

基于软硬件复用的柴油机控制策略研究*

韦雄 冒晓建 肖文雍 祝轶卿 卓斌
(上海交通大学机械与动力工程学院, 上海 200240)

【摘要】对怠速微调 (ISA)、额外动力输出 (PTO) 和巡航 (CCS) 功能进行了可复用分析; 基于软、硬件复用设计了相应的控制算法, 成功地在 GD 电控柴油机上实现了 ISA、PTO 和 CCS 控制功能; 通过硬件在环仿真和整车道路实验, 对控制算法进行了验证。实验结果表明, ISA、PTO 和 CCS 功能互不干扰, 控制效果理想。采用该方法, 有效节省了 ECU 的软硬件资源, 减少了开发中的重复劳动, 降低了系统成本, 从而提高了产品对市场的适应能力。

关键词: 柴油机 电控 控制策略 软硬件复用
中图分类号: TK421.6 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2011)09-0040-05

Control Strategy of Diesel Engine Based on Software and Hardware Reusability

Wei Xiong Mao Xiaojian Xiao Wenyong Zhu Keqing Zhuo Bin
(School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract

First of all, the control commons of idle speed adjust (ISA), power take off (PTO) and cruise control system (CCS) were concluded; and then, ISA, PTO and CCS were designed based on the software and hardware reusability and were successfully realized on GD electronic controlled diesel engine; last but not the least, the control strategies were verified on the hard in loop (HIL) bench and further on vehicle test, whose result demonstrated that the control functions based on software and hardware reusability would not affect with each other and have a satisfactory control result. By using this method, not only the duplication effort can be avoided, but the development cost can also be cut.

Key words Diesel engine, Electronic control, Control strategy, Software and hardware reusability

引言

随着柴油机电子控制技术研究的深入和电控柴油机应用范围的扩展, 电控系统的功能已经不仅限于柴油机燃油喷射系统, 而是越来越多的整车控制, 因此新功能的开发必须充分考虑 ECU 有限的软硬件资源。目前, 功能的开发普遍采用传统独立的开发模式, 即每一个控制问题都是以其独立的方式和方法解决的。这种开发模式不仅导致系统的封闭性, 同时也使软件开发效率低, 重复劳动严重, 产品成本高^[1]。本文基于软硬件复用, 对怠速微调 (ISA)、额外动力输出 (PTO) 和巡航 (CCS) 控制功能进行开发。

1 功能需求与可复用分析

1.1 3 种功能定义与共性分析

怠速微调 (idle speed adjust, 简称 ISA) 功能允许驾驶员在怠速工况时, 通过仪表盘上的微调开关手动调节目标怠速转速, 并且调整的结果适用于以后的发动机运行过程。

额外动力输出 (power take off, 简称 PTO)^[2] 功能允许驾驶员在一定的车速以下, 通过开关控制, 使发动机进入固定转速运行模式, 以满足车轮以外的其他动力输出需求。可以对目标转速进行调节, 以满足变化的动力输出要求。

巡航控制 (cruise control system, 简称 CCS)^[3]

收稿日期: 2010-09-18 修回日期: 2010-10-29
* 国家高技术研究发展计划 (863 计划) 资助项目 (2008AA110101)
作者简介: 韦雄, 博士生, 主要从事电控柴油机电子控制研究, E-mail: weixiong6616398@126.com

功能允许在一定的车速范围内,由 ECU 智能地闭环控制车速,使车辆进行定速运行,此功能同时支持对预定的车速进行加减速的手动调节。

对比 3 种功能,可以总结出其共性如下:都支持外部开关调节发动机转速或车速;转速范围或车速范围都有一定的限制;对目标转速或目标车速都需要进行闭环控制,使发动机稳定在某一工况工作。

提炼 3 种功能相同的子功能,可以发现它们在开关信号处理、目标转速或车速(在模块内部根据当前挡位的车速转速比将车速转换成转速)计算、发动机转速的闭环控制 3 个方面具有几乎完全一致的操作和计算需求。因此,只需要根据它们的工作范围不同设计一个“激活/退出条件判断”环节就可以使大部分的控制策略和软件流程得到复用。

1.2 复用控制流程的设计

根据以上分析,建立了怠速微调、PTO 和巡航控制 3 种功能的联合控制策略,其控制流程如图 1 所示。

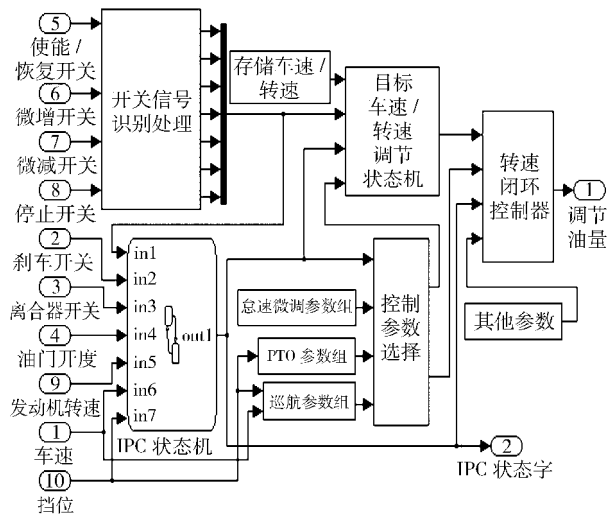


图 1 怠速微调/PTO/巡航控制联合控制策略总框图
Fig.1 Simulink model of joint control for ISA/PTO/CCS

“开关信号识别处理”模块对开关信号进行处理。根据开关输入、驾驶员指令以及发动机本身运行工况,通过“联合控制模式状态机”判断当前功能模式。不同功能模式对应的发动机及车速运行范围不同,因此要选择不同的控制参数组,如目标怠速调整偏移量或目标转速等。一旦退出当前功能模式,则状态机中止工作,所有设定参数被清零;运算后得到的调整值被赋予给相应功能的目标转速或转换成车速进行保存或舍弃。下一次如果进入了另一个功能模式,则在“目标转速计算状态机”的初始状态,该功能对应的设定参数组就会被调入,这样就保证了 3 种功能的设定参数不会互相混淆使用,而状态

机却可以复用。“目标车速/转速调节状态机”根据控制开关组的信号,基于当前功能模式的控制参数,对目标车速或转速进行计算和限制。针对目标转速采用 PI(比例积分)控制器进行闭环控制,输出结果通过电控喷油系统实现发动机油量调节。

2 功能实现

2.1 复用开关组的设计

如果每种功能都单独配备一组开关,不但在仪表盘上无法布置且增加成本,而且电控单元 ECU 也要增加额外的输入端口。因此本文考虑开关复用,采用四键制开关^[4~5],包括恢复、停止和调整 +/ -,如表 1 所示。从表中可以看出,每个开关在 3 个不同的功能中所起的作用几乎相同,具有很强的共性,因此符合开关复用的基本条件。

表 1 怠速微调/PTO/巡航控制开关组特性对比
Tab.1 Comparison of switch group characteristics for ISA/PTO/CCS

	开关 1	开关 2	开关 3	开关 4
怠速微调	使能		调整 +	调整 -
PTO	使能		调整 +	调整 -
巡航控制	恢复	停止	调整 +	调整 -
共性	使能	退出条件	微增	微减
差异	无	巡航控制必需此开关		无

另一方面,既然采用了开关复用,那么就必須使其当前功能唯一化,也就是说怠速微调、PTO 和巡航控制必须在任意时刻只能处于三者之一的功能模式下。3 种功能有各自的激活条件,任何工况均只有其中之一可能被激活,因此复用开关在使用时只可能作用于当前功能,不可能影响另外 2 个功能。

2.2 基于发动机工作区域分析的模式状态机

表 2 分别对 3 种功能适用工况进行比较分析,3 种功能的控制对象都是发动机转速,但是它们的适用范围却是不同的。另外,怠速微调和 PTO 时都要求电子油门不响应且发动机处于怠速状态,而巡航控制则没有此要求。最重要的是 3 种功能的适用车速范围不同,怠速微调要求车辆必须处于驻车状态,PTO 则只允许车辆在 0 ~ 35 km/h 的车速范围(包括驻车)内启用。然而,巡航控制对车速的要求是大于 35 km/h。

利用车速作为激活条件可以有效地区分巡航控制模式与另外 2 种功能,而怠速微调和 PTO 的区分需增加一个额外判断条件——刹车开关。对此设计了专门控制 3 种功能各自的进入和退出条件,以及它们之间的模式切换的联合控制模式状态机,如

图 2 所示,其中各状态含义在表 3 列出。

表 2 怠速微调/PTO/巡航控制的适用工况对比

Tab. 2 Comparison of applied condition for ISA/PTO/CCS			
	怠速微调	PTO	巡航控制
用途		原地动力输出	
	原地调整目	作业	较高车速的
	标怠速	低速行驶动力	定速行驶
		输出	
适用转速/ $r \cdot \min^{-1}$	700 ~ 1 400	1 100 ~ 2 100	900 ~ 3 100
适用工况	怠速	怠速/加速	加速
适用车速/ $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$	≤ 0	≤ 35	> 35

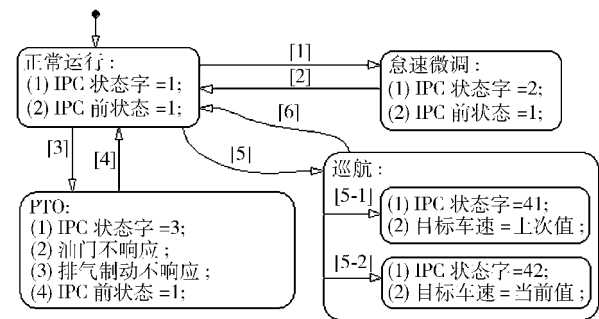


图 2 怠速微调/PTO/巡航控制联合控制状态机

Fig. 2 State machine of joint control for ISA/PTO/CCS

表 3 怠速微调/PTO/巡航控制的联合控制模式状态机各状态

Tab. 3 States of joint control for ISA/PTO/CCS	
功能模式	描述
正常运行	初始化,每次 ECU 上电后或退出各种功能模式后则处于该状态
怠速微调	发动机必须处于怠速,车辆必须处于驻车;以当前怠速作为起始调整怠速
PTO	车速小于等于 30 km/h 时被允许,以 1 400 r/min 作为起始转速
上次车速进入巡航	当激活条件满足,按使能开关进入,且非第一次
当前车速进入巡航	第一次进入时,按使能、微增或微减任意一开关;当激活条件满足且非第一次时,按微增或微减开关进入

以巡航控制为例,分析其激活条件的设计,主要包括如下要点:发动机处于怠速或运转状态,且发动机转速介于 900 ~ 3 100 r/min。车速传感器正常,并且车速大于 35 km/h。刹车开关无故障,且不踩刹车,刹车处于断开状态。离合器开关无故障,且不踩离合器,离合器开关处于结合状态。巡航开关组无故障,使能开关或微增、微减开关之一闭合。

另外,巡航控制模式设计了 2 种进入方式:只要是第一次进入巡航,则使用当前车速作为巡航车速。

点动使能开关激活且非第一次进入巡航时,使用上一次退出时的巡航车速。

之所以第一次进入巡航模式都采用当前车速作为巡航车速,是出于安全性的考虑,避免驾驶员在不知道上一次巡航车速的情况下进入巡航,导致车辆出现非预期且不可控的自动加速。

3 种功能模式互相之间不能直接切换,这是为了避免当车速或发动机转速在边界值附近变化时,功能模式不稳定,而成不受控的自动变化。因此任何一个功能模式相对于初始状态只有一个进口和出口,这也是采用点动开关作为使能开关的原因所在。

2.3 基于有限状态机的目标转速控制算法

3 个功能都允许在一定范围内调整发动机当前转速。由于发动机转速的状态是唯一的,因此根据开关对目标转速的调节算法可以利用有限状态机来实现。

首先,目标转速计算:①怠速微调:当前目标怠速为正常标定怠速加上微调偏移量。②PTO 模式:当前目标转速为初始 PTO 转速加上微调偏移量。③巡航控制:当前目标车速对应转速为上一次对应转速加上微调偏移量。

由于正常标定怠速和初始 PTO 转速都是固定的标定参数,上一次目标车速也是一个存储值,因此实际上根据控制开关进行微调的部分就是“微调偏移量”,3 种功能针对此“偏移量”的调整计算具有共性。

其次,恢复模式:①怠速微调:支持一键恢复,即重新上电后长按使能开关 2 s 以上再松开即可由当前怠速恢复到出厂的标定怠速。②PTO 模式:无。③巡航控制:处于巡航过程中,加速提挡后,点动恢复(使能)开关即可再次进入巡航,且自动恢复到之前的目标车速对应转速。

恢复模式可根据当前转速或车速与之前的目标值的大小关系,分为“从高到低的恢复”和“从低到高的恢复”2 种模式。

根据以上可复用性分析,设计的状态机^[6~7]如图 3 所示,下面以巡航控制为例,说明在目标转速(根据当前挡位对应的车速转速比将车速转换为转速)调整过程中各状态的切换条件及动作:

(1)从“初始”状态,该功能模式对应的设定参数组被调入,点动恢复开关,同时当前挡位下车速对应的转速高于上次目标转速,经过“从高到低的恢复”状态确认后,回到“保持”状态。

(2)从“初始”状态,点动恢复开关,同时当前挡位下车速对应的转速低于上次目标转速,经过“从低到高的恢复”状态确认后,回到“保持”状态。

(3)按下调整 + 开关,进入“提速”状态,目标转速以每秒2 km/h (根据当前挡位对应的车速转速比进行转换)的速率持续上升。

(4)松开调整 + 开关,或者持续上升的目标转速已经达到最高限制,则经过“从低到高的恢复”状态确认后,回到“保持”状态。

(5)长按调整 - 开关,进入“降速”状态,目标车速以每秒1.6 km/h (根据当前挡位对应的车速转速比进行转换)的速率持续下降。

(6)松开调整 - 开关,或者持续下降的目标转速已经达到最低限制,则经过“从高到低的恢复”状态确认后,回到“保持”状态。

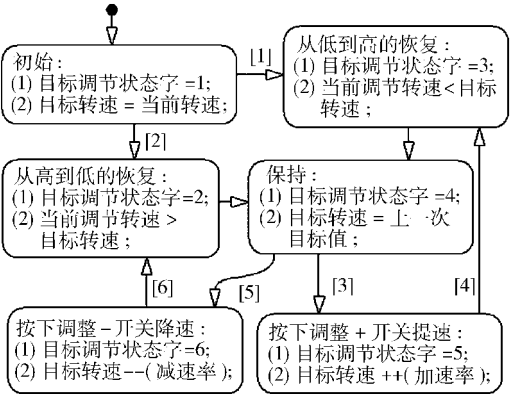


图3 怠速微调/PTO/巡航控制的目标转速调节状态机
Fig. 3 State machine of target speed for ISA/PTO/CCS

2.4 闭环控制器

由于合理设计了联合控制模式状态机,3种功能具有排它性(即每个时刻只有一种功能在起作用),为闭环控制器的复用提供了可能,即只需根据当前不同功能选取不同的初始值、目标调整值和比例积分增益参数组。

复用的闭环控制算法如图4所示,转速偏差为目标转速与当前转速之差,算法根据相应的比例和积分增益参数,计算比例和积分两部油量,其中积分油量的计算需要满足一定的使能条件,否则积分将被冻结。以巡航控制为例,积分的激活条件为:车速差为正(即当前车速低于目标车速)。最终计算得

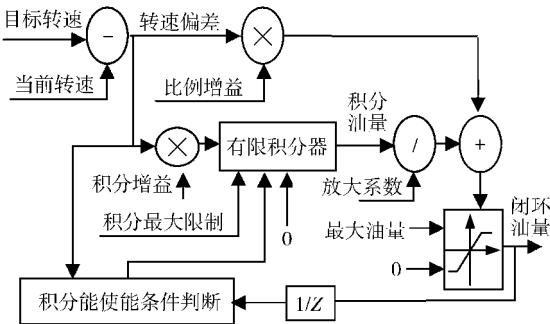


图4 怠速微调/PTO/巡航控制的闭环控制器
Fig. 4 Close loop controller for ISA/PTO/CCS

到的闭环油量经过最大、最小值限制后输出。

3 仿真与实验

基于硬件在环实验台和配备GD电控高压共轨系统的YC6J实验车,对控制算法进行了验证。

如图5所示为硬件在环的仿真结果,图中在各种使能条件满足的情况下,分别使能怠速微调、PTO和巡航功能。结果表明,3种功能模式互相之间不能直接切换,功能之间互不关涉,达到了预期的设计目标。

图6~8为控制算法在整车道路实验的验证结果。图6为怠速微调功能的控制效果,在驻车状态下使能怠速微调功能,并微增、微减调速目标怠速,

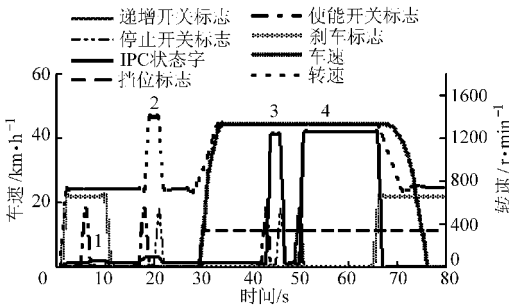


图5 怠速微调/PTO/巡航控制硬件在环仿真结果
Fig. 5 Simulation result of ISA/PTO/CCS control
1. 怠速微调使能 2. PTO 使能 3. 以上次车速开始巡航
4. 以当前车速开始巡航

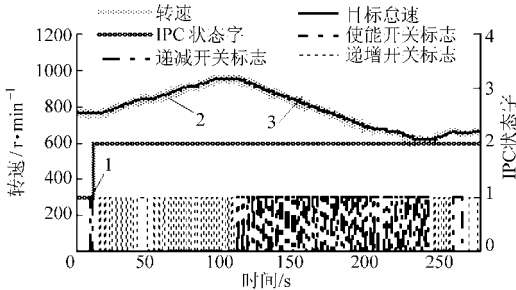


图6 怠速微调整车道路实验结果
Fig. 6 Result of road test for ISA
1. 功能使能 2. 微增调节 3. 微减调节

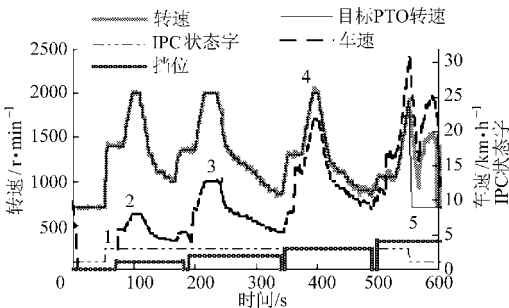


图7 PTO整车道路实验结果
Fig. 7 Result of road test for PTO
1. 功能使能 2. 1挡PTO 3. 2挡PTO 4. 3挡PTO 5. 4挡PTO
车速超高功能退出

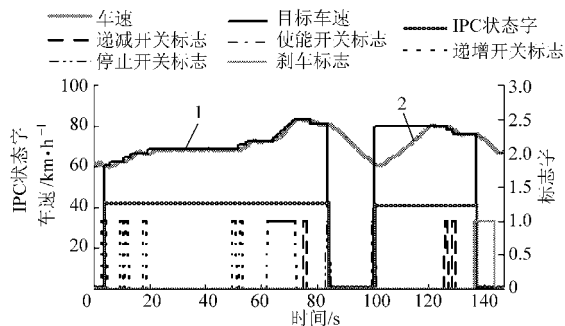


图8 巡航整车道路实验结果

Fig. 8 Test result of CCS

1. 以当前车速开始巡航,微增调整目标车速
2. 以上次车速开始巡航,微减调整目标车速

此时发动机转速迅速平稳地跟随目标怠速而变化。图7为PTO功能分别在1挡、2挡、3挡和4挡下使能的控制情况,在各挡位下,调整PTO目标转速时发动机转速随目标转速的变化迅速而平稳,控制效果理想,当处于4挡时,由于车速超过使能范围而强

制退出PTO功能。图8所示为巡航功能的控制效果,图中分别以当前车速和上次车速使能巡航功能,并实时调整目标车速,无论是在使能还是调速瞬间,实际车速都能迅速平稳过渡到目标车速。

4 结论

(1)在对怠微调、PTO、巡航控制进行模块化和可复用分析的基础上,以花费最小的软硬件资源代价,在GD电控柴油机上实现了怠速微调、PTO和CCS控制功能。硬件在环仿真和整车道路实验结果表明,基于软硬件复用的怠速微调、PTO和CCS控制功能互不干涉,控制效果理想,满足了实际的使用要求。

(2)控制算法具有较好通用性和标准的接口,使模块具有良好的可复用性,在不同控制功能中反复调用,减少了开发中的重复劳动,降低了系统成本,提高了产品对市场的适应能力。

参考文献

- 1 魏仁选,周祖德. 制造控制系统的软件构件模型[J]. 计算机工程,2004,30(12):48~50.
Wei Renxuan, Zhou Zude. Software component model for manufacturing controlling system[J]. Computer Engineering, 2004, 30(12):48~50. (in Chinese)
- 2 Demmin D M, Hallman Eric. Power take-off (PTO) safety[R]. Department of Agricultural and Biological Engineering, Cornell University, New York, 2009.
- 3 Anthony Spiteri Staines. Modeling and analysis of a cruise control system[J]. International Journal of Electrical and Computer Engineering, 2008,3(10):652~656.
- 4 诺莱斯 D. 汽车计算机控制系统[M]. 钱志鸿,译. 北京:机械工业出版社,1998.
- 5 潘旭峰. 现代汽车电子技术[M]. 北京:北京理工大学出版社,1998.
- 6 ETAS GmbH. ASCET V5.0 user's guide[S]. ETAS GmbH, Stuttgart, Germany, 2008:145~150.
- 7 Darid Harel. Statecharts: a visual formalism for complex systems[J]. Science of Computer Programming, 1987,8(3):231~274.

(上接第112页)

- 5 陆伟刚. 泵站拍门断流的力学特性研究[D]. 上海:上海大学,2008.
Lu Weigang. Studies on the mechanical characteristics of flap valve cutoff device in pumping stations [D]. Shanghai: Shanghai University, 2008. (in Chinese)
- 6 Felix A Muggli, Peter Holbein, Philippe Dupont. CFD calculation of a mixed flow pump characteristic from shutoff to maximum flow[J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 2002, 124(3):798~802.
- 7 汤方平,王国强,刘超,等. 高比转数轴流泵水力模型设计与紊流数值分析[J]. 机械工程学报,2005,41(1):119~123.
Tang Fangping, Wang Guoqiang, Liu Chao, et al. Design and numerical analysis on an axial-flow model pump with high specific speed [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(1):119~123. (in Chinese)
- 8 成立,刘超,汤方平,等. 基于 RNG 紊流模型的立式轴流泵站三维流动数值模拟及性能预测[J]. 机械工程学报,2009,45(3):252~257.
Cheng Li, Liu Chao, Tang Fangping, et al. 3D Numerical simulation and performance predication of vertical axial flow pumping station by RNG turbulent model [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(3):252~257. (in Chinese)