

超低温冰柜智能温度控制策略与系统稳定性分析

董军民 李蓝

浙江和利制冷设备有限公司 浙江金华 321103

【摘要】针对传统超低温冰柜温控策略滞后、波动大、稳定性不足等问题,本文深入研究智能温度控制策略,分析系统稳定性影响因素并验证策略有效性。研究采用数据驱动的波动事件分析结合智能控制算法,优化温控系统软硬件,实现超低温环境下精准控温与系统长期稳定运行。测试显示,所设计智能温控系统在 -86°C 设定温度下,温度波动控制在 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 以内,连续运行1000小时无故障,满足高端领域严苛要求,降低设备能耗28%以上。本文成果可为超低温冰柜智能温控系统优化设计和机电类设备智能控制技术工程应用提供参考与支撑。

【关键词】超低温冰柜;智能温度控制;波动事件分析;系统稳定性;节能优化

Intelligent Temperature Control Strategy and System Stability Analysis for Ultra-Low Temperature Freezers by
Dong Junmin Li Lan

Zhejiang Helix Refrigeration Equipment Co., Ltd., Jinhua City, Zhejiang Province 321103

【Abstract】To address issues such as lagging temperature control strategies, significant fluctuations, and insufficient stability in traditional ultra-low temperature freezers, this study conducts in-depth research on intelligent temperature control strategies, analyzes factors affecting system stability, and validates strategy effectiveness. The research employs data-driven fluctuation event analysis combined with intelligent control algorithms to optimize temperature control system hardware and software, achieving precise temperature regulation and long-term stable operation under ultra-low temperature conditions. Test results demonstrate that the designed intelligent temperature control system maintains temperature fluctuations within $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ at -86°C setpoint, operates continuously for 1000 hours without failures, meets stringent requirements for high-end applications, and reduces equipment energy consumption by over 28%. These findings provide valuable references and support for optimizing intelligent temperature control system design in ultra-low temperature freezers and engineering applications of intelligent control technologies for electromechanical equipment.

【Key words】ultra-low temperature freezer; intelligent temperature control; fluctuation event analysis; system stability; energy-saving optimization

一、引言

超低温冰柜通常指工作温度低于 -50°C 的制冷存储设备,广泛应用于生物样本、医疗试剂、疫苗、工业材料、航空航天元器件等领域的低温保存与测试,其运行性能直接关系到相关行业的发展质量与安全保障。随着医疗、科研等领域的技术升级,对超低温冰柜的温度控制精度、运行稳定性及智能化水平提出了更高要求,尤其是在生物样本存储领域,微小的温度波动可能导致细胞凋亡、核酸降解,造成不可挽回的损失。

当前,市场上多数传统超低温冰柜采用固定制冷循环与简单开关式温度控制策略,温度波动控制依赖人工经验,缺乏数据驱动的分析手段,导致控制策略滞后或过度调整,存在温度控制精度低、波动幅度大(通常在 $\pm 2^{\circ}\text{C}\sim\pm 5^{\circ}\text{C}$)、系统能耗高、稳定性差等问题。同时,现有部分温控技术在分析温度波动时,忽略了冰柜在多个场景下温度波动事件的周期性和组合性,导致温度分析关键要素缺失,进一步加剧了控制策略的滞后性。

二、超低温冰柜智能温度控制策略设计

2.1 温度数据采集与波动事件识别

温度数据采集是智能温控基础,为解决传统采集精度低、数据滞后问题,本文优化硬件配置与数据采集逻辑,引入波动事件识别机制。

硬件上,用高精度温度传感器阵列替代传统单一传感器,在冰柜内胆不同区域装8个进口NTC热敏电阻传感器,测量范围 $-100^{\circ}\text{C}\sim-50^{\circ}\text{C}$,精度 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$,探头封装防水金属外壳,线路用屏蔽线,电源端并联电容滤波。

数据采集逻辑采用高频与自适应采样结合,正常时1次/10秒,波动超 0.3°C 提至1次/1秒,采集数据经A/D转换传至主控芯片预处理。波动事件识别用滑动时间窗口结合温度变化率置信区间,将波动时间段视为事件形成序列,设定置信区间识别起止点,如10秒内变化超 0.3°C 且持续超30秒,判定为显著波动事件,系统进入精准调控模式。

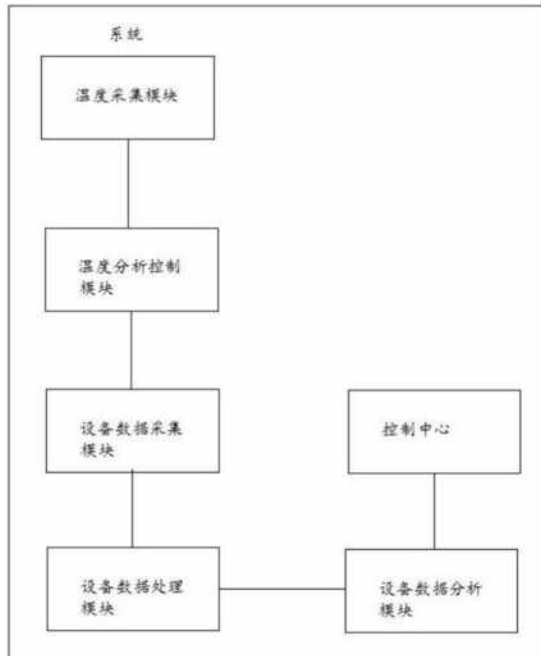
2.2 波动事件分析与关联

为解决现有技术对冷柜温度分析关键要素缺失问题,设计时段分析、事件组合与事件关联三个模块。

时段分析模块将波动事件在运行周期内取值划分类型,层次关联,确定累积波动时长及比例,如统计一天各小时分段内波动时长比例,识别高发时段。事件组合模块定义各波动时长比例下事件的温度状态转移,按多时间段组合事件,求解组合概率,构建状态转移概率矩阵,筛选最优组合。

事件关联模块以事件属性和温度特征为输入进行相关性分析,用随机森林筛选关键特征,如发现特定事件与环境

温度、门封密封性相关，为系统维护与策略调整提供方向。



2.3 智能控制算法优化

在波动事件分析基础上,用模糊 PID 控制算法替代传统算法,结合波动事件因素精准、自适应调控温度并节能。该算法融合模糊控制与 PID 控制优势,根据温度偏差、变化率及波动事件因素自动调整 PID 参数。

工作过程为:将温度偏差等作模糊输入量, PID 参数调整量作输出量;建模糊规则库,结合分析结果与经验制定规则;经模糊推理与解模糊处理得调整量,更新 PID 参数。此外,结合节能需求优化算法,内胆温度达设定值且波动在 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 内,系统进节能模式,检测到波动事件则退出,动态调整降低能耗。

2.4 控制策略执行与反馈

控制策略执行模块由主控芯片、制冷系统驱动模块、报警模块、远程通信模块组成,负责将优化后的控制指令转化为实际动作并反馈运行状态。

主控芯片采用 STC89C52RC 单片机,作为温控系统核心协调各模块工作,处理温度数据生成控制指令,控制制冷部件运行。如温度高于设定值,控制压缩机加速;低于设定值,控制其减速或停机,避免能耗与设备损耗。

制冷系统驱动模块用继电器驱动电路,将指令转化为驱动信号控制制冷部件。采用 12V 直流继电器驱动冰箱制冷回路,单片机引脚连控制端,输出高电平时触发继电器吸合接通制冷模块;继电器线圈两端并联续流二极管,制冷回路串联 10A 保险丝。

报警模块采用声光报警,检测到温度波动超 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 、传感器故障等异常时,自动报警并传信息至远程监控平台。应急处理模块在温度失控时,自动启动备用制冷回路(若配备)。

远程通信模块采用 WiFi 与 4G 双模通信,实现温控系统与远程监控平台、手机通信。工作人员可通过平台或 APP 实时查看冰柜状态、温度曲线等,远程调整参数,提升系统智能化与运维效率。

三、超低温冰柜温控系统稳定性分析

3.1 稳定性影响因素分析

3.1.1 硬件因素

硬件设备性能与可靠性是温控系统稳定性的基础,包括温度传感器、主控芯片、驱动模块、制冷系统部件等的性能与质量。

温度传感器精度与稳定性影响温度采集准确性,精度不足、漂移过大或线路问题会使温度数据失真、采集中断,导致系统不稳定,如传统铂电阻传感器长期超低温环境下漂移超 0.3°C 。

主控芯片运算速度与可靠性影响控制指令生成与执行,速度不足或故障会致温度波动甚至系统瘫痪。驱动模块可靠性不足影响制冷效果和温度稳定。

制冷系统部件性能与质量关键,压缩机、节流阀等故障使制冷系统无法正常工作,导致温度失控,如压缩机高负荷易故障、冷凝器结霜堵塞影响制冷效率、制冷剂泄漏直接引发温度失控。

3.1.2 软件因素

软件设计的合理性与可靠性是温控系统稳定性的核心,涵盖控制算法、数据处理逻辑、故障诊断逻辑、程序代码质量等方面。

控制算法合理性直接影响温度控制精度与稳定性,参数设置不合理、自适应能力不足会导致温度超调量大、波动幅度大甚至失控。

数据处理逻辑不合理会使异常数据无法及时识别处理,影响控制指令准确性;故障诊断逻辑不完善无法及时发现异常,导致故障扩大、系统不稳定;程序代码质量不高存在漏洞、卡顿等问题,影响控制指令执行和系统正常运行。

3.1.3 外部环境因素

超低温冰柜运行环境对温控系统稳定性有重要影响,包括环境温度、环境湿度、电源电压、振动等因素。

环境温度过高或过低影响制冷系统制冷效率,导致温度波动增大,建议环境温度控制在 $15^{\circ}\text{C} - 25^{\circ}\text{C}$ 。环境湿度过高会使冷凝器、蒸发器结霜、结露,影响散热与吸热效果、腐蚀硬件设备,降低设备寿命,影响系统稳定性,当环境相对湿度 $> 70\%$ 时,波动幅度增加 $1^{\circ}\text{C} - 2^{\circ}\text{C}$ 。

电源电压不稳定影响主控芯片、驱动模块、制冷系统部件正常运行,导致控制指令执行异常、部件损坏,引发系统故障;设备周围振动过大导致硬件设备线路接触不良、部件松动,影响系统正常运行。

3.2 稳定性优化措施

3.2.1 硬件优化

为应对硬件因素对系统稳定性的影响,本文从硬件选型、布局和冗余设计三方面着手,提升硬件可靠性与稳定性。

在硬件选型上,严格挑选高性能、高可靠性、适应超低温环境的设备,如进口温度传感器、高性能主控芯片、高品质驱动模块和知名品牌制冷系统部件。

在硬件布局方面,优化温控系统布局,减少干扰,如分开关键部件、线路,合理设计散热结构。在冗余设计方面,

增加关键硬件冗余配置,如温度传感器、主控芯片、制冷系统,提高系统容错能力。

3.2.2 软件优化

针对软件因素对稳定性的影响,从控制算法、数据处理、故障诊断容错及程序代码四方面优化,提升软件合理性与可靠性。

控制算法上,完善模糊 PID 控制算法,增强自适应与稳定性,如调整规则库、增加抗干扰能力、优化运算效率。

数据处理方面,完善预处理、备份恢复和传输逻辑,确保数据准确、不丢失、传输稳定。故障诊断容错时,完善诊断逻辑,增加检测功能,建立容错机制。程序代码按规范编写,注重质量,多次测试调试,建立升级维护机制。

3.2.3 外部环境适应性优化

为应对外部环境因素影响,从环境适应性设计、电源保护、振动防护三方面提升系统适应能力。环境适应性设计上,优化冰柜结构与保温性能,增加除霜装置,优化通风结构。电源保护方面,增加稳压滤波和备用模块,保障电源稳定,满足应急需求。振动防护方面,优化底座设计,固定硬件设备,运输安装采取防护措施,减少振动影响。

四、测试验证

4.1 测试平台搭建

通过模拟实际场景,控制环境温度 $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ 、湿度 $50\% \pm 10\%$ 、电源电压 $220\text{V} \pm 10\text{V}$,避免外部影响。测试设备有 HL-86L 超低温冰柜(用智能温控系统)、标准温度计、能耗测试仪、振动测试仪、环境温湿度测试仪、远程监控平台等。

标准温度计校准冰柜内胆温度;能耗测试仪测运行能耗;振动测试仪监测设备振动;环境温湿度测试仪监测温湿度;远程监控平台查看运行状态等。测试样品选模拟生物样本,负载量为冰柜额定容量 50% ,模拟实际存储场景。

4.2 测试结果与分析

4.2.1 温度控制精度测试结果

结果显示,HL-86L 冰柜设定 -86°C 时,内胆各点平均温度 $-85.9^{\circ}\text{C} \sim -86.1^{\circ}\text{C}$,波动幅度 $0.1^{\circ}\text{C} \sim 0.4^{\circ}\text{C}$,均在 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 以内,满足设计要求。中层波动最小,角落最大,因角落冷量循环差,但仍在范围。波动事件识别与分析显示,共发生 12 次,环境温度波动致 3 次,开门取放样本致 6 次,负载变化致 3 次;所有波动事件准确识别,波动幅度与持续时间测量误差不超 5% ,组合概率与相关性分析结果准确,为控制策略调整提供支撑,确保温度控制精度稳定。

4.2.2 运行稳定性测试结果

运行稳定性测试显示,HL-86L 超低温冰柜连续运行 1000 小时无软硬件故障,设备运行状态稳定,硬件设备和软件程序运行正常。温度变化曲线平稳,波动幅度在 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 以内,满足长期连续运行设计要求。

干扰场景测试中,环境温度从 15°C 升至 30°C 时,冰柜内胆温度波动 $0.3^{\circ}\text{C} \sim 0.5^{\circ}\text{C}$,系统自动调整制冷功率;负载量从 30% 增至 70% 时,温度波动 $0.2^{\circ}\text{C} \sim 0.4^{\circ}\text{C}$,控制算法自动调整 PID 参数;电源电压波动 $\pm 10\%$ 时,系统运行正常,温度无明显波动,电源保护模块发挥作用。测试表明该温控系统抗干扰能力强,运行稳定性好。

4.2.3 能耗测试结果

能耗测试显示,采用本文智能温控系统的 HL-86L 超低温冰柜 24 小时运行能耗 18.6kWh ,采用传统 PID 控制策略的对照组冰柜为 25.8kWh 。优化后温控系统能耗降低 7.2kWh ,降低比例 28% ,满足能耗降低 20% 以上设计要求。能耗降低主要因智能温控策略通过波动事件分析与模糊 PID 算法优化,动态调整制冷功率,避免过度制冷,且引入节能运行模式进一步降低能耗。

五、结论

本文围绕超低温冰柜智能温度控制策略与系统稳定性展开研究,解决了传统超低温冰柜温控精度低、波动幅度大、系统稳定性不足、能耗高的问题,主要研究结论如下:

(1) 设计了基于波动事件分析与模糊 PID 控制算法融合的智能温度控制策略,通过温度传感器阵列精准采集温度数据,采用滑动时间窗口结合温度变化率置信区间的方法识别波动事件,通过时段分析、事件组合与事件关联模块深入分析波动事件特征,结合模糊 PID 算法动态调整控制参数,实现了温度的精准调控与波动控制。

(2) 深入分析了超低温冰柜温控系统稳定性的影响因素,包括硬件因素、软件因素、外部环境因素与其他因素,从硬件优化、软件优化、外部环境适应性优化、维护保养优化四个方面,提出了针对性的稳定性优化措施,提升了系统的可靠性与长期运行稳定性。

(3) 通过实际产品测试验证,采用本文设计的智能温控策略与稳定性优化措施的 HL-86L 超低温冰柜,在 -86°C 设定温度下,温度波动范围控制在 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 以内,连续运行 1000 小时无故障,能耗降低 28% 以上,满足高端应用场景的需求,同时验证了研究成果的工程实用性与技术先进性。

参考文献

- [1]张宝树,王志敏.一种电冰柜数显温度控制器的研制[J].电工技术杂志,2002(5):60-61,63. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9560.2002.05.020.
- [2]下荷洁,谷波. -80°C 低温冰柜的系统设计[J].低温工程,2003(2):54-59. DOI: 10.3969/j.issn.1000-6516.2003.02.010.
- [3]高鹏.浅析冰柜设计[J].山东工业技术,2014(19):35-35,69.
- [4]胡春海.一种通用冰柜温控器的研制[J].黑龙江电子技术,1999,(10):21-22,24.