

基于 Profibus-DP 中冷控制器的方案设计*

王香梅¹ 薛英龙²

(1. 西安职业技术学院 西安 710077; 2. 南京致捷开关有限公司 湖州 313000)

摘要: 针对中冷控制系统的机械与电气结构,阐述了中冷器的换热工作原理以及现场总线设计的必要性。结合中冷控制系统硬件特征、驱动特性,根据其应用场合,完成了包括基本功能、辅助功能和附加功能在内的控制器模块。根据该设计方案,以工业级 PLC 为中心,借助环境控制系统与 Profibus-DP 工业现场总线,中央测控系统的控制可以延伸至发动机实验室中的各个角落。设计出了基于 DSP 和 Profibus-DP 通信功能的中冷控制器的硬件体系结构。结果该控制器不仅能够对涡轮增压后的空气温度进行良好控制,还能为工业控制的互联以及远程控制提供可行性。同时为发动机实验室环境控制系统中其他智能控制器的设计提供解决方案。

关键词: 中冷控制器; Profibus 总线; 温度控制; PLC; 闭环控制; 涡轮增压

中图分类号: TP23; TH715 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.80

Based on the Profibus-DP intercooler controller scheme design

Wang Xiangmei¹ Xue Yinglong²

(1. Xi'an Vocational and Technical College, Xi'an 710077, China; 2. Nanjing Zhijie Switch Co., Ltd., Huzhou 313000, China)

Abstract: According to the mechanical and electrical structure of intercooler control system, this paper expounds the working principle of intercooler heat exchange and the necessity of Fieldbus design. Combined with the hardware characteristics and drive characteristics of the intercooling control system, the controller module including basic functions, auxiliary functions and additional functions is completed according to its application situation. According to the design scheme, with the industrial PLC as the center, and with the help of environmental control system and Profibus-DP industrial field bus, the control of the central measurement and control system can be extended to every corner of the engine laboratory. The hardware architecture of intercooler controller based on DSP and Profibus-DP communication function is designed. Results the controller can not only control the air temperature after turbocharging, but also provide feasibility for industrial control interconnection and remote control. At the same time, it provides solutions for the design of other intelligent controllers in the engine laboratory environment control system.

Keywords: charge air cooler controller; Profibus-DP; temperatue control; PLC; closed-loop control; turbo supercharging

0 引言

随着汽车数量激增,大气污染、能源消耗、交通阻塞等问题日益凸现。世界各国加大了环境保护与节能减排的控制力度。在我国法规 GB 18352.3-2005^[1]与 GB 17691-2005^[2]中明确提出了 CO(一氧化碳)、HC(碳氢化合物)和 NO_x(氮氧化合物)3 种气态污染物以及 PM(颗粒物)固态污染物的测试方法与排放限值。不久前,美国环保总署 EPA 也发布了温室气体 CO₂(二氧化碳)的测试方法与排放限值。我国工业与信息化部装备工业司也在积极研究关于油耗限值的国家法规。试验数据表明,在涡轮增压器与

EGR(尾气再循环装置)配套使用的共轨柴油发动机上,其 NO_x 排放物可降低约 60%,PM 排放物降低约 45%,CO₂ 排放物降低 15%~20%。虽然涡轮增压技术已有 100 多年的历史,但是直到 20 世纪 70 年代末才真正应用于汽车发动机领域^[3]。该技术不仅提高了发动机的运转性能,又有效控制了汽车尾气排放,也提高了燃油经济性。现代发动机广泛采用涡轮增压技术,但是该技术的运用会导致发动机进气温升加剧,进而影响发动机运转特性。由于该技术在节能、提高功率以及满足环保等方面具有无可比拟的优点而被众多柴油机所采用,而且发展得越来越迅速。

随着中国汽车尾气排放法规的日益严格,发动机实验

收稿日期:2020-12-23

* 基金项目:西安职业技术学院院级基金(XZY2014YB01)项目资助

室间数据对比需求量的增大,作为辅助系统,环境控制系统与嵌入式的中冷控制器常常不受中国企业的重视,多数实验室尚不具备完整的环境控制系统。建立起一套嵌入式、可调的发动机实验环境系统显得尤为必要。设计一款适合的中冷控制器是非常有必要的,该控制器将不仅能够对涡轮增压后的空气温度进行良好控制,还能为工业控制的互联以及远程控制提供可行性。同时为发动机实验室环境控制系统中其他智能控制器的设计提供解决方案。

1 中冷控制系统

中间冷却器简称中冷器,起到为涡轮增压发动机增压后的高温空气降温的目的。加之其周边的机械部件、电子部件以及发动机本身,共同构成了具有闭环控制特性的中冷控制系统^[4],如图 1 所示。

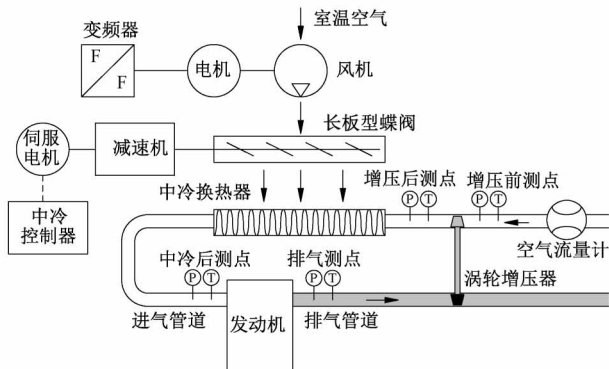


图 1 涡轮增压发动机中冷控制系统结构

风机、伺服电机、减速机和长板型蝶阀等机电设备构成中冷控制系统的执行部件。涡轮增压发动机的进、排气系统构成了该系统的控制对象。在发动机进气、排气管道上安装的温度传感器、压力传感器和进气空气流量计组成该系统的检测部件^[5]。中冷控制器作为控制核心,采样检测部件信号并将其数字化,通过控制算法运算,输出控制量并驱动执行部件进行角度与姿态的调整,从而改变控制对象的状态。然后,再次通过检测部件采样该状态量进入控制系统。如此不断循环,便构成了闭环控制系统^[6]。

涡轮增压发动机在不同工况点进行运转时,增压效率随发动机转速以及涡轮增压器有效开度而有所不同。故将其视作中冷控制系统的外部干扰源。将图 1 进行简化,得到中冷控制系统的控制框图,如图 2 所示。

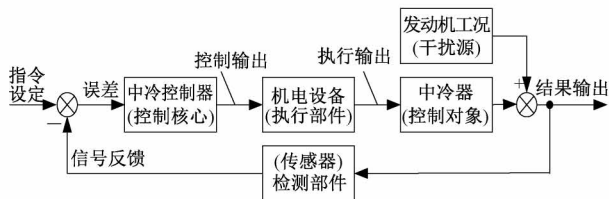


图 2 涡轮增压发动机中冷控制系统的控制框图

对于整个中冷控制系统来讲,其最终控制目标为物理

量温度。因而,该系统的控制对象为发动机涡轮增压后的空气温度。对于中冷控制器本身而言,其直接输出并驱动的对象则为伺服驱动器以及伺服电机所组成的伺服系统^[7]。因此,在设计控制器的软、硬件之前,不仅需要研究空气温度场的特性,而且需要了解伺服驱动器以及伺服电机的驱动方式以及输出特性。

2 中冷控制器热交换原理

根据理想气体状态方程,气体压力 P 、容积 V 与温度 T 之间满足式(1)。

$$\frac{P_1 \cdot V_1}{T_1} = \frac{P_2 \cdot V_2}{T_2} \quad (1)$$

在气体管路容积不变的条件下,当空气被压缩同时压力升高,温度也会随之升高。可以说,被压缩空气的高温来源于涡轮增压器对其做功的效果。

根据热交换原理,物质的热量 Q 、热交换系数 k 、有效面积 A 与温度变化 Δt 之间满足式(2)。流体流量 q 、流速 v 与面积 A 之间满足式(3)。

$$Q = k \cdot A \cdot \Delta t \quad (2)$$

$$q = v \cdot A \quad (3)$$

当中冷风机转速恒定,输出冷却空气的总流量为定值。改变长板型蝶阀的开度,即流体横截面积,仅仅可以改变流体的流速,并不会影响流体的总流量。但是,通过控制长板型蝶阀的开度,却可以控制冷却空气作用于中冷换热器上的有效面积 A ,从而达到改变热量交换效率的目的。若换热有效面积 A 恒定,设热流体流量、比热容与热交换温度差分别为 $q_h \cdot c_h$ 与 Δt_h 。设冷流体流量、比热容与冷交换温度差分别为 $q_c \cdot c_c$ 与 Δt_c 。根据热平衡原理,放热与吸热量守恒,则满足式(4)。

$$q_h \cdot c_h \cdot \Delta t_h = q_c \cdot c_c \cdot \Delta t_c \quad (4)$$

将比热容 c_h 与 c_c 视为常数,将热流体的流量 q_h 与冷流体的温度差 Δt_c 也认为基本恒定时。则在单位时间内,增加冷流体的流量 q_c 有助于获得更大的热流体的温度差 Δt_h ,达到加速降温的效果。

3 现场总线

典型的工业自动化系统由设备层、驱动层、控制层、管理层和现场总线网络构成。由于管理层任务繁重、控制循环周期长,因此采用位于驱动层或控制层的专用控制器与专用控制系统对设备实施高速、高精度的闭环控制^[8]。是否具备现场总线接口决定了控制器是否能够方便的成为大规模控制系统网络中的一份子,衡量着控制器设计的开放化程度。

Profibus 总线诞生于 1987 年,1989 年被德国立项为国家标准,1996 年被批准作为欧洲标准,2000 年入选 IEC 八大国际现场总线标准之一。2001 年,我国正式规定 Profibus 成为机械行业工业控制系统现场总线的国家标

准^[9]。而其中的 Profibus-DP 作为工业现场级总线,针对自动控制系统设备之间、分散 I/O 之间,实现分布式控制、高速数据传输。由于德国西门子可编程逻辑控制器(PLC)在工业自动化领域的广泛应用,更拓展了 Profibus 现场总线的市场占有率^[10]。

现场总线的运用,使得在现代发动机实验台架减少传输线缆,提高信号传输可靠性。另外,由于 Profibus-DP 总线的普及运用与西门子公司遍布全球的技术支持,以及发动机测试设备巨头供应商 AVL 公司也选择了 Profibus-DP 总线作为工控机现场总线的主要形式,因而中冷控制器选择 Profibus-DP 总线作为现场总线的嵌入式接口^[11]。

4 控制器硬件模块方案设计

4.1 伺服电机驱动方案

选用伺服驱动器的速度工作模式,使用数/模转换器(DAC)将微控制单元(MCU)的数字量转换成为模拟量,再经放大电路调整成 $\pm 10\text{ V}$ 的模拟量输出^[12]。

4.2 编码器解码方案

利用复杂可编程逻辑器件(CPLD),使用硬件编程语言编写具有 16 或 32 bit 长度的解码器,通过并口或者串行外设接口(SPI)与 MCU 进行数据传输^[13]。

4.3 温度采样方案

PT100 铂电阻温度传感器具有线性好、精度高、价格适中等优点广泛应用于中低温测量场合。采用精密电阻和放大器组成的检测电桥,将铂电阻随温度变化的电阻阻值转换为电压,并使用模/数转换器(ADC)完成温度采样任务^[14]。

4.4 人机界面方案

液晶显示器(LCD)与相对简单的工业键盘或工业按键成为首选。

4.5 现场总线与串行通信方案

采用 Profibus-DP 工业现场总线,实现工业自动化的嵌入式开发。设计 RS232C 与 RS485 总线规范的电平信号^[15]。

4.6 用户接口方案

利用光耦完成用户指定逻辑的输入与输出,设计兼容 0~10 V 的模拟接口。

综上所述,若以 MCU 为核心,各种功能模块围绕在其周边,则中冷控制器硬件结构如图 3 所示。

5 控制器的软件层次方案设计

中冷控制器的软件体系被划分为程序、平台、软件 3 个层次。从功能规划入手,首先拆分出任务层,再根据任务需要,编制底层驱动代码^[16]。

5.1 任务层软件方案

面向用户的高层应用软件,负责控制器具体功能的实

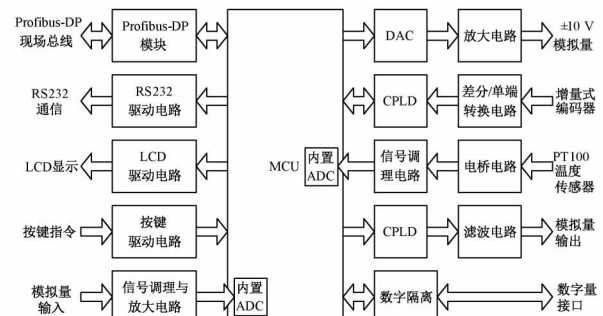


图 3 中冷控制器硬件方案

现。任务层程序代码中看不到与硬件相关的语句,是完全脱离了硬件的通用型软件。该层软件主要包括电机伺服控制算法、温度控制算法、键盘/数字/模拟指令处理、现场总线通信、串行通信、数字/模拟状态输出、人机交互以及其他扩展功能。

对于电机伺服控制、温度控制以及指令处理与状态输出等功能,有着高实时性处理要求,故被归类为实时类程序。Profibus-DP 与 RS232、RS485 等功能由 MCU 中断机制保证,故被称为中断类程序。对于 LCD 显示等其他无实时性要求的程序按照代码先后顺序依次执行,故被称为时序类程序^[17]。根据软件模块的重要程度与对实时性的要求,将中冷控制器任务层软件行划分如表 1 所示。

表 1 中冷控制器任务层软件模块分类

软件分类	软件模块	软件模块说明	优先级(1)
实时类软件	伺服控制	实现伺服电机的定位控制算法	1
	温度控制	实现温度采样与恒温控制算法	1
	指令处理	实现按键、数字与模拟指令输入以及处理	2
	状态输出	实现数字、模拟状态处理以及输出	2
中断类软件	现场总线	实现 Profibus-DP 总线数据与用户信息通信	3
	串行通信	实现 RS232 及 RS485 串行数据与用户信息通信	3
时序类软件	人机交互	实现 LCD 显示	无
	其他	预留功能,尚未规划	—

注:优先级 1 为最高优先级。

5.2 驱动层程序方案

驱动层程序是控制系统的最低层,直接与控制器的硬件打交道,对硬件芯片及设备直接进行读/写操作。其中包含 MCU 片内外设的驱动以及 MCU 之外的电子器件的驱

动等。驱动层程序应本着简洁、高效的思路编写,其代码执行效率直接决定着上层软件能否顺畅、稳定的运行。

5.3 系统层平台方案

系统层平台是驱动层程序与任务层软件的运行的舞台,起到承上启下的作用。向上分配各种任务进度,对中断请求进行处理,向下调用各种驱动程序完成具体的驱动任务。基于 MCU 定时中断的前后台操作系统。借鉴嵌入式操作系统的任务调配概念,使用 MCU 内置的 Timer 定时器,驱动运行于前台的一般性程序以及普通中断类程序。当定时中断来临,MCU 转向后台执行实时性要求极高的控制类程序。该方案用更为简单易行的方法模拟了嵌入式操作系统的部分功能,适用于对实时性有一定要求的多任务程序应用场合。

6 实验与分析

6.1 总线通信实验与分析

工业现场总线 Profibus-DP 总线的嵌入能力是该控制器研究的另一特色,必须对该功能加以验证。由于某公司发动机实验室的环境控制系统 PLC 已经封装完善,不便于在其中添加额外的节点,故在其他实验室,利用同样具有 Profibus-DP 总线的西门子 S7-300 系列 PLC 进行 Profibus-DP 的通信实验^[18]。实验设备如表 2 所示。

表 2 中冷控制器 Profibus-DP 总线通信实验设备

设备名称	品牌	数量	基本参数
PG/PC (预装 Win XP)	—	1	—
程序下载线	—	1	通过 MPI 连接 PC 与 PLC
S7-300 系列 PLC	西门子	1	CPU 315-2 DP
Profibus 自制连接线	—	1	1.5 m
STEP 7 v5.2 软件	西门子	1	PLC 编程工具

在进行总线通信调试前,必须根据所开发的从站编写 GSD 文件,以便在西门子 STEP 7 软件组态时使用。GSD 文件是 Profibus 标准要求生产商必须遵守的一个互操作规约和设备描述文件,即 EN50170。GSD 文件内主要包含设备名称、软硬件版本、波特率支持与监控时间等总体说明,以及 DP 主设备相关的连接最大从站能力、与 DP 从站相关的从站类型、I/O 通道数量与类型和诊断数据规格等信息^[19]。

6.2 数据传输可靠性试验

为验证使用总线桥的中冷控制器从站(简称从站)与主站 PLC(简称主站)的数据传输可靠性,在从站与主站中编制特定的数据交换测试程序。

数据交换测试原理如下:每隔一定时间(时间间隔视主站循环时间而定)从站在数据交换区的发送缓冲区中放置 48 Byte 特定且相同的数据,同时提出上传请求。主站在接

收后,将所有数据进行偏置处理(数字增减)。主站将处理后的数据放置于数据交换区的发送缓冲区,并提出下载请求。从站接收回传数据后,进行数据查验、传输次数记录、总数统计与错误数据数量统计等工作^[20]。由于主站循环比从站要慢得多,因而从站在完成统计工作之后进入延时程序,等待与主站进行下一次的交换。主站与从站的上传请求与下载请求均使用 PLC 的数字量输入/输出模块以及单片机的 I/O 引脚。从站与主站的数据发送以及接收程序流程如图 4 所示。

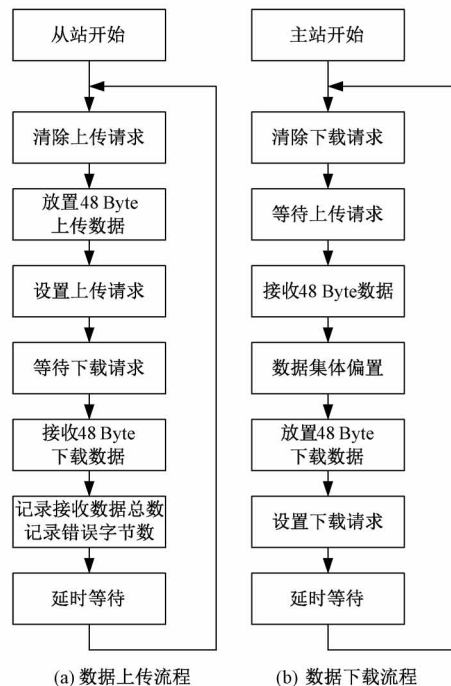


图 4 Profibus-DP 主从站通信可靠性测试程序流程

选用不同的传输波特率进行多次试验,每次以主、从站交换 10^5 次为准,数据交换量与误码量如表 3 所示。

表 3 Profibus-DP 主/从站数据交换测试

测试时长/h	波特率/(Mbit/s)	交换次数	误码量/Byte
1.0	12	100 000	1 128
0.9	6	100 000	0
0.9	1.5	100 000	0

由表 3 可知,系统在 6 Mbit/s 传输速率和自制的 1.5 m 传输线路上进行稳定的数据传输。当传输介质增长后,传输速率应相应的调低,以保证传输可靠性。若需要更高速率的传输,则需要选用 Profibus 专用传输介质。

7 结 论

本文分析了发动机实验室中冷控制系统的基本架构,借鉴现代化、开放式设计经验与模式,研究并开发基于 DSP 和 Profibus-DP 的嵌入式中冷控制器。关于控制器的设

计,得出如下结论。

1)控制器的硬件方面,在条件成熟的场合,将控制器的各种功能独立开来,分别放置于不同的子模块中,各模块间采用串行总线通信。有利于分工合作开发与模拟的独立升级。该模式是现代复杂工业控制器最常采用的设计构架。

2)总线型方案,将模块按照特性与功能规划设计在不同的电路板上。根据功能复杂程度,每块电路板上可能单独设置微处理器,也可能仅仅设置简单的逻辑控制电路。主板与分板之间采用串行接口进行通信。该方案的优势在于模块间相互独立,便于多人协作共同完成产品设计、升级换代容易、维护更换方便。但是会增加设计经费,适用于成熟化的自动化产品设计。

参考文献

- [1] GB 18352.3-2005. 轻型汽车污染物排放限值及测量方法(中国 III、IV 阶段)[S]. 北京:国家环境保护总局,国家质量监督检验检疫总局,2005.
- [2] GB 17691-2005. 车用压燃式、气体燃料点燃式发动机与汽车排放污染物排放限值及测量方法(中国 III、IV、V 阶段)[S]. 北京:国家环境保护总局,国家质量监督检验检疫总局,2005.
- [3] 张俊红,李志刚,王铁宁. 车用涡轮增压技术的发展回顾、现状及展望[J]. 小型内燃机与摩托车,2007,36(1):66-69.
- [4] 李洪东. 一种发动机水冷式中冷器的恒温试验装置开发[C]. 2019 中国汽车工程学会年会论文集(4),2019:136-139.
- [5] 班小强. 基于 PID 的温度控制系统研究与应用[J]. 时代汽车,2020(21):25-26.
- [6] 张宝峰,张耀,朱均超,等. 基于模糊 PID 的高精度温度控制系统[J]. 传感技术学报,2019,32(9):1425-1429.
- [7] 曲兴年,汤书芳,周明胜,等. 浅析发动机与涡轮增压器匹配性能的模拟计算[J]. 内燃机与配件,2020(23):21-22.
- [8] 韩乐. 车载混合储能动力系统功率最优分配策略研究[J]. 国外电子测量技术,2020,39(10):94-98.
- [9] 李万方. 基于 Profibus-DP 现场总线技术的电气改造设计研究[J]. 粘接,2019,40(9):30-34.
- [10] 李路. 基于 Profibus-DP 的中继器模块设计[D]. 西安:西安电子科技大学,2014.
- [11] 陈佳楠,马永涛,李松,等. 嵌入式存储器动态故障诊断数据压缩设计[J]. 电子测量与仪器学报,2020,34(7):203-209.
- [12] 王香梅. 基于伺服定位中冷控制系统的控制算法[J]. 兰州工业学院学报,2015,22(2):56-61.
- [13] 梁志勋,闭吕庆. 基于 CPLD 的倒车防撞系统设计[J]. 电子设计工程,2018,26(15):6-10,14.
- [14] 王香梅. 基于 MATLAB 的中冷控制器温度控制算法[J]. 电子测试,2014(24):78-79.
- [15] 滕飞. 基于现场总线的多变量系统自适应模糊控制研究[D]. 北京:北京化工大学,2010.
- [16] 马文鲁. 发动机管带式中冷器设计优化软件平台开发[D]. 武汉:华中科技大学,2018.
- [17] 宋一萍. 西门子 PROFIBUS-DP 总线在铸造静压线上的应用[J]. 拖拉机与农用运输车,2011,38(4):38-41.
- [18] 鲁斌,林定君,洪红,等. 基于 FPGA 的 UDP/IP 网络故障排除方法[J]. 电子测量技术,2020,43(22):150-154.
- [19] 宋连庆,梁鹏飞,王纪臣,等. 基于 FPGA 的 PROFIBUS-DP 从站实现[J]. 电子设计工程,2016,24(3):69-71,75.
- [20] 牛刚,曹雪杰,秦肖肖,等. 高速列车双通道速度传感器故障检测与隔离研究[J]. 仪器仪表学报,2019,40(1):158-165.

作者简介

王香梅,工程硕士,副教授,主要研究方向为电气控制工程。

E-mail:674772521@qq.com

薛英龙,高级工程师,主要研究方向为机械设计及自动化。

E-mail:2567321413@qq.com