

永磁伺服驱动系统高次谐波抑制随机调制策略比较分析

何静萱¹, 杨磊^{2,3}, 黄玉平^{2,3}, 朱家厅^{2,3}, 卜飞飞¹

(1. 南京航空航天大学自动化学院, 南京, 210016; 2. 北京精密机电控制设备研究所, 北京, 100076;
3. 控制执行机构技术创新中心, 北京, 100076)

摘要: 为了解决传统脉宽调制 (Pulse Width Modulation, PWM) 策略由于高速开关动作导致在固定开关频率附近聚集大量谐波的问题, 对永磁同步电机 (Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM) 伺服驱动系统中的随机调制策略进行了研究。在常规随机开关频率调制 (Random Switching Frequency PWM, RSF-PWM) 的基础上, 双随机调制策略 (Dual Randomized Modulation PWM, DRM-PWM) 通过引入零矢量作用时间的随机化, 有效提升了电磁兼容性 (Electromagnetic Compatibility, EMC)。然而, 该策略在电磁干扰 (Electromagnetic Interference, EMI) 抑制效果与系统控制性能之间难以兼顾。为此, 后续又对多平均开关 RSF-PWM (Multi-Average Random Switching Frequency SVPWM, MARSF-SVPWM) 策略进行了研究, 并重点对两种调制策略进行了对比分析。相较于 DRM-PWM 策略, MARSF-SVPWM 策略在保持整体扩频范围和平均开关频率不变的前提下, 缩小了相邻开关频率差值的分布范围, 从而进一步降低谐波峰值。仿真和试验结果表明, MARSF-SVPWM 策略获得了优于 DRM-PWM 策略的谐波分散效果, 并且对系统控制性能的影响维持在较低的水平, 优化了 EMI 抑制效果。

关键词: 伺服驱动系统; 空间矢量脉宽调制; 双随机调制; 多平均开关调制; 电磁干扰

中图分类号: V448

文献标识码: A

Comparative Analysis of Random Modulation Strategies for High-order Harmonic Suppression in Permanent Magnet Servo Drive Systems

HE Jingxuan¹, YANG Lei^{2,3}, HUANG Yuping^{2,3}, ZHU Jiating^{2,3}, BU Feifei¹

(1. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, College of Automation Engineering, Nanjing, 210016; 2. Beijing Institute of Precision Mechatronics and Controls, Beijing, 100076; 3. Innovation Center for Control Actuators, Beijing, 100076)

Abstract: To address the issue of harmonic concentration near fixed switching frequencies caused by high-speed switching actions in traditional PWM strategy, the random modulation strategies in the PMSM servo drive system are studied. On the basis of conventional RSF-PWM strategy, DRM-PWM strategy enhances EMC by introducing randomization of the zero-vector action time. However, this strategy struggles to balance EMI suppression effectiveness with system control performance. Subsequently, MARSF-SVPWM strategy is investigated, with a focus on comparing and analyzing the two modulation strategies. Compared to DRM-PWM strategy, MARSF-SVPWM strategy maintains overall spread spectrum range and average switching frequency while narrowing the distribution range of differences between adjacent switching frequencies, thereby further reducing harmonic peaks. Simulation and experimental results demonstrate that MARSF-SVPWM strategy achieves better harmonic dispersion performance compared to DRM-PWM, and maintains a lower impact on system control performance, optimizing the EMI suppression effect.

Keywords: servo drive system; space vector pulse width modulation; DRM-PWM; MARSF-SVPWM; electromagnetic interference

0 引言

电机伺服驱动系统可以实现高精度的运动控制, 被大量应用于机器人、数控机床半导体设备、医疗仪

器等领域^[1]。随着电机伺服驱动系统的规模化应用进程加速, 其面临着日益严苛的动态响应特性和稳态控制精度要求。而永磁同步电机 (Permanent Magnet

Synchronous Motor, PMSM) 凭借着高效率、高功率密度、高精度和高可靠性的优势^[2], 已经成为构建高性能伺服驱动系统的优选执行机构, 尤其是在需要快速动态响应速度、精密定位以及运行稳定的工业场合中展现了显著的技术优势。

在 PMSM 伺服驱动系统中, 常规脉宽调制 (Pulse Width Modulation, PWM) 策略通常基于固定的开关频率生成控制逆变器的特定脉冲^[3]。由于该调制方式固定的开关频率, 致使输出电压、电流的高频段中存在大量高次谐波分量。这些谐波分量主要分布在开关频率及其整数倍频处, 通过传导、辐射、感应耦合的方式进行传播, 引发伺服驱动系统对周围设备产生高强度电磁干扰 (Electromagnetic Interference, EMI), 从而影响电磁兼容 (Electromagnetic Compatibility, EMC) 性能。值得注意的是, PWM 实现过程中, 功率器件的高速开关过程会形成高频电压电流脉冲信号, 构成伺服系统 EMI 的主要干扰源, 影响设备的电磁兼容性能^[4]。随着高功率密度与集成化技术的深度发展, 伺服系统内部呈现出高度的功能模块集成化特征。在此条件下, 各类电子装置与机械结构高密度地布设在有限空间内, 导致系统内部 EMC 环境复杂度显著提升。作为伺服驱动系统的核心部件, PWM 逆变器在工作过程中产生的传导干扰, 不仅会劣化伺服系统的动态响应速度与定位精度, 更可能引发控制单元的信号失真与误动作, 进而降低整机设备的运行效能及可靠性^[5-6]。因此, 针对伺服系统电磁干扰问题的抑制策略优化具有重要的工程价值, 亟待提出更加有效的解决方案。

针对 PMSM 伺服驱动系统传导电磁干扰, 目前, 传导干扰的抑制策略主要分为硬件措施和软件措施^[7]。硬件抑制策略通过引入无源/有源 EMI 滤波器、新型拓扑结构降低系统共模电压的输出^[8-10]。文献 [11] 提出了一种电压传感电流补偿有源 EMI 滤波器, 通过将测量到的共模电压与共模电压阻抗网络结合生成共模反向电流, 从而抑制直流侧共模干扰, 省去了补偿变压器结构, 最终优化滤波器提升功率密度。文献 [12] 对传统三相四桥臂逆变器采用的三维空间矢量脉宽调制策略进行了改进, 试验验证了该调制方法不仅可以改善输出电压的谐波性能, 还能提升三相四桥臂逆变器驱动不同类型负载的能力。但是, 这些硬件抑制方案都依托于硬件改造, 不仅带来较高的成本, 其设计过程还需针对不同系统进行定制化参数计算及结构优化, 导致系统适用性受限。此外, 滤

波器的引入会显著增加系统体积与重量, 进而降低功率密度。

相较之下, 基于软件的谐波抑制方案通过改进型调制策略实现。该方案无需硬件改造、具有实施成本低、适用性强的优势。目前, 基于空间矢量脉宽调制 (Space Vector Pulse Width Modulation, SVPWM) 策略的随机扩频 PWM 策略是受到关注较多的扩频策略。扩频 PWM 策略依据信号类型可以分为随机调制与混沌调制两类。随机 PWM 采用概率分布的随机序列当作频率控制信号, 实际应用中一般通过软件设计采用特定算法生成随机数从而产生随机信号。混沌 PWM 则通过系统产生的混沌信号当作调制源, 但实现方法较为复杂, 并且可能出现低开关频率时采用混沌 PWM 导致输出信号畸变等情况, 还需进一步深入研究。

随机 PWM 技术的核心实现机制在于对开关函数参数进行随机化处理。通过这种方式, 可以生成两种随机 PWM 技术: 随机开关频率调制 (Random Switching Frequency PWM, RSF-PWM) 和随机脉冲位置调制 (Random Pulse Position PWM, RPP-PWM)。利用随机脉冲位置 PWM, 能够有限度地减少开关频率及其整数倍数处高次谐波的影响。但在较高的开关频率和调制比条件下, 这两种方法受限于随机化程度不足, 在谐波分布优化及电磁干扰抑制上的提升作用较有限。而对二者进行结合的双随机调制 (Dual Randomized Modulation PWM, DRM-PWM) 策略虽然同时兼顾两种单一随机调制方式的优势^[13-16], 但开关频率变化范围仍然是影响 DRM-PWM 策略谐波分散效果的主导因素。在 PMSM 伺服驱动系统中, 扩频范围较窄时, RSF-PWM 谐波分散效果不明显, 从而导致系统传导 EMI 抑制效果不理想; 而扩频范围过大会对 PMSM 伺服系统控制性能造成负面影响。因此, 需要对 RSF-PWM 策略进行改进, 在保持扩频范围较窄条件下, 使其高次谐波分散效果得到优化, 进一步削弱高次谐波的幅值, 从而减小对其他设备产生的电磁干扰强度, 提升 PMSM 伺服驱动系统的电磁兼容性能。

为了在较窄的扩频范围条件下得到理想的高次谐波频谱, 本文首先对两种随机 PWM 的原理进行分析, 对比了 DRM-PWM 策略和多平均开关频率 RSF-PWM (Multi-Average Random Switching Frequency SVPWM, MARSF-SVPWM) 策略的实现过程。其中, MARSF-SVPWM 在扩频范围相同的情况下通过降低相邻开关频率差值, 进一步抑制了高次谐波。最后结合仿真分析

和试验验证,证明了相同扩频范围条件下, MARSF-SVPWM可获得比 DRM-PWM 更好的谐波分散效果,同时不会对系统控制性能造成更大影响。

1 伺服驱动系统 SVPWM 调制基本原理

永磁同步电机的 PWM 调制方式主要有载波交截正弦脉宽调制 (Sinusoidal Pulse Width Modulation, SPWM) 和 SVPWM 调制。SPWM 调制策略是 PMSM 为常用的调制方法之一,它利用输出的信号作为调制波,以高频三角波作为载波,通过二者波形的交点得到桥臂中功率器件的开通关断情况。SPWM 调制策略虽然实现简单,可是仍面临输出电流谐波畸变率较高且直流电压利用率低等问题。

SVPWM 调制技术的核心原理在于每个开关周期内,通过对基本电压矢量进行线性组合以逼近目标参考矢量,调控逆变器开关器件通断时序,从而生成圆形旋转磁场。相较于 SPWM, SVPWM 可以改善电流谐波性能,提高直流电压利用率。因此,后续本文抑制伺服驱动系统传导 EMI 的研究将基于 SVPWM 策略展开。

SVPWM 调制技术主要利用操控开关器件的不同组合,切换空间电压矢量,进而获得一个圆形的旋转磁场,从而得到较理想的正弦电压。三相两电平逆变器拓扑如图 1 所示。

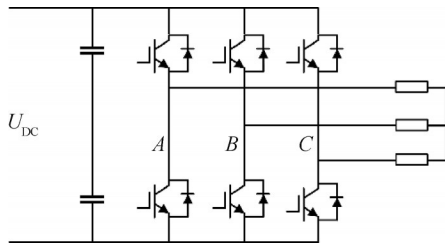


图 1 三相两电平逆变器拓扑

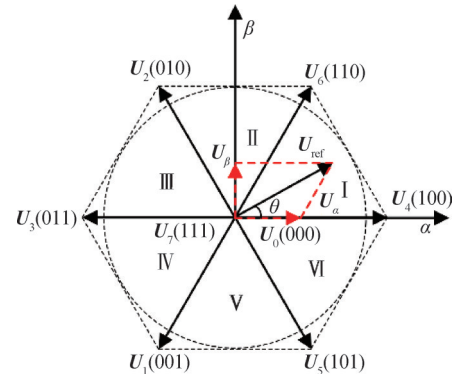
Fig.1 Topology of three-phase two-level inverter

U_{DC} 为直流母线电压,三相两电平逆变器有 6 个功率开关管。设置 $S = [S_A, S_B, S_C]$, 其中, $S_x = 1 (x = A, B, C)$ 表示相应桥臂上管导通、下管关断; $S_x = 0 (x = A, B, C)$ 表示相应桥臂上管关断、下管导通。根据开关状态不同,逆变器各相输出电压 U_A 、 U_B 、 U_C , 也就是 PMSM 定子三相电压,可表示为

$$\begin{cases} U_A = \left[S_A - \frac{1}{3} (S_A + S_B + S_C) \right] U_{DC} \\ U_B = \left[S_B - \frac{1}{3} (S_A + S_B + S_C) \right] U_{DC} \\ U_C = \left[S_C - \frac{1}{3} (S_A + S_B + S_C) \right] U_{DC} \end{cases} \quad (1)$$

图 1 的逆变器包含 8 种开关状态,包括六个幅值为 $2U_{DC}/3$ 的有效矢量状态和 2 个零矢量状态 U_0 、 U_7 。将上述基本矢量投影至复平面中,可得到如图 2 所示的空间矢量图。其中,6 个有效矢量将复平面分为 6 个扇区。

对位于特定扇区中任一参考电压矢量,可以采用该扇区两个相邻有效矢量与零矢量的线性组合实现其合成。通过控制有效矢量的作用时长可以改变合成矢量的幅值。以合成矢量在扇区 I 中为例,可以利用基本矢量 U_4 、 U_6 进行合成。



U_α — α 轴电压分量; U_β — β 轴电压分量; U_{ref} —参考电压矢量。

图 2 空间电压矢量分布

Fig.2 Space voltage vector distribution

在传统 SVPWM 策略下高次谐波聚集在开关频率及其整数倍频率点附近频带内,且随着倍数增加,频带内谐波幅值会整体降低。

因此,当 PMSM 伺服驱动系统采用 SVPWM 策略时,其输出电压、电流的频谱中会在开关频率及其整数倍附近较窄的频带内聚集大量高次谐波能量,形成的谐波尖峰会对 PMSM 伺服驱动系统产生传导 EMI 干扰,甚至影响系统及周围设备正常工作。

2 DRM-PWM 方法

2.1 开关频率的随机化

随机开关延时的方法,也就是在传统固定频率 PWM 策略的基础上,引入按特定规律分布的随机变量,使得 RSF-PWM 策略中的开关频率不再是固定不变的。因此,原先聚集在开关频率及其倍频处的能量可以被分散在更宽的频段内,有助于降低单一频带能量峰值。

将采样时刻和开关时刻分成两个互不干扰的部分,传统固定频率 PWM 策略按照采样时刻进行开关动作。而 RSF-PWM 策略保证采样频率不变,在一定范围内,对开关时刻进行随机化处理,然后执行开关

操作，如图3所示。

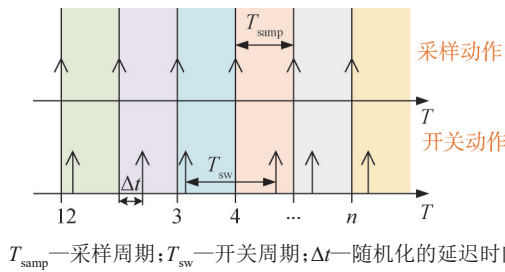


图3 随机开关延时方法原理

Fig.3 Schematic diagram of random switch delay method

由于采样频率是固定值，因此必须在每个采样周期内固定时间完成采样。但是采取RSF-PWM策略时，不再按照采样时刻进行开关动作，而是延时 Δt 。为确保每个采样周期内总有一次开关脉冲信号可以平稳执行，延迟时间 Δt 需要满足：

$$0 \leq \Delta t < T_{\text{samp}} \quad (2)$$

每次延迟的时间都是不同的，通过随机数和采样周期，随机延时 Δt 可表示为

$$\Delta t = \text{rand}[0, 1] \times T_{\text{samp}} \quad (3)$$

式中 $\text{rand}[0, 1]$ 为一个在 $[0, 1]$ 范围内均匀分布的随机数。虽然所有开关动作的操作时间都是不确定的，但是可以通过计算邻近的两个开关动作的时间差值，从而能够获得第 n 个开关周期 T_{sw} 的表达式：

$$T_{\text{sw}}(n) = T_{\text{samp}} + \Delta t_n - \Delta t_{n-1} \quad (4)$$

通过式 (4) 能够获得随机化后变化范围为 $[0, 2T_{\text{samp}}]$ 的开关周期。开关频率 f_{sw} 也在区间 $[0.5f_{\text{samp}}, \infty)$ 内随机变化， f_{samp} 为采样频率。随着开关频率提升，随机频带加宽，有利于降低输出电流中谐波成分。但是开关频率越高时，开关器件损耗也越大。所以，需要限定一个开关频率的最大值，即：

$$f_{\text{sw}}(n) = f_{\text{sw_max}} \quad (5)$$

式中 $f_{\text{sw_max}}$ 为开关频率的最大值。因此，能够得到开关频率随机变化的范围：

$$0.5f_{\text{samp}} \leq f_{\text{sw}} < f_{\text{sw_max}} \quad (6)$$

2.2 脉冲位置的随机化

由于SVPWM调制合成电压的幅值仅与有效矢量作用时间有关，与脉冲位置无关。而一种有效的改变脉冲位置的方法就是调整零矢量作用时间，使其随机化分配。传统SVPWM策略中，两个零矢量作用时长均等划分，但是在随机零矢量PWM策略中，开关频率和占空比保持不变，两个零矢量在开关周期内随机对称地分布。在总作用时间保持恒定的条件下，调整

位于开头末尾的零矢量和位于中间的零矢量的作用时间，使其不再相等，如图4所示。调制过程中，零矢量总作用时间和有效电压矢量作用时间均维持不变，因此逆变器输出电压也不变^[17]。

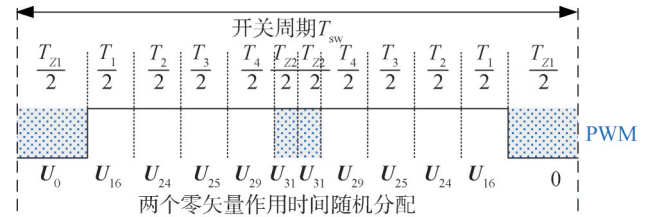


图4 随机零矢量分配原理

Fig.4 Principle diagram of random zero vector allocation

依据下式能够随机分配两个零矢量的作用时间：

$$\begin{cases} T_{z1} = R_i \times T_0 \\ T_{z2} = T_0 - T_{z1} \end{cases} \quad (7)$$

式中 T_{z1} 和 T_{z2} 分别为零矢量 U_0 和 U_{31} 的作用时间； R_i 是一个平均分布在 $[0, 1]$ 上的随机数。当生成的随机数为0.5时，即为传统SVPWM策略。

2.3 DRM-PWM调制方法

从上文的分析可以看出，在给定采样频率的前提下，利用随机开关延时可以实现开关频率随机化，不仅不影响控制系统性能，同时还会对开关频率倍频处的高次谐波幅值产生抑制，使原本聚集的谐波能力更加均匀；通过对零矢量位置的随机对称分布，实现了在不改变输出电压的前提下，提高了电压频谱分布的均匀性和连续性。将二者进行有机结合，即可得到DRM-PWM方法，同时兼具两者优点，大幅提高输出电压的高频特性。因此，结合随机开关延时和随机零矢量分配这两种随机方法，能够更好地解决更多电磁兼容问题。

3 MARSF-SVPWM策略

虽然DRM-PWM策略的高次谐波分散效果相对RSF-PWM策略得到了进一步提升，但是在DRM-PWM策略中，扩频范围大小对高次谐波分散能力起决定性作用，当扩频范围较窄时，谐波分散效果不明显，从而导致系统EMI抑制效果不理想。但当扩频范围过大时，则会影响PMSM伺服驱动系统其他控制性能。因此，需要对RSF-PWM策略进行改进，使其在较窄的扩频范围条件下，具有较好的谐波分散效果，实现较理想的EMI抑制效果。

由于扩频范围相同时，缩小相邻开关周期的开关频率值差值分布范围，也能降低高次谐波幅值。

因此, MARSF-SVPWM策略将原扩频范围平均划分为 n 个频段, 每个频段分别对应新的平均开关频率, 并设置开关频率切换周期为 T_b , 每经过 T_b/n 时间就切换一次开关频率变化频段。这样在保持整体扩频范围和平均开关频率不变的前提下, 缩小相邻开关周期的开关频率值差值分布范围, 进一步优化高次谐波分散效果。

3.1 传统RSF-PWM局限性及改进思路分析

采用传统RSF-PWM时, 开关频率以平均开关频率 f_{s0} 为中心, 在两侧 Δf 范围内不断随机变化, Δf 表示RSF-PWM扩频范围大小。固定开关频率SVPWM输出信号频谱在开关频率及其整数倍附近聚集大量谐波。在时域与频域中能量守恒, 总谐波能量不变, 故RSF-PWM可以将集中的谐波能量分散到整个扩频范围内, 谐波尖峰幅值就会降低。可以假设采用RSF-PWM策略时, 每个开关周期内产生的谐波能量会在频谱上产生一个以该周期开关频率点为中心的高次谐波包络线, 所有单个开关周期内的高次谐波能量叠加起来为总谐波能量分布情况。

基于上述分析, 可以将RSF-PWM策略在开关频率附近高次谐波分布情况表示为如图5所示的谐波。随着时间变化, 单个开关周期内产生的高次谐波包络线中心在开关频率变化范围 $[f_{s0} - \Delta f, f_{s0} + \Delta f]$ 内随机平移, 并最终叠加成总谐波能量。当扩频范围 Δf 较大时, 单个开关周期内产生谐波能量包络线的中心点移动范围也较大, 则谐波分散效果较为理想, 传导EMI的抑制效果比较好。反之, 当扩频范围较窄时, 单个开关周期内产生谐波能量包络线的中心点移动范围较小, 谐波分散效果较差, 造成电磁噪声, 影响系统的EMC。

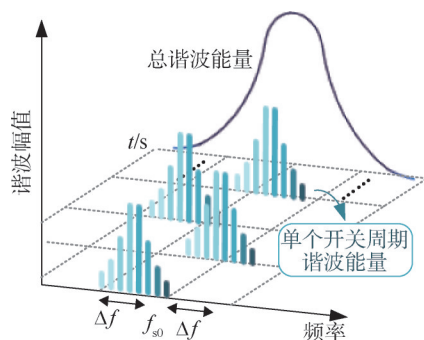


图5 传统RSF-PWM开关频率附近高次谐波分布

Fig.5 Distribution diagram of high-order harmonics near the traditional RSF-PWM switching frequency

RSF-PWM作用时, 随着扩频范围增大, 虽然输出信号高次谐波分散效果改善, 但系统控制精确性和稳定性较差。扩频范围越大, RSF-PWM对PMSM伺服驱动系统控制性能的负面影响也就越大。为了降低对PMSM伺服系统控制性能的负面作用, 选取扩频范围较小的RSF-PWM时, 高次谐波分散效果较差, 系统传导EMI发射值依然较高, 影响系统EMC的提升。因此, 传统RSF-PWM很难兼顾高次谐波分散效果和系统控制性能。

3.2 MARSF-SVPWM基本原理

由上述分析可知, 扩频范围较小时, 传统RSF-PWM产生的传导EMI值较高, 影响系统稳定运行。因此, 可以在维持原有开关频率的前提下, 通过将扩频范围分为 n 个分频段, 并为每个子频段配置独立的中心开关频率。由此, MARSF-SVPWM策略可在有限扩频范围的前提下优化高次谐波分布特性。

以 $n = 4$ 时为例, 对MARSF-SVPWM开关频率值随时间变化情况作具体说明。保持传统RSF-PWM平均开关频率 f_{s0} 和扩频范围 Δf 不变, 当 n 值取4时, 每经过 $T_b/4$ 时间, 平均开关频率就按 f_{s1} 、 f_{s2} 、 f_{s3} 、 f_{s4} 顺序切换一次, 开关频率在每个阶段的平均开关频率两边 $\Delta f/4$ 范围内随机变化, 在每个平均开关频率周期 T_b 内重复上述过程。 f_{s1} 、 f_{s2} 、 f_{s3} 、 f_{s4} 可以表示为

$$\begin{cases} f_{s1} = f_{s0} - \frac{3}{4} \Delta f \\ f_{s2} = f_{s0} - \frac{1}{4} \Delta f \\ f_{s3} = f_{s0} + \frac{1}{4} \Delta f \\ f_{s4} = f_{s0} + \frac{3}{4} \Delta f \end{cases} \quad (8)$$

MARSF-SVPWM开关频率附近高次谐波分布如图6所示。如图6所示, 为使MARSF-SVPWM策略作用原理更加明确, 同样在 $n = 4$ 时对其开关频率附近高次谐波分布情况进行分析。采用MARSF-SVPWM策略后, 单个开关周期内产生的谐波能量包络线中心将根据时间变化在不同频段内平移, 且平移范围互不重叠。在整体扩频范围保持相同的情况下, 总谐波能量的包络线中心由之前的 f_{s0} 变化为 f_{s1} 、 f_{s2} 、 f_{s3} 、 f_{s4} , 此时, f_{s1} 、 f_{s2} 、 f_{s3} 、 f_{s4} 处谐波能量幅值会低于采用传统RSF-PWM时 f_{s0} 处谐波能量幅值。因此, 采用MARSF-SVPWM总谐波能量的最高幅值得到降低, 在相同的扩频范围下, 实现了高次谐波的进一步分散。

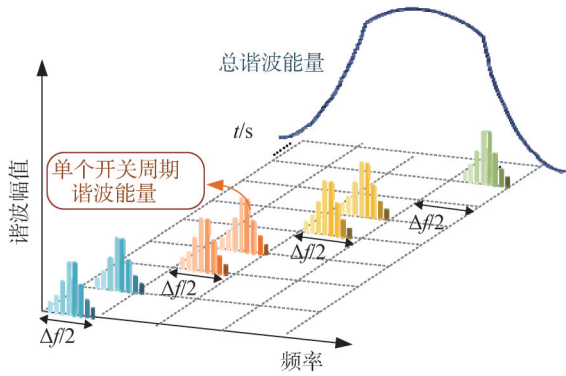


图6 MARSF-SVPWM开关频率附近高次谐波分布

Fig.6 Distribution diagram of high-order harmonics near the switching frequency of MARSF-SVPWM

4 仿真与分析

在仿真软件中进行PMSM伺服驱动系统建模。选择4对极永磁同步电机，直流母线电压为28 V，额定转矩为1.27 N·m，线电阻为0.13 Ω，线电感为0.15 mH，额定功率为0.4 kW，转矩常数为0.06 (N·m)/A，转子惯量为 0.28×10^{-4} kg·m²，平均开关频率 f_{s0} 为10 kHz，转速为1 000 r/min。在负载转矩为0.5 N·m和1 N·m时，对传统SVPWM、扩频范围为±10% ([9, 11] kHz)的DRM-PWM和MARSF-SVPWM进行仿真，对上文分析扩频范围对高次谐波分散效果产生影响进行验证，仿真结果如图7、图8所示。

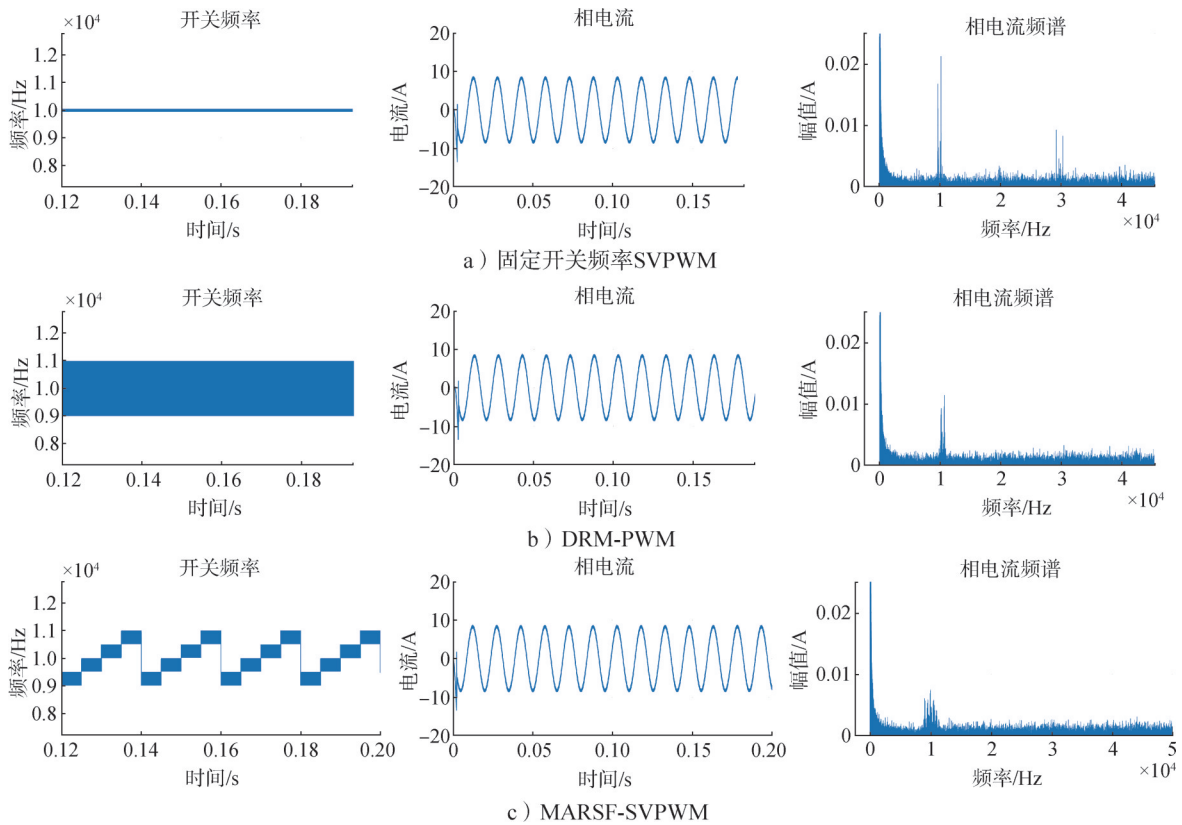


图7 负载0.5 N·m时,不同SVPWM输出电流波形及频谱

Fig.7 When the load is 0.5 N·m, different SVPWM output current waveforms and spectra

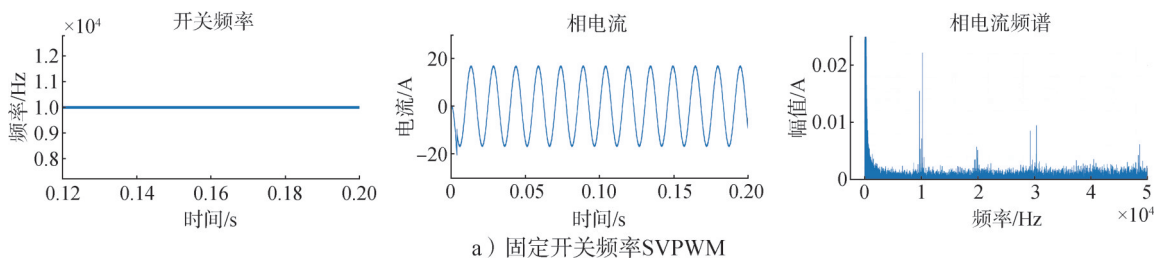
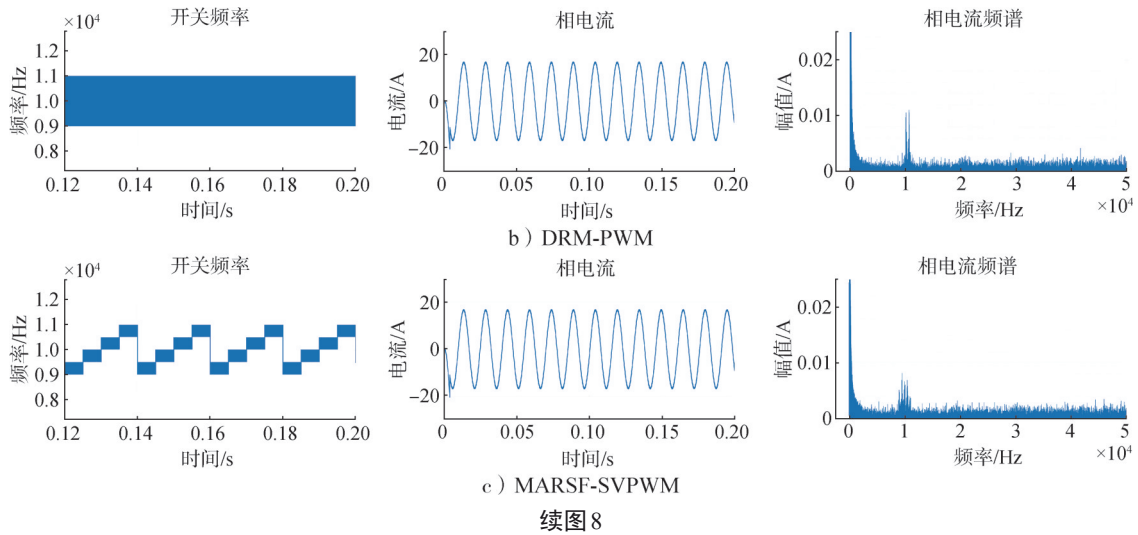


图8 负载1 N·m时,不同SVPWM输出电流波形及频谱

Fig.8 When the load is 1 N·m, different SVPWM output current waveforms and spectra



续图8

由图7与图8可知，同样在扩频范围±10%的条件下，采用 DRM-PWM 策略和 MARSF-SVPWM 策略得到的频谱图均优于采用固定开关频率 SVPWM 时得到的频谱图。可以看到原先分布在开关频率及其整数倍次频率附近的高次谐波被分散，谐波峰值降低。但是相比于 DRM-PWM 策略，MARSF-SVPWM 策略对高次谐波的削弱效果更强。而在较小的±10%扩频范围的情况下，MARSF-SVPWM 策略对系统的负面影响可以维持在较低的程度，具有一定优越性。

5 试验与分析

为了进一步验证不同调制策略的谐波分散效果以及上述分析的正确性，用 PMSM 伺服驱动系统试验平台，分别采取传统 SVPWM 策略、DRM-PWM 策略和 MARSF-SVPWM 策略，进行试验对比分析。利用示波器分析 PMSM 伺服驱动系统定子相电流的高次谐波频谱，对比不同调制策略的高次谐波抑制能力。在此基础上，观测不同调制策略下的相电流波变化，评估不同调制策略对 PMSM 性能产生的影响程度。图9为试验平台实物图，主要包含磁粉制动器、PMSM、联轴器和扭矩传感器。PMSM 采用的是拓达公司生产的 SDGA-04C1BD24 型号伺服电机，其主要参数与仿真参数一致，为4对极的表贴式永磁同步电机，直流母线电压为28 V，转速为1 000 r/min，转矩为0.5 N·m，扩频范围为±10%。传感器采用的是蚌埠大洋传感器公司的 DYN-200 型号的动态扭矩传感器，实时监测和反馈电机的运行状态，包括扭矩和转速等关键参数。对传统 SVPWM、扩频范围为±10%（[9, 11] kHz）的 DRM-PWM 和 MARSF-SVPWM 进行试验，试验结果如图10所示。

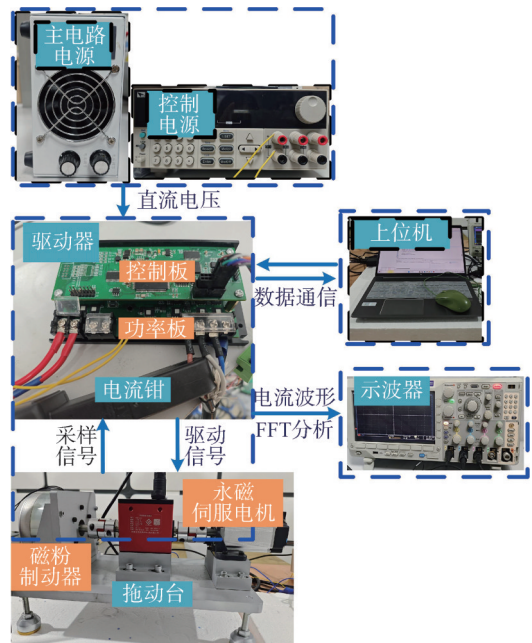


图9 试验平台实物

Fig.9 Physical platform

基于图10的试验数据分析，在0.5 N·m负载条件下，针对采用不同调制策略的电流波形及其频谱展开对比研究。试验结果表明，采用传统 SVPWM 时，相电流频谱在开关频率的倍频处呈现出明显的谐波聚集现象。相较于传统 SVPWM，采用 DRM-PWM 策略后，PMSM 伺服驱动系统相电流频谱中的高次谐波明显削弱。而 MARSF-SVPWM 策略对高次谐波的削弱效果比 DRM-PWM 策略更强。由上述试验结果可知，相较于 DRM-PWM 策略，MARSF-SVPWM 策略可以在保持扩频范围较窄的情况下，进一步削弱谐波尖峰，获得较为理想的谐波分散效果同时对相电压波形质量造成轻微负面影响。

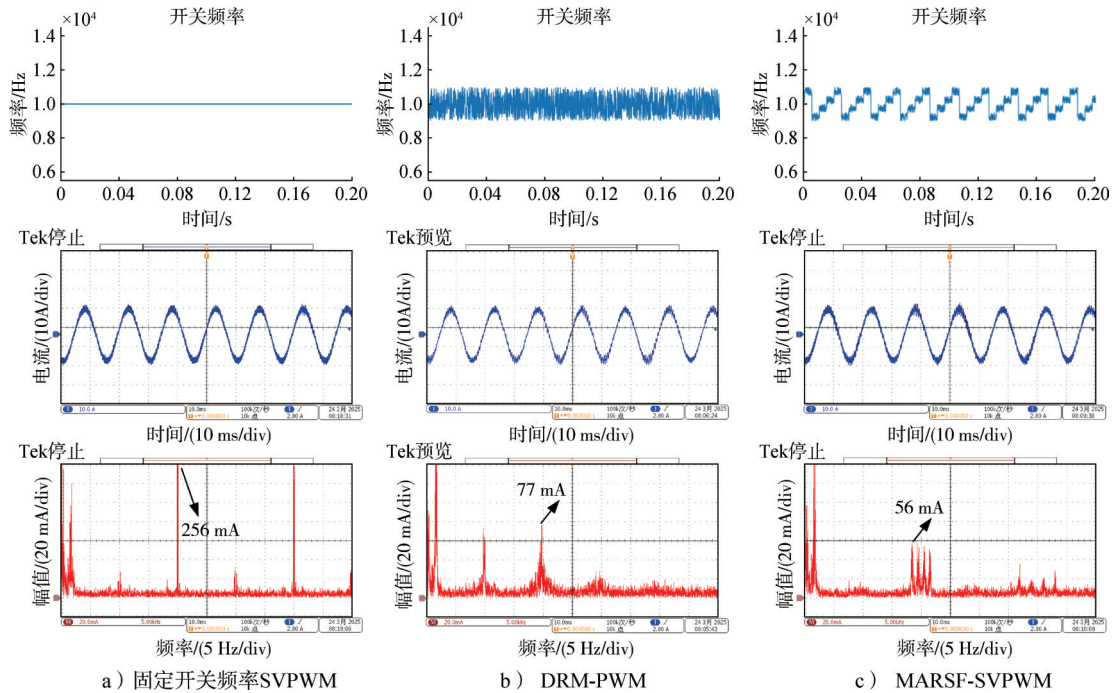


图 10 负载 0.5 N·m 时,不同 SVPWM 在试验平台上的输出电流波形及其频谱对比
 Fig.10 When the load is 0.5 N·m, different SVPWM output current waveforms and spectra at physical platform

6 结论

针对 PMSM 伺服驱动系统, 本文对 DRM-PWM 策略及 MARSF-SVPWM 策略的原理及实现过程进行了分析, 并重点对比了两种调制策略。相较于 DRM-PWM 策略围绕单一的平均开关频率随机变化, MARSF-SVPWM 策略将完整的频率变化范围划分为四个分频段, 并在各频段内实现开关频率的随机变化, 在维持扩频范围不变的情况下, 抑制了高次谐波的进一步分散。接着搭建仿真模型与实物平台, 将原有的固定开关频率 SVPWM 策略、DRM-PWM 策略与 MARSF-SVPWM 策略进行对比。通过仿真与试验验证, 在同样的扩频范围条件下, MARSF-SVPWM 策略的谐波分散效果明显优于 DRM-PWM, 验证了该策略的优越性。后续研究可以开展系统的电磁兼容特性测试, 深入探究高次谐波抑制效果与电磁兼容性提升之间的内在关联, 通过多维度测试数据开展综合评价。

参考文献

[1] 何万青. 永磁同步电机在新能源车上的应用[J]. 时代汽车, 2023 (1): 106-108.
 HE Wanqing. Application of permanent magnet synchronous motor in new energy vehicles[J]. Auto Time, 2023(1): 106-108.
 [2] 陈瑞, 吴悠, 杜荣华, 等. 一种基于特征模型的永磁同步电机协调控制策略[J]. 电气工程学报, 2025, 20(1): 54-64.
 CHEN Rui, WU You, DU Ronghua, et al. A coordinated control strategy for the permanent magnet synchronous motor based on the characteristic model[J]. Journal of Electrical Engineering, 2025, 20 (1): 54-64.

[3] 陈瑞焘, 项安, 刘青松, 等. 基于 SVPWM 控制的永磁同步电机伺服系统设计与仿真[J]. 机电一体化, 2013, 19(1): 65-70.
 CHEN Ruitao, XIANG An, LIU Qingsong, et al. Designed and simulation of PMSM based on the SVPWM control method[J]. Mechatronics, 2013, 19(1): 65-70.
 [4] 刘琦. 适用于永磁同步电机伺服系统的新型随机 SVPWM 策略研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2022.
 LIU Qi. Research on novel random space vector pulse width modulation strategy for permanent magnet synchronous motor servo system[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2022.
 [5] TAKAHASHI S, OGASAWARA S, TAKEMOTO M, et al. Common-mode voltage attenuation of an active common-mode filter in a motor drive system fed by a PWM inverter[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019, 55(3): 2721-2730.
 [6] 徐军忠. 现代逆变电源调制策略的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2021.
 XU Junzhong. Advanced pulse width modulation for modern inverters[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2021.
 [7] 张爱博. 基于 SiC MOSFET 永磁同步电驱系统共模电磁干扰特性及抑制策略研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2022.
 ZHANG Aibo. Study on common mode electromagnetic interference characteristics and suppression strategy in PMSM SiC drive system[D]. Chongqing: Chongqing University, 2022.
 [8] ZHANG Wentao, XU Yongxiang, HUANG Huidong, et al. Vibration reduction for dual-branch three-phase permanent magnet synchronous motor with carrier phase-shift technique[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 35(1): 607-618.
 [9] WANG S, MAILLET Y Y, WANG F F, et al. Investigation of hybrid EMI filters for common-mode EMI suppression in a motor drive system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25(4): 1034-1045.

(下转第 37 页)

参 考 文 献

- [1] 唐旭, 谭继文, 徐卫晓, 等. 基于卷积神经网络的数控机床滚珠丝杠副故障诊断研究[J]. 煤矿机械, 2019, 40(1): 141-143.
TANG Xu, TAN Jiwen, XU Weixiao, et al. Research on fault diagnosis of CNC machine ball screw pair based on convolutional neural network[J]. Coal Mine Machinery, 2019, 40(1): 141-143.
- [2] 刘家秀. 滚珠丝杠副故障诊断及试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
LIU Jiuxiu. Fault diagnosis method and experimental research of ball screw[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.
- [3] PAREY A, SINGH A. Gearbox fault diagnosis using acoustic signals, continuous wavelet transform and adaptive neuro-fuzzy inference system[J]. Applied Acoustics, 2019(147): 133-140.
- [4] DEMILIA G, GASPARI A, HOHWIELER E, et al. Improvement of defect detectability in machine tools using sensor-based condition monitoring applications[J]. Procedia CIRP, 2018(67): 325-331.
- [5] LEE W G, LEE J W, HONG M S, et al. Failure diagnosis system for a ball-screw by using vibration signals[J]. Shock and Vibration, 2015, 2015: 1-9.
- [6] 肖正义, 焦洁. 高速滚珠丝杠副的研发和测试技术[J]. 制造技术与机床, 2004(4): 95-98.
XIAO Zhengyi, JIAO Jie. Development and test of high speed ball screw units[J]. Function Units, 2004(4): 95-98.
- [7] ZHAO T, LI D, CUI P, et al. A self-powered flexible displacement sensor based on triboelectric effect for linear feed system[J]. Nanomaterials, 2023, 13(24): 3100.
- [8] FENG G H, PAN Y L. Establishing a cost-effective sensing system and signal processing method to diagnose preload levels of ball screws [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2012(28): 78-88.
- [9] GARINEI A, MARSILI R. A new diagnostic technique for ball screw actuators[J]. Measurement, 2012, 45(5): 819-828.
- [10] MÖHRING H C, BERTRAM O. Integrated autonomous monitoring of ball screw drives[J]. CIRP Annals, 2012, 61(1): 355-358.
- [11] TANAKA S, KIZAKI T, TOMITA K, et al. Direct observation of temperature distribution in ball screw feed drive system using wireless multi-point series temperature sensor[J]. Procedia CIRP, 2022(107): 876-881.
- [12] HUANG M, ZHU M, FENG X, et al. Intelligent cubic-designed piezoelectric node (iCUPE) with simultaneous sensing and energy harvesting ability toward self-sustained artificial intelligence of things (AIoT)[J]. ACS Nano, 2023, 17(7): 6435-6451.
- [13] HE L, MAIOLINO P, LEONG F, et al. Robotic simulators for tissue examination training with multimodal sensory feedback[J]. IEEE Reviews in Biomedical Engineering, 2023(16): 514-529.
- [14] 王凯瑶. 基于 MEMS 三维力传感器的机器人辅助微创手术触诊探头研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2023.
WANG Kaiyao. Research of palpation probe based on MEMS 3D force sensor for robotic-assisted minimally invasive surgery[D]. Suzhou: Soochow University, 2023.
- [15] HUANG M, LI Y, FENG X, et al. A magnetic-coupled nonlinear electromagnetic generator with both wideband and high-power performance[J]. Micromachines, 2021, 12(8): 912.

作者简介

张忠彬 (1994—), 男, 博士, 主要研究方向为 MEMS 传感器、无线监测系统和状态监测。

何露漫 (1997—), 女, 工程师, 主要研究方向为伺服系统设计与评估。

谢金 (1977—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为微纳制造、MEMS 传感器和驱动器。

黄玉平 (1967—), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为伺服系统设计技术。

刘会聪 (1982—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为微能源与自供能传感、微纳制造、智能传感与人机交互。

(上接第 25 页)

- [10] VARUN M, SHUKLA K, MAHESHWARI R, et al. A new hybrid PWM for two parallel connected interleaved two-level inverter to reduce output current ripple[C]. Toronto: 2017 IEEE 7th International Conference on Power and Energy Systems (ICPES), 2017.
- [11] ZHANG Y, LI Q, JIANG D. A motor cm impedance based transformerless active EMI filter for DC-Side common-mode EMI suppression in motor drive system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(10): 10238-10248.
- [12] ZHANG L, YANG H, TANG Y, et al. Decoupled modulation with common-mode load-voltage control for three-phase four-leg three-level inverter[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 69(8): 8594-8598.
- [13] 李尧, 刘剑. 基于双随机调制的特定频率谐波消除方法研究[J]. 兵器装备工程学报, 2022, 43(11): 266-272.
LI Yao, LIU Jian. Research on specific frequency harmonic elimination method based on dual randomized modulation[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2022, 43(11): 266-272.
- [14] 高捷. 三电平随机 SVPWM 调制策略研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2022.
GAO Jie. Research on three-level random SVPWM modulation strategy[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2022.
- [15] BOUDJERDA N, BOUDOUDA A, MELIT M, et al. Optimized dual randomized PWM technique for reducing conducted EMI in DC-AC converters[C]. Long Beach: IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 2011.
- [16] 朱琳. 五相逆变器非正弦供电电机脉宽调制技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.
ZHU Lin. Research on random pulse width modulation technology of five-phase inverter for non-sinusoidal power supply[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018.
- [17] 王新维. 基于随机调制的水下推进器用六相 PMSM 降噪策略研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2020.
WANG Xinwei. Research on noise reduction strategy of six phase PMSM for underwater propulsion based on random modulation[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2020.

作者简介

何静萱 (2001—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为伺服驱动控制与电磁干扰抑制。

杨磊 (1982—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为伺服电源技术。

黄玉平 (1967—), 男, 研究员, 主要研究方向为伺服系统设计技术。

朱家厅 (1987—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为伺服控制驱动技术。

卜飞飞 (1984—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为航空电源、伺服驱动、新能源发电等。