

多运行工况耦合条件下柴油机燃油喷射与燃烧协同控制

刘小四

安徽交通职业技术学院

摘要: 面向多运行工况耦合与瞬态强扰动场景, 提出柴油机燃油喷射-燃烧协同控制框架。通过燃烧状态虚拟估计与置信度管理获取 CA50、IMEP 等关键量, 采用轻量化 MPC 联合优化主喷定时、预喷比例与轨压目标, 并引入风险指标自适应调节排放-经济性-噪声权重, 实现工况切换下的约束一致。仿真与台架对比表明, 该方法可降低瞬态烟峰与相位漂移, 兼顾 NO_x 控制、油耗与燃烧平顺性, 提升全工况鲁棒性。

关键词: 柴油机; 多工况耦合; 燃油喷射; 燃烧相位; 协同控制

在排放法规持续加严与“双碳”目标约束下, 柴油机在重载运输、工程机械等场景仍具不可替代性, 但其控制难点从“单点最优”转向“全工况一致”。真实道路与作业过程呈现多运行工况耦合: 转速-负荷宽域波动、环境温度与海拔扰动、燃油品质差异以及附件功率随机叠加, 使共轨压力、喷油率形状与缸内湍流-化学反应关系不断漂移。传统离线标定依赖大量稳态点与插值, 在加速、换挡与负荷突变时易出现短时烟峰、NO_x 超限或扭矩响应滞后, 且在后处理未起燃的冷态阶段更难保证排放一致性。因此, 构建面向多工况耦合的燃油喷射与燃烧协同控制, 是提升柴油机全域性能与合规韧性的关键方向。

现有研究多从两条路径推进: 其一以喷射规律为核心开展开环优化, 调整轨压、喷油定时与多脉冲比例改善雾化与混合, 并通过分区标定覆盖典型点; 其二以燃烧相位为核心开展闭环控制, 依据缸压或虚拟传感估计 CA50、IMEP 等并反馈修正喷油提前角。前者工程易落地, 但对工况漂移、部件老化与燃油波动敏感; 后者鲁棒性更强, 却受传感成本、估计误差与控制延迟影响。更突出的问题在于耦合与多时间尺度: 轨压与喷油器动态属毫秒级, 燃烧相位与循环变动跨越多个工作循环, 进气/EGR 路径与热状态更慢; 若仅控制单一变量, 容易在耦合通道产生互扰, 导致 NO_x-烟度权衡失衡、噪声与机械负荷上升, 甚至在极端工况触发保护降扭影响可用性。由此需要一种能在不同工况下在线权衡多目标、能处理工况切换与模型漂移、并满足量产 ECU 资源约束的协同控制框架。

本文以“喷射可控量-燃烧状态量-性能约束量”的链式耦合为主线, 构建分层协同控制: 上层生成燃烧相位与扭矩目标及权重; 中层采用轻量化 MPC 联合决策 SOI、分段比例与轨压目标; 下层实现轨压与执行器快速闭环。为降低硬件依赖, 提出多源虚拟估计

结合在线辨识的燃烧状态获取方法, 并引入风险指标驱动的权重调节, 使排放与经济性在稳态与瞬态之间实现连续过渡。通过典型稳态点、加速/减速过渡与循环片段的对比验证, 分析协同控制对 NO_x、烟度、油耗与燃烧噪声的综合影响及其工程边界。

1 多运行工况耦合机理与协同控制建模

1.1 耦合特征与控制变量选取

多工况耦合使控制对象呈现强非线性与强约束特征。共轨压力由高压泵供油与喷油器泄放共同决定, 受泵速、燃油温度、轨容积与喷射频次影响; 喷油量与喷油率形状受电磁/压电驱动延迟、轨压与喷孔流量系数影响。燃烧受进气量、EGR 率、缸内温度与湍流强度共同支配, 着火延迟与扩散燃烧占比随转速负荷变化显著, 进而改变 NO_x 生成与碳烟氧化的相对速度。基于可实施性与可观测性, 本文将控制变量选为主喷 SOI、预喷比例与轨压目标, 并在需要时扩展到后喷用于热管理与烟度抑制; 燃烧状态以 CA50、燃烧持续期与 IMEP 为主, 机械约束以 p_{max} 与 $dp/d\theta$ 表征, 同时将 COVIMEP 作为稳定性约束纳入上层管理。

1.2 耦合模型的参数化与在线更新

为兼顾物理意义与实时性, 采用局部线性化与增益调度构建耦合模型: 在工况向量 $\omega = [n, Te, Tin, pamb]$ 附近, 燃烧相位与输出对喷射参数的扰动可写为 $\Delta y = G(\omega) \Delta u$, 其中 u 包含 SOI、预喷比例与轨压。 $G(\omega)$ 可由台架试验或高保真仿真在有限工况点识别, 再按转速负荷双线性插值得到在线模型。为抑制模型漂移, 引入等效着火延迟与等效混合速率作为中间参数, 并用递推最小二乘在线更新关键敏感度; 同时对喷油器开启延迟与轨压传感偏移设置偏置项, 实现对老化与燃油性质变化的慢时标补偿。对于强非线性区域, 可用分段仿射模型近似, 使 MPC 仍保持凸优化形式, 兼顾精度与求解效率。

1.3 多目标约束表达与权重调节

控制目标用性能向量 $y=[BSFC, NO_x, Smoke, p_{max}, dp/d\theta, COVIMEP]$ 描述, 硬约束包括轨压上限、喷油器驱动限制、排气温度上限与 p_{max} 上限, 软约束包括 NO_x 与烟度的目标窗口以及燃烧噪声的舒适性要求。为实现在线权衡, 引入排放风险指标 R 综合表征后处理温度、EGR 偏差、瞬态强度与环境工况: 当 R 升高或后处理处于低温区时, 提高烟度与 HC 抑制权重并限制富油加速; 当后处理温度充足且动力需求高时, 适度放宽排放软约束以保证响应与经济性。该机制使控制从“固定权重”转为“随工况与热状态自适应”的协同权衡, 减少不同区域标定逻辑不一致带来的边界效应。

1.4 分层协同控制结构

考虑多时间尺度, 采用“执行层-协调层-管理层”三层结构: 执行层以 ms 级采样实现轨压快速跟踪、泵控阀前馈与喷油器电流补偿; 协调层以 $5ms-10ms$ 采样进行喷射参数联合优化, 并处理执行器饱和与限幅; 管理层以循环级更新燃烧目标与权重, 监控 p_{max} 、 $dp/d\theta$ 与稳定性并触发保护策略。层间通过统一接口变量传递约束与参考值, 并通过增量式命令降低切换冲击, 从而在保证实时性的同时减少喷射、燃烧与机械约束之间的互扰。

2 燃油喷射与燃烧协同控制策略

2.1 燃烧状态虚拟估计与置信度管理

在不增加高成本传感的前提下, 利用曲轴角速度微扰与燃烧扭矩映射估计 IMEP, 并结合共轨压力纹波与喷油事件关系推断喷油实际时序, 进而获得近似 CA50 与循环波动信息。实现上可采用扩展卡尔曼滤波或观测器结构, 将可测信号(转速、轨压、进气压力等)与简化热释放模型融合, 输出燃烧相位与偏置项估计。为保证可用性, 估计器采用遗忘因子与滑动窗口滤波, 并输出置信度指标: 在快速过渡、信号缺失或噪声增大时降低反馈增益、冻结自适应参数并回退到保守策略, 避免估计误差放大为控制抖动, 保证闭环稳定、排放安全与可驾驶性。

2.2 轻量化 MPC 的联合决策

协调层将喷射与燃烧统一为约束优化问题, 决策变量 $u=[SOI, ratio_pre, prail^*]$, 输出包含燃烧相位、扭矩与排放代理指标。代价函数同时惩罚 CA50 偏差、扭矩误差、 NO_x /烟度代理与控制增量, 并对 $dp/d\theta$ 设置软约束抑制噪声。为适配 ECU 算力, 采用局部模型与约束集按工况插值实现增益调度, 求解器可选快速二次规划迭代或显式 MPC 控制表; 当检测到饱和趋势

时, 通过缩短预测窗口与调整惩罚项实现退化求解, 保证实时性。该方法可提前预见轨压滞后与执行延迟, 减少瞬态富油与相位偏移, 并降低跨工况切换时的控制“跳变”。

2.3 工况切换耦合补偿与自适应

针对加速段轨压爬升滞后与喷油率失配, 构建轨压-喷油量耦合前馈, 按目标喷油量与当前轨压计算泵控阀预开度与轨压斜率, 并设置限幅/斜率约束以避免过冲; 在喷油事件密集区域, 对轨压目标进行“柔性跟踪”, 避免因过快升压引起泵负荷尖峰与油耗恶化。针对环境与燃油波动导致的相位漂移, 在线辨识更新 $\Delta CA50$ 对 ΔSOI 的等效增益, 并采用投影算法将参数限制在合理区间; 在排放风险高或置信度低时暂停更新, 实现“安全优先”的自适应。通过快时标前馈与慢时标自适应的组合, 可同时应对滞后与漂移两类典型耦合问题。

2.4 排放-经济性-噪声的协同约束管理

为避免单指标最优导致的综合性能劣化, 将 NO_x -烟度权衡与噪声/机械约束纳入统一优化。高烟风险工况下提高轨压并增加预喷以改善混合, 必要时适度延后主喷降低局部富油并限制过浓当量比峰值; 高 NO_x 风险工况下延后燃烧相位、降低预混燃烧占比并限制峰值放热率; 高噪声或机械风险工况下约束 $dp/d\theta$ 并通过分段喷射平滑放热、限制 p_{max} 接近上限时的进一步提前。上述策略通过权重与软约束连续调节实现平滑切换, 并与管理层的热状态与风险指标联动, 提升全工况一致性与驾驶平顺性。

3 仿真与试验验证及讨论

3.1 试验与仿真方案

选取高压共轨柴油机建立包含轨压系统、喷油器动态、进排气与燃烧子模型的实时仿真平台, 并在台架开展对比试验。试验配置采集转速、轨压、进气/排气压力、空燃相关信号与排放分析数据, 部分工况配备缸压用于校准虚拟估计。工况覆盖典型稳态点、阶跃与斜坡扭矩瞬态, 以及包含起步-加速-巡航-减速片段的循环工况, 并考虑冷态与热态两种热状态。对比对象为传统开环标定与燃烧相位单闭环控制, 评价指标包括 BSFC、 NO_x 、烟度以及 p_{max} 、 $dp/d\theta$ 与 COVIMEP 等稳定性指标。

3.2 协同控制效果与机理解释

稳态条件下, 协同控制使 CA50 保持在目标窗口并抑制放热峰值, 从而在不牺牲油耗的前提下降低 NO_x 或烟度的极端值; 低速大负荷区域通过“提高轨压+增加预喷”改善扩散燃烧混合, 使烟度峰值下降

更明显；中速中负荷区域通过“相位后移+限制放热峰值”抑制峰温，使NO_x敏感段收益更突出。瞬态条件下，轨压前馈缩短扭矩响应滞后并降低加速烟峰，自适应更新减小冷态与燃油波动造成的相位漂移，使过渡段COVIMEP下降、燃烧平顺性提升；同时， $dp/d\theta$ 软约束减少了因过度提前导致的噪声尖峰，提升了NVH一致性。综合来看，协同控制通过“预测补偿+约束优化+自适应更新”同时解决滞后、饱和与漂移三类问题，因而具备跨工况的稳定收益，并减少传统分区标定在边界处的性能断裂。

3.3 工程落地要点与未来工作

工程部署需重点关注虚拟估计的鲁棒性与诊断策略，必要时采用少量缸压传感或离线校准增强可观测性，并设置故障降级逻辑保证安全；同时应结合法规循环与用户工况形成权重与约束的场景化配置，并以风险指标R进行在线修正，降低标定工作量。控制器实现层面，可通过显式MPC表、模型降阶与定点化计算提升实时性，并将参数自适应限定为慢时标、可追溯的更新过程以便标定与法规认证。未来可将喷射—燃烧协同进一步扩展到与EGR、VGT及后处理热管理的一体化协调，并结合数据驱动模型校正与在线学

习提高复杂工况下的泛化能力，为柴油机在高效低排放并重的过渡阶段提供可持续的控制技术支撑。

参考文献：

- [1] 杜家坤. 基于燃料特性与燃烧边界条件协同控制的高效清洁燃烧技术研究[D]. 吉林大学, 2016.
- [2] 刘雨龙, 任正敏, 梁永森, 等. 燃油喷射参数对混动柴油机低温起动燃烧与性能影响研究[J]. 内燃机工程, 2025, 46(02): 19-26.
- [3] 张俊梅. 某型高压共轨柴油机燃油喷射特性与排放性能研究[J]. 中国设备工程, 2025, (08): 87-90.
- [4] 王蕊, 董东升, 魏明亮, 等. 高功率密度柴油机用超高压喷射技术研究[J]. 拖拉机与农用运输车, 2023, 50(02): 34-37.
- [5] 杨继雅. 高强度隔热柴油机燃烧过程的模拟研究[D]. 大连理工大学, 2022.
- [6] 吴恒. 燃料理化特性和发动机控制参数对油机协同效能敏感性分析方法研究[D]. 吉林大学, 2024.
- [7] 王时野. 含氧混合燃料对船用主机均质压燃的NO_x和CO₂影响研究[D]. 大连海事大学, 2023.
- [8] 陈俊霖. 柴油机低温冷起动传热特性及辅助起动预热方案研究[D]. 昆明理工大学, 2024.