

2012 年大功率柴油机国际技术交流研讨会专题报道

大缸径气体机和双燃料发动机燃油喷射系统

Michael Willmann, Torsten Bucher, Clemens Senghaas, Ralph-Michael Schmidt

(L'Orange GmbH, 德国 斯图加特 70435)

摘要: 介绍了大缸径气体机概念和类型; 着重介绍了几种基于共轨技术的不同双燃料发动机喷射系统喷油器的设计特点和效果。指出: 这种共轨技术是未来产品开发的基石, 并有助于实现燃气发动机市场的多样性发展。

关键词: 气体机; 双燃料发动机; 燃油喷射系统; 共轨技术

中图分类号: TK423. 8; TK43 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2013)01-0009-04

Fuel Injection Systems for Large Diesel-Engines in Gas and Dual-Fuel Operation

Michael Willmann, Torsten Bucher, Clemens Senghaas, Ralph-Michael Schmidt

(L'Orange GmbH, Stuttgart Germany 70435)

Abstract: The concepts and categories of large diesel engines are introduced. The design characteristics and the effect of varied kinds of injectors used on dual fuel injection systems are especially introduced, which are based on common rail technology. It is concluded that common rail technology is the base for future product developments and will help to cover the expected diversity in the gas engine market.

Keywords: gas engine; dual fuel engine; fuel injection system; common rail technology

0 引言

随着新型勘探技术的诞生、新能源的发现以及许多国家在能源领域迫切独立的意愿使得燃气能源市场前景看好。据数个相关机构的预测结果, 这些因素甚至会促使“燃气时代”的到来。

图 1 为主要能源价格(美国)的历史走向。至少在美国, 价格的实际走向显示, 与原油相比, 天然气正变得愈发具有吸引力。世界范围内可用的天然气资源的走势也总体呈现出相同的趋势。因此, 使用天然气的往复式发动机将在能源转换中扮演越来越重要的角色。气体机的低排放特性也将推动这一发展趋势。双燃料发动机既能使用液态的柴油, 也能使用气体燃料, 将在气体燃烧技术的发展上发挥特殊作用。由于其很好的灵活性, 即使气体燃烧技术更进一步发展, 它们仍将占有重要的一席之地。

传统的气体机一般都是固定式并大多使用低压

气体, 但由于天然气的实际价格如此具有吸引力, 以至于那些移动式的, 仅有短暂中高速工况的设备亦要求使用气体机或双燃料发动机(这些发动机要能够使用 LNG 或者 CNG)。

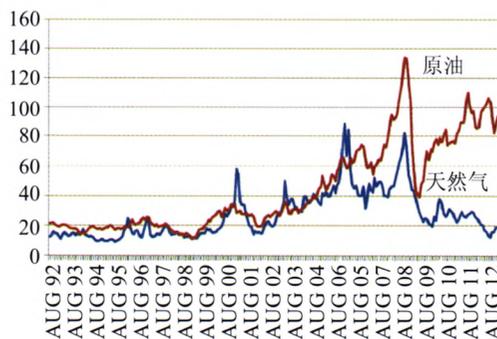


图 1 主要能源价格(美国)
(相当于一桶油能量当量的能源的美金单价)

本文将概览市场上现有的此类发动机, 并着重关注燃油喷射系统。由于这些双燃料发动机系统的潜在前景, 以及最近在共轨喷射方面取得的进步,

在此将探讨一种新型的、前景明朗的用于双燃料发动机的喷射系统。

1 气体机的概念

按所需的燃油喷射装置而言，燃气发动机可以分为如图 2 所示的不同类型。

气体-奥托发动机	气体-柴油发动机		
等比例混合 (外部点火)	非等比例混合 雾化扩散型燃烧		
气体 低压喷射 全负荷范围		纯气体	
气体 低压喷射 全负荷范围	燃油 火花塞点燃 预喷射	纯气体	双燃料
	气体 高压喷射 全负荷范围	纯液体 燃料	
燃油 高压喷射 全负荷范围	燃油 高压喷射 全负荷范围	混合 模式	
气体 低压喷射 全负荷范围	燃油 高压喷射 全负荷范围		

图 2 按照燃料喷射定义的燃气发动机类型

今天，大部分燃气发动机都是纯粹的只采用天然气和空气的单一混合物在 Gas-Otto 过程中工作。它们必须从外部点燃，主要是通过火花塞点燃。这些发动机在极少情况下使用预喷射方式进行点燃。当这些发动机用作双燃料发动机时，它们使用少量的液体燃料(预喷射)来点燃燃气。考虑到发动机上有柴油外围装置，这些发动机不再采用火花点火的方式。当这些发动机处于液体燃料模式时，燃气阀将被关闭，而液体燃料将通过高压燃油喷射系统进行喷射。

目前的 Gas-Otto 发动机在非公路市场中并没有提供一个混合的模式，而是由驾驶者选择气态和液态燃料的比率。

在燃气-柴油发动机中，气体燃料通过高压喷射系统(30 MPa 压力)被喷射入发动机燃烧室的压缩空气中，其燃烧过程与液态柴油的类似。因为燃气不能自燃，也无法通过火花塞点燃多种气体混合物，因此这些发动机不能在纯燃气模式下运行。

在双燃料模式下，通过来自高压喷射系统的少量液体燃料引燃，预喷射后靠近预喷射油嘴的燃气喷嘴马上打开，喷入的燃气由液体燃料燃烧的火焰点燃。市场上一些组合型的喷射系统仅限于这种操作模式。“双燃料”这个名称在这里可能使人误解。如果燃气喷嘴保持关闭状态，柴油系统足够强大，那么这类发动机也可以在纯柴油模式下运行。

一些主要的中低速发动机制造商提供了可在混合模式下操作的发动机。在这种模式下，驾驶员可以选择气态燃料和液态燃料之间的比率。这种模式在无法全部都使用燃气或燃气质量较差时是非常有用的。在混合模式下，液态柴油火焰引燃气体并使燃烧稳定下来。

即使如今在大部分实际应用中仍能够找到 Gas-Otto 发动机，但受排放限制，特别是对温室气体甲烷的限制，可能导致对高压燃气喷射系统需求的增加，至少对移动式应用设备来说已是如此。

选择合适的发动机概念取决于几个因素，如，柴油和燃气模式下的最大负荷、燃料适应性、排放量、可用的尾气处理设备、燃气供应压力等。但是，燃油喷射系统供应商应根据不同的发动机尺寸和应用范围为各种气态和液态燃油喷射技术做好准备。

2 燃气发动机的喷射系统

2.1 Gas-Otto 发动机

如上所述，此类发动机的燃气配量是通过低压燃气阀实现的，不在本文的讨论范围内。

在目前的双燃料发动机中，液态燃油喷射功能分为两种类型：小型预喷油嘴的“引燃”功能和大型主喷嘴的“液体燃料工作模式”功能。一个典型应用就是双喷油器配置。

图 3 所示为双喷油器双燃料设计，图 3(a)以单体喷油器为主，图 3(b)以共轨喷油器为主。对于此种设计，主喷油器可以完全从柴油应用中照搬。对于中速机而言，此类喷油器能够使用重油(HFO)。主喷油器是传统的单体式喷油器还是共轨喷油器取决于发动机的设计理念。按照这种设计，在缸头部位需设计出预喷射喷油器的位置，同时如果预喷射喷油器离缸体中心轴线过远，还必须花费精力研究燃烧问题。这里预喷射喷油器一般是共轨喷油器。如果使用轻油做预喷射，则此喷油器的设计将基于高速轻油发动机甚至可能是卡车发动机的喷油器来设计。对于不能改变缸头设计和降低燃烧性能的应用而言，双喷油器会是一个合适的解决方案。

图 4 所示的喷油器类型在一个喷油器壳体中有两个喷油器(主体：传统单体喷油器；预喷射部分：共轨喷油器)。实际应用中主喷油器采用传统单体式喷油器，而预喷油器则使用共轨技术。通过使用这种组合式喷油器，技术性的工作将从缸头设计和燃烧性能转移到如何设计一个紧凑的双喷油

器, 将两个共轨喷油器整合在一个类似大小的喷油器体内是非常困难的, 至今尚无先例。



(a) 单体喷油器为主 (b) 共轨喷油器为主

图3 双喷油器双燃料设计



图4 液体燃料双喷嘴喷油器设计

然而, 对于实际的 Gas-Otto 双燃料发动机来说, 除了确定最终的配置, 投入到与泵、管路系统、设计工作、燃烧性能研究和喷油系统相关的工作是相当多的。

2.2 燃气-柴油发动机

燃气-柴油发动机需将高压的燃气喷射到发动机燃烧室内灼热的压缩空气中。因此, 燃气侧的设计和技术与液体燃料的喷射类似。此外, 在大多数情况下, 两种技术都整合在一个喷油器体内, 以便通过燃气喷嘴和液体燃料预喷之间较短的距离实现更好的点火。

总体而言, 在市场上存在两个不同的系统。第一种系统使用燃气作为唯一一种主要的燃料, 而液体燃料仅作引燃之用。该种系统在卡车发动机及更小的发动机上广泛应用。这一技术具有快速的更新能力, 在未来几年里, 将为研制更大型的高速发动机奠定基础。第二种是基于中速发动机设计, 并能够在完全的双燃料模式下运行, 这主要得益于液体燃料侧能够提供足够的流量以保证纯液体燃料运行。

图5是一个 HPDI 燃气和液体燃料组合式喷油器的示例。液体燃料侧是一个单体式喷油器系统, 能够提供发动机运行所需的 5% ~ 100% 范围的高压燃料; 燃气侧由分布在中心液体燃料针阀附近的三根针阀组成。三个燃气出口由外部液压阀控制, 能够在大约 30 MPa 压力下为燃气配量, 配量范围从 5% ~ 100%。



图5 HPDI 燃气(三根针阀)和液体燃料(中间针阀)双喷嘴喷油器

此开发的下一步是共轨技术的应用, 由于可以做到任意压力情况下多次喷射, 共轨技术在燃烧控制上赋予了更多的灵活性。进一步观察上图所示的实际设计, 就不难发现这是一个极富挑战性的工作。

2.3 一种新型的喷油器理念

如上所示, 所有不同种类的燃烧类型都要用到燃油喷射系统, 对于双喷油器概念以及双针阀或双燃料喷射概念, 结合更高的喷射压力, 共轨技术的革命性发展将为此种技术带来更高的灵活性。

对少量燃料进行精确配量是多次喷射的一个要求, 最近在共轨喷射系统方面的进展是, 能保证该系统能够在最大燃料流量的 0.5% 的范围内对燃料进行精确配量, 精确度为 $\pm 5\%$ 。这些高精确性的系统为双燃料应用创造了一个新的机会。区别于将燃气引燃和液体燃料工况分开, 现在可以将两项功能通过喷射系统的同一个喷嘴来实现。

这一方法将极大地简化 Gas-Otto 发动机, 因此向燃气技术的转化将变得更加具有吸引力。在此, 困难仍然是主喷嘴产生的预喷量能否满足燃气的燃烧。

对于燃气-柴油发动机而言, 目前看来, 考虑到排放问题, 液态燃料预喷射可能不会发挥主导作用。然而, 具有配置少量燃料的独特能力的液体燃料共轨系统将为这些系统提供优化燃烧过程的可能性。因此, 随后的技术转化工作应该准备

好, 并可能将燃气-柴油发动机提高到最新的排放水平上。

2.4 设计特点和结果

可通过多种不同的措施实现稳定的少量燃料的喷射, 具体如下。

- 带蓄压腔以缓冲压力波动;
- 优化蓄压腔和喷嘴之间内部路径的流动性能;
- 快速有效的电磁阀控制;
- 缓慢但良好控制的喷嘴针阀速度;
- 油嘴喷油腔容积最小化;

- 系统优化, 包括高低管路压力。

这些措施保证了喷油器在最大喷油量的 0.5% 的情况下喷射量的变化在 $\pm 5\%$ 的范围内。

雾化扩散的缺陷可通过高速可视化技术来识别。图 6 的可视化成像结果显示, 喷雾形成良好, 即使在早期喷射阶段, 也没有发现明显的不对称情况, 随机性的有单个孔的雾化更好些。

如前文所述, 这种雾化模式和典型的预喷射(三个或四个小孔)的雾化模式不同。如果发现了适合的参数配置, 发动机的燃烧性能将得到进一步提高。

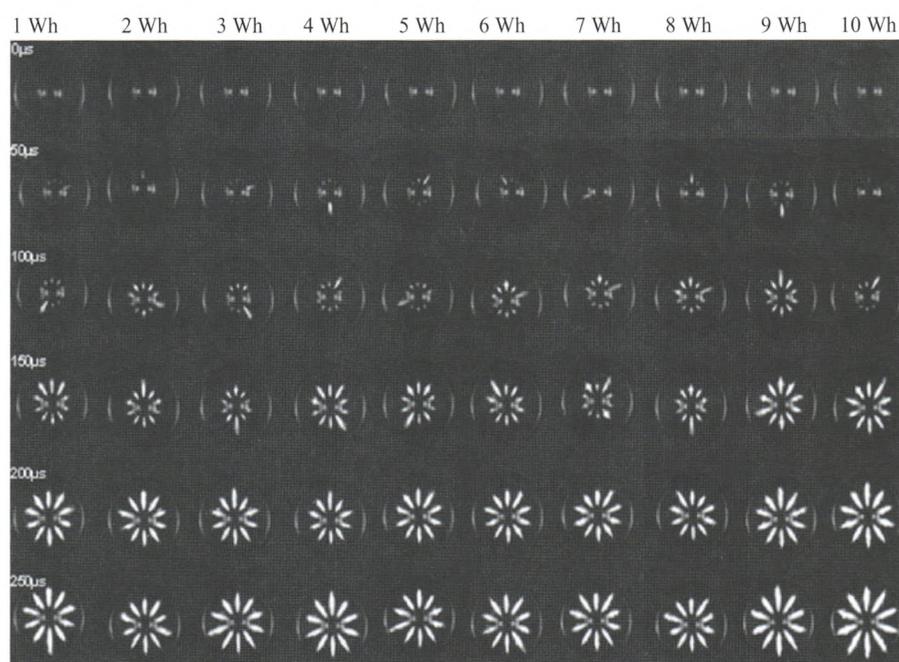


图 6 最少燃料喷射情况下, 每次喷射之间的变化(以最少的燃料进行 10 次喷射)(最大燃料喷射量的 1%, 压力为 90 MPa)

除了保证上述讨论的每次喷射的稳定性之外, 还必须保证在使用期内每个喷油器之间变化能达到同样的精密度, 这涉及到以下几项技术。

- 基于灵敏性研究的后续流体力学设计;
- 精密部件的制造;
- 部件配对和对部件组进行后续测量;
- 对喷油器进行初始调整(IIG 喷射代码);
- 生命期内的偏移量调整(INSITU-技术)。

以上前三点是必需完成的, 最后两点则是选择性的, 发动机控制单元需要额外的测试。通过对喷油器初始调整进行编码能够确保它们第一次装入发动机后能进行调整。每个喷油器之间的变量通过电子控制来进行平衡。INSITU 技术由 L'Orange 开发, 使用来自喷油器的信号(蓄压腔或者针阀升程的压力信号)在使用周期内监测并补偿喷油器的

偏移。

这种新型的喷油器设计在 Gas-Otto 高速发动机上进行了首个单缸测试, 产生的排放结果类似于火花打火型发动机, 但是显示出更大的操作 λ 幅度, 而这对短暂运转的应用是有益的。此外, 仅依靠单个喷油器, 发动机就可以在混合模式运行和液态燃料模式运行进行切换。这些测试取得的进步将表明该喷油器理念最终是否符合未来的发动机概念。

3 结 语

本文综述了燃气发动机现有的燃料喷射系统, 陈述了如何使用最新的共轨技术来简化 Gas-Otto 发动机的设计, 这种共轨技术可能成为提高未来燃气-柴油设计理念的一大亮点, 是未来产品开发的基石, 并有助于实现燃气发动机市场的多样性发展。