

doi: 10.16104/j.issn.1673-1891.2023.03.006

数字孪生驱动下永磁同步电机滑模变结构一体化解耦控制

杨 坤, 赵夫超, 毕忠梁

(安庆职业技术学院机电工程学院, 安徽 安庆 246003)

摘要:提出数字孪生驱动下永磁同步电机(PMSM)滑模变结构一体化解耦控制方法,改善永磁同步电机控制能力。构建基于数字孪生技术的永磁同步电机控制结构,通过设备层采集实际永磁同步电机运行数据及环境数据,作为数字孪生驱动数据来源,孪生建模层依据获取永磁同步电机数据,构建永磁同步电机的数字孪生驱动模型以及虚拟场景,经虚拟模型与虚拟场景耦合后,在虚拟场景中还原永磁同步电机运行状态;在孪生控制层中设计精确线性化解耦控制方法,并构建速度、电流一体化滑膜解耦控制器,在虚拟环境中通过解决永磁同步电机速度与电流之间的非线性耦合问题,完成实体电机解耦控制;同时数字孪生控制结构各层之间通过孪生数据传输实现数据交换与指令下发,实现有效的电机控制。经实验验证:经该方法控制后,永磁同步电机可在负载突加与突卸状态下保持平稳的电流与转矩,同时还可以迅速调整电机转速,使电机保持在理想状态下运行。

关键词:数字孪生驱动;永磁同步电机;滑模变结构;解耦控制;孪生数据;虚拟场景

中图分类号:TM341 **文献标志码:**A **文章编号:**1673-1891(2023)03-0034-06

Integrated Decoupling Control of Sliding Mode Variable Structure of Permanent Magnet Synchronous Motor Driven by Digital Twin

YANG Kun, ZHAO Fuchao, BI Zhongliang

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Anqing Vocational & Technical College,
Anqing, Anhui 246003, China)

Abstract: A sliding mode variable structure integrated decoupling control method for permanent magnet synchronous motor (PMSM) driven by digital twin is proposed to improve the control capability of PMSM. The control structure of permanent magnet synchronous motor based on digital twin technology is constructed. The actual permanent magnet synchronous motor operation data and environmental data are collected through the equipment layer as the source of digital twin drive data. The twin modeling layer constructs the digital twin drive model and virtual scene of permanent magnet synchronous motor based on the data of permanent magnet synchronous motor. After the virtual model is coupled with the virtual scene, the running status of the permanent magnet synchronous motor is restored in the virtual scene; The precise linearization decoupling control method is designed in the twin control layer, and the speed and current integrated sliding film decoupling controller is constructed. In the virtual environment, the decoupling control of the solid motor is completed by solving the nonlinear coupling problem between the speed and current of the permanent magnet synchronous motor; At the same time, the digital twin control structure realizes data exchange and command issuing through twin data transmission between each layer so as to achieve effective motor control. The experimental results show that the permanent magnet synchronous motor can maintain stable current and torque under sudden load and unloading and can rapidly adjust the motor speed to keep the motor running in an ideal state.

Keywords: digital twin drive; permanent magnet synchronous motor; sliding mode variable structure; decoupling control; twin data; virtual Scenario

收稿日期:2023-02-10

基金项目:安徽省教育厅2020年度高等学校省级质量工程项目之示范实验实训中心项目(2020sxzx27);安徽省教育厅2022年度高等学校省级质量工程项目之数控技术专业教学资源库(2022jzxyk029);2020年安徽省教育厅校企双元合作开发的职业教育规划教材《数控轴加工技术》(tzpy034)。

作者简介:杨坤(1980—),男,安徽安庆人,讲师,硕士,主要研究方向:数控技术、智能制造、CAD/CAM技术、高端数控机床结构设计及优化, e-mail: xideng551304764@163.com。

0 引言

目前,永磁同步电机(PMSM)广泛应用于汽车、自动化装置等领域,属于典型的非线性交流伺服系统,可以有效处理复杂的动力学问题^[1-3]。相较于传统异步式电机,永磁同步电机更容易受到负载影响,这就使得电机滑模变结构更容易出现非线性耦合等问题^[4],为此,提出合理的电机控制方法,可以使电机运行更加安全^[5-6]。

已有较多学者对电机控制方法进行研究,刘春芳等^[7]研究改进全局滑模变结构控制,该方法通过对滑膜变结构的整体调整,实现电机控制,但该方法控制后当突加负载时电机的电流会出现异常波动,导致电机稳定性变差;张伯泽等^[8]研究电机无位置传感器矢量控制,该方法借助外部传感器采集电机运行数据,并以此设计控制方法完成电机控制,但该方法无法有效实现电机转速控制,导致电机的控制性能不佳。

数字孪生技术是一种跨尺度、跨层级的虚拟技术,该技术根据实测的物理对象数据,构建仿真,预测实体对象的虚拟模型,以此控制实体对象变换^[9-10]。本文利用数字孪生技术,构建永磁同步电机滑模变结构一体化解耦控制,实现精准的永磁同步电机控制。

1 永磁同步电机滑模变结构一体化解耦控制

1.1 基于数字孪生技术的永磁同步电机控制结构

构建基于数字孪生的永磁同步电机控制结构,通过该结构实现永磁同步电机滑模变结构一体化解耦控制。该控制结构共包含3层,分别为设备层、孪生建模层以及孪生控制层,每层严格保障永磁同步电机运行数据安全,且每层之间均通过数据传输实现链接,使永磁同步电机滑模变结构一体化解耦控制过程更加安全。通过图1表示该控制结构。

1)设备层:该层属于数据感知层,主要用于永磁同步电机数据的采集、存储等功能,并满足其他层应用的需求。

2)孪生建模层:该层的作用是实现数据孪生驱动,通过三维设计工具构建永磁同步电机的三维模型,并结合设备层数据,在虚拟场景中还原电机实际动作。

3)孪生控制层:该层用于对永磁同步电机三维模拟结果的控制,通过滑模变结构一体化解耦控制方法,抑制永磁同步电机的抖振问题。并在该层中将控制结果通过控制界面展示给运行管理人员。

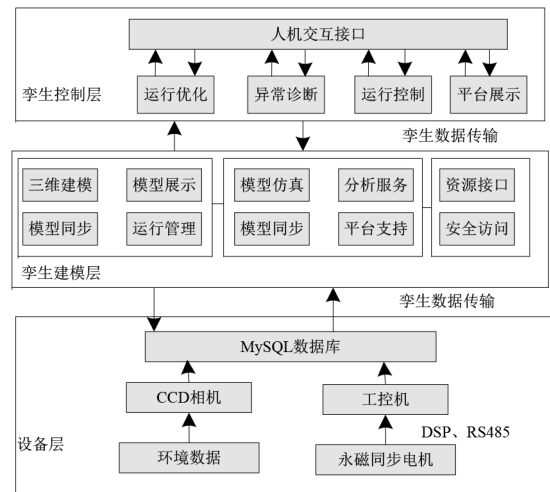


图1 基于数字孪生的电机控制结构

该控制结构主要包含以上3层,同时,该结构主要利用孪生数据传输实现数据交换、指令下发等操作。

1.2 永磁同步电机孪生数据感知

通过数字孪生控制结构下的设备层进行永磁同步电机数据采集,其中永磁同步电机环境数据通过CCD相机获取,同时该层采用1台工控机与10片数字信号处理器(DSP)组成,通过DSP与永磁同步电机的连接,采集永磁同步电机运行数据。将DSP作为下位机,通过DSP实时采集永磁同步电机运行数据并在DSP内进行滤波,之后采用RS-485总线将采集到的数据传输至工控机中,将工控机作为上位机对数据进行进一步处理,处理后数据储存至MySQL数据库中。通过图2表示设备层的数据采集过程。

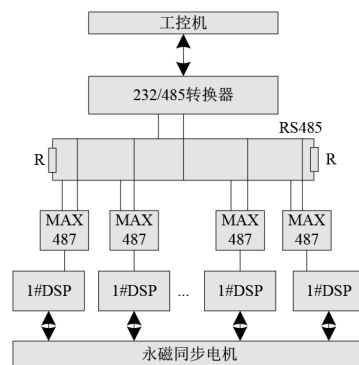


图2 设备层的数据采集过程

1.3 永磁同步电机(PMSM)孪生数据驱动

在数字孪生控制结构的孪生建模层实现PMSM的孪生数据驱动,即利用现实中的PMSM运行数据,构建相应的数字孪生驱动模型,使PMSM的真实运行场景能够通过虚拟场景进行表达^[11-12]。具体实现

的目标为:构建 PMSM 虚拟模型与虚拟场景,并设计 PMSM 的运动学模型,对其进行正逆求解,在虚拟场景中还原 PMSM 的运行状态。

按照 PMSM 的实际大小,应用 SolidWorks、3D Max 等软件绘制永磁同步电机三维模型,并通过 Unity3D 软件对 PMSM 运行状态进行编程,构建 PMSM 虚拟模型与虚拟场景。

利用图 3 中的坐标,实现 PMSM 虚拟模型与虚拟场景的耦合,在该空间坐标中, $O_w X_w Y_w Z_w$ 为虚拟世界坐标系(W系); $O_o X_o Y_o Z_o$ 为对象坐标系(O系),即永磁同步电机虚拟模型坐标; $O_v X_v Y_v Z_v$ 为观察坐标系(V系),即各个视角的坐标。

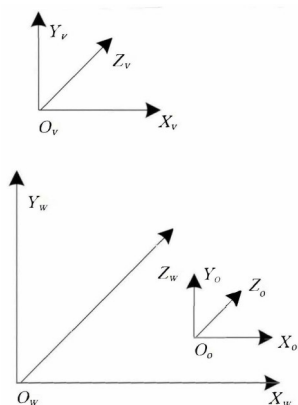


图 3 虚拟空间坐标

将 PMSM 虚拟模型坐标调整至 W 坐标系下才能完成 PMSM 运动状态的虚拟匹配,可为后续 PMSM 控制提供有利基础。假设在虚拟场景中某一位置在 W 系的坐标为 (x, y, z) ,同时在 O 系下的坐标为 (x', y', z') ,则存在:

$$[x' y' z' 1]^T = (-R)(-T)[x y z 1]^T \quad (1)$$

式中: T 为平移、缩放复合矩阵; R 为旋转矩阵。利用式(1)即可将 PMSM 融入虚拟空间,构成虚拟电机运行场景,使虚拟模型与虚拟场景耦合。同时构建 PMSM 运动学模型,采用运动学逆解方式求解 PMSM 虚拟模型实际运行状态。

1.4 PMSM 滑模变结构一体化解耦控制

在数字孪生结构中的孪生控制层通过对虚拟永磁同步电机滑模变结构一体化解耦控制,进而实现永磁同步电机实体控制。目前较为流行的机械设备控制方法为 PID 控制器,该控制器具有较高的可靠性^[13-15]。但是,由于永磁同步电机(PMSM)属于一种变量较多,因此,传统 PID 控制无法精准完成永磁同步电机控制,为此,本文基于 PMSM 的虚拟模

型,通过精准线性化理论实现电机速度与电流的解耦,并构建一体化滑模变结构控制器。

1.4.1 PMSM 精确线性化解耦

将 PMSM 在孪生数据驱动下的虚拟模型电流作为状态量,并通过式(2)表示状态方程:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{F}{L} & \omega \\ -\omega & -\frac{F}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -\omega \frac{\psi_f}{L} \end{bmatrix} \quad (2)$$

同时,将 PMSM 运动学方程通过式(3)描述:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{3p\psi_f}{2J} i_q - \frac{B}{J} \omega - \frac{T_L}{J} \quad (3)$$

式中:定子电流、电压在虚拟模型的分量依次为 i_d, i_q 与 u_d, u_q ;定子电阻为 F ;当 PMSM 的电感满足 $L_d = L_q = L$,在定子上耦合的永磁体磁链为 ψ_f ,极对数为 p 、黏滞摩擦系数为 B 、转动惯量为 J 、负载转矩为 T_L 、电角速度为 ω 。

可将 PMSM 的控制视作两输入两输出模式,假设该控制模式输入为 u_d, u_q ,则输出如式(4)所示:

$$\begin{cases} y_1 = \omega \\ y_2 = i_d \end{cases} \quad (4)$$

结合精确线性化理论,对输出结果进行求导,直至导数方程内存在输入变量,可通过式(5)表示求导结果:

$$\begin{cases} \frac{d^2 y_1}{dt^2} = \frac{3p\psi_f}{2JL} u_q - \frac{3p\psi_f}{2JL} (Fi_q + \omega i_d + \psi_f \omega) - \frac{B}{J^2} \left(\frac{3p\psi_f}{2} i_q - B\omega - T_L \right) \\ \frac{dy_2}{dt} = \frac{1}{L} u_d - \frac{F}{L} i_d + \omega i_q \end{cases} \quad (5)$$

可将式(5)简写为如下形式:

$$\begin{cases} \frac{d^2 y_1}{dt^2} = A_1 + B_{11} u_d + B_{12} u_q \\ \frac{dy_2}{dt} = A_2 + B_{21} u_d + B_{22} u_q \end{cases} \quad (6)$$

式中: $A_1 = -\frac{3p\psi_f}{2JL} (Fi_q + \omega i_d + \psi_f \omega) - \frac{B}{J^2} \left(\frac{3p\psi_f}{2} - B\omega - T_L \right)$, $B_{11} = 0$, $B_{12} = \frac{3p\psi_f}{2JL}$, $A_2 = -\frac{F}{L} i_d + \omega i_q$, $B_{21} = \frac{1}{L}$, $B_{22} = 0$, A_1, A_2 为待整定参数。假设 $B = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} \\ B_{21} & B_{22} \end{bmatrix}$,且 $\det B \neq 0$,则式(2)、式(3)以及式(6)的阶数均为 3,此时,精确化线性问题有解,假设式(7)成立:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{d^2 y_1}{dt^2} \\ \frac{dy_2}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \end{bmatrix} + B \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: V_1 、 V_2 为 PMSM 状态变量。并设定如下定义:

$$\begin{cases} M_1 = y_1 = \omega \\ M_2 = \frac{dy_1}{dt} = \frac{d\omega}{dt} \\ M_3 = y_2 = i_d \end{cases} \quad (8)$$

式中: M_1 、 M_2 、 M_3 为 x 、 y 、 z 方向上坐标。经过坐标变换,可得出线性化的控制模式,如式(9)所示:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} M_1 = M_2 \\ \frac{d}{dt} M_2 = \frac{d^2 y_1}{dt^2} = V_1 \\ \frac{d}{dt} M_3 = \frac{dy_2}{dt} = V_2 \end{cases} \quad (9)$$

此时同样对式(7)进行变换,可得到如下内容:

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = B^{-1} \begin{bmatrix} V_1 - A_1 \\ V_2 - A_2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

通过上述的线性化处理,可以仅求出变量 V_1 、 V_2 并将其代入到式(10)中,即可得到 PMSM 在虚拟模型上的电压,以此产生脉冲宽度调制(PWM)信号驱动永磁同步电机运行。

1.4.2 速度、电流一体化滑膜解耦控制器构建

为了改善本文的解耦控制模式中存在的滑膜固有抖振问题,并优化控制效果,本文通过新型指数趋近律滑膜控制方法,构建集速度、电流一体化的控制器,通过式(11)表示该新型指数趋近律:

$$\begin{aligned} \frac{ds}{dt} &= -\varepsilon |X| \operatorname{sgn}(s) - k |X| s \\ \lim_{t \rightarrow \infty} |X| &= 0, \varepsilon > 0, k > 0 \end{aligned} \quad (11)$$

式中: k 、 ε 为趋近律参数; s 为滑膜面。该控制器在常规指数趋近律基础上,引入 PMSM 状态量的绝对值 $|X|$,使得 PMSM 的滑膜面始终处于运动阶段,针对改进后的永磁同步电机控制器,假设:

$$\begin{cases} x_1 = \omega - \omega^* \\ x_2 = \frac{dx_1}{dt} = \frac{d\omega}{dt} \\ x_3 = i_d - i_d^* \end{cases} \quad (12)$$

式中: ω^* 为给定永磁同步电机转速; i_d^* 为给定电流, x_1 、 x_2 、 x_3 为滑膜面参数。取控制器滑膜面为 $s_1 = c_1 x_1 + x_2$, $s_2 = c_2 x_3$,并通过式(13)对该滑膜面进行求导:

$$\begin{cases} \frac{ds_1}{dt} = c_1 \frac{dx_1}{dt} + \frac{dx_2}{dt} = c_1 x_2 + V_1 \\ \frac{ds_2}{dt} = c_2 \frac{dx_3}{dt} = c_2 V_2 \end{cases} \quad (13)$$

式中: c 为设计参数。通过式(11)所得的趋近律对永磁同步电机控制器进行设计,假设 $X_1 = x_1$, $X_2 = x_3$,则结合式(13)可得:

$$\begin{cases} V_1 = -c_1 x_2 - \varepsilon_1 |x_1| \operatorname{sgn}(c_1 x_1 + x_2) - k_1 |x_1| (c_1 x_1 + x_2) \\ V_2 = -\varepsilon_2 |x_3| \operatorname{sgn}(c_2 x_3) / c_2 - k_2 |x_3| x_3 \end{cases} \quad (14)$$

结合式(14)与式(10),即可获取永磁同步电机一体化滑膜解耦控制器的实际输出,如式(15)所示:

$$\begin{cases} u_d = F i_d - L \omega i_q + L V_2 \\ u_q = F i_q + \frac{2BL}{3pJ\psi_f} \left(\frac{3p\psi_f}{2} i_q - B\omega - T_{L\lambda} \right) + \\ \omega i_d + \psi_f \omega + \frac{2JL}{3p\psi_f} V_1 \end{cases} \quad (15)$$

经过该一体化滑膜解耦控制器的虚拟永磁同步电机控制,即可有效强化永磁同步电机实体的运行能力。

1.5 数字孪生数据传输

在数字孪生驱动永磁同步电机控制结构中,采用 MySQL 数据库作为数据交互的媒介,利用该数据库对数据进行集中管理,并实时获取设备层的数据状态。当选取手动控制模式时,采用人机交互方式向数据库发出控制指令,控制结构根据永磁同步电机的状态实时完成虚实同步控制处理。当选取自动模式时,远程控制器按照永磁同步电机本体参数规划运动模式,此时向数据库下发指令,并传输至可编程逻辑控制器(PLC)中,在 PLC 中采用 RS485 通信方式结合 1.4 小节所述方法控制电机运行,实现永磁同步电机滑模变结构一体化解耦控制。

2 实验分析

为验证该控制方法的有效性,本文通过 MATLAB/Simulink 软件构建数字孪生驱动控制仿真模型,同时搭建实验平台,在仿真实验过程中,所采用的永磁同步电机具体参数如表 1 所示。

应用本文方法控制永磁同步电机转速,在永磁同步电机初始运行阶段,设置转速为 $900 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$,当运行至 0.6 s 时,调整转速为 $1100 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$,持续运行至 1.2 s 时,继续上调转速为 $1400 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$,分析本文方法对电机转速的控制能力,分析结果如图 4 所示。

表 1 永磁同步电机运行参数

参数	指标
定子电阻/ Ω	3.5
定子电感/mH	2.50
永磁磁链/Wb	0.178

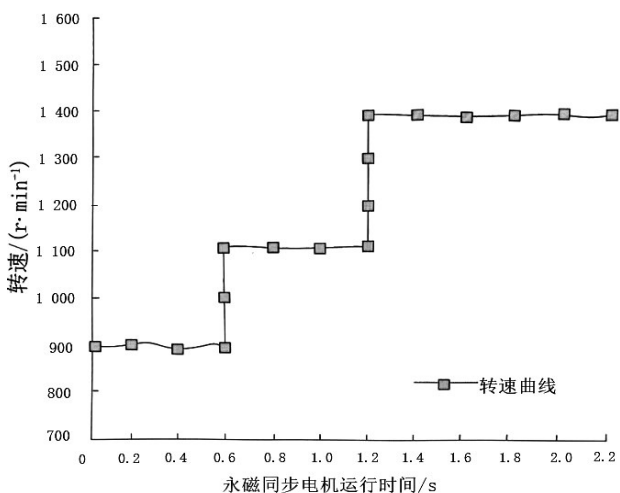


图 4 电机转速控制情况

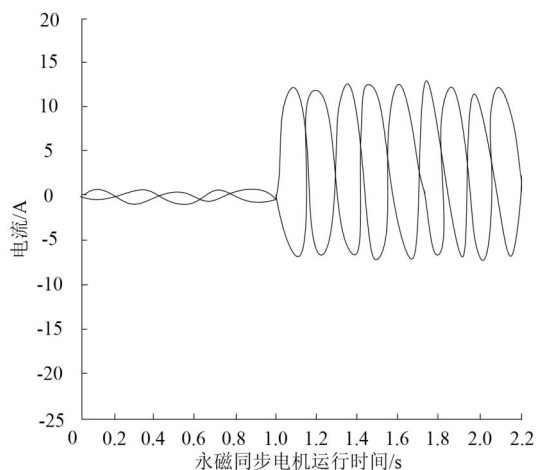
根据图 4 可知,在每个阶段设置电机转速时,本文方法均能够快速、有效控制电机达到相应转速,当电机在初始阶段设定转速为 $900 r \cdot \min^{-1}$ 时,可有效控制电机始终处于该转速运行,虽然运行过程中存在小幅度波动,但并未出现大范围变化,且在后续不断提升转速时,能够始终保持较高的转速控制能力,可有效保障永磁同步电机转速稳定。

永磁同步电机在 1.0 s 处突加负载,在 3.2 s 处突卸负载时的电流响应情况,分析结果如图 5 所示。

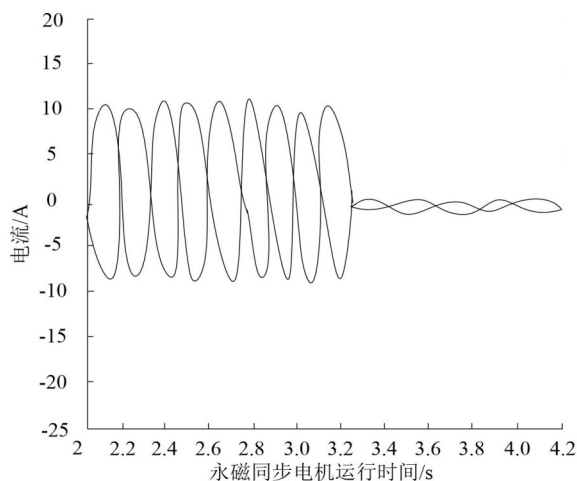
根据图 5 可知,当突然加入负载时,电机的电流会迅速放大,且放大后电流运行平稳,未影响电机正常运行,而在突卸负载后,电机电流波动范围迅速缩小,保持在 0 A 左右持续波动运行,能够快速实现永磁同步电机电流响应。

在永磁同步电机运行第 0.6 s 处突加负载,在其运行 1.2 s 处突卸负载,分析在本文方法控制下,电机的转矩响应能力,分析结果如图 6 所示。

根据图 6 可知,当突加负载时,转矩由原来的 $3 N \cdot m$ 上升至 $7 N \cdot m$,并持续在该转矩下运行,当运行至 1.2 s 处突卸负载时,转矩迅速下降,达到 $3 N \cdot m$,由此可见,通过本文方法控制后,突加、突卸负载时转矩可迅速响应。



a. 负载突加时电流响应情况



b. 负载突卸时电流响应情况

图 5 电流响应能力分析

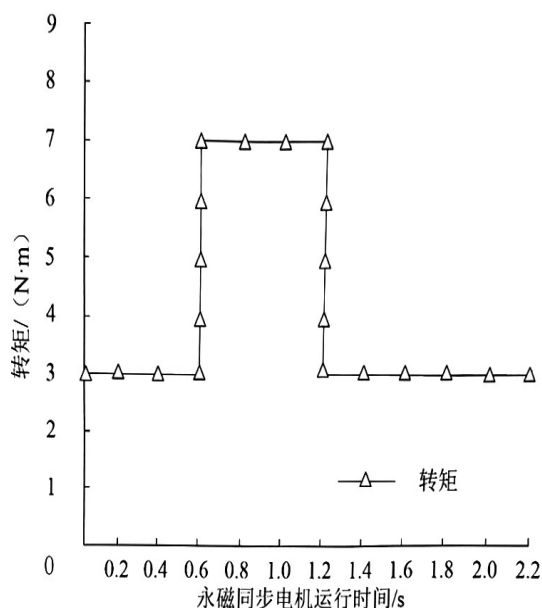


图 6 转矩响应能力分析

3 结束语

通过构建数字孪生驱动模型,将永磁同步电机的实际情况与数字孪生相结合,建立起完整的控制系统。通过实时掌握电机的各种参数,进行精准调控和优化控制,使电机在运行过程中能够保持稳定

的转速、转矩以及电流,保障永磁同步电机设备安全。此外,数字孪生驱动结构还具有可扩展性强、节省成本、提高效率等优点,在未来研究过程中,可针对现有研究结果继续进行优化设计,使永磁同步电机的每一个部件都能够得到精准控制。

参考文献:

- [1] 张志坚,荆龙,赵宇明,等.高速低开关频率下永磁同步电机的解耦控制[J].中国电机工程学报,2020,40(19):6345-6354.
- [2] 彭娟娟,黄民发,沈鸿,等.新型滑模变结构的永磁同步电机无位置控制[J].电气传动,2020,50(6):22-26.
- [3] 章春娟,王慧贞,刘伟峰,等.基于宽频带同步基频提取滤波器的永磁同步电机转子位置与转速估计[J].电工技术学报,2022,37(4):882-891.
- [4] 赵劲松,孙鑫宇,董杰,等.液驱并联机构多维力加载系统滑模解耦控制[J].中南大学学报(自然科学版),2020,51(12):3407-3417.
- [5] 魏惠芳,王丽梅.永磁直线同步电机自适应模糊神经网络时变滑模控制[J].电工技术学报,2022,37(4):861-869.
- [6] 刘宇博,王旭东,周凯.基于滑模观测器的永磁同步电机电流偏差解耦控制[J].电工技术学报,2020,35(8):1642-1652.
- [7] 刘春芳,于婷.永磁直线同步电动机改进全局滑模变结构控制研究[J].电机与控制应用,2021,48(11):21-26.
- [8] 张伯泽,宗剑,钱平.基于滑模变结构控制的内置式永磁同步电机无位置传感器矢量控制[J].电机与控制应用,2020,47(8):36-39+51.
- [9] 高扬,贺兴,艾芊.基于数字孪生驱动的智慧微电网多智能体协调优化控制策略[J].电网技术,2021,45(7):2483-2491.
- [10] 张旭辉,张超,王妙云,等.数字孪生驱动的悬臂式掘进机虚拟操控技术[J].计算机集成制造系统,2021,27(6):1617-1628.
- [11] 刘胜,郭晓杰,张兰勇.六相永磁同步电机鲁棒自适应反步滑模容错控制[J].电机与控制学报,2020,24(5):68-78+88.
- [12] 王伟达,彭浩楠,黄国强,等.四轮独立驱动电动汽车行驶稳定性分析与联合滑模变结构主动控制[J].机械工程学报,2021,57(4):103-112.
- [13] 武志涛,李帅,程万胜.基于扩展滑模扰动观测器的永磁直线同步电机定结构滑模位置跟踪控制[J].电工技术学报,2022,37(10):2503-2512.
- [14] 毛亮亮,周凯,王旭东.永磁同步电机变指数趋近律滑模控制[J].电机与控制学报,2016,20(4):106-111.
- [15] 黄俊豪,杨俊华,陈海峰,等.基于PSO优化的永磁直线同步电机混沌滑模控制[J].计算机仿真,2021,38(11):215-220+229.