维普资讯 http://www.cqvip.com

无糖植物组织培养营养液调配模糊-积分控制*

马明建 宋越冬

【摘要】 针对营养液参数具有非线性、时滞的特点，提出一种营养液模糊-积分控制器结构，解决系统稳态误差问题。系统采用直接法进行在线规则推理，便于修改控制器的模糊规则。将系统应用于无糖植物组织培养营养液控制，试验结果表明，系统无超调，pH值稳态误差为0.08，电导率稳态误差为0.11 mS/cm，两参数控制精度满足无糖植物组织培养的需要。

关键词：组织培养 营养液 模糊-积分控制

中图分类号：S625.5+1 **文献标识码**：A

引言

在无糖植物组织培养中，利用营养液为组培苗提供养分是关键生产技术。在移植初期，植物外肢体细胞活动较弱，营养液的pH值直接影响组培苗对离子的吸收，pH值过大或过小都将对组培苗的生长产生很大影响，将电导率S、pH值控制在期望的范围内是非常重要的[1]。由于pH值控制呈现严重的非线性[2~3]，加之投料口与营养液混合桶有一段距离，系统存在较大的时滞，很难建立精确的数学模型，用常规控制器难于对pH值实现精确控制[4]。

模糊控制器不用建立被控对象的数学模型，对被控对象的非线性、时滞具有一定的适应能力。但是，模糊控制器需把输入误差取整后转变为误差论域上的离散点，当输入误差小于或等于误差范围最大值的7%时，模糊控制器把它当作零来处理，因此模糊控制器存在较大的稳态误差[5]。鉴于此，提出一种针对营养液电导率S和pH值调配过程的模糊-积分控制器设计方法，解决营养液参数控制问题以减小系统的稳态误差[6]。

1 营养液控制系统组成

营养液控制系统主要由营养液供给泵、水处理装置、消毒装置、回液泵、计量泵、传感器、电磁阀、营养液混合桶等部分组成，如图1所示。

图中计量泵为ACS602ASP0000型。营养液混合桶为容积1 m^3的圆形塑料桶，采用水流喷射器沿切向对桶内液体进行搅拌。

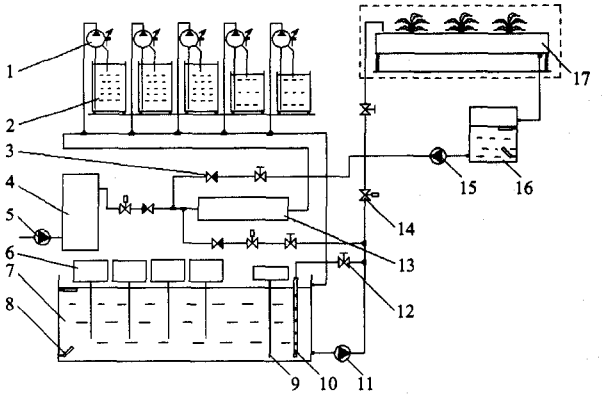

图1 营养液控制系统结构示意图

1. 计量泵 2. 母液桶 3. 单向阀 4. 水处理装置 5. 自来水泵 6. 传感器 7. 营养液混合桶 8. 液位开关 9. 加热器 10. 水流喷射器 11. 营养液泵 12. 调节阀 13. 消毒装置 14. 电磁阀 15. 回液泵 16. 回液桶 17. 栽培床

2 营养液模糊-积分控制器结构

控制系统以电导率S、pH值、液体温度的误差及误差变化率为输入变量，输出变量为母液计量泵、加酸和加碱计量泵、加热器和冷却器等装置的控制量，因此，本系统是一个6输入5输出系统。根据模糊控制器解耦的特点，可以在控制结构上将一个多输入多输出系统分解为若干个多输入单输出子系统[6]，营养液模糊-积分控制器结构如图2所示。

3 控制过程

3.1 模糊化

3.1.1 输入变量的论域、语言变量和隶属函数

电导率误差记为e_S，pH值误差记为e_{pH}，液温误

收稿日期：2006-08-23

*山东省自然科学基金专项资助项目（项目编号：2003ZX10）

马明建 山东理工大学轻工与农业工程学院 教授，255012 淄博市

宋越冬 山东理工大学轻工与农业工程学院 实验师

维普资讯 http://www.cqvip.com

差记为 e_t，分别指电导率、pH 值、液体温度的实测值与其设定值之差。

e_S 和 e_{pH} 变化范围为[－0.2，0.2]，模糊论域为{－6，－5，－4，－3，－2，－1，0，1，2，3，4，5，6}。量化因子分别为 $k_{e_S}=30$、$k_{e_{pH}}=30$。

液体温度误差变化范围为[－0.5，0.5]，模糊论域为{－6，－5，－4，－3，－2，－1，0，1，2，3，4，5，6}，量化因子为 $k_{e_t}=12$。

电导率、pH 值、液体温度误差隶属函数如图 3 所示。

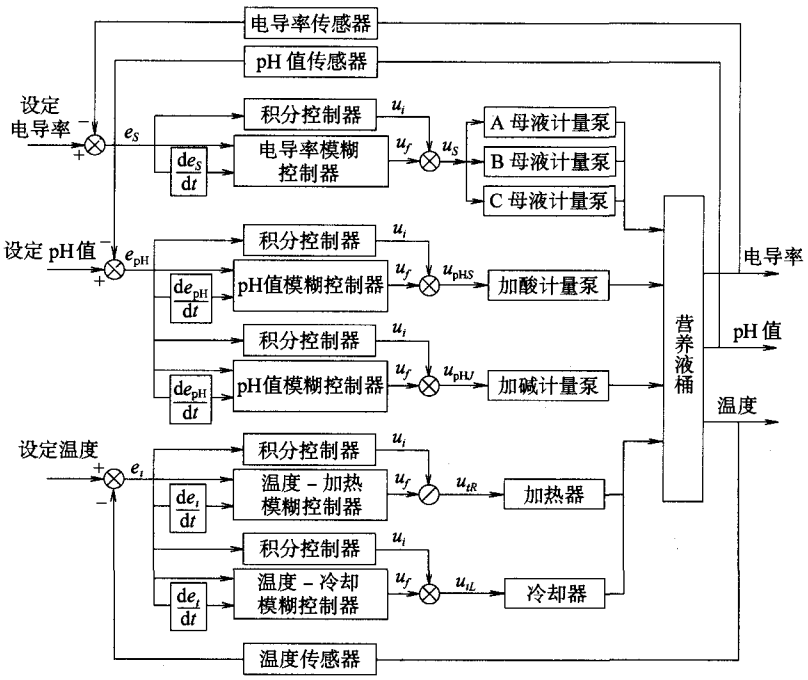

图 2　营养液模糊-积分控制器结构框图

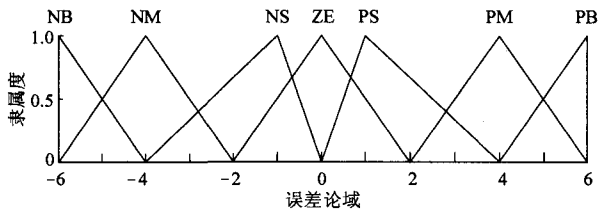

图 3　电导率、pH 值、液体温度误差隶属函数图

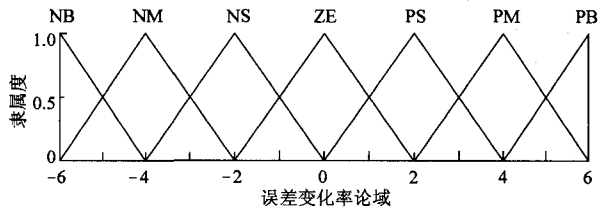

图 4　pH 值、电导率、液体温度误差变化率隶属函数图

电导率误差变化率 $\dot{e}_S$、pH 值误差变化率 $\dot{e}_{pH}$ 变化范围为[－0.1，0.1]，模糊论域为{－6，－5，－4，－3，－2，－1，0，1，2，3，4，5，6}，量化因子为 $k_{\dot{e}_S}=60$、$k_{\dot{e}_{pH}}=60$。

液体温度误差变化率 $\dot{e}_t$ 变化范围为[－0.2，0.2]，模糊论域为{－6，－5，－4，－3，－2，－1，0，1，2，3，4，5，6}，量化因子为 $k_{\dot{e}_t}=30$。

pH 值、电导率、液体温度误差变化率语言变量为{NB，NM，NS，ZE，PS，PM，PB}。

pH 值、电导率、液体温度误差变化率隶属函数如图 4 所示。

3.1.2　输出变量的论域、语言变量和隶属函数

系统中控制电导率的母液计量泵、控制 pH 值的加酸和加碱计量泵、营养液加热和冷却的控制量分别用 u_S、u_{pHS}、u_{pHJ}、u_{tR}、u_{tL} 表示，这些装置的控制只有通和断 2 种状态，用“1”和“0”表示。

3.2　模糊控制规则确定

在试验基础上，通过总结控制经验得出模糊控制规则。对于本系统的 5 个控制装置，每个控制装置的模糊控制规则的数量相同，例如 pH 值加酸计量泵模糊控制规则为 49 条，全系统共有模糊控制规则 245 条。其中 pH 值加酸计量泵模糊控制规则如表 1 所示。

表 1　pH 值加酸计量泵模糊控制规则

e_{pH}	e_{pH}						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	off	off	off	off	off	on	on
NM	off	off	off	off	off	on	on
NS	off	off	off	off	off	on	on
ZE	off	off	off	off	off	on	on
PS	off	off	off	off	off	on	on
PM	off	off	off	off	off	on	on
PB	off	off	off	off	off	on	on

维普资讯 http://www.cqvip.com

3.3 模糊规则的直接推理和去模糊化

在模糊控制的 Sugeno 模型中，其模糊规则后件部分可以是函数形式或常数，用“1”代表通，用“0”代表断，则与电导率、pH 值、液体温度的控制状态相符。因此，对电导率、pH 值、液体温度的控制采用 Sugeno 模型。在模糊逻辑理论中，对模糊规则的推理一般是依赖模糊关系 R 进行合成运算，存在计算时间长、占用较多计算机内存、不便于模糊规则修改等问题。为此系统采用软件实时在线推理，即用单点模糊集对输入信号的精确量进行模糊化，应用直接法进行模糊规则推理[7]。

假设有如下 2 条模糊控制规则

$$\begin{cases} R_1: \text{if } x=A_1 \text{ and } y=B_1 \text{ then } u_1=f_1 \\ R_2: \text{if } x=A_2 \text{ and } y=B_2 \text{ then } u_2=f_2 \end{cases}$$

其中 A_i 和 B_i 是前件中的模糊集合，而 f_i 是后件中的常数。假设目前的输入 $x=x_0, y=y_0$。先分别求出这 2 个输入对每个规则前件条件的隶属度 $A_i(x_0)$ 和 $B_i(y_0)$，据此再求出整个规则前件的匹配度

$$\alpha_1=A_1(x_0)\wedge B_1(y_0) \tag{1}$$

$$\alpha_2=A_2(x_0)\wedge B_2(y_0) \tag{2}$$

总的推理结果 u_0 由 u_1 和 u_2 的加权平均得出

$$u_0=\frac{\alpha_1u_1+\alpha_2u_2}{\alpha_1+\alpha_2} \tag{3}$$

对于由 m 条模糊条件语句组成的控制规则，总推理结果为

$$u_0=\frac{\sum_{i=1}^{m}\alpha_iu_i}{\sum_{i=1}^{m}\alpha_i} \tag{4}$$

3.4 模糊-积分控制器输出

在图 2 中，电导率、pH 值、液体温度二维模糊 PD 控制器分别与一个积分控制器并联，构成 5 个模糊-积分控制器。积分控制器的输出为

$$u_i=K_i[e(t-2)+e(t-1)+e(t)] \tag{5}$$

式中，K_i 为积分常数，通过计算和多次试验确定 $K_i=2.75$，$e(t-2)+e(t-1)+e(t)$ 为计算递推误差和，以消除干扰。每个模糊-积分控制器的总输出为

$$u_S=u_{pHS}=u_{pHJ}=u_{tR}=u_{tL}=u_f+u_i \tag{6}$$

积分控制器的作用是减小或消除系统的稳态误差[6]。在用模糊-积分控制器的输出控制执行装置时，以输出量 0.5 为基准，大于 0.5 时，启动相应执行装置工作；小于 0.5 时，停止执行装置工作；输出量为 0.5 时，维持执行装置的工作状态不变。

pH 值模糊-积分控制流程如图 5 所示。$f_{e_{pH}}$ 为 pH 值误差 e_{pH} 由基本论域（变化范围）到模糊论域的变换量，u_{pHS}、u_{pHJ} 分别为模糊-积分控制器的加酸、加碱输出量。

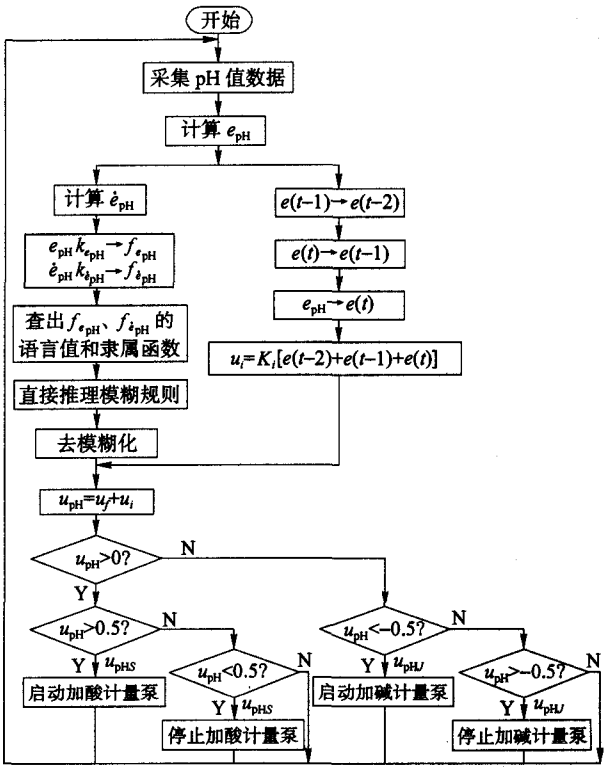

图 5 pH 值模糊-积分控制流程图

4 试验结果

在自行研制的营养液控制装置上进行了电导率、pH 值控制试验。A、B、C 母液浓缩 200 倍，酸、碱缓冲液浓度为 1 mol/L，电导率、pH 值计量泵工作频率为 4.66 Hz。电导率传感变送器为 ECCONXTR 型（测量范围 0～20.0 mS/cm，精度±2%），pH 值传感变送器为 ECpHXTR 型（测量范围 0～14，精度±2%），液体温度传感变送器为 WEPJF－230T 型（测量范围 0～50℃，精度±0.5℃）。电导率设定值为 2.0 mS/cm，pH 值设定值为 6。试验时间 120 h，试验数据记录周期为 1 min，控制装置间隔 1 h 循环搅拌营养液 10 min。

图 6 为电导率控制试验部分数据。由图 6 可知电导率由 1.67 mS/cm 逐渐上升接近 2.0 mS/cm，调节时间为 100.8 min，无超调，电导率稳定在设定值附近，稳态误差为 0.11 mS/cm。

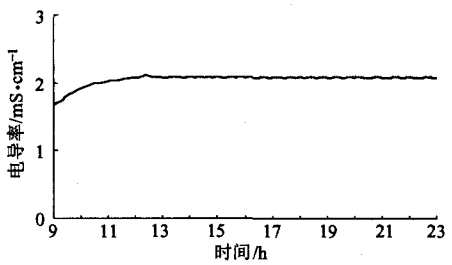

图 6 电导率模糊-积分控制曲线

维普资讯 http://www.cqvip.com

图 7 为 pH 值控制试验部分数据。由图 7 可知 pH 值由 6.79 逐渐下降接近设定值 6，调节时间为 59 min，无超调，在试验期间，pH 值稳定在设定值附近，稳态误差为 0.08。

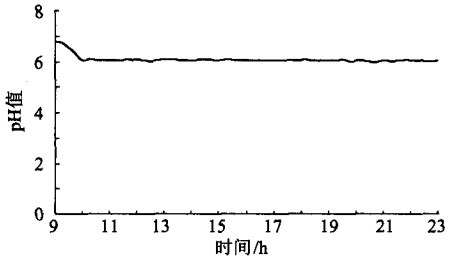

图 7　pH 值模糊-积分控制曲线

5　结束语

对基于 Sugeno 模糊模型的营养液电导率、pH 值调配过程的模糊-积分控制问题进行了研究，将二维模糊 PD 控制器与积分器并联，使模糊与积分控制同时进行，实现营养液参数模糊 PID 控制。试验结果表明，两参数控制精度满足无糖植物组织培养的需要。

参　考　文　献

1　曹孜义，刘国民. 实用植物组织培养技术教程[M]. 兰州：甘肃科学技术出版社，2002：23～39.
2　Nie J H, Loh A P, Hang C C. Modeling pH neutralization processes using fuzzy-neural approaches[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1996, 78(1):5～22.
3　Regunath S, Kadirkamanathan V. Design of pH control system using fuzzy non-uniform grid scheduling and evolutionary programming[J]. Applied Soft Computing, 2001, 1(1):91～104.
4　Biasizzo K K, Skrjanc I, Matko D. Fuzzy predictive control of highly nolinear pH process[J]. Computers Chem. Engng., 1997, 21(1):613～618.
5　张化光，何希勤. 模糊自适应控制理论及其应用[M]. 北京：北京航空航天大学出版社，2002：297～302.
6　诸静. 模糊控制原理与应用[M]. 北京：机械工业出版社，1995：220～355.
7　韩启纲，吴锡祺. 计算机模糊控制技术与仪表装置[M]. 北京：中国计量出版社，1999：62～71.

（上接第 177 页）

17　侯永平，李成刚，胡于进，等. 轮胎非稳态侧偏特性非线性模型[J]. 华中理工大学学报，2000，28(8)：53～55.
18　诸德培. 摆振理论及防摆措施[M]. 北京：国防工业出版社，1984.
19　胡贵友. 汽车前轮非线性摆振机理的研究[D]. 天津：天津大学，1999.
20　李胜，林逸. 汽车转向轮摆振分岔特性的数值分析[J]. 吉林大学学报，2005，35(1)：7～11.
21　Boumediene Hamzi, Wei Kang, Jean-pierre Barbot. Analysis and control of hopf bifurcations[J]. SIAM J. Control Optim. Math, 2004, 42(6):2 200～2 220.
22　刘延柱，陈立群. 非线性振动[M]. 北京：高等教育出版社，2001.
23　韩同群，邹汉华. 越野汽车前轮摆振影响因素仿真[J]. 农业机械学报，2007，38(5)：27～31.

（上接第 184 页）

参　考　文　献

1　何雄奎，严苛荣，储金宇，等. 果园自动对靶静电喷雾机设计与试验研究[J]. 农业工程学报，2003，19(6)：78～80.
2　邵振润，郭永旺. 我国施药机械与施药技术现状及对策[J]. 植物保护，2006，32(2)：5～8.
3　袁会珠. 农药雾滴沉积流失规律以及降低容量喷雾技术研究[D]. 北京：中国农业大学，2000.
4　共立株式会社. 共立スピードスプレーヤ営業技術資料，1987：6～25.
5　Lebeau F. Modelling the dynamic distribution of spray deposits[J]. Biosystems Engineering, 2004, 89(3):255～265.