

基于转速反馈增量补偿的永磁同步电机 柔性负载谐振抑制方法*

黄全安¹, 於 锋², 周陈辉², 张 雷¹

(1. 苏州绿控传动科技股份有限公司, 江苏 苏州 215200;

2. 南通大学 电气工程学院, 江苏 南通 226019)

摘 要: 针对电动汽车中永磁同步电机(PMSM)驱动柔性负载产生的振荡现象, 提出了一种基于转速反馈的增量补偿式柔性负载谐振抑制方法。首先, 通过高通滤波器找出转速中导致系统发生谐振的频率点。然后, 将谐振频率点处的转矩增量经过负反馈调节补偿给电磁转矩处进行调整, 以增大电磁转矩的垂直分量系数和系统的阻尼系数, 在保证系统稳定性的同时达到谐振抑制的效果。在此基础上, 引入转速反馈系数提高了系统极点的自由度, 进一步提升了系统的控制性能。最后, 通过仿真验证了方法的可行性。

关键词: 永磁同步电机; 柔性负载; 转速反馈; 增量补偿; 谐振抑制

中图分类号: TM 351 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2020)05-0001-06

doi: 10.12177/emca.2020.009

A Resonance Suppression Method Based on Speed Feedback Incremental Compensation for Flexible Load Driven by Permanent Magnet Synchronous Motor*

HUANG Quan'an¹, YU Feng², ZHOU Chenhui², ZHANG Lei¹

(1. Suzhou Lvkon Transmisson S&T Co., Ltd., Suzhou 215200, China;

2. School of Electrical Engineering, Nantong University, Nantong 226019, China)

Abstract: To address the resonance issue of flexible loads driven by permanent magnet synchronous motors (PMSMs) in electric vehicles, the resonance suppression scheme based on speed feedback incremental compensation is adopted. Firstly, a high-pass filter is utilized to effectively determine the resonance frequency point in the speed response. Then, for increasing the coefficient associated with vertical component in the electromagnetic torque and the damping coefficient in the system, the electromagnetic torque can be reasonably regulated by the negative feedback compensation according to the torque increment at the resonance frequency point. Thus, both the system stability and resonance suppression can be ensured. Following this, a speed feedback coefficient is introduced, which aims to increase the degree of freedom of the poles and even further improve the control performance. Finally, the feasibility of the method is validated by simulation.

Key words: permanent magnet synchronous motor (PMSM); flexible load; speed feedback; incremental compensation; resonance suppression

收稿日期: 2020-02-10; 收到修改稿日期: 2020-03-13

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(51807098)

作者简介: 黄全安(1978—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为新能源汽车电控技术。

於 锋(1985—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为永磁电机变频调速系统及电力电子技术 in 电动汽车中的应用。

周陈辉(1998—), 女, 硕士研究生, 研究方向为永磁电机控制技术。

0 引言

永磁同步电机(PMSM)因性能好、体积小、结构简单、调速范围广等优点,广泛应用于冶金、陶瓷、电动汽车等领域^[1]。在实际电动汽车系统中,由于悬架、轮胎等弹性体的作用,电动汽车用PMSM不可避免地会携带柔性负载,而柔性负载特征给运动控制系统带来许多问题,如电机在起步、急停等转矩变化迅速的工况下,转速发生抖动,从而影响机械寿命和乘车舒适性^[2]。因此,如何抑制PMSM驱动柔性负载所产生的谐振现象是应用PMSM到电动汽车领域的重要技术。

为了抑制PMSM驱动柔性负载产生的振荡现象,文献[3-5]提出一种在转速调节器的输出端与转矩给定之间串入陷波滤波器的方法,其本质为对高频分量进行衰减。虽然能够被动地抑制柔性负载的谐振,但需要准确提取系统的谐振特征,如谐振频率、反谐振频率等,如果谐振频率提取不准确则可能导致陷波的失败^[6],同时在涉及高阶系统时算法复杂,不易于在实际系统中进行。文献[7]提出了一种基于经典控制理论中PI控制的主动抑制策略,可实现速度的无静差跟踪和一定程度的机械谐振抑制效果,但是由于PI调节器仅有2个可调参数,难以实现极点的任意配置^[8],因此并不能够完全解决负载谐振问题。文献[6]提出了构建状态观测器的方法,但观测到的负载信息中通常包含随机噪声,噪声与谐振信息混杂在一起,难以分离。文献[9]提出了一种基于负载位置反馈的谐振抑制方法,通过配置相同的阻尼系数、实部、极点幅值来确定PI参数,能够达到较好的谐振抑制效果,但存在分析工况多、参数确定过程复杂等缺点。

针对上述问题,本文提出一种基于转速反馈增量补偿的PMSM柔性负载谐振抑制方法。由高通滤波器得到电机转速中引起系统产生谐振的高频信号。将所提取的高频信号以转矩增量的形式对电磁转矩输出进行反馈调整,以增大电磁转矩的垂直分量,进而增大轴端阻尼系数,从而实现柔性负载谐振抑制的目的。最后,通过仿真验证了该控制方法的有效性。

1 柔性负载的数学模型

考虑到通常情况下,柔性机械元件自身的惯量比电机转子和负载的惯量小很多,因此可在系统建模时忽略柔性机械元件的惯量或将其与电机、负载转动惯量合并计算^[10]。将电动汽车中具有弹性作用的连接体,如悬架、轮胎等,等效成一个理想的扭转弹簧并忽略弹簧惯量,从而可将实际的多质量系统简化为一个电机-弹簧-负载的二质量系统,如图1所示。

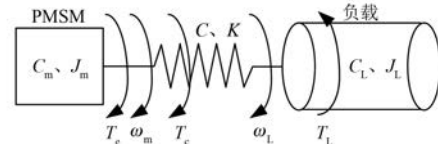


图1 基本二质量系统模型

图1中, T_e 为电磁转矩, T_L 为负载转矩, ω_m 为电机转速, ω_L 为负载转速。电机转轴的转动惯量和阻尼系数分别为 J_m 、 C_m ,负载机构的等效转动惯量和阻尼系数分别为 J_L 、 C_L 。当弹簧发生扭转形变时产生的轴上转矩为 T_c ,该转矩与弹性轴的弹性系数 K 有关,同时受机械轴上的阻尼系数 C 影响,关系式为:

$$C(\omega_m - \omega_L) + K(\theta_m - \theta_L) = T_c \quad (1)$$

PMSM运行时,电机转轴有电磁转矩 T_e ,在近电机轴处,电磁转矩 T_e 加上轴上转矩 T_c 一同作用于电机转轴,此时运动方程为

$$T_e - C_m\omega_m - T_c = J_m \frac{d\omega_m}{dt} \quad (2)$$

在近负载处,轴上转矩 T_c 与负载转矩 T_L 一同作用于负载机构从而决定负载转速 ω_L ,此时有运动方程:

$$T_c - C_L\omega_L - T_L = J_L \frac{d\omega_L}{dt} \quad (3)$$

因此,根据上述分析并结合角速度与角度间的关系式(4)可建立系统微分方程

$$\begin{cases} \omega_m = \frac{d\theta_m}{dt} \\ \omega_L = \frac{d\theta_L}{dt} \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} C\left(\frac{d\theta_m}{dt} - \frac{d\theta_L}{dt}\right) + K(\theta_m - \theta_L) = T_c \\ T_e - C_m \frac{d\theta_m}{dt} - T_c = J_m \frac{d^2\theta_m}{dt^2} \\ T_c - C_L \frac{d\theta_L}{dt} - T_L = J_L \frac{d^2\theta_L}{dt^2} \end{cases} \quad (5)$$

因为各部分阻尼系数很小,对于整个系统响应影响较小,所以可将其省略,从而对上述模型进行化简,再将微分方程经过拉氏变换得:

$$\begin{cases} T_c = K(\theta_m - \theta_L) \\ T_e - T_c = J_m \theta_m s^2 \\ T_c - T_L = J_L \theta_L s^2 \\ \omega_m = \theta_m s \\ \omega_L = \theta_L s \end{cases} \quad (6)$$

根据式(6),推导出系统模型框图,如图2所示。

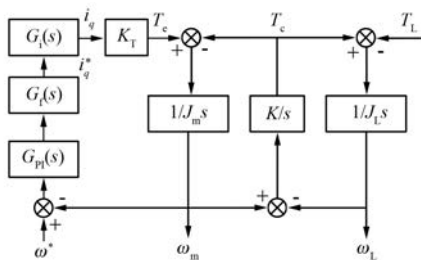


图2 基于矢量控制的二质量系统模型框图

图2中, ω^* 为转速给定值,与电机转速 ω_m 一同输入转速环PI调节器 $G_{pi}(s)$,经过低通滤波器 $G_f(s)$ 减小测量噪声影响后得到电流给定值 i_q^* ,然后经过电流控制环PI调节器 $G_i(s)$,得到电流值 i_q ,再利用电磁转矩系数 K_T 计算得到电磁转矩 T_e ,将其经过扭转弹簧与负载转矩 T_L 连接,最后由拉氏变换得到负载转速 ω_L 。

进而可得系统中电机转速、电磁转矩、负载转速间的传递函数:

$$G_m(s) = \frac{\omega_m}{T_e} = \frac{J_L s^2 + K}{J_m J_L s^3 + (J_m + J_L) K s} \quad (7)$$

$$G_L(s) = \frac{\omega_L}{T_e} = \frac{K}{J_m J_L s^3 + (J_m + J_L) K s} \quad (8)$$

2 柔性负载谐振抑制方法

2.1 谐振产生原因

由式(7)经过移项整理后的电机转速与电磁

转矩间的传递函数为

$$G_m(s) = \frac{\omega_m}{T_e} = \frac{1}{J_m s} \frac{s^2 + K/J_L}{s^2 + (1/J_m + 1/J_L) K} \quad (9)$$

由式(9)可得,PMSM 柔性负载系统中加入的共轭零极点为

$$\begin{cases} \omega_1^2 = K/J_L \\ \omega_2^2 = (1/J_m + 1/J_L) K \end{cases} \quad (10)$$

由于共轭零极点的引入,影响了电机侧和负载侧的转速响应。系统模型 Bode 图如图3所示。由图3可知, ω_1 为谐振频率,此处幅值增益最大即有明显波峰,影响系统的稳定性。如果该频率带宽处于系统带宽内,却不进行峰值抑制,则会产生振荡^[11],损害机械传动装置。 ω_2 为反谐振频率,此处幅值增益最小出现明显波谷,而在实际系统中,采样后会经过低通滤波器作用,只体现谐振频率点 ω_1 ,因此反谐振频率点 ω_2 不是谐振抑制的主要频率^[12]。

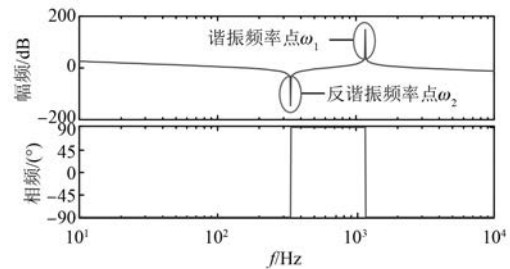


图3 系统模型 Bode 图

由于在实际系统中,考虑的是负载侧转速控制,因此对不同参数下的负载侧的谐振现象进行分析,如图4所示。由图4可以看出,当弹性系数 K 变大时,谐振频率变大且幅值增加,此时振荡加剧;当负载转动惯量 J_L 增大时,谐振频率减小且幅值减弱,此时振荡减缓。由此可知,关键参数弹性系数 K 与负载转动惯量 J_L 的共同作用决定了谐振的频率与幅值。

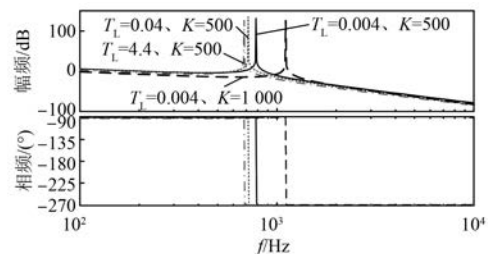


图4 不同参数下负载侧系统 Bode 图

2.2 转速反馈谐振抑制原理

传统 PI 调节虽然能在一定程度上谐振抑制,但是该方法在超调抑制和抗干扰能力上存在局限,且对系统的负载惯量比有范围要求,易出现欠阻尼和过阻尼现象,难以取得满意的谐振抑制效果^[13]。本文提出的基于转速反馈补偿调节的谐振抑制方法,通过高通滤波器得到电机转速中引起系统产生谐振的高频信号,将所提取的高频信号以转矩增量的形式对电磁转矩输出进行反馈调整,以增大电磁转矩的垂直分量系数,进而增大轴端阻尼系数,从而达到抑制柔性负载谐振的目的。与转矩或电流的变化相比,转速变化的速度较慢,且谐波含量少,通过转速变化来观察谐振的现象能够得到更准确的反馈增量。

在图 2 的基础上,引入有增量补偿的转速反馈环,得到基于转速负反馈的机械谐振抑制系统结构框图如图 5 所示。其中,采用的高通滤波器 $G_q(s)$ 为

$$G_q(s) = \frac{T_q s}{T_q s + 1} \quad (11)$$

式中: T_q 为滤波器的时间常数。

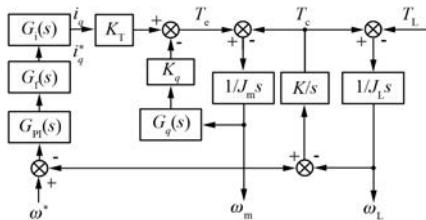


图 5 基于转速反馈的系统框图

由图 5 可得,加入转速反馈抑制后的系统中负载转速与电磁转矩之间的传递函数:

$$\frac{\omega_L}{T_e} = (\omega_1^2 T_q s + \omega_1^2) / [(\omega_2^2 J_m + \omega_1^2 T_q K_q) s + \omega_2^2 J_m T_q s^2 + (J_m + K_q T_q) s^3 + J_m T_q s^4] \quad (12)$$

一般情况下,负载转矩 T_L 在系统运行时变化较慢,甚至基本不变化。因此,在分析负载谐振时,令负载转矩增量 $\Delta T_L = 0$,则电机转速增量 $\Delta \omega_m$ 为

$$\Delta \omega_m = j \left(\frac{\omega}{K} - \frac{1}{\omega J_L} \right) \Delta T_e \quad (13)$$

当负载谐振发生时,弹性轴上转矩的波动 ΔT_e 会导致电机转速的波动 $\Delta \omega_m$,则转速负反馈

抑制环中转矩反馈增量 ΔT_e^* 为

$$\Delta T_e^* = \Delta \omega_m K_q \frac{T_q s}{T_q s + 1} \quad (14)$$

式中: K_q 为反馈系数。

又由所建柔性负载数学模型可得轴上转矩与电磁转矩关系式如下:

$$\frac{T_c}{T_e} = \frac{J_L K}{(J_m + J_L) K + (J_m + J_L) C s + J_m J_L s^2} \quad (15)$$

将式(15)用增量方式表达,可得频率特性方程为

$$\frac{K J_L}{J_m + J_L} \Delta T_e = \left[\left(K - \frac{J_m J_L}{J_m + J_L} \omega^2 \right) + j \omega C \right] \Delta T_e \quad (16)$$

根据式(13)、式(14)、式(16)分析三者相位之间的关系可知,电磁转矩增量 ΔT_e 的水平分量与轴上转矩增量 ΔT_c 反向,能够增加系统动态响应的速度; ΔT_e 的垂直分量与 ΔT_c 垂直,可减缓电机转速的波动。设对应分解方向上的系数为 b_1 、 b_2 ,则有:

$$\begin{cases} \Delta T_{e1} = b_1 \Delta T_c \\ \Delta T_{e2} = b_2 \Delta T_c \\ \Delta T_e = b_1 \Delta T_c + j b_2 \Delta T_c \end{cases} \quad (17)$$

将式(17)代入式(16),可得:

$$\left\{ \left[\left(K - \frac{K J_L}{J_m + J_L} b_1 \right) - \frac{J_m J_L}{J_m + J_L} \omega^2 \right] + j \left[- \frac{K J_L}{J_m + J_L} b_2 + \omega C \right] \right\} \Delta T_c = 0 \quad (18)$$

令式(18)的虚部为零,可得表示抑制转速波动的系数 b_2 为

$$b_2 = \omega C \frac{J_m + J_L}{K J_L} \quad (19)$$

可见,轴上阻尼系数与 b_2 成正比,通过转矩反馈增量 ΔT_e^* 的加入, b_2 变大,达到增加系统阻尼的目的,从而实现谐振抑制的效果。

根据式(12)可以看出,在系统参数确定的情况下,反馈系数 K_q 和时间参数 T_q 是影响负载谐振抑制效果的关键因素。通过控制变量法进行分析,当 $T_q = 0.002$ 保持不变时,考虑到 K_q 取值过大会影响系统稳定性,过小又可能达不到理想的增量补偿作用和谐振抑制效果,因此分别取 $K_q =$

0.1、1、5 进行反馈抑制。不同 K_q 对应的负载侧系统 Bode 图如图 6 所示。

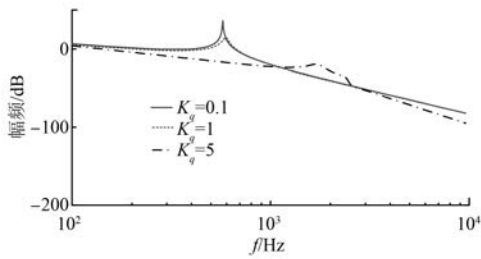


图 6 不同 K_q 对应的负载侧系统 Bode 图

从图 6 可以看出,随着 K_q 的增大,谐振频率 ω_1 处的幅频明显减小,波峰变平缓,即谐振抑制结果越来越好。可见通过对于反馈系数 K_q 的调节可以逐渐提升系统的控制性能。

对于时间常数 T_q 范围的确定,若转速反馈速度很快,则 T_q 趋近于 0,此时 $G(s)$ 为 0;若转速反馈速度很慢,则 T_q 趋近于无穷,此时 $G(s)$ 近似为 1。可根据两极端假设情况的频率响应曲线的交点来选择适当的时间常数,以实现良好的谐振抑制效果。

3 仿真结果及分析

为了验证本文所提转速反馈增量补偿的方法对 PMSM 驱动柔性负载的谐振抑制效果,在 MATLAB/Simulink 上搭建了基于矢量控制的 PMSM 驱动柔性负载系统的二质量仿真模型。PMSM 参数如表 1 所示。转速外环 PI 调节器参数为 $k_p=0.025, k_i=6.25$;电流内环 PI 调节器参数为 $k_p=500, k_i=10\ 000$ 。

表 1 PMSM 参数

参数名称	参数值
定子电阻 R_s/Ω	5.25
d 轴电感 L_d/mH	36
q 轴电感 L_q/mH	24
永磁磁链幅值 ψ_f/Wb	0.8
极对数 p	2
电机转动惯量 $J_m/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	0.000 1
负载等效转动惯量 $J_L/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	0.004 4
轴上阻尼系数 C	2
轴上弹性系数 K	120
采样时间 $T_s/\mu\text{s}$	50
定子电流最大值 I_{max}/A	10

图 7 所示为带有机械谐振的转速波形图。仿真工况设置为:额定转速 300 r/min,给定负载 4 N·m,采样频率 20 kHz。可以看出,在转速突变的过程中,由于柔性负载的引入,转速有明显的振荡现象。分析图 7 的动态性能,上升时间 $t_r=0.7\text{ s}$,超调 $\sigma=20.3\%$ 。

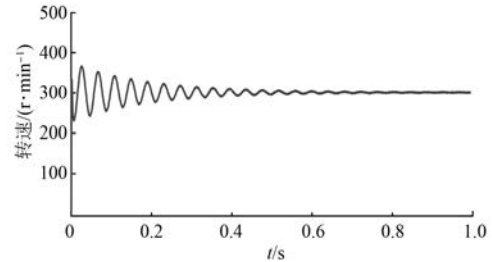


图 7 带有机械谐振的转速波形图

基于 PI 调节的谐振抑制仿真图如图 8 所示。由图 8 可以看出,通过调节合适的 PI 参数,能够在一定程度上抑制谐振现象。在 $k_p=0.001, k_i=12$ 的条件下,转速的上升时间 $t_r=0.26\text{ s}$,超调 $\sigma=19.67\%$ 。与图 7 相比,基于 PI 调节器的柔性负载谐振抑制方法能够获得较好的抑制效果。

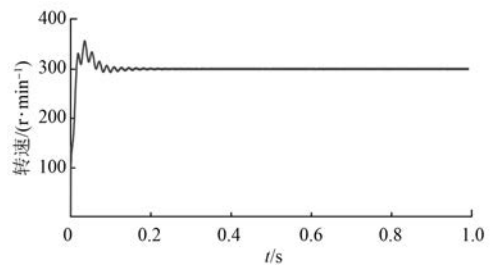


图 8 基于 PI 调节的谐振抑制仿真图

图 9 所示为基于转速反馈增量补偿的谐振抑制仿真波形,仿真工况设置与图 7 一致。在参数设定为 $K_q=1, T_q=0.001$ 的条件下,转速在 0.12 s 达到稳定,超调 $\sigma=10.67\%$,比图 8 具有更小的超调和更快的稳定速度,而且谐振抑制效果更为明显。为了寻找最优的参数,以达到最好的谐振抑制效果,通过参数设计方法的不断调试,得到 $K_q=5, T_q=0.002$ 的仿真曲线。可以看出,此时系统的谐振现象基本消除,上升时间减小为 $t_r=0.03\text{ s}$,基本无超调现象,体现了该控制策略良好的谐振抑制性能。

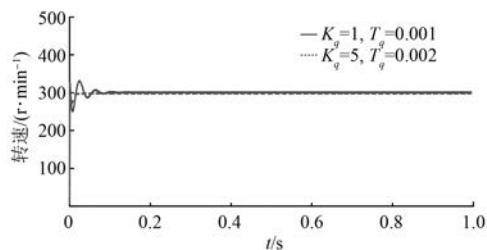


图9 基于转速反馈的谐振抑制仿真图

4 结 语

针对 PMSM 驱动柔性负载运动时产生的机械谐振问题,本文提出一种基于转速反馈补偿的谐振抑制方法。首先,搭建了 PMSM 驱动柔性负载的数学模型,分析了系统谐振的产生原因;然后,研究了转速反馈补偿策略的本质,以及谐振抑制的机理,并分析了反馈系数和时间常数对系统的影响;最后,通过仿真对该控制方法进行验证。结果表明,与传统 PI 调节器的谐振抑制方法相比,本文提出的基于转速反馈增量补偿的方法易于实现实际系统、操作简单、谐振抑制效果好,同时提高了系统极点的自由度,使系统变得更加灵活。

【参考文献】

- [1] DAI Y, SONG L, CUI S. Development of PMSM drives for hybrid electric car applications[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2007, 43(1): 434.
- [2] 曾晰, 申秀敏, 李利明. 新型纯电动汽车抖动现象测试与分析[J]. 工程与试验, 2017, 57(1): 41.
- [3] 龚文全, 罗炳章. 基于自适应陷波滤波器的伺服系统谐振频率估计及抑制[J]. 电机与控制应用, 2019, 46(11): 37.

- [4] 韦凤. 一种伺服驱动定位末端抖振问题的抑制分析及解决办法[J]. 机电工程技术, 2018, 47(5): 187.
- [5] 付永领, 罗婉琴, 汪明霞. 抑制低频谐振的多阶系统伺服控制器设计[J]. 液压与气动, 2010(12): 58.
- [6] 崔桂梅, 赵继威. 基于矢量控制和干扰前馈补偿的同步电机扭振控制[J]. 控制工程, 2014, 21(3): 330.
- [7] BOUHERAOUA M, WANG J, ATALLAH K. Design and implementation of an observer-based state feedback controller for a pseudo direct drive[J]. IET Electric Power Applications, 2013, 7(8): 643.
- [8] SHU T, GHARAATY S, XIE W, et al. Dynamic path tracking of industrial robots with high accuracy using photogrammetry sensor[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2018, 23(3): 1159.
- [9] 丁有爽, 肖曦. 基于负载位置反馈的永磁同步电机驱动柔性负载谐振抑制方法[J]. 电工技术学报, 2017, 32(11): 96.
- [10] HODGSON D, MECROW B C, GADOUE S M, et al. Effect of vehicle mass changes on the accuracy of Kalman filter estimation of electric vehicle speed[J]. IET Electrical Systems in Transportation, 2013, 3(3): 67.
- [11] 马小亮. 利用电气阻尼抑制双环调速系统轴扭振机理[J]. 电气传动, 2018, 48(2): 3.
- [12] 王昱忠, 何平, 王志成, 等. 基于自适应陷波器的伺服系统谐振抑制[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2019(1): 68.
- [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.

声 明

本刊已许可万方数据、重庆维普、中国学术期刊(光盘版)电子杂志社、北京世纪超星信息技术发展有限责任公司在其网站及其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网

络传播本刊全文。该社著作权使用费与本刊相关费用抵消。如作者不同意文章被收录,请在来稿时向本刊声明,本刊将做适当处理。

《电机与控制应用》编辑部