植物表型智能温室建设设计要点探析

徐伟楠　周　刚

中国中元国际工程有限公司 北京 100089

【摘　要】：植物表型智能温室是支撑作物表型组学研究、种质评价和精准育种的重要科研设施，其建设质量直接影响环境控制精度、植物培养稳定性及表型数据可靠性。相较普通生产温室，表型研究温室更强调自然环境利用、环境参数精准调节、植物自动转运、水肥定量供应及多系统协同运行。围绕科研任务需求，建设中需统筹温室朝向、围护结构、采光通风、功能分区和设备布置，并将 AGV 运输、水肥一体化、新能源利用及智能控制平台纳入整体设计。同时，根据植物规模、检测频率和设备处理能力优化运输节拍与管网配置，减少人工操作引起的环境扰动和试验误差。科学处理建筑空间、机电系统与科研工艺之间的关系，可增强植物表型研究的连续性、重复性和运行效率。

【关键词】：植物表型；智能温室；AGV 运输；水肥一体化；环境控制

DOI:10.12417/2811-0536.26.10.062

植物表型是植物基因型与环境相互作用后形成的外在表现，其形态、生理和生化特征能够反映植物生长状态及环境适应能力。伴随高通量育种和表型组学研究的发展，传统依靠人工搬运、人工观测和经验式环境调节的试验方式已难以满足大规模、连续化研究要求。植物表型研究温室需要在较长试验周期内保持温度、湿度、光照和水肥条件相对稳定，同时承担盆栽植物频繁转运、自动检测和数据采集等任务。由此，温室设计已从单纯满足植物生长条件，逐步转向科研空间、环境控制、智能物流和精准灌溉协同配置，对建筑布局、设备选型及系统运行提出了更高要求。

1 植物表型温室总体规划设计

（1）明确科研功能定位：植物表型智能温室的空间与设备配置宜由科研任务反推，而非沿用普通生产温室的种植逻辑。若研究对象以玉米、小麦、水稻等盆栽作物为主，设计阶段需明确材料数量、植株高度、冠幅、花盆规格、试验周期和日检测频次，再据此核定种植床架尺寸、运输载荷及成像工位数量。涉及株高、叶面积、冠层结构、叶色、冠层温度等指标时，可配置 RGB、三维成像、热红外和高光谱等设备，并固定拍摄距离、视角和背景条件，避免重复拆装改变成像基准。若承担干旱、盐胁迫或高温处理，还宜设置独立的环境控制单元，使各处理组在温湿度、水肥和光照条件上具有清晰边界，并保留重复样本与随机化摆放空间。科研型温室更强调数据重复性，床架编号、花盆编码、试验处理、表型任务和环境记录宜在建设初期统一规则，为自动识别、连续追踪和数据关联提供基础；针对植株生育期变化，还需校核苗期与成熟期的空间差异，避免冠层超出相机视场。

（2）合理组织功能分区：温室内部宜形成种植区、缓存区、表型检测区、AGV 运输区、水肥机房、能源设备区和维护区等相互衔接的功能单元，其中种植区承担培养，检测区承担图像与生理参数采集，缓存区用于平衡运输节拍和检测节拍[1]。床架可采用矩阵布置，主运输通道保持连续，AGV 转弯、会车、回充及故障处理位置预留，避免设备前形成排队。表型检测区墙面和地面宜减少高反射材料，较多采用哑光浅灰或中性背景，以降低反射光对机器视觉分割和叶缘识别的干扰；成像设备附近还需设置遮光帘或独立暗室，使不同批次图像维持一致的曝光条件。水肥管线、动力电缆、弱电桥架和数据线宜沿床架边缘或设备带集中敷设，检修口避开 AGV 运行轨迹，同时在检测设备附近预留维护净距。种植区与检测区之间设置过渡和临时停放位置，可防止灌溉后的滴水进入精密成像设备区域，设备房与控制柜集中布置后，也更便于供电、通信和后期检修。

（3）充分利用自然条件：自然采光和自然通风直接关系温室能耗及植物生长环境稳定性，设计时宜依据太阳高度角、主导风向、气温和降水条件确定建筑朝向、屋面形式及开窗位置。围护材料可选用高透光低铁玻璃或漫射型温室玻璃，屋架、檩条等构件宜控制截面宽度和遮光面积，减少结构阴影对冠层光照均匀性的影响；天窗与侧窗形成上下对流路径，晴热天气优先依托自然通风排热，强辐射时启动外遮阳或内遮阳系统。对于精准控温试验单元，自然通风宜与风机、湿帘、加热和机械制冷设备联动，并按照设定温湿度区间分级启停，避免设备频繁切换引起环境波动。光照不足季节可补充 LED 植物灯，结合光合有效辐射传感器控制启停时段，使天然光与人工光协同供给。雨水条件较好的地区可设置屋面雨水收集设施，经沉

淀和过滤后用于非关键灌溉或清洗，在满足试验环境一致性的前提下降低新水和能源消耗。

2 自动运输与科研作业设计

（1）配置 AGV 运输系统：大规模盆栽植物表型检测具有搬运频繁、单盆定位要求高和作业节拍固定等特点，AGV 更适合承担种植区与检测区之间的重复运输[2]。实际配置宜依据单盆质量、托盘尺寸、日检测量和输送距离选定潜伏式或顶升式 AGV，托盘底部设置统一定位槽或限位结构，减少运输过程中花盆偏移。导航方式可采用二维码、磁导航或激光 SLAM，在检测工位对成像位置要求较高时，可增加机械限位、视觉校正或二次定位机构，使植株进入 RGB、三维或高光谱设备后保持固定姿态。温室自主移动平台也可采用激光雷达、视觉里程计及惯性测量单元融合定位，以适应光照变化明显、通道狭窄及 GPS 信号不足的室内环境。AGV 额定载荷需留有安全余量，电池容量则按连续运行时长、单次任务距离及充电间隔核算，充电位宜布置在非主通道区域。对于高秆作物，还需结合冠幅及枝叶外伸范围校核运输净空，并采用缓启停控制，减少加减速造成的植株倾斜和机械扰动。

（2）优化运输路线组织：AGV 运输路线需与表型检测节拍同步核算，避免车辆数量增加后在成像工位前形成拥堵。常见流程可按“种植床架—取样点—缓存位—检测工位—返回位”组织，缓存位数量依据单盆检测时间、车辆周转周期和高峰任务量设置；若 RGB 拍摄耗时较短，而三维重建或高光谱扫描耗时更长，可将不同检测设备分设工位，由调度系统按任务类型进行分流。主通道适宜采用环形或单向流线，减少交叉、倒车和重复转弯，转弯半径需结合 AGV 车体尺寸、托盘外廓及安全间距共同校核，床架端部则预留取放和避障空间。检测完成后，系统宜按照原床位编号将植株送回既定位置，避免长期位置变化引起光照、风速和温度差异，干扰连续表型测量。遇到检测设备占用或异常停机时，可将植株暂存于缓冲区，待工位恢复后再继续检测；多台车辆同时作业时设置路权优先级和交叉口让行规则，使检测、回充和故障绕行任务在高负荷状态下保持有序运行。

（3）完善智能作业管理：自动运输的价值并不局限于减少人工搬运，更重要的是把植株身份、运输任务和表型数据建立稳定对应关系[3]。每盆植物可设置 RFID 或二维码，编码关联品种、处理组、播种日期、床位、灌溉策略和检测计划，AGV 取盆后由读码器核验身份，检测设备按照任务编号自动调用拍摄参数，并将图像、时间戳和环境数据写入同一记录。若某盆植物未完成规定检测、称重结果异常或运输途中出现定位失败，系统宜生成异常任务并进入人工复核，避免直接覆盖原始记录。设备调度还需考虑充电、维护、故障绕行和任务优先级，使单台车辆停机时仍可由其他车辆接续作业；对于关键试验批次，可保留每日任务完成率、平均等待时间、工位利用率和设备报警记录。重复测量任务宜锁定同一植株的检测路径和设备组合，降低更换工位产生的系统误差；原始图像与算法提取结果分层保存，便于后期复核、重新计算和算法迭代，使植物全生育期的表型信息具有完整的追溯关系。

3 能源与水肥系统设计

（1）加强新能源综合利用：植物表型智能温室全年承担控温、补光、灌溉、运输和数据采集等任务，能源系统既要保证试验连续运行，又需控制长期运维成本[4]。太阳能光伏宜布置在附属建筑、设备房屋面或停车棚等不影响主温室采光的位置，避免组件遮挡有效透光区域；冷热负荷相对稳定的项目，可由地源热泵或水源热泵承担基础冷热量，在夏季高温和冬季低温阶段再由辅助冷热源补偿。能源管理平台宜对空调、补光、水肥、AGV、服务器及表型设备实施分项计量，连续记录日耗电量、峰谷负荷、单位试验面积能耗和典型设备运行时长，据此核查不同科研任务下的能耗构成。围护结构可配置保温幕、双层中空玻璃及气密性较好的门窗，夜间减少热损失，夏季则配合外遮阳、自然通风和湿帘降温削减冷负荷。服务器、控制器和关键成像设备适宜配置 UPS 或应急电源，防止瞬时断电造成采集任务中断；同时将能源设备启停状态与室内温湿度、光照数据同步存档，便于分析设备运行、能耗变化与科研环境波动之间的对应关系，并据此优化后续能源调度策略，必要时按季节修订设备启停阈值与峰谷用电时段，并形成全年能源系统运行台账。

（2）设计精准水肥系统：水肥条件直接影响株高、叶面积、生物量、冠层温度及叶片含水状态等表型指标，科研温室更适合采用定量、分区、可追溯的灌溉方式。供液端可设置原水箱、肥液母液罐、过滤器、流量计、EC 和 pH 检测单元，再由变频泵向不同试验分区供液；盆栽端采用滴箭、压力补偿滴头或独立支路，减少相邻盆体之间的水肥串扰。智能水肥装备可利用蠕动泵、文丘里吸肥器和静态混合器完成母液吸取、比例混配及均匀混合，并与环境监测单元联动控制。开展干旱胁迫试验时，可在关键盆位配置称重平台，依据盆体质量变化确定单次灌水量，使各处理组

保持预设的基质含水梯度；营养胁迫试验则适宜设置独立肥液配方、储液容器和供液回路，减少处理液交叉污染。主管道可采用耐腐蚀 PE 或 PVC-U 材料，根据床架布局形成环状或枝状管网，末端设置冲洗、排空和取样接口。不同处理组还需设置独立阀组与编号，肥液切换前完成支路冲洗，并同步记录流量、压力、EC、pH 及灌溉时长，使水肥处理条件可复核、可比较，也便于后续解释表型差异，并形成按试验批次归档的水肥参数记录，便于开展批次追溯。

（3）强化系统协同控制：温室环境、AGV、水肥及表型设备宜纳入统一控制平台，关键在于让科研任务、设备动作和环境记录使用同一时间基准[5]。温湿度、光照、CO_2浓度、基质含水率、EC 和 pH 等参数可按固定周期采集，数值超出试验设定区间后联动天窗、遮阳、空调、风机、补光或灌溉设备；表型检测任务则调用相应时段的环境记录，使 RGB 图像、热红外数据、高光谱信息和称重结果具有完整背景。高温、断电、供液压力异常、传感器离线及 AGV 停机等事件，系统宜保存报警时间、持续时长、影响区域、恢复时间和处置结果，便于研究人员判断异常数据是否进入统计分析。数据管理可按“试验编号—植株编号—时间点—设备类型”建立索引，并将原始图像、设备参数、算法结果和环境记录分别存储，降低多批次、多设备数据混淆风险。控制平台可保留实时曲线、历史趋势、设备状态及任务日志，使科研人员能够追溯任一植株在检测时点的环境和作业背景；后期新增根系成像、机器人或环境传感器时，预留标准通信接口与数据库扩展字段，可减少硬件更新后对既有控制系统改造，并保持不同阶段试验数据格式的一致性。

4 总结

植物表型智能温室建设需围绕科研任务、环境控制与自动化作业协同展开，不能沿用普通生产温室的栽培思路。设计阶段宜依据作物类型、规模和检测频次确定功能分区，并利用高透光围护材料、自然通风及遮阳设施改善光热条件；AGV 运输系统可承担盆栽植物连续转运，配合固定工位和身份识别保持检测位置一致；水肥系统则依托流量、EC、pH 和基质水分监测开展分区定量供给。同时，光伏、热泵及分项计量有助于降低运行能耗。将环境参数、运输任务、水肥记录和表型数据纳入统一平台，增强试验条件的稳定性、数据追溯性和结果重复性，为植物表型组学研究、种质评价及精准育种提供设施支撑。

参考文献：

[1] 杨文庆,刘天霞,唐兴萍,徐国富,马喆,杨贺凯,吴文斗.智慧农业背景下的植物表型组学研究进展[J].河南农业科学,2022,51(7):1-12.

[2] 张建华,姚琼,周国民,吴雯迪,修晓杰,王健.作物农艺性状与形态结构表型智能识别技术综述[J].智慧农业(中英文),2024,6(2):14-27.

[3] 胡瑾,杨永霞,李远方,侯军英,孙章彤,王浩宇,何东健.温室环境控制方法研究现状分析与展望[J].农业工程学报,2024,40(1):112-128.

[4] 孙国祥,黄银锋,汪小旦,袁云鹏,陈光宇.基于 LIO-SAM 建图和激光视觉融合定位的温室自主行走系统[J].农业工程学报,2024,40(3):227-239.

[5] 赵鹏飞,王旭峰,胡灿,徐灿,郭文松,贺小伟,王龙,邢剑飞.智能温室水肥一体化装备设计与试验[J].农机化研究,2022,44(9):224-228.