DOI:10.12177/emca.2026.240 文章编号:1673-6540(2026)11-1119-11 中图分类号:TM 351 文献标志码:A

电机双惯量系统扭转振动主动抑制

刘 雄, 刘玉琦, 陈楷浩, 梁振华, 邓 慧*
(暨南大学 国际能源学院,广东 珠海 519000)

Active Suppression of Torsional Vibration in Motor Dual-Inertia Systems

Liu Xiong, Liu Yuqi, Chen Kaihao, Liang Zhenhua, Deng Hui*
(International Energy College, Jinan University, Zhuhai 519000, China)

Abstract: **[Objective]** Permanent magnet synchronous motor (PMSM) exhibits high efficiency, high power density and superior dynamic performance, and is widely adopted in high-precision servo control fields. Nevertheless, servo systems are plagued by mechanical torsional vibration arising from elastic shaft coupling in practical scenarios. Traditional proportional-integral (PI) control cannot strike a favorable balance between fast dynamic response and torsional vibration suppression. **[Methods]** To address this issue, this paper introduced model predictive control (MPC) into the speed control framework of a dual-inertia elastic system of PMSM to replace traditional PI control. Firstly, a mathematical model was established for the dual-inertia elastic transmission system driven by the PMSM, and the speed response and torsional vibration characteristics of the system under PI speed control were analyzed. Then, active damping control with speed difference feedback was adopted to suppress torsional vibration by increasing system damping. However, this method sacrificed the dynamic response performance of the system. To solve this issue, this paper proposed using MPC to replace the PI control of the speed loop. MPC performed rolling optimization based on the system model and featured excellent control performance and strong robustness. Finally, the feasibility of the proposed strategy was verified by simulations and experiments. **[Results]** The results showed that PI control exhibited obvious oscillations when the system encountered torsional vibration and could hardly meet the requirements of high-precision servo control. Active damping control delivered excellent torsional vibration suppression performance, yet at the cost of partial dynamic response performance. In comparison, although MPC was slightly inferior to active damping control in suppressing torsional vibration, it could still achieve favorable suppression effects and features superior dynamic speed response. **[Conclusion]** The strategy of using MPC to replace the speed loop PI control can effectively suppress torsional vibration and exhibits favorable feasible. Compared with the traditional active damping method, this approach can balance fast dynamic response and torsional vibration suppression, holding broad application prospects.

Key words: permanent magnet synchronous motor; model predictive control; dual-inertia elastic system; active damping; torsional vibration

摘 要:**【目的】**永磁同步电机(PMSM)具有效率高、功率密度高以及动态性能优的特点,被广泛用于高精度伺服控制领域。然而,伺服系统在实际应用中面临轴系弹性连接导致的机械扭转振动问题,传统比例积分(PI)控制难以兼顾快速动态响应与扭转振动抑制。**【方法】**针对此问题,本文将模型预测控制(MPC)引入 PMSM 双惯量弹性系统转速控制框架,以替代传统 PI 控制。首先,对 PMSM 驱动的双惯量弹性传动系统进行数学建模,分析该系统在 PI 控制下的转速响应与扭转振动特性。然后,施加基于转速差反馈的有源阻尼控制,通过增加系统阻尼来抑制扭转振动,但是该方法牺牲了系统的动态响应性能。针对这一问题,本文提出采用 MPC 替代速度环 PI 控制。MPC 基于系统模型滚动优化,具备控制性能优异、鲁棒性强的特点。最后,通过仿真与试验验证所提策略的可行性。**【结果】**结果表明,PI 控制在面对系统扭转振动时表现出明显的振荡现象,难以满足高精度伺服控制要求;有源阻尼控制具有优异的扭转振动抑制效果,但需以牺牲部分动态响应性能为代价;相比之下,MPC 对扭转振动的抑制效果虽略逊于有源阻尼控制,但仍能实现较好的抑制效果,且在转速动态响应方面表现更优。**【结论】**采用 MPC 替代转速环 PI 控制的策略可有效抑制扭转振

基金项目:国家自然科学基金(52277182)
National Natural Science Foundation of China (52277182)

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

动,具备良好可行性;相较于传统有源阻尼控制,该方法可兼顾快速动态响应与扭转振动抑制,应用前景广阔。
关键词:永磁同步电机;模型预测控制;双惯量弹性系统;有源阻尼;扭转振动

0　引言

永磁同步电机(Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM)凭借高效率、高功率密度与优良的动态性能,已在工业自动化、机器人控制等高精度伺服控制领域得到广泛应用[1-3]。然而,伺服系统在实际应用中面临轴系弹性连接导致的机械扭转振动问题[4-5],传统控制策略难以兼顾快速动态响应与扭转振动抑制。

在PMSM双惯量系统中,被控对象模型为三阶系统,弹性元件的存在使速度环控制带宽下降,动态响应较慢,负载突变时还会激发轴转矩振荡问题[6]。目前,抑制扭转振动的主要方法有陷波滤波器[7-8]、比例积分(Proportional-Integral, PI)控制、主动阻尼控制[9]以及其他先进算法[10-13]。PI控制结构简单、参数整定成熟[14],但难以同时满足快速响应与扭转振动抑制的双重要求。自抗扰控制对总扰动进行估计与补偿[15],但在复杂扰动工况下,观测器参数整定难度较大,难以实现响应速度与抗扰性能的平衡。

模型预测控制(Model Predictive Control, MPC)基于系统模型滚动优化,具备控制性能优、鲁棒性强的特点[16],被广泛用于PMSM的转速控制[17-18]与电流控制[19-21]。MPC能预估系统状态并在线调整控制量,在提升控制精度和响应速度上优势突出[22-23],但该算法计算量大、对模型参数敏感且对硬件实时性要求高,制约了其工程落地应用[24-25]。针对双惯量弹性系统的扭转振动抑制问题,已有研究尝试将MPC与PI控制结合,通过设定切换系数及相关数学关系实现控制策略切换以降低计算负担[26]。该方案利用PI控制器稳态转速误差小的优点,但受扰动影响时电机转速与参考转速之差未达到控制切换阈值,系统仍运行于PI控制模式,无法有效验证MPC在多工况下的扭转振动抑制能力。此外,上述研究中的轴转矩基于状态观测器估计,缺乏直接测量手段进行有效性验证。

为此,本文将MPC引入PMSM双惯量弹性系统转速控制框架,以替代传统PI控制器,并对其多工况控制性能展开研究。本文工作聚焦于算法设计、性能优化以及多工况适应性,旨在克服MPC应用于扭转振动抑制场景下的工程落地障碍。试验平台搭载德国Kistler动态转矩传感器,能够精准捕捉扭转振动瞬态过程,为验证所提控制策略的有效性提供可靠支撑。

1　双惯量弹性传动系统数学建模

由三相逆变器驱动的PMSM与机械负载组成的传动系统结构如图1所示。图中,V_{dc}为直流母线电压;i_a、i_b、i_c分别为逆变器a、b、c相输出电流;T_{sh}为传动轴的轴转矩;T_l、θ_l和ω_l分别为负载侧转矩、角度和转速;θ_m、ω_m分别为电机侧角度、转速。

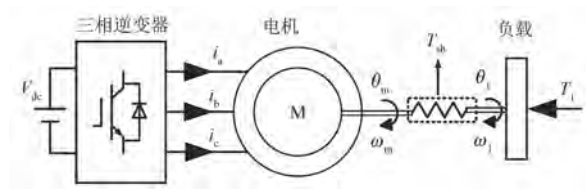


图1　逆变器驱动双惯量系统结构

Fig. 1　Inverter-driven dual-inertia system structure

图1所示的传动系统可视为双惯量模型,其驱动端和负载端通过弹性轴连接,电机与负载之间的机械连接部件采用细长轴,可等效建模为刚度系数较小的弹簧元件。当电磁转矩或负载转矩突变时,会激发扭转振动,不仅会降低系统的控制精度,严重时还可能造成设备机械结构损坏。因此,需根据动力学特征构建系统状态空间方程,并设计合理的控制算法。简化后的系统模型如图2所示[27]。图中,T_{em}、J_m分别为电机侧电磁转矩、转动惯量;J_l为负载侧转动惯量;K_{sh}为传动轴的刚度系数。

由图2可得:

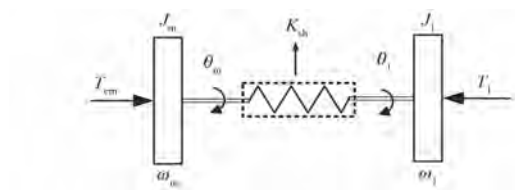


图2　系统简化模型

Fig. 2　Simplified system model

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

$$T_{em} - T_{sh} = J_m \cdot \frac{d\omega_m}{dt} \tag{1}$$

$$T_{sh} = K_{sh} \cdot \int (\omega_m - \omega_l)\,dt \tag{2}$$

$$T_{sh} - T_l = J_l \cdot \frac{d\omega_l}{dt} \tag{3}$$

由式(1)~(3)可得系统状态空间方程：

$$\begin{bmatrix} \dot{\omega}_m \\ \dot{\omega}_l \\ \dot{T}_{sh} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dfrac{-1}{J_m} \\ 0 & 0 & \dfrac{1}{J_l} \\ K_{sh} & -K_{sh} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_m \\ \omega_l \\ T_{sh} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dfrac{1}{J_m} & 0 \\ 0 & \dfrac{-1}{J_l} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{em} \\ T_l \end{bmatrix} \tag{4}$$

双惯量系统被控对象控制框图如图 3 所示。其中，$\Delta\omega$ 为电机侧与负载侧的转速差。

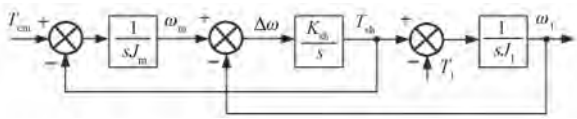


图 3　双惯量系统被控对象控制框图

Fig. 3　Control block diagram of the dual-inertia system controlled plant

由图 3 可得，ω_m/T_{em} 与 T_{sh}/T_{em} 的传递函数分别为

$$\frac{\omega_m(s)}{T_{em}(s)} = \frac{K_{sh}^{-1}J_l s^2 + 1}{J_l J_m K_{sh}^{-1} s} \cdot \frac{1}{s^2 + \omega_{rm}^2} \tag{5}$$

$$\frac{T_{sh}(s)}{T_{em}(s)} = \frac{K_{sh}}{J_m} \cdot \frac{1}{s^2 + K_{sh}(J_m + J_l)/J_m J_l} \tag{6}$$

式中：ω_{rm} 为机械系统谐振频率，其表达式为

$$\omega_{rm} = \sqrt{\frac{K_{sh}(J_m + J_l)}{J_m J_l}} \tag{7}$$

2　双惯量系统扭转振动抑制控制策略

2.1　有源阻尼控制

由式(5)、(6)可知，系统的传递函数均存在一个二阶振荡环节，且振荡环节中均不存在“s”项，几乎为零阻尼状态。转速模式采用 PI 控制时，动态调整过程中电机转速与负载转速会产生明显的转速差，对传动机构伤害极大。

本文采用有源阻尼控制来抑制传动轴扭转振动，核心设计思路如下：在传统 PI 控制器基础上，引入电机转速与负载转速的差值作为附加反馈量，以增大系统阻尼比，进而有效抑制由弹性连接引发的扭转振动[28]。转速差反馈控制框图如图 4 所示。图中，ω_{ref} 为参考转速；k_p、k_i 分别为 PI 控制器比例、积分增益；T_{ref} 为 PI 控制输出的参考转矩；K 为转速差反馈增益。

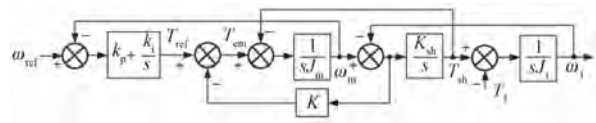


图 4　转速差反馈控制框图

Fig. 4　Block diagram of speed difference feedback control

由图 4 可得，ω_m/T_{ref} 与 T_{sh}/T_{ref} 的传递函数分别为

$$\frac{\omega_m(s)}{T_{ref}(s)} = \frac{J_l K_{sh}^{-1} s^2 + 1}{J_l J_m K_{sh}^{-1} s} \cdot \frac{1}{s^2 + \dfrac{K}{J_m}s + \omega_{rm}^2} \tag{8}$$

$$\frac{T_{sh}(s)}{T_{ref}(s)} = \frac{K_{sh}}{J_m} \cdot \frac{1}{s^2 + \dfrac{K}{J_m} \cdot s + \omega_{rm}^2} \tag{9}$$

与式(5)、(6)相比，式(8)、(9)所示的传递函数振荡环节存在由 K 影响的“s”项，并通过此项对系统阻尼进行补偿，从而抑制扭转振动。

有源阻尼系数 ζ 与阻尼频率 ω_d 的定义为[28]

$$2\zeta\omega_{rm} = \frac{K}{J_m} \tag{10}$$

$$\omega_d^2 = (1 - \zeta^2)\omega_{rm}^2 \tag{11}$$

2.2　MPC

MPC[29]是一种基于模型的先进闭环控制策略，其控制框图如图 5 所示。

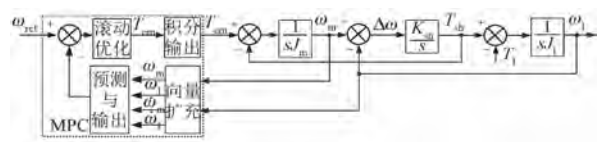


图 5　MPC 框图

Fig. 5　MPC block diagram

在每个控制周期内，MPC 控制器通过预测模型对未来有限时域内的系统动态进行预测，并通过求解二次规划类优化问题，得出最优控制信号[30]。对式(1)~(3)求导可得：

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

$$\dot{T}_{em} - \dot{T}_{sh} = J_m\ddot{\omega}_m \tag{12}$$

$$\dot{T}_{sh} = K_{sh}(\omega_m - \omega_l) \tag{13}$$

$$\dot{T}_{sh} - \dot{T}_l = J_l\omega\ddot{\omega}_l \tag{14}$$

联立式(12)~(14)可得无需观测或实测 T_{sh} 的状态空间方程:

$$\begin{bmatrix} \dot{\omega}_m \\ \dot{\omega}_l \\ \omega\ddot{\omega}_m \\ \omega\ddot{\omega}_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \dfrac{-K_{sh}}{J_m} & \dfrac{K_{sh}}{J_m} & 0 & 0 \\ \dfrac{K_{sh}}{J_l} & \dfrac{-K_{sh}}{J_l} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_m \\ \omega_l \\ \dot{\omega}_m \\ \dot{\omega}_l \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \dfrac{1}{J_m} & 0 \\ 0 & \dfrac{-1}{J_l} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{T}_{em} \\ \dot{T}_l \end{bmatrix} \tag{15}$$

对式(15)所示的连续状态空间方程使用前向欧拉法,以 2 ms 为步长离散化为如式(16)所示的一般格式:

$$\boldsymbol{x}_{k+1} = \boldsymbol{A}\boldsymbol{x}_k + \boldsymbol{B}\boldsymbol{u}_k \tag{16}$$

式中:$\boldsymbol{x}_{k+1}$ 为 k+1 时刻的状态变量;$\boldsymbol{x}_k$ 为 k 时刻的状态变量;$\boldsymbol{u}_k$ 为 k 时刻的系统输入;$\boldsymbol{A}$ 为状态矩阵;$\boldsymbol{B}$ 为输入矩阵。

当预测步长为 N 时,系统代价函数 J 为

$$J = \sum_{k}^{k+N-1} (\boldsymbol{E}_k^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Q}\boldsymbol{E}_k + \boldsymbol{u}_k^{\mathrm{T}}\boldsymbol{R}\boldsymbol{u}_k) + \boldsymbol{E}_N^{\mathrm{T}}\boldsymbol{F}\boldsymbol{E}_N \tag{17}$$

式中:$\boldsymbol{E}$ 为状态误差矩阵;$\boldsymbol{Q}$ 为状态误差权重矩阵;$\boldsymbol{R}$ 为控制输入权重矩阵;$\boldsymbol{F}$ 为终端误差权重矩阵。

对代价函数进行格式化简,转化为可使用二次规划问题求解的形式,如式(18)所示:

$$J = \boldsymbol{f}\boldsymbol{U}_k + \boldsymbol{U}_k^{\mathrm{T}}\boldsymbol{H}\boldsymbol{U}_k \tag{18}$$

式中:$\boldsymbol{U}_k$ 为输入信号矩阵;$\boldsymbol{f}$、$\boldsymbol{H}$ 为化简后得到的矩阵。

在后续仿真与试验中,通过求解二次规划问题得到输入解。

3　仿真分析

为了验证所提策略的可行性与有效性,基于 Matlab/Simulink 搭建双惯量弹性传动系统仿真模型,对比转速环分别采用有源阻尼控制与 MPC 时对扭转振动的抑制效果。仿真忽略了实际系统中可能存在的未知阻尼等非理想因素。设置仿真工况:转速到达 400 r/min 稳态后突加 100 r/min 转速阶跃扰动,当转速到达新稳态后,施加突变负载扰动。

3.1　有源阻尼控制仿真结果

通过调整有源阻尼系数和 PI 控制器增益可调整系统的闭环极点位置[28],从而控制系统阻尼来抑制扭转振动。为与 MPC 的优化效果进行对比,选取合适的参数量化有源阻尼控制对扭转振动的抑制效果。不同参数的有源阻尼控制下,电机转速与负载转速响应结果如图 6 所示,轴转矩响应结果如图 7 所示。

使电机工作在转速模式下,PI 控制器增益取 $k_p = 0.5$、$k_i = 5$,不施加有源阻尼时的转速响应如图 6 第一列所示。可见,突加 100 r/min 转速阶跃扰动时,系统超调量为 53%,转速恢复至 5% 误差带的时间为 0.118 s;施加突变负载扰动时,转速最大振幅达到±90 r/min,转速恢复至 5% 误差带的时间为 0.2 s,系统振荡明显。

保持 $k_p = 0.5$、$k_i = 5$ 不变,对系统施加有源阻尼,进行相同工况测试。设定参数 $\zeta = 0.3$,此时转速差反馈增益 $K = 0.256$,得到转速响应如图 6 第二列所示。可见,突加 100 r/min 转速阶跃扰动时,系统超调量为 48%,转速恢复至 5% 误差带的调节时间为 0.11 s;施加突变负载扰动时,转速最大振幅达到±100 r/min,转速恢复至 5% 误差带的时间为 0.19 s。转速振荡略微减小,但实际超调量与稳定时间不理想,故需调整 PI 控制器增益。

保持 $K = 0.256$ 不变,将 PI 控制器增益减小,进行相同工况测试。设置 $k_p = 0.2$、$k_i = 2$,得到转速响应如图 6 第三列所示。可见,突加 100 r/min 转速阶跃扰动时,电机转速与负载转速的相位几乎一致,超调量仅为 17%,转速恢复至 5% 误差带的调节时间为 0.18 s。施加突变负载扰动时,转速最大振幅为±105 r/min,转速恢复至 5% 误差带的时间为 0.25s,系统调节时间增加,动态响应速度变慢。由图 7 可知,在此参数配置下,轴转矩在加减载时依旧存在微小的振荡尖峰,故需调整有源阻尼系数。

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

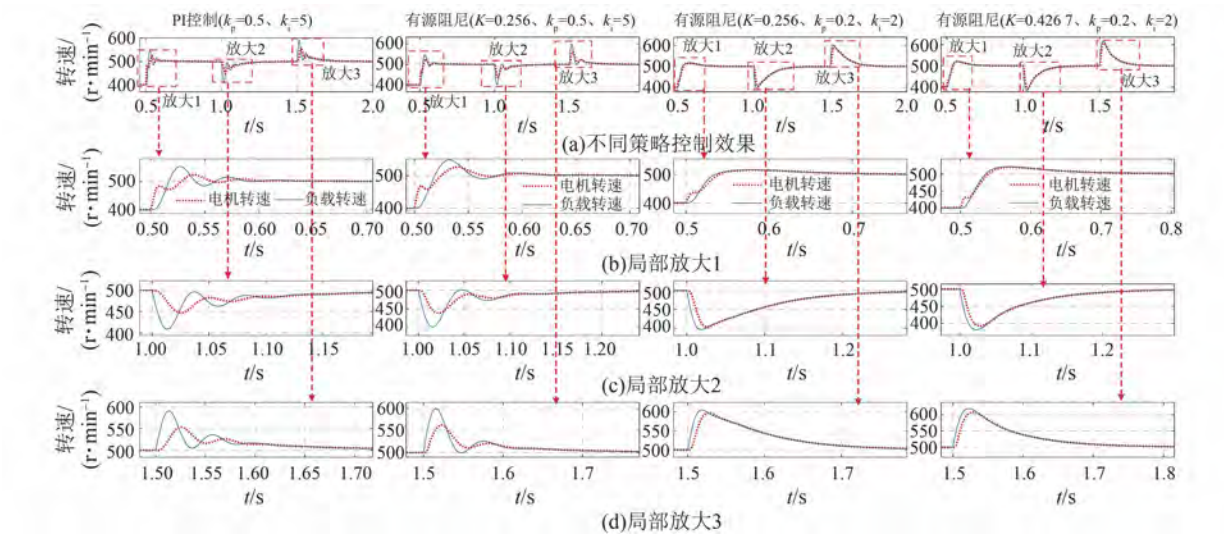


图 6　不同参数的有源阻尼控制下电机转速与负载转速响应仿真结果

Fig. 6　Simulation results of motor speed and load speed responses under active damping control with different parameters

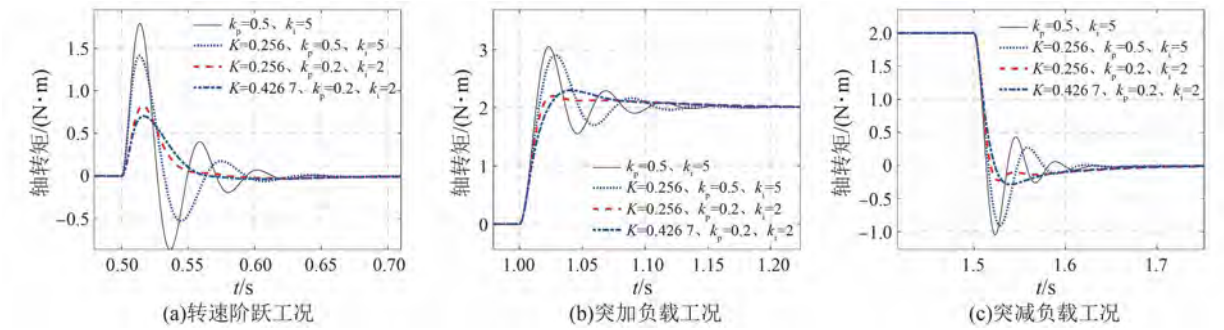


图 7　不同参数的有源阻尼控制下轴转矩响应仿真结果

Fig. 7　Simulation results of shaft torque response under active damping control with different parameters

保持 $k_p=0.2$、$k_i=2$ 不变，设定参数 $\zeta=0.5$，此时 $K=0.426\ 7$，进行相同工况测试，得到转速响应如图 6 第四列所示。结合图 7 可知，在该参数配置下，转速响应更加平滑，轴转矩的振荡尖峰也被消除。

仿真结果表明，施加有源阻尼控制后，系统扭转振动被明显抑制。为了更加直观地表现有源阻尼的影响效果，绘制不同参数有源阻尼控制下的系统极点分布图，如图 8 所示。可见，加入有源阻尼后，随着参数的改变，系统的共轭主导极点向高阻尼比等势线移动。值得注意的是，该极点图对应的阻尼比是整个系统由主导极点决定的阻尼比，需要与选择的有源阻尼系数 ζ 进行区分。

3.2　MPC 仿真结果

根据上一节分析可知，振荡抑制效果受转速环 PI 控制器增益及有源阻尼反馈增益共同影响，本质上是牺牲系统的响应时间来抑制振荡。鉴于此，采用 MPC 替代系统转速环 PI 控制器，通过调整权重来兼顾扭转振动抑制效果与动态响应速度。

MPC 具体过程如下：通过采集电机转速与负载转速的反馈信息，结合系统动态预测模型及预设权重系数，对系统状态变量与控制变量进行加权处理；在每个采样周期内，通过滚动优化求解有限时域内的最优控制律，来抑制传动系统扭转振动并优化动态性能。

MPC 下电机转速与负载转速以及轴转矩响应仿真结果如图 9 所示。

由图 9 可知，突加 100 r/min 转速阶跃扰动时，MPC 表现出极为优秀的动态性能，超调量仅为 3%，在第一次到达稳态时就进入了 5% 误差

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

带,仅用时 0.04 s,振荡抑制效果明显。施加突变负载扰动时,负载转速动态响应的最大偏差为±92 r/min,且转速能在 0.05 s 内快速恢复至稳态。与有源阻尼控制相比,响应速度和扰动后的恢复速度更快,在有效抑制扭转振动的同时,极大提升了动态响应速度。

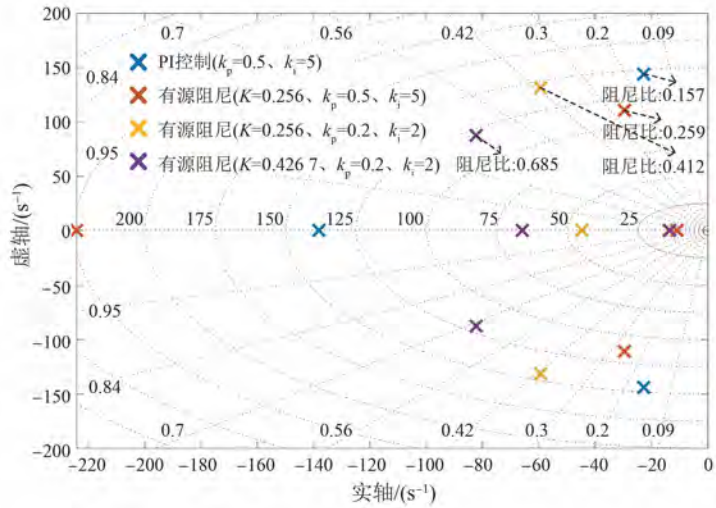


图 8　不同参数的有源阻尼控制下系统的极点分布图与对应阻尼比

Fig. 8　Pole distribution diagram and corresponding damping ratio of the system under active damping control with different parameters

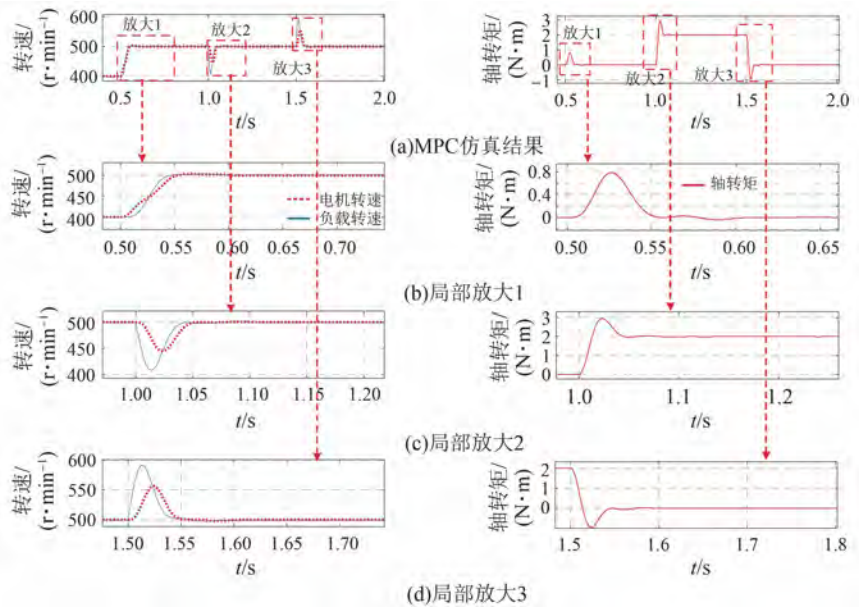


图 9　MPC 下电机转速与负载转速以及轴转矩响应仿真结果

Fig. 9　Simulation results of motor speed, load speed and shaft torque responses under MPC

综上,相较于有源阻尼控制,MPC 在系统受到扰动后的转速恢复速度更快,尤其是在转速阶跃工况下表现更优,转速在突变之后几乎无超调量;在突加负载扰动时,虽然对轴转矩超调的抑制效果一般,但转速恢复至稳态的时间更短。但就轴转矩而言,有源阻尼控制表现优于 MPC,突加负载扰动时转矩超调量明显减小,响应曲线更加平滑。

4　试验验证

为了进一步验证所提策略的可行性,基于如图 10 所示 PMSM 双惯量弹性传动平台开展硬件

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

试验。PMSM 参数及控制系统参数如表 1 所示。考虑到算法复杂度，MPC 部署于倍福 CX5240 控制器中，控制周期与仿真保持一致，均为 2 ms。PI 控制及有源阻尼控制基于 DSP28335 实现。试验系统存在传动阻尼未知、系统惯量有偏差等非理想因素，与仿真环境存在一定差异，可更真实地考核控制算法的鲁棒性与适用性。

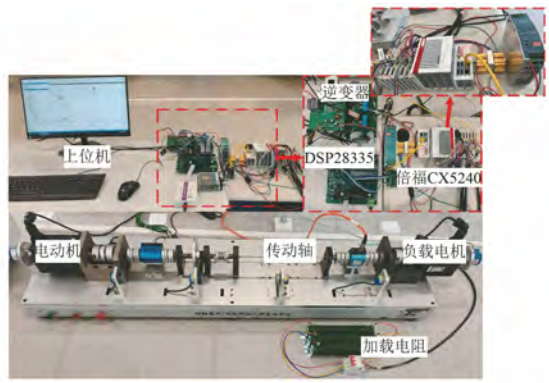


图 10　试验平台

Fig. 10　Experiment platform

表 1　PMSM 参数和控制系统参数

Tab. 1　Parameters of PMSM and control system

参数名称	参数值
电机极对数	5
电机相电阻/Ω	0.175
电机相电感/H	0.002 1
电机磁链/Wb	0.11
电机侧转动惯量/(kg·m^2)	0.001 51
负载侧转动惯量/(kg·m^2)	0.001 7
圆盘转动惯量/(kg·m^2)	0.001 056 6
电流环采样频率/kHz	20
脉宽调制开关频率/kHz	10
直流母线电压/V	100
传动轴长度/m	0.36
传动轴直径/m	0.006
传动轴刚度系数/(N·m·rad^{-1})	28.27

首先驱动 PMSM 到 400 r/min，然后施加 100 r/min 转速阶跃扰动，当转速到达新稳态后使用电阻棒进行加载以模拟负载突变。由于试验中的负载突变工况采用手动切换方式，导致不同控制算法下相同工况的时间刻度难以对齐，因此在绘制轴转矩试验对比图时，采用数据平移的方式，将不同控制算法下相同工况的数据平移至同一时间刻度，以直观对比不同控制算法的效果。

4.1　PI 控制试验结果

开展有源阻尼控制与 MPC 的硬件试验前，为明确扭转振动对系统动态性能的影响并建立对比基准，需先进行 PI 控制试验。设定 $k_p=0.5$、$k_i=5$，试验结果如图 11、12 所示。可见，突加 100 r/min 转速阶跃扰动时，PI 控制下的系统超调量为 28%，调节时间为 0.15 s；突加、突减负载扰动时，负载转速最大偏差分别为 52 r/min、60 r/min，恢复时间为 0.23 s；且系统动态过程中存在明显机械扭转振动现象。

4.2　有源阻尼控制试验结果

保持 $k_p=0.5$、$k_i=5$ 不变，引入有源阻尼控制，设置 $\zeta=0.3$，即 $K=0.256$，研究阻尼注入对系统扭转振动抑制及动态性能提升的效果。试验结果如图 11 第二列和图 12 虚线所示。数据分析表明，在此参数设置的有源阻尼控制下，突加 100 r/min 转速阶跃扰动时，系统超调量为 40%，相较于 PI 控制上升 12%，调节时间为 0.16 s；在突加、突减负载扰动时，负载转速最大偏差分别为 60 r/min、67 r/min，恢复至稳态时间为 0.2 s，与 PI 控制基本一致。由图 12 对应结果可知，引入有源阻尼后，在不改变 PI 控制器增益的情况下，系统转速阶跃及负载突变瞬态过程的轴转矩振荡幅度有所降低，但效果并不理想。

由 3.1 节仿真结果可知，在 PI 控制器增益取 $k_p=0.2$、$k_i=2$ 下，有源阻尼控制的转速差反馈增益取 $K=0.256$ 和 $K=0.426\ 7$ 时的扭转振动抑制效果十分接近，但后者响应曲线更加平滑，故选择该参数($K=0.426\ 7$，$k_p=0.2$，$k_i=2$)进行硬件试验。结果如图 11 第三列与图 12 点线所示。可见，有源阻尼对于转速突变、负载突变的振荡抑制效果显著，转矩超调量得到很好抑制，但是系统响应速度明显下降，调节时间增加至 0.27 s，受扰动影响时转速恢复至稳态的时间也显著增加；有源阻尼对于扭转振动的抑制效果十分显著。

4.3　MPC 试验结果

MPC 试验结果如图 11 第四列与图 12 点划线所示。可见，突加 100 r/min 转速阶跃扰动时，系统超调量为 17%，调节时间仅为 0.08 s；在突加、突减负载扰动时，转速最大偏差分别为

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

53 r/min、57 r/min,恢复至稳态的时间均在 0.1 s 内。相比参数设置为 $K=0.256$,$k_p=0.5$,$k_i=5$ 的有源阻尼控制,MPC 的振荡抑制效果、动态响应性能更优;相比参数设置为 $K=0.426\ 7$,$k_p=0.2$,$k_i=2$ 有源阻尼控制,MPC 在系统响应速度上表现更优,但振荡抑制效果略逊色。

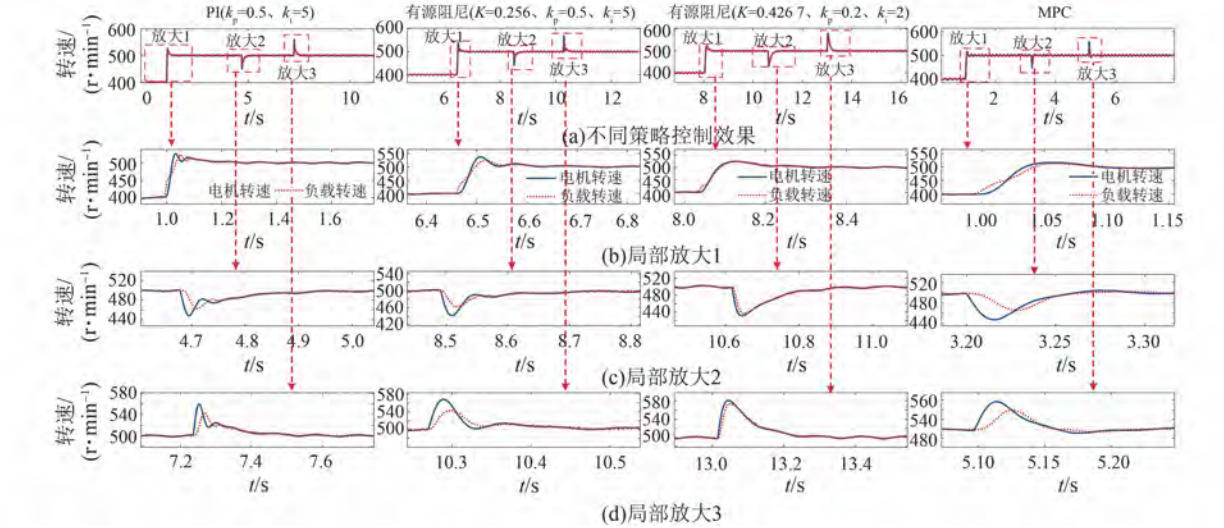


图 11　不同控制策略下电机转速与负载转速响应试验结果

Fig. 11　Experimental results of motor speed and load speed responses under different control strategies

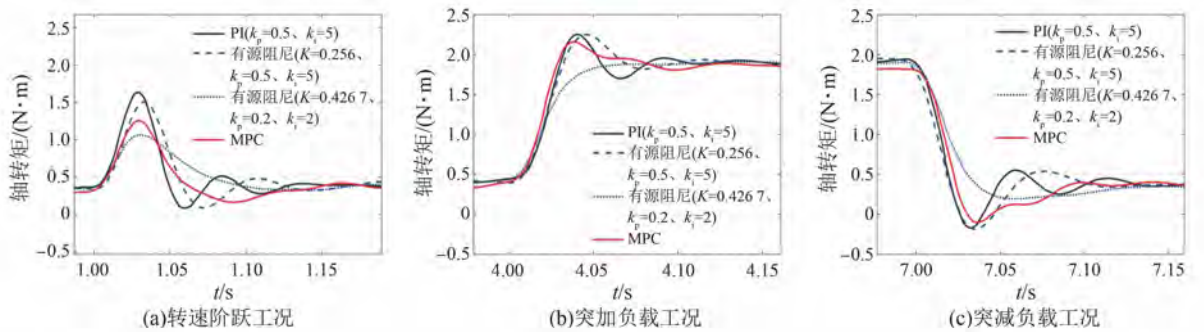


图 12　不同控制策略下轴转矩响应试验结果

Fig. 12　Experimental results of shaft torque under different control strategies

5　结语

针对工业自动化、机器人控制等电能转换过程中 PMSM 双惯量系统在转速阶跃及负载突变工况下的扭转振动问题,通过数学建模、软件仿真和硬件试验,阐明扭转振动产生的动力学机理,对比分析 PI 控制、有源阻尼控制以及 MPC 三种控制策略对扭转振动的抑制效果。仿真和试验结果表明,PI 控制在面对系统扭转振动时表现出明显的振荡现象,难以满足高精度伺服控制要求;有源阻尼控制具有优异的扭转振动抑制效果,但需以牺牲部分动态性能为代价;相比之下,MPC 对扭转振动的抑制效果虽略逊于有源阻尼控制,但仍能实现较良好的抑制效果,且在转速动态响应方面表现更优。

利益冲突声明

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

作者贡献

刘雄进行了试验方案设计、内容指导、论文撰写、审核与修改,刘玉琦进行了仿真与试验平台搭

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

建、试验操作与数据处理、论文撰写，陈楷浩进行了仿真与试验操作、论文撰写与修改，梁振华进行了试验平台搭建、论文修改，邓慧进行了试验方案设计、内容指导、论文审核与修改。所有作者均阅读并同意了最终稿件的提交。

Liu Xiong was responsible for experimental scheme design，content guidance，manuscript writing，review and revision. Liu Yuqi was responsible for simulation and experimental platform construction，experimental testing，data processing and manuscript writing. Chen Kaihao was responsible for simulation analysis，experimental testing，manuscript writing and revision. Liang Zhenhua was responsible for experimental platform construction and manuscript revision. Deng Hui was responsible for experimental scheme design，content guidance，manuscript review and revision. All authors have read and agreed to the submission of the final manuscript.

参 考 文 献

[1] 朱铭志，王玉彬. 基于 CLTC 工况的车用永磁同步电机 MTPA 控制[J]. 电机与控制应用，2026，53(3)：236-248.
Zhu M Z，Wang Y B. MTPA control of permanent magnet synchronous motor for vehicles based on CLTC driving cycle [J]. Electric Machines & Control Application，2026，53(3)：236-248.

[2] 李耀华，张鑫泉，董国庆，等. 永磁同步电机并联法模型预测转矩控制[J]. 电机与控制应用，2023，50(2)：41-48.
Li Y H，Zhang X Q ，Dong G Q，et al. Parallel model predictive torque control for permanent magnet synchronous motor [J]. Electric Machines & Control Application，2023，50(2)：41-48.

[3] 梁传栋，许刘超，潘志恒，等. 一种改进型滑膜变结构控制永磁同步电机直接转矩控制[J]. 电机与控制应用，2022，49(3)：1-6.
Liang C D，Xu L C，Pan Z H，et al. An improved sliding mode variable structure control direct torque control for permanent magnet synchronous motor [J]. Electric Machines & Control Application，2022，49(3)：1-6.

[4] 何朕，成知宁，王宁远，等. 基于扰动观测器补偿的双惯量系统和三惯量系统的谐振抑制[J]. 电机与控制学报，2022，26(12)：140-149.
He Z，Cheng Z N，Wang N Y，et al. Vibration suppression of 2- and 3-inertia systems based on disturbance observer compensation [J]. Electric Machines and Control，2022，26(12)：140-149.

[5] 刘铠源，杨明. 基于改进有源阻尼的柔性关节机械臂伺服系统振动抑制策略[J]. 电机与控制学报，2022，26(7)：20-28.
Liu K Y，Yang M. Vibration suppression strategy for manipulator servo with flexible joints based on improved active damping [J]. Electric Machines and Control，2022，26(7)：20-28.

[6] 史婷娜，谭本慷，徐奕扬，等. 机器人关节伺服系统力矩控制技术综述[J]. 中国电机工程学报，2025，45(24)：9725-9740.
Shi T N，Tan B K，Xu Y Y，et al. A review of torque control technology for robotic joint servo systems [J]. Proceedings of the CSEE，2025，45(24)：9725-9740.

[7] Chen Y Y，Yang M，Long J，et al. Analysis of oscillation frequency deviation in elastic coupling digital drive system and robust notch filter strategy [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics，2019，66(1)：90-101.

[8] Chang H，Lu S W，Zheng S Q，et al. Resonance suppression based on improved BFGS notch filter and simplified linear triangular model for double-inertia servo control [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics，2024，29(3)：2150-2160.

[9] Wang B，Pan J H，Xu D G. Logarithmic chirp identification and decoupled analytical active damping for mid-low frequency resonance in dual-inertia servo systems [J]. IEEE Transactions on Power Electronics，2026，41(12)：20828-20841.

[10] Ji X Y，Wang H M，Zuo Y，et al. A QGI-ESO-based disturbance torque current compensation scheme for electromechanical resonance suppression [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification，2026，12(5)：7787-7799.

[11] Shikata K，Szabat K，Katsura S. Vibration suppression in torsional systems robust to load-inertia variations using wave control [J]. IEEE Transactions on Industry Applications，2026，62(4)：6201-6210.

[12] Liu X，Qiu J Y，Wang Y Z，et al. Torsional vibration suppression control for inverter-driven multi-

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

rotating mass system using non-ideal generalized integrator [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2024, 39(2): 2594-2607.

[13] Thomsen S, Hoffmann N, Fuchs F W. PI control, PI-based state space control, and model-based predictive control for drive systems with elastically coupled loads—A comparative study [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(8): 3647-3657.

[14] 李小彭, 周赛男, 刘佳琪, 等. 模糊整定 PI 参数的双柔性机械臂振动抑制[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2024, 45(2): 217-225.
Li X P, Zhou S N, Liu J Q, et al. Vibration suppression of dual-flexible manipulator with fuzzy tuning PI parameters [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2024, 45(2): 217-225.

[15] Li P, Wang L, Zhong B, et al. Linear active disturbance rejection control for two-mass systems via singular perturbation approach [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2022, 18(5): 3022-3032.

[16] 刘志坚, 王伟铭, 骆军, 等. 基于 MPC 的虚拟同步双馈风机并网系统次同步振荡抑制策略[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(11): 75-84.
Liu Z J, Wang W M, Luo J, et al. Sub-synchronous oscillation suppression strategy for virtual synchronous DFIG grid-connected systems based on MPC [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(11): 75-84.

[17] 史婷娜, 赵梦圆, 夏长亮. 基于数据驱动观测器的永磁同步电机显式模型预测直接速度控制[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(4): 1248-1259.
Shi T N, Zhao M Y, Xia C L. Explicit model predictive direct speed control strategy for permanent magnet synchronous motors based on data driven observer [J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(4): 1248-1259.

[18] 牛峰, 高禄辰, 胡艳芳, 等. 基于电机参数失配的模型预测转速控制系统运行稳定性研究[J]. 电机与控制学报, 2023, 27(6): 55-63.
Niu F, Gao L C, Hu Y F, et al. Research on operation stability for model predictive speed control system based on parameter mismatch for motors [J]. Electric Machines and Control, 2023, 27(6): 55-63.

[19] Wang Y B, Zhang Y C, Yang H T, et al. Variable-vector-based model predictive control with reduced current harmonic and controllable switching frequency for PMSM drives [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2024, 39(12): 16429-16441.

[20] Zhang X G, Zhang C G, Xu C, et al. Multimode model predictive control for PMSM drive system [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2023, 9(1): 667-677.

[21] Wang F X, He L, Kang J S, et al. Adaptive model predictive current control for PMLSM drive system [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70(4): 3493-3502.

[22] 刘普, 崔艺博, 王聪, 等. 基于双 MPC 与变斜率 I/f 的 SPMSM 快速启动控制策略研究[J]. 电机与控制学报, 2024, 28(9): 151-161.
Liu P, Cui Y B, Wang C, et al. SPMSM fast start control strategy based on dual MPC and dynamic slope I/f [J]. Electric Machines and Control, 2024, 28(9): 151-161.

[23] Zhang X G, Cao Y H, Zhang C G, et al. Model predictive control for PMSM based on the elimination of current prediction errors [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2024, 12(3): 2651-2660.

[24] Niu S X, Luo Y X, Fu W N, et al. Robust model predictive control for a three-phase PMSM motor with improved control precision [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(1): 838-849.

[25] Aby-Ali M, Berkel F, Manderla M, et al. Deep learning-based long-horizon MPC: Robust, high performing, and computationally efficient control for PMSM drives [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(10): 12486-12501.

[26] Wang C, Yang M, Zheng W L, et al. Vibration suppression with shaft torque limitation using explicit MPC-PI switching control in elastic drive systems [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(11): 6855-6867.

[27] 丁有爽, 肖曦. 伺服系统柔性负载建模方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(3): 818-827.
Ding Y S, Xiao X. Mathematical modeling of flexible load in servo system [J]. Proceedings of the CSEE. 2016, 36(3): 818-827.

[28] Liu X, Qi Y, Tang Y, et al. Unified active damping control algorithm of inverter for LCL resonance and

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

mechanical torsional vibration suppression [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 69(7): 6611-6623.

[29] 陈虹. 模型预测控制[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
Chen H. Model Predictive Control [M]. Beijing: China Science Publishing & Media Ltd, 2013.

[30] Luo Y X, Luo J Q, Yang K, et al. Adaptive moment estimation-based model predictive control for PMSM motor with low tracking error [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2026, 73(1): 230-241.

收稿日期:2026-07-17
收到修改稿日期:2026-08-29

作者简介:

刘 雄(1985—),男,博士,副教授,研究方向为电力电子变换器与控制,舰船、航空混合电力推进系统等,liux396@jnu.edu.cn;

*通信作者:邓 慧(1979—),男,博士,副教授,研究方向为动态系统辨识与建模分析、先进控制理论及应用等,dengh@jnu.edu.cn。

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.