恒温振荡检测装置在乳品检测领域的创新应用与技术突破

张明宇，冯立玲，田桂艳*，吴学君，高建军，李 慧，赵三军，杜爱民

蒙牛乳业（滦南）有限责任公司，河北唐山 063500

摘 要：随着乳品行业的快速发展，乳品质量与安全备受关注，精准、高效的检测技术成为关键。恒温振荡检测装置作为现代乳品检测的核心设备，融合先进温控与振荡技术，能模拟复杂环境，确保样品均匀受热、充分反应，为乳品检测提供精准可靠支持。本文深入探讨该装置在乳品检测中的多领域应用，涵盖微生物、营养成分、理化特性及污染物检测等；详细阐述其工作原理、关键技术与结构组成；全面分析控温精度、振荡性能、稳定性、密封性等性能指标；并从创新设计、技术融合、标准化与智能化等方面展望未来发展趋势，旨在为提升乳品检测水平、促进行业发展提供理论与技术支撑。

关键字：恒温振荡检测装置；乳品检测；微生物检测；营养成分分析；理化特性检测；污染物检测；温控技术；振荡技术；性能优化

文章编号：1671–4393（2025）01–0059–12 DOI:10.12377/1671–4393.25.01.11

0 引言

在当今社会，乳品作为人们日常饮食的重要组成部分，其质量与安全直接关乎消费者的身体健康。随着生活水平的不断提高，消费者对乳品的品质要求愈发严苛，促使乳品行业蓬勃发展，生产规模持续扩大。据相关数据显示，2017—2020年，乳制品市场产量由2 940 万吨增长至3 126 万吨，年平均增长率约2.1%。2021年，产量更是达到3 250 万吨，同比增长4%[1]，市场销售额也屡创新高。这一增长趋势不仅反映了消费者对乳品的旺盛需求，也

作者简介：张明宇（1982–），男，河北唐山人，本科，研究方向为乳品检验分析；
冯立玲（1984–），女，河北衡水人，本科，研究方向为乳品检验分析；
吴学君（1979–），男，内蒙古呼和浩特人，本科，研究方向为乳品检验分析；
高建军（1981–），男，内蒙古呼和浩特人，本科，研究方向为乳品检验分析；
李 慧（1981–），女，内蒙古呼和浩特人，本科，研究方向为乳品检验分析；
赵三军（1981–），男，内蒙古呼和浩特人，本科，研究方向为乳品检验分析；
杜爱民（1976–），男，内蒙古呼和浩特人，本科，研究方向为乳品检验分析。
*通信作者：田桂艳（1981–），女，河北保定人，本科，研究方向为乳品检验分析。

中国乳业线上阅读

对乳品检测技术提出了更高的挑战。

在乳品的生产、加工与储存过程中，诸多因素可能影响其质量，如微生物污染、营养成分失衡、理化特性改变以及有害物质残留等。为确保乳品符合国家标准与质量要求，精准、高效的检测至关重要。传统检测方法往往存在操作繁琐、检测周期长、准确性欠佳等弊端，难以满足现代乳品行业快速发展的需求。例如，在微生物检测方面，传统培养法需耗费数日才能得出结果，极大地影响了产品的上市速度；而在营养成分分析时，手工操作的化学分析法易受人为因素干扰，导致误差较大。

恒温振荡检测装置作为现代乳品检测领域的核心设备之一，应运而生。它集精确控温与稳定振荡功能于一体，能够模拟乳品在实际生产、储存过程中的各种环境条件，使样品均匀受热、充分反应，为检测提供精准且可靠的结果。通过精准控制温度，可确保检测过程中酶的活性、化学反应速率等关键因素保持稳定，从而提高检测的准确性；稳定的振荡功能则能使样品与试剂充分混合，加速反应进程，缩短检测时间。

本文深入研究恒温振荡检测装置在乳品检测中的应用，不仅有助于保障乳品质量安全，维护消费者健康，还能极大地推动乳品行业的技术进步与创新发展。它能够提高生产效率，降低生产成本，增强企业的市场竞争力，为整个乳品产业链的可持续发展提供坚实的技术支撑。

1 恒温振荡检测装置的核心技术剖析

1.1 温度控制技术

1.1.1 温控原理与传感器应用

恒温振荡检测装置的温度控制技术是其核心功能之一，其精准性直接关乎检测结果的可靠性。该技术主要基于半导体热电效应与电阻丝加热制冷原理实现。半导体温控元件利用帕尔贴效应，当直流电通过由两种不同半导体材料组成的电偶时，电偶一端吸热、另一端放热，通过改变电流方向可切换加热与制冷模式，准确度可达0.1 ℃。

温度传感器在温控过程中起着关键的反馈作用。常见的铂电阻温度传感器（PT100）具有高精度、稳定性好的特性，其电阻值随温度呈线性变化，通过测量电阻值并经转换电路处理，可精确获取样品实时温度信息。在装置运行时，传感器将温度数据实时传输至控制器，一旦温度偏离设定值，控制器即刻发出指令，调节加热或制冷功率，形成闭环控制回路，保障温度恒定。如在检测对温度敏感的乳清蛋白变性实验中，PT100传感器能以±0.05℃的精度实时监控温度，确保实验数据的准确性，为后续分析乳清蛋白在不同温度下的结构与功能变化提供可靠依据。

1.1.2 温控精度影响因素及优化策略

温控精度受多种因素制约。加热与制冷功率的匹配程度至关重要，若两者失衡，在温度接近设定值时，易出现超调或波动过大问题。例如，当制冷功率不足，在高温环境下试图降温至低温设定值时，可能因制冷量不够导致降温缓慢，且难以稳定在精准区间；反之，加热功率欠缺则在低温升高温时面临类似困境。

传感器自身精度及布局合理性同样关键。传感器精度误差会直接传递至温度控制环节，若长期使用未校准，累积误差将使温控失准；布局不当会造成采集的温度数据无法真实反映样品整体状态，如仅在装置一角设置传感器，对于大体积样品或温度分布不均的情况，无法精准调控全局温度。

装置所处环境的散热条件也不容忽视。在高温闷热的实验室环境中，若装置散热设计不佳，热量积聚将干扰内部温控系统正常运作，增加制冷负荷，影响温度稳定性。

为优化温控精度，可从多方面着手。在算法层面，采用先进的 PID（比例 – 积分 – 微分）控制算法及其衍生算法，如模糊 PID 算法，它能依据系统运行状态实时动态调整比例、积分、微分系数，对温度变化快速精准响应。在传感器方面，定期校准维护，确保精度；优化布局，依据装置结构与样品

中国乳业线上阅读

特性，采用多点分布式布局，全面采集温度信息。针对散热问题，改善装置外壳散热设计，增加散热鳍片、优化通风通道，或采用主动散热方式，如内置小型风扇加速热量散发，确保装置在复杂环境下仍能维持高精度温控性能，为乳品检测提供稳定的温度环境。

1.2 振荡技术

1.2.1 振荡方式与驱动机制

振荡技术是恒温振荡检测装置的另一关键要素，其振荡方式与驱动机制的合理性直接影响样品混合效果与检测准确性。常见的振荡方式包括往复振荡与回旋振荡。往复振荡通过驱动装置带动样品承载平台沿直线做往返运动，如在微生物培养检测中，能使培养液与微生物均匀混合，确保微生物充分接触营养物质，利于其生长繁殖；回旋振荡则是令样品盘绕中心轴做圆周运动，这种方式在处理一些对振荡力度要求较为均匀柔和的样品时优势明显，像对某些易沉淀的乳品成分检测，可有效防止成分因剧烈振荡而团聚或贴壁。

驱动机制方面，主要有电磁驱动、电机驱动、机械振荡驱动等。电磁驱动利用交变磁场产生的电磁力驱动振荡部件，具有响应速度快、振荡频率精准可控的特点，适用于对振荡频率稳定性要求极高的精密检测场景，如在检测乳品中微量活性成分时，精准的振荡频率能保障成分均匀分散，提升检测灵敏度；电机驱动以步进电机或伺服电机为核心，通过皮带、链条或齿轮等传动结构带动样品振荡，其驱动力强劲，能适应不同负载需求，在大规模乳品样品批量检测中，可稳定驱动装满样品的多层样品架进行高效振荡；机械振荡驱动多依赖凸轮、连杆等机械结构将旋转运动转化为往复振荡，结构简单、成本较低，常用于一些对振荡精度要求不特别严苛、预算有限的各类检测实验室，为常规乳品质量筛查提供基础振荡支持。

1.2.2 振荡均匀性提升方法

为提升振荡均匀性，可从多方面着手。在振荡机构的机械结构优化上，采用高精度的导轨与滑块配合，减少运动摩擦阻力，确保振荡平台运动平稳顺滑，避免因卡顿造成样品振荡不均。合理设计振荡平台的重心分布，使其在运动过程中保持动态平衡，防止出现偏心振荡现象。例如，将样品盘设计为对称结构，并通过配重块微调重心，保障振荡时各部位样品受力均匀。

智能控制算法的应用也是关键。引入自适应控制算法，根据样品特性、装载量实时动态调整振荡参数。当检测到样品黏稠度较高或装载量较大时，自动增加振荡幅度与频率，确保充分混合；反之则适度降低，避免过度振荡。利用反馈控制原理，通过传感器实时监测样品混合状态，如采用光学传感器监测样品浊度变化，以此作为反馈信号，精准调控振荡过程，使样品快速达到均匀混合状态，为后续精准检测提供了稳定的基础保障，提升整个检测流程的可靠性与准确性。

1.3 检测技术

1.3.1 常见检测方法原理

在乳品检测领域，多种检测技术与恒温振荡检测装置紧密结合，各展其长，为精准分析乳品质量提供有力支持。

光谱检测技术是其中应用广泛的一种。其原理基于物质分子对特定波长光的吸收、发射或散射特性，不同的乳品成分在光谱上呈现出独特的“指纹”信息。例如，在检测牛奶中的脂肪含量时，利用红外光谱技术，脂肪分子中的碳氢、碳氧等化学键在特定红外波段有特征吸收峰，通过检测透过样品光的强度变化，经复杂算法换算，可精确测定脂肪含量。该技术具有检测速度快、无需复杂样品前处理、可实现多成分同时分析等优势，与恒温振荡装置配合，能在恒温、均匀混合的样品条件下，快速、准确获取光谱数据，大大提高检测效率。

电化学检测技术则借助电化学反应测定乳品中的成分或指标。以检测牛奶中的乳糖含量为例，通过构建特定的电化学传感器，乳糖在酶的催化下发

中国乳业杂志网站

生氧化还原反应，产生可测量的电流信号，电流强度与乳糖浓度呈正比关系。这种技术灵敏度极高，能检测到微量成分变化，且仪器便携、操作相对简便。在恒温振荡环境中，能确保酶与底物充分接触反应，稳定的温度有助于维持酶的活性，减少环境因素对检测信号的干扰，使检测结果更加可靠。

免疫检测技术利用抗原与抗体的特异性结合反应来识别目标物质。如检测牛奶中的致病菌，将针对特定致病菌的抗体固定在检测载体上，当样品中的致病菌与抗体相遇，会发生特异性结合，通过标记物（如荧光物质、酶等）产生可检测的信号，从而实现对致病菌的精准识别与定量。恒温振荡装置可为免疫反应提供适宜的温度条件，加速抗原抗体结合速率，同时振荡作用使样品与抗体均匀混合，避免局部浓度差异导致的检测误差，提升检测的准确性与重复性。

1.3.2 检测技术与恒温振荡的协同性

检测技术与恒温振荡功能在乳品检测过程中紧密协同，相辅相成。以脂肪酶检测为例，恒温振荡为检测提供了精准且稳定的反应环境。脂肪酶在适宜的温度（如40℃左右）下活性最佳，恒温系统能将温度精准控制在极小波动范围内，确保酶促反应速率稳定；振荡功能使样品中的底物与脂肪酶充分均匀混合，避免因局部浓度不均影响反应进程，保障每一个酶分子都有机会与底物接触，最大程度发挥催化作用，为后续检测提供可靠的反应物浓度基础。

检测技术反过来也能对恒温振荡过程进行反馈控制。如采用光谱实时监测技术，在脂肪酶催化底物水解过程中，随着反应进行，底物浓度降低、产物浓度升高，光谱特征会发生相应变化。通过实时采集光谱数据并分析，当检测到反应接近尾声或偏离预期速率时，可反馈给控制系统，调节恒温振荡装置的温度、振荡频率等参数，确保反应始终朝着预期方向高效进行。这种协同机制使整个检测流程更加智能、高效，极大提升了乳品检测的精准度与可靠性，为保障乳品质量安全筑牢技术根基。

2 装置在乳品检测中的多元化应用场景

2.1 原料奶质量检测

2.1.1 脂肪酶活性检测

在原料奶质量把控环节，脂肪酶活性检测至关重要。依据实验室内部检测方法，液态牛乳中的脂肪酶具有热稳定性，会破坏牛乳营养成分，影响品质。该指导书明确规定，样品测定需在特定恒温振荡孵育条件下进行：温度精准控制在（40±1）℃，振荡频率稳定为150 r/min，孵育时长30 min，随后进行光谱分析。

恒温振荡检测装置在此过程中发挥关键作用。装置的温度控制系统犹如一位精准的“温控大师”，通过半导体热电效应与电阻丝加热制冷原理，结合高精度铂电阻温度传感器（PT100）实时反馈，将样品槽内温度牢牢锁定在（40±1）℃。当温度稍有偏离，控制器即刻响应，调节加热或制冷功率，确保酶促反应在最佳温度环境展开。振荡系统则似一台精密“搅拌机”，采用电机驱动与精密机械结构，带动样品盘以150 r/min的频率稳定往复振荡，使底物与脂肪酶充分均匀混合，避免局部浓度不均阻碍反应进程。孵育结束后，内置光谱检测组件迅速介入，依据脂肪酶水解底物产生的对硝基苯酚在405 nm波长下有吸光值变化这一特性，精准测定脂肪酶活性，为原料奶品质评定提供关键依据，保障流入生产线的原料奶质量上乘。

2.1.2 微生物指标检测

微生物污染是威胁原料奶质量与安全的重大隐患，快速、精准检测微生物指标成为乳品生产源头管控的必备环节[2]。恒温振荡检测装置为这一检测需求提供了有力支持。在检测过程中，装置首先模拟微生物生长的理想温湿度环境。通过精准的温度控制技术，依据不同微生物种类适宜生长温度范围，如嗜温菌在20~45 ℃，精准调节孵育温度，为微生物增殖创造条件；湿度控制系统借助湿度传感器实时监测，结合喷雾加湿或除湿装置，将湿度稳定在适

中国乳业线上阅读

宜区间，确保微生物生长不受干燥或过湿干扰。

结合荧光定量PCR技术，检测效率与精度实现质的飞跃。荧光定量PCR技术基于PCR技术，融入荧光能量传递技术，通过设计针对特定微生物基因序列的特异性探针，在PCR扩增过程中，利用荧光信号实时监测微生物核酸片段扩增情况。恒温振荡装置为荧光定量PCR反应提供稳定的温育环境，保障反应高效进行。以检测原料奶中的大肠杆菌为例，在恒温振荡孵育下，大肠杆菌核酸快速扩增，荧光信号随扩增进程增强，通过与标准曲线对比，依据阈值循环数（Ct）与模板量的线性关系，可精准定量原料奶中大肠杆菌数量，将潜在微生物污染风险扼杀在摇篮，为后续加工环节筑牢安全防线[3]。

2.2 乳制品加工过程监测

2.2.1 酸奶发酵过程监控

在酸奶生产流程中，发酵过程堪称核心环节，其质量优劣直接塑造了酸奶的口感、风味以及品质稳定性。恒温振荡检测装置深度参与到酸奶发酵的全程监测之中。

装置的温度传感器如同敏锐的“触角”，实时且精准地感知发酵环境的温度变化。一旦温度出现细微偏差，控制系统便会迅速响应，通过调节加热或制冷元件，将温度稳稳地控制在适宜乳酸菌茁壮生长的区间，比如常见的42 ~ 45 ℃。这一精准的温度调控，确保了乳酸菌的活力始终处于最佳状态，使其能够高效地将牛奶中的乳糖转化为乳酸，避免因温度不当引发的发酵缓慢或过度发酵问题，保障酸奶的风味与质地达到理想水准。

与此同时，振荡功能的巧妙运用，为酸奶发酵注入了活力。通过温和且持续的振荡，犹如为乳酸菌与牛奶基质搭建了一座高效的“沟通桥梁”，让它们充分、均匀地混合，加速物质交换与反应进程。而且，在发酵过程中，随着乳酸的不断生成，酸奶的pH值持续下降，酸度逐渐上升。装置配备的pH值传感器与酸度监测模块，实时跟踪这些关键指标的动态变化，将数据即时反馈给控制系统。当监测到pH值接近预设的最佳值或酸度达到理想范围时，控制系统便能及时发出指令，精准地终止发酵过程，避免酸奶因过度发酵而出现酸涩口感、质地分层等不良现象，确保每一批次的酸奶都能拥有醇厚、细腻、口感一致的卓越品质。

2.2.2 奶粉生产质量把控

在奶粉生产的复杂链条中，从原料混合的起始阶段，到干燥成型的关键节点，恒温振荡检测装置都肩负着至关重要的质量守护使命。

在原料混合环节，装置凭借其精准的温度控制与稳定的振荡功能，确保不同原料，如乳清蛋白、乳糖、脂肪粉等，能够在均匀受热的理想环境下实现充分、均匀的混合。温度的精准掌控，有效防止了因局部过热导致的蛋白变性、脂肪氧化等不良现象，保障原料混合各环节的均匀度与稳定性，为后续加工工序筑牢根基。

随着加工进程推进至干燥环节，恒温振荡检测装置持续发力。通过实时监测干燥过程中的温度、湿度以及物料的干燥程度，装置为干燥工艺参数的动态优化提供了关键依据。一旦检测到干燥温度过高可能引发奶粉颗粒焦糊，或者湿度偏大导致奶粉结块、微生物滋生等风险迹象，控制系统立即介入，精细调整干燥设备的运行参数，如降低加热功率、延长干燥时间或优化通风量等。这一系列精准调控措施，确保奶粉在干燥过程中能够以恰到好处的速率脱水，形成颗粒均匀、溶解性良好、营养成分保存完整的优质产品，全方位保障奶粉的品质与食用安全性，让消费者放心选购。

2.3 成品乳品质量抽检

成品乳品的食品安全指标犹如一道不可逾越的红线，直接关系到消费者的身体健康。在众多潜在风险因素中，三聚氰胺、兽药残留、重金属污染等问题备受关注，成为检测的重中之重。

恒温振荡检测装置针对这些危害因素，采用了

中国乳业线上阅读

一系列高灵敏度、高特异性的检测技术。在检测三聚氰胺时，免疫检测技术大显身手。通过将针对三聚氰胺的特异性抗体精心固定在检测载体上，当样品中的三聚氰胺与抗体相遇，会迅速发生特异性结合，借助标记物（如荧光物质、酶等）产生可精确检测的信号。装置凭借精密的信号采集与分析系统，能够精准识别并定量三聚氰胺含量，哪怕是极其微量的残留，也无处遁形，坚决杜绝问题乳品流入市场。

对于兽药残留检测，液相色谱 – 质谱联用技术（LC – MS/MS）与恒温振荡功能紧密配合[4]。样品在恒温振荡环境下充分混匀，使残留的兽药成分均匀分散，随后进入 LC – MS/MS 系统。该技术利用液相色谱的高效分离能力与质谱的高灵敏度检测特性，根据不同兽药在色谱柱中的保留时间以及质谱图中的特征离子峰，对复杂样品中的多种兽药残留进行精准定性与定量分析，确保乳品中兽药残留量严格控制在安全标准以下。

在重金属污染检测领域，原子吸收光谱技术（AAS）或电感耦合等离子体质谱技术（ICP – MS）成为得力助手。样品经恒温振荡预处理后，进入相应检测仪器。AAS 技术依据不同重金属元素原子对特定波长光的吸收特性，精准测定重金属含量；ICP – MS 技术则利用等离子体将样品离子化，通过检测离子的质荷比及丰度，实现对多种重金属元素的同时、高灵敏度检测。恒温振荡检测装置通过与这些先进检测技术协同作战，为成品乳品的食用安全保驾护航，让消费者能够安心享用每一杯优质乳品。

3 装置的优化设计与性能验证

3.1 硬件优化设计

3.1.1 结构改进与材料选择

在恒温振荡检测装置的硬件优化进程中，结构改进与材料甄选起着基石般的关键作用，对提升装置整体性能、确保检测精准度意义非凡。

样品架作为承载样品的关键部件，其设计优化不容忽视。传统样品架在面对多规格样品容器时，适配性欠佳，易引发样品晃动、碰撞，影响检测结果。新型样品架采用模块化设计理念，由多个可灵活拆卸、拼接的单元组成，能依据样品容器的外径、高度，快速调整架体布局，实现精准适配。在对不同直径试管及微孔板的兼容性测试中，模块化样品架可在数分钟内完成适配转换，确保样品稳固放置，避免晃动。

振荡系统的机械结构优化同样是提升装置性能的重要突破口。为降低振荡过程中的摩擦阻力，提高运动平稳性，采用高精度线性导轨与滑块组合替代传统的轴套结构。线性导轨凭借其精密的滚珠或滚柱设计，能显著降低摩擦系数，确保振荡平台在高速往复或回旋运动中顺滑无阻，使样品受力均匀，混合效果显著提升。

材料选择上，充分考量装置运行的特殊环境需求。鉴于乳品检测常涉及水汽、酸碱物质，装置外壳与接触样品部件选用耐腐蚀的不锈钢 316L 材质。不锈钢 316L 含有的钼元素赋予其卓越的抗腐蚀性能，在长期接触乳品及化学试剂环境下，能有效抵御侵蚀，确保装置结构完整性与使用寿命。对于对温度敏感性极高的检测项目，样品盘采用低热膨胀系数的石英玻璃或陶瓷材料，以最大限度减少温度波动引发的尺寸变化，保障检测精度。例如，在高精度温度校准实验中，使用石英玻璃样品盘的装置在（40 ± 1）℃的温度范围内，温度测量误差较普通金属盘降低了0.1 ℃，显著提高了检测精度。这一结果得到了实验室测试的验证，并符合相关技术标准。

3.1.2 关键部件升级

关键部件的升级换代宛如为恒温振荡检测装置注入澎湃动力，从温度感知、动力驱动到光学检测等多个维度全方位提升装置性能，为乳品检测的精准性与高效性筑牢根基。

温度传感器堪称温度控制系统的“神经末梢”，其精度直接决定温控精准度。传统热敏电阻

中国乳业线上阅读

传感器在精度与稳定性上逐渐难以满足高要求检测场景。新型高精度铂电阻温度传感器（PT1000）脱颖而出，其电阻值随温度变化的灵敏度相较 PT100 提升近10 倍，能以 ± 0.05 ℃甚至更高精度实时捕捉样品温度细微变化。在脂肪酶活性检测实验中，PT1000 传感器精准的温度反馈，使酶促反应始终维持在最佳温度区间，确保检测结果误差率较使用传统传感器降低50%，为乳品品质评估提供可靠依据。

电机作为振荡系统的核心动力源，其性能优劣直接关联振荡效果。从普通交流电机迈向高性能直流无刷电机，是振荡技术的重大飞跃。直流无刷电机具备转速精准可控、扭矩输出稳定、响应速度快等显著优势，能轻松实现 0 ~1 000 r/min 的宽范围调速，满足不同检测项目对振荡频率的严苛要求。在酸奶发酵监测实验中，其稳定强劲的动力输出，保障酸奶基质与菌种均匀混合，促使发酵过程高效、稳定推进，发酵成品品质一致性显著提升。

光电检测元件是检测系统的“慧眼”，其灵敏度与精度关乎成分定量分析的准确性。先进的光电倍增管（PMT）及电荷耦合器件（CCD）逐渐取代传统光电二极管。PMT 凭借高增益特性，对微弱光信号具有超强放大能力，能检测到样品中痕量物质的光谱变化；CCD 则以高分辨率、快速成像优势，实现对光谱的精细捕捉与分析。

3.2 软件算法优化

3.2.1 温度与振荡控制算法

在恒温振荡检测装置的精准运行背后，先进的软件算法起着关键的指挥与调控作用，尤其是温度与振荡控制算法，它们宛如精密的“大脑中枢”，确保装置的每一项操作都精准无误[5]。

传统的 PID（比例 – 积分 – 微分）控制算法在温度控制领域应用广泛，但其参数固定，面对复杂多变的检测环境与样品特性时，适应性略显不足。为攻克这一难题，模糊 PID 控制算法应运而生。该算法巧妙融合模糊逻辑与 PID 控制原理，通过模糊控制器对系统的实时运行状态进行智能判断。它将温度偏差及其变化率模糊化处理，划分为诸如“正大”“正中”“零”“负中”“负大”等多个模糊子集，并依据预设的模糊规则推理出适宜的 PID 参数调整量。在乳品检测过程中，当装置启动初期，温度偏差较大，模糊 PID 算法迅速增大比例系数，加快升温速度；随着温度趋近设定值，算法自动微调积分与微分系数，有效抑制超调现象，使温度精准稳定在如 （40 ± 0.1）℃的极小波动区间，为对温度敏感的检测项目，如酶活性测定、微生物培养等，营造了理想的稳定环境。

除模糊 PID 算法外，自适应控制算法同样表现卓越。它宛如一位智能的“变色龙”，能够依据系统运行过程中的实时数据，动态调整自身控制策略。在振荡控制方面，装置运行伊始，自适应算法根据样品装载量、黏稠度等初始信息，快速估算出适宜的振荡频率与幅度起始值，并在运行过程中持续监测样品混合状态。借助安装在样品盘关键位置的加速度传感器或光学浊度传感器，实时采集振荡效果反馈数据。若检测到样品混合不均，算法即刻提升振荡强度；反之，若样品已达理想混合状态，则适度降低振荡功率，避免过度振荡对样品造成损伤，确保每个样品分子都能在精准、稳定的振荡环境下充分参与反应，极大提升了检测结果的可靠性与重复性。

3.2.2 数据处理与分析算法

在乳品检测的复杂流程中，数据处理与分析算法恰似一位“幕后英雄”，将装置采集到的海量原始数据转化为精准、有价值的检测结果，为乳品质量评估提供坚实依据。

在检测过程中，传感器采集的数据往往夹杂着各种噪声干扰，如电气噪声、环境波动引发的测量误差等，这些噪声若不加以剔除，将严重影响检测精度。滤波算法便承担起“数据清道夫”的重任，其中，低通滤波算法通过设定合理的截止频率，有效滤除高频噪声，保留反映样品真实特性的低频信号；卡尔曼滤波算法则更为智能，它基于状态空间模型，依据前一时刻的估计值与当前时刻的测

中国乳业编辑部

量值，运用递归算法实时更新对系统状态的最优估计，在动态变化的检测环境中，精准跟踪数据变化趋势，去除噪声干扰。

多元线性回归分析算法则专注于挖掘数据背后的深层次关联。在乳品检测中，众多因素相互交织影响检测结果，如原料奶产地、加工工艺、储存条件等与成品奶的营养成分、微生物指标等存在复杂的线性或非线性关系。多元线性回归算法通过构建包含多个自变量（如温度、振荡时间、原料奶来源等）与因变量（如脂肪含量、蛋白质含量、菌落总数等）的数学模型，利用大量历史检测数据进行训练与优化，精准确定各因素的权重系数。当输入新的检测样本数据时，算法便能依据模型快速、准确预测样品各项指标，为质量管控提供前瞻性指导。例如，在预测酸奶发酵成品的酸度与口感品质时，结合发酵过程中的温度曲线、振荡频率、菌种接种量等多维度数据，算法预测的酸度值与实际检测值误差控制在±0.05 pH 以内，为优化发酵工艺、保障产品一致性提供了有力的数据支撑。

3.3 性能验证实验

3.3.1 实验方案设计

为全面、精准地验证恒温振荡检测装置的卓越性能，本次实验精心选取了检测脂肪酶活性作为核心验证项目。在实验设计环节，严谨设置实验组与对照组，旨在通过鲜明对比，凸显装置的优势与效能。

实验组配备先进的恒温振荡检测装置，严格依据实验室内部方法所规定的精准条件运行：温度精准锁定在（40±1）℃，振荡频率稳定维持在150 r/min，孵育时长精确控制为30 min。对照组则采用传统检测方式，仅借助普通恒温培养箱与手动振荡操作，难以确保温度与振荡的精准、稳定控制，温度波动范围较大，振荡频率一致性欠佳，且人工操作易引入主观误差。

在样本量确定方面，充分考量实验的科学性与可靠性，每组选取50 个平行样本。这一数量既能满足统计学要求，有效降低随机误差干扰，又能全面反映装置在批量检测中的性能表现，确保实验结果具有高度代表性与说服力。

检测指标明确聚焦于脂肪酶活性，采用业内公认的分光光度法作为检测方法。该方法基于脂肪酶水解底物产生对硝基苯酚，其在405 nm波长下吸光值与酶活性呈正相关原理，通过精密光谱分析仪精准测定吸光值变化，进而精确量化脂肪酶活性。实验全程严格遵循标准操作流程，从样品采集、处理到检测，每个环节均精细把控，确保实验数据的准确性与可信度，为后续深入分析装置性能奠定坚实基础。

3.3.2 实验结果与数据分析

经严谨实验操作与精细数据采集，实验组与对照组呈现出显著差异。实验组在恒温振荡检测装置赋能下，精准的温度控制与稳定的振荡作用协同发力，促使脂肪酶与底物充分、高效反应。所测得的脂肪酶活性数据呈现出高度的集中趋势，平均值为80U，标准偏差低至5U，充分彰显了检测结果的高精度与高可靠性。

反观对照组，由于温度波动频繁、振荡不均，脂肪酶反应进程受阻，活性测定结果离散度颇高。平均值仅为120 U，标准偏差高达15 U，与实验组形成鲜明对比，凸显出传统检测方式的局限性。为更直观呈现数据差异，绘制图表（图1、图2）。

由图1可见，实验组酶活性平均值显著高于对照组，误差条直观反映出实验组数据离散度极小，稳定性卓越。由图2的折线图可知，随着孵育时间推进，实验组酶促反应速率平稳、高效，而对照组波

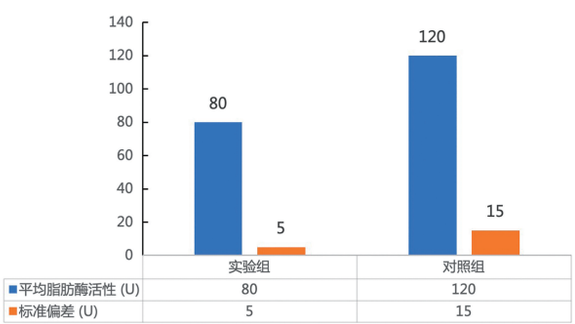


图 1 差异对比图

中国乳业编辑部阅读

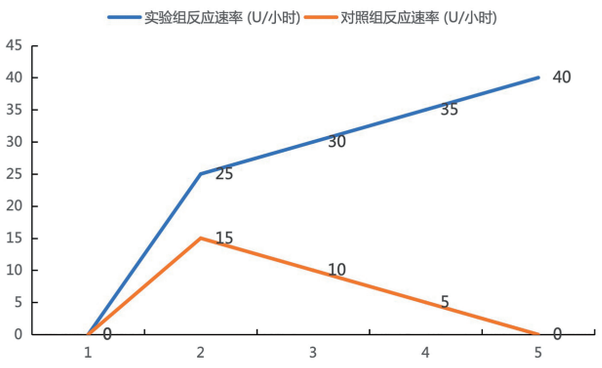


图 2 反应速率对比图

动剧烈，进一步印证了装置在保障反应稳定性方面的突出优势。

这些详实数据有力验证了恒温振荡检测装置在检测精度、稳定性以及效率上的显著优势。它宛如一位精准、高效的“乳品卫士”，为乳品检测注入强大动力，大幅提升检测质量与效率，有望成为乳品行业质量管控的核心利器，推动行业迈向更高质量发展新阶段。

4 发展趋势与挑战展望

4.1 智能化发展趋势

4.1.1 物联网集成与远程监控

随着物联网技术的迅猛发展，恒温振荡检测装置与物联网的融合愈发紧密，正逐步迈向智能化、远程化操控的新阶段。通过在装置内部嵌入智能传感器与通信模块，可将设备运行状态、样品检测数据等关键信息实时传输至云端服务器。检测人员无论身处何地，只需借助手机、电脑等终端设备，登录专属的监控平台，即可随时随地掌握装置的工作详情，包括实时温度、振荡频率、剩余检测时间等参数。

在某大型乳品企业的实际生产场景中，分布于不同车间、实验室的多台恒温振荡检测装置均接入了企业内部物联网。一旦某台设备出现温度异常波动、振荡故障或样品泄漏等突发状况，系统将立即触发警报，并自动向预设的管理人员手机推送详细的故障信息，如故障类型、发生时间、设备位置等。管理人员可凭借远程操作权限，迅速调整设备参数，或下达停机检修指令，有效避免因设备故障导致的检测延误与产品质量风险，极大地提高了生产效率与质量管控的及时性。

为进一步保障数据的真实性与安全性，区块链技术的引入成为新的亮点。区块链的分布式账本特性确保了检测数据在存储与传输过程中的不可篡改，每一次数据更新都被记录在多个节点上，形成完整且可靠的溯源链条。在乳品供应链中，从原料奶检测到成品出厂抽检，各环节的恒温振荡检测数据均可通过区块链进行共享与验证。监管部门、消费者等相关方能够依据授权，追溯查询每一批次乳品的详细检测记录，为乳品质量安全构筑起坚实的信任屏障，增强市场信心。

4.1.2 人工智能辅助检测

人工智能技术的蓬勃兴起为恒温振荡检测领域注入了新的活力，尤其是机器学习与深度学习算法的应用，正逐步改变着传统的检测模式。通过对海量乳品检测数据的深度学习，人工智能模型能够精准掌握不同乳品成分、微生物指标在恒温振荡条件下的变化规律，实现检测过程的自动化决策与智能优化。

在微生物检测方面，传统方法需人工观察培养皿上的菌落形态、计数并鉴别微生物种类，耗时费力且易受主观因素干扰。如今，借助基于深度学习的图像识别技术，装置内置的高清摄像头可实时拍摄培养皿图像，并传输至人工智能分析系统。系统瞬间识别菌落特征，依据预先训练的模型准确判定微生物种类，同时结合菌落数量、生长速率等信息，快速评估乳品的微生物污染程度，整个过程高效、精准且客观。

4.2 面临的挑战与应对策略

4.2.1 技术瓶颈

尽管恒温振荡检测装置在乳品检测领域已取得显著进展，但仍面临诸多棘手的技术瓶颈。在高精度温控技术层面，当面对复杂的乳品检测需求，如

中国乳业线上阅读

检测对温度变化极度敏感的生物活性成分时，需将温度精准控制在极小范围内，常规的温控技术难以满足要求。这是因为在极微小的温度区间内，温度的波动受多种因素干扰，如装置的散热不均、加热制冷元件的响应延迟等，导致难以实现长时间、稳定的超高精度控温。

微弱信号检测技术同样面临挑战[6]。在检测乳品中的痕量污染物、微量营养成分时，光电检测系统所接收到的信号极其微弱，易受噪声干扰而淹没在背景信号中。传统的信号检测与放大技术无法有效分离微弱有用信号与噪声，使得检测灵敏度受限，难以精准量化这些低浓度成分，对乳品质量的精准把控造成阻碍。

多参数耦合控制更是一大难题。在实际检测中，温度、振荡频率、湿度等多个参数相互影响、相互制约。例如，在模拟某些特殊乳品储存环境时，改变温度可能影响湿度平衡，进而影响样品的理化性质；调整振荡频率又可能干扰温度稳定性。现有的控制技术难以对这些复杂的参数耦合关系进行精准建模与动态调控，无法为样品提供完全贴合实际的理想检测环境，影响检测结果的准确性与可靠性。

为攻克这些技术难题，科研人员正全力以赴。在高精度温控方面，研发新型的智能温控材料，如具有快速热响应、高精度自调节特性的形状记忆合金或相变材料，结合先进的分布式温度传感网络与自适应控制算法，实现对温度的超精密控制；微弱信号检测领域，引入量子检测技术，利用量子纠缠、量子干涉等特性，突破传统检测技术的灵敏度极限，精准捕捉微弱信号；针对多参数耦合控制，运用大数据与人工智能技术，对海量实验数据进行深度学习，构建精准的参数耦合模型，实现对多参数的实时动态优化，确保装置在复杂检测任务下稳定运行，为乳品检测提供坚实的技术保障。

4.2.2 标准规范完善

当前，恒温振荡检测装置领域的标准规范尚不完善，给行业发展带来诸多不便。在国际上，虽有部分通用的检测设备标准，但针对恒温振荡检测装置在乳品检测这一特定应用场景的细致标准仍存在诸多空白。不同国家、地区的企业与检测机构在设备设计、性能指标、检测方法等方面遵循的规范不尽相同，导致检测结果缺乏统一可比性，阻碍了国际间的技术交流与贸易合作。

国内情况亦不容乐观，现行标准在一些关键性能指标的界定上不够精准、全面。例如，对于装置的控温精度，部分标准仅规定了较宽泛的温度范围，未根据不同乳品检测项目的严苛要求细分精度等级；振荡性能指标方面，对振荡均匀度、振荡稳定性的测试方法与评价标准缺乏详细规范，使得企业在产品研发与质量把控时缺乏明确指引，市场上产品质量参差不齐。

为扭转这一局面，行业各方需携手共进。一方面，积极参与国际标准的制定过程，联合国际权威机构、知名企业，依据大量科学实验数据与行业最佳实践，共同起草、完善针对恒温振荡检测装置用于乳品检测的专项国际标准，明确设备的设计规范、性能指标、校准方法等关键要素，确保全球范围内检测数据的一致性与可比性。另一方面，国内应加快完善标准体系建设，政府主管部门、行业协会、科研院校与企业协同发力，深入调研行业需求，广泛征求意见，制定详细、严谨且贴合国内产业实际的标准规范。通过加强标准的宣贯与执行监督，促使企业严格依标生产，提升产品质量，为恒温振荡检测装置在乳品检测领域的稳健发展营造规范有序的市场环境，推动整个行业迈向高质量发展新征程。

5 结论

5.1 研究总结

本研究深入探究了恒温振荡检测装置在乳品检测领域的应用潜力，通过优化装置设计与性能，显著提升了检测精度、稳定性和智能化水平，为乳品

中国乳业线上阅读

行业提供了强有力的技术支撑。研究通过高精度传感器与先进温控算法，将温度波动从传统±1℃提升至±0.1℃，并优化振荡系统，使其更加均匀、稳定，减少检测误差。同时，采用高品质材料和冗余设计，增强装置的可靠性和抗干扰能力，确保长时间稳定运行。智能化方面，引入物联网技术实现远程监控与操作，并结合大数据与人工智能算法，为质量管控提供智能化决策依据。

研究提出多项创新点，包括多技术融合创新，将温控技术、振荡技术、光谱检测技术、自动化控制技术等有机融合，打造一体化检测平台。例如，装置内部集成高精度光谱分析仪，实现样品孵育与实时检测无缝衔接，避免传统检测中样品转移带来的误差与污染风险，大幅提高检测效率与准确性。智能化算法优化创新，研发基于机器学习与深度学习的数据分析算法，对大量乳品检测数据进行学习与训练，使其能够自动识别复杂数据模式，精准判断乳品质量问题。例如，在微生物检测中，算法可根据微生物生长曲线、代谢产物变化等多维度数据，快速准确判定乳品是否受微生物污染及其污染程度，为质量控制提供前瞻性指导。多功能模块集成创新，设计模块化的功能组件，如可根据检测需求灵活更换的样品盘模块，适配不同规格、类型的样品容器；开发多功能检测模块，除常规检测项目外，还能拓展对新兴污染物、功能性成分的检测能力，满足乳品行业日益多样化的检测需求，提升装置的通用性与适应性。

在应用拓展方面，该装置在原料奶质量检测、乳制品加工过程监测以及成品乳品质量抽检中表现出色。例如，在原料奶检测中，精准检测脂肪酶活性并快速筛查微生物污染，从源头保障乳品安全；在乳制品加工过程中，实现全程精细化管控，优化工艺参数，确保产品质量稳定。性能提升方面，硬件优化和软件算法的改进显著提高了检测精度与稳定性，实验验证表明，使用该装置的实验组在脂肪酶活性检测等项目上，检测精度和稳定性远超传统方法，效率大幅提升。

5.2 未来展望

展望未来，恒温振荡检测装置在乳品检测领域将朝着智能化、微型化、多功能化方向蓬勃发展，为行业带来全新变革与机遇。在智能化进程中，随着物联网、大数据、人工智能等前沿技术深度融入，装置将实现全方位智能升级。借助物联网，设备间互联互通形成庞大检测网络，实时共享数据，如不同生产环节的多台装置协同，为企业构建全流程质量追溯体系[7]。通过大数据分析海量检测数据，挖掘潜在质量关联，为工艺优化、新品研发提供精准方向。人工智能赋能下，装置能依据样品特性、历史数据自动优化检测参数，实现自适应检测，还能借助智能图像识别、语音交互技术简化操作，降低人为误差，大幅提升检测效率与精准度。

微型化与便携化趋势凸显，为满足现场、即时检测需求，研发小巧便携、操作简易的装置迫在眉睫。小型化设备可深入奶源地、小型加工厂等基层，快速检测原料奶、半成品，助力企业即时把控质量，缩短生产周期。例如手持式、一体化微型装置，集成微流控芯片、纳米传感器等先进元件，在狭小空间实现精准温控、高效振荡与高灵敏检测，几秒至几分钟内输出结果，让检测更灵活便捷，保障乳品新鲜优质。

多功能化发展聚焦拓展检测维度与集成多种技术。一方面，不断拓展检测项目，除常规指标外，强化对新兴污染物、生物活性成分、功能性营养物质的检测能力，满足消费者对乳品品质、功能日益严苛的要求。如检测有机污染物、益生菌活性、乳铁蛋白含量等，为高品质、差异化乳品开发提供支撑。另一方面，融合多种先进技术，集恒温振荡、光谱分析、电化学检测、免疫分析等于一体，打造综合性检测平台，单台设备完成多项复杂检测，减少样品转移与设备切换误差，提高检测全面性与可靠性，降低成本。可以预见，恒温振荡检测装置的

中国乳业杂志社版权

持续创新将重塑乳品检测格局，为行业质量管控、产业升级注入磅礴动力，推动乳品行业迈向更高质量、更具创新活力的发展阶段，让消费者畅享更安全、优质、多元的乳品。

参考文献

[1] 慕容衣.中国乳制品行业前景展望. https：//xueqiu.com/4866021334/287460083，2024–04–24.
[2] 胡少震，逯刚，喻东威，等.原料乳及牧场环境中的微生物多样性及嗜冷菌污染源分析[J].中国食品学报，2024，24（3）：258–267.
[3] 周微，张伟钦，付宇，等.荧光定量PCR方法快速检测原料乳中的大肠杆菌[J].中国乳品工业，2009（11）：4.
[4] 季宝成，杨澜瑞，韩雨，等.动物源性食品兽药多残留检测中基质净化与液相色谱–质谱联用技术研究进展[J].轻工学报，2023，38（5）：8–16.
[5] 杜新培.智能恒温培养振荡器的研究[D].天津：天津工业大学，2009.
[6] 高晋占.微弱信号检测[M].北京：清华大学出版社，2004.
[7] 宋艳晶，李娟.乳制品质量与安全检测技术的研究进展[J].中国乳业，2024（8）：119–123.

中国乳业线上阅读

Innovative Application and Technical Breakthrough of Constant Temperature Oscillation Detection Device in Dairy Testing Field

ZHANG Mingyu，FENG Liling，TIAN Guiyan*，WU Xuejun，GAO Jianjun，LI Hui，ZHAO Sanjun，DU Aimin
Mengniu Dairy（Luannan）Co.，Ltd.，Tangshan Hebei 063500

Abstract：With the rapid development of the dairy industry，the quality and safety of dairy products have received much attention，and accurate and efficient detection technology has become the key.As the core equipment of modern dairy testing，the constant temperature and oscillation detection device integrates advanced temperature control and oscillation technology，which can simulate complex environment，ensure uniform heating and full reaction of samples，and provide accurate and reliable support for dairy testing. In this paper，the application of the device in dairy detection was discussed，including microorganism，nutrient composition，physical and chemical properties and pollutant detection.Its working principle，key technology and structure are described in detail. Comprehensive analysis of temperature control accuracy，oscillation performance，stability，sealing and other performance indicators.It also look forward to the future development trend from the aspects of innovative design，technology integration，standardization and intelligence，aiming to provide theoretical and technical support for improving the level of dairy testing and promoting the development of the industry.

Keywords：constant temperature oscillation detection device；dairy testing；microbial detection；nutrient analysis；physical and chemical characteristics detection；pollutant detection；temperature control technology；oscillation technique；performance optimization