

DOI:10.16356/j.2097-6771.2026.01.019

LCCR 滤波器设计方法及永磁同步电机 高频电流谐波抑制

王天佐, 周扬, 张瀚林, 周瑾
(南京航空航天大学机电学院, 南京 210016)

摘要: 由脉宽调制(Pulse width modulation, PWM)引起的开关电流谐波会造成真空环境下磁悬浮分子泵驱动电机发热, 从而影响分子泵的可靠性。LCCR 型的无源滤波器可以有效抑制高频开关谐波, 然而 LCCR 滤波器 4 个元器件参数对滤波器频率特性的影响相互耦合, 难以准确设计。为解决这一问题, 本文提出了滤波器参数的系统化设计流程, 首先, 基于双重傅里叶分析研究了开关谐波的产生机理及频谱特性, 随后使用谐波矢量法分析了开关电流谐波幅值与 PWM 之间的关系, 探究了高调制比下高频电流谐波幅值显著增大的原因, 说明了对高速电机高频谐波进行抑制的必要性。在此基础上, 提出了 LCCR 滤波器的参数设计方法, 分析了各元器件参数对系统频响特性的影响, 并通过伯德图验证了引入 LCCR 滤波器后电流环的稳定性。实验结果表明: 采用依据本文设计方法设计的 LCCR 滤波器, 电机相电流总谐波失真(Total harmonic distortion, THD)从 35.48% 降低至 6.50%, 在额定转速下, 定子温度稳定时从 68.5 °C 降至 50.5 °C。

关键词: 永磁同步电机; 电流谐波; 双重傅里叶分解; LCCR 滤波器; 参数设计方法

中图分类号: TM351 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2026)01-0202-08

LCCR Filter Design Method and High-Frequency Current Harmonic Suppression in PMSM

WANG Tianzuo, ZHOU Yang, ZHANG Hanlin, ZHOU Jin

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016)

Abstract: The switching current harmonics caused by pulse width modulation(PWM) leads to overheating of the drive motor in vacuum environment, which affecting the reliability of the molecular pump. The LCCR filter can effectively suppress high-frequency switching harmonics. However, the parameters of the four components in the LCCR filter have a coupled effect on the frequency characteristics, making it difficult to design accurately. To address this issue, this paper proposes a systematic design process for filter parameters. Firstly, based on double Fourier analysis, the generation mechanism and spectral characteristics of switching harmonics are analyzed. Subsequently, the relationship between the amplitude of switching current harmonics and PWM modulation is analyzed using harmonic vector method. The reasons for the significant increase in harmonic amplitude of high-frequency current under high modulation ratio are explored, highlighting the necessity of suppressing high-frequency harmonics in high-speed motors. On this basis, a parameter design method for LCCR filters is proposed, and the influence of various component parameters on the system frequency response characteristics is analyzed. The stability of the current loop after introducing the LCCR

基金项目: 国家重点研发计划(2024YFB3410004)。

收稿日期: 2025-10-14; **修订日期:** 2026-01-28

通信作者: 周扬, 男, 博士后, E-mail: zhouyang0216@nuaa.edu.cn。

引用格式: 王天佐, 周扬, 张瀚林, 等. LCCR 滤波器设计方法及永磁同步电机高频电流谐波抑制[J]. 南京航空航天大学学报(自然科学版), 2026, 58(1): 202-209. WANG Tianzuo, ZHOU Yang, ZHANG Hanlin, et al. LCCR filter design method and high-frequency current harmonic suppression in PMSM[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics(Natural Science Edition), 2026, 58(1): 202-209.

filter is verified through a bode plot. Experimental results show that using the LCCR filter designed according to the method in this paper, the total harmonic distortion (THD) of motor phase current is reduced from 35.48% to 6.50%, and the stabilized stator temperature under rated speed decreases from 68.5 °C to 50.5 °C.

Key words: permanent magnet synchronous motor (PMSM); current harmonics; double Fourier decomposition; LCCR filter; parameter design method

随着半导体制造及液晶注入等行业的高速发展,分子泵因其工作稳定可靠、抽气效率高,已成为科学仪器、工业生产中制造真空环境的主流设备^[1-2]。永磁同步电机(Permanent magnet synchronous motor, PMSM)由于其高效、高功率密度等优点,常被选择作为分子泵驱动部件。

永磁同步电机运行中,脉宽调制(Pulse width modulation, PWM)过程产生高频电压开关谐波,且高速工况下定子电流中的开关谐波含量高^[3],对转子涡流损耗及绕组高频铜耗起决定性作用^[4-5],因此对高频开关谐波进行抑制可以有效地降低分子泵运行过程中电机发热。然而分子泵腔体的真空环境中无法进行最高效的热对流散热,涡轮形变可能会产生不稳定旋转,且转子过热时可能会使永磁体退磁或护套膨胀变形,从而降低分子泵系统的工作性能及稳定性。为了减小分子泵的发热,需要对谐波电流进行抑制。

目前主要采用以下 3 种方法研究开关电流谐波抑制:优化 PWM 调制算法^[6-7]、优化逆变器拓扑结构^[8-9]、采用逆变器输出滤波器^[10-11]。使用逆变器输出滤波器是一种简单高效的谐波抑制方法,常用的 LC 滤波器主要的问题在于当驱动器的输出频率接近滤波器谐振频率时会出现较为明显的谐振现象。现有的研究常采用有源阻尼^[12-13]或无源阻尼^[14-15]两种方式对 LC 滤波器的谐振峰进行抑制。无源滤波器以相对简单的电路结构和相对较低的成本优势成为抑制电流高频谐波的有效方案。文献^[15]通过对不同形式的无源阻尼滤波器对比发现,LCCR 滤波器损耗较小,易于工程推广,可在电机驱动器载波比偏低时使用,同时可降低 LC 谐振。LCCR 滤波器设计难点在于其元器件参数较多且相互耦合,传统的 LCCR 参数设计方法常采用试凑法。文献^[4]中指出,LCCR 滤波器的 RC 支路阻尼可调,可有效调节阻尼。但其参数设计方法所得滤波器的 RC 支路阻抗较低,高频开关电流谐波大部分从 RC 支路上通过导致电阻损耗较高,选取大功率电阻又会导致滤波器体积较大。

本文针对高频开关电流谐波的产生机理以及载波比对谐波幅值的影响,分别采用双重傅里叶分解及谐波矢量圆的方法做了理论推导,说明了针对

高速电机的高频电流谐波进行抑制的必要性。随后分析了 LCCR 滤波器元器件参数对频响曲线的影响,并根据频响曲线特性及提出元器件参数选取流程,在此基础上分析了引入 LCCR 滤波器后电机 FOC(Field-oriented control)中电流环 DQ 坐标系下的传递函数及电流环控制稳定性。最后进行仿真及试验,在分子泵试验平台上对 LCCR 滤波器的高频谐波抑制效果进行试验验证,分析滤除高频开关谐波对分子泵运行过程中电机发热的影响。电机相电流总谐波失真(Total harmonic distortion, THD)从 35.48% 降至 6.50%,在额定转速下定子温度稳定时从 68.5 °C 降至 50.5 °C。

1 高频开关电流谐波特性分析

1.1 开关电流谐波产生机理

分子泵电机采用空间矢量脉宽调制(Space vector pulse width modulation, SVPWM)调制策略及两电平逆变器拓扑结构。调制过程中通过三角载波 u_c 与 SVPWM 调制所得马鞍波 u_s 相比得到 PWM 信号,信号传递至逆变器后可得到作用在电机上的周期电压信号,三相电压作用在电机三相上进一步得到三相电流。以电机 A 相为例,电压方程如下

$$v_{as} = R_s i_{as} + L_s \frac{di_{as}}{dt} + e_a \quad (1)$$

$$v_{af} = R_s i_{af} + L_s \frac{di_{af}}{dt} + e_a \quad (2)$$

式中: L_s 、 R_s 、 v_{as} 、 v_{af} 、 i_{as} 、 i_{af} 、 e_a 分别为定子电感、定子电阻、逆变器输出电压、基波电压、定子电流、基波电流、反电势项。

当周期函数 $f(x, y)$ 是由式(3)两个时间变量共同决定时,通过双重傅里叶分解对之进行频谱分析可以得到其级数形式

$$\begin{cases} x(t) = \omega_c t + \theta_c \\ y(t) = \omega_s t + \theta_s \end{cases} \quad (3)$$

将式(3)中的 $x(t)$ 和 $y(t)$ 分别代入三角载波 u_c 与 SVPWM 调制所得马鞍波 u_s ,为简化傅里叶求解过程,将调制波形横坐标由 t 转化为 $\omega_c t$,则三角载波转化为以 2π 为周期的周期函数,将所得信号向上平移 U_d 得到 $u_o(t)$,如图 1 所示。

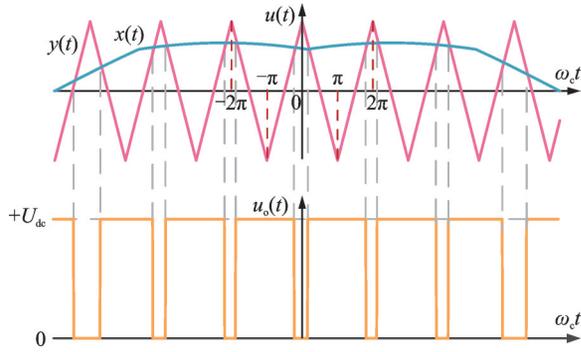


图1 调制信号产生过程及逆变器输出单相电压波形
Fig.1 Modulation signal generation process and inverter output single-phase voltage waveform

经过双重傅里叶分解之后可得调制 PWM 波的级数形式为(忽略直流分量)

$$u_o(t) = \underbrace{U_d M \cos(\omega_s t + \theta_s)}_{\text{基波分量}} + \underbrace{\frac{U_d}{6} M \cos 3(\omega_s t + \theta_s)}_{\text{三次谐波分量}} + \underbrace{\frac{4U_d}{\pi} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{m} J_0\left(m \frac{\pi}{2} M\right) \sin\left(m \frac{\pi}{2}\right) \cos[m(\omega_c t + \theta_c)]}_{\text{载波谐波分量}} + \underbrace{\frac{4U_d}{\pi} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{\substack{n=-\infty \\ (n \neq 0)}}^{\infty} \frac{1}{m} J_n\left(m \frac{\pi}{2} M\right) \sin\left[(m-n) \frac{\pi}{2}\right] \cos[m(\omega_c t + \theta_c) + n(\omega_s t + \theta_s)]}_{\text{边带谐波分量}} \quad (4)$$

式中 J_n 代表 n 次贝塞尔函数。可以看出逆变器输出电压信号中包含如下几种成分:(1)基波分量;(2)马鞍波调制导致的三次谐波分量;(3)频率为载波频率整数倍的载波谐波分量;(4)分布在载波谐波两侧、频率间隔为基波频率整数倍的边带谐波分量。图 1 中 PWM 信号的频谱分析结果如图 2 所示。

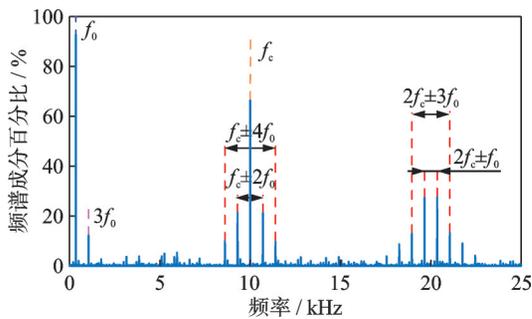


图 2 PWM 调制波频谱分析结果
Fig.2 PWM modulated wave spectrum analysis results

结合式(4),载波谐波分量和边带谐波分量中分别存在奇偶选择因子 $\sin(m\pi/2)$ 和 $\sin[(m-n)\pi/2]$, 波形 $u_o(t)$ 在频域中具有以下几条特征:(1)在载波谐波分量中,当 m 为奇数时载波谐波不为零,例如 f_c 处存在载波谐波分量;但当 m 为偶数时载波谐波为零,例如 $2f_c$ 处不存在载波谐波分量;

(2)在边带谐波分量中,当 $(m-n)$ 为偶数时边带谐波为零,即奇次载波周围不存在 $f_c \pm f_0, f_c \pm 3f_0$ 等奇次边带谐波,偶次载波周围不存在 $2f_c \pm 2f_0, 2f_c \pm 4f_0$ 等偶次边带谐波。

值得注意的是,式(4)所示为电机某一相电压波形的级数表达形式,三次谐波分量及载波谐波分量在三相电压中的表达式均一致,当作用于三相对称的电机系统时,电流谐波中不包含三次谐波及各次载波谐波。

综上所述,对高频开关电流谐波的产生机理及频谱特性进行了详细分析,对后文中设计 LCCR 滤波器时的截止频率选取提供了指导性分析。

1.2 调制比对开关电流谐波的影响分析

分子泵用永磁同步电机通常工作在较高转速下,当母线电压不变,转速不断升高时,电机调制比也不断升高,为分析转速对开关电流谐波的影响,根据 SVPWM 调制中基本电压矢量的作用顺序和时间分配方式计算不同调制比下的开关谐波电流。

逆变器输出电压由正弦基波电压与高频谐波电压构成,定子电流由基波电流和纹波电流构成,而反电动势项不存在于高频谐波中。忽略高频谐波在电阻上压降的影响,由式(1,2)做差可计算出高频谐波分量的电压方程

$$v_{ah} = R_s i_{ah} + L_s \frac{di_{ah}}{dt} \approx L_s \frac{di_{ah}}{dt} \quad (5)$$

将式(5)推广至三相并转换到 $\alpha\beta$ 坐标系上,有

$$v_{a\beta h} = L_s \frac{di_{a\beta h}}{dt} \quad (6)$$

式中: $i_{a\beta h}$ 为纹波电流矢量, $v_{a\beta h}$ 为基本电压矢量与参考电压矢量之差。对式(6)左右两侧同时对时间进行积分,可以得到每个基本电压矢量作用下产生的开关谐波电流矢量

$$i_{a\beta h} = (V_n - V_{ref}) T_n / L_s \quad (7)$$

式中: $V_n (n \in [0, 7])$ 为基本电压矢量, T_n 为基本电压矢量对应的作用时间。本文针对单采单更模式进行分析,电流采样与控制周期均与 PWM 周期相同,采用七段式 SVPWM 算法(以第一扇区为例),不同的基本电压矢量与电压矢量 V_{ref1} 和 V_{ref2} 之间的矢量差如图 3 所示。

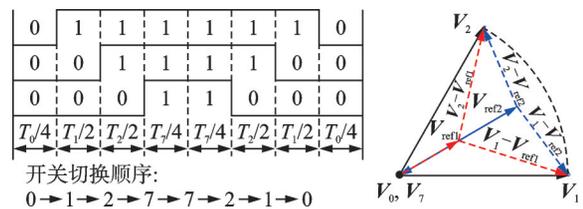


图 3 第一扇区开关切换顺序及矢量差示意图
Fig.3 Switching sequence and vector difference schematic diagram in the first sector

一个控制周期内八段开关状态下的开关谐波电流矢量为

$$\begin{cases} i_{0h} = (0 - V_{ref})T_0/4/L_s \\ i_{1h} = (V_4 - V_{ref})T_4/2/L_s \\ i_{2h} = (V_6 - V_{ref})T_6/2/L_s \\ i_{3h} = (0 - V_{ref})T_0/4/L_s \\ i_{4h} = (0 - V_{ref})T_0/4/L_s \\ i_{5h} = (V_6 - V_{ref})T_6/2/L_s \\ i_{6h} = (V_4 - V_{ref})T_4/2/L_s \\ i_{7h} = (0 - V_{ref})T_0/4/L_s \end{cases} \quad (8)$$

当参考电压矢量方向相同时,参考电压矢量的大小是影响开关电流谐波矢量大小和方向的主要因素,而参考电压矢量的大小主要与SVPWM调制过程中的占空比有关。当占空比增大时,0矢量作用时间减少,有效矢量作用时间占比增加。根据式(8)将对应的开关谐波电流矢量绘制在定子坐标系上。以矢量离原点O最远的距离为半径,以原点O为圆心作圆,绘制一条反映最大开关谐波电流的等纹波线,等纹波线半径越大,代表电流纹波越大。如图4所示为占空比分别为0.5和0.8时的等纹波圆示意图,占空比越高时开关谐波电流越大。

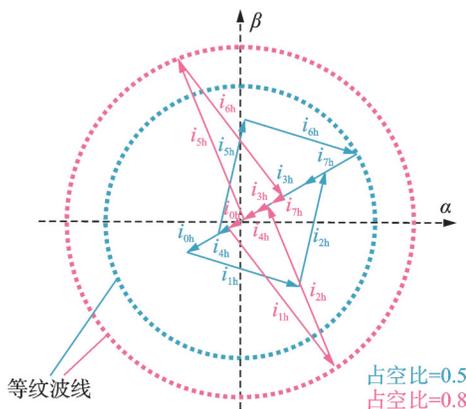


图4 不同占空比下等纹波圆示意图

Fig.4 Schematic diagram of ripple circles under different duty cycles

在分子泵永磁同步电机额定转速的高频工况下,开关电流谐波更加明显,位于第一开关频谱边带的谐波成分是对电机涡流损耗贡献最大的成分,这一分析说明了针对高速电机抑制高频开关谐波电流的重要性。

2 LCCR滤波器设计及验证

2.1 LCCR滤波器结构特性分析

引入LCCR后的电机控制框图如图5所示。图5中 L_f 、 C_f 、 C_d 、 R_d 分别为滤波电感、滤波电容、阻尼电容、阻尼电阻,四元器件的协同工作流程如下:(1)滤波电感 L_f 对低频基波呈现低阻抗、对高频开

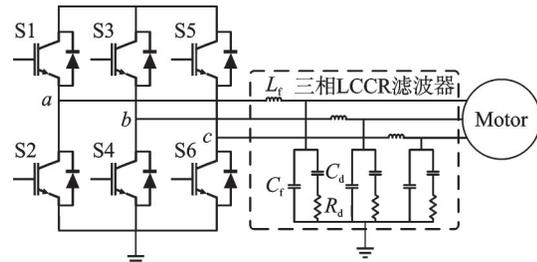


图5 引入LCCR后的电机控制框图

Fig.5 Schematic diagram of motor control system with LCCR

关谐波呈现高阻抗;(2)滤波电容 C_f 对未被完全滤除的高频谐波提供低阻抗路径;(3)阻尼电容 C_d 控制阻尼支路的频率选择性,阻断低频基波电流流入阻尼支路,引导高频谐波电流流向阻尼电阻;(4)阻尼电阻 R_d 用于耗散能量,抑制谐振峰。电机内部每一相包括相电感 L_s 、相电阻 R_s 及相反电势(Electromotive force, EMF)。当同时考虑LCCR滤波器及电机相电感电阻时,利用阻抗分析法可推导系统传递函数为

$$G_u(s) = \frac{U_o(s)}{U_i(s)} = \frac{s^2 L_s C_d R_d + s(C_d R_d R_s + L_s) + R_s}{s^4 a_0 + s^3 b_0 + s^2 c_0 + s d_0 + e_0} \quad (9)$$

其中

$$\begin{cases} a_0 = L_f L_s C_f C_d R_d \\ b_0 = L_f C_f C_d R_d R_s + L_f L_s C_f + L_f L_s C_d \\ c_0 = L_f C_f R_s + L_f C_d R_d + L_f C_d R_s + L_s C_d R_d \\ d_0 = L_f + L_s + C_d R_d R_s \\ e_0 = R_s \end{cases} \quad (10)$$

也可得从逆变器输出电压到电机电流的传递函数为

$$G_i(s) = \frac{i_s(s)}{U_i(s)} = \frac{1}{L_s s + R_s} \cdot G_u(s) \quad (11)$$

2.2 LCCR滤波器参数设计方法

当电机电阻电感参数保持一致时,采用控制变量法,分别分析4个元器件参数对传递函数频响曲线的影响。并提出如下滤波器参数设计流程。

(1)确定滤波器转折频率

首先确定转折频率

$$10\omega_0 < \omega_n < \omega_s/2 \quad (12)$$

式中: ω_0 为电机工作频率, ω_n 为滤波器转折频率, ω_s 为逆变器开关频率。

根据文献[16]分析,带感性负载的四阶LCCR滤波器的传递函数可以简化为典型二阶低通滤波器的传递函数结构,并且可以得出滤波器的截止频率即谐振角频率 $\omega_n = 1/\sqrt{L_1 C_1}$,结合式(12)可以确定滤波电感和滤波电容的乘积。

(2)确定滤波电感参数

当 C_f 、 C_d 、 R_d 参数一定,改变滤波电感 L_f 时:随

滤波电感越增大,则滤波器截止频率降低,对高频谐波的抑制效果越好,谐振峰值也会略微增大。但基波电流在电感上的压降越大,从而增加逆变器负担,如图 6 所示。滤波电感上下限可由以下两条原则确定。

(1)要求电感上的基波压降不得超过 5%

$$j\omega_0 L_f \leq 5\% \left[j\omega_0 L_f + \frac{1}{j\omega_0 C_f} \parallel (j\omega_0 L_s + R_s) \right] \quad (13)$$

(2)要求总谐波电流的有效值小于逆变器电流容量的 20%

$$\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{|H_n|^2}{\sqrt{2} Z_n} \right)} < 20\% \frac{mU_d}{\sqrt{2} Z} \quad (14)$$

式中: Z_n 代表滤波器对 n 次谐波所表现的阻抗, $|H_n|$ 为 n 次谐波幅值, Z 代表滤波器对基波电压产生的阻抗。

当以上两条设计准则产生冲突时优先满足基波压降的要求以保证电机的正常运行。

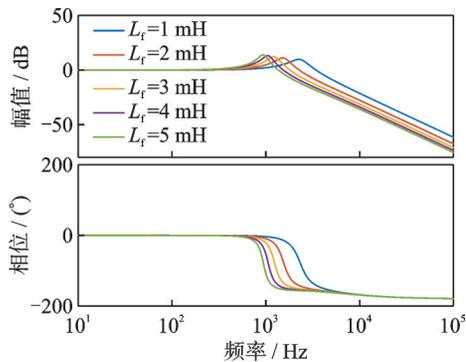


图 6 改变滤波电感参数对滤波器频响曲线的影响
Fig.6 Impact of changing filter inductor parameters on filter's frequency response curves

(3)确定滤波电容参数

如图 7 所示,当 L_f 、 C_d 、 R_d 参数一定,改变滤波电容 C_f 时:随滤波电容越大,滤波器截止频率降低,谐振峰值略微增大。滤波电容主要用于产生高频谐波通路。高容值可使高频谐波从电容支路通过,但同时电容支路会产生较大基波损耗。一般要求流经电容支路的基波损耗不得大于系统额定功率的 15%。

$$j\omega_0 C_f \leq \frac{15\%}{j\omega_0 L_s + R_s} \quad (15)$$

(3)确定阻尼电容参数

如图 8 所示,当 L_f 、 C_f 、 R_d 参数一定,改变阻尼电容 C_d 时:随阻尼电容增大,截止频率变化不明显,谐振峰值减小。阻尼电容应取较小值,以保证阻尼支路损耗尽量小,可以选取阻尼电容值与滤波电容值相同或更小。

(4)确定滤波电阻参数

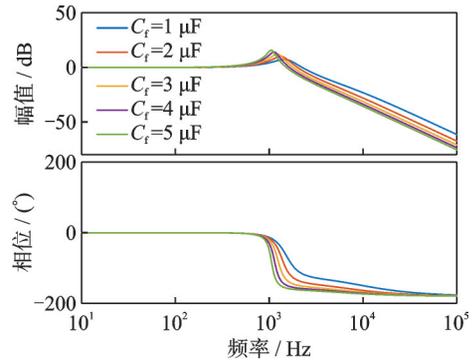


图 7 改变滤波电容参数对滤波器频响曲线的影响
Fig.7 Impact of changing filter capacitor parameters on filter's frequency response curves

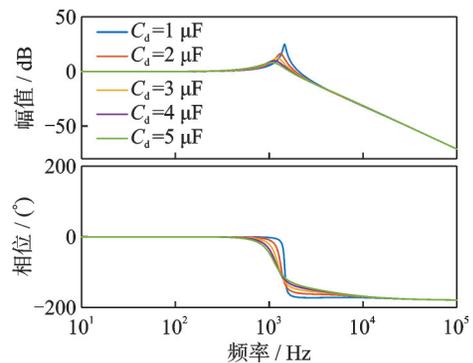


图 8 改变阻尼电容参数对滤波器频响曲线的影响
Fig.8 Impact of changing damping capacitor parameters on filter's frequency response curves

如图 9 所示,当 L_f 、 C_f 、 C_d 参数一定,改变阻尼电阻 R_d 时:主要影响曲线的谐振情况,取值逐渐增大时谐振值先变小后变大,故 R_d 取值应适中,过大过小都会引起谐振。为保证谐波电流应尽量多地从滤波电容支路流走,阻尼支路的阻抗应大于滤波电容的阻抗,当选择阻尼电容值与滤波电容值相同时,式(16)成立。

$$\frac{1}{j\omega_c C_d} + R_d > \frac{1}{j\omega_c C_f} \quad (16)$$

另外阻尼电阻上的损耗可以通过式(17)计算,

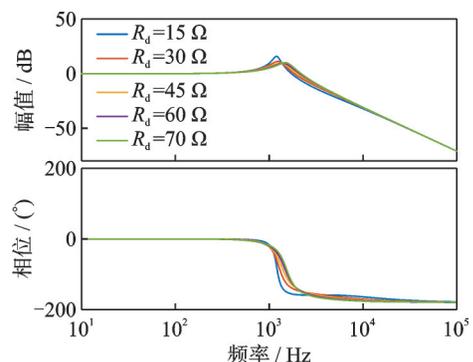


图 9 改变阻尼电阻参数对滤波器频响曲线的影响
Fig.9 Impact of changing damping resistor parameters on filter's frequency response curves

可据此选择电阻功率

$$P_R = \frac{U_o^2}{R_d^2 + \frac{1}{\omega^2 C_d^2}} \quad (17)$$

2.3 电流环稳定性分析

根据上述参数设计流程,结合永磁同步电机、逆变电路参数,设计LCCR滤波器,参数如表1所示。

表 1 电机及 LCCR 滤波器相关参数
Table 1 Parameters of motor and LCCR filter

参数	数值	参数	数值
额定转速/Hz	350	dq轴电感/mH	1.25
母线电压/V	300	滤波电感/mH	1.5
电流环P	1.92	滤波电容/ μ F	1.5
电流环I	450	阻尼电容/ μ F	1.5
载波频率/kHz	10	阻尼电阻/ Ω	22

为分析引入LCCR滤波器后电机电流环的稳定性,将式(11)扩展至三相,写成向量形式并做Clarke、Park变换,得到同步坐标系下的传递函数

$$\begin{bmatrix} i_{sa}(s) \\ i_{sb}(s) \\ i_{sc}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{ia}(s) & & \\ & G_{ib}(s) & \\ & & G_{ic}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{ia}(s) \\ U_{ib}(s) \\ U_{ic}(s) \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$T \begin{bmatrix} i_{sa}(s) \\ i_{sb}(s) \\ i_{sc}(s) \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} G_{ia}(s) & & \\ & G_{ib}(s) & \\ & & G_{ic}(s) \end{bmatrix} T^{-1} \begin{bmatrix} U_{id} \\ U_{iq} \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$\begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_i(s) & \\ & G_i(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{id} \\ U_{iq} \end{bmatrix} \quad (20)$$

式中: $G_{ia}(s) = G_{ib}(s) = G_{ic}(s) = G_i(s)$, T 、 T^{-1} 为Park矩阵与Clarke矩阵的积及对应的逆变换矩阵,最终得到dq坐标系下的传递函数与 $G_i(s)$ 完全一致。以d轴为例进行分析,将表1中数据代入式(21),绘制引入LCCR滤波器前后开环传递函数伯德图如图10所示,可以看出幅值裕度约为20.7 dB,相位裕度约为81.1°,引入LCCR后电流环控制稳定性得以证明。

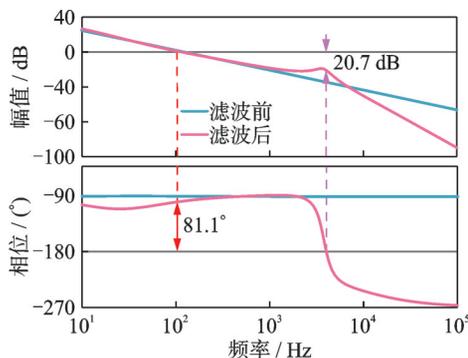


图 10 引入LCCR滤波器后电流环伯德图

Fig.10 Bode plot of the current loop with LCCR filter

$$G_{open}(s) = G_{PI}(s)G_i(s) \quad (21)$$

$$G_{PI}(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (22)$$

3 仿真及试验验证

3.1 仿真验证

通过Matlab/Simulink搭建电机控制框图,验证LCCR滤波器对电机相电流中高频开关电流谐波的抑制效果,从仿真结果图11,12中可以看出,增加LCCR滤波器后电流波形得到明显改善,电流总谐波失真量THD从21.17%降至3.19%。

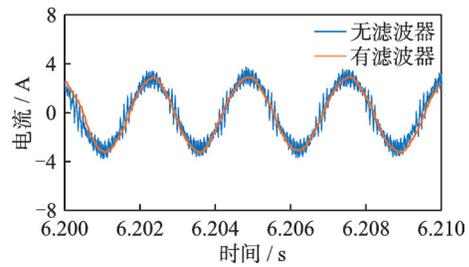


图 11 加装滤波器前后仿真电机相电流波形对比

Fig.11 Comparison of motor phase current waveform in simulations with and without LCCR filter

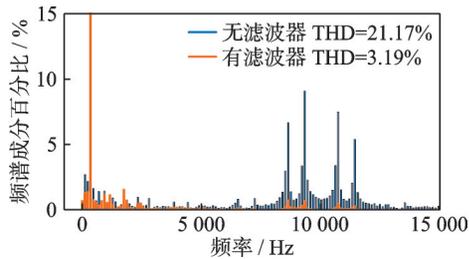


图 12 加装滤波器前后仿真电机相电流频谱分析结果

Fig.12 Spectrum analysis results of motor phase current in simulations with and without LCCR filter

3.2 试验验证

对图13滤波器实物进行扫频,所得滤波器实物的频响函数如图14所示,频响曲线与设计相一致。为实际验证LCCR滤波器对高频开关电流谐波和电机定子发热的抑制效果,本文以一台分子泵电机样机为实验对象,在逆变器与电机之间加装LCCR滤波器。实验过程中使用dSPACE仿真控制器执行FOC程序与SVPWM运算,并将6路开

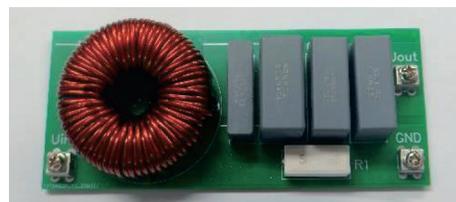


图 13 单相LCCR滤波器样机实物图

Fig.13 Photo of the single-phase LCCR filter

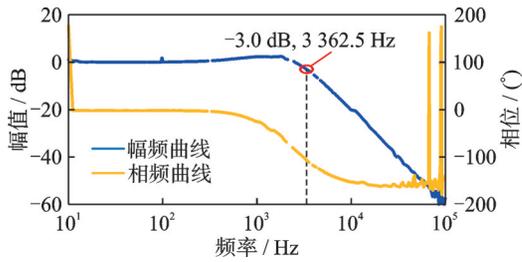


图 14 LCCR 滤波器实物频响特性曲线
Fig.14 Frequency response curves of LCCR filter

关信号传输至三电平逆变器进行电机供电,电机转速及转子位置信息通过全阶滑模观测器无感控制策略获取,三相电流信号通过电流传感器进行反馈信号采集,并通过仿真控制器将反馈信号传输至 PC 上位机进行数据分析。另外通过定子线圈内预埋的 PT100 温度传感器及 ANTHONELU-920 温控表做温度检测。所搭建实验平台如图 15 所示。

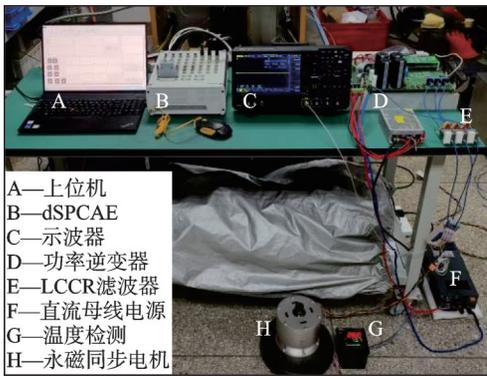


图 15 实验设备示意图
Fig.15 Schematic diagram of the experimental equipment

实验中所用电机参数与仿真参数一致,设定电机转速为 15 000 r/min,用示波器分别记录加装 LCCR 滤波器前后两组试验的相电流波形;在初始室温均为 26 °C 的前提下,当电机转速到达 15 000 r/min 之后开始记录温度数据,每隔两分钟记录一次,直至温度在 10 min 内无明显变化,试验数据如图 16~18 所示。

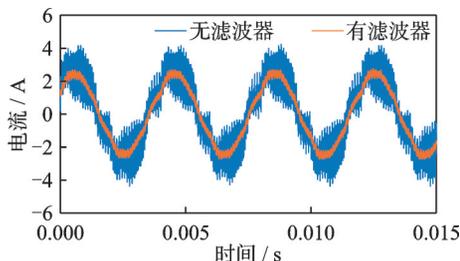


图 16 加装滤波器前后试验电机相电流波形对比
Fig.16 Comparison of motor phase current waveform in experiments with and without LCCR filter

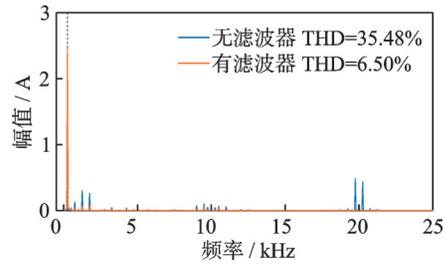


图 17 加装滤波器前后试验电机相电流频谱分析结果
Fig.17 Spectrum analysis results of motor phase current in experiments with and without LCCR filter

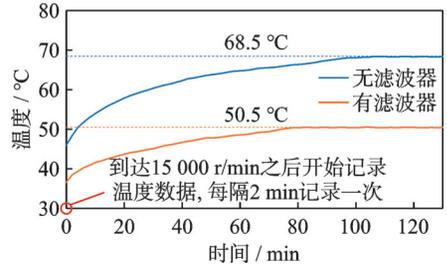


图 18 加装滤波器前后电机定子温度变化情况
Fig.18 Motor stator temperature with and without LCCR filter

图 16 中蓝色和橙色波形为加装滤波器前后的相电流波形对比,可以看出加装 LCCR 滤波器后电流波形得到改善,电流纹波明显减小。对电流波形进行频谱分析,计算时取前 100 次谐波,从图 17 中可以看出有 PWM 调制引起的高频开关电流谐波得到明显衰减,加装滤波器前后电流谐波总失真量 THD 由 35.48% 降低到 6.50%。根据图 18 所记录的温度变化情况,加装滤波器前,电机定子处温度最终稳定在 68.5 °C,加装滤波器后电机定子处温度最终稳定在 50.5 °C 左右,且在加装滤波器的情况下,到达 15 000 r/min 后,电机定子温度达到稳定所需要的时间比未加装滤波器时明显缩短。综上实验结果可知,通过 LCCR 滤波器抑制高频谐波可有效降低电机温升,为真空环境下电机热管理提供了一种可行路径。

4 结 论

本文针对分子泵用高速永磁同步电机在高频 PWM 调制下产生的开关电流谐波问题,提出采用 LCCR 滤波器进行谐波抑制,并通过理论分析、仿真与实验验证了其有效性。主要结论如下:

- (1) 谐波特性分析表明,高频开关电流谐波主要集中在载波倍数频率及其边带附近,且高频电流谐波幅值随调制比升高而增强,这一特性使得针对高速电机的高频谐波抑制更具必要性。
- (2) LCCR 滤波器具有良好的高频衰减特性,并能够有效抑制传统 LC 滤波器中的谐振峰。通

过本文所提参数设计方法,能够条理清晰地对LCCR滤波器元器件参数按流程进行设计,所得滤波器可在不影响基波传输的前提下有效滤除高频谐波。另外引入LCCR滤波器后电流环仍具有良好的幅值与相位裕度,系统能够运行稳定。

(3) 通过仿真与实验说明LCCR滤波器可显著降低电流总谐波失真量,能够有效抑制电机定子温升,提升分子泵系统的热稳定性和运行可靠性。

本研究为高速电机驱动系统中的谐波抑制与温升抑制提供了一种可行解决方案,并给出了适用于电机系统的滤波器参数设计流程,具有一定的工程应用价值。未来可进一步研究滤波器与电机参数的协同优化,以及在不同工况下的适应性控制策略。

参考文献:

- [1] 姚润晖,周瑾,丁嵩,等.磁悬浮分子泵转子振动抑制研究[J].振动与冲击,2024,43(1):117-122.
YAO Runhui, ZHOU Jin, DING Song, et al. Vibration suppression of magnetic levitation molecular pump rotor[J]. Journal of Vibration and Shock, 2024, 43(1): 117-122.
- [2] LIU G, CHEN B D, WANG K, et al. Selective current harmonic suppression for high-speed PMSM based on high-precision harmonic detection method [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(6): 3457-3468.
- [3] 玉佰强.永磁同步电机低开关频率无位置传感器控制技术[D].武汉:华中科技大学,2024.
YU Baiqiang. Research on the position sensorless control of permanent magnet synchronous motor at low switching frequency[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2024.
- [4] 裴乐.高速永磁同步电机电流谐波抑制技术的研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2024.
PEI Le. Research on current harmonics suppression technology of high-speed permanent magnet synchronous machine[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2022.
- [5] 杜鹏程.高速永磁同步电机电流谐波抑制研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2020.
DU Pengcheng. Current harmonic suppression technology of high speed permanent magnet synchronous motor[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.
- [6] 王晓琳,鲍旭聪,石滕瑞.一种可抑制三次谐波的五相混合式步进电机空间矢量脉宽调制优化控制策略[J].南京航空航天大学学报,2020,52(2):181-190.
WANG Xiaolin, BAO Xucong, SHI Tengrui. Optimal control strategy of SVPWM for five-phase hybrid stepping motor suppressing third harmonic wave[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2020, 52(2): 181-190.
- [7] 要焰梅.基于扩频原理的永磁同步电机系统开关噪声抑制策略[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2012.
YAO Yanmei. Noise reduction strategies of PMSM system based on the spread spectrum principle[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.
- [8] 王智杰.基于SiC逆变器的永磁同步电机电流谐波抑制研究[D].石家庄:河北科技大学,2024.
WANG Zhijie. Research on current harmonic suppression of PMSM based on SiC inverter[D]. Shijiazhuang: Hebei University of Science and Technology, 2024.
- [9] BAHRAMI A, NARIMANI M, NORAMBUENA M, et al. Current control of a seven-level voltage source inverter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(3): 2308-2316.
- [10] WU W, HE Y, TANG T, et al. A new design method for the passive damped LCL and LLCL filter-based single-phase grid-tied inverter[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(10): 4339-4350.
- [11] 谭广军.高速永磁同步电机驱动控制关键技术研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2016.
TAN Guangjun. Research on key technologies of drive and control for high-speed permanent magnet synchronous motors[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
- [12] GOMES C C. Damping techniques for grid-connected voltage source converters based on LCL filter—An overview[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 81(1): 116-135.
- [13] 李超.带有LC正弦波滤波器的永磁同步电机无位置传感器控制研究[D].徐州:中国矿业大学,2023.
LI Chao. Research on position sensorless control of interior permanent magnet synchronous motor equipped with LC sinusoidal filter[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2023.
- [14] WU W M, HE Y B, et al. A new design method for the passive damped LCL and LLCL filter-based single-phase grid-tied inverter[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(10): 4339-4350.
- [15] 刘珺,邵亮.无源阻尼滤波器分析[J].电气应用,2007,24(4):67-71.
LIU Jun, SHAO Liang. Analysis of passive damping filters[J]. Electrotechnical Application, 2007, 24(4): 67-71.
- [16] 李永,张承瑞,翟鹏,等.半桥斩波逆变器输出滤波器设计[J].电机与控制学报,2012,16(10):13-20.
LI Yong, ZHANG Chengrui, ZHAI Peng, et al. Output filter design of half bridge chopping inverter[J]. Journal of Electric Machines and Control, 2012, 16(10): 13-20.