

水培营养液硝态氮浓度在线标测系统研究

赵倩^{1,2} 王利春^{1,2} 郭文忠^{1,2} 陈晓丽^{1,2} 聂铭君^{1,2} 贾冬冬^{1,2}

(1. 北京农业智能装备技术研究中心, 北京 100097; 2. 农业部都市农业(华北)重点实验室, 北京 100097)

摘要: 针对目前氮素浓度检测技术中电极标定过程与离子检测过程分离,难以实现在线检测的问题,设计了一套基于双传感器冗余控制的水培营养液硝态氮浓度在线标测系统。系统的标定过程为利用丝杠滑块线性导轨完成电极清洗和标准液电压获取,并采用最小二乘法,辨识所采集电压与离子浓度对数之间标准曲线的参数。系统的检测过程为基于最大误差原理,采用双传感器冗余控制方法进行数据融合和标定决策,最终实现硝态氮浓度的连续在线检测。验证试验结果表明:双传感器冗余控制方法可靠,在线检测值与离子色谱法获得的实验室检测值平均相对误差仅为5.64%,平均绝对误差只有 1.172×10^{-5} ,二者呈现极显著线性相关关系($P < 0.01$)。综合分析得出,该系统能够实现营养液连续消耗情况下硝态氮浓度的在线检测,其结果与实验室检测值具有较好的一致性,解决了人工标定电极费时、费工的问题,提高了检测效率,为营养液的精细化管理提供了新的技术手段。

关键词: 水培营养液; 硝态氮; 在线检测; 自动标定; 离子选择电极

中图分类号: S237; TP273+.5 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2018)08-0203-07

Construction and Verification of On-line Calibrating and Measuring System about Nitrate N in Hydroponic Nutrient Solution

ZHAO Qian^{1,2} WANG Lichun^{1,2} GUO Wenzhong^{1,2} CHEN Xiaoli^{1,2} NIE Mingjun^{1,2} JIA Dongdong^{1,2}

(1. Beijing Research Center of Intelligent Equipment for Agriculture, Beijing 100097, China

2. Key Laboratory of Urban Agricultural (North China), Ministry of Agriculture, Beijing 100097, China)

Abstract: Efficiently obtaining the concentration of nitrate N (NO_3^- -N) in hydroponic nutrient solution is essential for crop growth. However, it is difficult to realize on-line detection due to the separation of electrode calibration and ion detection. In order to obtain the concentration of NO_3^- -N promptly, conveniently and accurately, an on-line calibrating and measuring system was established based on dual-sensor redundancy control method and nitrate ion-selective electrode (ISE). When calibrating, screw nuts were developed for driving ISEs to move in two degrees of freedom, for the purpose of rinsing electrodes and getting standard voltages. Additionally, unknown parameters of the linear function between collected voltages and logarithms of the ion concentrations were recognized under the least squares fitting method. When measuring, a dual-sensor redundancy control method was applied to carry out periodically calibrating and rinsing, as well as on-line measurement based on the principle of maximum error. To test and verify the accuracy of this system, a no-load test and a production test were carried out. The former was compared the on-line detection concentrations with the actual values of NO_3^- -N in the 14 single-ion (KNO_3) solutions, and the latter continuously monitored the concentrations of NO_3^- -N for 12 d in the process of lettuce production. The results showed that the dual-sensor redundancy control method was reliable. The on-line detection measured by this system and the laboratory detection measured by ion chromatography showed an extremely significant linear positive correlation ($P < 0.01$), and the mean of average relative error was merely 5.64%, and the mean of average absolute error was 1.172×10^{-5} . Therefore, the system could realize the on-line detection of NO_3^- -N under the continual consumption of nutrient solution, which not only had strongly relation to those determined by laboratory instrument, but also solved the problems of time-consuming and labor-intensive about manual calibration.

Key words: hydroponic nutrient solution; nitrate N; on-line detection; automatic calibration; ion-selective electrode

收稿日期: 2017-12-28 修回日期: 2018-06-14

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0201503)、北京市科技计划项目(D171100007617003)和北京市科技专项(Z161100005016111)

作者简介: 赵倩(1990—),女,研究实习生,主要从事设施农业智能系统研究,E-mail: zhaq@necita.org.cn

通信作者: 郭文忠(1970—),男,研究员,主要从事设施园艺工程与智能装备研究,E-mail: guowz@necita.org.cn

0 引言

自 1929 年 GERICKE 首次尝试以营养液作为栽培介质进行商业化蔬菜生产以来,无土栽培已经由研究探索逐步演变为一种实用的生产技术^[1]。这种技术节水节肥,清洁高产,其栽培面积迅速扩大。尤其是在 20 世纪 80 年代后,多种栽培模式(深液流栽培、营养液膜栽培、汽雾培、岩棉栽培、复合式栽培)相继被国内外科研工作者开发出来,与之相配套的栽培管理技术理论的研究工作也在逐步完善^[2-5]。水培作为无土栽培的一种重要形式,不论面积还是规模,在我国设施栽培中均占较大比例,而营养液是水培的基础和关键^[1]。

在水培条件下,作物根系对不同养分离子有不同的吸收速率,这必将导致营养液组分失衡,而营养液缓冲能力远弱于土壤,若不及时调整,种植作物的生长状况将受到影响^[6-7]。基于营养液配方进行的 EC/pH 调控^[8-9],并未触及营养液调控的本质目标,不能够实现维持作物所需的营养组分平衡,营养液管理精准性差。因此,在 EC/pH 调控的基础上,兼顾营养液中重要离子的组分平衡,尤其是兼顾浓度变化快、且对作物产量形成和品质提高具有重要影响的氮浓度平衡^[10-11],对完善营养液管理体系、提高水肥利用效率具有重要意义^[12]。

目前,营养液氮浓度的获取主要依靠实验室分析法和离子选择电极法^[13]。由于离线操作和样品预处理操作复杂,实验室分析法并不适合连续的现场测量,因此,针对利用离子选择电极获取营养液组分浓度的相关研究和相关设备在持续推进^[14-17],有关电极温度漂移矫正的理论研究也取得了一定进展^[18-21]。但电极的标定仍依赖人工,与现场检测过程分离,不仅费时、费力,也不利于将离子浓度的在线检测设备转化为产品。因此,本文设计一种标定

检测集成化的硝态氮浓度在线标测系统,并在此基础上建立标定规则,旨在实现水培营养液的智能化、精细化管理,为作物生长过程中营养液的及时补充和调控提供技术支撑。

1 系统构建

1.1 总体结构

该系统旁路安装在温室原有的营养液循环系统上,由自动标定模块和实时检测模块组成,总体结构如图 1 所示。其中,自动标定模块包括标定机构、标准液组件及清洗组件。进水管道和出水管道连接清洁水源,与清洗池构成清洗组件。实时检测模块由离子选择电极、EC 电极、信号放大电路、A/D 转换电路及检测池构成。供液管道将储液桶中营养液输送到检测池中,以供营养液组分检测;回流管道则将检测池内的营养液回流至储液桶内,从而形成一个循环系统,并使用微流泵实时连通检测池中营养液与栽培床中营养液。

1.2 标定机构

自动标定模块一方面可解决传统手工标定电极不适宜于现场在线检测的问题,提高检测效率;另一方面可及时减少离子选择电极电位漂移特性对检测结果的影响,提高检测精度。其关键功能为通过标定机构带动离子选择电极移动,从而实现电极在标准液组件中的电压采集,拟合标准曲线。

标定机构采用丝杠滑块线性导轨作为传动机构,搭建倒 T 型工作平台,实现电极在 2 个自由度上的直线移动。配制的 6 组标准液,按浓度由小到大分别盛放在标准液容器 A ~ F 中。离子选择电极由传动机构带动,在标准液组件和清洗池之间往复运动。标定机构结构如图 2 所示。

1.3 硬件平台

标测系统控制器一方面需连续监测待测营养液

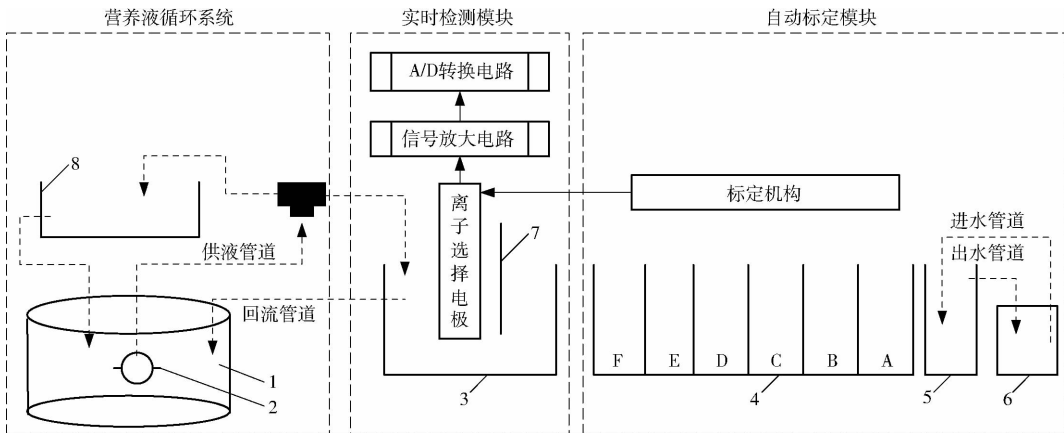


图 1 营养液标测系统总体结构图

Fig. 1 Overall structure diagram of calibration-measurement system used for nutrient solution

1. 储液桶 2. 微流泵 3. 检测池 4. 标准液组件 5. 清洗池 6. 清洁水源 7. EC 电极 8. 栽培床

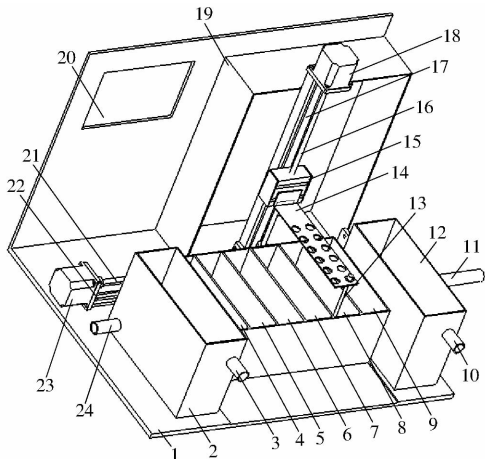


图 2 标定机构结构示意图

Fig. 2 Structure diagram of calibration mechanism

1. 底座 2. 检测池 3. 回流管道 4. 标准液容器 F 5. 标准液容器 E 6. 标准液容器 D 7. 标准液容器 C 8. 标准液容器 B 9. 标准液容器 A 10. 进水管 11. 出水管 12. 电极清洗池 13. 离子选择电极 14. 电极夹 15. 滑块 16. Y 轴丝杠 17. Y 轴导轨 18. Y 轴电动机 19. 控制器 20. 上位机 21. X 轴丝杠 22. X 轴导轨 23. X 轴电动机 24. 回流管道

EC 值及离子选择电极输出电压的动态变化；另一方面，在启动标定后，需发出驱动信号控制电动机运动，带动离子选择电极在空间按照既定轨迹自动完成电极标定过程，从而集成标定功能和检测功能，真正实现营养液氮素的在线检测。

标测系统控制器由单片机模块、电源模块、电动机驱动模块、模拟量检测模块及显示模块组成，采用 STM32 单片机作为控制核心，硬件结构如图 3 所示。单片机数据接口将采集到的 EC 值和浓度经过信号调理后存储显示，并通过具有输出 PWM 脉冲的引脚，输出信号给 DRV8825PWPR 型步进电动机驱动芯片，进而控制 X 轴电动机和 Y 轴电动机转动，从而使滑块带动电极在空间两自由度上移动，进行电极的自动标定。

模拟量检测模块

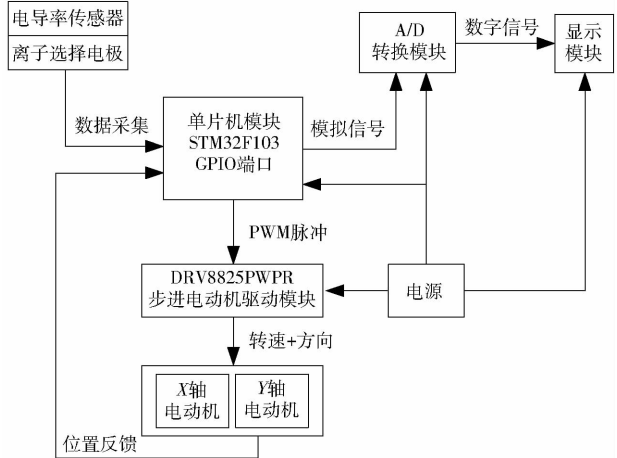


图 3 系统硬件结构图

Fig. 3 Hardware structure diagram

2 双传感器冗余控制方法

在检测池中布置 2 个同型号离子选择电极，系统软件通过比较单片机所采集的检测电极及冗余电极输出电压，自动决策进入标定电极过程还是继续离子浓度检测过程。

2.1 标定算法

当电极进入待测液后，输出电动势可用 Nerst 方程^[21]来表示，即离子选择电极输出电压与对应离子浓度的对数呈线性关系，本文采用最小二乘法进行标准函数的参数辨识。为减少离子交叉混合，要求电极从低浓度标准液向高浓度标准液依次移动，并在每次浓度采集后均返回清洗池清洗电极，自动标定过程如下：①清洗电极。②进入标准溶液中实时采集溶液浓度并输出电压 $V(t)$ ，当 $V(t)$ 、 $V(t+1)$ 、 $V(t+2)$ 小于阈值时（阈值根据测量精度要求和传感器检测误差设置），认为采集信号趋于稳定，将 3 次测量结果的平均值作为该浓度（ C ）下的电压 V_{avg} 。③重复步骤①、②，直到 6 组标准液电压采集完毕。④建立一次函数模型： $V_{avg} = K \ln C + b$ ，采用最小二乘法计算未知参数，得到标准曲线。⑤电极进入检测池中，进行待测营养液氮素浓度的在线检测。

2.2 冗余控制算法

使用冗余方法准确检测同一被测量的关键在于传感器的故障判断及数据融合算法，考虑到系统在线性，提出一种基于最大误差原理的冗余控制决策方法，旨在利用标定机构，用标定次数补偿温度漂移，实现按需标定，提高检测效率。

根据标准曲线 $V_{avg} = \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \end{bmatrix} \ln C + \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix}$ ，设在某时刻二者测量电压分别为 $V_{avg1}(t)$ 和 $V_{avg2}(t)$ ；下一时刻二者测量电压分别为 $V_{avg1}(t+1)$ 和 $V_{avg2}(t+1)$ ；测量过程中允许的最大误差为 Δ_{max} ，则当前时刻 2 个传感器测量值之差 $d = |V_{avg1}(t) - V_{avg2}(t)|$ 。当 $V_{avgk}(t) = 0 (k = 1, 2)$ 时，表示对应传感器信号断路；当 $V_{avgk}(t) < 0 (k = 1, 2)$ 时，表示采集故障或传感器故障；当 $V_{avgk}(t) > 0 (k = 1, 2)$ 时，表示信号正常。在信号正常的情况下，按照如下算法进行冗余控制：

(1) 当 $d \leq \Delta_{max}$ 时，表示两传感器检测值之差在最大误差允许范围内，决策结果为信号合理，最终的检测值根据信号质量取加权平均值。设 $\delta_k = V_{avgk}(t) - V_{avgk}(t-1)$ ， $k = 1, 2$ ，规定 $\delta_k < 0$ ，或 δ_k 变化平稳，或用户指定的高信任度传感器获得更大权限。

(2) 当 $d > \Delta_{max}$ 时，表示两传感器检测值之差超

出了允许的最大误差,丢弃该次数据,且当 $\sum_{i=t}^{i=t+2} d_i > 3\Delta_{\max}$ 时,认为传感器发生漂移,决策结果为信号超限,调用标定子程序,重新进行电极标定。冗余决策算法流程图如图 4 所示。

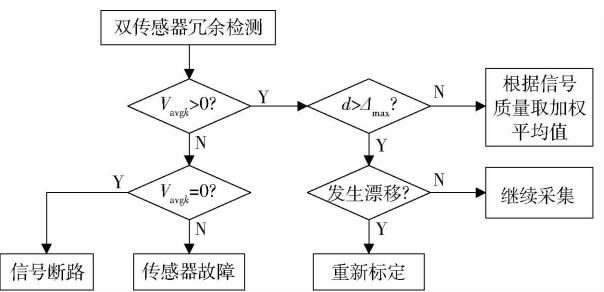


图 4 冗余决策算法流程图

Fig. 4 Flow chart of redundancy control algorithm

3 验证试验与结果分析

3.1 空载验证试验

传感器的正确标定是准确检测的前提,自动标定方法的可靠性直接影响后续试验结果。该试验目的是在空载情况下,验证标定算法和冗余决策算法的可靠性。

3.1.1 试验材料制备

采用定容法,将硝酸钾(KNO_3)药品与去离子水混合,配制 6 组硝态氮(NO_3^- -N)标准液与 14 组待测溶液(浓度已知);为保证标准曲线的合理性,硝态氮标准液体积比分别为: 2.5×10^{-5} 、 5.0×10^{-5} 、 1.0×10^{-4} 、 2.0×10^{-4} 、 4.0×10^{-4} 、 8.0×10^{-4} ,范围涵盖 14 组待测溶液;配置的 2 个氮离子选择电极在美国 ASI 公司的 NO43-A0001 型电极。

3.1.2 试验方法与测定项目

将 2 个氮离子选择电极放入任意已知浓度的同一待测溶液,连续监测该溶液中硝态氮浓度的动态变化。系统根据冗余控制算法,自动进行数据融合,记录检测值或调用标定程序,拟合标准曲线(由于无营养液消耗情况,数据融合时 2 个传感器信号平均值均为 1)。且每次标定后,均放入其他 13 组待测溶液中记录在线检测值。在连续 3 d 的试验(06:00—20:00)结束后,通过分析标定发生的时刻、标准曲线方程及检测值与真实值的拟合度来验证算法可靠性。

3.1.3 结果与分析

系统每天标定电极 3 次,分布在早、中、晚 3 个时间段。选取其中 1 d,3 次标定分别发生在 10:25、14:08 和 17:13,3 条拟合曲线如图 5a 所示;记录的在线检测浓度与真实浓度线性拟合结果如图 5b

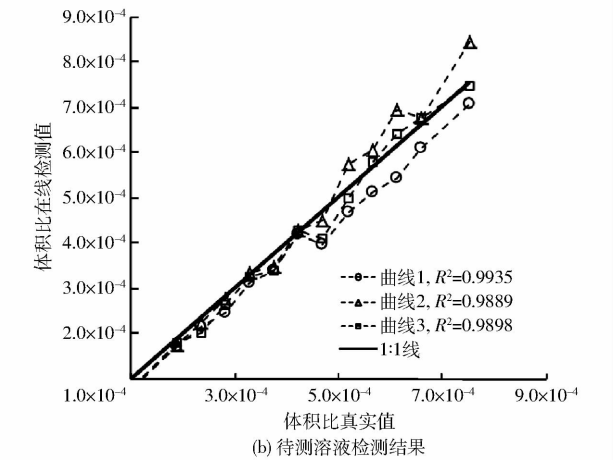
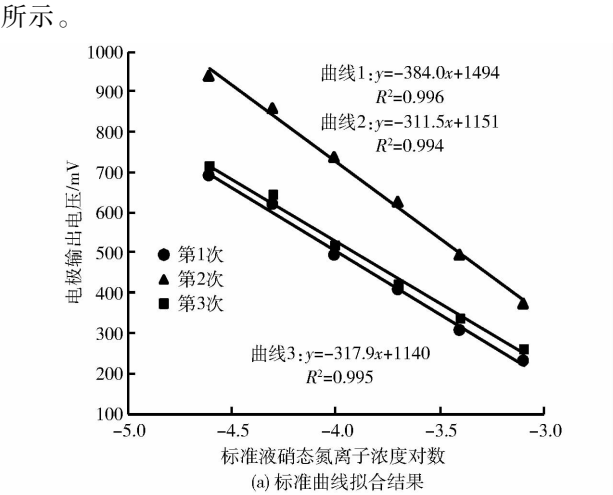


图 5 空载试验验证结果

Fig. 5 Validation results of no-load test

由图 5a 可知,同一标准液,不同时刻电极输出的电压不同;同一天的 3 次标定,第 2 次标定与第 1 次和第 3 次的拟合曲线差异较大,而第 1 次的曲线拟合较好;结合标定启动时刻,第 2 次标定发生在营养液温度较高时,表明传感器由于温度漂移而产生了标定行为,且基于双传感器的冗余控制算法可以标识温度漂移并自动启动标定子程序。3 条拟合曲线的决定系数 R^2 均达到 0.99 以上,且直线斜率为负值,符合 Nerst 方程,表明基于双传感器的标定算法正确。由图 5b 可知,对于任意配制的 14 组待测溶液,虽然 3 次拟合曲线有所差异,但硝态氮浓度的检测值与真实值决定系数 R^2 均在 0.98 以上;并且浓度在 4.0×10^{-4} 以内时,硝态氮体积比的真实值与在线检测值更接近,超过 4.0×10^{-4} 后,接近程度略差,表明系统针对低浓度营养液的检测精度高于高浓度营养液,因此,为了提高检测精度,可以根据实际生产中营养液浓度,适当缩小标准液浓度范围。

综上,该标定方法可以通过及时标定减小温度漂移影响,且算法可靠,可以尝试应用在实际生产中。

3.2 实际生产验证试验

在营养液连续消耗的过程中,离子种类众多,浓度动态变化,情况复杂。该试验目的是在实际生产过程中,验证系统可靠性和检测准确性。

3.2.1 试验方案设计

搭建硝态氮浓度在线标测系统(图 6),其中,栽培方式为水培,营养液配方为改进的霍格兰配方,供试生菜品种为奶生 1 号;配制的 6 组硝态氮标准液体积比分别为 2.0×10^{-5} 、 4.0×10^{-5} 、 8.0×10^{-5} 、 1.6×10^{-4} 、 3.2×10^{-4} 和 4.0×10^{-4} ;配置的检测传感器及冗余传感器同空载验证试验。

在生菜定植一段时间后,安装检测电极及冗余电极,启动标测一体化系统,人为指定其中一个新购置的传感器为高信任度传感器,在系统软件控制下自动进行连续 12 d 的硝态氮浓度标定和检测管理。系统运行期间,每隔 4 h 对检测池中待测液进行采样,样本储存在离心管冷冻保存,同时记录此时系统在线检测值,直到试验结束。

3.2.2 测定项目及方法

试验结束后采用离子色谱法获取样本硝态氮浓度实验室检测值,并与试验记录的高信任度离子选择电极的在线检测值以及双离子选择电极利用冗余



图 6 硝态氮浓度在线标测系统

Fig.6 On-line calibrating and measuring system of nitrate N

控制算法融合后的在线检测值进行比较,采用相对误差(Relative error, RE)的平均值和最大值、绝对误差(Absolute error, AE)的平均值和最大值对在线检测值与实验室检测值的拟合度进行统计分析。

3.2.3 结果与分析

(1) 系统可靠性分析

在实际生产中,营养液连续消耗的情况下,本系统获取的单离子选择电极检测值和双离子选择电极融合后的检测值与实验室检测值趋势一致,且相较单离子电极检测值的动态变化,双离子电极融合后的检测值数据突变较少(图 7a);在为期 12 d 的营养液在线检测过程中,系统自动决策电极标定 40 次,随着营养液的消耗,电极在标准液中输出电压的跨

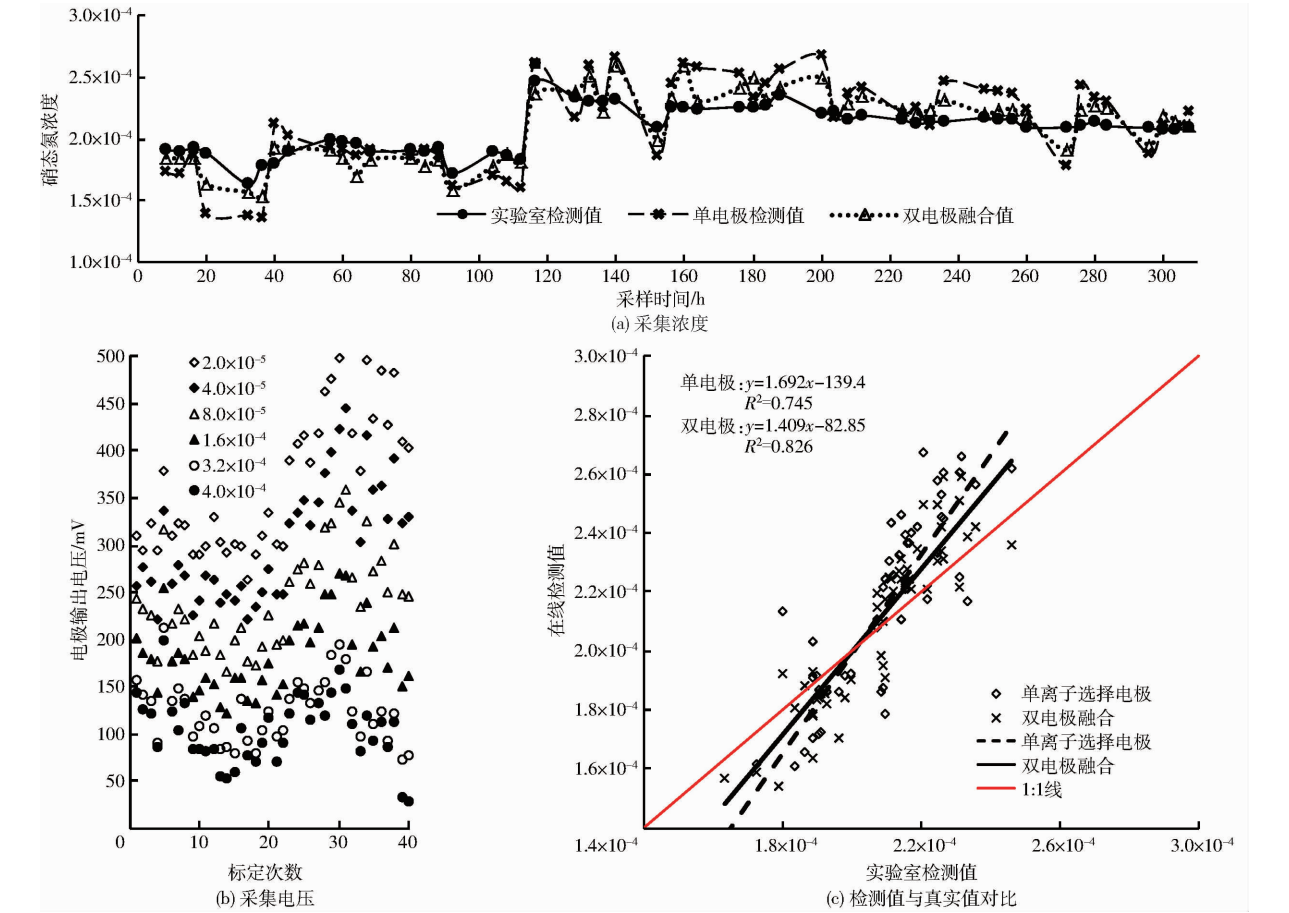


图 7 硝态氮浓度在线检测值与实验室检测值对比

Fig.7 Comparison of nitrate N concentration of online detection value and experiment result

度增大(图 7b);标准曲线中,离子浓度对数值与响应电压的决定系数 R^2 平均值为 0.994,最大值为 0.999,最小值为 0.979。因此,本研究建立的确态氮浓度在线标测系统具有良好可靠性。

(2)检测准确性分析

将单离子选择电极检测值、双离子选择电极融合后的检测值与实验室检测值进行统计分析,如表 1 所示。线性回归分析的结果表明(图 7c),单离子选择电极检测值、双离子选择电极融合后的检测值与实验室检测值均呈现极显著线性相关关系($P<0.01$),但后者(R^2 为 0.826)相关程度明显高于前者(R^2 为 0.745)。

表 1 在线检测值与实验室检测值误差分析
Tab.1 Error analysis of online detection value
and experiment result

电极	相对误差/%		绝对误差	
	平均值	最大值	平均值	最大值
单离子选择电极	9.08	26.12	1.877×10^{-5}	4.929×10^{-5}
双离子选择电极	5.64	14.68	1.172×10^{-5}	3.320×10^{-5}

针对以上结果,当营养液中的离子种类较多(混合营养液)时,虽然随着离子浓度的变化,电极输出电压的跨度增大,但标准曲线线性相关程度与实验室检测值决定系数相当^[19-20];并且,双离子选择电极融合后的在线检测值与实验室检测值的精度明显高于单离子选择电极的检测精度,与 KIM 等^[19]在实验室中的 N 素检测精度相当,基本能够满足农业生产要求(不大于 15%)。但是,在营养液连续消耗的实际生产中,系统每天自动决策的电极标

定次数为实验室条件下的 1.5 倍,试验后期电极输出电压范围明显大于前期,而且双离子选择电极输出值加权处理后,RE 的最大值仍达到了 14.68%,可能原因是,随着氮的吸收,离子干扰的影响逐渐增大,可以通过改进试验装置,将检测池一分为二,双离子选择电极并联测量的方法,进一步提高检测精度。

综上,在生菜水培过程中,由于系统可以自动决策电极标定,能够提高检测效率,且双传感器冗余控制方法的检测精度基本可以满足农业生产要求,因此,该系统能够摆脱手工标定电极的传统做法,可以实现营养液中硝态氮浓度的连续在线检测。

4 结论

(1)利用丝杠滑块线性导轨作为传动机构搭建的倒 T 型标定机构,可以基于冗余决策算法,在单片机驱动下自动带动电极在 2 个自由度上按需移动,并采用最小二乘法计算一次函数模型的未知参数。所拟合的标准曲线的 R^2 均达到 0.99 以上,检测值与真实值决定系数 R^2 均达到 0.98 以上,控制方法可靠。

(2)建立的在线标测系统有效集成了电极标定过程和现场检测过程,并在系统软件控制下实现了连续 12 d 的生菜水培液的硝态氮浓度的在线检测,基于冗余控制方法的在线检测值与实验室检测值呈现极显著线性相关($P<0.01$),相对误差平均值仅为 5.64%,二者具有较好的一致性,可以满足农业生产基本要求。

参 考 文 献

1 王久兴,王子华. 现代蔬菜无土栽培[M]. 北京:科学技术文献出版社,2005.
2 WANG Ziqin, GAN Dexin, LONG Yuelin, et al. Advances in soilless culture research[J]. Agricultural Science & Technology, 2013, 14(2):269-278.
3 蒋卫杰,刘伟,余宏军,等. 中国大陆无土栽培发展概况[J]. 农业工程学报,2001,17(1):10-15.
JIANG Weijie, LIU Wei, YU Hongjun, et al. Development of soilless culture in mainland China[J]. Transactions of the CSAE, 2001, 17(1):10-15. (in Chinese)
4 徐伟忠,王利炳,詹喜法,等. 一种新型栽培模式——气雾培的研究[J]. 广东农业科学,2006,11(7):30-33.
XU Weizhong, WANG Libing, ZHAN Xifa, et al. Review on aeroponics—a new cultivation pattern[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2006,11(7):30-33. (in Chinese)
5 徐凡,赵倩,贾冬冬,等. 循环式岩棉栽培水肥一体化装备及控制系统研发[J]. 农业工程,2017,7(4):45-49.
XU Fan, ZHAO Qian, JIA Dongdong, et al. Integrated water and fertilizer equipment and control system in closed rook wool cultivation[J]. Agricultural Engineering, 2017, 7(4):45-49. (in Chinese)
6 李冬梅,魏珉,张海森,等. 氮、磷、钾用量和配比对温室黄瓜叶片相关代谢酶活性的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2006,12(3):382-387,393.
LI Dongmei, WEI Min, ZHANG Haisen, et al. Effects of NPK rates and rations on activities of metabolism enzymes in leaves of cucumber in greenhouse[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2006, 12(3):382-387,393. (in Chinese)
7 倪纪恒,毛罕平. 电导率对温室黄瓜叶面积和干物质生产影响的动态模拟[J]. 农业工程学报,2011,27(12):105-109.
NI Jiheng, MAO Hanping. Dynamic simulation of leaf area and dry matter production of greenhouse cucumber under different electrical conductivity[J]. Transactions of the CSAE, 2011,27(12):105-109. (in Chinese)
8 DOMINGUES D S, TAKAHASHI H W, CAMARAL C A P. Automated system developed to control pH and concentration of nutrient solution evaluated in hydroponic lettuce production [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2012(84):53-61.
9 GEOFFREY R, DIXON M A, ARNOLD K E. Evaluation of sensor technologies for automated control of nutrient solutions in LSS

using higher plants[C] // Proceedings of the Sixth European Symposium on Space Environmental Control Systems, 1997, 400:851.

10 杨小锋,别之龙. 氮磷钾施用量对水培生菜生长和品质的影响[J]. 农业工程学报,2008,24(增刊2):265-269.
YANG Xiaofeng, BIE Zhilong. Effects of the amount of application of N, P, K on the growth and quality of lettuce[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(Supp.2):265-269. (in Chinese)

11 王新,马富裕,刁明,等. 滴灌番茄临界氮浓度、氮素吸收和氮营养指数模拟[J]. 农业工程学报,2013,29(18):99-108.
WANG Xin, MA Fuyu, DIAO Ming, et al. Simulation of critical nitrogen concentration, nitrogen uptake and nitrogen nutrition index of processing tomato with drip irrigation[J]. Transactions of the CSAE,2013,29(18):99-108. (in Chinese)

12 GUTIERREZ M, ALEGRET S, CACERES R, et al. Application of a potentiometric electronic tongue to fertigation strategy in greenhouse cultivation[J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2007, 57(1):12-22.

13 徐雅洁. 营养液多组分检测的关键技术研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2011.
XU Yajie. Research on the key technology of multi-component detection of nutrient solution[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2011. (in Chinese)

14 邱雪峰,薛美盛,孙德敏,等. 设施栽培中营养液成分的在线检测[J]. 农业工程学报,2000,16(1):83-86.
QIU Xuefeng, XUE Meisheng, SUN Demin, et al. The on-line measurement of the nutritive medium ingredient in greenhouse culture[J]. Transactions of the CSAE, 2000,16(1):83-86. (in Chinese)

15 孙德敏,张利,王永,等. 无土栽培营养液检测仪的研制[J]. 仪器仪表学报,2004,25(3):281-283.
SUN Demin, ZHANG Li, WANG Yong, et al. Development of soilless culture nutrient solution measuring instrument[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2004, 25(3):281-283. (in Chinese)

16 KIM H J, HUMMEL J W, BIRRELL S J. Evaluation of ion-selective membranes for real-time soil nutrient sensing[C]. ASAE Annual International Meeting, 2004(101):339-359.

17 BAMSEY M T, BERINSTAIN A, DIXON M A. Calcium-selective optodes for the management of plant nutrient solutions[J]. Sensors & Actuators B—Chemical, 2014(19):61-69.

18 王永,司炜,孙德敏,等. 温室营养液循环检测系统中离子选择电极的数学建模与测量[J]. 农业工程学报,2003,19(4):230-233.
WANG Yong, SI Wei, SUN Demin, et al. Modeling and measurement of ion-selective electrode of nutrient solution measuring system in greenhouse[J]. Transactions of the CSAE, 2003,19(4):230-233. (in Chinese)

19 KIM H J, KIM W K, ROH M Y, et al. Automated sensing of hydroponic macronutrients using a computer-controlled system with an array of ion-selective electrodes[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2013, 93(4):46-54.

20 陈薇,秦琳琳,吴刚,等. 硝酸根离子选择电极建模[J]. 传感技术学报,2007,20(1):14-17.
CHEN Wei, QIN Linlin, WU Gang, et al. Modeling of ion selective electrode[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2007,20(1):14-17. (in Chinese)

21 张利,孙德敏,王永. 一种新的离子计温度补偿方法[J]. 电子测量与仪器学报,2003,17(4):4-8.
ZHANG Li, SUN Demin, WANG Yong. A new method to compensate the temperature excursion of ion instrument[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2003,17(4):4-8. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 244 页)

14 张林,吴普特,范兴科. 多点源滴灌条件下土壤水分运动的数值模拟[J]. 农业工程学报,2010,26(9):40-45.  
ZHANG Lin, WU Pute, FAN Xingke. Numerical simulation of soil water movement with drip irrigation of multiple point source [J]. Transactions of the CSAE, 2010,26(9):40-45. (in Chinese)

15 ZHOU Q Y, KONG S Z, ZHANG L, et al. Comparison of APRI and Hydrus-2D models to simulate soil water dynamics in a vineyard under alternate partial root zone drip irrigation[J]. Plant and Soil,2007,291(1-2):211-223.

16 FEDDES R A, BRESLER A E, NEUMAN S P. Field test of a modified numerical model for water uptake by root system[J]. Water Resources Research, 1974, 10(6):1199-1206.

17 VAN GENUCHTEN M T. A numerical model for water and solute movement in and below the root zone[D]. Research Report, U. S. Salinity Laboratory. 1987.

18 刘昌明,窦清晨. 土壤-植物-大气连续体模型中的蒸散发计算[J]. 水科学进展, 1992, 3(4):255-263.  
LIU Changming, DOU Qingchen. Evapotranspiration calculation in soil-plant-atmosphere continuum models [J]. Advances Water Science, 1992, 3(4):255-263. (in Chinese)

19 ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration guidelines for computing crop requirements[M]. Rome: United Nations FAO,1998.

20 BELMANS C, WESSELING J G, FEDDES R A. Simulation model of the water balance of a cropped soil: SWATRE[J]. Journal of Hydrology, 1983, 63(3):271-286.

21 HAY R K M, PORTER J R. The physiology of crop yield[M]. Oxford: Blackwell Publishing, 2006.

22 VAN GENUCHTEN M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soil[J]. Soil Science Society of America Journal, 1980,44:892-898.

23 郭向红,孙西欢,马娟娟,等. 基于混合遗传算法和积水入渗实验反求土壤水力参数[J]. 应用基础与工程科学学报, 2010, 18(6):1017-1026.  
GUO Xianghong, SUN Xihuan, MA Juanjuan, et al. Inverse model estimating soil hydraulic parameters based on hybrid genetic algorithms and ponding infiltration experiment[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2010, 18(6):1017-1026. (in Chinese)