

# 基于辅助铁心的永磁直线同步电机边端力最小化<sup>\*</sup>

杨科科<sup>1</sup>, 任宁宁<sup>1,2</sup>, 李长乐<sup>3</sup>, 张刚<sup>2</sup>

[1. 河南工业职业技术学院 自动化工程学院, 河南 南阳 473000;

2. 南阳防爆电气研究所, 河南 南阳 473000;

3. 上海电器科学研究所(集团)有限公司, 上海 200063]

**摘要:** 针对永磁直线同步电机(PMLSM)边端力最小化问题, 提出在初级铁心两端增加辅助铁心的方法, 有效削弱 PMLSM 的边端力。首先分析了边端力产生的机理, 对齿壁上所受电磁力进行解析研究。当初级铁心两端辅助铁心高度为一个气隙长度, 且辅助铁心长度为 1/4 永磁极距时, 边端力有最小值。以一台 36 槽 12 极轴向充磁圆筒永磁直线同步电机(TPMLSM)为例, 进行有限元仿真分析和试验测试, 边端力的有限元分析值和试验值较吻合, 证实了所提方法能够有效削弱 PMLSM 边端力, 为该类电机边端力最小化提供了一种简单有效的技术手段。

**关键词:** 边端力; 辅助铁心; 电磁力; 圆筒永磁直线同步电机

中图分类号: TM351 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2022)08-0047-06

doi: 10.12177/emca.2022.072

## End Force Minimization of Permanent Magnet Linear Synchronous Motor Based on Auxiliary Iron Core<sup>\*</sup>

YANG Keke<sup>1</sup>, REN Ningning<sup>1,2</sup>, LI Changle<sup>3</sup>, ZHANG Gang<sup>2</sup>

[1. College of Automation Engineering, Henan Polytechnic Institute, Nanyang 473000, China;

2. Nanyang Explosion Protection Electrical Apparatus Research Institute(CNEX), Nanyang 473000, China;

3. Shanghai Electrical Apparatus Research Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200063, China]

**Abstract:** Aiming at the problem of end force minimization of permanent magnet linear synchronous motor (PMLSM), an effectively method to weaken the end force by adding auxiliary iron core at the both ends of the primary iron core is proposed. Firstly, the mechanism of the end force and the electromagnetic force on the tooth wall are analyzed. When the height of the auxiliary iron core at both ends of the primary iron core is an air gap length, and the length is 1/4 permanent magnet pole distance, the end force has the minimum value. Taking a 36-slot/12-pole axial-magnetized tubular permanent magnet linear synchronous motor (TPMLSM) as an example, the finite element simulation analysis and experimental test are carried out. The finite element analysis value is in good agreement with the experimental value, which proves that the proposed method can effectively weaken the end force of PMLSM, and also provides a simple and effective method of the end force minimization for PMLSM.

**Key words:** end force; auxiliary iron core; electromagnetic force; tubular permanent magnet linear synchronous motor (TPMLSM)

收稿日期: 2022-03-03; 收到修改稿日期: 2022-07-11

<sup>\*</sup> 基金项目: 河南省科技攻关项目(212102210250); 2022 年度河南省高等学校重点科研项目(22B470003); 南阳市科技攻关项目(KJGG047)

作者简介: 杨科科(1982—), 女, 硕士, 讲师, 研究方向为电机优化设计及驱动控制。

任宁宁(1984—), 男, 博士, 讲师, 研究方向为永磁电机设计及现代驱动控制。(通信作者)

张刚(1968—), 男, 教授级高工, 研究方向为防爆电机与电器理论及应用。

## 0 引言

目前越来越多的高性能伺服传动系统采用直线电机作为驱动源,这不仅能够实现传动系统的直驱化,也大大简化了整个传动系统的结构,提高了系统的可靠性及动态响应性。由于永磁直线同步电机(PMLSM)具有高推力密度、高功率因数、高效及响应速度快等优良特性,其得到越来越多的关注及研发应用。然而,PMLSM 本体结构初级铁心两端长直断开,边端效应产生的边端力易引起电磁推力波动,较大的边端力将严重影响电机的电磁推力性能,甚至拉低整个传动系统的性能。因此,对 PMLSM 边端力机理及可行的边端力最小化技术措施的研究是提高 PMLSM 性能及推广应用的关键课题之一。

关于 PMLSM 的边端效应及边端力抑制的问题,国内外专家学者给予了较大关注,并取得了大量的研究成果。文献[1]对边端效应产生的机理进行了理论研究,并对不同初级铁心长度及两端铁心结构所产生的边端力进行了定性分析。文献[2-3]采用傅里叶级数法和有限数值法,通过建立单端半无限长铁心模型,对 PMLSM 的边端力进行研究,并定性给出了边端力最小化时的初级铁心长度取值计算公式。文献[4]对边端力引起的推力波动进行了研究,但未给出理论分析模型,同时也未给出相应的边端力最小化技术措施。文献[5]基于辅助磁极的方法对边端力最小化进行了研究,该方法不仅使本体结构变得复杂,且辅助磁极对电磁推力及磁路均有影响。文献[6]基于永磁磁极移距法对边端力进行研究,但该方法并不适用于圆筒型永磁直线同步电机(TPMLSM)。文献[7]为抑制边端效应产生的纵向边端效应力,设计了一种 PMLSM 辅助极结构,并利用等效磁路法和虚位移法推导出了最优辅助极结构及位置的解析表达式。文献[8]采用初级铁心不等齿宽和端齿长度的技术措施对大推力双边 PMLSM 的磁阻力进行了优化分析研究,并给出了磁阻力最小化的不等齿宽和端齿长度选取方法。文献[9]采用磁通虚位移法对电机的边端力进行了解析分析,并归纳了铁心长度对边端力的影响规律。文献[10]基于初级辅助极法对 TPMLSM 的边端力进行了研究,并采用有限法对边端力进行了仿

真分析。文献[11]采用不同的电流传导方式,及改变次级磁极位置的方法,得到了不同工况运行条件下电机的推力波动最小化技术措施。文献[12]提出合适的初级铁心长度及初级铁心端部光滑的方法来抑制电机的端部效应和边端力。文献[13]采用数值计算的方法对 PMLSM 的磁阻力进行研究,通过改变初级端部齿结构与次级磁极形状的方法抑制电机的推力波动,该研究为提高 PMLSM 的力能指标提供了较实用的方法。上述文献虽然对边端力的产生机理及边端力最小化技术措施进行了理论分析研究,但有些技术措施使电机本体结构变得更复杂,实现难度较大。

本文采用在初级铁心两端增加辅助铁心的方法使电机的边端力最小化,通过对边端力产生的机理及齿壁上所受电磁力进行研究,得到了边端力最小化时辅助铁心选取的具体结构尺寸,同时给出了初级铁心两端辅助铁心选取值。并对一台 36 槽 12 极的轴向充磁 TPMLSM 进行了有限元仿真分析和试验测试,证实了该方法能够有效地削弱电机的边端力,为该种电机边端力最小化提供了一种可行的技术措施。

## 1 边端力解析分析

### 1.1 边端力解析表达式

PMLSM 边端力是电机初级铁心纵向端部断开、端部磁导发生变化而引起的。本文采用麦克斯韦张量法对电机的边端力进行解析分析,为边端力最小化研究提供理论依据。

从边端力产生的机理上看,初级铁心边端发生位移使电机磁路的磁导发生变化,从而产生边端力。因此,假设电机初级无齿槽,由麦克斯韦应力张量法可知,铁磁材料在磁场中所受到的电磁力为一面积力,可采用张力张量  $T$  来描述电磁力,即

$$F = \int_S T \cdot dS = \int_V f \cdot dV \quad (1)$$

式中: $S$  为初级铁心在磁场中受电磁力的面积; $V$  为初级铁心体积。

边端力可等效为一个无齿槽的 PMLSM 结构进行研究,边端力麦克斯韦应力张量法计算分析模型如图 1 所示。

由麦克斯韦应力张量法可知,对于二维电磁

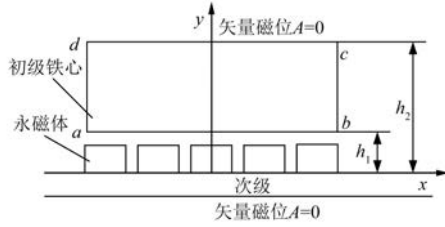


图1 边端力解析计算分析模型

场,铁磁材料在磁场中所受到的电磁力可采用曲线积分的形式求得,即

$$F = \int_S \mathbf{T} \cdot d\mathbf{S} = \int_S \mathbf{t} \cdot d\mathbf{S} = \frac{L_{Fe}}{\mu_0} \int_l \left[ B(B \cdot \mathbf{n}) - \frac{1}{2} B^2 n \right] d\mathbf{l} \quad (2)$$

式中: $L_{Fe}$ 为初级铁心长度; $l$ 为包围 $S$ 面的曲线长度; $\mu_0$ 为真空磁导率; $B$ 为初级铁心表面磁密; $n$ 为使 $nz/zp$ 为整数的整数。

因此,对于图1所示的边端力解析计算分析模型,在 $a-b-c-d$ 的闭合曲线积分路径上,采用麦克斯韦应力张量法求得无齿槽初级铁心在电磁场中所受到的电磁力表达式为

$$F_{end} = \frac{L_{Fe}}{2\mu_0} \left[ - \int_{bc} (B_\theta^2 - B_r^2) dr + \int_{da} (B_\theta^2 - B_r^2) dl \right] + \frac{L_{Fe}}{\mu_0} \left( \int_{ab} B_\theta B_r d\theta - \int_{cd} B_\theta B_r d\theta \right) \quad (3)$$

式中: $B_\theta$ 为切向磁密; $B_r$ 为径向磁密。

由于初级铁心的磁导率远大于空气和气隙的磁导率,电磁场通过两个交界面时,磁力线基本上垂直进入初级铁心表面。因此,曲线 $ab$ 和 $cd$ 上切向磁密 $B_\theta = 0$ ,进而得到电机初级铁心受到的电磁为

$$F_{end} = \frac{L_{Fe}}{2\mu_0} \left[ \int_{ad} (B_\theta^2 - B_r^2) dl - \int_{bc} (B_\theta^2 - B_r^2) dr \right] \quad (4)$$

式(4)即为PMLSM边端力解析计算表达式。由此可知,PMLSM的边端力可通过对初级铁心两端端面进行曲线积分求得。同时式(4)也表明,初级铁心两端所受到的电磁力方向相反,电机整体边端力为初级铁心两端受到的电磁力矢量之和。

## 1.2 边端力最小化研究

由于PMLSM大多采用长次级短初级结构,当初级长度为次级极距的2~3倍或更长时,电机

初级铁心两端受到的电磁力基本上不互相影响,则可采用图2所示的模型对电机两端所受到的边端力进行分析。铁心受到的整体边端力可由两端分别受到的电磁力合成求得,初级铁心单端及整体边端力如图3所示。



图2 边端力最小化分析模型

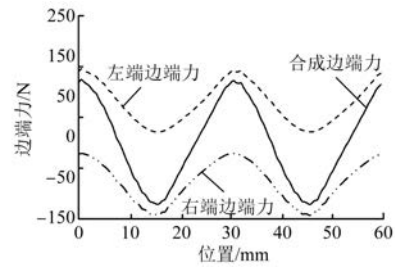


图3 边端力波形

由图3及式(4)可知,PMLSM初级铁心两端所产生的边端力方向相反,其中一端为负值,另一端为正值,两端边端力周期和幅值大小相等,存在相位差,由此可知:

$$F_L \big|_{x=x'} = -F_R \big|_{x=-(x'+k\tau-L_{Fe})} \quad (5)$$

式中: $\tau$ 为永磁极距; $k$ 为整数。

初级铁心两端所产生的边端力可用傅里叶级数进行描述,即

$$F_L = F_0 + \sum_{n=1}^n F_{sn} \sin \frac{2n\pi}{\tau} x + \sum_{n=1}^n F_{cn} \sin \frac{2n\pi}{\tau} x \quad (6)$$

$$F_R = -F_0 + \sum_{n=1}^n F_{sn} \sin \frac{2n\pi}{\tau} (x + k\tau - L_{Fe}) + \sum_{n=1}^n F_{cn} \sin \frac{2n\pi}{\tau} (x + k\tau - L_{Fe}) \quad (7)$$

式中: $F_0$ 为基波边端力幅值; $F_{sn}$ 为边端力 $n$ 阶正弦系数; $F_{cn}$ 为边端力 $n$ 阶余弦系数。

由此可得到电机初级铁心整体边端力的表达式为

$$F_{end} = F_L + F_R = \sum_{n=1}^n F_n \sin \frac{2n\pi}{\tau} \left( x + \frac{k\tau - L_{Fe}}{2} \right) \quad (8)$$

$$F_n = 2 \times \left[ F_{sn} \cos \frac{n\pi(k\tau - L_{Fe})}{\tau} + F_{cn} \sin \frac{n\pi(k\tau - L_{Fe})}{\tau} \right] \quad (9)$$

由式(8)可看出,电机整体受到边端力的周期与初级铁心单端产生的边端力周期相同,整体边端力的大小取决于电机铁心长度。由此可知,存在合适的初级铁心长度使电机整体边端力最小化,若要使整体边端力为0,则系数  $F_n=0$ ,则可得到整体边端力为0的初级铁心长度计算表达式为

$$L_{Fe} = k\tau - \frac{\tau}{n\pi} \arctan\left(-\frac{F_{sn}}{F_{cn}}\right) \quad (10)$$

由上述边端力的解析表达式可知,边端力由各次谐波成分构成,因此边端力并不能完全得到抑制,边端力幅值大小取决于基波边端力,由此可知,抑制边端力可行且有效的初级铁心长度为

$$L_{Fe} = k\tau - \frac{\tau}{\pi} \arctan\left(-\frac{F_{sn}}{F_{cn}}\right) \quad (11)$$

## 2 辅助铁心边端力研究

由上述分析可知,当初级铁心长度取值为  $L_{Fe}=(k+1/2)\tau$  时,边端力能够得到有效的抑制。本文在初级铁心两端增加辅助铁心以实现边端力的有效抑制。辅助铁心结构示意图如图4所示,图中  $L_a$  为辅助铁心长度,  $d$  为辅助铁心高度。

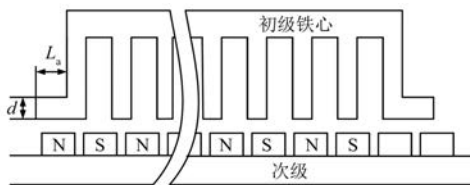


图4 初级辅助铁心示意图

由上述分析可知,电机的边端力主要由初级铁心两端端面产生,若把铁心一个端面看成槽深  $h=\infty$ ,槽宽  $b=\infty$ ,则初级铁心单端受到的边端力可等效为单槽齿壁受到的电磁力,单槽齿壁受到的电磁力  $F_{sstw}$  为

$$F_{sstw} = \int_0^h tLdy = \frac{L}{2\mu_0} \int_0^h B_{s0}^2 dy \quad (12)$$

式中:  $h$  为槽高;  $L$  为初级铁心宽度;  $B_{s0}$  为齿壁上的磁感应强度,可由许克保角变换法求得。

$$B_{s0} = \mu_0 \left| \frac{dt}{dz} \right| = \mu_0 \left| \frac{dt}{dw} \frac{dw}{dz} \right| = \mu_0 \frac{F_0}{g} \left| \sqrt{\frac{w}{w-1}} \right| = B_{\max} \left| \sqrt{\frac{w}{w-1}} \right| \quad (13)$$

式中:  $g$  为气隙高度;  $B_{\max}$  为磁密幅值;  $w$  为保角变

换系数。

则单端齿壁深度为  $d$  时受到的电磁力为

$$F = \int_0^h tLdy = \frac{L}{2\mu_0} \int_0^h B_{s0}^2 dy = \frac{B_{\max} L}{2\mu_0} \int_0^h \frac{w^2}{(w-1)^2} dy \quad (14)$$

上式中  $d$  和  $w$  之间的关系如下:

$$\frac{d}{g} = \frac{2}{\pi} \left| \frac{1}{\sqrt{s}} th^{-1} \sqrt{\frac{s(1-w)}{s+w}} - tg^{-1} \sqrt{\frac{1-w}{s+w}} \right|, \quad 0 < w < 1 \quad (15)$$

式中:  $s = \left(\frac{2g}{b}\right)^2$ ; 其中  $b$  为槽宽。

分析可得到齿壁深度与气隙长度的比值对电磁力有影响,80%的电磁力产生在槽深为一个气隙的齿壁上( $d \approx g$ )。由此可知,通过调整辅助铁心长度  $L_a$  和辅助铁心高度  $d$  即可达到抑制电机边端力的目的。

## 3 辅助铁心边端力验证

基于上述辅助铁心边端力最小化分析,本文对一台36槽12极TPMLSM进行有限元仿真分析,样机的主要结构参数如表1所示。

表1 样机主要结构参数

| 参数名称      | 参数值 |
|-----------|-----|
| 初级铁心外径/mm | 103 |
| 初级铁心内径/mm | 52  |
| 轴径/mm     | 20  |
| 初级槽数      | 36  |
| 极对数       | 6   |
| 极距/mm     | 30  |
| 槽距/mm     | 10  |
| 齿宽/mm     | 10  |
| 永磁体内径/mm  | 20  |
| 永磁体外径/mm  | 49  |
| 充磁高度/mm   | 14  |
| 永磁体       | 钕钴  |
| 最小气隙/mm   | 1.5 |

本文取辅助铁心高度为2 mm,辅助铁心长度分别取2、5、6.5、7.5、8.5、11、13.5、15 mm,采用有限元法对电机边端力进行仿真分析,仿真分析结果如图5和图6所示。

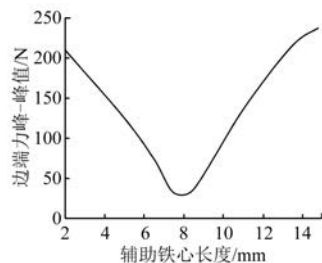


图5 辅助铁心边端力峰-峰值

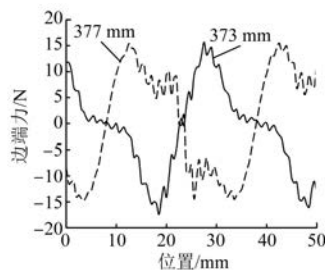


图6 不同辅助铁心长度边端力

由图5和图6可知,边端力随辅助铁心的长度在 $0 \leq L_a \leq \tau/2$ 变化时,边端力峰-峰值在辅助铁心长度范围内呈抛物线的形式,当辅助铁心长度为 $2L_a = \tau/2$ 时,边端力的峰-峰值为最小值。由此可知,该方法和增加初级铁心长度抑制边端力的效果及边端力随铁心长度的变化规律一致。同样,当辅助铁心长度 $2L_a > \tau/2$ 时,初级铁心受到的边端力相位突变 $180^\circ$ 电角度。

取辅助铁心长度 $L_a$ 为 $\tau/4$ ,即7.5 mm时,不同辅助铁心高度 $d$ 下电机的边端力如图7所示。由图7可知,电机边端力峰-峰值随辅助铁心高度 $d$ 增加而变大,当高度增加到一定值时,和增加初级铁心长度产生的边端力一致。分析结果同时也表明,辅助铁心高度为一个气隙长度 $g$ 时,电机的边端力能够得到有效的抑制。

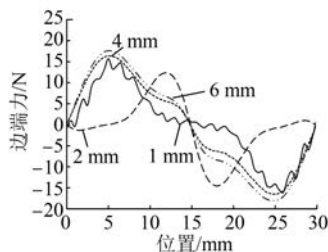


图7 辅助铁心长度7.5 mm时不同辅助铁心长度高度的边端力

本文取辅助铁心长度 $L_a$ 和高度 $d$ 分别为

7.5 mm和2 mm进行了样机制造,搭建边端力测试平台,采用MIK-LCS1推力负载传感器,通过转动位移螺母调节电机定子位置,定子相对位移信号由与电机相连的增量式光栅尺(万濠WTA05-0550,精度 $0.5 \mu\text{m}$ )测量输出,样机及试验测试平台如图8所示。边端力测试结果如图9所示,由图9可看出,该方法能够有效抑制电机的边端力,试验测试结果和有限元分析结果一致。



图8 样机及试验测试平台

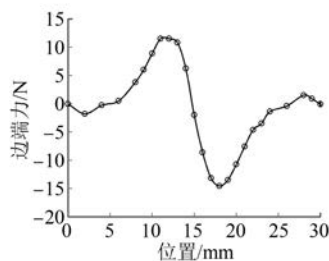


图9 边端力试验测试值

## 4 结 语

本文提出采用辅助铁心法抑制PMLSM的边端力,推导了边端力解析表达式,对齿壁上所受电磁力进行研究,得到了边端力最小化时辅助铁心长度与高度的匹配关系。以一台36槽12极的轴向充磁TPMLSM为例,对其端部力进行计算。有限元和试验结果表明,本文所提方法能够有效抑制电机边端力,验证了该方法的正确性,为该类直线电机边端最小化提供了一种简单有效的技术措施。

## 【参考文献】

- [1] INOUE M, SATO K. An approach to a suitable stator length for minimizing the detent force of permanent magnet linear synchronous motors [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2000, 36(4): 1890.
- [2] 潘开林,傅建中,陈子辰. 永磁直线同步电机的磁

- 阻力分析及其优化[J]. 浙江大学学报(自然科学版), 2005, 39(10): 1627.
- [3] 潘开林, 傅建中, 陈子辰. 永磁直线同步电机的磁阻力分析及其最小化研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(4): 112.
- [4] 李庆雷, 王先逵, 吴丹, 等. 永磁同步直线电机推力波动分析及改善措施[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2000, 40(5): 33.
- [5] ZHU Y W, LEE S G, CHUNG K S, et al. Investigation of auxiliary poles design criteria on reduction of end effect of detent force for PMSLM [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2009, 45(6): 2863.
- [6] YOSHIMURA T, KIM H J, TORII S, et al. Analysis of the reduction of detent force in a permanent magnet linear synchronous motor[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1995, 31(6): 3728.
- [7] 张遥, 胡业发, 张丽, 等. 永磁同步直线电机纵向末端效应补偿辅助极设计与分析[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2020(8): 52.
- [8] ZHANG C, CHEN F X, PEI T Y, et al. A low detent force DS-PMSLM based on the modulation of cogging and end forces [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, doi: 10.1109/TIE.2022.3153799.
- [9] 彭兵, 夏加宽, 沈丽, 等. 永磁直线电机端部效应力的解析计算[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(2): 547.
- [10] 彭兵, 李丽萍, 张囡, 等. 双V型结构削弱永磁直线电机磁阻力波动方法[J]. 电工技术学报, 2017, 32(22): 108.
- [11] LKEDA Y, SAKAI R, MIZUMURA S, et al. Basic consideration on the linear motor drive by permanent poles mounted on vehicles[C]//Proceedings of 1994 Power Electronics Specialist Conference-PESC'94, 1994.
- [12] 寇宝泉, 张赫, 郭守仑, 等. 辅助极一体式永磁同步直线电机端部定位力抑制技术[J]. 电工技术学报, 2015, 30(6): 106.
- [13] 凌志健, 赵文祥, 吉敬华. 高推力永磁直线作动器及其关键技术综述[J]. 电工技术学报, 2020, 35(5): 1022.

(上接第46页)

- [5] SOUZA W A D, GARCIA F D, MARAFAO F P, et al. Load disaggregation using microscopic power features and pattern recognition[J]. Energies, 2019, 12(14): 2641.
- [6] HINTON G, DENG L, YU D, et al. Deep neural networks for acoustic modeling in speech recognition: The shared views of four research groups[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2012, 29(6): 82.
- [7] WU S, ZHONG S, LIU Y. Deep residual learning for image steganalysis [J]. Multimedia Tools and Applications, 2018, 77(9): 10437.
- [8] FAUST O, HAGIWARA Y, HONG T J, et al. Deep learning for healthcare applications based on physiological signals: A review [J]. Computer Methods and Programs in Biomedicine, 2018, 161: 1.
- [9] ZHAI M Y. A new graph learning-based signal processing approach for non-intrusive load disaggregation with active power measurements [J]. Neural Computing and Applications, 2020, 32(10): 5495.
- [10] MASSIDDA L, MARROCU M, MANCA S. Non-intrusive load disaggregation by convolutional neural and multilabel classification [J]. Applied Sciences, 2020, 10(4): 1454.
- [11] XIA M, LIU W, WANG K, et al. Non-intrusive load disaggregation based on composite deep long short-term memory network [J]. Expert Systems with Applications, 2020, 160: 113669.
- [12] XIAO Z, GANG W, YUAN J, et al. Cooling load disaggregation using a NILM method based on random forest for smart buildings[J]. Sustainable Cities and Society, 2021, 74: 103202.
- [13] MORADZADEH A, MOHAMMADI L B, ABAPOUR M, et al. A practical solution based on convolutional neural network for non-intrusive load monitoring[J]. Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, 2021, 12(10): 9775.
- [14] CHEN H, WANG Y H, FAN C H. A convolutional autoencoder-based approach with batch normalization for energy disaggregation [J]. The Journal of Supercomputing, 2021, 77(3): 2961.