

吴壮壮,牛智有,刘梅英,等.基于响应面法的仔猪配奶罐搅拌器数值模拟与优化[J].华中农业大学学报,2023,42(1):248-257.
DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2023.01.030

基于响应面法的仔猪配奶罐搅拌器数值模拟与优化

吴壮壮,牛智有,刘梅英,刘静,李洪成

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

摘要 为了探究仔猪配奶罐中搅拌器参数对奶水搅拌效果的影响,设计了一种双层桨叶仔猪配奶罐,采用CFD数值模拟与响应面分析相结合方法,以转速、层间距、桨叶角度和离底距离为优化参数,以搅拌功率、混合时间和平均温升速率为响应指标,设计四因素三水平正交仿真试验,建立响应指标的回归模型,得到双层桨叶搅拌器的最优参数值。结果显示:转速和桨叶角度对搅拌功率的影响极显著,转速、层间距、桨叶角度和离底距离对混合时间影响极显著,转速对平均温升速率影响极显著,层间距和桨叶角度对平均温升速率影响显著,其中转速对搅拌器性能影响最大;响应面回归模型具有较好的拟合性,通过响应面回归模型得到最优的参数组合为转速80 r/min、层间距170 mm、桨叶角度30°、离底距离100 mm。与优化前相比,搅拌功率减小27.08%,混合时间减小70.15%,平均温升速率提升9.57%,且湍流动能云图分布和温度云图分布明显优于初选模型。

关键词 配奶罐;搅拌器;搅拌性能;响应面法;CFD数值模拟;智慧养猪

中图分类号 S817.3 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2023)01-0248-10

哺乳阶段是生猪养殖的关键环节,提高仔猪的成活率是决定生猪养殖产业的经济效益和社会效益的关键指标之一^[1]。满足哺乳仔猪的营养摄取,及时对哺乳仔猪进行喂奶或补奶是提高仔猪成活率的重要措施。在仔猪自动喂奶设备中,仔猪配奶罐主要用于承载和制备奶水,搅拌器作为仔猪配奶罐的核心部件,主要用来促进奶水混合和加热,其搅拌性能与奶水品质密切相关。在实际生产中,由于搅拌器型式、搅拌器结构参数等因素的不合理性导致搅拌性能低下的情况时有发生。因此,优化搅拌器参数对提高仔猪配奶罐的搅拌性能尤为重要,对提高仔猪存活率具有重要意义。

传统的搅拌器研究如LDV或PIV测量技术等操作成本高、费时、费力,难以获得搅拌器对流动介质混合的流场信息^[2-3]。随着计算机技术的快速发展和计算流体力学理论体系的逐步完善,CFD数值模拟为获取搅拌槽内复杂的流场信息提供了新方法^[4-5]。李欣欣等^[6]针对单层双桨叶采用CFD数值模拟的方法分析了单因素条件下不同搅拌器参数对混合时间、搅拌功率和单位体积混合能的影响,结果表明单位体积混合能可以作为参数优化指标。张智

等^[7]基于Fluent对不同搅拌器摆放角度下的流场进行了数值模拟分析,获得了不同摆放角度对搅拌效果的影响规律。王定标等^[8]利用CFD技术和PIV测量研究了双层桨在不同位置的流场和浓度分布,得出了桨叶高度和加料位置对搅拌功率基本没有影响,对混合时间有较大影响的结论。贾慧灵等^[9]通过对圆盘涡轮式搅拌器不同叶片倾角下的浓度场数值模拟,发现不同叶片倾角对应的最佳安装高度不同,且当安装高度降低时,搅拌釜内的流型由径向流转化为轴向流。Ranade等^[10-11]采用了CFD数值模拟方法对传统的四斜叶涡轮和直叶涡轮进行了分析,结果表明该方法可以较好地反映搅拌槽内的湍流流场分布。综上所述,虽然国内外研究人员对搅拌器已有了较深入的研究,但主要集中于流场的分析,而对温度场的研究较少,尤其在综合考虑多个因素及交互作用对流场和温度场影响方面的研究缺失。因此,优化搅拌器参数,提高搅拌器的搅拌性能,建立多指标参数优化数学模型,具有重要的现实意义。

本研究在已有的研究基础上,设计一种双层桨叶仔猪配奶罐,采用CFD数值模拟与响应面分析相结合的研究方法,以双层桨叶搅拌器的转速、层间

收稿日期:2022-02-21

基金项目:中央高校基本科研业务费专项(2662019PY065)

吴壮壮,E-mail:3274901628@qq.com

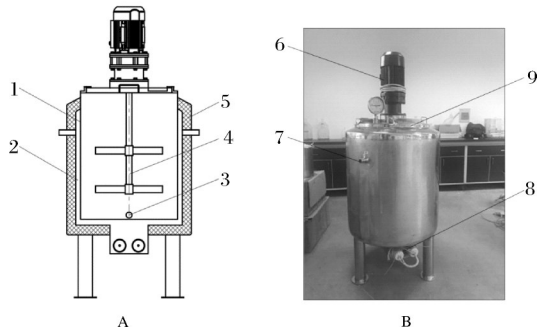
通信作者:刘梅英,E-mail:meiying_liu@mail.hzau.edu.cn

距、桨叶角度和离底距离为优化参数,以搅拌功率、混合时间和平均温升速率为响应指标,基于四因素三水平正交仿真试验计算结果,构建搅拌器参数与响应值之间的响应面回归模型,分析各设计因素及其交互作用的影响,寻求最优的设计参数组合,旨在为仔猪配奶罐中搅拌器设计提供理论参考。

1 材料与方 法

1.1 仔猪配奶罐的工作原理及总体结构

仔猪配奶罐在进行仔猪奶水制备时,需要用搅拌器对奶水进行混合。根据实际需求,设计了一种双层桨叶式仔猪配奶罐,实际容积约为127 L,有效容积100 L,其主要由罐体、外夹套、搅拌装置、加热装置等组成。在搅拌装置中,选用双层桨叶搅拌器,依靠其搅拌作用,加快奶粉的快速溶解和传热。在加热装置中,采用电加热-夹套水浴加热的加热方式对奶水进行温度控制。此外,为了保证奶水的质量安全,仔猪配奶罐整体采用食品级304不锈钢材质。仔猪配奶罐结构示意图和试验台架如图1所示。



1. 罐体 Tank body; 2. 水浴层 Water bath layer; 3. 出料口 Material outlet; 4. 搅拌器 Agitator; 5. 保温层 Insulation layer; 6. 电机 Motor; 7. 夹套进水口 Jacket inlet; 8. 电加热器 Electric heater; 9. 进料口 Material inlet.

图1 仔猪配奶罐结构示意图(A)和试验台架(B)

Fig.1 Structural diagram of piglet milk preparation tank (A) and test bench (B)

1.2 仔猪配奶罐数值模拟

1) 物理模型构建。双层桨叶仔猪配奶罐简化模型如图2所示,配奶罐直径为500 mm,高度为600 mm,初选搅拌器直径为350 mm,搅拌器轴径30 mm,桨叶宽度35 mm,桨叶角度为 90° ,搅拌器离底距离为150 mm,搅拌器层间距为200 mm,转速为60 r/min。

2) 网格无关性分析。使用Mesh网格划分软件对导入的模型进行网格划分。在网格划分时采用结构化网格与非结构化网格相结合的方式,对形状规

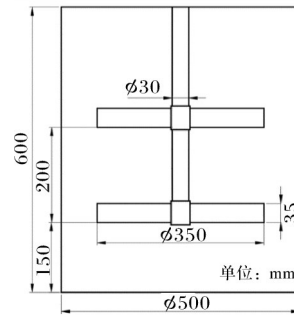


图2 双层桨叶搅拌器简化模型

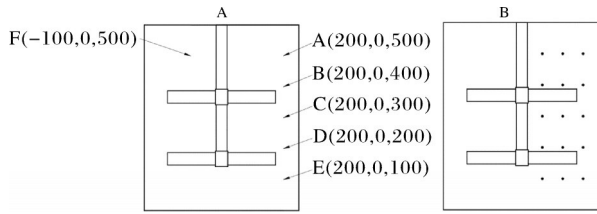
Fig.2 Simplified model of double-layer paddle agitator

则的静止区域采用六面体结构化网格划分,对形状复杂的桨叶区采用空间适应能力较强的非结构化四面体网格,并对桨叶及桨叶区流体进行局部加密。为了更好地反映流场状态以及提高数值模拟结果精度,进行网格无关性分析。对配奶罐内5个不同速度监测点进行速度分析,网格数量从5万增加到36万,分别进行CFD数值模拟,根据分析结果选择28万作为数值模拟的网格数量。

3) 边界条件设置。采用多重坐标系法(multiple reference frame, MFR)解决配奶罐内运动区域和静止区域的交互问题,将计算域划分为包含桨叶运动的桨叶区和除了桨叶区以外的静止区,2个区域通过Interface面进行数据交换。配奶罐的内壁面、下表面设定为无滑移壁面,上表面设定为对称边界。设定计算域的流体介质为奶水,奶水密度为 1062 kg/m^3 ,黏度为 $8 \text{ MPa}\cdot\text{s}$,比热容为 $3.5 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$,导热系数为 $0.45 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。

1.3 模拟方法与模型验证

1) 模拟方法。通过设置不同参数模拟不同的环境进行流场和温度场的数值分析。流场模拟采取稳态计算方法,采用标准 $k-\epsilon$ 双方程湍流模型,以SIMPLE算法作为压力速度耦合方式,收敛精度设定为 10^{-4} 。待稳态流场收敛后,在配奶罐内的某一点加入示踪剂进行混合时间的模拟,将此稳态流场作为初始条件进行示踪剂浓度场的瞬态模拟,开启组分传输模型,仅激活组分传输项,打开示踪剂方程,关闭其他方程,设置残差收敛标准为 10^{-7} 。温度场模拟采用瞬态计算方法,为了简化计算,将配奶罐内壁面和下表面设定为恒温热源 $360 \text{ K}(86.85^\circ\text{C})$,桨叶区和静止区初始温度设定为 $300 \text{ K}(26.85^\circ\text{C})$,能量方程残差设置为 10^{-8} ,仿真时间300 s,示踪剂加料点及监测点和温度监测点如图3所示。



A: 示踪剂加料点及浓度监测点 Tracer feeding point and concentration monitoring point; B: 温度监测点 Temperature monitoring points.

图3 示踪剂加料点及浓度监测点(A)、温度监测点(B)
Fig.3 Tracer feeding point and concentration monitoring point(A), temperature monitoring points(B)

2) 仿真模型验证。参考文献[12]验证方法,将功率准数模拟值与功率准数理论值进行比较。功率准数模拟值、搅拌功率 P 、功率准数理论值及雷诺数(Re)可由公式(1)~(7)计算得到^[13-14],力矩可由数值模拟得到,在进行理论值计算时,双层桨叶搅拌器的功率准数可以近似看作为单层桨的功率准数乘以搅拌桨的层数^[15]。经计算分析得知,功率准数理论值普遍比模拟值大,两者相差较小,但整体变化趋势相同,这是因为CFD数值模拟是基于流体各向同性的特性计算得到的,而实际中流体特性是各向异性的,因此,可以使用此模型进行数值模拟分析。

$$N_p = \frac{P}{\rho N^3 d^5} \quad (1)$$

$$P = M\omega \quad (2)$$

$$N_p = \frac{A}{Re} + B \left(\frac{10^3 + 1.2 Re^{0.66}}{10^3 + 3.2 Re^{0.66}} \right)^C \left(\frac{H}{D} \right)^{(0.35 + \frac{b}{D})} (\sin \theta)^{1.2} \quad (3)$$

$$Re = \frac{\rho N d^2}{\mu} \quad (4)$$

$$A = 14 + \left(\frac{b}{D} \right) [670 \left(\frac{d}{D} - 0.6 \right)^2 + 185] \quad (5)$$

$$B = 10^{[1.3 - 4 \left(\frac{b}{D} - 0.5 \right)^2 - 1.14 \frac{d}{D}]} \quad (6)$$

$$C = 1.1 + 4 \frac{b}{D} - 2.5 \left(\frac{d}{D} - 0.5 \right)^2 - 7 \left(\frac{b}{D} \right)^4 \quad (7)$$

式(1)~(7)中: ω 为角速度,rad/s; N 为搅拌转速,r/s; ρ 为搅拌介质密度,kg/m³; b 为桨叶宽度,mm; d 为搅拌器直径,mm; θ 为桨叶角度,(°); H 为液面高度,mm; D 为罐体内径,mm; μ 为搅拌介质黏度,Pa·s。

1.4 搅拌评价指标

搅拌评价指标主要包括搅拌功率、混合时间、平均温升速率。理想状态下搅拌功率正好为搅拌作业功率,在搅拌系统中应合理控制搅拌功率,避免过大或过小。混合时间是指从搅拌开始到罐内液体理化特性参数不存在明显差异时的时间,国际上通常用

95%的规则确定混合时间,即当一个或多个监测点达到最终稳定浓度的±5%所用的时间为混合时间。平均温升速率是平均温度与加热时间的比值,能够反映出在相同加热时间下不同搅拌器参数对温度的影响程度,平均温升速率越大,加热效率越高。

1.5 响应面法设计

本研究采用BBD法进行响应面试验设计。在响应面分析中采用二阶多项式模型,分别构建设计因素与响应指标之间的函数关系。选用的二阶多项式模型基函数为

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j}^k \beta_{ij} x_i x_j \quad (8)$$

式(8)中, y 为响应指标; x_i, x_j 为设计变量; k 为设计变量个数; β_0 为回归方程常数; $\beta_i, \beta_{ii}, \beta_{ij}$ 分别为回归方程的线性偏移系数、二阶偏移系数和交互系数。本研究基于双层桨叶仔猪配奶罐,使用Design-Expert 8.0.6软件以搅拌器转速(X_1)、层间距(X_2)、桨叶角度(X_3)和离底距离(X_4)为设计优化参数,以搅拌功率(Y_1)、混合时间(Y_2)和平均温升速率(Y_3)为响应指标,设计四因素三水平正交仿真试验,共设计出29组试验。按照试验组的搅拌器参数分别构建不同的仿真模型并展开CFD数值模拟分析。试验因素水平如表1所示。

表1 试验因素及水平

Table 1 Test factors and levels

因素 Factors	水平 Level		
	-1	0	1
X_1 转速/(r/min) Rotational speed	30	65	100
X_2 层间距/mm Interlayer distance	100	175	250
X_3 桨叶角度/(°) Blade angle	30	60	90
X_4 离底距离/mm Distance from bottom	50	125	200

2 结果与分析

2.1 仿真模型构建与网格划分

采用Design Modeler构建仿真模型,使用Mesh进行网格划分,仿真模型及网格划分示意图如图4所示。

2.2 响应面模型建立与分析

1) 响应面模型建立。BBD响应面试验设计方案及数值模拟结果如表2所示,二阶多项式响应面回归模型分别为:

$$Y_1 = 3.57 + 5.97X_1 - 0.03X_2 + 1.5X_3 - 0.031X_4 - 0.022X_1X_2 + 2X_1X_3 - 0.022X_1X_4 + 0.019X_2X_3 + 0.037X_2X_4 - 0.002X_3X_4 + 2.89X_1^2 + 0.13X_2^2 - 0.57X_3^2 + 0.082X_4^2 \quad (9)$$

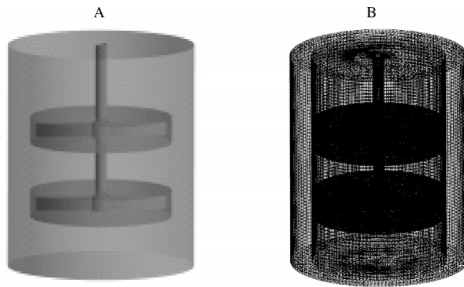


图 4 仿真模型(A)及网格划分(B)

Fig.4 Simulation model (A) and meshing (B)

$$Y_2 = 52.45 - 34.78X_1 + 16.72X_2 + 14.1X_3 + 21.44X_4 - 10.81X_1X_2 - 7.36X_1X_3 - 11.2X_1X_4 + 7.91X_2X_3 + 4.25X_2X_4 + 0.62X_3X_4 + 17.31X_1^2 + 3.42X_2^2 - 1.6X_3^2 - 10.9X_4^2 \quad (10)$$

$$Y_3 = 9.44 + 1.05X_1 - 0.19X_2 - 0.22X_3 + 0.015X_4 - 0.036X_1X_2 - 0.028X_1X_3 - 0.025X_1X_4 - 0.1X_2X_3 - 0.19X_2X_4 + 0.00815X_3X_4 - 0.095X_1^2 - 0.21X_2^2 - 0.64X_3^2 - 0.52X_4^2 \quad (11)$$

2)响应面模型方差分析。为了检验响应面回归模型拟合的准确性,采用方差分析法对设计因素与响应指标间的响应面模型分别进行显著性分析,以复相关系数 R^2 和校正决定系数 R^2_{adj} 评价响应面回归模型的拟合效果,其值越接近于1,表示拟合效果越好^[16]。响应面回归模型误差分析如表3所示,响应面方差分析如表4、表5和表6所示,可以看出,搅拌功率、混合时间和平均温升速率的响应面模型 P 值均小于0.000 1,表明响应面回归模型极显著,具有统计学意义。搅拌功率、混合时间和平均温升速率响应面模型的复相关系数 R^2 分别为0.991 7、0.988 1、0.947 2,校正决定系数 R^2_{adj} 分别为0.983 4、0.976 1、0.894 4,表明拟合得到的响应面回归方程拟合程度高,准确性强,预测值与实际值间具有高度相关性,可以用该模型对搅拌器相关指标进行分析及预测。

由表4可知,4个设计因素中 X_1 、 X_3 对搅拌功率 Y_1 响应面模型的影响均为极显著,交互项中 X_1X_3 影响极显著,二次项中 X_1^2 影响极显著, X_3^2 影响显著,其余项不显著,设计参数影响大小顺序为 $X_1 > X_3 > X_4 > X_2$ 。由表5可知,在4个设计因素中 X_1 、 X_2 、 X_3 和 X_4 对混合时间 Y_2 响应面模型的影响均为极显著;交互项中 X_2X_3 、 X_1X_2 和 X_1X_4 影响极显著, X_1X_3 影响显著;二次项中 X_1^2 、 X_4^2 影响极显著,其余项不显著,设计因素影响大小顺序为 $X_1 > X_4 > X_2 > X_3$ 。由表6可知,4个设计因素中 X_1 、 X_2 和 X_3 对平均温升速率 Y_3 响应面模型影响显著,交互项中均不显著,二次项中

表 2 搅拌器参数响应曲面试验设计与结果

Table 2 Experimental design and calculation results of agitator parameter response surface

编号 No.	因素水平 Factors and levels				响应指标 Response index		
	X_1 / (r/min)	X_2 / mm	X_3 / (°)	X_4 / mm	Y_1 /W	Y_2 /s	Y_3 / (°C/min)
1	100	250	60	125	12.939	48.69	10.155 0
2	65	175	60	125	3.566	52.12	9.439 8
3	100	175	30	125	7.030	26.38	9.940 6
4	100	175	90	125	15.255	47.57	9.642 4
5	30	175	60	50	0.384	53.16	7.796 0
6	30	175	60	200	0.380	127.51	8.015 2
7	65	100	30	125	2.073	38.56	8.837 0
8	30	250	60	125	0.375	142.48	8.020 4
9	65	175	60	125	3.566	52.12	9.439 8
10	100	175	60	50	12.828	13.96	9.715 6
11	65	100	60	200	3.598	44.61	9.088 4
12	65	175	90	50	4.447	34.23	7.792 8
13	65	175	30	50	2.012	14.06	8.352 8
14	65	250	60	200	3.638	85.43	7.798 8
15	30	175	30	125	0.218	80.45	7.672 8
16	65	175	60	125	3.566	52.12	9.439 8
17	65	250	60	50	3.597	36.86	8.686 0
18	65	100	90	125	4.383	50.02	8.506 8
19	65	175	60	125	3.566	52.12	9.439 8
20	65	175	30	200	1.910	49.46	8.764 2
21	65	250	90	125	4.324	93.55	8.158 4
22	65	250	30	125	1.936	50.43	8.892 2
23	100	100	60	125	13.032	23.72	10.329 2
24	100	175	60	200	12.739	43.52	9.833 8
25	65	100	60	50	3.706	13.34	9.212 8
26	65	175	60	125	3.566	52.12	9.439 8
27	65	175	90	200	4.336	72.21	8.236 8
28	30	175	90	125	0.446	141.06	7.488 2
29	30	100	60	125	0.381	74.68	8.051 0

X_3^2 、 X_4^2 影响极显著,其余项不显著,设计因素影响大小顺序为 $X_1 > X_3 > X_2 > X_4$ 。

3)响应面交互作用影响。由响应面模型方差分析可知,搅拌功率响应面模型中 X_1X_3 交互作用影响显著,混合时间响应面模型中 X_2X_3 、 X_1X_3 、 X_1X_4 和 X_1X_2 交互作用影响显著,平均温升速率响应面模型交互作用影响均不显著,因此在分析因素交互作用影响时着重考虑设计参数显著交互项对搅拌功率和混合时间的影响。 X_1X_3 交互作用对搅拌功率的影响如图5所示,由图5可知,搅拌功率的大小主要受桨叶角度和转速的影响,与桨叶层间距和离底距离基本没有影响。在设计因素水平取值范围内搅拌功率随着桨叶角度和转速的增大而增大,转速对搅拌功

表3 回归模型误差分析

Table 3 Analysis of error in regression model

因素 Factors	平均值 Mean	变异系数/% Coefficient of variance	R^2	R^2_{adj}	精密度/% Precision
Y_1 搅拌功率 Agitation power	4.61	12.23	0.991 7	0.983 4	39.279
Y_2 混合时间 Mixing time	57.18	8.75	0.988 1	0.976 1	34.813
Y_3 平均温升速率 Average temperature rise rete	8.83	3.05	0.947 2	0.894 4	15.225

表4 搅拌功率响应曲面二次全模型方差分析

Table 4 Quadratic full model variance analysis of mixing power response surface

变异来源 Source of variation	平方和 Sum of square	自由度 Degrees of freedom	均方 Mean square	F值 F value	P值 P value
模型 Model	533.950 000	14	38.140 000	119.850 000	< 0.000 1
X_1	427.670 000	1	427.670 000	1343.880 000	< 0.000 1
X_2	0.011 000	1	0.011 000	0.035 000	0.854 9
X_3	27.040 000	1	27.040 000	84.970 000	< 0.000 1
X_4	0.012 000	1	0.012 000	0.036 000	0.851 4
X_1X_2	0.001 894	1	0.001 894	0.005 953	0.939 6
X_1X_3	15.980 000	1	15.980 000	50.210 000	< 0.000 1
X_1X_4	0.001 850	1	0.001 850	0.005 813	0.940 3
X_2X_3	0.001 521	1	0.001 521	0.004 780	0.945 9
X_2X_4	0.005 550	1	0.005 550	0.017 000	0.896 8
X_3X_4	0.000 016	1	0.000 016	0.000 050	0.994 4
X_1^2	54.030 000	1	54.030 000	169.790 000	< 0.000 1
X_2^2	0.110 000	1	0.110 000	0.360 000	0.558 6
X_3^2	2.100 000	1	2.100 000	6.590 000	0.022 4
X_4^2	0.043 000	1	0.043 000	0.140000	0.717 3
残差 Residual	4.460 000	14	0.320 000		
失拟项 Lack of fit	4.460 000	10	0.450 000		
纯误差 Pure error	0.000 000	4	0.000 000		
总误差 Total error	538.410 000	28			

注 Note: $P < 0.05$, 显著 Significant; $P < 0.01$, 极显著 Extremely significant. 下同 The same as below.

率的影响最大。原因是随着桨叶角度的增加,搅拌器桨叶与搅拌介质的有效接触面积增加,搅拌介质对搅拌器桨叶的反作用力增大,引起搅拌力矩的增加,因此导致搅拌功率增大。而转速的增加会直接引起转矩的增加,导致搅拌功率增大。

由图6A可知,当层间距一定时,混合时间随桨叶角度的增大而增大,层间距处于较低水平时($L=100$ mm),桨叶角度对混合时间的影响相对较小,最优桨叶角度范围为 $30^\circ \sim 48^\circ$ 。当桨叶角度一定时,混合时间随层间距的增大而增大,桨叶角度为 90° 时,层间距对混合时间的影响较大,最优的层间距范围为 $100 \sim 175$ mm,混合时间在桨叶角度为 30° ,层间距在 100 mm时最小。由图6B可知,当桨叶角度一定时,混合时间随转速的增大而减小,转速处于 $30 \sim 70$ r/min时,随着转速的增大,混合时间整体降低最多。转速

处于 $70 \sim 100$ r/min时,混合时间变化趋势趋于平缓且相对较小,最优的转速范围为 $70 \sim 100$ r/min。当转速一定时,混合时间随桨叶角度的减小而减小,混合时间在转速为 100 r/min,桨叶角度为 30° 时达到最小。由图6C可知,当离底距离一定时,混合时间随转速增大而减小。转速为 $85 \sim 100$ r/min时,转速的增大对混合时间变化趋势影响较小,且在此转速范围内混合时间随离底距离的增大先增大后减小。由图6D可知,当层间距一定时,混合时间随转速的增大而减小。转速处于 $30 \sim 70$ r/min时,随着转速的增大,混合时间整体降低最多。转速处于 $72 \sim 100$ r/min时,混合时间变化平稳。当转速一定时,混合时间随层间距的减小而减小,当转速为 100 r/min时,层间距的变化对混合时间影响最小,混合时间在转速为 100 r/min,层间距为 100 mm时达到最小。

表 5 混合时间响应面二次全模型方差分析

Table 5 Mixed time response surface quadratic full model analysis of variance

变异来源 Source of variation	平方和 Sum of square	自由度 Degrees of freedom	均方 Mean square	F 值 F value	P 值 P value
模型 Model	28 991.71	14	2 070.84	82.750	< 0.000 1
X_1	12 890.41	1	12 890.41	515.090	< 0.000 1
X_2	3 353.70	1	3 353.70	134.010	< 0.000 1
X_3	2 386.00	1	2 386.00	95.340	< 0.000 1
X_4	5 517.8	1	5 517.80	220.480	< 0.000 1
X_1X_2	467.42	1	467.42	18.680	0.000 7
X_1X_3	216.38	1	216.38	8.650	0.010 7
X_1X_4	501.31	1	501.31	20.030	0.000 5
X_2X_3	250.59	1	250.59	10.010	0.006 9
X_2X_4	72.17	1	72.17	2.880	0.111 6
X_3X_4	1.55	1	1.55	0.062	0.807 1
X_1^2	1 943.21	1	1 943.21	77.650	< 0.000 1
X_2^2	75.85	1	75.85	3.030	0.103 6
X_3^2	16.54	1	16.54	0.660	0.429 8
X_4^2	770.19	1	770.19	30.780	< 0.000 1
残差 Residual	350.36	14	25.03		
失拟项 Lack of fit	350.36	10	35.04		
纯误差 Pure error	0.00	4	0.00		
总误差 Total error	29 342.07	28			

4) 响应面模型验证。为了验证转速、层间距、桨叶角度和离底距离 4 个设计因素在取值范围内变化时,反映响应指标回归模型预测的准确性,在设计因素取值范围内进行随机取值,开展 10 组附加试验进行预测模型的精度验证,附加试验组如表 7 所示。

分别按照表 7 进行仿真模型的构建,采取与表 2 响应面试验组相同的操作属性开展数值模拟分析并得到数值模拟值。将表 7 设计因素的取值分别代入式(9)~(11)计算得到模型预测值,模型预测值与数值模拟值对比分析结果如图 7 所示。计算得知搅拌功率、混合时间和平均温升速率的模型预测值与数值模拟值的平均相对误差分别为 9.13%、8.41%、4.08%,表明所建立的模型可以对搅拌功率、混合时间与平均温升速率进行预测。

2.3 优化结果分析

以搅拌功率最低、混合时间最低和平均温升速率最高为优化目标,运用 Design Expert 软件对建立的响应指标的二次全因素响应面回归模型进行最

表 6 平均温升速率响应面二次全模型方差分析

Table 6 Quadratic full model variance analysis of mean temperature rise rate response surface

变异来源 Source of variation	平方和 Sum of square	自由度 Degrees of freedom	均方 Mean square	F 值 F value	P 值 P value
模型 Model	18.180 0	14	1.300 0	17.940	< 0.000 1
X_1	13.170 0	1	13.170 0	181.890	< 0.000 1
X_2	0.450 0	1	0.450 0	6.160	0.026 3
X_3	0.580 0	1	0.580 0	7.980	0.013 5
X_4	0.002 7	1	0.002 7	0.038	0.848 7
X_1X_2	0.005 2	1	0.005 2	0.071	0.793 5
X_1X_3	0.003 2	1	0.003 2	0.045	0.835 9
X_1X_4	0.002 6	1	0.002 6	0.035	0.853 8
X_2X_3	0.041 0	1	0.041 0	0.560	0.465 8
X_2X_4	0.150 0	1	0.150 0	2.010	0.178 3
X_3X_4	0.000 3	1	0.000 3	0.004	0.952 6
X_1^2	0.059 0	1	0.059 0	0.810	0.383 0
X_2^2	0.290 0	1	0.290 0	3.980	0.066 0
X_3^2	2.670 0	1	2.670 0	36.920	< 0.000 1
X_4^2	1.730 0	1	1.730 0	23.850	0.000 2
残差 Residual	1.010 0	14	0.072 0		
失拟项 Lack of fit	19.200 0	10			
纯误差 Pure error	0.000 0	4	0.000 0		
总误差 Total error	18.180 0	28	1.300 0	17.940	< 0.000 1

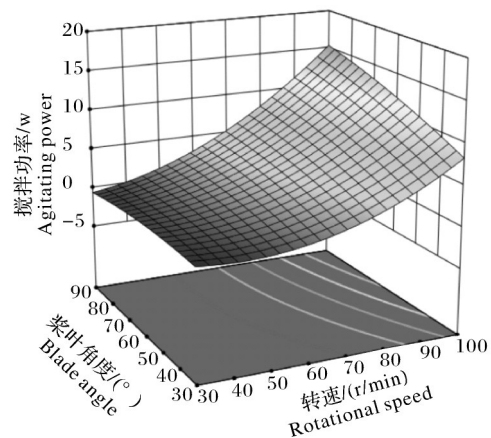
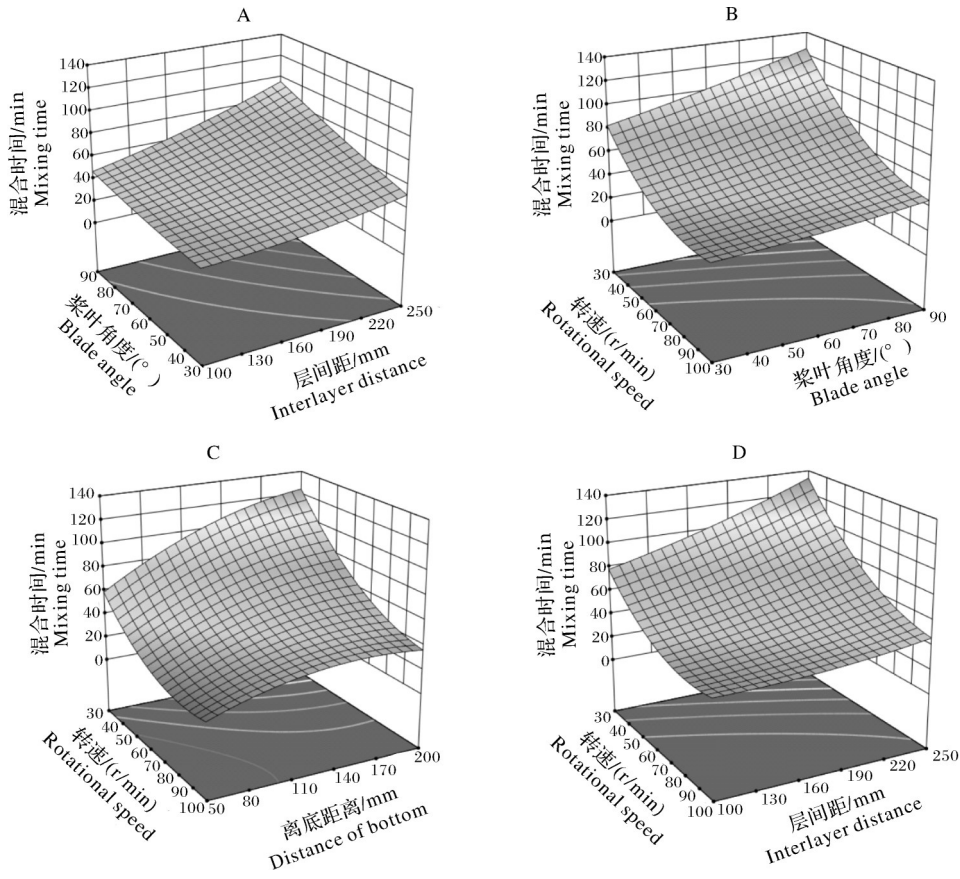


图 5 X_1X_3 交互作用对搅拌功率的影响

Fig.5 Effect of X_1X_3 interaction on stirring power

优参数求解,约束条件为:(1)目标函数: $\min Y_1$; $\min Y_2$; $\max Y_3$;(2)变量区间: $30 \leq X_1 \leq 100$, $100 \leq X_2 \leq 250$, $30 \leq X_3 \leq 90$, $50 \leq X_4 \leq 200$ 。优化后得到的各因素最优参数组合为:搅拌器转速 80 r/min,



A: X_2X_3 交互作用影响 X_2X_3 interaction effect; B: X_1X_3 交互作用影响 X_1X_3 interaction effect; C: X_1X_4 交互作用影响 X_1X_4 interaction effect; D: X_1X_2 交互作用影响 X_1X_2 interaction effect.

图6 交互作用对混合时间的影响

Fig.6 Effect of interaction on mixing time

表7 附加试验组

Table 7 Additional test groups

编号 No.	$X_1/(r/min)$	X_2/mm	$X_3/(^\circ)$	X_4/mm
1	30	120	30	50
2	40	130	35	50
3	50	140	40	80
4	60	160	45	80
5	65	175	50	100
6	70	180	60	120
7	75	190	65	140
8	70	200	60	160
9	80	220	80	180
10	100	240	90	200

层间距 170 mm, 桨叶角度 30° , 离底距离 100 mm。根据最优参数结果构建仿真模型, 优化前后响应指标对比分析如表8所示, 可以看出, 与优化前方案相比, 搅拌功率减小 27.08%, 混合时间减小 70.15%, 平均升温速率提升 9.57%。

为了进一步验证优化方案与初选方案的优劣性, 分析优化前后流场湍流动能云图和温度分布云图。由图8A、B可知, 优化后的流场湍流强度明显优于优化前, 且湍流分布更加均匀, 尤其在搅拌器的底部和近轴区湍流动能分布死区明显减小, 因此优化后的模型流场分布要优于优化前的模型。由图8C、D可知, 优化前的温度分布在罐体上端形成了较大的低温区, 高温区主要分布在罐体底部, 而优化后的整体温度分布均匀性明显优于优化前, 一方面是因为优化后的模型转速的增加引起整个流体区域流速的增加, 促进了流体间的热量交换, 另一方面是因为优化后的搅拌器模型桨叶形状由平直叶型变为折叶型, 平直叶型以径向流和切向流为主, 而折叶型是以径向流、切向流和轴向流组合的混合流动, 促进了近壁面温度和罐体底部的温度向罐体上端传热, 使整体温度分布更加均匀。总体来看, 响应面优化后的搅拌器, 功率损耗减少, 加热效率提高, 混合强度增强, 温度分布更加均匀, 更适用于仔猪配奶罐。

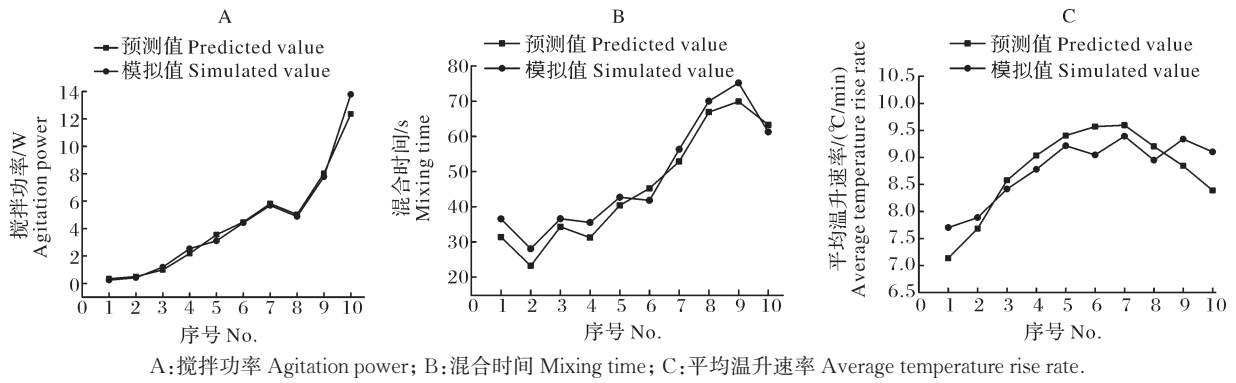


图 7 预测值与模拟值对比

Fig.7 Comparison between predicted and simulated values

表 8 优化前后响应指标对比

Table 8 Comparison of response indexes before and after optimization

响应指标 Response index	优化前 Before optimization	优化后 After optimization	相对变化量/% Relative variation
搅拌功率/W Agitation power	4.32	3.15	-27.08
混合时间/s Mixing time	85.26	25.45	-70.15
平均温升速率/(°C/min) Average temperature rise rate	8.17	8.95	9.57

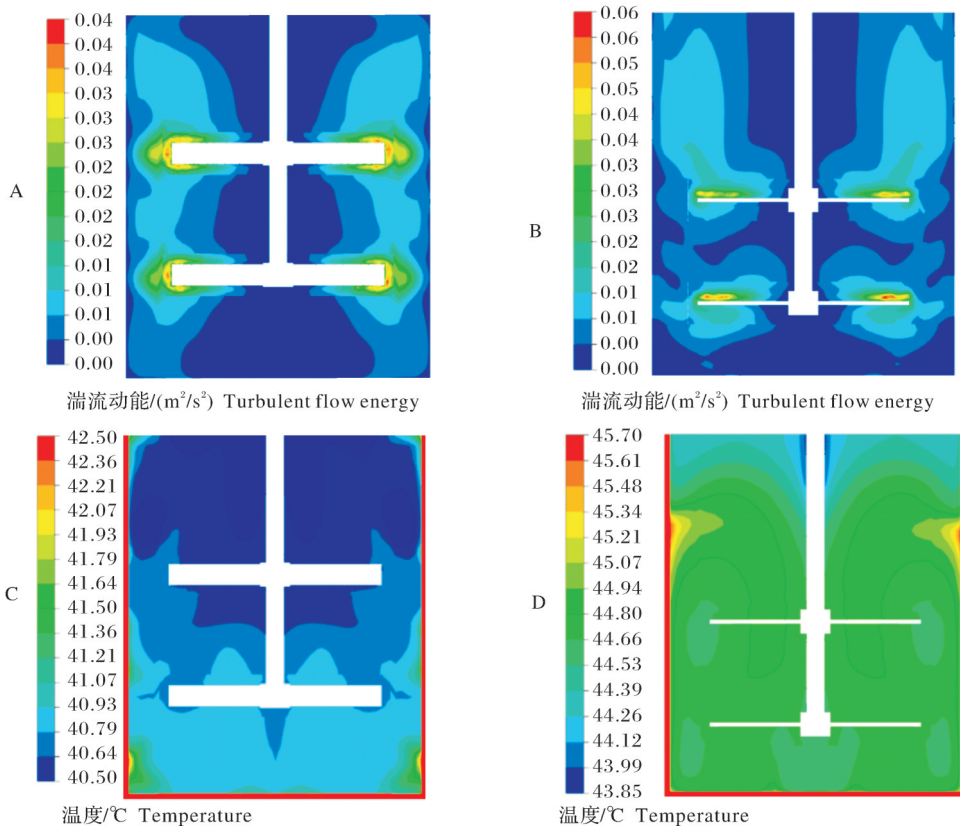


图 8 优化前后湍流动能分布云图和温度分布云图对比

Fig.8 Comparison of turbulence kinetic energy distribution and temperature distribution before and after optimization

3 讨论

本研究以仔猪喂奶装置中双层桨叶配奶罐为研究对象,以搅拌器桨叶转速、层间距、桨叶角度和离底距离为设计变量,搅拌功率、混合时间和平均温升速率为响应指标,基于CFD数值模拟结果建立了设计变量与响应指标间的二次多项式预测模型,分析了各因素及其交互作用对各响应指标的影响。研究表明,转速和桨叶角度对搅拌功率的影响极显著,转速、层间距、桨叶角度和离底距离对混合时间影响极显著,转速对平均温升速率影响极显著,层间距和桨叶角度对平均温升速率影响显著,其中转速是最大的影响因子。搅拌功率响应面模型中转速与桨叶角度交互作用影响显著,混合时间响应面模型中转速与层间距交互作用、转速与桨叶角度交互作用、转速与离底距离交互作用和层间距与桨叶角度交互作用影响显著,平均温升速率响应面模型交互作用影响均不显著。由响应面回归模型的误差分析及附加试验分析可知,基于二次多项式构建的搅拌功率、混合时间和平均温升速率的预测模型的复相关系数 R^2 分别为0.9917、0.9881、0.9472,校正决定系数 R^2_{adj} 分别为0.9834、0.9761、0.8944,模型预测值与数值模拟值的平均相对误差分别为9.13%、8.41%、4.08%,表明预测模型具有较好的可靠性。基于响应面法优化得到的优化方案与初选方案相比,搅拌功率减小27.08%,混合时间减小70.15%,平均温升速率提升9.57%,湍流动能分布和温度分布相较优化前的模型有明显改善。本研究基于响应面分析和数值模拟所得到的搅拌器参数,相较优化前搅拌性能得到明显提升。但是目前仅对搅拌器进行了仿真优化,尚未进行试验研究,后续研究可以对此方面进行设计补充,综合仿真结果和试验结果进一步优化搅拌器。

参考文献 References

- [1] 于虹,戴香华,崔超.里岔黑猪哺乳仔猪饲养管理技术[J].猪业科学,2021,38(6):124-125.YU H, DAI X H, CUI C. Feeding and management techniques for suckling piglets of Licha black pig[J]. Swine industry science, 2021, 38(6): 124-125 (in Chinese with English abstract).
- [2] 石贵振,王永江.内循环式浆料好氧发酵反应器的流场与传热分析及其参数优化[J].华中农业大学学报,2021,40(6):203-210.SHI G Z, WANG Y J. Flow field and heat transfer and parameter optimization of an internal circulation slurry aerobic fermentation reactor[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2021, 40(6): 203-210 (in Chinese with English abstract).
- [3] 周国忠,王英琛,施力田.用CFD研究搅拌槽内的混合过程[J].化工学报,2003,54(7):886-890.ZHOU G Z, WANG Y C, SHI L T. CFD study of mixing process in stirred tank[J]. Journal of chemical industry and engineering, 2003, 54(7): 886-890 (in Chinese with English abstract).
- [4] 赵行.基于PIV和CFD的双层搅拌反应器优化设计[D].重庆:西南大学,2021.ZHAO H. The design optimization of dual-impeller stirred tank reactor based on PIV and CFD[D]. Chongqing: Southwest University, 2021 (in Chinese with English abstract).
- [5] 杨壮.无挡板搅拌槽内液相混合特性的数值模拟[D].北京:北京化工大学,2020.YANG Z. Numerical simulation of liquid mixing characteristics in unbaffled stirred tank[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2020 (in Chinese with English abstract).
- [6] 李欣欣,向民奇,黄振峰,等.搅拌槽示踪剂浓度扩散模拟与实验研究[J].广西大学学报(自然科学版),2018,43(3):947-957. LI X X, XIANG M Q, HUANG Z F, et al. Study on simulation and experiment of concentration diffusion of tracer in stirred tank[J]. Journal of Guangxi University (natural science edition), 2018, 43(3): 947-957 (in Chinese with English abstract).
- [7] 张智,郑源,蒋洁青,等.污水搅拌器摆放角度对流场性能影响[J].排灌机械工程学报,2020,38(3):271-276.ZHANG Z, ZHENG Y, JIANG J Q, et al. Influence of wastewater mixer setting angle on flow field in sewage treatment pool[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering, 2020, 38(3): 271-276 (in Chinese with English abstract).
- [8] 王定标,杨丽云,于艳,等.双层桨叶搅拌器流场的CFD模拟与PIV测量[J].郑州大学学报(工学版),2009,30(2):1-5. WANG D B, YANG L Y, YU Y, et al. CFD simulation and PIV measurement of flow fields in stirred vessel with double-flat agitator[J]. Journal of Zhengzhou University (engineering science), 2009, 30(2): 1-5 (in Chinese with English abstract).
- [9] 贾慧灵,赵静,李梅,等.涡轮桨直径对锥盘底搅拌槽固液混合特性影响[J].化学工程,2017,45(6):62-68.JIA H L, ZHAO J, LI M, et al. Influence of turbine impeller diameter on solid-liquid mixing characteristics of cone-bottom stirred tank[J]. Chemical engineering (China), 2017, 45(6): 62-68 (in Chinese with English abstract).
- [10] RANADE V V, JOSHI J B. Flow generated by a disc turbine. II: Mathematical modelling and comparison with experimental data[J]. Transactions of the institution of chemical engineers, 1990, 62: 34-50.
- [11] RANADE V V, JOSHI J B, MARATHE A G. Flow generated by pitched blade turbines ii: simulation using κ - ϵ model[J]. Chemical engineering communications, 1989, 81(1): 225-248.
- [12] 孙存旭,王垒智,周勇军,等.双层侧进式搅拌槽内流场特性数值模拟[J].石油化工设备,2019,48(4):44-50.SUN C X, WANG L Z, ZHOU Y J, et al. Numerical simulation of flow field characteristics in a double side-entry stirred tank[J]. Petrochemical equipment, 2019, 48(4): 44-50 (in Chinese with English abstract).

- stract).
- [13] 永田进治. 混合原理与应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 1984. YONGTIAN J Z. Mixing principle and application[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 1984(in Chinese).
- [14] 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. Design and selection manual of mixing and mixing equipment [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004(in Chinese).
- [15] 毛德明. 多层桨搅拌釜内流动与混合的基础研究[D]. 杭州: 浙江大学, 1998. MAO D M. Basic study on flow and mixing in multi-layer propeller stirred tank [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 1998(in Chinese with English abstract).
- [16] 代翠, 孔繁余, 董亮, 等. 基于响应面法的离心泵作透平水力和声学性能优化[J]. 农业工程学报, 2015, 31(15): 40-47. DAI C, KONG F Y, DONG L, et al. Hydraulic and acoustic property optimization for centrifugal pump as turbine based on response surface method [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(15): 40-47 (in Chinese with English abstract).

Numerical simulation and optimization of stirrer in piglet milk tank based on response surface method

WU Zhuangzhuang, NIU Zhiyou, LIU Meiyang, LIU Jing, LI Hongcheng

College of Engineering/Ministry of Agriculture and Rural Areas Key Laboratory of Smart Farming for Agricultural Animals, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

Abstract A double-layer paddle piglet milk mixing tank was designed to study the effects of agitator parameters in piglet milk mixing tank on mixing effect of milk. The method combining CFD numerical simulation and response surface analysis was used. A four factor and three-level orthogonal simulation experiment was designed by taking the rotating speed, layer spacing, paddle angle and distance from the bottom as the design optimization parameters, and the mixing power, mixing time and average temperature rise rate as the response indexes. The regression model of response index was established. The parameters of double-layer paddle agitator were optimized. The results showed that the rotating speed and blade angle significantly affected the mixing power. The rotating speed, layer spacing, blade angle and distance from the bottom had a significant impact on the time of mixing. The rotating speed had an extremely significant impact on the average rise rate of temperature. The layer spacing and blade angle had a significant impact on the average rise rate of temperature. The rotating speed had the greatest impact on the performance of the agitator. The response surface regression model had good fitting. The parameters optimized by the response surface regression model were the speed of 80 r/min, the layer spacing of 170 mm, the blade angle of 30°, and the distance from the bottom of 100 mm. Compared with that before optimization, the stirring power and the time of mixing was reduced by 27.08% and 70.15%, respectively. The average rise rate of temperature was increased by 9.57%. The cloud diagram distribution of turbulent flow energy and temperature were significantly better than those of the primary model. It will provide theoretical basis and reference for the design and application of agitator in piglet milk preparation tank.

Keywords milk preparation tank; agitator; mixing performance; response surface methodology; CFD numerical simulation; intelligent pig breeding

(责任编辑: 陆文昌)