

基于动态预测的有源电力滤波器 选择性谐波补偿方法

李锦彬^{1,2}, 陈冲¹

(1.福州大学 电气工程与自动化学院, 福建 福州 350116;

2.福建工程学院 信息科学与工程学院, 福建 福州 350118)

摘要: 提出一种基于参考电流动态预测的选择性补偿方法。通过滑窗迭代 DFT 法提取与参考电流相关的特定次谐波;把动态预测算法植入补偿电流控制环节,预测下一拍的指令电流信号,并引入误差修正器提高预测精度,在此基础上计算逆变器的参考电压矢量;利用空间矢量脉宽调制法获得 PWM 信号,驱动三相变流器从而输出三相电压,实现选择性补偿。仿真和实验证明了该方法的正确性和可行性。

关键词: 有源电力滤波器;选择性谐波补偿;动态预测;无差拍控制

中图分类号: TM993

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2017)03-0279-06

Dynamic forecast-based selective harmonic compensation method for active power filter

Li Jinbin^{1,2}, Chen Chong¹

(1. College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China;

2. College of Information Science and Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

Abstract: To improve the compensation performance and efficiency of active power filters, a selective harmonic compensation method was proposed based on the dynamic forecast of reference current. Firstly, the specific harmonics associated with the reference current signal was extracted via sliding window iterative DFT method; then the dynamic forecast algorithm was implanted into the compensation current control link to estimate the reference current signal value at the following sampling period, and an error corrector was introduced to improve the prediction accuracy; and then the reference voltage vector of the inverter was calculated; Finally, the PWM signals to control the output voltage of the three-phase converter were obtained by the space vector pulse width modulation method, realizing the selective harmonic compensation. The simulation and experimental results confirm the correctness and feasibility of the proposed method.

Keywords: active power filter; selective harmonic compensation; dynamic forecast; deadbeat control

电力电子装置在给用户提供用电方便的同时也向公用电网注入大量的谐波、无功及不平衡电流,给电网造成污染,从而影响其他用户用电,甚

至使某些敏感设备无法正常运行^[1-2]。有源电力滤波器(active power filter, APF)是滤除谐波和补偿无功的新型电力电子装置^[3],近年来受到国内

外学者的关注、研究。然而,数字系统固有的计算延时放大了控制延时的负面效应,若不进行滞后补偿将降低 APF 的补偿性能,甚至使系统不稳定。谐波阶次越高,系统延时带来的负面影响越大,还可能出现谐波放大的现象^[4]。针对消除补偿系统延时问题,可以引进新型的控制算法对给定信号进行预测,相当于增加一个相位超前环节以对滞滞后环节,改善 APF 系统的性能。采用基于谐波指令电流动态预测法的前馈控制策略不增加额外的硬件成本,能有效地降低系统延时带来的影响。

实际应用中的 APF 通常按选择性补偿策略来设计,主要有 3 个方面原因:(1) APF 的带宽有限,补偿 20 次以上的谐波电流时效果不理想,而且这些阶次的谐波在总谐波中的占有率很小,不予补偿并不会影响电网供电。(2) 为了更加合理地分配 APF 的容量,实际应用中经常需要对补偿成分进行限幅;由于选择性补偿策略先是对单次谐波进行检测,而且无功和负序电流都是基频,所有的补偿成分都可以进行有效的限幅。(3) 在有源与无源混合使用的场合,APF 对谐波和无功的补偿必须避开无源补偿的成分;此外,选择性补偿策略可以避开个别配电网存在的谐振频点。

目前,针对 APF 选择性谐波补偿的研究主要包括选择性谐波检测算法^[5]和对指定次谐波电流综合控制策略^[6]。

新型的选择性谐波补偿策略采用动态预测算法预测下一采样周期的参考信号,并引入误差修正机制来提高预测精度。通过无差拍控制技术得出三相逆变器所需的电压空间矢量,经空间矢量脉宽调制获得 PWM 信号,实现实时补偿。

搭建 SIMULINK 仿真模型进行仿真研究,并在 APF 实验样机验证基于动态预测算法的选择性补偿策略,仿真和实验结果都证明了该预测算法的正确性和有效性。

1 APF 选择性补偿原理

针对三相三线并联型 APF 的选择性补偿进行研究,系统示意图如图 1 所示。其中: u_{sa} 、 u_{sb} 、 u_{sc} 为电网电压, i_{sa} 、 i_{sb} 、 i_{sc} 为电网输出的电流; i_{La} 、 i_{Lb} 、 i_{Lc} 为负载电流, i_{ca} 、 i_{cb} 、 i_{cc} 为 APF 输出的补偿电流; L 为 APF 输出滤波电感; C_{dc} 为变流器直流侧储能电容; U_{dc}^* 为直流侧电压参考值,而 U_{dc} 为其

实际值; i_{na}^* 、 i_{nb}^* 、 i_{nc}^* 为检测出的 n 次谐波电流。

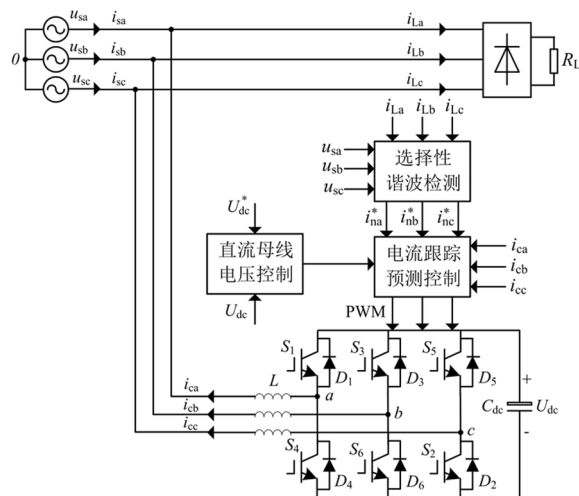


图 1 三相三线并联型 APF 原理示意图

Fig.1 Schematic of three-phase three-wire shunt APF

系统的工作流程为:(1) 利用选择性谐波检测方法提取负载电流中的待补偿谐波分量;(2) 按预测算法对所检测的谐波电流进行下一拍预测,反极性后即补偿控制系统的参考值;(3) 通过电流跟踪控制,产生 PWM 信号,驱动开关管,从而使逆变器输出电压,与电网电压一起作用在电感上,输出谐波电流,注入电网对消掉待补偿的谐波成分。

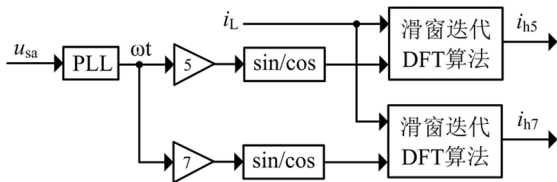
2 选择性谐波检测方法

对指定次谐波的快速、准确检测是 APF 实现选择性补偿的前提,目前的检测方法主要是采用多同步旋转坐标变换的检测方法^[5],或者采用引入旋转参考相量^[7]的方法,这些方法都要采用低通滤波器滤出交流分量。随着检测的谐波次数增加,同步旋转坐标系也成倍递增,因此系统比较复杂。笔者采用滑窗迭代离散傅里叶变换(discrete Fourier transform, DFT)法提取特定次谐波,检测精度高且动态响应快。图 2 给出了特定次谐波检测的原理。

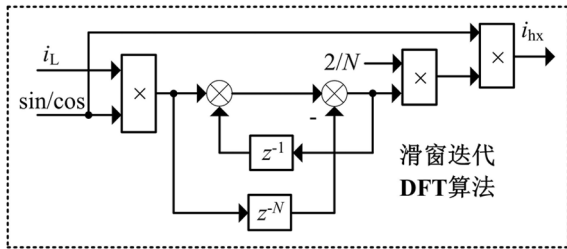
3 电流跟踪动态预测控制

3.1 电流无差拍控制策略

根据图 1 可列出 APF 回路电压方程:



(a) 指定次谐波检测



(b) 滑窗迭代 DFT 算法流程

图 2 选择性谐波检测算法

Fig.2 Selective harmonic detection algorithm

$$\begin{cases} u_{ao} - u_{sa} = L \frac{di_{ca}}{dt} \\ u_{bo} - u_{sb} = L \frac{di_{cb}}{dt} \\ u_{co} - u_{sc} = L \frac{di_{cc}}{dt} \end{cases} \quad (1)$$

式中, u_{ao} 、 u_{bo} 、 u_{co} 为变流器输出电压。对式(1)离散化, 得到如下的无差拍模型:

$$\begin{cases} u_{ao}(k) - u_{sa}(k) = \frac{L}{T_s} [i_{ca}(k+1) - i_{ca}(k)] \\ u_{bo}(k) - u_{sb}(k) = \frac{L}{T_s} [i_{cb}(k+1) - i_{cb}(k)] \\ u_{co}(k) - u_{sc}(k) = \frac{L}{T_s} [i_{cc}(k+1) - i_{cc}(k)] \end{cases} \quad (2)$$

式中, T_s 为开关周期, $i_{cx}(k)$ ($x = a, b, c$) 为 APF 的当前时刻补偿电流实测值, $i_{cx}(k+1)$ 为下一控制周期的补偿电流参考值, 下文表示为 $i_{cx}^*(k+1)$ 。

APF 是数字控制系统, 对谐波电流的提取、参考电压的计算等都需要指令周期的积累。因此, APF 当前拍发出的 PWM 脉冲实际上要等下一拍才会起作用, 产生了固有一拍的控制延时。消除固有一拍控制延时的方法是在谐波检测环节加入超前校正, 预测下一拍的参考电流是消除控制延时的有效方法。因此式(2)所示的无差拍模

型适合实现预测控制。

3.2 动态预测算法

若正弦信号表示为

$$x(t) = A \sin(\omega t + \varphi) \quad (3)$$

对 $x(t)$ 进行等间隔采样, 采样间隔为 T_s , 则得到序列 (k 为序列的序号)

$$x(k) = A \sin(\omega k T_s + \varphi) \quad (4)$$

当采样频率足够高时, 有

$$x(k+1) \approx x(k) + x'(k) T_s \quad (5)$$

将 $x'(n-1)$ 在 n 时刻一阶泰勒展开可得到

$$x'(k-1) \approx x'(k) + x''(k) T_s \quad (6)$$

进而

$$x'(k) \approx x'(k-1) + x''(k) T_s \quad (7)$$

而 $n-1$ 时刻的导数可近似表示为

$$x'(k-1) \approx \frac{x(k) - x(k-1)}{T_s} \quad (8)$$

考虑到在任意时刻

$$x''(t) = -\omega^2 A \sin(\omega t + \varphi) = -\omega^2 x(t) \quad (9)$$

所以有

$$x''(k) = -\omega^2 x(k) \quad (10)$$

将式(8)、(10)代入式(7)可得

$$x'(n) \approx \frac{x(n) - x(n-1)}{T_s} - \omega^2 T_s x(n) \quad (11)$$

再将式(11)代入式(5)可得

$$x(k+1) = [2 - (\omega T_s)^2] x(k) - x(k-1) \quad (12)$$

根据式(12), 用当前拍及前一拍的采样值 $x(n)$ 和 $x(n-1)$ 可估计下一拍的采样值 $x(n+1)$ 。由泰勒展开原理可知: 若连续函数无限次可导, 只要历史采样值足够多, 就能精确地拟合出有限时间内的函数。因为正弦函数具有如式(9)所示的微分性质, 导数的阶越高, 对应的差分方程阶次也越高, 参与估计未来值得历史样本数据也就越多, 估计值也就越接近真实值。

APF 是采用选择性补偿策略, 电流参考采用指定次谐波提取方法, 已经滤除了单次谐波的高频分量, 因此差分运算易使噪声放大的问题在此不存在。

理论上, 式(12)所示的差分方程可以计算更高阶, 但考虑到对电力谐波的滤出不需要达到绝对的零稳态误差, 所以本算法只使用到二次导数。

3.3 补偿电流预测控制

根据式(2)所示的无差拍控制模型,只要预测出 $i_{cx}^*(k+1)$ ($x=a,b,c$),即可计算出变流器输出电压空间矢量,从而利用空间矢量脉宽调制方法获得 PWM 信号。

根据式(12)所示的单频信号预测式,对 n 次谐波补偿电流参考值的一拍预测可表示为:

$$i_{cx}^*(k+1) = [2 - (n\omega T_s)^2] i_{cx}^*(k) - i_{cx}^*(k-1) \tag{13}$$

上述预测方法没有引入误差修正机制,属于开环控制。因此必须加入校正量来消除误差,预测电流误差修正流程如图 3 所示。

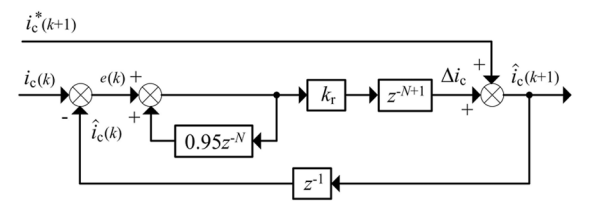


图 3 预测电流误差修正流程图

Fig.3 Flowchart of current forecast error correction

图 3 中, z^{-1} 和 z^{-N+1} 表示滞后 1 拍和 $(N-1)$ 拍; N 为一个电网周期的同步采样点数; $e(k)$ 为当前时刻 APF 实际输出的电流 $i_c(k)$ 与上一拍的指令电流预测值 $\hat{i}_c(k)$ 之间的误差; k_r 为稳定系数; Δi_c 是 $e(k)$ 进行重复预测控制得出的最终预测误差修正量; $\hat{i}_c(k+1)$ 是经误差修正后的最终参考电流预测值,表示为

$$\hat{i}_c(k+1) = i_c^*(k+1) + \Delta i_c. \tag{14}$$

4 仿真分析

4.1 仿真参数

为了验证动态预测算法的正确性,搭建了三相并联型 APF 的 SIMULINK 模型。APF 主要参数为:电网电压为 380 V,频率为 50 Hz;非线性负载采用三相不可控整流器带纯电阻负载,阻值 10 Ω ;直流侧电容 10 000 μF ,直流母线电压参考值 750 V;APF 输出端滤波电感 1.5 mH;采样频率 12.8 kHz;电流预测误差补偿系统的稳定系数 k_r 为 0.98。

负载电流(以 A 相为例)波形及其频谱如图 4 所示。负载谐波电流以低次为主,主要谐波成分是 5、7、11、13、17 和 19 次,总畸变率 THD = 26.65%。

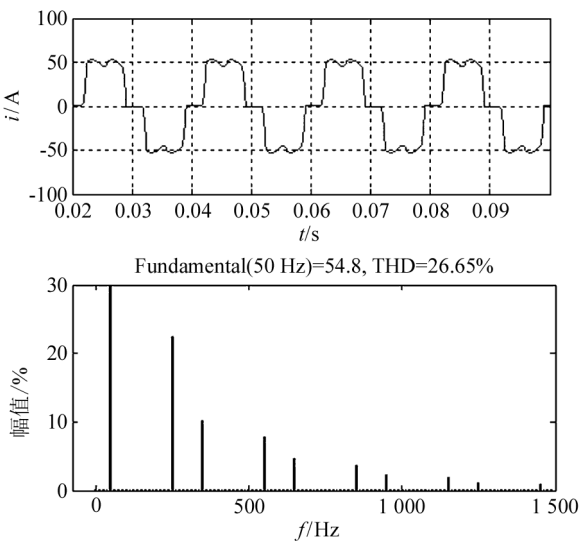


图 4 非线性负载电流及频谱(以 A 相为例)

Fig.4 Nonlinear load current and corresponding spectrum (in the case of phase A)

4.2 补偿 5 次谐波

由图 4 可知,负载电流中 5 次谐波的占有率最高。图 5 是仅补偿 5 次谐波的仿真结果。采用动态预测控制策略后,总谐波畸变率降为 15.01%;其中补偿前负载电流中的 5 次谐波占有率约 22%,经补偿后 5 次谐波占有率几乎为 0,补偿效果比较明显。

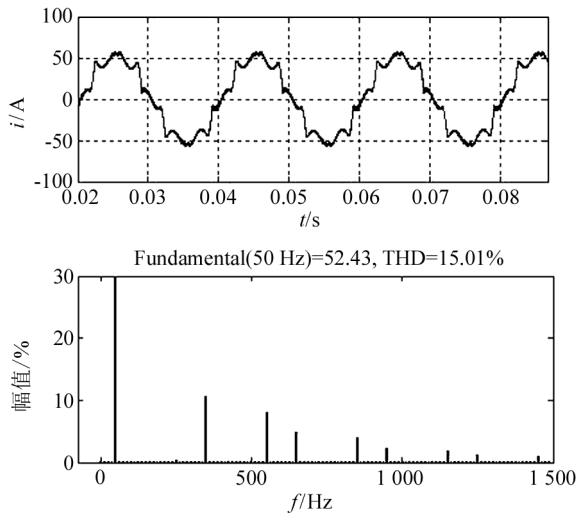


图 5 选择补偿 5 次谐波的仿真结果

Fig.5 Simulation results post 5 times of harmonic compensation

4.3 补偿 5、7 次谐波

图 6 是补偿负载电流中的 5、7 次谐波的仿真

结果。补偿之后总畸变率降为 10.74%, 5、7 次谐波也基本滤除。

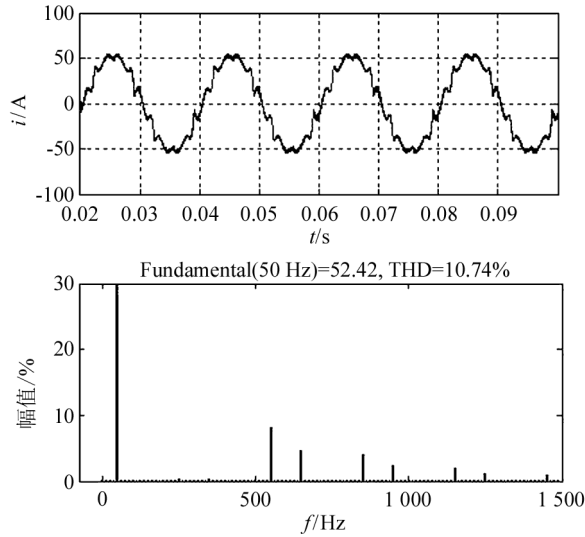


图 6 选择补偿 5、7 次谐波的仿真结果
Fig.6 Simulation results post 5 and 7 times of harmonic compensation

4.4 补偿 5、7、11、13、17 和 19 次谐波

图 7 是补偿负载电流中 5、7、11、13、17 和 19 次谐波的仿真结果。补偿之后总畸变率降为 3.46%, 小于 5%, 进一步验证了按指定次谐波补偿方式对谐波电流进行抑制是合理的。

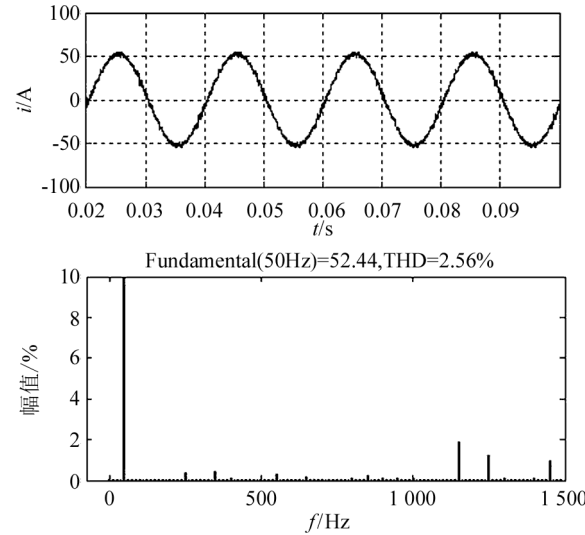


图 7 选择补偿 5、7、11、13、17、19 次谐波的仿真结果
Fig.7 Simulation results post 5, 7, 11, 13, 17 and 19 times of harmonic compensation

4.5 动态特性分析

为了验证 APF 补偿系统的动态性能, 在 $t =$

0.1 s 时, 负载电阻由原来的 10 Ω 突降为 5 Ω 。按 4.4 节的补偿成分进行补偿, 仿真结果如图 8 所示。由图 8 可知, 负载突变后, 大约经过 15 ms 过渡到新的平衡状态, 说明该预测控制策略具有较快的动态响应速度。

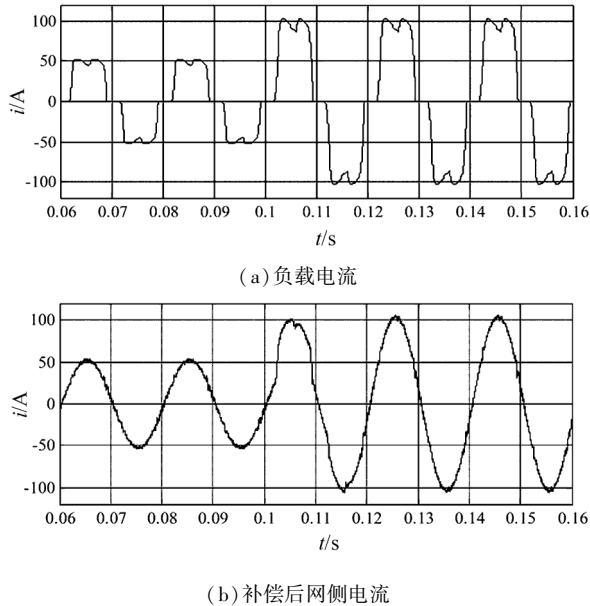


图 8 负载突变时的动态特性

Fig.8 Dynamic characteristics under load fluctuation

5 实验验证

为验证该方法的有效性, 在实验室的 APF 样机验证选择性补偿的稳态性能和动态响应性能。样机参数与仿真模型参数一致, 实验结果如图 9 所示。其中: 第一通道为 A 相负载电流波形, 存在

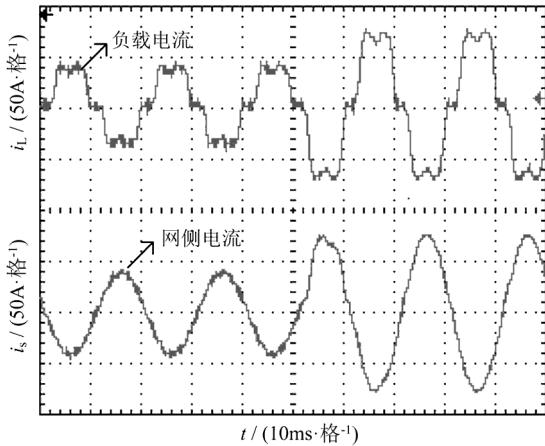


图 9 选择补偿 5、7、11、13、17、19 次谐波的实验结果
Fig.9 Experiment results post 5, 7, 11, 13, 17 and 19 times of harmonic compensation

负载突变情况;第二通道为补偿 5、7、11、13、17 和 19 次谐波后电网侧的电流波形。由网侧电流波形可知:负载固定时,补偿后电流的正弦度很高;负载突变时动态响应速度快,调节时间大约 15 ms,满足工程要求。

6 结论

(1)动态预测算法可应用于指定次谐波预

测,有效地克服了离散系统固有的控制延时。

(2)预测算法是开环的,引入递推重复预测的误差修正机制能提高动态预测的精度,提高鲁棒性。

参考文献:

- [1] 王兆安,杨君,刘进军,等.谐波抑制和无功功率补偿[M].北京:机械工业出版社,2005.
- [2] 杨君,叶杰,吴钊,等.谐波电流分次补偿控制的等效性研究[J].电力电子技术,2015,49(5):80-83.
- [3] 张国荣,邵竹星,陈林.基于改进重复预测原理的并联型有源电力滤波器无差拍控制策略[J].农业工程学报,2012,28(13):172-178.
- [4] 谢川,贺超,闫辉,等.基于频率自适应广义积分控制器选择性谐波电流控制策略[J].电工技术学报,2013,28(9):65-72.
- [5] 张树全,戴珂,谢斌,等.多同步旋转坐标系下指定次谐波电流控制[J].中国电机工程学报,2010,30(3):55-61.
- [6] 刘威葳,丁洪发,段献忠.有源电力滤波器选择性谐波电流控制策略[J].中国电机工程学报,2011,31(27):14-20.
- [7] 韩学军,刘万勋,刘广平,等.基于三相旋转参考相量的并联有源电力滤波器谐波电流精确检测方法[J].电网技术,2008,32(3):75-83.

(特约编辑:黄家瑜)

(上接第 272 页)

4 结语

日照分析对校园活动场地位置的设计选择具有一定的借鉴意义,同时对规划设计工作具有指导性的作用。借助日照分析软件,可以对校内的户外环境进行生态化和科学性的设计,满足学生对校园环境的多重需求,这对建设生态校园有着

重要作用。本研究只是为了辅助场所选择,并不能代替人的感官艺术设计,同时并没有全方位地考虑夏季场地日照的情况,存在着一定的局限性。在将来的研究工作中,将结合景观进行校园内文化环境设计的研究,将 3 个层次的活动场所进行统筹布局,以获得兼具生态性和人文性的校园户外环境。

参考文献:

- [1] 左广现,储坤.日照阴影辅助建筑环境设计[J].建筑重庆,2003(1):28-30.
- [2] 张亨.京津石地区居住外环境气候设计研究[D].保定:河北农业大学,2005.
- [3] 李建成,王凌,李鹏.夏热冬暖地区居住小区的阴影率[J].西安建筑科技大学学报,2001(4):387-391.
- [4] 郑洁.夏热冬冷地区居住小区户外空间气候适应性设计策略研究[D].武汉:华中科技大学,2005.
- [5] 陈铭,杨卓琼.日照分析优化住区外部活动场所设计研究——以鄂州市红莲湖某住宅规划设计为例[J].华中建筑,2014(2):40-44.
- [6] 姜涛.日照分析技术在上海经纬城市绿洲商业项目中的应用[J].中华民居,2014(8):202-204.
- [7] 杨馥与.基于日照舒适度分析华丽家族古北花园住区儿童户外活动场地布局[J].南方农业,2016,10(18):104-107.
- [8] 高原.大连地区高层住宅日照设计研究[D].大连:大连理工大学,2014.
- [9] 赵弘野.哈尔滨行列式住宅日照分析线性数学模型研究[D].哈尔滨:东北林业大学,2015.

(特约编辑:黄家瑜)