

电控泵管嘴系统在柴油发电机组 脉冲工况中的控制策略研究

袁利国, 曾凡明, 邢广笑

(海军工程大学船舶与动力学院, 湖北武汉 430033)

摘要: 在 GT-POWER 与 Matlab 耦合仿真和试验验证的基础上, 对电控泵管嘴燃油喷射柴油发电机组在脉冲工况下的动态特性进行了仿真, 研究了不同 PID 控制参数对脉冲工况下柴油机性能的影响, 得到了一组理想的控制参数; 并提出了首脉冲负载加载前提高柴油机转速的方案, 以增大机组轴系在脉冲负载加载前的能量, 减小机组在脉冲过程中的动态调速率。仿真结果显示, 在理想的 PID 参数下, 机组的动态调速率可由现场试验的 6.8% 降至 4.0%, 如果首脉冲负载加载前提前升高柴油机转速, 机组的动态调速率可降至 2.8%。

关键词: 柴油发电机组; 电控泵管嘴系统; 脉冲负载; 控制策略

中图分类号: TK421.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2010)05-0001-04

Research of Control Strategy for Electronic Control Pump-Pipe-Nozzle System in Diesel Gensets under Pulsed Load

Yuan Ligu, Zeng Fanming, Xing Guangxiao

(College of Naval Architecture and Power, Naval University of Engineering, Hubei Wuhan 430033)

Abstract: Based on coupled simulation of GT-POWER with Matlab and test verification, the dynamic performance of diesel gensets with electronic control pump-pipe-nozzle system were simulated under pulsed load. Then, the influences of PID control parameters on engine's performance under pulsed load were analyzed and a set of ideal PID parameters were obtained. In order to increase the unit's shaft energy before first pulse load and decrease dynamic speed droop, the control strategy of increasing unit's speed before first pulse load is put forward. Simulation results show that the unit's dynamic speed droop decreases from 6.8% in field test to 4.0% in simulation with optimized PID parameters. If the unit's speed is increased before first pulse load, its dynamic speed droop can decrease to 2.8%.

Keywords: diesel genset; electronic control pump-pipe-nozzle system; pulsed load; control strategy

1 概述

柴油发电机在脉冲工况下的工作特点是: 负载在空载和带载间周期性波动, 机组大部分时间运行在动态过程中, 载荷幅度有时甚至超过柴油机的额定功率, 同时, 机组转速的动态调速率要求在一定范围内(例如 10%)。相比于其它工况, 脉冲工况是一种异常恶劣的工作状态, 其对柴油机的供油情

况有着更为严格的要求。在某脉冲负载废气涡轮增压柴油发电机组的设计中, 柴油机的供油系统为电控泵管嘴燃油喷射系统。与传统柴油机相比, 电控燃油喷射柴油机通过对喷油过程进行时间式、多参数柔性控制, 能更灵活准确地控制柴油机的各种运行参数^[1,2]。但要做到这一点, 首先要对电控系统的控制参数进行精细地标定。柴油机的许多指标是相互矛盾的, 必须经过综合分析和比较, 才能最终

收稿日期: 2009-11-23; 修回日期: 2010-04-01

作者简介: 袁利国(1975-), 男, 博士生, 主要研究领域为舰船动力装置总体设计与系统分析, E-mail: yuanliguoemail@163.com。

确定喷射系统的各控制参数,这是一项极其复杂的工作^[3]。所以,在某脉冲负载柴油发电机组试验中,电控泵管嘴燃油喷射系统控制参数的现场整定过程消耗了大量的时间、人力和燃油等资源。

本文在计算机仿真和试验验证的基础上,对电控泵管嘴燃油喷射系统在废气涡轮增压柴油机脉冲负载工况中的控制策略进行研究,以提高机组动态性能,节省现场参数调整时的资源消耗,因此具有重要意义。

2 某脉冲负载柴油发电机组简介

机组主要设备包括废气涡轮增压柴油机、联轴器、离合器、发电机以及大惯量储能飞轮。储能飞轮的作用是在机组加载转速降低时释放能量,以弥补柴油机所发出功率的不足部分,其惯量为机组轴系其它运转部件惯量的 20.5 倍^[4]。其中柴油机的额定转速为 1000r/min。机组的工作电流如图 1 所示,

是幅值依次递减、突加突卸的一组脉冲波形电流。机组最大脉冲电流时的负载功率大于柴油机所能发出的最大功率。

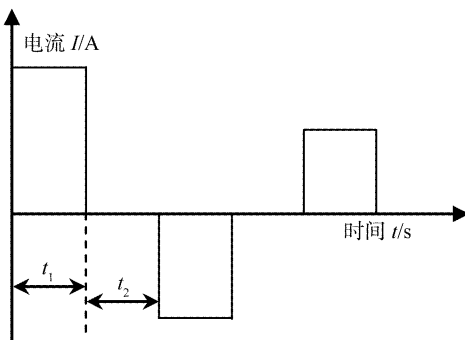


图 1 脉冲电流示意图

柴油机供油系统为电控泵管嘴系统,它是一种时间控制式喷油系统,它的控制系统工作原理如图 2 所示^[5,6]。

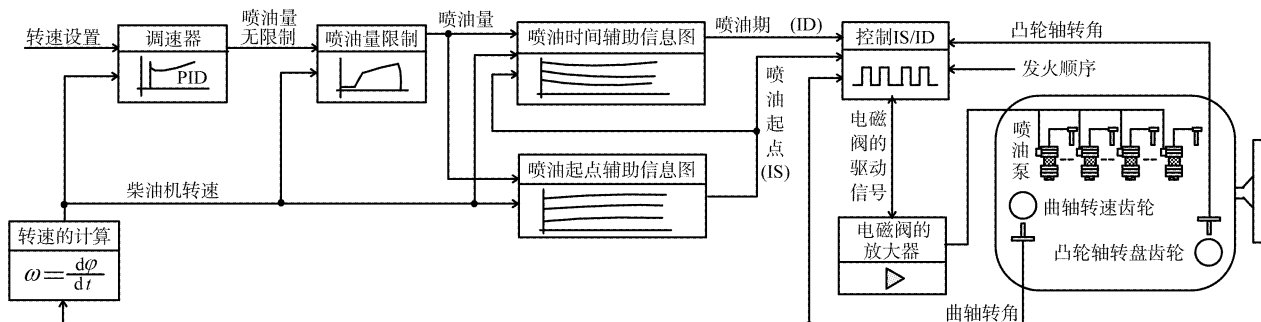


图 2 电控泵管嘴控制系统工作原理示意图

3 仿真模型及试验验证

3.1 机组仿真模型

本文基于发动机仿真软件 GT-POWER 和数学计算软件 Matlab 对整个系统进行仿真计算分析,系统划分为柴油机、联轴器、离合器、飞轮、发电机以及轴承六大部分。在柴油机建模时,采用管内一维非定常流动 FVM (Finite Volume Method) 和缸内容积法,按工作过程将其划分为进气系统、排气系统、涡轮增压系统、中冷器、电控泵管嘴系统、气缸以及曲轴箱。

由于机组大部分时间运行在瞬态工况,燃烧模型采用半预测模型和自定义修正模型。在对进排气系统建模时,采用一维交错网格,将柴油机进排气系统分成若干控制体积,应用 FVM 进行数值计算。

在电控泵管嘴系统建模过程中,系统的相关参数在“InjProfileConn”供油模板中进行设置;供油凸轮型线在“profile”中设置;喷油提前角在“start of injection”中填写,它是随柴油机转速和供油量而改变的二维表格。供油模板参数设置界面如图 3 所示。

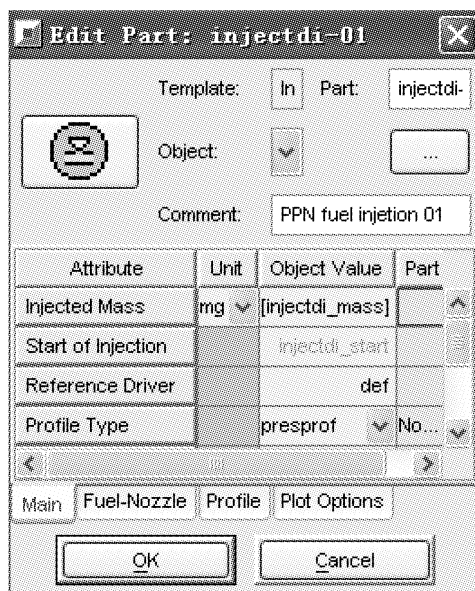


图 3 供油模板参数设置界面

机组的 GT-POWER 模型如图 4 所示。

为了对电控燃油喷射系统的控制策略进行研究,系统的 PID 调节模型在 Matlab/Simulink 中构

建。机组的 GT-POWER 模型与供油系统 PID 调节的 Matlab 模型耦合仿真模型如图 5 所示。

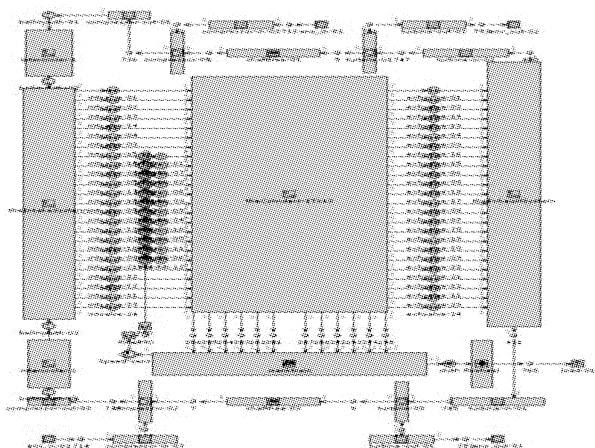


图 4 机组 GT-POWER 模型

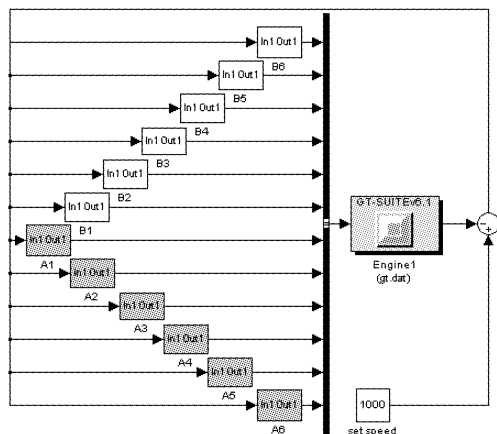


图 5 机组耦合仿真模型

3.2 试验验证

为了下一步研究电控燃油喷射系统的控制策略, 首先需要验证仿真模型的正确性。

图 6 是 PID 参数分别为 $K_p = 15$ 、 $K_i = 1.5$ 、 $K_d = 10$ 时前 5 个脉冲试验过程中负载功率、飞轮功率、机组转速与仿真转速的曲线图。试验结果表明, 机组转速的试验数据曲线 test speed 和仿真数据曲线 simulation speed 的差值与柴油机额定转速的比值都在 2% 以内, 两者较好的一致性表明, 机组的仿真过程是正确的。同时, 飞轮功率的变化曲线 flywheel power 显示, 在首脉冲负载持续期间, 飞轮释放的能量与负载所需能量的比值为 31.3%。机组转速波动率发生在首脉冲负载加载结束时, 为 6.8%。

4 控制策略研究

在正确的建模基础上, 对不同的喷油提前角、PID 参数以及控制逻辑对机组性能的影响进行了仿真分析。仿真结果显示, 将标定工况下转速高于 900 r/min 时的喷油提前角增加或减小 1° 时, 机组

动态调速率、油耗率、气缸内的燃空比、最高燃烧压力及压力升高率变化都很小。

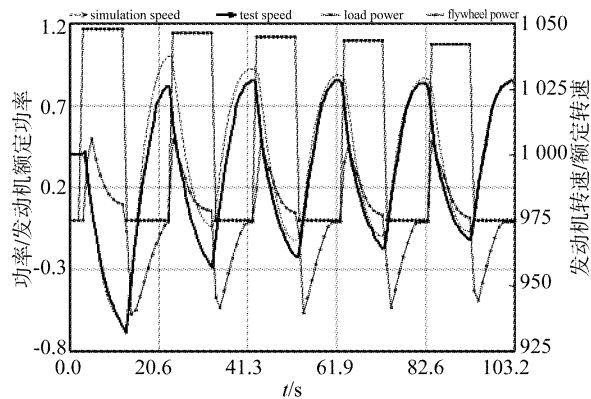


图 6 脉冲负载柴油发电机组试验曲线图

4.1 五种 PID 参数对机组性能的影响

图 7~10 分别为五种 PID 参数时, 机组的转速、油耗率、燃空比以及缸内最大压力变化曲线, 这五种 PID 参数分别为: (a) $K_p = 10$ 、 $K_i = 1$ 、 $K_d = 0.6$; (b) $K_p = 10$ 、 $K_i = 2.5$ 、 $K_d = 0.6$; (c) $K_p = 15$ 、 $K_i = 1.5$ 、 $K_d = 10$; (d) $K_p = 30$ 、 $K_i = 2$ 、 $K_d = 100$; (e) $K_p = 50$ 、 $K_i = 2$ 、 $K_d = 200$ 。

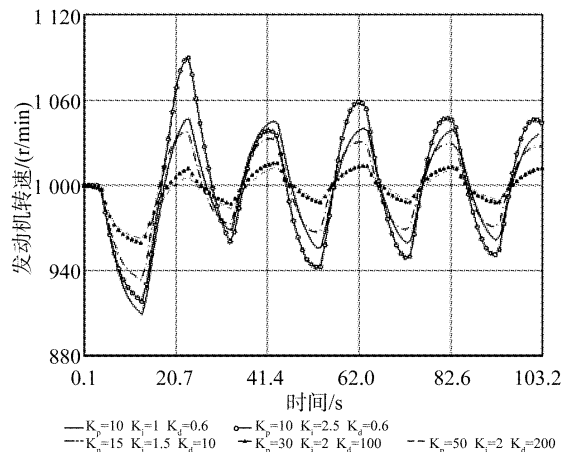


图 7 五种 PID 参数时的机组转速图

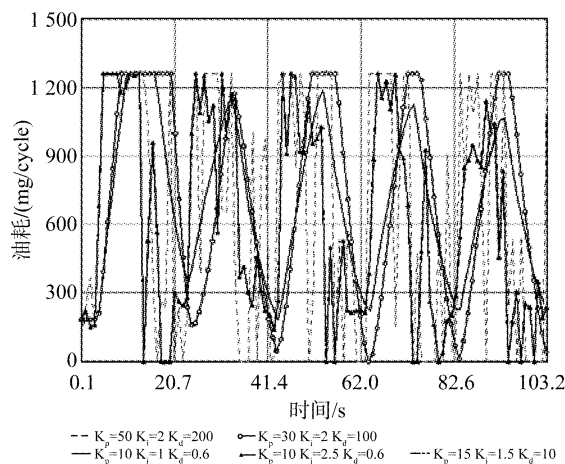


图 8 五种 PID 参数时的油耗率图

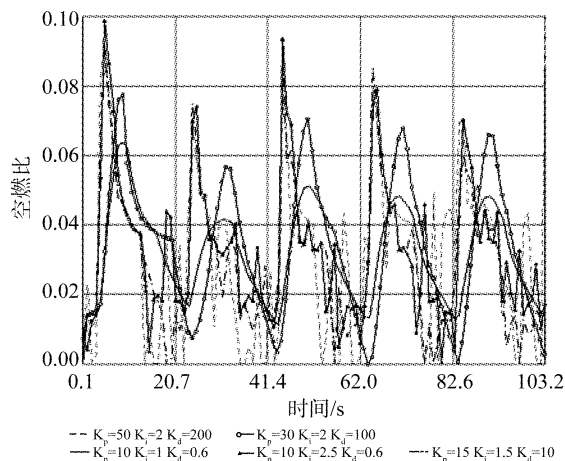


图 9 五种 PID 参数时的燃空比图

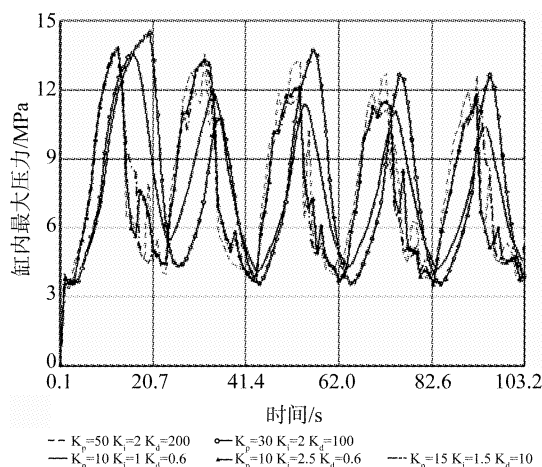


图 10 五种 PID 参数时的缸内最大压力图

由图中可以看出,随着比例系数 K_p 的增大,在整个脉冲负载工作期间,供油量增大,燃空比增大,最大缸内压力增大,动态调速率降低。

随着积分系数 K_i 的增大,首负载持续期间,供油量增大,燃空比增大,缸内最大压力增大,转速降减小;之后,负载持续期间,供油量增大,负载间隔期间,供油量减小,动态调速率增大,当 $K_i > 2.5$ 时,动态调速率显著增大。

随着微分系数 K_d 的增大,负载持续期间,供油量增大,缸内最大压力增大,动态调速率减小;负载间隔期间,供油量减小,动态调速率减小。但当 $K_d > 100$ 时,缸内最大压力和柴油机的热负荷、机械负荷变化剧烈,不利于柴油机的工作可靠性。

在前五个脉冲过程中,五种 PID 参数情况下的油耗率(d)最少,(a)、(b)、(c)、(f)的油耗率分别比(d)多 9.2%、12.6%、9.1%、8.3%。

当脉冲负载突加后,电控泵管嘴系统会在 PID 调节作用下,迅速增加供油量,以尽快维持柴油发电机组的转速恒定。但由于涡轮增压器转子惯性以及

的建立明显滞后于供油量的增加,使得进气空气压力的建立及质量流量的增加和供油速率之间存在一段时间延迟,导致气缸内燃烧过量空气系数急剧变化,产生很浓的混合气,使得缸内燃油燃烧并不完全,柴油机的动力性指标和经济性指标变差。但如果偏重柴油机的燃烧质量,减小脉冲负载加载初期的供油量,势必会造成较大的动态调速率。综合各因素,工况 d 的 PID 匹配参数是比较理想的,其最大动态调速率为 4.0%。

4.2 首脉冲加载前机组提前加速对机组性能的影响

由图 7 可知,机组在首脉冲负载持续期间的动态调速率是最大的,这是因为相比其它的脉冲,首脉冲负载功率最大,并且首脉冲负载突加前的机组转速为额定转速,而其它的脉冲负载突加前的机组转速要远远高于额定转速,这就意味着首脉冲以后的脉冲在负载突加、转速降低时,整个轴系可以释放相对较多的能量,从而减小机组的转速降。所以,为了减小首脉冲加载时转速降,可以在首脉冲加载前使机组提前加速,从而使机组在脉冲加载前储存较多的能量。

图 11 为 PID 参数分别为 $K_p = 30$, $K_i = 2$, $K_d = 10$ 时五种不同工况下的前 2 个脉冲过程中机组转速变化仿真图。

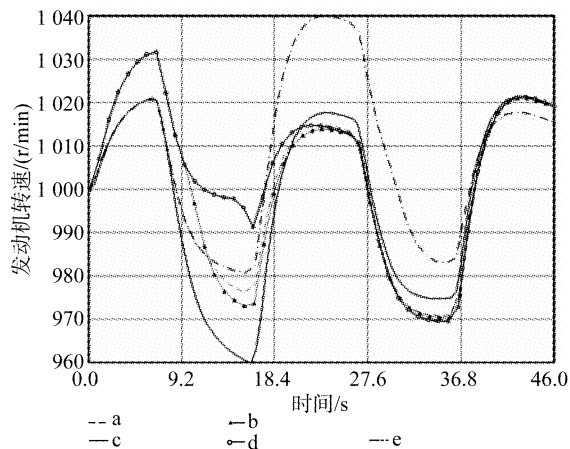


图 11 首脉冲加载前机组提前加速不同参数设置时机组转速变化图

这五种不同工况的参数设置为:(a)首脉冲加载前 6 s 和首脉冲持续期前 2 s 的机组设定转速为 1 020 r/min; (b)首脉冲加载前 6 s 和首脉冲持续期前 4 s 的机组设定转速为 1 030 r/min; (c)首脉冲加载前 6 s 和首脉冲持续期前 6 s 的机组设定转速为 1 020 r/min; (d)首脉冲加载前 6 s 和首脉冲持续期前 9 s 的机组设定转速为 1 030 r/min; (e)首脉冲加载前 6 s 一直到第二个脉冲持续期前 4 s 的机组设定转速为 1 020 r/min。

(下转第 18 页)

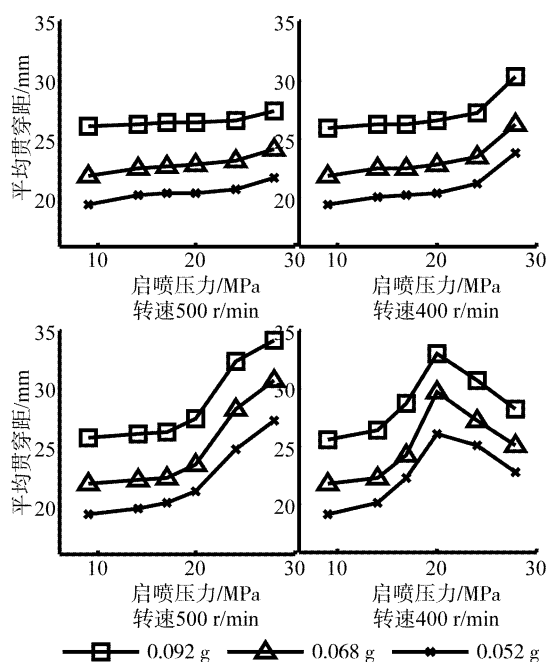


图 13 启喷压力对整个喷油期间内平均贯穿距的影响

整个喷油期间内油滴平均喷雾锥角在各工况下都随着启喷压力增大而增大。平均贯穿距在高转速下(700 r/min)随着启喷压力提升增大幅度不明显,随着转速降低平均贯穿距增大幅度变大,而在低转速(400 r/min)时,在启喷压力为 20 MPa 出现转折,在此之前平均贯穿距随启喷压力增大而增大,而后减小。

5 结 论

(1) 依照本文所建立的柴油机喷射系统液力模型进行仿真计算的结果与试验数据进行了对比,显示二者吻合度较好,验证了仿真计算模型的可靠性和适用性。

(上接第 4 页)

前两个脉冲工作期间,五种工况下的最大动态调速率分别为 4.0%、3.2%、2.8%、3.2%、4.0%。

5 结 论

在试验验证的基础上,建立了电控泵管嘴燃油喷射柴油机的动态仿真模型。研究了不同 PID 参数及首脉冲负载加载前机组提前加速对机组性能的影响,仿真结果可用来指导机组现场试验中的 PID 参数整定和控制策略制定,节省大量的试验工作。仿真结果显示,在理想的 PID 参数和控制策略下,机组的动态调速率可达到 2.8%。

参考文献

[1] 何建辉,王波涛,张阿庆,等. 单缸柴油机高压共轨燃油

(2) 启喷压力对燃油系统喷油特性有重要的影响,提高启喷压力可使喷油滞后,燃油喷射压力提高,改善雾化质量,特别是明显减小喷射初期和后期油滴 SMD,增大了喷射初期和后期喷射贯穿距和喷雾锥角。

(3) 启喷压力提高对喷雾特性的改善与柴油机工况也有关系,低工况性能改善效果要明显优于高工况。在本文中,启喷压力从 9 MPa 增大到 28 MPa,高工况时,喷油峰值压力增加了 19%,油滴平均 SMD 减小了 27%;而低工况时,喷油峰值压力增加了 150%,油滴平均 SMD 减小了 48%。

(4) 利用该仿真计算模型,可对不同工况下的不同启喷压力时柴油机的喷油特性进行计算预测,进而可以开展工作过程计算,预测柴油机的燃烧特性和整机性能,为寻求变启喷压力喷油器的控制策略打下了基础。

参考文献

- [1] M. Badami et al. Influence of injection pressure on the performance of a DI diesel engine with a common rail fuel injection system[C]. SAE paper,1999-01-0193.
- [2] D. T. Hountalas, D. A. Kouremenos and G. C. Mavropoulos. Multi-zone combustion modeling as a tool for DI diesel engine development-application for the effect of injection pressure[C]. SAE paper,2004-01-0115.
- [3] 姚春德. 启喷压力对直喷式柴油机燃烧的影响[J]. 内燃机工程,1994(4):7-12.
- [4] 冒晓建,肖文雍,徐美玲等. 提高泵-管-嘴供油系统喷射压力的研究[J]. 内燃机工程,2001(3):28-31.
- [5] 関岡信明,庄保怡. 三菱 UEC52L 型柴油机特点和第一台整机实验结果[J]. 柴油机,1985(04):16-29.
- [6] 喷射控制系统的研究[J]. 内燃机工程,2009,30(2):61-64.
- [7] 张思庆. 240/275 型柴油机用电控泵-管-嘴系统[J]. 内燃机车,2002(10):6-10.
- [8] Graham Balfour, Pierre Dupraz, Mark Ramsbottom, etc. Diesel fuel injection control for optimum driveability [C]. SAE Paper, No. 2000-01-0265, 2000.
- [9] Bjorn Bolund, Hans Bernhoff, Mats Leijon. Flywheel energy and power storage systems [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2007(11), 235-258.
- [10] Heinzmann GmbH & Co KG. Digital basic system for digital governor (CANopen Gateway) [R]. Germany; 2004.
- [11] Heinzmann GmbH & Co KG. Heinzmann digital electronic speed governors operating instructions (Hand Programmer) [R]. Germany; 2004.