

曹清,孔宪锐,丁潘,等.规模化养猪场产房单元仔猪自动补奶系统设计与试验[J].华中农业大学学报,2025,44(2):29-38.  
DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2025.02.004

## 规模化养猪场产房单元仔猪自动补奶系统设计与试验

曹清<sup>1</sup>,孔宪锐<sup>1</sup>,丁潘<sup>1</sup>,李灿<sup>1</sup>,牛智有<sup>1</sup>,李志伟<sup>2</sup>

1. 华中农业大学工学院/农业农村部智慧养殖技术重点实验室,武汉 430070;  
2. 深圳市慧农科技有限公司,深圳 518000

**摘要** 针对规模化养猪场哺乳仔猪哺育自动化程度较低等问题,设计一种适用于规模化养猪场产房单元的恒温循环式仔猪自动补奶系统,实现奶液制备、循环饲喂、自动清洗等功能。阐述补奶系统的整体结构及工作原理,开展搅拌罐、搅拌机、循环管道、输送泵、辅助加热器等关键部件结构设计和理论分析;开发以西门子S7-200 SMART为核心处理器的补奶控制系统,通过电磁阀、继电器等对奶液流动状态进行控制,通过流量传感器、温度传感器、液位传感器等对奶液物理参数进行监测,使用触摸屏实现人机交互;试制样机并进行性能试验,结果显示,搅拌制备的奶液均匀性总平均变异系数为0.435%,管道压力分布在26.0~65.2 kPa,所有补奶碗均可在6.1 s内充满奶液,奶液温度控制在40~42℃。研究结果表明,设计的产房单元仔猪自动补奶装置奶液均匀性较好,压力分布合理,奶液温度符合仔猪补奶要求,满足产房单元仔猪自动补奶的生产需求。

**关键词** 仔猪补奶;自动补奶系统;辅助加热;恒温循环;产房单元

**中图分类号** S817.3 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2025)02-0029-10

哺乳仔猪的成活率显著影响生猪养殖业的经济效益。当前母猪每胎产仔数多、哺乳母猪泌乳量不足对哺乳仔猪的生存造成威胁,严重影响着哺乳仔猪的成活率<sup>[1-3]</sup>。饮奶不足导致哺乳仔猪有更高的患病率、更慢的生长速度和更轻的断奶体质量,与养猪业追求的高效率、高成活率、低成本目标相违背<sup>[4-6]</sup>。因此,满足哺乳仔猪补奶需求可以有效降低仔猪患病率、增加仔猪断奶体质量,提高仔猪成活率,进而提高养猪场生产利润。

哺乳仔猪发育不完善,对奶液温度要求高,奶液温度应与母乳温度相近,控制在40~42℃<sup>[7]</sup>。根据实际生产经验,哺乳仔猪自3日龄到断奶期间,每日饲喂奶液量逐渐增加到360 mL。目前,常用的仔猪奶液供应方法主要包括交叉寄养和人工喂奶<sup>[8]</sup>。交叉寄养能够有效提高哺乳母猪的利用效率<sup>[9]</sup>,但母猪对非同窝仔猪具有排斥性,可能会出现母猪拒绝哺乳甚至攻击寄养仔猪现象,且寄养母猪数量也不能满足生产实际需求<sup>[10]</sup>。人工喂奶则对饲喂人员经验要求较高,需要结合仔猪的个体差异实现仔猪的精准饲喂,但也存在人工成本高、效率低下等问题<sup>[11]</sup>。

半自动或者自动哺乳仔猪补奶机研发有效地解决上述问题,对于提高仔猪的生长性能,保证仔猪的断奶体质量,实现哺乳仔猪的规模化、精细化饲喂具有重要意义和应用价值。Peter<sup>[12]</sup>发明了一种仔猪补奶系统,集成了奶粉和热水自动添加、自动搅拌、自动输送、自动清洁等功能,实现了大规模养猪场仔猪补奶的全自动化,但该系统不能对不同日龄的哺乳仔猪进行精细化补奶,其24 h不间断供奶模式也不符合国内仔猪养殖习惯。WEDA公司设计的一款仔猪补奶系统可以实现自动制备奶液和自动输送奶液,但是该系统仍然需要人工清洗。吴壮壮等<sup>[13-14]</sup>设计了一种保育箱仔猪喂奶系统,该系统以PLC为核心控制器,实现了自动供水、自动加热、自动搅拌、自动清洗等功能,但该系统需要对保育箱进行改造,安装繁琐,且不能实现恒温补奶。杨亮等<sup>[15]</sup>研制的新型仔猪补奶机包括下料装置、进水装置、搅拌装置、吸奶装置和干燥装置等,但该装置1次只能饲喂4只仔猪,无法满足规模化养猪场需求。以上研究对仔猪补奶系统的结构进行了探索,但仍无法做到兼顾国内仔猪养殖模式、恒温饲喂和精准饲喂。

收稿日期:2024-11-12

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFD1300305)

曹清,E-mail:cqing2267464@outlook.com

通信作者:牛智有,E-mail:nzhy@mail.hzau.edu.cn

为了满足规模化养猪场对哺乳仔猪的补奶需求,针对目前仔猪补奶效率低、劳动强度大和自动化水平低等问题,本研究设计一种适用于产房单元的恒温循环式仔猪自动补奶系统,试制样机并对仔猪自动补奶系统性能进行测定,以期为我国规模化养猪场哺乳仔猪自动补奶提供技术支撑。

## 1 材料与方 法

### 1.1 仔猪自动补奶系统结构设计

本研究的仔猪自动补奶系统基于某大型规模化养猪场产房单元,包含30个产床,产床呈两侧布置,每侧布置15个,每个产床包含母猪饲喂区和仔猪饲喂区(图1)。该系统需要满足对1个产房单元内所有哺乳仔猪的补奶需求。

基于规模化养猪场产房单元的布置形式和哺乳仔猪的饲喂需求,设计了恒温循环式仔猪补奶系统,其整体结构如图2所示。恒温循环式仔猪补奶系统主要包括控制单元、水添加单元、奶液制备单元、循环单元、辅助加热单元和饲喂终端。水添加单元包括热水器、过滤器、搅拌罐注水电磁阀、循环缓冲罐注水电磁阀和流量计等,其主要功能是对猪场自来水进行过滤和预加热、向搅拌罐和循环缓冲罐内输送水。奶液制备单元包括搅拌罐、搅拌电机、搅拌器、过滤器和搅拌罐液位计等,其主要功能是通过代乳粉和水搅拌,形成满足饲喂要求的稳定奶液,并储存制备好的奶液。循环单元包括循环缓冲罐、输送泵、循环管道、循环缓冲罐液位计、循环电磁阀、循环缓冲罐注奶电磁阀和循环缓冲罐注水电磁阀等,其主要功能是提取制备好的奶液,让奶液在产房单元内的所有产床之间进行循环。辅助加热单元包括辅助加热器和温度传感器,其主要功能是对循环中的奶液进行加热和保温。饲喂终端通过循环管道布置在产床哺乳仔猪饲喂区内,其主要功能是将循环系统中的奶液提取到饲喂碗中,以备仔猪饮用。

该系统的工作过程为:操作人员添加代乳粉到搅拌罐中,并设置代乳粉添加量,启动补奶系统。系统自动向搅拌罐中添加热水,启动搅拌电机,完成奶液制备,将奶液储存在搅拌罐中备用。到达设定饲喂时间,系统进入补奶阶段。系统自动向循环缓冲罐中添加制备好的奶液,启动输送泵,抽送奶液进入循环管道,同时辅助加热器对循环中的奶液进行加热和保温,保证循环奶液温度在仔猪适饮温度范围。当循环管道内奶液通过饲喂终端被仔猪饮用后,循环管道内奶液通过循环缓冲罐内奶液进行补充,保证循环管道内奶液充足。当循环缓冲罐内奶液不足时,通过搅拌罐进行补充。饲喂结束后,停止向循环系统添加奶液,输送泵和辅助加热器停止工作。到达下次饲喂时间后,系统再次进入补奶阶段。当搅拌罐内奶液消耗完后,系统向搅拌罐中添加清洁用水,启动搅拌电机,对搅拌罐进行清洁,系统同时向循环缓冲罐内添加清洁用水,对循环系统进行清洁,清洁完毕后将污水排出。补奶系统本次工作结束,等待操作人员再次启动。

### 1.2 关键部件设计和选型

1)搅拌罐。每个产房单元有30个产床,每个产床饲喂8~10只哺乳仔猪,根据实际生产经验,哺乳仔猪自3日龄到断奶期间,每日饲喂奶液量逐渐增加到360 mL。操作人员每天最多投放代乳粉2次,按照最大饲喂哺乳仔猪数量和个体最大奶液饲喂量进行计算,最大单次制备奶液量为45.8 L,考虑到管道残留和哺乳仔猪摄入浪费,设计最大单次制备奶液量为50 L。搅拌罐采用圆筒锥底型式,其结构和关键尺寸如图3所示。

搅拌罐关键几何尺寸计算公式为:

$$\begin{cases} V = \frac{V_0}{\varphi} \\ V = \frac{\pi}{4} H_2 D_1^2 + \frac{\pi}{12} (H_1 - H_2) (D_1^2 + D_2^2 + D_1 D_2) \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中,  $V$  为搅拌罐容积, L;  $V_0$  为最大单次

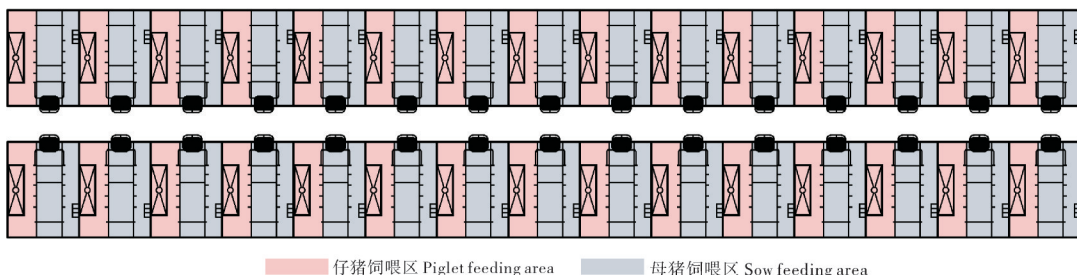
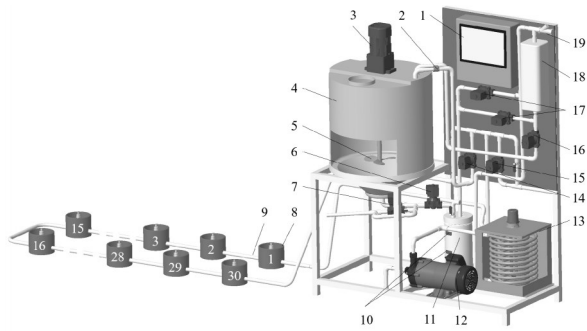


图1 某大型规模化养猪场产房单元产床布置示意图

Fig.1 Layout of delivery beds in a large scale pig farm's delivery room unit



1. 控制箱 Control box; 2. 流量计 Flow meter; 3. 搅拌机 Mixing motor; 4. 搅拌罐 Mixing tank; 5. 搅拌机 Blender; 6. 搅拌罐注奶电磁阀 Mixing tank milk injection solenoid valve; 7. 搅拌罐排污电磁阀 Mixing tank discharge solenoid valve; 8. 喂奶终端 Feeding terminal; 9. 循环管道 Circulating pipeline; 10. 液位计 Liquid level gauge; 11. 循环缓冲罐 Circulating buffer tank; 12. 输送泵 Transfer pump; 13. 辅助加热器 Auxiliary heater; 14. 回奶电磁阀 Return milk solenoid valve; 15. 循环管道排污电磁阀 Circulating pipeline discharge solenoid valve; 16. 搅拌罐注水电磁阀 Mixing tank water injection solenoid valve; 17. 循环缓冲罐注水电磁阀 Circulating buffer tank water injection solenoid valve; 18. 热水器 Water heater; 19. 过滤器 Filter.

图2 仔猪补奶系统整体结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of the overall structure of the piglet milk supplementation system

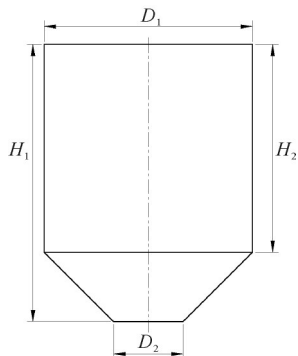


图3 搅拌罐结构和关键尺寸示意图

Fig.3 Schematic diagram of the structure and key dimensions of the mixing tank

制备奶液量,取 50 L; $\varphi$  为填充系数,取 0.8; $H_1$  为搅拌罐总高度, mm; $H_2$  为搅拌罐直段高度, mm; $D_1$  为搅拌罐直段直径, mm; $D_2$  为搅拌罐底面直径, mm。设定  $H_1:H_2:D_1:D_2=4:3:3:1$ , 经计算和圆整可得:  $H_1=600$  mm,  $H_2=450$  mm,  $D_1=450$  mm,  $D_2=150$  mm。

2) 搅拌机。推进式搅拌机适用于黏度低、流量大的场合,较小的搅拌功率即可达到良好的搅拌效果<sup>[16]</sup>。为实现乳粉与水的充分混合,采用推进式搅拌机(图4)。搅拌机螺旋方向为左旋,直径  $d$  设定

为 150 mm,螺距  $p$  设定为 150 mm,叶片数量设定为 3 片,叶片角度  $\alpha$  设定为  $49^\circ 2'$ 。为保证搅拌机对搅拌罐中不同液面高度的奶液均能够实现良好的搅拌效果,将搅拌器的离底距离  $h$  设定为 160 mm。推进式搅拌机与搅拌罐之间安装位置如图 5 所示。

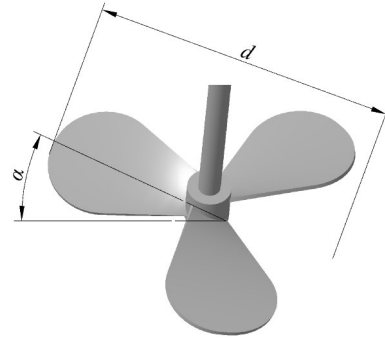


图4 推进式搅拌机结构和关键尺寸示意图

Fig.4 Schematic diagram of the structure and key dimensions of the propulsion mixer

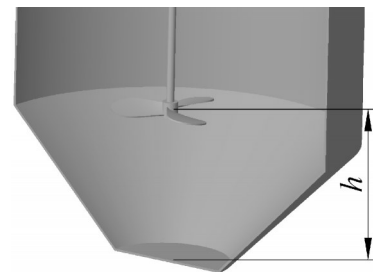


图5 搅拌机安装位置示意图

Fig.5 Schematic diagram of the installation position of the mixer

搅拌机转速可通过搅拌雷诺数( $N_{Re}$ )确定。当搅拌罐中的奶液流动状态处于湍流区( $N_{Re}>20\ 000$ )时,奶液形成有效的流动状态和适当的流态,搅拌机具有良好的搅拌性能<sup>[17]</sup>。搅拌机转速为<sup>[18]</sup>:

$$N = \frac{N_{Re}\mu}{\rho d^2} \quad (2)$$

式(2)中, $N$ 为搅拌机转速, r/s; $N_{Re}$ 为搅拌雷诺数,取 20 000; $\mu$ 为奶液黏度, Pa·s; $\rho$ 为奶液密度, kg/m<sup>3</sup>;  $d$ 为搅拌机直径, mm。经测量,奶液密度为 1 041 kg/m<sup>3</sup>、黏度为 0.002 Pa·s。计算可得,搅拌机转速应高于 1.74 r/s,综合考虑搅拌效果和搅拌能耗,设定搅拌机转速为 2 r/s。

3) 搅拌机。搅拌机需要与之匹配的搅拌机作为其驱动力。搅拌机功率为:

$$\begin{cases} P_M = \frac{P_S + P_m}{\eta} \\ P_S = N_P \rho N^3 d^5 \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中, $P_M$ 为搅拌机计算功率, W; $P_S$ 为搅拌

器计算功率,  $W$ ;  $P_m$  为轴密封系统摩擦损失,  $W$ ;  $\eta$  为传动系统机械效率,  $\%$ ;  $N_p$  为搅拌功率准数;  $\rho$  为奶液密度,  $kg/m^3$ ;  $N$  为搅拌器转速,  $r/s$ ;  $d$  为搅拌器直径,  $m$ 。轴密封系统摩擦损失, 取  $6 W$ , 传动系统机械效率取  $0.9$ , 搅拌功率准数根据 Rushton 算图法取  $0.35$ 。经计算, 搅拌电机计算功率为  $31 W$ 。结合搅拌器转

速, 选用型号为 5IK60RGU-CF 的齿轴电机和与之匹配的减速比为  $20$  的减速机。

4) 循环管道。对循环管道的长度进行设计, 该养猪场产房单元每个产床宽度为  $1.8 m$ , 每列  $15$  个产床,  $2$  列产床间距  $0.9 m$ , 因此, 设定循环管道长度为  $58 m$ 。循环管道布置方式如图 6 所示。

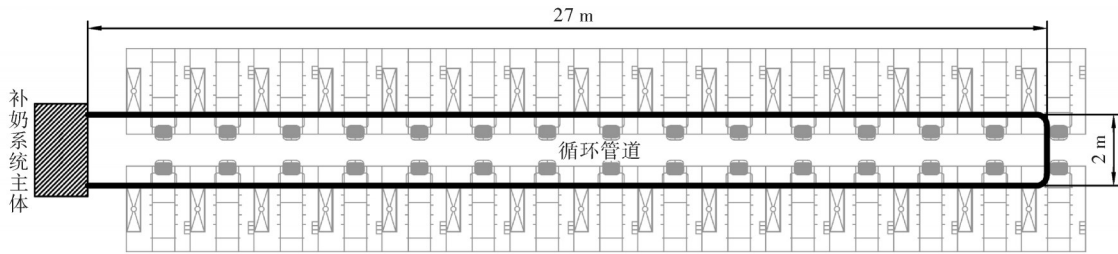


图6 循环管道布置方式示意图

Fig.6 Schematic diagram of circulation pipeline layout

循环管道设计断面处内径计算公式为<sup>[19]</sup>:

$$D = \sqrt{\frac{4Q}{\pi v}} \quad (4)$$

式(4)中,  $D$  为管道设计断面处的计算内径,  $mm$ ;  $Q$  为通过管道设计断面的水流量,  $m^3/s$ ;  $v$  为管道设计断面处水流平均速度,  $m/s$ 。为满足对单元内所有仔猪的同时饲喂, 设计该循环管道在  $8 s$  内充满  $1$  个仔猪补奶碗。本研究选用的饲喂终端容积为  $250 mL$ , 则通过管道设计断面水流量为  $4 \times 10^{-4} m^3/s$ , 设定管道设计断面处水流平均速度为  $1.5 m/s$ , 经计算, 管道设计断面处的计算内径为  $11.5 mm$ 。最终选用内径为  $12 mm$ 、外径为  $16 mm$  的 PE 铝塑管作为循环管道的搭建材料。

5) 输送泵。循环管道内奶液需要合适的输送泵作为驱动力, 使其达到合适的流动状态, 因此, 需要对输送泵参数进行计算。输送泵扬程计算公式为:

$$\begin{cases} H = H_1 + H_2 + H_3 + H_4 \\ H_2 = \sum h_l + \sum h_m \\ h_l = \lambda \frac{lv^2}{2gd} \\ h_m = \zeta \frac{lv^2}{2g} \end{cases} \quad (5)$$

式(5)中,  $H$  为输送泵的计算扬程,  $m$ ;  $H_1$  为几何扬程,  $m$ ;  $H_2$  为阻力扬程,  $m$ ;  $H_3$  为设备扬程,  $m$ ;  $H_4$  为扬程余量,  $m$ ;  $h_l$  为沿程水头损失,  $m$ ;  $h_m$  为局部水头损失,  $m$ ;  $\lambda$  为沿程阻力系数;  $\zeta$  为局部阻力系数;  $l$  为循环管道总长,  $m$ ;  $v$  为管道设计断面处水流平均速度,  $m/s$ ;  $d$  为循环管道内径,  $m$ ;  $g$  为重力加速度, 取  $9.8 m/s^2$ 。经计算, 输送泵扬程为  $9.6 m$ , 且管道设计断面水流量为  $4 \times 10^{-4} m^3/s$ 。因此, 选用型号为 MD-

100RM 的输送泵, 其扬程为  $10 m$ , 流量为  $8.7 m^3/h$ , 功率为  $370 W$ 。

6) 循环缓冲罐。循环缓冲罐内存储循环系统中的冗余奶液, 是循环管道中奶液的来源和回流装置, 用于防止循环管道内奶液被饮用后空气进入循环管道。循环系统内奶液越多, 加热和保温所需的能耗就越大, 因此, 循环缓冲罐的设计应在达到缓冲效果的基础上尽可能减小设计容积。循环缓冲罐容积计算公式为:

$$V = \frac{\delta V_1}{\eta} \quad (6)$$

式(6)中,  $V$  为循环缓冲罐容积,  $L$ ;  $\delta$  为缓冲系数, 取  $0.25$ ;  $V_1$  为循环管道内奶液量,  $L$ ;  $\eta$  为循环缓冲罐填充系数, 取  $0.8$ 。计算可得循环缓冲罐的容积为  $2.04 L$ 。设计循环缓冲罐罐体外径  $d_1$  为  $120 mm$ 、罐高  $h_1$  为  $250 mm$ 、壁厚  $10 mm$  (图 7)。罐体采用透明亚克力制作, 便于操作人员观察奶液循环状态。上下盖与罐体采用螺纹连接, 下盖开孔分别为循环管道奶液进口和奶液回流口, 上盖开孔分别为奶液添加口、水添加口和透气阀, 所有开孔与管道采用螺纹连接。上下盖和所有开孔均安装胶圈提高密封性能。

7) 辅助加热器。哺乳仔猪生理尚未发育, 体温调节能力差, 对奶液温度要求高, 因此在补奶系统中加入辅助加热器, 对循环系统内奶液进行加热和保温, 确保仔猪饮用到适宜温度的奶液。盘管加热系统能够迅速加热流体, 提供高效的热交换, 具有加热均匀、控制方便和高安全性等优点<sup>[20-21]</sup>。因此, 本研究设计的辅助加热器选用盘管加热方式。加热功

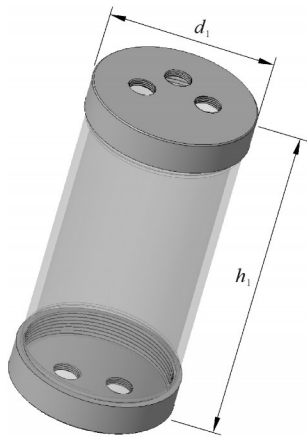


图7 循环缓冲罐

Fig.7 Circulating buffer tank

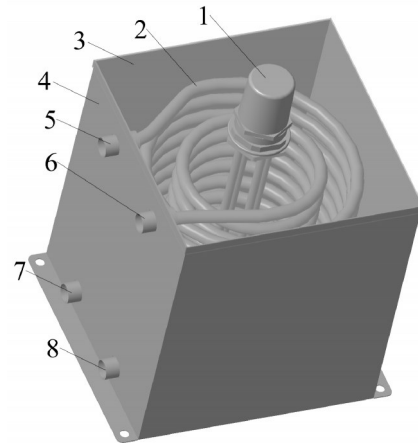
率、盘管长度计算公式为：

$$\begin{cases} P = \frac{Cm\Delta t_1}{T} \\ L = \frac{eK\Delta t_2}{fPS} \end{cases} \quad (7)$$

式(7)中,  $P$ 为加热功率, kW;  $C$ 为奶液的比热容,  $2.5 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$ ;  $m$ 为奶液质量, kg;  $\Delta t_1$ 为加热前后温差,  $^\circ\text{C}$ ;  $T$ 为盘管加热时间, s;  $f$ 为换热量和阻力影响系数, 取1.2;  $e$ 为结垢影响系数, 取0.8;  $K$ 为传热系数, 取  $3 \text{ kJ}/(\text{m}^2\cdot^\circ\text{C})$ ;  $\Delta t_2$ 为换热前后温差,  $^\circ\text{C}$ ;  $L$ 为盘管长度, m;  $S$ 为每米盘管的表面积,  $\text{m}^2$ 。设定需要将循环缓冲罐和循环管道内奶液在3 min内从  $30^\circ\text{C}$ 加热到  $42^\circ\text{C}$ , 换热前后温差  $2.5^\circ\text{C}$ , 盘管管径与循环管道内径一致, 经计算, 可得加热功率为1.66 kW, 盘管长度为8.9 m。最终选用功率为1.8 kW的加热棒和长度为10 m的加热盘管。

最后, 确定辅助加热器结构由加热棒、加热盘管和箱体组成, 辅助加热器结构如图8所示。使用时, 加热棒对箱体中的介质水进行升温, 介质水对加热铜管中的循环奶液进行升温。箱体尺寸为  $240 \text{ mm}\times 240 \text{ mm}\times 270 \text{ mm}$ 。箱体一侧设置有奶液进口、奶液出口、介质水进口、介质水出口。

8) 饲喂终端。饲喂终端是将循环奶液饲喂到仔猪口中的最后一个环节。选用容量为250 mL的触摸式补奶碗。该补奶碗与循环管道直接连接, 当仔猪触碰到补奶碗内的弹簧杆时, 循环管道内的奶液在输送泵提供的压力下进入补奶碗中, 当弹簧杆未被触碰时, 奶液不能进入补奶碗中, 经由补奶碗下部的管道继续进行循环, 实现奶液的即饮即送, 避免奶液浪费, 减缓奶液腐败。



1. 加热棒 Heating rod; 2. 加热铜管 Heating copper pipes; 3. 上盖 Upper cover; 4. 箱体 Box body; 5. 奶液进口 Milk import; 6. 奶液出口 Milk export; 7. 介质水进口 Inlet of medium water; 8. 介质水出口 Medium water outlet.

图8 辅助加热器

Fig.8 Auxiliary heater

### 1.3 控制系统设计

1) 控制系统硬件设计。根据系统设计要求, 以西门子S7-200 SMART CPU SR30作为控制系统的核心控制器, EM DR16作为控制器I/O接口扩展模块, EM AE08作为控制器模拟信号处理模块, 昆仑通态TPC 1061Ti触摸屏作为系统主要交互单元, 开关电源作为触摸屏、传感器和继电器的供电模块, 电磁阀作为系统注水、注奶、排污、奶液循环、奶液回流、管道清洗等动作控制节点, 流量传感器用作读取搅拌罐注水水量、液位传感器用作读取搅拌罐和循环缓冲罐奶液上下液位, 温度传感器用作读取循环管道中奶液温度, 电磁继电器用作控制搅拌电机和输送泵、固态继电器用作控制辅助加热器, 启停开关用作控制系统上下电, 信号灯用作提示和警告当前系统运行状态。控制系统硬件选型如表1所示。结合控制系统硬件选型表完成硬件电气原理设计和线路连接。

2) 控制系统软件设计。使用STEP 7-MicroWIN SMART软件, 基于梯形图进行程序设计。为提高程序易读性, 方便样机调试和参数更改, 自动补奶系统采用“主-子程序”结构进行设计, 将奶液制备、循环饲喂和自动清洗3个功能程序段封装成3个子程序, 程序运行时在主程序中对所需功能模块对应的子程序进行调用即可。自动补奶系统的主程序工作流程如图9所示。系统运行时首先对触摸屏、电磁阀、继电器、流量传感器、温度传感器、液位传感器和子程序参数进行初始化设置。初始化完成后, 操

表1 硬件选型表

Table 1 Hardware selection

硬件名称 Hardware name	硬件型号 Hardware model	输入电压/V Input voltage	数量 Number
PLC	S7-200 SMART CPU SR30	220	1
I/O接口扩展模块 I/O interface expansion module	EM DR16	24	1
模拟信号扩展模块 Analog signal expansion module	EM AE08	\	1
触摸屏 Touch screen	TPC 1061Ti	24	1
电磁阀 Solenoid valve	D01-4104	24	7
开关电源 Switch power supply	NES-150-24	220	1
流量传感器 Flow sensor	WFS-NB011G	24	1
液位传感器 Liquid level sensor	XKCY26	24	4
温度传感器 Temperature sensor	PT100	24	1
电磁继电器 Electromagnetic relay	RXM2LB2BD	24	2
固态继电器 Solid state relay	CDG1-1DA/10A	24	1
启停开关 Switch	HB38 SWITCH	\	1
信号灯 Signal light	HBD16-220 S32	220	2

作人员添加代乳粉到搅拌罐中,设置代乳粉添加量,并点击确认按钮。PLC读取确认按钮状态,当状态为1时,则调用奶液制备子程序,完成搅拌罐内奶液制备。PLC使用READ\_RTC指令读取当前时间,将预设循环饲喂时间和当前时间进行对比,如果相同,则判定为到达预设饲喂时间,调用循环饲喂子程序。当PLC识别到搅拌罐和循环缓冲罐下液位传感器状态均为0时,结束循环饲喂,调用自动清洗子程序。自动清洗结束后系统清除乳粉添加量、水添加量等缓存数据,本次饲喂结束等待下1次操作人员进行确认。

3)交互界面设计。该仔猪自动补奶系统使用昆仑通态TPC 1061Ti触摸屏作为主要交互单元。因此,基于MCGS嵌入版组态软件进行交互界面设计(图10)。如图10所示,交互界面左侧为补奶系统运行状态可视化模块,可以实时显示搅拌电机、输送泵、辅助加热器和所有电磁阀工作状态,当其运行或者呈打开状态时,在触摸屏上为彩色实体显示,当停止运行或者呈关闭状态时,在触摸屏上为透明状显

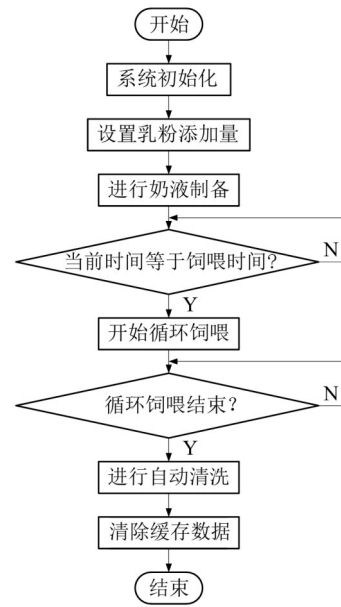


图9 主程序工作流程图

Fig.9 Workflow of the main program

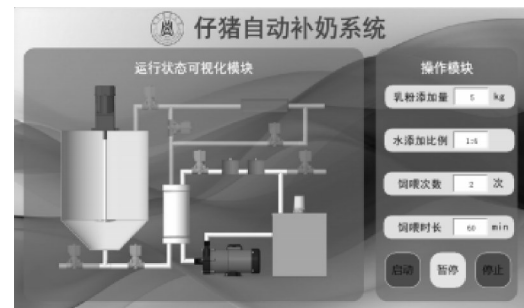


图10 自动补奶系统交互界面

Fig.10 Physical picture of automatic milk supplementation system

示,同时,同步更新奶液在系统中的流动路径。交互界面右侧为设置模块,包括乳粉添加量设置、水添加比例设置、饲喂次数设置、饲喂时长设置、启动按钮、暂停按钮和停止按钮。

## 2 结果与分析

为验证补奶系统是否满足设计要求,试制样机(图11),并在华中农业大学工科基地试验中心开展样机性能试验。试验材料采用河南牧经海润农牧科技集团有限公司生产的中美普克仔猪专用奶粉。

### 2.1 传感器精度校准

首先对流量传感器和温度传感器进行精度校准。在控制系统中设置水添加量分别为50 L,使用注水电磁阀向搅拌罐内添加水,使用流量传感器对水量进行控制,待水添加完毕后,将搅拌罐内水全部

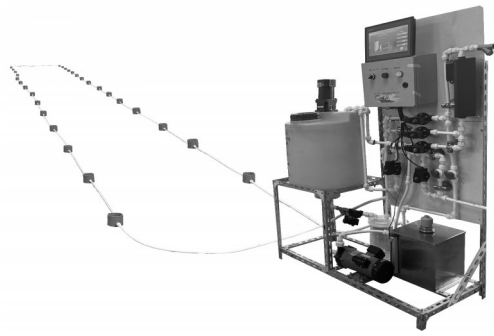


图11 自动补奶系统实物图

Fig.11 Physical picture of automatic milk supplementation system

排出到容器中,使用电子秤对实际添加水量进行标定。3次试验平均标定水量为49.84 L,总平均相对误差为0.5%,满足使用要求。使用温度传感器和水

银温度计同时测量同一烧杯内的水温,操作温度变送器上的矫正电位器,使水银温度计读数和温度传感器输出温度值相等,完成温度传感器校准。

### 2.2 搅拌效果验证

采用所购乳猪专用奶粉的推荐冲调比例进行奶液制备,每10 g奶粉使用60 mL水进行冲调。向搅拌罐内投放10 kg奶粉、添加50 L水,设定搅拌时长5 min并启动搅拌电机,到达搅拌时长后,关闭搅拌电机,静置5 min,量筒量取液面下10、25、40 cm处各50 mL奶液制成样品,使用电子秤称质量,并计算样品密度作为搅拌效果评价指标。试验重复3次,结果如表2所示。由表2可知,3次试验总平均变异系数为0.435%,不同深度位置奶液密度差别不明显,奶液均匀性较好,搅拌效果满足设计要求。

表2 不同深度奶液样品搅拌效果

Table 2 Mixing effect of milk samples with different depths

试验次序 Experimental sequence	取样深度/cm Sampling depth	样品质量/g Sample quality	样品密度/(g/mL) Sample density	平均密度/(g/mL) Average density	标准差/(g/mL) S.D.	变异系数/% CV
1	10	51.51	1.030	1.034	0.004 2	0.405
	25	51.65	1.033			
	40	52.01	1.040			
2	10	52.36	1.047	1.049	0.004 3	0.412
	25	52.28	1.045			
	40	52.74	1.055			
3	10	51.78	1.035	1.040	0.005 1	0.490
	25	51.91	1.038			
	40	52.36	1.047			

### 2.3 补奶效果验证

以远离输送泵的方向,依次将仔猪补奶碗编号为1、2、3、……、30,进行补奶效果试验。启动补奶系统,让制备好的奶液进行循环,依次手动触碰补奶碗的弹簧杆,模拟仔猪饮奶,记录补奶碗处管道压力和补奶碗充满奶液需要的时长。试验结果表明,越远离输送泵的补奶碗处管道压力越小,充满奶液所需时长越长,压力在26.0~65.2 kPa,30号补奶碗充满奶液所需时长为6.1 s,相对较短,能够满足使用要求(图12)。

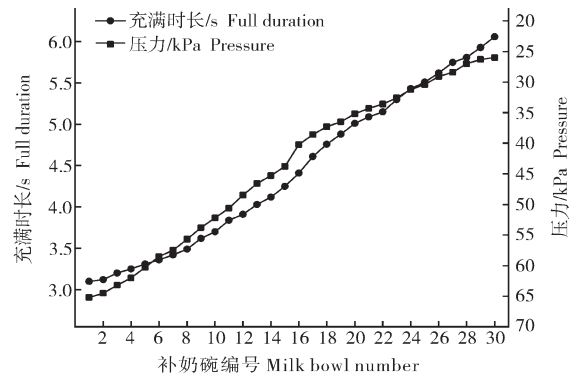


图12 补奶碗补奶效果试验结果

Fig.12 Results of the milk replenishment effect test on the milk bowl

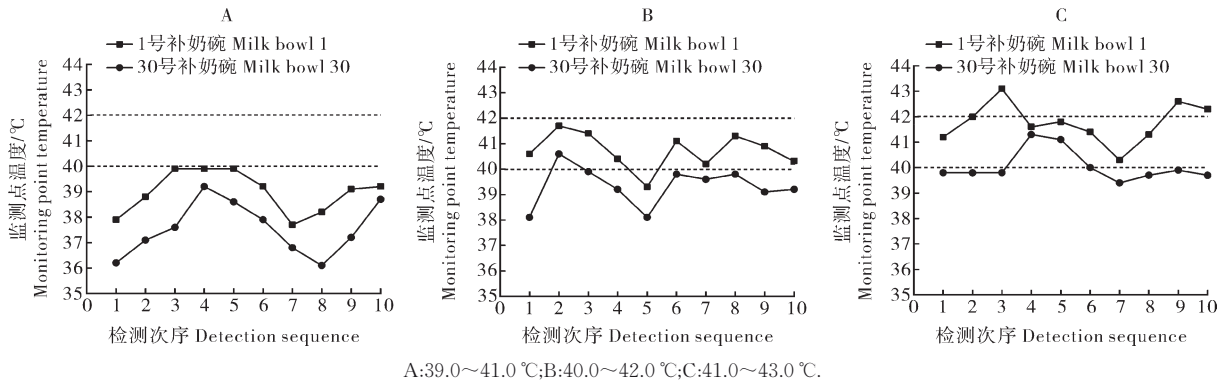
### 2.4 温度控制验证

根据仔猪哺乳经验,需要将补奶碗中奶液温度控制在仔猪饮用最佳温度范围(40~42℃)。辅助加热器中温度传导具有滞后性和非线性,温度传感器的监测点实测温度与补奶碗位置奶液温度也有一定差异,因此,需要探究最佳温度控制方案。通过温度传感器监测点的奶液温度控制辅助加热器的

启停,当温度传感器监测点温度低于A时,启动辅助加热器,当温度传感器监测点温度高于B时,关闭辅助加热器。沿用上文补奶碗编号,启动补奶系统,让制备好的奶液进行循环,手动触碰补奶碗的弹簧杆,待奶液充满补奶碗,立即用水银温度计测

量并记录1号和30号补奶碗中奶液温度,以此作为补奶碗中奶液的最高温度和最低温度。每隔3 min测量1组,持续测量30 min。首先将A和B的温差设定为2℃,设置A-B温度组分别为39.0~41.0、40.0~

42.0、41.0~43.0℃,进行温度控制试验(图13)。结果表明,该温度控制方案均不能将补奶碗奶液温度完全控制在40~42℃,在41.0~43.0℃温度组中,补奶碗奶液温度会同时出现低于40℃和高于42℃。



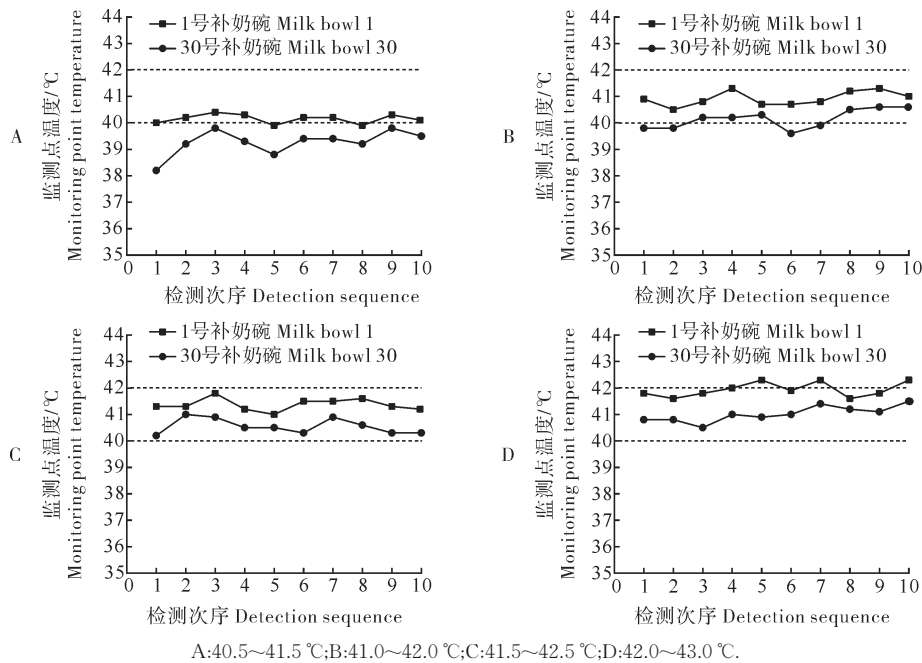
A:39.0~41.0℃;B:40.0~42.0℃;C:41.0~43.0℃.

图13 补奶碗奶液温度控制验证(2℃)

Fig.13 Verification results of temperature control of milk solution in the milk replenishing bowl(2℃)

将A和B的温差设定为1℃,设置A-B温度组分别为40.5~41.5、41.0~42.0、41.5~42.5、42.0~43.0℃,进行温度控制试验(图14)。结果表明,可见

补奶碗奶液温度波动幅度明显减小,在41.5~42.5℃温度组中,补奶碗奶液温度完全控制在40~42℃。该温度控制方案能够满足设计要求。



A:40.5~41.5℃;B:41.0~42.0℃;C:41.5~42.5℃;D:42.0~43.0℃.

图14 补奶碗奶液温度控制验证(1℃)

Fig.14 Verification results of temperature control of milk solution in the milk replenishing bowl(1℃)

### 3 讨论

本研究设计了一种恒温循环式仔猪自动补奶系统,由控制单元、水添加单元、奶液制备单元、循环单元、辅助加热单元和饲喂终端组成。对仔猪自动补奶系统控制系统进行了设计,对控制系统硬件进行选型和连接,对软件和交互界面进行详细设计,实现

系统的奶液制备、循环饲喂和自动清洗功能。完成了补奶系统性能试验,对搅拌效果、补奶效果和温度控制效果进行了验证,结果表明,搅拌罐内不同深度奶液密度总平均变异系数为0.435%,管道压力为26.0~65.2 kPa,补奶碗充满奶液最长时长为6.1 s,奶液温度控制效果良好。与现有仔猪补奶装置<sup>[13,15]</sup>相



比,本研究设计的仔猪自动补奶系统饲喂仔猪数量更多,奶液温度控制精度更高,能耗更少,最大饲喂仔猪数量由200多头增加到300头,奶液温度波动范围由35~45℃优化到40~42℃,整机功率由5.5 kW下降到3 kW,满足仔猪补奶需求。

本仔猪自动补奶系统仅以规模化养猪场产房单元为适用场景,实现了奶液制备、奶液饲喂、罐体和管道清洗的自动化,针对其他不同场景下的仔猪补奶方法、代乳粉自动添加方法、补奶碗自动清洗方法、仔猪个体精细化饲喂方法还需进一步研究,提供更多仔猪补奶解决方案,为实现更高程度仔猪补奶无人化和智能化、提高仔猪成活率、降低仔猪养殖成本提供理论依据和技术支持。

### 参考文献 References

- [1] 沈明霞,陈金鑫,丁奇安,等.生猪自动化养殖装备与技术研究进展与展望[J].农业机械学报,2022,53(12):1-19.SHEN M X, CHEN J X, DING Q A, et al. Current situation and development trend of pig automated farming equipment application [J]. Transactions of the CSAM, 2022, 53 (12) : 1-19 (in Chinese with English abstract).
- [2] HARPER J, BUNTER K L. Review: improving pig survival with a focus on birthweight: a practical breeding perspective [J/OL]. Animal, 2024, 18: 100914 [2024-11-12]. <https://doi.org/10.1016/j.animal.2024.100914>.
- [3] 杨美德,孙静莹.哺乳仔猪生理特点与提升存活率的饲养要点[J].现代畜牧科技,2022(11):40-42.YANG M D, SUN J X. Brief talk about the physiological characteristics of suckling piglets and the key points of livability [J]. Modern animal husbandry science & technology, 2022 (11) : 40-42 (in Chinese with English abstract).
- [4] LE DIVIDICH J, CHARNECA R, THOMAS F. Relationship between birth order, birth weight, colostrum intake, acquisition of passive immunity and pre-weaning mortality of piglets [J/OL]. Spanish journal of agricultural research, 2017, 15(2): e0603 [2024-11-12]. <https://doi.org/10.5424/sjar/2017152-9921>.
- [5] 范春国,彭健,汪绍南,等.湖北白猪IV系母猪哺乳期体重与仔猪窝重变化规律的研究[J].华中农业大学学报,1992,11(4):369-372.FAN C G, PENG J, WANG S N, et al. Studies on the law in weight changes of the sow and her litter during lactation in Hubei white swine strain IV [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 1992, 11 (4) : 369-372 (in Chinese with English abstract).
- [6] MARTÍNEZ-RAMÍREZ H R, JEAUROND E A, DE LANGE C F M. Nutrition-induced differences in body composition, compensatory growth and endocrine status in growing pigs [J]. Animal, 2009, 3(2):228-236.
- [7] 游筱彤,张锦瑞,王华,等.温度精细调控对哺乳仔猪局部供暖节能的影响[J].农业工程学报,2022,38(24):180-187. YOU X T, ZHANG J R, WANG H, et al. Effects of precise temperature control on local heating energy saving of suckling piglets [J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38 (24) : 180-187 (in Chinese with English abstract).
- [8] 肖文萍.哺乳仔猪的管理流程与护理要点[J].畜牧产业,2023(10):76-80.XIAO W P. Management process and nursing points of suckling piglets [J]. Animal agriculture, 2023 (10) : 76-80 (in Chinese).
- [9] 郭志勇,侯国华.浅谈哺乳仔猪腹泻预防和治疗措施[J].山东畜牧兽医,2021,42(10):32-33.GUO Z Y, HOU G H. Discussion on prevention and treatment measures of diarrhea in suckling piglets [J]. Shandong journal of animal science and veterinary medicine, 2021, 42 (10) : 32-33 (in Chinese).
- [10] 高云,陈斌,廖慧敏,等.群养猪侵略性行为的深度学习识别方法[J].农业工程学报,2019,35(23):192-200.GAO Y, CHEN B, LIAO H M, et al. Recognition method for aggressive behavior of group pigs based on deep learning [J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35 (23) : 192-200 (in Chinese with English abstract).
- [11] 胡月超,辛英霞.如何养好哺乳仔猪[J].中国畜禽种业,2006,2(4):10-11.HU Y C, XIN Y X. How to raise suckling piglets well [J]. The Chinese livestock and poultry breeding, 2006, 2 (4) : 10-11 (in Chinese).
- [12] PETER J K M. 一种全自动仔猪补奶系统及其使用方法:中国, CN111955370B [P]. 2022-05-27. PETER J K M. A fully automatic piglet milk supplementation system and its usage method, CN111955370B [P]. 2022-05-27 (in Chinese).
- [13] 吴壮壮,牛智有,刘梅英,等.基于响应面法的仔猪配奶罐搅拌机数值模拟与优化[J].华中农业大学学报,2023,42(1):248-257.WU Z Z, NIU Z Y, LIU M Y, et al. Numerical simulation and optimization of stirrer in piglet milk tank based on response surface method [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2023, 42 (1) : 248-257 (in Chinese with English abstract).
- [14] 吴壮壮,牛智有,刘梅英,等.仔猪喂奶系统设计与输送管道优化[J].华中农业大学学报,2023,42(2):216-223.WU Z Z, NIU Z Y, LIU M Y, et al. Design and experiment of piglet feeding system and transmission pipeline optimization [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2023, 42 (2) : 216-223 (in Chinese with English abstract).
- [15] 杨亮,裴孟侠,肖强,等.新型仔猪补奶机的研制[J].现代农业装备,2019,40(6):28-33.YANG L, PEI M X, XIAO Q, et al. Research on a new type milk machine for piglet [J]. Modern agricultural equipment, 2019, 40 (6) : 28-33 (in Chinese with English abstract).
- [16] 钟天铖,汤文成,刘碧茜.推进式搅拌机固液混合的计算流体力学模拟[J].东南大学学报(自然科学版),2016,46(4):713-719.ZHONG T C, TANG W C, LIU B X. CFD simulation of

- solid-liquid mixing in stirred vessel by propeller agitator [J]. *Journal of Southeast University (natural science edition)*, 2016, 46(4): 713-719 (in Chinese with English abstract).
- [17] 马小欣. 搅拌不同粘度溶液的搅拌器选择[J]. *中国新技术新产品*, 2016(7): 63. MA X X. Selection of agitators for mixing solutions with different viscosity [J]. *New technology & new products of China*, 2016(7): 63 (in Chinese).
- [18] 陈志平. 搅拌与混合设备设计选用手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004. CHEN Z P. Manual for design and selection of mixing and mixing equipment [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004 (in Chinese).
- [19] 蔡增基, 龙天渝. 流体力学泵与风机[M]. 4版. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999. CAI Z J, LONG T Y. Fluid mechanics pumps and fans [M]. 4th edition. Beijing: China Architecture & Building Press, 1999 (in Chinese).
- [20] 芦潮, 朱敦智. 盘管式与容积式储热水箱供水实验研究[J]. *太阳能学报*, 2008, 29(5): 569-573. LU C, ZHU D Z. The experiment research of the tube type-tank and the volume-type tank to supply the hot water [J]. *Acta energiae solaris sinica*, 2008, 29(5): 569-573 (in Chinese with English abstract).
- [21] 方桂花, 刘颖杰, 王峰, 等. 基于螺旋盘管蓄热装置放热实验研究[J]. *太阳能学报*, 2022, 43(12): 166-171. FANG G H, LIU Y J, WANG F, et al. Experimental research on heat release of heat storage device based on spiral coil [J]. *Acta energiae solaris sinica*, 2022, 43(12): 166-171 (in Chinese with English abstract).

## Design and experiment of an automatic supplement system of milk for piglets in farrowing unit of large-scale pig farms

CAO Qing<sup>1</sup>, KONG Xianrui<sup>1</sup>, DING Pan<sup>1</sup>, LI Can<sup>1</sup>, NIU Zhiyou<sup>1</sup>, LI Zhiwei<sup>2</sup>

1. *College of Engineering/Ministry of Agriculture and Rural Affairs Key Laboratory of Smart Farming for Agricultural Animals, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;*

2. *Shenzhen Huinong Technology Co., Ltd., Shenzhen 518000, China*

**Abstract** An automatic supplement system of milk for piglets in the farrowing unit of large-scale pig farms with homeothermia circulation was designed to realize the functions including preparing milk, feeding circularly, and cleaning automatically to solve the problem of low level of automation in nursing piglets in large-scale pig farms. The overall structure and working principle of the supplement system of milk for piglets were explained. The structural design and theoretical analyses of key components including the mixing tanks, stirrers, circulation pipelines, delivery pumps, and auxiliary heaters were conducted. A control system for the supplement of milk was developed with Siemens S7-200 SMART as the core processor. Human-computer interaction through a touchscreen was realized by controlling the flow state of the milk solenoid valves and relays, and monitoring the physical parameters of milk with flow sensors, temperature sensors, liquid level sensors, etc. A prototype was manufactured and the performance of prototype was tested. The results showed that the overall average coefficient of variation for the uniformity of the milk prepared by stirring was 0.435%, and the pipeline pressure ranged from 26.0 kPa to 65.2 kPa. All milk refilling bowls were filled with milk within 6.1 seconds, with the temperature of milk controlled between 40 °C and 42 °C. It is indicated that the designed automatic supplement device of milk for piglets in the farrowing unit has good uniformity of milk, reasonable distribution of pressure, with the temperature of the milk meeting the requirements of supplementing milk for piglets, thereby satisfying the production needs of automatic supplement of milk for piglets in the farrowing unit.

**Keywords** piglet milk supplementation; automatic supplement system of milk; auxiliary heating; homeothermia circulation; farrowing unit

(责任编辑:陆文昌)