

基于虚拟仪器技术的渔船超低温冷库 制冷监控系统研究

Refrigeration monitoring system of ultra-low temperature cold
storage on fishing boat based on virtual instruments

徐旻晟 谢 晶 王金锋

XU Min-sheng XIE Jing WANG Jin-feng

(1. 上海海洋大学食品学院, 上海 201306; 2. 上海水产品加工及贮藏工程技术研究中心, 上海 201306)
(1. College of Food Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. China Shanghai
Aquatic Products Processing and Storage Engineering Technology Research Center, Shanghai 201306, China)

摘要:为了解决金枪鱼渔船超低温制冷控制系统自动化程度低, 监控效果不理想和监控条件恶劣等问题, 提出采用虚拟仪器技术, 基于 LabVIEW 平台设计开发了一套金枪鱼渔船超低温冷库制冷监控系统, 实现了冷库机组数据的实时监测、数据及动态曲线的显示、数据的处理及保存、系统控制参数的设定、电子膨胀阀实时状态检测和电子膨胀阀控制及输出显示等功能。试验结果表明: 该系统运行稳定, 自动化程度高, 测控及时准确, 人机交互界面友好, 操作简单, 功能完善。

关键词:虚拟仪器技术; 金枪鱼渔船; 复叠式制冷; 超低温
Abstract: There are several problems in the ultra-low temperature refrigeration control system on the tuna fishing boat, including the low degree of automation, unsatisfactory monitoring effect and poor monitoring conditions. In order to solve these problems, a tuna fishing boat ultra-low temperature cold storage refrigeration monitoring system was designed and developed by using the virtual instrument technology, based on LabVIEW. This system achieved a real-time monitoring, and displayed a unit's data and dynamic curves. Moreover, it also included a data processing and storage, a control parameter settings, an electronic expansion valve real-time status monitoring, a valve control and an output display. The experimental results indicated that this system could be operated stably and automatically, and used to get detection timely and accurately, with a

friendly human-machine interface.
Keywords: tuna fishing boat; cascade refrigeration; cryogenic; monitoring; virtual instruments; LabVIEW

金枪鱼渔船在捕捞季节需要在海上进行长时间作业, 金枪鱼在捕捞上船后需在第一时间经处理后送入-55℃以下的超低温冷库进行冷冻保藏, 以保证鱼肉的新鲜^[1]。传统的金枪鱼渔船超低温冷库制冷控制系统多采用继电器逻辑电路组成的控制器, 这种控制方式自动化程度低, 需要有人现场监控和操作。由于工作环境恶劣, 劳动强度大, 容易造成调节滞后、误操作等问题, 并且无法自动采集、保存数据, 对机组运行状态进行分析^[2]。考虑到渔船上空间紧张等因素, 超低温冷库多采用单机双级活塞式压缩制冷系统, 为达到节能减排的目的, 国外一些学者^[3-4]提出采用吸收式和吸附式制冷来回收利用渔船柴油机排除的大量废气余热, 提供部分制冷量。在远洋渔业发达的国家, 如美国、荷兰和日本等渔业渔船^[5]将制冷系统监控信息, 包括温度、压力值和系统报警信息等, 整合到船只的自控系统中, 方便船员监控管理。随着计算机技术的发展, 传统仪器的测控系统因在数据处理、显示和存储等方面的局限性, 正逐步被虚拟仪器技术所替代。虚拟仪器技术是利用高性能的模块化硬件, 结合高效灵活的软件来完成各种测试、测量和自动化控制。相较于传统仪器, 虚拟仪器具有功能强大、性价比高、开放性好、升级和复用便捷、操作方便等特点。倪汉华等^[6-7]将虚拟仪器技术应用于渔船液压舵和渔船捕捞设备的测控中, 获得了良好、准确的测控效果, 同时利用 LabVIEW 平台编程, 极大地降低了编程工作量, 提高了系统开发的效率。Gonçalves C 等^[8]利用 LabVIEW 进行压强的实时数据采集, 通过数值分析和试验, 研究了一艘快速巡逻艇结构在不同负载下的静态强度和抗疲劳强度, 基于

基金项目: 国家“十三五”重点研发项目课题(编号: 2016YFD0400303); 上海市科委平台能力提升项目(编号: 16DZ2280300)
作者简介: 徐旻晟, 男, 上海海洋大学在读硕士研究生。
通信作者: 谢晶(1968—), 女, 上海海洋大学教授, 博士, 博士生导师。
E-mail: jxie@shou.edu.cn
收稿日期: 2016-09-05

LabVIEW 平台的数据采集系统提供了方便准确的测量结果。段培永等^[9]利用 CAN 总线技术,在 LabVIEW 平台上开发了一套吸收式制冷机分散式参数采集和控制系统,经实验验证表明该系统运行稳定、实时性好、抗干扰能力强。

本研究自行开发了一套基于 LabVIEW 平台编程,可用于金枪鱼渔船超低温冷库制冷系统等大多数冷库制冷及低温实验研究的计算机辅助测控系统,实现对制冷机组各测点压力、温度、电流、制冷量等参数的自动监测和记录,对机组异常情况的报警和处理,对机组、风机和电加热的启停控制,库温和蒸发器出口过热度的设定,以及对电子膨胀阀控制和仿真参数的调整。

1 系统硬件组成

金枪鱼渔船超低温冷库制冷系统构成和系统实物见图

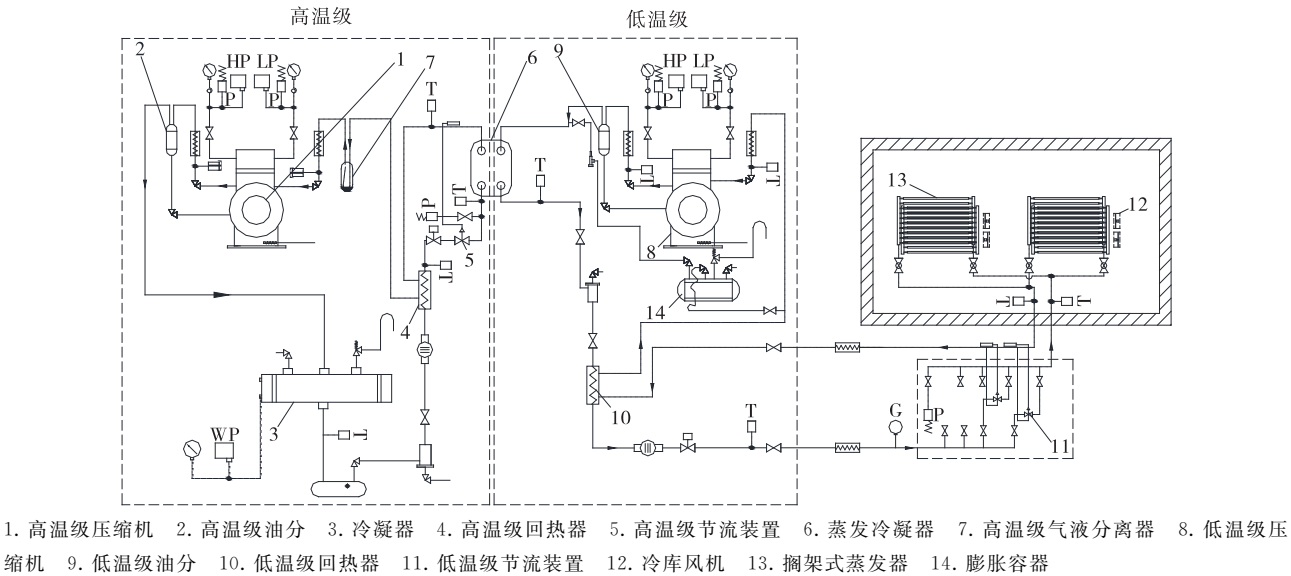


图 1 金枪鱼渔船超低温复叠制冷系统结构图

Figure 1 Schematic diagram of ultra-low temperature cascade refrigeration system on tuna fishing boat

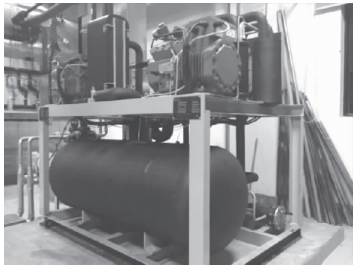


图 2 超低温复叠式制冷系统机组部分实物图

Figure 2 Image of cascade refrigeration system (Unit)

金枪鱼渔船超低温冷库制冷监控系统结构见图 3,主要由采用虚拟仪器技术的上位机和基于 PLC 构建的下位机构成,两者通过通信协议完成通信,进行信号的相互传递。下位机选用 SIMENS 公司型号 S7-300 系列 PLC(CPU315-2DP),可实现数据采集和向执行机构发送上位机指令等功能。上位机程序基于 LabVIEW 平台编写,实现对制冷系统的控制和对采集的数据处理和分析,上位机与下位机通过 OPC(OLE for Process Control)通信协议 PLC 进行通信。系

图 1、2,该系统为复叠式制冷系统,高温级制冷剂选用 R404A,低温级制冷剂选用 R23,采用搁架式蒸发器,设计蒸发温度 $-65\text{ }^{\circ}\text{C}$,制冷量 5 kW ,系统按照船用标准进行设计和搭建。针对要求的低温环境,电子膨胀阀选用美国 HANSEN PXV 电子膨胀阀,制冷剂温度范围 $-51\sim 115\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。根据测控要求,该系统总共有 17 个温度测点、7 个压力测点、1 个制冷剂质量流量测点和 6 个电流测点,需要控制的参数包括库温和蒸发器出口过热度,电子膨胀阀的开度和控制参数。机组温度采用型号 JWB/Pt100/C 热电阻温度传感器测量,测温范围 $-200\sim 1\text{ }600\text{ }^{\circ}\text{C}$,库内测点采用 PT100 热电偶进行测量;压力测点采用 Danfoss 型号 AKS 33-060G2112 和 AKS 33-060G2100 压力传感器测量,测量范围 $0.1\sim 0.5\text{ MPa}$;制冷剂质量流量采用 EMERSON 型号 CMF200 质量流量计测量,测量范围 $0\sim 225\text{ t/h(m}^3\text{/h)}$;电流采用多功能电力仪表测量。

统的温度、压力、电流和质量流量信号经转换为对应的电信号,这些电信号经过放大滤波等处理后,经 A/D 转换由下位机 PLC 进行数据采集,采集的数据流通过通信协议传递给上位机程序处理,处理后由 LabVIEW 实时显示在人机交互界面上,并接受操作人员的控制指令。该系统具有可靠性高、处理速度快、体积小、适用于露天恶劣条件等特点,特别适用于金枪鱼渔船超低温制冷控制系统。

2 上位机软件设计

上位机程序使用的编程软件是美国国家仪器公司(National Instruments, NI)推出的虚拟仪器开发平台 LabVIEW,它采用图形化的语言,数据流的形式,利用其完善的功能模块,配合多种硬件设备驱动功能,可以较容易地实现传统仪器难以完成的复杂功能,提供了实现仪器编程和数据采集系统的便捷途径。

上位机程序主要负责发送操作人员的控制指令,定时接收和保存下位机 PLC 返回的测量结果,并对下位机的状态进行监控,异常状态时向操作人员发出报警信号。数据采集

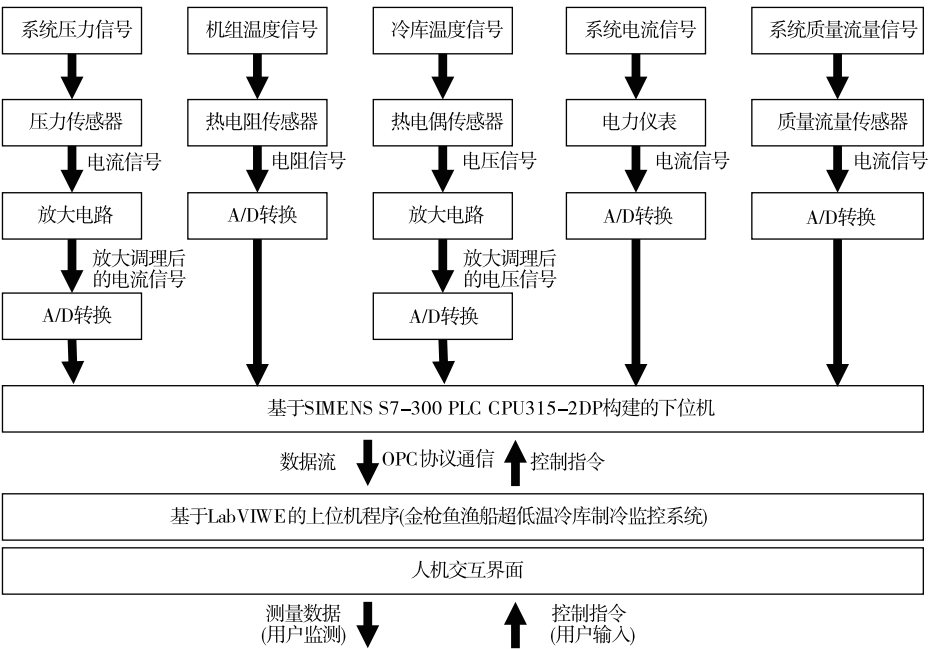


图 3 监测系统架构图
Figure 3 Architecture diagram of the monitoring system

以曲线的形式显示在操作界面上,系统的温度、压力、电流和制冷剂质量流量自动定时测量,同一类的不同的参数可以通过下拉菜单进行切换,测量数据能自动转换成 Excel 文件,方便后续查看和进一步的处理。

系统的主要功能结构见图 4,软件编写采用模块化的思想,将系统结构分为 3 个部分,系统状态模块,数据采集模块及电子膨胀阀控制和仿真模块。其中每个模块包含 2 个子模块,操作人员可通过主要操作界面完成数据的实时监测、数据及动态曲线的显示、数据的处理及保存、系统控制参数的设定、电子膨胀阀实时状态检测和电子膨胀阀控制和仿真输出显示。

2.1 系统状态模块

系统状态模块如图 5 所示,主要是用于实时显示超低温复叠制冷系统状态,报警显示,系统设备的启停以及关键参数的设定。

数据读取方面,通过 LabVIEW 提供的数据记录与监控 (Datalogging and Supervisory Control, DSC) 模块,根据实际制冷系统连接情况制作出形象的系统流程图,并在对应的位置放置显示控件,通过共享变量引擎 (NI-PSP) 绑定 OPC 服

务器中的对应数据,刷新时间 100 ms,在程序运行时即可实时显示对应各点的温度、压力等数据;在机组出现异常情况下,对应故障的报警灯闪烁,蜂鸣器持续鸣叫,以提醒操作人员对故障进行排查,故障解除后报警自动复位。

在数据写入方面,采用 LabVIEW 自带的 Datasocket 系列函数完成操作人员控制指令向下位机 PLC 的写入。以库温设定为例,如图 6 所示,通过 Datasocket open、Datasocket write 和 Datasocket close 函数,配合 while 循环,完成库温设定值的写入。操作人员可以根据预设目标进行库温的设定,操作人员可以通过该部分旋钮或下方输入控件直接输入库温的设定值,输入的范围定在 $-60\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$,如超出这个范围,会直接设定在最接近值;机组、风机和电加热启停开关,出于安全考虑,需要操作人员手动开启风机,软件首先开启复叠式制冷系统高低温级的供液阀,再启动高温级压缩机,等待 10~15 s 后,再启动低温级压缩机;电加热用于模拟货物负荷和稳定库温,操作人员可在需要的时候进行开启。

2.2 数据采集模块

数据采集模块的主要操作界面见图 7。使用 LabVIEW 的图表控件可以方便地对实时曲线进行操作,用鼠标选择各

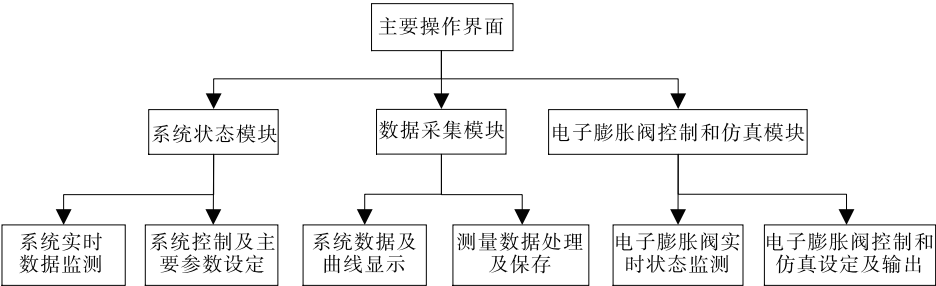


图 4 监控系统主要功能模块
Figure 4 Main functions of the monitoring system

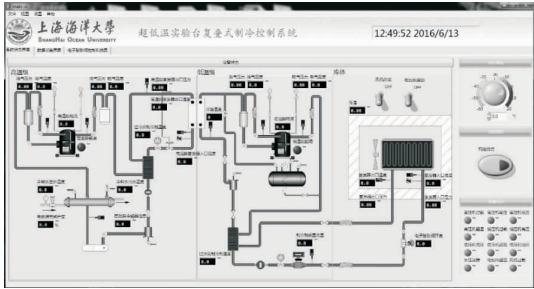


图 5 系统状态操作界面

Figure 5 The interface of system state

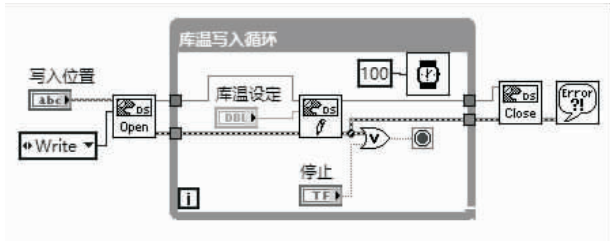


图 6 利用 Datasocket 函数写入库温设定值

Figure 6 Write storage temperature set point with Datasocket



图 7 数据采集操作界面

Figure 7 The interface of data acquisition

个图表左下角的工具按钮，可以获得相应工具的功能，包括图表的移动，所选范围数据的放大缩小等功能。操作人员可以通过单击下拉列表来选择显示在图表中的数据，分别为温度参数，库温测点和压力参数。被选中的参数在右侧显示“√”符号，并在相应的图表中显示实时的参数数据。

数据采集采用写入测量文件 Express VI 进行编写，以压力和电流为例，见图 8。使用该函数可以将采集到的数据输出包括文本 (LVM)、二进制 (TDMS)、和 Excel 表格等 4 种格式，方便操作人员对数据做进一步的处理和分析。

当操作人员需要进行数据采集时，可以通过点击右侧的数据采集按钮，按钮变绿，则进行采集，采集间隔 30 s，采集的数据保存在对应的 Excel 表格中，操作人员可以通过弹出的对话框来选择数据保存的位置，操作人员可以在之后进行查看和进一步的处理。如果需要停止，则单击停止采集按钮，按钮变绿，同时数据采集按钮变暗。

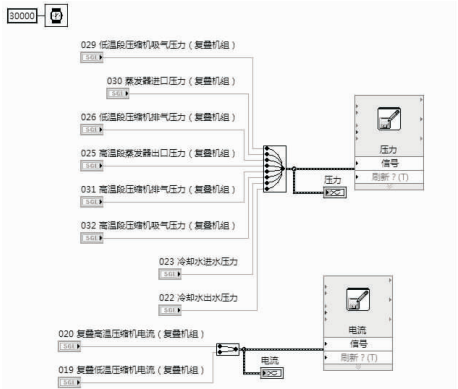


图 8 部分数据采集程序

Figure 8 Data acquisition program

2.3 电子膨胀阀控制和仿真模块

美国 HANSEN PXV 脉宽调制 (Pulse Width Modulation, PWM) 电子膨胀阀采用电磁线圈控制开闭阀，脉冲宽度的调制信号周期为 T_0 s，控制器输出信号是脉冲宽度，即一个高电平加载到电磁线圈上的持续时间 T 决定电子膨胀阀的开度大小， $T = T_0$ 时对应的阀开度为 100%， $T = 0.5T_0$ 时对应的开度是 50%， T 为 0 时对应阀处于关闭状态。这种控制方式逻辑简单，并且动态响应好，相较于常见的步进电机控制的电子膨胀阀，硬件成本和维护成本得到了大幅度的降低，但控制精度还有待提高。

为了优化 PWM 的控制精度，本系统采用模糊控制进行电子膨胀阀控制的优化。以蒸发器出口过热度为控制目标，选取实际和目标过热度误差 $e(^{\circ}\text{C})$ 和误差变化率 $ec(^{\circ}\text{C}/\text{s})$ 为输入变量，电子膨胀阀一个周期内的开启时间 $ot(\text{s})$ 为输出变量。根据实际情况和仿真要求，误差 e 的实际论域为 $[-10, 10]$ ，模糊化后为模糊语言变量 E ，模糊集合 $\{\text{NH}, \text{NB}, \text{NM}, \text{NS}, \text{Z}, \text{PS}, \text{PM}, \text{PB}, \text{PH}\}$ ，模糊论域 $\{-5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5\}$ ；误差变化率 ec 的实际论域为 $[-0.6, 0.6]$ ，模糊化后为模糊语言变量 EC ，模糊集合 $\{\text{NB}, \text{NM}, \text{NS}, \text{Z}, \text{PS}, \text{PM}, \text{PB}\}$ ，模糊论域 $\{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ ；开启时间 ot 的实际论域为 $[0, 6]$ ，模糊集合 $\{\text{CB}, \text{CM}, \text{CS}, \text{H}, \text{OS}, \text{OM}, \text{OB}\}$ ，模糊化后为模糊语言变量 OT ，模糊论域 $\{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ 。根据专家知识和实践经验^[10]，用 IF-THEN 语句表达模糊逻辑推理控制规则：IF{误差 E 为 NH } AND {误差变化率 EC 为 NB } THEN {电子膨胀阀开启时间 OT 为 OB }；IF {误差 E 为 NS } AND {误差变化率 EC 为 PB } THEN {电子膨胀阀开启时间 OT 为 CS }。诸如此类，模糊控制规则见表 1。规则共 63 条，输入输出的隶属函数均采用高斯型隶属函数，去模糊化方法采用最大隶属度法。

电子膨胀阀控制和仿真模块的主要操作界面见图 9。操作人员可以在这个界面上监测电子膨胀阀的运行状态、电子膨胀阀控制的输出和蒸发器出口过热度曲线，进行控制模式的选择以及相应的控制参数设定。在系统未接入电子膨胀阀时，还可以进行电子膨胀阀仿真控制，包括各个参数的设定和相应的输出曲线的显示。

表 1 模糊规则控制表
Table 1 Rules of fuzzy logical control

误差 变化率	实际和目标过热度误差								
	NH	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB	PH
NB	OB	OB	OB	OM	OM	OS	OS	H	CS
NM	OB	OB	OM	OM	OS	OS	H	CS	CS
NS	OB	OM	OM	OS	OS	H	CS	CS	CM
Z	OM	OM	OS	OS	H	CS	CS	CM	CM
PS	OM	OS	OS	H	CS	CS	CM	CM	CB
PM	OS	OS	H	CS	CS	CM	CM	CB	CB
PB	OS	H	CS	CS	CM	CM	CB	CB	CB



图 9 电子膨胀阀控制和仿真操作界面
Figure 9 The interface of control and simulation of electronic expansion valve

在未接入电子膨胀阀或需要进行预试验时,系统提供了电子膨胀阀的仿真控制,包括仿真控制参数的设定和输出曲线的显示。本系统提供了两种控制算法的仿真:PID 控制器和模糊控制器。地址栏内需要操作人员选择编写好的 Fuzzy 控制.fz 文件。“SP”为仿真控制过热度的设定值。右侧 3 个值分别为 P 值、I 值、D 值,操作人员可根据经验进行设定。“ST”为仿真持续的时间值。模糊因子和解模糊因子为 Fuzzy-PID 控制的设定参数,操作人员可以根据自己的设计进行修改,采用 Fuzzy 控制算法来优化 PID 控制器的 K_P 、 K_I 和 K_D 3 个参数。PID 控制和 Fuzzy-PID 控制的输出曲线可以在右侧两个图表中获得。

3 验证实验结果与分析

3.1 数据采集和处理

为了验证监控系统的性能以及可靠性,进行了模拟负荷降温实验。采用 4 个电加热模块进行负荷模拟,每个电加热模块的功率为 1.5 kW,可进行 0~100% 无级调节。为了使模拟负荷均匀分布在库内,将 4 个电加热模块分别安装在 4 个冷风机的出风口,通过风机的强制对流作用,将热量及时、均匀地分散到搁架式蒸发器上。

实验前,保持库温在 15℃。打开冷却水开关,保证冷却水路通畅。首先启动冷库内冷风机,开启电加热模块,调节每个电加热模块为 30% 的加热量,即总共 1.8 kW 的模拟热负荷。启动高温级压缩机,等待 15 s 后,启动低温级压缩机。每隔 30 s 记录一次数据,直至降到-60℃,数据被保存至指定的 Excel 表格内。在获得数据后,每 5 min 取一个数据点,进行后续数据分析。图 10 为模拟负荷实验自动采集到的压力数据曲线,图 11 为模拟负荷实验温度曲线图。

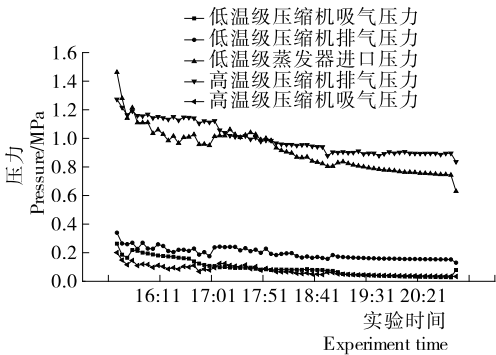


图 10 模拟负荷实验压力数据
Figure 10 Simulated load experiment pressure data

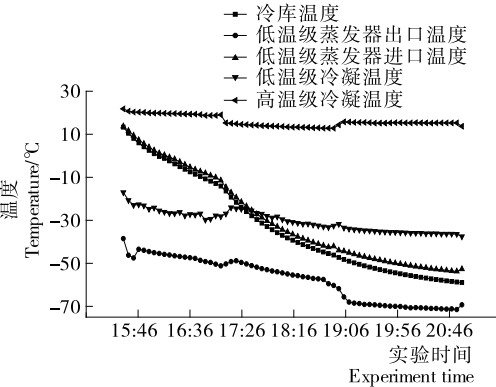


图 11 模拟负荷实验温度变化曲线
Figure 11 Simulated load experiment temperature curve

实验记录数据显示,模拟负荷实验的整个降温过程共用时 5.5 h。在降温过程中库内温度稳步下降,库内温度,蒸发器进、出口的温度变化趋势较为平缓,低温级冷凝温度和低温级蒸发器进口温度在实验中略有波动。系统运行过程中,性能稳定,提高了数据采集的准确性和实时性,采集后的数据处理方便,减轻了后续数据分析的负担,高度自动化的监控系统有效地提高了金枪鱼渔船冷库监控的工作效率。

3.2 电子膨胀阀控制仿真

仿真时间设置为 1 000 s,步长 1 s,采样周期取 2 s。PID 控制器的参数整定采用临界比例法,获得参数初始值分别为: $K_P=30.03$, $K_I=0.429$, $K_D=300$,仿真系统输入信号为 10℃ 的过热度阶跃信号,分别使用 PID 控制器和 Fuzzy-PID 控制器进行电子膨胀阀控制仿真,得到的控制器响应曲线见图 12。由于数据采集设备性能、自然环境因素等诸多原因的干扰,实际控制过程的输入信号中往往会带有一定的随机波动,为了获得控制器在实际控制情况下的控制效果,同样的条件下,采用在阶跃信号中加入高斯噪声来仿真实际输入信号,获得的控制器响应曲线见图 13。同时,实际控制过程中,系统的元件参数变化以及外来的未知扰动等都会影响控制器的控制效果,为了验证控制器在受到扰动情况下自动修正控制量出现偏离的能力,同样条件下,在 350 s 加入一个幅值为 2,持续时间 30 s 的锯齿波,用于仿真实际控制过程中由于参数变化带来的扰动,获得的控制器响应曲线见图 14。

在输入信号未加入噪声的情况下,采用PID控制的阶跃

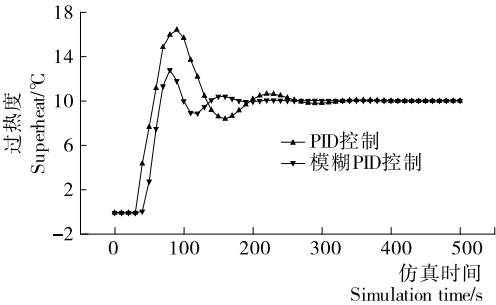


图 12 采用 PID 控制器和模糊 PID 控制器过热度响应曲线
Figure 12 Superheat response curve of PID controller and Fuzzy-PID controller

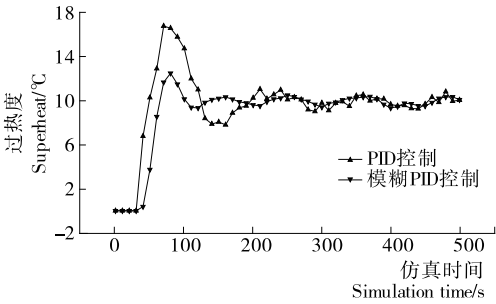


图 13 加入高斯噪声后 PID 控制器和模糊 PID 控制器过热度响应曲线
Figure 13 Superheat response curve of PID controller and Fuzzy-PID controller with Gaussian noise

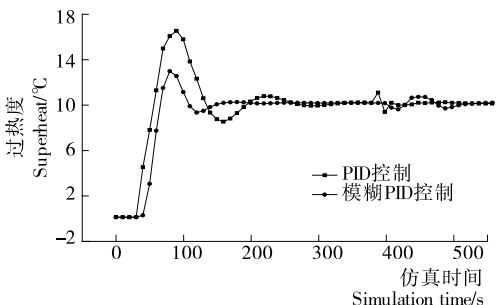


图 14 加入锯齿扰动后 PID 控制器和模糊 PID 控制器过热度响应曲线
Figure 14 Superheat response curve of PID controller and Fuzzy-PID controller with saw-tooth disturbance

响应超调量为 60%，调节时间(2%误差带)为 310 s；采用模糊 PID 控制的阶跃响应超调量在 25%，调节时间(2%误差带)为 215 s。在加入高斯噪声后，采用 PID 控制的超调量达到了 68%，调节时间(5%误差带)为 350 s；采用模糊 PID 控制的超调量在 23%，调节时间(5%误差带)为 210 s。在加入锯齿扰动后，PID 控制器 20 s 后得到响应，进行调整，过热度波动为 0.9℃，调节时间(2%误差带)为 40 s；模糊 PID 控制器对扰动的响应延迟更大，但过热度波动更小，约为 0.5℃，调节时间(2%误差带)90 s。

根据仿真实验结果可知，采用 PID 控制器阶跃响应超调量较大，在加入噪声之后，PID 控制器的稳定性较差，受扰动的影响较大，但响应能更快回到稳定状态；采用模糊 PID 控

制器能够获得更小的超调量，系统鲁棒性更好，稳定性强，受扰动的影响更小，但响应的调节时间更长。

4 结论

本研究采用虚拟仪器技术，基于 LabVIEW 平台设计开发了一套金枪鱼渔船超低温冷库制冷监控系统，进行了低温冷库模拟负荷降温试验，并通过 LabVIEW 仿真模块进行了电子膨胀阀控制仿真。

验证实验表明：① 虚拟仪器技术应用于制冷控制系统运行稳定可靠、操作简单便捷、测试结果准确，控制及时迅速，后期数据分析处理方便直观，能够降低冷库管理的人工成本投入，对节能、减轻劳动强度有实际意义；② 相较于传统 PID 控制器，模糊 PID 控制器在电子膨胀阀控制系统超调量和抑制外界扰动方面有明显的优势，但调节时间显著长于 PID 控制器。今后可针对优化模糊 PID 控制的响应调节时间进行进一步的研究；③ 电子膨胀阀的控制仿真中，默认系统传递函数不变，但在实际应用中，制冷剂流量变化时，蒸发器出口过热度对电子膨胀阀的开度响应会发生改变，控制器性能也会有所降低，如果能够通过构建控制目标的数学模型来建立模糊控制系统，则会更加接近实际应用的工况，对电子膨胀阀控制的研究更加深入。

参考文献

[1] 郭耀君, 谢晶, 朱世新, 等. 超低温制冷装置的研究现状和进展[J]. 食品与机械, 2015, 31(1): 238-243.

[2] 谢晶, 徐旻晨, 王金锋, 等. 一种金枪鱼渔船余热回收喷射式复叠制冷系统, 中国: CN105627622A[P]. 2016-06-01.

[3] TAMAINOT-TELTO Z, METCALF S J, CRITOPH R E, et al. Carbon-ammonia pairs for adsorption refrigeration applications: ice making, air conditioning and heat pumping[J]. International Journal of Refrigeration, 2009, 32(6): 1 212-1 229.

[4] FARSHI L G, FERREIRA C A I, MAHMOUDI S M S, et al. First and second law analysis of ammonia/salt absorption refrigeration systems[J]. International Journal of Refrigeration, 2014 (40): 111-121.

[5] TORRES-IRINEO E, GAERTNER D, CHASSOT E, et al. Changes in fishing power and fishing strategies driven by new technologies: The case of tropical tuna purse seiners in the eastern Atlantic Ocean[J]. Fisheries Research, 2014(155): 10-19.

[6] 倪汉华, 徐志强, 湛志新. 基于 LabVIEW 的渔船液压舵机试验台研制与应用[J]. 渔业现代化, 2010(4): 45-48.

[7] 倪汉华, 徐志强, 羊衍贵, 等. OPC 技术在渔船捕捞设备测控系统中的应用[J]. 渔业现代化, 2012(6): 62-65.

[8] GONÇALVES C, MARTINS R F, ALMEIDA R, et al. Static and fatigue behavior of the main section of a fast patrol boat[J]. Procedia Engineering, 2014(74): 161-164.

[9] 段培永, 刘桂云, 段晨旭, 等. 基于 LabVIEW 和 CAN 总线的吸收式制冷机组数据监控系统[J]. 计算机系统应用, 2015(4): 103-107.

[10] LI H, JEONG S K, YOU S S. Feedforward control of capacity and superheat for a variable speed refrigeration system[J]. Applied Thermal Engineering, 2009, 29(5): 1 067-1 074.