



船用共轨柴油机燃油喷射系统控制策略研究

尹成彬¹, 欧大生², 张晓怀², 周加东²

(1. 青岛市 92771 部队, 山东 青岛 266405; 2. 海军工程大学船舶与动力学院, 湖北 武汉 430033)

摘 要: 根据船用柴油机在控制目标、控制范围、控制方法与运行环境等方面的特点, 以满足船用柴油机动力性、经济性和排放性能为目标, 提出了船用共轨柴油机燃油喷射系统中轨压、喷油量、喷油正时及喷油率的具体控制策略, 为船用共轨柴油机电控系统的设计提供参考。
关键词: 船用柴油机; 高压共轨; 燃油喷射系统; 控制策略
中图分类号: TK421⁺.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2012)05-0022-05

Research on the Control Strategy of Marine Common Rail Diesel Engine's Fuel Injection System

Yin Chengbin¹, Ou Dasheng², Zhang Xiaohuai², Zhou Jiadong²

(1. The Troops of 92771 at Qingdao, Shandong Qingdao 266405;
2. College of Naval Architecture and Power, Naval University of Engineering, Hubei Wuhan 430033)

Abstract: According to the characteristics of marine diesel engine with regard to control target, control range, control method and operation environment, and with the aim to satisfy the marine diesel demands on high output, low fuel consumption and low exhaust emissions, the control strategy of marine common rail diesel engine's fuel injection system is proposed in detail from the aspects of rail pressure, injection mass, injection timing and injection ratio, which providing valuable reference for the design of electronically-controlled system of marine common rail diesel engine.
Keywords: marine diesel engine; high pressure common rail; fuel injection system; control strategy

0 引言

面对不断增长的船用动力性能、操纵性能需求, 以及日益严格的排放法规和经济性要求, 船用柴油机需要进一步提升综合性能, 特别是改善燃油喷射系统的性能^[1]。高压共轨燃油喷射系统正是顺应以上需求而研发, 其柔性控制能力强, 可灵活实现系统喷射压力、喷油定时、喷油量和喷油规律的独立自由控制, 能够满足船用柴油机上述诸方面要求, 是当前船用柴油机燃油系统的发展方向^[2]。

1 船用柴油机特点及性能要求

相对于车用柴油机共轨系统, 船用柴油机共轨

系统有其自身的特点: 一是由于船用柴油机功率大、循环油量大, 因此其油量变化范围相对于车用共轨系统大得多, 这要求船用共轨系统对油量变化的适应性更强; 二是控制目标不同, 相对于车用柴油机的以排放控制为主要指标兼顾经济性及其他性能, 船用柴油机特别是舰船柴油机首先要求保证柴油机的动力性和经济性指标, 兼顾排放性能, 这使其控制策略优化的侧重点不同; 三是运行特性及控制方式不同, 车用柴油机是车用负载特性且其运转由油门控制, 而船用柴油机是按照作为电站时的负荷特性或者作为推进主机时的推进特性运行, 运转时完全靠 ECU 的控制策略控制柴油机的转速; 四是运行环境以及需控制的参数也不相同, 船用柴

收稿日期: 2012-02-20; 修回日期: 2012-04-16
作者简介: 尹成彬(1969-), 男, 工程师, 主要从事船舶动力的研究, E-mail: ods629@163.com。

油机特别是舰船柴油机在高湿、高温、高盐雾、具有强的冲击和电磁干扰的环境下运行，这对共轨系统以及 ECU 的可靠工作提出了更高的要求，且舰船柴油机运行中对柴油机冷却水、滑油、进排气系统等参数均须进行监测并根据环境状态进行相应调整，纳入并反映到系统控制之中。

正是船用柴油机所具有的以上特点，决定其共轨系统在控制策略方面与车用发动机共轨系统特别重视排放控制这点不同，船用柴油机更加重视的是柴油机在全工况范围内均不损失柴油机的动力性能和经济性能的前提下保证柴油机排放控制达标，还要保证柴油机常用工况、特别是部分负荷工况下的燃烧优化匹配。

动力性主要体现在船用柴油机的输出功率范围、输出扭矩与功率密度；而经济性主要体现在有效燃油消耗率与有效热效率方面^[3]。传统机械液力喷油柴油机受本身系统结构的制约已很难兼顾船用柴油机不断增长的性能需求，必须寻求更为灵活的柴油机控制体系，电控共轨是船用柴油机发展的普遍趋势。

2 船用共轨燃油喷射系统控制策略

在船用高压共轨燃油喷射系统中，高压泵向共轨腔提供高压燃油，而喷油量和喷油定时则由喷油器内部的高速电磁阀控制。燃油喷射系统控制单元根据操作者的命令和发动机所处工况，通过控制共轨腔压力及电磁阀的动作时间来实现喷油始点、喷油终点、喷油持续时间以及喷油次数的控制，从而实现对系统喷射压力、喷油量、喷油定时和喷油规律的精确调节和灵活控制^[4-6]。

2.1 轨压控制策略

高压共轨燃油喷射系统共轨压力的精确控制是众多控制量优化控制的一个前提，决定了喷油压力的高低，是喷油量计算的重要依据，其稳定性和动态响应直接影响发动机起动、怠速、加速等动力性能。高压共轨系统通过调节高压供油泵供油量来控制轨压，常用的调节方式有变排量法、节流调节法及停缸技术三种。本文采用变排量法来调节轨腔压力，即通过调节高压供油泵进油电磁阀的启闭实现轨压调节。轨压控制具体步骤如下：

(1) 最终喷油压力 P_{fm} 的计算

首先根据发动机转速 N_e 和负荷 Q_{fm} (最终喷油量) 确定喷油压力目标值，再由冷却液温度 THW 等作出修正，得到最终喷油压力 P_{fm} 。

(2) 轨压控制输出量 P_f 的计算

采集实际轨压值 P_e 与目标轨压值 P_{fm} 进行对比，经过实时闭环控制算法得到轨压控制输出量 P_f 。

(3) 确定最终的输出控制量

变排量法的输出控制量为控制电磁阀驱动脉宽，通过改变其占空比，改变激励电流，以达到轨压的控制与调节。最终输出量为一定频率与占空比的驱动波形。

轨压控制的实现通常有两种方式：开环控制和闭环控制。开环控制响应速度快，其控制精度取决于运行工况和状态参数的测量精度；闭环控制对传感器和执行器的精度依赖较小，可以实施优化控制，但其控制周期长且响应速度慢。所以为了迅速建立轨压，在起动过程中采用开环控制方式；当达到目标压力后，采用闭环控制方式维持，通过调整比例电磁阀的通电电流，调节比例电磁阀的开合程度来达到调整轨压的目的。

在起动过程中，转速较低，内部泄漏较大，为促进燃油与空气的混合，必须迅速建立起足够的喷射压力；同时需要根据柴油机的冷热状态确定合适的低速加浓油量，在不冒黑烟的前提下保证柴油机顺利起动。

按照起动过程的状态变化，将压力控制划分为如下两个阶段：

阶段一为柴油机起动初期，ECU 未检测到判缸信号时，为了尽快建立共轨内油压 ECU 的起动程序，不是采取查取轨压 MAP 图去控制油泵电磁阀，而是取电磁阀电流为零，即 PWM 占空比为零，进油量最大，加速起动过程中目标轨压的建立。

阶段二为轨压达到目标值后、柴油机未达到最低怠速转速前，ECU 以闭环控制的方式，通过查询 MAP 图，采用合适的 PWM 占空比，维持起动目标油压，直到转入怠速过程。

当共轨压力达到所需压力后，进入共轨压力的闭环控制方式，保持共轨压力的稳定。稳态工况下，共轨压力要求维持在根据柴油机状态确定的压力值上，由于喷油器喷油和燃油泄漏的影响，每次喷油后均需进行压力调节。

ECU 首先根据最终喷油量和转速，通过查油压 MAP 确定目标轨压基本值，结合进气温度、进气压力和冷却水温对基本值进行修正，得到的结果即为最终目标轨压 P_{fm} ；然后将当前轨压反馈值与目标值相比较，两者通过实时控制算法求得轨压实际控制量 P_f ，查询 MAP 图得到相应的 PWM 驱动占空比，输出至高压油泵进油量比例电磁阀，完成

共轨压力控制。

轨腔压力决定着柴油机的循环供油量，共轨系统对其波动有严格的要求，船用共轨柴油机的轨压波动率要求不大于 3%。

2.2 喷油量控制策略

高压共轨系统喷油量 Q 是轨压 P_{CR} 与脉冲宽度 T_M 的函数：

$$Q=f(P_{CR},T_M) \tag{1}$$

电控单元(ECU)对喷油量的控制分两级计算。一是计算喷油量，在由各个传感器提供的信息基础上，确定每次喷射的目标喷油量(包括基本喷油量和修正喷油量)；二是确定驱动电磁阀的通电脉宽，如果系统具有预喷射和后喷射的多段喷射功能，电控单元还要根据总的油量和柴油机的具体工况计算出各个辅助喷射的喷油量。

高压共轨系统作为时间压力式控制系统，喷油量的大小实际上是由某一轨压下作用于喷油器电磁阀的喷射脉冲宽度所决定的。由于喷油器的执行元件是电磁阀，对喷油量无法实现闭环控制，所以喷油量的控制是通过查询 MAP 图进行开环控制的。

(1) 起动喷油量控制

起动工况的油量控制主要考虑转速和冷却水温的影响，在转速低时喷油量大，随转速提高喷油量逐渐减小至怠速油量；ECU 根据冷却水温度判断柴油机的冷热状态，冷机时增大喷油量使燃油蒸发、雾化的数量增大，以改善起动性能；热机时适当减小喷油量以避免冒黑烟。

ECU 根据起动开关及转速传感器的信号，判断柴油机是否处于起动状态。起动喷油控制的特点是，起动时程序不查控制喷油量 MAP，喷油定时取设定值，以固定的喷油脉宽开始，每次喷射以一定的步长增加，但喷油脉宽不大于最大脉宽，直到柴油机转速超过设定怠速，随后转入正常运行工况。

(2) 起动后喷油量控制

船用柴油发电机组起动后，ECU 首先根据柴油机工况信息，即车钟位置(自动模式下切换为负载百分比)和平均转速，通过查询基本总喷油量 MAP_1 和基本预喷油量 MAP_2 确定基本总喷油量和预喷油量，结合燃油温度、增压压力和冷却水温对基本油量进行修正，得到的结果与当前转速下的最大喷油量作比较，较小的值即为最终总喷油量和预喷油量，由此得到最终主喷油量。通过最终主喷油量和转速再查主喷定时 MAP_3 得到主喷定时；通过最终主喷油量当前的共轨压力查主喷脉宽 MAP_4 得

到主喷脉宽；结合转速和预喷油量查预喷间隔 MAP_5 得到预喷间隔；结合轨压和预喷油量查预喷脉宽 MAP_6 得到预喷脉宽；最后根据最终总油量和转速查目标轨压 MAP_7 得到目标轨压，将目标轨压与当前轨压相比较查高压泵泵油角 MAP_8 得到泵油角度。其具体流程见图 1。最后通过喷射控制软件驱动高压泵和喷油器电磁阀完成喷油量控制。

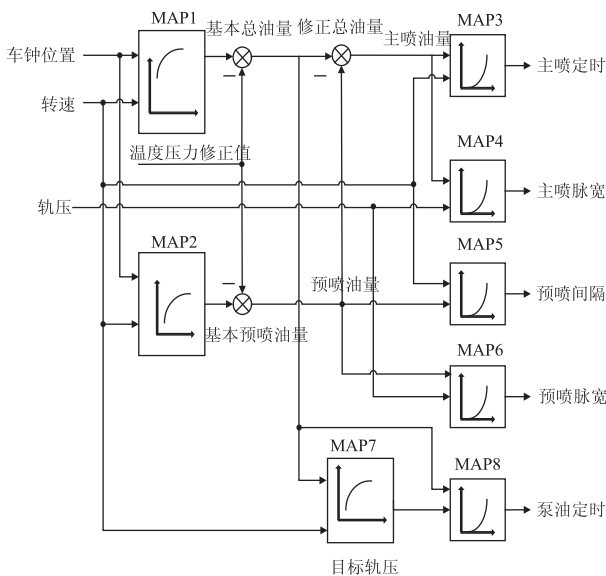


图 1 燃油系统喷油量控制参数控制流程图

2.3 喷油正时控制策略

发动机正时识别是保证发动机按顺序喷油的前提，是影响柴油机喷射控制准确性和精度的至关重要的因素。发动机正时识别是依据曲轴传感器信号(发动机转速信号)和凸轮轴传感器信号(发动机的相位关系)而进行的，因为它提供喷油的时钟，所以它的准确性和精度将关系到喷油的准确性和精度。通常设计中留有独立起动的备用系统，以避免曲轴传感器信号或凸轮轴传感器信号发生故障而造成的损失。

柴油机喷油正时的控制，实际上是对喷油器的喷油提前角的控制。电控共轨柴油机不仅要把精确计算后得到一定压力的燃油喷入气缸，而且要根据工况选择合适的喷油始点，燃油过早喷入缸内导致最高燃烧压力压力过大，影响发动机寿命；过迟则喷入缸内的燃油雾化质量变差，造成燃烧不良，油耗增加，排气冒黑烟。使燃烧点发生在最佳位置所对应的喷油提前角称为最佳喷油提前角，也是控制过程中所追求的最终喷油提前角。共轨系统的喷油正时控制，就是要精确地控制触发喷油器电磁阀的起始时刻，来控制喷油开始的时刻。对于多段喷射的共轨系统，其预喷射、主喷射与后喷射的喷油始

点位置以及它们之间的时间间隔都要由 ECU 精确计算与控制。ECU 根据发动机转速决定基本喷油提前角，同时，还要根据发动机负荷、冷却水温、进气压力等对喷油提前角进行修正。

喷油正时的控制过程中，存在着时间-角度的转换，并且喷油过程的信号与控制的频率都是随着柴油机转速而变化的，电控共轨系统为能够精确控制喷油正时，需要准确预报瞬时柴油机转速。针对不同工况对柴油机进行标定，预先制定准确的喷油正时的 MAP 图供 ECU 计算控制时使用。

喷油正时控制是采用基于查询 MAP 的开环控制方式。与喷油量控制一样，喷油正时的控制分两个步骤进行计算：一是根据各传感器信号确定目标喷射始点时刻，将其转化为曲轴上止点提前角度，表示为 θ_{im} ；二是根据柴油机转速与喷油提前角度，确定喷油器电磁阀起动时刻 T_{start} 。

(1) 起动喷油正时控制

起动工况下，转速很低，空气运动也很弱，混合气燃烧速度比较低，所以要早一点喷油，此时喷油提前角不能低于某一个下限，即要根据起动时发动机转速确定一个最小许可的喷油提前角 θ_s 。在起动过程中，随着转速的提高，这个下限往下推移。在起动机通电的情况下，起动信号发给 ECU，ECU 就激活这个功能。

(2) 起动后喷油正时控制

在冷发动机条件下，气缸内空气压缩所达到的温度比较低，着火延迟比较长，所以喷油不能太迟，也就是喷油提前角不能太小，否则燃油不能在上止点附近迅速燃烧，造成后燃增加，使发动机的动力性和经济性降低。所以要根据冷却液温度 THW 确定一个最小许可的喷油提前角 θ_w 。

与此同时，ECU 根据最终喷油量和转速，通过查喷油定时 MAP 确定喷油定时基本值 θ_{base} ，结合进气压力 PIM 修正量 θ_p 对基本值进行修正。最终喷油提前角 θ_{im} (目标值) 为修正后的基本量与最小许可的喷油提前角 θ_w 两者中的最大值。

2.4 喷油率控制策略

在电控共轨系统中，喷油率的定义是：在一次喷油循环过程中，从喷油开始到喷油结束之间，包括预喷射、主喷射和后喷射等都在内的喷油率。喷油率控制是一种保证柴油机动力性和燃油经济性兼容以及降低排放和噪声十分有效的手段。为了使柴油机工作柔和，排放降低，理想的喷油规律是：初期喷油速率低，中期按照一定的速率建立起较高的喷油速率后保持稳定，而喷油后期能快速断油，不

滴漏，即“先缓后急”的喷油规律。

对于高压共轨系统，每次喷油压力几乎是恒定的，喷油速率曲线趋向方形，相对理想的喷油速率，该系统具有快速断油 and 中期保持高压、高速率喷射的优势。然而喷油初期在高压下进行，喷油速率较大，如果仍然按照理想喷油率曲线进行喷射，其结果是滞燃期内喷入燃油较多，致使发动机噪声和 NO_x 排放增大。解决的方法是使初期低速喷射与后期的高速喷射分开，即采用多次喷油模式来改善喷油规律。

船用共轨燃油喷射系统由于喷射压力的产生与喷射过程无关，而且喷油器的启、闭是以电控液压的原理控制的，响应速度极快，所以非常便于实现多次喷射，包括预喷、主喷和后喷。

在主喷射脉冲前，先给喷油器电磁阀一个宽度较小的喷射脉冲来实现预喷射。采用预喷来诱发冷焰反应，可以改善冷起动性能，尤其对低温时的冷起动性能非常有效。预喷射降低了发动机噪声：在主喷射之前百万分之一秒内少量的燃油被喷入气缸压燃，预加热燃烧室；预热后，使主喷射后的压燃更加容易，缸内的压力和温度不再是突然地增加，有利于降低燃烧噪声。转速越高，预喷对降低噪声的影响力减少。

决定预喷形状的参数有：预喷油量的大小及预喷与主喷之间的时间间隔，具体方法是准确地调节脉冲始点、脉冲宽度和脉冲间隔。

为了满足更加严格的柴油机排放要求，预、主喷之后还需要后喷，即二次甚至多次喷射。在膨胀过程中进行后喷射，产生二次燃烧，将缸内温度增加 $200 \sim 250\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，减少了排气中的碳氢化合物。当后喷射靠近主喷射时可以降低 PM，但是 NO_x 稍有增加。

高压共轨系统可以在一次喷油中通过控制喷油电磁阀通、断电来实现多次喷射，从而实现对喷油规律的灵活控制。多次喷射的喷油量和喷油定时同样可根据前面所介绍的方法计算获得，只是在某一工况下需要多次查对应 MAP 图和转换工作。总喷油量是主喷油量、预喷油量和后喷油量之和，所以，主喷油量为总喷油量减去预/后喷油量。

多次喷射正时的核心是主喷正时、预喷和后喷正时，以及它们与主喷之间的时间间隔确定。近预喷和近后喷定时采用相对主喷起始和结束时刻的间隔决定，采用间接的方式：时间间隔由 ECU 根据转速和总油量查 MAP 计算，并考虑修正因素后获得。

共轨喷油器仍然是电磁阀控制的，根据发动机温度、负荷扭矩和转速来控制喷射次数，最多每循环三次喷射。在低速低负荷工况和怠速工况，为了降低燃烧噪声，采用二次预喷射，而在全负荷和高扭矩工况，既不用预喷射，也不用后喷射。只有当发动机温度较低时，在一个很小的工况范围内才考虑采用预喷射、主喷射和后喷射，此时的后喷射主要用于使氧化催化器快速升温。

3 结 论

根据船用柴油机的特点与性能要求，本文提出了船用共轨柴油机燃油喷射系统中轨压、喷油量、喷油正时及喷油率的具体控制策略，为船用共轨柴油机电控系统的设计提供参考。

参考文献

[1] 黄少竹. 船舶柴油机[M]. 大连:大连海事大学出版社, 2006.

[2] 唐开元,欧阳光耀. 高等内燃机学[M]. 北京:国防工业出版社,2008.

[3] 徐筱欣. 船舶动力装置[M]. 上海:上海交通大学出版社,2007.

[4] 黄军,王书义. Bosch 公司共轨燃油喷射系统及其发展[J]. 车辆与动力技术,2005(1):58-63.

[5] Huhtala K,Vilenius M. Study of a common-rail fuel injection system[C]. SAE 2001-01-3184,2001.

[6] Kohketsu Susumu,Tanabe Keiki,Mori Koji. Flexibly controlled injection rate shape with next generation common rail system for heavy duty DI diesel engines[C]. SAE 2000-01-0705,2000.

+++++

信息动态

MAN 报告对低速航行的调研情况

2011 年底，MAN Diesel & Turbo 公司对其集装箱船、散装货轮和油轮客户作了一次调查，以便了解他们对低速航行的态度以及已有的经验。

基于网络的调查以多项选择为基础，结合文字评论。在大约 200 位答卷人中，149 位已经具有低速航行经验，其中的 38 位已经对推进机械系统进行了改造，以便更好地适应低速航行体系。

据 MAN 称，调查结果表明：在那些已经做了改造（如发动机降功率、燃料滑阀、涡轮增压器切断、螺旋桨升级）的答卷人与没有做的人之间存在明显的区别。然而，这两组答卷人都赞成实行低速航行的主要原因是节约燃油；同样，大家都同意低速航行为利用多余的容积和避免空转时间提供了有效的办法。然而，两组的不同之处在于，进行了发动机改造的答卷人对通过采取措施已最大化低速航行获益，从而提升效率和节能，表现出更加明显积极的认识。

只有小部分答卷人（相当于 6%）仅在发动机 50% 负荷以下实行低速航行，而大部分则将低速航行与正常负荷结合起来。油轮和散装货轮行业的答复是，其大部分船队都实行低速航行；而集装箱行业愿意实施低速航行的似乎稍少些。只有很少的船舶在极低的发动机负荷下工作（即极低和超低速航行）；大部分“低速航行”工作在 30% ~ 50% MCR（最大持续功率）。

大部分已经实行了发动机改造的答卷人都认为低速航行在燃料经济性上的获益明显比预期的大。有趣的是，从商业角度来看，多数航运公司认为他们的客户对低速航行反应积极。但在多数情况下，低速航行对税费的影响很小。

MAN Diesel & Turbo 公司 PrimeServ 部门提供完整的报告。

（思帆 编译）