

大型零件搬运装配的智能轨道系统建模与仿真^①董玉红^{②*} 张立勋^{**} 陈雄标^{***}

(* 哈尔滨理工大学机械动力工程学院 哈尔滨 150080)

(** 哈尔滨工程大学机电工程学院 哈尔滨 150001)

(*** 加拿大萨斯喀彻温大学机械工程系 萨斯喀彻温 SKS7N 5A9)

摘 要 智能辅助作业设备(IAD)是新一代人机工程学与智能控制技术相结合的产物,它必须与操作者合作才能完成作业任务。根据搬运大型零件时 IAD 的功能和组成,设计了由智能移动单元和 H 型钢轨道构成的智能轨道系统。考虑系统的摩擦非线性,建立了智能移动单元的数学模型。基于 Simulink 建立了智能移动单元的仿真模型,对主动工作模式下智能轨道系统的速度响应特性进行了仿真分析和半物理仿真实验研究。研究结果表明,该智能轨道系统能够跟踪给定的速度指令,跟踪性能满足设计要求。该研究为智能轨道系统的实际应用与推广奠定了基础。

关键词 智能轨道系统,智能移动单元,摩擦非线性,数学模型,Simulink

0 引 言

智能辅助作业设备(intelligent assist device, IAD)是新一代人机工程学与智能控制技术相结合的产物。IAD 包括智能轨道系统(intelligent rail system)、智能提升系统(intelligent lift system)和智能操作臂系统(intelligent arm system),它不能完全代替操作工人或工业机器人,必须与操作者合作才能完成作业任务,操作安全、快捷,轻便、省力。美国 Stanley 公司研制开发了一种称为 Cobotics 的智能辅助作业设备,该设备是由计算机控制、伺服装置提供动力,主要用于物料搬运及装配作业等场合^[1]。美国西北大学研制了一种称为 RailCobot 的智能臂系统,该系统是一个 3 轴(x, y, ψ_z)联动的轨道式人机合作机器人,主要用于大型零件的搬运装配,如汽车座椅和车门的总成、仪表盘的安装、大型钣金的搬运等场合^[2-6]。意大利 Dalmec 公司研制的 IAD 采用专门夹具和抗重力的平衡技术,辅助操作者零重力全方位地搬运工件^[7]。本文设计了具有主动、欠驱动力和被动工作模式的智能轨道系统,该系统是由 H 型钢与智能移动单元构成的模块化结构。根据智

能轨道系统组成,建立了主动工作模式时智能移动单元的数学模型,对系统的跟踪性能进行了仿真分析与半物理仿真实验研究。

1 智能轨道系统组成

智能轨道系统机构简图如图 1 所示,该系统主要由 H 型钢导轨和智能移动单元组成^[8]。智能移动单元结构示意图如图 2 所示。智能移动单元由交流伺服电动机、齿轮减速机构、辊子轴、辊子、承载轮和导向轮等部分组成。辊子与大齿轮通过键固定在辊子轴上,并随大齿轮的旋转沿 H 型钢轨道的下表面运动,辊子与轨道之间的摩擦力驱动承载轮、导向轮、负载等一起运动^[9]。H 型钢选 HM 系列型号为 H150 × 100 × 6 × 8,交流驱动电动机选用日本松下 A4 系列 MDMA-08 交流伺服电动机,该电动机具有高性能实时自动调整增益功能,与自适应滤波器配合,满足高、低刚性负载惯量变化的要求。为了满足伺服电机和辊子之间转矩、转速的匹配要求,取总传动比 $i = 4$,二级传动比按质量最小原则,取 $i_1 = i_2 = 2$ 。齿轮材料选用 40Cr,为了提高承载能力,对齿轮轮齿进行调质处理,小齿轮通过平键直接安装

① 黑龙江省教育厅海外学人(1154h05)资助项目。

② 女,1965 年生,博士,硕士生导师,教授;研究方向:机电控制,数控技术,特种机器人控制技术与仿真;联系人,E-mail:dongyuhong585@163.com

(收稿日期:2013-07-09)

在电机轴上,采用紧固螺钉作轴向固定;中间齿轮设计成双联结构,其轮轴设计成法兰式结构,通过螺栓与移动单元车体前板联接,双联齿轮采用弹性挡圈作轴向固定。各齿轮齿数为:小齿轮 $z_1 = 25$, 双联齿轮 $z_2 = 51, z_3 = 25$, 大齿轮 $z_4 = 51$ [10]。

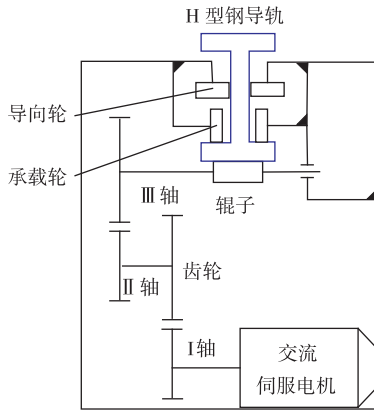


图 1 智能轨道系统机构简图

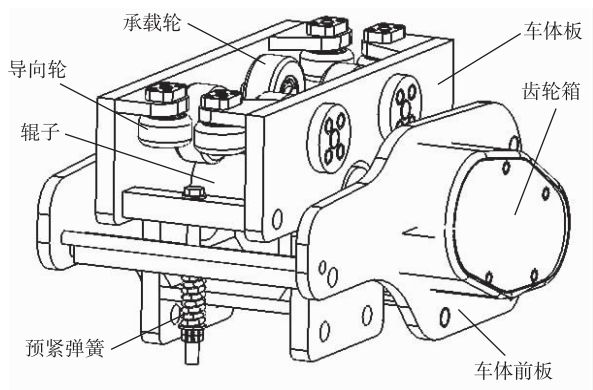


图 2 智能移动单元结构示意图

2 智能移动单元数学模型

智能移动单元由三相交流异步电动机驱动,为了便于分析,对该交流伺服电动机进行假设,其三相绕组对称,在空间中互差 120° 电角度,所产生的磁动势沿气隙周围按正弦规律分布;各绕组的自感和互感都是恒定的;不计涡流和磁滞损耗;不考虑频率和温度变化对绕组电阻的影响 [10]。则电动机三相定子的电压方程可表示为

$$\begin{cases} u_A = R_s i_A + \frac{d\psi_A}{dt} \\ u_B = R_s i_B + \frac{d\psi_B}{dt} \\ u_C = R_s i_C + \frac{d\psi_C}{dt} \end{cases} \quad (1)$$

式中: u_A, u_B, u_C —三相定子电压; i_A, i_B, i_C —三相定子电流; Ψ_A, Ψ_B, Ψ_C —三相定子绕组磁链; R_s —定子各相绕组电阻。

电动机三相转子的电压方程为

$$\begin{cases} u_a = R_r i_a + \frac{d\psi_a}{dt} \\ u_b = R_r i_b + \frac{d\psi_b}{dt} \\ u_c = R_r i_c + \frac{d\psi_c}{dt} \end{cases} \quad (2)$$

式中: u_a, u_b, u_c —转子三相电压; i_a, i_b, i_c —转子三相电流; Ψ_a, Ψ_b, Ψ_c —转子三相绕组磁链; R_r —转子各相绕组电阻。

每个绕组的磁链是其本身的自感磁链和其他绕组对它的互感磁链之和,6 个绕组的磁链可表示为

$$\begin{bmatrix} \psi_A \\ \psi_B \\ \psi_C \\ \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{AA} & L_{AB} & L_{AC} & L_{Aa} & L_{Ab} & L_{Ac} \\ L_{BA} & L_{BB} & L_{BC} & L_{Ba} & L_{Bb} & L_{Bc} \\ L_{CA} & L_{CB} & L_{CC} & L_{Ca} & L_{Cb} & L_{Cc} \\ L_{aA} & L_{aB} & L_{aC} & L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{bA} & L_{bB} & L_{bC} & L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{cA} & L_{cB} & L_{cC} & L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \\ i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: L_{ij} —绕组间的自感与互感 ($i, j = A, B, C, a, b, c$)。

电动机电磁转矩方程为

$$T_e = \frac{1}{2} n_p i^T \frac{\partial L}{\partial \theta} i \quad (4)$$

式中: T_e —电磁转矩; n_p —电动机极对数; $i^T = [i_A \ i_B \ i_C \ i_a \ i_b \ i_c]$; L —由绕组间的自感与互感组成的 6×6 矩阵; θ —电动机转角。

其运动方程为

$$T_e = T_{Ll} + \frac{J}{n_p} \frac{d\omega}{dt} + \frac{B}{n_p} \omega \quad (5)$$

式中: T_{Ll} —折算到电机轴上的负载力矩; ω —电动机转速; J —等效转动惯量; B —等效粘滞阻尼系数。

如图 1 所示,考虑到齿轮传动刚度大,建模时可忽略其刚度对系统性能的影响,对输入轴 I 轴列写力矩平衡方程为

$$T_e = J_m \frac{d^2 \theta}{dt^2} + B_m \frac{d\theta}{dt} + T \quad (6)$$

对输出轴 III 轴列写力平衡方程为

$$iT = J_L \frac{d^2 \theta_L}{dt^2} + B_L \frac{d\theta_L}{dt} + T_L \quad (7)$$

式中: J_m —电机轴转动惯量; B_m —电机轴粘滞阻尼系数; T —I 轴作用于 II 轴上的驱动力矩; i —总传动比; T_L —负载力矩; θ_L —III 轴的转角; J_L —III 轴负载惯量; B_L —III 轴粘滞阻尼系数。

将式(6),(7)取拉氏变换,并取 $\theta = i \theta_L$, 消去 θ, T 得

$$\theta_L(s) = \frac{1}{s(J_s + B)i} (T_e - \frac{1}{i} T_L) \quad (8)$$

式中: $J_e = J_m + \frac{1}{i^2} J_L$; $B_e = B_m + \frac{1}{i^2} B_L$ 。

由式(8)可得负载转速为

$$\omega_L(s) = \frac{1}{(J_s + B)i} (T_e - \frac{1}{i} T_L) \quad (9)$$

智能移动单元的负载力矩为

$$T_L = \mu \cdot Mg \cdot r \quad (10)$$

式中: μ —承载轮与辊道之间的滚动摩擦系数,通常取 $\mu = 0.05$; M —负载质量; g —重力加速度常数; r —辊子半径, $r = 0.03\text{m}$ 。

若考虑承载轮与辊道之间的摩擦非线性^[11], 智能移动单元的负载力矩为

$$T_L = \begin{cases} -T_e, \omega_L = 0 & |T_e| < T_{fs} \\ -T_{fs}, \omega_L = 0 & |T_e| \geq T_{fs} \\ -\text{sign}(\omega_L) \cdot T_{fc}, \omega_L \neq 0 \end{cases} \quad (11)$$

式中: T_{fs} —最大静摩擦力矩; T_{fc} —库仑摩擦力矩。

3 仿真分析

根据式(1)–式(5)、式(9)、式(11)建立了智能移动单元的 Simulink 仿真模型,如图 3 所示^[12]。

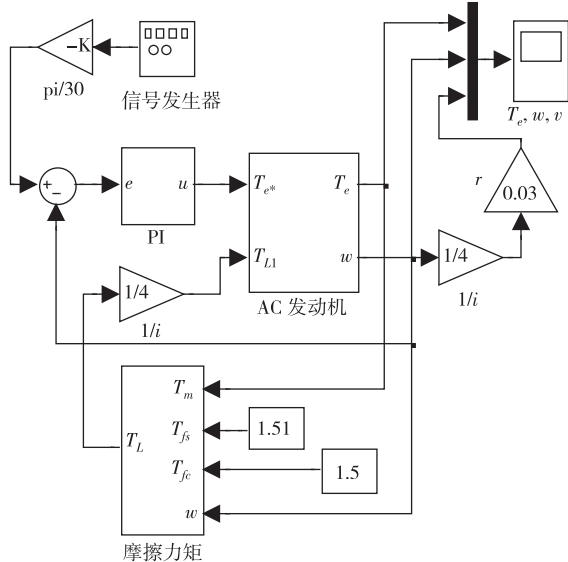


图 3 智能移动单元 Simulink 仿真模型

智能移动单元的交流伺服电动机采用速度闭环控制,给定参考速度,电动机输出转矩经过齿轮减速机构,驱动辊子转动,依靠辊子与轨道的摩擦力矩带动智能移动单元沿 H 型钢轨道运动。

日本松下 A4 系列 MDMA-08 交流伺服电动机额定最大转速 $n = 2000\text{r/min}$, 额定最大转矩 $T_e = 3.57\text{N} \cdot \text{m}$ 。由图 3 所示仿真模型进行仿真计算时,取电机转速指令 $n = \pm 1200\text{r/min}$, PI 控制器参数 $K_p = 1, K_i = 0.5$, 减速器传动比 $i = 4$, 辊子半径 $r = 0.03\text{m}$ 。智能轨道系统空载时,只考虑智能移动单元本身的质量,负载转矩 T_L 很小,折算到电动机轴上的负载转矩 $T_{L1} = (1/i) T_L$ 更小,故取 $T_{L1} \approx 0$ 。进行仿真得到电动机指令转速及实际转速如图 4 所

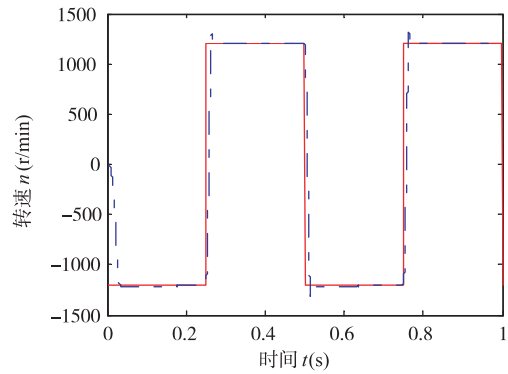


图 4 智能移动单元空载时电动机转速仿真曲线

示,驱动力矩、辊子移动速度仿真曲线如图 5、图 6 中的实线所示。图 4 中实线为指令转速,点划线为实际转速。智能轨道系统带负载时,取负载质量 $M = 100\text{kg}$,根据式(10)求得 $T_L \approx 1.5\text{N} \cdot \text{m}$,取 $T_{fs} = 1.51\text{N} \cdot \text{m}$, $T_{fc} = 1.5\text{N} \cdot \text{m}$,进行仿真得到电动机指令转速及实际转速如图 7 所示,图 7 中实线为指令转速,点划线为实际转速。驱动力矩、辊子移动速度

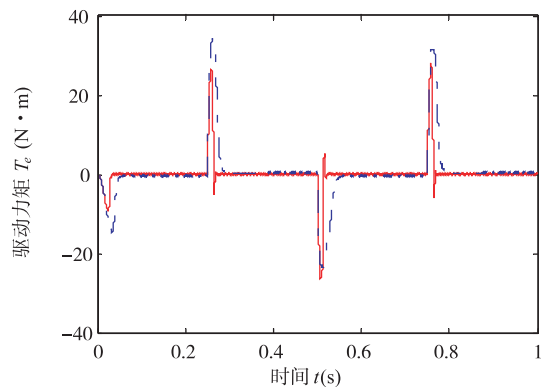


图 5 智能移动单元驱动力矩仿真曲线

仿真曲线如图 5、图 6 中的点划线所示。由图 4、图 6 和图 7 可知,智能移动单元具有良好的速度响应特性。

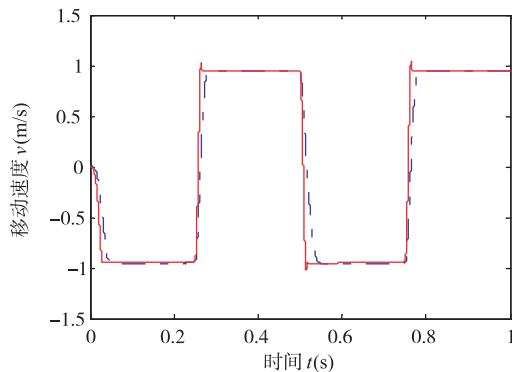


图 6 智能移动单元辊子移动速度仿真曲线

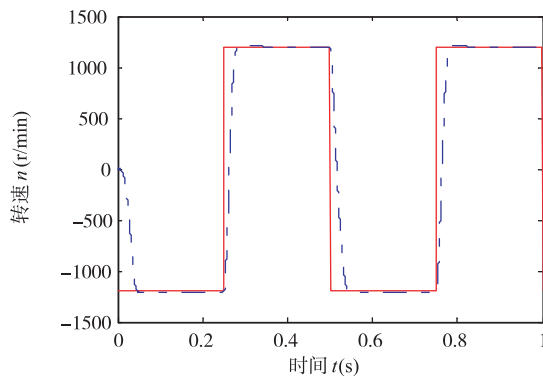


图 7 智能移动单元带载时电动机转速仿真曲线

基于 dSPACE 构建了单自由度智能轨道实验系统,如图 8 所示,进行半物理仿真实验研究,得到智能移动单元空载、带载时的速度响应曲线如图 9、图 10 中的点划线所示。由图 9、图 10 可知,系统的负载对驱动电机的速度存在影响,在相同参数情况下,加上负载后,速度跟踪曲线存在微小的超调量,

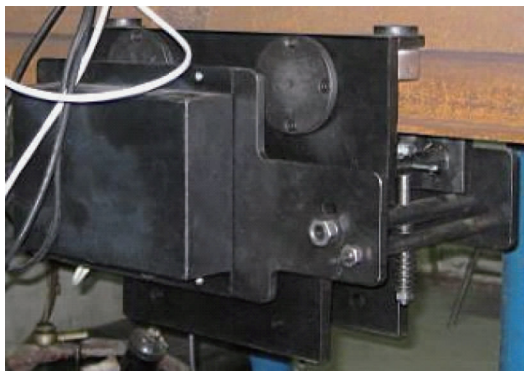


图 8 单自由度智能轨道系统实验样机照片

但是影响并不明显,跟踪性能满足设计要求。实验中当带载质量过大时(大于 150kg),以至于超过驱动电机的带载能力,系统启动困难,且伴有振动现象。

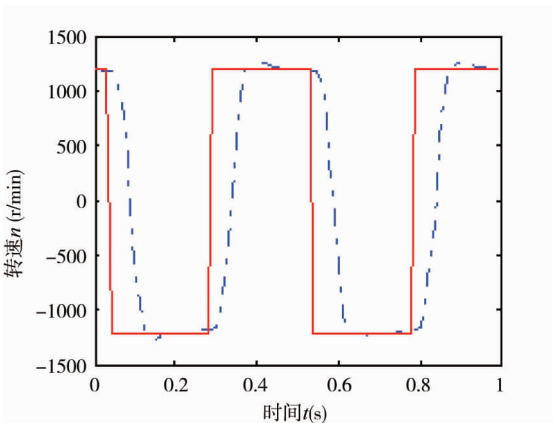


图 9 智能移动单元空载时的速度响应曲线

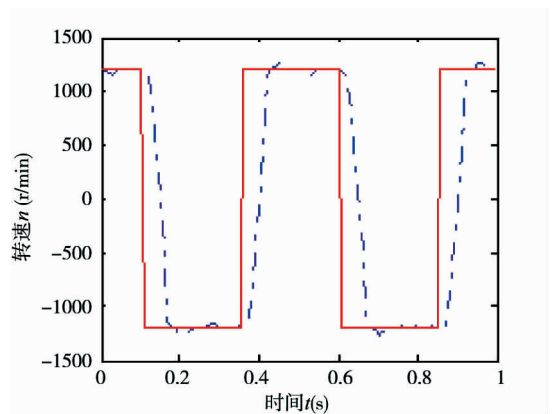


图 10 智能移动单元带载时的速度响应曲线

4 结 论

智能轨道系统采用交流伺服电机驱动,依靠辊子与 H 型钢轨道的摩擦力矩来带动智能移动单元运动。考虑系统的摩擦非线性,建立了智能移动单元的数学模型和仿真模型,仿真分析和实验研究表明:该系统具有良好的速度响应特性,其跟踪性能满足设计要求。本文所设计的智能轨道系统是搬运装配大型零件的智能辅助作业设备(IAD)的关键部分,其结构采用模块化开式导轨结构,具有主动、欠驱动力和被动工作模式。在搬运装配大型零件时,不仅安装维护方便,能耗低,而且导轨加长时,成本也低,易于构建和组成多自由度的智能轨道系统,安装在大型零件生产车间的上方,辅助操作者完成独

自难以完成的作业任务。本文的研究对 IAD 的推广和应用具有参考价值。

参考文献

- [1] Stanley Assembly Technologies. <http://www.stanleyengineeredfastening.com/brands/stanley-assembly-technologies>; Stanley Engineered Fastening, 2013
- [2] Peshkin M A. Michael Peshkin's homepage. <http://peshkin.mech.northwestern.edu/>; Peshkin M A, 2013
- [3] Akella P, Peshkin M A, Colgate J E, et al. Cobots for the automobile assembly line. In: IEEE International Conference on Robotics and Automation, Detroit, USA, 1999. 728-733
- [4] Surdilovic D, Bernhardt R, Zhang L. A Novel class of intelligent power-assist systems based on differential CVT. In: The 11th IEEE International Workshop in Robot and Human Interactive Communication, Berlin, Germany, 2002. 170-175
- [5] Surdilovic D, Bernhardt R, Zhang L. New intelligent power-assist systems based on differential transmission. *Robotica*, 2003, 21 (03) : 295-302
- [6] Colgate J E, Peshkin M A, Klostermeyer S H. Intelligent assist devices in industrial applications; a review. In: Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Las Vegas, USA, 2003. 2516-2521
- [7] Dalmec Inc. Industrial Manipulator Brochures. Suzhou: Dalmec Inc, 2005
- [8] 董玉红, 张立勋, 陈雄标. 大型零件装配搬运的智能轨道系统驱动控制. *中国工程机械学报*, 2011, 9 (3) : 325-330
- [9] 董玉红, 许洪涛, 张立勋等. 大型零件搬运装配的智能轨道系统. 中国发明专利, 200810064843. 2. 2013-05-15
- [10] 许洪涛. 大型零件搬运装配的智能辅助设备设计及控制研究: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学机械动力学院, 2009. 23-25
- [11] Dong Y H, Tian S L. Simulation analysis of friction nonlinear for NC servo system. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 274 : 642-645
- [12] 薛定宇, 陈阳泉. 基于 MATLAB/Simulink 的系统仿真技术与应用 (第 2 版). 北京: 清华大学出版社, 2011. 153-158

Modeling and simulation of intelligent rail system for large parts moving and assembly

Dong Yuhong^{*}, Zhang Lixun^{**}, Chen Xiongbiao^{***}

(^{*} School of Mechanical and Power Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080)

(^{**} College of Mechanical and Electrical Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001)

(^{***} Department of Mechanical Engineering, University of Saskatchewan, Saskatoon SK S7N 5A9, Canada)

Abstract

Intelligent assist device (IAD) which has to collaborate with operators for completing task is the result of newly ergonomics combining with intelligent control technology. In terms of the functions and components of IAD for moving large parts a kind of intelligent rail system which consists of an intelligent moving unit and an H type steel rail was designed. With the system friction nonlinearity being considered, a mathematic model for the intelligent moving unit was built up. Based on the Simulink, the simulation model for the intelligent moving unit was established. The simulation analysis and hard-in-loop simulation experimental study on the velocity response characteristics of the intelligent rail system running in an active mode were carried out. The study results illustrate that the intelligent rail system can follow the given velocity instructions. The tracking performances meet the design requirements. The study establishes the foundation for practice application and spreading of intelligent rail systems.

Key words: intelligent rail system, intelligent moving unit, friction nonlinearity, mathematic model, Simulink