



4

只是空气？

UniAir —— 首个电液控制
全可变气门控制系统

Michael Haas



汽车工业的大趋势



图1 汽车工业的大趋势

尽管对汽车动力来说，混合动力和电气化的趋势日益增长，但是内燃机在未来几十年内将继续扮演非常重要的角色。日益严格的二氧化碳排放限制，即燃油经济性决定了汽车工业的一项主要任务是进行内燃机的优化。同电气化、混合动力及开发低成本汽车一样，优化燃油经济性也是一个大趋势（图1）。达到苛刻燃油经济性和排放目标的一个可能的方法就是采用可变气门机构。

舍弗勒集团很早以前就开始了各种形式可变气门机构的研发工作。按照分类，可变气门机构可分为

可变凸轮相位和可变气门升程。调节凸轮相位可影响废气再循环和有效压缩比。可变气门升程系统又可分为非连续（两段或三段）可变和连续可变。本文主要关注连续可变气门机构（图2）。在过去的研发中，舍弗勒集团很快认识到

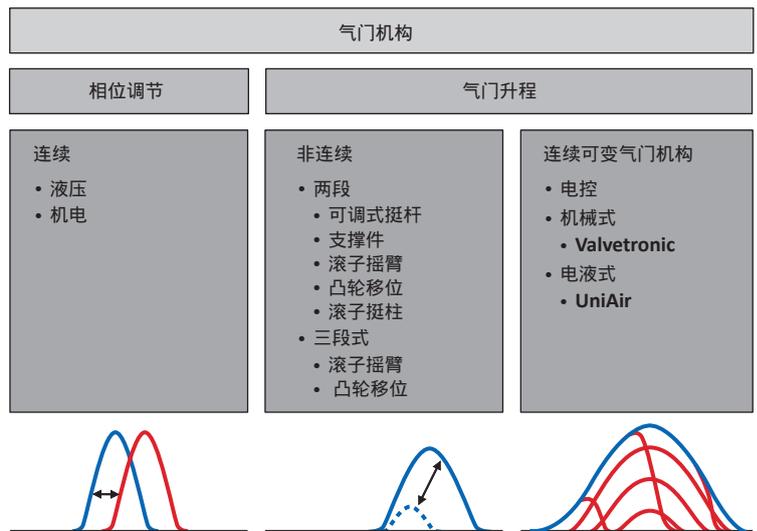


图2 可变气门机构

机械式连续可变气门机构例如 Valvetronic 无法理想地满足发动机各种多变工况的要求。因此舍弗勒集团早在 2001 年就开始了 UniAir 的研发并注册专利，这很可能是目前灵活性最高的系统了。

引言

连续可变气门机构是实现低二氧化碳排放策略的一项关键技术。传统节气门控制的汽油机，在达到所需的进气量的同时，有大约 10% 的燃料能量消耗在空气克服节气门阻力进入气

缸的过程中。如果应用连续可变气门机构，节气门可以保持全开（甚至去除节气门），则空气进入气缸过程无阻力。每个工况的准确进气量可直接通过气门的开启正时及开启断面来调节。

图 3 展示了连续可变气门机构连续地调节气门升程（见 B）。如果同时加上凸轮相位调节器，气门升程曲线可以在相位调节的过程中进行提前关闭。这就降低了泵气功并提高了发动机工作效率。此时在部分负荷工况发动机工作在米勒循环过程中（图 4）。米勒循环描述了进气门提前关闭过程。通过带可变气门机构的发动机和普通发动机的 PV 图对比可发现，由于节流损失的减少，泵气功大大降低。此外，

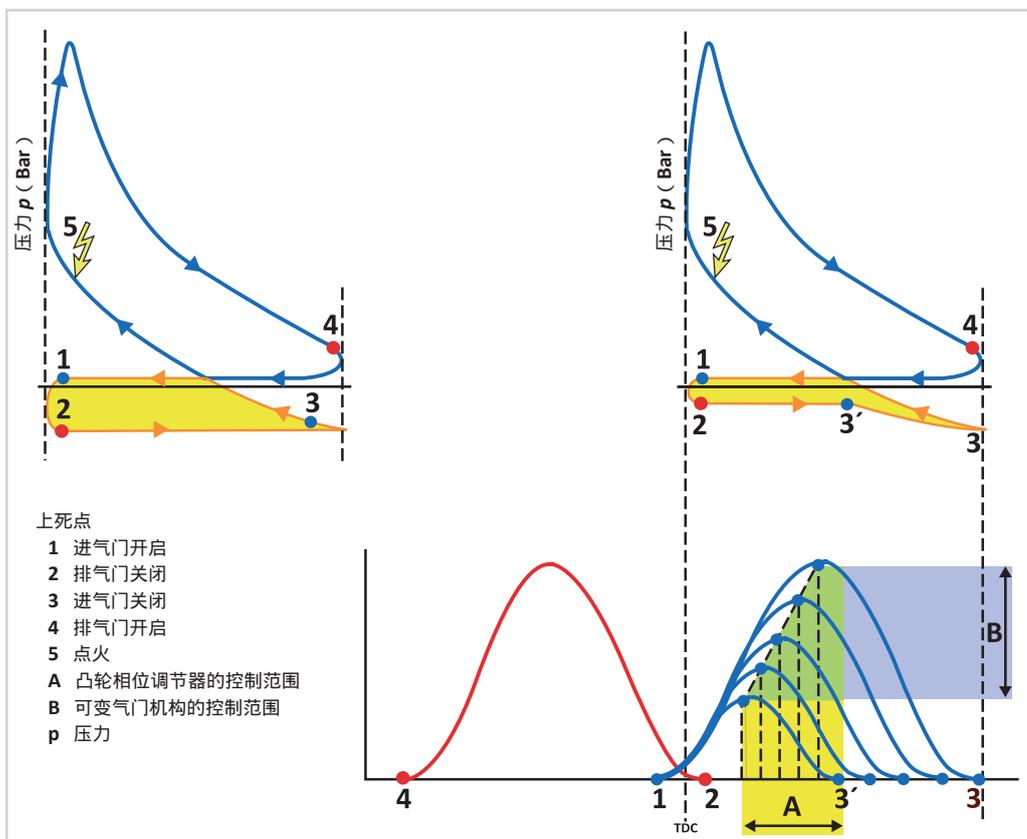


图 3 机械式连续可变气门机构的燃烧过程

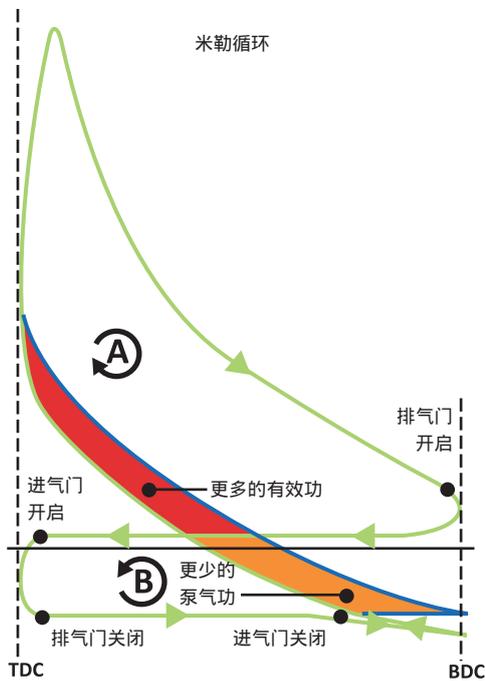


图4 米勒循环

由于进气门提前关闭，更少的空气进入气缸。因此压缩冲程需要更少的功，缸内温度维持在较低水平，有利于发动机输出更多的能量。

系统对比

图5为汽车主机厂、供应商或者工程服务公司开发过的一些系统。尽管经过几十年的努力，但汽车行业还没有成功开发出一款可用于量产的无凸轮、电磁或电液控制的高设计自由度连续可变气门升程系统。主要的问题是能耗、噪音、排放、成本以及错误控制可能导致的对发动机的损害。这也是为什么只有机电式的系统在批量生产。对比无凸轮气门机构系统，机电式系统有相对简单和可靠的结构，但通常机械构造和传动部件较复杂，并常与凸轮相位调节器结合使用。该类系统的主要缺点是灵活性较低、响应速度慢、各缸独立控制不可实现或者实现起来非常复杂。UniAir系统于2009年9月开始量产，是介于无凸轮系统和机电式系统之间的最佳折衷方案。该系统已经配备在Alpha Romeo MITO的菲亚特 FIRE MultiAir发动机上。对比市场上的其它系统，UniAir技术提供了最

全可变气门机构			
开发	机械系统	3D cam	电液式
	INA EcoValve Toyota Valvematic Nissan VVEL Hilite Univalve BMW Valvetronic II Mahle VLD Meta VVH Presta DeltaValveControl Yamaha CVVT Delphi VVA Mitsubishi MIVEC Honda A-VTEC	Suzuki SNVT INA 3CAM Fiat 3D CAM	INA UniAir
量产的全可变气门机构系统			
	Toyota Valvematic 2008	BMW Valvetronic II 2001	Nissan VVEL 2007/2008
			MultiAir 2009

图5 可变气门机构的对比

高自由度的调节，以及低能耗、低故障率和低系统成本。

系统的功能原理

该系统包括一套液压气门驱动装置，凸轮轴通过一个快速响应的电磁阀以及电磁阀控制软件来控制该驱动装置。

传统的机电式气门机构，凸轮型线通过刚性元件（例如挺柱或滚子摇臂）传递到发动机气门；UniAir 则不同，通过高压腔内一定容

弹簧推动气门关闭，高压腔的油被压出到与储压腔连接的中压腔。如果要实现进气晚开(LIVO)，则让电磁阀保持未通电状态，即一直开启，凸轮通过油缸活塞将油压入储压腔；在气门需要开启时电磁阀提前关闭。进气晚开和气门多次开启（同一循环气门开启两次）只允许在发动机转速 3000 转以下工况使用。气门多次开启实际上是进气早关和进气晚开的一个组合。当电磁阀开启时，储压腔的油压被释放以对高压腔进行充油，并使能量损失最小化。在进气早关过程中，由于气门弹簧的作用，进气门会进行快速落座。在气门即将落座前，液压制动模块开始起作用，以保证气门能以正常较低的速度进行落座。此系统也包含液压间隙调节器单元（HLA）。

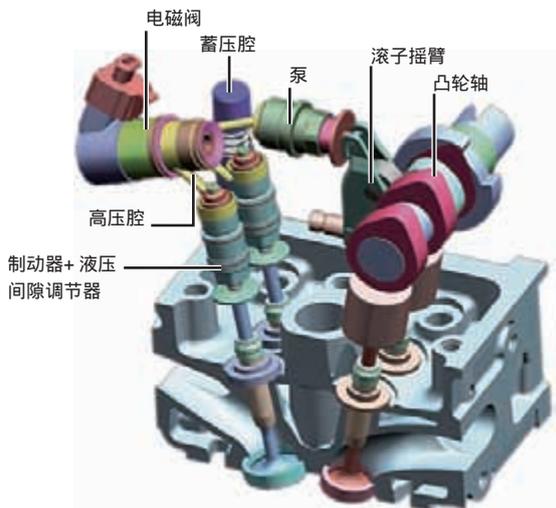


图 6 UniAir 系统——主要零部件

量的机油来传递凸轮型线。机油的容量会随着 2 位 2 通电磁阀的调节而变化。当电磁阀关闭时，机油作为刚性液压推杆来工作。当电磁阀开启时，凸轮和气门的连接被中断。通过控制电磁阀，可以实现循环独立控制各缸/各气门的升程曲线。例如，如果在凸轮返回基圆前电磁阀开启，则实现进气早关（EIVC）。此时，气门

气门升程模式

UniAir 技术使得气门升程曲线具有高度的灵活性，不同的气门升程模式满足发动机不同工况点的要求。最大升程曲线主要用于发动机最大功率工况。此模式下，整个凸轮有升程阶段电磁阀保持关闭。EIVC 模式用于发动机部分负荷时，电磁阀提前开启，只执行部分气门升程，此时可以根据扭矩曲线来调节进气量。如果需要达到高扭矩，则进气门仅在凸轮回到基圆前的瞬间关闭，以防止空气被压出，提高低速时的充气效率。

接近怠速时，凸轮在升程开始阶段进气门保持关闭以控制气缸内的空气量同时产生高进气速度，这有利于在油气混合过程中产生足够的涡流，之后通过关闭电磁阀来打开进气门（LIVO）。低速低负荷时将两个模式组合，例

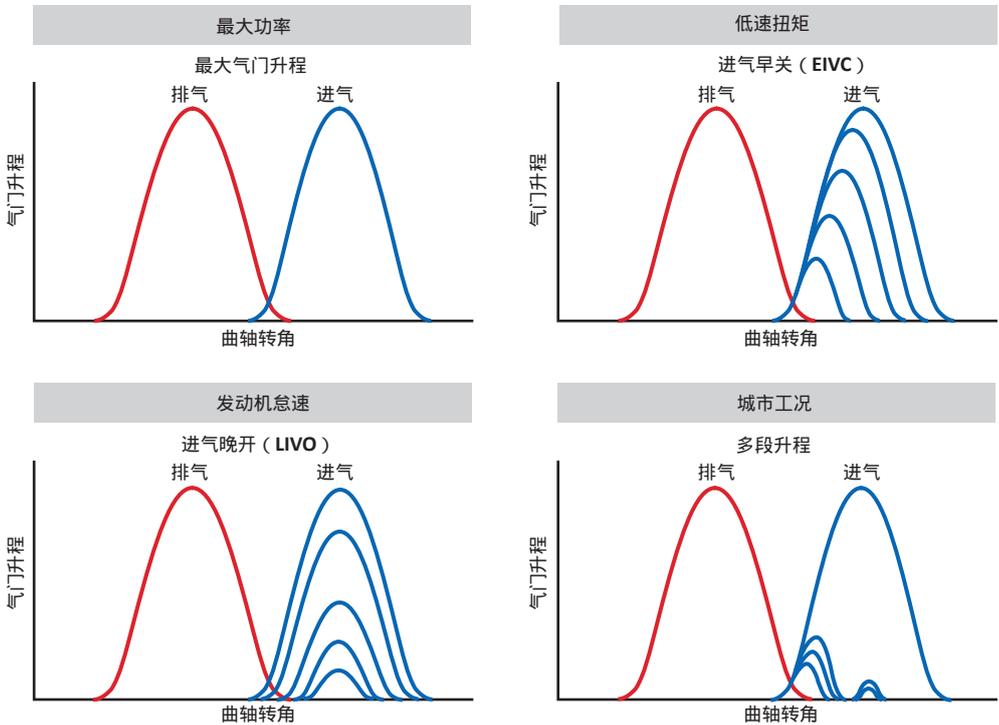


图7 进气侧气门升程模式

如第一个升程采用 EIVC，第二个升程采用 LIVO。这有利于稳定燃烧，并通过进气早关来防止空气过度膨胀导致的问题。

设计要求

为了保证每个工况下的正确油气混合，UniAir 系统的设计必须满足以下的要求：

- 机油温度（-30℃ 到 150℃）
- 整个转速范围可实现功能（700 至 7000 1/min）
- 高精度控制缸内空气量
- 反复精确地执行发动机每个气门的升程
- 快速响应能力（一个凸轮轴旋转周期内）以

适应瞬时工况调节

- 对零部件公差、环境条件变化（如温度或零部件的老化）的补偿功能

在 UniAir 设计中，我们考虑了用尽可能低的成本来实现功能性要求。同时，我们也意识到尽管系统有大量的优点，客户也不愿意在设计空间、额外重量和摩擦方面牺牲太多。设计初期我们就非常了解该系统对于发动机机油系统的要求。

需求

我们针对汽油机和柴油机进排气的各种应用开发了不同的设计（见图 8）。

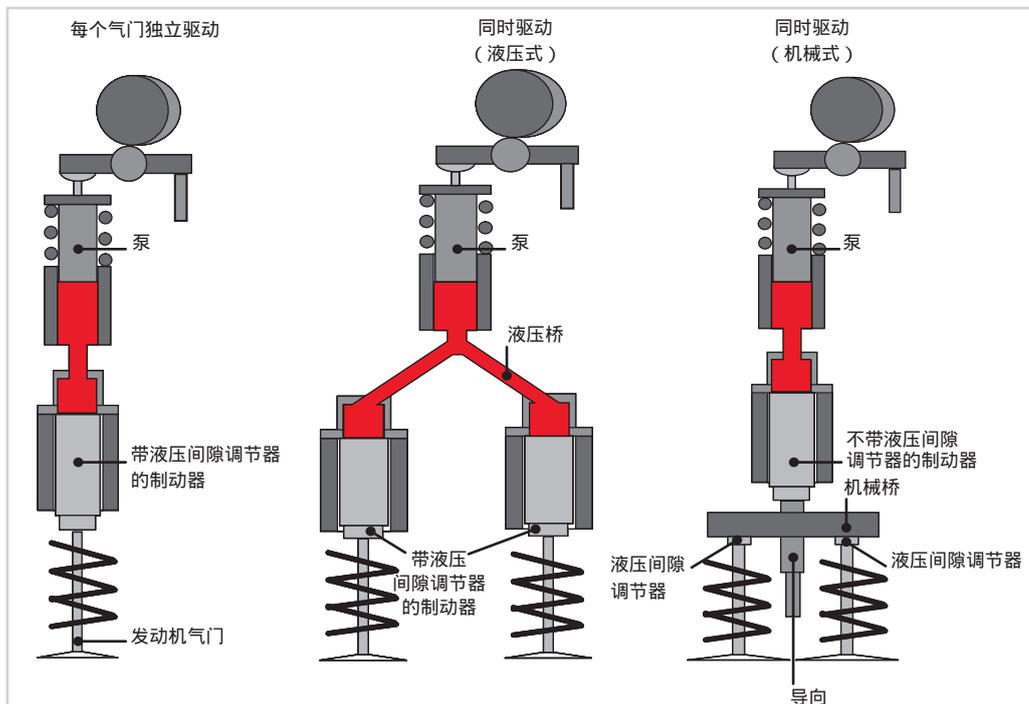


图 8 几种系统结构

单个气门的独立控制提供最高的设计自由度。如果通过液压或机械桥来驱动某缸气门则灵活性稍有降低，但是系统的性价比更高。怎样达到最高的性价比取决于特定的应用及其要达到的目标。

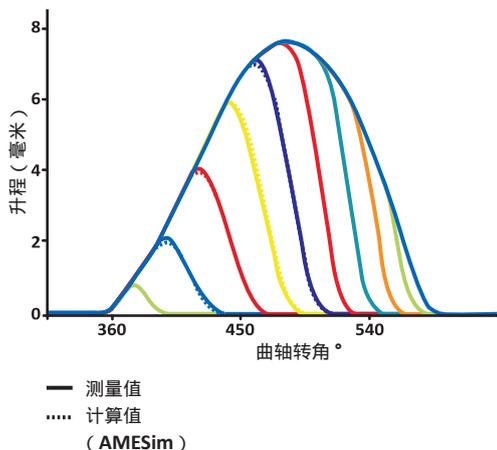


图 9 仿真和实测气门升程曲线对比

系统的开发及其设计

在开发阶段，我们采用了最先进的设计、计算和模拟工具来进行系统的初步开发。将 Matlab/Simulink 和 AMESim 等强大的工具结合起来，形成了对整个系统进行仿真分析的综合工具。该工具用于设计凸轮轮廓以及模拟进气门升程曲线。图 9 对仿真及实测的气门升程曲线组进行了对比，结果显示它们的吻合度非常高。

UniAir 零部件

高精度电磁阀

为了保证同一气门升程的连续一致性，以

及不同缸气门升程之间的一致性，要求 UniAir 系统必须具有非常高的精确性。至关重要的是：所有的零部件，从油缸到制动器都必须在公差范围内。作为每个升程曲线的执行机构，电磁阀是整个系统中最重要。在开发此新一代电磁阀的过程中，开发者曾遇到很多挑战，例如电磁阀的开启和关闭时间以及切换时间的精确性和耐久性。

带“常开”电磁阀的系统结构要求电磁阀在一个凸轮轴旋转周期内切换一次，在气门多次开启时甚至需要在一个凸轮轴周期内切换好几次。为了保证高压腔内充满油，即下个循环可以保证最大升程，电磁阀在每个循环结束后需要开启一小段时间，以进行高压腔的充油。对于气门多次开启的工况，气门第一次开启结束后并在第二次开启前，必须保证电枢回到它

的基准位置。电枢回到基准位置约 2 毫秒以后才能进行通电，继而开始二次气门开启。

图 10 为电磁阀电流的激活曲线和实际发动机的气门升程曲线。该图对比了进气早关和全升程曲线。

为了在尽可能小的电流条件下实现电磁阀的快速响应，需要针对电磁阀电流开发特殊的激活策略。电流轮廓包括了好几个部分。非激活状态的电磁阀会先通偏流，对电磁阀预磁化却不进行切换。为了保证快速及准确的通电过程，在切换时接入增大的峰值电流。切换点由软件根据工况来决定。电磁阀驱动完成后，电流减至保持电流，此时电磁阀处于关闭位置。相应地，软件决定何时电流需要被完全断开，即电磁阀再次开启。

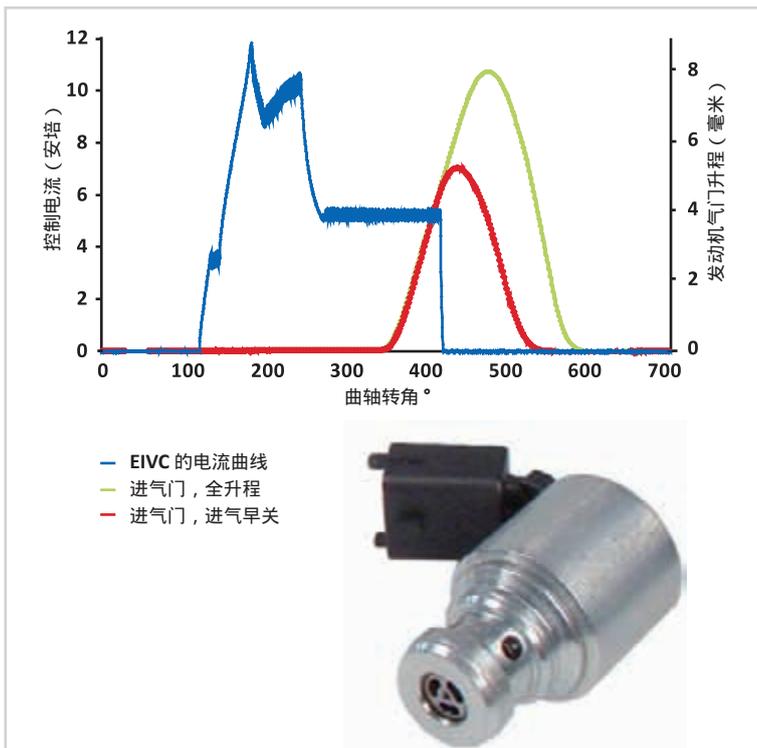


图 10 电磁阀及电磁阀电流曲线

发动机气门开启和关闭角度的精准性对系统功能是非常重要的。电磁阀切换时间的准确性对这一点有很大的影响。在电磁阀及其子系统的装配过程中，需要在生产线上测量各种功能参数，例如流量和切换时间；装配过程也进行了调整，以保证功能参数在规定的范围内。这意味着单个零件的加工公差可以通过分组来进行补偿。尽管对单个零部件的公差进行了补偿，但

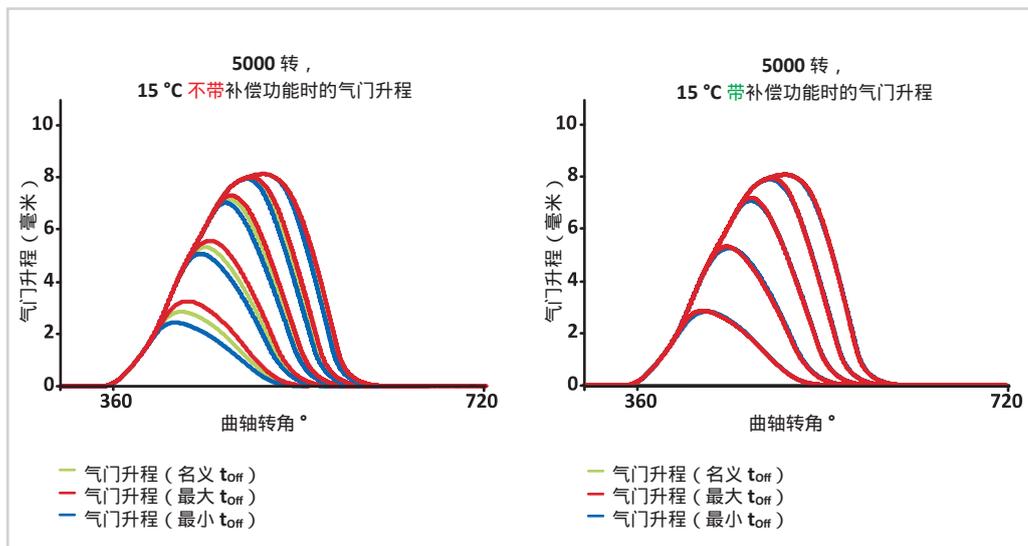


图 11 电磁阀关闭时间 t_{off} 补偿

还是有必要通过适当的补偿功能对切换时间的精确性进行优化。补偿在产品的整个寿命周期都有效，因此同样可以补偿由老化导致的切换时间的变化。这保证了在发动机整个生命周期内各缸充气过程的最佳平衡。

系统寿命范围内每个电磁阀约进行三亿三千万次的切换。完成如此多次的切换并保证其精确性对电磁阀的开发是异常艰巨的挑战。新电磁阀从概念设计到量产准备使用了最先进的设计仿真方法，并与大陆汽车系统进行了紧密合作。电磁阀通过了零部件实验、整机实验和整车实验，包括相关的功能性和耐久性实验，其功能性在大量的实验中得了充分的验证。

电磁阀由控制软件根据不同的工况独立控制。控制软件的作用是执行发动机控制系统定义的各种模式和气门的开启和关闭时间。这里，为了找到电磁阀在每个工况的正确工作点，软件考虑了大量影响系统功能的因素。电磁阀的工作点决定了发动机的气门正时（图 12）。电

磁阀工作的主要影响因素在零部件相关介绍及接下来的章节有详细的介绍。

首先，开启和关闭每个电磁阀的时间必须在此提及。它们在每缸的切换过程通过电流曲线来独立监控，并根据发动机控制系统的脉谱图中的工况来进行再调整。在这种情况下的特殊挑战是，电流曲线要实现在整个工作温度范围及相关的机油粘度范围内的可监测性。所有电磁阀组件都必须完全相互匹配，以确保此功能。

系统结构和组件几何形状也决定了气门升程曲线的特性，其中包括制动单元。该单元是一个副缸，其通过液压间隙调节器把液压压力转化为发动机气门的运动。由于此系统发动机气门的开启关闭独立于凸轮型线，所以气门落座时不会被机械制动。为了防止过大落座速度导致的噪音及对气门的损坏，气门在落座前被制动活塞导向内的液压控制单元制动。由于制动单元通过特殊的单向阀短油路快速补油，所以气门可以快速开启。所有这些零部件的特殊

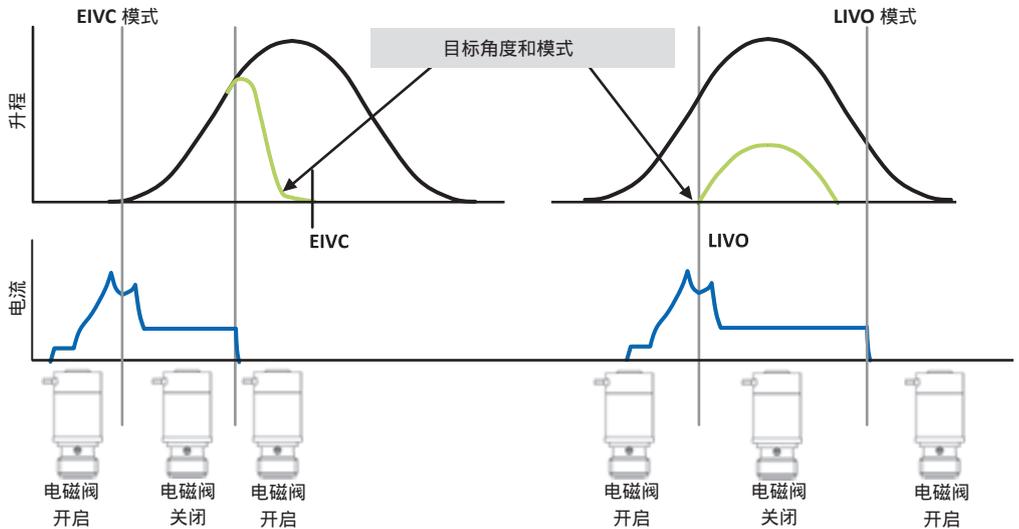


图 12 目标角度和模式

设计保证了发动机气门在低温时 (-30°C) 也能准时关闭, 以及在高机油温度时的低气门落座速度。

气门运动和制动功能不仅取决于几何形状和结构影响, 而且也包括环境和工作参数的影响, 比如发动机转速和机油粘度。控制系统也需要这些因素的信息, 以便将其考虑进去。

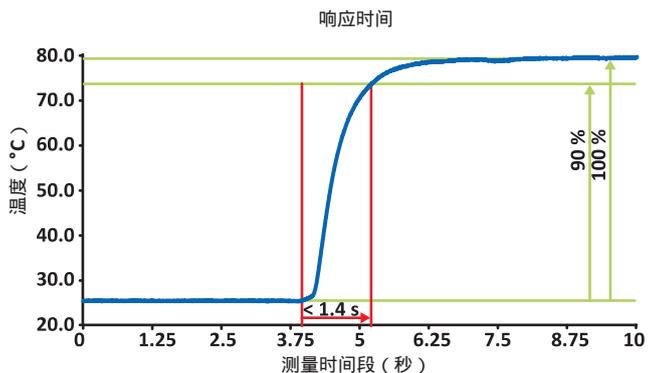
有必要监控机油粘度信息, 特别是冷启动时的粘度以及随后内部系统温度的上升。从这

个角度讲, 此系统中唯一的一个额外传感器——温度传感器 (图 13) 是个非常重要的零件。该传感器实时测量机油温度, 给控制单元提供了决定机油粘度的重要输入参数。发动机中现有测量冷却水温度和机油温度的温度传感器的响应速度不够快。

我们对带 NTC (负温度系数) 元件的传感器进行了特殊标定, 其在低温时具有高精度性 (0°C 时的最高精确度) 和快的响应时间 (水中 τ_{90}) —— 最大 1.4 秒。



图 13 温度传感器



确保功能和质量

UniAir 驱动器生产装配完后，必须通过质量测试，以确保与控制软件结合运行的系统毫无差错并满足必要的功能。为了达到这个目的，我们特别研发了和开发阶段测试台架一致的线后（EOL）测试台架（图 14）。通过特殊的 EOL 测试程序，针对重要的功能例如全升程、进气迟开和进气早关，在定义好的控制角度和速度进行测试。特别对于进气晚开模式，精确性是极其重要的，所以要特别测试切换时间。制动单元的测试也包含在内。所有的测试由自动程序控制在 EOL 测试台架上执行。每个驱动器刚性固定在测试汽缸盖上，并检查开启及关闭角度、最大气门升程的精确度。

总结

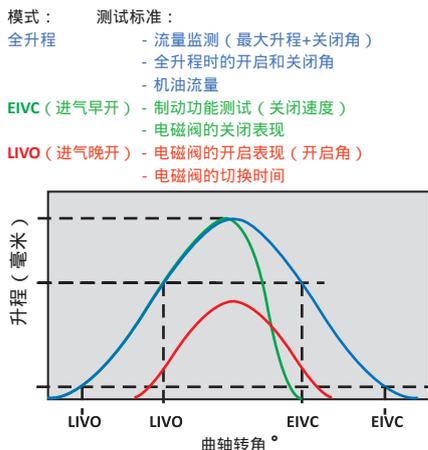
可变气门机构是未来内燃机技术的一个重要方面，将协助我们满足未来越来越严格的排

放和油耗标准及终端客户的要求。全可变电液控制气门机构系统 UniAir 可以扩展现有可变气门控制系统的潜力，对优化燃烧过程作出较大的贡献。和菲亚特联合开发的 UniAir 系统意味着舍弗勒集团成功地启动了一种新的气门机构系统。对比传统气门机构，该系统不仅给汽车制造，而且给终端客户提供了大量的益处。世界上第一个电液控制全可变气门控制系统已于 2009 年 9 月在市场上推出，配备在阿尔法罗密欧 MITO 上（发动机：Fire 1.4l 4V 135 HP 涡轮增压版本），菲亚特称之为 Multi-Air。Runto EVO 车辆发动机的进气侧也配备了 UniAir 技术。图 15 为 Alpha Romeo MITO 的实测数据，展示了 UniAir 系统对发动机的提升。

除了对提升性能和降低油耗的贡献，UniAir 还提供了广泛的额外好处。由于其高度灵活的设计，该系统能满足不同客户的要求和适应几乎所有类型的发动机。UniAir 发动机用传统发动机机油运行。控制软件也是由舍弗勒提供，整合在发动机控制系统里。舍弗勒作为汽车行业的系统合作者，供应整个 UniAir 系统，包括硬件、软件和标定数据组（图 16）。该系统给



图 14 线后测试台/测试标准



汽车制造商提供了一个显而易见的好处是让他们得到的是一套的综合测试模块，可以很容易的整合在发动机工厂的汽缸盖上。

UniAir 系统首先应用在汽油发动机的进气侧，但这并不意味着它的应用仅限于此。



- 降低最高 10 % 的二氧化碳排放/燃油消耗率
- 提升最高 10 % 的功率
- 提升最高 15 % 的低速扭矩

(对比配备传统气门机构、不带凸轮相位调节器的发动机)

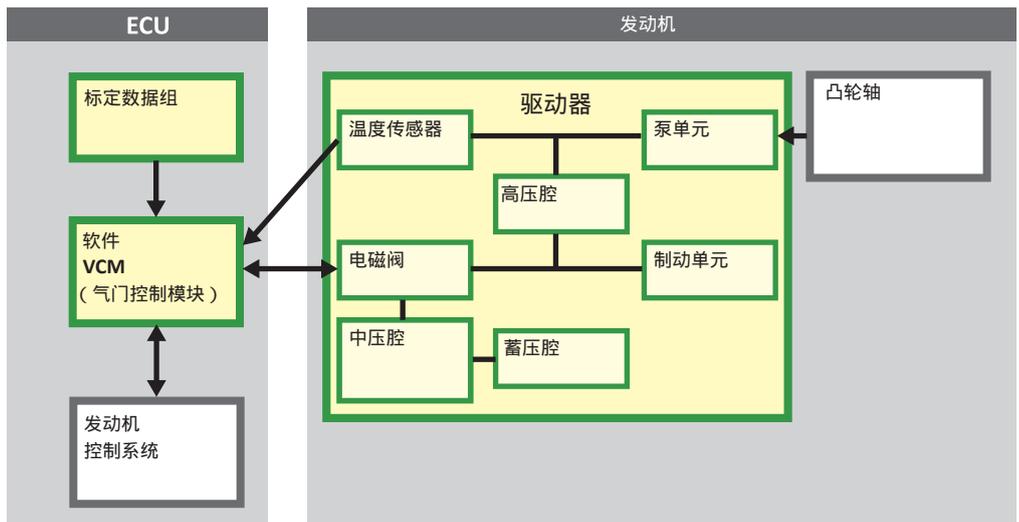
图 15 UniAir 在第一个量产应用——菲亚特 1.4 升 MultiAir 发动机上的优点

UniAir 也可以应用在轿车柴油发动机上。非常灵活的系统功能可以实现一些策略，例如内部废气再循环、产生进气涡流以及可变有效压缩比。UniAir 已经被应用在轿车柴油发动机的样机上。

UniAir 在商用车上也有成功的应用。目前，

舍弗勒和 ABB 已经签署了一项合作协议，将把此气门机构系统推广到大型非公路用发动机上（船舶，火车，发电机上的应用）。

为了满足未来燃烧方式的要求，例如 CAI/HCCI，在气道和排气方面，舍弗勒集团及其合作伙伴已经开始进行相关系统的前期开发。



□ 舍弗勒供货部分

图 16 UniAir 系统的工作顺序

