

永磁同步直线电机单齿切向电磁力分析

刘津成，夏加宽，马功臣

(沈阳工业大学 电气工程学院,辽宁 沈阳 110870)

摘要：永磁同步直线电机是新一代高效高精度电子设备、数控机床等机电产品中最具代表性的先进电机技术之一。构建了永磁同步直线电机模型,不考虑边缘效应,建立了电机初级齿部所受单齿切向电磁力数学模型,并利用有限元分析软件对电机单齿切向电磁力和局部齿槽电磁力进行仿真计算。最后利用 ANSYS Workbench 平台对电机的模态和振动加速度进行计算,验证了切向电磁力在振动分析中的重要性。结果表明,局部齿槽电磁力波动是单齿切向电磁力产生振动的重要原因,通过合理调整电机初级齿部磁场分布,可以有效减小电机的振动,为该类电机的设计和优化提供了参考。

关键词：永磁同步直线电机；单齿切向电磁力；局部齿槽电磁力；有限元分析

中图分类号：TM351 文献标志码：A 文章编号：1673-6540(2023)11-0059-06

doi: 10.12177/emca.2023.135

Analysis of Single Tooth Tangential Electromagnetic Force in Permanent Magnet Synchronous Linear Motors

LIU Jincheng, XIA Jiakuan, MA Gongchen

(School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

Abstract: Permanent magnet synchronous linear motor is one of the most representative advanced motor technologies in the new generation of high-efficient and high-precision electronic equipment, CNC machine tools, and other electromechanical products. A permanent magnet synchronous linear motor model is established. Without considering edge effects, a mathematical model of the tangential electromagnetic force on the primary teeth of the motor is established, and the finite element analysis software is used to simulate and calculate the single tooth tangential electromagnetic force and local cogging electromagnetic force of the motor. Finally, the modal and vibration acceleration of the motor are calculated using the ANSYS Workbench platform to verify the importance of tangential electromagnetic force in vibration analysis. The results indicate that the fluctuation of local cogging electromagnetic force is the important cause of vibration generated by single tooth tangential force. The vibration of the motor can be effectively reduced by reasonably adjusting the distribution of the magnetic field in the primary teeth of the motor, which provides a reference for the design and optimization of this type of motor.

Key words: permanent magnet synchronous linear motor (PMSLM); single tooth tangential electromagnetic force; local cogging electromagnetic force; finite element analysis

0 引言

近年来,随着电机行业的不断发展,永磁同步

直线电机(PMSLM)得到了更加广泛的应用,比如 PMSLM 驱动的物料输送机、起重设备、空气压缩机以及各种电动门等^[1]。由于 PMSLM 具有特殊

收稿日期: 2023-06-21; 收到修改稿日期: 2023-08-15

作者简介: 刘津成(2000—),男,硕士研究生,研究方向为永磁直线电机设计。

夏加宽(1962—),男,教授,博导,研究方向为永磁电机设计及其控制。(通信作者)

的直线结构,不存在绕组端部,凭借更高的功率因数、效率、推力密度及定位精度,在高度集成化、轻量化的应用场合受到越来越多的关注^[2-4]。

在旋转电机中,引起分数槽绕组永磁电机振动的激振源分别为径向电磁力和切向电磁力^[5],切向电磁力分为全局切向电磁力和局部切向电磁力即单齿切向电磁力。现有研究中,大多数学者关注的都是径向电磁力和全局切向电磁力又称磁阻力^[6]。国内外许多学者对磁阻力进行了分析计算。文献[7]通过解析法,精确计算并归纳边端力与齿槽电磁力的一般规律,合理设置了补偿器参数。文献[8]研究了端部齿相对次级永磁体不同位置时对磁阻力的影响,通过优化端部齿来削弱端部力。文献[9]提出初级铁心齿开虚拟槽结构,对比分析四种不同虚拟槽型,最后得出矩形槽对齿槽力的抑制效果最显著。文献[10]指出直线电机的边端力并非理想的正弦波,存在奇、偶次谐波,提出利用有限元来分析边端力,对其幅值和相位进行快速傅里叶变换,确定最佳初级长度,并反复迭代以提高最佳初级铁心长度的精度。由于直线电机存在边缘效应,初级端部和中部的齿的受力情况也不尽相同^[11]。

分数槽电机单齿切向电磁力通过电机初级齿部的杠杆效应引起轭部振动,振动方向为法向,在低频段单齿切向电磁力引起的振动和径向电磁力引起的振动对电机性能的影响几乎具有同等贡献^[12]。因此,对电机单齿切向电磁力进行分析研究很有必要。

本文以 PMSLM 为研究对象,利用麦克斯韦方程组建立了单齿切向电磁力模型,并对电机气隙磁密进行仿真计算,分析了单齿切向电磁力产生振动的原因,利用 ANSYS Workbench 平台对电机的模态和振动加速度进行计算,为 PMSLM 的设计和振动优化提供了参考。

1 PMSLM 模型的设计与分析

研究表明,当直线电机的极数和槽数互为质数时,可以有效减小电机推力波动从而提高电机效率^[13],因此本文的 PMSLM 采用 11 极 12 槽的极槽配合。

在旋转电机中,首先需要根据主要尺寸关系式来确定电机中有效电磁部分的主要尺寸,

PMSLM 同样也需要根据关系式来确定主要尺寸^[14]。电磁推力与主要尺寸计算关系式如式(1)所示:

$$2p\tau l = \frac{\sqrt{2}(1-\sigma_L)F_{st}}{K_{N1}B_{\delta1}A\cos\varphi\eta} \quad (1)$$

式中: p 为极对数; τ 为电机极距; l 为永磁体纵向长度; $(1-\sigma_L)$ 为压降系数; F_{st} 为电机电磁推力; K_{N1} 为绕组系数; η 为电机效率; A 为电机线负荷; $B_{\delta1}$ 为气隙磁密基波幅值; $\cos\varphi$ 为功率因数。

PMSLM 的初级绕组分为隔齿绕组和全齿绕组,本文所设计的电机采用的是全齿绕组形式,可以有效提高铁心材料利用率,提高电机性能^[15]。同时考虑到电机实际制造过程中的绕线问题,还需在初级两端加辅助齿,使电机的设计与分析更加合理^[16]。

电机的气隙磁密基波幅值与电磁推力的大小都会随着永磁体磁化方向长度的增加而增大^[17]。因此电机永磁体尺寸可根据式(2)确定:

$$h_m = \frac{K_s K_\delta b_{m0} \mu_r}{\sigma_0 (1 - b_{m0})} \delta \quad (2)$$

式中: K_s 为外磁路饱和系数; K_δ 为气隙系数; b_{m0} 为预估永磁体的空载工作点; δ 为气隙长度; σ_0 为空载漏磁系数; μ_r 为相对磁导率。

本文建立的 PMSLM 模型如图 1 所示,其主要结构参数如表 1 所示。

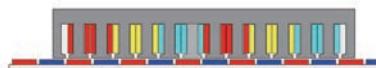


图 1 PMSLM 模型

表 1 PMSLM 主要结构参数

参数名称	参数值
极数	11
槽数	12
初级长度/mm	188
极距/mm	18
气隙长度/mm	0.9
初级铁心齿宽/mm	6.7
导体匝数	74
永磁体宽度/mm	15.2
永磁体高度/mm	3.6

PMSLM 模型的磁密云图和空载反电势波形如图 2 和图 3 所示。由图可知,电机初级齿部磁密最大处为 1.5 T,空载反电势三相对称,电机设计基本合理。

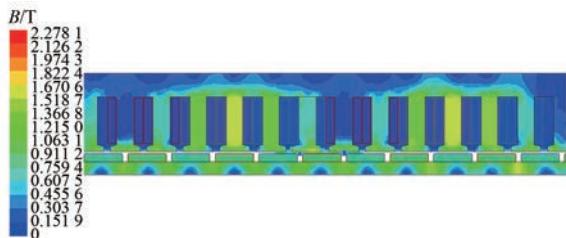


图 2 PMSLM 磁密云图

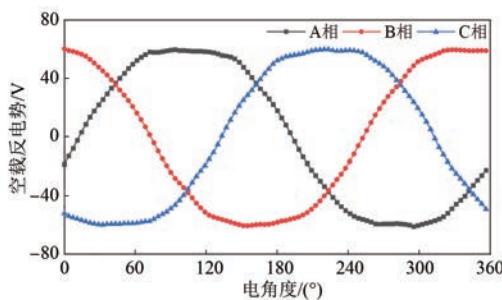


图 3 PMSLM 空载反电势波形

2 PMSLM 单齿切向电磁力模型

为了便于分析,本文所采用的 PMSLM 忽略边缘效应,只考虑初级中部齿的受力情况。在旋转电机中,作用在定子齿上的电磁力分为径向电磁力和切向电磁力^[18],而在 PMSLM 中,初级和次级的耦合磁场在初级齿上产生的电磁力波分为法向电磁力波和切向电磁力波,其解析表达式与旋转电机类似。根据麦克斯韦应力方程可知,其法向电磁力密度和切向电磁力密度的解析表达式如式(3)所示:

$$\begin{cases} f_n = \frac{1}{2\mu_0} (B_n - B_z)^2 \approx \frac{B_n^2}{2\mu_0} \\ f_z = \frac{1}{\mu_0} B_n B_z \end{cases} \quad (3)$$

式中: f_n 、 f_z 分别为法向和切向电磁力密度; B_n 、 B_z 分别为法向和切向磁密; μ_0 为真空磁导率。

取 PMSLM 初级中部某一齿,记为齿 A,如图 4 所示。利用 MAXWELL 软件对齿 A 所受到的电磁力密度进行分析计算,取某一时刻的计算结果如图 5 所示。沿着齿部中心线将齿分成左右两侧,左侧由 l_a 和 l_b 两部分组成,称为 l 侧;右侧由 l'_a 和 l'_b 两部分组成,称为 l' 侧。由图可知,随着初级的移动,齿靴顶端(l_a 和 l'_a 部分)主要由法向电

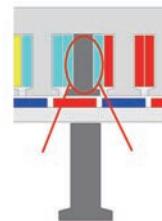


图 4 选取的初级齿 A 示意图

磁力组成,齿靴侧端(l_b 和 l'_b 部分)主要由切向电磁力组成,且切向电磁力主要分布在齿靴顶部的边缘位置。

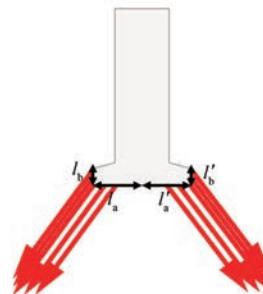


图 5 初级齿 A 所受电磁力密度示意图

由于初级齿部的杠杆效应,PMSLM 的单齿切向力会引起轭部产生法向振动,即单齿切向力波作用在齿靴顶部的边缘位置时,初级齿部会产生局部齿槽电磁力波动,引起轭部产生法向振动。所以局部齿槽电磁力波动是单齿切向力产生振动的主要原因。局部齿槽电磁力由作用于初级齿靴两侧的切向力合力引起,左、右两侧齿靴所受到的切向集中力解析表达式如式(4)所示:

$$\begin{cases} F_{zl} = \int_{l_a+l_b} f_{zl} L_e dl \\ F_{z'l'} = \int_{l'_a+l'_b} f_{z'l'} L_e dl \end{cases} \quad (4)$$

式中: L_e 为电机电枢长度。

由于左、右两端齿靴顶部所受切向集中力的方向相反,因此单齿切向电磁力大小可以由二者的差值确定,如式(5)所示:

$$\Delta F_z = F_{zl} - F_{z'l'} \quad (5)$$

3 PMSLM 单齿切向电磁力产生振动的原因

利用有限元仿真软件,计算 PMSLM 一对极下的气隙磁密,并对该结果进行快速傅里叶变换

(FFT), 计算结果如图 6 所示。由图可知, 气隙磁密主要分为三个部分:I、II 和 III 区域。其中, I 区域是永磁体所对应的气隙磁密, 波形接近平顶波; II 区域是由于电机初级开槽而导致的气隙磁密, 气隙磁密呈现先减小后增大的变化趋势, 变化范围是 0.65 T 至 0.9 T; III 区域是永磁体之间的极间区域对应的气隙磁密, 其值经过零点呈正负波动。在这三个区域, 区域 III 的波动幅度最大, 即极间区域所对应的气隙磁场畸变最明显。由 FFT 结果可知, 基波磁密为最大值, 奇数次谐波整体要大于相邻的偶数次谐波。

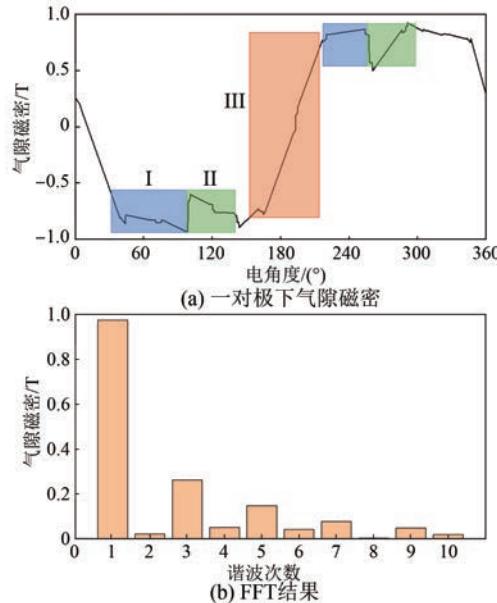


图 6 PMSLM 一对极下气隙磁密及其 FFT 结果

由于 PMSLM 的初级是运动的, 所以需要对各个时刻齿 A 齿靴顶部的切向集中力受力情况进行分析计算, 仿真计算结果如图 7 所示。可知, 当齿 A 左右两侧所受切向电磁力相等时, 切向集中力为 0; 当齿 A 左右两侧所受切向电磁力不相等时, 切向集中力正负变化, 产生局部齿槽电磁力波动。

再对齿 A 所受的局部齿槽电磁力进行仿真计算, 结果如图 8 所示。可以看出, 切向集中力与局部齿槽电磁力的变化趋势基本一致, 因此可以认为, 切向集中力的变化趋势可以用来体现局部齿槽电磁力的变化趋势, 为进一步分析建立基础。

在图 7 中, 将一个周期内的切向电磁力分为 $t_1 \sim t_4$ 四个时间结点, 其对应的电磁力值分别为

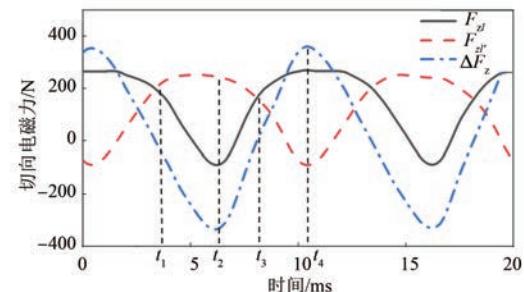


图 7 PMSLM 单齿切向集中力曲线

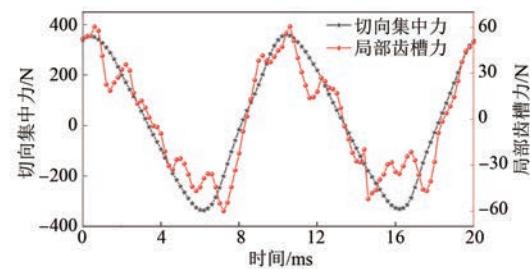


图 8 PMSLM 局部齿槽电磁力曲线

0、最小值、0 和最大值, 图 9 为上述各个时刻初级齿 A 所受电磁力密度的分布图, 可以得到如下结论。

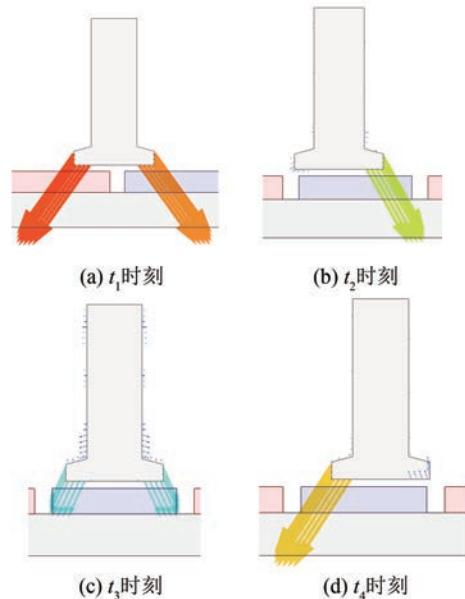


图 9 不同时刻初级齿表面所受电磁力分布

(1) t_1 时刻, 齿 A 经过永磁体之间的极间区域, 齿靴顶部两端同时受到电磁力作用, 且该电磁力关于齿中心线对称, 齿 A 所受局部齿槽电磁力为 0。

(2) $t_1 \sim t_2$ 时间段, PMSLM 向右移动, 齿靴顶

部两端受到的电磁力不对称,局部齿槽电磁力在数值上逐渐减小。

(3) t_2 时刻, F_{d} 减小到 0, 齿靴顶部表面电磁力密度主要集中在 l' 侧, 齿部受到的局部齿槽电磁力处于波谷位置。

(4) $t_2 \sim t_3$ 时间段, 随着 PMSLM 的向右移动, F_{d} 变大, F'_{d} 减小, 齿部所受的局部齿槽电磁力在数值上变大。

(5) t_3 时刻, 齿中心线和永磁体中心线相重合, 齿靴顶部两端同时受到电磁力作用, 且该电磁力关于齿中心线对称, 齿部所受的局部齿槽电磁力为 0。

(6) $t_3 \sim t_4$ 时间段, 随着 PMSLM 的向右移动, 齿靴顶部两端受到的电磁力不对称, F_{d} 增大, 齿部所受的局部齿槽电磁力变大。

(5) t_4 时刻, F'_{d} 减小到 0, 齿靴顶部表面电磁力密度主要集中在 l 侧, 齿部受到的局部齿槽电磁力处于波峰位置。

综上所述, 局部齿槽电磁力波动是单齿切向力产生振动的主要原因。当 PMSLM 初级齿中心线与永磁体中心线或永磁体之间的极间区域中心线相重合时, 齿靴顶部两端所受单齿切向电磁力的合力为 0, 局部齿槽电磁力也为 0; 当二者不重合时, 齿部磁场畸变, 齿靴顶部两端所受单齿切向电磁力的合力不为 0, 局部齿槽电磁力也不为 0, 其值正负波动。

4 PMSLM 振动分析

结构系统受到外界激励产生运动时, 将按特定频率发生自然振动, 这个特定的频率被称为结构的固有频率^[19]。对于无阻尼单自由系统而言, 固有频率定义如下:

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (6)$$

式中: k 为物体的劲度系数; m 为物体的质量。

利用 ANSYS Workbench 仿真平台, 对 PMSLM 初级的模态进行仿真计算, 其结果如图 10 所示。

当电机特定阶次电磁力波某一频率分量等于或者接近初级相应模态固有频率时, 初级会发生共振现象^[20]。在额定工况下, 低频范围内的初级各阶固有频率与相应电磁力频率相差较远, 因此, 不会发生共振现象。

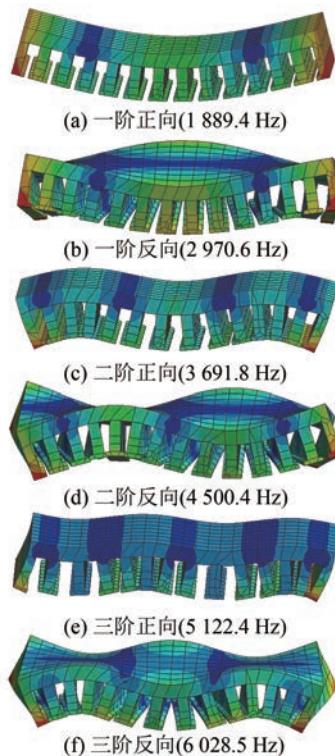


图 10 PMSLM 初级模态振型图

空载时, 电机在不同电磁力作用下关键频率点的振动加速度如图 11 所示。可以看出, 两种电磁力对振动的贡献既有叠加关系也有抵消关系, 仅考虑法向电磁力的作用并不能完全反应电机的振动特性。其次, 切向电磁力对振动的贡献基本可以与法向电磁力比拟^[21], 因此, 切向电磁力也是重要的激振源。

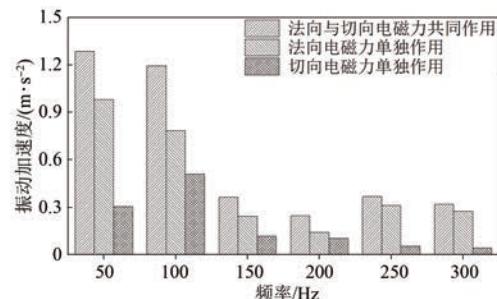


图 11 空载下样机关键频率点振动加速度仿真结果对比

5 结语

本文构建了 PMSLM 模型, 根据麦克斯韦应力方程建立了 PMSLM 单齿切向电磁力数学模型, 并对单齿切向电磁力产生振动的原因进行了分析。利用 ANSYS Workbench 平台对电机的模

态和振动加速度进行计算。结果表明,切向集中力的变化趋势可以体现局部齿槽电磁力的变化趋势,局部齿槽电磁力波动是单齿切向电磁力产生振动的主要原因。因此,通过合理调整电机初级齿部磁场分布,能够有效减小电机的电磁振动,为PMSLM 的振动优化提供了参考。

【参考文献】

- [1] 吕刚. 直线电机在轨道交通中的应用与关键技术综述[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(17): 5665-5675.
- [2] 夏加宽, 赵鹏, 黄伟. 直线伺服电机法向力分析[J]. 电气开关, 2010, 48(4): 15-17.
- [3] 杨归, 许金, 朱俊杰, 等. 六相永磁直线同步电机电磁特性分析及数学模型建立[J]. 电机与控制应用, 2022, 49(11): 22-28.
- [4] 冀相, 许金, 黄垂兵, 等. 永磁直线同步电机推力脉动削弱方法综述[J]. 电机与控制应用, 2019, 46(1): 70-74.
- [5] 李泽星, 夏加宽, 刘铁法, 等. 基于分段交错梯形磁极的分数槽集中绕组永磁电机局部切向力的削弱[J]. 电工技术学报, 2023, 38(6): 1447-1459+1485.
- [6] 刘凯, 张炳义, 冯桂宏. 基于电枢齿偏移法双面转子永磁同步电机振动噪声特性的研究[J]. 电工技术学报, 2021, 36(增刊1): 95-106.
- [7] 沈海涛, 汪奇, 吉晓凯, 等. 直线电机推力波动补偿技术[J]. 电机与控制应用, 2022, 49(9): 44-49+56.
- [8] 许孔孔, 贾萍, 尹海韬, 等. 永磁同步直线电机磁阻力优化设计[J]. 微电机, 2022, 55(10): 44-47+75.
- [9] 夏加宽, 于冰. 定子齿开槽对永磁电机齿槽转矩的影响[J]. 微电机, 2010, 43(7): 18-21.
- [10] HU H Z, LIU X D, ZHAO J, et al. Analysis and minimization of detent end force in linear permanent magnet synchronous machines [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(3): 2475-2486.
- [11] 张啸. 潜油永磁直线同步电机优化设计研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2020.
- [12] LAN H, ZOU J B, XU Y X, et al. Effect of local tangential force on vibration performance in fractional-slot concentrated winding permanent magnet synchronous machines [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2019, 34(2): 1082-1093.
- [13] 黄文美, 杨帅, 宋桂英. 永磁直线电动机削弱齿槽力的槽极数配合分析[J]. 微特电机, 2012, 40(4): 4-6.
- [14] 谢建隆, 陆可, 郑云广, 等. 大功率多相永磁同步直线电机设计[J]. 微电机, 2018, 51(2): 6-10+19.
- [15] 张婷婷. 间隔绕组永磁直线电机设计研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2020.
- [16] 李雄松. 平板型永磁直线同步电机推力特性的优化设计[D]. 长沙: 湖南大学, 2020.
- [17] 李威扬. 削弱永磁直线伺服电机法向力波动优化设计[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2011.
- [18] 贾梦凡, 于冰, 唐小春, 等. 基于转子辅助槽的PMSM 电磁振动噪声削弱方法研究[J]. 电机与控制应用, 2022, 49(3): 68-76.
- [19] 曹树谦, 张文德, 萧龙翔. 振动结构模态分析[M]. 天津: 天津大学出版社, 2014.
- [20] 李晓华, 刘成健, 梅柏杉, 等. 电动汽车IPMSM 宽范围调速振动噪声源分析[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(17): 5219-5227+5319.
- [21] LI Z X, XIA J K, GUO Z Y, et al. Analysis and reduction of pole-frequency vibration of surface mounted permanent magnet synchronous machines with fractional slot concentrated winding considering the radial and tangential forces [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2023, 9(2): 2129-2140.