

基于物联网的水肥一体化智能灌溉系统设计及效益分析

师志刚^{1,2}, 刘群昌^{1,2}, 白美健^{1,2}, 史源^{1,2}, 张守都^{1,2}

(1. 中国水利水电科学研究院, 北京 100048; 2. 国家节水灌溉北京工程技术研究中心, 北京 100048)

摘要: 基于灌溉现代化发展需求和节水省工的目的,以物联网技术为支撑,对水肥一体化智能灌溉系统进行设计及效益分析。该系统主要包括智慧平台(信息中心),田间灌溉控制系统,智能施肥系统,农田气象环境监测系统,远程土壤墒情测报系统,远程管道压力、流量监测系统,远程作物长势视频监测系统,能效监测系统等8个组成部分。效益敏感性分析结果表明,物联网水肥一体化智能灌溉系统的年效益在其经济内部收益率指标中最为敏感,故该系统与普通滴灌工程相比投资虽较大,但年效益的提高使其在应用年限中获得较高的经济内部收益率,从而极大提高灌溉系统的收益创造能力。应用效果显示,物联网水肥一体化智能灌溉系统省工节水效果显著,随着科技的不断进步与水利信息化的发展趋势,有着良好的应用前景。

关键词: 物联网; 水肥一体化; 智能灌溉系统; 效益分析

中图分类号: TV93; S277.9

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2017)03-0221-07

Water and fertilization integrated intelligent irrigation system design and benefit analysis based on the Internet of Things

SHI Zhigang^{1,2}, LIU Qunchang^{1,2}, BAI Meijian^{1,2}, SHI Yuan^{1,2}, ZHANG Shoudu^{1,2}

(1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China;

2. National Center of Efficient Irrigation Engineering and Technology Research, Beijing 100048, China)

Abstract: This study focused on the design and benefit analysis of water and fertilization integrated intelligent irrigation system based on the Internet of Things to save water and labor. This system includes eight components: intelligence platform (information center), field irrigation control system, intelligent fertilization system, farmland meteorological environment monitoring systems, remote telemetry system of soil moisture, the remote pipeline pressure and flow monitoring system, remote video monitoring system of crop condition, and energy efficiency monitoring system. In the process of application, according to the results of sensitivity analysis, we found that the annual benefit is the most sensitive factor in its economic internal rate of return. Comparing with common drip irrigation, the investment of the system is large, but its annual benefit improvement can make higher economic internal rate of return. Therefore, greatly enhance the benefits of irrigation system creation ability. Application effect showed that the water and fertilization intelligent irrigation system based on the Internet of Things has remarkable water-saving effect. In addition, the system has a good application prospect along with the advance of science and technology and the development trend of water resources informatization.

Key words: the Internet of Things; integration of water and fertilization; intelligent irrigation system; benefit analysis

收稿日期: 2017-03-06; 修回日期: 2017-03-23

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0401403、2015BAD24B00)

作者简介: 师志刚(1991-), 男, 河南漯河人, 硕士研究生, 主要从事节水灌溉工程技术研究。

通讯作者: 刘群昌(1964-), 男, 河南南阳人, 硕士, 教授级高级工程师, 主要从事节水灌溉工程技术研究。

我国人口约占世界的 20%,但淡水资源只有全球的 5%~7%^[1]。作为世界 12 个贫水国家之一,我国人均水资源占有量是世界人均水平的 1/4,而由于干旱造成的损失,据世界银行测算每年约为 350 亿美元^[2]。水资源短缺已对我国经济可持续发展和生态平衡构成了严重威胁。不管是相对于农业用水量还是相对于全国总用水量,农业灌溉用水都是真正的用水大户^[3]。因此,节水灌溉研究一直是一项重要而又紧迫的任务。随着节水灌溉技术的不断发展,滴灌、微喷灌、小管出流等微灌技术都得到了迅速发展。由于人们对环境、生态保护意识不断增强,与微灌方式相结合的水肥一体化技术也不断进步。

与此同时,当今新兴科技发展迅猛,“物联网”(Internet of Things)作为一项当下人们比较关注的热点技术,在农业领域的应用也越来越广泛^[4]。然而,当下农业发展不得不面临这样一个重要问题:部分农村劳动力在市场经济环境下转移到城市,而造成目前农村劳动力的短缺及老龄化^[5]。在此形势下,农业集约化经营模式应运而生,成为了我国农业的发展趋势,高产增效成为了我国农业追求的基本目标,灌溉现代化则成为了我国农业发展的必然选择^[6]。随着农业集约化的不断推广,土地流转和家庭农场经营模式的不断扩张,发展现代农业节水高新技术逐步成为保障我国人口高峰期粮食安全、水安全、生态安全及整个国家安全的重大战略^[7]。在此背景下,面对我国水资源紧缺,农村劳动力匮乏的现状,根据农田集约化经营模式和灌溉现代化发展需求,基于省工节水的目的,本文对物联网水肥一体化智能灌溉系统设计及应用效益进行了分析研究,以期为该技术的进一步推广应用提供技术依据。

1 物联网技术与水肥一体化技术

1.1 物联网技术

“物联网”(Internet of Things)是通过传感器将互联网和物品联系起来,实现智能化识别和管理。目前,物联网技术在环境保护、公共安全、工业监测、水系监测、敌情侦查和情报搜集等多个领域得到快速发展,得到社会各行各业极大重视^[8]。

1.2 水肥一体化技术

水肥一体化是通过管道灌溉系统把水溶性肥料输送到作物根部,适时适量满足作物水肥需求的现代农业新技术。它是建设“资源节约型、环境友好型”现代农业重要手段,对发展高产、优质、高效、生

态的现代农业十分关键^[9]。

在国外,水肥一体化技术应用推广较好,在美国玉米种植中所占比例为 25%,马铃薯为 60%,果树为 32.8%;以色列则 90% 以上农业采用了水肥一体化技术。而我国水肥一体化技术推广应用相对滞后,在玉米、马铃薯、果园、甘蔗等的种植中该技术所占比例仅为 3% 左右^[10]。从实际推广应用来看,水肥一体化技术能将蔬菜、果树等经济作物的肥料利用率提高 50% 以上,节肥 30% 以上,增产 10%~50% 以上,并使果蔬品质有明显提升。当下我国水肥一体化的发展趋势是从经济作物发展到粮食作物、从设施农业发展到大田农业、从西北推广至全国^[11]。目前,国家对水肥一体化技术越来越重视,农业部于 2016 年 4 月发布《推进水肥一体化实施方案(2016-2020 年)》,其中提出:到 2020 年,我国水肥一体化技术推广面积达到 1.5 亿亩,新增 8000 万亩。

2 物联网水肥一体化智能灌溉系统设计

2.1 系统设计架构及组成

针对当前较为常见的规模经营农业种植园区,在中国水利水电科学研究院自主研发的水肥一体化智能管控系统软件基础上,对灌溉系统进行了设计。该物联网水肥一体化智能灌溉系统主要由 8 部分组成:(1)智慧平台(信息中心);(2)田间灌溉控制系统;(3)智能施肥系统;(4)农田气象环境监测系统;(5)远程土壤墒情测报系统;(6)远程管道压力、流量监测系统;(7)远程作物长势视频监测系统;(8)能效监测系统。其中,农田气象环境监测系统与远程作物长势视频监测系统采集田间雨量、温度、湿度及作物长势等参数信息,远程管道压力、流量监测系统与远程土壤墒情测报系统通过解码器采集管网压力、流量数据与土壤含水率及墒情状况信息,通过有线或无线传输至田间灌溉控制系统,进行信息识别与处理,并对智能施肥系统与能效监测系统进行调节,同时也可通过客户端访问智慧平台(信息中心)对灌溉控制系统进行参数调试,及时了解作物生长状况与灌溉系统运行状况,确保系统正常安全运行,促进作物稳产高产^[12-16]。系统架构及组成示意图如图 1 所示。

2.2 系统主要组成部分

(1)智慧平台(信息中心):主要完成功能包括实现多维信息存储与维护,对外精确展示每个区域的农田环境信息、水量信息、农业气象信息等,通过

智能灌溉管控软件平台进行报警提示与生产指导。

(2)田间灌溉控制系统:主要通过解码器系统与田间的电磁阀、流量传感器、压力传感器、墒情传感器等进行实时通讯,采集相关数据,从而进行灌溉

决策。灌溉控制器与田间设备通讯机制如图 2 所示。通过电脑、手机或 Ipad 可直接通过浏览器输入 IP 地址访问灌溉控制器页面,进行灌溉参数的设置与操作。

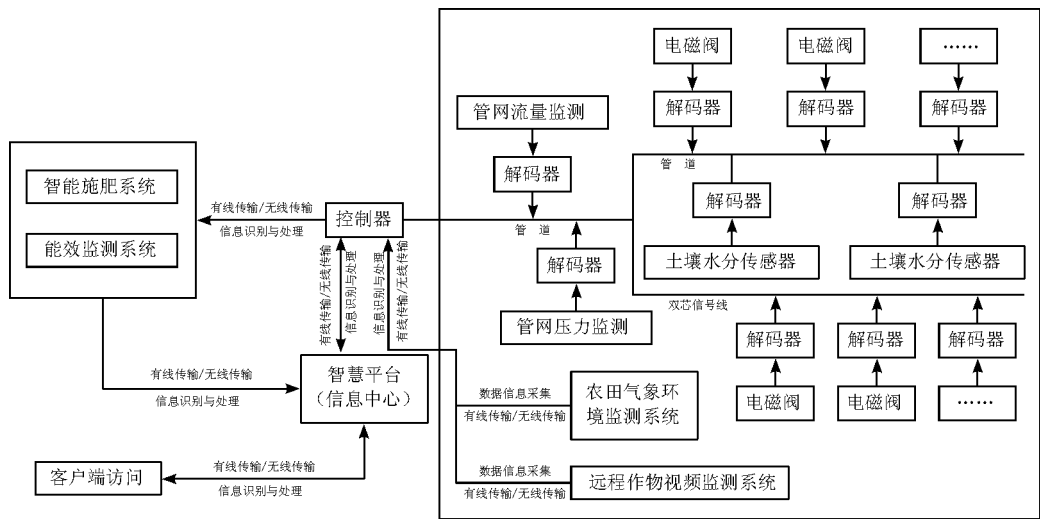


图 1 物联网水肥一体化智能灌溉系统架构及组成示意图

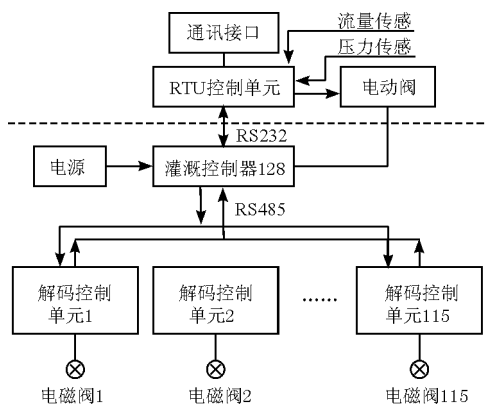


图 2 灌溉控制器与田间设备通讯机制示意图

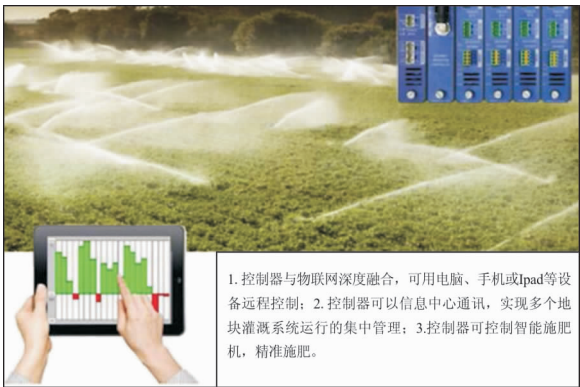


图 3 手机或 Ipad 直接访问控制器设置参数

(3)智能施肥系统:灌溉系统内置智能施肥控制程序,采用兼容 N、P、K 及微量元素等多个施肥通道的智能施肥机,通过调控肥液的 EC 及 pH 值来确保肥液参数与作物的生长需求相适应^[17]。

(4)农田气象环境监测系统:采用自动气象站采集雨量、湿度、温度等参数信息,并传送到智慧平台,根据内置数据库,结合彭曼公式分析得出参考作物需水量 ET_0 、作物系数 K_c 、作物实际需水量 ET_c 等,为制定灌溉制度提供合理参数^[18]。

(5)远程土壤墒情测报系统:根据实时土壤含水量及气象信息自动评估土壤墒情是否正常,并设定灌水上下限值。可实时请求田间信息,获得灌溉参数,迅速、准确、实时、高效、易用^[19,20]。

(6)远程管道压力、流量监测系统:通过低功耗传感器实时采集管道压力、流量数据,并传送到灌溉控制器和信息中心综合管控平台,从而保障灌溉系统安全运行。

(7)远程作物长势视频监测系统:采用数码相机或视频设备记录田间作物冠层影像信息,定期拍摄作物长势图片,并存入数据库。可实时查询作物长势变化,进行年际对比,以及时调整灌溉、施肥方案^[21]。

(8)能效监测系统:用于监测灌溉系统运行消耗的电能,可查询周、月、旬用电量,分析电能利用效率,根据电价分析投入产出比,为调整优化灌溉、充分利用能源及提高能效比给出参考建议。

3 应用案例分析

3.1 应用项目概况

该物联网水肥一体化智能灌溉系统 2015 年在河北省固安县顺斋瓜菜种植专业合作社 41.33 hm² 白菜、白萝卜、冬瓜、蒿子杆等蔬菜大棚滴灌工程上得到应用。顺斋瓜菜种植专业合作社位于固安县牛驼镇商家营村,处于永定河冲积而成的河北大平原中部,属暖温带半干旱半湿润大陆性气候,干寒同

期,雨热同季,光热充足,雨量集中,适合温室大棚蔬菜瓜果的种植。

应用地块灌溉系统控制滴灌温室大棚 115 个,每个温室布置一个电磁阀,在系统首部布置灌溉控制器,在干管上安装流量传感器,在灌溉系统远端布置压力监测器,在地块中间布置气象站,在所选典型温室地块中间布置墒情监测器,在办公区设置监测信息中心,管网系统平面布置图如图 4 所示,通讯系统平面布置图如图 5 所示。

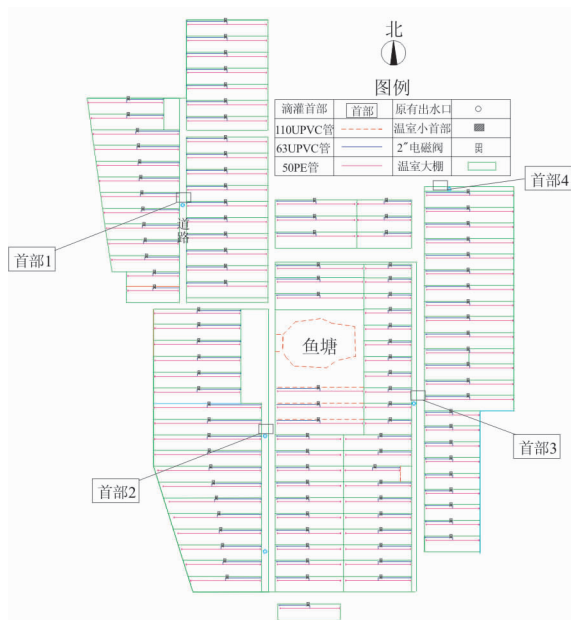


图 4 应用项目管网系统平面布置图

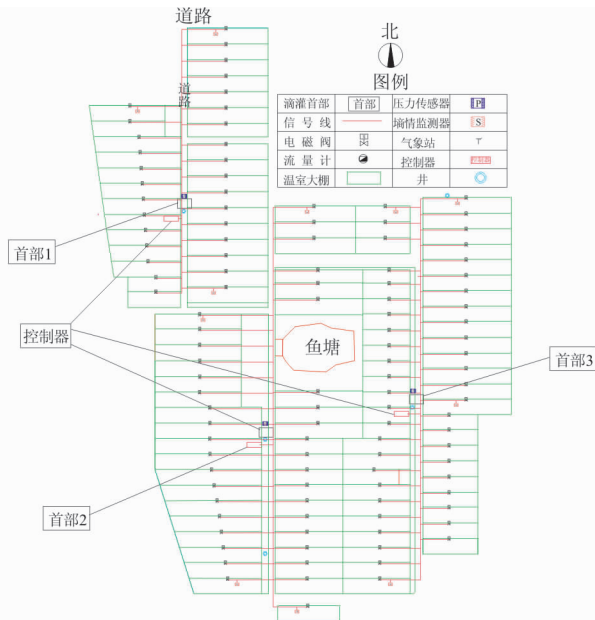


图 5 应用项目通讯系统平面布置图

3.2 应用效益分析计算

河北省固安县顺斋瓜菜种植专业合作社 2015 年物联网水肥一体化智能化滴灌工程灌溉面积 41.33 hm²,考虑效益分摊等影响因素,为便于比较,本文针对项目实施智能化灌溉后效益情况与原有普通滴灌工程效益情况进行分析研究。

3.2.1 年增效益计算

(1)增产效益。通过对典型灌面的调查,实施智能化灌溉后与传统地面灌溉相比年增产 7 437.10 kg/hm²,而在未安装水肥一体化智能化灌溉系统前,与传统地面灌溉相比,原有普通滴灌工程年增产为 3 264.88 kg/hm²,蔬菜综合价格按 1.60 元/kg 计,智能化灌溉年增产效益为 49.18 × 10⁴ 元,而原普通滴灌年增产效益为 21.59 × 10⁴ 元。

(2)省工效益。智能化灌溉工程实施后,大大降低了灌水劳动强度,节省了大量劳动力。根据典型灌面调查统计数据,与传统地面灌溉相比,项目区实施智能化灌溉后,年省工 90 个/hm²,而原有

普通滴灌工程年省工为 15 个/hm²,每个工日按 60 元计算,智能化灌溉年省工效益为 22.32 × 10⁴ 元,原普通滴灌年省工效益为 3.72 × 10⁴ 元。

(3)水肥药效益。智能化灌溉工程运行后,根据对典型灌面调查数据分析,和传统地面灌溉相比,每公顷可节水 3 000 m³,节约化肥 28%。由于智能化滴灌降低了大棚内空气湿度而减少了蔬菜病虫害的发生,每公顷可节约水肥药费用为 3 000 元,共计 12.40 × 10⁴ 元。而普通滴灌工程每公顷可节约水肥药费用为 1 200 元,其效益为 4.96 × 10⁴ 元。

根据上述分析,实施智能化灌溉后产生的年效益合计为 83.90 × 10⁴ 元。而普通滴灌工程的年效益合计为 30.27 × 10⁴ 元。

3.2.2 费用计算

(1)工程投资。该物联网水肥一体化智能灌溉系统工程投资为 328.40 × 10⁴ 元,而考虑折现率等影响因素,原来所采用普通滴灌工程投资为 125.78 × 10⁴ 元。

(2)年运行费。年运行费主要包括动力能耗费、工程维修费、设施更新费、工资及福利费等。

①动力能耗费。项目所处井灌区节水灌溉工程的动力能耗费即抽水所消耗的电费,本项目为水泵工程。

电费的计算,由机电设备的装机容量和扬程确定。电费的计算公式为:

$$E_e = 0.00272Q \cdot H \cdot P / \eta$$

(1)

式中: E_e 为电费,元; Q 为年用水量, m^3 ; H 为水泵净扬程, m ,按平均提水高度 100 m 计算; P 为电价,采用 0.45 元 / ($\text{kW} \cdot \text{h}$); η 为水泵效率,取 54%。

经计算,该智能化灌溉项目年电费为 4.22×10^4 元,原普通滴灌工程年电费为 7.64×10^4 元,详见表 1。

表 1 项目区智能化灌溉工程与原普通滴灌工程年动力能耗计算表

灌溉形式	年灌溉定额/ ($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)	单方水耗电/ ($\text{kW} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3}$)	年单位能耗费/ (元 $\cdot \text{hm}^{-2}$)	面积/ hm^2	年动力能耗费/ 元
物联网水肥一体化智能灌溉系统	4500	0.50	1020.00	41.33	4.22×10^4
普通滴灌工程	8160	0.50	1849.60	41.33	7.64×10^4

②年维修费。年维修费滴灌按工程投资的 3% ^[22-23],物联网水肥一体化智能灌溉工程为 9.85×10^4 元。普通滴灌工程为 3.77×10^4 元。

③设施更新费。按工程投资的 1.0% ^[22-23],物联网水肥一体化智能灌溉工程为 3.28×10^4 元,普通滴灌工程为 1.26×10^4 元。

④工资及福利费。按工程投资的 0.8% 计^[22-23],物联网水肥一体化智能灌溉工程为 2.63×10^4 元,普通滴灌工程为 1.01×10^4 元。

以上 4 项物联网水肥一体化智能灌溉工程年运行费合计 19.98×10^4 元,普通滴灌工程年运行费合计为 13.68×10^4 元。

3.2.3 经济评价 采用经济评价指标主要有:经济内部收益率、经济净现值和经济效益费用比,分别计算如下^[23]:

(1)经济内部收益率 $EIRR$ 为项目计算期内各年净效益现值累计等于零时的折现率,即:

$$\sum_{t=1}^N (B - C)_t (1 + EIRR)^{-t} = 0$$

(2)

式中: $EIRR$ 为经济内部收益率,%; B 为年效益,元; C 为年费用,元; t 为计算期各年的序号。

(2)经济净现值 $ENPV$:用社会折现率将项目计算期内各年的净效益折算到计算期初的现值之和表示,即:

$$ENPV = \sum_{t=1}^N (B - C)_t (1 + i_s)^{-t}$$

(3)

式中: $ENPV$ 为经济净现值,元; B 为年效益,元; C 为年费用,元; t 为计算期各年的序号; i_s 为社会折现率,%。

(3)经济效益费用比 $EBCR$:经济效益费用比为

项目效益现值与费用现值之比,即:

$$EBCR = \frac{\sum_{t=1}^N B_t (1 + i_s)^{-t}}{\sum_{t=1}^N C_t (1 + i_s)^{-t}}$$

(4)

式中: $EBCR$ 为经济效益费用比; B 为年效益,元; C 为年费用,元; t 为计算期各年的序号; i_s 为社会折现率,%。

该智能化灌溉工程 1 年建成,因节水灌溉工程偏属效益性较强的项目,因此取社会折现率 7%,工程使用期 20 年,根据计算结果,本项目经济内部收益率为 18.72%,大于社会折现率 7%;经济净现值为 310.52×10^4 元;经济效益费用比为 1.62。计算结果表明,从国民经济角度来衡量该工程是合理的。

此外,针对顺斋瓜菜种植专业合作社 41.33 hm^2 蔬菜大棚地块,将已实施后的物联网水肥一体化智能灌溉系统和未加入该系统前的普通滴灌工程经济效益情况进行比较(如表 2 所示)。

表 2 物联网水肥一体化智能灌溉系统与
普通滴灌工程指标对比

指标名称	物联网水肥一体化 智能灌溉系统	普通滴灌工程
投资额/元	328.40×10^4	125.78×10^4
年效益/元	83.90×10^4	30.27×10^4
年运行费用/元	19.98×10^4	13.68×10^4
经济净现值/元	310.52×10^4	42.70×10^4
经济内部收益率/%	18.72	11.53
经济效益费用比	1.62	1.17

从表 2 中可以看出,添加智能化灌溉系统后,虽然工程总投资额增加了 161.1%,但智能化灌溉工

程运行 20 年后的净现值是普通滴灌的 7 倍多,每年的效益是原来普通滴灌工程的两倍多,根据典型灌面调查统计分析,其增加的效益主要体现在增产、省工、节约水肥药等方面。故物联网水肥一体化智能灌溉系统的工程投资虽高,但其 20 年后产出效益比普通滴灌工程要高的多。

3.2.4 经济内部收益率敏感性分析 经济内部收益率作为充分考虑了资金时间价值的动态指标,可以不受标准收益率的影响,从动态的角度直接反映投资项目实际创造收益的能力,因此,经济内部收益率是项目投资决策依据的主要指标。为了找出投资

额、年效益和年运行费用对物联网水肥一体化智能灌溉系统项目的经济内部收益率影响情况,根据其效益分析结果,选择 $\pm 1\%$ 、 $\pm 5\%$ 、 $\pm 10\%$ 和 $\pm 15\%$ 的因素变化幅度,采用敏感度分析的方法进行了研究。选用相对敏感系数(RS) 作为指标^[24],其公式如下:

$$RS = \frac{[y(x \pm \Delta x) - y(x)]/y(x)}{\Delta x/x}$$

(5)

式中: x 为参数初始值; Δx 为参数的变化值; $y(x)$ 为目标变量初始值; $y(x \pm \Delta x)$ 为目标变量变化后数值。

表 3 投资额、年效益和年运行费用不同变幅对智能化灌溉项目经济内部收益率相对敏感系数表

变化指标	变化幅度/%							
	-15	-10	-5	-1	1	5	10	15
投资额	1.31	1.25	1.19	1.14	-1.13	-1.09	-1.04	-1.00
年效益	-1.53	-1.51	-1.50	-1.50	1.51	1.48	1.47	1.46
年运行费用	0.35	0.35	0.35	0.35	-0.36	-0.36	-0.36	-0.36

表 3 计算结果表明:物联网水肥一体化智能灌溉项目经济内部收益率对年效益比较敏感,且年效益变化时,经济内部收益率相对敏感系数绝对值变化不大;投资额对经济内部收益率影响适中,当投资额变化幅度为正数时,经济内部收益率的相对敏感系数绝对值随着投资额的增大而减小,当投资额变化幅度为负数时,经济内部收益率的相对敏感系数随着投资额的减小而增大;经济内部收益率对年运行费用的敏感性较差,且年运行费用的变化幅度对经济内部收益率相对敏感系数绝对值影响不大。

4 结 论

(1)通过对物联网水肥一体化智能灌溉系统的设计,有几个问题值得注意:一是设计时需要多关注设备选型,当前市场上气象观测设备基本成熟、稳定;压力传感器、流量计产品质量、精度差别较大;土壤墒情监测设备稳定性、精度差别较大;电磁阀作为智能灌溉最关键设备之一,其选型首先应该遵循安全性,可靠性,适用性,经济性四大原则,其次是需要根据 6 个方面的现场工况,即管道参数、流体参数、压力参数、电气参数、动作方式、特殊要求进行合理选择。二是系统正常维护保养是智能灌溉系统发挥其诸多优势的关键,因此在系统运行管护设计中要制定科学合理的管理机制。三是当下缺乏物智能化灌溉工程相应的技术标准、施工、安装与验收规范,相关部门应当

给予足够重视并尽快完善以加强引导。

(2)案例效益分析计算结果表明,与普通滴灌工程相比,智能灌溉系统投资虽大,但年效益的提高可使其在应用年限中获得较高的经济内部收益率,从而提高系统的收益创造能力。经济内部收益率的敏感性分析对其工程投资和后期的运行管理有一定的参考价值。

(3)案例应用结果表明,物联网水肥一体化智能灌溉不仅实现了智慧农业远程控制、手机种地方便省力;而且实现了精准化种植、高效化管理,有利于农业生产的标准化发展;同时促使农产品品质得到了进一步提高,实现了农产品质量安全实时监测,提高了农业生产效率,有效改善了农业生产环境。

(4)我国作为世界第一人口大国,保障粮食安全至关重要,物联网水肥一体化智能灌溉提质增产、降本增收优势显著。随着农业集约化、产业化、机械化经营模式的不断推广,农村劳动力短缺与老龄化不断加剧,其省工效益亦愈加可观。无污染、风景美作为当下现代化灌区建设的重点,其良好的水肥药效益也将受到人们更多关注。物联网水肥一体化智能灌溉系统具有较好的实用价值和应用前景,既能克服传统农业旱涝不均的弊端,推进农业生产精细化发展,又助于提升灌溉管理水平,是一项加快我国灌区现代化建设步伐,从农业大国向农业强国转变的关键技术。

参考文献:

- [1] Qiu J. China faces up to groundwater crisis[J]. Nature, 2010, 466(7304):308.
- [2] 汪国雅,邵亮全. 我国西部地区再生水资源合理配置与可持续发展[J]. 节能与环保, 2016(6):56-58.
- [3] 康绍忠,马孝义,曹红霞,等. 农业高效用水研究的未来战略与关键科学问题[C]//中国水利学会2001学术年会论文集, 2001.
- [4] Kaloxylas A, Eigenmann R, Teye F, et al. Farm management systems and the future internet era[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2012, 89(5):130-144.
- [5] 徐成波,马文武,阮成. 我国农村劳动力转移后的农村困境:表现及成因[J]. 农业经济, 2012(7):67-69.
- [6] 吴大付,孙夏耘,张伟. 我国农业集约化与持续化关系研究[J]. 农业现代化研究, 2008,29(4):417-420.
- [7] 康绍忠,许迪. 我国现代农业节水高新技术发展战略的思考[J]. 中国农村水利水电, 2001(10):25-29.
- [8] 王保云. 物联网技术研究综述[J]. 电子测量与仪器学报, 2009,23(12):1-7.
- [9] 吴勇,高祥照,杜森,等. 大力发展水肥一体化 加快建设现代农业[J]. 中国农业信息, 2011(12):19-22.
- [10] 王曰鑫. 腐植酸水溶肥料促进水肥一体化发展[J]. 中国农资, 2014(6):23.
- [11] 高祥照,杜森,钟永红,等. 水肥一体化发展现状与展望[J]. 中国农业信息, 2015(4):14-19.
- [12] 江新兰,杨邦杰,高万林,等. 基于两线解码技术的水肥一体化云灌溉系统研究[J]. 农业机械学报, 2016, 47(S1):267-272.
- [13] 朱洪清,于利娟,汪烨欢,等. 基于物联网的太阳能远程精准灌溉系统的研制和应用[J]. 中国农机化学报, 2014, 35(2):246-249.
- [14] 尤兰婷. 水肥一体化精准控制系统的设计与开发[D]. 武汉:华中农业大学, 2011.
- [15] 余国雄,王卫星,谢家兴,等. 基于物联网的荔枝园信息获取与智能灌溉专家决策系统[J]. 农业工程学报, 2016, 32(20):144-152.
- [16] 安进强,魏凯,王立乾,等. 基于物联网的精确灌溉控制技术[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2013, 41(12):220-226.
- [17] 吴松,杨春园,杨仁全,等. 智能施肥机系统的设计与实现[J]. 上海交通大学学报(农业科学版), 2008, 26(5):445-448.
- [18] 周晓倩. 基于GPRS的农田气象数据监测系统研究[D]. 杨陵:西北农林科技大学, 2014.
- [19] 赵丽,刘兵. 土壤墒情监测预报技术研究进展[J]. 现代农业装备, 2007(11):38-41.
- [20] 王吉星,孙永远. 土壤水分监测传感器的分类与应用[J]. 水利信息化, 2010(5):37-41.
- [21] 童领,陈曙光,王俊岭,等. 基于物联网的大田作物视频监测系统[J]. 农业与技术, 2014(11):250.
- [22] 中华人民共和国水利部. 水利工程水利计算规范 SL 104-2015, 中华人民共和国水利行业标准[S]. 北京:中国水利水电出版社, 2015.
- [23] 中华人民共和国水利部. 水利建设项目经济评价规范 SL 72-2013, 中华人民共和国水利行业标准[S]. 北京:中国水利水电出版社, 2013.
- [24] 薛静,毛萌,任理. DNDC模型在曲周试验站的参数灵敏度分析及率定[J]. 中国农业科学, 2013, 46(13):2695-2708.