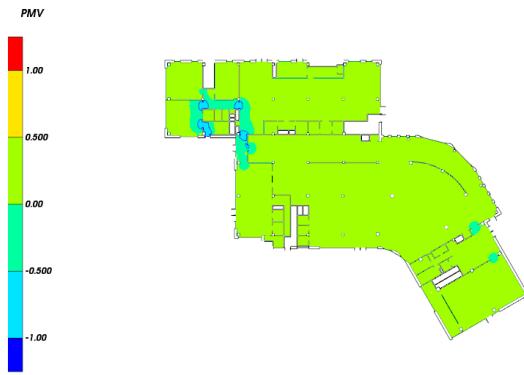
图 4.6-5 夏季负一层室内热舒适相关图



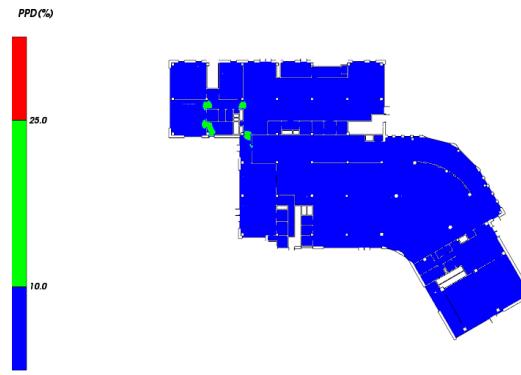
夏季一层人行高度处温度场分布图



夏季一层人行高度处速度云图



夏季一层人行高度处 PMV 分布图



夏季一层人行高度处 PPD 分布图

图 4.6-6 夏季一层室内热舒适相关图

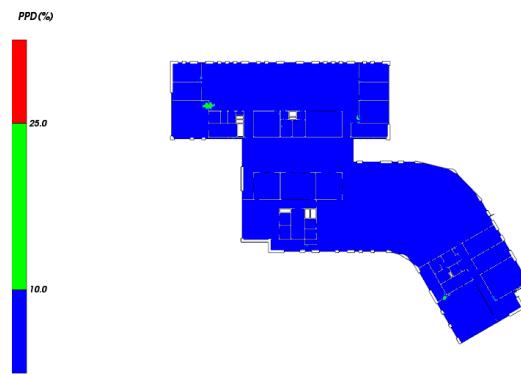
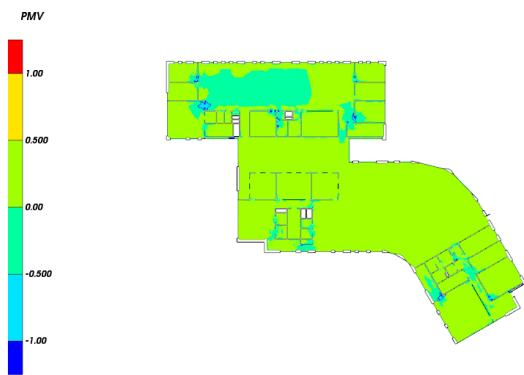
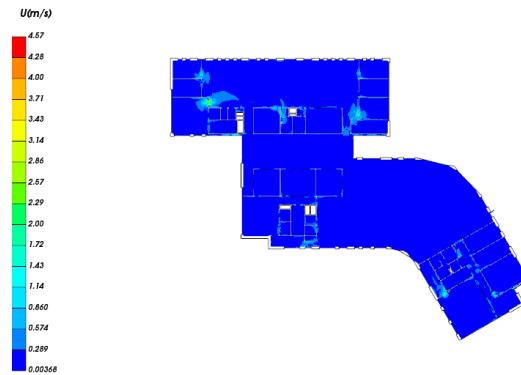
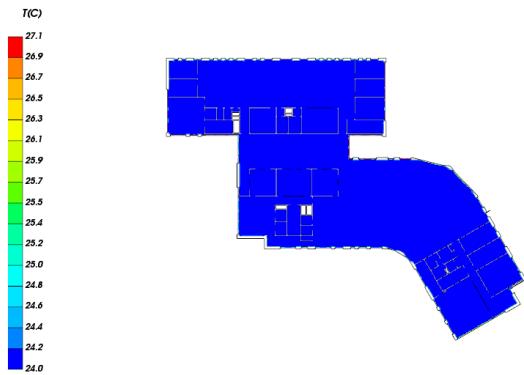


图 4.6-7 夏季二层室内热舒适相关图

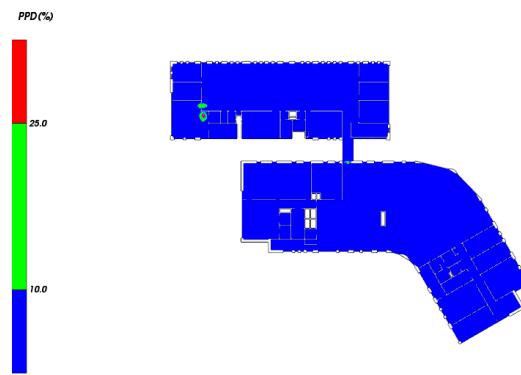
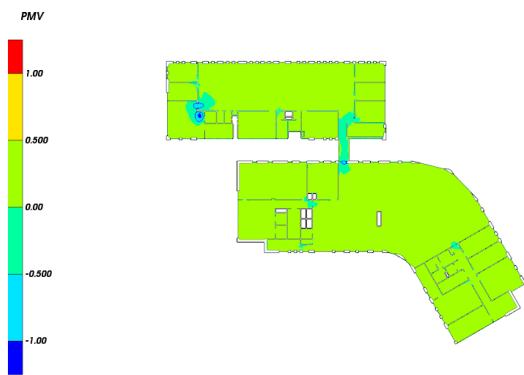
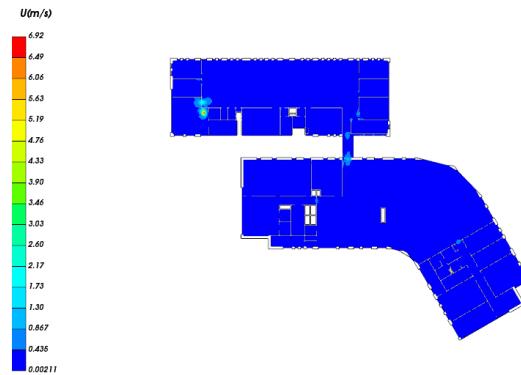
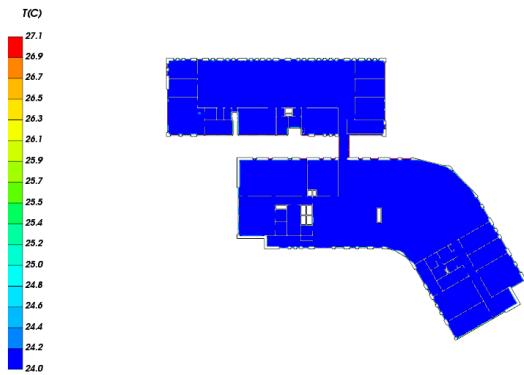


图 4.6-8 夏季三层室内热舒适相关图

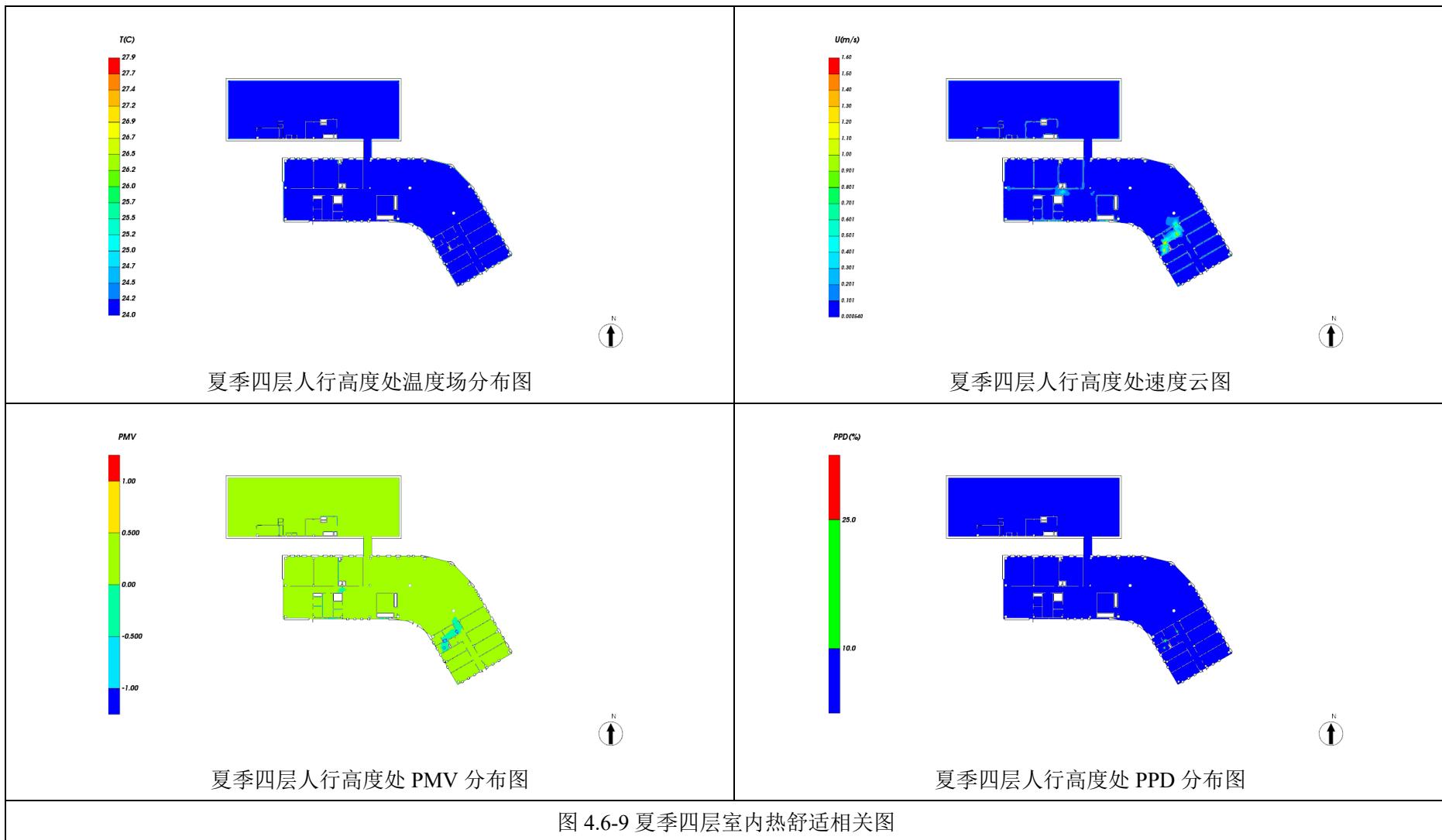


图 4.6-9 夏季四层室内热舒适相关图

4.6.2 日照分析

该办公楼建筑南立面铺设有玻璃幕墙，玻璃幕墙表面光滑，对太阳光进行镜面反射而形成的眩光对行驶在公路上的驾驶员的危害明显。因此，我们需要对玻璃幕墙光污染进行分析报告。

我们依据《建筑环境通用规范》GB 55016-2021 要求对玻璃幕墙光污染的评价指标进行分析，包括玻璃幕墙反射光对周边建筑窗台的连续滞留时间以及对受影响最不利路段长度。

表 4.6-1 具体分析结果及得分情况表

标准要求项	分析结果	标准要求	结论
反射光影响道路的最大长度	6 m	不超过 100m	满足
反射光对周边建筑窗台面的连续滞留最长时间	0 min	不超过 30min	

4.6.3 建筑声环境

建筑声环境模拟的主要难点在于克服建筑材料难点和室内外噪声源布置难点，满足评价标准，同时设计建筑围护结构构造和门窗空气声隔声性能，以满足建筑隔声性能评价标准。

构件的透射系数越小，隔声量就越大，隔声性能越好。对于高声阻、刚性、匀质密实的围护结构，通常越密实的材料对应结构的隔声性能越好。单层匀质密实墙的隔声性能和入射声波的频率有关，还取决于墙体的面密度、劲度、材料的内阻尼以及墙的边界条件等因素。我们优化了建筑围护结构和噪声源布置，最终结果如下：

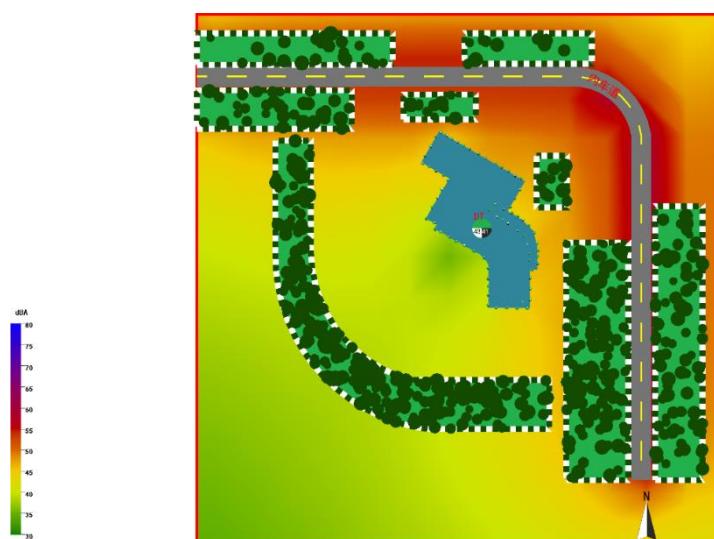


图 4.6-10 室外噪声彩图

表 4.6-2 环境噪声综合得分表 单位: dB(A)

时段	噪声最大值	2类噪声限值	3类噪声限值	得分情况
昼间	48	60	65	10 分
夜间	41	50	55	

表 4.6-3 主要功能房间室内噪声值 单位: dB (A)

房间类型	对标功能	包含房间	室内 噪声级		标准限值 (H:高要求) (L:低限值)		达标判定	
			昼	夜	昼	夜	昼	夜
报告厅	普通会议室	1015,1024	30	20	L: ≤ 45 H: ≤ 40	--	满足 高要求	--
餐厅	餐厅	1010	30	20	L: ≤ 55 H: ≤ 45	--	满足 高要求	--
接待室	普通会议室	1026,1042	30	20	L: ≤ 45 H: ≤ 40	--	满足 高要求	--
会议室	普通会议室	2020,4004,2044 等 9 个房间	30	20	L: ≤ 45 H: ≤ 40	--	满足 高要求	--
普通办公室	多人办公室	3009,2008,4002 等 29 个房间	31	22	L: ≤ 45 H: ≤ 40	--	满足 高要求	--

表 4.6-4 围护结构隔声性能评价结果 单位: dB

检 查 项	评价依据	结论	得 分
空 气 声 隔 声	控制项: 5.1.4 主要功能房间的外墙、隔墙、楼板和门窗的隔声性能应能满足现行国家标准《民用建筑隔声设计规范》GB50118 中低限要求。	满足	--
	评分项: 5.2.7 构件及相邻房间之间的空气声隔声性能达到现行国家标准《民用建筑隔声设计规范》GB50118 中的低限标准限值和高要求标准限值的平均值, 得 3 分; 达到高要求标准限值, 得 5 分。	满足 平均 要求	3 分
撞 击 声 隔 声	控制项: 5.1.4 主要功能房间的外墙、隔墙、楼板和门窗的隔声性能应能满足现行国家标准《民用建筑隔声设计规范》GB50118 中低限要求。	满足	--
	评分项: 5.2.7 楼板的撞击声隔声性能达到现行国家标准《民用建筑隔声设计规范》GB50118 中的低限标准限值和高要求标准限值的平均值, 得 3 分; 达到高要求标准限值, 得 5 分。	满足 高要 求	5 分

4.6.4 住区热环境

住区热环境模拟的主要难点在于合理布置室外区域，满足评价标准，我们需要合理利用乔木林地等区域，对室外区域进行修正，并且室外区域的选材同样重要。同时，所有区域均应进行个性化设计，满足遮阳覆率要求、屋顶绿化要求、渗透蒸发指标要求。

屋顶绿化可以改善热岛效应、吸收热能，有助散热，因此我们设计了屋顶绿化，使屋面绿率达到了 79%。同时优化了室外分布区域的植被覆盖，使得广场、人行区域、停车场等主要区域绿化面积上升，分别达到 28%、60%、37%。渗透蒸发指标由原来的 0%上升为 100%，最终各项要求均满足规定性设计。

表 4.6-5 住区热环境评价表

类别	检查项	结论	备注
强制性条文	平均迎风面积比	满足	强制条文，必须满足
	活动场地遮阳覆盖率	满足	
规定性设计	底层通风架空率	满足	不满足任意一条时， 进行评价性设计
	绿化遮阳体叶面积指数	满足	
	渗透蒸发指标	满足	
	屋面绿化率	满足	
结论		满足	

5. 智慧能源管控系统实现高效运行

5.1 智慧能源管控系统实施架构

高效能源管控系统充分运用物联网、大数据人工智能、自动控制等先进技术，通过定制化智慧能源管控平台，结合前端采集与控制设备，实现全自动化高效能源站。通过末端数据采集与汇总统计分析，计算并展示相关数据结果，实现能效对标，结合历史数据分析与前期控制逻辑策略优化系统控制从而降低能耗成本，并以此指导下一次的数据分析工作，形成完成的逻辑闭环，真正实现能源站高效化运行。

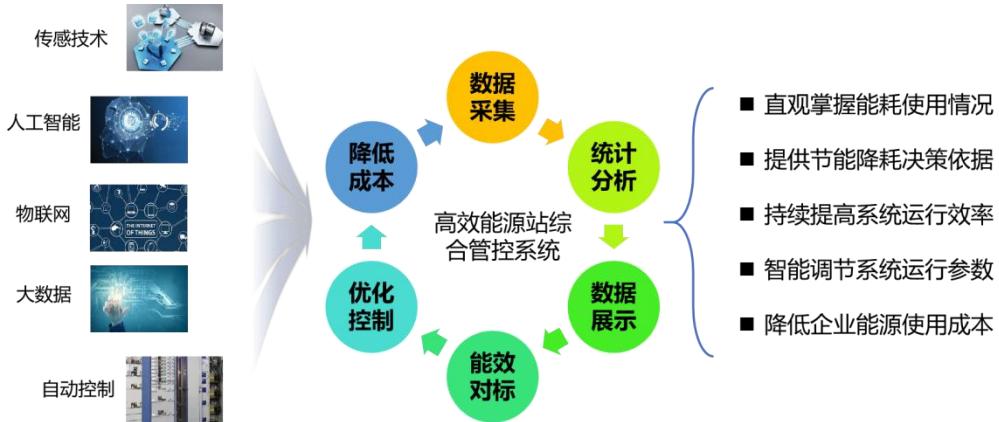


图 5.1-1 高效能能源站综合管控系统

智慧能源管控系统应当具备能耗数据采集、系统配置、能耗检测、基础报表和能耗地图的基本功能，同时应当实现节能分析、能效管理和优化运营的特殊功能，从运行管理层面显著降低建筑系统运行能耗。

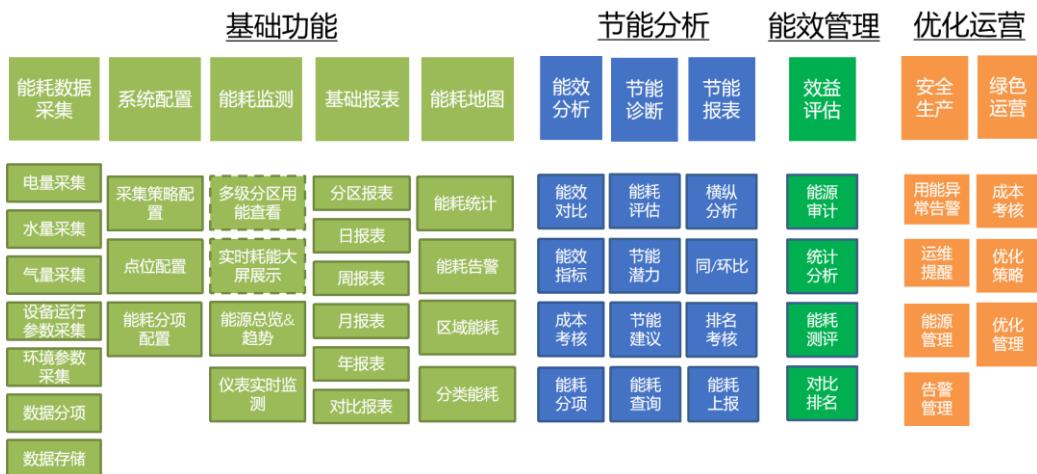


图 5.1-2 智慧能源管控系统功能

对于智慧能源管控系统，应当满足如下核心要求：

- 1) 精准计量：精准计量是能源系统高效运行的重要保障，通过实验室校验、现场校准最后经软件平台校准，保证采集数据的精度，从而确保后续流程的正确性；
- 2) 实施监测：基于对各个系统前端数据的全面采集，融合设备运行状态监控及能耗等多元数据，通过可视化及 3D 建模等方式对采集数据形象化、直观化、具体化，直观呈现系统整体运行态势；
- 3) 评估诊断：依照相应能效指标标准，给出对应设备系统能效水平，便于对标管理，评估设备系统性能，诊断排查设备系统问题；

- 4) 运行参数优化: 基于针对能耗系统的前期能效分析、运行状态分析、台账节点记录及健康度分析功能等多元数据分析服务, 通过深入挖掘设备调节、供需侧响应、电网匹配等问题, 结合大数据分析、机器学习等相关智能化技术, 为系统提供专业设备管理、维保维修方案, 优化运行控制策略;
- 5) 高效控制: 通过系统自评估诊断与运行参数优化, 合理协同控制各系统同步调节, 实现最佳能源配置, 提升建筑系统整体运行性能。

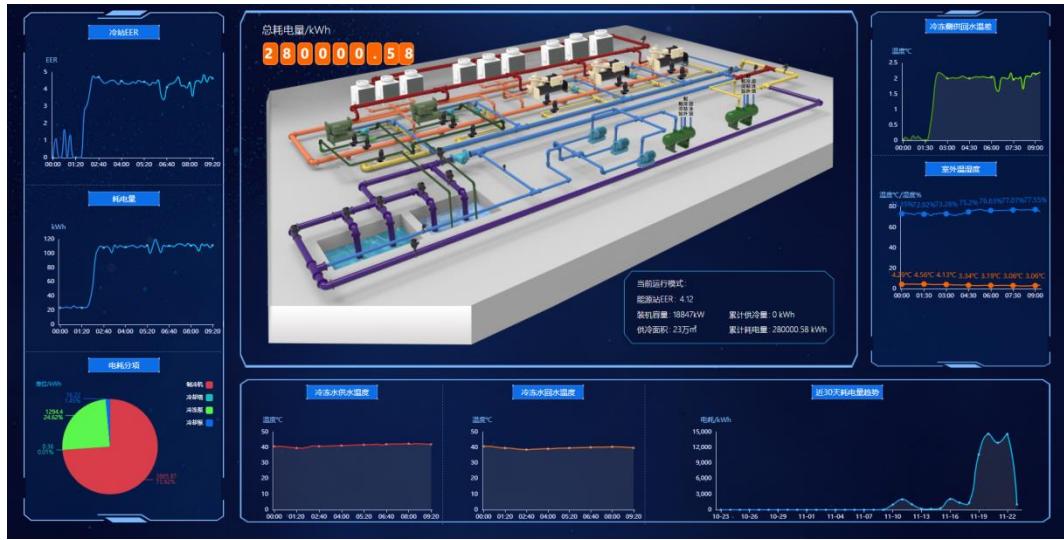


图 5.1-3 智慧能源管控系统可视化面板

5.2 能源系统控制逻辑

5.2.1 空调风系统

5.2.1.1 AHU 新风系统

AHU 风系统通过检测室内 CO_2 浓度、新风阀开度、风机频率以及处于运行状态的风机个数, 同步调节风阀开度与风机频率, 将室内 CO_2 浓度保证在 800–1000ppm。具体控制逻辑如下:

- 1) 通过 CO_2 浓度传感器检测室内 CO_2 浓度, 若检测浓度超过 1000ppm, 首先观察当下新风阀开度是否开到最大, 没有的情况下, 优先调大新风阀开度增大新风量, 进行通风换气, 降低室内 CO_2 浓度。反之, 通过风机频率变化调节进入室内的新风量, 若频率无法调节, 增大风机个数, 保证 CO_2 浓度回归正常值范围;
- 2) 通过 CO_2 浓度传感器检测室内 CO_2 浓度, 若检测浓度小于 800ppm, 首先观察当下新风阀开度是否开到最小, 没有的情况下, 优先调小新风阀开度减少新风量, 减少不必要的通风换气, 降低能耗。反之, 通过风机频率变化调节进入室内的新风量, 若频率无法调节, 减少风机个数, 保证 CO_2 浓度回

归正常值范围；

3) 否则, CO_2 浓度保持在正常值范围内, 当前风机频率、新风阀开度、运行风机个数保持不变。

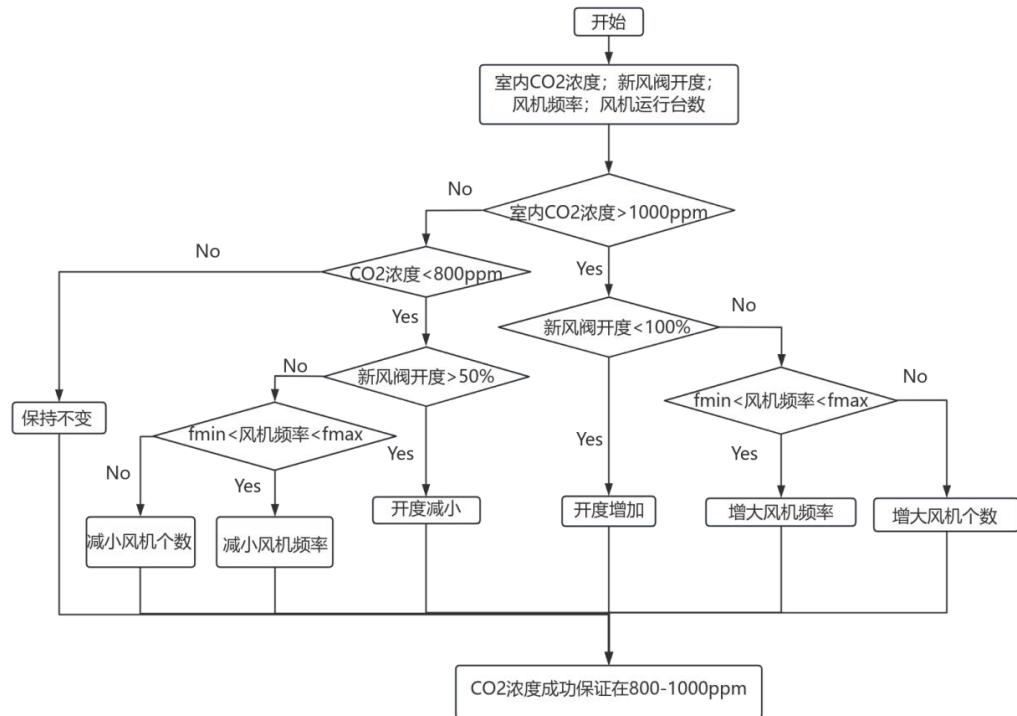


图 5.2-1 AHU 新风系统控制逻辑框图

5.2.1.1 风机盘管系统

风机盘管风系统通过检测室内 CO_2 浓度、风机频率以及处于运行状态的风机个数, 控制风机频率, 将室内 CO_2 浓度保证在 800–1000ppm。基本控制逻辑如下:

- 1) 通过 CO_2 浓度传感器检测室内 CO_2 浓度, 若检测浓度超过 1000ppm, 首先观察当下风机频率是否大于频率上限, 没有的情况下, 优先调大风机频率增大新风量, 进行通风换气, 降低室内 CO_2 浓度。反之, 增大风机个数, 保证 CO_2 浓度回归正常值范围;
- 2) 通过 CO_2 浓度传感器检测室内 CO_2 浓度, 若检测浓度小于 800ppm, 首先观察当下风机频率是否小于频率下限, 没有的情况下, 优先调小风机频率减少新风量, 减少不必要的通风换气, 降低能耗。反之, 减少风机个数, 保证 CO_2 浓度回归正常值范围;
- 3) 否则, CO_2 浓度保持在正常值范围内, 当前风机频率运行风机个数保持不变。

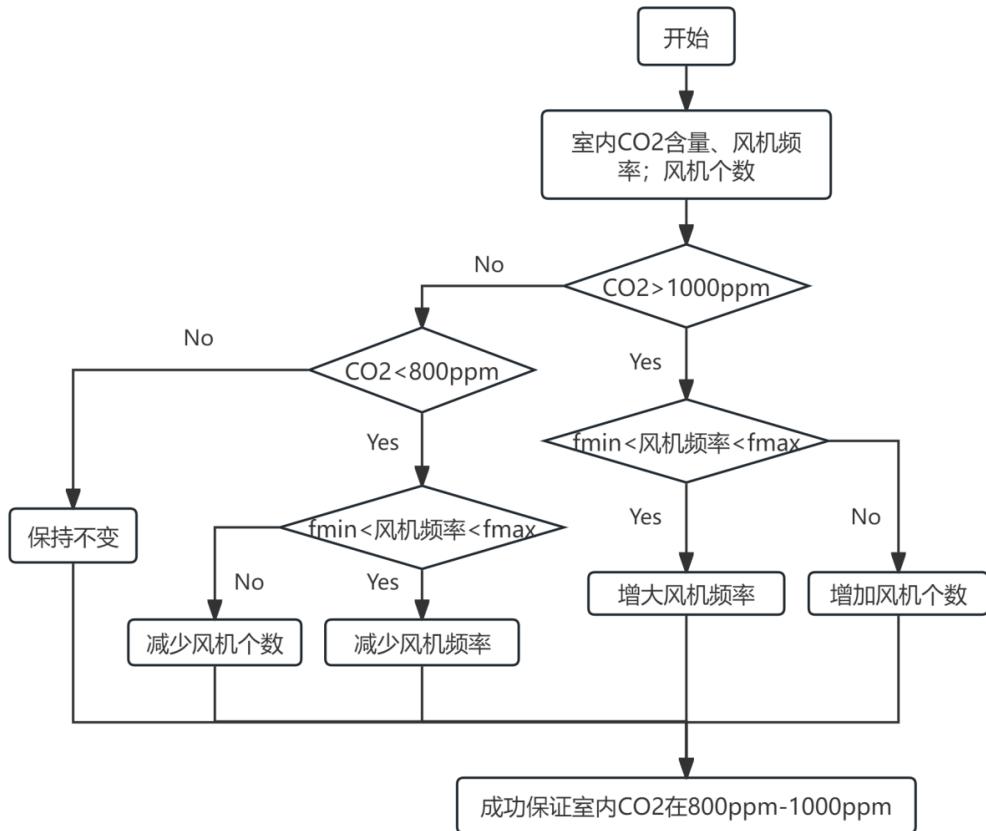


图 5.2-2 风机盘管系统控制逻辑框图

5.2.2 空调冷热源系统

针对本项目冷热源系统，首先根据室外气象条件与冷热供应需求，确定冷热源系统各设备运行参数设定值，包括用户侧供水温度设定值、开机阶段初始开启台数等。

随后热泵机组根据实际供冷/热需求调整运行台数，用户侧、热源侧水泵根据实际供回水温差实现台数频率自动调整。由此构建前馈控制-反馈调节协同的调控模式。

本项目采用湖水源热泵进行供冷供热，设置 4 台 300kW 等容量热泵机组，供冷期常开 4 台热泵，供暖期常开 2 台。用户侧、水源侧各设置 4 用 1 备变频水泵，水泵先并联、随后与热泵机组串联，供冷期常开 8 台，供暖期常开 4 台。具体控制逻辑如下：

1) 首先设定供冷/暖负荷下限 Q_{min} ，本项目 Q_{min} 设置如公式 1 所示，若当前负荷低于 Q_{min} ，则不开启热泵，停止供冷/热。

$$Q_{min} = 10\%Q_{max} \quad \text{公式 1}$$

式中， Q_{max} 为尖峰负荷，单位 kW。

2) 对于供暖期, 当前负荷满足最低负荷开机台数规则如表 5.2-1 所示, 用户侧供水水温度设定规则如表 5.2-2 所示。

表 5.2-1 供暖期开机规则

负荷情况	开机台数
$50\text{kW} < Q \leq 300\text{kW}$	1
$Q > 300\text{kW}$	2

表 5.2-2 供暖期用户供水温度设定规则

建筑负荷率	供水温度 (°C)
$\text{PLR} > 0.9$	45
$0.8 > \text{PLR} \geq 0.7$	44
$0.7 > \text{PLR} \geq 0.6$	43
$0.6 > \text{PLR} \geq 0.5$	42
$0.5 > \text{PLR} \geq 0.4$	41
$0.4 > \text{PLR} \geq 0.3$	40
$0.3 > \text{PLR} \geq 0.2$	38

3) 对于供冷期, 当湖水温度低于 10°C 时可不开启热泵直接采用湖水供冷, 若湖水温度不满足要求, 则开机台数规则和用户供水温度设定规则分别如表 5.2-3、5.2-4 所示。

表 5.2-3 供冷期开机规则

负荷情况	开机台数
$50\text{kW} < Q \leq 300\text{kW}$	1
$300\text{kW} < Q \leq 600\text{kW}$	2
$600\text{kW} < Q \leq 900\text{kW}$	3
$900\text{kW} < Q$	4

表 5.2-4 供冷期用户供水温度设定规则

建筑负荷率	供水温度 (°C)
$\text{PLR} > 0.9$	7
$0.8 > \text{PLR} \geq 0.7$	7.5
$0.7 > \text{PLR} \geq 0.6$	8
$0.6 > \text{PLR} \geq 0.5$	8.5
$0.5 > \text{PLR} \geq 0.4$	9
$0.4 > \text{PLR} \geq 0.3$	10
$0.3 > \text{PLR} \geq 0.2$	11

4) 对于用户侧与水源侧水泵, 初始开启台数与热泵机组运行台数对应。设定供回水温差 (通常为 5°C)。系统运行过程中根据供回水温差实际值与设定值的差别, 自动调整运行台数与频率。

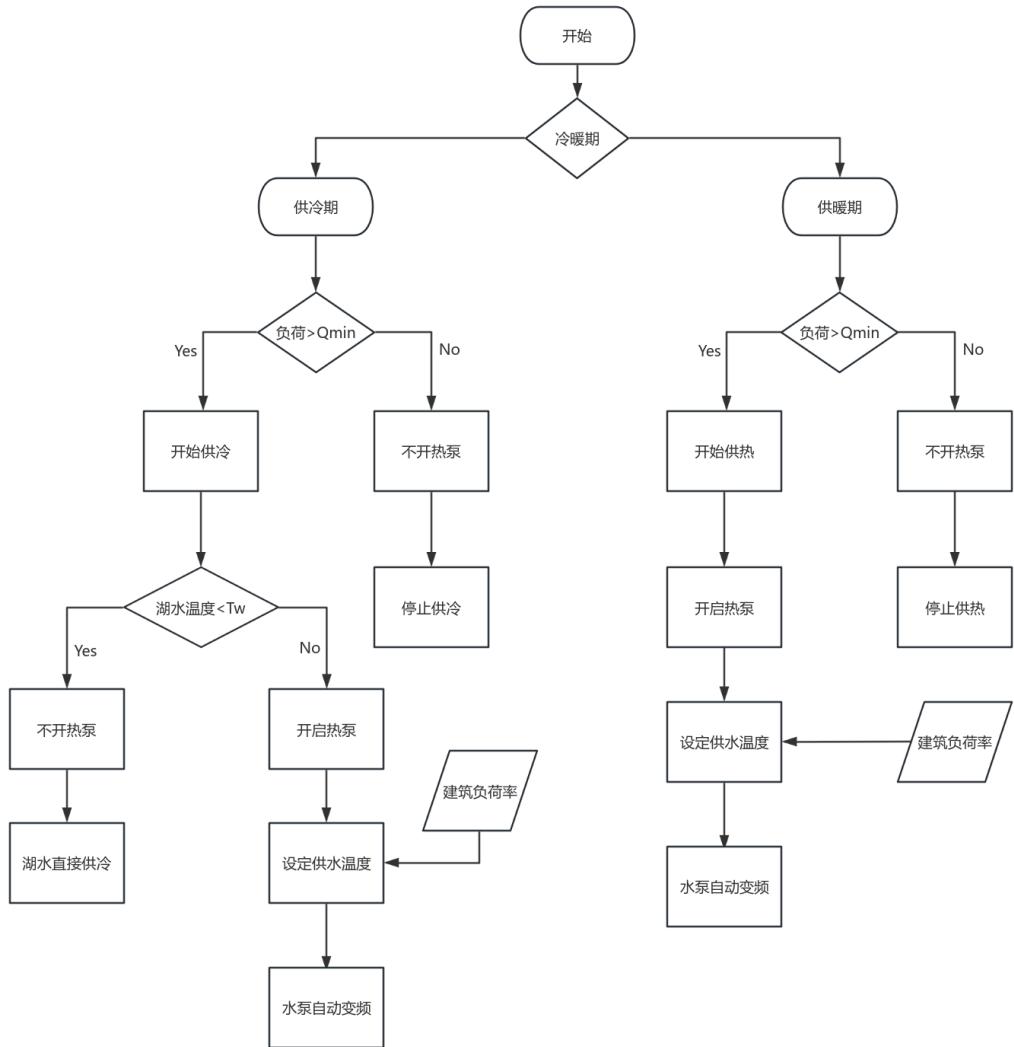


图 5.2-3 湖水源系统冷热源控制逻辑框图

5.2.3 照明系统

照明控制系统回路划分如下:

- 1) 回路供电方式: 在大厅、会议室、办公室以及走廊等公共场所的照明控制系统中, 根据受自然采光影响程度的不同, 每个区域均采用两个照明供电回路来控制。为实现照明控制, 灯具采用交叉供电的方式进行配置;
- 2) 不同情况照度控制要求: 对于大厅、会议室、办公室、走廊等公共区域, 工作日期间可根据时段情况控制照明照度, 午休时段可降低照度, 但不得低于标准值的 1 / 2; 下班时段可只保留火灾应急照明及值班照明;

3) 照明灯具安装高度在 2.5m 及以下的, 设置剩余电流动作保护电器作为附加防护;

4) 照明每一单相分支回路电流不宜超过 16A, 所接光源数或 LED 灯具数不超过 25 个; 组合灯具每一单相回路电流不宜超过 25A, 光源数量不宜超过 60 个; 小功率单颗 LED 灯, 仅需满足回路电流的规定;

5) 公区照明按使用条件和天然采光状况按分区、分组进行回路划分。装设两列或多列灯具时, 所控灯列与采光窗平行;

6) 建议在灯具内装设补偿电容, 以降低照明线路电流值, 降低线路能耗和电压损失。

照明控制及节能措施如下:

1) 照明控制应主要采用支路控制, 办公区域、非人员停留区域各自都有不同的控制策略和要求, 通过不同的场景设置等来实现对其相对应的照明控制。

2) 整个系统建议采用集中管理、分散控制的模式, 避免使用中央集中控制的模式。要求通过照明监控系统实现照明控制自动化, 允许运行人员根据目前区域占有情况, 来控制照明, 可以实现灯光的自动开关和手动控制、能够达到分散集中控制、远程控制、延时控制、定时控制、亮度感应器控制、红外线遥控、并能够与其他系统进行联动控制等。(当照明回路采用遥控方式时, 应同时具有解除遥控功能和手动控制的功能)

3) 应根据季节、工作日、节假日等不同要素等制定合理的照明开关灯时段和时间, 严格控制关灯时段后仍开启的灯具类型、数量和光照强以减少能源消耗。

4) 通过定时控制及移动感应控制的结合, 保证非人员停留区域及办公区域加班时段的灯光在有人期间定时开启, 无人定时关闭灯光、同时自动启动移动感应器, 有人走动时开启灯光, 人走开后自动关闭, 达到节能、便于管理的目的。

基本控制逻辑如下, 设置照度传感器, 当室内自然采光照度低于设定值时, 基于室内工作人员的活动时间及人员密度, 调节室内照明设备进行不同程度的补光:

1) 根据写字楼内不同区域的具体要求和实际情况, 可利用天然采光的区域, 其照明根据采光状况采取按时段调节的节能控制措施; 无法利用天然采光的区域, 根据人员活动密度及活动时间控制照明设备。

2) 根据受自然采光影响程度, 将办公室、会议室、大厅等公共区域划分为内外区两个照明供电回路, 灯具采用交叉供电的方式进行控制。

3) 对于办公区域, 采用定时控制, 在上班时段、午休时段, 当自然采光无法满

足采光要求时, 照度传感器将控制信号传至执行器, 通过调节照明设备的开启数量, 使得工作面照度分别达到预设照度值的 100%、60%; 在下班时段, 开启火灾应急照明及值班照明设备; 加班时段, 所有照明设备关闭, 开启人体红外传感器, 根据加班人员所在区域位置自动打开对应照明设备。

4) 对于走廊、停车场、楼梯间等非人员停留区, 利用人体红外传感器检测人员出入信号来控制照明设备, 当有人员进入该区域, 照明设备自动开启; 若传感器感应此区域无人, 照明设备关闭。

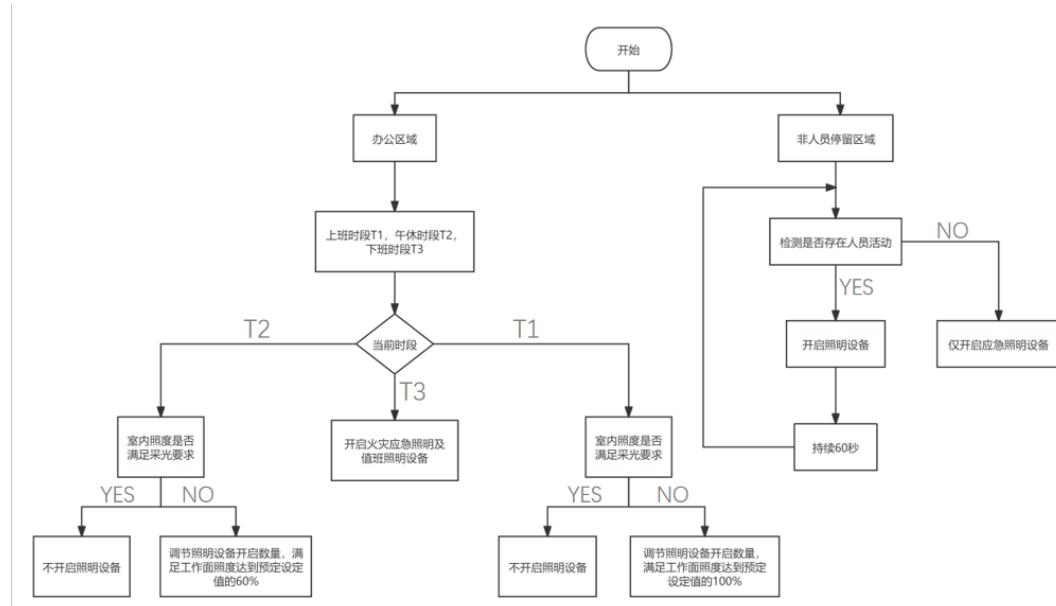


图 5.2-4 照明系统控制逻辑框图

5.2.4 通风系统

在工作时段, 使用室外风进行自然冷却; 在非工作时段, 使用室外风进行室内余热的消除。充分减少能耗, 达到节能目的。基本控制策略如下:

1) 处于工作时段时, 当室外焓值低于送风状态焓值时, 采用全新风进行自然冷却; 当室外焓值高于送风状态焓值时, 保持最小新风量运行。

2) 当处于非工作时段时, 若室内外温差值超过 2℃, 则开启外窗, 消除室内余热; 否则, 保持外窗关闭。

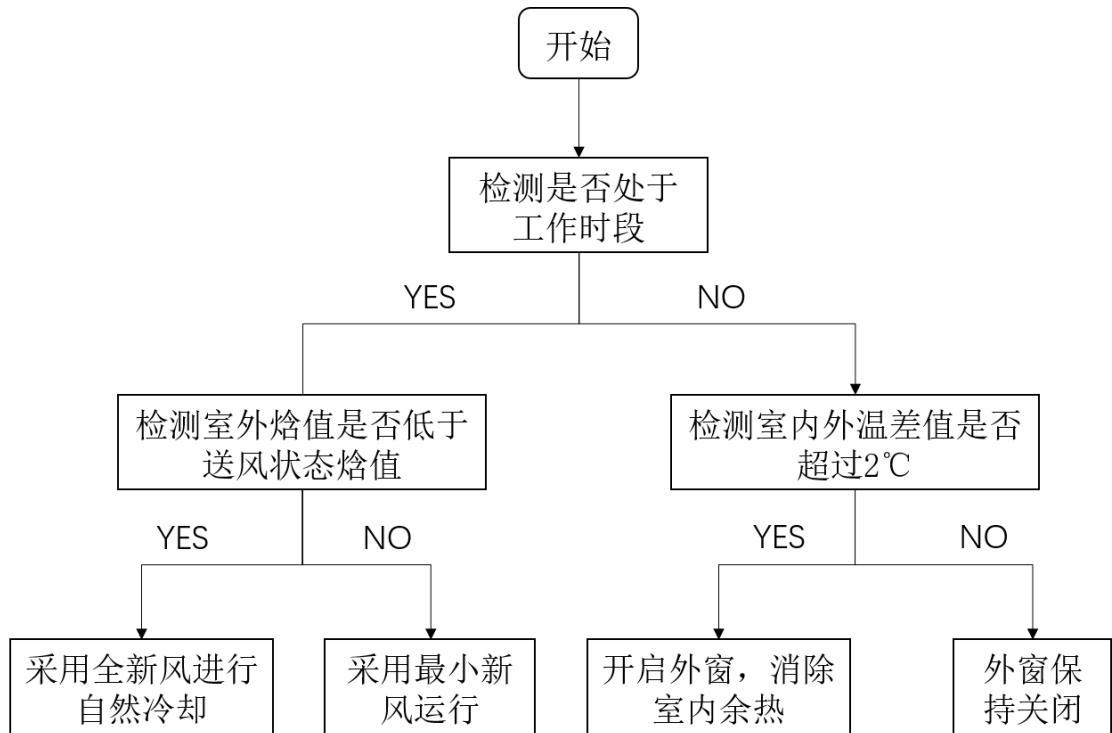


图 5.2-5 通风系统控制策略

6. 节能减排效益分析

本项目通过改造围护结构降低冷热需求、优化冷热源系统提升运行性能、温湿度独立控制系统实现品位匹配、建设光伏系统有效利用可再生能源四个维度，降低能耗，减少碳排放。

6.1 围护结构改造降低冷热需求

由于原建筑建设时间较为久远，相关规范在此期间不断更新调整，所以我们首先通过优化围护结构，提高保温性能，从而来降低建筑的冷热负荷需求。

我们主张增加保温层厚度，以最新的绿建三星节能设计规范为基准，通过对墙体、屋面保温材料的添加，降低围护结构（外墙、外窗、玻璃幕墙等）的传热系数。在夏季可减少室外热量传入室内，在冬季可减少室内热量的流失，使建筑热环境得以改善，从而减少建筑冷、热消耗。

通过绿建斯维尔的模拟得到改造前后的冷热需求：

表 6.1-1 围护结构改造改造前后的冷热需求

	供暖需求 (kWh)	供暖指标 (kWh/m ² · a)	供冷需求 (kWh)	供冷指标 (kWh/m ² · a)
优化前	84939	5.19	721206	44.04
优化后	55265	3.37	696056	42.51

由此，供热需求降低了 35.1%，供冷需求降低了 3.5%.

6.2 冷热源系统优化提升运行性能

由于项目毗邻某大型湖泊水系，存在可利用的湖水源，因此针对冷热源的节能优化为采用湖水源热泵进行供冷供热。

系统设置 4 台 300kW 等容量热泵机组，供冷期常开 4 台热泵，供暖期常开 2 台。用户侧、水源侧各设置 4 用 1 备变频水泵，水泵先并联、随后与热泵机组串联，供冷期常开 8 台，供暖期常开 4 台。

同时考虑采用温湿度独立控制，通过湖水源热泵处理显热负荷，溶液除湿系统处理潜热负荷，独立调节温度与湿度，进一步降低冷热源系统能耗。

表 6.2-1 不同改造工况下的能耗与碳排放对比

参数类别 改造工况	总年均能耗 (kWh/m ²)	节能率 (%)	总年均碳排放 (tCO ₂ /年)	减排率 (%)
原系统	69.52	--	650	--
优化围护结构后	68.13	2.00	637	2.02
采用湖水源热泵	63.28	6.98	591	9.08
温湿度独立控制	60.90	12.39	569	12.46
铺设光伏	56.64	14.62	529	18.62

项目最初总能耗为 69.52kWh/m²，经过一系列的冷热源系统改造，建筑年均能耗为 63.28 kWh/m²，能耗减少了 6.27 kWh/m²，节能 8.98%。

6.3 温湿度独立控制系统实现品位匹配

温湿度独立控制作为暖通空调系统中的先进技术，通过独立控制室内温度与湿度，实现对室内热湿环境的更精确调控，提升末端环境热舒适性，满足个性化末端环境需求。如表 6.2-1 可知，项目最初总能耗为 69.52kWh/m²，经过一系列的冷热源系统改造，建筑年均能耗为 60.90 kWh/m²，能耗减少了 8.62 kWh/m²，节能 12.39%。

6.4 建设光伏系统实现可再生能源利用

考虑本建筑屋面具有较大平顶空间，同时该地具备一定太阳辐照资源条件，因此我们选择在办公楼表面铺设光伏板，通过光伏发电满足建筑本身部分能耗需求。

如表 6.2-1 可知，项目最初总能耗为 69.52kWh/m²，经过一系列的冷热源系统改造，建筑年均能耗为 56.64 kWh/m²，能耗减少了 12.88 kWh/m²，节能

14.62%。

6.5 园林绿化增加碳汇

为了保证园区绿化率能够吸收建筑全生命周期中的大量二氧化碳, 增加项目碳汇, 相对降低项目全生命周期中的碳排放量, 我们在园区内合理规划绿化, 种植冠层密集乔木, 种植面积 18257.8 平方米, 叶面积指数为 4, 叶面积量 72382 平方米。年均减少碳排放 $62.308 \text{ tCO}_2/a$ 。

综上所述, 通过上述五种途径的改造设计, 总体能耗大大降低。

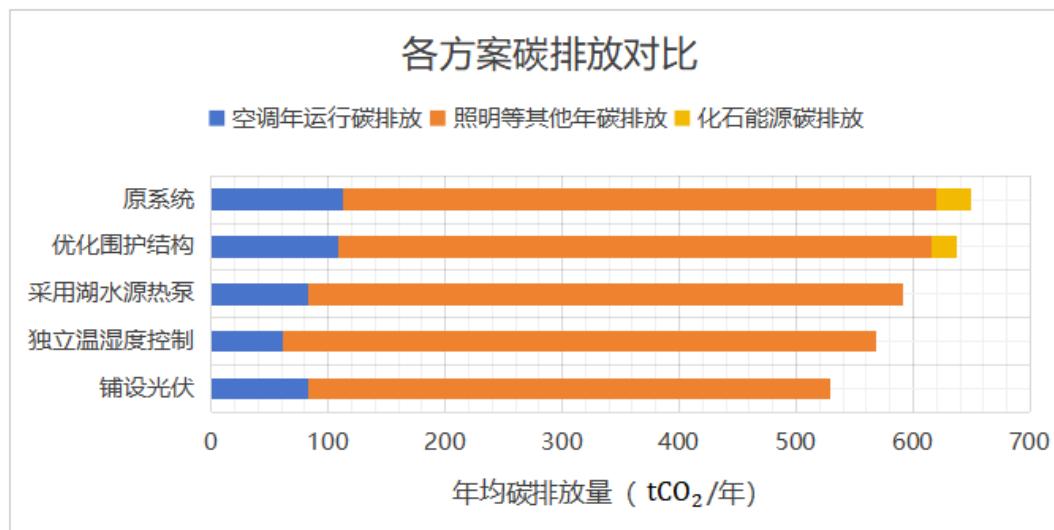


图 6.5-1 各改造方案下年运行碳排放对比



图 6.5-2 各改造方案下全寿命周期年碳排放对比

7. 总结与展望

整体项目改造工作结合最新技术手段，做到最大化的节能提升，减排效果显著。通过外围护结构改造，冷热源系统优化，温湿度独立控制，建设光伏系统，采光通风优化，智慧能源管控六大方面，对项目建筑实现全方位的优化设计，在竭力做到“零碳”的同时，也全面的考虑了建筑使用者本身，从声环境、热舒适性、采光照明等角度大大优化了建筑使用者的使用感受。

通过本次的备赛参赛，项目团队每位同学都有颇丰的学习收获与颇深的心得感悟。“众智之所为则无不成”，在竞赛过程中，团队协作的魅力体现的淋漓尽致，大家在明确的分工下独立自主的完善目标任务的同时，也会积极帮助其他同学发展问题、解决困难。在建筑负荷模拟、能耗分析、碳排放计算三个环节分别由不同同学承担，同一模型中，不同模拟环节仍会发现些许异同，三位同学友好交流，不断改正模型问题，优化参数设置，最终顺利完成项目。

8. 参考文献及标准

- [1] 《绿色建筑评价标准》 GB/T50378-2019
- [2] 《建筑通风效果测试与评价标准》 JGJ/T309—2013
- [3] 《建筑节能与可再生能源利用通用规范》 GB55015—2021
- [4] 《光伏发电站设计规范》 GB50797—2012
- [5] 《可再生能源建筑工程评价标准》 GBT50801—2013
- [6] 《建筑太阳能光伏系统设计规范》 DB11/T881—2012
- [7] 《绿色建筑评价技术细则》 2019
- [8] 《建筑采光设计标准》 (GB50033-2013)
- [9] 《建筑环境通用规范》 GB55016-2021
- [10] 《采光测量方法》 GB/T5699-2007
- [11] 《民用建筑绿色性能计算标准》 JGJT_449-2018
- [12] 《民用建筑室内热湿环境评价标准》 GB/T50785-2012
- [13] 《热环境人类工效学通过计算 PMV 和 PPD 指数与局部热舒适准则对热舒适进行分析测定与解释》 GB/T18049-2017
- [14] 《民用建筑供暖通风与空气调节设计规范》 GB50736-2012
- [15] 《民用建筑热工设计规范》 GB50176-2016

- [16] 《玻璃幕墙光热性能》 GB/T18091-2015
- [17] 《民用建筑设计通则》 GB50352—2005
- [18] 《公共建筑室内空气质量控制设计标准》 JGJ/T461
- [19] 《室内空气质量标准》 GB/T18883
- [20] 《建筑外门窗气密、水密、抗风压性能分级及检测方法》 GB/T7106
- [21] 《民用建筑工程室内环境污染控制规范》 GB50325
- [22] 《环境空气质量指数（AQI）技术规定》 HJ633
- [23] 《住宅建筑室内装修污染控制技术标准》 JGJ/T436
- [24] 《民用建筑隔声设计规范》 GB 50118-2010
- [25] 《建筑隔声评价标准》 GB/T 50121-2005
- [26] 《建筑声学设计手册》
- [27] 《建筑隔声设计—空气声隔声技术》
- [28] 《声学手册》
- [29] 《噪声与振动控制工程手册》
- [30] 《建筑声学设计原理》
- [31] 《建筑设计资料集（2）第二版》
- [32] 《声环境质量标准》 GB 3096-2008
- [33] 《环境影响评价技术导则 声环境》 HJ2.4-2009
- [34] 《声环境功能区划分技术规范》 GB/T 15190-2014
- [35] 《城市居住区热环境设计标准》
- [36] 《建筑能效标识技术标准》(JGJ/T288-2012)
- [37] 《公共建筑节能设计标准》 GB50189-2015
- [38] 《建筑幕墙、门窗通用技术条件》 GB/T31433-2015
- [39] 《建筑碳排放计算标准》 GB/T51366-2019
- [40] 《建筑照明设计标准》
- [41] 《公共建筑节能设计标准》 DB11/T687-2024
- [42] 湖北省建筑节能与绿色建筑标准体系（2022年版）
- [43] 《低能耗居住建筑节能设计标准》 DB42/T559-2022