

数字孪生技术在农田水利灌溉系统优化中的应用研究

韩兴龙

新疆峻特设计工程有限公司 新疆 喀什 844000

摘要：随着水资源日益紧张，农田水利灌溉系统的优化成为关键。数字孪生技术通过构建农田系统的虚拟模型，实现农田环境的实时监测、数据分析与决策优化。该技术集成多维度数据，为精准灌溉提供科学依据，提高水资源利用效率，减少浪费。同时，它助力实现灌溉系统的智能化管理，降低灌溉成本，保护生态环境。数字孪生技术的应用，为推动农业可持续发展提供了有力支持。

关键词：数字孪生技术；农田水利灌溉系统；优化；应用

引言：在农田水利灌溉领域，传统灌溉方式存在水资源浪费和灌溉效率低下等问题。随着数字化技术的发展，数字孪生技术为灌溉系统优化提供了新的解决方案。该技术通过构建虚拟农田模型，实时监测农田环境和作物生长状态，实现灌溉决策的智能化和精准化。本研究旨在探讨数字孪生技术在农田水利灌溉系统优化中的应用，以期提高灌溉效率，促进农业可持续发展，保障粮食安全和生态安全。

1 数字孪生技术概述

1.1 数字孪生技术的基本概念

(1) 定义与特点。数字孪生技术是指通过传感器、物联网、虚拟现实、人工智能等技术，对真实世界中的物理对象进行特征、行为、运行过程及性能的全面描述与建模的方法。其特点在于能够实时、动态地反映实体对象的状态，为使用者提供实时的反馈与交互。通过数字孪生技术，我们可以创建一个精确实时反映实体对象状态的数字模型，该模型可用于预测、优化、监控和管理实体对象的运行。(2) 技术架构与关键组件。数字孪生技术的架构通常包括数据采集层、数据处理层、模型构建层、仿真与优化层以及用户界面层。关键组件则包括传感器、物联网设备、数据处理器、仿真软件以及用户界面工具等。传感器和物联网设备负责收集物理对象的数据，数据处理层对数据进行清洗、整合和分析，模型构建层则利用这些数据构建数字模型。仿真与优化层利用模型进行仿真和优化，最终通过用户界面层向用户展示结果并提供交互功能。

1.2 数字孪生技术在农业中的应用现状

(1) 国内外案例分析。在国内外，数字孪生技术在农业领域的应用已逐渐展开。例如，在智慧农业中，通过数字孪生技术可以实时监测农田的土壤、气象、作物生长等信息，为农民提供科学的种植建议和管理决策支

持。在美国，一些农场利用数字孪生技术开发了智能农田管理系统，实现了对农田生态状态的实时监测和优化决策。(2) 应用效果与启示。数字孪生技术在农业中的应用效果显著，能够显著提高农业生产的效率和资源利用效率。通过精准农业管理，农民可以根据数字孪生模型提供的实时数据，进行精确的施肥、灌溉和植物保护等操作，从而提高农作物的生长质量和产量。此外，数字孪生技术还为农产品溯源和食品安全提供了新的解决方案，通过数字化建模和记录农产品的生产过程，可以确保农产品的质量和安全可追溯。这些应用效果启示我们，数字孪生技术在农业领域具有广阔的应用前景和巨大的发展潜力。

2 农田水利灌溉系统现状及问题

2.1 我国农田水利灌溉系统的发展历程与现状

2.1.1 传统灌溉方式的优缺点

我国农田水利灌溉系统的发展历史悠久，传统灌溉方式在其中占据了重要地位。传统的灌溉方式主要包括漫灌、沟灌和淹灌等。漫灌简单易行，适用于大面积农田，尤其在地形平坦且对灌溉精度要求不高的地区，但这种方式水资源浪费严重，均匀性差，易导致土壤盐碱化。沟灌则通过开挖灌水沟，借助毛细管作用湿润土壤，适用于宽行距的中耕作物，如玉米、棉花等，其优点是不破坏土壤结构，减少蒸发损失，但劳动力成本较高，且占用一定土地面积。淹灌则通过保持一定水层，适用于水稻等水生作物，但要求土地平整度高，且水资源消耗量大。

2.1.2 现代化灌溉系统的发展趋势

随着科技的进步和农业现代化的发展，现代化灌溉系统逐渐兴起。智能化、节水高效和环保可持续成为现代化灌溉系统的主要发展趋势。智能化灌溉系统通过传感器、物联网和大数据技术，实现灌溉过程的自动化和

智能化控制,提高灌溉效率和水资源利用率。节水高效灌溉技术如喷灌、滴灌等,能够减少水资源浪费,提高灌溉效果。同时,现代化灌溉系统还注重与环境保护相结合,采用生态友好的灌溉方式和技术手段,减少化肥农药流失,保护水体和土壤环境^[1]。

2.2 农田水利灌溉系统面临的主要问题

(1) 水资源分配不均。在我国,水资源分布不均是一个长期存在的问题。一些地区水资源匮乏,而另一些地区则水资源相对丰富。这种不均导致农田灌溉时水资源难以有效利用,尤其是在干旱和半干旱地区,水资源短缺问题更加突出。(2) 灌溉效率低下。传统的灌溉方式往往存在灌溉效率低下的问题。漫灌等方式水资源浪费严重,且灌溉效果不均匀,影响作物生长。而现代化灌溉系统虽然能够提高灌溉效率,但在一些地区,由于资金、技术等原因,现代化灌溉系统尚未得到广泛应用。(3) 环境污染与生态压力。农田灌溉过程中往往伴随着化肥、农药等化学物质的使用,这些物质若处理不当,会对水体和土壤环境造成污染。同时,过度灌溉也会导致土壤盐碱化、地下水水位上升等问题,对生态环境造成压力。

3 数字孪生技术在农田水利灌溉系统中的应用分析

3.1 数字孪生技术在灌溉系统监测与评估中的应用

(1) 构建农田系统的虚拟模型。数字孪生技术利用三维建模、仿真等技术手段,根据农田的地理位置、土壤类型、作物种类、灌溉设施等实际数据,构建出高度逼真的虚拟农田模型。这一模型不仅包含了农田的静态信息,还能够动态模拟农田在不同灌溉策略下的变化情况。通过这一模型,灌溉管理人员可以直观地了解到农田的灌溉需求、水资源分配情况等关键信息。(2) 实时监测土壤湿度、作物生长状态及气象数据。在虚拟模型的基础上,数字孪生技术通过部署在农田中的各类传感器,实时监测土壤湿度、作物生长状态以及气象数据。这些传感器能够精确感知农田环境的变化,并将数据传输至数字孪生平台。通过对这些数据的分析,灌溉管理人员可以及时了解农田的灌溉状况,发现潜在的灌溉问题,为灌溉决策提供依据^[2]。(3) 数据集成分析与灌溉效果评估。数字孪生平台具备强大的数据集成与分析能力,能够将来自农田的多维度数据进行整合,形成综合的灌溉效果评估报告。这些报告不仅包含了农田的灌溉效率、水资源利用率等关键指标,还能够根据历史数据和当前情况预测未来的灌溉需求。通过对这些数据的深入分析,灌溉管理人员可以不断优化灌溉策略,提高灌溉效果。

3.2 数字孪生技术在灌溉决策优化中的应用

(1) 精准灌溉模型的构建与灌溉量的精确计算。数字孪生技术结合先进的算法和模型,能够构建出精准的灌溉模型。这些模型能够根据不同作物的生长需求、土壤条件以及气象状况,精确计算出所需的灌溉量。通过这一模型,灌溉管理人员可以制定出更加合理的灌溉计划,避免水资源的浪费。(2) 基于GIS的空间分析技术与分区管理。结合GIS技术,数字孪生技术能够实现农田的精细化管理和分区灌溉。通过GIS平台,灌溉管理人员可以直观地了解到农田的空间分布情况,以及不同区域的灌溉需求。根据这些信息,灌溉管理人员可以将农田划分为不同的灌溉区域,并制定出针对不同区域的灌溉策略,实现灌溉资源的优化配置。(3) 灌溉方案的动态调整与优化。数字孪生技术还能够实现对灌溉方案的动态调整与优化。通过实时监测农田环境的变化以及灌溉效果,灌溉管理人员可以及时发现灌溉策略中的不足之处,并对其进行调整。这一能力使得灌溉系统能够更加适应农田环境的变化,提高灌溉的灵活性和效率。

3.3 数字孪生技术在灌溉系统智能控制中的应用

(1) 远程操控与一键直达的灌溉控制。数字孪生技术使得灌溉系统的控制变得更加便捷和高效。通过远程操控功能,灌溉管理人员可以随时随地实现对灌溉系统的监控和控制。一键直达的功能则使得灌溉操作更加简便快捷,降低了操作难度和人力成本。(2) 智能阀控系统与自动化灌溉技术。结合物联网技术和智能阀控系统,数字孪生技术能够实现灌溉系统的自动化控制。智能阀控系统能够根据预设的灌溉计划自动开启或关闭阀门,精确控制灌溉水量和时间。自动化灌溉技术则能够实现对灌溉过程的全程监控和智能化管理,提高灌溉的精度和效率^[3]。(3) 故障预警与应急响应机制的建立。在灌溉系统的实际运行中,故障和异常情况时有发生。数字孪生技术通过实时监测和分析灌溉系统的运行状态,能够及时发现潜在的故障隐患,并发出预警信号。这种预警机制不仅能够提高灌溉系统的可靠性和稳定性,还能够减少因故障导致的灌溉中断和作物损失。

4 基于数字孪生技术的农田水利灌溉系统优化策略

4.1 构建数字孪生灌溉系统的框架与流程

(1) 数据采集与预处理。构建数字孪生灌溉系统的第一步是广泛而精准的数据采集。这包括农田环境数据(如土壤湿度、气象条件)、作物生长数据、灌溉设施运行状态数据等。数据预处理阶段则负责对原始数据进行清洗、去噪、标准化等处理,以确保数据质量,为后续分析和建模提供可靠基础。(2) 虚拟模型构建与校

验。基于预处理后的数据，利用三维建模、物理仿真等技术构建农田灌溉系统的虚拟模型。该模型需准确反映农田的实际灌溉需求、土壤水分动态、作物生长状况等关键信息。模型构建完成后，需通过与实际农田灌溉数据的对比验证，确保模型的准确性和可靠性。（3）灌溉决策与优化算法设计。在虚拟模型的基础上，设计灌溉决策算法，综合考虑作物生长周期、土壤条件、气象预报等因素，实现灌溉计划的智能生成与优化。通过不断迭代算法，结合机器学习技术，进一步提升灌溉决策的精准度和灵活性。

4.2 强化系统集成与协同能力

（1）实现物联网、大数据、AI等技术的深度融合。数字孪生灌溉系统的优化离不开物联网、大数据、人工智能等先进技术的支撑。通过深度融合这些技术，实现灌溉数据的实时采集、智能分析与精准决策，形成闭环的灌溉管理系统。物联网技术负责数据感知与传输，大数据技术负责数据处理与分析，AI技术则负责决策制定与优化。（2）构建灌溉系统信息共享与协同服务平台。构建灌溉系统信息共享与协同服务平台，实现灌溉管理部门、科研机构、农户之间的信息共享与协同作业。平台应提供数据上传、下载、查询、分析等功能，促进灌溉知识的交流与共享，提升灌溉系统的整体效能。

4.3 提升系统智能化与自动化水平

（1）智能感知与预警系统的完善。通过部署智能传感器和监控设备，实时监测农田灌溉系统的关键参数，如土壤湿度、气象条件等。当参数异常时，系统能够自动触发预警，及时通知管理人员采取相应措施。（2）自动化灌溉设备的研发与推广。研发高效、节能的自动化灌溉设备，如智能阀门、滴灌系统、喷灌系统等，并实现这些设备与数字孪生平台的无缝对接。通过平台远程控制灌溉设备的开关、调整灌溉量和灌溉时间，实现灌溉作业的精准化和自动化。同时，积极推广这些自动化灌溉设备，鼓励农户采用，提高整个农田灌溉系统的智能化水平。（3）基于机器学习的灌溉策略优化。利用机器学习算法对灌溉历史数据进行分析，挖掘灌溉量与作物生长、土壤湿度、气象条件之间的关联规律。通过不断

学习和调整，优化灌溉策略，实现灌溉的精准化和个性化。同时，机器学习算法还能根据实时气象预报和作物生长状况，智能调整灌溉计划，提高水资源利用效率^[4]。

4.4 加强系统安全与可靠性保障

（1）数据安全与隐私保护措施的制定。在数字孪生灌溉系统中，数据的安全性和隐私保护至关重要。应建立完善的数据安全管理制度，明确数据采集、存储、传输和使用过程中的安全要求。采用加密技术保护敏感数据的传输和存储，防止数据泄露。同时，对涉及个人隐私的数据进行脱敏处理，确保个人隐私不被泄露。（2）系统稳定性与故障恢复能力的提升。为确保数字孪生灌溉系统的稳定运行，应采取冗余设计和容错技术，提高系统的容错能力和稳定性。建立故障监测和报警机制，及时发现并处理系统故障。同时，制定应急预案，对可能发生的重大故障进行预演和应对，确保在紧急情况下能够迅速恢复系统的正常运行。此外，定期对系统进行维护和升级，修复已知漏洞，提高系统的抗攻击能力。

结束语

综上所述，数字孪生技术在农田水利灌溉系统优化中展现出巨大的潜力和价值。通过精准模拟和实时监测，该技术显著提高了灌溉效率，节约了宝贵的水资源。同时，数字孪生技术还为灌溉系统的智能化管理提供了可能，降低了运营成本，增强了系统的可持续性和韧性。未来，随着技术的不断进步和应用的深入，数字孪生技术有望在农田水利领域发挥更大的作用，助力农业绿色转型和可持续发展。

参考文献

- [1]廖斌.水利工程中农田水利灌溉系统的优化设计与应用[J].建筑技术科学,2024,(11):107-108.
- [2]俄日克图.小型农田水利工程高效节水灌溉系统的优化设计[J].建筑科学,2025,(04):45-46.
- [3]王志军.小型农田水利工程高效节水灌溉系统的优化设计[J].建筑设计及理论,2025,(05):60-61.
- [4]雷毅.农田水利工程中灌溉系统设计与效率优化研究[J].建筑理论,2024,(10):104-105.