

文章编号: 1673-5196(2021)02-0054-06

# 变负载下永磁同步直线电机的推力及速度变化分析

沈浩\*, 张旺, 谈伟荣, 党生辉

(兰州理工大学 机电工程学院, 甘肃 兰州 730050)

**摘要:** 以永磁同步直线电机为研究对象进行受力分析, 建立数学模型, 并利用 Matlab/Simulink 软件建立直线电机的仿真模型, 探究施加不同负载时直线电机的推力以及速度变化. 结果表明: 随着工件质量的不断增加, 直线电机的状态响应时间和最大偏差也在增加; 速度的响应时间曲线上升趋势较为平缓, 推力的响应时间曲线变化明显; 推力的超调量曲线上升趋势较为平缓, 速度的超调量曲线上升趋势变化明显, 当工件质量为 240 kg 时, 电机速度的超调量超过 30%, 严重影响到电机的运行. 为降低负载变化对直线电机稳定性的影响, 通过计算得出了最大负载质量和最大电机推力.

**关键词:** 直线电机; 变负载; Simulink; 建模仿真

**中图分类号:** TH17 **文献标志码:** A

## Analysis of thrust and velocity variation of permanent magnet synchronous linear motor under variable load

SHEN Hao, ZHANG Wang, TAN Wei-rong, DANG Sheng-hui

(College of Mechano-Electronic Engineering, Lanzhou Univ. of Tech., Lanzhou 730050, China)

**Abstract:** Taking the permanent magnetic synchronous linear motor as the research object, its force was analyzed; mathematical model was established, and the simulation model of the linear motor by using Matlab/Simulink in order to study the thrust and speed change of the linear motor when different loads are applied. The results show that with the increase of the workpiece's mass, the state response time and maximum deviation of the linear motor increased; the response time curve of the speed is flat; the response time curve of thrust changed obviously; the overshoot curve of thrust increase flatly; the overshoot curve of velocity increased stably, the overshoot curve of speed is obvious. When the quality of the workpiece is 240 kg, the over-adjusting amount of motor speed exceeds 30%, which seriously affects the operation of the motor. In order to reduce the effect of load change on linear motor stability, the maximum load quality and maximum motor thrust are calculated.

**Key words:** linear motor; variable load; Simulink; modeling simulation

永磁同步直线电机由旋转电机演变而来, 可将电能直接转换成直线运动的机械能且不需要任何传动装置<sup>[1]</sup>. 由于这种“零传动”的工作特点, 工作台上的负载发生大范围变化时将直接作用于直线电机, 对直线电机的工作状态和稳定性产生一定的影响.

国内外已经有不少学者开始了对直线电机领域的探索. 冀宏等<sup>[2]</sup>针对电机气隙较小、电机气隙油膜受到剪切作用而产生的负载效应, 采用环形缝隙劲

性流动模型和电磁场有限元分析方法, 研究了电机气隙对电机泵效率的影响. 结果表明: 气隙增大时, 可以提高电机泵的效率, 有利于电机和液压泵的集成. Lu 等<sup>[3]</sup>针对直线电机驱动系统的控制约束参数不确定性和输入扰动, 提出一种约束自适应鲁棒控制法则用于实现所需要的鲁棒性, 对所跟踪的轨迹可进行在线重新规划, 当存在输入饱和与各种不确定情况时, 同样可以重新进行轨迹规划, 并最终在直线电机上验证了所提出的算法达到闭环稳定性, 具有瞬态性能的小稳态跟踪误差比无约束算法好. Ting 等<sup>[4]</sup>为了提高永磁直线同步电机的鲁棒性和

收稿日期: 2019-07-09

通讯作者: 沈浩(1965-), 男, 甘肃兰州人, 副教授.

Email: 13919935375@163.com

计算效率,在不使用坐标变换的情况下,提出一种自适应模糊神经网络和反步控制相结合的控制方法. Shin 等<sup>[5]</sup>对高精度永磁线性同步电机的俯仰力矩进行了特征分析和实验,基于二维极坐标系的分析磁场计算,得出 PM 生成的磁场分析解决方案,推导了每个子域的分析解,并通过应用子域之间的边界和接口条件获得最优解,最后对预测与测量数据比较确认了结果的正确性.杨亮亮等<sup>[6]</sup>针对迭代学习控制算法在线性离散系统中的收敛性问题,建立了直线电机的离散化数学模型.杨伟东等<sup>[7]</sup>建立了直线电机系统的传递函数模型,分析了伺服参数对于响应特性的影响,采用 PID 控制器对电机位置输出进行控制以减小电机位置输出误差,提高了系统的动态响应特性.甄文喜等<sup>[8]</sup>针对负载扰动严重影响直线电机系统伺服性能,提出了一种改进型的扰动补偿器与复合控制器相结合的扰动抑制方法,减小系统的响应时间同时提高了直线电机伺服系统的控制精度和鲁棒性.许道金等<sup>[9]</sup>介绍了直线电机数控机床进给系统的特点,理论推导分析了负载大范围变化时直线电机作为进给系统的误差机理,并利用专用实验设备模拟数控机床实际加工工况进行实验,结果验证了在负载大范围变化时单一模型控制下的直线电机进给系统的运动精度和定位精度较差.钟添明<sup>[10]</sup>采用有限元法对机床永磁直线电机的推力波动进行仿真计算,通过采用改变端齿的高度、宽度以及磁钢倾斜角度等措施,以减小直线伺服电机推力波动为目标进行了电磁优化设计,经过优化设计后永磁直线电机推力波动大幅减小.余凤豪等<sup>[11]</sup>推导了永磁同步直线电机的磁链方程、电压方程和电磁推力方程,得到永磁同步直线电机是一个多变量、非线性、强耦合且参数随动子位置变化的控制对象.吕帅朋等<sup>[12]</sup>建立了直线电机模型,在空载扰动和负载的情况下对电流推力和速度图形进行分析,结果表明基于模糊 PID 控制的速度调节器对整体系统的速度稳定性更加优越.王昊等<sup>[13]</sup>在建立考虑端部效应的磁路分析模型基础上,采用能量法理论计算定位力,分析了影响定位力波动的关键因素,得出合适的槽型和改变边齿形状可以有效减小定位力.司纪凯等<sup>[14]</sup>采用状态变量有限元法研究 PMLSM 负载突变特性,计算 PMLSM 的负载突变及稳态振荡特性,结果表明磁阻力的端分量是影响动子稳态运行速度振荡的主要因素.

现有国内外的研究成果主要集中在分析电机伺服系统的稳定性上,以及针对在实际应用过程中出现的问题进行改进,具有一定意义但不具有一般性.

对于直线电机本身的特性、电机推力及运行速度的研究较少,而这些研究对于提高直线电机的工作效率、加工精度及使用寿命有重要意义.本文将通过 Matlab/Simulink 软件对永磁同步直线电机进行仿真,通过模拟负载变化的环境,对仿真结果进行分析,探究变负载对直线电机的推力以及速度产生的影响.

## 1 直线电机的受力分析及数学模型

### 1.1 直线电机的受力分析

直线电机类型丰富、安装简单,但对安装精度要求较高.本文选用平板式直线电机模型进行分析.直线电机的安装有水平和垂直两种布局方式,图 1 为永磁同步直线电机水平布局的受力分析.

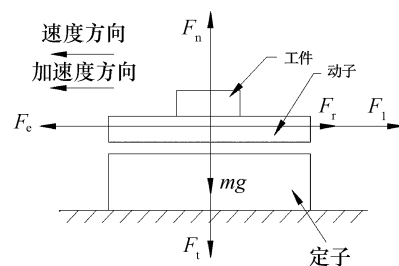


图 1 永磁同步直线电机的受力分析

Fig.1 Force analysis of permanent magnet synchronous linear motor

由图 1 可知永磁同步直线电机的机械动力学方程:

$$m \frac{dv}{dt} = F_e - F_r - F_l \quad (1)$$

$$F_n = mg + F_t \quad (2)$$

式中:  $m$  为动子与负载的总质量,  $m = m_r + m_l$ ,  $m_r$  为动子质量,  $m_l$  为动子带动的负载质量;  $F_e$  为电磁推力;  $F_r$  为摩擦力;  $F_l$  为负载阻力;  $F_n$  为支持力;  $F_t$  为初级与次级间的垂直吸引力.

### 1.2 直线电机的矢量控制和数学模型

基于旋转电机利用导体在磁场中受电磁力作用的运行原理可建立直线电机的数学模型.为了简化分析,做以下几点条件假设:

- 1) 磁隙为恒定值;
- 2) 磁场沿着气隙正弦分布;
- 3) 永磁体所在动子部分不受阻尼影响;
- 4) 不考虑温度、频率变化对电机的影响;
- 5) 不考虑磁路饱和、损耗,忽略端部效应.

为了获得与直流电机相似的控制效果,对数控机床上的永磁同步直线电机可采用矢量控制方法进行解耦控制,将三相静止坐标系  $a-b-c$  变换成两相

旋转坐标系  $d-q$ , 简称 Park 变换或  $3s/2r$  变换<sup>[15]</sup>:

$$C_{\frac{3s}{2r}} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - 120^\circ) & \cos(\theta + 120^\circ) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - 120^\circ) & -\sin(\theta + 120^\circ) \end{bmatrix} \quad (3)$$

所以

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \times \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - 120^\circ) & \cos(\theta + 120^\circ) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - 120^\circ) & -\sin(\theta + 120^\circ) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (4)$$

又因为

$$u = R \cdot i + \frac{d}{dt} \psi \quad (5)$$

所以

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + Q \begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \end{bmatrix} + \omega_e \begin{bmatrix} -\psi_q \\ \psi_d \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中:  $u_d$ 、 $u_q$  分别为变换后的电机直、交轴电压;  $i_d$ 、 $i_q$  分别为电机直、交轴电流;  $\psi_d$ 、 $\psi_q$  分别为直、交轴磁链;  $R_s$  为初级绕组电阻;  $Q$  为微分算子;  $\omega_e$  为直线电机平移速度折算成旋转电机角速度。

当忽略磁路饱和的影响时, 磁链可由直轴和交轴电流线性表示为

$$\begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \psi_f \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中:  $\psi_f$  为永磁体在初级上的耦合磁链;  $L_d$ 、 $L_q$  分别为  $d$ 、 $q$  轴电感, 对于表面磁钢的永磁同步直线电机,  $L_d = L_q = L$ 。

因此式(6)可以写为

$$\begin{cases} u_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_e L_q i_q \\ u_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_e L_d i_d + \omega_e \psi_f \end{cases} \quad (8)$$

对于永磁同步直线电机的功率为

$$P = \frac{3}{2} \left[ (R_s i_d^2 + R_s i_q^2) + \left( i_d \frac{\partial \psi_d}{\partial t} + i_q \frac{\partial \psi_q}{\partial t} \right) + \omega_e (\psi_d i_q - \psi_q i_d) \right] \quad (9)$$

将初级与次级之间的气隙  $\delta$  引入上式可得:

$$P = \frac{3}{2} \left[ (R_s i_d^2 + R_s i_q^2) + \left( i_d \frac{\partial \psi_d}{\partial t} + i_q \frac{\partial \psi_q}{\partial t} \right) + \right]$$

$$\left[ \left( i_d \frac{\partial \psi_d}{\partial \delta} + i_q \frac{\partial \psi_q}{\partial \delta} \right) \dot{\delta} + \omega_e (\psi_d i_q - \psi_q i_d) \right] \quad (10)$$

上式中最后一项为电磁推力所做的功:

$$W = F_e v = \frac{3}{2} \omega_e (\psi_d i_q - \psi_q i_d) \quad (11)$$

所以, 电磁推力方程为

$$F_e = 1.5\pi (\psi_d i_q - \psi_q i_d) / \tau \quad (12)$$

式中:  $\tau$  为磁极中心距。

将式(7)代入上式可得:

$$F_e = 1.5\pi [\psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] / \pi \quad (13)$$

结合直线电机的机械运动方程, 得到  $d-p$  轴的永磁同步直线电机的数学模型为

$$\begin{cases} u_d = R_s i_d + Q \psi_d - \omega_e \psi_q \\ u_q = R_s i_q + Q \psi_q - \omega_e \psi_d \\ F_e = 1.5\pi [\psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] / \pi \\ m \frac{dv}{dt} = F_e - F_r - F_l \end{cases} \quad (14)$$

采用  $i_d = 0$  的磁场定向控制, 同时对上式进行拉普拉斯变化, 得到永磁同步直线电机的数学模型为

$$\begin{cases} U_d(s) = -\omega_e L_s I_q(s) \\ U_q(s) = R_s I_q(s) + L_s I_q(s) + \omega_e \psi_f \\ F_e(s) = \frac{3\pi}{2\tau} \psi_f I_q(s) \\ msv(s) = F_e(s) - F_l(s) - Bv(s) \end{cases} \quad (15)$$

式中:  $L_s$  为拉普拉斯变换后的电枢电感;  $K$  为比例系数,  $K = \pi \psi_f / \tau$ ;  $ms$  为拉普拉斯变换后的负载与动子总质量;  $B$  为阻尼系数;  $s$  为拉普拉斯算子。

为简化该模型, 不考虑动态过程中直轴电流对电动机模型的影响, 经过拉普拉斯变化后, 此模型的传递函数如图 2 所示。

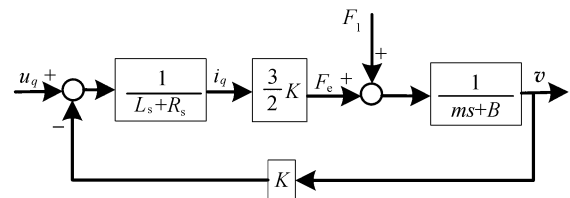


图 2 直线电机的闭环传递函数  
Fig.2 Closed-loop transfer function for linear motors

## 2 永磁同步直线电机的变负载试验

### 2.1 利用 Simulink 建立直线电机的仿真模型

为了进行永磁同步直线电机的仿真验证, 首先利用 Matlab/Simulink 搭建直线电机模型. 电机部分的模块主要是根据直线电机的运动方程和数学模型进行搭建. 电机模块和其整体仿真模块如图 3 和图 4 所示。

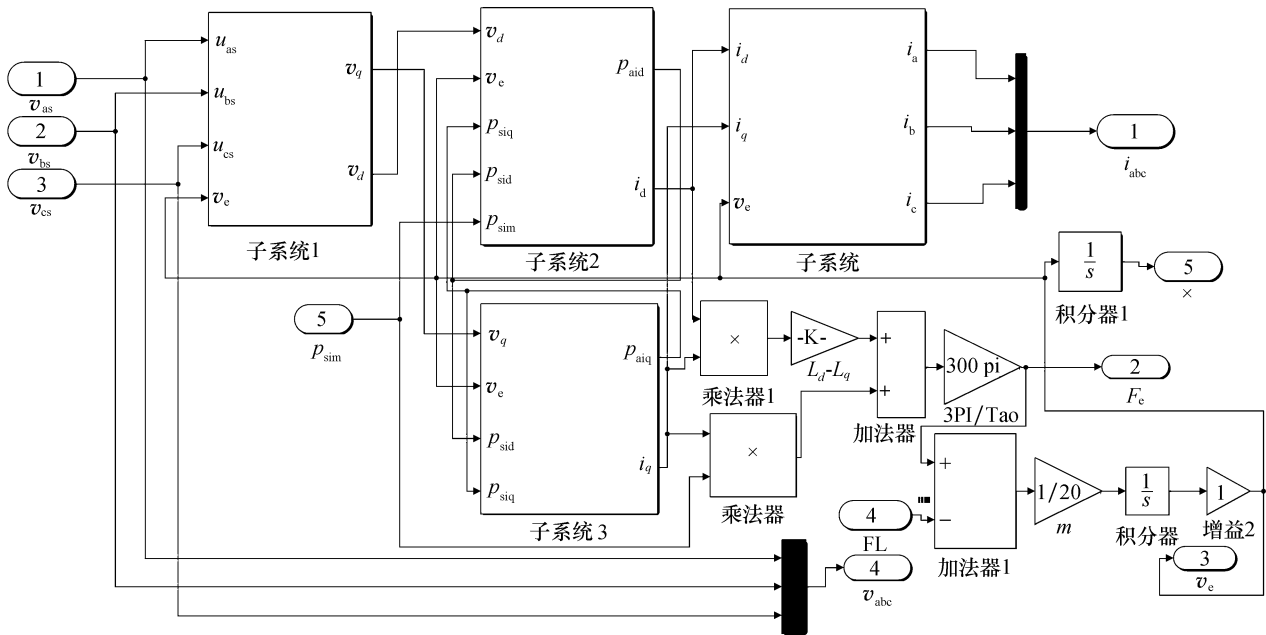


图 3 直线电机部分仿真模型  
Fig.3 Simulation model of linear motor part

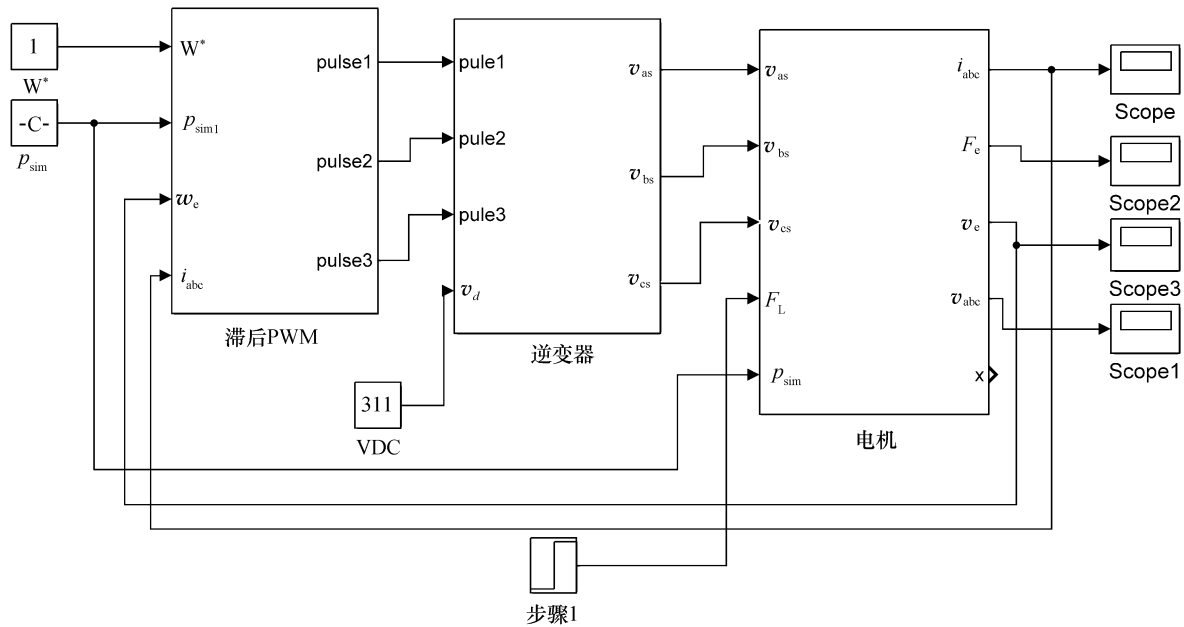


图 4 PMLSM 的整体仿真模型  
Fig.4 Overall simulation model of PMLSM

本文中永磁同步直线电机 PMLSM 各个部分的仿真参数为:电阻  $R = 18 \Omega$ , 阻尼系数  $B = 0.02 \text{ N}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$ , 电感  $L_d = L_q = L = 0.026 \text{ H}$ , 空载阻力  $F = 100 \text{ N}$ , 仿真总时间设定为  $0.4 \text{ s}$ , 直线电机的速度设定值为  $1 \text{ m/s}$ .

2.2 变负载情况下的仿真结果

在仿真过程中, 工件质量  $m$  选取  $40、80、120、$

$160、200、240 \text{ kg}$ . 图 5 为不同负载下直线电机推力和进给速度变化的曲线.

从图 5a 可以看出: 电机空载启动, 由于自重推力  $F_e$  会出现激增, 约  $0.05 \text{ s}$  后回归为零, 在之后的  $0.05 \text{ s}$  开始趋近于稳定值  $100 \text{ N}$ ; 在  $0.2 \text{ s}$  时开始改变工件的质量, 随着负载不断的增大, 曲线的波动也在不断增大; 当  $m$  为  $240 \text{ kg}$  时  $F_e$  达到额定载荷

1 300 N,曲线开始波动不平滑.从图 5b可以看出:电机启动时速度  $v$  会在 0.03 s 内达到峰值 1.22 m/s,在之后 0.03~0.08 s 速度回归到设定的初始值 1 m/s;在 0.2 s 时开始改变工件的质量,随着负载不断的增大,速度的突变量越大,但速度的回归时间基本保持稳定,保持在 0.14 s 左右.

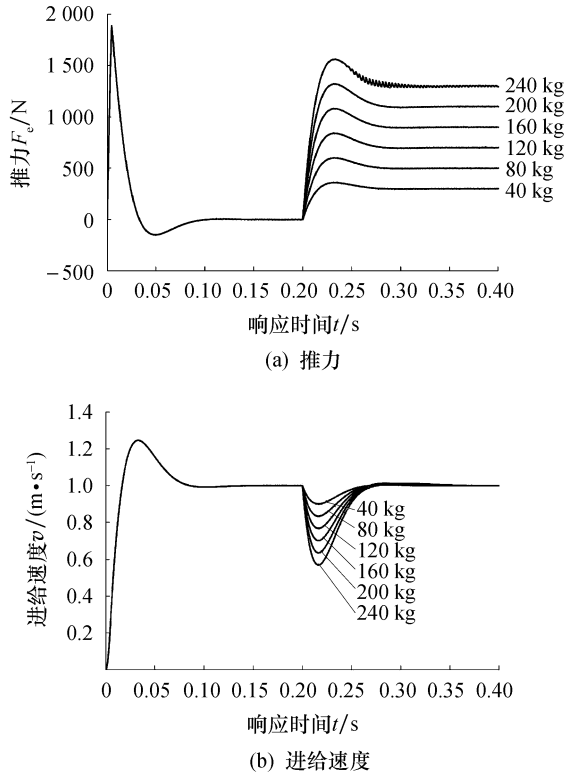


图 5 不同负载下直线电机推力和进给速度变化的曲线  
Fig.5 Curves of changes in linear motor thrust and feed speed under different loads

### 3 直线电机推力和速度变化分析

为了分析直线电机的性能,由图 5a 推力变化曲线和图 5b 进给速度变化曲线得到表 1.

表 1 不同工件质量对直线电机性能的影响

Tab.1 Effect of different workpiece quality on linear motor performance

$m/kg$	$\Delta t_1/s$	$\Delta t_2/s$	$F_e/N$	$\Delta v/(m \cdot s^{-1})$
40	0.08	0.12	300	0.066 5
80	0.08	0.12	500	0.132 8
120	0.09	0.13	700	0.198 9
160	0.13	0.135	900	0.265 0
200	0.14	0.14	1 100	0.331 1
240	0.18	0.16	1 300	0.397 2

由表 1 可以看出:随着工件质量  $m$  的不断增大,直线电机推力  $F_e$  的响应时间和数值大小也在增加;当  $m$  为 240 kg 时,推力  $F_e$  增加至额定载荷

1 300 N,推力的响应时间  $\Delta t_1$  突增较大,达到 0.18 s;同时,速度  $v$  的响应时间  $\Delta t_2$  和最大偏差量也在增大,响应时间增长较为稳定,在 0.12~0.16 s 时最大偏差量可达 0.397.

图 6 和图 7 分别为变负载下的响应时间和超调量变化趋势.由图 6 可以看出:速度的响应时间曲线上升趋势较为平缓,整体变化时间在 0.12~0.16 s;推力的响应时间曲线变化明显,上升趋势较快,最大响应时间为 0.18 s.

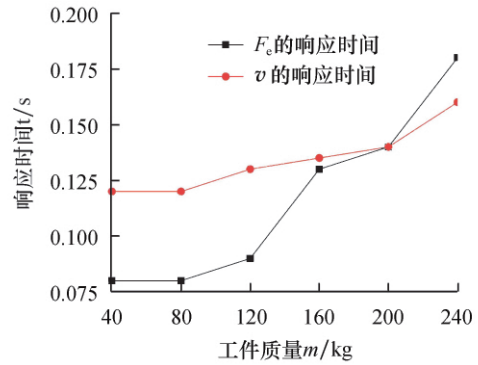


图 6 变负载下的响应时间

Fig.6 Response time under variable load

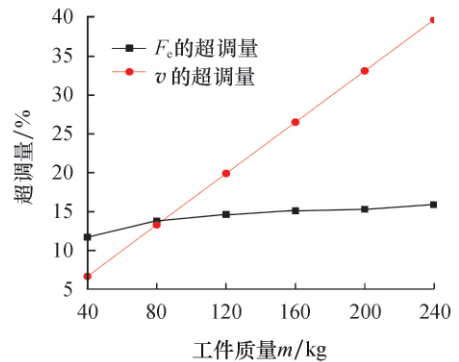


图 7 变负载下的超调量

Fig.7 Overshoot under variable load

超调量主要反映了系统动态性能中的平稳性,越小越好.超调量越大,反映平稳性越差.在控制系统中一般允许出现电机超调,这有助于提高系统响应和跟踪特性,一般取值在 20%~30%.计算方法为  $\alpha = [Y(t_p) - Y(\infty)] / Y(\infty) \times 100\%$  (16) 式中: $Y(t_p)$  为瞬态响应中的最大值; $Y(\infty)$  为稳态值.

由图 7 可以看出:推力的超调量曲线上升趋势较为平缓;速度的超调量曲线变化明显,当负载质量为 240 kg 时,速度的超调量达到 39%,对电机平稳运行影响较大.因此为降低负载变化对直线电机性能的影响,设电机速度超调量取值不高于 30%,可得出负载最大质量取值不超过 185 kg,电机的最大

推力为 1 025 N.

## 4 结论

1) 负载变化越大,对直线电机的影响也越大.当负载增加至 240 kg 时,推力达到 1 300 N,推力曲线开始波动不光滑.负载超过电机的额定载荷,电机的伺服系统产生严重影响,将导致机床加工精度的降低.

2) 速度的响应时间曲线上升趋势平缓;推力的响应时间曲线变化明显,最大响应时间为 0.18 s.可通过改善电机的伺服系统来降低响应时间,提高加工效率.

3) 推力的超调量曲线上升趋平缓;速度的超调量曲线上升趋势变化明显,当负载为 240 kg 时,速度超调量超过 30%,影响电机的进给速度.为保证电机运行平稳.计算得出施加负载最大质量不超过 185 kg,电机最大推力为 1 025 N.

4) 通过对变负载下直线电机性能的研究,发现负载的变化对电机推力、速度的超调量和响应时间影响很大,从而影响到直线电机的工作性能,不利于高速高精加工.因此,对推力及速度的研究将为直线电机的后续研究提供借鉴意义.

### 参考文献:

- [1] 叶云岳.国内外直线电机技术的发展与应用综述[J].电器工业,2003(1):12-16.
- [2] 冀 宏,孙 磊,王嵘嵘,等.液压电机泵中浸油电机的负载效应[J].兰州理工大学学报,2009,35(4):52-56.
- [3] LU L, YAO B. A performance oriented multi-loop constrained adaptive robust tracking control of one-degree-of-freedom mechanical systems: theory and experiments [J]. Automatica, 2014, 50(4): 1143-1150.
- [4] TING C S, LIEU J F, LIU C S, *et al.* An adaptive FNN control design of PMLSM in stationary reference frame [J]. Journal of Control Automation and Electrical Systems, 2016, 27(4): 391-405.
- [5] SHIN K H, LEE S H, CHO H W, *et al.* Analysis on the pitching moment in permanent-magnet linear synchronous motor for linear motion stage systems [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2016, 52(7): 1-4.
- [6] 杨亮亮,胡 建.基于最优控制迭代学习算法的收敛性研究[J].机电工程,2018,35(4):397-401.
- [7] 杨伟东,贾鹏飞,杨泽青.直线电机进给系统伺服参数与控制参数设计[J].机床与液压,2018,46(1):97-101.
- [8] 甄文喜,戴跃洪,唐传胜.永磁同步直线电机伺服系统负载扰动建模与抑制[J].组合机床与自动化加工技术,2013(2):7-10.
- [9] 许道金,杨庆东.变负载对数控机床直线电机控制系统影响的研究[J].机械工程与自动化,2014(4):169-171.
- [10] 钟添明.机床用永磁直线电机的推力波动优化研究[J].机电工程技术,2019,48(3):118-120.
- [11] 余凤豪,吕飞,张松涛,等.永磁同步直线电机的数学模型分析[J].舰船电子工程,2010,30(9):120-122.
- [12] 吕帅朋,李积元.基于 MATLAB/Simulink 的永磁同步直线电机控制分析与研究[J].自动化与仪器仪表,2016(3):174-176.
- [13] 王 昊,张之敬,刘成颖.永磁直线同步电机定位力分析与实验研究[J].中国电机工程学报,2010,30(15):58-63.
- [14] 司纪凯,汪旭东,焦留成,等.永磁直线同步电机负载突变及稳态振荡特性[J].电机与控制学报,2009,13(4):483-489.
- [15] 王兴贵,孙宗宇,王言徐.基于模糊 PI 控制的永磁同步直线电机矢量控制系统研究[J].微电机,2010,43(5):59-61.