

分类号: S24
学号: 20212109063

密级: 公开
单位代码: 10759

石河子大学

硕士学位论文



基于遗传算法 PID 的农田作物需水动态调控 技术与系统开发

学位申请人	郑宇
指导教师	张立新 教授 赵宇峰 工程师
申请学位类别	专业硕士
专业名称	机械
研究领域	机械工程
所在学院	机械电气工程学院

中国·新疆·石河子

2024年07月

**Research and System Development of Farmland Crop Water Demand
Dynamic Regulation Technology Based on Genetic Algorithm PID**

A Dissertation Submitted to

Shihezi University

In Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master of Engineering

By

Zheng Yu

(Mechanical Engineering)

Dissertation Supervisor: Prof. Zhang Li-xin

July, 2024

石河子大学学位论文独创性声明及使用授权声明

学位论文独创性声明

本人所提交的学位论文是在我导师的指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含其他个人已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中作了明确的说明并表示谢意。

研究生签名：

时间：

2024年07月09日

使用授权声明

本人完全了解石河子大学有关保留、使用学位论文的规定，学校有权保留学位论文并向国家主管部门或指定机构送交论文的电子版和纸质版。有权将学位论文在学校图书馆保存并允许被查阅。有权自行或许可他人将学位论文编入有关数据库提供检索服务。有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

研究生签名：

时间：

2024年07月09日

导师签名：

时间：

2024年07月09日

摘要

水资源的合理利用直接影响着世界粮食的安全与稳定，但近年来全球气候变暖加剧了水资源短缺。我国是一个农业大国，农业总产值约占全国生产总值的五分之一。近年来随着农业生产种植规模的持续增加，农业用水量也在不断加大。因此在水资源有限的情况下，实现农业用水的高效利用逐渐成为人们关注的焦点。新疆作为我国棉花主要产区之一，每年农业灌溉用水量约占农业用水总量的 90%。在农业灌溉过程中灌溉需水量的多少主要受到土壤、作物以及气象三个因素的影响，而目前市场上的灌溉设备在灌溉决策时往往从单一因素去考虑，导致灌溉水量与作物实际需水量差距较大造成水资源的浪费。本文针对新疆地区棉花种植过程中棉田灌溉需求，基于传感器技术、智能控制技术以及物联网技术设计了基于遗传模糊 PID 的农田作物需水动态调控系统，主要研究内容如下：

(1) 为确定农田作物需水的主要影响因素，分析了作物需水量特性与土壤、作物、气象因素之间的关系，并研究了作物需水量不同估算方式的差异选出了合适的估算方法，基于遗传算法、粒子群算法以及 BP 神经网络搭建了参考作物需水量预测模型，使用 MATLAB 对预测模型进行仿真，结果表明 GA-PSO-BP 的作物需水量预测结果更为准确。并设计了 PID、模糊 PID 以及遗传模糊 PID 控制器对灌溉过程进行控制，通过 simulink 仿真根据仿真结果可知遗传模糊 PID 控制器在农田灌溉过程中调控性能更好。

(2) 根据农田作物需水动态调控系统的功能需求与设计的要求，设计了农田作物需水动态调控系统总体方案包括硬件系统和软件系统，硬件系统包括环境信息采集节点、灌溉执行节点以及太阳能供电模块的选型与设计，而软件系统设计包括环境信息采集节点程序设计、灌溉执行节点程序以及农田作物需水动态调控系统主程序设计，并基于 OneNET 云平台开发了农田作物需水远程监控端包括作物需水量预测界面、手动控制和自动控制界面等。

(3) 开展了农田作物需水动态调控系统的环境信息采集节点精度、系统通信稳定性以及系统性能测试工作。在环境信息采集节点精度进行测试中，结果表明在环境信息采集节点在晴天和雨天两种天气条件下，采集到的环境信息数据与标准值相对误差较小，能够满足系统对环境数据采集要求。在系统通信稳定性测试中，结果表明系统通信平均成功率达到 96.9%，能够满足系统稳定通信的要求。而在系统调控性能测试中，分别对预测模型实际预测效果和调控性能进行了测试，在需预测模型预测效果测试中，由预测结果可知预测结果与实测结果相对误差为-5.98%~5.82%之间，预测模型能够很好地实现参考作物需水量的预测，在调控性能测试中在遗传模糊 PID 控制方式下系统的计算灌溉水量与实际灌溉农田水量最大误差为 2.86%，调控性能优于 PID 控制和模糊 PID 控制。

关键词：农田；需水量预测；动态调控；遗传算法；模糊 PID

Abstract

The rational utilization of water resources directly impacts global food security and stability. However, in recent years, global warming has exacerbated water shortages. China, as a major agricultural country, has its agricultural output accounting for about one-fifth of the national GDP. In recent years, with the continuous increase in agricultural production and planting scale, agricultural water consumption has also been rising. Therefore, how to achieve efficient utilization of agricultural water under limited water resources has gradually become a focus of attention. Xinjiang, as one of the main cotton-producing regions in China, has agricultural irrigation water consumption accounting for about 90% of the total agricultural water use annually. In the process of agricultural irrigation, the amount of irrigation water needed is mainly influenced by three factors: soil, crops, and meteorology. Currently, most irrigation equipment on the market often considers only a single factor when making irrigation decisions, resulting in a significant gap between the amount of irrigation water and the actual water needs of the crops, leading to water resource wastage. This thesis addresses the irrigation needs of cotton fields in Xinjiang, designing a dynamic crop water demand regulation system based on genetic fuzzy PID using sensor technology, intelligent control technology, and the Internet of Things. The main research contents are as follows:

(1) To identify the main factors affecting crop water demand in farmland, the relationship between crop water demand characteristics and soil, crops, and meteorological factors was analyzed. Different estimation methods of crop water demand were studied, and a suitable estimation method was selected. A reference crop water demand prediction model was built based on genetic algorithm, particle swarm optimization, and BP neural network. MATLAB was used to simulate the prediction model, and the results showed that the GA-PSO-BP crop water demand prediction results were more accurate. PID, fuzzy PID, and genetic fuzzy PID controllers were designed to control the irrigation process. Simulation results in Simulink indicated that the genetic fuzzy PID controller performed better in regulating the irrigation process.

(2) Based on the functional requirements and design needs of the dynamic crop water demand regulation system, an overall scheme of the system was designed, including hardware and software systems. The hardware system includes the selection and design of environmental information collection nodes, irrigation execution nodes, and solar power supply modules. The software system design includes programming for environmental information collection nodes, irrigation execution nodes, and the main program of the dynamic crop water demand regulation system. The OneNET cloud platform was used to develop a remote monitoring terminal for crop water demand, including interfaces for crop water demand prediction, manual control, and automatic control.

(3) Environmental information collection node accuracy, system communication stability, and system performance tests were conducted for the dynamic crop water demand regulation system. The results showed that the relative error between the collected environmental information data and the standard values was small under both sunny and rainy conditions, meeting the system's requirements for environmental data collection. In the system communication stability test, the results showed an average communication success rate of 96.9%, meeting the system's stable communication requirements. In the system performance test, both the actual prediction effect of the prediction model and the regulation performance were tested. In the prediction model's actual prediction effect test, the relative error between the predicted results and the measured results was between -5.98% and 5.82%, indicating that the prediction model could effectively predict the reference crop water demand. In the regulation performance test, under the genetic fuzzy PID control method, the maximum error between the calculated irrigation water volume and the actual irrigated farmland water volume was 2.86%, with regulation performance superior to PID control and fuzzy PID control.

Key words: Farmland; Water demand Prediction; Dynamic regulation; Genetic algorithm; Fuzzy PID

目录

摘要.....	I
Abstract.....	II
目录.....	IV
第1章 绪论.....	1
1.1 课题研究背景与意义.....	1
1.2 国内外研究现状.....	2
1.2.1 作物需水量研究现状.....	2
1.2.2 智能灌溉动态调控研究现状.....	4
1.3 主要研究目标、内容及技术路线.....	6
1.3.1 研究目的.....	6
1.3.2 研究内容.....	6
1.3.3 技术路线.....	7
第2章 农田作物需水动态调控系统总体框架设计.....	9
2.1 农田作物需水动态调控系统设计需求与原则.....	9
2.1.1 系统功能需求.....	9
2.1.2 系统设计原则.....	10
2.2 系统相关技术分析.....	10
2.2.1 作物需水量估算方法分析.....	10
2.2.2 无线通信技术分析.....	15
2.2.3 智能控制技术分析.....	16
2.3 系统总体结构设计.....	17
2.4 本章小结.....	18
第3章 农田作物需水动态调控策略设计.....	19
3.1 作物生长过程需水分析.....	19
3.1.1 作物需水影响因素分析.....	19
3.1.2 棉花全生育期蒸散过程分析.....	20
3.1.3 棉花作物需水量计算.....	21
3.2 参考作物需水量预测模型建立与分析.....	23
3.2.1 参考作物需水量预测模型输入因子筛选.....	23
3.2.2 参考作物需水量预测模型构建.....	23

3.2.3 参考作物需水量预测模型仿真分析	28
3.3 农田作物需水动态调控策略研究	30
3.3.1 调控策略结构设计	30
3.3.2 遗传模糊 PID 控制器设计	31
3.3.3 遗传模糊 PID 控制器仿真分析	35
3.4 本章小结	37
第 4 章 农田作物需水动态调控系统设计	38
4.1 农田作物需水动态调控系统硬件选型与设计	38
4.1.1 核心控制模块选型	39
4.1.2 通信模块选型	40
4.1.3 环境信息采集节点传感器选型	41
4.1.4 执行机构选型与设计	44
4.1.5 太阳能供电模块设计	45
4.2 农田作物需水动态调控系统软件设计	46
4.2.1 环境信息采集节点软件设计	47
4.2.2 灌溉执行节点程序设计	52
4.2.3 遗传模糊 PID 程序设计	54
4.3 农田作物需水动态调控系统监控端开发	56
4.3.1 农田作物需水动态调控系统数据库设计	56
4.3.2 远程监控端系统环境搭建	58
4.3.3 人机交互界面设计	59
4.4 本章小结	62
第 5 章 农田作物需水动态调控系统测试	63
5.1 农田作物需水动态调控系统搭建	63
5.2 环境信息采集节点采集精度测试	64
5.2.1 测试条件	64
5.2.2 测试结果与分析	65
5.3 农田作物需水动态调控系统通信稳定性测试	66
5.3.1 测试条件	66
5.3.2 测试结果与分析	67
5.4 农田作物需水动态调控系统性能测试	67
5.4.1 测试条件	68
5.4.2 测试结果与分析	68
5.5 本章小结	70

第 6 章 结论与展望.....	71
6.1 结论.....	71
6.2 展望.....	72
参考文献.....	73
致谢.....	80
作者简介.....	81

第 1 章 绪论

1.1 课题研究背景与意义

我国是一个传统的农业大国，农业在我国经济发展中占有很大比重^[1]。截至到 2022 年我国耕地面积达到 19.14 亿亩，位居世界第一^[2]。近年来随着耕地面积的持续增多，农业用水的需求也在不断增大。但我国水资源总量较少约占世界水资源总量的 6%，水资源的不足严重阻碍着我国农业的可持续发展和国民经济的增长^[3,4]。根据 2022 年水利部发布的《中国水资源公报 2022》可知（如图 1-1 所示），全国用水总量为 5998.2 亿 m^3 ，其中农业用水量达到 3781.3 亿 m^3 ，占全国用水总量的 62.6%，农田灌溉水有效利用系数为 0.572^[5]。然而，由于我国地理空间跨度大造成水资源分布不均，尤其是西北内陆地区水资源严重匮乏。新疆地处西北地区主要产业为种植业，2022 年新疆地区农业用水达到 511.76 亿 m^3 （如图 1-2 所示），占新疆地区用水总量的 91%。因此在水资源有限的情况下，实现水资源的高效利用至关重要。



图 1-1 2022 年全国用水量占比统计

Fig.1-1 Statistics of the proportion of national water consumption in 2022

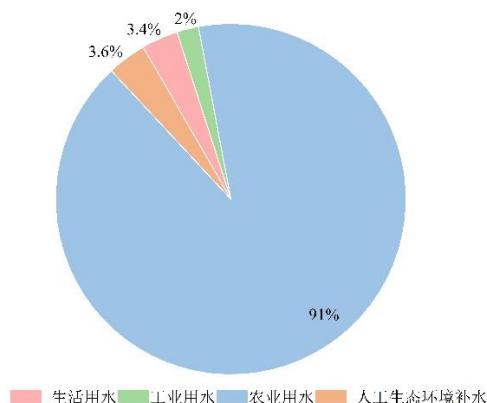


图 1-2 2022 年新疆用水量占比统计

Fig.1-2 Statistics of the proportion of water consumption in Xinjiang in 2022

在农业生产过程中常用的灌溉方式有大水漫灌、喷灌、滴灌等方式，其中滴灌和喷灌可以较为准确地控制每次灌水量，但在灌溉时间和灌溉总水量还主要靠人工经验进行判断^[6,7]。人工决策方式有时会导致过量灌溉或灌溉不足的情况出现，无法满足我国农业现代化的发展要求^[8]。当前我国农业正处于向现代化、信息化、智能化农业转型的关键期，先进科学技术正被应用到农业生产的各个领域^[9]。因此，如何利用科学技术指导农民进行节水灌溉管理是我国农业灌溉工程发展的重点，对促进农业节水、提高农业生产水平具有十分重要的意义^[10]。

近年来随着物联网技术、传感器技术、智能算法等技术的快速发展，为了提高农业灌溉用水的利用率，使用机器学习的方式进行农田灌溉水量预测^[11,12]。通过探究影响作物需水量的因素建立作物需水量预测模型，将采集到的环境信息数据输入到模型中得到对应的作物需水量。但是由于影响作物需水量的因素众多，仅考虑部分因素造成预测结果与实际需要之间偏差过大。因此在减少影响因子的同时尽可能使结果较为准确是研究的一个思路，这在一定程度上为农业精准灌溉提供了方向，并对农业生产具有很高的利用价值与现实意义^[13]。新疆作为我国棉花主要生产地之一，2023 年新疆棉花总产量达到了 511.2 万吨，占全国棉花总产量的 90%。棉花是一种耗水量相对较高的农作物，新疆地区棉花种植过程中采用膜下滴灌的方式进行灌溉，因此在新疆地区水资源紧缺的背景下，在棉花膜下滴灌方式的基础上发展智能化的灌溉控制系统是符合当前发展需求。本文设计的农田作物需水动态调控系统，能够根据棉花生长过程中对水的实际需求，实现棉花生长过程中水量的精准化灌溉，在节约用水的同时提高农业灌溉用水的利用率。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 作物需水量研究现状

人们生产生活离不开水资源的使用，近年来随着人口不断增长以及城市化和工业化的加剧，对水的需求日益增加导致农业用水变得越来越有限，因此通过对作物需水量进行估算进行精准灌溉至关重要。作物需水量是指作物在适宜的生长条件下，正常生长发育时所需要的水量包括：植株蒸腾、棵间蒸发以及植株含水量，由于植株含水量较低在实际计算时往往只计算植株蒸腾和棵间蒸发，既将作物蒸发蒸腾量近似作为作物需水量^[14]。因此通过作物需水量的准确估算，可以尽可能减少灌溉过程中出现过度灌溉或者灌溉不足的情况，有效提高了水资源的利用率^[15]。为了实现作物需水量的准确估算相关学者对作物需水量计算方法进行研究，并提出了多种作物需水量估算方法。

（1）国外作物需水量研究现状

作物需水量的研究最早可以追溯到 20 世纪 40 年代，Penman 首先提出了蒸散量计算公式，随后相关研究人员不断对其更新修正，提出了修正后的计算参考作物蒸散量的公式既 Penman-Monteith 公式，并被联合国粮农组织推荐^[16]。然而在缺乏气象数据的条件下 Penman-Monteith 公式并不适用，因此出现了许多其他估算作物需水量的计算公式。2001 年，Kashyap 等人^[17]采用多种估算方法计算作物需水量，并将计算结果与农场作物需水量的实测值进行对比，结果表明 Panman-Monteith 公式计算结果与实测值更为接近。2008 年，Ali 等人^[18]基于人工神经网络（ANN）建立了作物需水量预测模型，将传统方法测得结果分别与预测模型预测结果以及 Panman-Monteith 公式计算结果进行对比，结

果表明采用 Panman-Monteith 公式计算是准确的,且作物需水量预测模型与传统方法相比效果也更好。2013年,Valiantzas 等人^[19]提出了一种简化的作物需水量计算公式,该公式通过对 Penman-Monteith 公式和标准化 Penman 公式之间对应关系的简化和系统分析得出,且该公式的预测精度与标准的 Panman-Monteith 公式几乎相同。2017年,Cobaner 等人^[20]在缺少太阳辐射、风速和相对湿度等气象数据的地区使用 HS 公式计算作物需水量,并使用 Panman-Monteith 公式的计算结果修正 HS 公式系数,结果表明修正后的 HS 公式预测结果误差更小。2019年,Ferreira 等人^[21]通过对人工神经网络(ANN)和支持向量机(SVM)的性能进行了研究,并在 Penman-Monteith 公式的基础下通过人工神经网络(ANN)和支持向量机(SVM)建立了作物需水量预测模型,结果人工神经网络(ANN)模型预测作物需水量性能更好。2021年,Saeid 等人^[22]通过对自适应神经模糊推理系统(ANFIS)、洗牌蛙跳算法(SFLA)和入侵杂草优化算法(IWO)进行研究提出了两种混合模型 ANFIS-SFLA 模型和 ANFIS-IWO 模型用于预测作物需水量,并以联合国粮农组织提出的标准公式为基准对提出的模型进行评估,结果表明两模型预测效果良好且 ANFIS-SFLA 模型优于 ANFIS-IWO 模型。2023年,Mehdi 等人^[23]采用了遥感方法(SEBAL、SEBS)估算作物需水量,并将估算结果与 Penman-Monteith 公式、Hargreaves-Samani 公式计算结果进行了比较,结果表明采用 SEBAL、SEBS 时的预测结果与 Penman-Monteith 公式计算结果相比误差较大,而与 Hargreaves-Samani 公式计算结果相比误差较小。

(2) 国内作物需水量研究现状

目前,国内许多学者开展对作物需水量的研究,并且往往以联合国粮农组织(FAO)提出的 FAO-56 (Penman-Monteith) 公式为基础开展研究^[24]。2007年,郭晓玲^[25]为了计算春小麦不同生育阶段的作物需水量,通过 Penman-Monteith 公式计算参考作物需水量,使用单系数法计算作物系数,根据作物系数和参考作物需水量计算实际作物需水量,并以计算得到的作物需水量为目标输出气象因子为输入,建立了基于 BP 神经网络的作物需水量预测模型。2013年,刘婧然等人^[26]为了实现核桃作物的精细化灌溉,分别提出了基于 RBF 神经网络和 BP 神经网络的作物需水量预测模型,并将两种作物需水量预测模型及逆行试验验证,结果表明基于 RBF 神经网络的作物需水量预测模型的预测精度高于基于 BP 神经网络的作物需水量预测模型。2015年,夏泽豪等人^[27]通过对灰色系统理论和神经网络进行研究,建立了基于灰色神经网络的作物需水量预测模型,该模型以气象因子为输入作物需水量输出并应用到实际灌溉管理系统中,结果表明该模型采用的预测方法合理且预测结果精确。2019年,李志新等人^[28]针对 Penman-Monteith 公式计算作物需水量需要气象因子较多的情况,采用遗传算法优化 Elman 算法训练过程,构建了基于 GA-Elman 神经网络的作物需水量预测模型,并对模型的预测性能进行了测试。2019年,杨昊^[29]为了实现灌溉过程中对灌溉水量的准确控制,提出了基于 BP 神经网络作物

需水量预测模型,并将模型应用于模糊控制的灌溉系统中,系统可以根据预测模型预测结果确定灌溉时长。2021年,李真真^[30]通过对夏季玉米各生长阶段需水特性进行研究,以 Penman-Monteith 公式计算结果为标准值,并通过灰色关联度法分析作物需水量的主要气象因子,建立了基于长短时记忆网络(LSTM)的作物需水量预测模型用于灌溉系统的决策。2022年,孙博瑞^[31]为实现南疆地区枣园智能灌溉,构建了基于 LSTM 神经网络需水量预测模型,模型以系统采集到气象信息和土壤信息为输入预测枣树日需水量,在节约水量的同时使枣树始终生长在适宜的土壤环境下。

综上所述,针对作物需水量的研究国外早期主要集中在作物需水量计算公式的提出以及公式修正上,后来随着联合国粮农组织对作物需水量计算公式的推荐,开始逐渐转变为以 Penman-Monteith 公式为研究基础的作物需水量计算模型,并与其对比验证新建模型的性能。国内学者对于作物需水量的研究大多数以 Penman-Monteith 公式为理论基础开展作物需水量估算的研究,并通过对神经网络相关智能算法的研究构建作物需水量模型,以实现在输入因子尽可能少的情况下得到较为准确的结果。

1.2.2 智能灌溉动态调控研究现状

随着现代信息技术的快速发展,传统农业生产方式已无法满足当前发展需要,致使当前农业不断向智能化、精准化的方向发展^[32]。智慧农业是我国发展重要战略之一,其他国家也在不断加快现代化农业的发展,同时由于智能灌溉是现代化农业的重要组成部分,国内外学者在智能灌溉控制上开展了大量研究^[33]。

(1) 国外智能灌溉动态调控研究现状

国外一些国家针对农业灌溉中用水量大、利用率低等问题,开展节水灌溉方面的研究,其中以色列在节水技术上研究最早,由于以色列的地理位置原因其 80%的土地干旱缺水,为了提高灌溉用水的利用率,研究开发了一套能够自动控制的灌溉系统。2010年, Garcia-Sanchez A 等人^[34]通过土壤温湿度传感器采集果园土壤信息,并通过无线传感网络将信息发送至控制系统,系统通过对农田土壤温湿度信息进行处理,并根据处理结果对阀门的开启或关闭进行决策,使得果园土壤温湿度始终满足果树的生长需求。2011年, Gomez-Melendez D 等人^[35]研发一种基于 FPGA 的模糊灌溉控制系统,该系统具有成本低、适应性强、控制简单等特点,在种植作物种类不相同的情况下可以基于不同作物对营养需求不同进行最优方式灌溉施肥,与传统控制系统相比节约了大量水分和养分。2014年, Gutiérrez J 等人^[36]设计了一种基于分布式无线网络的自动灌溉系统,该系统通过在作物根部土壤中布设土壤温湿度传感器,当采集到的土壤信息和系统设定的条件一样时开启阀门实施灌溉。2015年, Osrooh Y 等人^[37]提出一种基于作物水分胁迫指数的智能灌溉系统,系统根据自适应调整算法对灌溉过程进行控制,测试结果表明该系统具有适应性强,受外界影响小等特点。2017年, Rodríguez Danie 等人^[38]提出了一种低成本

的无土栽培灌溉管理控制系统,该系统水流量为反馈信号通过 PID 控制调节灌溉时间和灌溉量,实现了对无土栽培条件下的灌溉管理优化。2019 年, Barkunan S 等人^[39]设计了以数字图像处理技术为基础的农田自动灌溉系统,系统将采集到的农田图片经过图像处理,系统根据图片处理结果计算出所需水量进行农田灌溉,并进行了 3 个月测试结果表明与传统灌溉相比减少了三分之一用水。2020 年, Krishnan S R 等人^[40]设计了一种基于 GSM 技术的智能灌溉系统,该系统可以实时监控土壤湿度、环境温度、太阳能储蓄电量,当出现天气变化如降雨等系统会自动关闭以节约水电。2022 年, Kumar V S 等人^[41]开发了一种智能物联网滴灌系统,系统通过传感器采集田间环境参数,根据采集结果实时精准调节灌溉过程。2023 年, Bhupalam V 等人^[42]等人设计了一套灌溉和喷药为一体的远程灌溉系统,系统通过传感器和热成像仪等设备采集到的大量数据,确定灌水量和杀虫剂的类型实现远程灌溉和农药喷洒。

(2) 国内智能灌溉灌溉动态调控研究现状

相对于国外在农业灌溉控制领域的研究我国发展较晚,早在 20 世纪 70 年代从国外引进了先进的节水灌溉技术,并在此基础上开展了研究。近年来随着农业现代化的快速推动,越来越多的研究人员投入进去促使我国农业技术快速地向智能化方向迈进。2015 年,周小波等人^[43]针对农田灌溉过程中,输水管道距离长、分支水口多的情况,为保证灌溉过程稳定运行,设计了一套无线控制终端与 PLC 控制器相结合的灌溉系统以实现灌溉过程远程高效的控制。2016 年,王建华等人^[44]针对农业灌溉用水利用率低的问题,基于云服务、移动互联网平台等技术搭建了一套智能节水灌溉自动控制系统,系统不仅可以自动滴灌还可以远程手机控制。2017 年,韩贵黎等人^[45]设计了一套基于 PLC 和物联网的智能灌溉节水系统,系统采用模糊控制以土壤湿度为依据进行精准灌溉,使农田土壤能够始终保持在适宜的湿度。2018 年,沈建炜等人^[46]建立了能够预测灌溉水量的蓝莓园智能灌溉系统,系统的灌溉决策模型根据园区气象信息检测站监测到的环境信息进行灌水量的预测,使得土壤湿度始终满足蓝莓生长需求。2019 年,王延年等人^[47]通过考虑天气因素对作物的影响,建立了基于气象信息的小麦作物灌溉系统,系统根据小麦的蓄水规律以及天气情况确定灌溉水量,使得土壤保持在最适宜小麦生长的湿度。2020 年,刘雪燕等人^[48]设计一套能够根据作物不同生长阶段调节土壤灌溉湿度的智能灌溉系统,该系统不仅可以通过手动方式控制,还可以通过语音方式进行控制,在保证灌溉准确的同时降低了用户的操作难度。2021 年,胡长增等人^[49]为实现温室远程化监控,设计了一套温室智能灌溉系统,系统通过传感器采集温室环境经过无线传感网络信息发送到监控端,用户能够通过手机实时监测温室环境信息。2022 年,谢佩军等人^[50]设计了一套智能灌溉系统,系统通过 Smith 预测补偿对灌溉系统控制器进行改善解决了灌溉过程迟滞性、非线性的情况,提高系统的控制精度以及适应性。2023 年,廖洪铠等人^[51]设计一套适用于丘陵地区的灌溉控制系统,该系统采用模糊 PID 进行控制,通过对山地土壤湿度的变

化进行实时监测控制系统灌溉时长，以解决丘陵地区灌溉过程水资源浪费和人工成本高的问题。

综上所述，国外由于更早地关注到农业灌溉领域，在农业灌溉智能控制上取得较多的研究成果，使得灌溉系统智能化水平不断提高。近年来随着传感器、物联网、无线通信等技术的发展，智能灌溉控制系统从最初的单一控制逐渐向精准控制方向发展。国外对智能灌溉的研究大多以土壤湿度为依据少数结合环境信息设计智能灌溉系统，使得控制效果在一定程度上得到提高。国内节水技术发展时间晚于国外，但是近年来随着人员和技术的大力投入，在一定程度上实现了农田灌溉的智能化控制，研究内容也从控制技术方向逐步延伸到远程监控、灌溉水量预测等多方向发展。

1.3 主要研究目标、内容及技术路线

1.3.1 研究目的

针对新疆地区农业灌溉用水量，水资源利用率低，以及现有灌溉设备智能化程度不足、决策条件单一，造成灌溉水量与作物实际需水量之间存在较大差异等问题。本文以新疆棉花为研究对象，探究棉花生长过程中作物需水量的影响因素，并结合现有的膜下滴灌方式设计一种基于棉花作物实际需水量的农田节水灌溉控制系统，通过在田间布设环境信息采集节点，采集灌溉决策的所需农田信息进行作物需水量预测并设计作物需水调控策略动态调整农田灌溉水量，并搭建远程监控云平台实时监控系统运行情况。将研究成果应用于新疆地区农业生产过程中，实现水资源精准化、高效化利用。

1.3.2 研究内容

(1) 农田作物需水动态调控系统总体框架设计

结合新疆地区棉花种植过程中的灌溉方式以及灌溉过程存在的问题，对农田作物需水动态调控系统的功能需求进行分析，确定系统作物需水量环节的理论研究基础，对比现有通信方式分析其优缺点选择合适的无线通信方式，分析目前常用智能控制技术的优缺点选择合适的控制方式，确定农田作物需水动态调控系统总体设计方案。

(2) 农田作物需水动态调控策略设计

根据作物生长过程中对水的实际需要，分析农田环境信息中土壤、气象以及作物等因素对作物需水量的影响，建立以 Penman-Monteith 公式为基础的参考作物需水量预测模型，结合作物生长阶段和土壤当前含水量计算出实际应灌溉水量。由于土壤灌溉过程中存在不确定性和非线性，为实现灌溉水量精准化调控设计遗传模糊 PID 控制方法，并在 simulink 中建立仿真模型，验证算法的调控性能以实现精准化灌溉。

(3) 农田作物需水动态调控系统设计

根据农田作物需水动态调节系统的实际需求，设计农田作物需水动态调控硬件系统和软件系统。其中硬件系统工作包括对环境信息采集节点、灌溉执行节点以及太阳能供电模块的元器件选型、相关电路设计以及搭建；而软件系统工作包括对数据采集节点和灌溉执行节点有关程序进行编写、远程控制平台的搭建等工作，并对系统的通信质量、数据终端采集精度以及各个功能模块进行测试。

1.3.3 技术路线

通过对新疆棉花种植模式及灌溉设备存在问题进行分析，根据研究目的与研究内容制定技术路线，如图 1-3 所示：