

doi: 10.7690/bgzdh.2023.07.009

# 基于 UG 和 Matlab 的全方位移动平台联合仿真

叶 伟, 郑晓东, 邓路军

(中国空气动力研究与发展中心高速气动研究所, 四川 绵阳 621000)

**摘要:** 为研究某交流伺服电机驱动的 4Mecanum 轮全方位移动平台的运动控制特性及参数, 提出一种基于 UG 和 Matlab 的控制动力学联合仿真方法。分别建立该系统的 3 维动力学模型及电机伺服系统模型, 搭建 Simulink 环境下的联合仿真模型, 通过仿真验证结构和控制系统设计的合理性, 得到初步的控制参数, 为后续控制系统参数调试提供参考。联合仿真结果表明: 该系统的结构及控制系统设计合理, 各向速度控制精度均可达到 2% 以内, 满足工程实际要求。

**关键词:** Mecanum 轮; 全方位移动; 交流伺服; UG; Matlab; 联合仿真

**中图分类号:** TP391.9; TM301.2 **文献标志码:** A

## Joint Simulation of Omnidirectional Mobile Platform Based on UG and Matlab

Ye Wei, Zheng Xiaodong, Deng Lujun

(High Speed Aerodynamics Institute, China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, China)

**Abstract:** In order to study the motion control characteristics and parameters of a 4Mecanum omnidirectional mobile platform driven by an AC servo motor, a joint simulation method of control dynamics based on UG and Matlab is proposed. The 3D dynamic model and motor servo system model of the system are established respectively, and the joint simulation model under the Simulink environment is built. The rationality of the structure and control system design is verified through simulation, and the preliminary control parameters are obtained, providing reference for the subsequent control system parameter debugging. The joint simulation results show that the structure and control system design of the system are reasonable, and the speed control accuracy of each direction can reach less than 2%, which meets the practical requirements of the project.

**Keywords:** Mecanum wheel; omnidirectional motion; AC servo; UG; Matlab; joint simulation

## 0 引言

Mecanum 轮是由瑞士 Mecanum AB 公司的工程师 Bengt Ilon 于 1973 年设计提出的<sup>[1]</sup>, 其轮毂的圆周边缘装有与中心轴成一定角度且能够绕自身轴线自由旋转的辊子。当轮子旋转时, 辊子与地面接触产生的摩擦力可以分解为 2 部分: 1) 辊子自身旋转圆周切向的摩擦力, 该力较小; 2) 沿辊子轴线的摩擦力, 该力较大, 也是实现全方位移动的主要作用力, 该力又可以分解为沿轮子圆周切向的力和沿轮子轴线方向的力 2 部分, 前者可驱动平台前后运动, 后者则可以驱动平台左右运动。通过 Mecanum 轮与地面形成的特殊方向的摩擦力, 再配合各轮之间的转向、转速, 可以有效实现平台的全方位移动。

国内外众多学者相继对 Mecanum 轮全方位运动系统进行了理论分析。在国外, A. Jorge<sup>[2]</sup>采用矢量分析的方法将由辊子坐标系表示的轮子速度和平台质心坐标系中表示的轮子速度等值, 得到全向移

动平台的普遍运动学模型; P. F. Muir 等<sup>[3]</sup>则利用矩阵变换法得到了 Mecanum 轮式机器人的运动学方程。在国内, 王一治等<sup>[4]</sup>研究了 Mecanum 轮与不平地面的接触问题, 采用矢量及坐标变换方法解析了这种小车结构在不平地面条件下的运动学特性; 杨飞等<sup>[5]</sup>推导了三轮正三角形排布的 Mecanum 轮机器人的运动学模型, 比较了关键机构参数对机器人典型运动的影响。

交流伺服系统是由永磁同步电机 (permanent magnet synchronous motor, PMSM) 和调速控制系统等组成的, 在数控机床、工业机器人等伺服控制领域得到了广泛的应用, 并将在多数应用领域逐步取代直流伺服系统<sup>[6]</sup>。交流伺服系统在 Matlab Simulink 环境下的建模仿真技术目前已经比较成熟, 很多学者都对其数学模型、仿真建模方法等方面进行了深入的研究和分析<sup>[7-11]</sup>, 但是单独在 Simulink 环境下进行 PMSM 的仿真一般都是基于给定的电机负载或理想化的动力学模型, 难以真实模

收稿日期: 2023-03-19; 修回日期: 2023-04-20

作者简介: 叶 伟(1992—), 男, 四川人, 工程师, 从事机械设计、模型及支撑设计研究。E-mail: yewei.dec.11@qq.com。

拟复杂机械系统在实际运行情况下的载荷及惯性。

笔者基于 UG NX 和 Matlab Simulink 对某交流伺服电机驱动的 4Mecanum 轮全方位移动平台进行控制动力学联合仿真,可以将 Mecanum 轮在运动过程中的实际载荷及惯性作用反馈给控制系统的电机模型,从而研究其运动控制特性,进一步验证系统的结构及控制系统设计的合理性,并分析交流伺服控制系统的各项参数对其运动性能的影响。

### 1 控制动力学联合仿真方法简介

Mecanum 轮结构如图 1 所示。

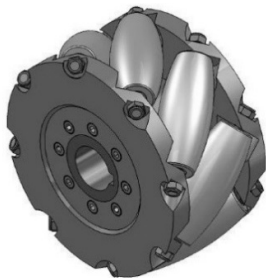


图 1 Mecanum 轮结构

基于 UGNX 和 Matlab Simulink 的控制动力学联合仿真方法<sup>[12]</sup>的主要思想:利用 UG NX 软件建立机械系统的 3 维数模,并进行运动仿真的设置,包括连杆、运动副、接触以及输入输出等,最后生成一个 Simulink 模块,称为 UG NX Motion Plant Block,该模块可直接导入 Simulink 环境,与其他控制系统模块正确连接后便可进行联合仿真,仿真结果可同时在 UG 和 Matlab 软件中读取和分析。该联合仿真方法的基本流程如下:

1) 3 维建模。在 UG 建模环境下进行 3 维建模或利用其他 3 维建模软件进行建模后导入 UG,并对零部件指派材料。

2) 仿真环境设置。求解器:RecurDyn;分析类型:动力学;RecurDyn 解算方案选项:协同仿真。

3) 创建仿真模型。主要创建连杆、运动副、接触及载荷等。

4) 创建工厂输入。工厂输入是指控制系统对机械系统的控制变量,先添加工厂输入,再将工厂输入关联至运动副的载荷上,这样实现了控制系统对机械系统的驱动。

5) 创建工厂输出。工厂输出是指机械系统给控制系统的反馈变量,首先对需要控制的运动部件添加标记,然后利用函数编辑器或传感器将标记的运动变量(如位移、速度加速度等)关联给工厂输出。

6) 仿真求解。解算类型:常规驱动;分析类型:

控制动力学;时间和步数可根据实际情况设置,最后正确设置重力方向和重力值,协同仿真主机程序选择 Simulink,求解完成生成 2 个 m 文件,分别为 xxxx\_plant.m 和 xxxx\_plantIO.m。

7) 创建运动控制仿真模型。进入 Matlab 环境,打开 xxxx\_plant.m 生成 NX Motion Plant Block,如图 2 所示,该模块就是机械系统模型,然后利用 Simulink 工具箱构建控制系统模型,并与机械系统模块进行输入输出连接。



NX Motion Plant Block

图 2 NX Motion Plant Block 模块

8) 联合仿真。在 Simulink Model 中将系统模型搭建完毕后,设置仿真求解器类型、仿真时间、步长及相对误差,点击运行即可完成联合仿真。

### 2 全方位移动平台仿真模型

如图 3—4 所示,全方位移动平台结构主要由车架、负载、车轮架、联轴器、减速器及伺服电机组。四轮布局采用图 5 所示(底部俯视视图)的方式,该布局方式在典型四轮布局方式中属于动力学最优的方式<sup>[13]</sup>。

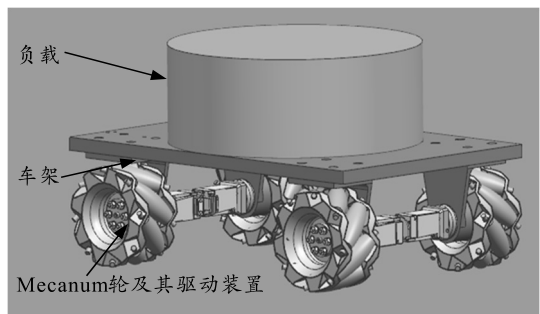


图 3 全方位移动平台结构

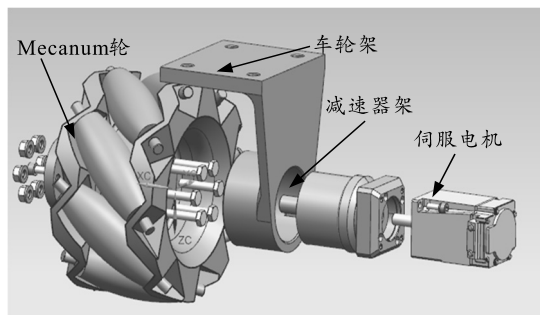


图 4 Mecanum 轮驱动装置结构

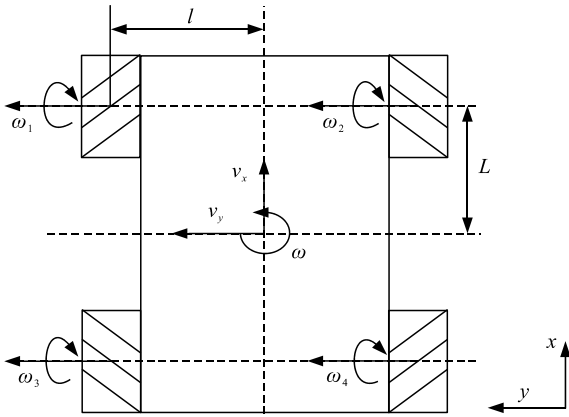


图 5 四轮布局

### 2.1 全方位移动平台运动学模型

利用矢量分析法，可以得到该 4 Mecanum 轮全方位移动平台的运动学方程<sup>[4]</sup>如下：

1) 正运动学方程为：

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega \end{bmatrix} = \frac{r_{hub}}{4} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ -1 & 1 & 1 & -1 \\ \frac{-1}{L+l} & \frac{1}{L+l} & \frac{-1}{L+l} & \frac{1}{L+l} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \\ \omega_4 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中：\$(v\_x, v\_y, \omega)^T\$ 表示平台中心速度；\$(\omega\_1, \omega\_2, \omega\_3, \omega\_4)^T\$ 表示 4 个轮子的角速度；\$r\_{hub}\$ 表示 Mecanum 轮半径；\$L\$ 和 \$l\$ 分别表示轮心的 \$x\$ 向间距和 \$y\$ 向间距的一半。

2) 逆运动学方程为：

$$\begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \\ \omega_4 \end{bmatrix} = \frac{1}{r_{hub}} \begin{bmatrix} 1 & -1 & -L-l \\ 1 & 1 & L+l \\ 1 & 1 & -L-l \\ 1 & -1 & L+l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega \end{bmatrix} \quad (2)$$

得到该全方位移动平台的运动学方程，有助于后续控制系统仿真模型的建立以及对其运动仿真的结果进行分析比对。

### 2.2 全方位移动平台联合仿真模型

全方位移动平台联合仿真模型的建立参照联合仿真方法的基本步骤进行。其中需要对以下设置进行详细说明：

1) 材料指定。车架、负载、车轮架、联轴器指派材料为：Steel；Mecanum 轮轮毂指派材料为：Aluminum\_6061；Mecanum 轮小辊子指派材料为：Polyurethane\_Hard。

2) 接触设置。所有 Mecanum 轮辊子与地面接触采用 3D 实体接触类型，开启库伦摩擦，主要参数设置如图 6 所示。



图 6 接触参数设置

3) 工厂输入与载荷。创建 4 个工厂输出，打开函数管理器，新建 4 个函数，如图 7 所示；最后对 4 个 Mecanum 轮的运动副添加标量扭矩，类型为函数，并选择对应的函数 T1、T2、T3、T4。



图 7 函数管理器

4) 工厂输出与标记。对 4 个 Mecanum 轮的轮心以及车架的中心，再新建 7 个函数，如图 7 所示；最后创建 7 个输出，分别选择对应的函数，它们分别表示 4 个轮子的角速度和平台中心的 \$x\$ 向速度、\$y\$ 向速度及绕自身中心轴线的旋转角速度。

## 3 交流伺服系统仿真模型

交流伺服系统由 PMSM 和伺服驱动器组成，需要对 4 个 Mecanum 轮进行精确的转速控制，而转速的控制需要通过对 PMSM 的电磁转矩的控制来实现；因此，伺服驱动器必须包含电流环和速度环。目前，PMSM 的高性能控制技术主要有磁场定向矢量控制技术(field orientation control, FOC)和直接转矩控制技术(direct torque control, DTC)，两者分

别建立在转子磁场和定子磁场的控制技术针对 PMSM 的转矩进行高性能闭环控制。FOC 技术对负载的响应速度小于 DTC 技术,但其转矩脉动明显小于 DTC 技术<sup>[14]</sup>。根据 Mecanum 轮速度控制的要求,

本文中采用的是 FOC 技术,其电流控制方法则采用最简单的  $i_d=0$  控制。该 PMSM 控制系统如图 8 所示,主要由速度控制器、坐标变换器、CHBPWM 逆变器和 PMSM 组成。

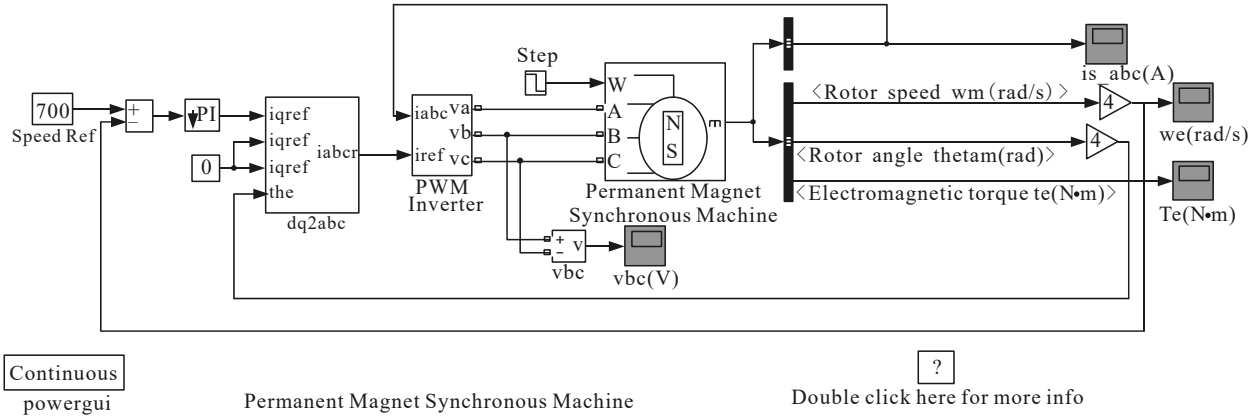


图 8 基于 FOC 技术的 PMSM 转速控制系统

### 3.1 PMSM 的数学模型

笔者直接利用 Simulink 的 SimPowerSystem 工具箱中的 PMSM 模块。该模块数学模型的建立基于以下假设:在不影响控制性能的前提下,忽略电机铁心饱和,永磁材料的导磁率为零,不计涡流和磁滞损耗,3 相绕组是对称、均匀的,绕组中感应电流感波形为正弦波<sup>[15]</sup>。

三相正弦波电机在转子 dq0 坐标系下的数学模型如下:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}i_d &= \frac{1}{L_d}\mu_d - \frac{R}{L_d} + \frac{L_q}{L_d}p\omega_r i_q; \\ \frac{d}{dt}i_q &= \frac{1}{L_q}\mu_q - \frac{R}{L_q}i_q - \frac{L_d}{L_q}p\omega_r i_d - \frac{\lambda p\omega_r}{L_q}; \\ T_e &= 1.5p[\lambda i_q + (L_d - L_q)i_d i_q]; \\ L_{ab} &= L_d + L_q + (L_d - L_q)\cos^2(2\theta_e + \pi/3). \end{aligned} \quad (3)$$

式中:  $L_d$ 、 $L_q$  分别表示转子的  $d$  轴和  $q$  轴等效电感;  $R$  表示绕组等效电阻;  $i_d$ 、 $i_q$  分别表示  $d$  轴和  $q$  轴的电流;  $\mu_d$ 、 $\mu_q$  分别表示  $d$  轴和  $q$  轴的电压;  $\lambda$  表示转子永磁体在定子绕组中产生的磁链幅值;  $p$  表示电机极对数;  $\omega_r$  表示转子角速度;  $T_e$  表示电磁转矩;  $\theta_e$  表示转子的电角度。

文中采用的电机转子为圆筒形转子,则

$$L_d = L_q = L_{ab}/2. \quad (4)$$

并且采用  $i_d=0$  电流控制方法,则转矩公式可简化为:

$$T_e = 1.5p\lambda i_q. \quad (5)$$

PMSM 的运动学方程可表示为:

$$T_e = T_l + J(dw_r/dt). \quad (6)$$

式中:  $T_l$  表示机械系统折算至电机端的负载转矩;  $J$  表示机械系统折算至电机端的转动惯量。

PMSM 仿真模块默认输入为三相电压  $\mu_a$ 、 $\mu_b$ 、 $\mu_c$  以及电机端负载转矩  $T_l$ 。文中需进行控制动力学联合仿真,由于全方位移动平台的结构复杂性和 Mecanum 与地面间摩擦力不断变化的因素,其负载转矩  $T_l$  是难以获取的;因此,需要将该仿真模块的输入方式改为电机转子角速度  $\omega_r$ 。此时,该系统即忽略了机械系统折算至电机端的转动惯量  $J$  和负载  $T_l$ ,直接采用从 UG 中测量得到的电机转速作为输入。实际上,从联合仿真的角度看,机械系统折算至电机端的转动惯量  $J$  和负载  $T_l$  是由 UG 的机械系统模块来体现的。

### 3.2 速度控制器

速度控制器的主要功能是根据电机角速度给定值  $\omega_{r\_ref}$  与实际反馈值  $\omega_r$  的差量  $\Delta\omega_r$ ,利用 PI 调节器,输出  $q$  轴电流给定值  $i_{q\_ref}$ 。此外 PI 调节器的内部需增加限幅模块 Saturation,其作用是防止电流值超过 PMSM 最大电流限制。PI 调节器的内部结构如图 9 所示。

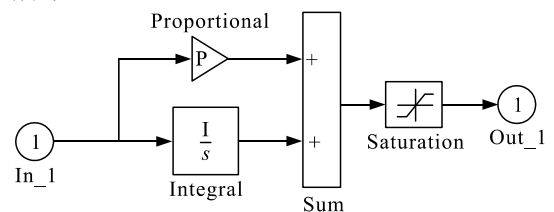


图 9 PI 调节器内部结构

### 3.3 dq0-abc 坐标系变换模块

dq0-abc 坐标系变换模块的作用是将 dq0 坐标系下的电流给定值  $i_{d\_ref}$ 、 $i_{q\_ref}$ 、 $i_0\_ref$  转换成 abc 坐标系下的电流给定值  $i_{a\_ref}$ 、 $i_{b\_ref}$ 、 $i_{c\_ref}$ ，笔者采用  $i_d=0$  控制方式，且转子绕组为无中线的 Y 型接线，因此  $i_{d\_ref}$  和  $i_0\_ref$  均为零。

dq0-abc 坐标系变换的矩阵表达式<sup>[11]</sup>如下：

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_e & -\sin\theta_e & 1 \\ \cos(\theta_e - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_e - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta_e + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_e + \frac{2\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中： $i_a$ 、 $i_b$ 、 $i_c$  分别表示定子 abc 三相绕组的电流值； $i_0$  表示零序电流。根据上述坐标变换矩阵可建立坐标变换器的内部结构框图，如图 10 所示。

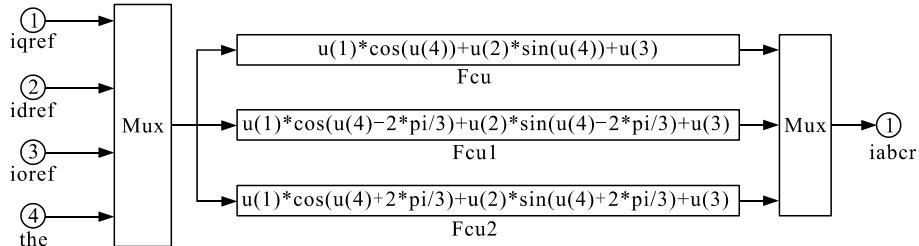


图 10 坐标变换器内部结构

### 3.4 CHBPWM 逆变器

电流滞环跟踪脉宽调制 (current hysteresisband pulse width modulation, CHBPWM) 是一种控制逆变器输出电流的 PWM 技术<sup>[16]</sup>。电流滞环跟踪控制的目标是将实际输出电流控制在给定电流  $i_{ref}$  的环宽  $2h$  范围内，即给定电流与实际电流的差值  $\Delta i > i_{ref} - i$  在  $\pm h$  内。其实现方式是当  $\Delta i > h$  时，逆变器输出正电压，使电流升高；当  $\Delta i < -h$  时，逆变器输出负电压，使电流降低。CHBPWM 逆变器的内部结构如图 11 所示，其中 compare 模块内部结构如图 12 所示。

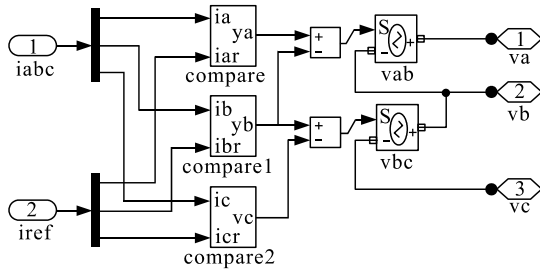


图 11 CHBPWM 逆变器内部结构

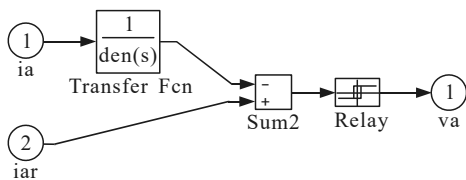


图 12 compare 模块内部结构

### 3.5 全方位移动平台运动学模块

除以上模块之外，还需要 2 个全方位移动平台的正逆运动学模块，分别根据其正逆运动学方程建立，如图 13 和 14 所示。其中正运动学模块的功能

是将平台中心的速度给定值转换为 4 个 Mecanum 轮的速度给定值，逆运动学模块的功能是将 4 个 Mecanum 轮的实际速度转换为平台中心的理论计算速度，注意该速度要区别于平台中心的实际速度，只有在 Mecanum 轮的小辊子无形变且与地面无打滑现象的情况下两者才相等。

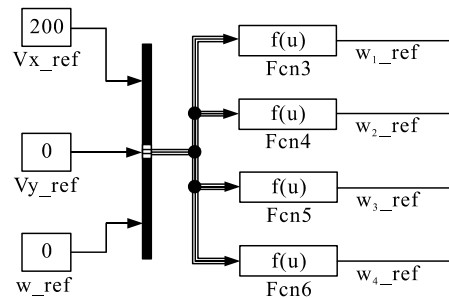


图 13 正运动学模块结构

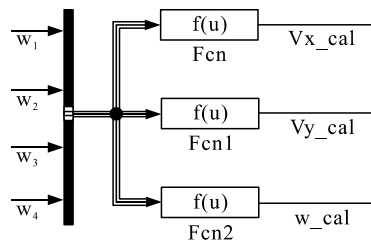


图 14 逆运动学模块结构

## 4 控制动力学联合仿真模型

控制动力学联合仿真需要在 Matlab 环境下进行，将交流伺服系统仿真模型和全方位移动平台仿真模型分别导入 Simulink Model 中。之后进行下述操作：

- 1) 控制输出与工厂输入数据连接。分别将 4 个 PMSM 模块的输出端  $T_e$  与全方位移动平台仿真模

型的对应输入端连线，中间需加入 Gain 增益模块，增益值设置为减速器的减速比 10。

2) 控制输入与工厂输出数据连接。分别将全方位移动平台仿真模型的 4 个车轮速度输出端与对应交流伺服系统的速度调节器中的 Sum 模块连线，同样需要在中间加入增益模块，增益值设置为减速器的减速比 10。

3) 其他工厂输出数据连接。剩余 3 个输出分别连接示波器，用于观察全方位移动平台实际的运动速度。

如此便搭建完整的控制动力学联合仿真模型。此外，还需要对以下几方面进行参数设置：

1) PMSM 模块设置。本文中所采用的交流伺服电机主要参数如表 1 所示，根据这些参数设置 PMSM 模块的参数。

表 1 PMSM 参数

技术参数	数值	技术参数	数值
额定功率/W	100.000	额定相电流/A	1.000
额定扭矩/Nm	0.320	瞬间最大相电流/A	2.900
最大瞬时扭矩/Nm	0.810	电枢绕组相电阻/ $\Omega$	20.900
额定转速/(r/min)	3000.000	电枢绕组相电感/mH	18.426
最高转速/(r/min)	3600.000	极对数	2.000
转矩系数/(Nm/A)	0.320		

2) 速度控制器设置。主要设置电流限幅模块 Saturation 的上下限值，虽然电机最大相电流为 2.9 A，但为避免 Mecanum 轮与地面发生打滑现象，电机转矩不宜过大，将 PI 控制器的输出限幅设置为 [-1.5, 1.5]。

3) CHBPWM 逆变器设置。主要对其中的电流滞环跟踪模块 Relay 进行参数设置，设置环宽  $2h=0.005$  A，开关输出为  $\pm 155$  V。

4) 求解器参数配置。类型为 Variable-step，求解器选择 ode23tb，相对误差  $1e^{-4}$ ，重置方法为 Robust；仿真时间设置为 0.4 s。

### 5 PI 调节器参数调试

以 x 向运动为调试工况， $v_{x\_ref}=100$  mm/s，调试目标为速度控制精度  $\pm 2\%$ 。根据 PI 参数选取经验方法，反复试凑比例系数 P 和积分时间系数 I。为快速缩小参数范围，先以步长 0.001 s 进行仿真，最终以步长 0.000 1 s 仿真进行精确调整，得到较为满意的参数值：P=0.19，I=0.01。

观察单个 PMSM 的三相定子绕组的输出电流曲线和电磁力矩曲线，如图 15 和 16 所示。可以看出，PMSM 的电磁力矩在初始加速过程中由于 PI 调节器的限幅作用达到了最大值，当电机速度接近

目标值时，力矩值也开始逐渐降至 0 附近，并有小幅波动现象。

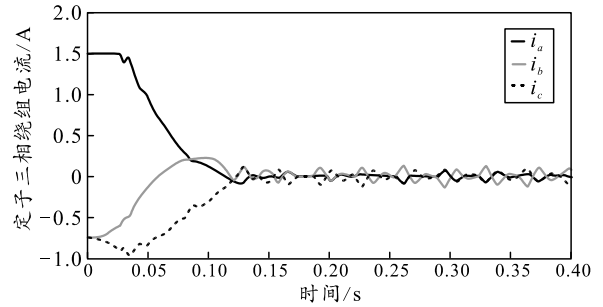


图 15 PMSM 三相定子绕组电流曲线

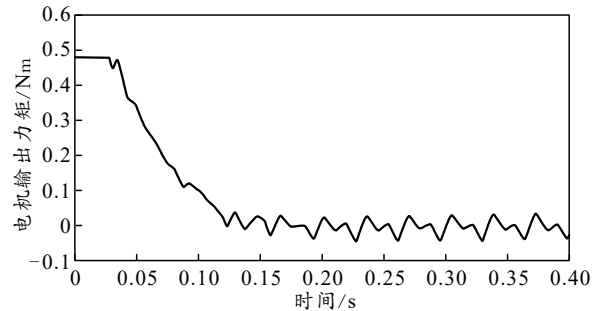


图 16 PMSM 电磁力矩曲线

此时，全方位移动平台的实际速度  $v_x$ 、 $v_y$  和  $\omega$  的曲线以及单个 Mecanum 轮的实际速度  $\omega_1$  的曲线如图 17—20 所示。其中  $v_x$  和  $\omega_1$  曲线在加速过程中及达到稳态后均存在波动情况，其主要原因是 Mecanum 轮的辊子为聚氨酯弹性体，相当于一个弹簧，其与地面接触变形后的反弹力会引起轮子速度波动。 $v_y$  和  $\omega$  的曲线在零附近也存在小幅波动，波动产生的主要原因是四轮速度的波动及不同步。

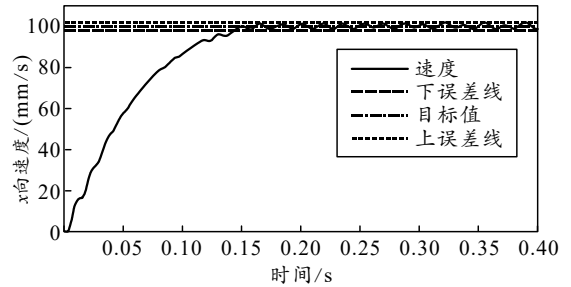


图 17 全方位移动平台 x 向速度曲线

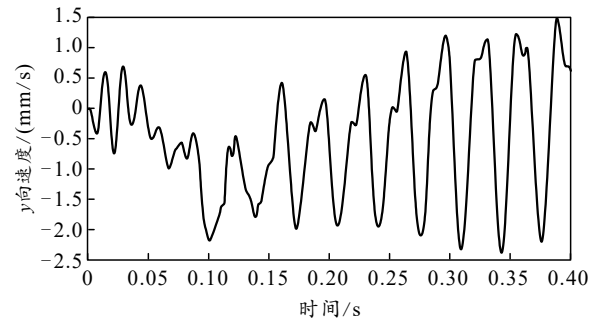


图 18 全方位移动平台 y 向速度曲线

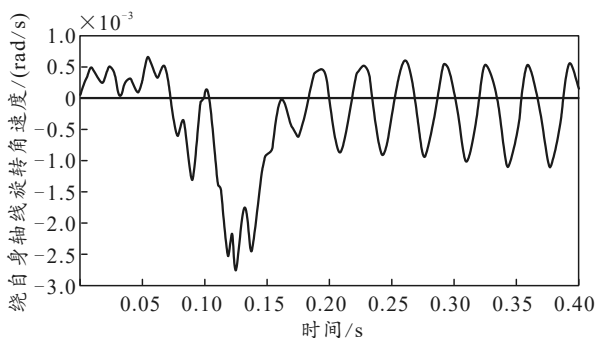
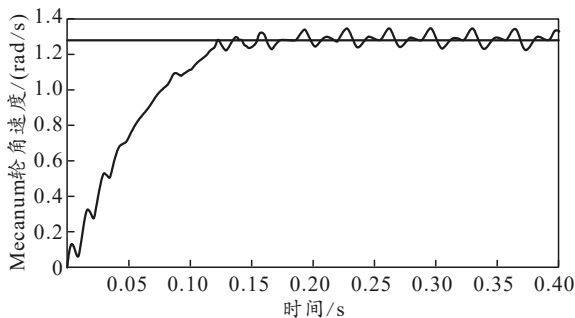
图19 全方位移动平台角速度  $\omega$  曲线

图20 单个 Mecanum 轮的角速度曲线

此外, 根据全方位移动平台逆运动学方程将四轮速度换算得到的速度  $v_{x\_cal}$  与实际速度  $v_x$  的对比曲线如图 21 所示, 2 条曲线未完全重合的现象是由四轮转速的不同步造成的。

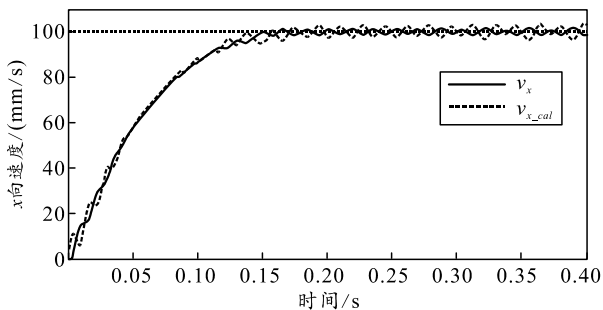


图21 全方位移动平台计算速度与实际速度曲线

## 6 仿真结果

为便于对比各个方向运动的特性, 在以下 4 个方向运动时的车轮目标旋转速度的幅值相等或者等于零, 仅转向不同。

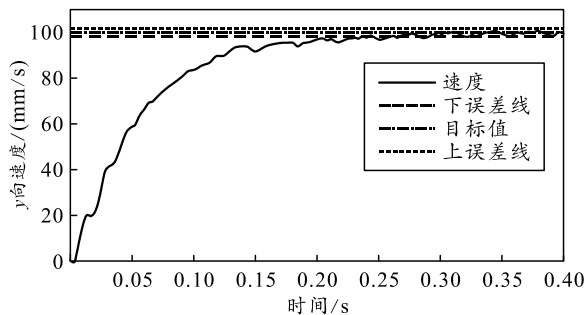
### 6.1 x 向运动

全方位移动平台以 100 mm/s 的速度沿  $x$  向运动, 进行联合仿真, 得到其运动速度曲线如图 17 所示。速度曲线约在 0.16 s 之后达到目标速度的  $\pm 2\%$  误差范围内, 且无明显发散现象, 判断其基本达到稳态。

### 6.2 y 向运动

全方位移动平台以 100 mm/s 的速度沿  $y$  向运

动, 进行联合仿真, 得到其运动速度曲线如图 22 所示。速度曲线约在 0.3 s 之后才达到目标速度的  $\pm 2\%$  误差范围内, 且无明显发散现象, 判断其基本达到稳态。沿  $y$  向运动达到稳态所需时间明显长于沿  $x$  向运动, 这是因为沿  $y$  向运动时轮 1 和轮 4 的旋转方向与轮 2 和轮 3 相反, 使得轮子的力矩负载和转速变化更加复杂, 因此要达到稳定状态所消耗的时间也更长。

图22 全方位移动平台  $y$  向速度曲线

### 6.3 绕自身中心轴线旋转

全方位移动平台以 0.26 rad/s 的角速度绕自身轴线旋转, 进行联合仿真, 得到其运动速度曲线如图 23 所示。该角速度曲线约在 0.1 s 之后达到目标速度的  $\pm 2\%$  误差范围内, 且无明显发散现象, 判断其基本达到稳态。达到稳态速度较快的主要原因是绕自身轴旋转运动时折算至每个轮子电机的惯性矩明显小于平移时的惯性矩, 因此加速较快。

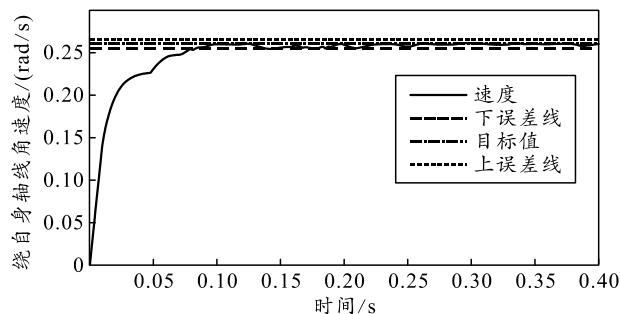


图23 全方位移动平台绕自身轴线的角速度曲线

### 6.4 45°方向运动

全方位移动平台以 70.71 mm/s 的速度沿 45°方向运动 (即  $v_x=v_y=50$  mm/s), 进行联合仿真, 得到其运动速度曲线如图 24 所示。该方向的速度约在 2.7 s 之后达到目标速度的  $\pm 2\%$  误差范围内, 且无明显发散现象, 判断其基本达到稳态。该曲线在加速过程中的波动次数明显比单独沿  $x$  向或  $y$  向运动时更多, 主要原因是它合成了  $x$  向和  $y$  向 2 个分速度, 因此 2 个分速度的波动或者不同步均会引起合成速度的波动。

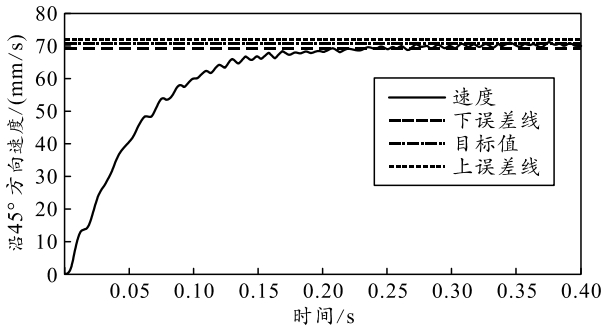


图 24 全方位移动平台沿 45°方向速度曲线

## 7 结论

笔者基于 UG 和 Matlab 的控制动力学联合仿真方法，建立了全方位移动平台的机械系统与伺服控制系统的联合仿真模型，通过仿真得到以下结论：

1) 该伺服控制系统对全方位移动平台的速度控制精度可达到±2%，基本满足工程实际要求，进一步验证了机电系统设计的合理性。

2) 通过联合仿真得到了初步的控制系统参数，为后续的实验调试提供参考，可有效节省参数调试时间。

3) 该联合仿真方法能够将虚拟样机技术与控制系统仿真技术有效结合起来，在机电系统的设计阶段为设计人员提供更加准确的数据支撑，从而缩短机电系统的开发周期。

## 参考文献：

[1] ILON B. Wheels for a course stable self-propelling vehicle movable in any desired direction on the ground or some other base: U. S, 3876255[P]. 1975: 4-8.  
 [2] JORGE A. Fundamentals of robotic mechanical system: Theory, methods and algorithms[M]. Chicago: Springer-Verlag, 1997: 80-94.  
 [3] MUIR P F, NEUMAN C P. Kinematic modeling for feedback control of an omnidirectional wheeled mobile

robot[C]//International Conference on Robotics and Automation. Raleigh, USA: Springer New York, 1987: 1772-1778.  
 [4] 王一治, 常德功, 钱晋武. 适应不平地面的 Mecanum 四轮全方位小车结构及运动学模型[J]. 中国机械工程, 2009, 20(9): 1130-1133.  
 [5] 杨飞, 刘正士. 麦克纳姆轮式智能小车典型运动分析[J]. 合肥工业大学学报, 2008, 31(3): 331-334.  
 [6] 郭超. 基于 DSP 的数字化永磁同步电机位置控制技术[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2009: 1-4.  
 [7] 袁登科, 徐延东, 李秀涛. 永磁同步电机变频调速系统及其控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2015: 10-68.  
 [8] 寇宝泉, 程树康. 交流伺服电机及其控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008: 45-62.  
 [9] 祁涛, 白国振, 江鸿潮. 基于 Simulink 的电动伺服加载系统仿真建模研究[J]. 电子科技, 2019(8): 1-7.  
 [10] 陈文卓, 靳文涛. Matlab 下永磁同步电机的三相坐标系建模[J]. 华北科技学院学报, 2017, 14(4): 52-56.  
 [11] 杨平, 马瑞卿, 张云安. 基于 Matlab 永磁同步电机控制系统建模仿真方法[J]. 沈阳工业大学学报, 2005, 27(2): 195-199.  
 [12] 李玉胜, 董保香, 张国海. 基于 NX 与 Matlab/Simulink 的协同仿真与应用[J]. 制造业自动化, 2013, 35(3): 64-65.  
 [13] 王一治. 适于楼宇环境的全方位移动技术研究[D]. 上海: 上海大学, 2009: 20-23.  
 [14] 陈安, 王晗. 电动汽车永磁同步电机无传感器 FOC-DTC 混合控制系统[J]. 湘潭大学自然科学学报, 2018, 40(1): 123-126.  
 [15] 舒志兵, 周玮, 李运华, 等. 交流伺服运动控制系统[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006: 56-60.  
 [16] 白洪芬, 朱景伟. 船用永磁容错电机 CHBPWM 与 SVPWM 矢量控制的比较研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2017(9): 1-7.