

要开发新型的发动机燃烧过程控制系统，通常需要极快的控制环路，只有这样才能使工程师进行及时干预，甚至干预进行中的燃烧过程。亚琛工业大学使用 dSPACE MicroAutoBox II 实现了循环内控制，以确保稳定地控制汽油发动机的压燃。

在 思考新的替代推进技术时，开发人员现在更多地倾向于电动汽车。这是因为那些开发人员目光短浅，认为内燃机将会被逐步淘汰。然而，实际上内燃机的开发潜力仍远未耗尽。创新的燃烧过程控制可以极大地提高效率。例如，过去一直被认为是柴油机独有的压燃技术也可以在汽油机上实现。汽油机的可控压燃（GCAI）有望大大减少二氧化碳、氮氧化物及颗粒物的排放。但是，实现 GCAI 需要复杂的控制和调节过程。因此，以燃烧室压力指示值作为输入的闭环控制已被证明前景极其广阔。对压力曲线

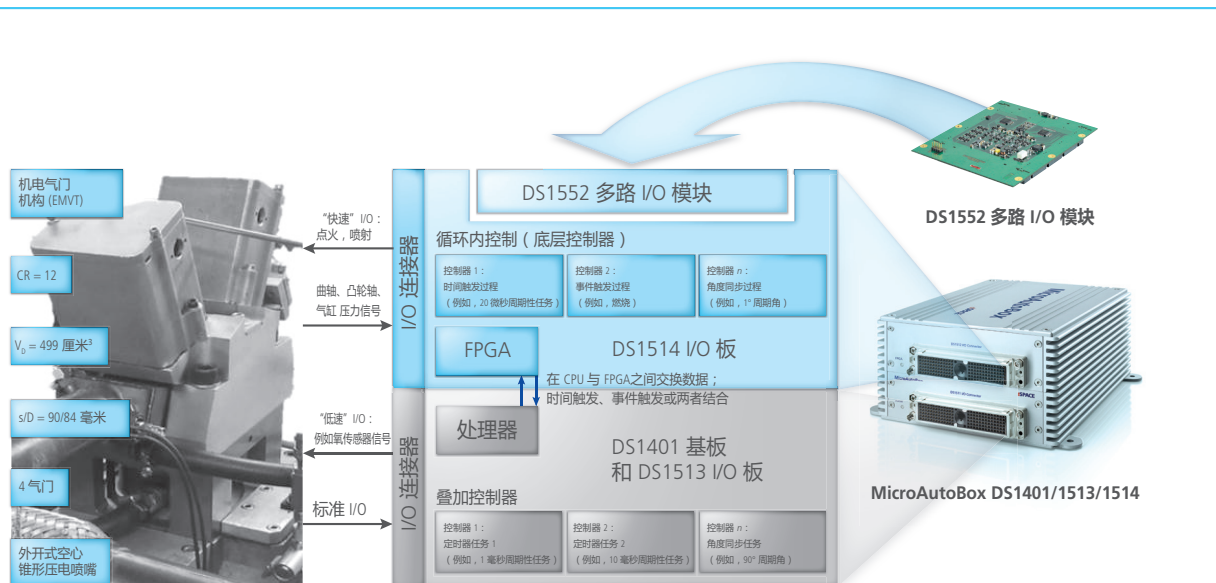
的直接热力学分析使开发人员能够立即评估燃烧过程，并在循环内对参数设定进行调整。德国亚琛工业大学内燃机研究所 (VKA) 的研究人员积极参与寻找快速控制原型的开发方法，并确保采用的方法在利用综合指标进行分析的前提下，仍能实现足够快速的循环内控制，保证最小的延迟特性。

高度可调的试验发动机

为此，亚琛工业大学的研究人员使用了一种直喷单缸发动机，其中央位置装配有一个外开压电式作动的空心圆锥喷嘴（图 1）。试验发动机进一步还配备了一个完全可调的

机电式气门机构 (EMVT)。由于气门机构可以从曲柄传动中完全脱离，因此可以根据工况点，为每个循环的压燃过程提供高比例的内部残留气体。dSPACE 的 MicroAutoBox II 与可以自由编程的 Xilinx® Kintex®-7 FPGA 相结合，已被证明是适用于执行该研究计划的理想控制原型。一开始，研究所使用了 XSG 高级发动机控制解决方案以及 MicroAutoBox II。该解决方案是一个开放的库，专为在 Simulink® 环境下基于模型的 FPGA 开发而设计，并且可以基于 Xilinx System Generator(XSG)进行使用。

图 1：带有机电式气门机构的单缸试验发动机（左侧）；带有 Kintex-7 FPGA 的控制原型系统 MicroAutoBox II（右侧）。



实时指征

该解决方案一项极具特点的功能就是具有实时能力的分析评估和气缸压力指示 (CPI)。曲轴、凸轮轴和编码器信号先在 FPGA 上由角度计算单元 (ACU) 进行评估, 然后生成一个分辨率为 0.1° 的角度信号作为进一步实时评估的基础。气缸压力信号以 1 MHz 为单位进行采样, 并同步于曲轴角度进行处理。此过程中, 循环内控制所需的热力学值将被自动计算, 例如: 放热行为、做功过程和换气过程的平均有效指示缸压、峰值缸压和缸压梯度。为确保实时性, 仅使用近似算法。在比较测试中, 使用的 CPI 算法得到了 FEV GmbH 公司成熟的指示工具“燃烧分析系统 (CAS)”的验证。产生的偏差微不足道, 不到百分之一, 因此证明可以在 FPGA 的速率下, 为循环内提供所需的控制参数。快速执行机构 (EMVT、燃油喷射) 也通过 XSG 高级发动机控制解决方案直接控制, 从而允许在仅仅几纳秒内进行控制干预。因此, 上述过程可以在一个燃烧循环中完成并为 MicroAutoBox II 处理器中运行的低速全局控制提供修正变量。

>>

点燃 发动机 创新 之火

压燃汽油发动机的循环
内燃烧控制

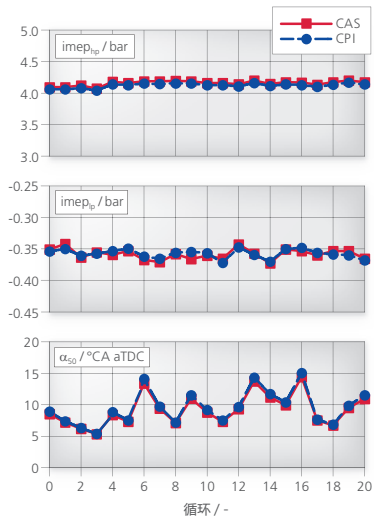


图 2：过高级发动机控制解决方案及燃烧分析系统 (CAS) 工具进行气缸压力指示 (CPI) 的示范性比较。平均有效指示缸压 $imep_{ip}$ 与 $imep_p$ 和燃烧点 (α_{50}) 的偏差微不足道。

循环内控制概念

在研究实验期间，用于压燃的高比例内部残留气体通过燃烧室再循环的方式来实现。此方法中，提前关闭排气阀，延迟打开进气阀，并使提前角与延迟角相对换气阶段的上

止点对称。在此阶段，燃烧室内残留的废气将被压缩。如有燃油未燃尽，不充分的滞燃之后通常会紧接着出现早燃，并且压力急剧升高。中间压缩期间与后续燃烧点之间的压力水平存在明显的相关性。这样，极度延迟的燃烧会导致中间压缩期间出现大量放热（图 3）。循环内控制利用了这一关联性。通过高级发动机控制解决方案，可以确定中间压缩期间的最大气缸压力信号，该信号可用作控制环路的输入信号。进气阀关闭时的曲轴角度被用作控制变量（图 4 中的 IVC）。

延迟此操作会降低有效压缩比。结果，压燃条件和燃烧点也会相应延迟。提前关闭进气阀可促使压燃的发生，从而造成燃烧点提前。如果在中间压缩期间，执行的气缸压力实时评估算法发现换气阶段上止点附近存在较低的峰值压力，则用于关闭进气阀的控制变量将被移至该循环内较早的点，以防止燃烧点延迟，反之亦然。这样，控制环路将在换气阶段上止点与进气阀激活点之间关闭（在大约 90° CA 曲轴角度内，在转速 $n = 1500$ min 时对应 10 毫秒时隙）。

“dSPACE 工具能够实现极快的循环内控制，这为开发新型燃烧过程控制创造了机会。”

Jakob Andert 教授/工程博士，德国亚琛工业大学

Bastian Lehrheuer 工程硕士
工程硕士 Bastian Lehrheuer 是德国亚琛工业大学内燃机研究所 (VKA) 的助理研究员。



Jakob Andert 教授/工程博士
教授/工程博士 Jakob Andert 是德国亚琛工业大学内燃机机电系统高级教授。



Maximilian Wick 理科硕士
理科硕士 Maximilian Wick 是德国亚琛工业大学内燃机研究所的机电系统助理研究员。



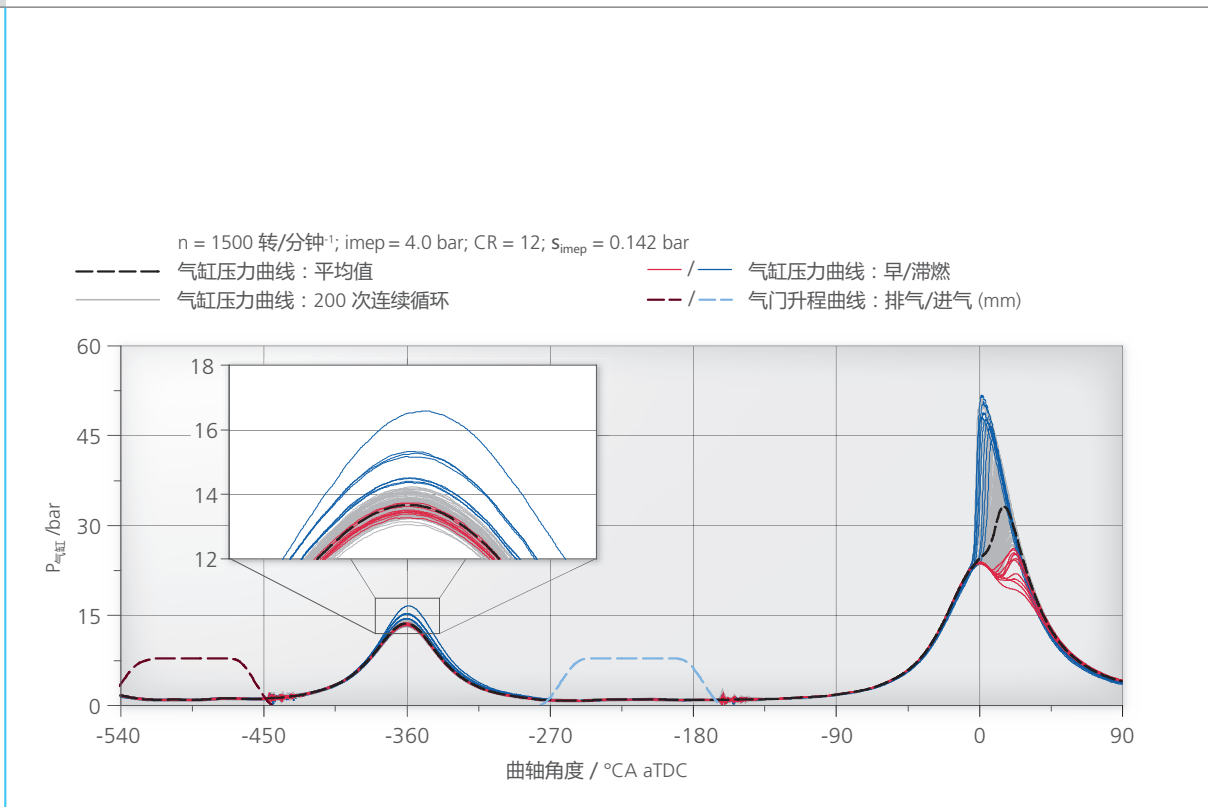


图 3 : 燃烧点过迟 (红色) 或过早 (蓝色) 的缸压曲线。周期性的压力波动被平均有效指示缸压 ($imep_{imep} = 0.142 \text{ bar}$) 的标准差量化表示, 从而可以被清晰地观测到。

试验结果

上述循环内控制的评估清晰地表明, 可以通过主动控制来避免极大的负载偏差, 从而大大降低平均有效压力指示的标准偏差 (图 4)。燃烧点也可以大大改善, 可靠避免燃烧点过早或过迟。通过利用中间压缩与后续燃烧之间的关联性, 德国亚琛工业大学的研究人员成功实现了计划中的循环内控制, 并将其应用于试验发动机。快速控制干预的潜力显而易见。该大学的进一步研究项目是将 MicroAutoBox II 的 FPGA 功能用于更复杂的控制算法。通过此项目, 研究人员希望通过气缸压力实时评估来优化燃烧过程的预测。此外, 还需要在控制变量方面进行另一项研究, 以允许在循环过程中进行控制干预。在此背景下, 内燃机研究所目前正在专门细

致地考察多次喷射和内燃机注水方面的策略。这样, 内燃机就很有可能摆脱被完全淘汰的厄运。■

Bastian Lehrheuer 工程硕士, Jakob Andert 教授/工程博士, Maximilian Wick 理科硕士, 德国亚琛工业大学

图 4 : IVC (关闭进气阀的控制变量)、 α_{50} 和 $imep$, 在启用了和未启用循环内控制时的 1000 次连续循环测试结果。通过主动控制, 平均有效指示缸压的标准偏差从 $\sigma_{imep} = 0.142 \text{ bar}$ 大幅下降至 $\sigma_{imep} = 0.088 \text{ bar}$ (底部)。可靠避免燃烧点过早或过迟。

