收奶线CIP清洗工艺优化与风险评估研究

余志宝[1]，杨文平[1]，高万东[1]，张红雨[2]，吴林涛[1]，刘 洋[1*]

（1.内蒙古伊利实业集团股份有限公司，内蒙古呼和浩特 010100；2.国家乳业技术创新中心，内蒙古呼和浩特 010100）

摘 要：[目的]在乳制品工业化生产中，设备清洗不彻底易导致微生物污染，影响产品质量。为进一步优化传统原位清洗系统（CIP）清洗参数，本研究以收奶线为对象，对碱循环清洗时序进行优化，将碱循环时间从900 s缩短至600 s，并降低脉冲频次。[方法]通过采集清洗后多个时间点的残留水样，采用ATP快速检测法对5 个关键采样点进行卫生验证，并结合双样本T检验进行数据分析。[结果]优化后的清洗参数所有ATP检测值均低于标准限值（100 RLU）。[结论]在保证清洗效果的前提下，可有效减少清洗时间与资源消耗，为乳品企业CIP清洗过程的节能优化与风险评估提供参考依据。

关键词：CIP清洗；清洗优化；风险评估；ATP检测

文章编号：1671-4393(2026)06-0141-12 **DOI:**10.12377/1671-4393.26.06.18

Optimization and Risk Assessment of CIP Cleaning Process for Milk Receiving Line

YU Zhibao[1]，YANG Wenping[1]，GAO Wandong[1]，ZHANG Hongyu[2]，WU Lintao[1]，LIU Yang[1*]

（1.Inner Mongolia Yili Industrial Group Co.，Ltd.，Hohhot Inner Mongolia 010100；2.National Center of Technology Innovation for Dairy，Hohhot Inner Mongolia 010100）

Abstract：[Objective]In the industrial production of dairy products，incomplete equipment cleaning can lead to microbial contamination and affect product quality. To further optimize the traditional Cleaning in Place（CIP）

基金项目：国家乳业技术创新中心支持项目（2023-JSGG-26）

作者简介：余志宝（1985-），男，宁夏吴忠人，回族，本科，高级工程师，研究方向为乳品加工工艺、设备清洗消毒、环境与过程微生物控制；

杨文平（1972-），男，内蒙古呼和浩特人，专科，初级工程师，研究方向为乳品加工工艺、设备清洁消毒、环境与过程微生物控制；

高万东（1972-），男，河北张家口人，本科，研究方向为乳制品质量管理与质量体系；

张红雨（1972-），女，河北唐山人，本科，研究方向为食品风险评估；

吴林涛（1992-），男，内蒙古呼和浩特人，本科，研究方向为乳品设备清洁消毒、环境与过程微生物控制、生产过程异物控制。

*通信作者：刘 洋（1987-），男，江西九江人，硕士，高级工程师，研究方向为产业计量、测试。

cleaning parameters，this study focused on the milk collection line and optimized the sequence of alkaline circulation cleaning. The alkaline circulation time was shortened from 900 seconds to 600 seconds，and the pulse frequency was reduced.[Method]Residual water samples were collected at multiple time points after cleaning，and the hygiene of 5 key sampling points was verified using the ATP rapid detection method. Data analysis was conducted using the two-sample T test.[Result]All ATP detection values after optimization were below the standard limit（100 RLU）.[Conclusion]While ensuring the cleaning effect，it is possible to effectively reduce cleaning time and resource consumption，providing a reference basis for the energy-saving optimization and risk assessment of the CIP cleaning process in dairy product enterprises.

Keywords：CIP cleaning；cleaning optimization；risk assessment；ATP detection

在乳制品工业化生产过程中，设备表面及管线内壁残留物形成的微生物污染风险是制约产品质量的核心挑战。研究表明，未彻底清除的乳脂、蛋白质等残留物极易成为微生物增殖的温床，进而引发产品腐败变质等严重质量问题[1]。为应对这一行业共性问题，原位清洗系统（Cleaning in Place，CIP）已成为现代乳品加工过程中不可或缺的关键工艺。

CIP清洗系统通过构建闭环清洗体系，实现了对复杂管道网络及加工设备的非拆卸式深度清洁。其创新性地采用“化学-机械”协同作用机制：一方面通过碱性清洗剂对有机残留物进行皂化分解，另一方面借助酸性清洗剂去除无机盐类沉积物。在此过程中，清洗剂通过循环泵组产生湍流剪切力，结合精确控制的温度、浓度参数，完成对设备表面污染物的化学转化、溶解剥离及物理冲刷，最终达到高效脱脂除垢的卫生标准。该技术凭借其自动化程度高、清洗效率稳定的优势，已广泛应用于乳制品、饮料、酒类等连续化生产的食品加工领域，成为保障生产系统卫生安全的核心技术手段[2]。

我国乳业通过数十年的技术迭代与产业升级，在关键生产环节已实现系统性突破。牧场端挤奶设备的自动化改造、原奶冷链储运体系的标准化建设显著降低了微生物污染风险。2024年，生鲜乳抽检合格率达99.96%，生鲜乳中乳蛋白、乳脂肪等质量安全指标达到较高水平；菌落总数、杂质度和体细胞监测平均值符合国际及欧盟限量标准[3，4]。加工环节通过在线质控系统升级与智能化设备应用，显著缩短了原奶流转时间。行业内部分企业的CIP清洗参数引进于20世纪90年代，因此，需研究相应的技术方法，对CIP清洗优化的过程进行风险评估分析研究，从而进一步优化参数。

1 优化分析及风险评估方法

1.1 目标选择

工艺流程图与功能分析：本研究以中试车间的收奶线为试验目标进行试验和分析，收奶线功能分析如表1所示，收奶线工艺流程如图1所示。

表 1 收奶线功能分析

Table 1 Function Analysis of Milk Collection Line

子工序	功能
收奶软管	连接奶车与收奶管线、接收牛奶，奶温1～6 ℃
过滤器端口阀	截止作用，端口阀内部设有密封结构
过滤器	拦截异物
磁性过滤器	拦截金属异物
物料泵	物料输送
取样阀	收奶过程采样
管线	物料输送载体，横向管线需要设置倾斜角度
冷板	牛奶冷却，通过与冷却水或冰水置换进行降温，内部结构为 M 型板换
阀阵	物料转向，通过阀门连接实现
阀阵蝶阀	截止物料，防止窜料
脉冲阀	脉冲清洗阀腔，通过阀门的开关控制脉冲清洗
单向阀	防止倒流，用于物料或清洗液的正向输送

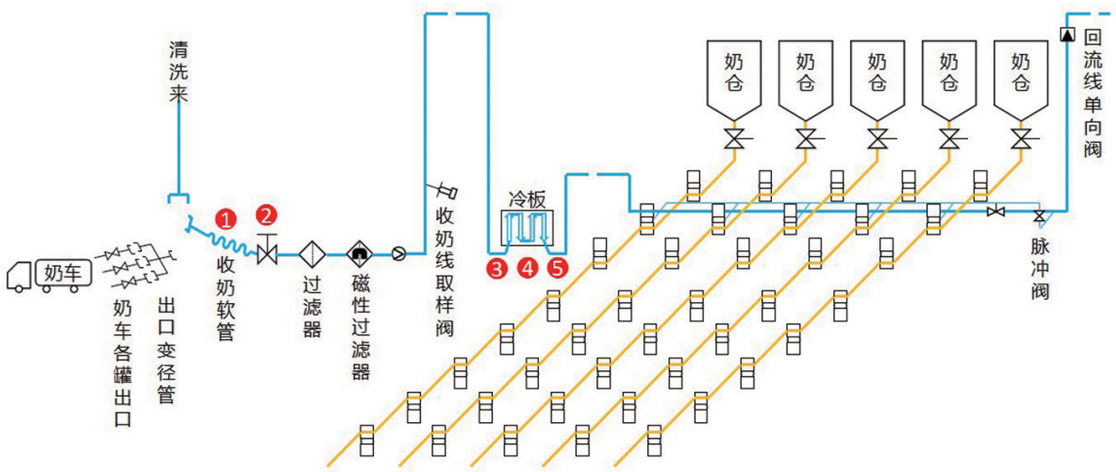


图 1 收奶线工艺流程图

Figure 1 Process Flow Chart of Milk Collection Line

注：采样点①物料泵口，采样点②过滤器端，采样点③板换进口，采样点④板换出口，采样点⑤阀组进口端

1.2 拟优化 CIP 清洗过程时序

收奶线清洗时序如图2所示。程序优化参数如表2所示。

1.3 试验步骤

（1）将碱循环自900 s缩减至600 s，并降低碱循环脉冲频次，由6.5 次/5 s降至4.3 次/5 s；

（2）评估可能存在的失效模式：全系统清洗不净；阀阵脉冲清洗，单次时间未变化，清洗频次削减2.2 次，阀腔清洗不净。

（3）卫生验证方法选择：在CIP清洗后，可采用三磷酸腺苷（ATP）检测来确认关键控制点的指标，为防止ATP涂抹检测可能造成的交叉污染，本研究采用残留水进行ATP快速检测，以评估清洗水平[5~8]。

（4）采集样本：采集CIP后第一次、第四次和下次CIP前的最后一次碱循环的3组样本。

（5）采集时间点：通过每3 h的数据采集，清洗后采集3、6、9、12、15、18、21、24 h等8组数据进行趋势比对。

（6）重点关注点梳理5 个采样点位，详见图1。

采样点①：物料泵口，如覆盖软管、端口、视镜、单向阀、泵；

采样点②：过滤器端，如覆盖管道中过滤器、磁性过滤器所属的所有管路；

采样点③：板换进口，如覆盖板换进口前、高空管道倾斜，第一个U型弯落差部分的管道；

采样点④：板换出口，如覆盖板换出口位置及第一个U型弯上升部分的管道；

采样点⑤：阀组进口端，如覆盖第二个U型弯下落部分的管道，阀阵处阀门阀腔、脉冲清洗、及第二个U型弯上升部分的管道。

（7）对采样水样进行ATP分析。

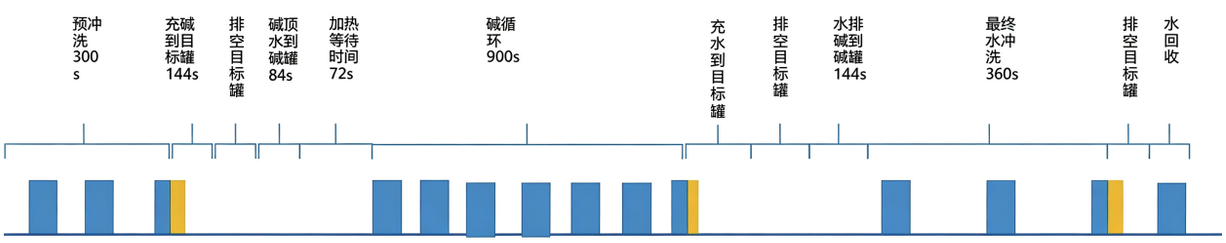


图 2 收奶线清洗时序图

Figure 2 Timeline Diagram for Milk Collection Line Cleaning

表 2 程序优化参数

Table 2 Program Optimization Parameters

子程序	碱循环 900 s	碱循环 600 s	变化点
步骤 1 检查条件	5	5	/
步骤 2 选择 CIP 模式	5	5	/
步骤 3 预冲洗	300	300	/
预冲洗（脉冲）	134 s 脉冲 5 s，脉冲 2.1 次	134 s 脉冲 5 s，脉冲 2.1 次	/
步骤 4 充碱到目标罐	144	144	/
步骤 5 排空目标罐（回收水）	5	5	/
步骤 6 碱顶水到碱罐	5	5	/
步骤 7 碱循环	900	600	清洗时间减少
碱循环（脉冲）	134 s 脉冲 5 s，脉冲 6.5 次	134 s 脉冲 5 s，脉冲 4.3 次	脉冲次数减少
步骤 8 充水到目标罐	144	144	/
步骤 9 排空目标罐（碱）	5	5	/
步骤 10 水排碱到碱罐	5	5	/
步骤 11 中间水冲洗	0	0	/
步骤 12 充酸到目标罐	144	144	/
步骤 13 排空目标罐（清水）	5	5	/
Step14 酸顶水到酸罐	5	5	/
步骤 15 酸循环	600	600	/
酸循环（脉冲）	134 s 脉冲 5 s，脉冲 4.3 次	134 s 脉冲 5 s，脉冲 4.3 次	/
步骤 16 充水到目标罐	144	144	/
步骤 17 排空目标罐（酸）	5	5	/
步骤 18 水排酸到酸罐	5	5	/
步骤 19 最终水冲洗	360	360	/
最终水冲洗（脉冲）	134 s 脉冲 5 s，脉冲 2.6 次	134 s 脉冲 5 s，脉冲 2.6 次	/
步骤 20 排空目标罐	5	5	/
步骤 21 水回收	10	10	/
水回收（脉冲）	无脉冲	无脉冲	/

（8）对数据进行双样本T检验。

1.4 清洗效果验证阶段的样本采集注意事项与条件准备

（1）在样本采集过程中，需确保所有管道内的残留水均被采集，包括横向管道的流向；

（2）通过绘制采集点位图，判定管道倾斜趋势，确定其最低点，并将最低点管线周围的设备界定为覆盖目标，进而将收奶线上所有单元进行覆盖；

（3）打冷线板换作为一种特殊工艺设备，其内部板片为M型，存在多个低点，因此无法与管道采样流程同步执行，需单独进行板换样品采集。在采集过程中，除需对采集板换进口、出口两个点位进行采集外，还需对内部进行特殊采集，即将板换内液体滞留24 h后采用0.8 MPa的无菌压缩空气将板换中水顶出，随后进行ATP检测；

（4）完成采样点位梳理后，随即开展现场取样。鉴于生产线上存在多处U型弯，且部分U型弯处无可采集点位，故在数据采集阶段需于各指定点位增加手动采样阀用于数据收集。

1.5 清洗效果验证阶段的样本采集方法

本研究重点分析了清洗残留水微生物的增殖情

况。因管线中点位较多，采用涂抹的方式无法快速有效评估所有残留点微生物的增殖情况，且存在采样过程中交叉污染的风险。因此，本研究通过采集各点位残留水样本并进行ATP快速检测的方法，以评估整体残留水段是否存在微生物增殖的情况。具体采样方法如下：

（1）对比数据采集：通过收集收奶线3 个批次的生产数据，每个批次分别获取工艺变更前与变更后的数据各一组，并分析各组数据的平均值变化趋势；

（2）样本采集：通过采集CIP后第一次、第四次和下次CIP前的最后一次碱循环的3 组样本；

（3）时间点数据采集：以每3 h为间隔进行数据采集，于碱洗后第3、6、9、12、15、18、21、24 h 8 个时间点采集数据，并进行数据趋势比对。

2 数据处理方法

2.1 各采样点位采样与 ATP 检测数据对比

变更前碱循环清洗900 s ATP检测数据如表3所示。其中，最大检测值为57 RLU（企业内部控制标准限值：＜100 RLU），所有采样数据均符合标准。

变更后循环清洗600 s ATP检测数据如表4所示，采集数据中最大值为71 RLU，所有采样数据均符合标准。

2.2 不同采样点位与清洗次数下残留水 ATP 检测数据随滞留时间变化趋势分析

图3～7为各采样点位在不同清洗次数下，残留水于各滞留时间点的ATP检测数据变化趋势。

2.3 数据控制单值图与双样本 T 检验结果

2.3.1 物料泵口双样本T检验

针对物料泵口清洗后残留水中微生物增殖情况的验证结果，采用双样本T检验进行统计分析。检验结果显示，所有样本$P>0.05$，表明两组数据之间无显著差异，清洗工艺参数的调整未导致清洗效果的显著下降（图8、表5）。

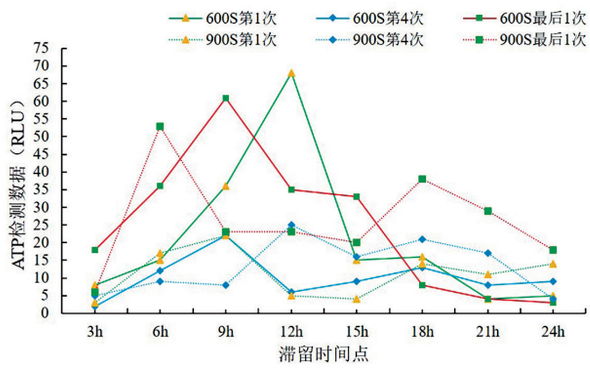


图 3 物料泵口 ATP 检测数据曲线

Figure 3 ATP Detection Data Curve at Material Pump Outlet

表 3 变更前碱循环清洗 900 s 效果验证数据

Table 3 Verification Data of the Effect of 900 Seconds of Alkali Circulation Cleaning Before Changes

点位	物料泵口			过滤器端			板换进口			板换出口			阀组进口端		
取样时间	CIP后第1次碱洗数据	CIP后第4次碱洗数据	CIP前碱洗数据	CIP后第1次碱洗数据	CIP后第4次碱洗数据	CIP前碱洗数据	CIP后第1次碱洗数据	CIP后第4次碱洗数据	CIP前碱洗数据	CIP后第1次碱洗数据	CIP后第4次碱洗数据	CIP前碱洗数据	CIP后第1次碱洗数据	CIP后第4次碱洗数据	CIP前碱洗数据
3h	3	5	6	6	5	5	7	52	24	11	8	17	22	29	18
6h	17	9	53	4	13	57	6	10	31	5	8	29	46	18	19
9h	22	8	23	10	2	22	9	2	14	22	1	22	38	22	18
12h	5	25	23	4	21	24	8	25	35	25	25	24	27	12	10
15h	4	16	20	5	12	56	10	18	14	28	10	16	36	5	11
18h	14	21	38	4	26	34	14	22	18	16	27	20	6	10	9
21h	11	17	29	12	19	37	18	13	16	14	21	19	16	1	12
24h	14	4	18	19	1	42	15	3	21	13	6	34	21	7	11
最高	22	25	53	19	26	57	18	52	35	28	27	34	46	29	19
最低	3	4	6	4	1	5	6	2	14	5	1	16	6	1	9
区间	19	21	47	15	25	52	12	50	21	23	26	18	40	28	10

表 4 变更后碱循环清洗 600 s 效果验证数据

Table 4 Verification Data of the Effect of Post-changing Alkali Circulation Cleaning for 600 Seconds

点位	物料泵口			过滤器端			板换进口			板换出口			阀组进口端		
取样时间	CIP 后第 1 次碱洗数据	CIP 后第 4 次碱洗数据	CIP 前碱洗数据	CIP 后第 1 次碱洗数据	CIP 后第 4 次碱洗数据	CIP 前碱洗数据	CIP 后第 1 次碱洗数据	CIP 后第 4 次碱洗数据	CIP 前碱洗数据	CIP 后第 1 次碱洗数据	CIP 后第 4 次碱洗数据	CIP 前碱洗数据	CIP 后第 1 次碱洗数据	CIP 后第 4 次碱洗数据	CIP 前碱洗数据
3h	8	2	18	4	1	17	4	21	20	6	6	16	22	25	27
6h	15	12	36	23	11	53	15	17	13	25	10	8	27	9	9
9h	36	22	61	26	16	71	20	5	19	21	5	9	21	8	14
12h	68	6	35	18	10	59	20	17	18	19	13	11	20	9	11
15h	15	9	33	15	11	42	21	14	15	23	6	11	20	15	6
18h	16	13	8	16	6	13	4	11	6	6	16	6	15	5	5
21h	4	8	4	17	28	5	11	6	9	3	3	4	11	3	8
24h	5	9	3	8	7	5	8	10	4	8	9	2	12	12	1
最高	68	22	61	26	28	71	21	21	20	25	16	16	27	25	27
最低	4	2	3	4	1	5	4	5	4	3	3	2	11	3	1
区间	64	20	58	22	27	66	17	16	16	22	13	14	16	22	26

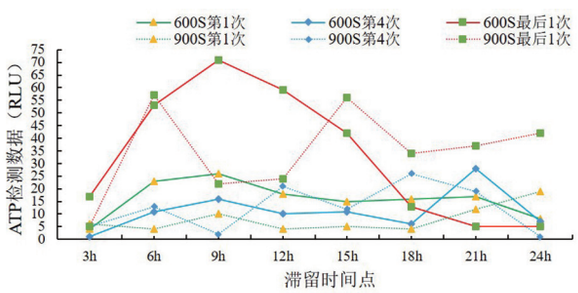


图 4 过滤器端 ATP 检测数据曲线

Figure 4 ATP Detection Data Curve at Filter End

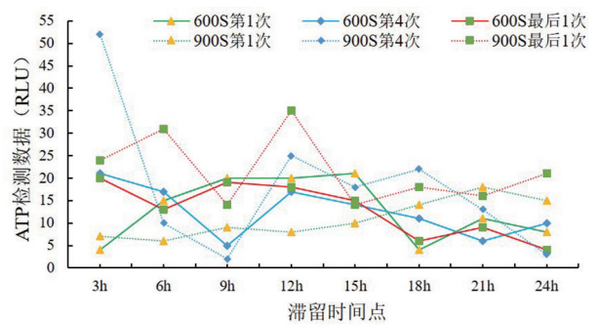


图 5 板换进口 ATP 检测数据曲线

Figure 5 Curve of Imported ATP Detection Data Replacement

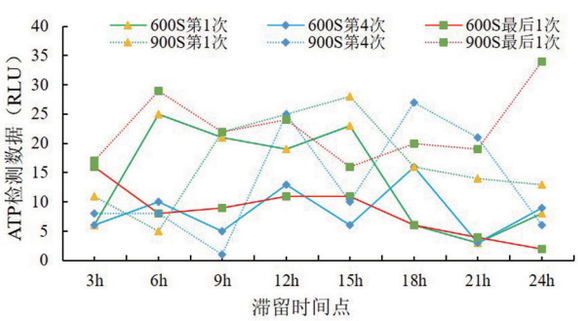


图 6 板换出口 ATP 检测数据曲线

Figure 6 Curve of ATP Detection Data at Board Exit

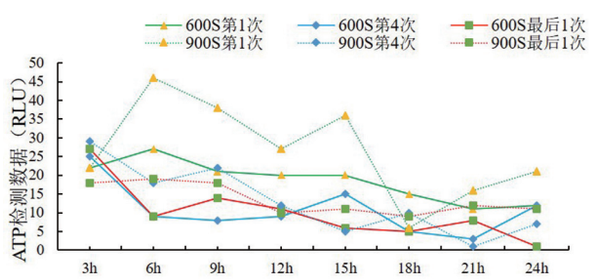


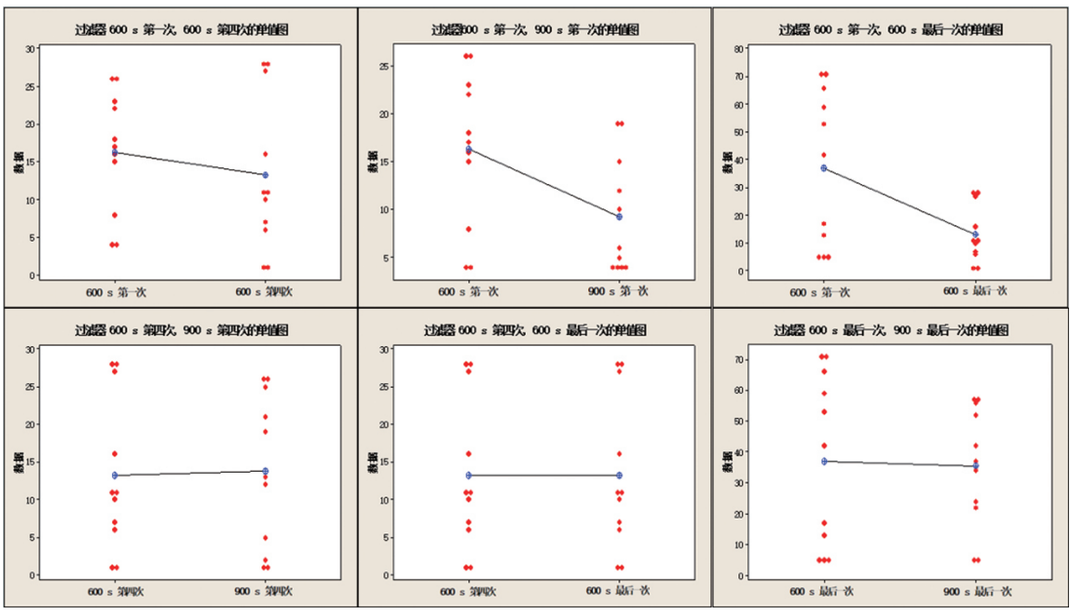
图 7 阀组进口 ATP 检测数据曲线

Figure 7 Curve of ATP Detection Data at Valve Group Inlet

表 5 物料泵口双样本 T 检验 *P* 值分析结果（$P > 0.05$）

Table 5 Results of Two-sample T-test for Material Pump Outlet *P*-Value Analysis（$P>0.05$）

比对范围	600 s 第一次与 600 s 第四次	600 s 第一次与 900 s 第一次	600 s 第一次与 600 s 最后一次	600 s 第四次与 900 s 第四次	600 s 第四次与 600 s 最后一次	600 s 最后一次与 900 s 最后一次
P 值	0.210	0.262	0.716	0.399	0.084	0.866



（a）单值变量控制图

双样本 T 检验和置信区间：600 s 第一次，600 s 第四次

均值标

	N	均值	标准差	准误
600 s 第一次	8	20.9	21.5	7.6
600 s 第四次	8	10.13	5.89	2.1

差值 = μ（600 s 第一次）- μ（600 s 第四次）
差值估计值：10.75
差值的 95% 置信区间：（-7.45，28.95）
差值 = 0（与 ≠）的 T 检验：T 值 = 1.36 P 值 = 0.210 自由度 = 8

双样本 T 检验和置信区间：600 s 第一次，900 s 第一次

均值标

	N	均值	标准差	准误
600 s 第一次	8	20.9	21.5	7.6
900 s 第一次	8	11.25	6.80	2.4

差值 = μ（600 s 第一次）- μ（900 s 第一次）
差值估计值：9.63
差值的 95% 置信区间：（-8.78，28.03）
差值 = 0（与 ≠）的 T 检验：T 值 = 1.21 P 值 = 0.262 自由度 = 8

双样本 T 检验和置信区间：600 s 第四次，600 s 最后一次

均值标

	N	均值	标准差	准误
600 s 第四次	8	10.13	5.89	2.1
600 s 最后一次	8	24.8	20.2	7.1

差值 = μ（600 s 第四次）- μ（600 s 最后一次）
差值估计值：-14.63
差值的 95% 置信区间：（-31.74，2.49）
差值 = 0（与 ≠）的 T 检验：T 值 = -2.39 P 值 = 0.036 自由度 = 8

双样本 T 检验和置信区间：600 s 第一次，600 s 最后一次

均值标

	N	均值	标准差	准误
600 s 第一次	8	20.9	21.5	7.6
600 s 最后一次	8	24.8	20.2	7.1

差值 = μ（600 s 第一次）- μ（600 s 最后一次）
差值估计值：-3.9
差值的 95% 置信区间：（-26.4，18.7）
差值 = 0（与 ≠）的 T 检验：T 值 = -0.37 P 值 = 0.716 自由度 = 13

双样本 T 检验和置信区间：600 s 第四次，900 s 第四次

均值标

	N	均值	标准差	准误
600 s 第四次	8	10.13	5.89	2.1
900 s 第四次	8	13.13	7.74	2.7

差值 = μ（600 s 第四次）- μ（900 s 第四次）
差值估计值：-3.00
差值的 95% 置信区间：（-10.43，4.43）
差值 = 0（与 ≠）的 T 检验：T 值 = -0.87 P 值 = 0.399 自由度 = 13

双样本 T 检验和置信区间：600 s 最后一次，900 s 最后一次

均值标

	N	均值	标准差	准误
600 s 最后一次	8	24.8	20.2	7.1
900 s 最后一次	8	26.3	14.1	5.0

差值 = μ（600 s 最后一次）- μ（900 s 最后一次）
差值估计值：-1.50
差值的 95% 置信区间：（-20.47，17.47）
差值 = 0（与 ≠）的 T 检验：T 值 = 0.04 P 值 = 0.967 自由度 = 12

（b）双样本 T 检验结果

图 8 物料泵口双样本 T 检验结果

Figure 8 Results of Two-sample T-test for Material Pump Ports

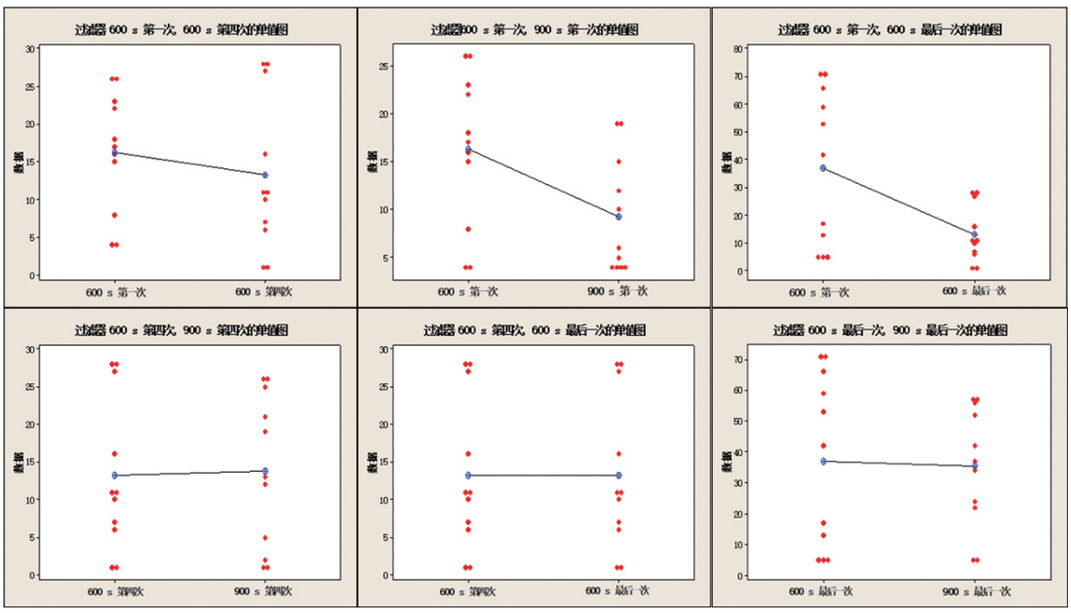
2.3.2 过滤器端双样本T检验

CIP前600 s最后一次清洗与CIP后600 s第一次清洗的检验结果显示$P<0.05$，表明两组数据之间存在统计学显著差异，该差异可能与参数变化有关。具体而言，CIP后600 s第一次清洗效果相较于CIP前600 s最后一次清洗呈现下降趋势。其余对比组间$P>0.05$，表明数据间无显著统计学差异，清洗效果未因参数调整而下降（图9、表6）。

表 6 过滤器端双样本 T 检验 *P* 值分析结果（$P > 0.05$）

Table 6 Results of Two-sample T-test *P*-Value Analysis for Filter Ends（$P>0.05$）

比对范围	600 s 第一次与 s 第四次	600 s 第一次与 900 s 第一次	600 s 第一次与 600 s 最后一次	600 s 第四次与 900 s 第四次	600 s 第四次与 600 s 最后一次	600 s 最后一次与 900 s 最后一次
P 值	0.453	0.093	0.022	0.918	1.000	0.890



（a）单值变量控制图

双样本 T 检验和置信区间：600 s 第一次，600 s 第四次

均值标

	N	均值	标准差	准误
600 s 第一次	11	16.27	8.01	2.4
600 s 第四次	11	13.3	10.2	3.1

差值 = mu (600 s 第一次) - mu (600 s 第四次)
差值估计值: 3.00
差值的 95% 置信区间: (-5.23, 11.23)
差值 = 0 (与 ≠) 的 T 检验: T 值 = 0.77 P 值 = 0.453 自由度 = 18

双样本 T 检验和置信区间：600 s 第一次，900 s 第一次

均值标

	N	均值	标准差	准误
600 s 第一次	11	27.5	26.7	8.0
900 s 第一次	11	12.18	7.47	2.3

差值 = mu (600 s 第一次) - mu (900 s 第一次)
差值估计值: 15.36
差值的 95% 置信区间: (-3.03, 33.75)
差值 = 0 (与 ≠) 的 T 检验: T 值 = 1.84 P 值 = 0.093 自由度 = 11

双样本 T 检验和置信区间：600 s 第四次，600 s 最后一次

均值标

	N	均值	标准差	准误
600 s 第四次	11	13.3	10.2	3.1
600 s 最后一次	11	13.3	10.2	3.1

差值 = mu (600 s 第四次) - mu (600 s 最后一次)
差值估计值: 0.00
差值的 95% 置信区间: (-9.09, 9.09)
差值 = 0 (与 ≠) 的 T 检验: T 值 = 0.00 P 值 = 1.000 自由度 = 20

双样本 T 检验和置信区间：600 s 第一次，600 s 最后一次

均值标

	N	均值	标准差	准误
600 s 第一次	11	37.0	28.2	8.5
600 s 最后一次	11	13.3	10.2	3.1

差值 = mu (600 s 第一次) - mu (600 s 最后一次)
差值估计值: 23.73
差值的 95% 置信区间: (4.01, 43.45)
差值 = 0 (与 ≠) 的 T 检验: T 值 = 2.62 P 值 = 0.022 自由度 = 12

双样本 T 检验和置信区间：600 s 第四次，900 s 第四次

均值标

	N	均值	标准差	准误
600 s 第四次	11	13.3	10.2	3.1
900 s 第四次	11	13.7	10.2	3.1

差值 = mu (600 s 第四次) - mu (900 s 第四次)
差值估计值: -0.45
差值的 95% 置信区间: (-9.59, 8.68)
差值 = 0 (与 ≠) 的 T 检验: T 值 = -0.10 P 值 = 0.918 自由度 = 19

双样本 T 检验和置信区间：600 s 最后一次，900 s 最后一次

均值标

	N	均值	标准差	准误
600 s 最后一次	11	37.0	28.2	8.5
900 s 最后一次	11	35.5	19.6	5.9

差值 = mu (600 s 最后一次) - mu (900 s 最后一次)
差值估计值: 1.5
差值的 95% 置信区间: (-20.4, 23.3)
差值 = 0 (与 ≠) 的 T 检验: T 值 = 0.14 P 值 = 0.890 自由度 = 17

（b）双样本 T 检验结果

图 9 过滤器端双样本 T 检验结果

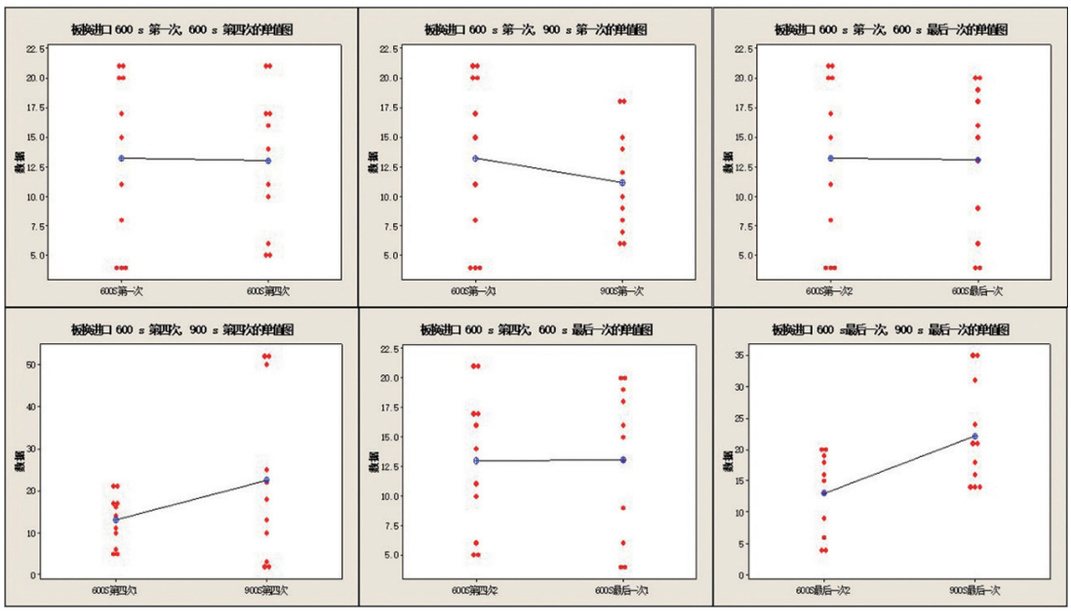
Figure 9 Results of Two-sample T-test at Filter Terminal

2.3.3 板换进口双样本T检验

在板换进口双样本T检验中，600 s最后一次与900 s最后一次的P值为0.010＜0.05，表明两组数据之间存在统计学显著差异，该差异可能与参数变化有关。具体而言，600 s第一次清洗效果相较于900 s最后一次呈现下降趋势。其余对比组间P＞0.05，表明数据间无显著统计学差异，清洗效果未因参数调整而下降（图10、表7）。

2.3.4 板换出口双样本T检验

在板换出口双样本T检验中，600 s最后一次与900 s最后一次的P值为0.000＜0.05，表明两组数据之间存在统计学显著差异，该差异可能与参数变化有关。具体而言，600 s第一次清洗效果相较于900 s最后一次呈现下降趋势。其余对比组间P＞0.05，表明数据间无显著统计学差异，清洗效果未因参数调整而下降（图11、表8）。



（a）单值变量控制图

双样本 T 检验和置信区间：600 s 第一次，600 s 第四次

	N	均值	均值标准差	均值标准误
600 s 第一次	11	13.18	7.19	2.2
600 s 第四次	11	13.00	6.00	1.8

差值 = mu（600 s 第一次）- mu（600 s 第四次）
差值估计值：0.18
差值的 95% 置信区间：（-5.73，6.09）
差值 = 0（与 ≠）的 T 检验：T 值 = 0.06 P 值 = 0.949 自由度 = 19

双样本 T 检验和置信区间：600 s 第一次，600 s 最后一次

	N	均值	均值标准差	均值标准误
600 s 第一次	11	13.18	7.19	2.2
600 s 最后一次	11	13.09	6.32	1.9

差值 = mu（600 s 第一次）- mu（600 s 最后一次）
差值估计值：0.09
差值的 95% 置信区间：（-5.95，6.13）
差值 = 0（与 ≠）的 T 检验：T 值 = 0.03 P 值 = 0.975 自由度 = 19

双样本 T 检验和置信区间：600 s 第一次，900 s 第一次

	N	均值	均值标准差	均值标准误
600 s 第一次	11	13.18	7.19	2.2
900 s 第一次	11	11.18	4.51	1.4

差值 = mu（600 s 第一次）- mu（900 s 第一次）
差值估计值：2.00
差值的 95% 置信区间：（-3.43，7.43）
差值 = 0（与 ≠）的 T 检验：T 值 = 0.78 P 值 = 0.446 自由度 = 16

双样本 T 检验和置信区间：600 s 第四次，900 s 第四次

	N	均值	均值标准差	均值标准误
600 s 第四次	11	13.00	6.00	1.8
900 s 第四次	11	22.6	20.0	6.0

差值 = mu（600 s 第四次）- mu（900 s 第四次）
差值估计值：-9.64
差值的 95% 置信区间：（-23.48，4.21）
差值 = 0（与 ≠）的 T 检验：T 值 = -1.53 P 值 = 0.154 自由度 = 11

双样本 T 检验和置信区间：600 s 第四次，600 s 最后一次

	N	均值	均值标准差	均值标准误
600 s 第四次	11	13.00	6.00	1.8
600 s 最后一次	11	13.09	6.32	1.9

差值 = mu（600 s 第四次）- mu（600 s 最后一次1）
差值估计值：-0.09
差值的 95% 置信区间：（-5.59，5.41）
差值 = 0（与 ≠）的 T 检验：T 值 = -0.03 P 值 = 0.973 自由度 = 19

双样本 T 检验和置信区间：600 s 最后一次，900 s 最后一次

	N	均值	均值标准差	均值标准误
600 s 最后一次	11	13.09	6.32	1.9
900 s 最后一次	11	22.09	8.18	2.5

差值 = mu（600 s 最后一次）- mu（900 s 最后一次）
差值估计值：-9.00
差值的 95% 置信区间：（-15.55，-2.45）
差值 = 0（与 ≠）的 T 检验：T 值 = -2.89 P 值 = 0.010 自由度 = 18

（b）双样本 T 检验结果

图 10 板换进口双样本 T 检验结果

Figure 10 Results of Paired Import Double Sample T-test

表 7 板换进口双样本 T 检验 *P* 值分析结果（*P* ＞ 0.05）

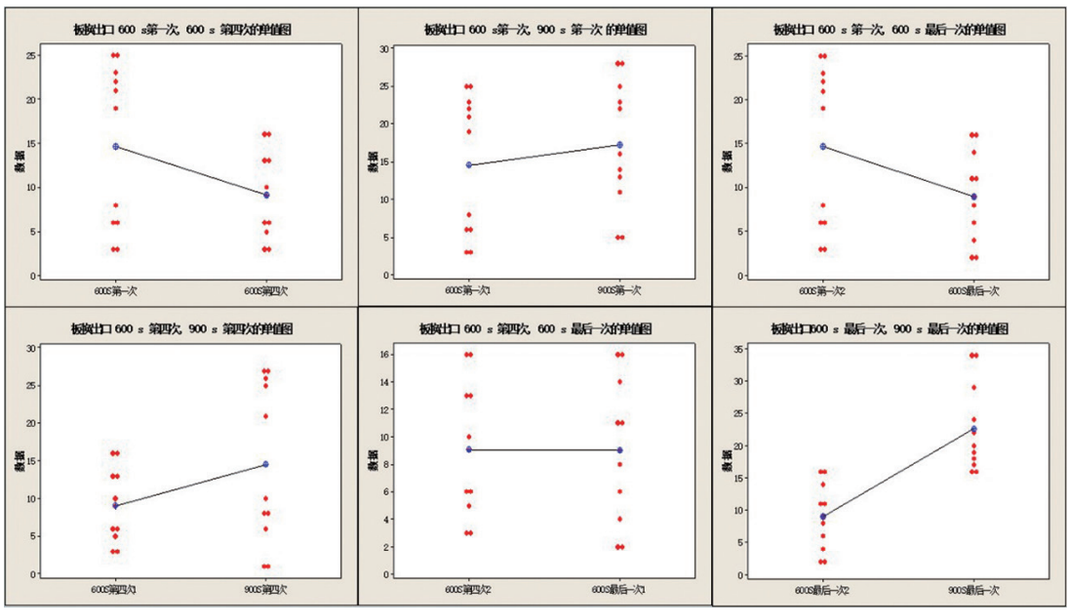
Table 7 Results of *P*-value Analysis for Two-sample T-test of Imported Data Replacement（*P*＞0.05）

比对范围	600 s 第一次与 600 s 第四次	600 s 第一次与 900 s 第一次	600 s 第一次与 600 s 最后一次	600 s 第四次与 900 s 第四次	600 s 第四次与 600 s 最后一次	600 s 最后一次与 900 s 最后一次
P 值	0.949	0.446	0.975	0.154	0.973	0.010

表 8 板换出口双样本 T 检验（*P* ＞ 0.05）

Table 8 Results of P-value Analysis for Two-sample T-test at the Outlet of Heat Exchanger（*P*＞0.05）

比对范围	600 s 第一次与 600 s 第四次	600 s 第一次与 900 s 第一次	600 s 第一次与 600 s 最后一次	600 s 第四次与 900 s 第四次	600 s 第四次与 600 s 最后一次	600 s 最后一次与 900 s 最后一次
P 值	0.100	0.495	0.099	0.147	0.966	0.000



（a）单值变量控制图

双样本 T 检验和置信区间：600 s 第一次，600 s 第四次

	N	均值	均值标准差	均值标准误
600 s 第一次	11	14.64	9.29	2.8
600 s 第四次	11	9.09	4.87	1.5

差值 = mu (600 s 第一次) - mu (600 s 第四次)
差值估计值: 5.55
差值的 95% 置信区间: (-1.19, 12.28)
差值 = 0 (与 ≠) 的 T 检验: T 值 = 1.75 P 值 = 0.100 自由度 = 15

双样本 T 检验和置信区间：600 s 第一次 1，900 s 第一次

	N	均值	均值标准差	均值标准误
600 s 第一次	11	14.64	9.29	2.8
900 s 第一次	11	17.27	8.46	2.6

差值 = mu (600 s 第一次) - mu (900 s 第一次)
差值估计值: -2.64
差值的 95% 置信区间: (-10.57, 5.29)
差值 = 0 (与 ≠) 的 T 检验: T 值 = -0.70 P 值 = 0.495 自由度 = 19

双样本 T 检验和置信区间：600 s 第四次，600 s 最后一次

	N	均值	均值标准差	均值标准误
600 s 第四次	11	9.09	4.87	1.5
600 s 最后一次	11	9.00	5.14	1.5

差值 = mu (600 s 第四次) - mu (600 s 最后一次)
差值估计值: 0.09
差值的 95% 置信区间: (-4.38, 4.56)
差值 = 0 (与 ≠) 的 T 检验: T 值 = 0.04 P 值 = 0.966 自由度 = 19

双样本 T 检验和置信区间：600 s 第一次，600 s 最后一次

	N	均值	均值标准差	均值标准误
600 s 第一次	11	14.64	9.29	2.8
600 s 最后一次	11	9.00	5.14	1.5

差值 = mu (600 s 第一次) - mu (600 s 最后一次)
差值估计值: 5.64
差值的 95% 置信区间: (-1.18, 12.46)
差值 = 0 (与 ≠) 的 T 检验: T 值 = 1.76 P 值 = 0.099 自由度 = 15

双样本 T 检验和置信区间：600 s 第四次，900 s 第四次

	N	均值	均值标准差	均值标准误
600 s 第四次	11	9.09	4.87	1.5
900 s 第四次	11	14.5	10.7	3.2

差值 = mu (600 s 第四次) - mu (900 s 第四次)
差值估计值: -5.45
差值的 95% 置信区间: (-13.09, 2.19)
差值 = 0 (与 ≠) 的 T 检验: T 值 = -1.54 P 值 = 0.147 自由度 = 13

双样本 T 检验和置信区间：600 s 最后一次，900 s 最后一次

	N	均值	均值标准差	均值标准误
600 s 最后一次	11	9.00	5.14	1.5
900 s 最后一次	11	22.64	6.80	2.1

差值 = mu (600 s 最后一次) - mu (900 s 最后一次)
差值估计值: -13.64
差值的 95% 置信区间: (-19.04, -8.24)
差值 = 0 (与 ≠) 的 T 检验: T 值 = -5.31 P 值 = 0.000 自由度 = 18

（b）双样本 T 检验结果

图 11 板换出口双样本 T 检验结果

Figure 11 Results of Two-sample T-test for Board Exit

2.3.5 阀阵进口双样本T检验

在阀阵进口双样本T检验中，所有对比组间$P>0.05$，表明数据间无显著统计学差异，清洗效果未因参数调整而下降（图12、表9）。

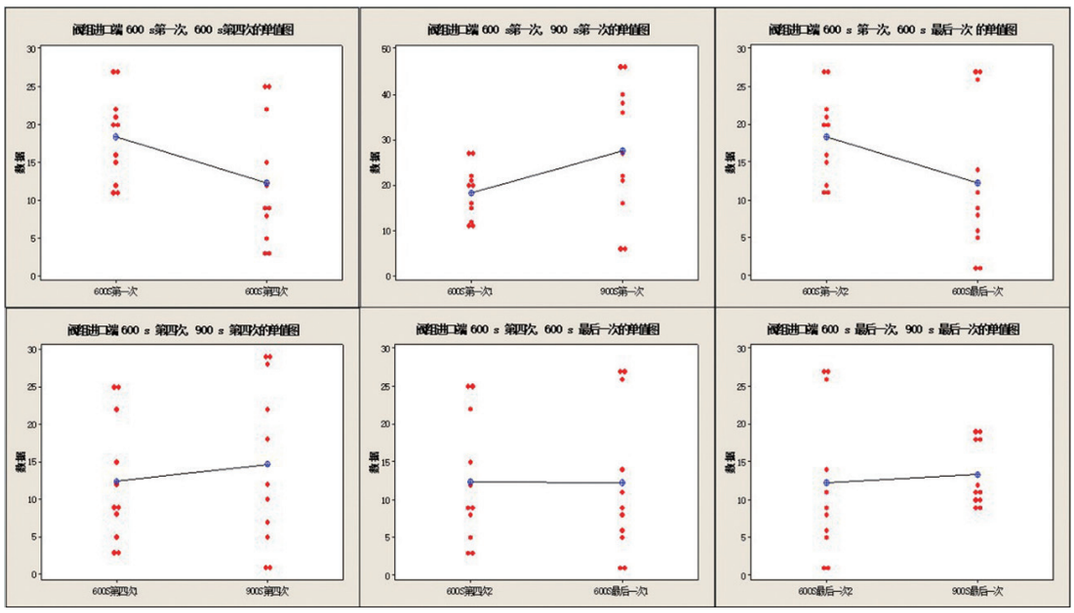
2.4 故障模式与影响分析（FMEA）风险评估

依据本研究试验结果，对S（严重程度）、O（概率）和D（检测度）进行打分，各项分值均处于可接受水平。表明在试验数据采集点位的设置下，

表 9 阀阵进口双样本 T 检验（$P>0.05$）

Table 9 Results of *P*-value Analysis for Two-sample T-test at the Valve Array Inlet（$P>0.05$）

比对范围	600 s 第一次与 600 s 第四次	600 s 第一次与 900 s 第一次	600 s 第一次与 600 s 最后一次	600 s 第四次与 900 s 第四次	600 s 第四次与 600 s 最后一次	600 s 最后一次与 900 s 最后一次
P 值	0.067	0.073	0.100	0.576	0.982	0.765



（a）单值变量控制图

双样本 T 检验和置信区间：600 s 第一次，600 s 第四次

	N	均值	均值标准差	均值标准误
600 s 第一次	11	18.36	5.84	1.8
600 s 第四次	11	12.36	8.31	2.5

差值 = mu（600 s 第一次）- mu（600 s 第四次）
差值估计值：6.00
差值的 95% 置信区间：（-0.46，12.46）
差值 = 0（与 ≠）的 T 检验：T 值 = 1.96 P 值 = 0.067 自由度 = 17

双样本 T 检验和置信区间：600 s 第一次，900 s 第一次

	N	均值	均值标准差	均值标准误
600 s 第一次	11	18.36	5.84	1.8
900 s 第一次	11	27.6	14.7	4.4

差值 = mu（600 s 第一次）- mu（900 s 第一次）
差值估计值：-9.27
差值的 95% 置信区间：（-19.56，1.01）
差值 = 0（与 ≠）的 T 检验：T 值 = -1.95 P 值 = 0.073 自由度 = 13

双样本 T 检验和置信区间：600 s 第四次，600 s 最后一次

	N	均值	均值标准差	均值标准误
600 s 第四次	11	12.36	8.31	2.5
600 s 最后一次	11	12.3	10.0	3.0

差值 = mu（600 s 第四次）- mu（600 s 最后一次）
差值估计值：0.09
差值的 95% 置信区间：（-8.12，8.30）
差值 = 0（与 ≠）的 T 检验：T 值 = 0.02 P 值 = 0.982 自由度 = 19

双样本 T 检验和置信区间：600 s 第一次，600 s 最后一次

	N	均值	均值标准差	均值标准误
600 s 第一次	11	18.36	5.84	1.8
600 s 最后一次	11	12.3	10.0	3.0

差值 = mu（600 s 第一次）- mu（600 s 最后一次）
差值估计值：6.09
差值的 95% 置信区间：（-1.32，13.50）
差值 = 0（与 ≠）的 T 检验：T 值 = 1.74 P 值 = 0.100 自由度 = 16

双样本 T 检验和置信区间：600 s 第四次，900 s 第四次

	N	均值	均值标准差	均值标准误
600 s 第四次	11	12.36	8.31	2.5
900 s 第四次	11	14.7	11.0	3.3

差值 = mu（600 s 第四次）- mu（900 s 第四次）
差值估计值：-2.36
差值的 95% 置信区间：（-11.09，6.36）
差值 = 0（与 ≠）的 T 检验：T 值 = -0.57 P 值 = 0.576 自由度 = 18

双样本 T 检验和置信区间：600 s 最后一次，900 s 最后一次

	N	均值	均值标准差	均值标准误
600 s 最后一次	11	12.3	10.0	3.0
900 s 最后一次	11	13.27	4.24	1.3

差值 = mu（600 s 最后一次）- mu（900 s 最后一次）
差值估计值：-1.00
差值的 95% 置信区间：（-8.08，6.08）
差值 = 0（与 ≠）的 T 检验：T 值 = -0.31 P 值 = 0.765 自由度 = 13

（b）双样本 T 检验结果

图 12 阀阵进口双样本 T 检验结果

Figure 12 Results of Two-sample T-test for Valve Array Inlet

所有监测单元采集数据均满足标准要求（表10）。

3　讨论

本研究以中试车间收奶线为对象验证了CIP清洗参数优化的可行性，但仍存在三方面局限：

（1）验证场景单一。仅针对一条中试收奶线开展试验，未涵盖不同管径规格、产能规模及冬夏温差波动对清洗效果的差异化影响，结论向规模化产线推广的普适性有待多场景验证。

（2）检测维度有限。仅采用ATP荧光法在24 h内监测有机残留总量，该方法无法区分微生物种类与活菌数量，难以评估芽孢杆菌等耐热菌的潜在风险；监测窗口仅覆盖一个生产日，对更长周期的延迟性微生物反弹缺乏数据支撑。

（3）优化变量不足。本研究仅调整碱循环时间与脉冲频次两个变量，未对清洗温度、碱液浓度、

表 10 FMEA 风险评估中 SOD 打分表

Table 10 SOD Scoring Table in FMEA Risk Assessment

工序	功能	严重程度	概率	检测度	RPN 值	行动优先级（AP）
		S	O	D		
原奶接收	收奶管路	1	1	4	4	L
	端口	1	1	4	4	L
	视镜	1	4	4	16	L
	单向阀	1	1	7	7	L
	泵	1	4	4	16	L
	过滤器	1	4	1	4	L
	磁性过滤器	1	4	1	4	L
	打冷板换左侧	1	4	4	16	L
	打冷板换右侧	1	4	4	16	L
	打冷板换中间 M 型	4	1	4	16	L
	阀阵脉冲	4	1	7	28	L

酸洗段参数及水流速等关键因子开展协同优化，多参数间的交互补偿效应尚不明确。

未来研究可从三方面推进：第一，开展温度-时间-浓度-流速多因素正交试验或响应面分析，构建多变量协同的清洗效能预测模型，探明参数间的交互机制；第二，引入在线电导率、浊度传感器与实时ATP监测模块，结合机器学习算法构建自适应“按需清洗”智能控制策略，实现清洗终点的动态判定与闭环优化；第三，将验证范围拓展至多产线、多地域、多季节的平行试验，延长监测周期至48~72 h，补充传统微生物培养法与特定致病菌靶向检测，建立ATP-RLU值与微生物指标的定量映射关系，提升风险评估精度与工程推广价值。

4 结论

本研究优化了收奶线CIP清洗过程中碱循环时间与脉冲频次，并系统评估了优化后的清洗效果及其潜在风险。结果表明，将碱循环时间由900 s缩短至600 s，并相应降低脉冲频次，未对采样点的清洗效果产生显著影响，所有ATP检测值均满足卫生标准要求（<100 RLU）。因此，优化后的CIP清洗程序在确保卫生安全的同时，可有效降低能耗与设备损耗，展现出良好的可行性与推广价值。未来可进一步结合实时监测与智能控制技术，以实现清洗过程的动态优化与精准管理。

参考文献

[1] 张水成，王沂，张世卿.食品工厂设备清洗及CIP系统[J].食品科技，2006，31（8）：167-170.

[2] 姜建林，文棋.CIP清洗系统在乳饮料行业的应用[J].中国高新技术企业，2016（15）：41-42.

[3] 中国奶业协会.中国奶业质量报告(2025)[R].北京：中国农业出版社，2025.

[4] 其布日其其格，李勇，白惠玲.乳品生产线CIP清洗技术优化及节能效果分析[J].现代食品，2021，29（23）：86-88，92.

[5] 周元，陈伟.液态奶工厂贮奶罐清洗工艺和效果验证的研究[J].中国乳业，2021（12）：111-115.

[6] 彭绍忠，黄泳涛，薛小锦，等.植物饮料在线调配生产线CIP清洗优化[J].饮料工业，2013，16（7）：36-38.

[7] European Hygienic Engineering & Design Group（EHEDG）. EHEDG DOC 45：Hygienic Design Guidelines for Food Machinery[S].

[8] 国家环境保护总局.HJ/T 316—2006 清洁生产标准 乳制品制造业（纯牛乳及全脂乳粉）[S].