

电动平移式喷灌机行走同步控制与仿真

苑严伟¹, 徐海港², 姜金铸³, 李 颀¹, 张小超¹

1. 中国农业机械化科学研究院; 土壤植物机器系统技术国家重点实验室, 北京 100083
2. 山东时风(集团)有限责任公司, 山东高唐 252800
3. 山东农业大学园艺学院, 山东泰安 271000

摘要 为避免大型平移式喷灌机传统试验中反复试验、改进造成的浪费及受季节、人力、物力等的制约, 研究了大型平移式喷灌机行走控制系统在虚拟环境中的仿真和控制方法。对大型平移式喷灌机进行测绘, 用 Pro/Engineer 建立三维仿真模型, 用 Multigen Creator 软件建立三维虚拟农田场景。利用地面车辆力学理论, 建立大型喷灌机的塔架车受力数学模型。在 Visual C++ 6.0 环境下, 结合 Multigen Vega 软件, 将三维喷灌机模型加载到虚拟场景中, 对大型平移式喷灌机驱动系统和行走系统进行协同仿真。根据仿真实验结果, 对大型喷灌机实体样机行走控制参数进行优化, 并进行田间行走控制试验。仿真结果及田间试验表明, 该系统能真实反映大型喷灌机在驱动电机作用下的行走状态。田间试验中, 大型喷灌机能进行同步行走, 相邻各跨之间的最大夹角误差为 0.04°。

关键词 平移式喷灌机; 平行系统理论; 行走控制系统; 人机交互; 虚拟现实

中图分类号 S127

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2010)14-0080-05

Simulation of Walking Control System of Linear Moving Irrigation

YUAN Yanwei¹, XU Haigang², JIANG Jinzhu³, LI Jie¹, ZHANG Xiaochao¹

1. State Key Laboratory of Soil-Plant-Machine System Technology; Chinese Academy of Agricultural Machinery Sciences, Beijing 100083, China
2. Shandong Shifeng (Group) Co. Ltd., Gaotang 252800, Shandong Province, China
3. College of Horticulture, Shandong Agricultural University, Tai'an 271000, Shandong Province, China

Abstract A large scale linear-moving irrigation system is more efficient with less water, but the traditional trial and error involves much waste of water, material and human resource. To avoid this problem, the virtual reality technology is used to simulate the control and drive system. Three-dimensional models of the irrigation system are built according to their scale with Pro/Engineer, and three-dimensional scenes of farmland are established with Multigen Creator software. The mechanical model of the irrigation system is built according to the principles of ground vehicle dynamics. Visual C++ 6.0 and Multigen Vega are used to program an application, which loads the three-dimensional models of the irrigation system into the scenes of farmland. Then the control system and the drive system are simulated to monitor in real-time and to optimize the system parameters. The simulation results and tests show that the system can reflect the large-scale irrigation effectively, and optimize the control parameters through simulation, with the error of angle less than 0.04°.

Keywords linear move irrigation; parallel systems theory; walking control system; human-computer interaction; virtual reality

0 引言

大型喷灌机是指工作功率大于 37.3kW, 控制灌溉面积超过 26.7hm² 的机型。其自动化程度高, 单位资源量(电、水、人

力)消耗少, 生产效益高, 是代表现代科学技术水平的喷灌机^[1]。

平移式喷灌机又称直线连续自走式喷灌机。大型平移式喷灌机是大型喷灌机中应用最广的一种机型。它的结构包括

收稿日期: 2010-03-18

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(2008AA100902, 2006AA10A305); “十一五”国家科技攻关项目(2006BAD11A01); 《科技导报》“博士生创新研究资助计划”项目(kjdb20090102-8)

作者简介: 苑严伟(中国科协所属全国学会个人会员登记号: E040100027M), 博士研究生, 研究方向为虚拟现实和 GPS/GIS 技术, 电子信箱:

yyw215@163.com; 张小超(通信作者, 中国科协所属全国学会个人会员登记号: E041200093S), 研究员, 研究方向为农业机械自动控制与智能化仪器, 电子信箱: zxc@caams.org.cn

桁架、塔架、尾部的悬架,传动部件及行走部件,基本实现通用化^[2]。平移式喷灌机呈矩形喷洒,喷灌覆盖率较其他类型喷灌机高,但构造复杂,需要导向控制系统,对塔架同步性的精度要求高,需要完善的电气控制系统^[3-5]。

传统的控制系统试验方法需要对大型平移式喷灌机整机机器控制系统进行大量的田间试验,通过参数给定和行走状态数据记录,改进控制参数,然后再试验,如此多次反复才能得到较好的控制效果。这种反复试验、记录、计算、改进、再试验,浪费大量人力财力,导致设备开发生产周期长、成本高,加之灌溉试验受作物生长季节影响大,使大型平移式喷灌机的传统试验成为一项巨大工程^[6-8]。

虚拟现实技术为解决这些问题提供了有效方法,并带来了生产领域中方法和观念上的变革^[9-11]。基于虚拟现实技术的大型平移式喷灌机虚拟试验模式的主要特点是可在实际喷灌试验前,对平移式喷灌机的控制系统进行过程分析、性能分析、控制效果分析、控制参数优化、灌溉效果评价等,大大缩短了试验周期,节约了成本。

本研究针对传统试验的弊端,在虚拟建模和虚拟试验的基础上,根据平行系统理论解决复杂问题的方法,在不断探索和改善的原则下,寻求复杂系统的有效解决方案,建立系统的新型研究体系和方法^[12-14]。通过改进控制方法和控制参数,进行平移控制性能检测和导向控制性能检测现场试验,实现根据倾角传感器数据控制对应的电机转速。

1 行走控制系统工作原理

数字化精准控制系统针对国产大型喷灌机采用各跨同步行走的自动控制方式,使用变频器分别控制各跨的电机运行,依据摆角归零法自动调节各跨的摆角大小,由下位机对采集的数据进行分析和处理,进而控制各跨的运行速度,实现自动调节,并将所有运行参数通过无线电台上传到上位机,由上位机对数据进行再分析和处理,并将结果下载到下位机执行相应的控制,上位机同时还记录喷灌机各时刻的各跨运行状态。

数字化精准控制系统还采用 GPS 采集数据^[15-16],实时记录喷灌机行走状态,结合多组喷头组合式可调精量喷灌方式,可依据土壤水分分布处方图进行变量作业,实现大型喷灌机的数字化精准控制^[17]。总体结构如图 1 所示。按工作原理可分为监视单元、控制单元、驱动单元和反馈单元 4 部分。

监视单元由 1 台计算机(上位机)、1 个数传电台、1 个 GPS 接收机(固定)和辅助电源组成。

控制单元由 1 块单片机控制板、1 个数传电台、1 个 GPS 接收机(移动)、1 块喷头控制板、辅助电源等组成。单片机控制板的数传电台接收计算机发来的控制信号,依据反馈信号的大小控制输出相应的控制信号到驱动单元。单片机控制板同时还接收 GPS 接收机(移动)的数据,并将此数据与各反馈数据等通过数传电台返回计算机。三相交流电源通过空开和接触器后在控制开关的作用下直接输出到驱动单元。

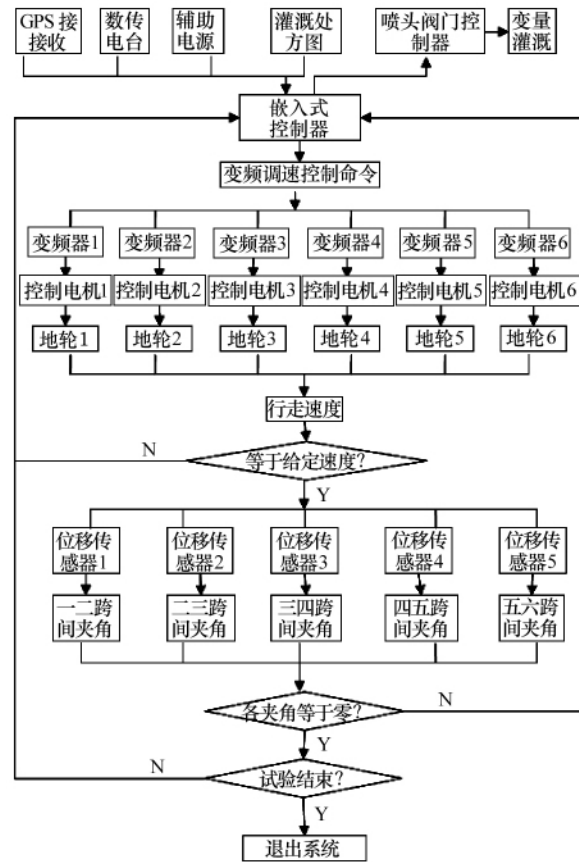


图 1 大型喷灌机变量灌溉控制系统结构

Fig. 1 Variable rate irrigation control system of large scale irrigator

驱动单元由 8 台变频器组成,每台变频器驱动 1 台电机,所有变频器的三相电源输入端并联连接到控制单元输出的三相电源上,所有变频器的 RS485 口并联连接到控制单元输出的控制信号端上,各变频器的控制由各自的地址识别。

反馈单元由 6 个位移传感器和 1 个位置传感器组成,位移传感器安装在喷灌机相邻两跨的连接处,位置传感器安装在整机桁架的中间部位,电源由控制单元提供,输出位移信号和位置信号反馈到控制单元。

2 大型喷灌机三维模型的建立和驱动

2.1 大型喷灌机三维模型的建立

对大型平移式喷灌机实体进行拆卸,测绘各零部件结构尺寸,用三维制图软件 Pro/Engineer 对部件进行三维建模;将得到的三维零部件模型转换成后缀为 .obj 的模型文件;将 OBJ 格式的三维模型导入三维建模软件 Multigen Creator,导出为 FLT 格式的三维零部件模型;利用 Multigen Creator 软件对零部件模型进行装配,形成后缀为 .flt 格式的大型平移式喷灌机的整机三维仿真模型(图 2)。

将大型喷灌机模型的各个地轮置于不同的 DOF(动态节点)下,均赋以绕 x 轴旋转的运动模式;将大型喷灌机各跨视

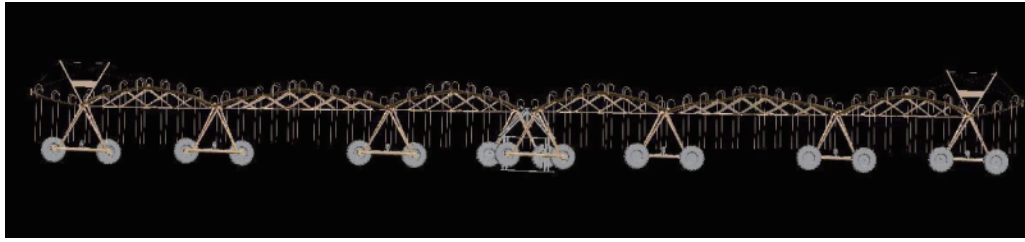


图2 大型平移式喷灌机三维模型
Fig. 2 3D models of linear moving irrigation

为刚体,分别置于不同的DOF下,赋以沿 y 轴方向平移的运动模式。为实现各跨之间摆角的变化,对各跨赋以相邻跨之间的连接点为支点, z 轴为转动轴的转动运动模式。

获取试验地块的地形海拔数据,将其转换成三维建模软件Multigen Creator支持的DED格式;将转化得到的DED文件导入Creator软件中,设定转换参数,生成三维地形模型;加载地形纹理数据,得到逼真的虚拟场景。

2.2 机电多系统协同仿真方法

虚拟场景下的大型平移式喷灌机电多系统协同仿真,是在Windows操作系统下,利用Visual C++ 6.0,结合Multigen Vega提供的API,编写应用程序实现的。编写虚拟场景下的大型平移式喷灌机电多系统协同仿真程序,调用三维虚拟农田场景,同时加载大型平移式喷灌机三维模型。通过输入设备键盘和鼠标改变运动参数,并根据场景中地形特征和参数设置情况,进行人机交互,实现对大型平移式喷灌机各跨的行走速度、相邻跨间夹角的实时检测和控制。

首先进行程序的初始化,给大型平移式喷灌机各跨所在位置赋初始值,启动大型平移式喷灌机各跨驱动电机,根据地势特征,各跨之间的作用力、大型平移式喷灌机自身重量以及行走时所受的摩擦力等因素,结合大型平移式喷灌机各部件在虚拟场景中受力的数学模型,实时计算大型喷灌机的位置和姿态变化,更新显示界面。

实时检测大型喷灌机各跨间的夹角,通过改变电机驱动力,结合各部件的物理特性,得到各跨运行速度、地轮转动速度、电机转速等,实时计算各跨的速度和位移,调整控制电机的转速,保证各跨在行走时保持在同一直线上。大型喷灌机行走控制的模拟流程如图3所示。

2.3 协同仿真的软件设计

2.3.1 坐标变换

大型喷灌机的受力、速度、位置等为矢量,在计算大型喷灌机姿态时,须考虑配合Vega进行实时计算。场景涉及的4种坐标系如表1所示。

计算大型喷灌机的位置及姿态需要在全局坐标系中进行,计算受力则需要在其角色对象坐标系中,这就需要进行坐标变换,将计算得到的局部坐标受力转化到绝对坐标系中。Vega提供的Tripod方法保证了大型喷灌机能够始终贴着

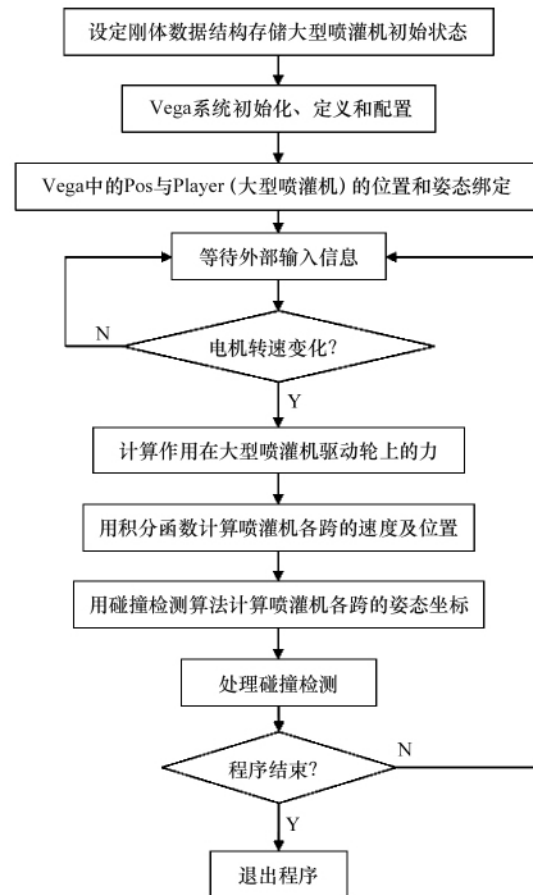


图3 大型喷灌机运动模拟流程
Fig. 3 Process of linear moving irrigation

表1 虚拟场景中的参考坐标系
Table 1 Coordinate system in virtual scene

参考坐标系	原点位置
绝对坐标系	与指定的场景数据库原点位置重合
观察者坐标系	与指定的观察者原点位置重合
角色对象坐标系	与指定的角色对象原点位置重合
自定义坐标系	与用户自定义的坐标系原点位置重合

地面行驶,并能实时地提供大型喷灌机的姿态信息。大型喷灌机的位置是指其在绝对坐标系中的坐标,姿态是指其角色

对象坐标系的 3 个坐标轴相对于绝对坐标系的转角。

模型的六自由度姿态变化通常用欧拉角 $(x, y, z, \theta, \psi, \varphi)$ 描述。其中, θ, ψ 和 φ 分别为绕 x, y, z 轴旋转的俯仰角、偏航角和横滚角, 由于欧拉方程的平衡环锁定性质, 在转角达到 90° 时, 变换矩阵中出现无穷大元素, 仿真终止。泊松运动学方程能避免欧拉方程的奇异性, 但随着仿真的进行, 正交误差不断积累。标定算法或者求解旋转矩阵的各元素常使用其他形式的旋转角表达式, 这里引入四元数以进行坐标变换。

令三维空间中的向量 $v=(x, y, z)$ 与四元数 $V=0+xi+yj+zk$ 对应, 设 L 是一过原点的旋转轴, 其方向向量为 $n=(n_1, n_2, n_3)$, 那么, 绕 L 轴旋转 θ 角的旋转变换可用实四元数 R 表示, 有

$$R = \cos \frac{\theta}{2} + \sin \frac{\theta}{2} \mathbf{n} \quad (1)$$

则 V 绕 L 旋转 θ 角后的实四元数为

$$V_1 = RVR^{-1} \quad (2)$$

若旋转轴 L 不经过坐标原点, 设 P 为旋转轴上 1 个已知点, 则通过坐标平移, 可推出其旋转变换公式为

$$V_1 = R(V-P)R^{-1} + P \quad (3)$$

2.3.2 基于 MFC 和 VEGA 库函数的仿真程序实现

控制台应用程序尚不能满足良好的人机交互性的要求, 而直接利用 Windows 的 API 编程非常繁琐, 效率低下。本研究采用 MFC 结构框架搭建自己的交互。

用程序向导生成一个单文档界面 (SDI) 应用程序框架, 编辑和修改相应的代码实现在视图框架中显示 Vega 渲染窗口, 通过添加菜单、工具条和对话框对 Vega 窗口的渲染过程进行实时的交互式控制, 在单独线程中执行 Vega 循环, 全屏显示 Vega 渲染窗口, 在状态栏实时地显示当前观察者的位置和姿态等。

为使程序便于扩展, 将此大型喷灌机动态模拟模块放入单独的文件中, 并用改造的视图类 myMFCVegaView 中的 runVega() 函数建立工作者线程从而调用此模块, 在 runVega() 函数中检查 ADF 文件中是否定义了必要的 Vega 类实例。为实现良好的运动控制和碰撞反应, 使用 Vega 提供的 Input Devices 类和自定义运动模式。在 Lynx 下设定 Input Device, 建立鼠标和键盘的输入设备。由于这种控制不能满足虚拟试验中对大型喷灌机的控制的要求, 且不能进行碰撞检测, 添加运动模式 Callback 回调函数, 使用 vgMotRegister() 函数进行注册, 使用 vgMotionCallbackStruct 结构体作回调函数的参数, 自定义运动模式的关键是在运动模式更新的触发事件中填写自己需要的控制代码, 这就要使用在 Input Device Tool 中获得的输入设备属性资料。

工作者线程的建立使得先前构造的物理模型和相应的控制函数很容易在 MFC 框架内得到实现, 并且易于建立键盘和鼠标控制的虚拟行走控制程序, 采用 MFC 下的消息响应函数 OnKeyDown 和 OnKeyUp 消息处理函数记录按键信息, 再在 vega 主线程里等待接收。

3 试验与结果分析

3.1 系统仿真试验

对大型平移式喷灌机的控制参数进行优化, 根据评价结果, 改变大型平移式喷灌机各跨的控制电机转速, 保证大型平移式喷灌机相邻跨间的摆角在允许的范围内, 同时调整各跨的行进速度, 使效果达到最优。

本系统所模拟的大型喷灌机, 共由 6 跨组成, 每跨的横向长度, 在 50~100m 之间, 支撑各跨桁架的, 有 8 个塔架车, 图 4 是大型喷灌机模型在虚拟现实环境中行走控制的界面。

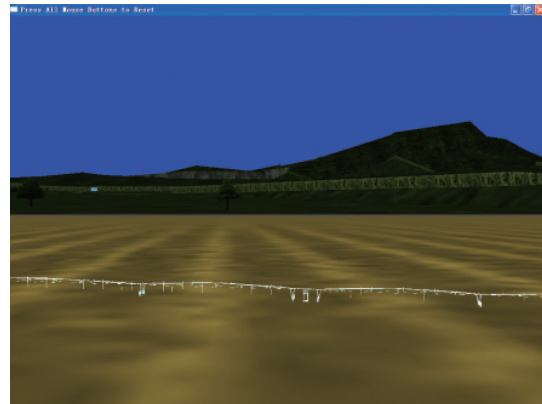


图 4 大型喷灌机在虚拟环境中的行走控制界面

Fig. 4 Interface of the linear moving irrigation control system

每个塔架车上, 安装有控制电机, 通过变速装置驱动塔架车上的 2 个地轮, 带动大型喷灌机行走。试验时, 8 个驱动电机以同样的驱动功率同时开启, 大型喷灌机在电机的驱动下启动。由于田地表面坡度、地面坚实度和土壤特性的差异, 各跨实际行走速度不一样, 对各跨的实际行走速度进行积分, 计算各跨之间在前进方向上的位置差异, 实时调整相应跨的塔架车上的控制电机转速, 保证各跨行走速度一致。

3.2 田间试验

在中国农业机械化科学研究院小王庄试验站进行大型喷灌机同步行走控制的田间试验。设定控制电机基准运行频率为 7.5Hz, 通过实时检测各夹角传感器数据, 同时调整各对应控制电机的频率, 试验数据如表 2 所示。

从表 2 可以看出, 当给定各变频电机基准频率为 7.5Hz, 开始行走控制试验时, 大型喷灌机各地轮在变频电机驱动下整体向前移动。由于各地轮所受阻力不同, 前进速度也有差异, 表现在各夹角传感器读数的变化。根据各夹角传感器读数的变化调整对应的变频电机频率, 可使大型喷灌机同步行走, 相邻各跨之间的最大夹角为 0.04° 。

4 结论

为改进传统试验方法存在的弊端, 开发了大型平移式喷灌机的虚拟试验仿真系统。模拟试验证明, 本系统能够对大

表 2 大型喷灌机同步控制系统夹角传感器和电机频率数据

Table 2 Data of angle sensors and motors of the large scale irrigator

编号	传感器偏角/(°)						电机频率/Hz							行走 距离/m	
	01	02	03	13	12	11	01	02	03	04	14	13	12		11
1	0	0	-0.04	0.04	-0.02	0	8.85	8.31	7.63	7.32	6.54	7.37	8.19	7.61	622
2	0	-0.02	-0.04	0.02	0	0	7.18	7.18	7.6	7.1	6.89	7.4	6.68	6.54	626
3	0	0	-0.04	0.02	0.02	0	8.08	7.8	7.56	6.99	6.78	7.44	6.34	6.1	625
4	0	0	-0.04	0	0	0	8.02	7.86	7.68	7.28	7.09	7.32	6.44	6.16	632
5	-0.02	-0.02	-0.04	0.02	0.02	0	7.2	7.28	7.62	6.77	6.66	7.39	5.71	4.72	634
6	0	0	-0.02	0	0	0	8.81	8.43	7.67	7.43	7.08	7.33	6.85	6.67	637
7	0	0	-0.04	0.02	0.02	0	8.59	8.13	7.77	7.25	6.66	7.23	5.63	4.65	643
8	0	-0.02	-0.02	0.02	0	0	7.92	7.64	7.7	7.4	6.58	7.3	6.84	6.14	643
9	0	-0.02	-0.02	0.02	0	-0.02	7.42	7.42	7.64	7.42	6.99	7.36	7.26	7.92	651
10	0	0	-0.02	0	0.02	0	8.57	7.81	7.57	7.32	7.14	7.43	6.35	5.53	653
11	-0.02	-0.02	-0.02	0.02	0.02	0	6.72	7.1	7.6	7.23	6.83	7.4	6.36	6.34	655
12	0	0	-0.02	0	0	-0.02	8.99	8.29	7.73	7.63	7.12	7.35	7.13	7.29	658
13	-0.02	0	-0.04	0	0.02	0	7.84	7.9	7.48	7.01	7.31	7.57	6.51	5.81	661
14	0.04	-0.02	-0.02	0.02	0	0.04	8.41	8.05	6.99	6.2	6.81	7.36	5.85	5.09	668
15	-0.02	-0.02	-0.02	0	-0.04	-0.04	6.55	7.01	7.31	6.66	9.18	8.5	9.6	11.9	670
16	0	0	0	0.06	0	-0.02	7.22	7.64	7.2	5.23	11.59	6.95	6.59	6.71	672

型喷灌机行走控制系统进行模拟仿真试验;能够对大型平移式喷灌机控制参数进行优化;现场试验表明,控制系统能保证大型喷灌机同步行走,最大夹角误差为 0.04° 。对该系统解除传统试验受作物生长季节制约,避免传统试验需要大型的设备和场地、开发周期长、成本高等弊端尚需进一步研究。

参考文献 (References)

- [1] Yeh C K, Liao Y T. Development of a GPS-operated sprayer-spraying at a destined field and by a fixed flow rate [C]/Proceedings of International Symposium on Automation and Mechatronics of Agricultural and Bioproduction Systems, 2002: 344-349.
- [2] 中华人民共和国机械电子工业部. JB/T 6280.1—1992 电动大型喷灌机技术条件[S]. 北京: 机械工业出版社, 1993.
Ministry of Machine Building and Electronics Industry. JB/T 6280.1—1992 Technology condition for electric large scale irrigator [S]. Beijing: China Machine Press, 1993.
- [3] 金宏智. 大型喷灌机技术在我国的应用与发展 [J]. 节水灌溉, 1998(4): 24-26.
Jin Hongzhi. *Water Saving Irrigation*, 1998(4): 24-26.
- [4] 何建强. 圆形和移动式喷灌机行走装置的力学性能研究 [D]. 北京: 中国农业机械化科学研究院, 2003.
He Jianqiang. Study on mechanical performance of drive unit of center pivot and linear irrigation [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, 2003.
- [5] 严海军. 基于变量技术的圆形和移动式喷灌机水量分布特性的研究 [D]. 北京: 中国农业大学水利与土木工程学院, 2004.
Yan Haijun. Study on variable rate technology based water distribution of center pivot and linear irrigation [D]. Beijing: College of Water Conservancy and Civil Engineering, China Agricultural University, 2004.
- [6] 金宏智. 大型喷灌机的引进及经验总结[J]. 农村机械化, 1999(3): 38-39.
Jin Hongzhi. *Agricultural Machinery*, 1999(3): 38-39.
- [7] Jimenez P, Thomas F, Torras C. 3D collision detection: A survey[J]. *Computers & Graphics*, 2001, 25(2): 269-285.
- [8] Ehmann S A, Lin M C. SWIFT: Accelerated proximity queries using multi-level voronoi marching[C]. Chapel Hill, NC 27599-3175, 2000.
- [9] Dukes M D, Perry C. Uniformity testing of variable-rate center pivot irrigation control systems[J]. *Precision Agriculture*, 2006, 7(3): 205-218.
- [10] Klocke N L, Hunter C, Alam M. Application of a linear move sprinkler system for limited irrigation research [C]/2003 ASAE Annual Meeting, Las Vegas, Nevada, 2003: 27-30.
- [11] 严海军, 金宏智, 李军叶, 等. 圆形和移动式喷灌机塔架车的纵向稳定性[J]. 农业机械学报, 2005(11): 42-46.
Yan Haijun, Jin Hongzhi, Li Junye, et al. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*, 2005(11): 42-46.
- [12] 王飞跃. 平行系统方法与复杂系统的管理和控制 [J]. 控制与决策, 2004(5): 485-489, 514.
Wang Feiyue. *Control and Decision*, 2004(5): 485-489, 514.
- [13] 王飞跃. 计算实验方法与复杂系统行为分析和决策评估 [J]. 系统仿真学报, 2004(5): 893-897.
Wang Feiyue. *Journal of System Simulation*, 2004(5): 893-897.
- [14] 王飞跃. 关于复杂系统的建模、分析、控制和管理[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2006(2): 26-34.
Wang Feiyue. *Complex Systems and Complexity Science*, 2006(2): 26-34.
- [15] 张小超, 王一鸣, 汪有祥, 等. GPS 技术在大型喷灌机变量控制中的应用[J]. 农业机械学报, 2004, 35(6): 37-40.
Zhang Xiaochao, Wang Yiming, Wang Youxiang, et al. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*, 2004, 35(6): 37-40.
- [16] Elton Robinson Farm Press Editorial Staff. GPS-guided center pivot eliminates need for buried wire[R/OL]. Southwest Farm Press. [2003-04-17]. http://southwestfarmpress.com/mag/farming_gpsguided_center_pivot.
- [17] Amir I, Alchanatis V. Procedure for predicting and designing moving sprinkler application patterns[J]. *Irrigation Science*, 1992(13): 93-98.

(责任编辑 陈广仁)