

基于刚柔耦合仿真模型的高地隙喷雾机 转向机构特性

杨方飞¹, 闫光², 郝云霄¹, 刘克格¹

(1. 北京飞机强度研究所, 北京 100083; 2. 北京信息科技大学 仪器科学与光电工程学院, 北京, 100192)

摘要: 针对高地隙自走式喷雾机转向系统复杂的运动学、动力学等转向特性, 建立其数字样机, 并在此基础上, 考虑转向机构的大变形运动与构件的结构变形的相互耦合问题, 对转向油缸固定支架柔性化处理, 分析转向机构运动过程中的柔性体与刚性体耦合时的运动学、动力学特性, 并与全刚体构件的转向机构进行了对比, 结果表明: 转向油缸固定支架柔性化后, 与刚性体相比, 角位移、角速度、铰接处的接触力均有较大幅度的增加, 进一步对等效应力、总变形变化进行仿真, 结果表明: 柔性固定支架满足转向系统使用要求。

关键词: 机械设计; 高地隙喷雾机; 转向机构; 刚柔耦合; 转向特性

中图分类号: TH113.2; TP391.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2015)03-0857-07

DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb201503025

Study on the characteristics of steering system for high clearance sprayer based on rigid-flexible coupling simulation model

YANG Fang-fei¹, YAN Guang², HAO Yun-xiao¹, LIU Ke-ge¹

(1. Beijing Aircraft Strength Institute, Beijing 100083, China; 2. School of Instrumentation Science and Opto-Electronics Engineering, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, China)

Abstract: The rigid body dynamics is widely used in current research of the digital prototype of agricultural equipment without considering the mutual coupling problem between the large displacement of component movement and small displacement of the structural deformation. For the complex dynamic characteristics of steering system in high clearance boom sprayer, a digital prototype of steering system is established with flexible part of steering hydro-cylinder fixation. The influence of the flexible-body fixation in the steering system on its performance is researched. The kinematics and dynamics characteristics of the rigid-flexible coupling influence component movement are revealed. Compared with whole rigid components, the results show that the maximum angular displacement, angular velocity and contact force at hinged place are increased dramatically considering the rigid-flexible coupling. Analysis results of equivalent stress and translational displacement show that the strength of the flexible fixation meets the application requirements.

Key words: mechanical design; high clearance sprayer; steering system; flexible-rigid coupling; steering characteristics

收稿日期: 2014-06-09.

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2011BAD20B01).

作者简介: 杨方飞(1978-), 男, 研究员, 博士. 研究方向: 机械数字化设计与仿真. E-mail: kingyff@163.com

0 引言

高地隙自走式喷雾机是为了解决我国高秆作物生长中后期施药作业难而制造的新型农业装备,转向系统是其核心部件,对于喷雾机的作业性能和整机可靠性具有重要影响。目前国内对于汽车、工程机械领域的转向系统研究较为成熟,在转向助力装置^[1]、转向传动机构^[2]、转向特性分析^[3]、运动特性分析与仿真^[4]等方面已有较多研究成果,但在农业机械领域,关于转向系统的研究并不多,且主要集中于拖拉机的转向液压系统^[5]、自动控制系统的研究^[6]。国外自走式喷雾机经历了几十年的发展,在动力转向系统方面已进行了深入的研究,并在众多的机型上得到了应用;国内对于该领域的研究则刚刚起步^[7],窦玲静对 3WZG-3000A 型全液压驱动高地隙自走式喷雾机转向系统的运动学转向特性进行了分析,并结合仿真结果对转向油缸固定支架加以改进优化^[8],但对于转向特性的动力学分析没有涉及。

近年来,随着高性能计算机的不断出现以及各种有效数值算法的提出,多刚体机构的动力学建模方法有了长足的发展^[9-10],相关的建模理论、计算方法及软件工程等已经相当完善^[11-15],但在多柔体系统建模方面,相关的研究工作尚在开展之中^[16-17]。由于工程实际问题大多属于柔性多体动力学问题,以往为了便于求解,往往将问题简化为多刚体动力学问题或者结构动力学问题。而对于实际多体系统,构件小位移柔性变形运动与大位移的刚性运动之间的耦合问题十分突出,使得准确分析刚柔耦合多体系统的动力学性态和对机器实施精确控制变得很困难。

本文针对高地隙自走式喷雾机转向系统的部件进行柔性化处理,考察转向系统在刚柔耦合作用下的运动学、动力学特性,为准确分析喷雾机转向系统的转向特性奠定基础。

1 刚柔耦合多体动力学建模的基本理论

由于工程中实际存在的大量机械运动可以归结或简化为平面问题,因此针对多柔体的平面运动建立方程。

1.1 柔性体参考坐标系的建立

柔性体系统的平面坐标系如图 1 所示,包括整体惯性坐标系 OXY , 平移坐标系 $O'_iX'_iY'_i$ 和物

体坐标系 $O''_iX''_iY''_i$, $O'_iX'_iY'_i$ 固结于 O'_i , 并随之旋转。分析柔性体的运动,尤其是在小变形的情况下,可将运动过程近似分解为刚性平移、刚性转动、变形运动的合运动。

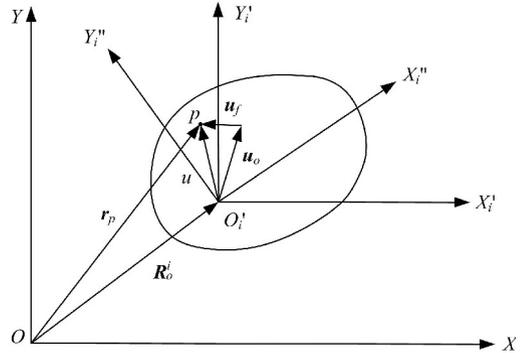


图 1 柔性体上点的描述

Fig. 1 Description of point in the flexible body

从图 1 可知,柔性体上点 p 的位移可表示为:

$$r_p = R_o^i + u = R_o^i + A(u_o + u_f) \quad (1)$$

式中: r_p 为 p 点在整体坐标系下的位置向量; R_o^i 为平移坐标系原点的位置向量; A 为物体坐标系到平移坐标系的旋转变换矩阵; u_o 为整体刚性位移向量; u_f 为局部弹性变形位移向量。

1.2 运动学方程的建立

当整体刚性运动和弹性运动存在相互耦合作用时,由于无法获得柔性体局部弹性变形 u_f 的精确解,因此一般采用将弹性体离散成有限个自由度或用有限个广义坐标来表示:

$$u_f = T_1 S T_2 q_j \quad (2)$$

式中: T_1 为向量 \bar{u} 从单元坐标系到物体坐标系的变换矩阵; S 为与空间相关的基函数; T_2 为节点位移向量从物体坐标系到单元坐标系的变换矩阵; q_j 为在物体坐标系下的 j 单元节点位移向量。

将式(2)代入式(1),并令 $N = T_1 S T_2$, 由代入后的式(1)求对时间的导数,即可得 p 点的速度为:

$$\dot{r}_p = \dot{R}_o^i + \dot{A}(u_o + Nq'_j) + AN\dot{q}_j \quad (3)$$

$$\dot{A} = \begin{bmatrix} -\sin\theta & -\cos\theta \\ \cos\theta & -\sin\theta \end{bmatrix} \dot{\theta} = A_\theta \dot{\theta}$$

同理,求对时间的导数,即可得 p 点的加速度。

1.3 动力学方程的建立

将动能 T 与势能 U_g 的公式代入拉格朗日方

程,得到柔性体方程式为^[18]:

$$\begin{aligned} \mathbf{M}\ddot{\xi} + \mathbf{M}\dot{\xi} - \frac{1}{2} \left[\frac{\partial \mathbf{M}}{\partial \xi} \right]^T \dot{\xi} + \mathbf{K}\xi + f_g + \\ \mathbf{C}\dot{\xi} + \left[\frac{\partial \mathbf{\Omega}}{\partial \xi} \right]^T \lambda = \mathbf{Q} \end{aligned} \quad (4)$$

式中: \mathbf{M} 为质量矩阵; \mathbf{K} 为刚度矩阵; f_g 为广义重力; \mathbf{C} 为阻尼矩阵; $\mathbf{\Omega}$ 为欧拉角; λ 为拉格朗日乘子; \mathbf{Q} 为外部广义力。

1.4 刚柔耦合动力学方程的建立

结合柔性体系统动力学方程与多刚体研究方法,则可获得刚柔耦合多体系统动力学方程:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \mathbf{T}}{\partial \dot{q}^i} \right) + \left(\frac{\partial \mathbf{T}}{\partial q^i} \right) + \mathbf{C}_q^T \lambda = \mathbf{Q}^i \quad (5)$$

式中: q_i 为第 i 个节点的位移向量。

系统的约束方程为:

$$\mathbf{C}(q, t) = 0 (t \text{ 为时间}) \quad (6)$$

联立方程(5)(6),即构成了刚柔耦合系统的动力学方程。

2 转向系统刚柔耦合模型的建立

2.1 转向系统几何模型的建立

本文仍以 3WZG-3000A 型高地隙自走式喷雾机为研究对象,图 2 为其转向系统装配简图,应用三维造型软件 Inventor 对转向系统各零部件完成几何建模,并进行虚拟装配、干涉检查以及运动仿真,从而获得符合实际运动规律的前轮转向机构几何模型^[19-20]。为了简化分析过程,对于不影响后续分析的轮边马达、马达安装支架在建模时予以忽略。

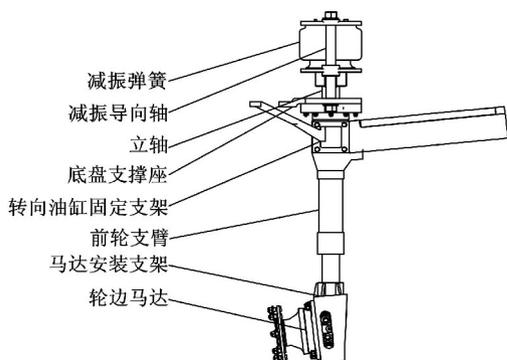


图 2 转向机构装配主视图

Fig. 2 Main view of steering system assembly

2.2 转向系统仿真模型的建立

本文研究基于 Recurdyn V7R1 仿真平台。Recurdyn 是由 FunctionBay 公司基于相对坐标

系运动方程理论和完全递归算法开发出的最新多体系统动力学仿真软件,与传统多体动力学仿真软件相比,其对于求解大规模的多体系统动力学问题具有较快的求解速度和稳定性,同时对于机构接触碰撞问题也有较好的适应性。

将建立的转向系统模型导入到 Recurdyn 中,此时各部件均为刚体,且部件之间相对位置不变,但部件之间的约束已不存在,需要在 Recurdyn 中重新定义。对于不存在相互运动关系的部件之间定义固定约束,如减振导向轴与减振弹簧之间定义固定约束;对于存在转动关系的部件之间(如转向油缸接头铰接处)定义为转动约束;对于转向油缸,因其缸桶与缸壁存在平动关系,因此定义为平移约束;对于支腿受地面支撑的反馈作用,将其定义为圆柱约束,即前轮支臂与立轴存在平移和转动的复合运动,考虑问题的简化,在本文中仅考虑转动,以此作为转向系统的输入。

定义约束副后的转向系统模型如图 3 所示,共包括 35 个刚体,1 个柔性体(转向油缸支架),共定义了 31 个固定副,2 个旋转副,1 个圆柱副,1 个平移副。



图 3 定义约束副后的转向系统模型

Fig. 3 Steering system model with defined constraints

2.3 接触定义

分析系统构件发生接触时的特性,重点考虑的是构件之间接触力的计算。用 Recurdyn 计算接触力是基于 Hertz 接触理论,并在此基础上做了改进,计算接触产生的法向接触力 f_n 的公式为:

$$f_n = k\delta^{m_1} + c \frac{\dot{\delta}}{|\dot{\delta}|} |\delta|^{m_2} \delta^{m_3}$$

式中: k 为接触刚度系数; c 为阻尼系数; δ 为接

触穿透深度; $\dot{\delta}$ 为接触穿透深度的导数(接触点的相对速度); m_1 、 m_2 、 m_3 分别为刚度指数、阻尼指数、凹痕指数。

为了考查转向油缸两端接头与刚性底盘支撑座及柔性转向油缸固定支架之间的接触力,定义两对接触力,分别为刚性面接触和刚柔面接触。同时,由于转向油缸支架的柔性特性,需定义其与底座之间的接触力。

2.4 驱动力

为了简化问题,模拟转向系统的运动时,前轮支臂与立轴之间的圆柱约束仅考虑将转动作为驱动,忽略平动。对圆柱约束施加角位移驱动,驱动表达式设为 $0.4 \times \sin(\text{time} \times \text{PI})$,表示立轴以 2 s 为一个周期做正弦运动,最大转动角度为 22.92° 。

经预分析,转向系统包含 0 个冗余约束,模型验证成功。

2.5 转向油缸固定支架的柔性化

Recurdyn 支持两种类型的柔性体:模态柔性体(RFlex)和有限元柔性体(FFlex)^[21]。

RFlex 方法事先用有限元程序计算出部件的模态参数,然后代替多系统中的刚体,该柔体在多体中受力后的响应是用模态叠加法计算得到,模态柔性体法的优势在于可以将复杂的有限元网格模型缩减为一组模态,使计算变得简单易行,其缺点是由于接触是用虚拟的“触点”表述,因此该方法对接触问题的建模不准确,同时当柔性变形后模态模型的更新仍需要调用外部有限元程序进行计算获得,因此给分析带来了不便。

FFlex 方法可以采用内置的有限元程序计算柔体的响应,将其柔性体分割成若干个彼此之间只在节点处相互连接的单元,每一个单元都是一个弹性体,单元位移用节点位移插值函数来表示,由位移插值函数和动力学基本原理来确定每个单元的质量矩阵和其他特性矩阵,采用有限元柔体法还能够精确地表达接触力引起的局部变形。但是当柔性体数目较多时,会对求解的速度产生极大影响。因此在本文研究中,对关键构件进行柔性化处理,而对其他构件仍按照刚体处理,这样既可加快求解速度,又可提高求解精度。

对喷雾机转向系统而言,转向油缸固定支架因其结构特点,且对于转向系统具有关键性作用,将其进行柔性化处理,而对于其他构件仍作为刚

体考虑。转向油缸固定支架的有限元柔性体如图 4 所示,其中划分网格 16 366 个,节点 4672 个。点 A 为转向油缸固定支架与油缸铰接处。



图 4 转向油缸固定支架柔性化处理

Fig. 4 Flexible model of steering hydro-cylinder fixation

3 刚柔耦合运动学、动力学仿真

3.1 运动学仿真

对转向系统分别进行刚性体运动仿真以及刚柔耦合运动仿真,获得转向油缸固定支架分别为刚性体和柔性体时铰接处 A 点的角位移曲线及角速度曲线,分别如图 5 和图 6 所示。

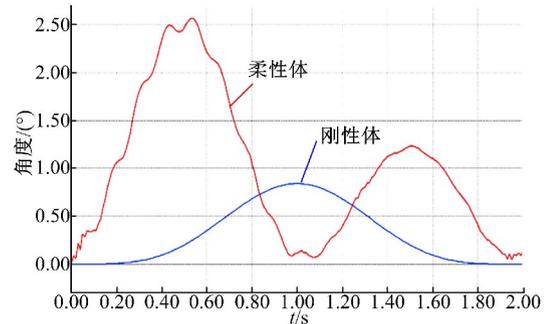


图 5 铰接处 A 点的角位移变化曲线

Fig. 5 Angular displacement curve of point A

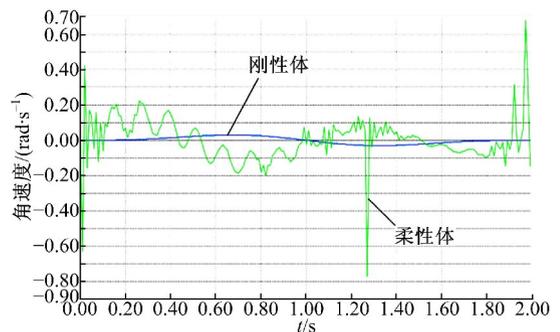


图 6 铰接处 A 点的角速度曲线

Fig. 6 Angular velocity curve of point A

从角位移变化图中可以看出,转向油缸固定支架柔性化后,在一个周期内,铰接处 A 点的位置变化曲线呈两个波峰,变形最大值发生时间为 0.53 s 时,角位移值约为 2.52° ,此时受预设的驱动力作用,前轮立轴转动方向发生变化,油缸由压

缩状态转变为拉伸状态。柔性化后,角位移的最大值是刚性体时最大值 0.8° 的 3.2 倍。

从角速度曲线可以看出,转向油缸固定支架柔性化后,铰接处 A 点的角速度总体呈现 2 个正弦波,但各点位置振荡,在仿真初期的 $t=1.26\text{ s}$ 以及 $t=1.98\text{ s}$ 时出现大的峰值。经分析,原因是受前轮立轴转动方向发生了变化的影响。同时也受油缸转向支架柔性化的影响,柔性化后的角速度幅值为刚性体时的 5.1 倍。

3.2 铰接处 A 点的接触力分析

对喷雾机转向系统分别进行刚性体动力学仿真及刚柔耦合动力学仿真,获得转向油缸固定支架分别为刚性体和柔性化后铰接处 A 点所受的接触力,如图 7 所示。

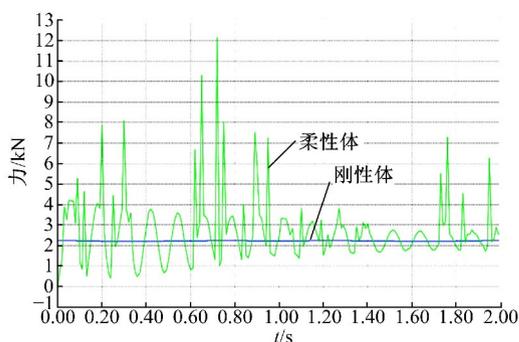


图 7 铰接处 A 点的接触力曲线

Fig. 7 Contact force curve of point A

从图中对比可以看出,转向油缸固定支架柔性化后,铰接处 A 点的接触力趋势完全改变,变得振荡起伏,且出现多个波峰,波峰值最大达到 12.2 kN。经分析,出现这一现象的原因除了受转向油缸固定支架柔性化的影响外,铰接点处的间隙也对接触力产生了影响。从图中得出,固定支架柔性化后,最大接触力为刚性体时的 5.3 倍。

3.3 柔性固定支架动态应力、变形分析结果

将转向油缸固定支架柔性化后,通过刚柔耦合仿真,可得到柔性固定支架在一个运动周期内的等效应力、应变以及总变形。图 8 为油缸压缩某一时刻($t=0.46\text{ s}$)总变形云图;图 9 为油缸拉伸某一时刻($t=1.44\text{ s}$)转向油缸固定支架柔性体的等效应力云图。从等效应力云图可以看出,最大应力值发生在节点 71 570 处,时间为 1.51 s 时,最大等效应力值为 350 MPa;从总变形云图能够看出,最大总变形值发生在节点 71 197 处,时间同样为 1.51 s 时,最大总变形量为 2.19 mm。由于转向油缸固定支架采用优质合金钢锻造加焊

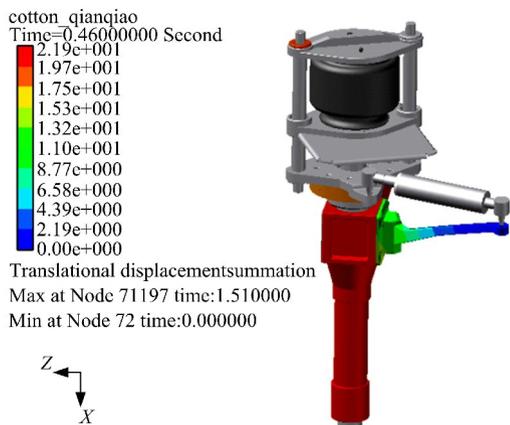


图 8 柔性固定支架总变形云图

Fig. 8 Displacement cloud chart of flexible fixation

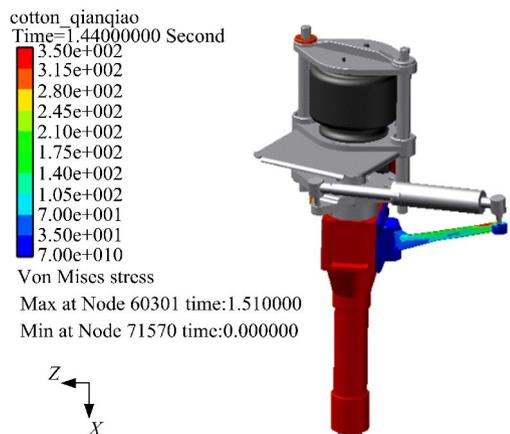


图 9 柔性固定支架等效应力云图

Fig. 9 Equivalent stress cloud chart of flexible fixation

接工艺加工,最大等效应力小于所选材料的许用应力,满足强度使用要求;最大总变形量对转弯半径的大小和转向的稳定性影响不大。

4 结束语

建立了高地隙自走式喷雾机底盘转向系统的刚柔耦合运动学、动力学分析模型,应用多体动力学软件 Recurdyn 计算了转向油缸支架柔性化后铰接处的角速度、角位移等运动特性参数曲线,并与系统构件均为刚体时的铰接处运动特性参数进行了对比;同时对刚性体和转向油缸固定支架构件柔性化时铰接处的接触力进行了对比,结果为:构件柔性化后的运动特性参数规律发生明显变化,角位移的最大值是刚性体时的 3.2 倍,角速度幅值为刚性体时的 5.1 倍,而柔性化后铰接处 A 点的接触力呈现振荡起伏,且最大值为刚性体时的 5.3 倍。此外还获得了柔性转向油缸固定支架随时间的等效应力、总变形变化情况,得到了最大

等效应力值及最大总变形值。

通过高地隙喷雾机转向系统的构件大位移运动与其转向油缸固定支架小位移柔性变形运动的耦合分析,揭示了趋于真实的转向系统中因构件柔性化作用对转向特性产生的影响,为进一步考虑复杂转向系统的可靠性分析奠定了基础。

参考文献:

[1] 施国标,申荣卫,林逸. 电动助力转向系统的建模与仿真技术[J]. 吉林大学学报:工学版,2007,37(1):31-36.

Shi Guo-biao, Shen Rong-wei, Lin Yi. Modeling and simulation of electric power steering system[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2007,37(1):31-36.

[2] 黄小平,毛金明. 平面梯形机构不能精确实现无侧滑转向的证明[J]. 农业机械学报,2003,34(6):47-49.

Huang Xiao-ping, Mao Jin-ming. Proof on impossibility for any plane trapezoid linkage to reproduce ackermann steering exactly[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2003,34(6):47-49.

[3] 刘喜东,刘应东. 考虑转向速度的汽车操纵稳定性分析[J]. 机械工程学报,2011,47(10):95-100.

Liu Xi-dong, Liu Ying-dong. Analysis on vehicle handling and stability considering steering velocity [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(10):95-100.

[4] 王同建,陈晋市,赵锋,等. 全液压转向系统机液联合仿真及试验[J]. 吉林大学学报:工学版,2013,43(3):607-612.

Wang Tong-jian, Chen Jin-shi, Zhao Feng, et al. Mechanical-hydraulic co-simulation and experiment of full hydraulic steering systems[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2013,43(3):607-612.

[5] 何卿,高焕文,李洪文,等. 基于 DSP 的拖拉机电液转向控制系统[J]. 农业机械学报,2007,38(10):1-6.

He Qing, Gao Huan-wen, Li Hong-wen, et al. Electrohydraulic steering control system of tractor based on DSP[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2007,38(10):1-6.

[6] 张智刚,罗锡文,李俊玲. 轮式农业机械自动转向控制系统研究[J]. 农业工程学报,2005,21(11):77-80.

Zhang Zhi-gang, Luo Xi-wen, Li Jun-ling. Auto-

matic steering control system of wheeled model farming machinery[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005,21(11):77-80.

[7] 毛罕平,倪静,韩绿化,等. 高地隙液压四轮驱动喷雾机转向防滑控制系统[J]. 农业机械学报,2012,43(6):58-62.

Mao Han-ping, Ni Jing, Han Lu-hua, et al. Turning anti-slip control system of hydraulic four-wheel drive high clearance sprayer[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2012,43(6):58-62.

[8] 窦玲静. 高地隙自走式喷雾机轮距可调式转向系统的设计与研究[D]. 北京:中国农业机械化科学研究院,2012.

Dou Ling-jing. Development and research on wheel track adjustable steering system of high clearance self-propelled sprayer[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences,2012.

[9] 闫楚良,杨方飞. 机械数字化设计新技术[M]. 北京:机械工业出版社,2007.

[10] 洪嘉振. 计算多体动力学[M]. 北京:高等教育出版社,1999.

[11] Shabana A A. Flexible multibody dynamics: Review of past and recent developments[J]. Multibody System Dynamics, 1997,1:189-222.

[12] 洪嘉振,蒋丽忠. 柔性多体系统刚-柔耦合动力学[J]. 力学进展,2000,30(1):15-20.

Hong Jia-zhen, Jiang Li-zhong. Flexible multibody dynamics with coupled rigid and deformation motions[J]. Advances in Mechanics, 2000,30(1):15-20.

[13] 李杰,闫楚良,杨方飞. 联合收割机振动筛的动态仿真与参数优化[J]. 吉林大学学报:工学版,2006,36(5):701-704.

Li Jie, Yan Chu-liang, Yang Fang-fei. Dynamic simulation and parameter optimization of the combine harvester vibration sieve[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2006,36(5):701-704.

[14] 杨方飞,闫楚良. 基于视景仿真的联合收获机虚拟试验技术[J]. 农业机械学报,2011,42(1):84-88.

Yang Fang-fei, Yan Chu-liang. Virtual test of combine harvester based on visual simulation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2011,42(1):84-88.

[15] Yang Fang-fei, Yan Guang, Yan Chu-liang. Research on the cutting unit's simulation of combine

- harvester based on digital modeling and kinematic analysis technologies[C]//Proceedings of the 8th International Conference on Frontiers of Design and Manufacturing, 2008:23-26.
- [16] Heidari H R, Korayem M H, Haghpanahi M, et al. A new nonlinear finite element model for the dynamic modeling of flexible link manipulators undergoing large deflections[C]//2011 IEEE International Conference on Mechatronics (ICM). Istanbul, Turkey, 2011:375-380.
- [17] 董得忠,郭军,丁希仑,等. 双连杆柔性臂力学建模与仿真分析[J]. 机械科学与技术, 2006, 25(4):472-474.
- Dong De-zhong, Guo Jun, Ding Xi-lun, et al. Dynamic modeling and simulation analysis of a two-link flexible robot manipulator [J]. Mechanical Science and Technology, 2006, 25(4):472-474.
- [18] 潘祥生,李露,沈惠平,等. 基于刚柔耦合建模的工业机器人瞬变动力学分析[J]. 机械设计, 2013, 30(6):24-27.
- Pan Xiang-sheng, Li Lu, Shen Hui-ping, et al. Transient dynamic analysis of industrial robot based on rigid-flexible hybrid modeling[J]. Journal of Machine Design, 2013, 30(6):24-27.
- [19] Yan Chu-liang, Li Jie, Zhang Shu-ming, et al. Digital design of combine harvester based on virtual prototyping[J]. Frontiers of Mechanical Engineering in China, 2007, 2(2):159-163.
- [20] 李杰,闫楚良,杨方飞. 联合收割机数字化建模与关键部件仿真[J]. 农业机械学报, 2006, 37(9):83-86.
- Li Jie, Yan Chu-liang, Yang Fang-fei. Digital modeling and key parts simulation of combine harvester [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2006, 37(9):83-86.
- [21] 焦晓娟,张潜渭,彭斌彬. Recurdyn 多体系统优化仿真技术[M]. 北京:清华大学出版社, 2010.