doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.10.001

卷盘式喷灌机研究进展与发展趋势分析

汤玲迪　袁寿其　汤　跃
(江苏大学国家水泵及系统工程技术研究中心,镇江 212013)

摘要:为促进我国卷盘式喷灌机快速发展,提高对卷盘式喷灌机关键技术的整体认识和比较国内外差距,本文概述了国内外的发展历程和卷盘式喷灌机的主要类型和机型,从内外特性指标两方面,阐述了影响卷盘式喷灌机的关键因素及研究现状,总结出喷头车行走速度的均匀性、行走速度与喷头旋转扇形角及速度的匹配关系、喷头车运行稳定性、喷头进口压力的稳定性、喷头的姿态和地形等是影响喷灌均匀性指标的关键因素,各组成部分的能量转换效率和优化匹配是影响整机能耗的关键因素。分析了卷盘式喷灌机驱动动力、传动系统、速度控制、关键环节能量转换和喷头车稳定性等关键技术的研究进展和存在的问题。提出了我国卷盘式喷灌机需要重点研究的应用基础和关键技术问题,展望了卷盘式喷灌机多功能和智能化的发展趋势。

关键词:卷盘式喷灌机;动力与传动;速度感知与控制;水涡轮驱动;光伏电驱动;智慧灌溉架构
中图分类号:S277.9⁺4　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2018)10-0001-15

Analysis on Research Progress and Development Trend of Hose Reel Irrigator

TANG Lingdi　YUAN Shouqi　TANG Yue
(*National Research Center of Pumps*, *Jiangsu University*, *Zhenjiang* 212013, *China*)

Abstract: In order to accommodate the rapid development of hose reel irrigators in China, enhance the overall awareness of key techniques for the hose reel irrigator and find the gap with the rest of the world, the development history in the world and the main types of hose reel irrigators were reviewed. Key influential factors and research status of the hose reel irrigator were described. The matching relationship among the uniformity of the traveling speed of the sprinkler cart, the traveling speed of the sprinkler cart, the rotating fan angle of the spray nozzle, and the rotating speed of the spray nozzle were concluded. And it was summarized that the running stability of the sprinkler cart, the stability of the nozzle inlet pressure, the attitude and topography of the nozzle were critical factors affecting the irrigation uniformity. Energy conversion efficiency and optimized matching of each component were the key factors affecting the energy consumption of the whole machine. From the scientific and technical point of view, the research progress and existing problems of key technologies such as drive power, transmission system, speed control, energy conversion of the key link and the sprayer cart stability were analyzed, the application basis and key techniques for the development of the hose reel irrigator in China were presented. The development trend of multifunctional and intelligentized hose reel irrigator was expected, and the idea of intelligent irrigation of hose reel irrigator based on Internet of things was proposed.

Key words: hose reel irrigator; power and transmission; speed perception and control; water turbine driven; photovoltaic electrical driven; intelligent irrigation architecture

0　引言

农业高效节水灌溉是促进水资源可持续利用和保障国家粮食安全、水安全及生态安全的重大战略举措。节水灌溉装备是实现高效节水的有效保障,大中型节水灌溉装备能解决农业灌溉规模化与集约

收稿日期:2018-06-20　修回日期:2018-08-28
基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0400202、2016YFC0400104)和江苏省自然科学基金青年基金项目(BK20180876)
作者简介:汤玲迪(1988—),女,助理研究员,博士,主要从事农业灌溉装备技术研究,E-mail:angelattld@163.com
通信作者:袁寿其(1963—),男,研究员,博士生导师,主要从事农业排灌装备技术研究,E-mail:shouqiy@ujs.edu.cn

化的高效作业问题,国内外典型机械化节水灌溉装备有圆形喷灌机、平移喷灌机、滚移式喷灌机、卷盘式喷灌机等大中型移动式灌溉机。卷盘式喷灌机具有适应性强、机动方便、自动化程度高、单位面积设备投资低等优势,是一种适合我国国情,能适应大、中、小不同规模地块、不同作物高效作业的机械化灌溉装备[1-5]。因此本文对我国卷盘式喷灌机科研及生产中存在的问题加以总结分析,提出需重点研究的问题,以期为卷盘式喷灌机发展提供参考。

1 国内外产品现状

20 世纪 60 年代卷盘式喷灌机在欧洲开始研究[6-7]。至 20 世纪 70 年代后期,已基本定型并大量生产,型号多达 120 余种[8]。经过近 50 年的发展,意大利已成为全球卷盘式喷灌机制造企业的集聚地。目前,意大利总的卷盘式喷灌机年产量达到 6 000 ~ 7 000 台,保有量约 15 万台,涵盖几十种规格的系列卷盘式喷灌机,适合农业、林业、城市园林等许多领域。

我国卷盘式喷灌机的发展开始于 20 世纪 70 年代末[9-14]。1979 年成功试制了我国第一台 JP90/300 型卷盘式喷灌机,1984 年又研制成功 JP75/200 型卷盘式喷灌机[15-20]。到 20 世纪 90 年代后期,又通过引进奥地利 BAUER 公司的卷盘式喷灌机加以仿制,形成了 JP50、JP75 和 JP90 国产卷盘式喷灌机主流机型,这一阶段经历了 20 余年,在研究、制造、应用和标准化方面取得了一定进展,先后通过国际标准[21-23]转换制订了一批国家和行业标准[24-27];2010 年以后,我国卷盘式喷灌机产业发展迅速,至 2017 年,我国卷盘式喷灌机保有量已从 2012 年不足 2 万台增加到 8 万多台。但与国际先进水平相比还有很大差距。近 5 年来,许多科研单位对卷盘式喷灌机基本理论、试验技术与装备、动力驱动、多功能等方面开展了大量研究,形成了灌溉装备新的研究热点。

卷盘式喷灌机主要由喷头车、输水软管(PE 盘管)、卷盘、驱动卷盘的动力机(水涡轮、液压马达及电机)、减速箱、传动系统、底盘等主要部分组成,如图 1 所示。大型机还有液压传动与控制系统。动力能源目前主要来源于电力和燃油,太阳能作为清洁能源也开始被使用。

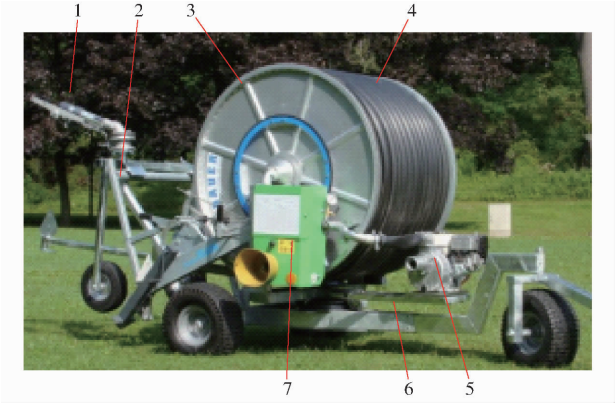


图 1 卷盘式喷灌机实物图

Fig. 1 Structure of hose reel irrigator

1. 喷头 2. 喷头车 3. 卷盘 4. PE 管 5. 供水泵 6. 底盘 7. 动力传动系统

目前,世界上最大的卷盘式喷灌机是意大利 CASELLA 公司生产的 PLLSMP180/400,输水 PE 管外径 180 mm、长 400 m,流量 240 m^3/h,采用液压马达驱动卷盘回转,液压系统的动力由柴油发动机提供;世界上最小的卷盘式喷灌机是意大利 ORMA 公司生产的水涡轮驱动型 Passeggiando 和中国华源公司生产的电驱动型 JP25 - 30/D,其输水 PE 管外径 25 mm、长 30 m。

国内外卷盘式喷灌机按用途分为农业和园林两大类。园林机型用于运动场、高尔夫球场、公园的草坪灌溉,如图 2 所示。农业基本类型见表 1。

2 卷盘式喷灌机工作原理

喷灌机喷灌作业前,由牵引车(拖拉机)将喷头车牵引至田块地头,开启水泵给喷灌机供水,卷盘在动力机的驱动下开始回卷 PE 管,喷头车在 PE 管的牵引下一边回收一边喷灌,当 PE 管全部盘绕至卷盘上后,关闭水泵,然后移动喷灌机至下一个地块继续喷灌作业,如图 3 所示。

3 影响卷盘式喷灌机性能的关键因素

一次灌溉面积由喷头的射程和牵引喷头车的



(a) 意大利IRRILAND (b) 德国PERROT (c) 中国华源

图 2 国内外典型园林卷盘式喷灌机

Fig. 2 Hose reel irrigators used in garden

表 1　国内外典型卷盘式喷灌机(农业)基本信息

Tab. 1　Basic information of typical hose reel irrigators used in farmland

驱动形式	整机结构	主要结构特点和基本参数
液压马达	 意大利CASELLA	大型卷盘式喷灌机动力由机载柴油机提供，一般配置有水泵、空压机和液压控制系统，液压由液压泵提供，经液压分配阀分别输送给底盘回转、前腿支撑、轮胎抬起和液压马达，液压马达驱动卷盘回转，配有速度自动控制器。并提供柔性臂直接从灌溉渠中取水，只需一人通过遥控器操作整台机器。输水PE管外径范围：140~180 mm，管长范围：400~600 m，流量范围：60~240 m^3/h
水涡轮	 意大利IDROFOGLIA/RM等	大中型卷盘式喷灌机带有液压系统，液压由机载柴油机或利用拖拉机液压系统提供，供底盘回转、前腿支撑、轮胎抬起使用，卷盘回转常采用水涡轮驱动，配有速度自动控制器。配有机载柴油机的机器也配置空压机和水泵。无机载柴油机的机器无空压机和水泵。输水PE管外径范围：100~140 mm，管长范围：300~800 m，流量范围：31~150 m^3/h
	 奥地利BAUER	中小型的卷盘式喷灌机通常采用水涡轮驱动卷盘回转，是最传统也是最常见的型式，配有速度自动控制器。无液压系统，支撑靠手摇操作。轮胎不能抬起。输水PE管外径范围：40~100 mm，管长范围：100~800 m，流量范围：4~65 m^3/h
直流电机	 中国华源	电机驱动卷盘回转的卷盘式喷灌机克服了水涡轮驱动既作动力又作速度调节的缺陷，使能耗比水涡轮驱动的喷灌机平均降低10%。电机的电源可采用蓄电池和太阳能电池。配有速度自动控制器。输水PE管外径范围：25~75 mm，管长范围：30~500 m，流量范围：0.5~40 m^3/h

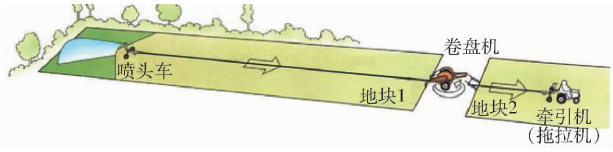


图 3　卷盘式喷灌机作业方式

Fig. 3　Work pattern of hose reel irrigator

PE 管长度决定，灌水量在供水量(流量)一定的情况下由 PE 管回收速度决定。灌溉质量是反映卷盘式喷灌机性能的外在指标。能耗是反映卷盘式喷灌机性能的内在指标。

3.1　喷灌质量

COLLIER 等[28]通过试验发现，在不进行任何控制时，随 PE 管盘绕层每变化一层，喷头车的行走速度会增加 11% ~12%，同时，随着 PE 管盘绕圈数的增加，流动阻力增加也会使流量减少，两者的共同作用使得最后的灌水深度只有初始灌水深度的 68% ~77%。GRANT 等[29]比较了喷头扇形喷洒角的变化对灌溉均匀性的影响，初始喷洒区域的灌水均匀性可以通过减小正常喷洒时的喷洒扇形角来提高。ROCHESTER 等[30]实验研究了在流量或者入机压力一定时，两者的克里斯琴森均匀系数相差小于 2%，分布均匀性相差小于 1%。GRAZIANO 等[31]通过在垂直摇臂喷头上加装旋转速度调节装置，使喷头左右两侧的旋转速度低于中间的旋转速度，将喷头降雨的横向分布规律扁平化，即提高两侧的降雨和降低中间的降雨，可提高喷灌均匀性至 88% ~92%，增加组合间距至 1.8R ~1.9R，有效增加灌溉宽度 5%，达到潜在节水约 15% 的目的。

在国内，尹万和等[11]对国外一种卷盘式喷灌机的喷头、水涡轮、PE 管等水力部件的水力特性和喷洒特性进行了简单的试验分析。许一飞[6]较早地

提出了卷盘式喷灌机具有运行、调速、能耗、软管和动力 5 个特性,并分别对 5 个特性进行了分析,认为如果喷头车行走速度不控制,则由于盘绕直径的变化和负载的变化会使首末两端的速度相差 1 倍以上,灌水量首末端也相差 50%。梁文经等[32]分析了喷头转速、喷头车行走速度及喷头扇形角对均匀性的影响及其计算方法。吴涤非[33]从理论上提出了计算行喷机组均匀系数的基本计算公式,并做了试验验证。范永申等[34]从喷灌强度与桁架式喷头车行走速度之间的关系,试验得到喷灌强度在移动速度相同时与理论计算十分接近。葛茂生等[35]通过建立基于最小二乘法卷盘式喷灌机喷洒均匀度简化算法,讨论了喷头工作压力、辐射角选择周期和组合间距等运行参数对喷洒均匀度的影响。段福义等[36]试验分析了卷盘式喷灌机入机压力、行走速度、压力损失、流量及喷洒均匀度之间的关系。

国内外近 40 年的研究都一致认为卷盘式喷灌机喷头车行走速度的均匀性、行走速度与喷头旋转扇形角及速度的匹配关系、喷头车运行稳定性、喷头进口压力的稳定性、喷头的姿态和地形等是影响喷灌均匀性指标的关键因素。

3.2 能量损耗

OAKES 等[37]对两种卷盘式喷灌机动力、PE 管、喷头等各组成部分的能耗贡献率进行了分析研究,结果发现,喷头工作所需要的能量约占 60%,PE 管流动阻力损失约占 20%,其他 20% 是卷盘式喷灌机内部能量转换的效率所致。

卷盘式喷灌机的各组成部分能量转换效率和优化匹配是影响整机能耗的关键因素。这些关键影响因素是国际上高性能卷盘式喷灌机的核心技术。

4 关键技术研究进展

4.1 卷盘驱动技术

卷盘是盘绕 PE 输水管的执行机构,其驱动方式有水力驱动、液压马达驱动和电机驱动。早期的水力驱动技术有旋转喷嘴式、水涡轮式、水压缸式和伸缩橡皮囊式等 4 种型式,现在大都使用水涡轮驱动技术;液压马达驱动由柴油机液压系统提供动力;电力驱动由直流电机、交流电机或者步进电机完成。

4.1.1 水涡轮驱动技术

喷灌机在喷灌作业时,灌溉压力水输入喷灌机后分流成两路,其中,一路分流水冲击水涡轮转动,将水的能量转换成机械能再通过变速箱减速来驱动卷盘缓慢转动,并不断回收 PE 管并整齐盘绕在卷盘上,PE 管牵引喷头车在田间平移进行喷灌作业;另一路分流水由旁路通道与流经水涡轮的水汇合后一道进入 PE 管,并通过 PE 管将灌溉水输送到喷头车上使灌溉喷头工作,如图 4 所示。

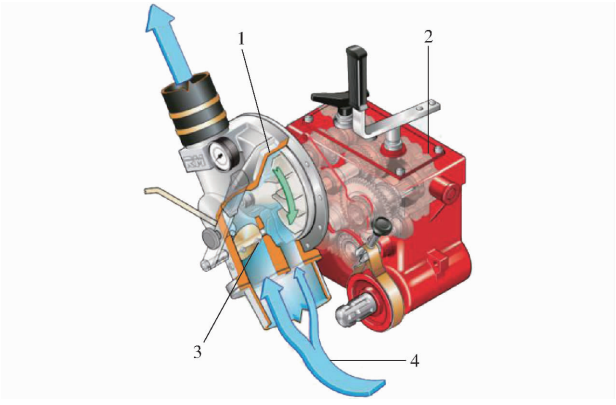


图 4 水涡轮工作原理图

Fig. 4 Working principle of water turbine

1. 水涡轮 2. 变速箱 3. 旁路阀 4. 入机压力水

4.1.1.1 国外水涡轮发展历程

国外早期的卷盘式喷灌机水涡轮有两种结构型式,一种是类似于冲击式水轮机的水斗转轮式水涡轮,另一种是用水泵反转作水涡轮,当时试验发现水泵反转作水涡轮的水头损失比冲击式水涡轮大[7],泵反转作水涡轮在其他工业领域也有大量应用,国外早有大量研究[38-51],但研究发现,水泵反转作透平时效率比水泵低,特别是低比转数离心泵作透平,普遍存在效率较低的问题。早期德国 PERROT 公司的 90/350、110/350 水斗式水涡轮,转轮直径为 500 mm,水斗数为 26,水流切向进入,冲击完水斗后由切向流出[12],这种结构现在已不采用。后来被引进国内的还有意大利几家公司产品,国外水涡轮结构与特点见表 2。

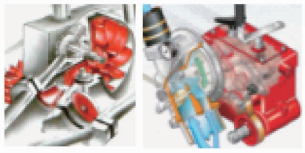
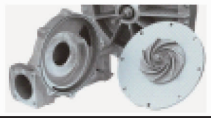
意大利 IDROFOGLIA 公司的水涡轮结构如图 5 所示。这种水涡轮主要由喷嘴、转轮、外壳和尾水管组成。输入水的压能通过喷嘴转换为动能切向冲击转轮的叶片旋转做功,冲击完成后,水流沿叶片流道流向尾水管,但水流与叶片发生作用的只有个别叶片。这种水涡轮实测最高效率为 34%,对应转速为 700 r/min,对应流量为 25 m^3/h,达到 200 W 功率输出时的最小流量约 17.5 m^3/h,此时效率为 31.6%[5]。

4.1.1.2 国内水涡轮研究历程

改革开放后的 30 多年(1978—2007),我国研究人员只是从国外产品样本获得对水涡轮压差(水头损失)的认识,文献[11-12]介绍了我国研究人员获得的德国 PERROT 公司的 Peromat 机型的水斗式水涡轮空载下的流量-水头损失和流量-转速试验曲线,以及负载下的入机压力与水涡轮水头损失的关系曲线,发现水涡轮水头损失约为入机压力的

表 2　国外典型水涡轮结构与特点

Tab. 2　Structure and characteristics of foreign typical water turbines

制造商	水涡轮结构	特点
德国PERROT		早期使用的水涡轮，采用射流冲击式进口，转轮为水斗式结构，冲击水斗后，水流切向出流
意大利IDROFOGLIA		水涡轮采用喷嘴射流冲击式进口，转轮为径流式结构，冲击完成后，沿转轮叶片径向流动，流动只在个别叶片内发生，最后水流从转轮中心轴向出流，水涡轮与减速箱一体化装配
意大利IRRILAND		水涡轮采用喷嘴射流冲击式进口，转轮为类水斗式结构，冲击完成后，水流切向出流，水涡轮与减速箱一体化装配
意大利 RM MARANI等		水涡轮采用喷嘴射流冲击式进口，转轮为径流式结构，冲击完成后，沿转轮叶片径向流动，流动只在个别叶片内发生，最后水流从转轮中心轴向出流，水涡轮与减速箱一体化装配
意大利CASELLA等		水涡轮采用蜗壳式引水室，转轮为径流式结构，水流沿转轮叶片径向流动，流动在所有叶片内发生，最后水流从转轮中心轴向出流，水涡轮与减速箱一体化装配

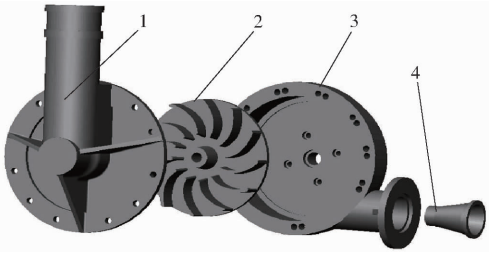


图 5　典型水涡轮结构图

Fig. 5　Structure diagram of typical water turbine

1. 尾水管　2. 半开式转轮　3. 外壳　4. 射流喷嘴

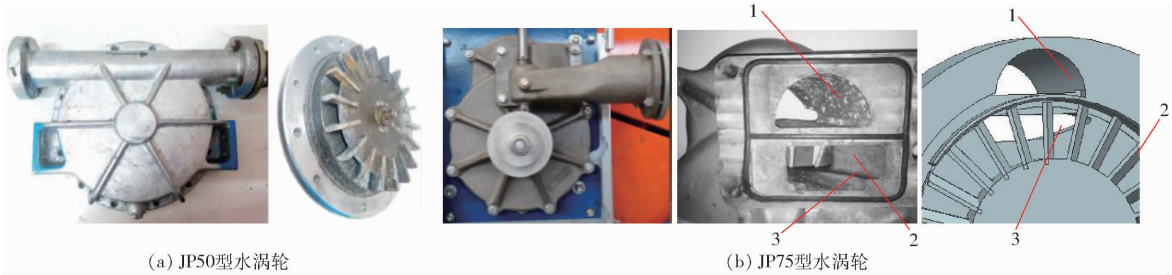
14%、喷头压力的 24%。王综武[14]初步研究了水涡轮的流量-转速和流量-功率特性。王综武等[20]认为造成国内外水涡轮差距的主要影响因素是没有形成系列和缺少性能试验装置。李国民等[52]从理论上分析了水涡轮的进出口角对水力效率的影响，但缺少对容积效率和机械效率等的分析，也未开展试验验证。

从 1980 年至 2007 年的这一时期，我国研究人员对水涡轮的性能和要求的认识还比较零碎，缺乏系统性研究，更没有形成设计理论和试验方法。

近 5 年来，我国研究人员采用试验和数值计算相结合的方法，对国产水涡轮进行详细的试验研究和内部流动分析。

图 6a 所示为 JP50 型切击式水涡轮，由国外进口的喷嘴、转轮和外壳组成，类似早期德国 PERROT 的水涡轮，只是转轮的叶片由水斗简化为直板，输入水流的压能通过喷嘴转换为动能切向冲击转轮的叶片旋转做功，冲击完成后，水流切向流出，完成将动能转换为转轮轴上机械能的过程。

图 6b 所示为 JP75 型斜击式水涡轮，入口管道由上、下两个通道组成，上下通道前设有一阀板来分配进入上下通道的流量。下通道的水流经一喷嘴结构从侧面冲击转轮的叶片旋转做功，喷嘴的冲击角与折叠式叶片呈一定角度，冲击完成后，水流由叶片流出经下通道与上通道流出的水流汇合后一起流出



(a) JP50型水涡轮　　(b) JP75型水涡轮

图 6　国产水涡轮

Fig. 6　Domestic water turbine

1. 上通道　2. 叶片　3. 下通道

输送给 PE 管和喷头,完成将动能转换为转轮轴上机械能的过程。

为了掌握国产水涡轮的性能,文献[53 - 56]建立了水涡轮试验装置,对国产 JP50 型水涡轮开展了性能试验,获得了详细的性能曲线,结果发现,水涡轮的最高效率仅为 16.5%。通过对水涡轮内部流场的 CFD 模拟分析,认为叶片进口冲角过大消耗了部分射流能量,以及水流由水涡轮进口运动至出口的过程中出现旋涡区,消耗了大量的能量,是导致 JP50 型水涡轮效率较低的主要原因。为此,文献[54]重新设计了一种径流式转轮,新转轮的叶片改变成弯曲的叶形,水流的出口改为中心轴向出流,叶片的流道有利于水流顺畅流动,以减少流动过程的损失。CFD 分析预测的效率达到 38% 左右,但这个效率值没有进行试验验证。

文献[57 - 58]对国产 JP75 型水涡轮进行了性能试验,掌握了不同转速下的性能特性,结果是水涡轮在 15 ~ 40 m^3/h 流量范围内使用时,转速范围为 150 ~ 450 r/min,效率范围为 10% ~ 14%。并采用 CFD 对 JP75 型水涡轮内部各部分进行了模拟计算,能量转换分析发现,大量压力势能在转化为动能之前,就被复杂的进口结构损失了很多,转轮的出流因缺少导流结构也造成很多损失。

近 5 年的研究,虽然开始注重从试验和 CFD 两方面开展研究,并掌握了国产水涡轮水力特性和造成效率低下的原因,也提出了改进的结构并进行了性能预测和内流分析,但只是单纯地从效率的角度去研究,缺乏针对水涡轮设计点参数(流量、功率、水头)及卷盘式喷灌机动力要求等开展性能分析,水涡轮设计方法仍未突破。

为进一步提高意大利 IDROFOGLIA 水涡轮的效率,汤玲迪等[5,59]对这种结构的水涡轮原型开展了理论分析、数值模拟和试验研究。实测国外原型水涡轮的最高效率为 34%,对应转速为 700 r/min,对应流量为 25 m^3/h。并尝试采用 GA_BP 优化算法进行了优化设计,获得了进一步优化的转轮模型,经试验实测证明,优化后水涡轮设计工况的效率提高了 10.9 个百分点,轴功率增加了 49%。

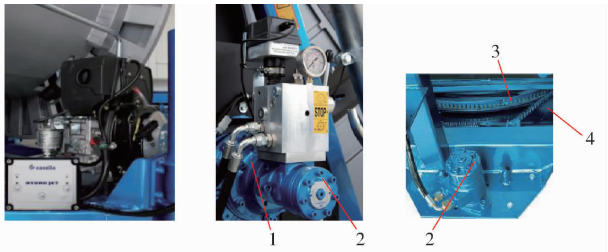
黎耀军等[60]也对国外的这种水涡轮原型进行了数值分析和试验,试验结果与文献[5,59]基本一致。通过正交试验,改进了原来的圆形平口喷嘴为圆形斜口喷嘴和叶轮出口侧倾斜角。模拟预测发现可以较大幅度减少射流段的损失和提高水力性能,改进后的水涡轮输出功率提高约 15%,不同工况效率总体提高约 15 个百分点。但没有看到对改进后的水涡轮的试验验证。

卷盘式喷灌机所用水涡轮实际上就是水力机械领域的水力透平,其研究成果值得借鉴。杨孙圣[61]、王桃等[62-68]利用水泵蜗壳作引水室,设计了多种前弯形叶片的径流式水力透平,并对叶片安放角、转轮直径、转速影响等因素进行了数值分析和试验,其结果是效率都比泵反转作透平有大幅提高。但这些研究的水力透平比转速都未低于 40 m·kW。

综上发现,水涡轮从早期射流冲击式水斗水涡轮及泵反转作水涡轮两种结构型式,发展成了现在射流冲击式水涡轮和径流式两种结构型式。近几年来,对水涡轮的研究在研究方法上比早期已经有了很大进步,不仅建立了水力性能试验装置,而且采用现代流体动力学 CFD 开展水涡轮内部流动及能量转换机理的研究,从流动规律出发,优化水涡轮结构。在设计方法上,不仅有采用传统正交试验法,也有采用现代优化算法的优化设计,使水涡轮效率进一步提升。但是,文献[54,56 - 58,60]对原模型进行改进后,只进行了 CFD 性能预测,而缺少对改进后的水涡轮进行试验验证和动力特性的讨论。文献[5]注意了研究的完整性,从讨论卷盘负载特性到传动系统效率试验,提出了水涡轮轴功率的确定方法,分析和实测了水涡轮的水力和动力特性。

4.1.2 液压马达驱动技术

国外大型的卷盘式喷灌机基本上都采用柴油机为动力来驱动液压泵,将机械能转换为液力输出,其中一路液力带动液压马达驱动卷盘回转,液压泵输出的其他油路控制喷灌机底盘回转和整机支撑系统,图 7 所示为意大利 CASELLA 公司的柴油机动力系统。



(a) 柴油机动力 (b) 液压马达驱动卷盘 (c) 液压马达驱动底盘

图 7 CASELLA 柴油机动力的液压马达驱动技术

Fig. 7 Hydraulic pump-hydraulic motor drive technology of CASELLA diesel power

1. 减速箱 2. 液压马达 3. 底盘牙盘 4. 传动链条

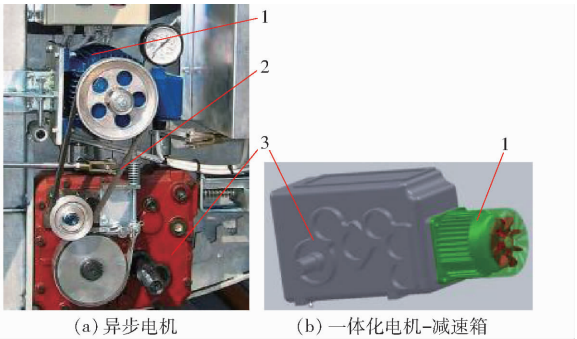
在国内,严海军等[69]利用小四轮拖拉机液压系统来带动卷盘喷灌机上的液压马达驱动卷盘回转。

4.1.3 电机驱动技术

由于水涡轮的效率受比转速的限制,效率突破 50% 的难度较大,流道的水力损失会使喷灌机的入机压力和供水泵的功率增大。而普通电机的效率一

般可达到 70% ~80%。因此，国外除了采用水涡轮和液压马达作驱动外，许多公司也采用电机作驱动，如图 8a 所示是意大利 IRRIMEC 公司采用异步电机作动力的驱动系统，电机采用逆变电源供电。

我国研究人员采用永磁无刷直流电机代替水涡轮作驱动开展了研究。永磁无刷直流电机不但可以用蓄电池供电还可以使用太阳能供电，能量转换效率可达到 80% 以上。但由于电机转速比水涡轮高，减速箱的传动比就必须加大，如果仍然采用与水涡轮配套的减速箱，在喷头车低速行走时，电机转速需要降得很低，使其效率急速下降，造成牵引力矩不足。为此，汤跃[70]注重动力与传动的匹配性研究，研发成功了电机-减速箱一体化结构，简化了传动环节，如图 8b 所示。



(a) 异步电机　　(b) 一体化电机-减速箱

图 8　电机驱动系统

Fig. 8　Motor drive system

1. 电机　2. 传动链条　3. 减速箱

减速箱采用直齿圆柱齿轮和蜗轮蜗杆混合传动的方案，基于电机转矩-转速特性和变速规律，建立了传动效率高、质量轻及体积小的多目标优化模型及换挡策略，优化了大传动比减速箱，使传动系统的效率提高了 20% 以上，体积减小了 10%[71-72]。此后，赵进等[73]又采用行星齿轮传动代替了直齿圆柱齿轮和蜗轮蜗杆混合传动，进一步提高了减速箱的传动效率，降低了电机功率，使太阳能板面积进一步减小。

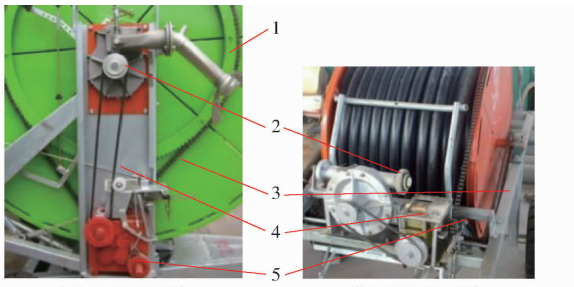
4.2　传动系统

卷盘式喷灌机是通过喷头车在田间行走来达到灌溉的目的，灌水量靠行走速度来调节，喷头车的最低行走速度为 10 m/h 左右，卷盘回转牵引喷头车的转速极低，而动力机的旋转速度相对较高，因此，在动力与卷盘之间需要一套减速传动系统来实现。

4.2.1　传统传动机构

国产卷盘式喷灌机的传动系统是采用国外 40 多年前的技术，如图 9 所示。水涡轮与减速箱之间通过胶带传动，减速箱与卷盘之间通过链条传动。由于传动环节多，传动效率不高。

汤玲迪等[74]发明了一种卷盘式喷灌机传动系



(a) JP75/JP90型　　(b) JP50/JP40型

图 9　传统传动系统

Fig. 9　Traditional transmission system

1. 大牙盘　2. 水涡轮　3. 传动链　4. 胶带传动　5. 减速箱

统效率试验装置，解决了大扭矩传动系统试验难的问题。张晨骏等[75]采用文献[74]的试验装置对图 9a 所示 JP75 型的传动系统进行了效率试验，结果在最大负载下效率都不足 50%，在常用负载下效率为 40% 左右。再加上国产水涡轮效率低的问题突出，造成国产卷盘式喷灌机的动力-传动系统的整体效率不足 10%。苏中伟[76]从工程设计的角度，讨论了水涡轮轴功率和减速箱传动比的计算方法，但传动系统的传动效率取名义值计算，其可信度不高，文献[5]中传动系统的试验结果足可证明此点。

4.2.2　高效传动机构

国外卷盘式喷灌机经过 40 多年的发展，传动系统进行了很大改进。首先是重新设计了新的水涡轮结构，效率比老式水涡轮提高了 10 多个百分点，并将水涡轮与减速箱直联，减少了传动环节，其次是减速箱输出牙轮与卷盘上大牙盘之间采用齿轮啮合型式，传动效率有了很大提高，大牙盘有内齿和外齿两种型式，如图 10 所示。试验表明，新型传动系统的传动效率比传统传动系统提高 10 ~20 个百分点[5]。

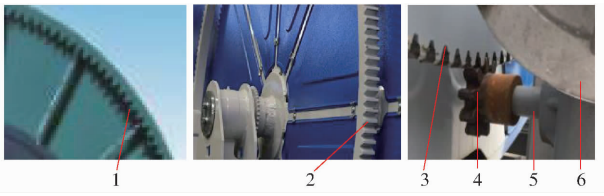


图 10　高效传动系统

Fig. 10　Efficient transmission system

1. 内啮合大牙盘　2. 外啮合大牙盘　3. 大牙盘　4. 小齿轮　5. 减速箱输出轴　6. 减速箱

综合了驱动和传动两个系统的研究现状，文献[70]在研究开发电机做卷盘动力时，注意了减速箱传动比的匹配性，从动力-传动整个系统考虑了能量的高效转换。但水涡轮作卷盘驱动和柴油机作卷盘动力的系统运行能效研究明显不足。

4.3　速度感知与控制技术

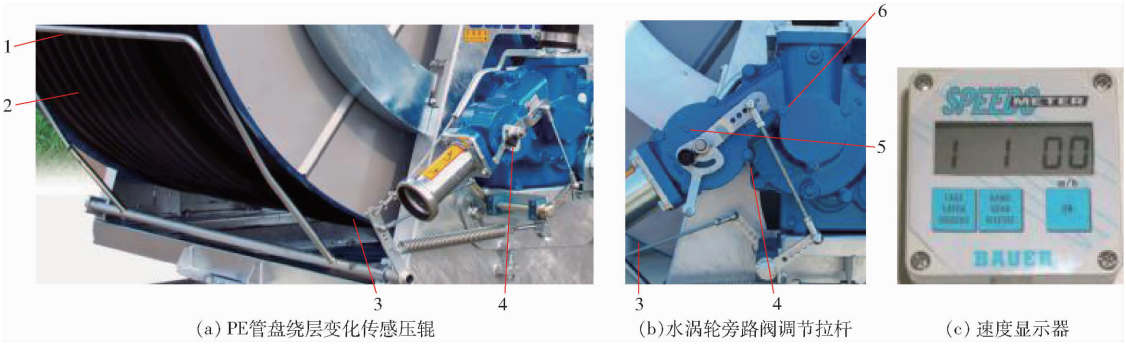
4.3.1　速度的影响因素

卷盘式喷灌机作业时，当盘绕的 PE 管在卷盘

上发生层间变化时,一方面,牵引喷头车的线速度会随 PE 管的盘绕半径增加而加快,造成灌水量减少;另一方面,随着 PE 管不断被回收,卷盘的负载越来越小,卷盘的角速度随之变快,也会造成灌水量减少[5-6,14,69]。COATES 等[77]通过试验发现,水涡轮驱动的卷盘式喷灌机,在没有速度控制时,喷头车移动速度差为 47%,当供给压力恒定时,机械控制器的行走速度变化系数为 19%,电子控制器的行走速度变化系数为 5% 左右。

4.3.2 水涡轮驱动的速度控制技术

水涡轮驱动的速度感知与控制装置分机械式和电控式两种。机械式是通过盘绕在卷盘上的 PE 管压杆感知盘绕层的变化,进而牵动拉杆机构来调节水涡轮旁路阀的开度,以减少进入水涡轮的流量,使水涡轮转速降低来达到控制牵引喷头车的 PE 管的线速度,线速度可由显示器显示,如图 11 所示。



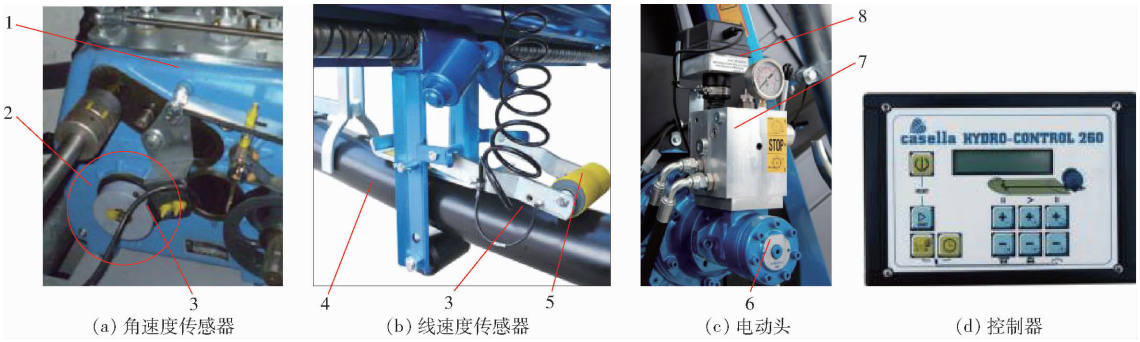
(a) PE管盘绕层变化传感压辊 (b)水涡轮旁路阀调节拉杆 (c) 速度显示器

图 11 机械式速度控制装置

Fig. 11 Mechanical speed control device

1. PE 管压杆 2. 卷盘 3. 拉杆 4. 曲柄拉杆 5. 水涡轮旁路阀杆 6. 水涡轮

电控式速度感知与控制是将水涡轮旁路阀加上电动头,通过由速度传感器、控制器和电动头组成的速度反馈控制系统控制进入水涡轮的流量来降低转速,达到控制牵引喷头车 PE 管的线速度。目前,国外的速度传感器有角速度和线速度两种。角速度传感器由安装在减速箱轴上的具有磁钢的测速盘和霍尔感应头组成,线速度传感器由压在 PE 管上线速度测速辊和霍尔感应头组成,如图 12 所示。



(a) 角速度传感器 (b) 线速度传感器 (c) 电动头 (d) 控制器

图 12 速度控制系统

Fig. 12 Speed control system

1. 减速箱 2. 测速盘 3. 感应头 4. PE 管 5. 测速辊 6. 液压马达 7. 液压阀 8. 电动头

4.3.3 液压马达驱动的速度控制技术

国外液压马达驱动的速度控制执行机构是采用电动头通过液压阀控制与减速箱直联的液压马达的转速来达到调节卷盘回转的速度,实现控制牵引喷头车 PE 管的线速度,如图 12c 所示。

4.3.4 电驱动的速度控制技术

文献[70]在研发光伏电驱动卷盘式喷灌机时,构建了通过由速度传感器、控制器和直流电机组成的速度反馈控制系统来控制电机的转速以达到调节卷盘回转的速度及 PE 管的线速度的目的,控制误差 5%,地面灌溉均匀性达到 90% 左右。在此基础上,吴晨[78]针对现有电驱动卷盘喷灌机无法实现作业信息无线物联和控制的问题,设计了一种基于手机 APP 的卷盘式喷灌机无刷直流电机驱动与控制系统,手机客户端可以远程监控卷盘喷灌机的运行剩余时间、PE 管长度、电机转速、卷盘转速和 PE 管回收速度等作业信息。

此外,王昌伟等[79]还设计了一种基于 DSP 和 ARM 的人机交互绞盘式太阳能喷灌机智能控制系统;张会娟等[80]设计了一种采用步进电机驱动卷盘回转和控制卷盘转速及喷头车移动速度的控制系统。还有一些企业自行研发了电驱动卷盘式喷灌机

及速度控制器。

国外的速度控制技术在 30 多年前就实现了电子化，速度误差在 5% 左右。而国内直到近 5 年才开始研究和开发，市场上大部分卷盘式喷灌机还是机械式速度控制技术，速度误差大，影响喷灌均匀性的提高。

4.4　PE 管材质与水力特性

为卷盘式喷灌机的喷头车供水的管道是一种聚乙烯 PE 管，喷灌作业开始前，需要用拖拉机等牵引设备将喷头车拉到田块地头，PE 管呈近似直管的伸展状态，开始灌溉时，随着卷盘回卷，PE 管一边牵引喷头车移动喷洒，一边被逐渐盘绕在卷盘上，喷灌结束时，PE 管呈螺旋盘绕状态。PE 管不仅承受弯曲、拉伸应力的作用，而且还受到地面摩擦的作用。因此，要求卷盘式喷灌机上的 PE 管具有耐压、耐磨、耐拉、耐环境应力开裂和水力损失低等机械特性和水力特性。

4.4.1　PE 管材质

聚乙烯 PE 管有高、中、低不同密度的原料，高密度 PE 具有强度高、刚性好的机械特性，而低密度 PE 具有强度低、柔软性好的机械特性。郝金东[8]介绍了国外 20 世纪 70 年代就使用中密度 PE 管（德国标准为 HDPE2 型）。ROCHESTER 等[81]在分析 PE 管压力损失时使用的是一种牌号为 PE2406 的中密度原料。文献[7]根据德国 3 种不同密度 PE 管的对比数据，说明中密度 PE 管的拉伸强度和断裂强度远高于高密度或低密度 PE 管，因此，认为高密度或低密度 PE 管均不能满足使用要求，而应该使用中密度 PE 管。文献[11]分析了德国 PERROT 公司的 PE 管化学成分为低密度 PE、碳黑和稳定剂。包大凯等[82]以 GM5010 高密度 PE 树脂为主要原料，并添加聚异丁烯、低密度 PE、EVA、抗氧剂、润滑剂和碳黑作为改性剂进行了大量试验，获得了耐环境应力开裂的 PE 管配方，经测试，机械性能达到国外同类产品水平。

虽然我国在 20 世纪 80 年代就基本解决了 PE 管的材质问题，但其技术却随着我国企业体制的变化而流失，现在几乎找不到提供卷盘式喷灌机使用的特质 PE 管的生产企业，大多数卷盘式喷灌机制造企业只好采用高密度 PE 盘管，为防磨损采用壁较厚的 PE 管，导致 PE 输水管的使用寿命偏短和水力损失偏大，另外，由于高密度 PE 管偏硬还易发生乱管和线速度检测不准等问题。

PE 管壁偏厚也是我国卷盘式喷灌机能耗高的主要因素之一，国内外 PE 管的壁厚见表 3。

表 3　国内外 PE 管壁厚（以外径 75 mm 的 PE 管为例）

Tab.3　Wall thickness of PE pipe（taking PE pipe with 75 mm outer diameter as example）

国别	制造商	PE 管参数	
		外径/mm	壁厚/mm
意大利	OCMIS	75	5.5
意大利	MARANI	75	5.5
意大利	IRRIMEC	75	5.5
意大利	CASELLA	75	（变壁厚）
中国		75	6.5（平均）

4.4.2　PE 输水管水力特性

卷盘式喷灌机 PE 输水管的水力特性受工作状态影响呈现动态变化的特点，随着 PE 管逐渐被盘绕到卷盘上，其流动阻力也逐渐增大，流动阻力是平铺近似直管与螺旋盘管的叠加。当弯曲管形成螺旋盘管时，其阻力损失的机理非常复杂，既不同于直管的沿程损失，也不同于弯头的局部损失，自 1928 年 DEAN 建立二次流理论以来，国外许多研究人员以不同曲率、不同挠率、不同雷诺数或 Dean 数对摩擦因数的影响进行了长期深入研究，形成了多种不同流态条件的计算公式，开展了长期的学术交流和争论[12,83-90]。

较早直接针对卷盘式喷灌机 PE 螺旋盘管流动损失研究的是文献[81]，试验测试了某一种规格的 PE 管在不同速度水头下完全展开和完全盘卷状态的压力损失，线性回归得到了单位长度压力损失与速度水头的系数。在国内，张敏等[91]用达西公式与局部损失公式之和代表盘管的损失，推导了一个对数线性方程，并以 1 圈 PE 盘管进行试验来验证所建方程。但文献[81,91]都未讨论不同圈数对摩擦因数的影响。汤玲迪等[92-96]采用数值计算的方法对 PE 盘管进行了内部流动分析，掌握了其内部流动规律，通过对 8 种 r/R 比值的 PE 管的模拟试验，建立了一种单位长度摩擦因数计算模型，在对不同圈数的模拟试验中，发现摩擦因数随着圈数的改变而产生线性变化，需要根据 PE 盘管的变化而调整，并对 4 种典型 PE 管进行了试验验证[96]。

由于螺旋盘管结构及内部流动的复杂性和卷盘式喷灌机 PE 管盘绕的动态特征，其流动阻力的研究和试验还有待进一步深入。

4.5　喷头车技术

喷头车是卷盘式喷灌机在田间移动喷洒的执行机构，其运动稳定性和对地形的适应性也是影响喷灌质量的关键，在喷头车的稳定性研究方面，范永申等[97]采用理论分析的方法分析了桁架式喷头车在纵横向坡度上作业时影响其稳定性的因素，并给出

了其稳定性与各影响因素之间的关系。汤跃等[98]采用虚拟样机技术对桁架式喷洒车的纵向、横向抗倾覆性以及爬坡能力等稳定性问题进行了动力学仿真分析和试验,并对影响爬坡和倾覆性能较大的地面粘附系数、质心高度、轮距等关键因素进行优化,使临界爬坡角比原来提高了21.48%。赵进等[99]对单喷头车的拓扑结构及受力、稳定平衡条件、坡度稳定性和重心位置进行了理论分析,并以喷头车不发生翻倾的临界坡度角为目标建立了优化函数,优化后的最大不翻倾临界坡度角提高了39.5%。

喷头车主要以单喷头配置为主,但由于存在单喷头所需工作压力高、消耗的能量大以及喷灌强度大等问题,喷头车的配置又出现了桁架式双喷头和多喷头配置,多喷头的工作流量和压力明显小于单喷头,可以达到节能、降低喷灌强度、提高雾化和均匀性水平的目的。

5 今后研究重点与发展趋势分析

基于绿色发展理念和农业物联网的发展需要,绿色低能耗、多功能、智能化和精准灌水将成为卷盘式喷灌机的4个研究方向和发展趋势。

5.1 研究重点

(1)完善PE盘绕输水管流动阻力计算与验证试验方法,研究PE盘管单位长度摩擦因数与盘绕圈数的关系,克服依靠单圈推导和试验得出的公式在多圈动态盘绕状态下所带来的误差和局限性。

建立卷盘式喷灌机PE管滑动摩擦因数试验方法,研究不同土壤土质条件下滑动摩擦因数与阻力的关系,克服现有技术采用假设滑动摩擦因数分析卷盘负载时取值偏大,造成驱动动力配套大、负载率低和运行效率降低的问题。

研究和试验适合卷盘式喷灌机使用的不同规格PE管特质材料和配方,降低PE管的壁厚,减少水力损失,提高使用寿命。

(2)研究高转速径流式水涡轮的蜗壳和转轮水力参数对性能的影响及适合高转速运行的耐磨材料,揭示蜗壳引水室、转轮内部和出水管内涡旋的流场结构、能量转换机理,突破现有低速水涡轮效率难以提高的瓶颈问题。

建立基于先进算法的水涡轮优化、快速设计和多工况设计方法,研究卷盘式喷灌机的系列水涡轮及型谱。

研究水涡轮不同旁路分流结构的内部流场结构和对水涡轮进口流态的扰动影响。

研究和完善低速水涡轮不同进口结构和径流式转轮几何参数对性能的影响,进一步挖掘效率空间,淘汰现有斜击式水涡轮。

(3)研发适合高速驱动动力的大传动比行星齿轮减速箱以及换挡和脱挡机构,构建卷盘不同驱动方式的动力特性与负载、减速箱优化匹配的多目标优化模型,研究不同行走速度及负载工况下动力及传动系统高效运行的减速箱挡位数和换挡策略,解决高速驱动动力与大传动比减速箱的匹配不当所造成的传动运行效率低的难题。

(4)研究单喷头变转速控制装置及其控制规律对灌水分布图形的影响,揭示扁平化灌水分布图形对提高卷盘式喷灌机叠加组合喷灌作业的灌水均匀性和节水节能的机理,解决普通恒定转速喷头的半圆形灌水分布图形难以提高组合喷灌作业间距的难题。

深入研究和提高喷头车行走喷洒均匀性计算方法及其实用性。

研究桁架式喷头车末端低压喷头的型式和灌水分布图形对灌水均匀性的影响。

(5)研发智能速度控制器。分析卷盘式喷灌机喷头车行走速度的均匀性对灌水均匀性的影响程度,确定合理的行走速度控制偏差带,研究基于先进算法的控制率对速度反馈系统的模型参数、瞬态特性和稳定性的影响。

建立喷头车行走速度决策模型与方法,研究和掌握耗水模型与灌水量、灌水制度和不同区域喷灌水分利用效率之间的规律,为智能速度控制器的速度决策模型提供依据。

分析PE盘管回收时的流动阻力对供水量、喷头工作压力和喷灌均匀性的影响,研究喷头工作压力补偿规律和方法。

5.2 发展趋势

(1)水肥一体化功能是近年来灌溉装备的研究热点和发展方向之一。

由于输水管内部工作压力较高,所以,在卷盘式喷灌机上增加水肥一体化功能时,需要在头部水肥装置上采用吸肥和注肥两种方法才能有效将肥液与灌溉水混合。

吸肥方法是在卷盘式喷灌机入水口配置比例施肥器将液体肥按一定比例抽吸进管路,与灌溉水混合喷洒到田间。这个方案的关键是比例施肥器的比例精度对混合浓度的影响。

注肥方法是将输入卷盘式喷灌机的灌溉水分流进入一个可添加可溶性颗粒肥的容器中,经溶解混合后,由计量泵按比例注入卷盘式喷灌机管路,与灌溉水混合后喷洒到田间。但采用这种方案,由于受容器的容积局限,不能一次溶解全部所需肥液的量,

需要在中途添加颗粒肥料。因此，添加的量和速度对溶解混合浓度的均匀性还是目前国内没有解决的难题，关键是浓度的感知技术有待传感器结构和原理的创新。

(2)基于农业物联网的智慧灌溉是一个多学科融合才能实现的现代化灌溉装备体系，也是卷盘式喷灌机必然的发展方向。

由于卷盘式喷灌机在使用前需要根据灌水量来设置喷头车的行走速度，传统上是靠农民的经验来估算灌水量，再通过灌水量与喷头车行走速度关系表来设定行走速度。而智能化可根据田间作物耗水信息及模型自动决策灌水量和喷灌车行走速度，实现精准灌溉和智能控制的目的，使农民真正可以“傻瓜”使用卷盘式喷灌机。

为此，提出卷盘式喷灌机智慧灌溉体系架构，如图 13 所示。

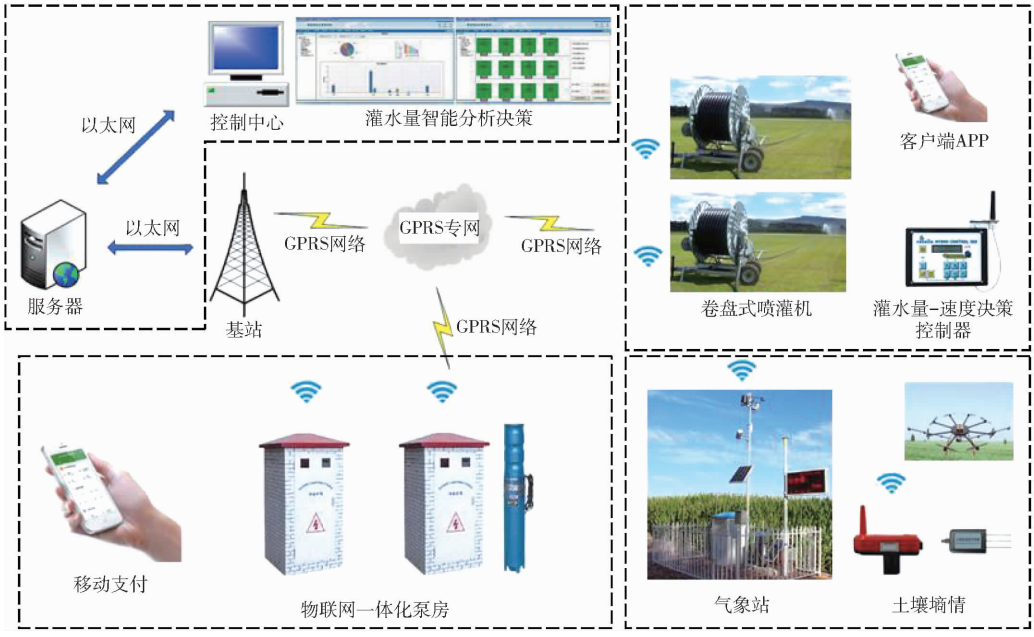


图 13　基于物联网的卷盘式喷灌机智慧灌溉架构

Fig. 13　Intelligent irrigation architecture for hose reel irrigator based on Internet of things

该架构需要研发具有与互联网实现通信的卷盘式喷灌机的智能速度控制器、水泵运行管理控制器，建设农田作物耗水信息采集系统和多学科共享的集控中心(服务器)。

农田作物耗水信息的采集需要建设气象站和土壤墒情检测点，或者采用无人机、卫星遥感等监测技术手段。数据经预处理后通过互联网上传至专门的服务器。包括作物耗水规律和模型的研究，以及灌水的分析决策及其信息的发布等研究内容。

水泵运行管理控制器应具有与手机支付平台互联通信功能，负责给卷盘式喷灌机提供灌溉水，其中启停、运行、故障和水电费支付等信息由控制器和传感器完成。其研究内容主要是研究掌握水泵供水压力与卷盘式喷灌机喷头恒定工作压力的关系，解决现有入机压力恒定技术不能保证喷灌的均匀性问题。

卷盘式喷灌机的智能速度控制器应具备与手机 APP、水泵运行管理控制器互联互通功能，手机 APP 是智能速度控制器的控制与信息界面，可以通过其获取灌水提醒的信息，了解经过专家系统处理的灌溉地图，也可以随时获取卷盘式喷灌机作业数据，掌握运行工作状态。研发内容主要是互联互通的协议和通信等技术问题。

服务器是数据处理和决策平台，是整个架构的中枢。负责处理来自农田作物的耗水信息并发布灌水决策信息，多学科的各种专家模型在平台汇集和共享。主要涉及大数据后处理和专家库的程序化、自学习和决策的人工智能研究内容。

参　考　文　献

1　陆红娜，康绍忠，杜太生，等. 农业绿色高效节水研究现状与未来发展趋势[J]. 农学学报，2018，8(1)：155－162.
LU Hongna，KANG Shaozhong，DU Taisheng，et al. Current status and future research trend on water-saving high-efficiency and eco-friendly agriculture[J]. Journal of Agriculture，2018，8(1)：155－162.（in Chinese）

2　康绍忠，李万红，霍再林. 粮食生产中水资源高效利用的科学问题[J]. 中国科学基金，2012(6)：321－324，329.
KANG Shaozhong，LI Wanhong，HUO Zailin. Scientific issues high efficient utilization of water resources in food production process[J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China，2012(6)：321－324，329.（in Chinese）

3 王玉宝, 吴普特,孙世坤,等. 我国粮食虚拟水流动对水资源和区域经济的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(10): 208 - 215. http: // www. j-csam. org/jcsam/ch/reader/view_abstract. aspx? flag = 1&file_no = 20151027&journal_id = jcsam. DOI:10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2015. 10. 027.
WANG Yubao, WU Pute, SUN Shikun, et al. Impact of virtual water flows of grain on water resources and regional economy in China [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(10): 208 - 215. (in Chinese)

4 袁寿其,李红,王新坤. 中国节水灌溉装备发展现状、问题、趋势与建议[J]. 排灌机械工程学报,2015,33(1):78 - 92.
YUAN Shouqi, LI Hong, WANG Xinkun. Status, problems, trends and suggestions for water-saving irrigation equipment in China [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2015, 33(1): 78 - 92. (in Chinese)

5 汤玲迪. 卷盘式喷灌机水涡轮优化设计与内部流动分析[D]. 镇江:江苏大学,2017.
TANG Lingdi. Optimization design and analysis of inner flow characteristics for the special water turbine used in hose reel irrigator [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2017. (in Chinese)

6 许一飞. 软管卷盘式自动喷灌机特性分析[J]. 中国农业大学学报,1996,1(6):19 - 25.
XU Yifei. Analysis of characteristics of hose type wheel-driven automatic sprinkler[J]. Journal of China Agricultural University, 1996, 1(6): 19 - 25. (in Chinese)

7 刘子沛. 法国的水利灌溉及卷盘式喷灌机技术[J]. 广西水利水电,1998(4):55 - 57.

8 郝金东. 国外绞盘式喷灌机的发展和现状[J]. 喷灌技术,1979(3):64 - 75.

9 林中卉. “佩罗玛特”绞盘式喷灌机[J]. 喷灌技术,1978(4):45 - 50.

10 尹万和.《台风》绞盘式喷灌机和《布姆》旋转悬臂式喷灌机[J]. 喷灌技术,1979(3):81 - 85.

11 尹万和,马春兰,陈兰发,等. “佩罗玛特”型绞盘式喷灌机的水力特性分析[J]. 喷灌技术,1980(4):44 - 53.

12 陈亚新. 引进的绞盘式喷灌机性能试验分析及对我国研制的意见[J]. 内蒙古农牧学院学报,1982(1):179 - 194.
CHEN Yaxin. Performance test and analysis of the imported winch sprinkler and opinions on the development in China[J]. Journal of Inner Mongolia College of Agriculture and Animal Husbandry, 1982(1): 179 - 194. (in Chinese)

13 海因茨·舒雷尔,艾人. 绞盘式喷灌机牵引速度和牵引力需要量的变化[J]. 喷灌技术,1979(3):76 - 80.

14 王综武. 绞盘式喷灌机调速装置的初步研究[J]. 粮油加工与食品机械,1984(11):19 - 24.

15 王综武. 又一种大型喷灌机试制成功——JP90/300 型绞盘式喷灌机[J]. 农业机械,1980(3):18.

16 魏永耀. 我国试制成功第一台绞盘式喷灌机[J]. 喷灌技术,1980(2):80.

17 王综武,王家保. JP90/300 型绞盘式喷灌机[J]. 粮油加工与食品机械,1984(9):38 - 40.

18 王综武. 略谈我国的卷管式绞盘喷灌机的开发和应用[J]. 节水灌溉,1998(1):31 - 34.

19 王综武. 浅谈我国卷盘式绞盘喷灌机的引进和开发[J]. 农业机械,1999(9):16 - 17.

20 王综武,梁彦芳. 略谈我国卷管式绞盘喷灌机的引进和开发中的几个问题[J]. 节水灌溉, 2000(1): 33 - 34.

21 ISO 8224 - 1:2003 Traveller irrigation machines—part 1: operational characteristics and laboratory and field test methods [S]. Geneva: IHS, 2004.

22 ISO 8224 - 2:1991 Traveller irrigation machines—part 2: softwall hose and couplings—test methods [S]. Geneva: IHS, 1992.

23 SS EN 908 - 1999 Agricultural and forestry machinery—safety—part 18: reel machines for irrigation [S]. Singapore: IHS, 2000.

24 GB/T 21400. 1—2008 绞盘式喷灌机第 1 部分:运行特性及实验室和田间试验方法[S]. 2008.

25 GB/T 21400. 2—2008 绞盘式喷灌机第 2 部分:软管和接头试验方法[S]. 2008.

26 GB 10395. 18—2010 农林机械安全第 18 部分:软管牵引绞盘式喷灌机[S]. 2010.

27 SL 280—2003 卷管牵引绞盘式喷灌机使用技术规范[S]. 2003.

28 COLLIER R L, ROCHESTER E W. Water application uniformity of hose towed traveler irrigators[J]. Transactions of the ASAE, 1980, 23(5): 1135 - 1138.

29 GRANT T W, ANDERSON W C, ROCHESTER E W. Constant and variable operating-angle sprinklers for traveler irrigators[J]. Transactions of the ASAE, 1984, 27(4): 1106 - 1110.

30 ROCHESTER E W, HACKWELL S G, YOO K H. Pressure vs. flow control in traveler irrigation evaluation[J]. Transactions of the ASAE, 1989, 32(6): 2029 - 2034.

31 GRAZIANO G, ENRICO P. Controlling sprinkler rotation speed to optimize water distribution uniformity of travelling rain guns[C] // ASABE 2014 Annual International Meeting, 2014: 3574 - 3580.

32 梁文经,邓华略. 介绍一种行喷式喷灌机组合均匀度的计算方法[J]. 喷灌技术,1980(1):22 - 26.

33 吴涤非. 行喷式喷灌机组合均匀度的设计与计算[J]. 华北水利水电学院学报,1984(1):40 - 52.
WU Difei. The design and calculation of resultant uniformity of continuously moving mechanical sprinkleysystems[J]. Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, 1984(1): 40 - 52. (in Chinese)

34 范永申,黄修桥,仵峰,等. 喷灌和软管灌溉两用机组水量分布特性与试验[J]. 农业机械学报, 2009, 40(11): 74 - 77.
FAN Yongshen, HUANG Xiuqiao, WU Feng, et al. Experiment and analysis on water distribution uniformity of machine of sprinkling irrigation and hose irrigation dual purpose[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(11): 74 - 77. (in Chinese)

35 葛茂生,吴普特,朱德兰,等. 卷盘式喷灌机移动喷洒均匀度计算模型构建与应用[J]. 农业工程学报,2016,32(11):130 - 137.

GE Maosheng, WU Pute, ZHU Delan, et al. Construction and application of mobile spraying uniformity model of hard hose traveler [J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(11): 130 – 137. (in Chinese)

36 段福义,刘建瑞,范永申,等. 轻型卷盘喷灌机运行效果影响因素分析[J]. 排灌机械工程学报,2017,35(6):541 – 546,552.
DUAN Fuyi, LIU Jianrui, FAN Yongshen, et al. Influential factor analysis of spraying effect of light hose-fed traveling sprinkling system[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2017, 35(6): 541 – 546, 552. (in Chinese)

37 OAKES P L, ROCHESTER E W. Energy utilization of hose towed traveler irrigators[J]. Transactions of the ASAE, 1980, 23(5): 1131 – 1134.

38 SANJAY V J, RAJESH N P. Investigations on pump running in turbine mode: a review of the state-of-the-art[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014, 30: 841 – 868.

39 DERAKHSHAN S, NOURBAKHSH A. Experimental study of characteristic curves of centrifugal pumps working as turbines in different specific speeds[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2008, 32: 800 – 807.

40 WILLIAM A A. The turbine performance of centrifugal pumps: a comparison of prediction methods[J]. Proc. IMech E, Part A: Journal of Power and Energy, 1994, 208(1): 59 – 66.

41 SINGH P, NESTMANN F. A consolidated model for the turbine operation of centrifugal pumps[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines & Power, 2011, 133(6): 063002.

42 SINGH P, NESTMANN F. An optimization routine on a prediction and selection model for the turbine operation of centrifugal pimps[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2010, 34(2): 152 – 164.

43 DERAKHSHAN S, NOURBAKHSH A. Theoretical, numerical and experimental investigation of centrifugal pumps inreverse operation[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2008, 32: 1620 – 1627.

44 NATANASABAPATHI S R, KSHIRSAGAR J T. Pump as turbine—an experience with CFX – 5.6[C]// Corporate Research and Eng. Division, Kirloskar Bros. Ltd., 2004.

45 SONIA R, KSHIRSAGAR J T. Numerical simulation on a pump operating in a turbine mode[C]// Proceedings of the Twenty-third International Pump Users Symposium, 2007: 1 – 7.

46 MADE S, NENGAH S, WAYAN B, et al. Experimental work on modification of impeller tips of a centrifugal pump as a turbine [C]// The 2nd Joint Conference on Sustainable Energy and Environment (SEE 2006), 2006: 1 – 5.

47 SINGH P, NESTMANN F. Internal hydraulic analysis of impeller rounding in centrifugal pumps as trubines[J]. Experimental Thermal and Fluid Sciences, 2011, 35(1): 121 – 134.

48 SINGH P. Optimization of the internal hydraulic and of system design in pumps as turbines with field implementation and evaluation[D]. Karlsruhe: University of Karlsruhe, 2005.

49 DERAKHSHAN S, NOURBAKHSH A, MOHAMMADI B. Efficiency improvement of centrifugal reverse pumps[J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 2009, 131(2): 021103 – 1 – 9.

50 DERAKHSHAN S, MOHAMMADI B, NOURBAKHSH A. Incomplete sensitivities for 3D radial turbomachinery blade optimization [J]. Computational & Fluids, 2008, 37(10): 1354 – 1363.

51 DERAKHSHAN S, MOHAMMADI B. The comparison of incomplete sensitivities and genetic algorithms applications in 3D radial turbo machinery blade optimization [J]. Puters & Fluids, 2010, 39(10): 2022 – 2029.

52 李国民,王春海,贾平,等. 8PJ – 75/300 新型卷管式绞盘喷灌机的研究[J]. 农机化研究,2007,29(1):66 – 69.
LI Guomin, WANG Chunhai, JIA Ping, et al. Research on 8PJ – 75/300 new winch watering machine based on coiling tubular type[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2007, 29(1): 66 – 69. (in Chinese)

53 汤跃,朱相源,梅星新,等. JP50 卷盘喷灌机水涡轮水力性能试验[J]. 中国农村水利水电,2014(2):26 – 29.
TANG Yue, ZHU Xiangyuan, MEI Xingxin, et al. Performance test of water turbine of JP50 reel sprinkler[J]. China Rural Water and Hydropower, 2014(2): 26 – 29. (in Chinese)

54 朱相源. JP50 卷盘喷灌机用水涡轮数值模拟与优化[D]. 镇江:江苏大学,2014.

55 袁寿其,牛国平,汤跃,等. JP50 卷盘式喷灌机水涡轮水力性能的试验与模拟[J]. 排灌机械工程学报,2014,32(7):553 – 557.
YUAN Shouqi, NIU Guoping, TANG Yue, et al. Experiment and numerical estimation of performance of hydraulic turbine of JP50 reel sprinkle[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2014, 32(7): 553 – 557. (in Chinese)

56 牛国平. 卷盘式喷灌机水涡轮水力性能试验与数值模拟[D]. 镇江:江苏大学,2015.

57 程俊,汤跃,汤玲迪. JP75 型卷盘喷灌机用水涡轮能耗贡献率分析[J]. 排灌机械工程学报,2016,34(11):1008 – 1012.
CHENG Jun, TANG Yue, TANG Lingdi. Energy consumption analysis of hydraulic turbine of JP75 hose reel irrigator[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2016, 34(11): 1008 – 1012. (in Chinese)

58 程俊. 卷盘式喷灌机专用斜击式水涡轮内流分析及优化[D]. 镇江:江苏大学,2017.

59 TANG Lingdi, YUAN Shouqi, TANG Yue. Performance improvement of a micro impulse water turbine based on orthogonal array [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2017(12): 1 – 15.

60 黎耀军, 张振洲,严海军,等. JP75 卷盘式喷灌机水涡轮水力性能分析与结构改进设计[J/OL]. 农业机械学报,2018, 49(1):100 – 107. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20180112&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.01.012.
LI Yaojun, ZHAN Zhenzhou, YAN Haijun, et al. Hydraulic performance analysis and optimization for water turbine of JP75 hose

reel irrigation machine[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(1): 100 - 107. (in Chinese)

61 杨孙圣. 离心泵作透平的理论分析数值计算与实验研究[D]. 镇江:江苏大学,2012.

62 王桃,孔繁余,袁寿其,等. 前弯叶片液力透平专用叶轮设计与实验[J/OL]. 农业机械学报,2014,45(12):75 - 79. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20141212&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.12.012.
WANG Tao, KONG Fanyu, YUAN Shouqi, et al. Design and experiment on pump as turbine with forward curved blades[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(12): 75 - 79. (in Chinese)

63 WANG T, KONG F Y, YANG S S, et al. Numerical study on hydraulic performances of pump as turbine with forward-curved blades[C]// Proceedings of the ASME 2014 4th Joint US - European Fluids Engineering Division Summer Meeting, FEDSM, 2014: 2014 - 21347.

64 WANG Tao, WANG Chuan, KONG Fanyu, et al. Theoretical, experimental, and numerical study of special impeller used in turbine mode of centrifugal pump as turbine[J]. Energy, 2017, 130: 473 - 485.

65 王桃,孔繁余,杨孙圣,等. 叶片安放角变化规律对液力透平性能的影响[J/OL]. 农业机械学报,2015,46(10):75 - 80. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20151012&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.10.012.
WANG Tao, KONG Fanyu, YANG Sunsheng, et al. Effects of blade angle distributions on performance of pump as turbine[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(10): 75 - 80. (in Chinese)

66 WANG Tao, KONG Fanyu, XIA Bin, et al. The method for determining blade inlet angle of special impeller using[J]. Renewable Energy, 2017, 109: 518 - 528.

67 王桃,孔繁余,杨孙圣,等. 泵作透平专用叶轮直径的确定及其对透平性能的影响[J]. 农业工程学报,2016,32(15):60 - 66.
WANG Tao, KONG Fanyu, YANG Sunsheng, et al. Determination of special impeller diameter for pump as turbine and its effects on turbine performance[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(15): 60 - 66. (in Chinese)

68 王桃,孔繁余,陈凯,等. 转速对离心泵作透平性能影响的试验与分析[J]. 农业工程学报,2016,32(15):67 - 74.
WANG Tao, KONG Fanyu, CHEN Kai, et al. Experiment and analysis of effects of rotational speed on performance of pump as turbine[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(15): 67 - 74. (in Chinese)

69 严海军, 许一飞. 悬挂式卷管灌溉机的设计与研制[J]. 农业工程学报, 2000, 16(3): 32 - 34.
YAN Haijun, XU Yifei. Design and study on tractor mounted hose-reeling irrigation machine[J]. Transactions of the CSAE, 2000, 16(3): 32 - 34. (in Chinese)

70 汤跃. 低能耗自动卷盘式智能农业灌溉装备研究与开发[EB/OL]. (2016 - 03 - 01)[2016 - 03 - 01]. http://www.jsstrs.cn/xiangxiBG.aspx? id=2281.

71 李科,汤跃,赵进. 基于蜗轮蜗杆的卷盘喷灌机传动设计与优化[J]. 排灌机械工程学报,2017,35(5):454 - 460.
LI Ke, TANG Yue, ZHAO Jin. Design and optimization of worm drive based transmission system for hose reel sprinkler[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2017, 35(5): 454 - 460. (in Chinese)

72 李科,汤跃,赵进. 卷盘喷灌机传动系统的疲劳仿真[J]. 排灌机械工程学报,2017,35(8):725 - 730.
LI Ke, TANG Yue, ZHAO Jin. Fatigue simulation of transmission system of hose reel irrigators[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2017, 35(8): 725 - 730. (in Chinese)

73 赵进,邱志鹏,彭涛,等. 基于行星齿轮的卷盘喷灌机传动设计与优化[J]. 排灌机械工程学报,2015,33(8):724 - 730.
ZHAO Jin, QIU Zhipeng, PENG Tao, et al. Design and optimization of transmission system for hose reel irrigators based on planetary gears[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2015, 33(8): 724 - 730. (in Chinese)

74 汤玲迪,汤跃,袁寿其,等. 卷盘式喷灌机传动系统效率试验装置与方法:201410352831.5[P]. 2014 - 10 - 08.

75 张晨骏,汤跃,汤玲迪,等. JP75 型卷盘喷灌机传动效率分析与试验[J]. 农机化研究,2015,37(9):37 - 40.
ZHANG Chenjun, TANG Yue, TANG Lingdi, et al. Efficiency analysis and experimental of the type JP75 hose reel irrigator[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, 37(9): 37 - 40. (in Chinese)

76 苏中伟. JP75/300 型卷盘式喷灌机设计要点的讨论[C]// 中国农机学会 2003 年学术年会论文集,2003:266 - 270.

77 COATES W, AZOUGGAGH M, JORDAN K. Pressure-Compensated speed controller for hose reel irrigators[J]. Transactions of the ASAE, 1991, 7(4): 389 - 392.

78 吴晨. 基于安卓系统的电驱动卷盘式喷灌机电机自控关键技术[D]. 镇江:江苏大学,2017.

79 王昌伟,朱德兰,张林,等. 基于 DSP 和 ARM 的人机交互绞盘式太阳能喷灌机控制系统设计[J]. 节水灌溉,2015(7):76 - 80.
WANG Changwei, ZHU Delan, ZHANG Lin, et al. Design of human machine interaction auto-control system of solar powered hose reel sprinkler based on DSP and ARM[J]. Water Saving Irrigation, 2015(7): 76 - 80. (in Chinese)

80 张会娟,朱瑞祥,吴峰,等. 卷管式喷灌机绞盘速度自动控制系统的研究[J]. 农机化研究, 2007, 29(1): 136 - 138.
ZHANG Huijuan, ZHU Ruixiang, WU Feng, et al. Study of winch velocity automatic control system on traveler sprinkling irrigation machine[J]. Journal of Agricultural Mechanization, 2007, 29(1): 136 - 138. (in Chinese)

81 ROCHESTER E W, FLOOD C A, HACKWELL S G. Pressure losses from hose coiling on hard-hose travelers[J]. Transactions of the ASAE, 1990, 33(3): 834 - 838.

82 包大凯，徐建建，吕美琪. 绞盘式喷灌机输水管：改性聚乙烯(PE)管耐“环境应力开裂”的研究[J]. 排灌机械，1984(3)：19－22.
BAO Dakai, XU Jianjian, LÜ Meiqi. Research on the resistance to “environmental stress cracking” of modified polyethylene (PE) pipes for water pipe of winch sprinkling irrigation machine[J]. Drainage and Irrigation Machinery, 1984(3): 19－22. (in Chinese)

83 DEAN W R. The stream-line motion of fluid in a curved pipe[J]. Philosophical Magazine, 1928, 30(5): 673－695.

84 WHITE C M. Streamline flow through curved pipes[J]. Proceedings the Royal Society: Series A, 1929, 123: 645－663.

85 TAYLOR G I. The criterion for turbulence in curved pipes[J]. Proceedings the Royal Society: Series A, 1929, 124: 243－249.

86 ITO H. Friction factors for turbulent flow in curved pipes[J]. ASME Journal of Basic Engineering, 1959, 81: 123－134.

87 ADLER M. Flow in curved pipes[J]. Journal of Applied Mathematics and Mechanics, 1934, 14: 257－275.

88 ITO H. Laminar flow in curved pipes[J]. Journal of Applied Mathematics and Mechanics, 1969, 49: 653－663.

89 SRINIVASAN P S, NANDAPURKAR S S, HOLLAND F A. Friction factors for coils[J]. Transactions of the Institution of Chemical Engineers, 1970, 48: 156－161.

90 GRUNDMAN R. Friction diagram of the helically coiled tube[J]. Chemical Engineering and Processing—Process Intensificatio, 1985, 19(2): 113－115.

91 张敏，王和平. 卷盘式喷灌机软管阻力损失的试验研究[J]. 中国农机化，2005(3)：58－59.
ZHANG Min, WANG Heping. Experimental study on the hose resistance loss of the hose reel irrigator[J]. Chinese Agriculture Mechanization, 2005(3): 58－59. (in Chinese)

92 汤玲迪. 卷盘喷灌机螺旋输水盘管二次流特性与流动阻力数值模拟[D]. 镇江：江苏大学，2013.

93 TANG Lingdi, YUAN Shouqi, TANG Yue. Numerical simulation on secondary vortex rotational phenomenon for helically coiled water pipe[J]. Applied Mechanics & Materials, 2014, 687: 684－687.

94 TANG Lingdi, YUAN Shouqi, TANG Yue. Flow resistance study of helically coiled pipe for a hose reel irrigator based on CFD analysis[C]//2014 ASABE International Meeting, 2014: 1085－1093.

95 TANG Lingdi, TANG Yue, SIVA P. A numerical study of flow characteristics in a helical pipe[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2016, 8(7): 1－8.

96 TANG Lingdi, YUAN Shouqi, MIKE M, et al. Secondary vortex-based analysis of flow characteristics and pressure drop in helically coiled pipe[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2017, 9(4): 1－11.

97 范永申，黄修桥，李金山，等. 喷灌和软管灌溉两用轻小机组洒水车稳定性分析[J]. 排灌机械工程学报，2010，28(3)：256－259.
FAN Yongshen, HUANG Xiuqiao, LI Jinshan, et al. Stability analysis on light weight and small size watering cart for dual purpose of both sprinkling irrigation and hose irrigation[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2010, 28(3): 256－259. (in Chinese)

98 汤跃，赵进，邱志鹏，等. 基于虚拟样机的桁架式喷洒车稳定性动力学仿真[J/OL]. 农业机械学报，2015，46(7)：72－78. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20150711&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.07.011.
TANG Yue, ZHAO Jin, QIU Zhipeng, et al. Dynamics simulation of stability of spraying vehicles based on virtual prototype[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(7): 72－78. (in Chinese)

99 赵进，汤跃. 高稳定性卷盘喷灌机单喷头喷洒车设计[J]. 排灌机械工程学报，2015，33(9)：823－828.
ZHAO Jin, TANG Yue. Design for stability single nozzle sprinkler cart of hose reel irrigator[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2015, 33(9): 823－828. (in Chinese)