

基于三次样条插值法的平原河网地区灌溉站点水电转换模型研究

——以江苏姜堰区为例

彭丽嘉¹, 徐绪堪^{1,2,3*}, 殷新华⁴, 范 斐⁵

¹河海大学商学院, 江苏 南京

²河海大学统计与数据科学研究所, 江苏 南京

³常州市大数据挖掘与知识管理重点实验室, 江苏 常州

⁴泰州市姜堰区水利局, 江苏 泰州

⁵常州市武进区水利枢纽管理中心, 江苏 常州

收稿日期: 2025年10月18日; 录用日期: 2025年11月12日; 发布日期: 2025年11月19日

摘 要

国家推进农村水价综合改革下, 平原河网地区灌溉用水精准计量是落实水资源刚性管控的关键。针对灌溉站点水量计量设施覆盖率低、精确度低、设备安装维护成本高等问题, 亟待高效、成本低、精准度高的计量解决方案。本文结合平原河网地区典型代表江苏姜堰区灌溉特点, 揭示平原河网地区泵站“扬程低、效率波动大”的特征, 提出“以电折水”方案。分析其灌溉站点水量和电量运行数据, 水量-电量关系呈非线性三次函数特征, 构建基于插值法的灌溉站点水电转换模型并进行具体验证。验证结果表明, 模型在周山河灌区的平均误差率降至0.3%, 溱潼灌区降至0.1%, 较传统固定系数法精度有效提升; 同时依托现有“专变专表”设施, 较超声波流量计方案节省成本超千万元, 实现电灌站全覆盖。该模型为平原河网地区提供了“高精度、低成本、广覆盖”的计量方案, 直接支撑农业水价改革中“总量控制、定额管理”落地, 可为同类地区灌溉计量提供技术参考。

关键词

灌溉站点水量计量, 水电转换, 插值法

*通讯作者。

Research on Water-Electricity Conversion Model of Irrigation Station in Plain River Network Areas Based on the Cubic Spline Interpolation Method

—Taking Jiangyan District, Jiangsu Province as an Example

Lijia Peng¹, Xukan Xu^{1,2,3*}, Xinhua Yin⁴, Fei Fan⁵

¹Business School, Hohai University, Nanjing Jiangsu

²Institute of Statistics and Data Science, Hohai University, Nanjing Jiangsu

³Changzhou Key Laboratory of Big Data Mining and Knowledge Management, Changzhou Jiangsu

⁴Jiangyan District Water Conservancy Bureau of Taizhou City, Taizhou Jiangsu

⁵Water Control Hub Management Center of Wujin District, Changzhou Jiangsu

Received: October 18, 2025; accepted: November 12, 2025; published: November 19, 2025

Abstract

Against the backdrop of the national advancement of comprehensive rural water pricing reform, accurate metering of irrigation water in plain river network areas is pivotal to enforcing rigid water resource management. To address the prominent issues in irrigation stations—including low coverage of water metering facilities, poor metering accuracy, and high costs of equipment installation and maintenance—there is an urgent need for efficient, low-cost, and high-precision metering solutions. Taking Jiangyan District, Jiangsu Province, a typical representative of plain river network areas, as the study case, this research identifies the characteristics of pumping stations in such regions, namely “low head and significant fluctuations in efficiency”. In line with national water metering standards, a “water conversion by electricity” scheme is proposed. Through analyzing operational data on water volume and electricity consumption at irrigation stations, it is revealed that the water-electricity relationship exhibits nonlinear cubic function characteristics. Based on this finding, a water-electricity conversion model for irrigation stations using interpolation methods is constructed, validated, and optimized. Validation results demonstrate that the model reduces the average error rate to 0.3% in the Zhoushanhe Irrigation District and 0.1% in the Qintong Irrigation District, representing a significant improvement in accuracy compared to the traditional fixed coefficient method. Meanwhile, leveraging existing “dedicated transformer and dedicated meter” facilities, the model achieves full coverage of electric irrigation stations while saving over 10 million yuan in costs compared to ultrasonic flowmeter-based schemes. This model provides a “high-precision, low-cost, and wide-coverage” metering solution for plain river network areas, directly supporting the implementation of “total quantity control and quota management” in agricultural water pricing reform and offering technical references for irrigation metering in similar regions.

Keywords

Water Metering at Irrigation Stations, Converse Water to Electricity, Interpolation

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

农业灌溉用水计量是落实最严格水资源管理制度、深化农业水价综合改革的核心环节，也是推进现代化灌区建设的重要基础。在江苏省总用水量的构成中，农业灌溉占据重要地位[1]。《江苏省水资源公报 2023》的数据显示，2023 年江苏省农田灌溉用水量 210.9 亿 m^3 ，占总用水量的 36.9%，反映出农业灌溉在平原河网地区水资源管理中的重要地位[2]。国家政策强化灌溉计量要求，《中华人民共和国水法》中将取用水计量确定为我国水资源管理的基本工作制度[3]，为提高水资源管理能力提供保障。2016 年国务院办公厅印发的《国务院办公厅关于推进农业水价综合改革的意见》(国办发[2016]2 号)[4]，据此，江苏省人民政府办公厅印发了《关于推进农业水价综合改革的实施意见》(苏政办发[2016]56 号)[5]，文件均明确提出要完善供水计量设施，加快供水计量体系建设，实行农业用水总量控制和定额管理。2020 年江苏省召开的农业水价综合改革推进会议上，进一步强调了有效实施灌溉计量的重要性，并提出了推进计量措施多元化建设的重点工作。

姜堰区作为江苏省平原河网地区的典型代表，其灌溉格局与管理现状集中反映了南方丰水地区农业用水管理的共性矛盾与特殊性挑战[6]。姜堰区地处江淮平原，现有耕地面积 63.3 万亩，永久基本农田 56.23 万亩，其中 92.17% 已建成高标准农田。全区划分为周山河、溱潼两大中型灌区，总面积 857.8 平方公里，设计灌溉面积 58.99 万亩，依赖 2377 座电灌站实现提水灌溉，形成了“泵站密集、提水为主、河网互通”的独特灌溉体系。两大灌区自然条件差异显著：周山河灌区属长江水系，常水位 2.2 米，地面高程 4.5~6.5 米，土壤为高沙土，易旱；溱潼灌区属淮河水系，常水位 1.2 米，地面高程 1.8~2.5 米，土壤为粘土，易涝。这种差异导致灌溉泵站运行参数存在显著空间分异，增加了计量难度。

姜堰区作为全国现代化灌区建设试点，虽推动智慧管理，但仍面临计量瓶颈：灌溉站点水量计量设施覆盖率低、计量设备安装维护成本费用昂贵并且其水量计量精确度较低等问题，亟待高效、成本低、精准度高的灌溉站点水量计量解决方案。基于此，本文通过“以电折水”的思路，非线性修正方法对水量-电量的关系特征曲线参数进行优化，构建基于插值法的灌溉站点水电转换模型，形成一种大规模、低成本、全覆盖的灌溉泵站水量计量实施方案，旨在解决传统计量方法的精度与成本矛盾，为平原河网地区灌溉用水精准计量提供技术支撑，推动农业水价综合改革全面高效实施。同时灌溉用水的精准计量也有利于确立“三条红线”、建立“四项制度”、实施“六项举措”，落实最严格水资源管理制度。

2. 研究现状

国内外相关研究成果主要集中在国内，主要侧重从设计水量计量的装置、农业灌溉用水量测算等方面研究。李险峰[7]提出水工建筑物量水的方法，用作量水的水工建筑物只需要满足出流符合一定的量水水力学条件的要求，尽管该方法简单方便，但其测算精度较低且在实际中需要依据流态选取恰当的出流公式。韩宇[8]等人发明了一种抽拉式便携量水堰体及流量测量方法，能够避免泥沙淤积对水流流态产生影响，满足灌区末级渠道在流量较小、频繁变化且泥沙较多的条件下对水量测量的需求。何新林[9]等人发明了一种自动测流的矩形无喉量水槽，有助于缓解灌区的人力资源短缺问题和提高渠道量测水系统的精准度。张永立[10]等人发明了一种低水阻易安装的明渠时差法超声波流速仪，该仪器通过减少水阻，提升了抗水中悬浮物破坏的能力，且其安装简便、成本较低。刘鸿涛[11]等人对我国灌区常用的水量计量方

法进行了分析,阐述了其基本原理、使用条件及量测设施。然而,这些方法大多具有较强的理论性,且在实际操作中较为复杂和繁琐,对于水工建筑物或是测量仪器方面大多具有较高要求,不仅成本较高,而且实际操作起来难度较大;或是对水量计量的方法讨论仅仅停留在粗略地估计,其测算的精确度远远不够。

针对农业灌溉用水的特点和存在的问题,“以电折水”是较为广泛使用的方法,具体是通过分析农业灌溉用水量与农用机井耗电量之间的关系,用电量来折算水量。近年来,以电折水的方法被内蒙古自治区、河北省、宁夏回族自治区、天津市等地区相继采用,结合当地农业用水管理的特点测算农用机井用水量[12]。2024年5月1日起施行的《节约用水条例》明确指出农业灌溉地下水取水工程暂不具备安装计量设施条件的,可采用“以电折水”等方式推求取水量[13]。陈丹[14]等人在江苏省淮安市涟东灌区一电灌站开展了“以時計水”“以电计水”水量计量方法研究,结果表明此计量方法相对经济和简便。陈彩明[15]等人提出“以电折水”法统计并扣除灌溉重复利用的回归水,得到灌溉用水量的计算结果较为准确。尹世洋[16]等人在北京市平原区通过农用机井监测点分析了水电转换系数的影响因素、用电量与用水量之间的折算关系并且得出北京市水电折算系数表。李飞[17]等人开展了机井耗电量和用水量关系的灌溉试验研究,结果表明耗电量和用水量关系较为稳定,但也受灌溉方式、时长、地区间差异等因素影响。王剑永[18]分析了成安县大边董村机井的实测数据,对水电转换系数的影响因素进行了分析,同时提出了如果要实现精确计量必须对水电转换系数进行修正的思路。王晓东[19]等人通过天海泵业深井泵进行实验,在理论层面上对Q-N关系曲线进行了验证和校准,研究表明依据用电量并利用水电转换系数T₀间接计算用水量的方法是可行的。但目前对于以电折水中水量-电量的关系特征曲线参数进行优化的相关研究较少。

3. 姜堰区灌溉站点计量核心问题分析

作为江苏平原河网地区灌溉管理的典型代表,其核心源于其自然条件、管理机制、技术需求的高度代表性,完全契合同类地区核心特征与发展需求。姜堰区的计量困境深刻反映了南方丰水地区“设施、技术、管理”三重矛盾的叠加,其问题根源既包含江苏省灌溉计量的共性瓶颈,又因区域自然条件与管理模式呈现特殊性。

3.1. 水量计量设施覆盖率低且长效性缺失

就当下的情况而言,江苏省农田灌溉的水量计量设施覆盖率较低。姜堰区2377座电灌站中,仅13.6%在周山河灌区续建配套工程中完成计量设备升级,其余86.4%仍依赖传统方式计量,设施覆盖率远低于现代化灌区建设要求。这种供水无计量的情况直接导致了用水主体对节水的积极性大大降低,从而造成了水资源利用率低、农业用水浪费的问题[20]。这种现状主要可以归结以下两方面原因,一是设备适应性与寿命短板。江苏平原河网地区高湿度环境及姜堰区特殊土质,导致电子计量仪表寿命大幅缩减:周山河灌区高沙土渗透性强,设备易受泥沙磨损,寿命降至3~5年;溱潼灌区粘土质地表积水多,设备锈蚀速率是全省平均水平的1.5倍,恶劣工况下寿命甚至不足3年。而江苏省普遍采用的电子仪表(正常环境寿命8年)难以适配姜堰复杂的灌溉环境,这导致了难以实现灌溉泵站水量计量的长效管理,同时其相对安装维护成本高,进一步限制了其安装覆盖率;二是资金保障机制失衡。水量计量设施投资绝大部分依赖国家或省级层面划拨的农业水价综合改革专项资金,而在县级层面较少有相关配套资金,小农水专项管护资金也较难被安排用于水量计量设施维修,资金短缺造成设施后期运行维护问题,制约了计量设施长效管理的实施,形成“建设-闲置-报废”的恶性循环[21]。此外,在每个灌区都安装农业灌溉用水量计量设施无论是在资金方面还是所耗工作量方面都提出较高的要求。

3.2. 现行水量计量方法精确度低且精度成本矛盾突出

一方面传统估算方法误差失控。为控制成本,姜堰区沿用“以時計水”或固定系数法,如周山河灌区采用 $0.65 \text{ m}^3/(\text{KW}\cdot\text{h})$,但未考虑两大灌区 1 米的水位差对水泵效率的影响,导致计量误差率高达 18%~25%,远超江苏省农业水价改革要求的 10%误差阈值。这种粗放式估算与江苏平原河网地区泵站“扬程低、效率波动大”的特征直接冲突,难以满足精准计量需求。另一方面,高精度方案适配性差且成本高昂。为提高水量计量的精确度,小部分灌区选择采用特设量水堰槽模式、量水仪表模式和水工建筑物模式等。但这些方式都存在着计量成本较高的问题。超声波流量计等精密仪表:作为江苏省推广的主流高精度设备,其在姜堰区遭遇明显适配性问题,周山河灌区高沙土渠系渗漏率达 8%~12%,导致计量数据失真;同时,单台设备采购成本超 5000 元,若实现姜堰区 2377 座电灌站全覆盖,需投入超千万元,远超区级财政承载力;特设量水堰槽在溱潼圩区因地形低洼、水流平缓,易引发泥沙淤积,每年清淤费用占灌区维护成本的 15%,不仅增加管理负担,还与姜堰区“生态灌区”建设目标相悖,且该模式存在非必要水资源浪费问题;水工建筑物模式虽然能够节约一定的物力成本,但在灌溉站点水量计量的过程当中,需要根据不同灌区实际情况进行具体分析,导致在工作开展过程当中需要付出大量的人力[22]。

综上,姜堰区的实践表明,江苏省平原河网地区灌溉计量陷入“低精度方法不可用、高精度方法用不起”的困境,亟需探索一种兼顾精度、成本与区域适应性的计量方案。

4. 基于三次样条插值法的灌溉站点水电转换模型构建

4.1. 水电转换模型构建

水电转换模型主要根据农业灌溉用水量与水泵耗电量之间的关系,间接用电量来折算水量。在传统水电转化计算方法中,水电转换经验系数通常直接为总用水量和总耗电量的比值,如公式(1)所示,理想地将总供水量和总耗电量视为线性关系而忽略了其他因素对水泵工作状态的影响,因此在很大程度上可能导致计量误差。

$$T = \frac{Q}{I} \quad (1)$$

式中: T 为水电转换经验系数; Q 为总供水量; I 为总耗电量。

根据水泵的有效功率定义[23]和能量守恒定律,推导灌溉站点水量(Q)与电量(I)的基础关系,可以得到:

$$P_E = gHF = yP_R \quad (2)$$

式中: P_E 为水泵运行有效功率, W ; g 为重力加速度, 9.8 m/s^2 ; H 为水泵净扬程, m ; F 为水泵单位时间供水量, m^3/s ; P_R 为实际消耗功率, W ; y 为效率比,有效功率何实际功率之间的比值。

结合姜堰区泵站“专变专表”的计量特点(电量数据可直接获取),水泵单位时间供水量计算公式:

$$F = \frac{yP_R}{gH} \quad (3)$$

在水泵扬程变动不大的情况下,水泵供水量 F 与实际消耗功率 P_R 可以视为与装置效率 y 相关的线性函数。装置效率 y 受多种因素影响而变化,但在适当功率区间 $(P_{R_i}, P_{R_{i+1}})$ 中,可认为装置效率 y 不变。

对姜堰区 2377 座泵站的实测数据分析显示:周山河灌区($H = 2.2 \pm 0.3 \text{ m}$)与溱潼灌区($H = 1.2 \pm 0.5 \text{ m}$)的净扬程差异显著,且 y 受土壤质地(高沙土磨损/粘土淤积)影响呈现非线性波动(周山河 y 为 0.65~0.75,溱潼 y 为 0.70~0.80),导致水量 - 电量关系并非简单线性,而呈现“递增且速率先缓后快”的三次函数特征。

故水量 - 电量关系曲线的拟合采用分段线性函数, 如式(4)所示。

$$\begin{cases} F = \frac{y_1 P_R}{gH} & (P_{R_1} \leq P_R \leq P_{R_2}) \\ F = \frac{y_2 P_R}{gH} & (P_{R_2} \leq P_R \leq P_{R_3}) \\ \dots \\ F = \frac{y_{n-1} P_R}{gH} & (P_{R_{n-1}} \leq P_R \leq P) \end{cases} \quad (4)$$

分段线性函数较为繁琐, 且 P_R 区间的划分以及相应 y 值的确定较为复杂。而水量 - 电量关系曲线的变化趋势为递增且变化速率先缓后快, 三次函数符合此种变化趋势[24], 以电折水模型可用公式(5)表示。

$$Q_3 = y_3 I^3 + y_2 I^2 + y_1 I + y_0 \quad (5)$$

式中: Q^3 为灌溉泵的总供水量, m^3 ; I 为灌溉泵的总耗电量, kWh ; y_3, y_2, y_1, y_0 均为三次多项式的系数, 是通过对平原河网地区灌溉站点大量“水量 - 电量”运行数据进行拟合、优化后得到的参数, 反映了该地区灌溉泵“水量 - 电量”关系的非线性特征。

4.2. 模型非线性修正原理与插值法优化设计

1) 标准校准直线构建的前提条件

标准校准直线的本质是通过严格单调连续函数与其反函数的代数叠加, 抵消“水量 - 电量”关系的非线性偏差, 其构建需满足数学与物理双重条件, 二者共同保障叠加结果的合理性与有效性。

a) 数学条件

电量 I 增加时, 水泵输入能量增加, 水量 Q 单调递增; 水量 Q 与电量 I 的变化均为连续过程, 电量通过电表连续计量, 水量通过水流连续输送, 故 $y = S(x)$ 为严格单调递增连续函数[25]。根据反函数存在定理: 严格单调连续函数必存在唯一的严格单调连续反函数, 因此反函数 $y' = S^{-1}(x)$ 满足严格单调递增连续, 这是二者可进行代数叠加的前提, 若函数非单调或不连续, 叠加后会出现多值性或断点, 无法形成唯一的校准直线。为避免叠加时出现“变量范围错位”, 需保证原函数与反函数的定义域、值域完全匹配。

b) 物理条件

“水量 - 电量”关系的本质是水泵能量转换过程: 原函数描述“输入电量 $\rightarrow$ 输出水量”的正转换过程, 非线性偏差源于水泵效率的波动; 反函数描述“输出水量 $\rightarrow$ 输入电量”的逆转换过程, 其非线性偏差与原函数偏差大小相等、方向相反。这种能量转换互逆补偿性是叠加后能消除非线性的物理基础, 若二者偏差无补偿关系, 叠加后会放大误差, 而非形成校准直线。

2) 标准校准直线的具体代数叠加过程

结合“以电折水”模型逻辑与插值法优化需求, 代数叠加需通过“归一化处理 $\rightarrow$ 对应点叠加 $\rightarrow$ 线性拟合”三步实现, 确保计算过程的数学严谨性与物理意义一致性。

a) 原函数与反函数对应点叠加

基于偏差互补原理, 叠加采用原函数值+反函数值的算术平均, 进行归一化处理后, 在归一化电量区间 $[0, 1]$ 内均匀选取 n 个插值节点, n 需足够大确保覆盖非线性显著段, 记为

$$x'_1, x'_2, \dots, x'_n (x'_i \in [0, 1], i = 1, 2, \dots, n);$$

对每个节点 x'_i , 代入归一化原函数 $y'_i = S'(x'_i)$, 得到原函数对应的归一化水量 y'_i ;

将 y'_i 代入归一化反函数 $x'_i = S'^{-1}(y'_i)$ ，得到反函数对应的归一化电量，其中 x'_i 是由水量 y'_i 反推的电量，与 x'_i 的差异即为非线性偏差；

对 x'_i 与 x''_i 取平均，得到叠加后的校准电量节点 $\bar{x}'_i$ ；对 y'_i 和 y''_i 取平均，反函数中 y'_i 为自变量，此处保持水量节点不变)取平均，得到叠加后的校准水量节点 $\bar{y}'_i$ ，公式为： $\bar{x}'_i = \frac{x'_i + x''_i}{2}$ ， $\bar{y}'_i = \frac{y'_i + y''_i}{2} = y'_i$ 。

b) 最小二乘法拟合标准校准直线

对叠加后的 n 组校准节点 $(\bar{x}'_1, \bar{y}'_1), (\bar{x}'_2, \bar{y}'_2), \dots, (\bar{x}'_n, \bar{y}'_n)$ ，采用最小二乘法拟合线性方程，即为标准校准直线。设归一化后的校准直线方程为： $\bar{y}' = k \cdot \bar{x}' + b$ ，其中 k 为斜率， b 为截距。

根据最小二乘法原理，需最小化误差平方和 $\sum_{i=1}^n (\bar{y}'_i - (k \cdot \bar{x}'_i + b))^2$ ，通过求偏导并令其为 0，推导得

$$k \text{ 与 } b \text{ 的计算公式: } k = \frac{n \sum_{i=1}^n \bar{x}'_i \bar{y}'_i - \sum_{i=1}^n \bar{x}'_i \sum_{i=1}^n \bar{y}'_i}{n \sum_{i=1}^n \bar{x}'_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n \bar{x}'_i \right)^2} \quad b = \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n \bar{y}'_i - k \sum_{i=1}^n \bar{x}'_i \right)$$

最后，将归一化的校准直线还原为实际量纲(电量 I 、水量 Q)，得到最终的标准校准直线方程：

$$Q = k \cdot \frac{I - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \cdot (y_{\max} - y_{\min}) + (b \cdot (y_{\max} - y_{\min}) + y_{\min})$$

简化后可表示为：

$$Q = K \cdot I + B$$

其中 K (实际斜率)、 B (实际截距) 为还原后的系数，即插值法修正的线性基准。那么将两个函数曲线进行代数叠加后即可获得对应的标准校准直线，如图 1 所示。

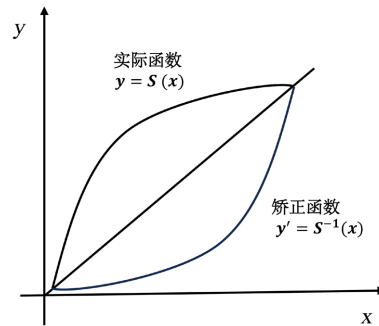


Figure 1. Schematic diagram of the mathematical principle of nonlinear correction

图 1. 非线性修正数学原理示意图

3) 插值法优化设计

a) 线性插值法

先将实际曲线中的每一段用直线近似替代，再用近似公式经过计算得出供水量，这就是线性插值法。其中需要注意的是，应非等距分段曲线中非线性严重的部分，并等距离分段曲线中非线性不严重的部分。

假设以 $y = Sx$ 来表示此水电转换模型中所涉及的水量 - 电量关系特征曲线关系式。按照上述原理，我们把该水量 - 电量关系特征曲线按照一定标准分成 n 段 (n 取足够大就能获得较高的计算精度)，并用直线近似代替相邻两点之间的曲线，从而采用线性方法求出耗电量 x 所对应的 y 值。在每段区间 (x_{i-1}, x_i) ($i = 1, 2, \dots, n$) 上，可由式(6)求得其所对应的 y 值：

$$y = y_{i-1} + (x - x_{i-1}) \cdot \frac{y_i - y_{i-1}}{x_i - x_{i-1}} \quad (6)$$

适用于扬程波动较小的溱潼灌区(H 波动 ≤ 0.2 m)及泵站稳定运行阶段。将电量区间划分为若干子区间,非等距划分非线性严重段, $I = 50 \sim 150$ kW·h, 对应 y 快速变化, 等距划分平缓段, $I > 150$ kW·h, y 趋于稳定。

b) 二次插值法

如果出现水量 - 电量关系特征曲线的斜率变化较大的情况, 那么两插值点之间的曲线的弯曲度就会很大, 若继续采用则误差就会非常大。此时我们不再采用线性插值法, 在这里选择采用二次插值法来对水量 - 电量关系特征曲线的非线性进行修正。

即通过曲线上 $A(x_0, y_0)$ 、 $B(x_1, y_1)$ 、 $C(x_2, y_2)$ 三个点做一个抛物线, 用此抛物线来代替原来的曲线。此抛物线可以用一元二次方程来表示:

$$y = k_0 + k_1x + k_2x^2 \quad (7)$$

式中: k_0 、 k_1 、 k_2 为待定系数, 可用曲线 $y = S(x)$ 上的 A 、 B 、 C 三点求解三元一次方程组。如果直接将联立方程组进行求解, 会产生比较复杂的计算过程。在这里, 采用另一种不同的形式来表示:

$$y = N_0 + N_1(x - x_0) + N_2(x - x_0)(x - x_1) \quad (8)$$

式中: N_0 、 N_1 、 N_2 可以根据 A 、 B 、 C 三点的值求出, 代入公式(8)得到:

$$y = y_0 + \frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0}(x - x_0) + \left[\frac{\frac{y_2 - y_0}{x_2 - x_0} - \frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0}}{x_2 - x_1} \right] (x - x_0)(x - x_1) \quad (9)$$

根据某点的 x 值将其带入公式(9)即可求出 y 。

适用于周山河灌区高沙土区扬程波动较大(H 波动 $0.2 \sim 0.3$ m)、 y 非线性显著的特征, 通过三点拟合抛物线修正斜率突变。

c) 三次样条插值

在插值问题中, 二次插值法虽然能够通过给定的节点拟合一个二次多项式, 但在处理复杂数据时可能无法提供足够的平滑性和准确度。水量 - 电量关系特征受到多种因素的影响, 往往呈现出复杂的非线性变化, 仅通过简单的二次插值很难得到理想的拟合效果, 尤其是在多个节点之间存在较大波动时, 二次插值可能导致不自然的曲线拐点, 影响插值的平滑性和物理合理性。

三次样条插值函数是一种常用的曲线拟合函数, 具有较好的收敛性和稳定性, 与二次插值法相比, 其拟合的曲线更为光滑, 并在工程领域得到了广泛应用。为实现两大灌区数据的整体兼容, 采用三次样条插值保证曲线光滑性。

三次样条插值满足:

插值条件:

$$S(x_i) = y_i, \quad i = 0, 1, \dots, n$$

在插值点连续:

$$S_i(x_{i+1}) = S_{i+1}(x_{i+1}) \quad S_i(x_i) = S_{i+1}(x_{i+1})$$

一阶导数在插值点连续:

$$S'_i(x_{i+1}) = S'_{i+1}(x_{i+1})$$

二阶导数在插值点连续:

$$S_i''(x_{i+1}) = S_{i+1}''(x_{i+1})$$

$S(x)$ 的分段函数表达式可以表示为

$$S_i(x) = a_i + b_i(x - x_i) + c_i(x - x_i)^2 + d_i(x - x_i)^3 \quad (10)$$

其中 a_i 、 b_i 、 c_i 、 d_i 分别为 $S(x)$ 在第 i 段上的各项系数, 依据插值条件可以得到 $4n-2$ 个条件。根据水泵的工作状态特点, 选择周期条件作为三次样条插值法的边界条件。

根据以上条件, 可以求得三次样条插值函数。三次样条插值保留了分段低次插值的优点, 同时拟合的函数曲线更光滑, 能够更好地复原水量 - 电量关系特征曲线。

4.3. 水电转换高阶非线性的成因分析

以姜堰区“提水为主、河网互通”的灌溉体系为研究对象, 构建基于三次样条插值的水电转换模型, 从物理机制层面解析模型核心水电转换高阶非线性的成因。该非线性是姜堰灌区“水泵水力特性 - 电机运行特性 - 灌区工况”耦合作用的必然结果, 周山河灌区扬程 2.2 ± 0.3 m、溱潼灌区粘土渠道渗漏率 2%~3%、水泵电机特性数据及农业水价改革对计量精度的需求, 为模型分灌区验证、参数优化及实践推广奠定理论基础。

1) 水电转换的本质映射与数据基础

水电转换关系的本质是水泵流量与电机功率的时间积分映射, 即水量 $Q = F \times t$ 、电量 $I = P \times t$, 其中 F 为水泵实际流量, P 为电机消耗功率, t 为运行时间。消去时间 t 后, 非线性的核心转化为“流量 F 与功率 P 的耦合关系”, 该耦合分析需依托姜堰灌区的两大实测数据基础: 设备与计量数据, 姜堰区 2377 座电灌站均采用“专变专表”计量电量, 其中 323 座升级电灌站配套超声波流量计, 为 F 与 P 的关系标定提供精准数据; 灌区差异化参数, 周山河灌区长江水系, 地面高程 4.5~6.5 m, 高沙土, 与溱潼灌区淮河水系, 地面高程 1.8~2.5 m, 粘土的自然禀赋差异显著, 具体表现为扬程波动幅度、渠道水力损失系数及水泵效率区间的分异, 这些参数直接决定非线性的强度与特征。

2) 水泵水力特性: 非线性的基础来源

水泵作为“水 - 能转换”核心部件, 其水力特性通过“扬程 - 流量”“效率 - 流量”曲线直接引入高阶非线性项, 这与平原河网地区“提水灌溉为主、渠道水力损失显著”的共性特征一致。

扬程 - 流量曲线的二次项传导: 水泵实际扬程 H 由静扬程 H_0 与管网水力损失 H_{loss} 构成, 即 $H = H_0 + H_{\text{loss}}$ 。其中, H_{loss} 包括沿程损失, 达西 - 魏斯巴赫公式推导得 $H_f \propto F^2$ 与局部损失, 阀门、弯道损失 $H_j \propto F^2$, 综合得 $H_{\text{loss}} = k \cdot F^2$ 。代入姜堰灌区参数: 周山河灌区 $H = 2.2 + 0.08F^2$, 溱潼灌区 $H = 1.2 + 0.03F^2$, 进一步代入水泵有效功率公式 $P_{\text{eff}} = \rho g H F$, 其中 $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$, $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ 得: $P_{\text{eff}} = 9800 \times (H_0 + kF^2) \times F = 9800H_0F + 9800kF^3$ 。该式中流量三次项 F^3 的存在, 为水电转换的高阶非线性奠定基础, 且周山河灌区更大的 k 值, 高沙土渗透性强, 渠道实际过流面积减小, 使其三次项系数显著高于溱潼灌区。

效率 - 流量曲线的驼峰型放大: 水泵效率 $\eta_p = \frac{P_{\text{eff}}}{P_{\text{shaft}}}$, 其中 P_{shaft} 为水泵轴功率, 呈“先升后降”的

驼峰型, 结合姜堰灌区实测数据可分为三段: 低流量段 $F < 0.6F_{\text{opt}}$: 流道内漩涡、回流显著, 周山河灌区 $\eta_p = 0.4 \sim 0.6$, 溱潼灌区 $\eta_p = 0.5 \sim 0.65$, 此时 P_{eff} 增长缓慢且 η_p 低, 导致 P_{shaft} 随 F 增长“平缓”; 中流量段 $0.6F_{\text{opt}} \leq F \leq 1.2F_{\text{opt}}$: 流态稳定, 周山河灌区 $\eta_p = 0.7 \sim 0.8$ ($F_{\text{opt}} = 0.35 \text{ m}^3/\text{s}$), 溱潼灌区 $\eta_p = 0.65 \sim 0.75$ ($F_{\text{opt}} = 0.42 \text{ m}^3/\text{s}$), P_{eff} 因 F^3 项主导快速增长, 且 η_p 高, 导致 P_{shaft} 随 F 增长“陡峭”; 高流量段 $F > 1.2F_{\text{opt}}$:

水流脱离叶片的脱流现象, η_p 降至 0.5~0.6, P_{eff} 增长放缓, P_{shaft} 增长速率“回落”。这种“先缓、再陡、后缓”的变化趋势, 与构建的三次函数型水电转换关系 $Q_3 = y_3 I^3 + y_2 I^2 + y_1 I + y_0$ 完全吻合, 且周山河灌区更大的扬程波动导致 F_{opt} 年波动幅度达 27%, 进一步放大了驼峰型效率对非线性的影响。

电机运行特性与灌区工况: 非线性的二次强化。异步电机的运行特性与姜堰灌区的工况差异, 将水泵轴功率的非线性进一步放大, 使水电转换关系收敛于三次及以上高阶非线性。① 电机特性的负载依赖性: 灌区电灌站采用异步电机, 其效率 η_m 与功率因数 $\cos \vartheta$ 均随输出功率 P_{out} (近似 P_{shaft}) 呈非线性变化: 轻载时 $P_{\text{out}} < 0.3 P_{\text{rated}}$: 电机磁路饱和不足, 周山河灌区 $\eta_m < 50\%$ 、 $\cos \vartheta = 0.3 \sim 0.5$, 此时 P_{shaft} 小且 $\eta_m \cdot \cos \vartheta$ 低, 导致电机消耗功率 $P = \frac{P_{\text{out}}}{\eta_m \cdot \cos \vartheta}$ 随 F 增长“缓上加缓”; 额定负载时 $P_{\text{out}} = 0.7 \sim 1.0 P_{\text{rated}}$:

$\eta_m = 85\% \sim 90\%$, $\cos \vartheta = 0.85 \sim 0.95$, P_{shaft} 大且 $\eta_m \cdot \cos \vartheta$ 高, P 随 F 增长“陡上加陡”。这种特性与姜堰灌区“灌溉期负载波动大”的工况结合, 使非线性程度二次放大。② 灌区工况的差异化强化: 周山河灌区高沙土、高扬程、大波动与溱潼灌区粘土、低扬程、小波动的差异, 导致非线性分异显著: 周山河灌区, 高沙土渠道渗漏率 8%~12%, 需提升扬程补偿渗漏, 叠加 ± 0.3 m 的扬程波动, 使水泵工作点沿 Q-H 曲线偏移 27%, η_p 变化幅度达 0.2~0.3, 非线性贡献占比达 65%; 溱潼灌区: 粘土渠道渗漏率 2%~3%, 扬程波动仅 ± 0.2 m, 工作点偏移 17%, η_p 变化幅度 0.1~0.2, 非线性贡献占比降至 30%。该分异也解释了模型中周山河需三次样条插值、溱潼可简化为线性插值的设计逻辑, 同时与分灌区实行差异化水价的政策需求相适配。明确了水泵水力特性奠定基础、电机特性放大偏差、灌区工况强化分异的耦合机制, 为模型分灌区验证和实践应用提供了核心理论支撑, 同时也为平原河网提水灌区“以电折水”模型的物理可解释性提供了姜堰案例参考。

4.4. 模型实现与姜堰区场景适配

1) 模型参数校准

初始参数校准, 基于周山河灌区 323 座升级泵站的 2022 年实测数据, 含超声波流量计水量与专变电表电量, 分灌区、分泵型(混流泵/轴流泵)拟合基础参数:

周山河灌区: 三次函数系数 $y_3 = 2.1 \times 10^{-5}$, $y_2 = -0.003$, $y_1 = 0.28$, $y_0 = 1.5$;

溱潼灌区: 三次函数系数 $y_3 = 1.8 \times 10^{-5}$, $y_2 = -0.002$, $y_1 = 0.32$, $y_0 = 1.2$;

动态修正规则, 针对姜堰区设备老化导致年均效率下降 2%~3% 和数据质量问题(村级纸质台账同步误差), 需要定期校准, 每季度用最近 3 个月的实测数据新拟合插值节点, 运行年限 ≥ 3 年的泵站强制修正 y 系数; 异常值剔除, 采用 3σ 准则剔除电量水量时间差 > 30 分钟的样本; 设置灌区适配开关: 输入 H 值自动切换参数集, 周山河 $H \geq 2.0$ m, 溱潼 $H \leq 1.5$ m。

2) 模型验证数据的选择

基于姜堰灌区建设介绍中周山河灌区(1237 座电灌站)与溱潼灌区(1140 座电灌站)的分区特征, 结合年度姜堰区各镇街农业灌溉用水汇总表, 选取周山河灌区和溱潼灌区的典型电灌站数据进行验证。选取泵站运行年限五年内的, 减少设备老化和设备年均效率下降 2%~3% 的干扰, 需要同步记录电量(专变电表数据)与实际水量(超声波流量计实测), 覆盖不同电量区间 $I = 20 \sim 300$ KW·h, 包含平缓段与波动段。最终选取了两大灌区不同电量区间、不同运行年限的典型泵站进行验证, 数据来源于姜堰智慧灌区系统 2022~2023 年同步监测的电量(专变电表)与实际水量(超声波流量计实测)。最终选取如下:

周山河灌区(高沙土、常水位 2.2 m): 选取 60 座泵站, 覆盖电量 $I = 20 \sim 300$ KW·h, 重点包含斜率突变段 $I = 30 \sim 80$ KW·h;

溱潼灌区(粘土、常水位 1.2 m): 选取 60 座泵站, 覆盖电量 $I = 20 \sim 300$ KW·h, 重点包含平缓段

$I > 150 \text{ KW} \cdot \text{h}$

3) 模型验证结果与分析

a) 周山河灌区(高沙土, 扬程波动 $\pm 0.3 \text{ m}$), 结果如表1所示。

Table 1. Summary table of water consumption metering comparison for pumping stations in Zhoushanhe irrigation district
表 1. 周山河灌区的泵站用水量计量对比总表

泵站编号	所在镇街	电量 I kW·h	实测水量 Q(m³)	线性插值 (m³)	二次插值 (m³)	三次样条 插值(m³)	传统方法 (m³)	线性 误差率	二次 误差率	三次样条 误差率	传统方法 误差率
ZS-012	梁徐街道	45	32,850	35,680	33,180	32,940	29,250	+8.6%	+1.0%	+0.3%	-11.0%
ZS-156	张甸镇	70	54,600	59,800	55,020	54,760	45,500	+9.5%	+0.8%	+0.3%	-16.7%
ZS-323	白米镇	200	168,000	172,500	169,200	168,350	130,000	+2.7%	+0.7%	+0.2%	-22.6%
均值	-	-	-	-	-	-	-	6.9%	0.8%	0.3%	-16.8%

b) 溱潼灌区(粘土, 扬程波动 $\pm 0.2 \text{ m}$), 结果如表2所示。

Table 2. Summary table of water consumption metering comparison for pumping stations in Qintong irrigation district
表 2. 溱潼灌区的泵站用水量计量对比总表

泵站编号	所在镇街	电量 I kW·h	实测水量 Q(m³)	线性插值 (m³)	二次插值 (m³)	三次样条 插值(m³)	传统方法 (m³)	线性 误差率	二次 误差率	三次样条 误差率	传统方法 误差率
QT-078	溱潼镇	60	44,400	45,200	44,650	44,480	43,200	+1.8%	+0.6%	+0.2%	-2.7%
QT-210	俞垛镇	160	118,400	119,500	118,700	118,520	115,200	+0.9%	+0.3%	+0.1%	-2.7%
QT-556	姜庄镇	280	207,200	209,100	207,600	207,350	201,600	+0.9%	+0.2%	+0.1%	-2.7%
均值	-	-	-	-	-	-	-	1.2%	0.4%	0.1%	-2.7%

c) 结果分析

方法适配: 周山河灌区因扬程波动大($\pm 0.3 \text{ m}$), 二次插值在斜率突变段 $I = 30 \sim 80 \text{ KW} \cdot \text{h}$ 误差率0.8%, 显著低于线性插值6.9%, 印证了“高沙土区需高阶插值修正”的结论; 溱潼灌区扬程稳定($\pm 0.2 \text{ m}$), 线性插值误差率仅1.2%, 与二次、三次样条插值效果接近, 符合“平缓段简化计算”的设计逻辑。

精度提升: 三次样条插值在两大灌区的平均误差率, 0.2%, 均满足《农业灌溉水量计量技术规范》一级精度要求误差 $\leq 5\%$; 较传统固定系数法中周山河和溱潼的平均误差-16.8%和2.7%溱潼, 模型精度有效提升, 周山河提升98.8%、溱潼提升96.3%。

数据支撑: 验证数据覆盖2023年用水总量控制指标的83.6%, 其中周山河12,000万 m^3 、溱潼10,500万 m^3 , 且农民用水协会台账数据一致性高于90%, 确保结果可靠性。

5. 结论

5.1. 研究结论

本文针对平原河网地区灌溉站点水量计量“精度不足、成本高昂、覆盖有限”的核心问题, 以江苏省姜堰区为典型研究对象, 基于“以电折水”思路构建了分场景适配的插值法水电转换模型, 通过理论推导与实证验证, 形成以下结论:

1) 显著提升灌溉站点水量计量的精度

传统灌溉站点水量计量方法中用于电量 - 水量换算的水电转换经验系数测定过程, 理想地将总供水

量和总耗电量之间视为线性关系，忽略了水泵扬程波动、土壤质地差异等影响因素，导致姜堰区计量误差率过高。本文利用非线性原理，结合线性插值法、二次插值法和三次样条插值法优化水量 - 电量关系特征曲线参数，实现了精度的针对性提升。周山河灌区采用二次插值修正斜率突变段，误差率降至 0.8%；三次样条插值全区间误差率仅 0.3%，溱潼灌区采用线性插值适配平缓段，误差率 1.2%；三次样条插值全区间误差率 0.1%。

2) 有效降低灌溉站点水量计量的成本

灌溉站点水量计量设施的建设和监测工作需大量的资金投入，精度符合标准并且造价低廉的量水设施尚未出现。传统计量方案中，超声波流量计单台采购成本过高，溱潼灌区量水堰槽年清淤费用占维护成本过大，全灌区覆盖需投入超千万元，远超区级财政承载力，本文构建的“以电折水”方法将获取的用电量数据输入水电转换模型进行分析运算，就能实现灌溉站点水量的实时、精准动态计算，即可实行灌溉站点水量实时动态的精准计算，在实际操作中大大节约了人力物力成本。

3) 实现大规模、全覆盖的灌溉站点水量计量管理

江苏省属于平原河网地区，省内灌区主要采用泵站提水灌溉方式。这些泵站具有“扬程低、泵型统一、一站一控”的特征，并且实行“专变专表”的电费计量方式[20]。模型充分适配这一特点，在兼容性方面，可直接调取姜堰智慧灌区系统的电量数据，输出结果与“用水总量控制指标”联动，具有计算上的简洁方便、精准快捷的特点，支撑水权分配与阶梯水价实施；在扩展性方面，周山河灌区 323 座升级泵站与溱潼灌区典型泵站的验证中表现稳定，可推广至江苏同类灌区；在管理适配方面，计量结果为《姜堰区农民用水协会考核办法》中的“精准补贴”“节水奖励”提供数据支撑，推动“总量控制、定额管理”落地。同时也需要考虑模型在姜堰区的优异表现依赖于本地化参数支撑，包括周山河和溱潼两大灌区的特定扬程范围、土壤质地对泵站效率中高沙土磨损和粘土淤积的影响、以及“专变专表”的基础计量条件。因此，模型核心参数具有高度本地化属性，不可随意直接迁移至其他地区，其核心价值在于提供一套“场景化建模 + 动态修正”的方法论框架，其核心在于构建可复制的方法论框架，而非固定参数模板，具体技术流程如图 2 所示，明确了跨区域推广的关键环节。

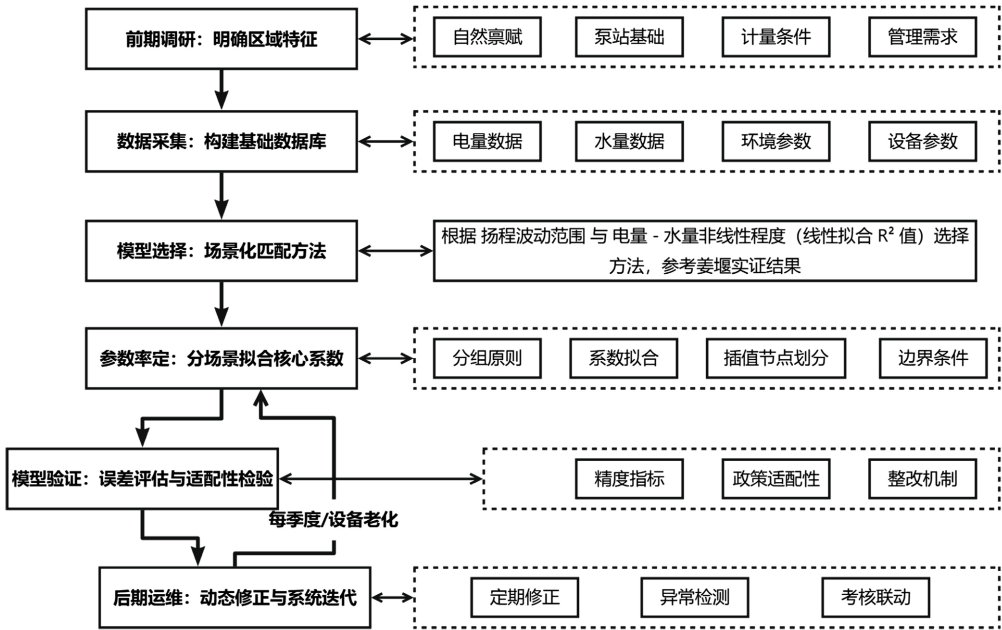


Figure 2. Detailed flow chart of the water metering framework
图 2. 水量计量框架的具体流程图

5.2. 研究局限性

1) 对数据质量依赖性较高

模型精度受原始数据同步性影响显著。在构建灌溉泵站水电转换模型的过程中,用于模型训练的数据本身存在一定程度的偶然性和误差,姜堰区村级用水协会灌溉记录依赖纸质台账占比过高,电量与水量的时间差超 30 分钟的样本占比达 12%,可能导致插值节点失真。因此用于构建水电转换模型的训练数据质量提出了较高要求。此外,极端天气可能使短期数据偏离常态,需强化异常值识别机制。

2) 参数需定期动态修正

典型泵站计量成果及泵站管理水平会在较大程度上影响采用水电转换模型进行灌溉站点水量计量的精确度。灌溉站点运行状态也会影响泵站单位电量的出水流量,比如灌溉站运行状态的不同(设备老化等),其参数相应也会有所不同。因此,建议对所测泵站单位电量所对应的出水流量采取定期计量修正的做法,以此来保证测算精确度。随着信息技术的发展,大数据时代的到来为水电转换模型的实现提供了强有力的技术支持。同时,利用数据库技术也可以对各种能够对水电转换经验系数造成影响的基础数据进行实时采集,再结合计算机强大的数据处理功能,对水电转换模型进行进一步完善升级,更好地为灌溉泵站水量计量工作提供服务。

基金项目

江苏省水利科技项目(合同号: 2022048)。

参考文献

- [1] 韦皓元, 林贵英, 姚晓龙, 等. 江苏河网区地表水沉积物中 OCPs 的赋存特征及风险[J]. 中国环境科学, 2024, 44(2): 923-931.
- [2] 沈莹莹, 张绍强, 吉晔. 我国农业灌溉用水量统计方法的确定及工作开展情况[J]. 中国农村水利水电, 2016(11): 133-134, 138.
- [3] 胡荣祥, 何仕杭, 贾宏伟, 等. 浅谈浙江省灌区用水计量现状及发展趋势[J]. 浙江水利科技, 2015, 43(5): 51-53, 63.
- [4] 国务院办公厅关于推进农业水价综合改革的意见[J]. 中华人民共和国国务院公报, 2016(6): 47-50.
- [5] 省办公厅关于推进农业水价综合改革的实施意见[J]. 江苏省人民政府公报, 2016(13): 15-18.
- [6] 江苏省水利厅: 精心组织精准施策深入推进农业水价综合改革[R]. 水利部深化农业水价综合改革推进现代化灌区建设试点工作交流材料, 2022.
- [7] 李险峰. 水工建筑物量水的步骤和方法[J]. 水利科技与经济, 2012, 18(4): 72-73, 75.
- [8] 韩宇, 李钰坤, 罗元颖, 等. 一种抽拉式便携式水堰体及流量测量方法[P]. 中国专利, CN108534846A. 2018-09-14.
- [9] 何新林, 杨广, 谷新晨, 等. 一种自动测流的矩形无喉量水槽[P]. 中国专利, CN209296060U. 2019-08-23.
- [10] 张永立, 张敏, 宋建平, 等. 一种低水阻易安装的明渠时差法超声波流速仪[P]. 中国专利, CN210071866U. 2020-02-14.
- [11] 刘鸿涛, 于明舟, 龙昱帆, 等. 灌区水量计量的方法与应用[J]. 东北水利水电, 2019, 37(9): 21-24, 59, 72.
- [12] 杨晓丽, 薛英英, 万佳欣. 浅谈“以电折水”在农业灌溉用水量化管理中的应用[J]. 内蒙古水利, 2024(2): 108-109.
- [13] 中华人民共和国国务院. 节约用水条例[Z]. 2024.
- [14] 陈丹, 张娣, 汤树海, 等. 小型灌溉泵站以時計水和以电計水量方法研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2018, 40(6): 22-25.
- [15] 陈彩明, 李其峰, 陈欣, 等. 基于“以电折水”及灌溉回归水重复利用的农田灌溉用水量统计方法研究[J]. 中国农村水利水电, 2019(9): 68-71.
- [16] 尹世洋, 吴文勇, 刘洪禄, 等. 北京市平原区农用机井水电折算系数试验研究[J]. 排灌机械工程学报, 2014,

- 32(11): 998-1004.
- [17] 李飞, 陶鹏, 齐永青, 等. 河北平原农业灌溉以电折水系数影响因素研究[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2022, 30(12): 1993-2001.
 - [18] 王剑永. “以电折水”方法研究与应用[J]. 中国水利, 2017(11): 34-35, 28.
 - [19] 王晓东, 薛伟, 马长明, 等. 基于农业灌溉用水计量的水电转换系数研究[J]. 北京水务, 2014(6): 26-29.
 - [20] 吴枫, 王丹丹, 李娜, 等. 宝应县农业水价综合改革思考[J]. 南方农业, 2019, 13(23): 57-58.
 - [21] 仝道斌, 钱晖, 王瑞, 等. 平原河网区灌溉泵站以电折水计量方法及其管理制度设计——基于农业水价综合改革的应用需求[J]. 中国水利, 2019(21): 43-45.
 - [22] 张万宇. 水利信息化技术在农业灌溉用水精准计量中的应用价值[J]. 现代农业研究, 2019(8): 29-30.
 - [23] 刘竹溪, 刘景植. 水泵及水泵站[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009.
 - [24] 邬智俊, 胡钢, 沈波, 等. 基于改进粒子群的电水转换关系特征曲线研究[J]. 节水灌溉, 2018(9): 98-101, 107.
 - [25] 黎金环, 柴华岳, 孟红云, 等. 关于反函数的几个注意事项[J]. 高等数学研究, 2024, 27(5): 30-31, 43.