

基于 PLC 的船舶冷藏集装箱控制装置设计

杨明亮¹, 林华建¹, 陈武^{1,2}, 俞文胜^{1,2}

(1. 集美大学轮机工程学院, 福建 厦门 361021; 2. 福建省船舶与海洋工程重点实验室, 福建 厦门 361021)

[摘要] 为了开发具有自主知识产权并且能够满足船用冷藏集装箱应用要求的制冷机组控制系统, 设计了一种基于 PLC 的新型船用冷藏集装箱控制装置。该装置利用触摸屏上位机对系统的运行进行在线监控, 并采用压缩机变频调节为主, 热气旁通调节为辅的控制策略, 实现箱内温度控制。机组的运行实验结果表明, 控制装置在冷藏模式下从 28 ℃ 降至 0 ℃ 仅需约 810 s, 冷冻模式从 27 ℃ 降至 -18 ℃ 仅需约 2100 s, 箱内温度控制的静态偏差 ± 0.3 ℃, 具有良好的控制品质。

[关键词] 船舶冷藏集装箱; PLC; 热气旁通; 变频控制

[中图分类号] U 664

The Design of Control Device for Marine Reefer Containers Based on PLC

YANG Ming-liang¹, LIN Hua-jiang¹, CHEN Wu^{1,2}, YU Wen-sheng^{1,2}

(1. School of Marine Engineering, Jimei University, Xiamen 361021, China;

2. Fujian Provincial Key Laboratory of Naval Architecture and Ocean Engineering, Xiamen 361021, China)

Abstract: In order to develop refrigeration unit control system with independently intellectual property rights and conforming to the application standard for marine reefer containers, a new kind of control device based on PLC was developed in this paper. This device monitored the running condition of system online via upper touch screen, by strategies which includes frequency conversion control and hot gas bypass regulation, achieved control of temperature in the container. It showed that the control device could supply efficient cooling capacity for temperature control from 28 ℃ to 0 ℃ within a duration about 810 s in chilled mode, from 27 ℃ to -18 ℃ within a duration about 2100 s in frozen mode, and the temperature fluctuation within the container can be kept smaller than ± 0.3 ℃.

Keywords: ship refrigerated container; PLC; hot-gas bypass; frequency conversion control

0 引言

机械制冷集装箱是当今船舶冷藏集装箱中不可缺少的、十分重要的一种专用集装箱, 其特点是价格昂贵, 技术要求高, 操作管理复杂, 在国际集装箱总量中占有相当的比重。国外工业发达国家对冷藏集装箱的研究进行得较早, 并且成功实现了产业化生产。美国的开利 (CARRIER) 和冷王 (THERMOKING)、日本的大金 (DAKIN)、丹麦的马士基 (MAERSH) 等大公司长期垄断着船用冷藏集装箱控制装置以及相关软件设施的核心技术^[1-2]。C. P. Tso 等^[3]通过对船用冷藏集装箱整体机组

[收稿日期] 2015-11-24

[修回日期] 2016-04-12

[基金项目] 福建省科技重点项目 (2012H0032)

[作者简介] 杨明亮 (1985—), 男, 硕士生, 甲类二管轮, 从事先进轮机工程技术研究。通信作者: 林华建 (1972—), 男, 副教授, 高级轮机长, 从事先进轮机工程技术研究, E-mail: 18659481501@126.com

进行数学建模,模拟仿真吸气调节和热气旁通两种不同的容量控制方式,对比结果表明,在部分负荷工作时吸气调节方式的节能效果优于热气旁通容量调节控制方式。P. K. Chia 等^[4]把模糊逻辑控制算法引入到船用冷藏集装箱制冷机组的制冷剂流量控制,在控制过热度方面与传统 PID 控制算法对比,证明模糊控制器能够更加精准地调节过热度,并具备快速稳定特点。王本明^[5]将模糊控制理论应用于现代冷藏集装箱控制系统中,对“过热度”和“制冷容量”实现了模糊参数自适应 PID 控制,使系统的工作状态更加合理、稳定、节能,获得了较理想的控制效果。杨利强^[6]针对冷藏集装箱制冷系统的节能,提出了在压缩机、风机中运用变频器进行无级调速的方法,使制冷系统的制冷量与箱内的热负荷有较好匹配,从而达到节能的目的。

目前国内外学者的研究仅仅停留在基础的容量调节方式、控制策略以及单一的变频节能等领域,缺乏对制冷机组及其控制装置整体匹配性能的研究。本研究正是利用变频压缩机和热气旁通等技术,采用不同于其他冷藏集装箱产品的容量调节方式和控制策略,设计出一套冷藏集装箱制冷机组和基于可编程控制器 (PLC) 的新型自动控制装置,并通过实验探究该系统装置的运行特性。

1 船用冷藏集装箱制冷机组系统结构

基于制冷装置的基本设计方法^[7]设计出一种新型船用冷藏集装箱制冷机组系统^[7],其主要设备及系统工作原理如图 1 所示。

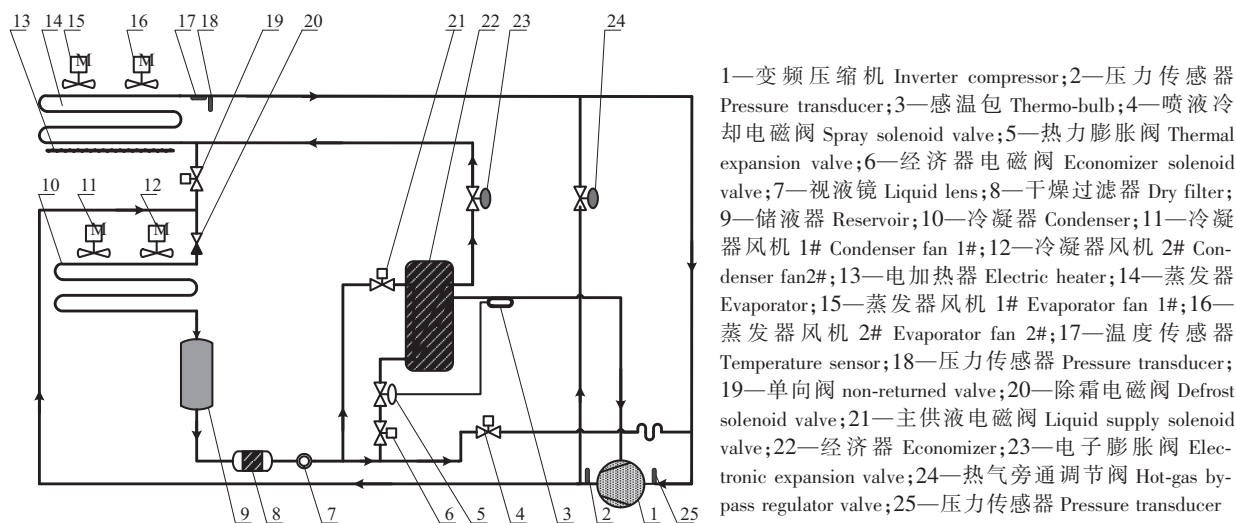


图 1 船舶冷藏集装箱制冷机组系统原理图

Fig.1 Systematic design of a marine reefer

采用 R134a 作为系统制冷剂,机组设计安装后利用真空绝热板搭建 20 英尺 (6.096 m) 标准集装箱实验平台。

该制冷机组的设计多处采用了目前冷藏集装箱领域的先进技术,其主要特点是: 1) 选用两级压缩活塞式变频压缩机实现变频容量调节,可靠性高,灵活性强,更容易适应船舶运输所处的复杂多变的恶劣气候环境; 2) 由于变频调节依然受到压缩机最低运行频率的限制,所以在变频容量调节的基础上辅助以热气旁通容量调节,这样可以扩大容量调节的范围,并且使制冷机组容量调节更加精确,温度控制更加稳定; 3) 选用电子膨胀阀控制流经蒸发器的制冷剂流量,因此响应速度快、调节精度高,可以减小蒸发器过热度波动; 4) 配备了除霜电磁阀和除霜电加热器,两套除霜装置相互配合工作,可以缩短除霜时间,提高除霜效率,避免因为长时间除霜而造成的箱体温度波动过大; 5) 蒸发器采用双风机结构,以增强箱内换热效果,缩短降温时间。

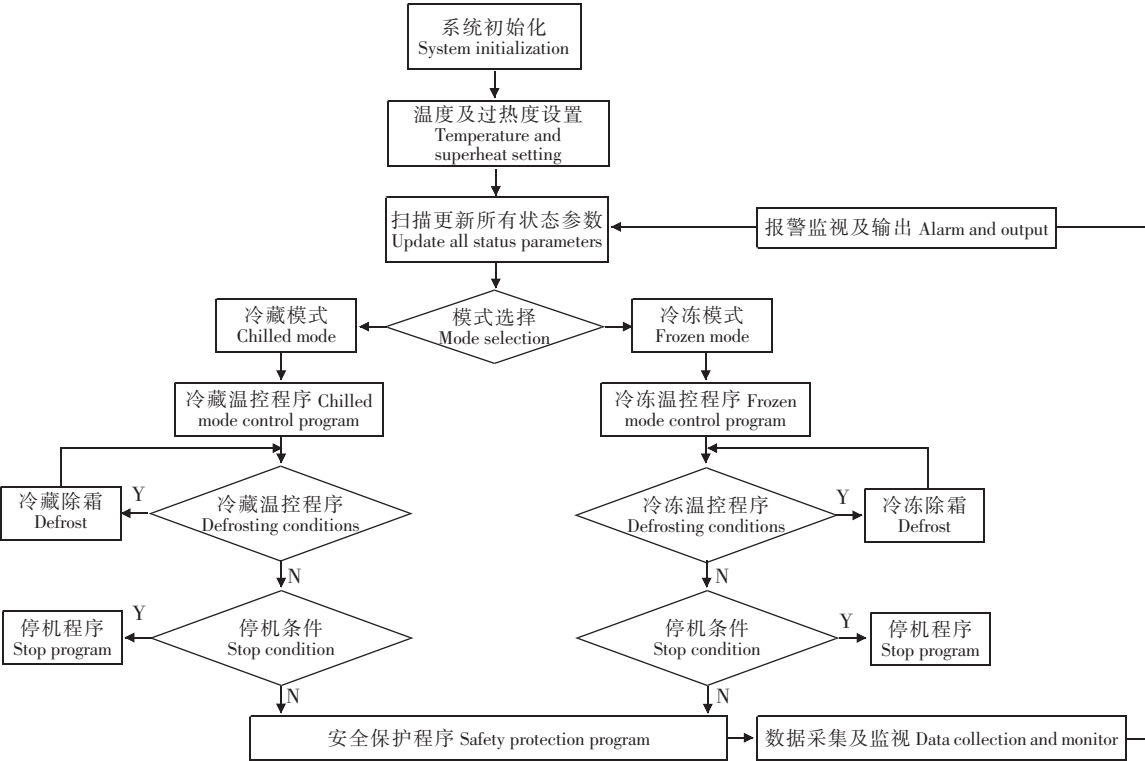


图 5 控制程序设计流程图

Fig.5 Program design of flow diagram for control system

2.3 PID 控制策略实现

由于本系统采用了变频调节与热气旁通相结合的联合调节方式，所以系统中需要设计两个与之对应的 PID 控制器。当冷藏集装箱箱内负荷较低，但箱内货物对温度控制精度较高时，制冷机组首先进行变频调节，如图 6 所示，采集温度与设置温度的偏差 e 通过 PID 运算程序计算后输出相应的模拟量，调整变频压缩机频率，使之与负荷匹配；当压缩机转速降至停机下限时，再进行热气旁通调节，如图 7 所示，此时采集温度与设置温度的偏差通过 PID 运算程序计算后减小或者开大热气旁通阀的开度，避免了压缩机启停造成的温度波动，实现温度的精确控制。PID 控制器的各个参数由工程整定法中的试凑法得出。

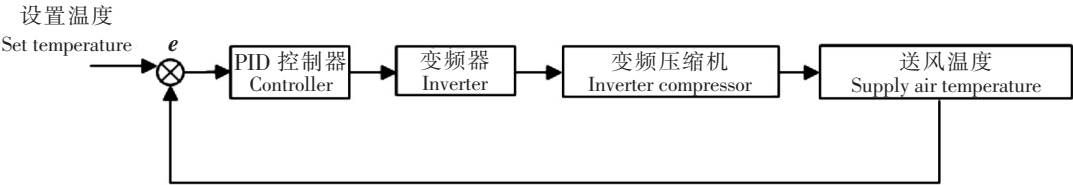


图 6 变频容量调节控制原理图

Fig.6 Principle diagram of frequency conversion capacity regulator control

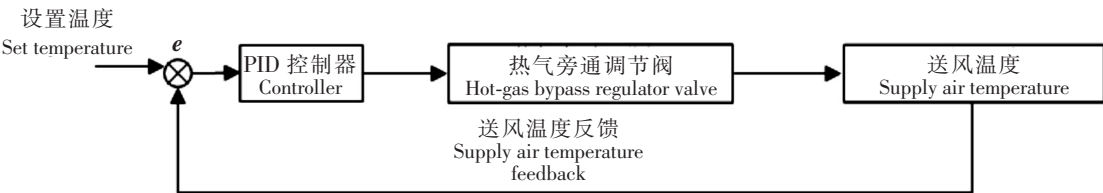


图 7 热气调节控制原理图

Fig.7 Principle diagram of hot-gas regulating control

3 实验平台特性实验

本实验台搭建完成后, 在温度为 $(25 \pm 1)^\circ\text{C}$, 相对湿度为 88% 的环境条件下, 将过热度设置为 8°C , 开展冷藏模式快速降温实验、冷冻模式快速降温实验和冷冻模式下的负荷阶跃实验, 测试制冷机组整体性能和控制系统的稳定性。冷藏模式的空箱快速降温实验过程如图 8 所示, 设置温度 0°C , 箱内温度从 28°C 降至 0°C 用时大约 810 s, 平均每分钟降温 2°C 左右; 冷冻模式的空箱快速降温实验过程如图 9 所示, 实验设置温度为 -18°C , 从 27°C 降至 -18°C 大约用时 2100 s, 平均每分钟降温 1.3°C 左右。在这两项降温实验中, 送风温度与回风温度之间始终保持在 2°C 左右的温差, 制冷机组在主要降温区域运行平稳, 降温速度较快, 表明该控制系统与制冷机组各部件匹配良好, 控制效果稳定。

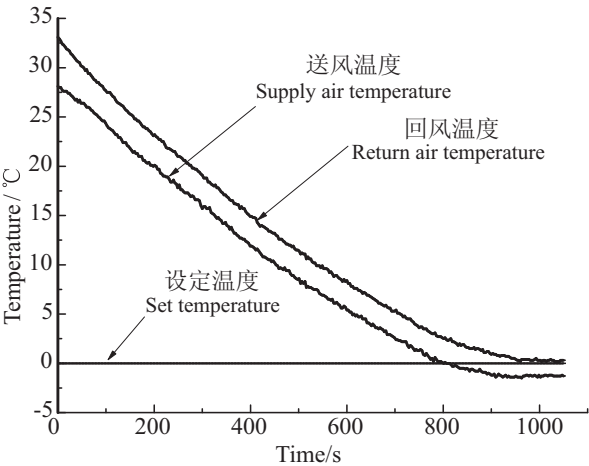


图 8 冷藏模式快速降温过程
Fig.8 Rapid cooling process of refrigeration mode

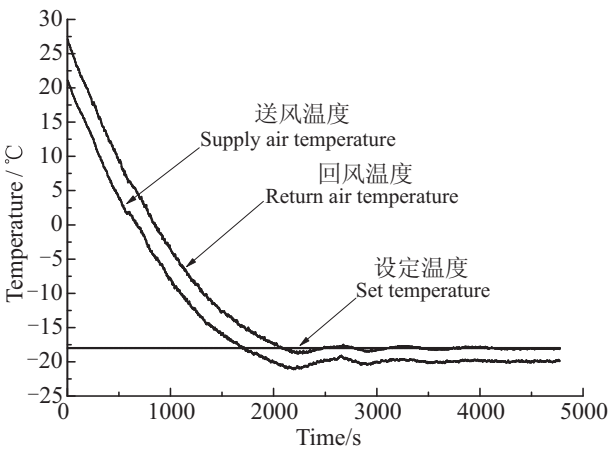


图 9 冷冻模式快速降温过程
Fig.9 Rapid cooling process of freeze mode

在前面的冷冻模式快速降温达到设置温度并且进入稳定区后, 接着进行冷冻模式负荷阶跃的容量调节实验。向系统中加入 2 kW 热负荷阶跃, 该项实验温度变化曲线如图 10 所示。从图 10 中可以看出, 在 600 s 时向箱内加入 2 kW 负荷后, 破坏了系统原先达到的动态平衡, 回风温度迅速波动上升, 最大动态偏差达到 1.3°C , 但是之后通过系统的 PID 自动调节, 系统制冷量增大, 回风温度随之降低, 最终再次稳定后的静态偏差为 $\pm 0.3^\circ\text{C}$ 。从平衡被打破到再次实现平衡用时 840 s 左右。实验表明本控制系统在低温区控制性能良好, 对负荷波动的调节能力强, 负荷变动时温度波动较小, 能够达到对控制精度和稳定性的要求。

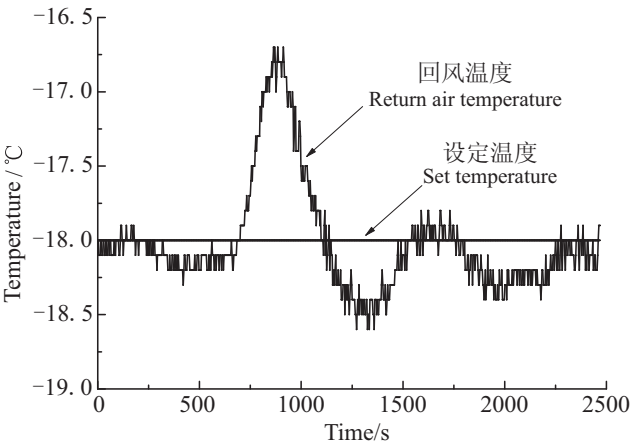


图 10 冷冻模式 2 kW 负荷阶跃回风温度变化
Fig.10 Return air temperature fluctuation under step load 2 kW of freeze mode

4 结束语

船舶冷藏集装箱制冷机组的设备选型、控制系统硬件结构、软件算法和控制策略等因素共同决定了机组运行控制性能, 基于 PLC 的船用冷藏集装箱控制系统装置充分利用了 PLC 可靠性高、系统开发简单等优点, 将经典的 PID 控制算法应用到变频控制和热气旁通相结合这一全新的控制策略当中, 为冷藏集装箱控制系统理论研究和实际开发应用开拓了一个新思路。

通过实验证明,该控制系统在冷藏模式和冷冻模式下都可以达到快速制冷的要求,加入负荷扰动后也能够迅速稳定。本实验平台控制系统的控制精度高、稳定性良好,实用性强,能够满足船用冷藏集装箱的储运要求。但是由于条件限制并没有定量分析制冷机组在该控制系统运行的能耗情况,以及更加详尽控制指标,所以后期需要继续对此系统进行进一步优化设计和实验验证,例如对上位机扩展开发、进一步改进控制算法等等,以实现功能更加完善、性能更加优越的船用冷藏集装箱控制系统,使其具有更为广阔的应用前景。

[参 考 文 献]

- [1] 王世良. 机械制冷冷藏集装箱与运输 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
- [2] 崔玉亮, 殷页庭, 谷杰然, 等. 冷藏集装箱的技术现状和发展趋势//中国制冷学会冷藏运输专业委员会学术年会论文集. 上海: 中国制冷学会冷藏运输专业委员会, 2007: 65-67.
- [3] TSO C P, WONG Y W, JOLLY P G. A comparison of hot-gas by-pass and suction modulation method for partial load control in refrigerated shipping containers. *International Journal of Refrigeration*, 2001, 24: 544-551.
- [4] CHIA P K, TSO C P, JOLLY P G, et al. Fuzzy control of superheat in container refrigeration using an electric expansion valve. *Ashrae Hvac & R Research*, 1997, 3(3): 81-98.
- [5] 王本明. 模糊 PID 控制在冷藏集装箱制冷容量控制中的应用. 青岛远洋船员学院学报, 2001, 22(4): 24-29.
- [6] 杨利强. 船舶冷藏箱变频节能技术的研究. 上海: 上海海运学院, 2000.
- [7] 张小松. 制冷技术与装置设计. 重庆: 重庆大学出版社, 2008.
- [8] 初勤亭, 吕美进. 基于 PLC 的模糊参数自整定冷库控制系统研究. 制冷与空调, 2008, 35(1): 67-70.
- [9] 郑昕斌. 基于 CAN 总线的汽车自动空调控制器开发. 机电技术, 2012, 35(1): 122-125.
- [10] 冯晓星, 孟芳芳, 张庆勇. 基于 PLC 的新型冷藏集装箱温控系统设计. 集装箱化, 2009, 20(8): 28-30.
- [11] 李金城. PLC 模拟量与通信控制应用实践. 北京: 电子工业出版社, 2011.
- [12] 中国国家标准化管理委员会. 运输用制冷机组: GB/T 21145—2007. 北京: 中国标准出版社, 2007.

(责任编辑 陈 敏 英文审校 郑青榕)