

间歇供暖模式下高校教学建筑多目标排课优化研究

刘艳峰^{1,2}, 明 慧^{1,2}, 罗 西^{1,2}, 胡 亮^{1,2}, 孙勇凯³

(1. 西安建筑科技大学 西部绿色建筑国家重点实验室, 陕西 西安 710055;

2. 西安建筑科技大学 建筑设备科学与工程学院, 陕西 西安 710055; 3. 西安建筑科技大学 管理学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 我国高校教学建筑的供暖能耗普遍较高。基于间歇供暖模式对高校课程安排进行优化, 是通过改变不同教室的使用规律来降低教学楼整体能耗的有效方法。但仅以建筑节能为目的, 而忽略课程授课节次的时间间隔应尽量均匀这一常规排课优化目标, 会导致优化后的课程安排出现难以与学生客观学习规律相适应的不利结果。为解决以上问题, 本研究提出了间歇供暖模式下, 同时考虑建筑节能和课程授课时间间隔的高校教学建筑多目标排课优化方法, 通过 Building Controls Virtual Test Bed(BCVTB)平台建立 EnergyPlus 与 Matlab 的联合仿真模型, 并利用遗传算法在不同权重的优化目标下对高校排课问题进行计算求解。研究表明, 随着建筑节能目标所占权重的逐渐增大, 排课优化结果存在如下规律: 1) 室外温度整体较低的授课日内所排课程减少, 室外温度整体较高的授课日内所排课程增多; 2) 所有教室中全天不供暖次数以及仅下午供暖的累计次数明显增多; 3) 教室占用在时间上逐渐集中, 一个教室在半天内课程安排全满的概率显著增加; 4) 教学建筑典型周内累计供热量最多可降低 31.1%。

关键词: 建筑节能; 排课; 联合仿真; 多目标优化; 遗传算法

中图分类号: TU83

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2022)05-0710-08

Research on multi-objective course scheduling optimization of college teaching building under intermittent heating mode

LIU Yanfeng^{1,2}, MING Hui^{1,2}, LUO Xi^{1,2}, HU Liang^{1,2}, SUN Yongkai³

(1. State Key Laboratory of Green Building in Western China, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. School of Building Services Science and Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

3. School of Management, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

Abstract: The heating energy consumption of university teaching buildings in China is generally high. Optimization of curriculum arrangement based on intermittent heating mode is an effective way to reduce the overall energy consumption of teaching buildings by changing the use rules of different classrooms. However, it is only for the purpose of building energy conservation, while ignoring the conventional optimization goal of arranging courses that the interval between teaching sessions should be as uniform as possible, which will lead to adverse results that the optimized course arrangement is difficult to adapt to the objective learning laws of students. In order to solve the above problems, this study, considering both building energy conservation and course teaching time interval, proposes a multi-objective course scheduling optimization method for university teaching buildings under intermittent heating mode. The co-simulation model of EnergyPlus and Matlab is established through the Building Controls Virtual Test Bed (BCVTB) platform, and the genetic algorithm is used to calculate and solve the course scheduling problem under the optimization objective of different weights. The results show that, with the gradual increase of the weight of building energy saving objectives, the results of course scheduling optimization are as follows: 1) the number of courses scheduled in the teaching days with low outdoor temperature decreases, while the number of courses scheduled in the teaching days with high outdoor temperature increases; 2) the cumulative number of times that all classrooms are not heated all day and only heated in the afternoon has increased significantly; 3) classroom occupancy is gradually concentrated in time, and the probability that a classroom will be

收稿日期: 2021-07-09

修改稿日期: 2022-10-08

基金项目: 陕西省科技厅重点研发计划一般项目(2020SF-393)

第一作者: 刘艳峰(1971—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事建筑节能与可再生能源应用。E-mail: yanfengliu@xauat.edu.cn

通信作者: 罗 西(1988—), 女, 副教授, 硕士生导师, 主要从事区域综合能源系统规划。E-mail: xiluo@xauat.edu.cn

fully filled within half a day increases significantly; 4) the accumulated heat supply of teaching buildings in a typical week can be reduced by 31.1% at most.

Key words: building energy saving; course timetabling; co-simulation; multi-objective optimization; genetic algorithms

随着城市化进程的不断加快,我国建筑能耗持续增长,建筑作为最消耗能源的部门,其能耗约占社会总能耗的30%^[1].教育设施,如大学和学校建筑,约占商业部门能源需求的12%^[2-4].其中高校建筑中,教学楼是教师和学生最主要活动场所之一.因使用频率高,人员密度大,教学楼建筑能耗普遍较高.因此,通过合理手段降低高校教学楼建筑能耗,是亟待解决的问题.

常用的建筑节能手段可分为技术和管理两个手段^[5],技术方面主要是通过替换更高效的暖通空调系统,管理方面主要是改进暖通空调的控制方案,或改变室内人员的行为如占用时间表^[6-9].由于后者成本低,操作灵活,因此更受青睐^[10].学生和学校管理方是实施管理手段节能的主要主体,但由于学生并不承担教学建筑耗能所产生的费用,其主动采取节能行为意识缺失,需要学校管理方通过强制性的管理手段实现教学楼建筑节能,排课优化就是通过改变不同教室的使用规律来降低教学楼能耗的有效方法^[11-12].相关研究中,Sethanan等^[13]提出了以提高能源效率为目标的泰国某大学2006—2012学年排课方法,优化后的时间表能够节约7.12%~28.59%的能源.但为了简化问题,该研究在计算教室热传递值时假设所涉及参数固定不变,导致优化结果与实际情况不符.Song等^[14]提出了一种基于能源效率的课程时间表算法,利用该算法得到的最优课程时间表能够实现4%的节能效果.但是,该研究主要考虑的是课程在不同空间上的分配问题,而未探究其在时间上的安排.Kim等^[15]进行了一项研究,研究中考虑了居住者的最佳行为,以在保持教学建筑室内热舒适性的同时节约能源.但这种方法只改善了居住者的行为,没有提供一个节能的时间表.Jafarinejad等^[16]利用基于元启发式的双层优化方法得到排课方案,其优化方案在第一层根据能耗最低找到最优课程人数占用率,第二层将课程分配给每个时段,以使“分配的課程中存在的學生總數”与“从第一层获得的最佳占用情况”之间的偏差之和最小,最终优化结果可实现18.97%的能源节约.Fathi等^[17]分析了某大学综合楼中机械工程系、计算机工程系和礼堂的最佳时间表对供暖负

荷的影响.结果表明,提前两周开始上课,且将供暖温度由26℃调整为23℃,可以减少50%以上的能耗.但由于该优化模型计算量过大,为解决这个问题,删减了部分已知值的决策变量.在以建筑节能为目标的高校课程表优化研究中,教学楼采用间歇供暖模式能够大幅减低建筑能耗,而间歇供暖需要精准计算建筑内不同时段的用能需求,这要求排课优化中的建筑能耗计算应是逐时且动态的,但以上研究中对于建筑能耗的计算均过于粗糙.为了在排课优化中精准计算建筑能耗,Sun等^[18]借助Building Controls Virtual Test Bed(BCVTB)平台实现了EnergyPlus中建筑能耗模型和Matlab中排课模型的耦合仿真.但是,该研究仅以建筑节能为目的,却忽略了同一课程不同授课节次的时间间隔应尽量均匀这一常规排课优化目标,导致排课结果难以与学生的客观学习规律相适应^[19].

为弥补以上研究的不足,本研究提出了间歇供暖模式下,同时考虑建筑节能和课程授课时间间隔的高校教学楼建筑多目标排课优化方法,通过BCVTB建立EnergyPlus与Matlab的联合仿真模型,并利用遗传算法进行计算求解,研究方法可为高校教学楼建筑的排课优化提供理论参考.

1 模型的建立与求解方法

1.1 目标函数

本研究的排课问题是在满足教学资源约束的情况下,分配给定数量的课程到可用的教室和时间段,使得该课表在使同一门课程在不同授课节次之间的时间间隔均匀,同时保障教学楼建筑累计供热量能够有效降低.

本研究的优化目标之一为均匀化同一课程在不同授课节次之间的时间间隔(以下简称课程间隔目标).对于一周需安排多节次的某个课程,若该课程不同节次的时间间隔过短,学生学习效率会受到不利影响,授课效果大大降低.因此,应尽量将同一课程不同授课节次的时间间隔均匀分布.本研究对某门课程不同授课节次的时间间隔组合赋予一定的惩罚成本,通过最小化所有需要安排的课程的惩罚成本,以此实现同一课程不同授课

节次的时间间隔均匀化. 因此, 该优化目标的函数表达式为

$$\min f_1 = \sum_{c=1}^C f_c \times P_k \quad (1)$$

$$f_c = \begin{cases} 1, & F_c > 1; \\ 0, & \text{否则}; \end{cases} \quad (2)$$

式中: c 表示课程集合; f_c 为决策变量; F_c 表示课程 $c(c \in C)$ 一周内所需上课的次数; P_k 表示课程 $c(c \in C)$ 在一周内不同授课节次的时间间隔组合的惩罚值. 同一课程间隔时间越短, 则 P_k 的取值越大.

本研究的优化目标之二为最小化教学楼建筑一周内累计供热量(以下简称建筑节能目标), 以 f_2 表示. 本研究利用建筑能耗模拟软件 EnergyPlus 来计算教学楼建筑一周累计供热量值. EnergyPlus 是由美国劳伦斯伯克利国家实验室结合多个单位联合开发的能耗模拟软件, 对于建筑和暖通空调的设计都具有强大的指导作用^[20].

本研究采用加权求和法处理多目标求解问题, 即给不同的优化目标分配不同的权重值并求和, 从而将多目标问题转化为单目标问题. 由于课程间隔目标与建筑节能目标二者量级不同, 需要对不同的目标进行归一化处理, 处理方法如下.

$$F_1 = \frac{f_1(i) - \min f_1(i)}{\max f_1(i) - \min f_1(i)} \quad (3)$$

$$F_2 = \frac{f_2(i) - \min f_2(i)}{\max f_2(i) - \min f_2(i)} \quad (4)$$

式中: F_1 表示归一化处理后的课程时间间隔惩罚值; F_2 表示归一化后的建筑一周累计供热量, F_1 , F_2 范围在 0~1 之间.

经过归一化处理后, 本研究的目标函数最终可以表示为

$$\min F = \omega_1 \times F_1 + \omega_2 \times F_2 \quad (5)$$

式中: ω_1 , ω_2 表示课程间隔目标及建筑节能目标在优化模型中所占的权重, $\omega_1 + \omega_2 = 1$.

1.2 约束条件

1.2.1 课程资源约束

教学课程安排问题这一时间表问题可以表示为 $F(\text{timetable}) = \{C, L, S, W, R\}$, 其中 C , L , S , W , R 分别代表课程集合、教师集合、班级集合、时间集合以及教室集合, 具体表示方法如下: 课程集合: $C = \{c_1, c_2, \dots, c_c\}$; 教师集合: $L = \{l_1, l_2, \dots, l_l\}$; 班级集合: $S = \{s_1, s_2, \dots, s_s\}$; 时间集合: $W = \{w_1, w_2, \dots, w_w\}$; 教

室集合: $R = \{r_1, r_2, \dots, r_r\}$. 本研究假设一个教师仅教授一门课程. 为得到一个可行的课程时间表, 课程安排应满足以下约束条件:

(1) 同一个班级在同一个授课时段至多只能安排一门课程, 即

$$\sum_{c \in C_s} \sum_{r \in R} x_{crwj} \leq 1 \quad \forall s \in S, w \in W, j \in J \quad (6)$$

(2) 同一个教室在同一个授课时段至多只能安排一门课, 即

$$\sum_{c \in C} x_{crwj} \leq 1 \quad \forall r \in R, w \in W, j \in J \quad (7)$$

(3) 课程的每周课时数应达到规定的要求, 即

$$\sum_{r \in R} \sum_{w \in W} \sum_{j \in J} x_{crwj} = F_c \quad \forall c \in C \quad (8)$$

(4) 教室的座位数应大于上课的人数, 即

$$A_c * x_{crwj} \leq B_r \quad \forall c \in C, r \in R, w \in W, j \in J \quad (9)$$

式中: S 表示班级的集合; R 表示教室的集合; W 表示一周内的上课天数集合, w 可取值为 1, 2, 3, 4, 5, 即代表周一, 周二, 周三, 周四, 周五; J 表示一天内可用上课时间段的集合; C_s 表示班级 $s(s \in S)$ 的课程集合; A_c 表示课程 $c(c \in C)$ 的上课人数; B_r 表示教室 $r(r \in R)$ 的座位数. 其中 x_{crwj} 为二元决策变量, 其定义如下: 如果课程 $c(c \in C)$, 在 $w, j(w \in W, j \in J)$ 期间被安排在 $r(r \in R)$ 教室, 则取值为 1, 否则取值为 0.

1.2.2 供暖系统控制约束

教室供暖系统采用启停控制策略以实现间歇供暖, 具体措施如下:

$$G = \begin{cases} 0, & t \in D; \\ k, & t \in J; \end{cases} \quad (10)$$

$$k = \begin{cases} 1, & X_1 + X_2 \geq 1 \text{ 或 } X_3 + X_4 \geq 1; \\ 0, & X_1 + X_2 = 0 \text{ 或 } X_3 + X_4 = 0; \end{cases} \quad (11)$$

式中: G , k 表示供暖系统的启停控制, 值为 1 表示开启, 值为 0 则关闭. D 表示非供暖时间集合. t 表示一天中的时间, 单位 h ; X_1 , X_2 , X_3 , X_4 分别表示一天中上午第一节, 上午第二节, 下午第一节, 下午第二节是否安排上课, 若有课则值为 1, 否则为 0.

1.3 模型求解

本研究在 Matlab 中建立排课模型, 在 EnergyPlus 中建立建筑能耗模拟模型, 并利用遗传算法对该多目标优化模型进行求解. 为实现 Matlab 和 EnergyPlus 之间数据的实时传输, 本研究借助 BCVTB 平台建立联合仿真模型, 数据传输过程如

图 1 所示. 首先, Matlab 通过遗传算法获得第一次迭代产生的课表及该课表对应的各个教室供暖启停策略. Matlab 输出的课表以矩阵形式表示, 矩阵内部数字代表教室人数(图 2). 然后, Matlab 将上述结果发送给 EnergyPlus, EnergyPlus 计算该课表对应的教学楼建筑一周累计供热量, 并将供热量值返送给 Matlab. Matlab 利用遗传算法根据接收到的供热量值计算课表的适应度, 并进行选择、交叉、变异等操作, 从而产生新的种群, 再将新种群对应的课表及该课表对应的各个教室供暖启停策略再次发送给 EnergyPlus, 从而形成新一轮的循环. 重复上述步骤, 直至达到遗传算法中预先设置的最大迭代次数, 即可得到最优排课方案.

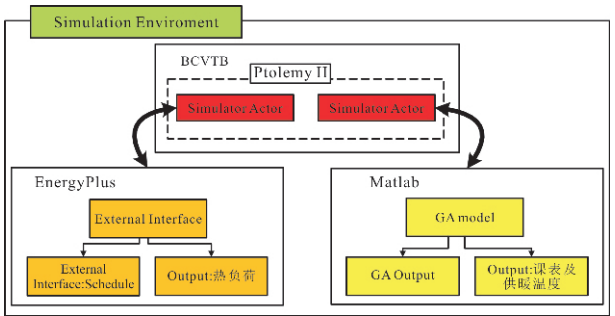


图 1 通过 BCVTB 实现 EnergyPlus 和 Matlab 的联合仿真
Fig. 1 Co-simulation of EnergyPlus and Matlab through BCVTB

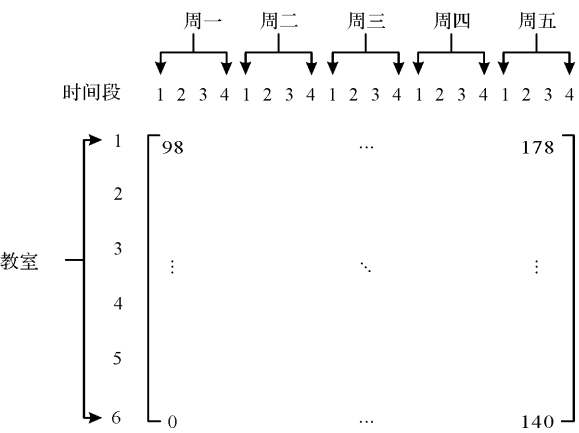


图 2 Matlab 课程表的输出结果呈现形式
Fig. 2 Presentation form of output results of Matlab course schedule

2 案例及结果分析

本研究使用的课程表数据来自中国西安某大学 2019—2020 年秋季学期第七周 6 个教室的课程表, 数据集中包括 42 名教师、17 个班级和 42 门课程. 上课时间段 j 取值为 1, 2, 3, 4(分别代表一天中的上午第一节 8:00—10:00, 上午第二节

10:00—12:00, 下午第一节 14:00—16:00, 下午第二节 16:00—18:00), 其余时间为非供暖时间 D. 课程按频率分为每周 1 次、每周 2 次、每周 3 次, 对应课程门数分别为 16、19、7, 课程周组合惩罚值如表 1 所示^[21]. 教学楼建筑包括 6 间教室和 1 间办公室, 层高 3.5 m, 总建筑面积为 1 078 m², 教室建筑平面图见图 3. 教室 1、4 座位数为 98, 教室 2、3、5 为 140, 教室 6 座位数为 178. 照明及用电设备的运行时间为 8:00—18:00 点全开, 其余时间全关. 设定建筑内人员散热量 70 W/人, 教室及办公室照明功率密度为 11 W/m², 设备功率密度为 5 W/m² 及 20 W/m², 相关数值均选自《实用供热空调设计手册》, 开启供暖时, 其温度设定值为 20 ℃. 能耗模拟周期为从 1 月 13—1 月 19 日, EnergyPlus 中的模拟时间步长设定为 1 小时. 假定供暖季内每周课程安排相同. 经过前期反复模拟, 发现当种群大小为 60 时, 其在 65~80 代时已达到最优效果, 并保持了相对稳定的值. 因此, 种群大小设置为 60, 迭代次数最大设置为 100 次, 此外, 交叉概率为 0.5, 突变概率为 0.01^[18].

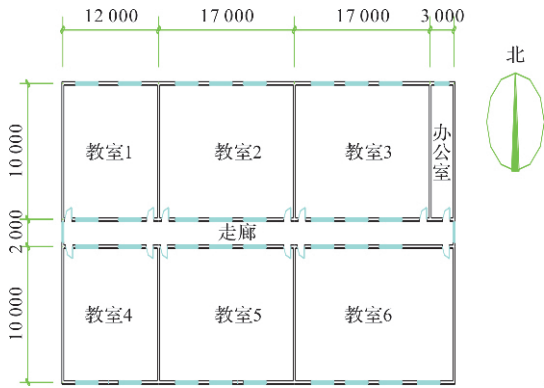


图 3 教学建筑平面布局图
Fig. 3 Layout of teaching building

表 1 课程周次组合惩罚值

Tab. 1 Weekly combination penalty value of courses

| 上课次数/周 | 课程周次组合 | 惩罚值(P_k) |
|--------|----------------|--------------|
| 2 | 2 次课排在同一天 | 2 |
| | 2 次课排在相邻 2 天 | 1 |
| | 其余组合 | 0 |
| 3 | 3 次课排在同一天 | 3 |
| | 有两次课排在同一天 | 2 |
| | 3 次课排在连续 3 天 | 1 |
| | 有 2 次课排在连续 2 天 | 0.5 |
| | 其余组合 | 0 |

2.1 课程安排结果分析

将课程间隔目标所占权重值 ω_1 从 0.1 取至 0.9 并分别进行多目标优化, 得到优化结果中不同授课节次时间间隔下的课程数量如图 4 所示. 同一课程不同节次的时间间隔过短会影响授课效果, 因此随着 ω_1 的增大, 授课节次时间间隔为 0 d 的课程数量逐渐减小, 时间间隔为 2 d 及以上的课程数逐渐增大. 时间间隔为 1 d 的课程数先增大后减小, 其先增大的原因是时间间隔为 0 d 课程的转移, 后减小的原因是随着 ω_1 的进一步增大, 时间间隔为 1 d 的课程会向间隔 2 d 以上转移, 导致其课程数减少.

教室每天的供暖模式有全天关闭、全天开启、仅 8:00—12:00 开启、仅 14:00—18:00 开启四种, 优化后 6 间教室不同供暖模式的统计数量如图 5 所示. 可以看出, 随着建筑节能目

标所占权重 ω_2 的增大, 全天不供暖次数以及仅下午开启供暖的次数明显增多. 这是因为下午室外温度相对上午而言较高, 将课程转移至下午可以减少建筑一周累计供热量.

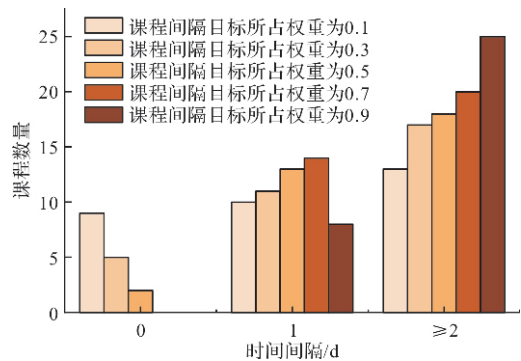


图 4 不同课程间隔目标权重下课程节次时间间隔优化结果

Fig. 4 Time interval optimization results of course sessions under different course interval target weights

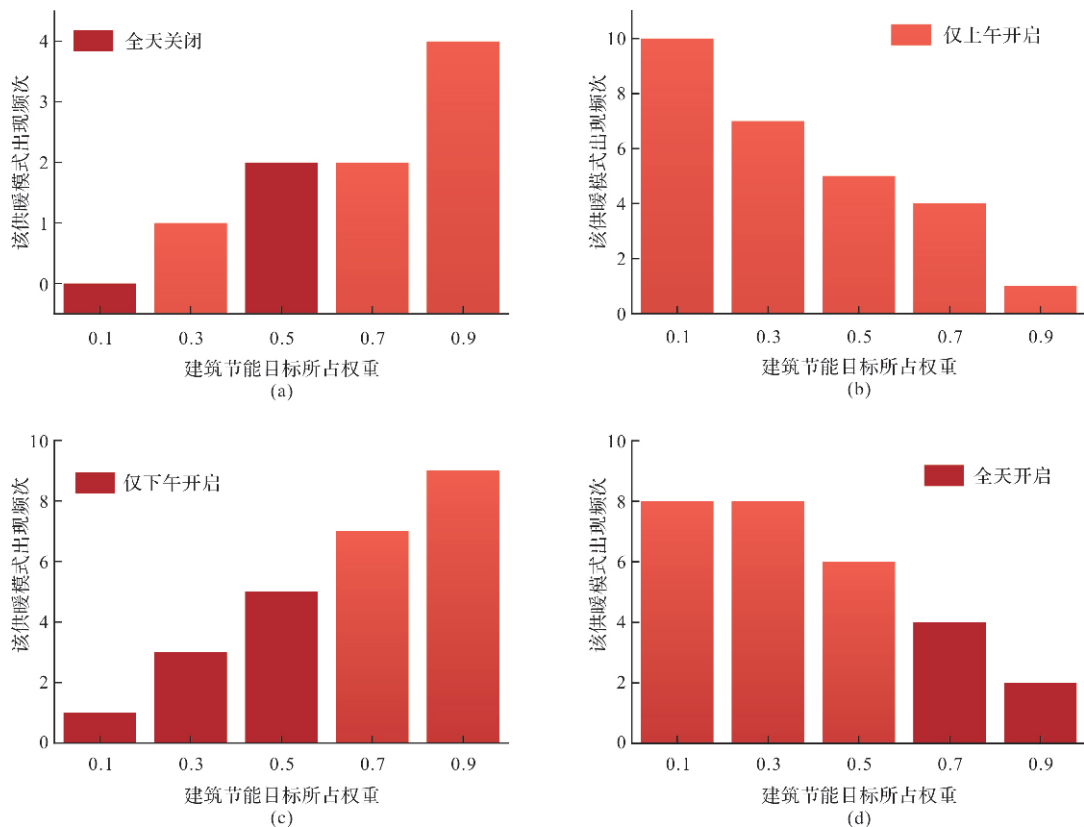


图 5 不同供暖模式出现频次

Fig. 5 Frequency of different heating modes

不同建筑节能目标权重下的课程安排表如图 6 所示, 图中粉色色块表示此时教室内安排有课程, 白色色块表示未安排课程, 由图 6 可知, 随着建筑节能目标所占权重的增大, 课程逐渐向下午以及周二集中, 且全天不开放供暖的次数增多. 不同

建筑节能目标权重下所需开启供暖的教室数如图 7 所示. 由图 7 可看出, 随着建筑节能所占权重的逐步增大, 其教学建筑一周累计所需开启的供暖教室数量呈逐步下降趋势.

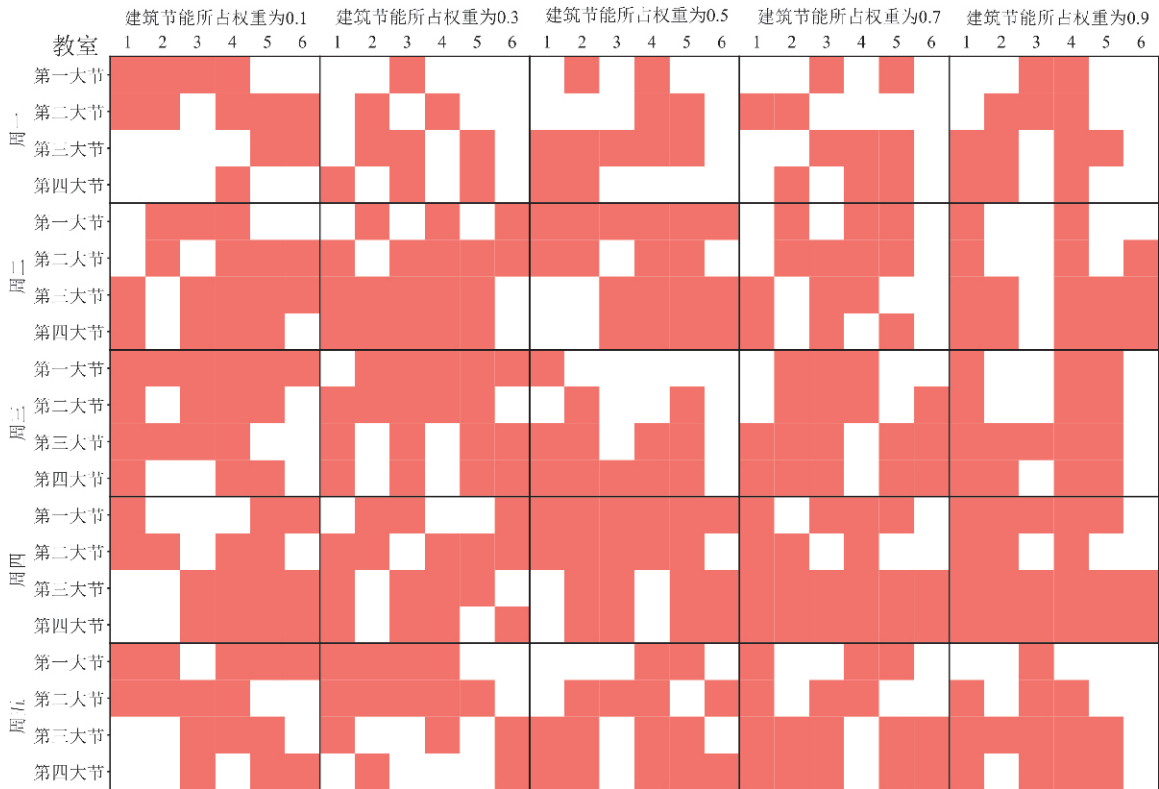


图 6 不同建筑节能目标权重下教室课程安排结果

Fig. 6 Results of classroom curriculum arrangement under different building energy efficiency target weights

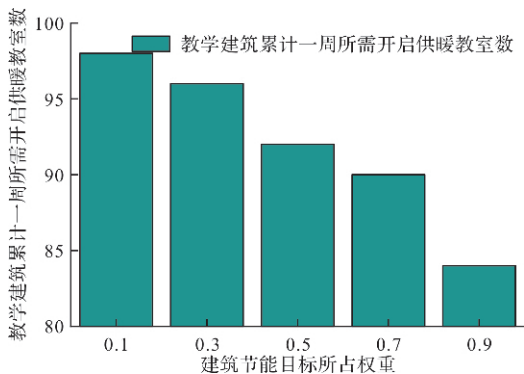


图 7 不同建筑节能目标权重下累计开启供暖教室数

Fig. 7 Cumulative number of classrooms with heating on under different building energy saving target weights

2.2 建筑供热量分析

由于室外温度与供暖设定温度之间的温差是影响建筑所需供热量的主要因素之一,本文主要从室外温度的角度进行分析.本研究使用的天气文件来自 EnergyPlus 软件官方网站,取冬季典型周 1 月 13 日—1 月 19 日进行模拟,其中周一至周五的室外天气温度如图 8 中折线所示,可以看出周一室外温度较低,周四室外气温较高.以建筑节能目标所占权重值 ω_2 为 0.2、0.4、0.6、0.8 为例分析不同权重下,教学楼建筑逐时需开启供暖教室数量的变化情况,优化结果如图 8 所示.

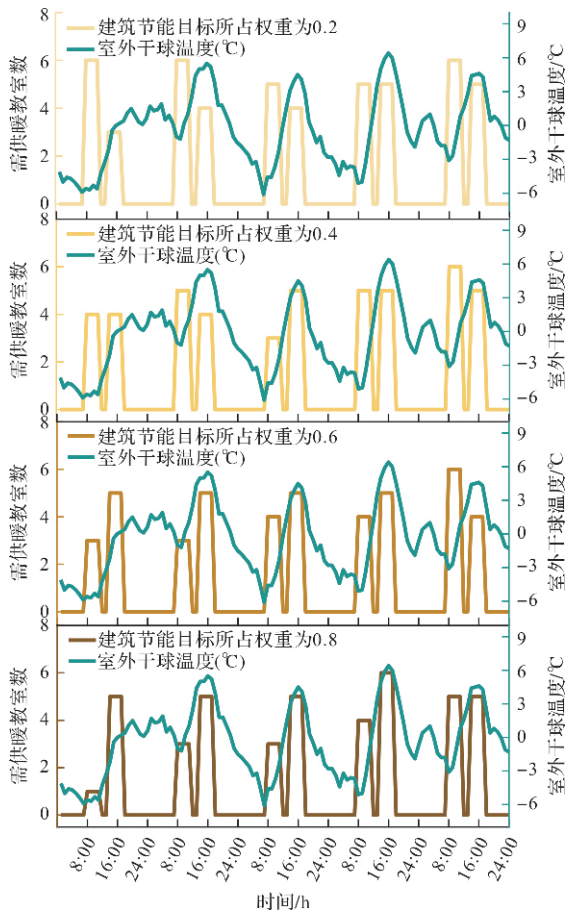


图 8 不同建筑节能目标权重下逐时需开启供暖教室数优化结果

Fig. 8 Optimization results of the number of heating classrooms opened hourly under different building energy saving target weights

可以看出,随着 ω_2 的增大,周一8:00—12:00需开启供暖教室数逐渐降低,周四全天供暖开启教室数增多。这是由于周一的室外温度较低,减少周一上午需开启供暖的教室数,有助于降低建筑供热量,而周四室外温度较高,将课程尽量安排在周四,可减少其余时间的课程数。同时,随着 ω_2 的增大,下午需开启供暖教室数增多,这是因为下午室外温度相对上午而言较高,下午供暖能耗较低,因此课程更多被排在下午。

随着 ω_2 的增大,教学建筑一周累计供热量的变化情况如图9所示。从图9可看出,考虑建筑节能的排课优化最多可使教学建筑典型周内的累计供热量降低31.1%。

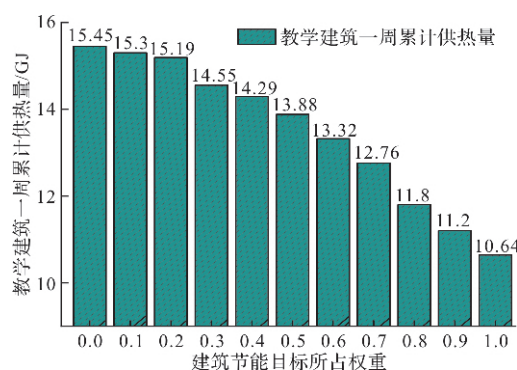


图9 不同建筑节能目标权重下教学建筑一周累计供热量优化结果

Fig. 9 Optimization results of cumulative heat supply of teaching buildings in a week under different building energy saving target weights

3 结论

从均匀化课程时间间隔以及降低教学楼累计供热量的角度优化高校课程表,提出一种间歇供暖模式下基于BCVTB平台的课程表优化方法,并基于该方法对西安某高校教学楼的秋季课程进行模拟优化。研究结果表明,随着建筑节能在多目标优化中所占权重的逐渐增大,其课程分布有如下规律:

(1)室外温度较低的时间段内所排课程减少,室外温度较高的时间段内所安课程增多;

(2)教学楼所有教室中全天不供暖次数以及仅下午供暖的累计次数明显增多;

(3)课表中的教室占用率在时间上逐渐集中,一个教室里两门课连续排列的概率显著增加;

(4)教学建筑典型周内累计供热量最多可降低31.1%;

由于本排课优化研究中未考虑学生对于自习室的使用,下一步工作中将在优化模型中加入学生自习室的使用信息,从而得到更为贴合实际的课程表。

参考文献 References

- [1] 周思童,沈意,孙奇,等.基于DeST-C对武汉地区办公建筑能耗影响因素的研究[J].中国科技信息,2019(17):70-72.
ZHOU Sitong, SHEN Yi, SUN qi, et al. Research on the influencing factors of office building energy consumption in Wuha based on DeST-C [J]. China Science and Technology Information, 2019(17):70-72.
- [2] CHUNG M H, RHEE E K. Potential opportunities for energy conservation in existing buildings on university campus; a field survey in Korea [J]. Energy Build, 2014, 78: 176-182.
- [3] ASIMAKOPOULOS D A, SANTAMOURIS M, FARROU I, et al. Modeling the energy demand projection of the building sector in Greece in the 21st century[J]. Energy and Buildings, 2012, 49: 488-498.
- [4] GUL M S, PATIDAR S. Understanding the energy consumption and occupancy of a multipurpose academic building[J]. Energy Build, 2015, 87: 155-165.
- [5] ROMANI Z, DRAOUI A, ALLARD F. Metamodeling the heating and cooling energy needs and simultaneous building envelope optimization for low energy building design in Morocco[J]. Energy Build, 2015, 102: 139-148.
- [6] ANDERSON K, SONG K, LEE S, et al. Longitudinal analysis of normative energy use feedback on dormitory occupants [J]. Appl. Energy, 2017, 189: 623-639.
- [7] IYER M, KEMPTON W, PAYNE C. Comparison groups on bills: automated, personalized energy information[J]. Energy Build, 2006, 38 (8): 988-996.
- [8] KORKAS C D, BALDI S, MICHAILIDIS I, et al. Intelligent energy and thermal comfort management in grid-connected microgrids with heterogeneous occupancy schedule[J]. Appl. Energy, 2015, 149: 194-203.
- [9] KORKAS C D, BALDI S, MICHAILIDIS I, et al. Occupancy-based demand response and thermal comfort optimization in microgrids with renewable energy sources and energy storage[J]. Appl. Energy, 2016, 163: 93-104.
- [10] ZENG Y, ZHANG Z, KUSIAK A. Predictive modeling and optimization of a multi-zone HVAC s-system with data mining and firefly algorithms[J]. Energy,

- 2015, 86: 393-402.
- [11] YANG Z, BECERIK-GERBER B. The coupled effects of personalized occupancy profile based HVAC schedules and room reassignment on building energy use [J]. *Energy Build*, 2014, 78: 113-122.
- [12] SONG K, KWON N, ANDERSON K, et al. Predicting hourly energy consumption in buildings using occupancy-related characteristics of end-user groups[J]. *Energy Build*, 2017, 156: 121-133
- [13] SETHANAN K, THEERAKULPISUT S, BENJAPIYAPORN C. Improving energy efficiency by classroom scheduling: a case study in a thai university [J]. *Advanced Materials Research*, 2014 (931/932): 1089-1095.
- [14] SONG K, KIM S, PARK M, et al. Energy efficiency-based course timetabling for university buildings[J]. *Energy*, 2017, 139: 394-405.
- [15] KIM J, HONG T, JEONG J, et al. Establishment of an optimal occupant behavior considering the energy consumption and indoor environmental quality by region[J]. *Appl. Energy*, 2017, 204: 1431-1443.
- [16] JAFARINEJAD T, ERFANI A, FATHI A, et al. Bi-level energy-efficient occupancy profile optimization integrated with demand-driven control strategy: University building energy saving[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2019, 48: 101539.
- [17] FATHI A, SALEHI M, MOHAMMADI M, et al. Cooling/Heating Load Management in Educational Buildings through Course Scheduling [J]. *Journal of Building Engineering*, 2021, 41: 102405.
- [18] SUN Y, LUO X, LIU X. Optimization of a university timetable considering building energy efficiency: An approach based on the building controls virtual test bed platform using a genetic algorithm [J]. *Journal of Building Engineering*, 2021, 35: 102095.
- [19] 王文娟. 基于效率的课表编排及运行管理优化研究:以苏州科技大学为例[J]. *智库时代*, 2018(49):210-216. WANG Wenjuan. Study on the Optimization of Course Schedule and Operation Management Based on Efficiency: taking Suzhou University of Science and Technology as an Example[J]. *A think-tank era*, 2018(49): 210-216.
- [20] 申树仁. 基于 EnergyPlus 的大空间能耗模拟与负荷分析研究[D]. 上海:上海理工大学, 2018. SHEN Shuren. Energy simulation and load analysis of large space based on EnergyPlus[D]. Shanghai: University of Science and Technology, 2018
- [21] 何元园. 学分制下研究生课程排课算法的设计与实现[D]. 南京:南京师范大学, 2019. HE Yuanyuan. Design and implementation of post-graduate course arrangement algorithm under credit system [D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2019.

(编辑 桂智刚)