

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.01.023

基于模型的共轨柴油机主喷油量 控制算法研究

张 岳¹, 聂 飞², 贺 敏¹

(1. 中国人民解放军镇江船艇学院 装置保障系, 江苏 镇江 212003;

2. 浙江大学 能源工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要:针对目前高压共轨柴油机电控系统开发周期较长以及开发成本较高的问题,通过研究基于模型的软件开发流程,在 Matlab/Simulink 环境下建立了高压共轨柴油机主喷油量控制算法模型,其中包括烟度限值控制模型、启动油量控制模型、怠速油量控制模型、怠速 PID 控制模型以及油量脉宽转换模型;对控制算法模型的关键 MAP 图进行了标定以验证该控制算法模型的有效性,并在使用 INCA 标定软件建立监控和标定的发动机试验台架上进行了一系列试验。试验结果表明,发动机启动过程迅速,且正常工况下转速稳定,并能根据环境情况和发动机的当前需求自动调节目标油量;该控制算法能够较好地满足发动机启动、怠速以及正常工况的控制需求。

关键词:电控柴油机;基于模型的软件开发;主喷油量;控制模型

中图分类号:TP391;TK429

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2016)01-0116-07

Optimization for model-based main fuel injection quantity control algorithm of common rail diesel engine

ZHANG Yue¹, NIE Fei², HE Min¹

(1. College of Equipment Support, PLA Zhenjiang watercraft College, Zhenjiang 212003, China;

2. Department of Energy Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Aiming at the problem that the development period of the electronic control system of high pressure common rail diesel engine is longer and the development cost is higher, through the research on the model based software development process, the model of the main fuel injection quantity control of high pressure common rail diesel engine was established under the Matlab/Simulink environment. The control algorithm model includes the model of the limit value of smoke, starting the oil quantity control model, the model of the idle oil quantity control, the PID control model and the pulse width conversion model. The key MAP diagram of the control algorithm model was calibrated to verify the validity of the proposed control algorithm. A series of experiments were carried out on the engine test bench using INCA calibration software. The results indicate that, the engine starts up quickly and steadily, and can adjust the target oil automatically according to the environment and the current requirement of the engine. The algorithm can meet the requirement of engine starting, idle and normal operation.

Key words: electronically controlled diesel engine; software development based on model; main fuel injection quantity; control model

0 引 言

随着国 VI 标准即将颁布,我国废气排放法规已经逐渐与国际标准接轨,作为一个能够通过灵活地控制

喷油压力和喷油规律提高发动机工作稳定性和排放性能的燃油喷射系统,高压共轨电控系统在柴油机上得到了广泛运用^[1]。高压共轨电控柴油机最核心的部分就是其电控系统的开发,精确可靠的控制系统才能

保证准确地调节喷油速率、喷油正时以及喷油压力,而主喷油量控制则是高压共轨电控系统实现稳定控制的关键部分^[2]。

传统软件开发模式的各个开发环节都是各自独立完成的,各部分分别开发完成后再拼接成为整体,这种开发模式不便于在系统设计早期发现产品设计的缺陷,必须把所有代码编写完成后才能测试设计的正确性以及有效性。基于模型的软件开发模式先建立模型,然后采用建模和仿真来完成从需求到设计的实现与测试,将模型进行系统验证后再将模型自动生成代码。基于模型的软件开发模式能够使模块得到重复使用,而自动代码生成技术使产品的代码生成和验证都由计算机自动完成,这样可以大大提高产品开发速度,同时保证代码的正确性^[3]。

基于模型的软件开发模式,本研究建立发动机主喷油量控制模型,并通过发动机试验台架展开试验以及使用标定软件对控制算法模型进行标定,验证该控制算法模型的有效性。

1 基于模型的软件开发流程介绍

基于模型的开发流程特点是整个开发调试过程都是在相同的环境下完成的,可以对每个步骤的开发过程都进行验证^[4]。

基于 V 模式的软件开发流程如图 1 所示。

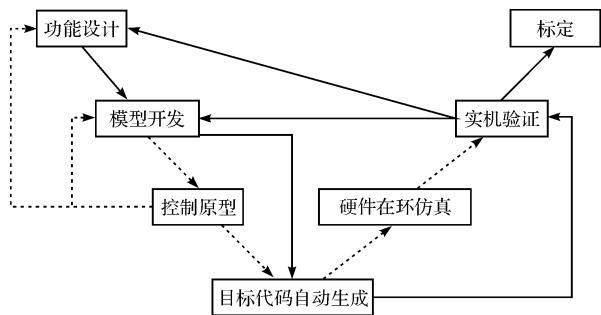


图 1 基于 V 模式的软件开发流程

所有发动机对象和控制策略都需要建立模型,即功能设计,在这个流程中,基于模型的控制算法设计和软件在环仿真可以使用图形化建模工具(如 Matlab/Simulink 等)设计需要实现的功能并先在仿真环境下验证。控制原型可以从图形化建模工具中自动生成代码,然后下载到硬件设备上进行测试,并在实际车辆中方便、可靠地进行测试和优化各种功能。目标硬件的代码自动生成部分是开发流程的中心环节,它能利用自动代码生成技术直接在 Simulink/Stateflow 中生成可执行的代码。而将这些生成的代码加载到 IDE 环境,

编译后下载到硬件平台,以测试代码的实时性指标,即硬件在环仿真。完成以上开发环节以后,研究人员在发动机试验台架或者实车上进行实机验证和标定。

2 主喷油量控制模型的建立

高压共轨喷油系统能够实现对柴油机喷油定时、喷油脉宽、喷油率和喷射次数的柔性控制,是当前柴油机提高经济性、优化燃烧、减少有害排放主要研究方向之一^[5-6]。高压共轨喷油系统对循环喷油量的灵活、精确控制是其改善柴油机性能的关键^[7]。

而基于模型的开发模式最基础的环节即第一阶段就是基于模型的控制功能设计,即建立需求文档,并设计出可执行的技术规范,完成算法建模并设定有效的控制参数,最后进行模型验证。为此本研究在 Simulink 上建立的主喷油量控制模型如图 2 所示。该模型主要包括烟度限值控制模型,启动油量控制模型,怠速油量控制模型,怠速 PID 控制模型以及油量脉宽转换模型。

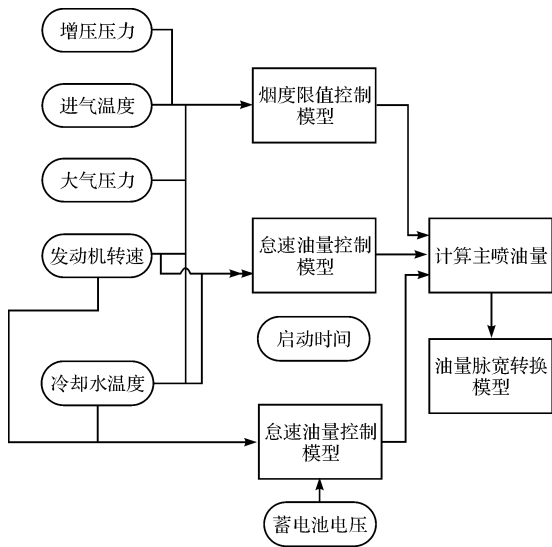


图2 主喷油量的控制模型原理

2.1 烟度限值控制模型

为了满足废气排放法规的要求,研究人员必须将发动机排放的烟度控制在一定范围之内,而发动机烟度过大有几方面的原因,其中进气压力的变化便会对发动机烟度产生影响,特别在高海拔地区,由于大气压力较小,空气密度也会较小,这样进入燃烧室混合气浓度较海拔低的地区会更浓,导致燃烧不完全,发动机冒黑烟。而进气温度下降,空气密度增大,进气量就增大,但同时混合气混合质量也会变差。为了控制发动机烟度,本研究设计了主喷油量的烟度限值控制部分,如图3所示。

该部分主要包括以下 3 个方面。

(1) TMAP 烟度对油量的限值。根据增压压力 BPSCD_pFltVal 与发动机转速 Eng_nAvrg_mp 查表 EngCtl_qSmokeLim_MAP 得到增压压力产生烟度的限值 InjCtl_qBPSLim_mp,再乘以进气温度 IATSCD_tAir 查表 EngCtl_facATSCor_CUR 得到的校正因子 InjCtl_facATSCor_mp,得到油量的 TMAP 烟度限值 InjCtl_qSmokeLim_mp。

(2) 大气压力烟度对油量的限值。由大气压力 APSCD_pVal 和发动机转速查表 EngCtl_qAPSLim_MAP 得到油量的大气压力烟度限值 InjCtl_qAPSLim_mp。

(3) 冷却水温烟度对油量的限值。由冷却水温 CTSCD_tClnt 和发动机转速查表 EngCtl_qCTSLim_MAP 得到油量的水温烟度限值 InjCtl_qCTSLim_mp。

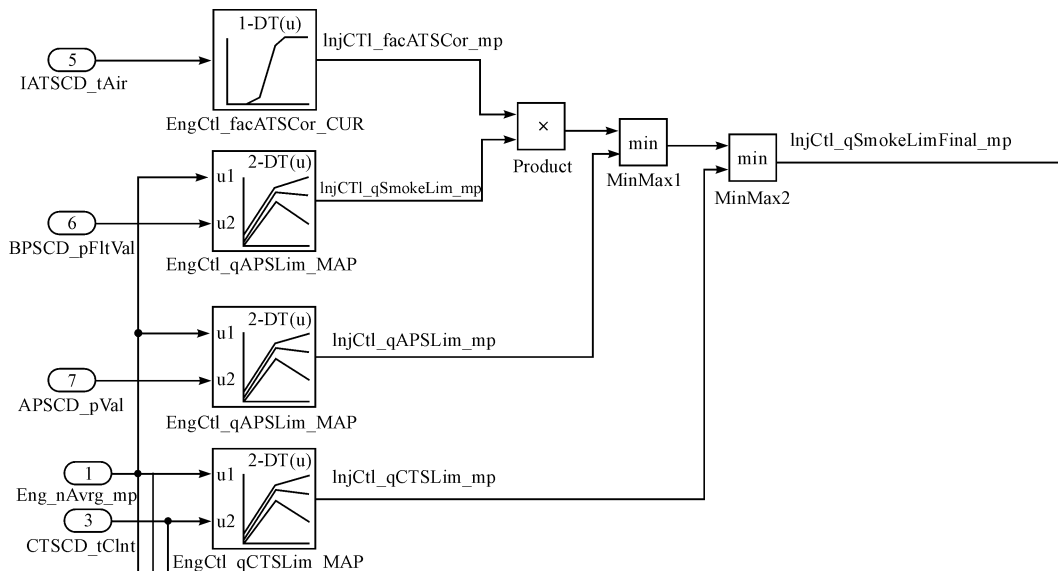


图3 主喷油量的烟度限值控制模型

最后笔者取三者中的最小值,即整体烟度对油量的限值 InjCtl_qSmokeLimFinal_mp,通过该限值限制主喷油量,使发动机提高燃烧效果、改善排放性能。

2.2 启动油量控制模型

在启动过程中,若发动机机体的温度较低,可能会出现冷启动困难的情况,这是由于活塞环与气缸壁之间的密封油膜尚未形成,不仅会造成压缩混合气泄漏,还会使润滑油黏度过大,引起起动机倒拖转速较低、气缸内混合气雾化不良等问题;若发动机启动转速过低,也会导致发动机温度较低,拖长启动时间,影响启

动性能。根据冷却水温度和启动时间设计的控制算法如图4所示。

由冷却水温和发动机转速查表 EngCtl_qStrtBase_MAP 得到发动机启动基本油量 InjCtl_qStrtBase_mp,再根据启动时间 TCRANK 查表 EngCtl_qStrtAdd_CUR 得到对启动油量的补偿值 InjCtl_qStrtAdd_mp,启动时间越长,油量逐渐增加,两者相加得到启动油量 InjCtl_qStrt_mp。为了限值启动时转速冲的过高,需要对最高转速进行限值,因此需要与最高转速油量限值 InjCtl_qSpeedLim_mp 比较,取较小值为发动机的最终启动油量。

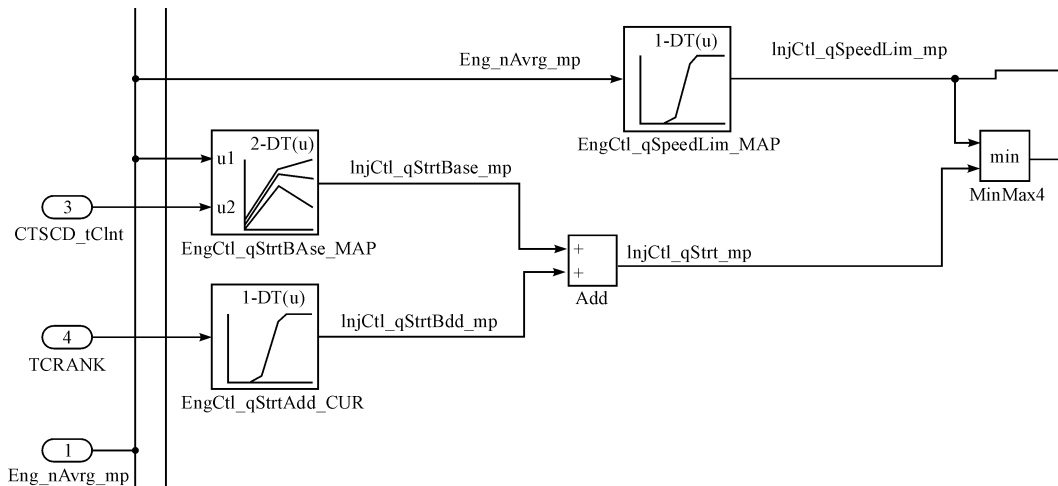


图4 发动机启动油量控制模型

2.3 怠速油量控制模型

发动机怠速油量过高或者过低,会造成柴油机各缸工作不均匀、功率下降、排放恶化甚至导致燃烧室及活塞等零件的早期磨损。发动机怠速油量控制部分如

图5所示。由油门开度 APPCD_rFlt 查基本油量 MAP 表 EngCtl_qBASE_MAP_1 可以得到发动机正常运行工况的油量 InjCtl_qBase_mp。

本研究根据冷却水温查表 EngCtl_rACCPCor_CUR

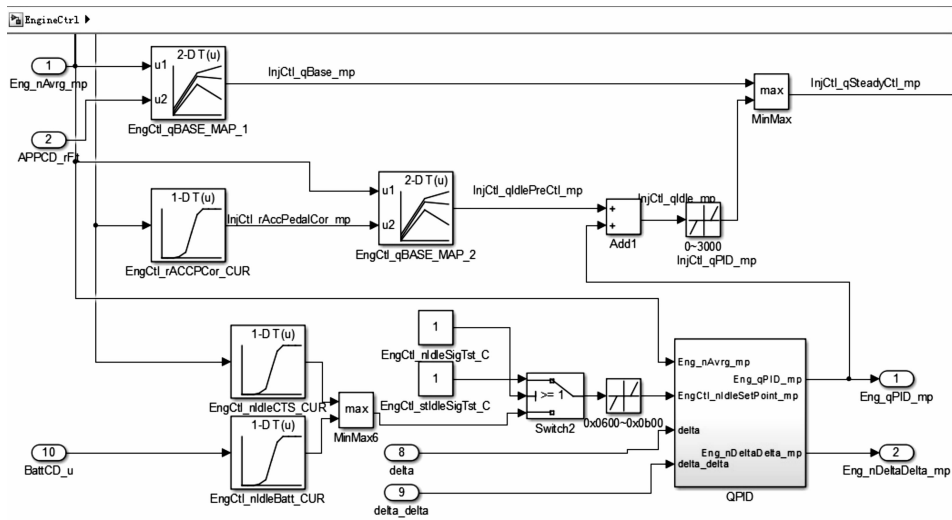


图5 发动机怠速油量控制模型

对油门位置进行修正,再结合发动机转速查基本油量 MAP 表得到发动机怠速油量的前馈控制量 InjCtl_qIdlePreCtl_mp。该前馈调节量能够在油量波动产生之前输出,能较好遏制由油门位置改变而引起的油量波动,提高了主喷油量控制系统的响应性能。同时,本研究根据冷却水温和蓄电电压 BattCD_u 分别查表得到的值取较大的为目标怠速(也可以手动设定目标怠速),最终得到发动机的目标怠速 EngCtl_nIdleSetPoint_mp。再根据发动机的目标怠速与实际转速的偏差对怠速进行 PID 控制,得到发动机怠速工况下 PID 控制后的油量 Eng_qPID_mp,接着与前馈控制量相加得到发动机怠速工况下的油量,最后与发动机正常运行工况的油量 InjCtl_qBase_mp 比较取较大值,得到发动机怠速稳定运行的油量 InjCtl_qSteadyCtl_mp。

2.4 怠速 PID 控制模型

PID 控制器根据定值与实际输出值构成控制偏差,将控制偏差的 P(比例)、I(积分)和 D(微分)通过线性组合构成控制量,对被控对象进行控制^[8]。发动机具体怠速 PID 控制模型如图6所示。由发动机目标怠速 EngCtl_nIdleSetPoint_mp 减去实际怠速 Eng_nAvg_mp 可得当前转速偏差 Eng_nDelta_mp,当前转速偏差与上一次转速偏差相减得到转速偏差的改变量 Eng_nDeltaDelta_mp。然后根据发动机转速偏差查表分别得到比例系数、微分时间常数和积分时间常数,结合转速偏差以及转速偏差的改变量,得到怠速 PID 控制油量,最后经过 PID 最大、最小值限制,得到最终的怠速工况下 PID 控制后的油量 Eng_qPID_mp。

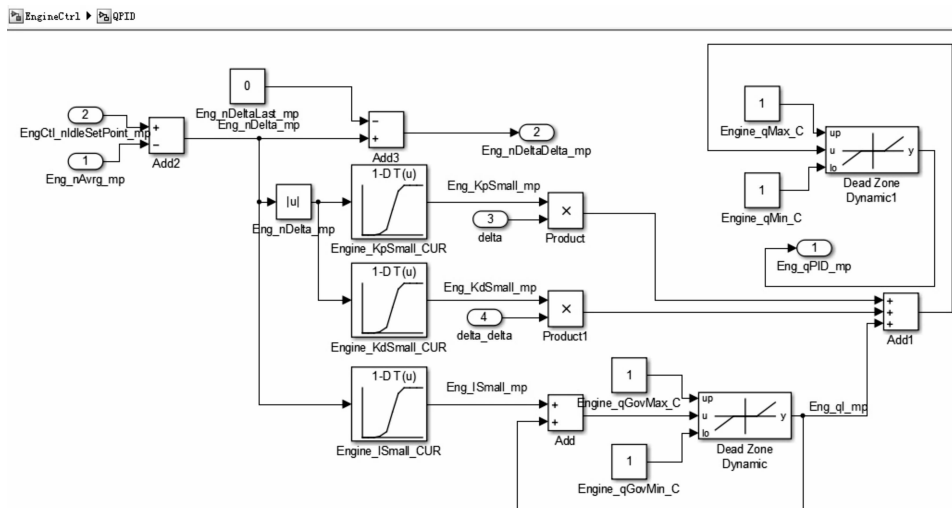


图6 怠速 PID 控制模型

2.5 油量脉宽转换模型

根据以上模型得到目标油量以后,还需要进行油量与脉宽的转换。油量脉宽转化 MAP 是根据喷油器实验台架上的 EFS 测得,发动机目标油量转换为喷油脉宽的过

MainInjection ▶

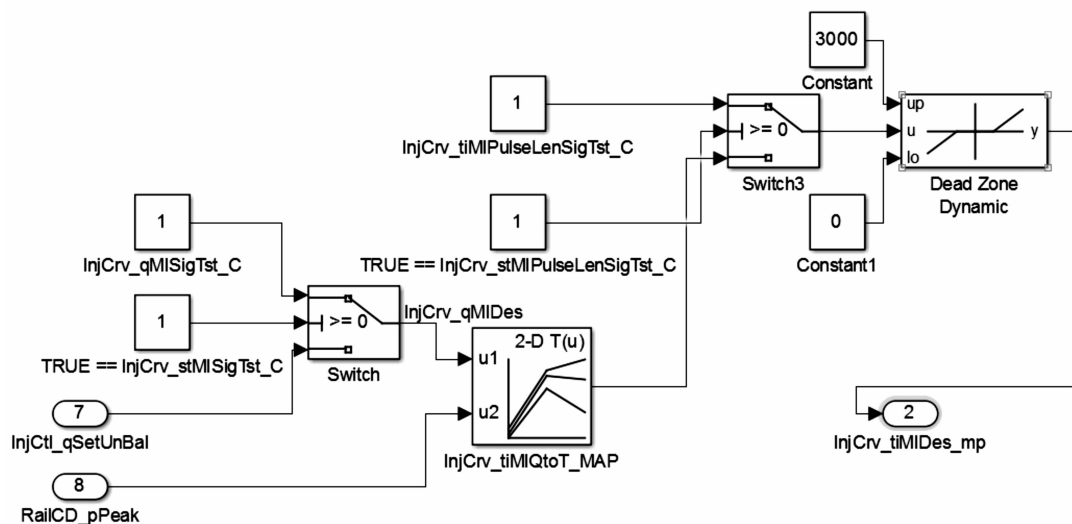


图 7 发动机油量脉宽转换模型

3 主喷油量控制模型试验及结果分析

如果喷油系统无法满足设定工况的喷油量和喷油压力要求,功率受到损失的同时,排放也可能产生一定程度的恶化;然而喷油量过多不仅会造成排放的恶化,而且还浪费了一定的动力,燃油经济性受到影响^[9]。本研究通过 Matlab/Simulink 建立主喷油量控制模型完成主喷油量控制算法设计后,使用 RTW Embedded Coder 完成了模型的代码自动生成,编译下载到硬件平台上进行试验。为了验证控制算法模型的有效性,本研究组在使用 INCA 标定软件建立监控和标定的发动机试验台架上进行了一系列试验。实验用柴油机型号为康明斯 IFS2.8S4161P,型式为 BOSCH 高压共轨直列式、增压中冷, EGR + DOC 处理,缸径 94 mm,行程 100 mm,排量 2.78 L,最大输出功率 120 kW (3 600 r/min),最大扭矩 360 N·M。

程如图 7 所示。由目标油量(也可以手动设置油量)和轨压 RailCD_pPeak 查表 InjCrv_tiMIQtoT_MAP 得到发动机喷油脉宽 InjCrv_tiMIDes_mp,此处也可以手动设置脉宽。此外,发动机的喷油脉宽最终要经过最大和最小值限制检测。

试验通过对柴油机的启动、稳态控制和变工况过程的模型进行验证,确保主喷油量控制模型的有效性。

3.1 启动油量标定及控制试验

车用柴油机启动工况是柴油机的常见工况,50%~80% 的 HC 和 CO 是在启动过程中产生的。对于柴油机而言,采用合理的启动油量和启动轨压能够提高燃油的雾化质量,使启动稳定性和排放得到改善^[10]。

发动机的启动基本油量可以通过发动机转速和冷却水温查表发动机启动油量基本 MAP 图得出。标定得到的发动机启动油量基本 MAP 图如图 8 所示。从图 8 可以看出,发动机启动基本轨压设定为 400 bar 且转速保持不变的情况下,启动基本油量随着冷却水温升高而逐渐降低,而且转速越高,下降幅度越大;冷却水温保持不变的情况下,启动基本油量随着转速升高而逐渐降低,而且冷却水温越高,下降幅度越大。

Table editor [69]

EngCtl_qSttBase_MAP <Map变量组>	[mm3]	x: Eng_nAavg_mp [rpm]	y: CTSCD_tCInt [deg]						
y \ x	100.000	119.922	150.000	200.000	250.000	300.000	400.000	600.000	800.000
-25.000	65.000	65.000	65.000	65.000	65.000	65.000	57.998	55.996	42.998
-20.000	65.000	65.000	65.000	65.000	65.000	62.002	57.998	52.998	42.012
-10.000	65.000	65.000	65.000	65.000	65.000	60.000	57.998	52.998	40.010
0.000	65.000	65.000	65.000	65.000	62.002	60.000	55.996	52.998	38.008
20.000	65.000	65.000	65.000	62.998	62.002	60.000	55.996	50.996	36.006
40.000	64.004	64.004	64.004	62.998	62.002	60.000	55.000	50.000	34.004
60.000	64.004	64.004	64.004	62.998	62.002	60.000	52.002	47.998	32.002
80.000	64.004	64.004	64.004	62.998	62.002	60.000	52.002	45.000	30.000

图 8 发动机启动油量基本 MAP 图

具体的启动试验效果如图9所示。从图9中可以看出,启动油量的设定比较合理,当发动机启动后,转速由0迅速上升到780 r/min,油量则从100 mm³迅速降低到10 mm³左右。启动后,发动机经过一个短暂的调整过程,平稳地进入到怠速工况,整个过程用时大约3 s~4 s。启动效果非常好,达到了预期的设计要求。

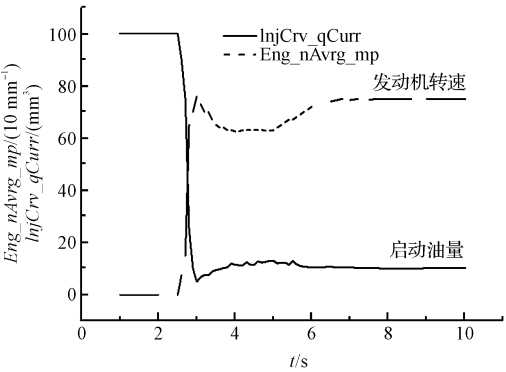


图9 发动机启动试验效果图

3.2 主喷油量基本 MAP 标定

发动机正常工况下的基本油量能根据发动机转速和油门开度查发动机主喷油量基本 MAP 图得出。完整的发动机主喷油量基本 MAP 图标定需要根据整车的性能要求和驾驶员的驾驶性能进行标定,本研究只在发动机台架上进行实验,该 MAP 图只要满足发动机调速型线规律,能够稳定控制发动机即可。标定得到的发动机主喷油量基本 MAP 图如图10所示。从图10看出随着转速的升高所需主喷油量减小,而随着油门加大所需主喷油量增大,这是由柴油机控制型线决定的。

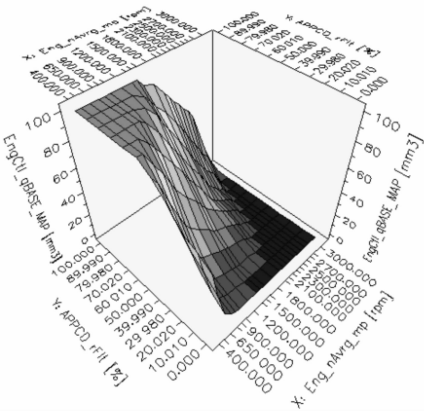


图10 发动机主喷油量基本 MAP 图

3.3 怠速油量控制试验

怠速工况下油量控制效果图如图11所示。从图11中可以看出,发动机空载,转速维持在800 r/min左右,此时油量也能够保持稳定在5 mm³附近的范围之内,波动非常小。整个怠速工况的油量供给情况比较平稳,说明本研究建立的主喷油量控制模型具有很好的控制效果。

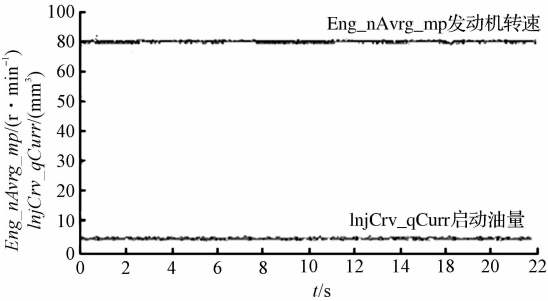


图11 怠速油量控制效果图

4 结束语

本研究的工作是在柴油机电控系统对于软件开发的需求的大背景下展开的,采用基于模型的开发模式完成了高压共轨柴油机控制算法中主喷油量控制部分的研究。本研究主要针对烟度限值控制模型,启动油量控制模型,怠速油量控制模型,怠速PID控制模型以及油量脉宽转换模型,在Simulink环境下建立了高压共轨柴油机主喷油量控制模型。在此基础上,在使用INCA标定软件建立监控和标定的发动机试验台架上进行了一系列试验。在试验中,发动机启动时,经过3 s~4 s的短暂调整,快速平稳地进入到怠速工况。发动机空载时,转速维持在780 r/min左右,此时油量也能够保持稳定在5 mm³附近的范围之内,波动非常小。

实验结果表明,该控制算法模型能够满足发动机启动、怠速、以及正常工况的主喷油量控制需求,为建立完整的高压共轨柴油机 ECU 控制算法模型打下了基础。

参考文献 (References) :

[1] CTANIA A E, FERRARI A, MANNO M, et al. Experimental investigation of dynamics effects on multiple-injection common rail system performance[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2008, 130(032806): 1-13.

(下转第126页)

本文引用格式:

张岳,聂飞,贺敏. 基于模型的共轨柴油机主喷油量控制算法研究[J]. 机电工程, 2016, 33(1): 116-121, 126.
ZHANG Yue, NIE Fei, HE Min. Optimization for model-based main fuel injection quantity control algorithm of common rail diesel engine[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2016, 33(1): 116-121, 126.
《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>