

基于模糊控制的轮式机器人振动主动控制*

张 梁¹ 张 方¹ 蒋 祺¹ 朱 伟²

(1. 南京航空航天大学 机械结构力学及控制国家重点实验室 南京 210016;

2. 昆山华恒焊接工程技术中心 昆山 215313)

摘 要:针对某型轮式机器人在不平路面的激励下产生的振动问题,利用 ADAMS 建立了包括货架在内的轮式机器人的虚拟样机。考虑轮式机器人主动轮的独立驱动方式,建立了主动轮和从动轮独立相关的白噪声时域路面激励模型。根据轮式机器人在路面激励下的振动情况设计了一种自调整的模糊控制器,通过 MATLAB 与 ADAMS 进行联合仿真实现对轮式机器人的货架振动主动控制。仿真结果表明,模糊控制能控制货架的振动响应,控制后的振动位移比无控减小 66% 以上,控制效果良好。

关键词:轮式机器人;振动;模糊控制;联合仿真

中图分类号: TP242 TP273 TB535 TN081 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 410.20

Active vibration control of wheeled mobile robot based on fuzzy logic

Zhang Liang¹ Zhang Fang¹ Jiang Qi¹ Zhu Wei²

(1. State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. Huaheng Welding Co., Ltd., Kunshan 215313, China)

Abstract: Vibration control is an important issue of wheeled mobile robot(WMR) when riding on uneven road, and random inputs should be taken in to consideration. Firstly, a virtual prototype of the WMR with its warehouse rack is established in ADAMS, and choose a filtered white noise model for the random road input both on with and without the consideration of correlation assumption of its wheels. Then design a self-regulation fuzzy logic control system according to the vibration response of the warehouse rack with random inputs in MATLAB. With the mechanical system in ADAMS and control system in MATLAB can build a closed loop to co-simulate the whole active vibration control system by combining the two software's specialties. The simulation results show that the fuzzy logic control system can reduce the vibration of warehouse rack, and the vibration amplitude is reduced by 79 percent, which demonstrates this method's effectiveness.

Keywords: wheeled mobile robot; vibration; fuzzy logic control; co-simulation

0 引 言

轮式机器人在现代仓储物流中扮演了重要的角色,是实现工业自动化生产的关键技术之一^[1-4]。在轮式机器人搭载货架工作时,由于货架和轮式机器人之间是直接接触关系,在不平路面的激励作用下产生振动,会导致货物的倾倒甚至倾翻。同时货架上货物的摆放有很大的随机性,使得货架的重心位置和整体重量不可预知,而货架和机器人的接触具有很强的非线性,给振动控制带来困难。因此采用模糊控制算法^[5-7],在不需要精确的模型下也可以实

现对货架的振动主动控制。

本文先建立了轮式机器人的虚拟样机模型,根据工厂路面的不平度,利用滤波白噪声模型建立一个 A 级的时域路面激励模型,同时考虑到轮式机器人左右主动轮的相干性,分别建立了辅助转向轮和左右主动轮的相干时域路面激励模型,计算出的不同工况下货架的振动响应;其次利用 MATLAB 的模糊控制工具箱设计模糊控制器,通过 Simulink 建立了一种可调因子的模糊控制系统;最后通过 ADAMS 控制插件的接口与 Simulink 控制系统建立一个完整的闭环控制系统,将货架质心的位移和速度作为控制

收稿日期:2017-07

* 基金项目:国家自然科学基金(51305197)、机械结构力学及控制国家重点实验室(南京航空航天大学)自主研究课题(0115K01)、江苏高校优势学科建设工程基金项目资助

系统的输入变量,在轮式机器人作用的控制力作为控制系统的输出,实现对轮式机器人的振动自适应主动控制。

1 ADAMS 虚拟样机

根据轮式机器人的动力学特性,可将轮式机器人简化为以下主要部分:主动轮、辅助转向轮、各轮的弹簧悬挂系统、机身、货架。保证各个部分的质量与转动惯量与三维几何模型一致,简化后模型的示意图如图1所示。

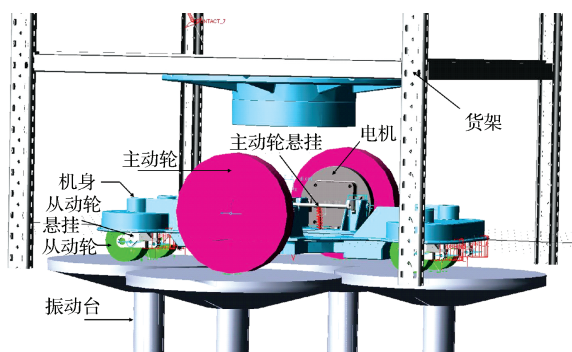


图1 轮式机器人简化示意图

本文只研究轮式机器人沿直线运行时的情况,因此将辅助转向轮的转向自由度约束,只考虑辅助从动轮前进方向的转动自由度。主动轮与电机通过旋转副连接,电机与机器人机身通过悬挂连接,前后辅助轮与悬挂连杆之间也设置旋转副,悬挂系统用轴套 BUSH 单元,通过设置较大的刚度和阻尼约束连杆左右的滑移自由度,只放松其上下的滑移与前后偏转的自由度。在设置各个旋转副的时候为避免系统产生冗余约束,可以适当地选择基本副代替低副^[8]。货架与机器人之间设置接触副,采用碰撞算法与库伦摩擦模型,本文假设货架的偏转角度较小且货架与机身的摩擦力足够大,货架与机器人不会产生滑动。

本文通过振动台的位移来施加路面对轮式机器人的激励,在轮子和振动台平面设置接触,振动台与地面设置滑移副。

2 时域路面激励模型

路面不平度一般采用功率谱密度来描述,根据国标给出的路面标准,可以将路面的功率谱密度 $G_q(n)$ 进行拟合,表达式为^[9]:

$$G_q(n) = G_q(n_0) \left(\frac{n}{n_0} \right)^{-\omega} \quad (1)$$

式中: $G_q(n)$ 为功率谱密度,单位是 m^2/m^{-1} ; n 为空间频率,单位是 m^{-1} ; n_0 为空间参考频率,一般取 0.1 m^{-1} ; $G_q(n_0)$ 为路面不平度系数, ω 为频率指数,本文取值为 2。根据国标 GB7021 对道路的分级标准将路面分成 A~E 8 个等级^[10],本文的研究对象一般在工厂地面工作,可以看成 A 级路面,对应的路面不平度系数的几何平均值为 $16 \text{ m}^2/\text{m}^{-1}$ 。

式(1)为路面的空间域模型,假设轮式机器人的运行速度为 v ,则路面输入的时间频率为:

$$f = vn \quad (2)$$

进一步将路面谱密度转换到时间域,表达式为:

$$G_q(f) = \frac{1}{v} G_q(n) = G_q(n_0) n_0^2 \frac{v}{f^2} \quad (3)$$

模拟时域路面的方法目前主要有三角级数法、滤波白噪声法、Poisson 法等^[11-12],本文采用滤波白噪声的方法^[13],可以直接根据路面不平度系数与车速确定路面模型,该模型将路面不平度以微分形式表示为:

$$\dot{q}(t) = -2\pi v f_0 q(t) + 2\pi n_0 \sqrt{G_q(n_0)} \dot{w}(t) \quad (4)$$

式中: f_0 为路面空间截止频率,为更接近真实路面,取值为 0.01。 $w(t)$ 为单位高斯白噪声。

考虑到轮式机器人的轮子布局方式,从动轮与主动轮不仅存在时滞,还存在左右相关性。由于前后从动轮各有两个轮子,每组轮子的距离较近,可以近似作为同一路面输入。假设左主动轮的路面输入为 $\dot{q}_0(t)$,跟据文献^[14]提出的随机时域路面通用模型,可以得到前从动轮的路面输入 $\dot{q}_1(t)$,右主动轮的路面输入 $\dot{q}_2(t)$ 和后从动轮的路面输入 $\dot{q}_3(t)$ 的表达式为:

$$\begin{cases} \dot{q}_1(t) = \dot{q}_0(t) - 24vq_0(t)/r + a_2 \\ \dot{q}_2(t) = -\dot{q}_0(t) + 4vq_0(t)/l - 4vq_2(t)/l \\ \dot{q}_3(t) = \dot{q}_2(t) - 12vq_2(t)/r + b_2 \\ \dot{q}_4(t) = -\dot{q}_1(t) + 2vq_1(t)/l - 2vq_4(t)/l \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \dot{q}_0(t) = -2\pi v f_0 q_0(t) + 2\pi n_0 \sqrt{G_q(n_0)} \dot{w}(t) \\ \dot{a}_1 = -24vq_0(t)/r + a_2 \\ \dot{a}_2 = 288v^2 q_0(t)/r^2 - 48v^2 a_1/r^2 - 12v a_2/r \\ \dot{b}_1 = -12vq_2(t)/r + b_2 \\ \dot{b}_2 = 72v^2 q_2(t)/r^2 - 12v^2 b_1/r^2 - 6v b_2/r \end{cases}$$

式中: r 为主动轮的轮距, l 为前后从动轮之间的距离。

将上述微分方程用 SIMULINK 编程求解,建立轮式机器人的路面模型如图2所示。

轮式机器人的运行速度为 1 m/s ,主动轮的距离为 0.7 m ,前后从动轮的距离为 0.74 m ,高斯白噪声的采样时间设为 0.0001 s ,仿真时间为 8 s ,得到的轮子时域输入曲线如图3所示。

3 ADAMS 与 MATLAB 联合仿真

3.1 模糊控制器设计

本文设计的模糊控制器为典型的二维模糊控制结构,选择货架质心的位移和质心位移的变化即质心速度作为控制系统的输入 E 和 EC,在轮式机器人的车身作用一个外力模拟控制力作为控制系统的输出 U。考虑轮式机器人的前后俯仰和左右偏转的耦合程度不高,可以独立设计一个模糊控制器。根据货架在路面激励下的响应情况,选取质心俯仰位移的初始论域为 $[-10, 10]$,偏转的质心位移论域为 $[-15, 15]$,单位为 mm,质心俯仰速度的初始论

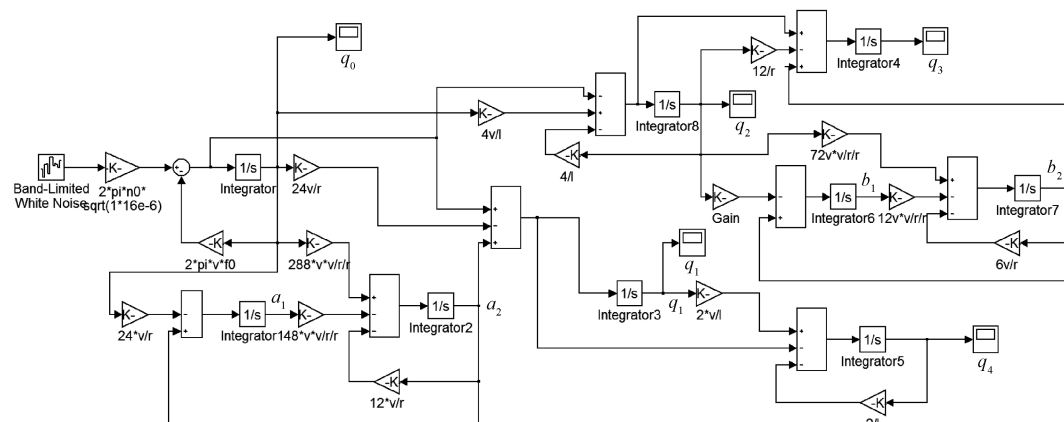


图2 轮式机器人的随机路面输入模型

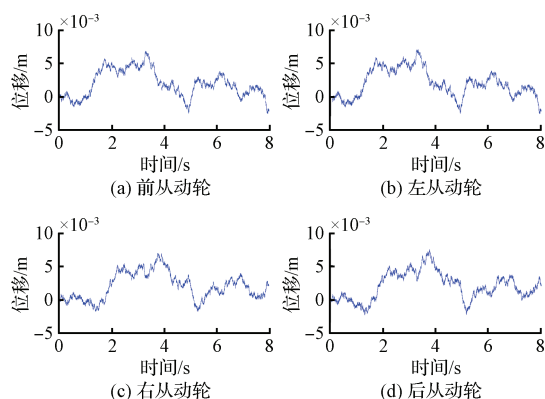


图3 路面白噪声随机输入曲线

域为 $[-40, 40]$, 偏转的质心速度初始论域为 $[-100, 100]$, 单位为 mm/s 。为了满足控制精度和计算效率的要求, 输入和输出变量的模糊子集都采用 7 个模糊语言来描述, 表示为 $\{\text{NB}, \text{NM}, \text{NS}, \text{O}, \text{PS}, \text{PM}, \text{PB}\}$, 模糊集论域为 $\{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ 。根据初始论域和模糊集论域可以计算出各个输入的量化因子以及输出的比例因子。

为了增强控制系统的鲁棒性, 控制器选取对称、均匀分布、全交迭的三角形隶属函数, 根据专家经验设计模糊控制规则如表 1 所示, 模糊推理采用运用最为广泛的 Mandani 推理算法, 解模糊选取重心法。

表1 模糊控制规则表

	NB	NM	NS	O	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PB	PM	PM	PS	O
NM	PB	PB	PM	PM	PS	O	O
NS	PB	PM	PM	PS	PS	O	O
O	PB	PM	PS	O	NS	NM	NB
PS	O	O	O	NS	NM	NB	NB
PM	O	O	NS	NM	NM	NB	NB
PB	O	NS	NM	NM	NB	NB	NB

根据设计的模糊子集与推理规则, 可以得到如图 4 所

示的模糊推理曲面。

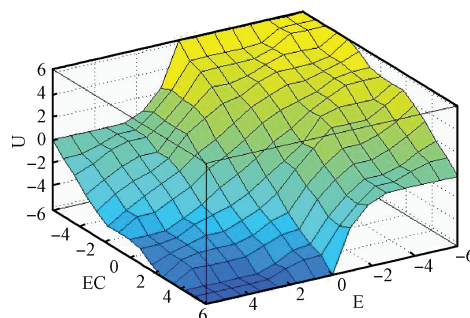


图4 模糊规则推理曲面

由于货架上摆放的货物质量与位置具有随机性, 不同的重量和质心会有不同的响应, 控制系统的初始论域也就难以确定是否为最佳, 此时往往需要将论域的范围取得更大, 以保证控制系统的稳定性和可控性, 然而初始论域的扩大会导致控制系统起作用的规则只有某一部分, 导致控制性变差。为此本文在原始控制系统的基础是增加了调整因子。

自调整因子的作用是在输入 E 或 EC 较大时, 此时的系统需要快速响应以减小误差, 则减小量化因子, 同时增大比例因子; 当 E 或 EC 较小时, 此时系统接近平衡状态, 因此需要增加控制灵敏度, 减小系统超调, 即增大量化因子同时减小比例因子。根据文献[15]的调整因子的设计方法, 使量化因子和比例因子的调整因子互为倒数, 再设计一个模糊控制器使调整因子随着输入的变化而变化。

3.2 联合仿真控制

首先将 Simulink 生成的路面输入曲线导入到 ADAMS 中, 将其以样条曲线函数的形式作为 4 个振动台的位移驱动。创建货架质心位移 DX 、 DY 和速度的状态变量 VX 、 VY 以及两个控制力的状态变量 FX 、 FY 。然后分别在车身的前方和左方适当的位置创建集中力模拟控制力, 将其值分别设置为 $\text{VARVAL}(FX)$ 和 $\text{VARVAL}(FY)$, 表示其值由状态变量 FX 、 FY 的实时值决定。加载 ADAMS 的控制插件, 输出机械模型到 MATLAB, 得到用于联合仿真的 4 个文件。再通过 MATLAB 命令调用生

成的用于控制的机械模型模块,将其与 Simulink 编制的 所示。
控制系统整合,最后得到联合仿真的控制系统如图 5

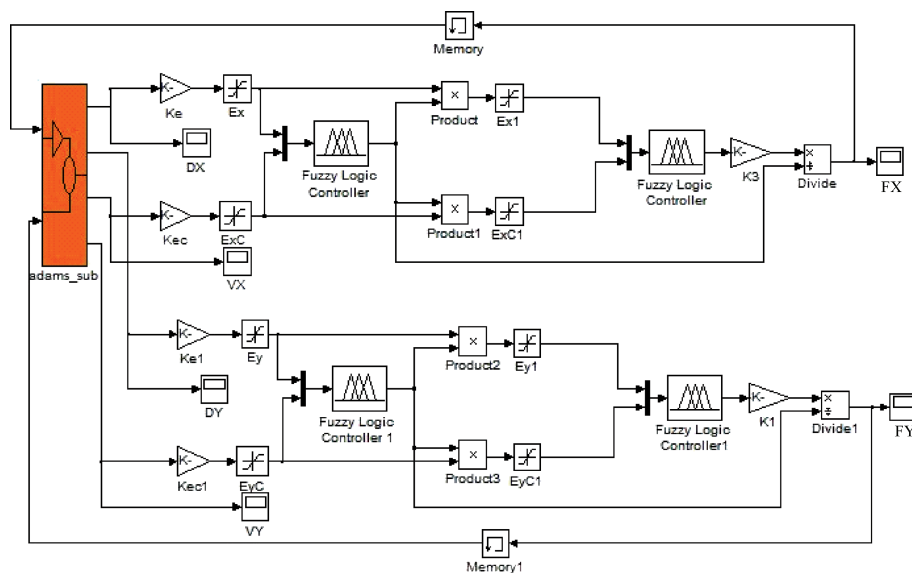


图5 联合仿真控制系统

设置机械系统模块的交互模式为 interactive,表示在计算过程中实时查看 ADAMS 的模型的运行情况。计算模式设置为离散模式,数据交换时间间隔为 0.001 s。分别计算轮式机器人在没有控制和有控制情况下货架质心的振动位移,比较两者的仿真结果,如图 6~9 所示。

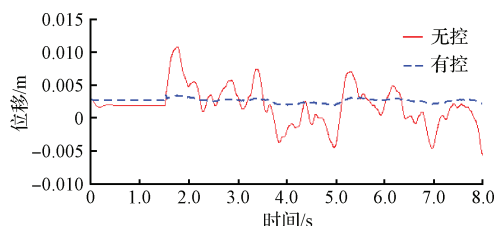


图6 轮式机器人俯仰方向货架质心位移

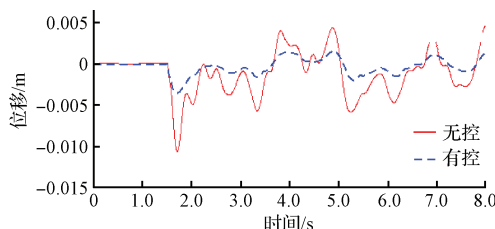


图7 轮式机器人偏转方向货架质心位移

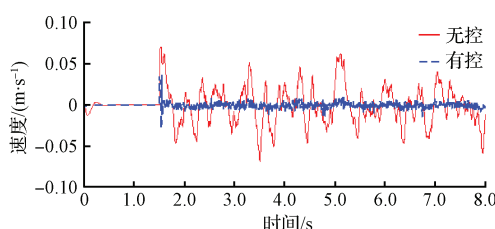


图8 轮式机器人俯仰方向货架质心速度

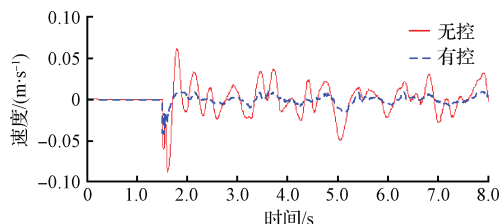


图9 轮式机器人偏转方向货架质心速度

分别计算各个测量变量的均方根值,结果如表 2 所示。

表2 计算结果对比

测量参数	无控	模糊控制	控制效率/%
俯仰位移/mm	3.289	0.345	89.5
俯仰速度/(mm/s)	23.660	3.520	85.1
偏转位移/mm	3.079	1.020	66.9
偏转速度/(mm/s)	20.200	5.560	72.5

从表 2 可知,在有控制的情况下,轮式机器人的货架位移在俯仰方向和偏转方向分别减小了 89.5%和 66.9%。

4 结 论

本文运用滤波白噪声模型建立了时域下随机路面的输入,并建立了一种自调整因子的模糊控制器,利用 MATLAB 与 ADAMS 联合仿真计算并对比分析了轮式机器人的货架在有控和无控情况下的振动情况,结果表明,轮式机器人的货架的振动在模糊控制下得到了有效的抑制,俯仰振动位移减小了 89.5%,偏转振动位移减小了 66.9%,证明了控制系统的有效性。

参 考 文 献

- [1] 方辉,程权成. 两轮自平衡机器人系统非脆弱控制器设计[J]. 国外电子测量技术, 2017,36(2):15-17.
- [2] 曹其新,张蕾. 轮式自主移动机器人[M]. 上海:上海交通大学出版社,2012.
- [3] 高美娟,杨智鑫,田景文. 移动机器人实时语音控制的实现[J]. 电子测量技术,2011,34(7):50-53,79.
- [4] 刘冬,张振国. 基于模糊控制的工厂无功补偿控制策略研究[J]. 电子测量技术,2017,40(6):93-96.
- [5] 肖友洪. 基于模糊控制的振动主动控制技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2003.
- [6] 鲍雪,王立志,胡明. 基于自适应模糊的旋转弹反演滑模控制律设计[J]. 仪器仪表学报,2016,37(6):1333-1339.
- [7] 王永宽,钱立军,牛礼民. 插电式混合动力汽车双模糊控制策略及其优化[J]. 电子测量与仪器学报,2016,30(2):209-217.
- [8] 李增刚. ADAMS 入门详解与实例[M]. 第2版. 北京:国防工业出版社,2012.
- [9] 卢凡,陈思忠. 汽车路面激励的时域建模与仿真[J]. 汽车工程,2015,37(5):549-553.
- [10] 周辅昆,刘小勤,曾水泉. 基于 MATLAB 的路面不平度数值模拟及验证[J]. 交通科技,2013(5):68-70.
- [11] 王亚,陈思忠,郑凯锋. 时空相关路面不平度时域模型仿真研究[J]. 振动与冲击,2013,32(5):70-74.
- [12] BADEAU R, DAVID B, RICHARD G. Fast approximated power iteration subspaces tracking[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2005, 53(8):2931-2941.
- [13] 尹志新,李端芳,唐萌,等. 基于 MATLAB 的时域路面不平度仿真研究[J]. 装备制造技术,2010(4):43-44,51.
- [14] 张立军,张天侠. 车辆四轮相关时域随机输入通用模型的研究[J]. 农业机械学报,2005,36(12):29-31.
- [15] 郭抗. 直线感应电动机自调整模糊控制系统的研究[D]. 长春:吉林大学,2008.

作 者 简 介

张梁,1993 年出生,硕士,主要研究方向为振动主动控制与结构动力学分析。
E-mail:zl15605193723@163.com