

文章编号: 1671-6612 (2022) 04-598-12

近似优化算法在半集中式 空调系统末端优化设计中的应用

刘雪峰 陈文鉴

(华南理工大学电力学院 广州 510640)

【摘要】 目前, 空调系统的优化设计存在巨大的问题, 一方面传统优化算法不能适应多变量高维度的末端优化问题, 另一方面, 空调的负荷分布存在极大的随机性, 一旦设计选型偏离设计工况, 会使空调系统性能的下降, 造成极大能源浪费。针对这些问题, 以能源利用效率为目标函数, 使用随机走步变步长的近似优化方法对末端选型进行优化, 并通过次优理论寻求对不同负荷分布适用性最好的末端选型。结果表明: 随机走步变步长的近似优化算法对不同的负荷分布的平均能源利用效率的优化增量可达 0.014。对于不同的随机负荷波动, 反向验证后次优解的平均能源利用效率增量可达 0.087, 且优化后 95%置信区间的下限比传统设计 95%置信区间的上限高 0.04, 证明近似优化算法可以提高中央空调冷冻水系统的能源利用效率以及对随机负荷的适应性, 对末端的选型优化有重要指导作用。

【关键词】 冷冻水系统; 次优理论; 末端优化; 近似优化算法

中图分类号 TK1/TU111 文献标识码 A

The Application of Approximate Optimization Algorithm in The Terminal Optimization Design of Semi-Centralized Air Conditioning System

Liu Xuefeng Chen Wenjian

(School of electric power, South China University of technology, Guangzhou, 510640)

【Abstract】 At present, there are huge problems in the optimization design of air conditioning system. On the one hand, the traditional optimization algorithm cannot adapt to the end-of-pipe optimization problem with high multi-variable dimension. On the other hand, the load distribution of air conditioning has great randomness. Once the design selection deviates from the design condition, the performance of air conditioning system will decline, resulting in great energy waste. In view of these problems, this paper takes energy utilization efficiency as the objective function, uses the approximate optimization method of random walking variable step size to optimize the air conditioning terminal, and seeks the air conditioning terminal selection with the best applicability to different load distributions through the suboptimal theory. The results show that the optimization increment of average energy utilization efficiency for different load distributions can reach 0.014. For different random load fluctuations, the average energy efficiency increment of the sub-optimal solution after reverse verification can reach 0.087, and the lower limit of the 95 % confidence interval after optimization is 0.04 higher than the upper limit of the 95 % confidence interval of the traditional design. It is proved that the approximate optimization algorithm can improve the energy efficiency of the central air conditioning

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51778234); 广东省自然科学基金资助项目 (2020A1515010762);
广东省省级科技计划项目 (2017A020216024); 天河区科技计划项目 (201705YH103)

作者 (通讯作者) 简介: 刘雪峰 (1976-), 男, 副教授, E-mail: lyxfliu@scut.edu.cn

收稿日期: 2022-02-28

chilled water system and the adaptability to random load, which has an important guiding role for the selection and optimization of air conditioning terminals.

【Keywords】 chilled water system; Suboptimum theory; Optimization of air Conditioning Terminal; approximate optimum algorithm

0 引言

建筑节能是我国实现碳达峰、碳中和的关键领域,公共建筑的中央空调系统能耗往往占据建筑能耗 40~50%以上,而冷冻水系统能耗占集中式中央空调系统的 60%以上^[1,2]。目前中央空调系统的设计方式一般为通过规范设计参数对建筑进行负荷计算,根据计算结果对中央空调冷冻水系统各设备进行选型,为保证设计的可靠性,设计人员通常会盲目放大安全系数,使中央空调系统的选型偏大,造成投资成本与运行成本的浪费,故合理的末端选型对建筑节能具有重要作用。

目前,很多学者都对中央空调系统部件设计优化的问题展开研究。在对末端进行优化设计时,算法的计算效率是优化可行的必要条件,进化算法、顺序搜索算法、遗传算法(GA)、粒子群算法(PSO)、GA-PSO组合算法等优化算法已经可以很好地对末端尺寸选型进行优化^[3-7],但是遗传算法在处理多变量、非线性、参数高度耦合的末端选型设计优化问题时,会有参数合理设定困难,优化效率慢、优化收敛性差等缺点,粒子群算法收敛速度快,但是收敛精度不高,且容易陷入局部最优的困境。对于各类混合算法虽然在一定程度上可以弥补各自算法的缺点,但是算法编写与调试较复杂,且很难找到速度与精度的平衡点^[8]。中央空调系统一般以全生命周期成本为评价指标^[9],为提高优化算法收敛速度,研究通常使用灰箱或者黑箱的方法来简化末端、管网等部件的数学模型^[7],忽略表冷器热力性能与管网水力性能对中央空调系统整体的影响,使其研究结果难以推广到大型复杂中央空调系统的应用过程中。其次,负荷分布在时间与空间上也具有不确定性,实际工程项目中很难选择到与优化结果相匹配的末端选型,这会使末端的性能偏离其设计工况,进而导致冷冻水管网的性能及系统的能耗发生改变^[10],故很难根据优化结果对末端选型设计进行优化。

为此,本文提出一种近似优化算法来探究随机负荷约束下大型复杂冷冻水系统末端优化问题。根

据热力平衡与水力平衡建立空调末端的热力模型和同程管网的水力模型,计算中央空调系统能源利用效率,使用随机走步变步长的近似优化算法获取大型复杂空调系统各末端的选型优化结果,并对其次优解群进行统计分析,以获得适应于不同负荷分布变化的末端设计方案,并对设计方案进行反向验证,为末端设计选型提供一些理论指导。

1 大型冷冻水系统空调末端优化模型

1.1 同程管网运行特性模型

1.1.1 同程管网拓扑结构

本文以同程管网为研究对象,同程管网包括空调末端(AHU),阀门以及连接管道等元件。同程管网的层数从底层到高层依次编号为 1~k,每层的末端从近端到远端依次编号为 1~n,拓扑模型如图 1 所示。

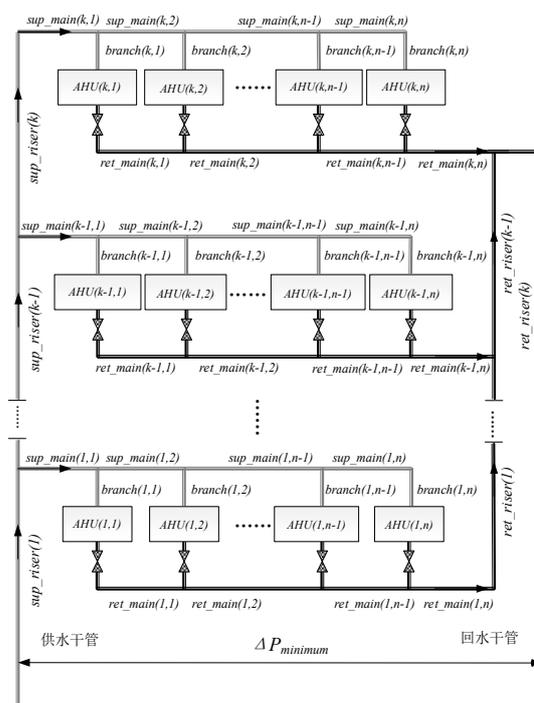


图 1 同程管网的拓扑图模型

Fig.1 T Topological Graph Model of Simultaneous Pipeline Network

1.1.2 末端换热设备热力模型

表面式换热器是最常见的空调系统末端换热设备,针对一次回风系统,在考虑传热传质以及能量守恒的情况下^[11],室内外空气混合与表冷器送风处理室内热湿负荷的方程为:

$$\begin{aligned} i_c &= i_w m_{new} + i_N (1 - m_{new}) \\ d_c &= d_w m_{new} + d_N (1 - m_{new}) \\ Q &= (i_N - i_0) G \\ W &= (d_N - d_0) G \end{aligned}$$

在考虑热交换系数、接触系数与空气-水换热热量平衡的情况下,表冷器处理空气过程方程为:

$$\begin{aligned} i_0 &= i_0 (F_{AHU}, G, G_{branch}, i_c, d_c, t_{w1}) \\ d_0 &= d_0 (F_{AHU}, G, G_{branch}, i_c, d_c, t_{w1}) \end{aligned}$$

式中, i_w 、 i_N 、 i_c 、 i_0 是室外、室内、风机盘管进风及出风的空气焓值, kJ/kg ; d_w 、 d_N 、 d_c 、 d_0 为室外、室内、风机盘管进风及出风的空气含湿量, g/m^3 ; m_{new} 为新风比; Q 为室内冷负荷, kW ; W 为室内湿负荷, kg/h ; G 为表冷器风量, m^3/h ; G_{branch} 为表冷器水流量, kg/s ; F_{AHU} 为表冷器换热面积选型, m^2 ; t_{w1} 为冷冻水进水温度, $^\circ\text{C}$; t_{w2} 为表冷器出水温度, $^\circ\text{C}$ 。

由上述公式可知,在已知风机盘管类型、室内温度设置参数,室外空气状态参数、新风比、冷冻水进水温度的情况下,表冷器所需水流量 G_{branch} 和

$$\begin{cases} \Delta P_{(1,1)} = \Delta P_{branch(1,1)} + (\Delta P_{sup-main(1,1)} + L + \Delta P_{ret-main(1,n)} + (\Delta P_{sup-riser(1)} + (\Delta P_{ret-riser(1)} + L + \Delta P_{ret-riser(k)})) \\ \Delta P_{(j,i)} = \Delta P_{branch(j,i)} + (\Delta P_{sup-main(j,1)} + L + \Delta P_{sup-main(j,i)} + (\Delta P_{ret-main(j,i)} + L + \Delta P_{ret-main(j,n)} + (\Delta P_{sup-riser(1)} + L + \Delta P_{sup-riser(j)})) \\ \quad + (\Delta P_{ret-riser(j)} + L + \Delta P_{ret-riser(k)}) \\ \Delta P_{minimum} = \max(\Delta P_{(j,i)}) \\ \Delta P_{val(j,i)} = \Delta P_{minimum} - \Delta P_{(j,i)} \end{cases} \quad (2)$$

式中, $\Delta P_{branch(j,i)}$ 为末端支路压降, Pa ; $\Delta P_{sup-main(j,i)}$ 为供水干管压降, Pa ; $\Delta P_{ret-main(j,i)}$ 为回水干管压降, Pa ; $\Delta P_{sup-riser(j)}$ 为供立管压降, Pa ; $\Delta P_{ret-riser(j)}$ 为回水立管压降, Pa ; $\Delta P_{(j,i)}$ 为各支路总压差, Pa ; $\Delta P_{minimum}$ 为最小供回水压差, Pa ; $\Delta P_{val(j,i)}$ 为阀门损耗压降, Pa 。

1.2 目标函数

中央空调系统经济性评价一般包括空调投资费用、空调年运行费用与系统的维护和折旧费

表冷器出水温度 t_{w2} 可表示为:

$$G_{branch} = G_{branch} (F_{AHU}, Q, W, t_n, i_w, d_w, M_{new}, t_{w1})$$

1.1.3 同程管网水力模型

管段内水流动的总压降包括沿程阻力压降和局部阻力压降,管段压降 ΔP 可由公式 (1) 获得:

$$\begin{cases} \varepsilon = 2 \times \Delta / D \\ V = 4 \times G / \pi D^2 \\ Re = V \times D / \gamma \\ \Delta P = \frac{1}{2} \times \left(\lambda \times \frac{L}{D} + \xi_{branch} + \xi_{AHU} + \xi_{valve} \right) \times \rho \times V^2 \end{cases} \quad (1)$$

式中, ε 为相对粗糙度; Re 为雷诺数; G 为管道流量, kg/s ; D 为管径, m ; Δ 为表面粗糙度, m ; γ 为冷冻水的平均动力粘度, 取值 1.3×10^{-6} ; ξ_{branch} 为管道局部阻力系数; ξ_{AHU} 为末端局部阻力系数; ξ_{valve} 为阀门局部阻力系数; L 为管道管长, m ; λ 为管道沿程阻力系数。

假设末端支路的温控阀采用比例积分线性调节阀且可以对管网进行水力调节。根据并联环路压力平衡的原理,已知各管段压降的情况下,计算各支路中最大压降作为管网的最小供回水压差,由温控阀对其余管网支路的压降进行调节以达到压降平衡^[12]。最小供回水压差 $\Delta P_{minimum}$ 的计算公式 (2) 如下:

用^[9],在考虑上述费用的情况下,本文以能源利用效率为目标函数^[13],能源利用效率的定义为输送到用户的能量与冷冻水系统消耗能量的比值,表达式为:

$$\eta = \frac{Q}{COP} \div \left(\frac{Q}{COP} + P_{AHU} + P_{pump} + P_{build} \right)$$

式中, Q 为制冷量, kW ; COP 为能效比。

间接等效功率 P_{build} 为建筑设备投资维护费用 等价转化为建筑实际运行功率的数值, 表示为:

$$P_{build} = \sum_{j=0}^{j=n} \sum_{i=0}^{i=n} \left[\frac{C(F_{AHU(j,i)}) \times (1+C_1) \times (1+C_2) \times \left(\frac{i \times (1+i)^m}{(1+i)^m - 1} \right)}{8760 \times \varphi_{use} \times C_e} \right]$$

C 为表冷器的投资金额, 元; C_1 为表冷器的安装成本系数; C_2 为表冷器的维护成本系数; 实际贴现率 $i = i_d - i_g / (1+i_g)$; i_g 为通货膨胀率; i_d 为贴现率、 m 为投资回收周期^[10], 年; φ_{use} 为表冷器的使用率、 C_e 为电价, kWh/元。

末端运行总功率 P_{AHU} 为:

$$P_{AHU} = \left[\sum_{j=0}^{j=k} \sum_{i=0}^{i=n} P_{AHU}(F_{AHU(j,i)}) \right]$$

输送功率 P_{pump} 为:

$$P_{pump} = \Delta P_{minimum} \cdot G_{pump}$$

式中, $\Delta P_{minimum}$ 为输送冷冻水的最小供回水压差, Pa; G_{pump} 为输送冷冻水的流量, kg/s。

1.3 近似优化计算方法

1.3.1 随机走步的近似优化算法

(1) 局部最优计算过程

冷冻水系统末端优化设计的寻优自变量是末端的换热面积矩阵 $F = (f_1, f_2, \dots, f_n)$, 其中 n 为末端编号, 优化目标为冷冻水系统能源利用效率 $\eta(F)$, 设置随机走步的步长 A , 控制模量为 M 。为了消除不同变量之间的数量级差异, 以最大最小值为上下限, 将换热面积矩阵进行归一化处理, 转化为-1~1 的数值。为避免陷入局部最优的情况, 以末端换热面积选型的最大值和最小值为约束条件, 将寻优自变量矩阵等距离划分为 m 个寻优计算面域。

针对第 m 个面域, 以末端换热面积选型平均值作为每个计算面域的初始寻优中心, 设置为 $F_0 = (f_{10}, f_{20}, \dots, f_{n0})$, 获取一随机矩阵 $(a_1, a_2, \dots, a_n)^T$, a_n 为一定范围内的随机变量。通过随机矩阵得到模为 1 的随机单位向量 U_k :

$$U_k = (1/\sqrt{a_1^2 + a_2^2 + \dots + a_n^2})(a_1, a_2 \dots a_n)^T$$

并根据换热面积选型的最大值、最小值及控制模量计算步长比例系数 $lamta$:

$$lamta = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\max(f_i) - \min(f_i)}{2} \right)^2 / (M-1)}$$

获取下一步随机矩阵 F_k , 其中 $f_{ik} = f_{i0} + m \cdot lamta \cdot U_k(a_i)$, 对下一步随机矩阵进行逆归一化处理, 并计算冷冻水系统能源利用效率 $\eta(F)_k$ 。若 $\eta(F)_k > \eta(F)_{temp}$, 则保存优化结果 $\eta(F)_{temp} = \eta(F)_k$, $F_{temp} = F_k$ 。保持寻优中心不变, 取下一步随机矩阵继续计算 $\eta(F)_{k+1}$ 。直到步骤次数 N 达到设定值, 跳出迭代循环, 继续下一个面域的寻优计算。

(2) 全局最优计算过程

取上节 m 个寻优计算面域中能源利用效率最高的面域所对应的自变量矩阵 F_{op} 作为全局优化的起始自变量, 获取下一步随机矩阵 F_k , 其中, $f_{ik} = f_{i0} + A \cdot lamta \cdot U_k(a_i)$, 计算冷冻水管网能源利用效率 $\eta(F)_k$ 。若 $\eta(F)_k > \eta(F)_{temp}$, 则 $\eta(F)_{temp} = \eta(F)_k$, 对应的随机矩阵作为新的寻优中心 $F_0 = F_k$, 否则取下一步随机矩阵继续计算 $\eta(F)_{k+1}$ 。当步骤次数达到设定值时, 减小步长 A , 并根据步长 A 对步骤次数 N 进行调整, 以减少循环迭代的次数, 提高计算效率。若 $A < \varepsilon$, 迭代完成, 得到末端的换热面积矩阵最优解 F_{op} 和 η_{op} ^[14]。

1.3.2 表冷器结构参数连续化

在寻优计算过程中, 为保证近似优化算法的准确性与收敛性, 本文以表冷器的换热面积 F_{AHU} 作为其型号标识, 即每一种换热面积代表一种表冷器选型规格, 将离散的表冷器选型连续化。其余结构参数, 包括表冷器的迎风面积 F_y , 风量 G , 功率 P_{AHU} , 价格 C_{AHU} , 水侧局部阻力系数 ξ_{AHU} 等, 可由表冷器换热面积拟合而成, 实现降维处理。拟合函数 (3) 如下所示:

$$\begin{aligned} F_y &= C_1 \cdot F_{AHU} + C_2 \\ G &= C_3 \cdot F_{AHU} + C_4 \\ P_{AHU} &= C_5 \cdot G + C_6 \\ C_{AHU} &= C_7 \cdot F_{AHU} + C_8 \\ \xi_{AHU} &= C_9 \cdot F_{AHU} + C_{10} \end{aligned} \quad (3)$$

式中, $C_1、C_2、C_3、C_4、C_5、C_6、C_7、C_8、C_9、C_{10}$ 为拟合函数的经验参数, 可由实际数据拟合获取。

1.3.3 次优理论分析及次优解群获取

对于多变量优化问题, 变量组合方式多样, 由于计算效率的限制及数据的稀疏性, 通过近似算法只能对部分组合进行计算, 其优化结果不一定是最优解。其次, 当负荷发生波动或者是建筑功能改变的情况下, 末端选型最优解不一定适应实际工况, 其能源利用效率也不一定是最高。所以必须使用次优理论的方法来处理多变量优化问题, 以寻求对不同负荷工况具有适应性的末端选型。

本文引入能源利用效率裕度作这一指标来获取次优解群 G_{sub} , 其中能源利用效率裕度表示为次优解群中最大值和最小值之差与次优解群最大值的比值, 其中次优解群的最大值一般是优化解群的最大值, 可表示为:

$$G_{sub} \subset G_{all}$$

$$X = \frac{\max(G_{all}) - \min(G_{sub})}{\max(G_{all})}$$

式中, G_{sub} 为次优解群, G_{all} 为算法迭代计算输出的总优化解群, X 为此优化结果的能源利用效率裕度。本文以能源利用效率裕度 2% 的数据集作为次优解群。

对于末端优化问题, 不同末端的选型的概率是独立的, 满足独立性假说, 由 $P(f_1|G_{sub})_{max} \cdot P(f_2|G_{sub})_{max} \cdot \dots \cdot P(f_n|G_{sub})_{max} = P(f_1, f_2, \dots, f_n|G_{sub})_{max}$ 可知, 假如已知次优解群 G_{sub} 中 (f_1, f_2, \dots, f_n) 的最大概率选型, 那么 (f_1, f_2, \dots, f_n) 同时发生的能源利用效率 $\eta(f_1, f_2, \dots, f_n)$ 也是最大的。通过上述分析可得, 以次优解群中概率密度最大的区域作为优化的次优解, 可以使末端选型在一定的负荷变化下仍有较高的能源利用效率。

1.4 冷冻水系统空调末端优化计算过程

获取建筑的房间数量, 管道的长度以及管径等结构参数, 及建筑房间的热湿负荷, 温度设定值, 室外干湿球温度, 冷冻水系统供水温度, 新风比等负荷参数。以末端换热面积选型平均值作为初始优化中心, 计算其能源利用效率。通过随机走步变步长的近似优化算法不断对末端选型进行迭代优化,

得到优化结果, 输出次优解群, 并对次优解群进行统计分析, 优化过程如图 2 所示。

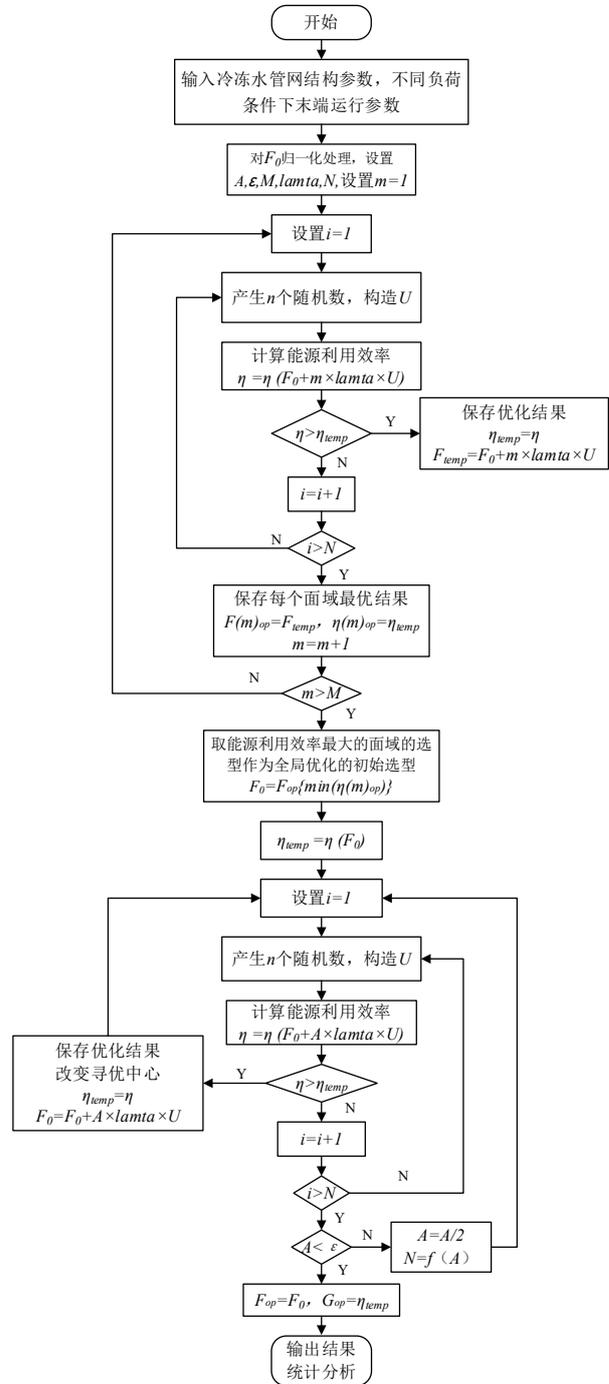


图 2 优化路径

Fig.2 Optimized Path

2 计算结果及讨论

2.1 结构参数设置

表 1 为表冷器换热面积与其他结构参数关联式的经验参数值。由实际数据拟合而成。

表 1 拟合函数的经验参数表

Table 1 The empirical parameter table of fitting function

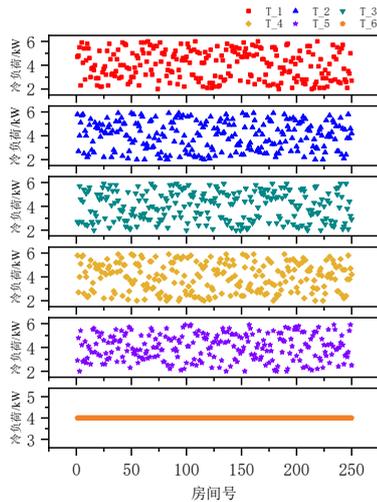
经验参数	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8	C_9	C_{10}
数值	0.0141	-0.0007	0.0591	0.1169	286.69	5.256	44.563	147.87	3.2119	33.509

管径按照推荐流速法选取。供水干管 L_{sup_main} 与回水干管 L_{ret_main} 为 7 m, 末端支路 L_{branch} 的管长、供水立管 L_{sup_riser} , 回水立管 L_{ret_riser} 的管长为 5 m。管道局部阻力 ζ_{branch} 为 3, 温控阀全开的局部阻力 ζ_{valve} 为 22, 温控阀管径为 DN20。

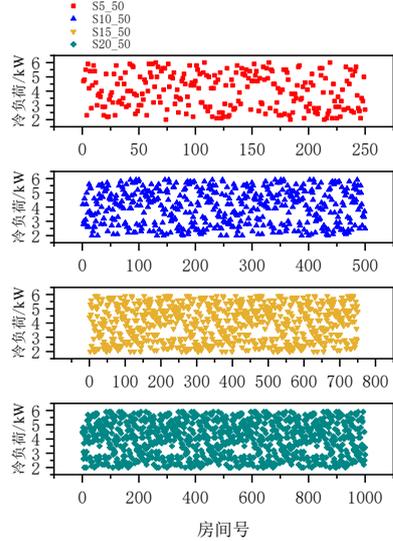
2.2 建筑负荷参数设置

为了探究随机走步变步长的近似优化方法对末端选型的优化效果, 本文构建 5 层规模的建筑模

型, 每层设置 50 个末端 (编号为 S_{5_50}), 设置 5 种随机负荷分布和 1 种平均负荷分布工况, 分别命名为 T_1、T_2、T_3、T_4、T_5、T_6。为了研究建筑规模对优化算法的影响, 针对随机的负荷工况, 本文再构建 10 层、15 层、20 层的建筑模型, 每层 50 个末端 (编号分别为 S_{10_50} 、 S_{15_50} 、 S_{20_50}), 各工况负荷分布如图 3 所示。



(a) S_{5_50} 规模 6 种负荷分布



(b) 4 种建筑规模的随机负荷分布

图 3 各负荷分布的负荷取值

Fig.3 Load value of each load distribution

在进行末端设计时, 室内干球温度取 25°C , 室内相对湿度维持在 40%~65%之间, 室外干球温度取 33.5°C , 室外湿球温度取 27.7°C , 新风比取 0.1, 冷冻水进水温度取 7.0°C , 末端平均冷负荷均为 4kW, 湿负荷为 0.55g/s。通货膨胀率取 8%、贴现率取 4%^[10]、回收周期取 15 年、使用率取 0.75、电费取 0.69 元/kWh、能效比取 5。

2.3 近似优化算法优化结果

2.3.1 迭代过程

为了验证随机走步变步长的近似算法对末端优化问题的有效性, 以 S_{5_50} 规模 6 种负荷分布为例, 通过随机走步变步长的近似优化算法, 对中央

空调能源利用效率模型进行多变量优化求解。

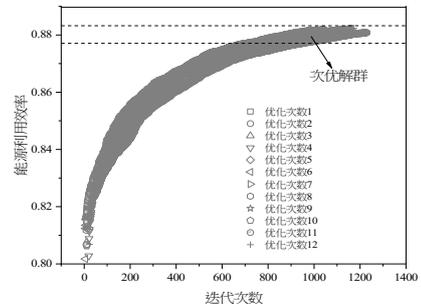


图 4 迭代过程

Fig.4 Iteration process

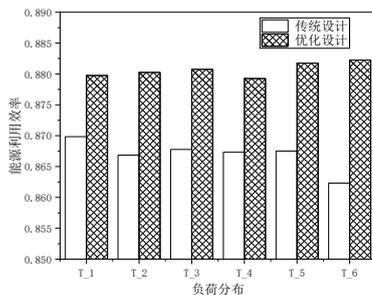
图 4 反映了使用随机走步变步长的算法对 S_{5_50} 规模 T_6 工况多次进行优化计算的迭代过程。由图

可知，在迭代初始的时候，不同优化次数的能源利用效率较低，不到 0.800，随着迭代次数的增加，中央空调系统的能源利用效率都急速增加，当迭代次数超过 200 次后，能源利用效率达到 0.844~0.855，提升的速度放缓，最终达到一个极值并跳出循环，多次优化结果的能源利用效率集中在 0.878~0.882，不同优化次数的优化结果相差不到 0.004，可得，在算法初始寻优中心不同的情况下，算法仍有较高的收敛性与稳定性，随机走步变步长算法对初始自变量的选择不敏感，且复现性较好。

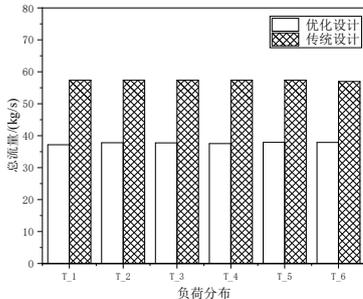
2.3.2 能源利用效率优化结果分析

能源利用效率最高点仅代表通过近似优化得到的最优结果，当负荷偏离设计工况时，不一定满足最高能源利用效率的要求，而其中次优解中概率密度最大的能源利用效率虽然小于最优解，但是其末端选型的范围最广，对不同负荷的适用性最好，故本文以概率密度最大的次优解作为近似优化的解，次优解群的获取由 1.3.3 节与图 4 可得。

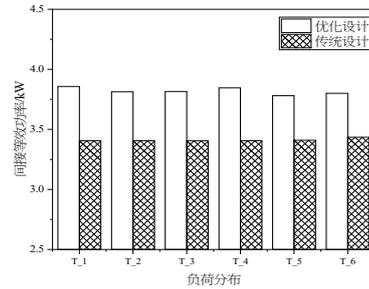
在设计负荷条件下，以表冷器进出水温差为 5℃且进水温度为 7℃时所对应的换热面积作为传统设计的换热面积选型。



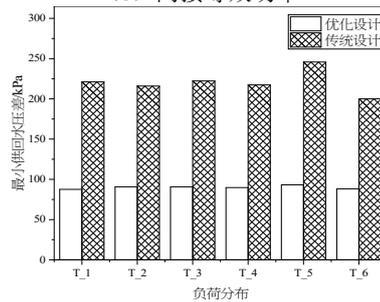
(a) 能源利用效率



(b) 中央空调系统总流量



(c) 间接等效功率



(d) 最小供回水压差

图 5 中央空调系统能源利用效率及其他参数的优化结果
Fig.5 Optimization results of energy utilization efficiency and other parameters of central air conditioning system

Error! Reference source not found. 反映了 S_{5_50} 规模 6 种负荷分布优化前后中央空调系统各参数的变化情况。由图可知，随机走步变步长的近似优化算法对不同负荷工况均有优化效果，6 种负荷工况的平均能源利用效率从 0.867 上升到 0.881，增加了 0.014。由图也可知优化后的总供水流量以及系统最小供回水压差均有下降，6 种负荷工况的平均流量从 57.3kg/s 下降到 36.7kg/s，最小供回水压差从 220kPa 下降到 90kPa。而优化后系统的间接等效功率略有上升，间接等效功率从 3.4kW 提高到 3.8kW。说明通过优化算法，可以适度提高末端选型，有效降低系统的流量与最小供回水压差，进而提高系统的能源利用效率。

2.3.3 换热面积选型优化结果分析

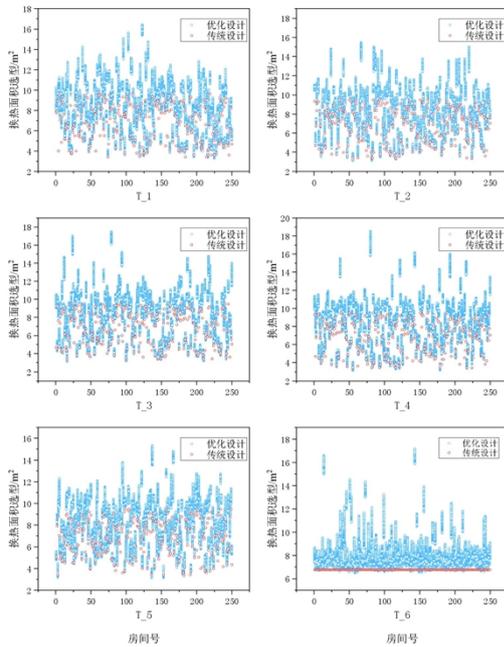


图 6 末端换热面积选型的优化结果

Fig.6 Optimization results of terminal heat transfer area selection

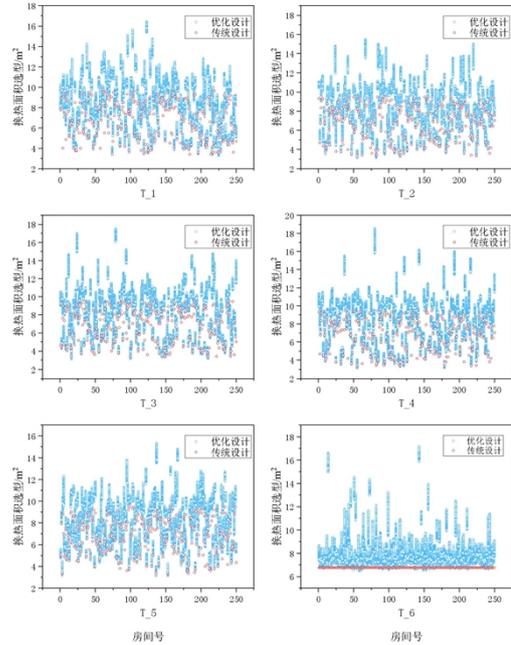


图 6 反映了 $S_{5,50}$ 规模 6 种负荷分布次优解集的末端换热面积选型与传统选型末端选型, 对

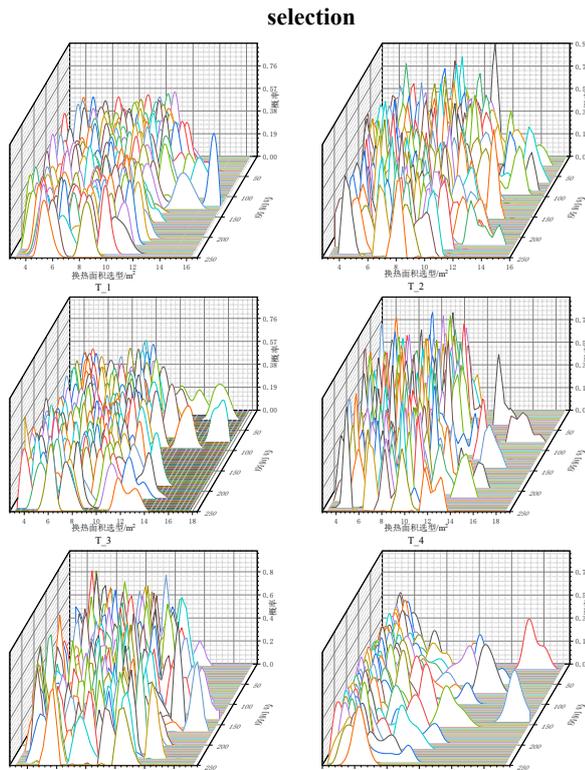


图 7 末端换热面积选型概率密度

Fig.7 Probability Density of Heat Transfer Area Selection for Air Conditioning Terminal

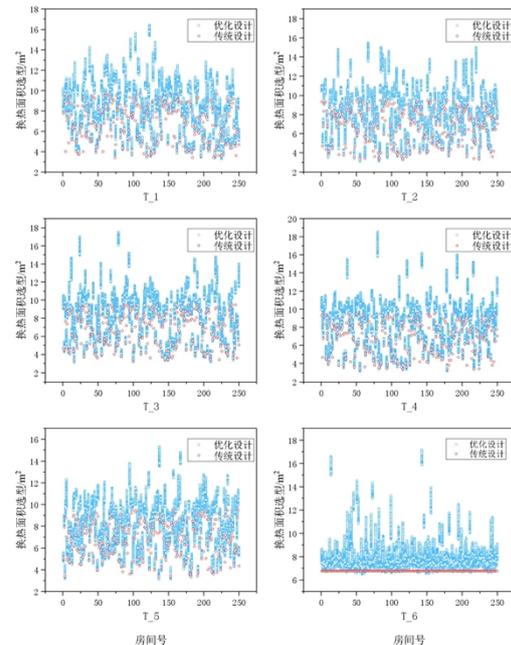


图 6 的 6 种负荷工况次优解集的换热面积概率密度进行统计, 可得图 7。由图可知, 6 种负荷工况优化设计的末端选型随负荷的波动而变化, 优化后末端选型可以对负荷进行精确响应。且优化后末端的选型相较于优化前有较大的提升, 6 种负荷分布平均末端换热面积选型从 6.68m^2 提高到 8.05m^2 , 增加了 21%, 证明了算法的有效性。

2.4 建筑规模对近似优化算法的影响

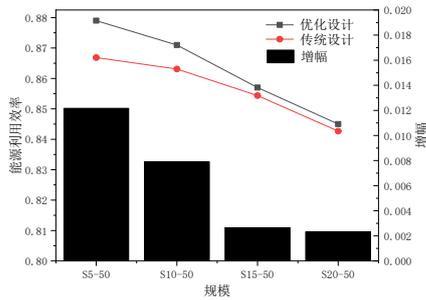


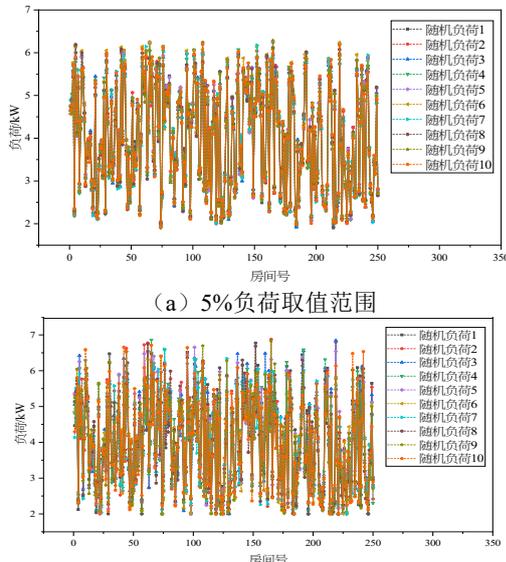
图 8 4 种建筑规模能源利用效率概率的优化结果

Fig.8 Optimization results of four building-scale energy efficiency probabilities

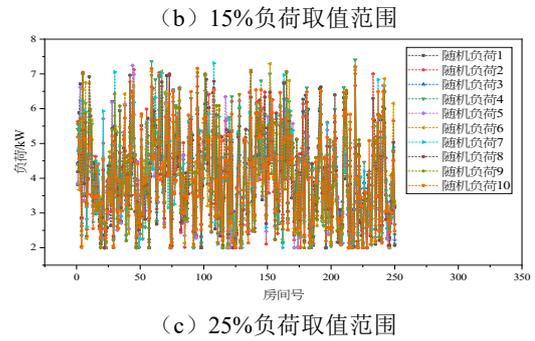
图 8 反映了不同建筑规模优化前后的能源利用效率。由图可知，优化后 5 层建筑规模最大概率的能源利用效率从 0.867 提高到 0.879，增加了 0.012。而 20 层建筑规模最大概率的能源效率从 0.843 提高到 0.845，仅增加 0.002。可得随着建筑规模的增加，随机走步变步长算法优化的效果不断下降。原因在于本优化算法采用随机组合的方式对自变量进行寻优，当自变量数目较多时，寻优组合方式成倍增加，由于数据的稀疏性及计算效率的限制，很难在随机的组合集中找到最优的组合。

2.5 随机负荷取值范围对近似算法的影响

由上文可知对某一特定的负荷分布形式，随机走步变步长近似优化算法与传统设计相比能源利用效率均有一定的优化效果。但在实际运行过程中，末端处理的热湿负荷在不断变化，末端设计选型过程中随机性比较大，提高末端对不确定负荷的适应性对中央空调系统的高效运行至关重要。



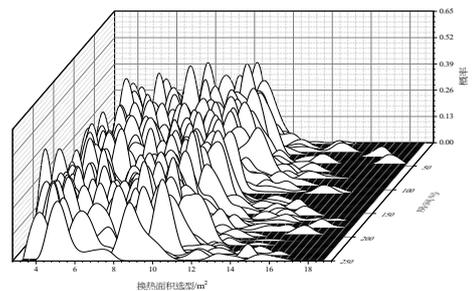
(a) 5% 负荷取值范围



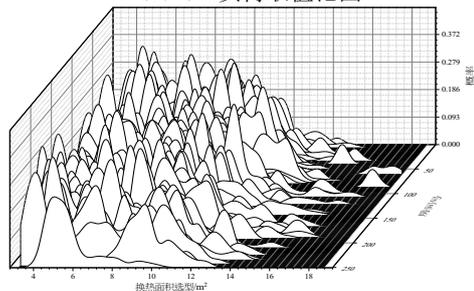
(c) 25% 负荷取值范围

图 9 不同负荷取值范围的 10 种随机负荷取值
Fig.9 10 random load values with different load fluctuations

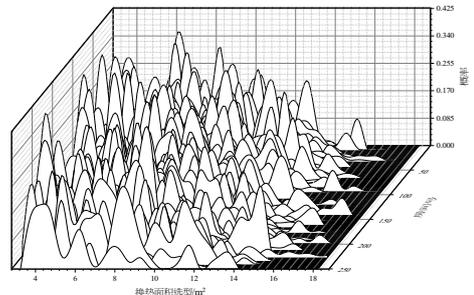
对 S_{5_50} 规模 T₁ 负荷分布进行随机取值，随机取值方法为，在以设计负荷为基准的上下 5%、15%、25% 的负荷区间内随机取值，每种负荷区间取 10 种随机负荷工况，随机负荷取值如图 9 所示。对图 9 的 10 种随机负荷进行优化计算，将各种随机负荷工况计算的次优解群作为同组数据进行统计分析，获得适应不同负荷工况的末端换热面积选型的概率分布。



(a) 5% 负荷取值范围



(b) 15% 负荷取值范围



(c) 25%负荷取值范围

图 10 各房间次优解群换热面积选型的概率分布

Fig.10 Selection probability of heat exchange area of

each room

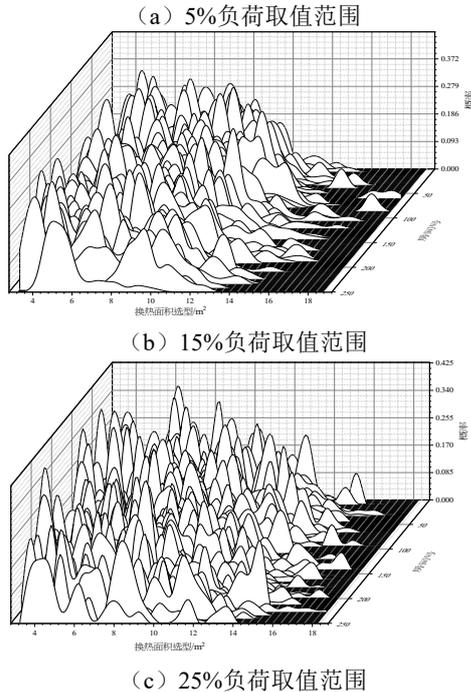


图 10 反映了优化后 3 种负荷取值范围的次优解群中换热面积选型的概率分布。由图可知优化后换热面积选型趋势与负荷分布的趋势基本吻合, 优化算法可以根据负荷的分布情况匹配相应末端选型, 侧面验证优化算法的有效性, 且随着负荷波动的加剧, 同一房间的换热面积选型的上下限也越大, 概率分布也越平均。

2.6 反向验证

2.6.1 反向验证过程

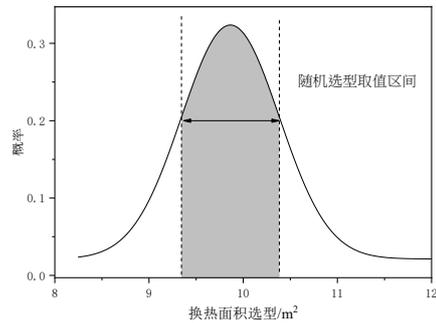


图 11 反向验证末端取值范围

Fig.11 Reverse verification end value range

取随机负荷次优解群的概率分布中概率密度最大的区域作为末端选型优化问题的次优解。图 11 反映了 S_{5_50} 规模 T_1 负荷分布第 10 个房间的选型取值区间。如图所示, 为了探求选型随机性对中央空调系统能源利用效率的影响, 以及对近似优化算法的次优解进行反向验证, 本文以次优解中概率最大的选型换热面积的 (90%~110%) 选型区间为次优解的选型区间。

在寻优计算过程中, 空调末端选型作为优化计算模型的输入变量, 在寻优计算过程中是连续变化的, 以保证算法的准确性与收敛性。但优化计算所得的末端选型不可以直接应用于实际工程项目中, 而是先将选型转化为实际末端换热面积选型, 再进行计算, 实际末端取值如

表 2 所示。

表 2 实际表冷器选型与换热面积的对应关系

Table 2 The corresponding relationship between actual surface cooler selection and heat exchange area

选型	Fp34	Fp51	Fp68	Fp85	Fp102	Fp136	Fp170	Fp204	Fp238
换热面积/m ²	4.259	5.370	6.019	7.220	8.334	10.186	12.779	14.446	16.298

图 12 反映了 S_{5_50} 规模 T_1 工况第一层第 10 个房间的换热面积选型概率分布。由图可知, 一个末端有多种实际选型取值结果, 将优化后连续的末

端取值转化为实际末端取值时, 应选取最靠近次优解的实际末端选型取值。

在考虑末端选型的随机性的情况下, 对不同负

荷工况次优解的随机选型区间进行随机取值,得到中央空调系统末端选型,并计算在该负荷分布条件下的能源利用效率,将计算结果输出到解集进行统计分析。

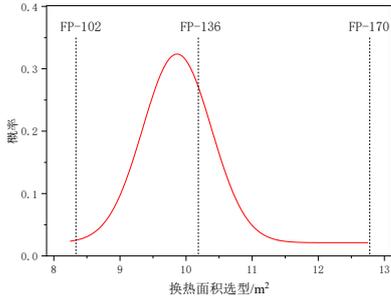


图 12 离散末端取值概率

Fig.12 Discrete terminal probability

2.6.2 6种负荷分布反向验证

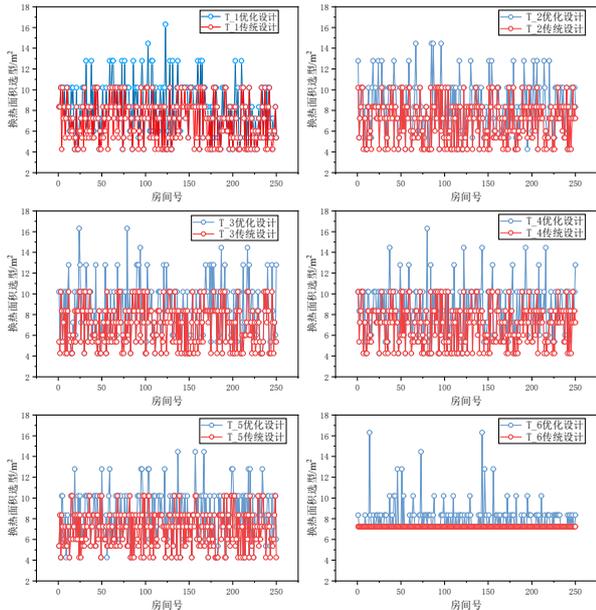


图 13 6种负荷分布反向验证换热面积选型取值

Fig.13 Six load distributions reverse verification of heat transfer area selection values

图 13 反映了 6 种负荷分布反向验证实际换热面积选型取值。由图可知,优化设计整体选型大于传统选型,传统设计的换热面积选型为 7.01m²,而优化设计的换热面积选型为 8.22m²,增加了 17.3%。

图 14 反映了 6 种负荷分布反向验证的能源利用效率。由图可知,优化后 T₁ 到 T₅ 负荷工况实际平均能源利用效率从传统设计的 0.870 提升到 0.875,而 T₆ 负荷工况优化后实际能源利用效率从传统设计的 0.885 降低到 0.880。原因在于数

据的稀疏性导致反向验证存在统计学偏差,但是偏差在 5%的范围内,属于合理的置信区间。

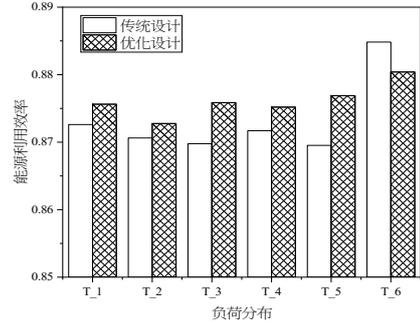


图 14 反向验证能源利用效率

Fig.14 Reverse verification of actual energy efficiency

2.6.3 3种负荷随机取值范围反向验证

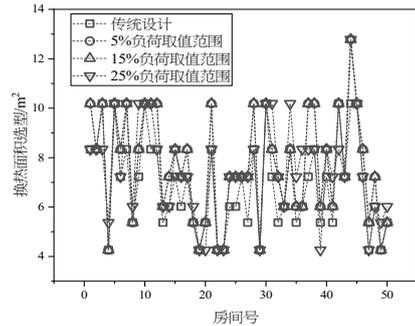
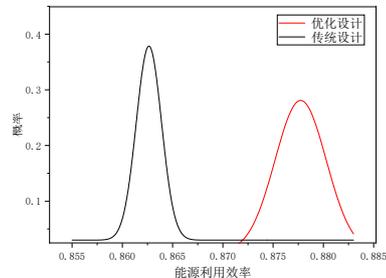


图 15 反向验证换热面积选型取值

Fig.15 Reverse verification of heat exchange area selection value

图 15 反映了 S_{5_50} 规模 T₁ 工况第一层 50 个末端反向验证实际换热面积选型的取值。由图可知,优化设计的实际面积取值虽与传统设计有重叠,但是优化设计整体选型大于传统选型,其中传统选型的末端平均换热面积选型仅为 6.96m²,而负荷波动为 25%的末端平均换热面积为 7.75m²,增加了 11.3%。说明通过次优方法,在考虑负荷波动的情况下,会适度提高末端的选型大小,以提高对负荷的适应性。



(a) 5%负荷取值范围

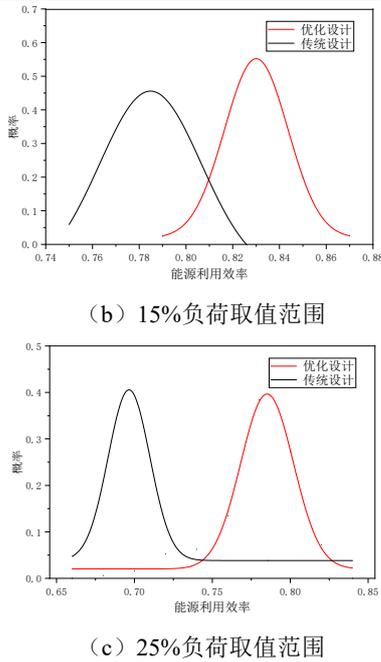


图 16 实际验证能源利用效率解集正态分布

Fig.16 Energy use efficiency reverse verification solution set normal distribution

表 3 反向验证能源利用效率解集正态分布参数

Table 3 Verify the normal distribution parameters of the energy use efficiency solution set reversely

	均值	95%置信区间下限	95%置信区间上限
优化设计			
5%负荷取值范围	0.878	0.873	0.883
15%负荷取值范围	0.830	0.803	0.857
25%负荷取值范围	0.783	0.753	0.814
传统设计			
5%负荷取值范围	0.863	0.860	0.865
15%负荷取值范围	0.785	0.741	0.828
25%负荷取值范围	0.696	0.680	0.713

图 16 反映了 S_{5_50} 规模 T_1 工况 3 种负荷取值范围对 10 种随机负荷工况反向验证的能源利用效率解集正态分布。表 3 反映了 3 种负荷取值范围反向验证能源利用效率解集正态分布的参数。由图和表可知, 随着负荷取值范围的增加, 优化设计与传统设计的能源利用效率均不断减少, 优化设计的能

源利用效率均值从 5% 负荷取值范围的 0.878 降低到 25% 负荷取值范围的 0.783, 减少了 10.8%。但是优化设计相较于传统设计能源利用效率仍有较大的提升, 随着负荷波动的增加, 优化后能源利用效率增量从 5% 负荷取值范围的 0.015 提高到 25% 负荷取值范围的 0.087。由图和表也可知, 随着负荷波动的增加, 反向验证能源利用效率的范围也不断增加, 其中优化设计的 95% 置信区间的上下限之差从 5% 负荷取值范围的 0.010 提高到 25% 负荷取值范围的 0.061, 且优化后 95% 置信区间的下限比传统设计 95% 置信区间的上限高 0.04, 说明负荷的波动会使末端偏离其设计工况, 导致能源利用效率的降低, 并增加能源利用效率的波动范围, 不利于系统的节能运行。但是通过考虑负荷的不确定性, 对末端进行多次优化寻求适用性较强的次优解, 可以提高中央空调系统的节能效果以及对随机的负荷分布的适应性。

3 结论

由于实际中央空调系统具有多变量非线性高度耦合的特性, 且中央空调系统运行过程中负荷具有随机性, 传统优化算法很难对末端选型进行优化。为此, 本文使用随机走步变步长的近似优化算法, 在考虑负荷随机波动的条件下, 通过对次优解群进行统计分析, 探索末端选型设计的优化方法, 得到以下结论:

(1) 随机走步变步长的近似优化算法对不同的负荷工况均有一定的优化效果, 平均其能源利用效率可增加 0.014。不同优化次数的优化结果相差不到 0.004, 算法的收敛性与稳定性较好, 可复现性较高。优化后的换热面积选型与负荷分布的趋势基本吻合, 验证了算法的有效性。取次优解群中概率密度最大的区域作为末端选型优化问题的次优解, 对其进行反向验证, 反向验证的平均能源利用效率相较传统设计方案仍有较大的提高。

(2) 对于多变量优化问题, 由于计算效率的限制, 对于某些负荷工况很难在随机的组合集中找到最优的实际离散末端选型组合, 特别是针对 20 层建筑的负荷工况, 其能源利用效率的增量仅仅达到 0.002。

(3) 随着负荷取值范围的增加, 优化设计与传统设计的能源利用效率均不断减少, 优化设计降

幅可达 10.8%。但是优化设计的能源利用效率相较于传统设计仍有较大的提升,增量可达 0.087,且优化后 95% 置信区间的下限比传统设计 95% 置信区间的上限高 0.04,说明负荷的波动会使末端偏离其设计工况,导致能源利用效率的降低,并增加能源利用效率的波动范围。但是通过次优理论,可以提高中央空调系统的能源利用效率以及对随机的负荷分布的适应性,对末端的选型优化有重要指导作用。

参考文献:

- [1] 2019 中国建筑能耗研究报告[J].建筑,2020,(7):30-39.
- [2] 刘国强,刘志斌,闫军威,等.集中式空调冷冻水系统运行特性分析与节能优化运行方法研究[J].建筑科学,2018,34(4):127-140.
- [3] Yang Z, Li X, Bowers C P, et al. An Efficient Evolutionary Approach to Parameter Identification in a Building Thermal Model[J]. IEEE Transactions on Systems Man & Cybernetics Part C, 2012,42(6):957-969.
- [4] Bichiou Y, Krarti M. Optimization of envelope and HVAC systems selection for residential buildings[J]. Energy & Buildings, 2011,43(12):3373-3382.
- [5] 王胤钧,于军琪.某冰蓄冷空调系统全寿命周期模型分析[J].暖通空调,2017,47(7):80-84.
- [6] Cheng Q, Wang S, Yan C. Robust optimal design of chilled water systems in buildings with quantified uncertainty and reliability for minimized life-cycle cost[J]. Energy and Buildings, 2016,126:159-169.
- [7] Zhuang C, Wang S, Tang R. Optimal Design of Multi-zone Air-conditioning Systems for Buildings Requiring Strict Humidity Control[J]. Energy Procedia,2019,158:3202-3207.
- [8] 李红亚,彭昱忠,邓楚燕,等.GA 与 PSO 的混合研究综述[J].计算机工程与应用,2018,54(2):20-28,39.
- [9] 王梅杰,王延可,温智理.基于生命周期的办公建筑空调循环水泵优化选择[J].制冷与空调,2013,27(1):78-81,85.
- [10] 张崎,燕达,朱丹丹,等.办公建筑室内发热量的空间不均匀特性对空调设计选型的影响分析[J].暖通空调,2014,44(10):26-32.
- [11] 卢智涛.次优解群分析法在复杂变量的冷源系统优化控制中的研究[D].广州:华南理工大学,2015.
- [12] 门玉葵,刘雪峰,杨鹏,等.异程管网热湿负荷分配次优解群及适应性[J].土木建筑与环境工程,2017,39(1):51-59.
- [13] 武杰,郭聪.并网分布式联供系统的能效研究[J].区域供热,2018,(6):130-134.
- [14] 刘金平,卢智涛,刘雪峰,等.基于次优化解群的冷冻水泵组全年能耗评价方法[J].华南理工大学学报(自然科学版),2015,43(7):106-117.