

车发动机电控燃油喷射系统的优化设计与性能分析

梁凤鸿 谭建

天津内燃机研究所 天津 300072

摘要: 车发动机电控燃油喷射系统作为现代内燃机的核心技术,其优化设计与性能分析直接关系到整车的动力性、经济性与环保性。本文聚焦于该系统的工程实践层面,探讨其在精准燃油计量与高效燃烧组织方面的核心价值。研究指出,当前系统在面向全工况自适应控制、多物理场耦合可靠性以及智能化升级路径等方面仍存在深层挑战。针对这些挑战,本文提出了基于模型预测的标定策略优化、面向极端工况的鲁棒性设计增强以及数据驱动的智能控制架构迭代等对策。通过整合控制理论、材料工程与信息技术,旨在构建更高效、可靠且具学习进化能力的燃油喷射系统,为下一代清洁高效动力平台的发展提供技术支撑。

关键词: 电控燃油喷射; 优化设计; 性能分析; 一致性控制; 智能标定; 鲁棒性设计

引言

随着全球排放法规日益严格与用户对车辆性能要求的不断提升,车发动机电控燃油喷射系统已从单一的燃油供给执行部件,演变为决定发动机综合性能的核心智能单元。该系统通过电子控制单元对喷油量、喷油正时及喷油压力的精确调控,实现了对缸内燃烧过程的主动干预与优化。然而,在追求更高热效率与超低排放的目标驱动下,系统设计复杂度剧增,控制精度、环境适应性与长期可靠性等问题愈发凸显,对其进行优化设计与性能分析成为推动内燃机技术进步的关键。当前,传统优化方法已难以满足复杂工况下的性能需求,亟需结合先进控制算法与仿真技术,开展系统性研究,为电控燃油喷射系统的性能提升提供技术支撑,助力内燃机行业实现节能降排与性能升级的双重目标。

一、基于车发动机电控燃油喷射系统的优化设计与性能分析的意义

电控燃油喷射系统的优化设计是实现发动机性能跃升的根本途径。传统机械式或早期电控系统受限于控制策略的僵化与执行器精度的不足,难以在瞬变工况下维持理想的空燃比与燃烧相位。通过优化设计,引入先进的控制算法与高动态响应执行器,系统能够实时感知并响应发动机转速、负荷、温度乃至驾驶意图的细微变化,从而在毫秒级时间内完成喷油参数的精准修正。这种能力使得发动机能够在从冷启动到高负荷的全工况谱内,始终保持接近理论最佳值的燃烧状态,这不仅直接转化为更强劲的动力输出与更低的燃油消耗,更是实现超低

尾气排放(如国六b、欧七标准)的前提条件。

深入的系统性能分析则是优化设计得以有效实施的科学基础。性能分析超越了简单的台架测试与数据记录,它需要构建涵盖流体力学、热力学、电磁学与控制理论的多学科耦合仿真模型,以揭示系统内部复杂的物理化学过程。例如,分析高压共轨系统中的压力波动如何影响各缸喷油量的一致性,或探究喷油器电磁阀在高温振动下的动态响应衰减机理。通过这种深层次的性能剖析,能够准确识别制约系统效能提升的瓶颈环节与潜在失效风险,为后续针对性的结构改进、材料选型与控制策略升级提供明确的工程指引,避免盲目试错,显著缩短研发周期并提升产品的固有质量与可靠性。尤为重要的是,优化设计与性能分析的深度融合,能够适配不同类型内燃机的需求,无论是柴油发动机的高压共轨系统,还是汽油发动机的直喷系统,都能通过针对性优化实现性能突破,同时为发动机的轻量化、小型化发展提供技术支撑,助力汽车产业兼顾节能降排与动力性能,契合全球汽车动力技术的发展趋势。

二、基于车发动机电控燃油喷射系统的优化设计与性能分析的问题

1. 多缸供油一致性控制难题

电控燃油喷射系统在多缸发动机上应用时,确保各缸循环喷油量高度一致是一项严峻挑战。这种不一致性源于机械制造公差、液压波动以及控制信号微差等多重因素的耦合作用。例如,各喷油器内部精密偶件(如针阀与阀座)的微观尺寸差异,会导致其流量特性曲线发生偏移;同时,共用的低压供油管路在多个喷油器交替

充油与泄压过程中，会产生复杂的压力脉动，使得抵达每个喷油器入口的燃油瞬时压力不尽相同。这些硬件层面的固有差异，会直接导致各缸实际空燃比偏离ECU设定的目标值，引发各缸排气温度不均、爆发压力波动等问题。这不仅影响发动机运转的平顺性与NVH性能，还会因个别气缸燃烧不理想而导致整机排放恶化与油耗上升，严重时甚至可能因局部热负荷过高而引发机械故障。

2. 极端工况下的系统可靠性衰减

现代发动机工作边界不断拓宽，电控燃油喷射系统需要持续在高温、高压、强振动及电气干扰等极端复合工况下稳定工作，其可靠性面临严峻考验。高温环境会加速电子元器件（如ECU中的芯片、驱动电路中的MOSFET）的老化，导致其电气参数漂移甚至热击穿失效。高压共轨系统长期承受高达200MPa以上的燃油压力，对密封材料、金属部件的疲劳强度提出了极高要求。强烈的机械振动可能导致传感器信号失真、接插件松动或内部焊点开裂。此外，发动机舱内复杂的电磁环境可能干扰敏感的传感器信号与控制指令的传输。这些因素共同作用，使得系统在长期使用后，其控制精度与响应速度可能出现不可预测的衰减，故障率升高，维护成本增加，严重制约了其在苛刻应用场景（如重型商用车、高性能车型）中的推广与使用寿命。

3. 高控制精度与快速动态响应的内在矛盾

提升燃油喷射的控制精度与加快系统的动态响应速度，两者之间存在着固有的工程矛盾。为实现极高的喷射精度（如微米级雾化颗粒、0.1毫秒级的喷油脉宽控制），需要采用高分辨率传感器、高位数模转换器以及复杂的闭环控制算法，这不可避免地增加了信号处理与计算的时间开销，导致系统响应延迟。然而，发动机工况瞬息万变，特别是在急加速、急减速等瞬态过程中，ECU需要近乎实时地调整喷油参数以匹配进气量的剧烈变化。若系统响应过慢，就会造成瞬时空燃比失调，导致加速无力、排放冒烟或燃烧不稳定。反之，若过分追求响应速度而简化控制逻辑或降低采样精度，又会使稳态工况下的控制精度下降，影响燃油经济性与排放水平。如何在这对矛盾中取得最佳平衡，设计出既能“慢工出细活”又能“快速反应”的控制系统，是优化设计中的核心难题。

三、基于车发动机电控燃油喷射系统的优化设计与性能分析的对策

1. 实施基于模型预测与在线自学习的柔性标定策略

为解决多缸一致性难题并缓解精度与响应的矛盾，

必须超越传统的固定参数标定模式，转向基于模型预测控制与在线自学习的柔性标定策略。该策略的核心在于构建一个能够实时反映发动机当前状态的数字孪生模型。例如，在博世新一代柴油共轨系统中，ECU内嵌的虚拟发动机模型会持续接收来自物理传感器的实际数据（如轨压、进气量、各缸离子电流信号），并实时计算在当前工况下各缸的理想喷油量。当模型预测到某缸因喷油器轻微堵塞或低压油路压力波动可能导致喷油量偏离时，ECU不会机械地执行预设的标定MAP图，而是动态调整对该缸喷油器的控制指令（如微调喷油脉宽或喷油起点），进行主动补偿，从而在硬件存在固有公差的情况下，依然能在软件层面实现各缸输出的一致性。

柔性标定的高级形态是引入在线自学习机制。系统在长期运行中，会持续积累海量的工况数据与对应的性能反馈（如排放值、油耗、爆震倾向）。通过边缘计算或与云端协同，系统能够利用机器学习算法分析这些数据，自主发现原有标定参数在特定工况区间（如高原低温启动、城市拥堵频繁启停）下的不足，并生成优化后的控制参数集，在确保安全的前提下进行在线更新。例如，某国产高端汽油机项目，通过部署具备自学习功能的标定系统，在车辆上市后的首年，通过OTA方式分批次推送了针对不同地域气候和用户驾驶习惯优化的喷油控制策略，使得用户群体的平均油耗降低了约2%，且冷启动排放表现得到普遍改善。这种从“出厂固定”到“终身优化”的范式转变，极大地提升了系统的适应能力与长期性能表现。实施过程中需注重数据安全与算法稳定性，通过搭建冗余备份机制，避免参数更新异常影响发动机运行，同时结合台架测试与实车验证，确保优化策略的实用性与可靠性，进一步释放电控燃油喷射系统的性能潜力。

2. 开展面向全生命周期可靠性的鲁棒性设计与智能热管理

提升系统在极端工况下的可靠性，需从被动应对故障转向主动设计预防，核心是开展鲁棒性设计与集成智能热管理。鲁棒性设计要求在开发初期就系统性地分析所有潜在失效模式，并在设计、材料与工艺层面予以根除或抑制。例如，针对高压驱动电路中MOSFET易热击穿的问题，德尔福公司在其新一代喷油器驱动模块设计中，摒弃了简单的双管并联方案，选用宽禁带半导体器件并优化栅极驱动电路，从源头上降低功耗与温升，同时优化PCB布局与散热设计，确保热量高效导出，材料上选用耐高温抗老化部件应对长期损耗。

智能热管理则是鲁棒性设计的动态延伸。系统通过多个温度传感器实时监控各区域温度场，建立温度与元件性能衰减的预测模型，而非简单阈值报警。如持续大负荷运行时，ECU会微调喷射策略或联动冷却系统主动降温，宝马某高性能发动机的智能热管理系统可预判热负荷变化，提前调整策略，避免功率衰减，保障发动机耐久性，这一设计进一步完善了电控燃油喷射系统的可靠性保障体系。此外，鲁棒性设计还需结合严苛的环境测试，通过高低温循环、振动冲击、盐雾腐蚀等模拟极端工况，验证部件耐受能力；智能热管理可与整车能源管理系统协同，实现散热与节能的平衡。同时，需建立全生命周期数据追溯机制，跟踪部件运行状态，为后续设计迭代提供数据支撑，全方位提升系统在复杂工况下的长期可靠性，满足排放法规与用户对车辆耐久性的双重需求。在工艺层面，可引入精密制造与无损检测技术，对高压油管、喷油器针阀等关键部件进行全流程质量控制，杜绝加工缺陷；智能热管理还可融入AI算法，通过深度学习持续优化温度控制策略，适配不同地域、不同驾驶场景的动态需求，进一步降低部件损耗，延长系统使用寿命，为电控燃油喷射系统的稳定运行筑牢防线。

3. 构建“感知-决策-执行”一体化的多模态协同智能控制架构

为从根本上调和控制精度与动态响应的矛盾，并支撑未来的功能进化，需要革新系统底层架构，构建“感知-决策-执行”一体化的多模态协同智能控制架构。传统架构中，传感器、ECU、执行器是线性串联关系，信息流与指令流延迟明显。新架构借鉴自动驾驶域控制器理念，为燃油喷射系统设立专用高性能微控制器，实现与发动机其他子系统控制器的高速互联与信息共享。大陆集团的集成式动力域控制器，将燃油喷射控制与空气路径管理深度融合，可结合前方车流预测信息，提前规划扭矩曲线，协同优化喷油与增压参数，改善瞬态响应并降低排放油耗。

该架构的多模态特性的核心是可根据性能优先级动态切换控制模式：稳态巡航启用高精度经济模式追求极致节能清洁，急加速切换至快速响应性能模式优先保障动力，丰田勒芒赛车系统还可根据轮胎磨损、燃油存量切换至耐久保护模式。这种一体化、智能化架构，让

燃油喷射系统从被动执行者转变为主动感知、协同决策的智能体，不仅解决了精度与响应的核心矛盾，更为应对未来复杂法规与应用场景提供了坚实支撑，进一步完善了电控燃油喷射系统的优化体系。为保障架构稳定运行，需配套搭建高速、高可靠的通信总线，采用以太网与CAN总线协同的方式，降低信息传输延迟，确保各子系统数据实时同步。同时，引入冗余设计，在核心传感器、微控制器出现故障时，可快速切换至备用模块，避免系统瘫痪。此外，架构可预留接口，兼容未来混合动力、自动驾驶等场景的功能扩展，通过软件升级即可实现燃油喷射控制与新能源动力系统的协同，进一步提升动力系统综合性能，为内燃机与新能源技术的融合发展提供技术适配，助力行业实现多元化节能降排目标。

结束语

车发动机电控燃油喷射系统的优化设计与性能分析是一项持续演进、多学科交叉的复杂系统工程。面对一致性控制、极端工况可靠性以及控制动态性能等深层挑战，单纯的硬件升级或参数调校已难以应对。未来的发展路径必然指向更深度的软硬件协同、更前瞻的鲁棒性设计以及更高级的智能控制架构。通过融合柔性标定、智能热管理、多模态协同控制等先进对策，电控燃油喷射系统将不仅继续作为提升传统内燃机效能的关键，更可能演变为连接传统动力与混合动力、乃至未来碳中和燃料应用的核心智能枢纽。持续深化该领域的研究与实践，对于推动汽车动力技术的绿色、高效与智能化转型具有不可替代的战略价值。这需要行业内科研人员、工程师协同发力，持续突破核心技术瓶颈，完善设计与验证体系，推动电控燃油喷射系统技术迭代升级，为汽车产业高质量发展注入持久动力。

参考文献

- [1] 李荣. 汽车发动机燃油经济性与排放性能优化分析[J]. 汽车测试报告, 2025(16): 151-153.
- [2] 蒋新德. 数字技术赋能汽车发动机燃油喷射系统故障诊断方式探究[J]. 汽车测试报告, 2025(8): 70-72.
- [3] 孙文福. 汽车发动机电控燃油喷射系统优化设计[J]. 汽车实用技术, 2024, 49(16): 51-55.