

T/WEA

团 体 标 准

T/WEA XXXX—2026

北方大田玉米节水灌溉智能控制规程

Code of practice for intelligent control of water-saving irrigation
for maize in northern field areas

(征求意见稿)

2026 - XX - XX 发布

2026 - XX - XX 实施

中国智慧工程研究会 发布

目 次

前言 III

引言 V

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 总体原则与系统架构 3

5 监测系统与数据质量控制 5

6 灌溉决策与智能控制策略 9

7 系统建设与联调 14

8 运行维护与故障处理 18

9 节水增效评价与验收方法 23

附录 A（资料性） 灌溉决策与执行闭环流程 28

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国智慧工程研究会提出并归口。

本文件起草单位：

本文件主要起草人：

全国团体标准信息平台

引 言

北方地区（含东北、华北、西北东部等典型玉米主产区）降水时空分布不均、蒸发蒸腾量大、春季干旱与伏旱频发，叠加地下水超采、灌区供水紧张与用水成本上升等因素，使大田玉米生产面临“水资源约束增强—稳产增产需求不减”的长期矛盾。传统粗放灌溉方式普遍存在灌水定额偏大、灌溉时机依赖经验、田间渗漏与蒸发损失高、灌溉均匀性不足以及水肥管理脱节等问题，不仅降低水分利用效率与肥料利用效率，还可能诱发倒伏、根系缺氧、盐分返迁、病害加重等次生风险，进而影响产量稳定性与品质一致性。

近年来，喷灌、滴灌（含浅埋滴灌）、微喷灌、移动式节水灌溉等技术在北方大田玉米生产中逐步推广，配套的土壤水分传感、气象监测、作物长势感知、阀门与泵站自动化控制、无线通信与云边协同计算等数字化技术快速发展，为实现“按需供水、精准灌溉、动态调控、节水增效”提供了工程基础。与此同时，北方玉米生产的地块尺度大、地形与土壤差异显著、设施与能源条件参差不齐、农机作业频繁、运维主体多元（合作社、家庭农场、灌区管理单位、社会化服务组织等），导致智能控制系统在实际落地中仍存在监测点布设不规范、数据质量不稳定、控制策略不透明或不可解释、设备互联互通性差、运行维护责任边界不清、节水与增产效果评价缺少统一方法等突出问题。缺乏可执行、可检验、可对比的技术规程，已成为节水灌溉智能控制规模化应用与工程质量提升的重要制约因素。

本文件面向北方大田玉米节水灌溉的工程实施与运行管理需求，围绕“监测—决策—控制—评价—运维”的闭环体系，建立智能控制系统的总体架构与关键技术要求，明确数据采集与质量控制、灌溉决策模型与控制逻辑、分区分时调控策略、系统联调与验收、运行维护与安全管理、节水增效评价与持续改进等内容，旨在为项目规划设计、设备选型集成、施工安装调试、运行管理考核以及社会化服务提供统一依据，促进北方大田玉米灌溉从“经验驱动”向“数据驱动、模型支撑、智能调控”转型升级。

本文件的制定遵循可实施性与适用性原则，充分考虑北方地区灌溉水源条件（井灌、渠灌、井渠结合等）、灌溉方式（喷灌、滴灌、微灌及其组合）、供配电与通信条件、作业季节性与农机通行要求等工程边界条件，强调在保证产量稳定和 risk 可控的前提下实现用水效率提升与综合投入降低。通过统一术语体系、指标体系与验证方法，本文件可为相关方开展系统对比、绩效评估与技术迭代提供基础支撑，并为节水型社会建设、高标准农田与智慧灌区建设、数字农业发展等提供技术规范保障。

北方大田玉米节水灌溉智能控制规程

1 范围

本文件规定了北方大田玉米节水灌溉智能控制系统的总体原则与系统架构、监测系统与数据质量控制、灌溉决策与智能控制策略、系统建设与联调、运行维护与故障处理及节水增效评价与验收方法等内容。

本文件适用于北方大田玉米生产条件下，以节水增效、稳产提质为目标，采用喷灌、滴灌（含浅埋滴灌）、微喷灌及其组合方式的智能控制系统建设与运行管理，可用于新建项目、改造提升项目以及规模化社会化服务场景。对仅包含人工经验决策、无自动化执行与数据闭环能力的灌溉系统，不适用。本文件在应用时应结合灌区水源条件、供配电与通信条件、土壤类型与地块尺度、农机作业要求等边界条件进行工程化配置与参数整定。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB 5084 农田灌溉水质标准

GB/T 1.1 标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则

GB/T 2887 计算机场地通用规范

GB/T 22239 信息安全技术 网络安全等级保护基本要求

GB/T 27612.1—2023 农业灌溉设备 喷头 第1部分：术语和分类

GB/T 35273 信息安全技术 个人信息安全规范

GB/T 50085 喷灌工程技术规范

GB/T 50485 微灌工程技术标准

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

北方大田玉米 north china field maize

北方地区露地规模化种植条件下的玉米生产系统，通常具有地块尺度大、灌溉半径与管网覆盖范围大、农机作业频繁、气候干旱或季节性干旱显著等特征。

3.2

节水灌溉 water-saving irrigation

在保证作物产量与品质目标的前提下，通过工程、农艺与管理措施降低无效耗水，提高灌溉水利用效率与作物水分生产率的灌溉方式。

3.3

智能控制 intelligent control

基于监测数据、模型或规则对灌溉决策进行计算，并通过自动化执行机构实施阀门、泵站、施肥装置等控制动作，形成闭环调控的控制方式。

3.4

灌溉分区 irrigation zone

在同一灌溉系统内，依据地形、土壤、作物长势、管网水力条件、灌溉方式与管理边界等划分的独立控制单元。

3.5

田间监测 field monitoring

对土壤水分、土壤温度、土壤电导率、气象要素、作物长势或灌溉水量等进行连续或周期性采集的过程。

3.6

数据质量控制 data quality control

为保证监测数据准确性、完整性、时效性与一致性，对采集、传输、存储与应用全过程实施的校验、清洗、标定与异常处理活动。

3.7

灌溉决策 irrigation decision

依据土壤—作物—气象—水源—工程约束等信息，确定灌溉时机、灌溉定额、灌溉历时、分区顺序与流量配置的过程。

3.8

控制策略 control strategy

将灌溉决策转化为可执行的控制规则或控制模型的集合，包括阈值控制、日历控制、模型预测控制、分时轮灌控制等。

3.9

执行机构 actuator

用于实施控制指令的终端设备，包括电磁阀、蝶阀/球阀电动执行器、泵站变频器、流量调节阀、施肥泵等。

3.10

边缘控制器 edge controller

部署在现场端、具备数据采集、局部决策与控制输出能力的控制单元，可在网络中断或平台不可用时维持基本控制功能。

3.11

灌溉水利用效率 irrigation water use efficiency

单位灌溉用水量所形成的产量或经济产出指标，或反映灌溉水有效利用程度的综合指标。

3.12

作物需水量 crop water requirement

作物在一定生育阶段内为实现目标生长所需的蒸散耗水量，通常与参考蒸散、作物系数及土壤水分状况相关。

4 总体原则与系统架构

4.1 总体原则

4.1.1 目标导向原则

智能控制系统应以节水增效与稳产提质为目标，综合考虑水资源约束、灌溉方式特性、土壤—作物—气象条件、管网水力与供能条件，形成可解释、可验证、可维护的控制体系。系统应支持以地块或灌溉分区为最小管理单元的差异化调控，避免“一把尺子”导致的过灌或欠灌。

4.1.2 闭环控制原则

系统应建立“监测—决策—执行—反馈—修正”的闭环机制，至少应具备：监测数据实时采集与质量控制、灌溉决策计算、执行机构自动控制、灌溉过程与结果反馈记录、异常报警与人工接管等能力。对采用云端平台的系统，应配置边缘控制器保障离线可用性与安全性。

4.1.3 分层分域原则

系统宜采用分层架构，划分感知层、控制层、平台层与应用层，并明确现场域与云端域的功能边界。关键控制功能应优先在现场域实现，云端域用于优化、分析、报表与跨地块协同调度。系统应支持分区轮灌、分时供水与限流运行等典型灌区约束条件。

4.1.4 可靠性与可维护性原则

系统的关键链路（传感—通信—控制—执行）应具备故障诊断与降级运行能力。设备选型与安装应满足防水、防尘、防雷、抗低温与抗干扰等要求。运维应可标准化，传感器应可标定或替换，控制参数应可追溯，日志应可导出，便于责任划分与绩效核算。

4.1.5 安全合规原则

系统应满足用电安全、压力管网安全与信息安全要求。涉及联网平台与数据共享的，应明确数据权限、加密传输、身份认证、访问审计与备份机制；涉及取水计量与用水管理的，应满足当地取水许可、计量与用水统计相关制度要求。

4.2 系统功能架构

系统功能架构宜按“感知—决策—控制—执行—评价”组织，并形成可配置的模块化能力。典型架构见图1。

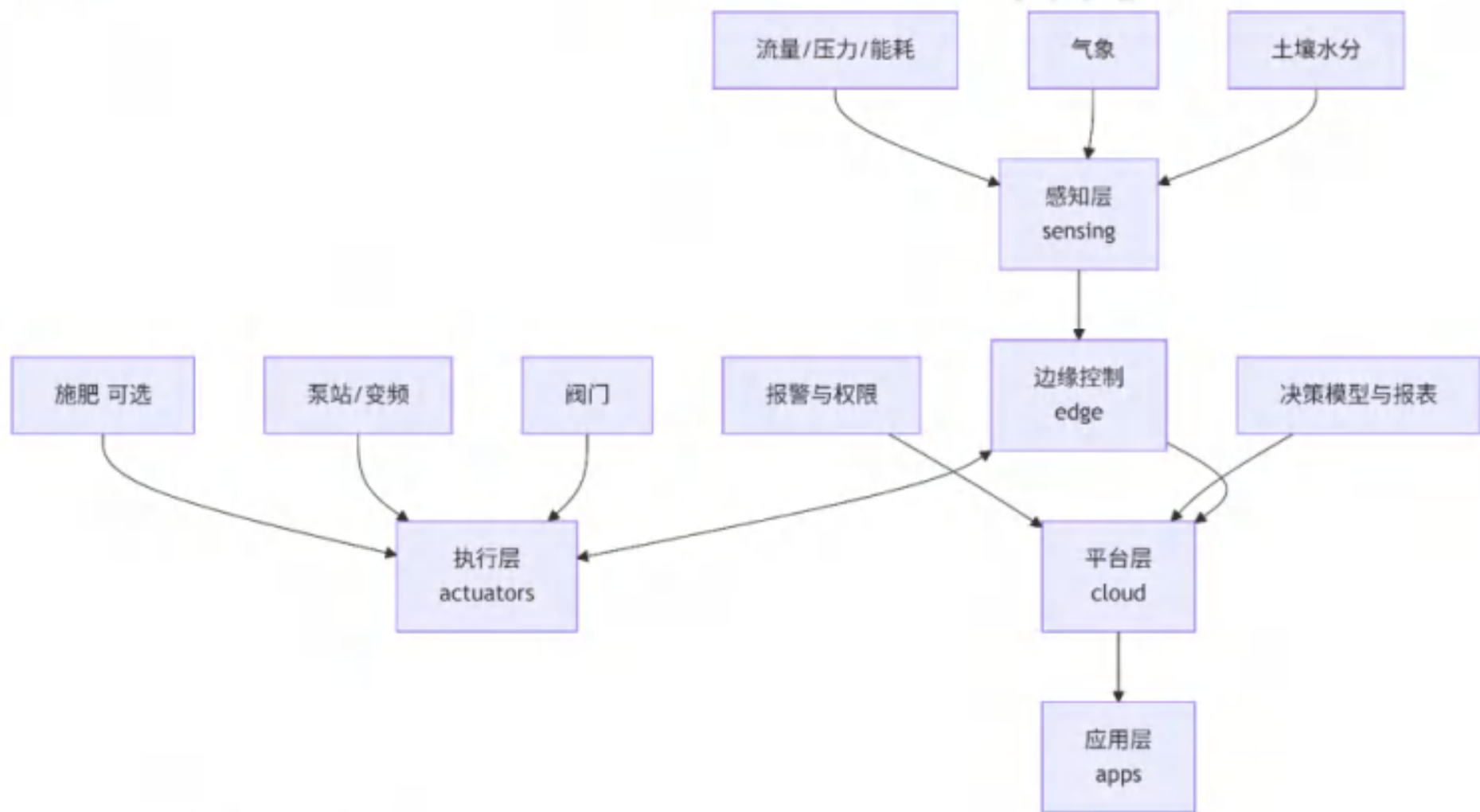


图1 北方大田玉米节水灌溉智能控制系统分层架构

系统分层的主要对象、配置要素与关键输出宜按表1执行。

表1 系统分层与典型配置要素

层级	主要对象	典型配置要素	关键输出
感知层	传感器与计量装置	土壤水分、气象、流量、压力、电量/能耗采集	原始数据、设备状态
边缘控制层	现场控制器与网关	采集协议、数据缓存、分区控制逻辑、离线保底策略	控制指令、现场日志
平台层	云端平台与数据库	数据存储、模型计算、权限管理、报警工单、统计报表	灌溉建议、绩效评价
应用层	管理端与移动端	分区配置、策略下发、运行监控、巡检维护、报表导出	管理决策与可视化

4.3 关键功能要求

系统应至少满足以下关键功能要求，并在后续章节中给出相应的配置、参数与验收方法：

- a) 分区管理：支持灌溉分区建模、分区参数配置、轮灌顺序与时间窗管理；
- b) 数据采集与质控：支持多源数据接入、缺测识别、异常值处理、标定记录与数据追溯；
- c) 灌溉决策：至少支持阈值控制或模型控制一种方式，能够输出灌溉建议的依据与关键参数；
- d) 自动控制与手动接管：支持自动/手动切换、紧急停机、断网保底策略与恢复策略；
- e) 计量与统计：具备分区用水量、灌溉次数、运行时长、能耗与投入统计，并支持导出；
- f) 报警与事件：具备压力异常、阀门故障、流量偏差、传感器故障、通信中断等报警能力并记录事件日志；
- g) 评价与改进：具备节水与产量相关的基础数据与对比口径，支持按生育期或灌季进行策略复盘与参数优化。

监测指标与采样频率宜设置最小集与推荐项见表2。

表2 监测指标最小集与推荐采样频率

指标类别	指标项	最小要求	推荐采样频率
土壤	体积含水量	分区代表点布设，支持标定与漂移识别	10 - 30 min
气象	降雨、气温、湿度、风速、辐射或等效ET0	支撑灌溉决策的基础气象要素	10 - 60 min
水力	管网压力、分区流量或总流量	支撑故障诊断与水量核算	1 - 5 min
计量	用水量、电量/能耗	支撑绩效评价与成本核算	15 - 60 min
作物	长势指数或冠层信息	支撑分区差异化与复盘优化	日尺度或周尺度

5 监测系统与数据质量控制

5.1 一般要求

- 5.1.1 监测系统应服务于灌溉智能控制的闭环运行，能够支撑灌溉时机判定、灌溉定额计算、分区轮灌调度、异常诊断与绩效评价等核心业务。监测指标应与灌溉方式、土壤类型、地块尺度、水源供给约束及管理精度相匹配，避免“仅有传感器而无法支撑决策”或“过度配置导致运维不可持续”。
- 5.1.2 监测系统应具备可追溯性。每个传感器、计量装置与监测站点应具有唯一编号，记录其型号、量程、精度等级（或标称误差）、安装位置（分区、地块、经纬度/相对位置）、安装深度、安装日期、标定信息、维护记录与更换记录，并与平台数据点位一一对应。
- 5.1.3 监测系统应具备环境适应性与可靠性。现场设备应满足防水、防尘、防腐蚀、防冻、抗紫外与抗电磁干扰要求；在北方地区应重点考虑低温、冻融、风沙与雷暴天气影响。关键节点应配置防雷与接地措施，供电系统应具备过流、过压与短路保护。
- 5.1.4 数据采集、传输与存储应保证时效性与完整性。系统应明确数据采集周期、上传周期、缓存策略与补传机制；当通信中断时，边缘端应能够缓存数据并在恢复后补传，确保关键生育期数据不中断或可追补。

5.2 监测指标与点位布设

5.2.1 分区代表性原则

监测点位应满足灌溉分区代表性要求。对同一分区内土壤类型、地势、管网末端压力或作物长势差异显著的，应按差异进行分层布点或加密布点。监测点位应避开田间明显异常位置（如地头压实区、车辙区、沟渠旁、积水洼地、明显盐斑区），除非该类位置被明确纳入管理目标。

5.2.2 土壤水分监测布设

a) 布点数量：每个灌溉分区土壤水分监测点不宜少于1处；当分区面积较大或土壤差异显著时，应设置2处及以上，并以分区面积、土壤异质性与灌溉均匀性评价结果综合确定。

b) 安装深度：应覆盖玉米主要根系活动层。宜设置至少2个深度层（例如浅层与中层），对滴灌或浅埋滴灌且湿润体分布明显的，可增加深度层以识别深层渗漏与根层缺水的分层差异。

c) 安装位置：对滴灌/微灌系统，应考虑滴头位置与作物行距，传感器应布设在代表性湿润体范围内；对喷灌系统，应布设在喷洒均匀性较高且能代表分区平均补水的位置。

d) 保护措施：传感器引线及连接件应采取防拉拽、防啃咬动物、防机械损伤措施，地表出线处应设置明显标识并避开农机作业路径。

5.2.3 气象监测布设

气象监测宜以灌溉控制服务半径为依据设置。气象站应布设在开阔、通风良好、远离高大遮挡物与热源的位置，传感器高度与安装方式应满足设备规范要求。气象数据可采用区域站点共享，但应评估与地块微气候差异，必要时通过校正系数或本地简易站补偿。

5.2.4 水力与计量监测布设

a) 流量监测：宜在泵站出口、干管或分区支管设置流量计，用于分区用水量核算、轮灌调度与异常诊断。

b) 压力监测：宜在干管、分区末端或典型不利点设置压力传感器，用于识别堵塞、泄漏、阀门故障与泵站工况异常。

c) 电量/能耗监测：对泵站或关键用能节点宜设置电量计量，用于能耗核算与节能评价。

d) 校验与比对：流量与用水量应可与取水计量或灌区计量口径进行对账或比对，确保用水统计口径一致。

5.3 传感器安装、标定与巡检

5.3.1 安装要求

传感器安装应遵循“减少扰动、紧密接触、避免空气缝隙”的原则。土壤传感器安装孔应尽量小，回填应分层夯实以恢复原状密实度，避免形成“漏斗效应”导致局部入渗异常，从而引入系统性偏差。

5.3.2 初始标定与在地校准

- a) 初始标定：设备投入运行前应进行初始标定或校验，至少应核查零点、满量程响应与重复性，并记录标定结果。
- b) 在地校准：土壤水分传感器应结合当地土壤质地进行在地校准或修正。可通过取土烘干法或经验证的等效方法建立校正关系，形成分区或土壤类型的修正参数。
- c) 校准频次：在关键生育期（拔节至灌浆）前宜开展一次巡检校验；对漂移敏感或历史漂移显著的点位应增加校验频次。

5.3.3 巡检与维护

巡检内容至少包括：设备供电与通信状态、传感器外观与固定情况、线缆与接头完好性、防护箱密封性、数据连续性与异常报警记录。对灌溉季节前应进行系统性开季巡检，对季末应进行关季维护与必要的拆卸保管。

5.4 数据采集与传输要求

5.4.1 采集频率与时间同步

监测系统的采样频率应满足表2推荐范围，并与灌溉控制周期匹配。边缘控制器、传感器网关与云平台应进行时间同步，确保数据时间戳一致，避免因时钟漂移造成“雨后仍触发灌溉”等控制错误。

5.4.2 传输可靠性与缓存补传

现场端应具备断网缓存能力，缓存时长不宜低于72 h；通信恢复后应支持按时间顺序补传并进行去重处理。对关键报警数据（例如压力骤降、流量异常、阀门故障）应支持优先上报。

5.4.3 数据安全与权限

联网系统应对数据传输与访问进行权限控制。应至少具备账号认证、分角色授权、访问审计与数据备份机制。对跨主体共享的数据，应明确数据权属与使用范围，避免因权限不清导致运维与责任界定困难。

5.5 数据质量控制与异常处理

5.5.1 数据质量指标

系统应至少对以下质量维度实施控制并可在平台侧可视化：

- a) 完整性：单位时间内有效数据点占比；
- b) 时效性：数据从采集到可用于决策的延迟；
- c) 合理性：数据是否处于物理可行范围与作物-土壤合理范围；
- d) 一致性：同分区不同深度、相邻点位或与降雨/灌溉事件的逻辑一致性；

- e) 稳定性：长期漂移、噪声水平与突变频次。

5.5.2 异常数据识别规则

应至少包含以下识别规则，并允许按分区配置阈值：

- a) 越界值：超出传感器量程或明显超出合理范围的数据；
- b) 突变值：相邻时刻变化幅度超过设定阈值且无法由降雨/灌溉解释；
- c) 恒定值：长时间不变化（疑似掉线或传感器失效）；
- d) 事件不一致：发生灌溉或降雨后土壤水分无响应，或无灌溉/无降雨却出现不合理上升；
- e) 交叉不一致：同分区多点位差异长期扩大且无土壤差异与灌溉不均匀性证据支撑。

5.5.3 异常处置与数据可用性分级

系统应对异常数据进行处置分级，至少包括：

- a) 可修正：通过校正、插值或与邻近点位融合可恢复；
- b) 暂不可用：需等待补传或人工核查；
- c) 不可用：确认传感器故障或安装失效，应剔除并触发维护工单。

对不可用数据，系统应自动切换到保底策略（见5.6与第6章），并提示管理人员进行现场检查。

5.5.4 数据融合与代表值计算

当同分区存在多个土壤水分点位或多深度层时，应明确分区代表值计算方法（例如加权平均、分层阈值控制、以最不利点控制等），并说明其适用条件。代表值方法一经确定，不宜随意变更。如需变更，应形成参数变更记录并评估对历史对比的影响。

5.6 离线运行与保底控制要求

5.6.1 离线保底原则

当出现通信中断、平台不可用或关键传感器不可用时，边缘控制器应能够维持基本灌溉控制能力，避免因“无数据—停灌”导致干旱减产，或因“失控—持续灌溉”导致过灌与渗漏。

5.6.2 保底策略设置

保底策略应至少包含：

- a) 基于日历/生育期的最大灌溉频次与单次最大灌溉量限制；
- b) 基于压力与流量的安全联锁（异常时停机/关阀）；
- c) 恢复策略：通信恢复或数据恢复后，逐步回切到正常策略，并对离线期间灌溉事件进行补记与校核。

5.7 记录与追溯

系统应保存灌溉事件记录（分区、开始/结束时间、目标水量或历时、实际水量、压力/流量曲线、异常报警与处置）、传感器维护记录、参数变更记录与权限操作日志。记录应支持导出，用于节水绩效核算、运行复盘、责任界定与持续改进。

6 灌溉决策与智能控制策略

6.1 一般要求

6.1.1 控制目标

灌溉决策与控制策略应以“节水不减产、稳产提质、风险可控”为总体目标，在水源供给、管网水力、能源与作业窗口等约束条件下，确定分区灌溉时机、灌溉定额（或灌溉历时/目标入渗量）、轮灌顺序与执行参数。控制策略应与监测能力相匹配，确保可执行、可解释、可验证。

6.1.2 控制对象

智能控制的对象宜包括：

- a) 分区阀门（电磁阀/电动阀）；
- b) 泵站启停与变频调速；
- c) 流量调节阀或稳压装置（如配置）；
- d) 施肥装置（可选，与水肥一体化系统联动时）。

控制策略应明确各对象的控制变量与边界，例如阀门开闭状态、泵站目标压力/流量、单区最大灌溉历时、轮灌切换延时等。

6.1.3 策略类型与选择原则

控制策略应至少支持阈值控制或日历控制作为保底策略，具备条件时宜采用基于作物需水与土壤水分平衡的模型控制或规则+模型融合控制。策略选择应遵循：工程约束优先（供水与水力安全）—安全连锁优先（防干转、超压、漏失）—数据质量优先（数据不可用时自动降级）—可用性优先（现场可理解、可维护）的原则。

6.1.4 策略参数管理

所有策略参数（如目标含水量区间、触发阈值、雨后修正系数、轮灌顺序、最大灌溉历时、限流阈值等）应具备版本管理与变更记录。参数变更应支持回溯与对比分析，避免因频繁调参导致难以评价节水增效效果。

6.2 玉米生育期划分与控水原则

6.2.1 生育期划分

北方大田玉米节水灌溉控制宜按以下生育期划分实施参数化管理：

- a) 苗期（出苗至拔节前）；
- b) 拔节期（拔节至大喇叭口前）；
- c) 大喇叭口期（大喇叭口至抽雄吐丝前）；
- d) 抽雄吐丝期（开花授粉关键期）；
- e) 灌浆期（灌浆至蜡熟前）；
- f) 成熟期（蜡熟至收获）。

注：实际日期应结合当地品种熟期、播期、积温与田间长势确定，系统应支持按“日期+积温+人工确认”三种方式修正生育期边界。

6.2.2 控水基本原则

- a) 关键期保障：抽雄吐丝期应优先保障水分供应，避免严重水分亏缺导致授粉不良与减产；
- b) 适度亏缺：苗期与成熟前期可在风险可控前提下实施适度亏缺灌溉，以节水并促进根系下扎、降低倒伏风险；
- c) 分区差异：对砂质土、坡地、管网末端压力不足或风大蒸发强的分区，应适当提高触发敏感度或缩短轮灌周期；
- d) 雨后修正：降雨后应及时修正灌溉计划，避免雨后叠加灌溉造成过灌与深层渗漏；
- e) 工程约束优先：在供水限额或轮灌约束下，应以“关键期优先、弱势区优先、末端区优先”的原则分配灌溉时段与流量。

6.3 决策输入与数据可用性判定

6.3.1 决策输入

灌溉决策输入应至少包括：

- a) 分区土壤含水量（至少一层或分层代表值）；
- b) 降雨与近24 h累积降雨；
- c) 气象要素或参考蒸散 ET_0 （可由本地气象站或区域站提供）；
- d) 分区用水计量或流量信息（用于核算与校核）；
- e) 工程约束参数（泵站能力、可用时段、限流/限压阈值）。

具备条件时，可引入：作物长势指标、土壤盐分/电导率、天气预报降雨概率与量级等。

6.3.2 数据可用性分级

系统应对关键输入数据进行可用性分级并触发策略降级：

- a) A级（可用）：关键数据完整且通过质控；
- b) B级（可用但需修正）：存在少量缺测或疑似漂移，可通过融合/插值修正；
- c) C级（不可用）：关键传感器失效或数据逻辑不一致，触发保底策略（6.8）。

数据可用性判定结果应记录并作为灌溉事件的解释信息保存。

6.4 灌溉触发判据与目标区间设定

6.4.1 触发判据设置方法

触发判据宜采用以下一种或多种方式组合：

- a) 土壤水分阈值触发：当根层代表含水量低于下限阈值时触发；
- b) 土壤水分亏缺触发：当可利用水亏缺达到设定比例时触发；
- c) 水量平衡触发：基于ET₀与降雨推算土壤水分平衡，当亏缺达到阈值触发；
- d) 日历窗口触发：在供水窗口内按最小轮灌周期触发（保底或限水情形）。

对滴灌/微灌系统宜优先采用“土壤水分阈值+水量平衡修正”的组合，对喷灌系统宜采用“阈值触发+轮灌周期约束”的组合。

6.4.2 生育期目标区间

系统应为各生育期配置根层水分管理目标区间（上限与下限），并结合土壤类型、灌溉方式与管理目标进行整定。目标区间应满足：

- a) 抽雄吐丝期下限应高于其他时期（更敏感）；
- b) 苗期与成熟期允许更宽区间（适度亏缺）；
- c) 不同土壤类型区间应有差异：砂质土下限不宜过低以防快速干旱，黏重土上限不宜过高以防通气不良；
- d) 目标上限应与田间持水量和入渗能力相协调，避免频繁达到饱和导致渗漏。

注：具体数值建议由项目依据当地试验、历史产量—用水数据或农业技术推广部门推荐参数确定，并在系统参数表中固化。

6.4.3 灌溉终止判据

灌溉终止宜采用以下判据之一或组合：

- a) 达到目标上限含水量；
- b) 达到设定灌溉定额（mm）或目标入渗量；
- c) 达到最大灌溉历时；
- d) 达到系统安全阈值（压力异常、流量偏差、漏失报警等）触发联锁停机。

终止判据应优先保证安全联锁，其次保证防过灌。

6.5 灌溉定额与历时计算

6.5.1 基本计算思路

灌溉定额宜依据“亏缺补偿+效率修正”确定。系统应支持以下至少一种计算路径：

a) 基于土壤水分：按目标区间下限到上限的补水量计算，并考虑有效根层深度与土壤体积含水量变化；

b) 基于水量平衡：按累计 $ET_0 \times$ 作物系数—有效降雨—上次灌溉补水的差额计算；

c) 基于经验配方：按生育期推荐定额表执行（用于保底或数据不足情形）。

系统应记录定额计算采用的路径与输入数据来源。

6.5.2 效率与损失修正

灌溉定额应考虑灌溉方式与田间应用效率。对喷灌系统应考虑风漂与蒸发损失，对滴灌系统应考虑局部湿润与管网末端压差导致的均匀性偏差。对均匀性较差的分区，应通过“分区系数”或“末端补偿”方式修正灌溉历时或轮灌频次。

6.5.3 历时换算

当系统以历时控制为主时，应将目标灌溉水量换算为分区灌溉历时，换算应基于分区流量或流量—压力关系曲线。若分区未配置可靠流量计，应通过初次标定试验建立“阀门开度/压力—流量—历时”关系，并在运行中根据计量数据动态校正。

6.6 分区轮灌与限流调度策略

6.6.1 轮灌基本规则

系统应支持分区轮灌。轮灌策略至少应包括：

a) 分区优先级：按生育期敏感度、土壤干旱程度、末端不利点、长势弱势区等设定；

b) 轮灌队列：支持队列自动生成与人工调整；

c) 切换逻辑：分区灌溉结束后延时切换至下一分区，避免水锤与压力波动；

d) 时间窗约束：支持夜间/白天、电价峰谷、供水窗口等约束。

6.6.2 限流/限压约束

当水源能力受限或需控制管网压力时，系统应支持：

a) 同时开阀数量限制；

b) 泵站变频调速保持目标压力；

c) 分区流量上限控制（如具备调节阀）；

d) 末端压力保障策略（对末端区延长历时或提高优先级）。

6.7 执行控制与安全联锁

6.7.1 阀泵协同控制

启泵、开阀、关阀、停泵应按“先稳压后开阀、先关阀后停泵”的原则编排，必要时采用缓开缓闭策略。系统应支持阀门状态回读（开到位/关到位）与泵站运行反馈（频率、电流、压力）。

6.7.2 安全联锁

系统应至少设置以下联锁条件：

- a) 低压/无水联锁：防止泵站干转；
- b) 超压联锁：防止管网爆管与接头脱落；
- c) 流量偏差联锁：实际流量与目标偏差超过阈值时报警并可停机；
- d) 漏失/破管联锁：压力骤降且流量异常时触发紧急停机与关阀；
- e) 电气保护联锁：过流、欠压、过温等保护触发时停机。

联锁触发后应自动生成事件记录与处置建议，并支持人工复位流程。

6.8 雨后修正与天气预报联动

6.8.1 有效降雨判定

系统应区分总降雨与有效降雨。有效降雨可依据降雨强度、持续时间、土壤初始含水量与地表径流风险进行折算。折算规则应参数化并可追溯。

6.8.2 雨后灌溉计划修正

降雨发生后，系统应：

- a) 重新计算分区水分状态与亏缺；
- b) 自动推迟或取消计划灌溉，避免雨后叠加灌溉；
- c) 对已开始轮灌的系统，允许在满足安全条件下“当前区完成—后续区暂停”或“立即停止并记录”的两种策略，并明确触发阈值。

6.8.3 预报联动

具备条件时可接入短期降雨预报。系统可在降雨概率较高且预期雨量可显著补水时，适度延后灌溉，但不得在抽雄吐丝期因预报不确定性导致严重亏缺。预报联动应设置保守系数并可由管理者启停。

6.9 运行模式与策略降级

6.9.1 运行模式

系统应至少提供：

- a) 自动模式：按策略自动决策并执行；
- b) 半自动模式：系统生成灌溉建议，人工确认后执行；
- c) 手动模式：人工直接控制阀泵，系统仅监测与报警。

三种模式切换应有权限控制并记录日志。

6.9.2 策略降级

当出现关键数据不可用、通信中断或设备故障时，应自动降级至保底策略。保底策略至少应包含：最大单次灌溉历时、最小轮灌间隔、关键期优先队列与安全联锁不变。降级与恢复过程应记录并可追溯。灌溉决策与执行闭环流程见附录A。

6.10 记录、评价与参数整定要求

6.10.1 记录要求

每次灌溉事件应记录：分区、触发原因（阈值/模型/人工）、目标定额或历时、实际用水量、执行开始/结束时间、压力/流量曲线摘要、降雨修正信息、异常报警与处置结果、数据可用性等级与策略版本号。

6.10.2 策略整定与季节复盘

灌季内宜在拔节前与抽雄吐丝前分别进行一次策略整定检查。灌季结束后应开展复盘，至少分析分区用水量、灌溉次数、土壤水分达标率、异常事件频次、产量（或估产）与水分生产率等指标，并据此调整下一季的阈值、轮灌优先级与保底限制参数。

6.10.3 与水肥一体化的协同

当系统联动施肥装置时，应在灌溉处方中明确施肥时段、浓度/比例与冲洗流程，防止末端浓度过高与堵塞风险。施肥联动应纳入联锁条件（如流量不足禁止施肥）并记录施肥事件数据。

7 系统建设与联调

7.1 建设流程与文件化要求

7.1.1 建设流程

智能控制系统建设宜按“需求与边界条件确认—方案设计—设备选型与分区建模—施工安装—单机调试—系统联调—试运行—验收移交”的流程实施。对改造提升项目，应在方案设计阶段开展现状评估（含管网水力、供电与通信、既有阀泵与计量能力、农机作业冲突点等），并形成差距清单与改造范围说明。

7.1.2 技术文件

建设单位或实施单位应形成并保存至少包括以下技术文件：

- a) 系统总体方案（含分层架构、功能边界、运行模式、数据流与控制流说明）；
- b) 灌溉分区划分与参数表（分区面积、灌溉方式、代表点位、阀门编号、设计流量/压力等）；

- c) 设备清单与安装图（传感器、阀门、泵站控制、流量/压力计量、网关/边缘控制器等）；
- d) 通信与供电方案（网络拓扑、协议、地址规划、供电回路、保护与接地）；
- e) 控制策略说明（阈值/模型/轮灌/限流、保底策略、联锁条件、参数版本）；
- f) 调试与联调记录（单机测试、联动测试、异常与整改闭环）；
- g) 试运行报告与验收资料（见7.6与第9章）。

7.2 方案设计与分区建模要求

7.2.1 边界条件确认

方案设计前应至少确认：水源类型与供水能力（井灌/渠灌/井渠结合）、供水时段与限额、泵站能力与管网允许压力范围、灌溉方式与均匀性现状、土壤类型与地块地形、品种与播期、通信覆盖与供电条件、运维主体与管理流程。

7.2.2 分区划分原则

灌溉分区应综合考虑地形土壤同质性、作物长势差异、管网水力边界、阀门控制边界与运维可达性。分区划分应满足：

- a) 同一区内灌溉方式一致或可按同一控制策略管理；
- b) 同一区内水力条件可保证设计流量与压力；
- c) 分区规模与轮灌窗口相匹配，避免单区过大导致关键期供水不及时；
- d) 分区边界与农机作业路线相协调，减少对阀井与传感器的机械损伤风险。

7.2.3 参数建模与编号规则

应建立统一的编号体系，至少覆盖：地块编号、分区编号、阀门编号、传感器编号、流量/压力点位编号、泵站与回路编号。编号应在现场实体标识、边缘控制器配置、平台点位与报表中保持一致，避免因映射错误导致误灌或漏灌。

7.3 设备选型与配置要求

7.3.1 通用要求

设备选型应满足北方农田环境下防水、防尘、防冻、防腐蚀与抗干扰要求，并与供电条件、通信条件、安装方式及维护能力相匹配。关键设备应具有状态回读或故障指示能力，便于远程诊断。

7.3.2 传感与计量设备

土壤水分、气象、流量、压力与能耗等设备的量程、精度（或标称误差）与采样周期应满足本文件第5章与表2要求。流量计量宜优先选用可远传、可累计、可校验的计量装置；压力传感器宜配置过压保护与防水接头。

7.3.3 边缘控制与通信设备

边缘控制器应支持：多协议采集、数据缓存补传、分区控制逻辑、离线保底策略、安全联锁与事件日志。通信方式可采用有线、蜂窝网络、专网或其他方式组合，应在方案中明确链路冗余或关键节点容错策略。

7.3.4 执行机构与泵站控制

阀门/执行器应与管径、工作压力、启闭频次与电源形式匹配，并满足防护等级要求。泵站控制应支持启停、变频调速（如配置）、压力/流量反馈、故障报警与保护联锁；对多泵并联场景应具备轮换策略与故障旁路策略。

7.4 施工安装要求

7.4.1 安装通则

安装应符合相关电气安全、管网安全与设备安装规范要求。现场施工应采取防误接、防短路、防水渗与防冻胀措施，施工完成后应恢复田间作业条件，确保阀井、传感器与线缆不影响农机通行与田间管理。

7.4.2 传感器安装

土壤传感器安装应满足第5章要求，重点控制安装深度、与土壤紧密接触、回填密实与防水封装。气象站安装应满足开阔与代表性要求；流量与压力点位应满足直管段、安装方向与维护空间要求（按设备说明执行）。

7.4.3 电气与防雷接地

泵站、阀控箱、边缘控制器与气象站等应按方案实施接地与防雷保护。供电回路应设置过流、漏电与过压保护，室外电控箱应满足防水防尘要求并设置明显安全标识。

7.4.4 通信与布线

有线布线应采取防水接头与防鼠咬措施，线缆应固定并避开机械损伤风险区。无线通信设备应在满足信号强度的前提下选择安装位置，并在方案中明确天线方向、安装高度与防雷措施。

7.5 调试与联调要求

7.5.1 单机调试

单机调试应至少覆盖：

- a) 传感器读数合理性（零点/量程/响应）与时间戳一致性；
- b) 阀门开闭方向、到位信号、开闭时间与失败告警；
- c) 泵站启停、变频调速（如有）、压力/流量反馈与保护动作；

- d) 数据上传、缓存补传与断网恢复；
- e) 平台点位映射正确性（编号一致、单位一致、量纲一致）。

7.5.2 系统联调

系统联调应在“分区轮灌—阀泵协同—限流限压—报警联锁—数据记录与报表”全链路上进行验证。联调应至少包含：

- a) 轮灌队列生成与切换延时设置验证；
- b) 灌溉触发—执行—终止的闭环验证（含图2流程关键节点）；
- c) 雨后修正逻辑验证（模拟降雨数据或现场降雨事件复核）；
- d) 联锁测试：低压/超压/流量偏差/通信中断触发后的停机与告警；
- e) 离线保底策略验证：断网情况下按保底限制运行，恢复后补记与回切。

7.5.3 整改闭环

联调发现的问题应形成整改清单，明确问题描述、影响范围、责任单位、整改措施、验证结果与关闭日期。涉及策略参数变更的，应记录参数版本号与变更原因。

7.6 试运行与验收

7.6.1 试运行期限

系统试运行宜覆盖至少一个典型灌溉周期。对关键期（抽雄吐丝期）上线项目，宜覆盖关键期前后的运行窗口，以验证高敏感阶段的触发与保障能力。试运行期间应持续记录灌溉事件、报警事件、数据完整性与人工干预情况。

7.6.2 验收原则

验收应以“功能可用、控制可控、数据可信、安全可靠、运维可持续”为原则，采用资料审查+现场抽查+联动测试相结合的方式进行。验收时应核查系统与分区模型一致性、编号一致性与策略版本一致性。

7.6.3 关键验收项目与指标

关键验收项目与指标宜按表3执行。表3为在工程可实施与风险控制导向下提出的验收建议指标，用于建设单位、监理单位与运维单位对照核验。

表3 关键验收项目与建议指标

验收类别	验收项目	建议指标/判定要点
数据与质控	数据完整性	关键点位（含土壤水分、降雨、流量/压力）有效数据占比不低于95%（试运行期统计），缺测具备补传或说明
数据与质控	时间同步	平台与边缘端时间戳一致，事件顺序可追溯；灌溉事件与水分响应逻辑一致
控制与执行	阀泵协同	启停顺序符合设定；压力波动在允许范围内；无明显水锤风险表现

表3 关键验收项目与建议指标（续）

验收类别	验收项目	建议指标/判定要点
控制与执行	触发与终止	至少完成一次“触发—执行—终止—记录”闭环验证，终止判据有效
安全联锁	低压/超压/偏差	联锁可触发停机/关阀并报警；复位流程明确且有权限控制
离线能力	断网保底	断网后可按保底策略运行（或保持安全停机），恢复后可补记并回切
统计与报表	用水核算	分区或系统用水量统计可导出，与计量口径可对账或合理解释偏差
运维与权限	权限与日志	角色权限清晰，关键操作留痕（策略变更、手动接管、复位等）

7.6.4 验收资料

验收资料应至少包括 系统方案与竣工图、设备清单与合格证明、分区模型与参数表、调试与联调记录、试运行报告、验收测试记录、运维手册与培训记录、账号与权限清单、数据备份与恢复说明。

8 运行维护与故障处理

8.1 运维组织与职责

8.1.1 运维组织设置

运行维护应建立“平台运维—现场运维—应急保障”分工体系，并明确责任主体、响应时限与考核指标。对合作社、家庭农场、灌区管理单位与社会化服务组织共同参与的项目，应通过合同或运维协议明确边界，避免出现故障无人处置或多头处置导致的风险扩大。

8.1.2 职责分工

运维职责至少应包括：

- a) 平台运维：账号与权限管理、数据备份、策略版本管理、模型与规则维护、报警规则维护、报表与接口维护；
- b) 现场运维：阀门与电控箱巡检、泵站设备巡检与保养、传感器巡检与标定、线缆与通信设备维护、防雷接地检查；
- c) 数据与计量：流量/用水计量对账、传感器数据质量监控、数据缺测补传核查、计量设备校验计划执行；
- d) 应急保障：重大故障应急预案组织、备品备件管理、应急停机与复位审批、关键期保供调度；
- e) 培训与改进：操作培训、季节复盘、参数整定与持续改进闭环。

8.1.3 权限与审批

系统应建立分级权限 只读监控、日常操作、策略参数调整、联锁复位、账号管理等。涉及策略版本发布、联锁复位、批量远程开阀/启泵等高风险操作，应设置双人复核或审批机制，并保留审计日志。

8.2 运维制度与例行巡检

8.2.1 运维制度

应建立包括但不限于以下制度：

- a) 例行巡检制度（巡检周期、内容、记录与闭环）；
- b) 报警响应制度（响应分级、处置时限、升级路径）；
- c) 变更管理制度（参数变更、设备更换、软件升级的审批与验证）；
- d) 计量与对账制度（用水、电量、运行时长统计口径一致）；
- e) 季节性维护制度（开季/关季维护、冻季保护）。

8.2.2 巡检频次（最低要求）

巡检频次应与运行强度、关键期敏感度及历史故障率相匹配，最低要求如下：

- a) 灌季前（开季）：不少于1次系统性巡检与联动测试；
- b) 灌季中：不少于每7 d 1次现场巡检；抽雄吐丝期宜加密至每3 d 1次或按灌溉周期巡检；
- c) 灌季后（关季）：不少于1次关季维护与设备状态评估；
- d) 极端天气前后：雷雨、大风、寒潮后应开展专项检查（防雷、供电、通信、气象站、裸露线缆等）。

8.2.2 巡检内容

巡检至少应覆盖：

- a) 供电与保护：电源电压、漏电保护、接地、防雷器状态；
- b) 通信与链路：网关在线率、信号强度、数据上传延迟、缓存补传是否正常；
- c) 执行机构：阀门到位信号、开闭时间、异常卡滞、阀井渗水与冻胀风险；
- d) 泵站：启停与变频状态、电流/温升、压力/流量反馈、保护动作记录；
- e) 传感器：外观与固定、引线与接头、读数合理性、漂移与恒定值；
- f) 数据与报警：关键点位数据完整性、异常规则触发情况、处置闭环情况；
- g) 现场安全：高压/旋转部件防护、警示标识、阀井盖板与电控箱锁闭。

8.3 传感器维护与标定管理

8.3.1 维护要求

传感器维护应遵循“先核查供电通信一再核查安装状态—后核查标定参数”的顺序。土壤传感器应重点检查回填沉降、空气缝隙、积水与盐分结晶影响；气象站应重点检查倾斜、遮挡与雨量筒堵塞；压力与流量计应重点检查安装方向、接头渗漏与直管段条件变化。

8.3.2 标定与校准

- a) 土壤水分传感器应建立在地校准或修正参数，并记录校准方法、样点、日期与结果；
- b) 流量计量装置应按设备说明或管理要求制定校验计划，必要时与取水计量口径进行比对；
- c) 校准参数变更应形成版本记录，并关联到数据处理与灌溉决策日志，保证可追溯。

8.3.3 更换与报废

出现下列情况之一应更换或报废：

- a) 连续缺测且排除供电通信原因；
- b) 读数长期漂移且无法通过校准修正；
- c) 外壳破损、进水、锈蚀或电气失效；
- d) 与灌溉/降雨事件响应明显不一致且复核确认失效。

更换后应完成点位映射校核与数据质控复核，防止“旧编号指向新设备”造成历史数据混乱。

8.4 执行机构与泵站运维

8.4.1 阀门与阀控箱

- a) 阀门应检查启闭灵活性、到位信号与回读一致性；对启闭时间明显变长或到位异常的应及时检修；
- b) 阀井应防渗、防积水、防冻胀，井内电缆接头应防水密封；
- c) 阀控箱应保持锁闭与防水，端子排应防松动、无烧蚀，接地可靠。

8.4.2 泵站与变频系统

- a) 泵站应按设备说明进行润滑、冷却与过滤维护，检查电机温升、电流波动与振动异常；
- b) 变频器参数应与控制策略匹配，禁止未经审批擅自修改关键参数（如最大频率、加减速时间、过压/欠压阈值等）；
- c) 应定期检查止回阀、泄压阀与稳压装置，防止水锤风险与超压；
- d) 对多泵系统应执行轮换策略，避免单泵长期高负荷运行导致寿命缩短。

8.4.3 管网与过滤系统

滴灌/微灌系统应重点维护过滤器（网式/叠片/砂石），建立反冲洗与压差监测机制；当压差超过设定阈值时应报警并执行反冲洗或停机保护，避免堵塞造成分区供水不足与灌溉不均。

8.5 报警分级、响应与工单闭环

8.5.1 报警分级

报警宜分为三级：

- a) 一级（紧急）：超压、低压/无水、疑似破管漏失、泵站保护触发、人员触电风险等；
- b) 二级（重要）：阀门失灵、关键传感器失效、流量偏差持续、通信长时间中断（影响控制）、过滤压差异常等；
- c) 三级（一般）：单点数据异常、短时通信波动、非关键报表异常等。

8.5.2 响应要求

- a) 一级报警应立即触发联锁停机或关阀，并在平台与现场同时报警；运维人员应按预案快速到场处置；
- b) 二级报警应在规定时限内处置，关键期宜缩短响应时限；处置期间系统应自动降级或按保底策略运行；
- c) 三级报警应纳入工单排期处理，形成闭环即可。

8.5.3 工单闭环

报警处置应形成工单记录，包含：报警类型、发生时间、影响分区、初判原因、处置措施、恢复时间、复核结果与预防措施。对重复发生的报警应进行根因分析并形成改进计划。

8.6 故障诊断与处置流程

8.6.1 诊断通用步骤

故障诊断宜按以下步骤执行：

- a) 确认故障类别（数据、控制、执行、水力、电气、通信）；
- b) 核查系统日志与事件时间线（灌溉事件、报警事件、参数变更、断网恢复）；
- c) 现场核查关键状态（阀门到位、泵站工况、压力/流量读数、过滤压差）；
- d) 采取安全措施（必要时停机/泄压/断电）；
- e) 排除与修复（更换部件或调整参数）；
- f) 复核与恢复（联调测试、回切自动模式）；
- g) 记录与总结（工单闭环与预防措施）。

8.6.2 常见故障与处置要点

- a) 土壤水分读数长期不变：优先核查供电、通信、采样周期与点位映射；再核查探头安装状态与进水；必要时更换并重新校准；
- b) 灌溉后水分无响应：核查分区阀门是否真正打开、流量是否到位、滴灌堵塞或喷灌喷头异常、传感器是否位于代表性湿润体；必要时调整点位或分区代表值算法；
- c) 压力骤降且流量异常：疑似破管漏失或大面积泄漏，应触发联锁停机并分段排查；
- d) 流量偏低：可能为过滤堵塞、阀门未到位、末端压不足或管网局部堵塞，应结合压力曲线定位；
- e) 频繁超压报警：核查变频参数、阀门切换延时、止回阀与稳压装置，必要时优化启停序列与缓开缓闭；
- f) 通信中断：启用离线保底策略，优先保障关键期供水；恢复后核查补传与日志一致性。

8.7 离线运行、应急保障与恢复

8.7.1 离线运行管理

当平台不可用或通信中断时，应启动离线保底策略（见6.9与5.6），并明确由现场负责人实施巡检与手动接管条件。离线期间的灌溉事件应在通信恢复后自动补记；对未能自动补记的，应由运维人员手工补录并注明原因。

8.7.2 应急处置

应建立应急预案，至少覆盖：破管漏失、泵站故障、停电、雷击损坏、关键期严重干旱风险、极端降雨导致排水不畅等情形。应急处置应遵循“人员安全优先—工程安全优先—关键期保供优先”的原则。

8.7.3 恢复与回切

故障排除后应进行恢复测试：阀泵联动、关键传感器数据合理性、报警复位流程与权限校验。回切自动模式前，应确认策略版本、分区参数与点位映射一致，避免因恢复过程的临时改动引发误灌。

8.8 备品备件与工具管理

8.8.1 备品备件清单

应根据系统配置建立备品备件清单，至少包含：常用阀门执行器或电磁阀线圈、关键传感器（土壤水分、压力）、通信模块或天线、保险与防雷器件、密封件与接头、过滤器滤芯（适用时）。关键期前应核查备件库存与可用性。

8.8.2 工具与测试设备

宜配备必要的现场测试工具：万用表、绝缘测试工具（适用时）、压力表与流量核验工具（或便携式核验装置）、手持终端（用于点位核对与调试）、防水接头与压接工具等。

8.9 运维培训与考核

8.9.1 培训要求

应对运维人员开展至少包括以下内容的培训：

- a) 系统架构与运行模式（自动/半自动/手动）；
- b) 分区模型与编号体系；
- c) 策略参数含义与调整边界；
- d) 报警分级与处置流程；
- e) 安全联锁与复位审批；
- f) 传感器安装、标定与数据质控；
- g) 泵站与电气安全、压力管网安全。

8.9.2 考核与绩效

应建立运维考核指标，建议至少包括：关键数据完整性、报警响应时效、故障复发率、离线事件处置合规性、关键期供水保障情况、节水增效指标完成情况等。考核结果宜用于指导参数整定与运维资源配置优化。

8.10 数据备份、审计与持续改进

8.10.1 数据备份

平台应设置定期备份机制，至少包含配置参数、分区模型、策略版本、灌溉事件记录与报警工单记录。备份应可恢复验证，避免“有备份不可用”。

8.10.2 审计与追溯

系统应保留关键操作审计日志，包括：策略发布、阈值调整、手动接管、联锁复位、账号与权限变更、点位映射变更等。日志应支持导出并按灌季归档。

8.10.3 持续改进

灌季结束应开展复盘，至少包括：灌溉达标率、分区差异、异常事件分布、设备故障统计、节水与产量指标对比、运维成本与响应时效评估，并形成下一季改进清单（参数优化、点位调整、设备升级与制度完善）。

9 节水增效评价与验收方法

9.1 一般规定

9.1.1 评价目的

节水增效评价应服务于智能控制系统的建设验收、运行考核与持续改进，重点验证系统在满足稳产提质与风险可控前提下的节水效果、用水效率提升、运行可靠性与管理效能提升，并为策略参数整定、分区优化与设备改造提供依据。

9.1.2 评价原则

评价应遵循“口径统一、数据可追溯、对照可比、结果可解释”的原则。评价应明确基准、边界条件与统计口径，避免因气象差异、播期差异、品种差异、供水制度变化等非系统因素造成误判。评价应优先使用系统自动记录数据（用水量、灌溉事件、压力流量曲线、报警与工单等），并结合必要的现场核查数据（产量、土壤水分达标率、灌溉均匀性抽测等）。

9.1.3 评价周期

评价周期宜分为：

- a) 单次灌溉事件评价（用于运行质量控制）；

- b) 生育期阶段评价（苗期、拔节期、大喇叭口期、抽雄吐丝期、灌浆期等）；
- c) 灌季评价（播种至收获的全季节）；
- d) 多年评价（用于项目长期绩效与策略迭代）。

建设验收阶段宜采用“试运行期+关键期覆盖”的评价口径；运行考核宜以灌季评价为主，辅以关键期阶段评价。

9.2 评价边界与对照设置

9.2.1 评价边界

评价边界应至少明确：

- a) 评价对象范围（地块/项目/灌区片区）、灌溉方式与分区数量；
- b) 水源条件与供水制度（限额、供水时段、轮灌约束）；
- c) 控制系统范围（感知、控制、执行、平台）及其启用状态（自动/半自动/手动）；
- d) 统计口径（用水量计量点位与口径、有效降雨处理口径、能耗统计口径）。

9.2.2 对照设置方法

应采用以下一种或多种方式建立对照基准，并在评价报告中说明选择理由：

- a) 历史对照：同一地块或同一项目在未采用智能控制或采用传统经验灌溉条件下的历史年度数据；
- b) 同期对照：同一地区相近条件下采用传统灌溉管理的对照地块（尽量保持品种、播期、土壤与灌溉方式一致）；
- c) 分区对照：同一项目内设置“智能控制区”和“人工控制区”进行对比（适用于试点与阶段性验证）。

注：对照数据应满足可比性要求；若对照期气象差异显著，应采用气象校正或在报告中进行敏感性说明。

9.3 数据来源与质量要求

9.3.1 数据来源

评价数据来源应包括但不限于：

- a) 系统自动记录：分区用水量、灌溉次数、灌溉历时、压力/流量曲线、泵站运行参数、能耗、报警与工单记录、策略版本与参数变更记录；
- b) 田间观测：土壤水分达标率抽测、灌溉均匀性抽测（适用时）、作物长势记录（可选）；
- c) 产量与投入：实收产量或估产、籽粒含水率（如用于折算）、肥料投入与作业成本（可选）；
- d) 气象与降雨：本地气象站或区域气象数据、降雨记录与有效降雨折算记录。

9.3.2 数据质量要求

用于评价的关键数据应满足：

- a) 完整性：关键点位有效数据占比应达到项目验收或运维考核要求；
- b) 可追溯性：计量点位、分区映射与时间戳一致，关键事件（灌溉、降雨、停电、断网）可追溯；
- c) 一致性：用水量统计与计量口径可对账或合理解释偏差；
- d) 异常处理透明：缺测、插值、剔除与修正应有记录，并说明对评价结果的影响。

9.4 评价指标体系

评价应至少包括以下核心指标：

- a) 节水率；
- b) 灌溉水利用效率或水分生产率；
- c) 产量稳定性（或单位面积产量）；
- d) 土壤水分达标率；
- e) 运行可靠性（数据完整性、控制成功率、故障/报警指标）；
- f) 能耗与成本。

9.5 评价方法与统计口径

9.5.1 灌溉事件级评价

对每次灌溉事件，宜评价：触发原因、目标定额/历时、实际用水量、执行曲线是否稳定、终止是否按判据完成、灌后土壤水分响应是否合理、是否触发报警与人工干预。事件级评价用于快速发现“误灌、漏灌、堵塞、末端不足、过灌渗漏”等问题。

9.5.2 生育期阶段评价

应按第6章生育期划分，对各阶段分别统计：灌溉次数、灌溉用水量、达标率（缺水与过灌占比）、关键期保障情况与异常事件频次。阶段评价用于识别“关键期保障不足”或“非关键期过灌”的策略偏差。

9.5.3 灌季评价

灌季评价应汇总：总用水量、节水率、产量与水分生产率、能耗指标、控制成功率与数据完整性，并形成分区对比（至少给出干旱风险高的分区与过灌风险高的分区）。灌季评价结果应作为下一季策略整定与设备改造的依据。

9.5.4 统计与显著性说明

对具备同期对照或分区对照的项目，可采用统计方法比较差异（如均值对比、置信区间等）。当采用统计检验时，应说明样本量、显著性水平与数据分布假设。对不满足统计条件的，可采用工程解释与多指标一致性判断。

9.6 验收方法与判定

9.6.1 验收类型

节水增效验收宜分为：

- a) 建设验收（试运行期的功能与运行质量为主）；
- b) 运行绩效验收（以灌季绩效为主）；
- c) 阶段性验收（试点扩面、改造提升后的阶段确认）。

9.6.2 验收方法

验收应采用“资料审查+数据核验+现场抽查+必要的对照分析”相结合的方式：

- a) 资料审查：核查策略版本、分区模型、计量口径、运维记录、报警工单闭环；
- b) 数据核验：核查用水量统计、事件日志、数据完整性与时间同步；
- c) 现场抽查：抽查阀门到位、泵站联锁、关键传感器读数合理性与安装状态；
- d) 对照分析：按9.2确定的对照口径，给出节水率与产量/水分生产率变化的解释。

9.6.3 判定原则

验收判定应坚持“安全与可靠性先决、节水增效综合评价”的原则：

- a) 若存在系统性安全隐患（联锁失效、误控导致超压/漏失风险）或关键链路不可用（长期缺测、无法闭环控制），应判定不通过并整改；
- b) 对节水增效指标应采用综合判定，不得以单一指标否定整体效果；对关键期保障不足导致明显减产风险的，应判定为不通过或限期整改；
- c) 对受供水制度变化、极端气象、灾害等因素影响导致指标偏离的，应在报告中说明并进行合理归因。

9.7 评价报告编制要求

9.7.1 报告内容

评价报告应至少包括：

- a) 项目概况（区域、面积、灌溉方式、分区数量、水源条件、供水制度）；
- b) 系统配置（监测点位、计量口径、控制对象、策略类型与版本）；
- c) 数据概况（关键数据完整性、异常处理说明）；
- d) 灌溉运行统计（事件、用水量、能耗、报警与工单）；
- e) 节水增效结果（节水率、水分生产率/效率、达标率、产量/估产与稳定性）；
- f) 对照与归因分析（对照设置、气象差异说明、工程约束说明）；
- g) 问题清单与改进建议（分区差异、设备与策略优化、运维改进）。

9.7.2 附表与数据归档

报告应附关键统计表与必要曲线示例（如典型轮灌曲线、压力/流量异常示例），并归档原始数据或数据链接，确保可复核。

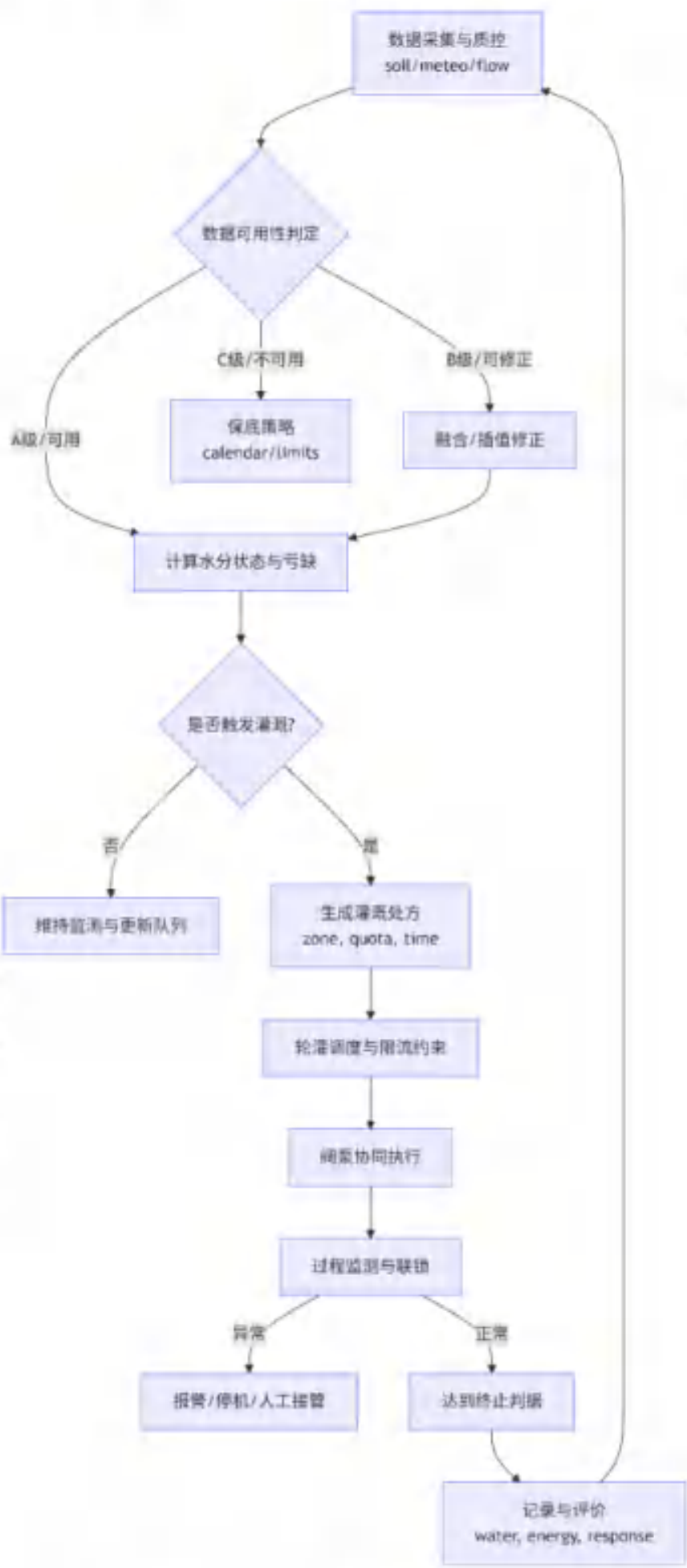
全国团体标准信息平台

附 录 A

(资料性)

灌溉决策与执行闭环流程

灌溉决策与执行闭环流程见图A. 1。



图A. 1 灌溉决策与执行闭环流程