

高压共轨系统控制参数对柴油机性能影响研究

周巍

(上海市港航事业发展中心, 上海 200000)

摘要: 为研究高压共轨燃油喷射系统的关键控制参数对柴油机性能的影响。建立了柴油机工作过程仿真模型和高压共轨燃油喷射系统模型, 将工作过程仿真模型与高压共轨燃油系统模型进行耦合。在对耦合得到的柴油机仿真模型进行精度验证后, 以功率为边界条件, 通过调整喷射正时和喷油压力, 研究不同燃油喷射控制参数对高压共轨柴油机经济性能和排放性能的影响。研究发现随着喷油压力升高, 循环喷油量增加, 导致缸内爆发压力增加, IMEP 值和 NO_x 排放量都上升; 而随着喷油始点提前, 由于滞燃期的增长, 燃料燃烧更充分, 缸内爆发压力, IMEP 值和 NO_x 排放量都上升。

关键词: 高压共轨燃油系统; 船用柴油机; 控制参数; 耦合模型

中图分类号: U664.121 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006—7973 (2021) 12—0083—04

1 引言

国际海事组织 (IMO) 为了更好地限制船舶废气污染, 而制定了三阶段的执行标准, 目前已规定了波罗的海、北海、北美以及美国加勒比海为排放控制区, 在该排放控制区内的船舶必须满足相应的排放标准^[1-2]。此外, 国内也在积极地推进海岸线划设排放控制 (ECA) 的划设工作。我国政府已颁布了《船舶发动机排气污染物排放限值及测量方法 (中国第一、二阶段)》(GB15097-2016), 规定自 2021 年 7 月 1 日起实施。日趋严格的排放法规对船用柴油机的排放性能和寿命周期提出了严峻的挑战, 降低排放的同时, 具备良好的燃油经济性一直是柴油机技术的研究重点^[3]。高压共轨电控燃油喷射技术已成为实现柴油机整机性能提升和排放降低的有效技术途径, 其通过提高喷油量和喷油定时的控制精度优化燃油的喷射过程, 能够显著提高柴油机的经济性和排放性能, 也能为机外排放后处理系统减轻了压力^[4-5], 同时, 高压共轨燃油喷射系统因由于其喷射燃油高压雾化良好的特点^[6], 还被运用于船用双燃料发动机的引燃装置上^[7], 因此开展高压共轨系统控制参数对船用中速柴油机性能影响的研究有着重要意义^[8]。本文以某船用中速柴油机为研究对象, 建立高压共轨燃油喷射系统仿真模型和柴油机工作过程仿真模型, 在对仿真模型进行精度验证后进行模型耦合并验证耦合可行性。利用建立的耦合模型进行喷油压力和喷油始点对柴油机性能的影响分析。

2 柴油机工作过程仿真模型建立

柴油机气缸内的工作过程是很复杂的, 它是包含

物理、化学、流动、传热、传质等综合过程。在柴油机气缸内热力过程仿真计算时, 为了简化计算, 采用零维模型建立柴油机实际缸内工作过程的数学模型^[9]。基于现象学的 BARBA 模型能够比较精确的反应柴油机燃油喷射、预混燃烧、扩散燃烧、废气对扩散燃烧的影响等过程, 该模型将燃油从喷入气缸到燃烧的过程划分为两个独立的过程: 第一步是基于预混火焰传播假设在预混区采用预混燃烧模型。当预混区间燃油充分燃烧后, 此时主喷阶段燃油的氧化则通过受控混合燃烧模型来表示^[10]。具有燃油引燃喷射和主喷的燃烧过程可以被分为孤立的 7 部分:

(1) 预混燃油喷射。在引燃喷射开始时初始化燃烧模型, 并计算相关变量。喷油时需要表示出预混区已喷射燃油的浓度并计算着火滞燃期的长短。此时油滴蒸发的宏观特性可以通过表面积和体积折算的方式来衡量, 用索特平均直径。假设燃油被喷入气缸时就开始蒸发, 则其蒸发公式表示为:

$$d_D^2 = d_{D_0}^2 - \beta \cdot t \quad (1)$$

其中, $d_{D_0} = SMD = c \cdot d_N \cdot (Re \cdot We)^{-0.28}$, $\beta = 10^{-6} m^2/s$ 在湍流场中。

(2) 预混喷射的着火滞燃期。将引燃喷射喷油始点的着火滞燃期定义为 θ_0 。在零维柴油燃烧模型中, 着火滞燃期通常表示为单步化学反应。这些相对简单的模型可以用于着火滞燃期的对数与温度的倒数成正比的传统燃烧模型。着火延时子模型根据 Arrhenius 定律可表示为:

$$\theta_0 = A_t \cdot p^{-n} \cdot e^{\frac{T_A}{T}} \quad (2)$$

式中 A_i , n 和 T_A 为子模型参数; p 和 T 为燃烧室的温度和压力。

(3) 预混喷射燃烧过程。在滞燃期结束时进入到预混燃烧阶段, 此前已经蒸发为气态的预混燃油得到充分燃烧。预混区多建立于喷油初期, 因此滞燃期中所喷油雾都被包含在预混区中。新鲜空气和燃烧废气通过下式也体现在预混区中。

$$\frac{d(m_{fg} + m_{bg})_{pre}}{dt} = \Lambda \cdot \frac{dm_{f, inj}}{dt} \quad (3)$$

式中参数 Λ 用来保证在无残余燃烧废气情况下燃油空气当量比为 1.25。若喷油结束时滞燃期仍未结束, 由于燃油在周围工质中的扩散预混区会扩大。

(4) 受控混合燃烧的燃油喷射。由于主喷开始时第一次喷射油雾的燃烧尚未结束, 主喷模型为主喷阶段建立了一个新的预混区并计算该区域的着火滞燃期。上述预混区燃油喷射过程的定义与预混燃油喷射阶段定义相同。

(5) 受控混合燃烧的着火滞燃期。在第一次喷射过程中, 着火滞燃期需要从主喷阶段的始点一直计算到它等于 1, 此时燃油开始燃烧。主喷阶段的着火模型与引燃喷射阶段相同, 但是由于较高的压力和温度, 主喷阶段的着火滞燃期更短, 且在喷射完成前结束。在着火开始时刻已经喷射的燃油在预混区燃烧, 此时尚未喷射的燃油则用受控混合燃烧模型表示。

(6) 受控混合燃烧之前的预混燃烧。由于滞燃期在喷射完成前结束, 主喷阶段预混区燃油比例较引燃喷射低, 且其燃烧路径比第一次喷射也偏低。

(7) 受控混合燃烧过程。与预混燃烧模型相同, 滞燃期结束时尚未燃烧的油雾按照受控混合燃烧模型逐渐燃烧。在这个燃烧模型中, 油雾和周围空气的混合速率决定了其引燃效率。因此, 混合燃烧模型中已燃烧燃油质量可通过下式计算:

$$\frac{dm_{f, mix}}{dt} = \frac{\sqrt{c_{pist} \cdot v_{pist}^2 + c_k \cdot k}}{\sqrt[3]{\frac{\Phi V_{cyl}}{n_N}}} \cdot m_f \quad (4)$$

典型混合长度是一个关于喷油孔的数量 n_N 和燃油 / 空气当量比 ϕ 和燃烧室容积 V_{cyl} 的函数, 典型混合速率是一个关于活塞运动速率 V_{pist} 和湍流动能 k 的函数。

(8) 排放预测。是内燃机排放的主要污染物, 下

式中表述了污染物生成与分解的三个守恒方程。

$$\begin{cases} N_2 + O \leftrightarrow NO + N & (5) \\ O_2 + N \leftrightarrow NO + O \\ OH + N \leftrightarrow H + NO \end{cases}$$

式中为不同公式定义了一个动力学参数 K_i , 并定义向右反应方向为符号 +, 向左反应方向为 -。 NO_x 演变定义如下式:

$$\begin{aligned} \frac{d[NO]}{dt} = & +K_1^+ [O][N_2] + K_2^+ [N][O_2] + K_3^+ [N][OH] & (6) \\ & + K_1^- [NO][N] + K_2^- [NO][O] + K_3^- [NO][H] \end{aligned}$$

选用 AMESim 提供的 ENG12BARBALTC12 元件作为缸内燃烧子模型, 该模型根据前文陈述的 BARBA 方法计算缸内工质燃烧压力、温度和废气排放等参数。

喷油器元件 FNGINJ11-1 可以将导入的喷油率数据拟合为用六个参数表达的近似曲线, 可以比较精确地反映出实际的喷油规律。此外, 喷油器子模型需要输入四个外部变量, 分别是喷油器内的燃油压力、燃油温度、喷油提前角和喷射脉宽, 根据机械式喷油器的喷油率试验数据拟合仿真喷油率曲线。将压气机与涡轮机通过一个旋转轴连接组合为涡轮增压器, 需要设置的主要参数包括压气机和涡轮机的几何参数 (如叶轮外缘直径、扩压管直径等), 通过获取的增压器特性曲线, 将其标准环境条件下 (一般为 1.013bar, 293K) 通用特性数据转化为当前试验条件下的特性数据,

3 燃油喷射系统仿真模型建立

为了研究高压共轨系统对柴油机的影响, 建立高压共轨燃油喷射系统仿真模型。共轨管具有稳压的作用, 能够减小高压油泵压力波动对喷油压力的影响, 因此本文假设从共轨管输出的燃油压力和温度相对稳定, 将其简化为一个稳定压力源与喷油器连接。由于共轨管具有稳压的作用, 能够减小高压油泵压力波动对喷油压力的影响, 因此本文假设从共轨管输出的燃油压力和温度相对稳定, 将其简化为一个稳定压力源与喷油器连接。高压共轨燃油喷射系统中的电控喷油器, 是通过一根较短的高压油管和共轨相连的, 主要由电磁阀, 压力放大系统和孔式针阀偶件等几部分构成的。综上根据实验室喷油器实物构建的高压共轨燃油喷射系统仿真模型如图 1 所示。

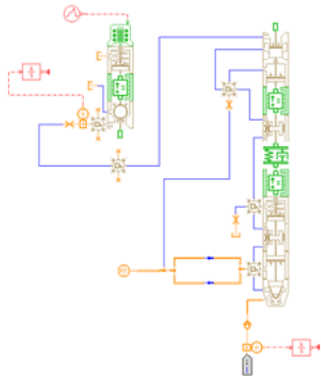


图1 高压共轨燃油喷射系统仿真模型

4 柴油机仿真模型精度验证

为了验证柴油机工作过程仿真模型的正确性，特选择100%负荷、90%负荷、75%负荷和50%负荷四个工况下的仿真结果与试验数据进行对比，结果如下：通过仿真，获得了柴油机各个工况下的仿真数据（见图2~图5），分别为各工况下缸内压力仿真数据与试模型的仿真数据与试验数据相对误差较小，验证了仿真模型的准确性与合理性。

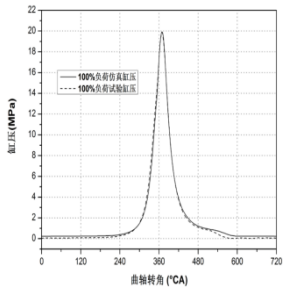


图2 100%负荷缸压对比

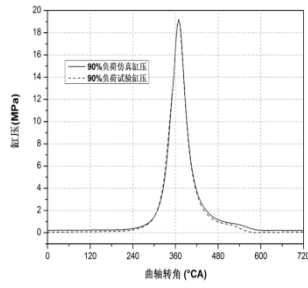


图3 90%负荷缸压对比

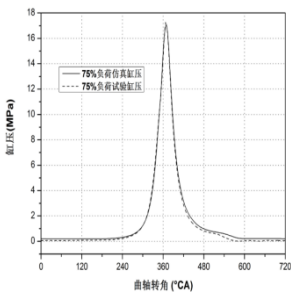


图4 75%负荷缸压对比

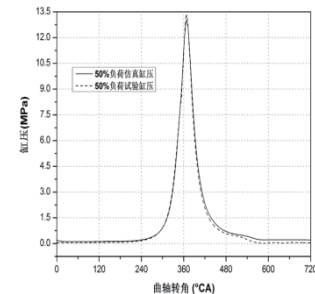


图5 50%负荷缸压对比

5 控制参数对柴油机性能影响分析

基于燃油喷射模型与柴油机工作过程仿真模型耦合的合理性，在保证喷油脉宽不变的条件下，分别改变喷油压力和喷油始点，探究燃油喷射控制参数对柴油机性能影响。如表1所示。

表1 燃油喷射控制参数对柴油机性能影响实验方案设计

项目	序号	取值范围	柴油机性能参数
喷油压力 (MPa)	1	150	爆发压力 IMEP, NO _x 排放 循环喷油量
	2	155	
	3	160	
喷油始点 (上止点前°CA)	1	4	
	2	5	
	3	6	

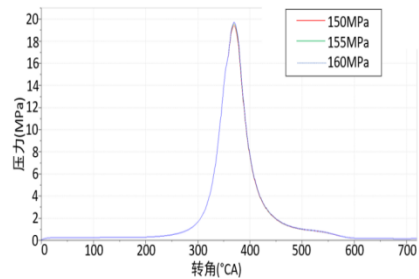


图6 不同喷油压力的缸压曲线

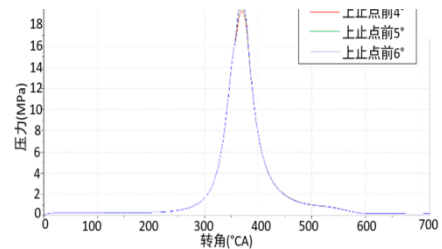


图7 不同喷油始点的缸压曲线

表2 不同喷油压力下的柴油机性能参数

喷油始点	爆发压力	IMEP	NO _x 排放	循环喷油量
150MPa	19.37MPa	20.50bar	10.88g/kWh	96.00 kg/h
155MPa	19.49MPa	20.86bar	11.20g/kWh	97.86 kg/h
160MPa	19.68MPa	21.24bar	11.52g/kWh	99.68 kg/h

表3 不同喷油始点下的柴油机性能参数

喷油始点	爆发压力	IMEP	NO _x 排放	循环喷油量
上止点前4°	19.27MPa	21.14bar	10.88g/kWh	99.76 kg/h
上止点前5°	19.68MPa	21.24bar	11.20g/kWh	99.68kg/h
上止点前6°	20.37MPa	21.40bar	11.52g/kWh	99.54 kg/h

从图6，图7及表2，表3可以看出，随着喷油压力升高，循环喷油量增加，导致缸内爆发压力增加，IMEP值和NO_x排放量都上升；而随着喷油始点提前，循环喷油量略有下降，但由于滞燃期的增长，燃料燃烧更充分，缸内爆发压力，IMEP值和NO_x排放量都上升。

6 结论

(1) 本文建立了柴油机工作过程仿真模型和高压共轨燃油喷射系统仿真模型耦合得到的柴油机模型，验证了仿真模型的精度，高压共轨燃油喷射系统仿真模型能够正确的反应燃油喷射和压力波动规律，耦合模型可以较准确地模拟缸内燃烧及涡轮增压器运行。

(2) 随着喷油压力升高，循环喷油量增加，导致

