

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.04.009

喷杆喷雾机机架动态特性分析与减振设计*

陈树人¹ 韩红阳¹ 陈刚¹ 邵景世² 姚勇²

(1. 江苏大学现代农业装备与技术教育部重点实验室, 镇江 212013; 2. 江苏圆通运动车业有限公司, 镇江 212325)

摘要: 在 Pro/E 中建立了喷杆喷雾机机架的三维模型, 在 Hypermesh 中建立了机架的有限元模型, 并导入到 ANSYS 中进行了自由模态分析, 并通过模态实验分析了机架的振动特性并验证了有限元模型的准确性。结合模态分析结果, 分析了外部激励对机架动态特性的影响, 发现发动机 1、2 阶往复惯性力的频率会导致机架共振。通过谐响应分析得到机架的振动情况, 提出了避免机架与发动机共振的方案, 对比了减振前、后的机架位移响应幅值。结果表明, 安装橡胶减振元件后机架的动态特性得到明显改善, 提高了整机的操纵舒适性。

关键词: 喷雾机 动态特性 谐响应分析 减振

中图分类号: S49 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)04-0050-04

Dynamic Characteristic Analysis and Vibration Reduction Design for Sprayer Frame

Chen Shuren¹ Han Hongyang¹ Chen Gang¹ Shao Jingshi² Yao Yong²

(1. Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment and Technology, Ministry of Education, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China 2. Jiangsu Yuantong Sporting Vehicles Co., Ltd., Zhenjiang 212325, China)

Abstract: A 3-D model of a sprayer was built with Pro/E, and its finite element model was developed by using Hypermesh. It was imported to ANSYS for free modal analysis. With analysis of vibration characteristic and accuracy of the finite element model, the modal experiment was carried out. Combined with the modal analysis results, the influence of external excitation on the frame was analyzed. It was found that engine's first-order and second-order reciprocating inertial force frequency can cause frame resonance. Harmonic response analysis was carried out to obtain the vibration result of the frame. The method of avoiding resonance between frame and engine was proposed. The frame's displacement response was compared before and after vibration reduction. The results showed that dynamic performance and ride equality of the frame was effectively improved.

Key words: Sprayer Dynamic characteristic Harmonic response analysis Vibration reduction

引言

喷杆喷雾机为露天作业, 作业环境十分复杂, 磨损、振动比较大, 喷雾机机架必须能够适应各种复杂地形, 因此对其动态特性要求较高。喷雾机田间行驶时, 如果激励频率与机架固有频率耦合将发生共振, 从而影响喷雾机乘坐舒适性, 降低机架疲劳寿命

和喷雾质量。对机架的动态特性进行分析研究, 有利于降低车辆的振动, 为喷雾机的操控稳定性和行驶安全性提供参考^[1-2]。

本文通过模态解析法和实验法对某喷雾机机架进行动态特性分析, 以实验法验证解析法有限元模型的准确性, 分析外部激励对机架的动态特性影响, 在此基础上提出减振方案, 以改善机架的动态特性,

收稿日期: 2012-04-02 修回日期: 2012-05-14

* 镇江市农业支撑资助项目(NY2011002)、江苏省自然科学基金资助项目(BK2009200)和江苏省高校优势学科建设工程资助项目(苏财教(2011)8号)

作者简介: 陈树人, 教授, 博士后, 主要从事农业装备智能化研究, E-mail: srchen@ujs.edu.cn

提高喷雾机的乘坐舒适性。

1 机架的模态分析

1.1 机架几何模型的建立

用三维软件 Pro/E 建立喷杆喷雾机的机架模型。在 Pro/E 中对机架进行适当的简化,省略部分工艺装饰件、非承载件,忽略较小的工艺孔和倒角等对整体力学性能影响较小的几何特征^[3]。该机架主要由圆形钢管、矩形钢及异型钢焊接而成,样车实物如图 1 所示。

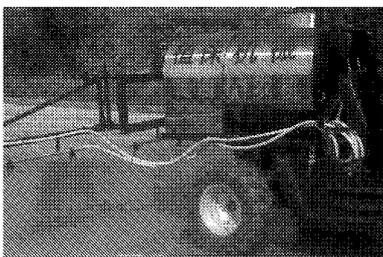


图 1 喷杆喷雾机实物图
Fig. 1 Factual picture of sprayer

1.2 机架有限元模态分析

机架模型在 Pro/E 中另存为 igs 格式后导入 Hypermesh 中进行有限元网格划分。机架的钢管属于薄壁结构,其厚度在 2 ~ 3 mm,故选择 shell63 单元对机架进行网格划分,网格大小为 8 mm。纵梁和横梁等关键部位用一维 REB2 单元模拟,其余各部件间的焊缝采用共用节点形式模拟^[3]。建立的有限元模型共 555 760 个单元,三角形单元不超过 10%。钢管材料为 Q235,泊松比 0.3,弹性模量 2.068×10^5 MPa,材料密度 $7 850 \text{ kg/m}^3$ 。在 ANSYS 中采用分块 Lanczos 法提取了机架的自由模态,得到了机架的前 6 阶固有频率和振型。机架 1 阶、6 阶振型如图 2、图 3 所示。

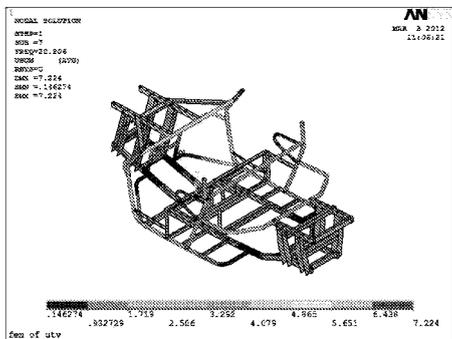


图 2 喷雾机机架的 1 阶振型
Fig. 2 First-order mode of sprayer's frame

1.3 机架的模态实验分析

机架模态实验即测量结构上某些点的动态输入力和输出响应,测量其频响函数矩阵,根据频响函数来估计模态参数。实验法可以验证所建有限元模

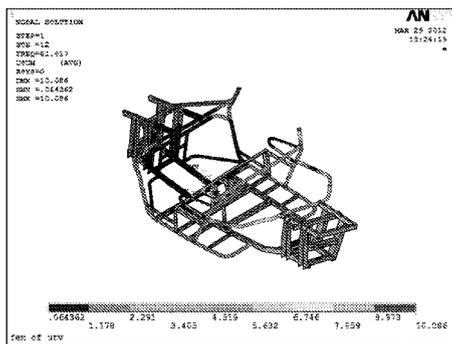


图 3 喷雾机机架的 6 阶振型
Fig. 3 Six-order mode of sprayer's frame

型的准确性,为后续的机架结构改进提供参考^[4]。

为了模拟自由状态,实验时用软橡胶绳将机架悬吊在空中。模态实验采用 MIMO 法,在机架上共布置了 105 个测点,3 个激励点,实测 105 个响应点的 3 个方向轴的振动加速度响应。在模态实验软件 Modalview 中建立机架模型,进行多次预实验并结合 ANSYS 仿真结果,最后选定 19 点、105 点、25 点作为激励点。机架布点如图 4 所示。对力信号和响应信号分别加力窗和指数窗,以减少频谱泄漏和噪声干扰^[4]。在软件中设定实验分析频率为 1 024 Hz,采样时间为 1 s。为防止力锤双击,将力锤双击检测幅度设为 80%。

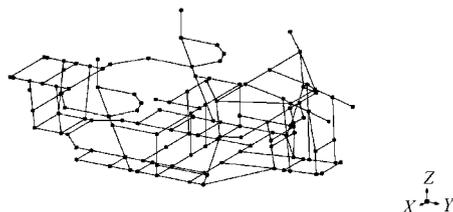


图 4 机架测点分布
Fig. 4 Measured points of frame

使用最小二乘复频率(LSCF)方法从一组多参考点 FRF 测量数据中提取模态参数,通过合成的 FRF 数据与原始 FRF 测量数据比较,验证模态估计质量。通过频响函数和模态置信准则(MAC)来验证实验的准确性^[5-6]。

表 1 是模态置信准则表,主对角线 MAC 均为 100%,非对角线上各阶 MAC 都较小,证明实验与分析的振型向量具有一定的相关性,估计的模态参数比较可靠^[4,7]。通过 ANSYS 计算的机架 6 阶固有频率和模态实验得到的 6 阶模态的固有频率如表 2 所示。对比表明,所建的有限元模型正确,能够反映机架的振动特性。

2 机架的动态特性分析

喷杆喷雾机在田间路面行驶时,机架受到的外部激励主要有:路面不平度引起车轮的不平衡激振

表1 模态置信准则

Tab.1 Modal assurance criterion %

频率/ Hz	模态					
	1	2	3	4	5	6
24.78	100					
30.71	2.9	100				
52.50	21.1	13.8	100			
56.20	3.7	17.3	2.7	100		
58.49	11.9	0.1	4.4	6.9	100	
60.18	0.1	7.0	1.4	7.8	14.7	100

表2 机架模态分析结果

Tab.2 Results of frame's modal analysis

阶次	实验模态/Hz	仿真模态/Hz	差值/Hz
1	24.78	20.81	3.97
2	30.71	28.74	1.97
3	52.50	52.46	0.04
4	56.20	55.28	0.92
5	58.49	60.74	-2.25
6	60.18	61.82	-1.64

和发动机工作时曲柄连杆机构的运动和燃烧爆发时引起的简谐振动。这些外部激励会传递到机架上,引起喷雾机的振动和噪声,影响喷雾机的使用寿命和乘坐舒适性^[8]。

2.1 路面不平度激励对机架动态特性的影响

路面不平度的激励频率与路面不平度及车速密切相关,根据时间频率公式^[2]

$$f = v / (3.6\lambda) \quad (1)$$

式中 v —— 车速, km/h

λ —— 路面不平度波长, m

取喷雾机的最高车速 30 km/h, 路面不平度波长 λ 为 0.32 m^[2], 得到路面最高激励频率为 26.04 Hz。显然, 1 阶频率小于该频率, 因此路面不平度激励可能会造成机架共振现象。但考虑到车身与机架的刚性连接可能抑制该阶振型, 还需要进行整车模态分析来验证^[9]。

2.2 发动机激励下的机架动态性能分析

发动机对机架振动产生的 3 种激励源包括: 旋转惯性力、往复惯性力和倾覆力矩。对于旋转惯性力和往复惯性力, 一般可以通过改进发动机结构加以平衡, 从而改进机架的振动。发动机在机架上的安装位置也决定了正常路况下, 发动机激励只对机架的弯曲变形有影响^[2,8]。

喷雾机采用 V 型双缸水冷四冲程发动机, 怠速为 1 000 r/min, 最高转速 3 300 r/min。根据发动机着火脉冲频率公式

$$\zeta = \frac{2vz}{60\tau} \quad (2)$$

式中 z —— 发动机缸数 τ —— 发动机冲程数

计算出发动机工作时的 1 阶惯性力频率范围为 16.7 ~ 55.0 Hz, 2 阶惯性力频率范围为 33.4 ~ 110.0 Hz。根据模态实验结果, 机架的前 6 阶频率中, 前 3 阶固有频率落在 1 阶惯性力频率范围内, 前 6 阶固有频率全部落在 2 阶惯性力频率范围内。所以, 机架在行驶中会发生共振。

3 机架减振方案谐响应分析

机架共振问题的解决措施包括: 抑制振源强度, 通过在发动机中加入平衡轴来减小 1 阶往复惯性力; 采用弹性悬挂技术减少发动机向机架的振动传输; 改进机架的结构, 使其固有频率漂移出发动机激励频率范围^[8]。

根据厂家要求, 本文选用第 2 种方案即安装橡胶隔振元件来实现减振目的。在连杆活塞往复运动产生垂直方向的激振力作用下, 发动机会发生受迫振动。传递率表达式为

$$\eta = \sqrt{\frac{1 + (2\varepsilon\theta)^2}{(1 - \theta^2)^2 + (2\varepsilon\theta)^2}} \times 100\% \quad (3)$$

式中 θ —— 激振频率与系统固有频率之比

ε —— 阻尼比

根据减振原理, 当 $\theta \geq \sqrt{2}$ 时, 系统进入隔振区, 随着 θ 的增大隔振效果增加。当 θ 为 2.5 ~ 5.0 时, 隔振效率可达 81% ~ 96%, 故在实际的应用中选取 θ 为 2.5 ~ 5.0。系统进入隔振区后, 随着隔振器阻尼的增大, 隔振效率会有所下降^[8]。

试制样机选用方柱形橡胶减振元件, 长度 73 mm, 宽度 60 mm, 高度 46 mm。根据橡胶减振元件计算公式^[10], 计算得到阻尼系数 $c = 922.428 \text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}$, $\theta = 3.97 > \sqrt{2}$, 理论上可以达到减振目的。减振元件安装如图 5 所示。

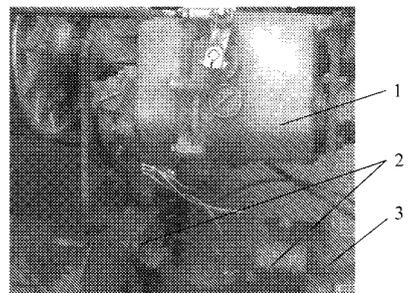


图5 安装在机架上的橡胶减振元件

Fig.5 Rubber damper installed on frame

1. 发动机 2. 橡胶减振元件 3. 机架纵梁

为了验证减振效果及乘坐舒适性, 在 ANSYS 中用 Full 法进行了谐响应分析。在 ANSYS 中建立了发动机有限元模型, 由于发动机结构比较复杂, 对其用集中质量点进行模拟, 并使用梁单元与机架相

连^[11]。发动机的垂直最大激励设为 2 000 N, 强制频率范围设为 24 ~ 80 Hz, 子步数为 56。前、后悬架减振器及橡胶减振元件使用 COMBINE14 单元模拟, 其中前减振器刚度 $K_1 = 35\ 820.2\ \text{N/m}$, 后悬架减振器刚度 $K_2 = 69\ 754.4\ \text{N/m}$ 。约束前悬架的 UX 、 UY 、 UZ 3 个自由度, 约束后悬架 UZ 、 UY 2 个自由度^[10]。

选择座椅横梁中点(30 114 节点)和发动机支座附近大梁上一点(32 812 节点)的 Y 、 Z 2 个方向位移响应作对比。图 6、7 为加装减振元件前、后 30 114 节点位移响应对比。由图可知在 60 Hz 处 Y 方向的振幅达到最大; 节点 30 114 在 70 Hz 处 Z 向位移达到最大。加橡胶弹性元件后, 60 Hz 处的 Y 向位移减小了 47.6%, 70 Hz 处的峰值基本消除。30 Hz 处 Z 向位移减小了 92.8%, 70 Hz 处的 Z 向位移减小

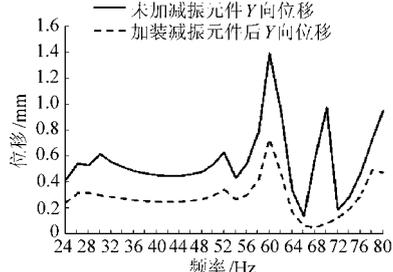


图 6 加装减振元件前后 30 114 节点 Y 向位移
Fig. 6 Y -displacement before and after adding damper at node 30 114

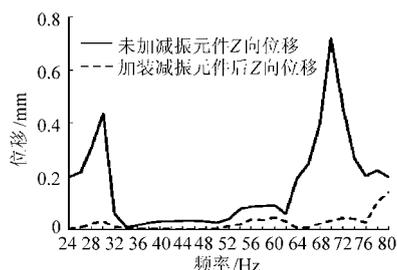


图 7 加装减振元件前后 30 114 节点 Z 向位移
Fig. 7 Z -displacement before and after adding damper at node 30 114

了 95.2%; 减振效果比较明显, 乘坐舒适性有所提高。

4 结论

(1) 建立了喷雾机机架的有限元模型, 通过实验模态分析验证了有限元模型的准确性, 为后续的机架的轻量化设计奠定基础。

(2) 通过分析路面及发动机激励对机架动态特性发现, 正常工作时发动机的激励频率与机架的固有频率发生耦合, 容易引起共振。

(3) 提出了共振解决方案, 并通过谐响应分析, 对比了安装橡胶减振元件前、后机架关键点的位移。结果表明, 加装橡胶弹性元件后 60 Hz 时 Y 向位移减小了 47.6%, 30 Hz 时 Z 向位移减小了 92.8%, 70 Hz 时 Z 向位移减小了 95.2%, 提高了喷雾机的乘坐舒适性。

参 考 文 献

- 尹辉俊, 黄昶春, 韦志林, 等. 重型车车架机架的动态特性分析[J]. 农业机械学报, 2007, 38(12): 20 ~ 23, 19.
Yin Huijun, Huang Changchun, Wei Zhilin, et al. Dynamic characteristic analysis of the heavy truck frame[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(12): 20 ~ 23, 19. (in Chinese)
- 徐中明, 余烽, 张志飞, 等. 小型机动平台车体动态特性分析与减振优化[J]. 机械设计, 2011, 28(3): 84 ~ 87.
Xu Zhongming, Yu Feng, Zhang Zhifei, et al. Dynamic characteristics analysis and improvement of body for mini mobile platform[J]. Journal of Machine Design, 2011, 28(3): 84 ~ 87. (in Chinese)
- 王学鹏. 多功能电动车车架机架结构有限元分析及优化[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2010.
Wang Xuepeng. The finite element analysis and optimization of a multi-function electric vehicle frame[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2010. (in Chinese)
- 于江, 杨振冬, 汪先国. 摩托车车架机架试验模态与解析模态分析[J]. 重庆工学院学报: 自然科学版, 2009, 23(9): 25 ~ 32.
Yu Jiang, Yang Zhendong, Wang Xianguo. Experiment modal and finite element modal analysis of motorcycle frame[J]. Journal of Chongqing Institute of Technology: Natural Science, 2009, 23(9): 25 ~ 32. (in Chinese)
- 卢强. 4LZ2.0 全喂入联合收割机割台模态分析及振动试验研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2012.
Lu Qiang. The study on the vibration test and modal analysis of header for 4LZ2.0 whole-feeding combine harvester[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2012. (in Chinese)
- Peeters B, Antonnio V, Herman V D A. Polymax modal parameter estimation from operational data[M]. Leuven: Katholieke University, 2004.
- 张洪伟, 张以都, 王锡平, 等. 基于 ANSYS 参数化建模的农用车车架优化设计[J]. 农业机械学报, 2007, 38(3): 35 ~ 38.
Zhang Hongwei, Zhang Yidu, Wang Xiping, et al. Optimization design of an agricultural vehicle frame based on ANSYS parametric modeling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(3): 35 ~ 38. (in Chinese)
- 魏凯. 基于虚拟分析的摩托车整车振动预测及减振研究[D]. 天津: 天津大学, 2007.
Wei Kai. Motorcycle vibration prediction and vibration reduction study based on virtual analysis[D]. Tianjin: Tianjin University, 2007. (in Chinese)

- transmission of arithmetic type[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2006(6):47~48. (in Chinese)
- 4 Yuan Shihua, Hu Jibin. The efficiency of multi-range hydro-mechanical stepless transmission[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2000, 9(4):129~133.
- 5 张明柱, 周志立, 徐立友, 等. 农业拖拉机用多段液压机械无级变速器设计[J]. 农业工程学报, 2003, 19(6):118~121.
Zhang Mingzhu, Zhou Zhili, Xu Liyou, et al. Design of a multirange hydrostatic mechanical transmission for farm tractors [J]. Transactions of the CSAE, 2003, 19(6):118~121. (in Chinese)
- 6 Renius K Th, Resch R. Continuously variable tractor transmissions[C]// ASAE Distinguished Lecture Series No. 29 (2005). St Joseph MI, American Society of Agricultural Engineers, 2005:1~37.
- 7 韩兆林, 胡纪滨, 荆崇波. 液压机械传动系统双流工况动态特性研究[J]. 北京理工大学学报, 2004, 24(2):104~108.
Han Zhaolin, Hu Jibin, Jing Chongbo. Dynamic characteristics on the dual-power state of flow in hydro-mechanical transmission [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2004, 24(2):104~108. (in Chinese)
- 8 曹付义, 周志立, 贾鸿社. 履带拖拉机液压机械双功率流差速转向机构设计[J]. 农业机械学报, 2006, 37(9):5~8.
Cao Fuyi, Zhou Zhili, Jia Hongshe. Design of hydromechanical double power differential steering mechanism for tracked tractor [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(9):5~8. (in Chinese)
- 9 迟媛, 蒋恩臣. 履带车辆差速式转向机构性能试验[J]. 农业机械学报, 2008, 39(7):14~17.
Chi Yuan, Jiang Enchen. Performance tests on differential steering mechanism of tracked vehicle [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(7):14~17. (in Chinese)
- 10 邓晓亭, 朱思洪, 高辉松, 等. 混合动力拖拉机传动系统设计理论与方法[J]. 农业机械学报, 2012, 43(8):24~31.
Deng Xiaoting, Zhu Sihong, Gao Huisong, et al. Design theory and method for drive train of hybrid electric tractor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(8):24~31. (in Chinese)
- 11 Xu Liyou, Zhou Zhili, Zhang Mingzhu, et al. Development of hydro-mechanical continuously variable transmission for agricultural tractors[C]// Proceedings of 2004 CIGR International Conference, 2004, 2: V-49.
- 12 Henning J Meyer. Fahrzeuggetriebetechnik getriebe in traktoren[R]. Tag der Wissen Schaftlichen Aussprache; 02, Berlin, 2009.
- 13 饶振纲. 行星齿轮传动设计[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
- 14 周一鸣. 汽车拖拉机学: 汽车拖拉机理论[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2000.
- 15 Larkin, Robert Francis. Multi-range with infinitely variable ratio in each range, hydro-mechanical transmission for off-road vehicles; United States Patent, US5830097[P]. 1998-11-03.

~~~~~

(上接第 53 页)

- 9 苏小平, 朱键, 徐练. 农用车辆车架结构动力学仿真研究[J]. 农机化研究, 2010, 32(5):36~40.  
Su Xiaoping, Zhu Jian, Xu Lian. Analysis and research on structure of agricultural vehicles frame based on finite element method [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2010, 32(5):36~40. (in Chinese)
- 10 蔡炳芳. 全地形车新车型开发与车架结构性能分析[D]. 镇江: 江苏大学, 2007.  
Cai Bingfang. New style development and frame structure performance analysis of all terrain vehicle [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2007. (in Chinese)
- 11 Ma Z D, Perkins N C. A track-wheel-terrain interaction model for dynamic simulation of tracked vehicles[J]. Vehicle System Dynamics, 2002, 37(6):401~421.
- 12 邱威, 丁为民, 申宝营, 等. 3WZ-700 型果园喷雾机通过性能分析[J]. 农业机械学报, 2012, 43(6):63~67, 146.  
Qiu Wei, Ding Weimin, Shen Baoying, et al. Analysis on trafficability of 3WZ-700 orchard sprayer [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(6):63~67, 146. (in Chinese)
- 13 宋坚利, 何雄奎, 张京, 等. “Π”型循环喷雾机设计[J]. 农业机械学报, 2012, 43(4):31~36.  
Song Jianli, He Xiongkui, Zhang Jing, et al. Design of Π-type recycling tunnel sprayer [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(4):31~36. (in Chinese)
- 14 陈树人, 尹东富, 魏新华, 等. 变量喷药自适应神经模糊控制器设计与仿真[J]. 排灌机械工程学报, 2011, 29(3):272~276.  
Chen Shuren, Yin Dongfu, Wei Xinhua, et al. Design and simulation of variable weed spraying controller based on adaptive neural fuzzy inference system [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2011, 29(3):272~276. (in Chinese)
- 15 贾卫东, 李成, 王贞涛. 高沉积静电喷雾装置试验研究[J]. 排灌机械工程学报, 2012, 30(2):244~248.  
Jia Weidong, Li Cheng, Wang Zhentao. Experimental study on electrostatic spraying device with better deposition [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2012, 30(2):244~248. (in Chinese)