系统与附件

基于网格法的船用柴油机冷却系统温控策略环境适应性研究

曹应佳，张学艳，霍晓萌，赵冠华，杨景全

(七一一研究所,上海 201108)

摘　要：以某船用柴油机冷却系统为研究对象,采用网格法建立了单点和多点两种温控策略仿真模型。基于该模型对两种温控策略分别开展了高温环境、标准环境和极寒环境条件下推进特性全工况对比分析,并结合现有机型试验中出现的温度波动问题,研究分析两种温控策略的环境适应性。研究表明:高温循环采用多点控制,可适当提高循环水温,以改善柴油机在极寒环境条件下的性能稳定;低温循环采用单点控制,将扩大环境对循环水温的影响,应采取适当措施防止系统过冷;此外,控制循环进口温度可提高冷却系统对外围附件的适应性,避免因外围系统配置不合理而导致的系统温度波动等问题。

关键词：船用柴油机;冷却系统;温控策略;环境适应性

中图分类号:TK424.2+1　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1001-4357(2019)04-0050-04

Study on Environmental Adaptability of Temperature Control Strategy for Marine Diesel Engine Cooling System Based on Network Method

Cao Yingjia, Zhang Xueyan, Huo Xiaomeng, Zhao Guanhua, Yang Jingquan

(Shanghai Marine Diesel Engine Research Institute, Shanghai 201108)

Abstract: The simulation models of single and multiple temperature control strategy of one type of marine diesel engine cooling system are established through the network method. Based on the simulation model, the two temperature control strategies are compared and analyzed under the conditions of high temperature environment, standard environment and extreme cold environment respectively. And combined with temperature fluctuation problems appeared in the test, the adaptability of two temperature control strategies to different environments are studied. The results show that the adaptability to the extreme cold environment can be improved as the circulating temperature is increased properly by the high temperature cycle with multi-control; the impact of the environment on the circulating temperature will be increased by the low temperature cycle with single control, appropriate measures should be recommended to prevent the system from overcooling; besides, the adaptability to the external accessories can be improved by circulating inlet temperature control, avoiding system temperature fluctuation caused by unreasonable external system configuration.

Key words: marine diesel engine; cooling system; temperature control strategy; environmental adaptability

收稿日期：2018-09-14；**修回日期**：2018-10-12

作者简介：曹应佳(1986-)，男，工程师，主要研究方向为柴油机润滑、冷却系统，caoyingjia@csic711.com。

0　引　言

冷却系统是柴油机最为重要的保障系统之一，而系统水温是影响柴油机工作的重要热工参数[1]。研究表明：冷却系统温度匹配的合理性直接影响整机的可靠性、动力性和经济性[2]。

船用柴油机工作环境温度范围较大，系统水温随环境温度变化容易产生较大波动，进而改变柴油机重要零部件的受热状态，影响整机可靠性。此外，柴油机外围系统配置复杂，不唯一，机外附件通常冗余较大，容易导致系统水温过冷，影响调温阀工作状态，引起系统温度波动。因此，船用柴油机冷却系统温度匹配设计除应关注系统本身的温度匹配外，还应充分考虑外部环境对系统的影响，以改善系统对外部环境的适应性。

本文以某船用柴油机冷却系统为研究对象，利用网格法建立系统仿真模型，开展两种典型温控策略在不同环境条件下全工况对比分析。研究不同环境条件对两种温控策略的影响，并结合现有机型试验中出现的温度波动问题，探讨两种温控策略的优劣与适用场合，为柴油机冷却系统温度匹配设计提供依据。

1　两种典型的温控策略

为满足不同的冷却需求，船用柴油机冷却系统通常采用高、低温循环设计，两个循环独立运行互不影响。

结合高低温循环特点，船用柴油机冷却系统通常采用如下两种典型的温控策略，如图 1 所示。

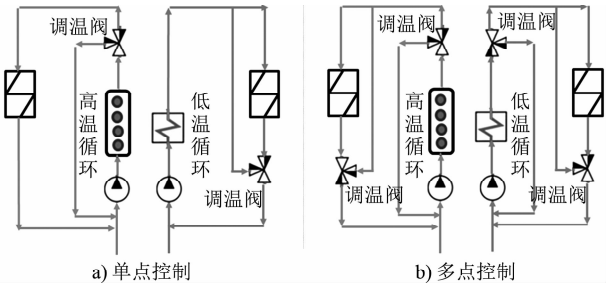

图 1　两种冷却系统典型控制策略

单点控制：各循环仅设置必须的调温阀进行温度控制，即高温循环仅控制出机温度，防止出机温度过高发生局部汽化；低温循环仅控制进机温度，防止进机过冷。

多点控制（冗余控制）：高、低温循环均分别设置两个调温阀，同时控制进、出机温度。

2　仿真模型

2.1　冷却系统网格模型

网格法是将系统中各组成部分描述为独立的元器件，采用节点和连线将各独立元器件组成一个网格系统，通过给定的初始边界，利用质量守恒、能量守恒和相关数学模型进行求解，最终获取各节点上的温度、压力等。

基于 Flowmaster 仿真平台，以某船用柴油机冷却系统为研究对象，建立了高、低温淡水循环系统和海水开式系统网格模型。模型中主要附件（如水泵、油冷器、空冷器、调温阀等）的性能和流阻特性由平台试验获得；系统集成水腔流阻特性由三维仿真 CFD 计算得到。连接管路拆分为只考虑沿程阻力损失的直管段和只考虑局部阻力损失的弯头、三通等元器件。直管段的摩擦系数由 Colebrook－White 方程计算[3]，弯头、三通等元件局部阻力系数根据 Miller 试验结果确定。

2.2　计算输入

上述仿真模型中海淡水泵、油冷器、海淡水冷却器、调温阀等附件性能及阻力特性参数由厂家提供，系统集成水腔及管路阻力特性通过 CFD 仿真计算得到。

2.3　计算说明

本文主要研究不同环境条件下两种温控策略对系统的影响，环境条件为主要变量。计算说明如下：

（1）模型一致性：两种策略的仿真模型除调温阀元件数量和控制位置有差异外，其余元器件均保持一致。

（2）输入一致性：相同工况下，两种策略仿真模型计算输入保持一致。

（3）模型标定：仿真对比前，在设计工况（高温环境、额定负荷工况）分别对两种策略模型进行了初步标定。标定结果：设计工况下两种策略主要测点的温度与设计值偏差均小于等于 5%；

（4）系统流量：柴油机采用机带离心泵，系统流量与柴油机转速成正比。在设计工况标定后，其余推进工况下系统的流量将根据柴油转速变化而变化，无须额外调节。相同工况下，两种策略模型系统流量基本相当，偏差小于等于 5%。

3　仿真结果及分析

根据上述仿真模型和输入，分别开展高温环境条件、标准环境条件和极寒环境条件下推进特性全

工况仿真计算。对比分析两种策略在不同环境条件下的环境适应性。三种典型环境工况如表 1 所示。

表 1　三种典型环境工况

环境条件	数值
高温环境	环境温度 45 ℃，海水温度 32 ℃
标准环境	环境温度 25 ℃，海水温度 25 ℃
极寒环境	环境温度 −28 ℃，海水温度 −2 ℃

3.1　高温循环环境适应性分析

以额定工况进、出机设计水温为基准对仿真结果进行无量纲处理，得到各工况下进出机温度系数 δ，δ 为各工况下进、出机温度与额定设计值的比值（$\delta = T/T_{基准值}$），反应了推进特性全工况下系统温度相对于设计值的波动情况。

不同环境条件下，高温循环各工况进、出机温度系数如图 2、图 3 所示。

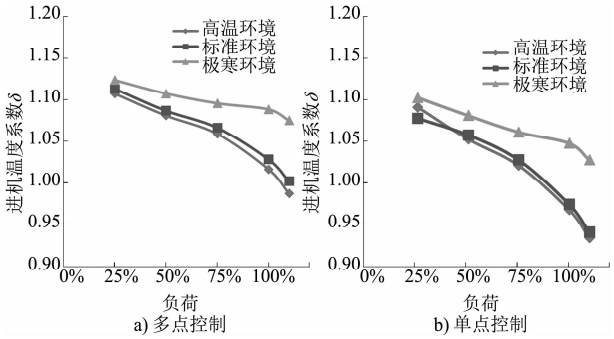

图 2　不同环境下全工况高温循环进机温度

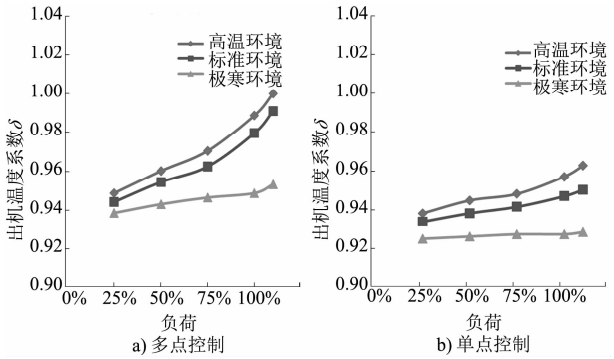

图 3　不同环境下全工况高温循环出机温度

对比不同环境条件下，两种控制策略各工况进、出机温度系数，可得到如下结论：

（1）同一控制策略下，不同环境条件各负荷进、出机温度变化趋势基本相同。随着负荷增加冷却水带走热量增多，导致出机温度升高；受高温循环出机调温阀旁通影响，进机温度随负荷降低而升高。

（2）两种控制策略下，高温水进机温度都随环境温度降低而升高；高温水出机温度随环境温度的降低而降低。相同负荷下，两种控制策略因环境变化而产生的温度变化基本相当，且随着负荷降低环境对系统温度变化的影响逐渐降低。

（3）对比极寒环境条件，相同负荷工况下，多点控制进、出机水温略高于单点控制。适当提高高温循环水温，有利于改善柴油机在极寒环境条件下的性能稳定性。

3.2　低温循环环境适应性分析

不同环境条件下，低温循环各工况进、出机温度系数如图 4、图 5 所示。对比不同环境条件下，两种控制策略各工况进、出机温度系数，可得到如下结论：

（1）同一控制策略下，不同环境条件各负荷下进、出机温度变化趋势基本相同。

（2）两种控制策略下，低温水进、出机温度均随环境温度降低而降低。相同负荷下，单点控制因环境变化而产生的温度变化较大，随着环境温度降低，系统温度明显下降，一定程度上能提高系统换热效率，但同时须采取适当措施防止系统过冷。

（3）多点控制策略下进、出机水温随环境条件变化幅值较小，受机内调温阀影响，进、出机温度均维持在较高温度，换热效率相对单点控制方案稍小，不利于冷却对象换热。

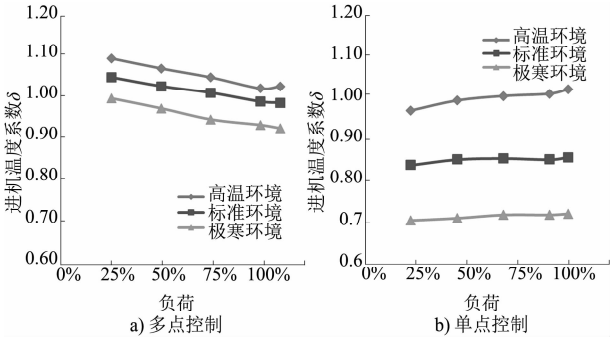

图 4　不同环境下全工况低温循环进机温度

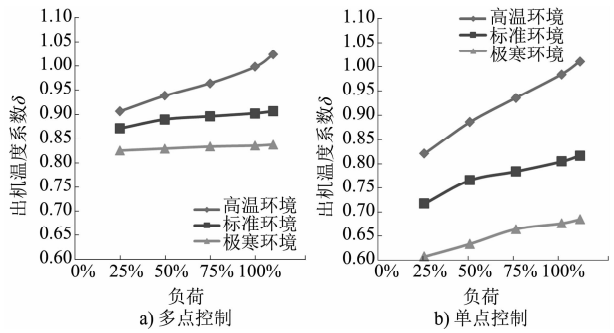

图 5　不同环境下全工况低温循环出机温度

4　外围系统适应性分析实例

4.1　故障描述

2017 年，某船用柴油机机械开发试验时，出

现高温水温度波动现象：额定工况下，高温水出机温度在温度控制下在临界点附近波动，温度波动幅度约4 ℃，周期约 2 min，低温循环水温正常。

4.2　原因分析与整改

现场排查发现：该柴油机高温循环采用单点控制方式，仅控制出机温度。机外海水循环为多个试验台架共用，海水流量偏大且无调节阀，海、淡水冷却器能力也明显偏大。

高温循环单点温控方式使得水温对外围系统适应性较差。因外围海水流量和板冷冗余过大，导致进机温度偏低，使得出机调温阀工作在临界点，不停开启、关闭，无法平衡稳定。建议将高温循环改为多点温度控制，同时控制进、出机温度，防止进机温度偏低，避免调温阀工作在临界点。

4.3　试验验证

根据整改建议，现场在机外重新配备了一个调温阀，控制高温水进机温度，安装于海、淡水冷却器之后，并调整了相关管路。经后续试验验证，全工况下高温循环水温度恢复稳定，波动现象消除。改造前后高温水出机温度波动情况如图 6 所示。

5　结论

通过对两种典型温控策略在不同环境条件下的全工况对比分析，并结合现有机型试验中出现的温度波动问题，对两种温控策略环境适应性进行了研究，得出以下结论：

（1）高温循环：相同负荷下，两种温控策略因环境变化而产生的温度变化基本相当，且随着负荷降低，环境对系统温度的影响逐渐减小。但高温循环采用多点控制，可改善柴油机在极寒环境条件下的性能，同时可提高系统对外围附件的适应性。

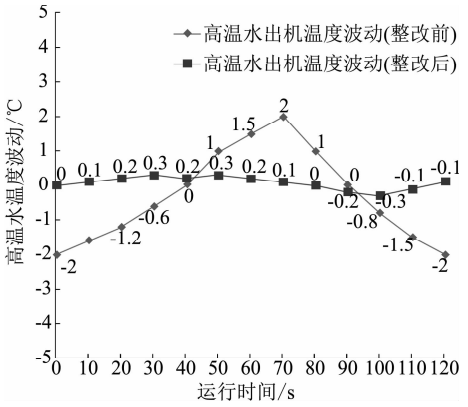

图 6　改造前后高温水出机温度波动

（2）低温循环：采用单点控制虽可降低循环水温，有利于提高系统换热和附件选型，但将扩大环境对循环水温的影响，应采取适当措施防止系统过冷，改善柴油机在低温、低负荷下的运行性能。

（3）在高、低温循环增加进口温度控制可提高冷却系统对外围附件的适应能力，避免因外围系统配置不合理而导致系统温度波动等问题。

参考文献

[1] 李海峰．船舶柴油机冷却水温度智能控制系统研究与设计［D］．大连：大连海事大学，2007.

[2] 叶香美．基于单片机的柴油发动机冷却水温控系统的研究［D］．武汉：华中农业大学，2005.

[3] 苑伟民，青青，袁宗明，等．Colebrook－White 方程显式公式对比研究［J］．天然气与石油，2010，28（4）：5-7.