

应用混合逻辑动态模型预测控制器的 磁轴承三电平调制策略

袁野¹, 朱俊俊¹, 杨帆¹, 南钰²

(1. 江苏大学电气信息工程学院, 212013, 江苏镇江;

2. 国网河南省电力公司开封供电公司, 475000, 河南开封)

摘要: 传统磁轴承三电平调制策略在数字控制系统中存在控制延迟问题, 影响电流纹波抑制效果。针对上述问题, 提出一种基于混合逻辑动态模型预测控制器的磁轴承三电平调制策略。基于混杂系统理论, 建立混合逻辑动态模型, 统一表征出驱动电路充电、放电和续流工作模态, 实现三电平调制; 结合模型预测控制理论, 将所建立的混合逻辑动态模型作为预测模型, 预测磁轴承的控制电流, 实现对控制延迟的补偿, 并将预测控制电流送入到代价函数中, 得出驱动电路的最优控制信号; 基于所提调制策略构建了磁轴承控制系统, 并与传统调制策略进行对比。仿真结果表明: 在轻载扰动工况下, 所提调制策略相比于传统三电平滞环调制策略与传统三电平脉冲宽度调制(pulse width modulation, PWM)策略, 电流纹波分别降低了 49.90% 和 49.87%; 在中载扰动工况下, 所提调制策略相比于传统三电平滞环调制策略与传统三电平 PWM 策略, 电流纹波分别降低了 49.99% 和 49.84%; 在重载扰动工况下, 所提调制策略相比于传统三电平滞环调制策略与传统三电平 PWM 策略, 电流纹波分别降低了 50.08% 和 49.77%。在三电平调制机制的基础上, 所提调制策略能够有效补偿一个采样周期的控制延迟, 达到降低电流纹波的效果。

关键词: 磁轴承; 三电平调制; 混合逻辑动态模型; 模型预测控制

中图分类号: TH133.3 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202408003 **文章编号:** 0253-987X(2024)08-0019-09

Magnetic Bearing Three-Level Modulation Strategy Based on Mixed Logical Dynamical Model Prediction Controller

YUAN Ye¹, ZHU Junjun¹, YANG Fan¹, NAN Yu²

(1. School of Electrical and Information Engineering, Jiangsu University, Jiangsu, Zhenjiang 212013, China;

2. Kaifeng Power Supply Company State Grid Henan Electric Power Company, Kaifeng, Henan 475000, China)

Abstract: The traditional magnetic bearing three-level modulation strategy has the problem of control delay in the digital control system, which affects the current ripple suppression effect. Aiming at the above problem, this paper proposes magnetic bearing three-level modulation strategy based on mixed logical dynamical model prediction controller. Firstly, based on hybrid systems theory, a mixed logical dynamical model is constructed to comprehensively characterize the charging, discharging, and current continuation modes within the driving circuit, enabling

收稿日期: 2023-12-16。 作者简介: 袁野(1991—), 男, 副教授, 硕士生导师; 杨帆(通信作者), 男, 讲师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52377053); 江苏省重点研发计划资助项目(BE2021094); 江苏省优势学科建设工程资助项目(PAPD-2018-87)。

网络出版时间: 2024-03-12

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.T.20240311.1822.004>

the implementation of three-level modulation. Next, along with the theory of model predictive control, the established hybrid logic dynamical model serves as a predictive model to anticipate the control current of the magnetic bearing, compensating for control latency. Subsequently, the predicted control current is fed into the cost function to derive the optimal control signal for the driving circuit. Finally, based on the proposed modulation strategy, a magnetic bearing control system is constructed, and compared with the traditional three-level modulation strategy. The simulation results show that under light-load disturbance conditions, the current ripple of the proposed modulation strategy is reduced by 49.90% and 49.87%, respectively, compared with the traditional three-level hysteresis modulation strategy and the traditional three-level pulse width modulation (PWM) strategy. Under medium-load disturbance conditions, the current ripple of the proposed modulation strategy is reduced by 49.99% and 49.84%, respectively, compared with the traditional three-level hysteresis modulation strategy and the traditional three-level PWM strategy. Under heavy-load disturbance conditions, the current ripple of the proposed modulation strategy is reduced by 50.08% and 49.77% respectively, compared with the traditional three-level hysteresis modulation strategy and the traditional three-level PWM strategy. It is proved that the control delay of one sampling period can be compensated effectively through the proposed modulation strategy on the basis of three-level modulation, and the effect of current ripple reduction can be achieved.

Keywords: magnetic bearing; three-level modulation; mixed logical dynamical; model predictive control

磁轴承是一种利用电磁力将转轴悬浮于空间的高性能轴承,与传统轴承相比,具有无摩擦、无需润滑、损耗小、转速高、主动可控等诸多优点,因此被广泛用于各工业领域,如飞轮储能、航空航天等^[1-6]。

磁轴承驱动电路可以采用两电平调制策略或三电平调制策略。二电平调制策略主要包括电流滞环控制^[7]、脉宽调制控制^[8]、采样-保持控制^[9]等。电流滞环控制通过反馈电流与参考电流的误差值输入到滞环比较器中生成脉冲宽度调制(pulse width modulation, PWM)信号,控制开关管导通或者关断;脉宽调制控制将反馈电流与参考电流的误差通过PI控制器输出误差信号,与PWM发生器模块产生的三角波相截产生开关管的控制信号;采样-保持控制以固定的采样周期对参考电流和反馈电流进行误差比较,根据二者差值的正负性控制开关管导通或关断。但是,磁轴承驱动电路用二电平调制策略,存在电流纹波难以降低的弊端^[10]。

相较于二电平调制,三电平调制下的磁轴承驱动电路具有充电、放电和续流共3种状态,其控制电流纹波与母线电压解耦,仅与开关管导通压降、绕组压降等成正比^[11]。清华大学徐旻团队提出一种基于三电平调制的空间矢量控制技术,减小电流纹波的同时也降低了桥臂数^[12]。南京工业大学张广明团队提出

了三电平采样/保持调制技术,该技术是在两电平采样/保持调制技术的基础上,在一个周期内引入一个新的可控点,实现驱动电路三电平调制,对电流纹波降低有显著作用^[13]。北京航空航天大学房建成团队分析了电流纹波产生的机理问题,提出一种磁轴承三电平PWM调制方式,该调制方式基于PI控制器和PWM发生器生成占空比,分别控制对角线上功率开关管,可以大幅度降低电流纹波^[14]。然而,传统磁轴承三电平调制策略在数字控制系统中会存在控制延迟,对电流纹波抑制效果产生影响^[15-16]。

针对上述问题,本文提出了应用混合逻辑动态模型预测控制器(mixed logical dynamical model prediction controller, MLD-MPC)^[17-19]的磁轴承三电平调制策略。首先,基于混杂系统理论^[20-22]建立了驱动系统混合逻辑动态模型,通过引入辅助逻辑变量与辅助连续变量,统一表征出驱动电路充电、放电、续流工作模式下开关状态与控制电流之间的数学关系;其次,基于磁轴承双闭环控制框架,设计了针对电流内环的混合逻辑动态预测控制器,通过计算预测控制电流,对控制延迟进行补偿,输入到代价函数中,得出最优的控制信号;最后,构建了磁轴承控制系统,验证了所提策略能够在保留三电平调制机制的基础上,有效补偿一个采样周期的控制延迟,

达到降低电流纹波的效果。

1 磁轴承驱动电路三电平调制原理

磁轴承驱动电路可以采用半桥式和 H 桥式。本文以两自由度径向永磁偏置磁轴承为研究对象,需要绕组电流能够提供双向电流,因此选用 H 桥式。三电平调制策略下,H 桥式驱动电路具有 4 种不同的工作模式,分别如图 1 所示。

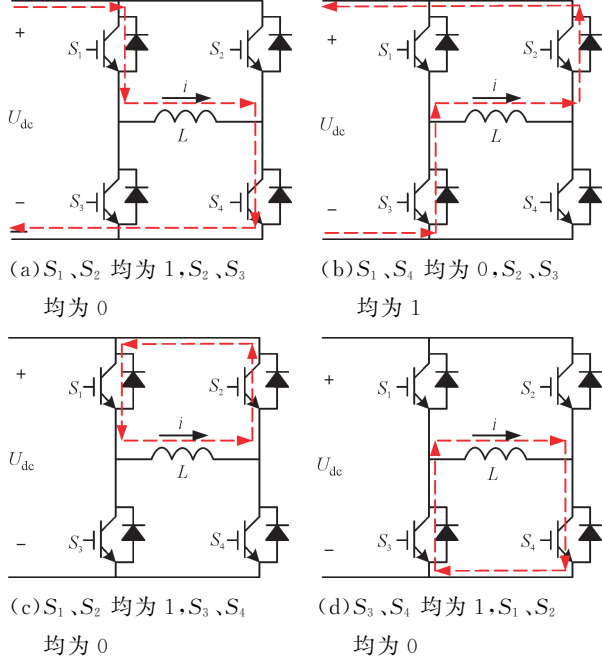


图 1 H 桥式驱动电路 4 种工作模式

Fig. 1 Four modes of operation of H-bridge drive circuit

图 1(a)为驱动电路充电状态(模式 a),绕组两端施加 U_{dc} ,绕组电流 i 线性上升,电路方程为

$$L \frac{di(t)}{dt} + ri(t) + 2U_{on} = U_{dc} \quad (1)$$

式中: U_{dc} 为直流母线电压; U_{on} 为开关管导通压降; L 为绕组电感; r 是绕组电阻。该充电状态下的绕组电流为

$$i(t) = \frac{U_{dc} - 2U_{on}}{r} (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) + i_{a0} e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (2)$$

式中:时间常数 $\tau = L/r$; i_{a0} 为模式 a 开始时绕组初始电流。

图 1(b)为驱动电路放电状态(模式 b),绕组两端施加 $-U_{dc}$,绕组电流 i 线性下降,电路方程为

$$L \frac{di(t)}{dt} + ri(t) + 2U_{on} = -U_{dc} \quad (3)$$

可以得到放电状态下的绕组电流表达式

$$i(t) = -\frac{U_{dc} + 2U_{on}}{r} (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) + i_{b0} e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (4)$$

式中: i_{b0} 为模式 b 开始时绕组初始电流。

图 1(c)、(d)为驱动电路自然续流不同状态(模式 c、d),绕组两端电压为 0,由于绕组电阻的存在,绕组电流缓慢减小,电流方程为

$$L \frac{di(t)}{dt} + ri(t) + 2U_{on} = 0 \quad (5)$$

可以得到该续流状态下的电流表达式

$$\begin{cases} i(t) = -\frac{2U_{on}}{r} (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) + i_{c0} e^{-\frac{t}{\tau}} \\ i(t) = -\frac{2U_{on}}{r} (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) + i_{d0} e^{-\frac{t}{\tau}} \end{cases} \quad (6)$$

式中: i_{c0} 、 i_{d0} 分别为模式 c、模式 d 开始时绕组初始电流。

稳定运行时,三电平调制下磁轴承驱动电路经历导通状态和续流状态,电流变化趋势如图 2 所示。以导通状态和续流状态为一个研究周期,其中导通状态持续时间为 $[0, t_1]$,续流状态持续时间为 $[t_1, T]$ 。

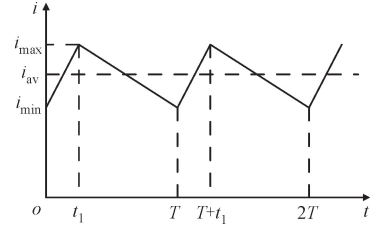


图 2 三电平调制驱动电路输出电流变化趋势

Fig. 2 Trend of output current of three-level modulation drive circuit

当驱动电路处于导通状态时,电流在 t_1 时刻达到最大值 i_{max} ,计算式如下

$$i_{max} = \frac{U_{dc} - 2U_{on}}{r} + \left(i_{min} - \frac{U_{dc} - 2U_{on}}{r} \right) e^{-\frac{t_1}{\tau}} \quad (7)$$

当驱动电路处于续流状态时,绕组电流在 T 时刻到达最小值 i_{min} ,计算式如下

$$i_{min} = -\frac{2U_{on}}{r} + \left(i_{max} + \frac{2U_{on}}{r} \right) e^{-\frac{T-t_1}{\tau}} \quad (8)$$

联合式(7)、(8)可得三电平调制策略下磁轴承控制电流纹波 Δi 表达式

$$\Delta i = i_{max} - i_{min} = \frac{(2U_{on} + ri)(U - 2U_{on} - ri)}{LU} T \quad (9)$$

开关管的导通压降和绕组压降相对于直流母线电压可以近似忽略,三电平调制策略下磁轴承控制电流纹波 Δi 可以近似表示为

$$\Delta i = i_{max} - i_{min} = \frac{2U_{on} + ri}{L} T \quad (10)$$

二电平调制策略下,磁轴承控制电流纹波 Δi 表达式^[9]为

$$\Delta i = i_{\max} - i_{\min} = \frac{U_{dc} T}{2L} \quad (11)$$

通过对比式(10)、(11)可得:三电平调制下的电流纹波与直流母线电压无关,其数值远小于两电平调制策略下的电流纹波。

但是,以上分析是基于理想情况下,实际数字控制系统中始终存在控制延迟时间(Δt ,包括采样延迟、计算延迟以及输出信号延迟等),这导致三电平调制策略下控制电流纹波 Δi 变为

$$\Delta i = i_{\max} - i_{\min} = \frac{2U_{on} + ri}{L}(T + \Delta t) \quad (12)$$

由式(12)可以看出,控制延迟将导致控制电流纹波增大。

2 应用 MLD-MPC 的磁轴承三电平调制策略

2.1 所提调制策略的基本原理

为了削弱控制延迟 Δt 对控制电流纹波抑制效果产生的影响,本文提出了应用 MLD-MPC 的磁轴承三电平调制策略,如图 3 所示。

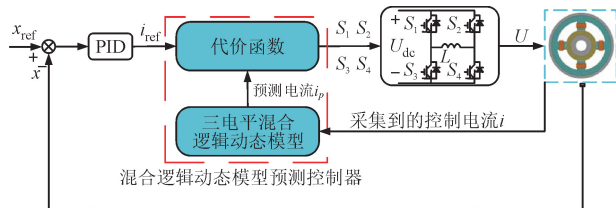


图 3 应用 MLD-MPC 的磁轴承三电平调制策略

Fig. 3 Magnetic bearing three-level modulation strategy based on MLD-MPC

该调制策略为双闭环控制,分为位移外环和电流内环。位移外环将参考位移与反馈位移的误差信号通过 PID 调节器后输出电流内环给定值。针对电流内环设计了 MLD-MPC。该控制器将采集到的控制电流输入到预测模型中,计算得到预测电流,抑制控制延迟的影响,并以参考电流和预测电流误差最小为目标,得到驱动电路以最优控制信号。预测模型采用了驱动电路的混合逻辑动态模型,该模型通过引入辅助逻辑变量与辅助连续变量,可以统一表征驱动电路充电、放电、续流工作模式下开关状态与控制电流之间的数学关系,可以实现三电平调制。

2.2 调制策略具体实现

2.2.1 MLD 模型构建

引入逻辑运算符号,“v”表示析取、上标“-”表示取非、“ $\leftrightarrow$ ”表示等价。定义电流从左向右的方向为正。引入辅助逻辑变量 δ_1 , $\delta_1 = 1$ 表示控制电流 i

> 0 , $\delta_1 = 0$ 表示控制电流 $i < 0$, 即

$$\begin{cases} [\delta_1 = 1] \leftrightarrow [i > 0] \\ [\delta_1 = 0] \leftrightarrow [i < 0] \end{cases} \quad (13)$$

当控制电流 $i > 0$ 时,磁轴承绕组两端的电压 U 与开关状态 S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_4 之间的逻辑关系为

$$\begin{cases} [\delta_1 = 1] \vee [S_1 = 1] \vee [S_2 = 0] \vee [S_3 = 0] \vee [S_4 = 1] \leftrightarrow [U = U_{dc}] \\ [\delta_1 = 1] \vee [S_1 = 1] \vee [S_2 = 1] \vee [S_3 = 0] \vee [S_4 = 0] \leftrightarrow [U = 0] \\ [\delta_1 = 1] \vee [S_1 = 0] \vee [S_2 = 0] \vee [S_3 = 1] \vee [S_4 = 1] \leftrightarrow [U = 0] \\ [\delta_1 = 1] \vee [S_1 = 0] \vee [S_2 = 1] \vee [S_3 = 1] \vee [S_4 = 0] \leftrightarrow [U = -U_{dc}] \end{cases} \quad (14)$$

由式(14)可得,控制电流 $i > 0$ 时磁轴承绕组两端电压 U 为

$$U = \delta_1 (S_1 \bar{S}_3 - S_2 \bar{S}_4) U_{dc} \quad (15)$$

同样地,可得控制电流 $i < 0$ 时磁轴承绕组两端电压

$$U = \bar{\delta}_1 (S_1 \bar{S}_3 - S_2 \bar{S}_4) U_{dc} \quad (16)$$

综合可得,绕组两端电压 U 的数学描述为

$$U = \delta_1 (S_1 \bar{S}_3 - S_2 \bar{S}_4) U_{dc} + \bar{\delta}_1 (S_1 \bar{S}_3 - S_2 \bar{S}_4) U_{dc} = (S_1 \bar{S}_3 - S_2 \bar{S}_4) U_{dc} \quad (17)$$

进一步地,引入辅助逻辑变量 δ_2 、 δ_3 , 并令

$$\delta_2 = S_1 \bar{S}_3; \delta_3 = S_2 \bar{S}_4 \quad (18)$$

由此得到磁轴承绕组两端电压为

$$U = (\delta_2 - \delta_3) U_{dc} \quad (19)$$

最后,引入辅助连续变量 z_1 、 z_2 , 并令

$$z_1 = \delta_2 U_{dc}; z_2 = \delta_3 U_{dc} \quad (20)$$

根据 H 桥式电路方程,建立电路连续模型,以磁轴承电流为状态变量建立状态方程

$$\dot{i} = -\frac{R}{L}i + \frac{1}{L}U \quad (21)$$

式中: $\dot{i}$ 是控制电流 i 的微分; R 为绕组电阻。结合式(19)~(21),可将原状态方程转化为

$$\dot{i} = -\frac{R}{L}i + \frac{1}{L}(z_1 - z_2) \quad (22)$$

上述状态方程既包含辅助连续变量,又包含辅助逻辑变量。将式(22)进行离散化,得到磁轴承驱动电路 MLD 模型

$$\begin{cases} i_p(k+1) = \left(1 - \frac{RT_s}{L}\right)i(k) + \frac{T_s}{L}(z_1(k) - z_2(k)) \\ y(k) = i(k) \end{cases} \quad (23)$$

式中: T_s 是采样周期。

2.2.2 代价函数选取

MLD-MPC 面临求解混合整数二次规划 (mixed integer quadratic programming, MIQP) 问题,而对于磁轴承,遇到扰动后需要快速的动态响应达到稳定状态,但极短的时间内求解 MIQP 问题具有很大困难。H 桥式电路只有 4 种不同工作模式,对应了 4 种不同开关状态组合。为了选取最优的控制信号,分别计算这 4 种不同开关状态组合,并比较代价函数值,以预测电流与参考电流误差最小为目标建立代价函数

$$J = (i_{\text{ref}}(k+1) - i_p(k+1))^2 \quad (24)$$

式中: $i_p(k+1)$ 为 $k+1$ 时刻的磁轴承绕组预测电流; $i_{\text{ref}}(k+1)$ 为 $k+1$ 时刻的磁轴承绕组的给定电流,虽然可以将 $k+1$ 时刻的参考值近似等于 k 时刻参考值,但是这一近似会使得给定信号存在一个采样周期的延迟。为了提高控制精度,可以采用二阶拉格朗日插值法来得到 $k+1$ 时刻的控制电流参考值,即

$$i_{\text{ref}}(k+1) = 3i_{\text{ref}}(k) - 3i_{\text{ref}}(k-1) + i_{\text{ref}}(k-2) \quad (25)$$

选择代价函数值最小的开关信号为磁轴承驱动电路的控制信号,即求解最优的开关控制信号。

2.2.3 控制延迟补偿

数字控制系统存在延迟^[23-25],所选择的控制信号要到下一时刻输出,但此时的控制电流已经变为 $i_p(k+1)$ 。因此,为了消除这一控制延迟的影响,需要以 $i_p(k+1)$ 为初始条件对电流再加一步预测,得到 $k+2$ 时刻的电流预测值 $i_p(k+2)$

$$i_p(k+2) =$$

$$\left(1 - \frac{RT_s}{L}\right)i_p(k+1) + \frac{T_s}{L}(z_1(k+1) - z_2(k+1)) \quad (26)$$

因此,代价函数可以重新表示为

$$J = (i_{\text{ref}}(k+2) - i_p(k+2))^2 \quad (27)$$

由式(25)向前推导一步可到

$$i_{\text{ref}}(k+2) = 3i_{\text{ref}}(k+1) - 3i_{\text{ref}}(k) + i_{\text{ref}}(k-1) \quad (28)$$

2.2.4 调制策略流程

图 4 是调制策略流程图,具体步骤如下。

(1)对当前时刻的电流 $i(k)$ 、参考电流 $i_{\text{ref}}(k)$ 进行采样。

(2)通过预测 $k+1$ 时刻的电流 $i_p(k+1)$ 和 $i_{\text{ref}}(k+1)$ 来对磁轴承控制系统进行延迟补偿。

(3)对 4 个不同的开关状态组合,通过式(26)的预测模型对控制电流进行预测,然后通过式(27)计

算代价函数值。

(4)通过比较得到最小的代价函数值。

(5)选择出最小的代价函数值所对应的开关状态组合,即是最优的驱动电路控制信号。

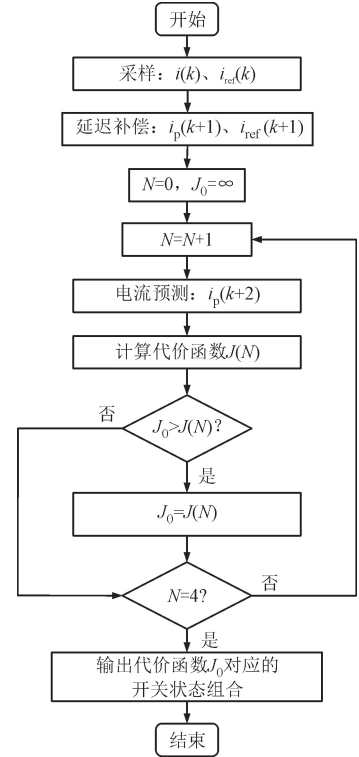


图 4 调制策略流程

Fig. 4 Flow chart of modulation strategy

3 调制策略验证

基于 Matlab/Simulink 对本文所提调制策略进行仿真验证,仿真参数如下: $U_{\text{dc}} = 15 \text{ V}$,绕组中的电感 $L = 1.8 \text{ mH}$,绕组中的电阻 $R = 0.13 \Omega$,采样周期 $T_s = 1 \mu\text{s}$,最大负载为 100 N 。

3.1 控制系统有效性验证

对控制系统进行起浮验证,图 5 为磁轴承控制系统转子起浮时的位移波形。可以看出,磁轴承开始

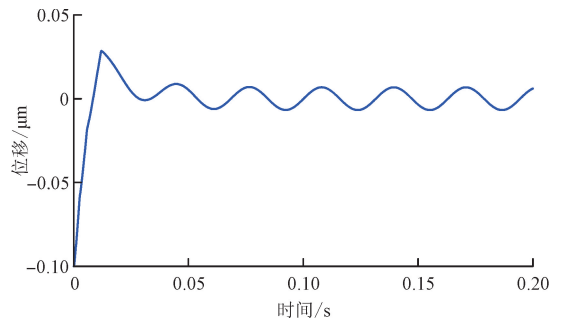


图 5 起浮时位移波形

Fig. 5 Displacement waveform during floating

悬浮到稳定运行过程中,最大位移为 $0.027\ \mu\text{m}$ 位移经过 $0.061\ \text{s}$ 后回到平衡位置,且稳定运行会有幅值为 $0.007\ \mu\text{m}$ 的波动,具有良好的悬浮精度。

不同负载扰动下的位移波形如图 6 所示。在 $0.05\ \text{s}$ 加入轻载($20\ \text{N}$)扰动时,本文所提调制策略的系统产生 $-2.25\ \mu\text{m}$ 的位移波动,经过 $0.075\ \text{s}$ 回到平衡位置;在 $0.05\ \text{s}$ 加入中载($50\ \text{N}$)扰动时,本文所提调制策略的系统产生 $-5.63\ \mu\text{m}$ 的位移波动,经过 $0.09\ \text{s}$ 回到平衡位置;在 $0.05\ \text{s}$ 加入重载($80\ \text{N}$)扰动时,本文所提调制策略的系统产生 $-9\ \mu\text{m}$ 的位移波动,经过 $0.1\ \text{s}$ 回到平衡位置。

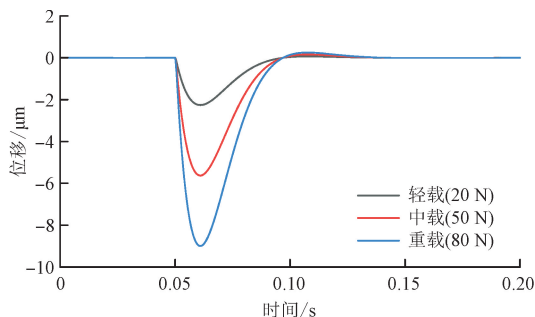


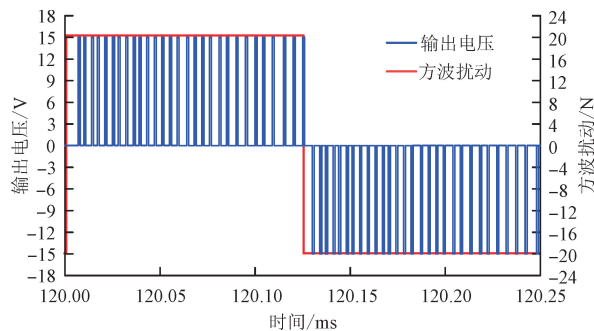
图 6 不同负载扰动下的位移波形

Fig. 6 Displacement waveforms under different loads

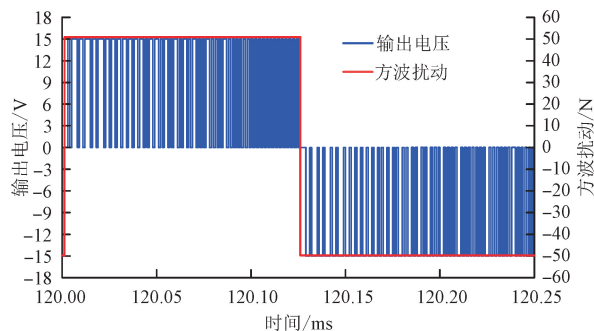
综上可知,基于所提调制策略的控制系统,在面对轻载、中载和重载的情况下均具有良好的鲁棒性。

3.2 三电平调制可行性验证

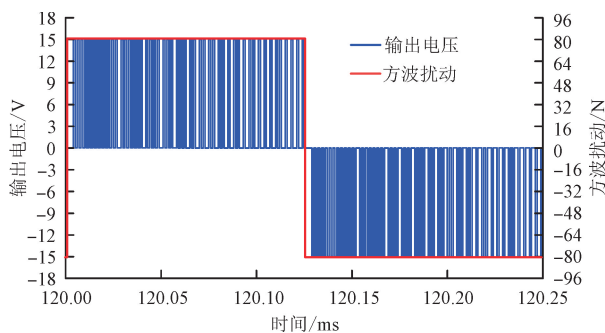
对控制系统分别施加 ± 20 、 ± 50 、 $\pm 80\ \text{N}$ 的方波扰动,驱动电路电压输出结果如图 7 所示。



(a) $\pm 20\ \text{N}$ 方波扰动



(b) $\pm 50\ \text{N}$ 方波扰动



(c) $\pm 80\ \text{N}$ 方波扰动

图 7 不同方波扰动下的电压输出波形

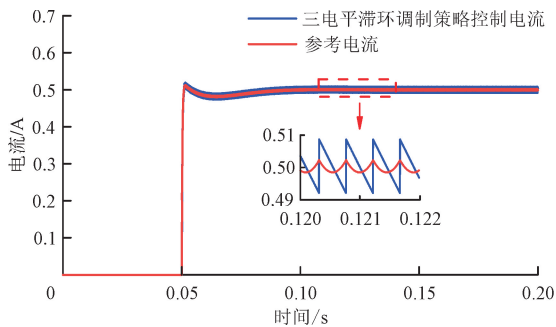
Fig. 7 Voltage output waveform under different square wave disturbances

由图 7(a)可知, $\pm 20\ \text{N}$ 方波扰动下,在正半周期时驱动电路输出电压有正和零电压输出,在负半周期时驱动电路输出电压有负和零电压输出。同样地,由图 7(b)、(c)可知, $\pm 50\ \text{N}$ 和 $\pm 80\ \text{N}$ 方波扰动下,在正半周期时驱动电路输出电压有正和零电压输出,在负半周期时驱动电路输出电压有负和零电压输出。

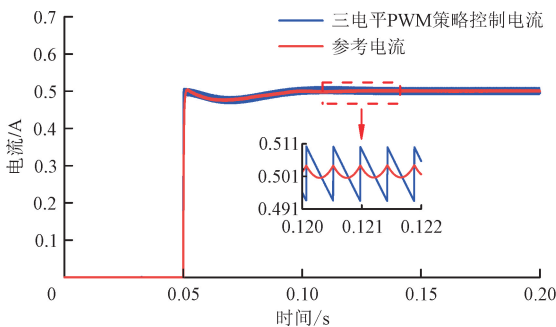
综上可知,在不同的方波扰动下,一个周期内驱动电路的电压始终输出有正、负和零电压,验证了控制系统能够实现三电平调制。

3.3 控制延迟抑制的有效性验证

面对轻载($20\ \text{N}$)、中载($50\ \text{N}$)、重载($80\ \text{N}$),分别施加一个采样周期的控制延迟,传统磁轴承三电平滞环调制策略^[26]、传统磁轴承三电平 PWM 策略^[14]、本文策略下的电流波形分别如图 8~10 所示。



(a) 三电平滞环调制策略



(b) 三电平 PWM 策略

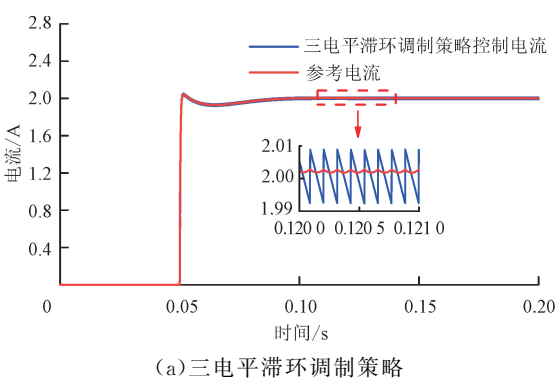
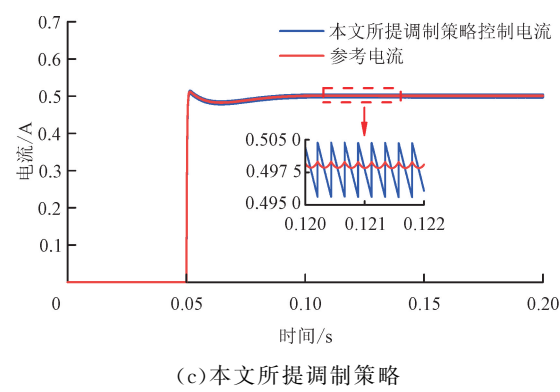


图 8 轻载(20 N)下不同调制策略的电流波形对比
Fig. 8 Comparison of current waveform of different modulation strategy at light load (20 N)

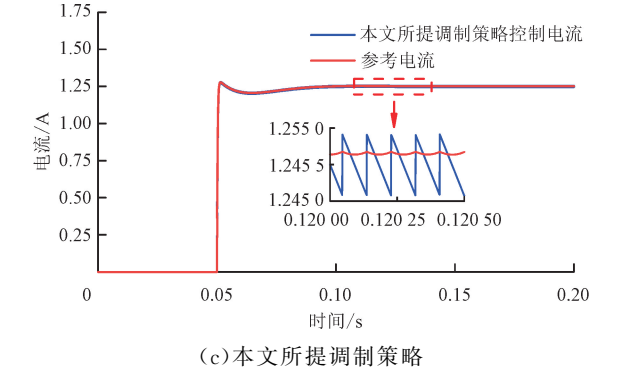
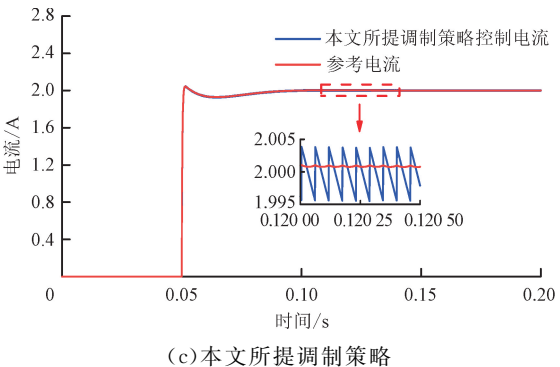
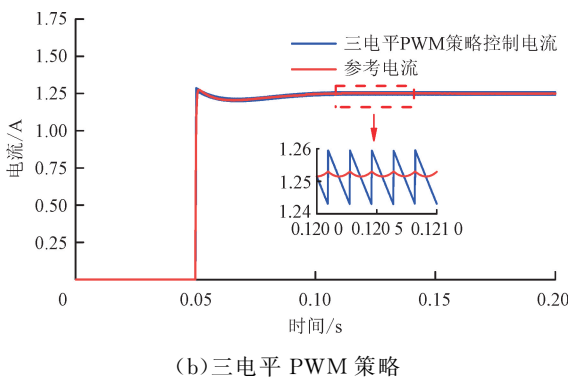
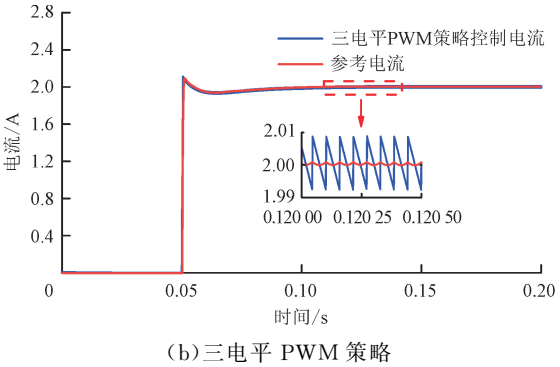
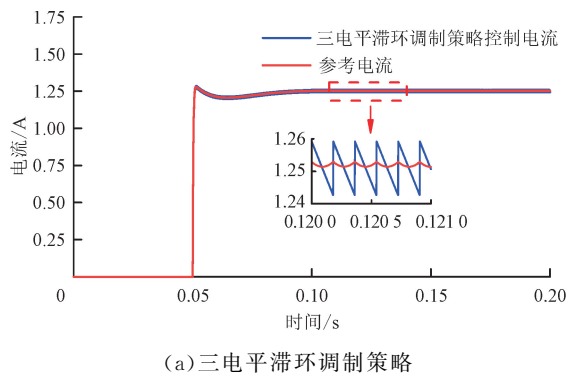


图 9 中载(50 N)下不同调制策略的电流波形对比
Fig. 9 Comparison of current waveform of different modulation strategy at medium load (50 N)

图 10 重载(80 N)下不同调制策略的电流波形对比
Fig. 10 Comparison of current waveform of different modulation strategy at heavy load (80 N)

由图 8 可知,面对轻载(20 N)扰动,三电平滞环调制策略下磁轴承的电流纹波为 1.656×10^{-2} A,三电平 PWM 策略下磁轴承的电流纹波为 1.655×10^{-2} A,而本文所提调制策略下磁轴承的电流纹波为 8.297×10^{-3} A,分别降低了 49.90%和 49.87%。

由图 9 可知,面对中载(50 N)扰动,三电平滞环调制策略下磁轴承的电流纹波为 1.648×10^{-2} A,三电平 PWM 策略下磁轴承的电流纹波为 1.643×10^{-2} A,而本文所提调制策略下磁轴承的电流纹波为 8.241×10^{-3} A,分别降低了 49.99%和 49.84%。

由图 10 可知,面对重载(80 N)扰动,三电平滞环调制策略下磁轴承的电流纹波为 1.637×10^{-2} A,三电平 PWM 策略下磁轴承的电流纹波为 $1.627 \times$

10^{-2} A,而本文所提调制策略下磁轴承的电流纹波为 8.172×10^{-3} A,分别降低了 50.08%和 49.77%。

综上可知,相对于以上两种传统三电平调制策略,无论在轻载、中载还是重载扰动情况下,应用 MLD-MPC 的三电平调制策略能够有效抑制一个采样周期控制延迟,进一步降低控制电流纹波。

4 结 论

本文提出了一种应用 MLD-MPC 的磁轴承三电平调制策略。该策略基于混杂系统理论,对磁轴承驱动电路建立混合逻辑动态模型,实现对磁轴承驱动电路充电、放电和续流共 3 种工作状态的统一表征。进一步地,结合模型预测控制策略,对磁轴承控制电流进行预测,实现延迟补偿,达到降低电流纹波这一目标。应用 MATLAB/Simulink 进行仿真验证,并与传统三电平滞环调制策略和传统三电平 PWM 策略进行对比,仿真结果表明,本文所提调制策略相比于传统三电平调制策略,在轻载、中载和重载这 3 种不同的工况下,均能有效补偿一个采样周期的控制延迟,实现降低磁轴承的控制电流纹波。

参考文献:

- [1] 马志豪,朱焜秋. 逆变器驱动式磁轴承关键技术研究发展综述 [J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(19): 7649-7659.
MA Zhihao, ZHU Huangqiu. Research and development overview of key technologies on inverter driven magnetic bearings [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(19): 7649-7659.
- [2] LIU Chengzi, ZHAN Jiang, WANG Jiawei, et al. An improved one-cycle control algorithm for a five-phase six-leg switching power amplifier in active magnetic bearings [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(12): 12564-12574.
- [3] LIU Gai, HUAN Junqi, ZHU Huangqiu, et al. Decoupling control of six-pole hybrid magnetic bearings [J]. Progress in Electromagnetics Research: M, 2022, 109: 51-61.
- [4] YANG I J, HONG M K, LEE J, et al. Design for reducing bearing force ripple and torque ripple of integrated magnetic bearing motor through Halbach array [J]. Energies, 2023, 16(3): 1249.
- [5] 张维煜,朱焜秋,袁野. 磁悬浮轴承应用发展及关键技术综述 [J]. 电工技术学报, 2015, 30(12): 12-20.
ZHANG Weiyu, ZHU Huangqiu, YUAN Ye. Study on key technologies and applications of magnetic bearings [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(12): 12-20.
- [6] 王波,耿海鹏,杜廷琛. 磁悬浮永磁同步电机转子系统的参数辨识与控制 [J]. 西安交通大学学报, 2023, 57(3): 106-116.
WANG Bo, GENG Haipeng, DU Tingchen. Parameter identification and control of rotor system of maglev permanent magnet synchronous motor [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2023, 57(3): 106-116.
- [7] YANG Fan, YUAN Ye, SUN Yukun, et al. Coupling suspension force regulator considering time-varying characteristic for a bearingless switched reluctance motor [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70(7): 6632-6641.
- [8] YANG Jichang, JIANG Dong, SUN Hongbo, et al. A series-winding topology converter with capability of fault-tolerant operation for active magnetic bearing drive [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(7): 6678-6687.
- [9] 吴华春,张选泽,杨克臻,等. 磁轴承功率放大器研究综述 [J]. 轴承, 2022(12): 8-16.
WU Huachun, ZHANG Xuanze, YANG Kezhen, et al. Research review on power amplifiers for magnetic bearings [J]. Bearing, 2022(12): 8-16.
- [10] 余忠磊,祝长生. 二电平电流型开关功率放大器稳定性分析 [J]. 电工技术学报, 2019, 34(2): 306-315.
YU Zhonglei, ZHU Changsheng. Analysis on the stability of two-level current mode switching power amplifiers [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(2): 306-315.
- [11] ZHANG Jing, SCHULZE J O, BARLETTA N. Synchronous three-level PWM power amplifier for active magnetic bearings [C]//Fifth International Symposium on Magnetic Bearings. [S.l.]: [s.n.], 1996: 277-282.
- [12] 王纯一,徐旻,张凯. 磁轴承功率放大器空间矢量脉宽调制算法的占空比限制策略 [J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(1): 248-256.
WANG Chunyi, XU Yang, ZHANG Kai. Duty cycle restriction strategies of SVPWM algorithm for magnetic bearing power amplifiers [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(1): 248-256.
- [13] 唐顺晨,张广明,梅磊,等. 磁悬浮轴承系统三电平开关功率放大器的研究 [J]. 电力电子技术, 2015, 49(1): 36-39.
TANG Shunchen, ZHANG Guangming, MEI Lei, et al. Research on magnetic bearing system of three-level switching power amplifier [J]. Power Electronics, 2015, 49(1): 36-39.

- [14] 张亮, 房建成. 电磁轴承脉宽调制型开关功放的实现及电流纹波分析 [J]. 电工技术学报, 2007, 22(3): 13-20.
- ZHANG Liang, FANG Jiancheng. Analysis of current ripple and implementation of pulse width modulation switching power amplifiers for active magnetic bearing [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(3): 13-20.
- [15] 吴晓新, 宋文祥, 乐胜康, 等. 异步电机模型预测三电平直接电流控制 [J]. 电工技术学报, 2017, 32(18): 113-123.
- WU Xiaoxin, SONG Wenxiang, YUE Shengkang, et al. Model predictive direct current control of induction machines fed by a three level inverter [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(18): 113-123.
- [16] LI Chen, VANKAYALAPATI B, AKIN B. Latency compensation of SD-ADC for high performance motor control and diagnosis [C]//2021 IEEE 13th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2021: 289-294.
- [17] 李宁, 李颖晖, 韩建定, 等. 基于混合逻辑动态模型的三相逆变电路有限控制集模型预测控制策略 [J]. 电网技术, 2014, 38(2): 375-380.
- LI Ning, LI Yinghui, HAN Jianding, et al. FCS-MPC strategy for inverters based on MLD model [J]. Power System Technology, 2014, 38(2): 375-380.
- [18] 孙毅, 石墨, 许鹏, 等. 基于混合逻辑动态模型的水热器群态势感知及调控策略 [J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(17): 5043-5051.
- SUN Yi, SHI Mo, XU Peng, et al. Situation awareness and control strategy of water heater group based on mixed logical dynamic model [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(17): 5043-5051.
- [19] HUANG Wentao, DU Jiachen, HUA Wei, et al. A hybrid model-based diagnosis approach for open-switch faults in PMSM drives [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(4): 3728-3732.
- [20] ZAMANI M R, RAHMANI Z, REZAIE B. A novel model predictive control for a piecewise affine class of hybrid system with repetitive disturbance [J]. ISA Transactions, 2021, 108: 18-34.
- [21] SUN Xiaoqiang, CAI Yingfeng, YUAN Chaochun, et al. Vehicle height and leveling control of electronically controlled air suspension using mixed logical dynamical approach [J]. Science China Technological Sciences, 2016, 59(12): 1814-1824.
- [22] 文章, 蔡华锋, 廖冬初. 基于 DFT 变换的单相 PWM 整流 IGBT 断路故障检测 [J]. 电子器件, 2018, 41(6): 1406-1410.
- WEN Zhang, CAI Huafeng, LIAO Dongchu. An open-switch fault of IGBT diagnosis method for single-phase PWM rectifier using DFT transform [J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2018, 41(6): 1406-1410.
- [23] 范佩樟, 刘凌, 靳东松, 等. 永磁同步电机的无差拍电流预测控制优化算法 [J]. 西安交通大学学报, 2023, 57(4): 29-38.
- FAN Peizhang, LIU Ling, JIN Dongsong, et al. Optimization algorithm of deadbeat current predictive control for permanent magnet synchronous motor [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2023, 57(4): 29-38.
- [24] 武志涛, 杨兆宁. 永磁直线同步电机的双闭环鲁棒补偿控制 [J]. 电机与控制学报, 2022, 26(3): 101-108.
- WU Zhitao, YANG Zhaoning. Double closed-loop robust compensation control for permanent magnet linear synchronous motors [J]. Electric Machines and Control, 2022, 26(3): 101-108.
- [25] 刘国海, 孙汶超, 周华伟, 等. 五相永磁同步电机改进型无差拍直接转矩和磁链控制 [J]. 电工技术学报, 2023, 38(24): 6658-6667.
- LIU Guohai, SUN Wenchao, ZHOU Huawei, et al. An improved deadbeat direct torque and flux control strategy of five-phase permanent magnet synchronous motor [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(24): 6658-6667.
- [26] 臧晓敏, 王晓琳, 仇志坚, 等. 磁轴承开关功放中电流三态调制技术的研究 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(9): 167-172.
- ZANG Xiaomin, WANG Xiaolin, QIU Zhijian, et al. Research on current mode tri-state modulation technology in switching power amplifier for magnetic bearings [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(9): 167-172.

(编辑 陶晴)