

中速柴油机相继增压控制系统研制

奚博文¹, 王 凯¹, 任建军¹, 徐永亮¹, 陈宗煌²

(1. 沪东重机有限公司, 上海 200129 ; 2. 沪东中华造船(集团)有限公司代表室, 上海 200129)

摘 要: 以改善大功率中速船用柴油机性能, 尤其是低工况性能为目的, 研制了带进排气旁通和高工况放气阀的相继增压控制系统。详细介绍了该控制系统的整体结构、系统功能、工作流程等。采用可编程逻辑控制器(PLC)实现控制系统功能。试验验证表明: 所研制的控制系统达到设计要求, 工作安全可靠。

关键词: 中速船用柴油机; 相继增压; 控制系统; PLC

中图分类号: TK421⁺.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2018)01-0013-05

Research on the Control System of Sequential Turbocharging for Middle Speed Diesel Engines

Xi Bowen¹, Wang Kai¹, Ren Jianjun¹, Xu Yongliang¹, Chen Zonghuang²

(1. Hudong Heavy Machinery Co., Ltd. Shanghai 200129;

2. The Naval Deputy Office of Hudong-Zhonghua Shipbuilding (Group) Co., Ltd., Shanghai 200129)

Abstract: In order to improve the performance of high-power middle-speed marine diesel engines, especially in low operating conditions, the research on the control system of sequential turbocharging which has intake and exhaust bypass and high load waste-gate system was carried out. The whole structure, system function and working flow of the developed control system is introduced in detail. Programmable logic controller (PLC) was adopted to achieve good controlling function. The tests results show that the developed control system reaches the design objective, and is safe and reliable in operation.

Key words: middle-speed marine diesel engine; sequential turbocharging; control system; PLC

0 引 言

目前, 涡轮增压技术在柴油机上的运用已经越来越广泛, 涡轮增压技术在提高柴油机功率、降低油耗及满足环保等方面具有优势; 但伴随而来的问题也同样不容忽视。使用涡轮增压技术的柴油机运行在低工况时, 由于增压器转速低, 增压压力也会较低, 此时柴油机进气量不足以满足气缸燃烧所需空气量的要求, 从而导致冒黑烟、排气温度过高等不良后果。为了改善涡轮增压柴油机低工况性能, 国内外科研院所研发了各种类型增压系统, 其中比较普遍的有进排气旁通、变几何截面涡轮、相继增

压(STC)、高工况放气等^[1]。

相继增压是 20 世纪 70 年代末德国 MTU 公司首先采用的新技术, 其改善高增压比柴油机低负荷性能较为有效, 因此被较多系列的柴油机采用。相继增压的基本工作原理是: 采用两个以上增压器, 随柴油机转速和负荷的增大, 相继按次序地投入运行, 以改善柴油机低工况时的性能和经济性^[2]。进排气旁通是 20 世纪 60 年代末法国在研究坦克发动机时提出并采用的增压系统。其通过开启旁通阀使通过压气机的一部分空气不经过气缸而直接进入涡轮; 通过合理地控制旁通空气量, 达到在柴油机部分运行区域防止增压器喘振同时降低排气温度的

收稿日期: 2017-07-25; 修回日期: 2017-08-25

作者简介: 奚博文(1984-), 男, 工程师, 主要研究方向为柴油机电控系统, E-mail: xbw@hbm.com.cn。

目的。为优化柴油机与增压器之间的匹配,相继增压与进、排气旁通结合使用是目前较好的方案之一。

1 采用相继增压系统的样机概述

本研究以某机型为例,该机使用2台涡轮增压器,采用带有进、排气旁通的相继增压系统(图1)。增压器随柴油机转速、功率的提高相继按次序投入运行,保证柴油机在高、低转速下运行时增压器都在高效区工作,扩大该机的低工况运行区域,降低部分负荷时燃油消耗率,使该机在全工况运行范围内都能获得较好的性能,满足船用主推进柴油机在低转速对大功率、大扭矩的要求。

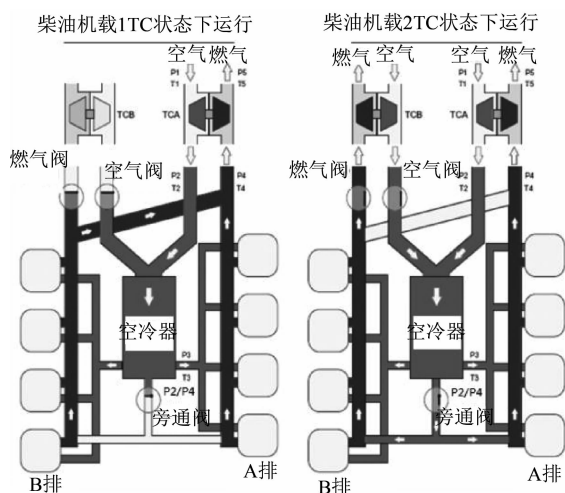


图1 相继增压系统简图

该机型的相继增压系统主要由四个受控蝶阀(燃气阀、空气阀、进排气旁通阀、高工况放气阀)、控制系统及专门设计配置的排气管路组成。蝶阀为气压驱动,由控制系统中的电磁阀控制气路,实现蝶阀的转换。

燃气阀的安装位置在B排受控增压器涡轮前的排气管段上,空气阀安装于B排增压器压气机出口至空冷器之间,这两个蝶阀受控制器控制在相应工况时决定受控增压器TCB的运行和停止,即决定柴油机增压系统处于1TC还是2TC状态。为了防止1TC状态切换2TC状态后主机转速过高导致涡轮增压器发生喘振现象,进排气旁通阀安装于空冷器至排气管之间;为了防止气缸内最高燃烧压力过高,高工况放气阀安装于空冷器上。当空气阀和燃气阀均为关闭状态时,相当于将B排受控增压器孤立,只有A排基本增压器参与工作,所有的燃气和空气均通过基本增压器进出,即为1TC工作状态;当位于B排的空气阀和燃气阀都处于

开启状态时,B排受控增压器将与A排基本增压器共同参与增压工作,柴油机处于2TC工作状态。如此对相继增压系统的控制系统提出要求:必须根据柴油机不同运行状态(涡轮增压器1TC与2TC工作状态),基于各个传感器采集并输入的相关参数(如柴油机主机转速 n 、涡轮增压器转速 N 、增压压力 p 等模拟量),控制相应的气动蝶阀(B排增压器处的燃气阀和空气阀)处于开启或关闭的状态。该相继增压系统三维模型如图2、3所示。

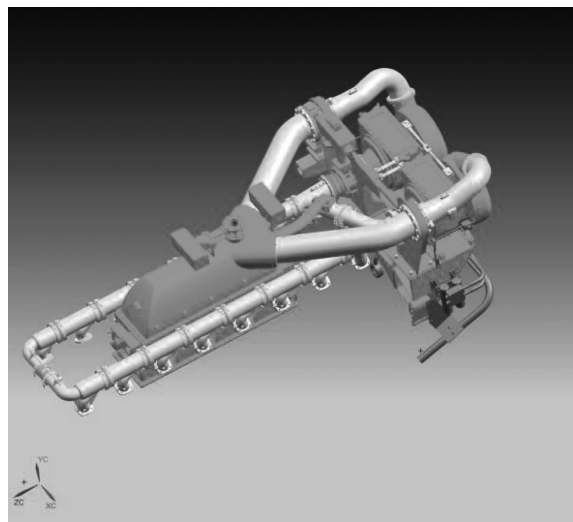


图2 带有进排气旁通的相继增压系统三维模型

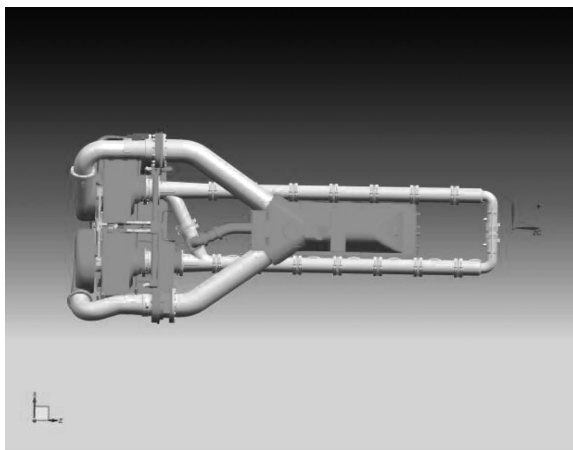


图3 带有进排气旁通的相继增压系统俯视图

2 控制系统设计

控制系统设计是带进排气旁通的涡轮相继增压系统研制成功的关键。要求控制系统能根据柴油机的各项运行参数,合理控制四个蝶阀的启闭,通过1TC与2TC状态切换达到优化低工况下柴油机性能的目的。

2.1 控制系统功能

系统采集的数据主要有:增压器转速(脉冲

在 2TC 情况下, 主机转速小于 n_3 , 旁通阀开; 主机转速大于 n_4 , 旁通阀关。增压压力大于 p_3 时, 放气阀开; 增压压力小于 p_4 时, 放气阀关。

```

graph LR
    subgraph Inputs
        A[增压器转速] --> PLC
        B[主机转速] --> PLC
        C[齿条位置] --> PLC
        D[齿条零位] --> PLC
        E[增压压力] --> PLC
        F[自动/手动检测] --> PLC
    end
    subgraph PLC [PLC 控制器]
        direction TB
        PLC
    end
    subgraph Outputs
        PLC --> G[空气阀]
        PLC --> H[燃气阀]
        PLC --> I[旁通阀]
        PLC --> J[放气阀]
        PLC --> K[增压转速显示]
        PLC --> L[主机转速显示]
        PLC --> M[齿条位置显示]
        PLC --> N[增压压力显示]
        PLC --> O[监控报警显示]
    end
    G -- 状态反馈 --> PLC
    H -- 状态反馈 --> PLC
    I -- 状态反馈 --> PLC
    J -- 状态反馈 --> PLC
    K --> P[触摸显示终端]
    L --> P
    M --> P
    N --> P
    O --> P
  
```

本系统有三种控制模式：自动、手动及自检，通过控制系统的转换开关可切换至不同模式。自动控制模式即柴油机正常运行时，当须要切换 1TC 和 2TC 时，控制系统动作，各个气动控制器控制对应的蝶阀开启或关闭；手动控制模式即通过手动控制四个蝶阀的开启或关闭来切换 1TC 与 2TC；自检模式是对各线路、蝶阀、控制器进行检查，并对故障进行报警，其中除转换开关位置须处于自检状态外，还须柴油机处于停机状态（即系统能采集到齿条零位信号），该模式才能正常运行。

在自动模式下, 柴油机由低工况向高工况运行时, 基本增压器转速 N 大于 N_1 (增压器转速设定值) 并且主机转速 n 大于 n_1 (主机转速设定值), 控制系统将控制气动控制器打开燃气阀和空气阀, 柴油机从 1TC 状态切换至 2TC 状态。为了防止由于信号故障产生错误的工作状态转换, 同时还有一个第二判定条件, 当增压压力 p 大于 p_1 (增压压力设定值) 时, 同样由 1TC 状态切换 2TC 状态。

```

graph TD
    Start([自动模式]) --> Step1[“1TC/2TC”转换开关置于“2TC”位置]
    Step1 --> Step2[“自动/手动”转换开关置于“自动”位置]
    Step2 --> Mode2TC[2TC模式]
    Step2 --> Mode1TC[1TC模式]
    
    Mode2TC --> Cond2TC1{n > n1 & N > N1}
    Cond2TC1 -- 是 --> Cond2TC1_1{p < p1}
    Cond2TC1 -- 否 --> Cond2TC1_2{p < p2}
    Cond2TC1_1 -- 是 --> Cmd2TC1_1[1TC转2TC]
    Cmd2TC1_1 --> Cmd2TC1_2[燃气电磁阀打开]
    Cond2TC1_2 -- 是 --> Cmd2TC1_3[燃气电磁阀关闭]
    Cond2TC1_2 -- 否 --> Cmd2TC1_4[约x秒后进气阀打开]
    
    Mode1TC --> Cond1TC1{n < n2 & N < N2}
    Cond1TC1 -- 是 --> Cond1TC1_1{p < p2}
    Cond1TC1 -- 否 --> Cmd1TC1_1[燃气电磁阀关闭]
    Cond1TC1_1 -- 是 --> Cmd1TC1_2[2TC转1TC]
    Cmd1TC1_2 --> Cmd1TC1_3[进气电磁阀打开]
    
    Cmd2TC1_1 --> FaultOut[故障报警输出]
    Cmd2TC1_2 --> FaultOut
    Cmd2TC1_3 --> FaultOut
    Cmd2TC1_4 --> FaultOut
    Cmd1TC1_1 --> FaultOut
    Cmd1TC1_2 --> FaultOut
    Cmd1TC1_3 --> FaultOut
    Cmd1TC1_4 --> FaultOut
    
    Cmd2TC1_1 --> FaultOut
    Cmd2TC1_2 --> FaultOut
    Cmd2TC1_3 --> FaultOut
    Cmd2TC1_4 --> FaultOut
    Cmd1TC1_1 --> FaultOut
    Cmd1TC1_2 --> FaultOut
    Cmd1TC1_3 --> FaultOut
    Cmd1TC1_4 --> FaultOut
  
```

在手动模式下, 可通过按钮手动转换 1TC/2TC 模式, 同时也可单独控制四个蝶阀的启闭。手动模式主要应用于系统调试及应急状态, 在应急状态使用时, 应特别避免高工况时使用 1TC 模式, 以防增压器损坏。在柴油机正常工作期间使用自动

模式即可。手动模式逻辑框图如图 6 所示。

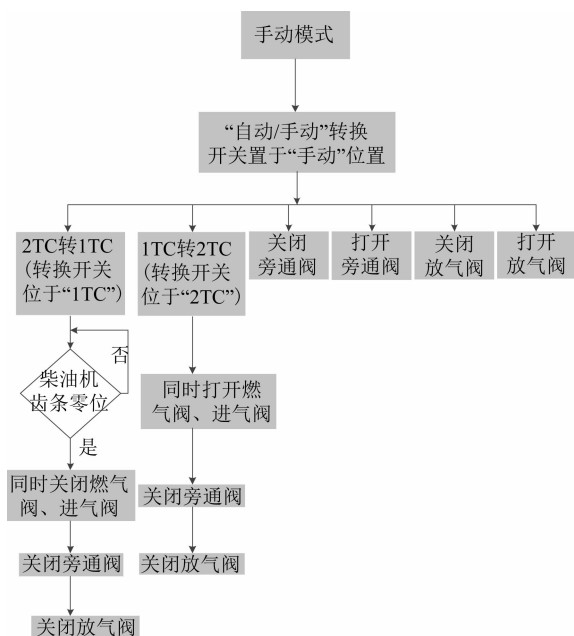


图 6 手动模式逻辑框图

2.2.3 自检模式

自检模式是用于对燃气阀、空气阀、旁通阀、放气阀的电磁阀线路和电磁阀本体及蝶阀气路、本体故障、蝶阀状态进行自检，自检时自检指示灯闪烁。该模式主要应用于长时间停机后，在起动之前对整个系统进行自动检查。其逻辑框图如图 7 所示。

2.2.4 故障报警

为了维持整个控制系统的可靠运行，对于如下一些重要的输入信号设置了两级报警提示，并输出给柴油机状态监测与安全保护系统。

(1) 增压器转速信号

若增压器转速信号丢失（如传感器损坏、连接电缆损坏或接线松动等），则增压器信号故障指示灯点亮；在自动状态时出现增压器信号故障，即自动转入 2TC 工作模式同时触发一级报警提示，建议用户进行检查。

(2) 主机转速信号

主机转速传感器失灵或连接件、电缆故障，则主机信号故障指示灯点亮并触发一级报警提示。

(3) 执行机构信号

若执行机构出现故障，包括：电磁阀连接电线故障、电磁阀本体故障、驱动蝶阀气路故障（气压不够、气路泄漏）、蝶阀本体故障、蝶阀状态反馈信号故障等，执行机构信号故障指示灯点亮；在自动状态时出现执行机构故障，即自动转入 2TC 工作模式，同时触发二级报警提示，建议用户马上停机进行修复后方可继续运行。

(4) 失电故障

失电故障时即自动转入 2TC 工作模式，同时触发二级报警提示，建议用户马上停机进行修复，修复后方可继续运行。

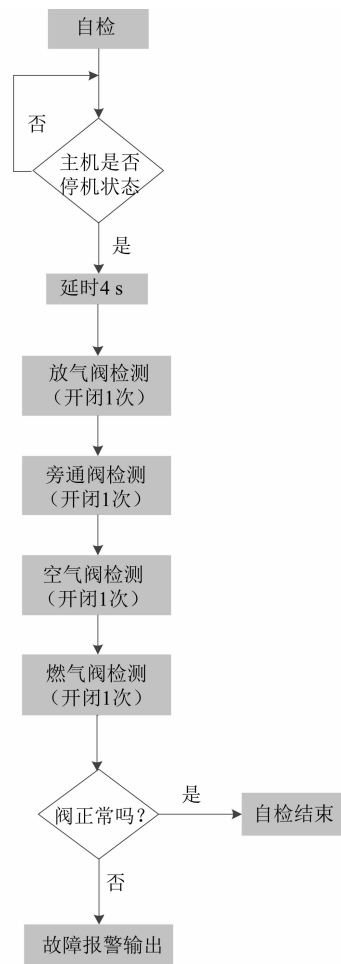


图 7 自检模式逻辑框图

3 PLC 程序实现

在系统整个框架确定后，便可以通过编制程序来实现控制系统的各种功能。该项目选用西门子 S7-200 系列 PLC，应用 STEP 7 Micro/ WIN SP9 V4.0 软件进行编制，应用的编程方式为梯形图（LAD），下面选取部分主要程序进行说明。

3.1 自检模式

在系统准备运行之初，须要对各个蝶阀进行检查，不仅是要查看蝶阀的开启与关闭是否正常，而且要确定蝶阀当前的状态是处于关闭还是开启中。

//通过自检控制按钮开启各个阀自检程序，

//同时各个蝶阀出现故障时（如无法进行开启或者关闭动作），对应的故障提示灯亮起。如图 8、9 所示。

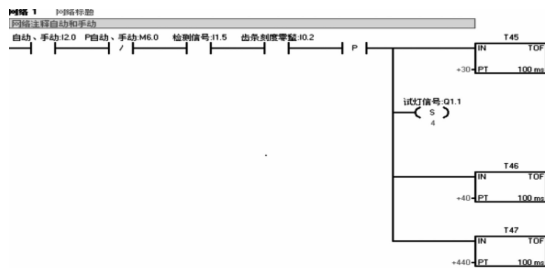


图8 启动自检模式

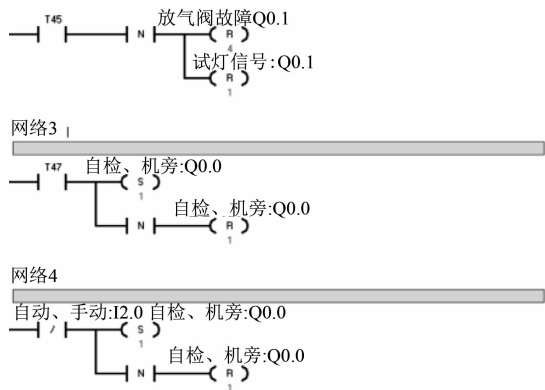


图9 指示灯亮起

3.2 自动模式

对于输入的实时增压器转速 N 、主机转速 n 和增压压力 p 进行与内部存储器设定值的对比，以控制各个蝶阀的动作，实现 1TC 与 2TC 状态的切换。

//位于自动模式下，对比内部存储器 VD100 中当前主机转速与 VD132 中设定的 2TC 切换 1TC 值，或 VD104 中储存的当前 A 排增压器转速与 VD136 中设定的 2TC 切换 1TC 增压器转速；

//为了保障安全，还须要对比 VD80 中增压器压力当前值与 VD140 中设定的 2TC 切换 1TC 增压器压力值；

//当以上对比条件小于为真时，燃气阀（复位）关闭，空气阀（复位）关闭。具体如图 10 所示。

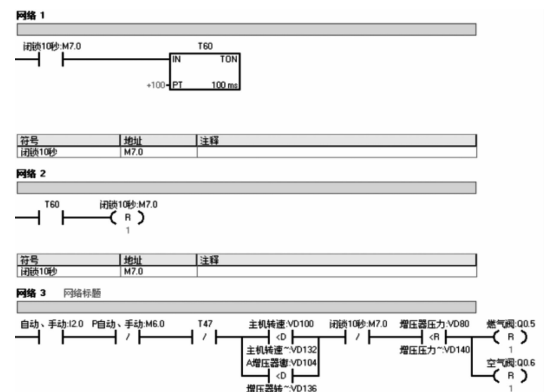


图10 2TC 切换 1TC

//位于自动模式下，同理对比内部存储器 VD100 中当前主机转速与 VD120 中设定的 1TC 切换 2TC 转速值，或 VD104 中储存的当前 A 排增压器转速与 VD128 中设定的 1TC 切换 2TC 增压器转速；

//为了保障安全，还须要对比 VD80 中增压器压力当前值与 VD128 中设定的 1TC 切换 2TC 增压器压力值；

//当以上对比条件大于为真时，燃气阀（置位）打开，空气阀延时约 3 s 后（置位）打开。如图 11 所示。

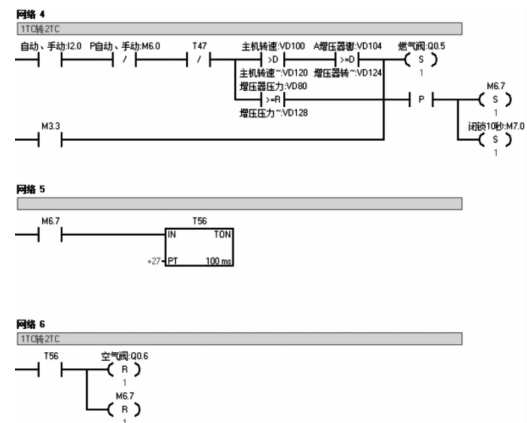


图11 1TC 切换 2TC

//位于自动模式下，当柴油机处于 1TC 工作模式时，旁通阀（复位）关闭。

//位于自动模式下，当柴油机处于 2TC 工作模式时，通过对比 VD100 中当前主机转速与 VD148 和 VD144 旁通阀开关状态主机转速设定值，实现旁通阀的开启与关闭（置位于复位）。

//位于自动模式下，当柴油机处于 2TC 工作模式时，通过对比 VD80 中当前增压压力与 VD152 和 VD156 放气阀开关状态增压压力设定值，实现高工况放气阀的开启与关闭（置位于复位）。如图 12 所示。

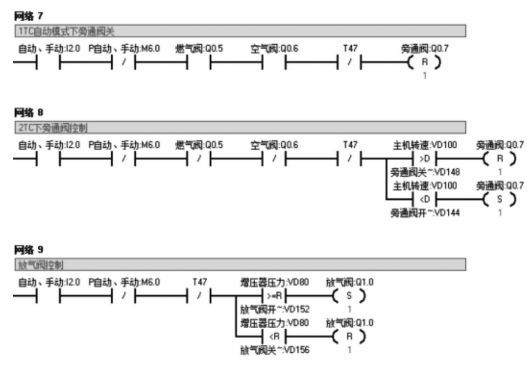


图12 旁通阀与放气阀控制

(下转第 37 页)

性参数;然后将参数带入详细扭振模型,按需要对参数进行调整,以达到最佳的减振效果。结构设计完成后,须要从计算和试验两方面对设计结果进行检验,以检验设计合理性、参数复现情况以及扭振控制效果。

将该设计方法应用到 HND 622V20CR 柴油机的扭振控制设计中,配机试验测试结果表明:扭振固有频率和振幅相对误差均在 5% 以内,扭振减振器的减振参数与设计值较为一致。安装扭振减振器后,该型柴油机扭振性能较原来采用硅油型扭振减振器时有明显改善。在同样安装空间和重量要求的条件下,A46×75 簧片滑油型扭振减振器较原减振器有明显优势。

参考文献

- [1] 张志华. 动力装置振动数值计算 [M]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2007.

- [2] 中国国家标准化管理委员会. 扭转振动减振器特性描述: GB/T 13437-2009 [S]. 中国标准出版社,2009.
- [3] 周炎. 卷簧扭振减振器优化设计研究 [C]. 中国内燃机学会大功率柴油机分会成立 20 周年年会,2001.
- [4] 全国船用机械标准化技术委员会柴油机分技术委员会. 扭转振动减振器: GB/T 16305-2009 [S]. 中国标准出版社,2009.
- [5] RAO S S. Mechanical Vibration [M]. U. S. A: Prentice Hall, 2009.
- [6] 中国船舶工业总公司. 舰艇柴油机轴系扭转振动计算: CB/Z 214-85 [S]. 中国船舶工业总公司,1985.
- [7] 中国国家标准化管理委员会. 弹性阻尼簧片减振器: GB/T 14654-2008 [S]. 中国标准出版社,2008.
- [8] 严济宽. 机械振动隔离技术 [M]. 上海:上海科技文献出版社,1986.
- [9] POTTER M C. Engineering fluid mechanics [M]. 北京:机械工业出版社,2015.

(上接第 17 页)

4 结 语

本系统研制完毕后经多次静态、动态试验,以及实机长时间运行验证,表明:控制系统动作灵敏,工作安全可靠;整套系统设计符合要求,适用于相继增压的控制及快速转换;性能与国外同类产品基本相当,但具有结构简单、工作可靠、价格低廉等优点,为国内相继增压系统的推广应用及试验研究提供了基础。

参考文献

- [1] 黄建华,王银燕,王贺春. 某船用 V 型高速柴油机相继增压计算分析 [J]. 船舶工程,2005,27 (2): 92-96.
- [2] 张永洋,杨彦涛,王禹华. 相继增压技术的应用研究 [J]. 柴油机,2009,31 (4): 23-27.
- [3] 陈在平,刘文芳. 西门子 S7-200PLC 系统设计与应用实例 [M]. 北京:电子工业出版社,2015.
- [4] Siemens A G. SIMATIC S7-200 PLC System Manual [R]. 2008.

(上接第 26 页)

(3) 改进后进行试验,故障未再发生。表明该仿真方法能够模拟并预测排气管结构薄弱区域;也可为存在振动可能的受热零部件可靠性设计提供参考和借鉴。

参考文献

- [1] 易台连,吴杰长,刁爱民,等. 基于有限元和 FE-SAFE 的柴油机排烟管振动下的疲劳寿命 [J]. 内燃

- 机工程,2008,29 (3): 76-80.
- [2] 骆旭薇,石勇,李斌,等. 应用 FEA-CFD 耦合方法对某增压柴油机排气歧管的开裂失效分析及设计改进 [J]. 内燃机工程,2015,36 (6): 144-150.
- [3] 李民,王站成,皮振新,等. 排气歧管热应力模拟计算及缸盖边界条件影响的分析 [J]. 小型内燃机与摩托车,2014,43 (3): 57-60.