

柴油机进气加温控制系统软件设计

姚素娟¹, 刘海瑞², 王刚², 况涪洪¹, 周慧芳¹, 邢璐¹

¹中国北方发动机研究所, 天津

²陆军装备部驻天津地区军事代表室, 天津

收稿日期: 2022年6月13日; 录用日期: 2022年8月15日; 发布日期: 2022年8月24日

摘要

针对柴油机低温起动过程中对进气加温装置的控制需求, 设计了基于单片机80C51F040的柴油机进气加温控制系统软件, 通过采集进气温度、大气压力、供电电压、电热塞电流等模拟量参数, 对电磁泵、电热塞、风机等加温执行部件进行协同控制, 实现加温装置在不同环境和工况下电热、供油、进气优化匹配, 各执行部件高效、有序、可靠运行。文中详细阐述了系统总体构成、软件构架、软件功能模块的设计思路及流程。软件设计过程中采用层次化、模块化设计理念; 创新双电热塞驱动功率器件热负荷控制技术、起动加温过程风/油/电协同调控技术等关键技术。软件设计完成后通过检测工装进行试验, 经验证软件能控制进气加温系统有效可靠运行, 满足使用需求。

关键词

柴油机, 进气加温, 软件设计

Software Design of Diesel Engine Intake Air Heating Control System

Sujuan Yao¹, Hairui Liu², Gang Wang², Fuhong Kuang¹, Huifang Zhou¹, Lu Xing¹

¹China North Engine Research Institute, Tianjin

²Military Representative Office, The Army Equipment Department in Tianjin Area, Tianjin

Received: Jun. 13th, 2022; accepted: Aug. 15th, 2022; published: Aug. 24th, 2022

Abstract

According to the control requirements of the intake air heating device which works during the starting process of the diesel engine in a low-temperature environment, the software used for the intake air heating control system of the diesel engine is built based on a C8051F040 single-chip. By collecting several analog parameters such as the intake air temperature, atmospheric pressure,

power supply voltage and glow plug current, the heating components (electromagnetic pump, glow plug and fan) are controlled cooperatively to achieve heating, oil supply, and intake air matching, to make every actuator work efficiently, orderly and reliably. This paper describes in detail the overall composition of the system, software architecture, software function module design ideas and processes. During the software design process, hierarchical and modular design concepts are adopted, and innovative technologies like heat load management of dual glow plug driving power devices and wind/oil/electricity regulation coordinately are used. After the software design is completed, the test is carried out by the inspection tooling. It is verified that the intake air heating device works well under the control of software, which meets the use requirements.

Keywords

Diesel Engine, Intake Air Heating, Software Design

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在低温环境特别是在高原低气压环境下工作的车辆,经常会遇到柴油发动机冷起动困难的问题,并且在起动以后工作也很不稳定。造成上述问题的主要原因就是发动机工作环境温度过低,使得气缸内温度过低,压缩终了的空气温度与压力降低,柴油黏度增大,流动性、蒸发性和喷雾特性变差,造成发动机冷起动困难或工作不稳定[1][2]。进气加温技术的引入,可有效解决该问题,提升柴油机低温起动能力。目前国内外柴油机多采用电热格栅式加温装置,即通过电-热转换元件(电热塞或电热丝),对进入气缸的混合气进行加热,把电能转化为热能[3],其结构简单,安装方便,但限于电池容量,最大加热功率有一定限制,不适用于大功率柴油机。因此,研制开发了火焰式进气加温系统,系统执行部件由电热塞、供油电磁泵、风机组成,采用在进气道内加热电热塞点燃柴油的方式,使高温燃气与低温进气混和,进而提高气缸的进气温度,实现缸内燃烧环境的优化[4],其电功率较小,对电池容量要求较低,适合大功率柴油机使用。本文设计的加温控制软件即运行于该套加温系统中,采集各路传感器信号,判断进气加温系统工况,控制电热塞、风机、电磁泵工作,实现电热、供油、进气优化匹配,保障加温系统有效、可靠地运行,从而提升进气温度,解决大功率柴油机高原低温环境冷起动困难、活塞烧蚀等问题。

2. 系统总体构成

进气加温控制系统以单片机 80C51F040 为核心完成进气加温控制任务,该单片机内部有 12 位转换精度的 ADC,用来采集电源电压信号、大气压力信号、电热塞电流信号、后热开关信号等模拟量信号;依据采集信号对加温条件及状态进行判断,驱动左、右排电热塞、电磁泵、风机、指示灯工作,完成进气加温功能,单片机具备 RS232 通讯口,可与监控装置进行串行通讯,显示进气加温系统的运行状态。系统组成图如图 1 所示。

3. 软件构架设计

进气加温控制系统软件设计采用层次化、模块化的软件架构,可分为:驱动层、应用层(控制模块、诊断模块、监控模块)。驱动层位于软件最底层,主要完成直接对 ECU 的硬件资源的调度及硬件接口关

联。应用层基于驱动层之上，通过调用驱动层的功能函数来操作硬件，该层包括控制算法模块、故障诊断模块、监控标定模块三部分，如图 2 所示。

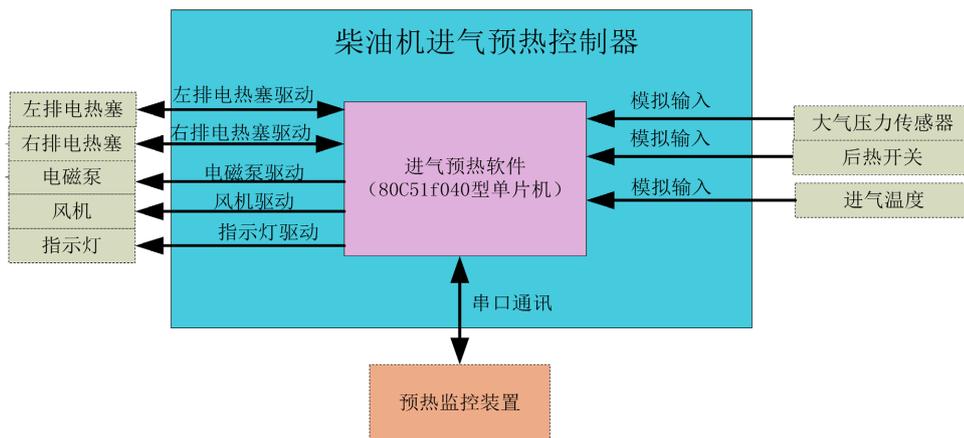


Figure 1. Composition diagram of intake air heating system
图 1. 进气加温系统组成图



Figure 2. Software structure design diagram
图 2. 软件结构设计图

3.1. 驱动层软件

驱动层软件包括模块驱动例程和存储资源分配模块两个部分。模块驱动例程由一系列寄存器设置和参数读取函数组成，它将硬件接口变为函数接口，为上层软件的模块化奠定基础[5]。存储器资源管理模块由一系列配置文件和接口函数组成，实现对各种类型存储器的地址分配和对读取、擦除等基本操作的支持。

3.2. 应用层软件

应用层软件针对进气预热系统的用户需求，分为控制算法模块、故障诊断模块、串口通讯模块三部分。控制算法模块通过判断系统工况以及采集的传感器数据驱动执行器工作，辅助发动机顺利起动，该模块又分为信号采集模块、驱动控制模块、工况状态机模块三个子模块。故障诊断模块主要对关重部件故障进行诊断上报。串口通讯模与预热监控装置进行通讯，参实现数标定修正以及系统状态监控。

4. 软件功能模块设计

4.1. 信号采集模块设计

信号采集模块主要实现对进气加温控制系统的各模拟量：进气温度、大气压力、柴油压力、电热塞

电流进行采集、计算。

单片机采用查询的方式对各通道模拟信号进行 AD 转换, 信号采样周期设置为 100ms。采集通道 0-5, 获取各模拟信号 AD 值。

ADC 的参考电压选用外部电压基准 2.5V, 结合传感器的硬件调理电路输出信号范围, 对 AD 值进行超上限与低于下限判断[6]。程序中将信号的 AD 值与传感器的正常范围进行比较, 如果连续检测采集信号值在范围之外超过 5 次则认为该 AD 值异常, 对应传感器的物理值采用默认值; 当采集 AD 值在正常范围内时, 依据对应电路原理计算传感器实际物理值。信号采集模块流程见图 3。

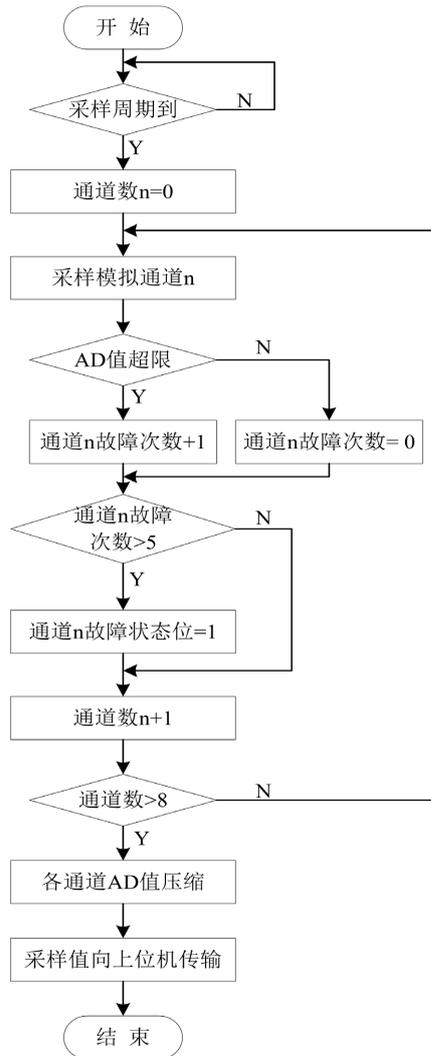


Figure 3. Flow chart of signal acquisition

图 3. 信号采集模块流程图

4.2. 驱动控制模块设计

驱动控制模块输出 PWM 信号, 控制系统的执行部件: 电热塞、风机、电磁泵工作。电热塞作为进气加温装置的关键执行部件之一, 对工作电压较为敏感。电压越高, 功率越大, 其表面温度越高, 越易着火, 但电热塞内部钨丝也越易蒸发、熔断而最终断路。反之, 电压越低, 功率越小, 其表面温度越低,

内部钨丝不易产生断路,但难以着火。柴油机车体供电电压常规为 28VDC,但低温环境启动时,电压常降到 16VDC,为保证电热塞在低电压工作的功率输出,保障柴油机的低温启动性能,选用了额定电压为 12VDC 的电热塞。若采用传统直流电压控制方式,因工作电压大于额定电压,容易导致电热塞因表面温度过高而熔断。本文通过大量的基础试验,摸清电热塞的电气特性后,创新采用 PWM 控制方式,通过调节 PWM 输出的频率和占空比,对预热塞工作电压、通电时间、断电时间等参数进行匹配,可以使电热塞在车体供电的全电压范围内都能达到需要的点火功率,同时能够稳定、可靠的工作,不被烧毁。

设计上采用单片机内置的 PCA 模块,它需要较少的 CPU 干预,每个模块都可以独立地用于在对应的 CEXn 引脚产生脉宽调制(PWM)输出。本设计采用 8 位脉冲宽度调制器方式,即当 PCA0 计数器/定时器的低字节(PCA0L)与 PCA0CPLn 中的值相等时,CEXn 的输出为高电平。当 PCA0L 中的计数值溢出时,CEXn 输出被置为低电平,见图 4。当计数器/定时器的低字节 PCA0L 溢出时(从 0xFF 到 0x00),保存在计数器/定时器高字节(PCA0H)中的值被自动装入 PCA0CPLn,不需软件干预。可通过配置 PCA0 计数器/定时器的时基以及 PCA0CPHn 的值,改变输出 PWM 信号的占空比,计算公式如下:

$$\text{占空比} = \frac{(256 - \text{PCA0CPHn})}{256}$$

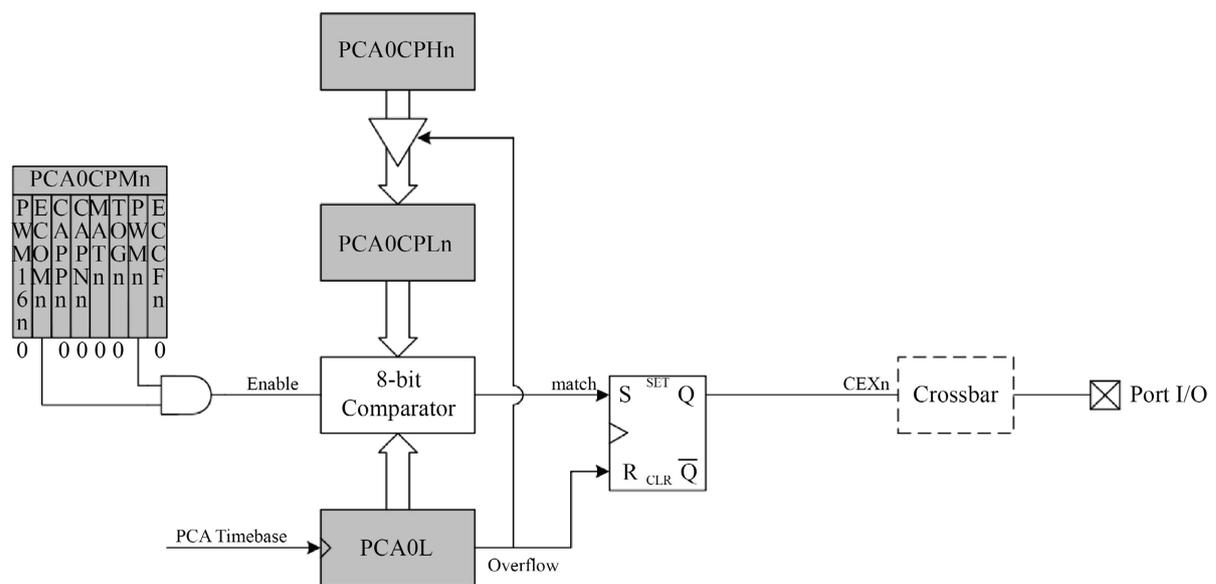


Figure 4. Schematic diagram of PWM signal output
图 4. PWM 信号输出原理图

4.3. 工况状态机模块设计

工况判断模块根据信号处理模块反馈的输入信息完成对进气加温系统工况的判断,并依据预设状态机,控制执行部件进行相应操作。该模块设计为 50 ms 定时执行,以保证工况状态及执行部件参数的及时更新。根据使用需求,设计状态机包含初始化、电热塞预热、提示启动、火焰预热、等待再次预热、系统休眠、冷却、故障状态共种工况,工况状态转换图见图 5,工况见状态转化条件见表 1。

4.4. 故障诊断模块设计

电热塞为系统的关键且易损部件,能够对其精准、及时的进行故障诊断是设计的关键点之一。电热

塞发生短路故障时，CPU 收到电路的外部中断信号，软件需要及时捕获该信号，且尽量避免误判，策略上采用时间窗口计数法，在外部中断子程序里设置计数器，来一次中断计数器加 1，计时 100 ms 判断累加值，若该值大于 20，则判定电热塞过流，切换工况为休眠状态。诊断策略流程图如图 6。因电热塞刚上电电路较大，设计上可考虑延迟外部中断打开时间。

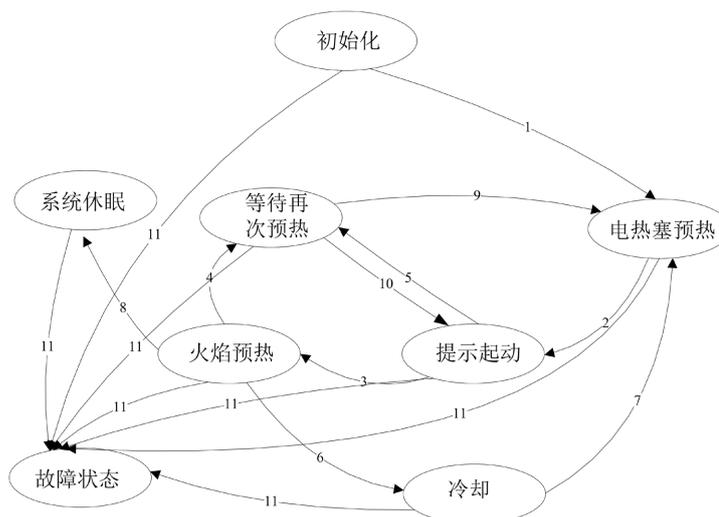


Figure 5. Working condition state transition diagram
图 5. 工况状态转换图

Table 1. State transition condition
表 1. 状态转化条件

编号	转换条件
1	完成底层驱动及变量初始化，且进气温度值 $\leq 15^{\circ}\text{C}$ ，高门限温度高于低门限温度
2	电热塞预热 40 s 结束
3	油压 $> 10\text{ kPa}$
4	进气温度值 $>$ 加温高门限时，或油压 $> 300\text{ kPa}$ ，或油压 $< 10\text{ kPa}$
5	60 S 后，油压 $\leq 10\text{ kPa}$
6	火焰预热 50 s 后，连续点火失败(火焰温度信号电压值 $\leq 10\text{ mV}$)次数 < 3
7	冷却时长 10 s，且高门限温度高于低门限温度
8	火焰预热 50 s 后，连续点火失败(火焰温度号电压值 $\leq 10\text{ mV}$)次数 ≥ 3 电热塞反馈信号收到 3 次
9	$40\text{ kPa} < \text{油压} \leq 300\text{ kPa}$ 且进气温度值 \leq 加温低门限时，高门限温度高于低门限温度 (前提：条件 4 “油压 $> 300\text{ kPa}$ ”，进入“等待再次预热”状态)
10	油压 $< 10\text{ kPa}$ 且火焰预热状态首次进等待预热状态 (前提：条件 4 “油压 $< 10\text{ kPa}$ ” 进入“等待再次预热”状态)
11	进气温度传感器故障或火焰温传感器故障或油压传感器故障

4.5. 串口通讯模块设计

进气加温系统可通过串口与预热监控装置进行通讯，采用一问一答模式，加温系统接收预热装置命

令，根据命令传输采集参数、预热状态等，并可根据需求对部分参数进行标定修改，为保证通讯速率，波特率配置为 115200 kbps。

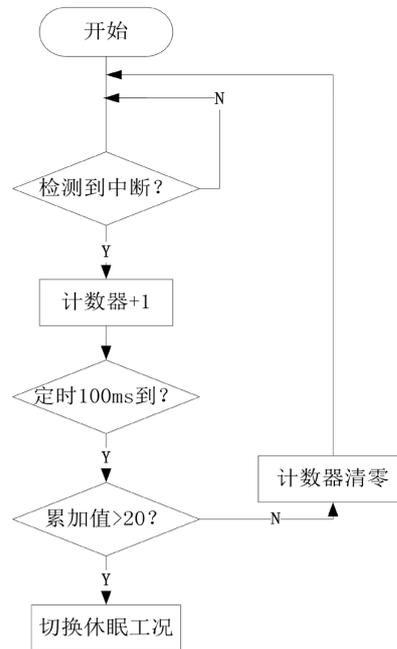


Figure 6. Flow chart of electric blockage diagnosis strategy
图 6. 电热塞故障诊断策略流程图

通讯协议设置 1、2、4 三个命令字，命令字 1 读指定单元实时数据，命令字 2 对指定单元数据进行写修改，命令字 4 读取实时数据：

命令字 1 读指定单元实时数据：

预热监控装置：(发送个数 = 4)

$0xAA + 1 + \text{发送个数} + \text{地址低} + \text{地址高} + \$$

电控盒回应：(发送个数 = 7)

$0xAA + 1* + \text{发送个数}* + \text{地址高}* + \text{地址低}* + \text{数据高}* + \text{数据低}* + \text{累加和} + \$$

其中累加和为标注*的数据(BYTE)累加，进位数自动溢出。

命令字 2 对指定单元数据进行写修改：

对话盒/PC 命令：(发送个数 = 7)

$0xAA + 2* + \text{发送个数}* + \text{低至高}* + \text{地址低}* + \text{数据高}* + \text{数据低}* + \text{累加和} + \$$ ，其中累加和为标注*的数据(BYTE)累加，进位数自动溢出。

电控盒回应：0xAA (接收正确) 0X55 (接收错误)

命令字 4 对实时数据的成组读取：

对话盒/PC 命令：(发送个数 = 4)

$0xAA + 4 + \text{发送个数} + \text{地址低} + \text{地址高} + \$$

电控盒回应：(发送个数 = 26)

$0xAA + 4* + \text{发送个数}* + \text{XXH}* + \dots + \text{XXH}* + \text{累加和} + \$$ 。

5. 试验验证

为验证软件设计的可靠性和稳定性，将调试好的进气加温系统连接进气加温检测工装。通过检测装置面板的传感器拨码开关，模拟不同的传感器输出值，从而使进气加温系统工作在不同的加温工况，检测装置屏幕可显示采集的传感器信号、加温工况，面板指示灯可指示执行部件运行情况，部件运行时对应指示灯亮，停止对应指示灯灭，如图 7、图 8 所示。



Figure 7. Intake air heating detection tooling test verification 1
图 7. 进气加温检测工装试验验证 1

图 7 中进气温开关拨至下限，油压开关拨至下限，火焰温度 A、B 开关拨至正常，接通电源开关，电热塞指示灯亮，预热指示灯亮，屏幕显示进气加温系统进入前热工况。



Figure 8. Intake air heating detection tooling test verification 2
图 8. 进气加温检测工装试验验证 2

图 8 中油压开关拨至正常，预热指示灯熄灭，风机 1、电磁阀指示灯亮，屏幕显示进气加温系统进入火焰预热工况。

通过多种输入组合，多轮次反复试验验证，柴油机进气加温系统软件完全满足预热功能需求，运行高效稳定，可靠性强。

6. 结束语

本文设计了进气加温系统软件，运行于柴油机进气加温系统中，采集传感器信号，控制系统执行部件高效有序的工作，从而提升进气温度，解决柴油机高原低温环境冷起动困难、绕山不稳定等问题。本

文详细介绍了软件构架、控制策略、参数匹配、功能模块设计,并用进气加温检测装置对设计的软件进行了试验测试,经验证设计的加温控制软件响应迅速、运行稳定、具备故障检测及保护功能,可保障加温系统有效、可靠的运行。

参考文献

- [1] 张俊,王宇,杨天军,等.不同进气加温方式对柴油机低温起动性能影响试验研究[J].内燃机,2020(5):43-45.
- [2] 陈月春,李兰菊,王霞,等.某型号柴油机低温起动性能优化[J].内燃机与动力装置,2021,38(2):63-67.
- [3] 陈月春,耿国芳,李兰菊,等.不同进气预热装置对柴油机起动性能的影响研究[J].客车技术与研究,2021,43(1):23-25+48.
- [4] 阎智慧,顾善愚.柴油发动机高原低温启动试验研究[C]//中国内燃机学会.中国内燃机学会2005年学术年会论文集.2005(10):303-306.
- [5] 童长飞.C8051F系列单片机开发与C语言编程[M].北京:北京航空航天大学出版社,2005.
- [6] 王宪成,张根良,和穆,等.车用柴油机技术状态数据实时采集系统设计[J].车用发动机,2011(4):23-26.