

# 电机模拟器系统设计与应用

王志福<sup>1</sup>, 王泽尚<sup>1</sup>, 潘琼<sup>1,2</sup>, 郭世成<sup>3</sup>

(1. 北京理工大学电动车辆国家工程研究中心, 北京 100081; 2. 北京理工大学长三角研究院(嘉兴), 浙江嘉兴 314011; 3. 广西科技大学自动化学院, 广西柳州 545616)

**摘要:** 电机驱动控制系统的测试一般采用机械负载对拖台架来实施, 然而传统的电机对拖台架成本高, 体积大, 灵活度低且存在安全隐患。本文设计了一种电机模拟器系统, 该系统由实时处理器、功率逆变器和接口滤波电感电路组成, 依托电机模型、高性能接口电流控制算法、高开关频率功率逆变器, 可实现目标电机电气特性和机械特性的模拟, 从而替代传统的机械台架对电机驱动控制系统开展功率级测试, 并通过实验验证了本文设计的电机模拟器的有效性。

**关键词:** 电机模拟器; 电机驱动; 电流控制; 电机驱动系统测试

中图分类号: TM30, TP273

文献标识码:

## Design and Application of Electric Motor Emulator

Wang Zhifu<sup>1</sup>, Wang Zeshang<sup>1</sup>, Pan Qiong<sup>1,2</sup>, Guo Shicheng

(1. National Engineering Research Center of EVS, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 2. Yangtze Delta Region Academy of Beijing Institute of Technology, Jiaxing, Zhejiang 314011, China; 3. School of Automation, Guangxi University of Science & Technology, Liuzhou, Guangxi 545026, China;)

**Abstract:** Motor drive control systems are typically tested by employing mechanical loads on dynamometer test benches. However, traditional motor dynamometers are expensive, bulky, lack flexibility, and pose safety concerns. In this paper, an electric motor emulator system is designed, consisting of a real-time processor, a power inverter, and an interface filter inductor circuit. Leveraging motor models, high-performance interface current control algorithms, and high-frequency power inverters, this system can simulate the electrical and mechanical characteristics of the target motor, thus replacing traditional dynamometer test benches for power-level testing of motor drive control systems. This system allows for the emulation of load requirements and fault injection via software, enhancing the testing efficiency of motor control units and reducing the development cycle for motor controllers.

**Keywords:** electric motor emulator, electric motor drive, current control, motor drive system test

## 1 引言

电驱动系统是新能源车辆的核心之一，针对电机控制系统的研发已成为新能源车辆领域的研究热点。目前相关开发测试主要依靠机械负载台架，一方面成本高、效率低，对一些威胁车辆安全的故障工况（如电机缺相、短路等）、极限工况（转速、转矩突增）的测试存在较大安全风险，同时难以在整车开发中实现对电驱动系统的充分测试；另一方面虽可通过测功机实现部分能量回收，但由于系统存在机械损耗，大量电能消耗在台架上，能量回收效率低，在“碳中和、碳达峰”的大背景下不利于节能减排的实现。

针对上述问题，本文设计的电机模拟器通过电力电子器件和控制算法实现对真实电机端口电流、电压特性的模拟，依托“数字仿真+功率器件”的组合，实现与电机控制驱动系统的功率级交互，是用于测试电机控制器性能的新型解决方案。

## 2 电机模拟器系统组成

### 2.1 电机模拟器系统拓扑结构

电机模拟器系统拓扑结构如图 1 所示。左侧为电机驱动单元，由电机控制器和驱动逆变器组成，用于运行电机控制算法并输出电机运行所需的驱动电压及电流，作为被测试部分；右侧为本文设计的电机模拟器，由实时处理器、接口电路、功率级逆变器及双向电源组成，用于替代机械负载台架。

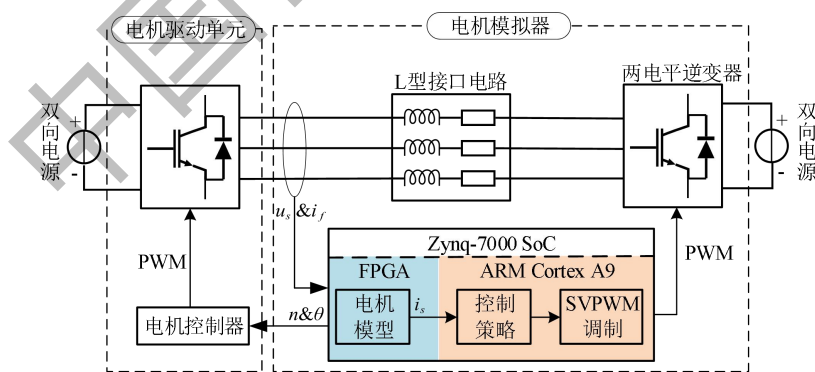


图 1 电机模拟器系统拓扑结构

实时处理器作为控制与计算核心，主要运行电机模型、控制策略与逆变器调制策略等软件算法，对实时性要求较高。通常情况下，电机模型的解算速度需在 1us 以内，以实现电机特性的高精度仿真；控制策略以及调制策略需在 20us 内计算完成，以提高电机模拟器控制系统的等效带宽，从而进一步保证电机模拟器的精度。因此，常规处理器无法满足电机模

拟器的高实时性、高运算速度的需求。本文选择 Zynq-7000 SoC 片上处理系统作为实时处理器，其内部的 FPGA 单元运行电机模型，ARM Cortex A9 单元运行控制算法以及调制策略，二者之间通过高速总线进行数据传输，满足低时延，高实时性的要求。

两电平逆变器作为实时处理器的执行部件，用以输出指令电压。为降低接口电路中电流谐波含量，提高模拟精度和控制带宽，逆变器开关频率应不低于 50kHz。本文选择 SiC MOSFET 作为逆变器的功率开关器件，并设计了相应的驱动电路，以满足电机模拟器系统的要求。

接口电路用于连接电机模拟器与被测电机驱动单元，是二者功率交互的通道，同时起到滤波的作用。接口电路主要分为 L 型与 LCL 型。其中，L 型接口电路结构简单，控制难度较低；LCL 型为三阶系统，存在谐振尖峰，控制难度较大。因此，本文选取 L 型作为接口滤波电路。

电机模拟器需采用双向电源供电，负责能量供给的同时，吸收从电机驱动单元传递的功率。当电机驱动单元也采用双向电源供电时，可实现其四象限测试。且两侧供电电源需要进行隔离。

## 2.2 电机模拟器系统工作原理

电机驱动单元中运行电机 FOC 控制程序，并输出驱动电压。该驱动电压经电压传感器采集后传递至实时处理器，作为内部电机模型的输入信号，在 FPGA 中进行高速实时计算，解算出的电流信号作为接口电路中实际电流的参考电流，经高速总线传输至运行于 ARM Cortex A9 中，作为电流控制策略的参考输入，并与实时采集的接口电流组成负反馈闭环系统，输出控制指令。该电压指令经 SVPWM 调制后输出 PWM 信号，控制逆变器输出控制电压。

# 3 电机模拟器系统软硬件设计

## 3.1 软件设计

电机模拟器软件程序分布示意图如图 2 所示，FPGA 中的电机模型以小于 1 $\mu$ s 的计算周期输出参考电流、转速、转角和转矩信息，并通过 AXI 总线接口传输至 ARM 中参与电流闭环控制。电流 PI 闭环控制策略运行于 ARM 中的定时器中断，中断周期为 20 $\mu$ s。

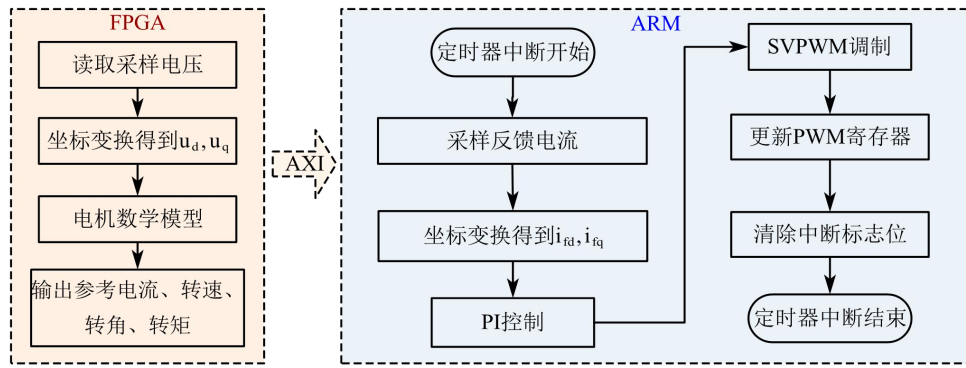


图2 电机模拟器程序部署示意图

### 1) 电机数学模型

本文选取永磁同步电机作为目标电机，其 dq 轴电压方程为

$$\begin{cases} u_{sd} = i_{sd}R_s + L_{sd} \frac{d}{dt}i_{sd} - \omega_e L_{sq} i_{sq} \\ u_{sq} = i_{sq}R_s + L_{sq} \frac{d}{dt}i_{sq} + \omega_e (L_{sd}i_{sd} + \psi_f) \end{cases} \quad (1)$$

式中， $i_{sd}$  和  $i_{sq}$  分别表示 d、q 轴电流； $u_{sd}$  和  $u_{sq}$  分别表示 MDU 侧端电压的 d、q 轴分量； $R_s$  表示永磁同步电机相电阻； $L_{sd}$  和  $L_{sq}$  分别表示 d、q 轴电感； $\omega_e$  表示电角速度； $\psi_f$  表示永磁体磁链。

电磁转矩方程和运动方程分别为

$$T_e = \frac{3}{2} p_n \psi_f i_{sq} + \frac{3}{2} p_n i_{sd} i_{sq} (L_{sd} - L_{sq}) \quad (2)$$

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = T_e - T_l - B\omega_m \quad (3)$$

式中， $p_n$  为电机极对数， $J$  为电机转动惯量， $\omega_m$  为机械角速度， $T_l$  为负载转矩， $B$  为阻尼系数。

### 2) PI 控制器

电机模拟器电流控制框图如图 3 所示，采用 PI 控制作为电机模拟器的电流控制策略。由于电机模拟器电流环是电机驱动单元电流环的内环，因此电机模拟器电流环带宽要高于外环电流环。被测电机控制器控制周期常为 100us，因此将电机模拟器的控制周期设置为 20us，以实现更高的等效带宽。

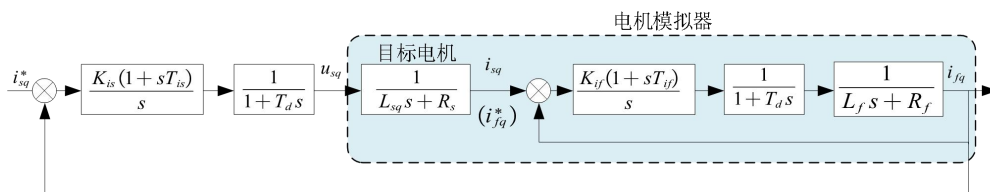


图3 电机模拟器电流环控制框图

由图3可得电机模拟器电流环闭环传递函数为

$$G(s) = \frac{i_{sq}}{i_{sq}^{**}} = \frac{K_{if}(1+sT_{if})}{L_f T_d s^3 + (L_f + R_f T_d)s^2 + (R_f + K_{if} T_{if})s + K_{if}} \quad (4)$$

在进行PI参数设计时,采用零极点对消可将式(1)简化为典型二阶系统。为得到综合最优性能,将阻尼比设置为0.707。此时,PI参数可解得为

$$\begin{cases} T_{if} = \frac{L_f}{R_f} \\ K_{if} = \frac{R_f}{2T_d} \end{cases} \quad (5)$$

### 3) 电机匝间短路故障模型

本文选取永磁同步电机定子绕组匝间短路作为故障模拟,假设PMSM发生A相匝间短路故障, $n$ 为短路匝数, $N$ 为故障相总匝数, $r_g$ 为短路电阻, $R_g$ 为短路匝内电阻, $R_s$ 为相电阻,则故障示意图如图4所示:

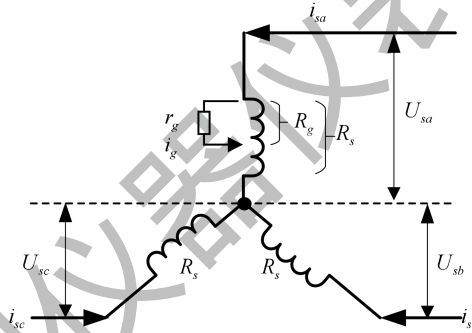


图4 匝间短路故障示意图

与PMSM数学模型相比,发生匝间短路故障时电路中增加了故障环,假定用 $k$ 表征故障的严重程度,不考虑磁场饱和,当PMSM发生A相匝间短路故障时,PMSM在匝间短路故障情况下的dq轴电压方程式可表为:

$$\begin{aligned} U_{sd} &= R_s i_{sd} + \frac{2}{3} k R_s i_g \cos(\theta) + L_{sd} \frac{di_{sd}}{dt} - \frac{2}{3} k L_{sd} \frac{di_g}{dt} \cos(\theta) \\ &\quad + \frac{2}{3} k \omega_e L_{sd} i_g \cos(\theta) - \omega_e L_{sq} i_{sq} - \frac{2}{3} k \omega_e L_{sq} i_g \sin(\theta) \\ U_{sq} &= R_s i_{sq} + \frac{2}{3} k R_s i_g \sin(\theta) + L_{sq} \frac{di_{sq}}{dt} + \omega_e L_{sd} i_{sd} + \omega_e \psi_f \\ &\quad - \frac{2}{3} k \omega_e L_{sd} i_g \cos(\theta) + \frac{2}{3} k L_{sq} \frac{di_g}{dt} \sin(\theta) + \frac{2}{3} k L_q \omega_e i_g \cos(\theta) \end{aligned} \quad (6)$$

式中,  $k = \frac{n}{N}$ 。

短路电流部分  $i_g$  计算公式为:

$$i_g = -\frac{k(U_{sd} \cos(\theta) - U_{sq} \sin(\theta))}{k(1-k)R_s + r_g} \quad (7)$$

## 3.2 硬件设计

### 1) 接口电路设计

本文选择 L 型电路作为接口滤波电路, 其在电机模拟器中的三相等效电路如图 5 所示。

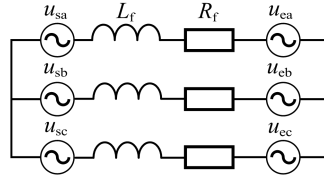


图 5 电机模拟器等效模型

图中  $u_{sj}$  ( $j = \{a, b, c\}$ ) 为 MDU 侧逆变器输出的三相电压, 同时该电压经采样后作为电机模型的输入;  $u_{ej}$  为 EME 侧逆变器输出的三相电压;  $L_f$  和  $R_f$  分别表示接口电路的实际电感值和电阻值; 其三相坐标系下的电压方程为

$$u_{sj} - u_{ej} = R_f i_{fj} + L_f \frac{di_{fj}}{dt} \quad (8)$$

式中,  $i_{fj}$  表示接口电路三相电流。

不同的接口电路电感参数对电机模拟器性能会产生影响, 电感过低会增大纹波, 给电流控制带来困难; 电感过大会降低系统的动态响应速度。综合考虑系统动态响应和谐波抑制能力, 可得电感最终的取值范围为

$$\frac{2}{3} \frac{U_{dc} - U_{sa}}{\Delta i_{\max}} \frac{3U_{sa}}{U_{dc}} \leq L_f \leq \frac{2U_{dc}}{3I_m \omega_e} \quad (9)$$

### 2) 功率逆变器设计

#### (1) 电压采集电路设计

电机驱动单元中逆变器输出的相电压是幅值为直流母线电压的方波脉冲信号, 为实现电压信号的高精度无失真采集, 需要选用高带宽的 ADC 芯片。然而, 高带宽 ADC 芯片成本高, 且对 PCB 布局布线要求较为严格。本文摒弃了模拟量采集方法, 通过高速电压比较器 TLV3501 将电压信号转变为 0-5V 数字信号, 将其输出与 FPGA 数字 I/O 口连接, 如图 6 所示。

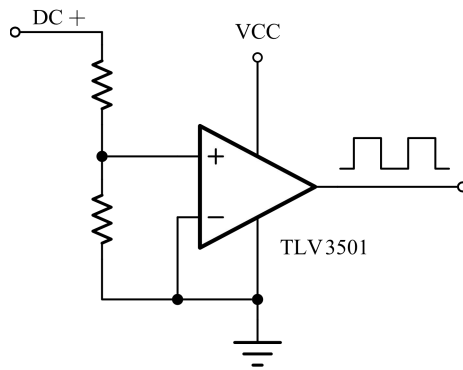


图 6 电压采集电路

### (2) 电流采集电路设计

电流传感器芯片采用 ACS712-20A, 该器件由一个精确的、低偏置的线性霍尔电路组成, 具有 80kHz 的带宽, 可以满足电流采样的精度要求, 电流采集电路如图 7 所示。该电压基准为 2.5V, 电流灵敏度为 100mV/A, 因此输出电压与电流的对应关系为

$$V_{out} = 0.1I_p + 2.5 \quad (10)$$

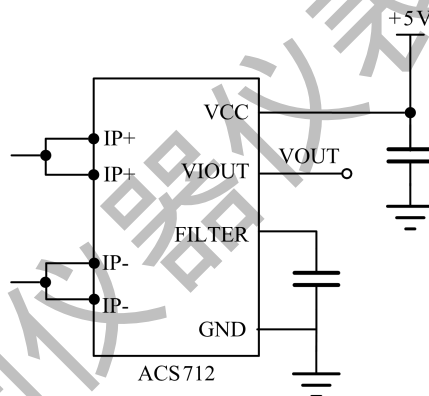


图 7 电流采集电路

### (3) SiC MOSFET 驱动电路设计

相对于传统 Si 基 MOSFET, SiC MOSFET 具有更小的通态电阻和级间电容, 在开关过程中栅极电容充放电速度更快, 导通损耗以及开关损耗更小。但是, SiC MOSFET 的栅极开启阈值电压较低, 使其容易受到干扰而发生误导通, 同时其正负栅极电压极限值也相对较低, 开关管工作时的栅极电压尖峰更容易使器件损坏, 这些基本特性使 SiC MOSFET 的高频应用受到影响。在进行驱动电路设计时, 要考虑驱动电压、驱动电路输出带载上升/下降时间、桥臂串扰抑制、驱动电路元件的  $du/dt$  限制以及可靠的保护等因素。

本文选择国产的专用 SiC MOSFET 驱动芯片, 具体型号为瞻芯电子 IVCR1401DR。该驱动芯片是一款 4A 高速智能驱动器, 内部集成 3.5V 负压偏置, 提高抗米勒效应的噪声抑

制能力。提供 5V/10mA 供电输出，最大程度降低了外部电源组件的数量。同时，芯片内置了退保和短路保护，具有过流保护功能。

#### (4) 隔离驱动电源设计

为保障三相桥臂中三个上桥臂的 SiC MOSFET 可以正常驱动，为其分别提供隔离电源，而下桥臂的 SiC MOSFET 共地，因此共用一路隔离电源。因此，本文共设计了 4 路隔离电压，为 6 个驱动芯片供电，隔离电源芯片分别采用 B1224S 和 TVRB1224YMD，如图 8 所示。

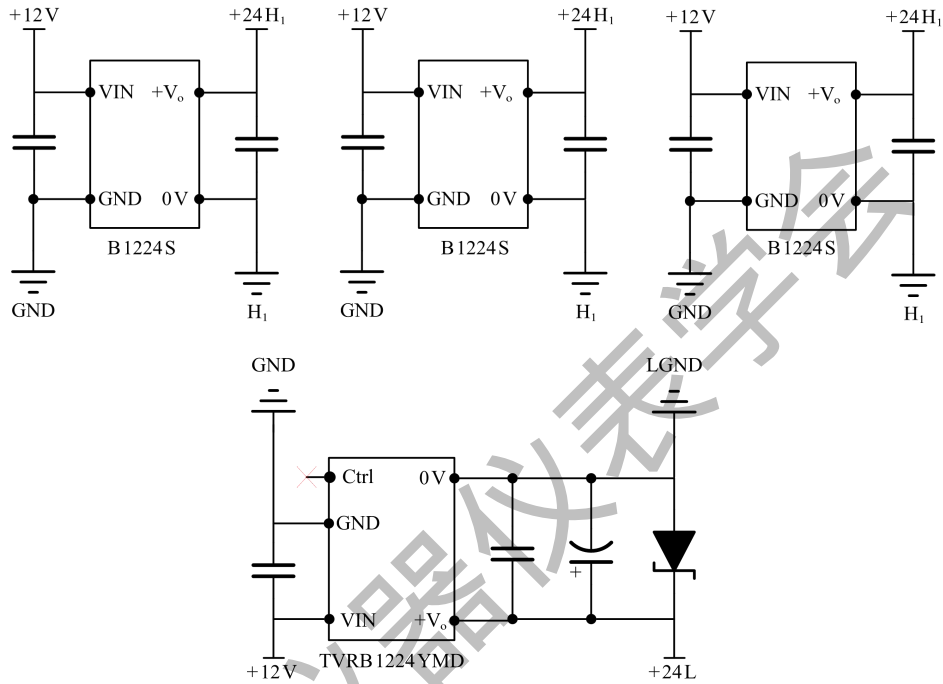


图 8 隔离电源设计

## 4 电机模拟器系统的应用

图 9 所示为本文设计的电机模拟器系统，电池模拟器用来给模拟器侧逆变器提供直流电源并吸收电路中的能量。接口电路为 L 型接口电路，用于连接电机驱动单元与模拟器侧功率逆变器。电机模拟器中的逆变器采用 SiC MOSFET 模块，开关频率 50kHz。

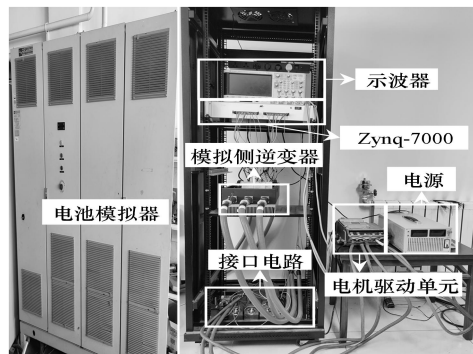


图 9 电机模拟器系统



设置工作条件为转速 400r/min，并在 0.1s 处施加 0~10N 的斜坡负载扰动，实验结果如图 10 所示。

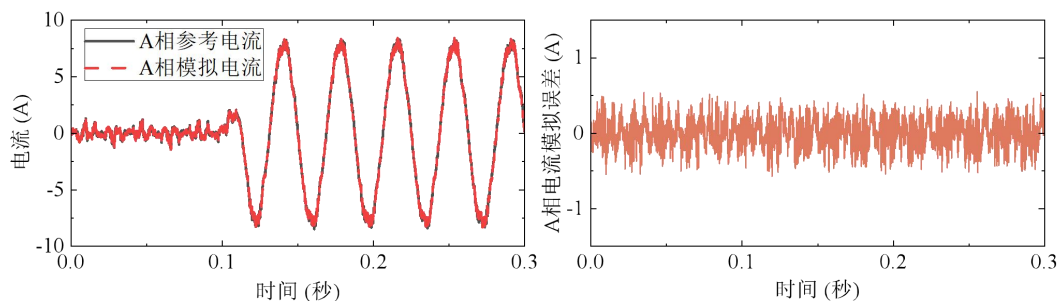


图 10 转速 400r/min 工况的 A 相电流实验结果

设置工作条件为转速 1200r/min，并在 0.1s 处施加 0~10N 的斜坡负载扰动，实验结果如图 11 所示。

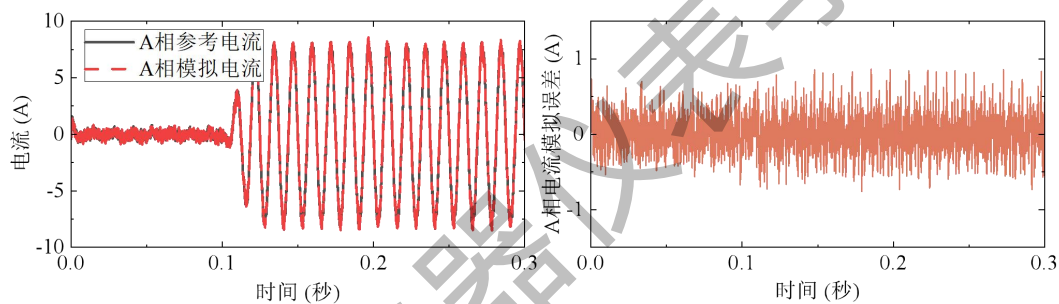


图 11 转速 1200r/min 工况的 A 相电流实验结果

加速工况下 0~0.3s 均与加速至 1200r/min，并在 0.1s 处施加 0~10N 的斜坡负载扰动，实验结果如图 12 所示。

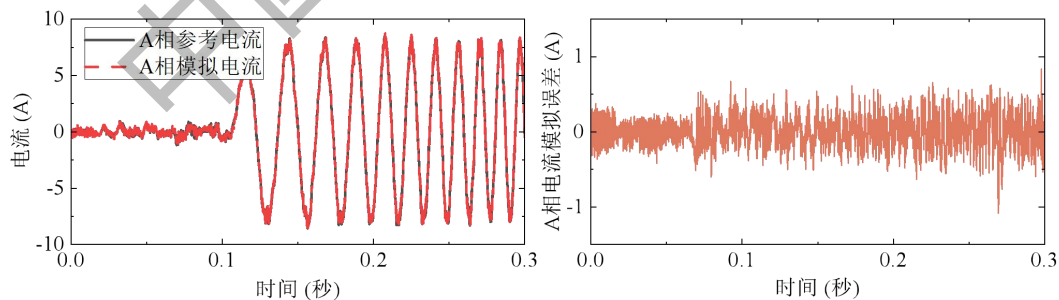


图 12 加速工况的 A 相电流实验结果

#### 参考文献:

- [1]刘丽,刘博,孙璐等.电机模拟器的电感选型及控制技术研究[J].控制与信息技术,2023(03):62-67.DOI:10.13889/j.issn.2096-5427.2023.03.008.

- [2]王志福,孙庆乐,李昊龙等.新能源汽车驱动电机硬件在环仿真技术综述[J].电气传动,2022,52(01):3-12.DOI:10.19457/j.1001-2095.dqcd22138.
- [3]郑国,李虹,郭彦青等.基于永磁同步电机的负载模拟器性能研究[J].机械设计与制造工程,2023,52(02):98-102.
- [4]李文娟,孔文豪,李鼎盛等.模拟永磁同步电机的电力电子系统实验[J].黑龙江大学自然科学学报,2022,39(02):215-221.DOI:10.13482/j.issn1001-7011.2021.12.029.
- [5]徐保荣,王家慧,梁秀等.面向电机模拟器的永磁同步电机模型研究[J].电机与控制学报,2021,25(10):78-88.DOI:10.15938/j.emc.2021.10.009.
- [6]Amitkumar K. S., Kaarthik R. Sudharshan, Pillay Pragasen. A Versatile Power-Hardware-in-the-Loop-Based Emulator for Rapid Testing of Transportation Electric Drives[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2018, 4 (4) : 901-911.
- [7]王泽尚,孙立清,王志福等.基于扰动补偿的电机模拟器电流控制策略[J/OL].电工技术学报:1-12[2023-10-24].<https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.230012>.
- [8]X. Zou, X. Xiao, P. He and Y. Song, "Permanent Magnet Synchronous Machine Emulation Based on Power Hardware-in-The-Loop Simulation," 2019 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), 2019, pp. 248-253, doi: 10.1109/IEMDC.2019.8785386.
- [9]Y. Qi, K. Ma and W. Tang, "Full-bandwidth mission profile emulation of the electric machine system with voltage reference signal transmission," IEEE Trans. Power Electron., vol. 37, no. 3, pp. 3473-3483, Mar. 2022.