doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.09.023

高效精准灌溉装备与技术创新及应用

袁寿其　李　红　汤玲迪　李彦军　裴　吉　王文杰　李亚林
（江苏大学流体机械工程技术研究中心，镇江 212013）

摘要：农业“提水”至农田“灌水和施肥”装备与技术是现代农业灌溉体系的核心。针对我国农业灌溉泵效率低、灌水施肥精度差和调控难等问题，本文在高效精准灌溉装备与技术研发及系统集成方面进行研究。建立了基于液相表面张力的非线性空化方程，揭示了变曲率 Dean 涡演变规律，实现了泵装置全流道能量匹配，创建了高效抗空化多工况设计技术与智能优化平台。研发的高效轴/混流泵系列产品效率达 87.20%，较国外同类产品提高 3.2 个百分点，研制了国际领先的双向流道泵装置。建立了多能驱动-传动优化匹配方法，开发了智能电驱动、新型水涡轮及液压驱动卷盘式喷灌机系列产品，创新了基于模糊控制策略的固体肥精准混施装置，搭建了集健康运行状态监测和供配水高效节能调度为一体的泵站灌溉系统高精度数字孪生平台。创制的喷灌机驱动-传动效率提高约 20%，水涡轮效率比国外同类产品提高 10.9 个百分点，研制的固体肥溶解混施装置肥液浓度控制准确度达 94.4%。研究成果在淠史杭灌区、引江济淮等国家重大工程中广泛应用，以及应用于河北、河南等粮食主产区和“一带一路”国家，显著提升了水资源和肥料利用率，推动了现代农业的高效可持续发展。

关键词：精准灌溉；泵及装置；喷灌机；施肥装置；高效
中图分类号：TH313；S277.94；S224.21　**文献标识码**：A　**文章编号**：1000-1298(2025)09-0312-14　**OSID**：

Innovation and Application of High-efficiency Precision Irrigation Equipment and Technology

YUAN Shouqi　LI Hong　TANG Lingdi　LI Yanjun　PEI Ji　WANG Wenjie　LI Yalin
(*Research Center of Fluid Machinery Engineering and Technology*, *Jiangsu University*, *Zhenjiang* 212013, *China*)

Abstract: Agricultural “water lifting” and “irrigation + fertilization” equipment and technology are the core of modern agricultural irrigation systems. Addressing the critical challenges in China's agricultural irrigation, such as low pump efficiency, poor precision in irrigation and fertilization, and difficult regulation, it was focused on research in the development of high-efficiency precision irrigation equipment and system integration. A nonlinear cavitation equation based on liquid-phase surface tension was established, revealing the evolution mechanism of variable-curvature Dean vortices, achieving full-flow-channel energy matching in pump systems, and creating high-efficiency anti-cavitation multi-condition design technology and an intelligent optimization platform. The developed high-efficiency axial/mixed-flow pump series achieved an efficiency of 87.20%, surpassing foreign counterparts by 3.2 percentage points, and the bidirectional flow channel pump unit was developed, reaching international leading standards. A multi-energy drive-transmission coupling optimized matching method was established, leading to the development of intelligent electric-driven, new-type hydraulic turbine-driven, and hydraulically driven reel-type sprinkler series. An innovative solid fertilizer precision mixing and application device based on fuzzy control strategy was introduced, and a high-precision digital twin platform integrating health operation monitoring and energy-efficient water distribution scheduling for pumping stations in the irrigation system was constructed. The drive-transmission efficiency of the developed sprinkler machines was increased by approximately 20%, and the hydraulic turbine efficiency surpassed foreign counterparts by 10.9 percentage points. The solid fertilizer dissolution and mixing device achieved a fertilizer solution concentration accuracy of 94.4%. The research outcomes were widely applied in major national projects such as the Pi - Shi - Hang Irrigation District and the Yangtze-to-

收稿日期：2025-07-30　修回日期：2025-08-13
基金项目：国家重点研发计划项目(2023YFD1900700)
作者简介：袁寿其(1963—)，男，研究员，博士生导师，主要从事排灌机械领域研究，E-mail：shouqiy@ujs.edu.cn

Huaihe Water Diversion Project, extensively used in major grain-producing regions like Hebei and Henan, as well as in the Belt and Road countries. Research results significantly improved water and fertilizer utilization efficiency and promoted the efficient and sustainable development of modern agriculture.

Key words: precision irrigation; pump device; sprinkler machine; fertilizer apparatus; high-efficiency

0　引言

我国农业用水占比 62.1%，灌溉泵输水量约占农业用水的 80%，化肥施用量居世界首位，但灌溉装备效率低、灌水精准度差等问题突出，已成为我国农业节水的瓶颈问题。因此，提高灌溉泵、喷灌机和施肥机水力性能是实现我国现代农业灌溉装备高水平科技自立自强的有效途径。

在农业泵站提水方面，灌溉泵为农业用水的核心装备，发挥着输水“心脏”作用，但因流动机理不清、设计方法依赖半经验半理论等原因，导致泵及装置实际运行效率低于设计目标。具体表现为泵内空化现象无法准确预测，缺乏高精度模型支撑，传统设计方法依赖经验公式，难以兼顾多工况性能需求，造成高效区狭窄、扬程曲线波动等问题。此外，泵与流道匹配设计智能化程度不足，流道内部流动损失大，不同流道型式对流动演变机理不明，导致水力损失难以有效控制。这些问题使得我国灌溉泵装置整体效率还有待提高，例如低扬程泵站装置效率小于 72%，双向流道泵装置效率不足 65%，且存在水力振动现象。尽管国内外在设计理论上有大量积累，但针对农业灌溉特殊需求的高效抗空化泵及装置研发仍存在明显短板，亟需突破空化预测、水泵优化以及装置流道匹配等关键技术[1-4]。

在农业灌水和施肥装置方面，喷灌机作为田间灌溉核心装备，普遍存在灌水精度差、调控难度大等问题。传统卷盘式喷灌机水涡轮效率低下，传动系统设计复杂且能耗高，导致喷灌均匀性难以保障，行走速度控制误差大，喷洒均匀度仅为 60% ~75%。同时，施肥装置肥液浓度控制精度不足，缺乏固体肥溶解混施技术，传统压差施肥罐和目前搅拌施肥罐无法实现动态调控，肥液浓度波动显著，影响施肥均匀性。此外，智能灌溉与施肥管控系统应用处于起步阶段，缺乏基于作物需水需肥规律的精准调控策略，导致水肥利用率低，资源浪费严重。相比之下，国外高端喷灌机虽在喷洒均匀度上略有优势，但水涡轮效率和传动效率仍存在提升空间，而针对固体肥精准混施的装备研究较少。因此，开发喷灌机高效驱动系统、优化传动结构，实现肥液浓度精准控制，并构建智能管控平台，成为提升灌水和施肥装置性能的关键研究内容[5-9]。

基于此，本文对提水泵装置、灌水喷灌机和施肥装置进行理论、技术探索与产学研合作研发，所研制的高效精准灌溉装备与技术为从灌溉源头的提水到农田间的灌水和施肥提供全链条的高效精准解决方案，以期为实现国家“农业节水化”战略目标提供有效支撑。

1　研究路线

本文围绕农业高效精准灌溉需求，面向“提水”装备技术和“灌水 + 施肥”装备技术两大系统开展研究，研究对象如图 1 所示。



图 1　研究对象

Fig. 1　Schematic of research object

在提水装备方面，需重点突破高效抗空化灌溉泵关键技术：①基于液相表面张力建立非线性空化预测模型。②基于迪恩涡理论创新装置流道水力设计方法。③采用 BVF 内流场诊断方法和多种优化方法相结合，开发水泵智能优化平台。④建立泵装置优化匹配技术，实现了全流道能量匹配。⑤研制高端大流量高效轴/混流泵及装置系列产品。

在灌水施肥装备方面，需重点提升精准作业性能：①创建驱动水涡轮优化设计方法，优化水涡轮几何参数和内部流场结构。②建立多能驱动-传动耦合模型，开发智能电驱动、水涡轮驱动和液压驱动卷盘式喷灌机系列。③基于补偿函数观察器设计线性

抗扰控制策略,实现喷灌车行走速度控制。④研制固体肥溶解混施装置,基于模糊控制策略实现肥液浓度高精度控制。⑤构建“数字孪生泵站”系统,实现泵站机组动态特性预测、运行状态监测和节能运行调控。

两大系统通过数字孪生智能管控平台有机融合,形成从水源提水到田间精准灌水施肥的完整技术链条,实现农业灌溉全流程高效精准调控。

2 高效抗空化灌溉泵及装置

针对农业灌溉泵及装置效率低等问题,尤其泵内空化无法准确预测、泵与流道寻优设计智能化低及匹配性差、缺乏高端大流量灌溉泵及装置产品,本文从泵装置理论突破、智能优化设计技术开发,以及高端大流量泵装置设计 3 方面进行研究。

2.1 灌溉泵及装置理论研究

2.1.1 泵内非线性空化模型

为了真实反映泵内空化流动本质,本文提出了一种基于完整 Rayleigh - Plesset(R - P)方程的非线性空化模型[10],突破了传统模型仅考虑空泡一阶运动项及压力驱动项的局限性。该模型创新性地引入空泡二阶运动项和液相表面张力项,并将流体介质处理为空泡相、液相及不可凝结气体(NCG)的三相混合物。非线性空化模型主要计算公式为

$$S_e=\frac{36\pi N_0R^2}{(3+4\pi N_0R^3)^2}\frac{\rho_l\rho_v}{\rho+\alpha_g(\rho_l-\rho_g)}\cdot\sqrt{\left|\frac{2}{3}\frac{p_B(t)-p_\infty(t)}{\rho_l}\left(1-\frac{R_0^3}{R^3}\right)-\frac{2S}{\rho_lR}\left(1-\frac{R_0^2}{R^2}\right)\right|} \tag{1}$$

$$S_c=-\frac{36\pi N_0R^2}{(3+4\pi N_0R^3)^2}\frac{\rho_l\rho_v}{\rho+\alpha_g(\rho_l-\rho_g)}\cdot\sqrt{\left|\frac{2}{3}\frac{p_B(t)-p_\infty(t)}{\rho_l}\left(1-\frac{R_0^3}{R^3}\right)-\frac{2S}{\rho_lR}\left(1-\frac{R_0^2}{R^2}\right)\right|} \tag{2}$$

$$p_v=p_{sat}+p_{tur} \tag{3}$$

式中 S_c——凝结率 S_e——蒸发率

α——体积分数

N_0——单位体积内空泡数量

ρ——密度 R——半径

R_0——空泡初始半径

$p_B(t)$——空泡内压力

$p_\infty(t)$——无穷远处压力

S——表面张力系数

下标 l、v 和 g 表示液相、空泡相和不可凝结气体。

计算时为了考虑湍流脉动对空化初生的影响,将空化压力 p_v 修正为液相饱和蒸气压 p_{sat} 和湍流压力修正项 p_{tur}。表面张力项在空泡半径小于 140 μm 时起主导作用。模型通过 UDF 嵌入 Fluent 软件,避免了传统模型需依赖经验系数的缺陷[1]。

在 Clark - Y 型水翼云状空化模拟中(σ = 0.8),非线性模型表现出显著优势:空泡演变周期预测误差仅为 9%,优于 Schnerr - Sauer 模型的 23.2%;平均升力系数相对误差 6.93%,较 Schnerr - Sauer 模型降低 3.58 个百分点;精准捕捉空穴形态细节,如 20% 周期时空穴全覆盖吸力面特征(图 2a),证实其对回射流与空泡团脱落的模拟能力更强[11-12]。

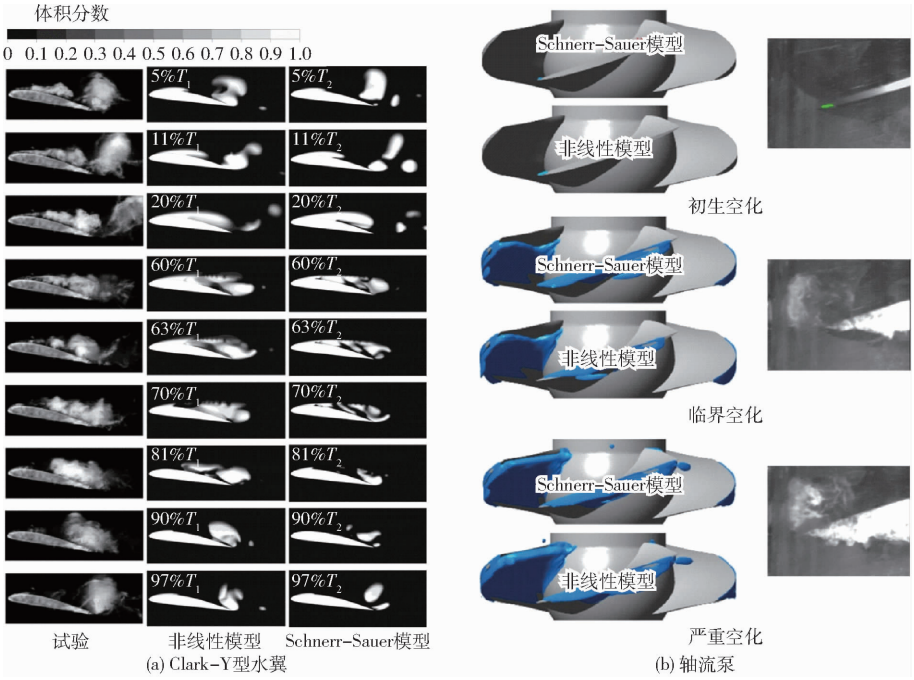


图 2 非线性空化模型应用对比

Fig. 2 Application and comparison of nonlinear cavitation model

在预测比转数 $n_s=692$ 的轴流泵空化性能时，设计工况下，临界空化余量预测误差小于 10%，且严重空化时，空泡团三角形分布与试验吻合（图 2b）；叶顶间隙初生空化预测更准确，因模型考虑 NCG 和湍流脉动（压力脉动贡献达时均值 15%）。该模型为水力机械空化预测提供了高精度工具，尤其适用于云状空化及泵内复杂流场分析。

2.1.2　基于迪恩涡理论的流道设计方法

降低弯肘型出水流道水力损失是提高低扬程泵装置效率的关键问题，而揭示流道内部流动机理是改善其水力性能的研究基础。因此，在理论层面上，研究了变曲率弯肘型流道 Dean 涡演变发展机理，获得弯肘型出水流道内各种旋涡结构的生成、发展及演变过程，对 Dean 涡理论所涉及的曲率比和面积比进行了参数研究，并且相关结果与 PIV 试验进行了对比[13]，揭示了几何参数对 Dean 涡演变机理的影响规律[2]，发现了 Dean 涡不稳定性现象，验证了传统的轴向速度径向梯度法、壁面压力梯度法和无量纲螺旋度法在判断 Dean 涡不稳定性时的失败案例，发展并完善涡核速度特征法来捕捉变曲率流道内的 Dean 涡不稳定性，如图 3 所示。得到了分离涡和曲率涡不稳定的临界迪恩数（De）[14]，有效克服了观测法工作量大以及现有方法的局限性。在设计层面上，对弯肘型流道几何参数和流动参数对流道水力损失规律进行统计分析，建立入口扰动流动参数以及各几何参数与流道水力损失的映射关系，实现流动的被动控制达到流道水力损失最小的优化目标。

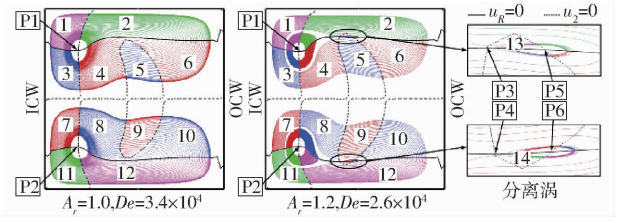


图 3　涡核速度特征法识别涡不稳定性

Fig. 3　Identification of vortex instability by using vortex core criterion

典型弯肘型出水流道水力模型如图 4 所示，在与泵段匹配时，通过设计外圆弧半径 R 和内圆弧半径 r 确定弯肘段几何边界，通过流道总长度 L 和高度参数（H_e 和 H_c）确定整个流道基本轮廓，通过圆形进口直径 D_1 和矩形断面参数（流道宽度 B 和高度 H_d）确定进出口面积，通过流道扩散角 θ 和断面形状（过流断面横向宽度 a，径向宽度 b 和倒圆角 r'）确定整个出水流道变截面尺寸。因此，如果用 ψ 表示出水流道目标函数，其几何参数映射函数可表示为

$$\psi=f(R,r,H_e,H_c,H_d,D_0,D_1,L,B,\theta,a,b,r') \quad (4)$$

为了减少设计参数，提高优化设计效率，本文提

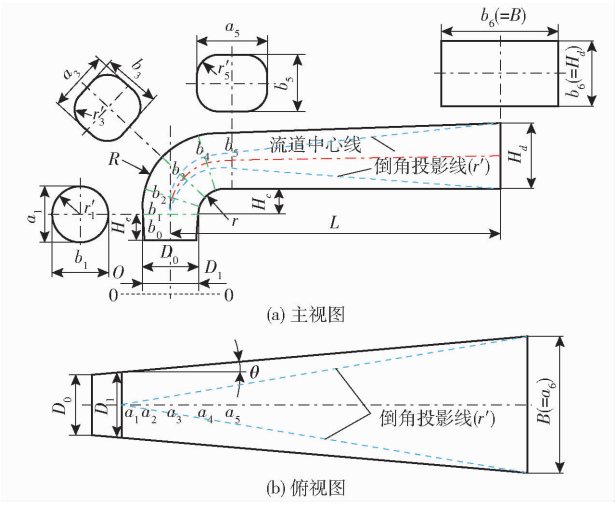


图 4　弯肘型出水流道设计方案

Fig. 4　Design schemes of elbow-shaped outlet conduit

出的基于 Dean 涡理论的弯肘型出水流道水力设计方法[15]，主要参数为迪恩数和雷诺数，以及涉及到的几何参数（面积比、曲率比和水力直径）。设计过程为计算流道中线沿程最大长度，确定从导叶出口到流道出口的流道中线沿程的最大尺寸计算公式；划分流道中线沿程 3 区域（锥形段、弯曲段和直管段）及初选长度；计算可知变量随流线中线沿程变化规律；建立由圆到长方形变截面水力直径计算公式，通过倒圆角改变实现变截面形状数学转换，确定变截面变化规律；建立弯肘型流道中线曲率半径计算公式，确定流道中线。式（4）可简化为

$$\psi=f(C_r,A_r) \quad (5)$$

该方法极大缩减了弯肘型出水流道参数数量，同时曲率比 C_r 和面积比 A_r 为 Dean 涡流动机理两个关键变量。因此通过分析 C_r 和 A_r，确立不同雷诺数（Re）和迪恩数（De）下流道水力损失规律，从而创新泵装置流道水力设计方法。

2.2　灌溉泵及装置智能优化匹配设计技术

2.2.1　泵智能优化方法及平台开发

针对优化目标与设计变量间拟合数学模型精度低的问题，提出了一种混合近似模型修正方法，提高了小样本不利条件下效率和空化性能预测精度，建立了效率和空化性能的多目标求解策略。针对多变量条件下优化目标全局寻优难的问题，提出了一种收敛速度快和精度高的改进粒子群算法，建立了泵效率智能化化方法。提出一种改进离散遗传算法，提高了离散变量优化适用性，解决了泵内非定常特性优化周期长的问题[16]。

引入“效率屋”理论将多工况转换为单一目标，建立了基于人工神经网络和克里金模型混合近似模型并进行了测试函数精度验证，解决了单一近似模型样本量较少情况下拟合精度不高的问题。采用多

目标遗传算法与人工神经网络结合的方法，对水泵效率-空化性能进行优化，在设计流量下空化余量提高 7.26%，效率提高 1.53%[17]。

为解决性能和几何参数间无精准数学模型的设计问题，基于蜗壳式泵叶轮和导叶的多参数匹配特性，提出了基于改进粒子群算法的水力部件匹配优化方法。通过叶片泵性能优化平台，自动调动泵数值计算程序，智能在全局范围内寻优。在粒子群算法迭代到第 13 次时，泵效率达到最优，设计工况下效率提高 3.09%，优化模型内部熵产损失降低，如图 5 所示，叶片工作面、叶轮与导叶交界处能量损失明显减小，流动分离状况得到改善[3,18]。

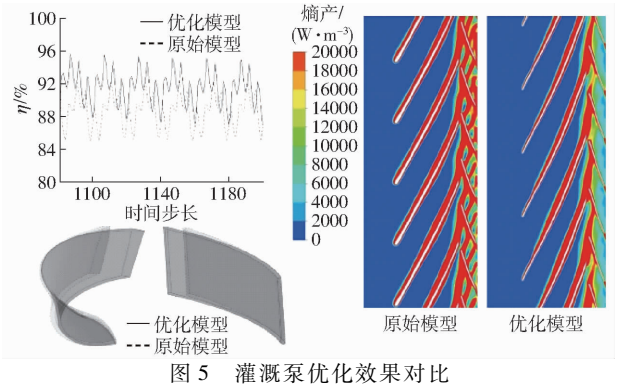


图 5 灌溉泵优化效果对比

Fig. 5 Comparison of optimization effect of irrigation pump

针对取值较大或含小数等变量时二进制编码过长的问题，提出了将变量取值离散化并采用二进制编码的离散遗传算法改进策略。该编码方式可有效减少编码长度，提升算法效率。以泵效率为优化目标，采用拉丁超立方设计方法创建 90 组设计样本，采用响应面模型对泵效率和设计参数进行拟合，通过改进的离散型遗传算法对其进行寻优，优化后泵在工况 $0.6Q_d$、$1.0Q_d$ 和 $1.4Q_d$（Q_d 为设计工况）下，效率增幅分别为 7.05%、5.98% 和 1.90%[19]。

基于边界涡量动力学理论，通过分析轴流泵叶片表面的边界涡量流（BVF）分布特征，揭示了不同工况下内部流场的能量耗散机制与流动失稳规律。研究表明，在最优工况下叶片表面 BVF 分布均匀，仅压力面进口边和吸力面轮毂处存在局部正峰值区域，对应微小负功区；当流量降低至临界失速工况时，吸力面中部出现显著 BVF 正峰值区，伴随大尺度旋涡生成，导致流动分离加剧，此时压力面进口边正峰值区向轮毂扩展，形成明显的能量耗散带。通过流线可视化发现，BVF 正峰值区与流动分离位置高度吻合，其中吸力面中部强涡旋与进口边回流共同构成马鞍区流动失稳的主要特征，如图 6 所示。进一步分析表明，叶片进口角设计缺陷会加剧小流量工况下的 BVF 异常分布，而出口角不合理则会导致尾缘流动干扰相邻叶片压力面。BVF 可为轴流泵叶轮优化设计提供了直接的流场诊断依据，通过抑制 BVF 正峰值区的形成可有效改善小流量工况下的能量性能与运行稳定性。

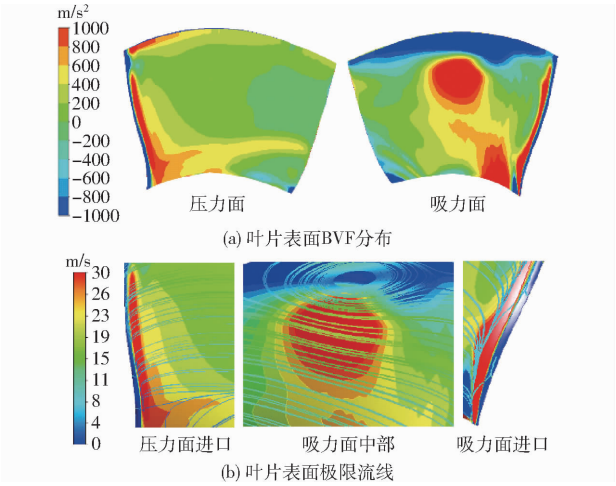


图 6 基于 BVF 的轴流叶片流场诊断

Fig. 6 Flow field diagnosis of axial-flow blades based on BVF

基于上述多种优化技术组合的优化模块和 BVF 流场诊断组成的分析模块，以灌溉泵高效和高空化性能为优化目标，结合参数化设计建模模块、网格划分和流场数值计算模块等，开发了全自动水泵智能优化设计平台，如图 7 所示，解决了水泵多参数、多工况、多目标优化全局寻优难、计算周期长的技术瓶颈，实现了多工况多参数下水泵空化与效率联合智能寻优。

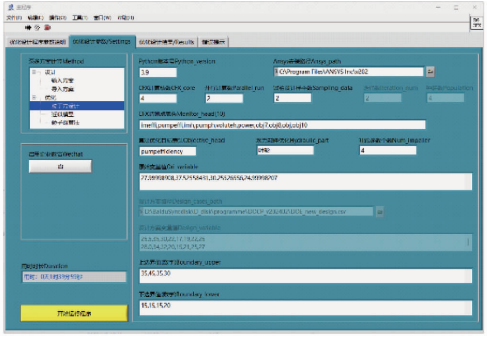


图 7 灌溉泵智能优化软件界面

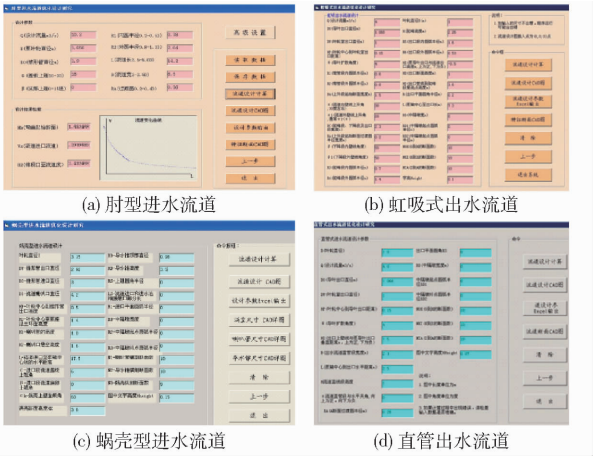
Fig. 7 Interface of intelligent optimization software for irrigation pumps

2.2.2 装置流道优化匹配系统

肘型进水流道是国内外已建大型泵站最常用的，是国标推荐采用的一种进水流道。传统的肘型流道设计方法是以平均流速的渐变来确定流道的外形尺寸，但一维设计理论已经不能满足设计需求，因此采用三维紊流数值计算的方法来优化设计泵站肘型进水流道。利用解析几何的方法对流道型线进行数学建模，设计的重点和难点在于实现弯曲渐缩段的优化，使其符合流速渐变的原则。基于建立的肘

型进水流道型线的数学模型，采用 Visual Basic 开发应用程序，对工程图形软件 AutoCAD 进行二次开发，设计了参数化的肘型进水流道优化设计的应用程序，降低了流道设计强度。对流道进行三维紊流数值仿真，检验流道在三维空间的流态，从而通过改变流道的参数调整型线，使其达到流态最优，损失最小。

虹吸式出水流道弯管段前接泵导叶出口，后接流道上升段。取泵导叶出口断面中心点为原点，建立直角坐标系。按照肘型弯管进水流道弯曲段计算方法，计算弯管段型线尺寸，并计算确定内外圆圆心及各控制断面位置，从而建立了虹吸出水流道型线数学模型。采用与弯肘型相同方法建立了虹吸式出水流道参数化软件，并推广形成了多种大型泵站进出水流道的参数化设计软件，包括常见的肘型进水流道、虹吸式出水流道，以及蜗壳型进水流道和直管出水流道，如图 8 所示，满足装置流道参数化设计需求。



(a) 肘型进水流道　(b) 虹吸式出水流道

(c) 蜗壳型进水流道　(d) 直管出水流道

图 8　泵装置不同流道参数化设计软件界面

Fig. 8　Different pump device conduit parameterization software design interface

针对进出水流道与泵优化匹配问题，由于描述进水流道优化问题的数学模型是复杂的非线性方程组，目标函数与优化变量之间呈高度非线性关系，存在很多局部极值点，致使在寻优过程中出现局部最优解。为了避免局部最优解，采用多目标遗传算法 NCGA 对整个解空间进行全局搜索，使解收敛到最优解附近，再采用序列二次规划法以 NCGA 算法的收敛解作为起始点进行局部搜索。采用这种组合优化方法规避了遗传算法的局部搜索能力不强的缺陷，尽管搜索到全局最优解附近，但要达到最优解还需要花费较大代价，因此，在局部搜索时，采用稳定性良好的数值优化方法——序列二次规划法 NLPQL 来进行搜索，既能避免陷入局部最优，又能加快收敛速度。

为了将进水流道、出水流道以及泵段几何形状表达成几何参数，需将参数化造型、网格划分、CFD 数值计算和优化算法集成到一个开放式优化平台中，形成基于 NCGA(GA)与 NLPQL 的 CAD－CFD 联合优化系统。该系统包含参数化造型模块、网格划分模块、CFD 性能预估模块和算法模块。

2.3　高端灌溉泵及装置水力模型设计

2.3.1　蜗壳式混流泵

蜗壳式混流泵效率曲线平缓，在中等扬程和较大流量工况下效率显著高于普通离心泵，其平衡性能和可靠性已成为中型灌区提水、平原规模化农业灌溉的主流设备之一。传统的水泵设计理论认为混流泵比转数不超过 500，比转数超过 500 时需设计成轴流泵。为了突破这一技术限制，在优秀水力模型基础上，采用双蜗壳结构设计，径向力较单蜗壳结构降低 42.3%，优化隔舌间隙比(e/D)提高了空化性能。建立基于速度系数法($K=0.26$)增大蜗壳断面面积的蜗壳断面优化模型，实现叶轮-蜗壳最佳匹配，设计工况点效率较初始方案提升 3.5 个百分点[20]。开发融合 SST 湍流模型与 Rayleigh－Plesset 空化模型预测方法，空化初生预测误差小于 8%，叶片背面空化区域面积得到有效改善，如图 9 所示。

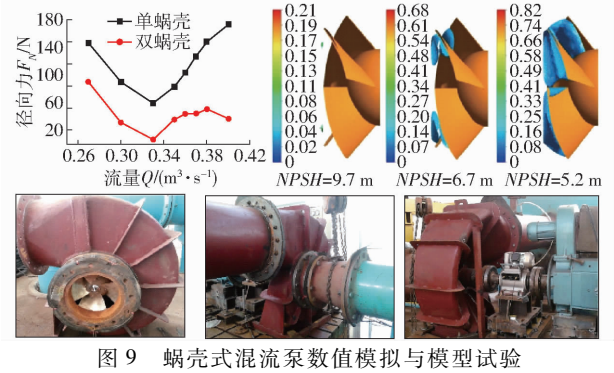


图 9　蜗壳式混流泵数值模拟与模型试验

Fig. 9　Numerical simulation and model test of volute mixed-flow pump

通过增大蜗壳断面和双蜗壳方案实现了蜗壳式混流泵高效、低振、抗空化的综合性能提升，并显著拓宽了蜗壳式混流泵比转数范围，研制的高比转数蜗壳式混流泵系列经模型试验验证，比转数为 650 的蜗壳式混流泵水力模型最高效率达 86.28%，汽蚀比转数为 1 085，空化性能优良。

2.3.2　导叶式混流泵

导叶式混流泵具有高流量、高效率优点，已成为大型灌区、调水工程和排灌结合项目的主流提水泵型，尤其适合对能耗敏感的大规模农业灌溉场景。但导叶式混流泵在农业灌溉中易出现空化性能不足、效率下降及扬程曲线波动等问题，尤其在非设计工况下流动分离显著[21]，影响运行稳定性。为了拓

宽导叶式混流泵应用范围,采用多工况和多目标优化设计,结合逆向求解、速度矩控制和变环量设计方法等[21-23],优化叶轮与导叶型线方案,并通过数值模拟验证了叶轮工作面与背面的压力分布规律,以及导叶流道流动特性,尤其关注导叶出口射流尾迹现象,确保多工况下稳定运行。优化后导叶结构有效抑制了非设计工况下流动分离,1.2 倍流量内流态稳定。

通过理论分析、数值模拟与试验结合(图 10),提升了导叶式混流泵综合性能,开发了系列导叶式混流泵水力模型,其中比转数 570 的导叶式混流泵最高效率达 87.20%,汽蚀比转数为 1 100,扬程曲线无明显拐点,满足 ±5% 变幅要求。

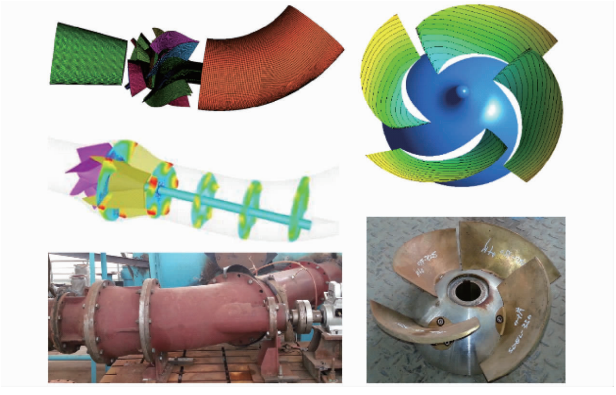


图 10 导叶式混流泵数值模拟与模型试验

Fig. 10 Numerical simulation and model test of guide vane mixed-flow pump

2.3.3 单向立式轴流泵装置

单向立式轴流泵装置凭借超大流量、低能耗、结构紧凑等优势,成为平原灌区、低洼地区排涝工程等的首选装置型式。但单向轴流泵装置在低扬程中运行常面临效率偏低、高效区狭窄等问题[24]。传统设计方法依赖经验公式,难以兼顾多工况性能需求,导致泵实际运行效率与设计目标存在偏差。为了提升单向泵装置整体性能,采用参数化建模与智能优化相结合的方法,对叶片进出口角和厚度分布进行多目标优化(图 11),并进行了模型试验验证。通过建立 Catia 参数化模型(10 个设计变量)并集成 Isight 优化平台,结合多岛遗传算法,实现了叶片几何的自动调整与性能评估。结果表明优化后叶片轮毂处进口角减小 2°,轮缘厚度降低 32%,加权平均效率提升 4.03%,高效区拓宽至 0.8 ~ 1.2 倍设计流量范围[25-26]。

基于多工况协同优化技术解决了传统试错法效率低的问题,优化周期缩短 60%。对轴流泵空化工况[27]和正常工况下压力脉动[28]进行研究,以提高轴流泵装置运行稳定性。研发的肘型进水、弯直管

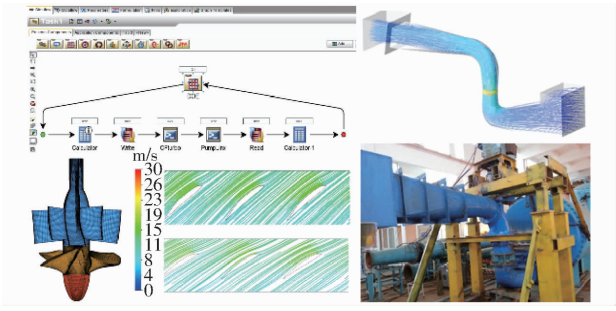


图 11 单向立式轴流泵装置数值模拟与模型试验

Fig. 11 Numerical simulation and model test of vertical axial flow pump device

出水单向立式泵装置在扬程 5 m 以下效率达 81.38%,并成功应用于淮河流域治理工程永幸河站。

2.3.4 双向流道泵装置

双向流道泵装置是一种特殊设计的泵站结构,能够同时实现灌溉与排涝双重功能,特别适合中国东南部平原、河口三角洲等易涝易旱地区的现代农业水利建设。但由于双向进出水流道的结构特性,导致流态紊乱、能量损失大及压力脉动显著等问题,影响泵装置的扬程和效率。采用 CFD 数值模拟与流固耦合方法,对比了双向流道泵装置与单向泵段的内外特性差异,如图 12 所示,发现双向流道致使泵装置在设计工况下效率降低 11.3%,扬程下降 12.6%,且导叶出口压力脉动幅值显著增大。基于此对双向进/出水流道的扩散喇叭管参数进行了水力优化匹配,提出的双向流道喇叭管优化方案将流道水力损失降低至 0.236 m,流速均匀度提升至 96.9%,显著改善了流态稳定性,提高了泵装置效率并降低了压力脉动幅值。

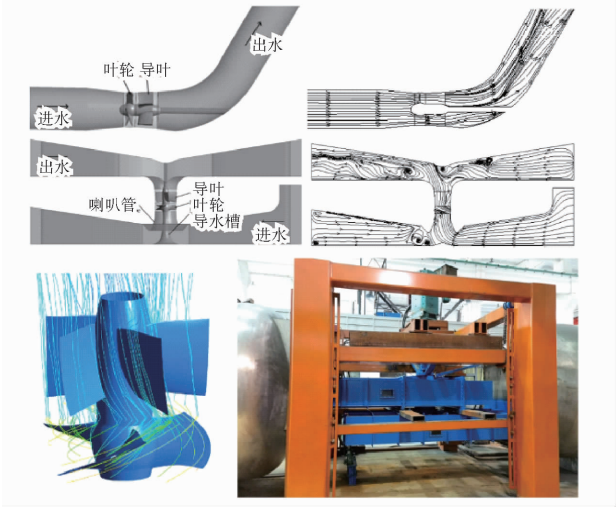


图 12 双向流道泵装置数值模拟与模型试验

Fig. 12 Numerical simulation and model test of two-way passage pump device

通过数值模拟计算与模型试验验证(图 12),揭

示了双向流道内旋涡形成机制、压力脉动特性以及双向流道对水泵水力性能的相干机理，解决了双向流道泵装置关键技术难题[4,29]。研制的双向流道泵装置效率达到 78.12%，成功应用于引江济淮工程枞阳站，相关优化设计技术推广应用到凤凰颈站改造工程、江阴水利枢纽泵站等工程。

3　智能精准喷灌机与施肥装置

针对农业喷灌机灌水精度差的问题，尤其喷灌机控制误差大、水肥机肥液浓度控制难、灌溉智能管控系统欠缺，本文从喷灌机精准灌水和高效运行、施肥机精准施肥以及数字孪生交互管理节水灌溉 3 方面内容进行研究。

3.1　智能卷盘式喷灌机

卷盘式喷灌机主要由驱动部件、传动系统、卷盘及 PE 管回收机构、喷头装置和行走控制系统等核心部分组成。其中，驱动-传动系统和速度控制是决定整机性能的关键技术[5]。

3.1.1　水涡轮结构优化

我国卷盘式喷灌机品种规格偏少，缺乏产品系列，在关键技术研究、产品品质和性能等方面与国外存在较大差距。水涡轮是卷盘式喷灌机关键水力部件，起到驱动卷盘旋转、回收 PE 管的核心动力传递作用。特别是大量国产专用水涡轮还是采用欧洲 40 多年前的技术，效率低的问题尤为突出，与欧洲先进技术相比，效率低约 15 个百分点。

针对上述问题，基于 CFD 高精度模拟和正交试验因素的极差和方差分析，获得几何因素对水涡轮效率影响的主次顺序依次为出口直径、叶片出口倾角、叶片数、叶片宽度、进口安放角和叶缘间隙。采用多重分析方法揭示了出口直径参数和叶片出口倾角参数间呈显著差异。对显著参数因素进行内部流动损失研究发现，出口直径增大，从叶片流出的水流产生的冲击损失增大，尾水管低压区变大，促进涡带形成，水力损失增大；而出口倾角增大，利于水流的流动，叶片出口的涡旋变少，水流平稳进入尾水管，降低了涡旋产生的水力损失。

为了进一步揭示水涡轮动静干涉作用机理以及压力脉动特性，对水涡轮喷嘴、转轮、尾水管不同位置进行压力脉动监测，通过时域和频谱分析发现原始水涡轮叶片达到受力峰值较缓慢，进入流道的水流速度矢量方向紊乱，当射流非正对流道时，水流会明显分叉，叶片凹面的流速加快，致使凹面压力变小，所受作用力也随之减低。以上研究揭示了水涡轮内部流动损失机制及影响水涡轮效率的显著因素，为水涡轮优化设计提供了参考。

采用优化的 BP 神经网络遗传算法（GA－BP），优化了转轮几何参数，有效改善了传统正交试验后续工作效率低下的问题。通过对比分析原型涡轮与优化后涡轮的内部流动特性（图 13），发现尾水管涡带尺寸与叶片出口倾角呈负相关，当倾角增大时，叶片对水流的约束和导向作用增强，导致流速减小，从而抑制了尾水管涡带形成；径向截面压力和工作面受力分析表明，优化后水涡轮喷嘴射流直接作用的流道区域外，其余部位基本保持压力均衡状态，压力能量主要集中于流道间进行恢复；叶片进口部位型线曲率影响叶片受力分布，曲率增大时会导致受力分布更为集中；同时优化后水涡轮由于叶形更弯曲，接收到的射流冲击反作用力变强，叶片受力快速集中，在整个动静干涉作用过程中，进入流道的水流速度矢量基本沿着叶片凸面向出口流动，使得凹面流速变低，压力增大，因此作用力也随之变大，冲击效率得到明显改善。该优化方法突破了影响超低比转数冲击式水涡轮效率的关键技术，优化后水涡轮设计点效率提高 10.9 个百分点。基于该优化方法研制的新型高效水涡轮全部实现更新换代。

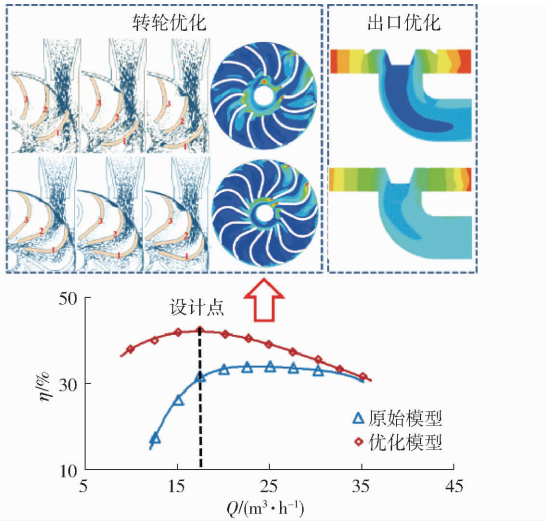


图 13　水涡轮内部流动优化

Fig. 13　Optimization of internal flow in water turbine

3.1.2　传动系统优化

卷盘式喷灌机驱动系统中，水涡轮和永磁电机作为主要动力源，其效率受负载工况和传动系统匹配性的显著影响。水涡轮效率通常受限于比转数，而永磁电机虽然能量转换效率较高，但由于其转速较高，需匹配大传动比减速箱，导致传动系统设计复杂且能耗增加。此外，现有减速箱挡位传动比和齿轮参数设计往往未能充分考虑田间负载动态变化，导致全工况效率分布不均，传动系统效率低下，能耗浪费严重。

针对这些问题，研究揭示了水涡轮和永磁电机

在不同田间负载条件下的效率分布规律，发现其效率与减速箱传动比及挡位数之间存在紧密耦合关系。具体而言，水涡轮在低转速、高扭矩工况下效率较高，而永磁电机在中高转速区间效率更优，但两者均需通过合理的传动比设计才能充分发挥性能优势。以驱动部件高效区为核心，兼顾能耗和换挡平顺性，建立了驱动-传动优化匹配模型

$$N^*(t)=\arg\min_{N\in\{1,2,3,4\}}[\eta_{\text{drive}}(T_d,n_d)+\lambda Penalty(N,N_{\text{prev}})] \tag{6}$$

式中 $N^*(t)$——最优挡位决策 N——挡位

η_{drive}——驱动部件效率

N_{prev}——上一时刻挡位

T_d——驱动部件转矩

n_d——驱动部件转速

λ——权重系数，平衡能耗优化与换挡频次

$Penalty$——换挡惩罚项，用于抑制无意义换挡

通过对减速箱齿轮参数（齿数、模数、齿宽）和挡位传动比进行协同优化[7]，以平衡全工况平均能耗和齿轮总体积。关键技术包括开发大传动比 4 挡减速箱（图 14），通过优化齿轮布局（图 15）和传动比分配，显著降低能耗和材料用量；设计高效水涡轮结构，改进叶片设计和流道布局，提升低转速工况下能量转换效率；设计永磁无刷直流电机与减速箱输入轴直联的一体化驱动结构，减少中间传动环节能量损失；此外，还探索了液压马达与减速箱直联方案，拓宽了驱动系统适用场景。

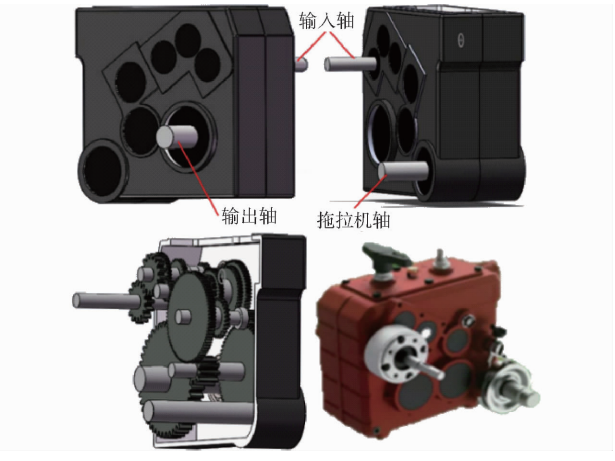


图 14 卷盘式喷灌机减速箱

Fig. 14 Four-speed reduction gearbox of reel irrigation machine

通过驱动-传动一体化关键技术创新，经试验测试证明传动系统效率提升 20%，同时齿轮总体积大幅减小，其中 4 挡减速箱方案能耗降低 4.1%，体积减少 40.7%，2 挡和 3 挡方案在体积优化方面表现尤为突出，分别减少 74.6% 和 69.9%。研究结果为卷盘式喷灌机的节能降耗和轻量化设计提供了重要

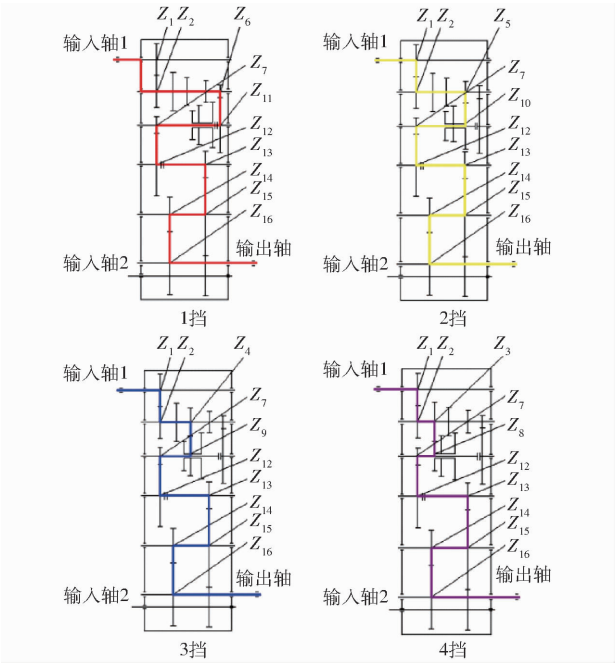


图 15 卷盘式喷灌机 4 挡减速箱传动系统

Fig. 15 Transmission system of 4-speed reduction gearbox of reel irrigation machine

技术支撑，推动了喷灌机高效化和可持续发展。

3.1.3 速度精准控制

在卷盘式喷灌机实际作业中，由于农田地形复杂、地面障碍物（如石块、坑洼）以及输水管盘绕层变化等因素，传统速度控制方法难以实现精准调控，导致喷灌机行走速度波动较大，进而影响喷灌均匀性。此外，在动态工况下现有传感器信号采集精度不足，无法实时准确反馈喷灌机运行状态，限制了控制系统的响应速度和抗干扰能力。

针对这些问题，研究了一种新型角速度传感器，通过高精度编码波形实时采集喷灌机运行数据，并结合智能算法对信号进行动态辨识，有效提升了状态监测准确性和实时性[8]。同时，基于改进粒子群算法（IPSO）和线性自抗扰控制（LADRC）技术，提出了一种自适应精准调控方法（图 16），能够在线估算和补偿系统内外部扰动，优化控制参数，确保喷灌机在不同工况下的速度稳定性。

实车试验（图 17）证实该方法在变速和变载工况下表现优异，系统调节时间缩短至 0.061 s，受干扰恢复时间仅为 0.023 s，且稳态无静差。田间试验进一步验证了其实际效果，当速度为 10、30 m/h 时，速度控制误差分别降至 4.42% 和 5.57%，显著优于传统 PID 控制方法。此外，通过优化传感器布局和控制算法，提高了灌溉适应性，灌水均匀性提高到平均 89%。通过上述相关技术的集成研制了高精度行走速度控制的电驱动组成电动卷盘式喷灌机，其结构如图 18 所示。

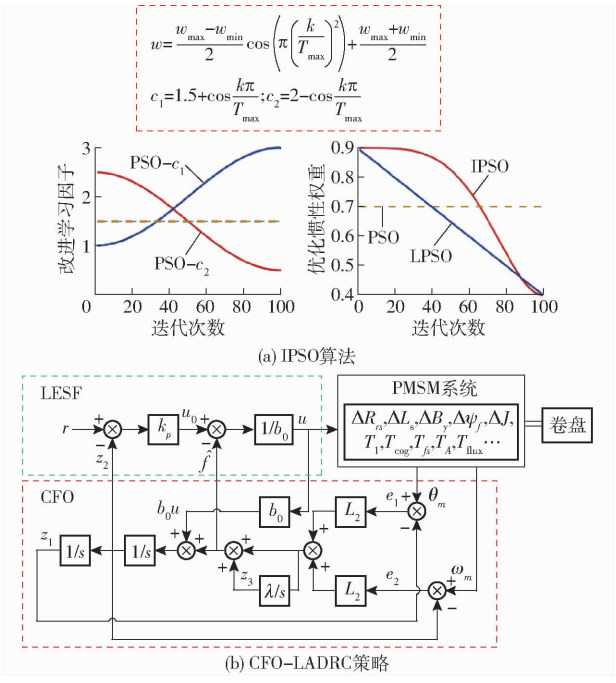


图 16　自适应精准调控方法

Fig. 16　Adaptive precise adjustment method



图 17　卷盘式喷灌机实车试验

Fig. 17　Real vehicle test of hose reel irrigator

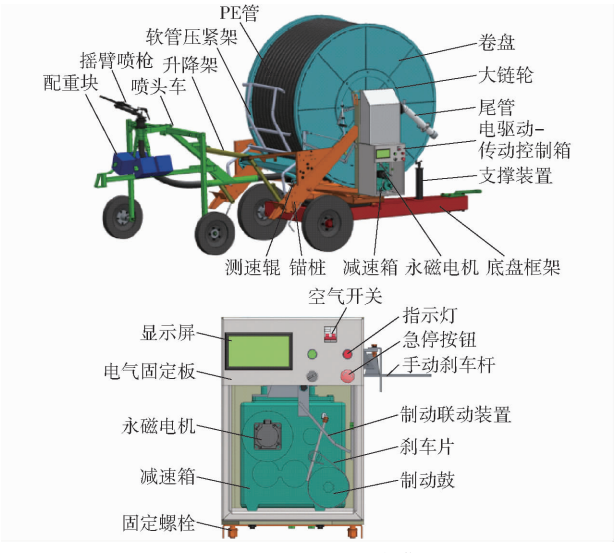


图 18　电动卷盘式喷灌机

Fig. 18　Electric reel-type sprinkler structure diagram

3.2　固体肥溶解混施装置

3.2.1　施肥精确调控模型

传统固体肥在水肥一体化系统中施用时，需预先将固体肥溶解为肥液存储，不仅费时费力，还依赖人工配比浓度，易导致浓度偏差大、稳定性差；同时，缺乏对溶解过程中变量（如搅拌速度、加肥流量、供水流量等）与肥液浓度均匀性关联的系统认知，难以实现实时精准调控。

针对这些问题，本文探究固体肥溶解特性，分析肥料量、饱和溶解度、搅拌速度、颗粒尺寸等因素对溶解速度的影响，发现溶解速度随时间衰减，与肥料量、搅拌速度正相关，与颗粒尺寸负相关。对比先溶肥后供水、先加肥后供水、水肥同时添加 3 种混合模式，发现水肥同时添加时浓度稳定性最高，并基于此建立肥液浓度变化模型，模型计算结果与试验结果平均偏差仅 6.09%。此外，通过试验标定肥液浓度与电导率的线性关系，明确电导率可间接精准反映浓度。在此基础上，结合模糊控制策略构建闭环反馈调控模型，基于电导率，通过实时检测肥液浓度，动态调节加肥流量和供水流量，实现浓度精准控制。

基于创建的精确调控模型探明了搅拌速度、加肥流量、供水流量和滤网数目对肥液质量浓度均匀性的影响规律[9]。由图 19 可知，搅拌速度提升、供水流量增大可提高均匀性，加肥流量增大会降低均匀性；建立了可靠的肥液质量浓度与电导率关联关系，为间接检测提供依据；基于模糊控制的调控策略能快速响应浓度变化，使肥液浓度控制准确度达 94.4%，解决了传统调控精度低、稳定性差等问题。

3.2.2　精准施肥装置

现有水肥一体化装备多适用于液体肥，对固体肥的施用存在明显局限：①预先将固体肥溶解为液体，增加前期处理成本。②装置功能单一，无法同步实现固体肥的添加、溶解与施用，导致施肥效率低、均匀性差。例如，压差施肥罐施肥浓度波动大，比例施肥泵注入流量小，均难以满足大田或温室固体肥精准施用需求。

为突破这些限制，本文设计了基于模糊控制策略的固体肥精准混施装置，结构如图 20 所示。研究内容包括：①设计关键机构，加肥部件采用螺杆输送与步进电机控制，实现固体肥精量添加，并基于施肥精确调控模型控制[9,30]；混肥部件配备滤网桶和搅拌器，提升溶解效率与浓度均匀性；输出机构采用柱塞泵。②集成自动控制系统[31]（图 21），通过电导率传感器实时检测浓度，结合模糊 PID 算法闭环调控加肥和供水流量，实现浓度动态修正。③开展性能试验，对比该装置与压差施肥罐、比例施肥泵性能。

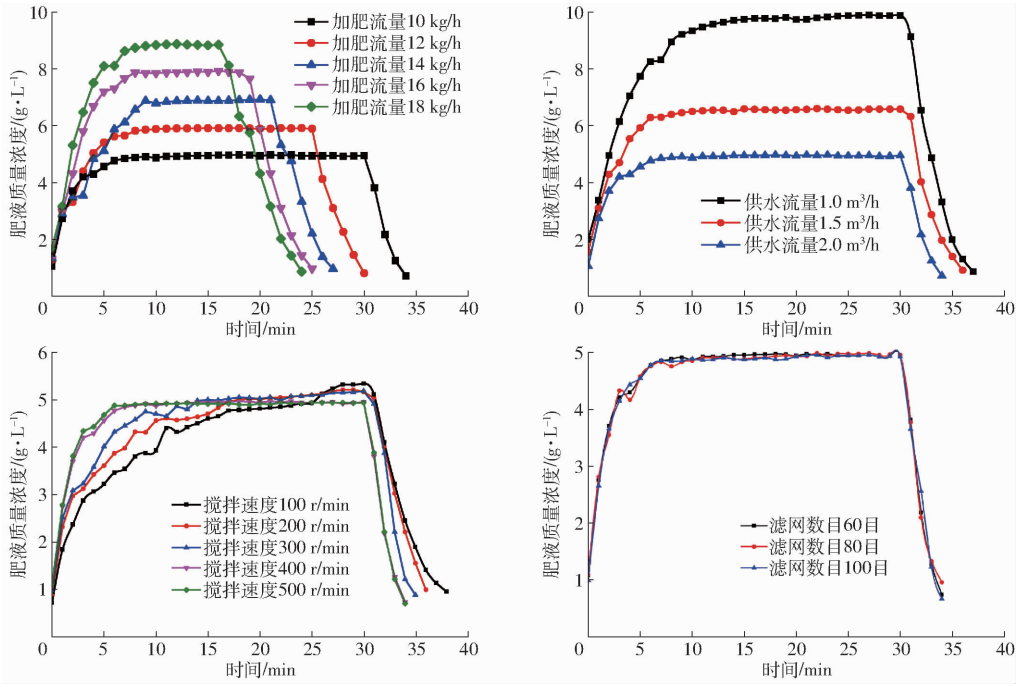


图 19 施肥影响规律

Fig. 19 Influence law of fertilization

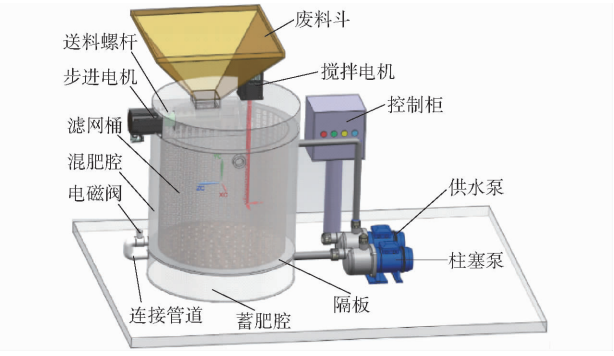


图 20 固体施肥装置样机结构

Fig. 20 Prototype structure of injection fertigation device



图 21 固体肥混施控制系统人机交互模块

Fig. 21 Human-machine interaction module of control system for solid fertilizer mixed application

该装置实现固体肥添加、溶解、施用一体化同步进行，无需前期溶解处理；施肥均匀性远优于压差施肥罐，略低于比例施肥泵，但注入流量约为其 6 倍，适配更大面积施肥需求；肥液浓度可根据作物需要实时动态调整，可精准适配喷灌和滴灌系统，通常喷灌时注肥口距主管末端至少 7 m，滴灌时距第 1 条滴灌带至少 3.5 m，确保肥液均匀混合，最终实现固体肥精准高效施用[9]。

3.3 数字孪生管控系统

基于数字孪生五维模型的理论框架，利用先进的传感、通信和仿真技术，提出了泵站机组数字孪生平台架构，研究了数据底板建设、模型库开发、可视化交互等关键技术，数据底板为系统提供了可靠的基础数据支撑，通过集成多种传感器信息，确保了泵站机组运行状态的全面感知；模型库开发通过标准化、模块化的方式，支持泵站机组各类运行工况的建模与实时更新，为平台提供了精准的映射能力。通过数据驱动，数字孪生模型实时映射了实际泵站机组内部的流态及运行工况，能够及时准确反映泵站运行动态变化情况。

搭建的泵站数字孪生系统[32]如图 22 所示。提出了基于变分模态分解和长短期记忆神经网络的泵站机组动态特性预测方法，预测误差小于 4%。结合基于农田作物需水模型和喷灌机灌溉施肥模型的泵站精准供水模型及泵站机组节能运行策略，构建了“数字孪生泵站-喷灌机作物水肥管控”全场景虚实交互平台，实现了农田“提水”和“灌水 + 施肥”智能精准管控。

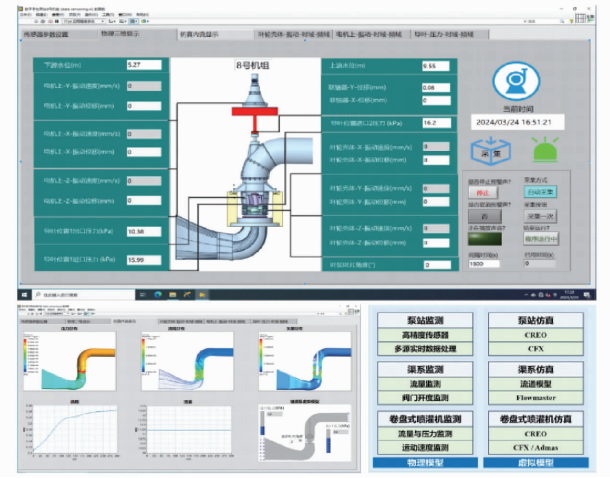


图 22　数字孪生管控平台

Fig. 22　Digital twin control platform

4　成果对比与应用

4.1　成果性能对比

针对灌溉泵效率低和空化性能差的问题，在高端泵领域研发了比转数 650 的蜗壳式混流泵模型效率达 86.28%、比转数 570 的导叶式可调叶片混流泵模型效率达 87.20%。研制了立式轴流泵装置在扬程 5 m 以下最高效率达 81.38%，应用于淮河流域治理工程永幸河站；研制双向流道立式轴流泵装置最高效率达 78.12%，应用于引江济淮工程枞阳站。主要性能与国内外同类产品对比，如表 1 所示。

表 1　灌溉泵产品性能对比

Tab. 1　Comparison of irrigation pump product performance

型号	研究成果	同类产品
蜗壳式混流泵	最高效率 86.28%，汽蚀比转数为 1 085	比转数大于 600 未见相关报道
导叶式可调叶片混流泵	最高效率 87.20%，无明显拐点	最高效率 84%，有显著拐点
单向轴流泵装置	最高效率 81.38%	行业规范 72%
双向流道泵装置	最高效率 78.12%，性能稳定	行业规范 65%，存在水力振动

针对喷灌机和施肥机作业精度问题，本文在喷灌和施肥装备方面成功开发出智能电驱动、新型水涡轮、液压驱动的卷盘式喷灌机系列产品（产品规格由 4 种发展到 50 多种，实现了高性能系列卷盘式喷灌机产业化），以及高精度固体肥混施装置，其中水涡轮设计点效率比意大利 Idrofoglia 等同类产品提高 10.9 个百分点，驱动-传动效率比传统产品提高约 20%，喷灌机行走速度控制误差小于 5.2%、喷洒均匀度比意大利 Marani、Idrofoglia 以及奥地利 Bauer 等规定参数 85% 提高到平均 89%，固体肥混施装置的肥液浓度控制准确度达 94.4%。相关技术指标与国内外同类产品对比，如表 2 所示。

表 2　喷灌机与施肥机产品性能对比

Tab. 2　Comparison of product performance of sprinkler irrigation machines and fertilizer applicators

型号		研究成果	同类产品
卷盘式喷灌机	喷洒均匀度/%	89（平均）	85
	水涡轮效率/%	42.5（设计点效率）	31.6（设计点效率）
	传动效率/%	63.5（最高）	51（最高）
施肥机	固体肥液浓度控制准确度/%	94.4	国内无法调控，国外未见报道

4.2　应用

新一代灌溉泵及装置在安徽淠史杭灌区、黑龙江青龙山灌区引水，以及引江济淮和淮水北调（图 23）、太湖流域治理等国家重大工程中的大型灌溉泵站及全国中小型泵站得到广泛应用，是我国灌溉提水装备的主流产品。

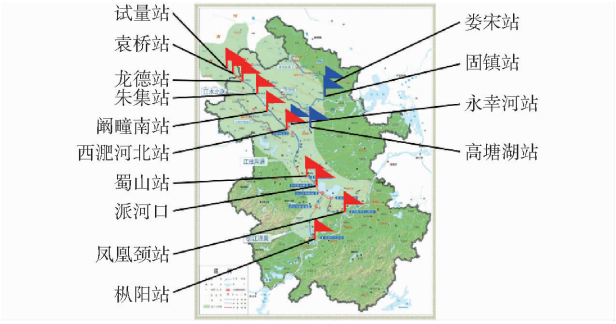


图 23　引江济淮和淮水北调工程应用案例

Fig. 23　Application cases of Yangtze River to Huaihe River diversion and Huaihe River to north diversion projects

新一代卷盘式喷灌机关键技术在华源节水等国内龙头企业得到成果转化，并辐射带动骨干企业产品升级，产品大批量生产。已应用于全国高标准农田建设、东北四省区节水增粮行动等一批国家重大工程。保有量由原来几千台套迅速增加到 30 多万台套，市场占有率近 70%，产品应用于我国内蒙古、吉林、河北、河南、安徽、山东等地，以及非洲、东南亚等“一带一路”国家（图 24）。

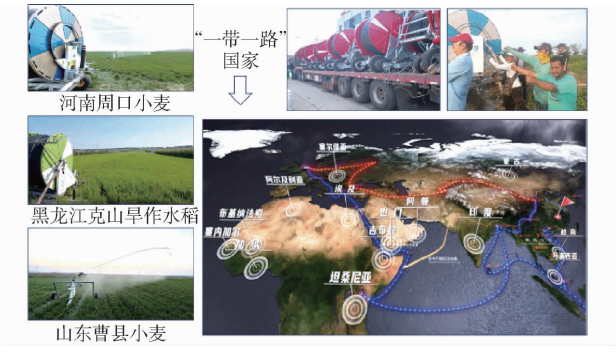


图 24　喷灌机应用及“一带一路”国家推广

Fig. 24　Application of sprinkler irrigation system and promotion of Belt and Road countries

通过项目成果的研制和推广应用,培育了上海凯泉成为灌溉泵行业龙头企业,培育了江苏华源节水股份有限公司成为喷灌机行业龙头企业,并且新一代灌溉泵及卷盘式喷灌机关键技术辐射全国行业骨干企业,形成了全国灌溉装备制造产业集群。成果先后转让、应用和辐射全国 20 余个省、自治区和直辖市,经济社会效益显著。

5 结论

(1)实现了农业灌溉装备理论突破。建立了基于液相表面张力的非线性空泡动力学模型,构建了基于 Dean 涡理论的流道参数化设计数学模型,创建了新一代高效抗空化灌溉泵及装置水力设计理论;建立了喷灌机驱动-传动优化匹配模型和基于作物水肥需求规律的精准作业智能控制策略,创建了新一代卷盘式喷灌机及施肥装置设计理论。

(2)实现了农业灌溉装备关键技术突破。创新了灌溉泵智能优化设计平台和装置匹配优化系统;发明了新一代高性能智能卷盘式喷灌机系列,创新了基于模糊控制策略的固体肥精准混施装置;搭建了集健康运行状态监测和供配水高效节能调度为一体的泵站高精度数字孪生平台。

(3)实现了农业灌溉装备水力性能突破。研发的高效轴/混流泵系列产品效率最高达 87.20%,比国外同类产品提高 3.2 个百分点,研制出国际领先的双向流道泵装置;开发出智能电驱动、新型水涡轮及液压驱动卷盘式喷灌机系列产品,创制的喷灌机驱动-传动效率提高约 20%,水涡轮效率比国外同类产品提高 10.9 个百分点,研制的固体肥溶解混施装置肥液浓度控制准确度达 94.4%。

(4)研究成果在淠史杭灌区、引江济淮等国家重大工程中广泛应用,并推广至“一带一路”国家,显著提升了水资源利用率,降低了能耗与化肥损失,为我国“农业节水化”战略提供了全链条技术支撑,对实现农业高效用水和可持续发展具有重要意义。

参 考 文 献

[1] 洪峰. 非线性空化模型在水力机械空化数值计算中的应用[D]. 镇江: 江苏大学, 2016.
HONG Feng. Application of a non-linear cavitation model for the computations of cavitating flow around hydraulic machineries [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2016. (in Chinese)

[2] LI Y, WANG X, YUAN S, et al. Flow development in curved rectangular ducts with continuously varying curvature[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2016, 75: 1 - 15.

[3] WANG W, HAN Z, PEI J, et al. Energy efficiency optimization of water pump based on heuristic algorithm and computational fluid dynamics[J]. Journal of Computational Design and Engineering, 2023, 10(1): 382 - 397.

[4] ZHENG Y, LI Y, YUAN S, et al. Improvement of energy performance of a two-way pumping station based on controllable diffusion technology[J]. Physics of Fluids, 2024, 36(7): 075188.

[5] 汤玲迪,袁寿其,汤跃. 卷盘式喷灌机研究进展与发展趋势分析[J]. 农业机械学报, 2018, 49(10): 1 - 15.
TANG Lingdi, YUAN Shouqi, TANG Yue. Analysis on research progress and development trend of hose reel irrigator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(10): 1 - 15. (in Chinese)

[6] TANG L, YUAN S, TANG Y, et al. Optimization of impulse water turbine based on GA - BP neural network arithmetic[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2019, 33(1): 241 - 253.

[7] 汤玲迪. 卷盘式喷灌机专用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 characteritics for the special water turbine used in hose reel irrigator[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2017. (in Chinese)

[8] TANG L, WANG W, ZHANG C, et al. Linear active disturbance rejection control system for the travel speed of an electric reel sprinkling irrigation machine[J]. Agriculture, 2024, 14(9): 1544.

[9] 张志洋. 固体肥水体化关键装备与技术研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2022.
ZHANG Zhiyang. Research on key equipment and technologies of solid fertilizer fertigation[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2022. (in Chinese)

[10] 洪锋, 高振军, 袁建平. 基于 Rayleigh - Plesset 方程的空化模型改进与应用[J]. 农业机械学报, 2018, 49(2): 126 - 132.
HONG Feng, GAO Zhenjun, YUAN Jianping. Improved cavitation model based on Rayleigh - Plesset equation and its application[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(2): 126 - 132. (in Chinese)

[11] HONG F, YUAN J, ZHOU B, et al. Modeling of unsteady structure of sheet/cloud cavitation around a two-dimensional stationary hydrofoil[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering, 2015, 231(3): 455 - 469.

[12] HONG F, YUAN J, ZHOU B. Application of a new cavitation model for computations of unsteady turbulent cavitating flows around a hydrofoil[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2016, 31(1): 249 - 260.

[13] LI Y, LI Y, YUAN S, et al. PIV measurement of turbulent flow in curved ducts with variable curvature convex wall[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2022, 98: 109074.

[14] LI Y, WANG X, ZHOU B, et al. Dean instability and secondary flow structure in curved rectangular ducts[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2017, 68: 189 – 202.

[15] 李亚林, 孙海超, 袁寿其, 等. 一种基于迪恩涡理论的弯肘形出水流道水力设计方法: 202111051328.2[P]. 2021 – 09 – 08.

[16] WANG W, DENG Q, PEI J, et al. Discrete optimization on unsteady pressure fluctuation of a centrifugal pump using ANN and modified GA[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2023, 36(1): 84.

[17] WANG W, OSMAN M, PEI J, et al. Efficiency-house optimization to widen the operation range of the double-suction centrifugal pump[J]. Complexity, 2020, 2020(1): 9737049.

[18] SUN J, PEI J, WANG W. Effect of impeller and diffuser matching optimization on broadening operating range of storage pump [J]. Journal of Energy Storage, 2023, 72: 108737.

[19] 王文杰, 龚小波, 裴吉, 等. 改进离散型遗传算法在离心泵性能优化中的应用[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2023, 51(7):130 – 136.
WANG Wenjie, GONG Xiaobo, PEI Ji, et al. Application of modified discrete genetic algorithm in performance optimization of centrifugal pump[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2023, 51(7): 130 – 136. (in Chinese)

[20] 施伟, 李彦军, 袁寿其, 等. 高比转数双蜗壳混流泵设计及流动特性分析[J]. 农业工程学报, 2016, 32(增刊 1): 57 – 62.
SHI Wei, LI Yanjun, YUAN Shouqi, et al. Design and internal flow field analysis of high specific mixed-flow pump with double volutes[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(Supp. 1): 57 – 62. (in Chinese)

[21] 王梦成, 焦海峰, 周正富, 等. 基于变环量设计的混流泵叶轮多工况优化[J]. 农业机械学报, 2023, 54(9): 227 – 235.
WANG Mengcheng, JIAO Haifeng, ZHOU Zhengfu, et al. Multi-conditions optimization of mixed-flow pump impeller based on variable circulation design[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(9): 227 – 235. (in Chinese)

[22] 李彦军, 王梦成, 袁建平, 等. 环量分布对基于反问题设计的混流泵优化结果的影响[J]. 农业工程学报, 2021, 37(20): 44 – 52.
LI Yanjun, WANG Mengcheng, YUAN Jianping, et al. Influence of circulation distribution on the optimization results of mixed-flow pump based on inverse design[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(20): 44 – 52. (in Chinese)

[23] ZHENG Y, GU Z, LI Y, et al. Entropy production analysis for energy dissipation of a vertical mixed-flow pump device under asymmetric inflow conditions[J]. Journal of Mechanical Engineering Science, 2022, 236(20): 10426 – 10439.

[24] 袁建平, 范猛, GIOVANNI Pace, 等. 高比转速轴流泵正交优化研究[J]. 振动与冲击, 2018, 37(22): 158 – 164.
YUAN Jianpin, FAN Meng, GIOVANNI Pace, et al. Orthogonal optimum design method for high specific-speed axial-flow pumps[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(22): 158 – 164. (in Chinese)

[25] 陆荣. 超高比转速轴流泵多工况优化设计研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2017.
LU Rong. Research on the multi-condition optimization of an ultra high specific speed axial flow pump[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2017. (in Chinese)

[26] 陆荣, 袁建平, 李彦军, 等. 基于神经网络模型和 CFD 的轴流泵自动优化[J]. 排灌机械工程学报, 2017, 35(6): 481 – 487.
LU Rong, YUAN Jianping, LI Yanjun, et al. Automatic optimization of axial flow pump based on radialbasis functions neural network and CFD[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2017, 35(6): 481 – 487. (in Chinese)

[27] 李彦军, 陈超, 裴吉, 等. 不同空化工况下轴流泵装置压力脉动试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(12): 158 – 164.
LI Yanjun, CHEN Chao, PEI Ji, et al. Experiment on pressure fluctuation of axial flow pump system under different cavitation conditions[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(12): 158 – 164. (in Chinese)

[28] 陆荣, 袁建平, 李彦军, 等. 基于数字信号处理的轴流泵压力脉动试验研究[J]. 振动与冲击, 2017, 36(20): 18 – 22.
LU Rong, YUAN Jianping, LI Yanjun, et al. An experimental investigation of pressure fluctuation in an axial-flow pump based on digital signal processing[J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(20): 18 – 22. (in Chinese)

[29] ZHENG Y, LI Y, ZHU X, et al. Hydraulic performance improvement of a two-way pumping station through bell mouth shape design[J]. Physics of Fluids, 2024, 36(3): 035119.

[30] 张志洋, 李红, 陈超, 等. 溶解混施水肥一体化装置设计与试验[J]. 节水灌溉, 2018(4): 46 – 49.
ZHANG Zhiyang, LI Hong, CHEN Chao, et al. Design and experiment of dissolved and mixed water fertilizer integrated device [J]. Water Saving Irrigation, 2018(4): 46 – 49. (in Chinese)

[31] 夏华猛, 李红, 陈超, 等. 溶解混施水肥一体化装置自动控制系统研制[J]. 排灌机械工程学报, 2019, 37(1): 80 – 85.
XIA Huameng, LI Hong, CHEN Chao, et al. Development of automatic control system for integrated fertilizer dissolving and mixing device[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2019, 37(1): 80 – 85. (in Chinese)

[32] 袁寿其, 彭文杰, 裴吉, 等. 一种基于数字孪生的泵站机组运行状态分析系统: 202210585723.7[P]. 2022 – 05 – 27.