

# 水肥一体机肥液电导率远程模糊PID控制策略

马永丰

内蒙古机电职业技术学院

**[摘要]**水肥一体化技术是提高水肥利用率、肥药减施重要手段，是国际公认的最佳灌溉施肥技术。本文基于物联网设计一个远程水肥灌溉系统，能实现计算机、手机微信多终端灌溉数据监测、开关量控制，解决了水肥灌溉系统EC调控非线性、时变性、滞后性问题，实现水肥一体化装置EC远程模糊PID控制，通过注肥泵变频调速改变吸肥量，动态调节灌溉液EC，提高水肥控制准确性及稳定性。

**[关键词]**水肥一体机；电导率；模糊PID控制

**【DOI】**10.12252/j.issn.2096-627X.2021.12.1745

水肥一体化是一种高效、节水、减肥的新型农业灌溉技术，该技术对提高水资源利用效率，促进农业节本增效具有重要意义。在作物施肥灌溉中，施肥浓度控制在最佳控制范围内，有利于作物根系发育和土壤中矿物质的吸收。随着物联网和5G技术的发展应用，数字技术能提高农业生产效率。根据作物水肥需求进行“互联网+农业”模式准确控制是实现农业智能化的关键。

## 一、水肥一体化来源与概念

水肥一体化一词最早来源于以色列，由于极度缺水，促使以色列水肥一体化技术在世界领先。以色列以“沙漠之国”打造“农业强国”奇迹闻名于世，其主要措施之一是发展水肥利用率高的水肥一体技术。水肥一体化技术是指灌溉与施肥融为一体的农业新技术，该技术通过结合可控管道肥料系统与供水管道，使用特殊材质管线使水和肥料在设备内充分混合，在滴头形成滴灌，定时定量、均匀地作用植物根部生长区域，使主根土壤始终保持松散及合适水含量。

## 二、水肥一体化技术优点

水肥一体化技术是现代设施农业技术，其核心是通过滴灌设施、水、肥料和土壤处理直接有效投放块根作物，以达到省水、保肥、省工、增效目的。

1、节约资源。在节约资源方面，首先为节水，节约用水是通过滴灌设施滴灌的一个基本概念，提高用水频率，减少每次用水数量，根据不同作物和不同生长阶段，水分3~10每平方米，只有沟灌或大水漫灌1/10~1/50，总耗水量只有沟灌或大水漫灌1/4~1/5。其次是节约化肥，全埋不仅能滴灌，而且可使肥料均匀直达作物根部，高效集中施肥，减少了水分流失与蒸发和被土壤固定等损失量，不仅能节省化肥施用，也能提高工作效率，在一块土地的设施，每滴水孔均匀实现全埋滴灌。甚至可根据用水、化肥和能源作物需要进行施肥，施肥时间可轻松控制。还能减少疾病，减少用药区域：很多疾病是由于过度田间湿度，而水和肥料集成技术不但能有效控制田间湿度，从而减少疾病的发生，也对土传病害进行有效控制。最后，还可减少杂草，因整个滴灌埋在土中，表土干燥，不易滋生杂草。还可防止土壤板结，传统灌溉用水，由于重力作用影响，经常野外作业，以及较少的水或大量水易造成致病微生物，尤其是有氧微生物等方面原因，易使土壤板结，影响农作物生长，水肥一体化技术为这些问题解决提供了途径和方案。

2、省工省心省力。在省工方面，水肥一体化技术不需再单独花时间灌水、施肥，减少农药、除草、中耕，大幅节约了工时。在节约成本上来说如水和肥料、农药和人工成本方面降低了生产成本，提高了生产效率与收益。一至三季生产可收回，设施则可多年使用。

3、增产增收。增产增收增效、促进生长、高效生产。除水稻及一些水生作物，大部分作物会因土壤中的水分多了或少了而影响生长，滴灌使作物根部水分保持在最佳状态，使作物在整个生长周期中保持持续、强劲的生长发育过程，奠定了优质和丰产的基础。

## 三、水肥灌溉系统

1、系统结构和设计。水肥灌溉系统由三部分组成：供水、吸肥、控制部分。其中，供水部件由蓄水池和自吸离心变频泵组成，为施肥灌溉提供水源及动力。吸肥部件由肥液罐、文丘里管和变频注肥泵组成。肥液罐用于储存肥液；变频注肥泵提供动力，注肥泵驱动水流通过文丘里管喉口产生负压，吸收肥液，将肥液注入主管混合。控制部分由传感单元、上位机和控制器组成。传感单元用于采集流量、压力和EC信息，为系统软件的水肥耦合调节提供决策数据；上位机包括本地端触摸屏及远程用户终端设备；控制器PLC主要接收上位机指令，控制水肥灌溉系统的开关量和变频注肥泵转速。

2、肥液EC模型。肥液混合模型选用典型的一阶滞后模型。M(t)指文丘里管吸肥量，由于文丘里管吸肥量和进口流量与变频注肥泵频率有关，因此它被改为与频率f(t)有关的变量，表示为f(t)q<sub>w</sub>、f(t)q<sub>m</sub>，根据质量守恒定理，有

$$\frac{d(V_T C(t))}{dt} = C_1 f(t) q_w + C_2 f(t) q_m - C(t) q_2 \quad (1)$$

式中：V<sub>T</sub>—混肥管道中肥液体积，L；C(t)—混肥管道中及出水管肥液浓度，%；C<sub>0</sub>—进水管中肥液浓度，%；C<sub>1</sub>—肥液罐中肥液浓度，%；q<sub>w</sub>—文丘里管最大吸肥量，L/h；q<sub>m</sub>—主管进口处最大流量，L/h；q<sub>2</sub>—主管出口流量，L/h；t—变频注肥泵工作时间，s。

等式左侧为混肥管道中肥液质量微分，右侧为进水管中肥液质量与文丘里管吸收的每种母液肥液质量之和减去出水管中肥液质量。由于浓度与Ec成正比，式(1)变为

$$\frac{d(V_1 E(t))}{dt} = E_1 q_w f(t) + E_o q_m f(t) - q_2 E(t) \quad (2)$$

式中：E(t) — 混肥管道及出水管肥液的EC，mS/cm；  
E<sub>o</sub>—进水管中清水EC，mS/cm；E<sub>1</sub>—肥液罐中肥液EC，mS/cm。

将式(2)进行拉普拉斯变换后得

$$E(s) = \frac{E_1 q_w + E_o q_m}{V_1 s + q_2} m(s) \quad (3)$$

根据式(3)，控制响应特性为一阶线性系统。在实际试验中，设备出口压力为0.35MPa，根据测量数据，V<sub>1</sub>=50 L，q<sub>m</sub>=3000L/h，q<sub>w</sub>=640L/h，E<sub>1</sub>=10mS/cm，E<sub>o</sub>=0.6mS/cm，滞后时间为10s。将上述变量代入式(3)，EC近似传递函数为

$$H(s) = \frac{E(s)}{m(s)} = \frac{2.74}{60s + 1} e^{-10s} \quad (4)$$

#### 四、远程模糊PID控制系统设计

1、远程控制系统结构。远程控制系统由本地端和远程端组成，其中，本地端由西门子S7-1200系列PLC、云盒、触摸屏、电磁阀、变频注肥泵、EC传感器等组成，云盒通过Modbus-TCP协议与PLC连接，PLC通过Modbus-TCP协议与触摸屏连接；远程端由云端服务器、用户终端设备和开发者服务终端组成。EC传感器通过LORA无线网关与云盒相连。本地端和远程端通过云盒进行动态数据交换；用户终端设备包括用户计算机或手机微信小程序，实现对本地端设备的远程操作控制；开发者服务终端通过API接口与云端服务器连接，主要存储传感器数据并处理控制算法。PLC的DA模块输入远程控制算法的输出数据，控制变频注肥泵变频调速，改变注入主管的肥液量，实时控制水肥灌溉系统的出口肥液EC。

#### 2、模糊PID调控方法设计

1) 模糊PID控制器设计。模糊自整定PID控制器由模糊控制器及PID控制器组成，控制器以EC误差e及误差变化率e<sub>o</sub>为输入量，经模糊化及模糊推理，对PID控制器的三个控制参数Δk<sub>p</sub>、Δk<sub>i</sub>、Δk<sub>d</sub>进行修正，实现了PID控制器三个参数的在线修正，最后通过控制变频注肥泵频率来调节肥料EC。

2) 模糊论域和隶属度函数。云端远程实时采集EC及目标值误差e与误差变化率e<sub>o</sub>。语言变量模糊子集取{NB(负大)，NM(负中)，Ns(负小)，z(零)，Ps(正小)，PM(正中)，PB(正大)}，量化为7级，模糊论域取{-3、-2、-1、0、1、2、3}，模糊子集采用三角形隶属度函数。

3) 控制规则制定。模糊控制规则表是根据水肥灌溉系统中EC变化规律及人员经验，综合考虑水肥灌溉系统稳定性、超调量和响应速度等建立的关系表。通过分析及仿真调整，针对水肥灌溉控制系统，制定PID控制器三个参数调整量的模糊规则。

4) 解模糊计算。在水肥灌溉控制系统中，经模糊逻辑推理后，PID的三个控制参数模糊集合不能直接转化为精确量输出，必须经解模糊。在本研究中，重心法用于解模糊体，将输出量k<sub>p</sub>、k<sub>i</sub>、k<sub>d</sub>提前清晰化，转换为相应量化值，然后

将运算结果填入模糊控制查询表并存储在计算机系统中。当系统运行时，可通过查询表格获得确定的输出量，然后乘以相应比例因子，得到相应频率模拟量。通过PLC控制器的D/A转换输出到变频器，然后控制变频注肥泵改变文丘里管吸肥量，完成其变频控制。

#### 五、试验验证

试验采用变频恒压供水系统提供试验所需的主管恒定水压。肥液罐中母液是一种溶液，EC为10mS/cm，由硝酸钾肥料制成，灌溉出口处EC由EC传感器实时检测，电磁流量计检测主管进口流量，EC通过云盒上传到云端进行实时记录。试验操作期间，在水肥灌溉系统触摸屏或用户终端设备上设置施肥配方、阀门开闭、灌溉策略、目标EC等内容。

主管压力保持在0.35MPa，主管出口流量保持在3m<sup>3</sup>/h，采用远程模糊PID控制算法及本地端PID控制算法，采样周期设置为5s，连续测量300s。设置不同EC进行对比试验，结果表明，当目标EC较大且采用远程模糊PID控制或本地端PID控制时，EC波动幅度越小，稳态EC越精确，但稳态时间及超调量增加，即滞后性增加，稳定性增加；在同一目标EC下，与本地端PID控制相比，远程模糊PID控制的EC具有较小的波动幅度、响应快和较小超调量；模糊PID控制策略调控水肥所需时间为100~120s，通用水肥一体化设备应用于日光温室生产实践时，水肥从设备灌溉出口到达滴头时间至少超过2min。由此可见，开发的基于物联网远程水肥灌溉控制系统能满足施肥灌溉实际需要。

#### 六、结论

1、以文丘里吸肥器为基础，利用物联网技术构建远程水肥灌溉系统，实现水肥灌溉系统的计算机、手机微信多终端灌溉数据监控及开关量控制，该控制策略应用于远程开发终端，实现了水肥灌溉系统EC的实时变频调控。

2、在确定的使用环境下，简化了水肥装置混肥的数学过程，建立了可操作性强的一阶滞后线性系统模型，为水肥EC调控策略提供了理论依据。

3、根据水肥EC调控滞后性及不稳定性，调控系统采用远程模糊PID控制策略。通过设定不同目标值与本地端PID控制的对比试验，发现目标EC越大，稳态EC越精确，但稳态时间及超调量增加；在同一目标EC下，与本地端PID控制相比，远程模糊PID控制具有波动范围小、响应速度快、超调量小的优点，能满足实际施肥灌溉需要。

#### 参考文献

[1] 马静楠. 推进水肥一体化的前景[J]. 江西农业, 2019(14).

[2] 朱德兰. 水肥一体机肥液电导率远程模糊PID控制策略[J]. 农业机械学报, 2021(01).

[3] 王丽娟, 吕途, 马刚, 等. 基于模糊控制的水肥一体化控制策略[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(23): 238-241.

内蒙古机电职业技术学院科学研究项目《基于云平台的智能水肥机控制系统研究》课题编号(NJZR2103)