

带货架的轮式物流机器人碰撞建模与仿真分析^{*}

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. 昆山华恒焊接股份有限公司 昆山 215313)

摘 要:针对轮式物流机器人在运送货物过程中出现货架与机身的碰撞带来的振动问题,采用等效的非线性弹簧阻尼模型描述了货架与机身的碰撞过程,运用拉格朗日乘子法建立了包括货架在内的多刚体动力学模型,写出机器人整体的动力学方程。选取物流机器人典型的几个工况,通过 Newmark 差分法求解得到的微分-代数动力学方程。最后在 ADAMS 仿真软件中建立了轮式机器人的虚拟样机模型,在相同条件下进行分析计算,对比分析了轮式机器人在工作过程中货架的运动状态,为轮式物流机器人的稳定性控制奠定了基础。

关键词:物流机器人;碰撞;Newmark;多体动力学

中图分类号: TP202 TP242 TB122 **文献标识码:**A **国家标准学科分类代码:** 410.20

Modeling and simulation on vibro-impact of wheeled mobile logistics robot with warehouse rack

Zhang Liang¹ Zhang Fang¹ Jiang Qi¹ Zhu Wei²

(1. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics State Key Laboratory of Mechanics and

Control of Mechanical Structures, Nanjing 210016, China;

2. Huaheng Welding Co., Ltd. Kunshan 215313, China)

Abstract: In order to analyze the vibration caused by the impact between warehouse rack and wheeled mobile logistics robot (WMLR) during cargo transportation, equivalent nonlinear spring-damping model is used to describe the impact process between the rack and WMLR, and the multibody dynamic model of WMLR as well as the warehouse rack is established with Lagrangian Multiplier Method. The result of differential-algebraic equation obtained from multibody dynamic model is calculated by using Newmark difference method in terms of several typical work cases of the rack. A virtual prototype of WMLR is also established in ADMAS, and the dynamic response of the rack during transportation is analyzed and compared with the results of analytical model. The results provide significant instructions for stability control of WMLR.

Keywords: wheeled mobile robot; impact; Newmark; multibody dynamics

0 引 言

现代工业机器人的发展极大的提高了社会工业自动化水平^[1-4],轮式物流机器人的引入有效的提高了工业仓储物流的工作效率,减小了工业成本。然而其在运送货物的过程中货架的晃动会引起机器人车身和货架的碰撞,增加了轮式物流机器人的不稳定性,其行进速度也因此受到了限制。因此有必要对轮式物流机器人在工作过程中货

架的运动特性进行分析研究,为进一步提高机器人的运行速度提供数据指导。

本文研究的轮式物流机器人是典型的且具有非完整约束的多体系统,随着多体动力学的发展,轮式机器人的运动学和动力学模型的建模方法也越来越丰富完善,许多学者在建模方法上做了大量的研究。Roberson 等人^[5]讨论了刚体建模的计算机模拟办法,FEATHERSTONE R 等人^[6]论述了多刚体系统中接触碰撞问题的计算方

收稿日期:2017-04

^{*} 基金项目:机械结构力学及控制国家重点实验室(南京航空航天大学)自选研究课题(0115K01)、江苏高校优势学科建设工程基金(PAPD)资助

法,夏鸿建^[7]提出了一种对于多体子系统的数值解法,能够快速计算出多体动力学方程的数值解。目前,机器人的主要采用的建模方法有相对坐标法、绝对坐标法、旋量法、凯恩法、自然坐标法等方法^[8-10]。对于轮式机器人这种具有非完整约束的多体系统,必须附加对多余约束的描述,一种方法就是采用牛顿-欧拉方法,该方法能够将非完整约束直接融入到方程中,当子构件较多的时候,该方法的建模过程比较复杂^[11]。而拉格朗日乘子法通过引入拉格朗日乘子,从而引入动力学普遍方程中消除的理想约束力^[12],本文在此基础上推导轮式物流机器人的多体动力学模型,然后运用 Newmark 差分算法编制 MATLAB 程序求解得到的微分代数方程,并在 ADAMS 中建立轮式物流机器人和货架的虚拟样机,对比分析两者的计算结果。

1 动力学建模

1.1 模型分析与简化

实际的轮式物流机器人构件十分复杂,在保留必要的模型特点又不影响计算精度的前提下需要对模型进行简化,机器人内部的元器件可以作为集中质量处理。物流机器人的模型主要包括:前后辅助转向轮的连杆及悬挂弹簧、主动轮的电机及其弹簧悬挂、货架、机身与车轮。所有部件都作为刚体处理,之间的连接假设为理想约束,不考虑摩擦及间隙的影响,简化后模型的示意图如图 1 所示。

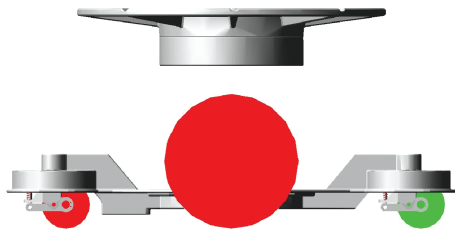


图 1 轮式机器人简化示意图

主动轮与电机通过旋转铰连接,电机与机器人机身通过悬挂连接,前后轮与悬挂连杆之间也为旋转铰接。

轮式机器人可以近似看作车辆形式的结构,轮子与地面的约束为非完整约束,分析其运动时可以在机器人车身的质心和地面 B_0 之间增加一个虚铰 O_1 ,只考虑机器人前进的情况,在地面情况理想时,此虚铰只有 3 个自由度,地面的一个移动自由度体现机器人沿地面的行驶自由度,竖直方向的位移体现机器人的上下振动,绕转轴的旋转自由度体现机器人前后俯仰的运动,其他铰的编号在下图中标明,刚体 B_1 表示机器人机身, B_2 为主动轮的电机, B_3 、 B_4 分别为左、右主动轮, B_5 为前轮悬挂连杆, B_6 为前轮, B_7 为后轮悬挂连杆, B_8 为后轮, B_9 为货架,其拓扑结构如图 2 所示。

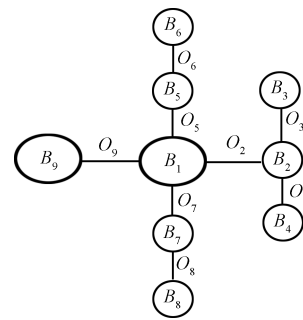


图 2 轮式物流机器人拓扑结构

1.2 多体动力学模型推导

1.2.1 货架与机身的碰撞模型

接触碰撞的过程具有很强的非线性特征,目前还没有通用性的解析模型去描述这个过程,工程应用大多是基于经验和实验进行的,在忽略物体变形的基础上,多刚体碰撞动力学能够较好的描述碰撞模型,经典的 HERTZ $H^{[13]}$ 接触理论将静力学中的理论公式运用到低速碰撞领域中,在处理球面碰撞的模型中依然被广泛应用,然而经典假设的理想化使得许多复杂情况下的结果往往与实际相差甚远,同时由于碰撞过程中摩擦的引入进一步加大了求解的困难和精度问题。等效弹簧阻尼模型可以研究碰撞过程中碰撞力的历史,认为接触碰撞力与接触区域的材料变形大小(产生刚性力)和变形速度(产生阻尼力)有关^[14]。

本文所涉及到的碰撞是幅度较小,低速间歇碰撞,同时货架与机器人的接触面都是平面,在货架的底部边缘有突起的结构与机器人的接触面上的凹槽配合用于定位,当货架与机器人有分离的趋势时,为便于分析,在碰撞过程中将其一端看作一个旋转铰约束,另一端的中点处为接触碰撞点,如图 3 所示。

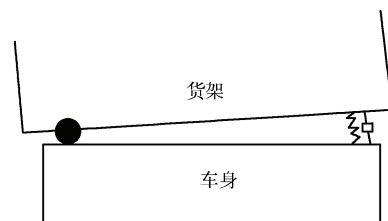


图 3 货架与物流机器人接触碰撞模型

这种非线性的弹簧阻尼模型虽然完全不符合实际的物理过程,然而在描述碰撞过程的工程实际中能够得到很好的应用。碰撞力的解析表达式需要知道碰撞的材料特性以及碰撞的发生位置和碰撞前的距离,本文研究的轮式机器人与货架之间在运行过程中相对滑动速度很小,可以忽略接触带来的摩擦影响。因此,接触点的法向力可表示为如下形式:

$$F = \begin{cases} 0 & h > h_0 \\ \max\{0, k(g_{i,j})^e - \text{step}(|g_{i,j}|), 0\} & \\ 0, d_{\max}, C_{\max} \dot{g}_{i,j} \} & h \leq h_0 \end{cases} \quad (1)$$

式中： h_0 为接触点碰撞的触发间隙， h 为两接触点的距离， $g_{i,j}$ 表示接触点法向距离或渗透深度， e 为力的指数， d_{max} 为最大渗透距离， C_{max} 为渗透距离最大时的阻尼系数。 $step$ 为三次插值阶跃函数，表示阻尼系数随着渗透距离的增大而增大，当渗透距离达到最大值 d_{max} 时，阻尼系数为 C_{max} 。货架与车身均为钢材料，接触刚度系数取 10^8 N/m，力的指数取 1.5，最大阻尼系数为 $1\ 000$ N·s/m，最大渗透深度为 $0.000\ 1$ m。

1.2.2 整体模型动力学方程

假设各刚体(除货架外)的内接旋转铰均与质心重合，以 B_i 的质心 O_i 为基点建立连体基 $(O_i, e^{(i)})$ 。轮式机器人车身 B_1 的连体基 $(O_1, e^{(1)})$ 中， $e_3^{(1)}$ 轴垂直于车身向上， $e_2^{(1)}$ 轴在车身平面指向前进方向，其他基矢量如图 4 所示。

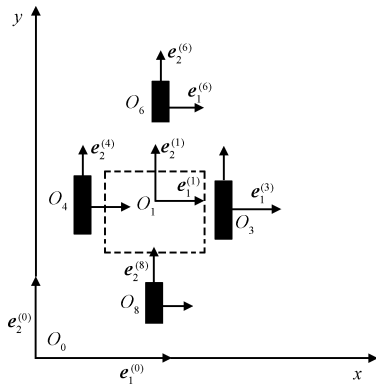


图 4 轮式物流机器人的基矢量和相对坐标

写出派生树的广义坐标矩阵 q 及相应的转轴 P 和滑移轴矢量矩阵 K ：

$$\left. \begin{aligned} q &= (q_1^T \quad q_2 \quad q_3 \quad \cdots \quad q_9)^T \\ P &= \text{diag}(p_1 \quad p_2 \quad p_3 \quad \cdots \quad p_9) \\ K &= \text{diag}(k_1 \quad k_2 \quad \cdots \quad k_9) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

其中：

$$\left. \begin{aligned} q_1 &= (y \quad z_1 \quad \theta_1)^T, \quad q_2 = z_2, \quad q_j = \theta_j \\ j &= 3, 4, \dots, 9 \\ p_1 &= (0 \quad 0 \quad e_1^{(1)})^T, \quad p_2 = (0 \quad 0 \quad 0)^T \\ p_3 &= p_4 = p_5 = p_6 = p_7 = p_8 = p_9 = e_1^{(0)} \\ k_1 &= (e_2^{(1)} \quad e_3^{(1)} \quad 0)^T, \quad k_2 = e_3^{(2)} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

各个连体基之间的坐标转换矩阵为

$$\begin{aligned} L_{01} &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_1 & \sin\theta_1 \\ 0 & -\sin\theta_1 & \cos\theta_1 \end{pmatrix} \\ L_{05} &= \begin{pmatrix} \cos\theta_5 & 0 & -\sin\theta_5 \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta_5 & 0 & \cos\theta_5 \end{pmatrix} \\ L_{07} &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_7 & \sin\theta_7 \\ 0 & -\sin\theta_7 & \cos\theta_7 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

$$L_{19} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_9 & \sin\theta_9 \\ 0 & -\sin\theta_9 & \cos\theta_9 \end{pmatrix} \quad (4)$$

多体系统动力学方程普遍形式为：

$$\sum_{i=1}^n [(m_i \ddot{r}_i - F_i^e) \delta r_i + (J_i \omega_i + \varepsilon_i - M_i^e) \delta \omega_i] - \delta P = 0 \quad (5)$$

式中： F_i^e 为外力主矢， M_i^e 为外力主矢相对质心的主矩， $\varepsilon_i = \omega_i \times (J_i \times \omega_i)$ ， δP 为铰和力元的总虚功率，整理后的简化方程可写成：

$$M \ddot{q} - K = 0 \quad (6)$$

式中： M 为广义质量矩阵， K 为广义力矩阵。

假设轮子在地面上作纯滚动运动，即与 M 地面的接触点速度为零，据此可以得到物流机器人的非完整约束：

$$H \dot{q} = b \quad (7)$$

式中： H 为约束矩阵， b 为约束方程对时间的导数组成的向量。

然后引入与非完整约束方程数相等数量的拉格朗日乘子 λ ，将非完整约束方程整合到动力学方程最后得到整体动力学方程为：

$$M \ddot{q} = K + H^T \lambda \quad (8)$$

物流机器人的基本参数如表 1 所示，悬挂的弹簧刚度如表 2 所示，根据这些参数可以确定物流机器人的广义力矩阵 K 和广义质量矩阵 M 。

表 1 轮式物流机器人的基本参数

刚体	质量/kg	转动惯量/kg·m ²
机身	223.38	14.32, 9.98, 17.40
轮轴	20.64	0.01, 0.05, 0.05
主动轮	12.23	0.10, 0.097, 0.097
连杆	0.36	0.000 2, 0.000 3, 0.000 4
辅助转向轮	1.4	0.002, 0.001 3, 0.001 3

表 2 悬挂弹簧的刚度

悬挂	主动轮悬挂	辅助转向轮悬挂
刚度/N·mm ⁻¹	105.2	52.6

2 动力学方程的数值解

通过多体动力学建立的方程通常是微分代数方程(DAE)，一般情况下没有解析解，需要借助计算机计算数值解。文献[15]提出了一种求解多体系统微分-代数方程的拉格朗日乘子方法，在时间上按 Newmark 差分形式对方程进行离散，将完整约束进行泰勒展开，约束方程的违约为精确度的一阶小量，从而无须进行违约修正。运用该算法进行 MATLAB 编程计算，初始广义坐标值与广义速度都设为零。需要注意选择合适的步长和误差精度，否则

结果会发散。本文由于需计算碰撞力,因此时间步长设为0.001,精度设为 10^{-5} 。

因为不同的工况,即货架上货物的重量及摆放位置的不同会影响货架的重心位置与转动惯量,本文选取了4种常用的物流机器人工作状态进行建模求解,4种工况的示意图如图5所示,对应的货架重心及转动惯量在表3中给出。

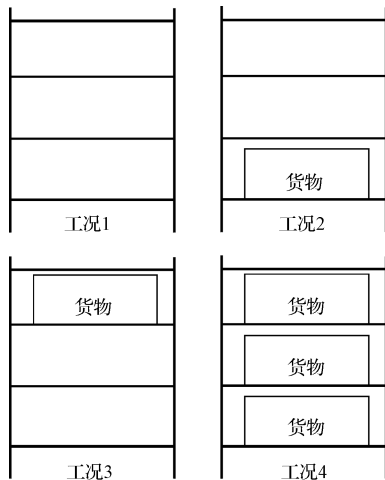


图5 轮式物流的货架工况示意图

表3 不同工况下货架重心高度与转动惯量

工况	1	2	3	4
重心高度/m	0.80	0.40	1.26	0.92
转动惯量/kg·m ²	5.48	8.16	10.08	19.46

由于重力的作用,首先需要物流机器人进行一次静平衡分析,然后在平衡位置进行其他运动状态的分析。得到的结果如图6所示。

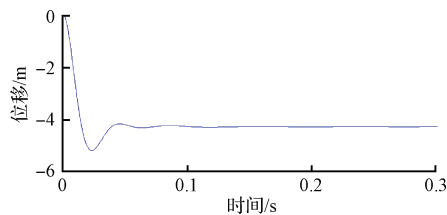


图6 静平衡分析后机器人的质心位移

考虑货物放置会有偏心的情况,将货架的重心位置水平偏移货架宽度的20%,即0.06m。将货架的重心和惯量等参数代入到轮式机器人的动力学方程,用MATLAB运行求解得到货架重心相对地面坐标系的偏转角,结果如图7所示。

由上图的结果可以看出货架的偏转角跟其重心位置和重量都有关系,重量越重和重心越高,偏转角越大。

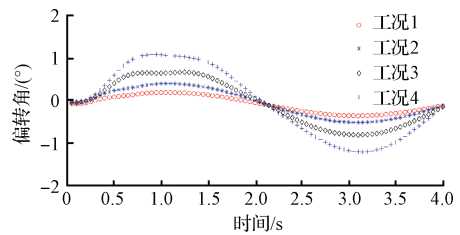
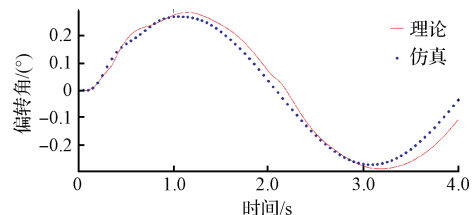


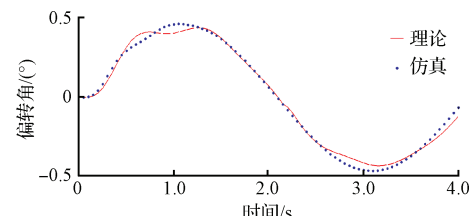
图7 轮式机器人的货架的偏角响应

3 ADAMS 仿真结果与对比分析

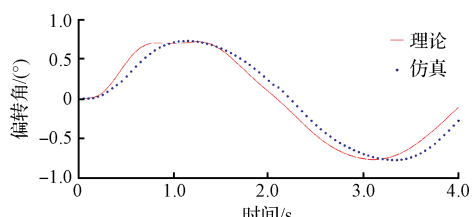
将三维几何CAD模型导入到仿真软件ADAMS中,根据上文的模型简化方法对该实体模型进行简化,在与轮子最低点相切的地方建立路面模型,设置轮子与地面、货架与机身的接触,将算法设置为碰撞。设置各部件之间的约束副,最后在主动轮的旋转副上设置速度驱动,驱动函数为 $\text{step}(\text{time}, 0, 0, 2, 1/0.14) + \text{step}(\text{time}, 2, 0, 4, -1/0.14)$,将求解器设置为GSTIFF,选择SI2积分器,仿真时长为4s,步长为0.001s,得到的结果如图8所示。



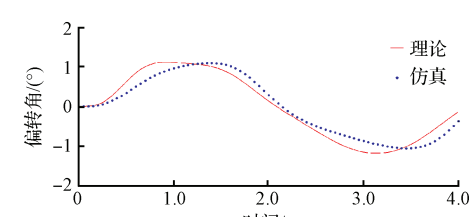
(a) 工况1



(b) 工况2



(c) 工况3



(d) 工况4

图8 货架偏角仿真结果与理论计算对比

从上图可以看出理论计算和仿真结果基本一致,各个工况的理论计算和仿真结果的最大误差为17%,认为仿真动力学模型正确,可以进行进一步分析计算。

4 结 论

等效的非线性弹簧阻尼模型能描述碰撞过程的碰撞力,本文结合多体动力学理论将货架与物流机器人的碰撞过程以外作用力的形式引入到整体模型的动力学方程中,通过 Newmark 差分法计算得到了4种常用工作状态下的货架偏转角响应,并在 ADAMS 中建立了虚拟样机,分析对比了两者结果,证实了理论模型的正确性,对于物流轮式机器人的稳定性研究和控制打下了基础。

参 考 文 献

- [1] 吕书信,张北伟,王泽澄. 基于 STM32 分拣搬运机器人控制系统的设计[J]. 国外电子测量技术, 2016, 35(9):101-104.
- [2] 高申勇,许方镇,郭鸿杰. 基于弹簧模型的移动机器人路径规划研究[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(4): 796-803.
- [3] SONG A, ZENG H, YANG R, et al. Fundamental problems in rehabilitation robots based on neuro-machine interaction[J]. Instrumentation, 2014, 1(3): 1-16.
- [4] 吴成中,王耀南,冯明涛,等. 基于神经网络的医药微弱异物视觉检测机器人[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(12):1746-1756.
- [5] ROBERSON R E, SCHWERTASSEK R. Dynamics of multibody systems[M]. Springer Verlag, Berlin, 1988.
- [6] FEATHERSTONE R. Rigid body dynamics algorithms[M]. Springer, New York, 2008.
- [7] 夏鸿建,王波兴,陈立平. 多体系统动力学子系统求解算法[J]. 计算力学学报, 2009, 26(1):20-25.
- [8] 戎保,芮筱亭,王国平,等. 多体动力学研究进展[J]. 振动与冲击, 2011, 30(7):178-187.
- [9] 刘铸水,洪嘉振. 柔性多体系统动力学研究现状与展望[J]. 计算力学学报, 2008, 25(4): 411-416.
- [10] 杨新民,杨海根. 动力学参数可视化仿真软件研究与设计[J]. 电子测量技术, 2016, 30(12):15-26.
- [11] 梅红,王勇. 轮式机器人的动力学建模及跟踪控制[J]. 机床与液压, 2009, 37(9):127-129.
- [12] 刘延柱,潘振宽,戈新生. 多体系统动力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2014.
- [13] HERTZ H. On the contact of elastic solids (in Ger.)[J]. Journal fur die reine und angewandte Mathematik, 1881(92):156-171.
- [14] 张云波. 多体动力学接触与碰撞建模研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.
- [15] 原亮明,王成国,刘金朝. 一种求解多体系统微分-代数方程的拉格朗日乘子方法[J]. 中国铁道科学, 2001, 22(2): 54-57.

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: zll5605193723@163.com