

燃气汽车发动机研究现状与发展趋势^{*}

李西秦 刘冰

浙江科技学院机械与汽车工程学院

李西秦等.燃气汽车发动机研究现状与发展趋势.天然气工业,2009,29(4):105-108.

摘 要 由于能源紧缺和环保压力,LPG、CNG 等气体燃料以经济性好、排放低而被视作汽车理想的代用燃料。然而,较之燃油汽车,燃气汽车普遍存在动力性下降的问题,制约了它们的发展。为此,国内外许多机构在这方面开展了广泛的研究工作,所取得的进展表明:液态 LPG 喷射及 LPG、CNG 缸内直喷技术对解决动力性下降问题效果比较显著。在液态 LPG 缸内直接喷射的同时,如果提高压缩比,其动力性可以达到原汽油机的水准。CNG 缸内直接喷射技术从根本上解决了预混合方式中天然气燃料挤占空气,造成充气效率下降的问题,可有效提高 CNG 发动机的动力性。LNG 因其纯度高、存储体积小、安全可靠、续航里程长,比 CNG 更具发展潜力,是今后车用天然气的主要发展方向。

关键词 燃气汽车 研究 发展 缸内直喷

DOI:10.3787/j.issn.1000-0976.2009.04.032

0 引言

统计资料表明,预计到 2010 年我国汽车保有量将达到 6 200 万辆,汽车保有量急剧上升,石油资源相对紧缺,这将导致我国石油供需矛盾更加突出,环保压力日益增大。液化石油气(LPG)、压缩天然气(CNG)、液化天然气(LNG)等清洁汽车能源以其良好的经济性和较低的排放污染物,被认为是车用发动机较理想的代用燃料,得到了广泛应用。然而相对于传统汽油机来说,常见的缸外混合燃气发动机普遍存在充气效率低、动力性下降的问题,制约了燃气汽车的进一步发展。世界各国纷纷就如何提高燃气汽车的动力性开展了大量研究工作。

1 LPG 发动机供气方式的研究

1.1 LPG 液态喷射

常见 LPG 汽车发动机的供气方式是先将 LPG 减压气化,再喷入进气阀前与空气混合后进入气缸。在进气过程中,气态 LPG 挤占空气,造成充气效率下降,发动机动力性下降。为提高 LPG 发动机的充气效率,荷兰 Vialle 公司在国际上最先研发出液态 LPG 喷射系统。它采用专用燃料装置将 LPG 以液

体状态喷入发动机进气阀前,可获得与汽油机相当的输出功率、扭矩和燃料消耗。该专用燃料装置称之为 LPI 系统(图 1)。该系统采用加压方式使 LPG 在整个传输过程中处于临界压力以上,始终保持为液态。当 LPG 以液态喷入进气道后,一部分迅速蒸发,蒸发吸热降低了进气温度,提高了进气密度,增大充气量,LPG 部分蒸发所占的体积比采用预混合系统时燃料蒸气所占体积大大减少。另一部分液态 LPG 在气缸内蒸发进一步吸热,使缸内充量得到冷却,提高了体积效率。同时由于液态燃料密度远高于气态,在高速重负荷时,避免了燃料供给不足的现象。这些措施都有效提高了发动机的动力性。

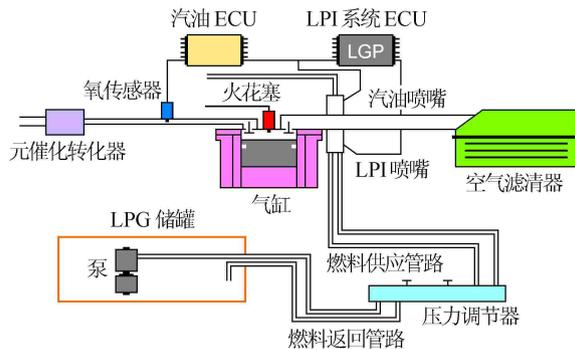


图 1 Vialle 公司液态 LPI 供气系统图

^{*} 本文受到国家自然科学基金项目(编号:60774101)的资助。

作者简介:李西秦,1960 年生,教授,硕士;主要从事汽车、发动机的教学和研究工作。地址:(310023)浙江省杭州市留和路 318 号。电话:(0571)85070214,13588723699。E-mail:lixiqin@yahoo.com.cn

借鉴国外成功经验,吉林大学和中国第一汽车集团公司利用荷兰 Vialle 公司生产的液态 LPG 供应装置,对国产电喷汽油机进行改装和试验研究,喷嘴安装在进气阀前,使发动机的动力性达到了原汽油机的水平,排放达到欧 II 标准^[1],验证了液态 LPG 喷射的有效性。

1.2 LPG 不同喷射方式的研究

根据 LPG 的物理状态,喷射方式可分为气态喷射和液态喷射两种。按照喷嘴安装位置不同,又分为进气阀前喷射和缸内直接喷射。

LPG 进气阀前气态喷射技术可减轻和消除由于进、排气阀角度重叠而造成的燃气直接逸出、排放性能和经济性能下降,但仍不能消除气体燃料对充气效率的不良影响。进气阀前液态 LPG 喷射技术比气态喷射技术要先进,能够有效提高充气效率,但也不能从根本上消除气体燃料对充气效率的不良影响^[2]。

液态 LPG 缸内直接喷射燃料供给方式兼收并蓄了柴油机的优点^[3],充气效率高,其原因在于:①无气体节流损失;②燃料直接喷入气缸,不占据进气道;③液体燃料密度大、体积小,几乎不占据气缸容积;④如果喷射发生在进气过程,燃料气化引起温降,将进一步提高充气效率;⑤无论缸内喷射发生在进气行程或者压缩行程,燃料气化引起的温降均能减少爆震倾向,提高压缩比。图 2 为某 170F 发动机改装成 LPG 缸内直喷发动机前后,采用不同燃料,在不同供给方式时的外特性曲线^[4]。试验结果显示,缸内液态 LPG 直喷方式的动力性最佳,其最大输出扭矩在转速为 2 800 r/min 左右,最大扭矩比燃油汽油提高约 10.7%,比进气道液态喷射提高 8.9%,比进气道气态喷射提高更多。其主要原因在于液态 LPG 喷射时的充气效率达到或有可能超过汽油机的水平(LPG 的气化热是汽油的 426/297 倍,因而进气道温度降得低,空气密度比喷射汽油时增加更多;同时,LPG 高抗爆可将压缩比从 6 提高到 6.95)。

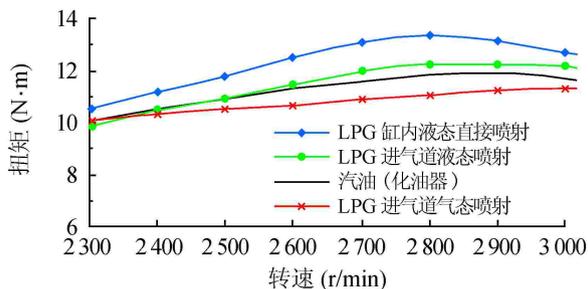


图 2 发动机外特性比较曲线图

动力性位居其次的是进气道液态 LPG 喷射。在试验中,由于结构上的限制,喷射器布置在进气道但并未紧靠进气阀处,因而液态 LPG 在进气道中部分气化体积膨胀对充气效率产生了不利影响,但同时气化又使得进气道温度下降,气体密度增加,部分弥补了充气效率的下降。

2 CNG 发动机研究进展

CNG 发动机在历经几代产品的发展演变之后,燃料供给系统从机械式混合器发展到电子控制喷射系统;电喷系统由单点开环控制发展到闭环多点喷射控制系统;喷射方式从缸外预混合发展到复合供气、缸内直接喷射;燃料的使用从两用燃料、双燃料发展到单一燃料。

2.1 单一燃料 CNG 发动机前景广阔

双燃料 CNG 发动机要兼顾使用汽油时的性能,不能充分发挥 CNG 燃料的优势,难以应对日趋严格的排放要求。单一燃料 CNG 发动机完全根据 CNG 的特性进行设计,可以获得良好的动力性、经济性和排放性能。近年来世界各大公司纷纷开发单一燃料 CNG 发动机,如:康明斯 B5.9-195G、福特 380、戴姆勒—克莱斯勒的 M908LAG、依维柯 8220、沃尔沃的 THG103、本田的 CIVICGX、卡特皮勒的 3306 等^[5]。

我国东风汽车有限公司、玉柴集团、上海柴油机股份有限公司、潍柴动力有限公司、天津大学、吉林大学、北京理工等单位也先后开发出单一燃料点燃式 CNG 发动机。河北工业大学开发出具有自主知识产权的 CNG 电控系统^[6],且已投放市场。

2.2 缸内直喷技术应用

为提高 CNG 发动机的充气效率,近年来研究人员借鉴柴油机技术,研制出缸内直接喷射 CNG 发动机。按压力不同,缸内直喷 CNG 发动机分为低压喷射和高压喷射两种。低压喷射是在进气阀关闭后将 CNG 喷入气缸,形成均质预混合气并采用电火花塞点火,喷射压力通常在 0.2~1.0 MPa 之间^[7]。采用缸内直喷后,发动机充气效率可提高 9% 左右,但低压缸内直喷 CNG 发动机的燃烧过程类似于均质燃烧,压缩比较低,无法进一步提高热效率。高压喷射压力通常在 15~19 MPa 之间,在压缩行程上止点前将 CNG 喷入气缸,靠电热塞助燃或喷入微量柴油引燃,实现了 CNG 非均质混合气扩散燃烧,发动机不需要节气门,没有节流损失及 CNG 引起的容积效率损失,改善了缸外供气和低压喷射发动机存在动力性差、热效率不高及大负荷情况下性能欠佳等问题。

加拿大 Westport 公司首先研制出 CNG 缸内直喷发动机,将空气的吸入和 CNG 的喷射分开进行,先将纯净空气吸入汽缸,在接近压缩冲程上止点时将 CNG 以高压喷入汽缸,借助 1 300 °C 的电热塞使天然气压燃,保持了柴油机效率高的特色,燃烧效率比传统火花点燃式 CNG 发动机提高 25%,实现了真正意义上的 CNG 发动机狄塞尔循环。

美国 Caterpillar 公司在柴油机的基础上开发出高压缸内直喷式 CNG 发动机,CNG 喷射压力为 19 MPa,借助陶瓷电热塞辅助加热,实现了 CNG 发动机的压燃点火。在标定工况下,该发动机热效率超过原柴油机,无可见烟排放,NO_x 排放低于同类型柴油机^[8]。

吉林大学 and 天津大学在 20 世纪 90 年代末,进行了 CNG 缸内直喷发动机匹配试验,使 CNG 发动机动力性接近原汽油机^[9]。上海理工大学将 175F 型单缸汽油机改装成 CNG 缸内直喷射发动机,并将压缩比由 6 增加到 8,进行了对比试验,结果见图 3^[10]。可以看出,CNG 发动机的最大功率与原汽油机相差不多。

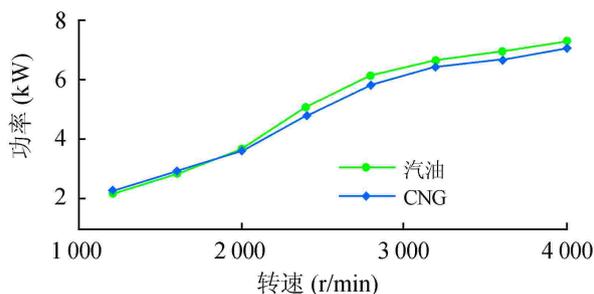


图 3 发动机输出功率比较曲线图

2.3 CNG 复合供气技术

为满足 CNG 发动机点火能量的要求,除采用高能点火或双火花塞点火外,对预燃室燃烧室发动机,亦可采用复合供气系统:部分负荷时,单独向预燃室喷射 CNG 并点火;高负荷时,即向预燃室又向主燃室喷射,用火花塞点燃预燃室中的混合气,再由预燃室引燃主燃烧室中的混合气。美国西南研究院采用复合供气方式开发出预燃室 CNG 燃料喷射系统,通过单独向预燃室或同时向预燃室、主燃室供气,改善了 CNG 发动机部分负荷和全负荷下的性能^[11]。天津大学提出了一种新型的复合供气压燃式 CNG 发动机燃烧系统,并进行了燃烧过程模拟计算和试验研究^[12]。

2.4 油气共用喷射器

加拿大 British Columbia 大学和 Westport Re-

search 公司联合研制出天然气和柴油共用高压缸内喷射器。与传统的双燃料发动机采用两个喷射器不同,该喷射器为一个整体,内有柴油和天然气两个同轴布置的针阀,针阀采用液压驱动电子控制,在接近压缩上止点时先打开柴油针阀,喷射引燃柴油,引燃量为 5%;引燃后打开天然气针阀喷射天然气,一边混合一边燃烧,天然气喷射量由电磁阀控制。两针阀的开启间隔由两针阀弹簧的预紧力调节。经此改装的发动机,热效率比柴油机提高 5%,NO_x 排放降低 60%。

2.5 其他方面的研究

吉林大学针对 CA6SE1-21N 增压 CNG 发动机进行了燃烧室形状和天然气喷射时刻对发动机燃烧、排放影响的试验与数值模拟研究^[13],结果表明:燃烧室形状对 CNG 发动机的动力性、经济性和排放性能有较大的影响,采用几何结构变化较大的缩口燃烧室形状能产生较强的湍流,使得火焰传播速度显著提高,有利于提高 CNG 发动机的热效率。

北京理工大学将可变截面增压系统应用到 CNG 发动机上,通过 BOOST 软件对可调增压器匹配进行模拟计算。由于增压的缘故,发动机进气量有显著增加,使 CNG 发动机的动力性恢复到原汽油机水平^[14]。

长安大学针对汽油—CNG 双燃料汽车,采用在中、小负荷工况下,发动机燃用纯 CNG,当发动机负荷达到 50% 以上时,减少 CNG 供气量并加入少量汽油掺烧,或在大负荷工况下完全切断 CNG 供气,改为纯汽油供给方案,使发动机动力性得到彻底恢复^[15]。

为适应更加严格的排放法规的要求,一种新的均匀混合气压缩着火技术(HCCI),正成为当前研究的热点。HCCI—CNG 发动机靠压缩升温引发缸内混合气自燃,它融合了汽油机和柴油机两者的特点。HCCI—CNG 发动机的研究开始于 20 世纪 90 年代,美国 Lawrence Livermore 国家实验室、Michigan 大学、Caterpillar 公司、日本 KEIO 大学、瑞典 Lund 技术学院^[16-18]和国内天津大学等都相继开展了这方面的研究。

3 LNG 发动机发展前景

CNG 的能量密度较低,高压储气瓶重量大,不便携带,限制了车辆的行驶里程。LNG 以 -162 °C 低温液化天然气的存储方式代替了压缩存储方式,同重量 LNG 的体积仅为 CNG 的 1/3,具有纯度高、

存储体积小、能量密度大、安全可靠等优势,发展潜力巨大。近年来随着天然气低温液化技术的成熟,LNG已成为全球增长最快的能源。美国 Caterpillar、Ford、John Deere、Cummins 公司和加拿大 Westport 等公司均生产 LNG 发动机。日本 SUZUKI、NISSHIN 等公司也研制出微型客车用进气道多点喷射 LNG 发动机。

LNG 的应用在我国正逐渐引起各方面的重视,受天然气的液化和储存技术的制约,目前尚处于起步阶段。目前研制和生产汽车 LNG 装置的单位有:吉林油田、中科院低温实验中心、绵阳燃气集团公司、中原油田绿能高科公司、张家港中集圣达因公司等。国产 LNG 储罐技术已经成熟,价格仅为进口装置的 2/3。河南中原油田绿能高科有限责任公司与北京公交公司合作,于 2002 年完成我国第一个 LNG 汽车科技示范项目,并建成我国第一个车用 LNG 加气站。LNG 在冷能回收利用方面(冷藏车、空调车)的应用上具有其他燃料不可比拟的优势,国内西安交通大学和西南石油大学等单位在这方面进行了理论研究和实践探讨。LNG 技术解决了天然气汽车燃料的储运问题,但 LNG 汽车改装燃气系统费用高,LNG 自气化引起的污染等问题还有待进一步解决。

4 结论

1) 气体燃料不同的状态和喷射方式,对发动机混合气形成和燃烧过程有着非常重要的影响,直接影响到发动机的动力性和排放性能。

2) LPG 进气道气态喷射充气效率低,发动机的动力性受到影响;而进气道液态 LPG 喷射较好地解决了充气效率下降的问题,发动机的动力性得到明显恢复;缸内液态 LPG 直接喷射效果更佳,其动力性能可以达到或超过原汽油机,是解决 LPG 发动机动力性下降的有效途径之一。

3) CNG 缸内直喷技术综合了柴油机和汽油机的优势,从根本上解决了预混合方式中,天然气燃料挤占进气空气,造成充气效率下降的问题,可有效提高 CNG 发动机的动力性。

4) LNG 纯度高、存储体积小、安全可靠,续航里程长,比 CNG 更具发展潜力。LNG 在冷能回收利用方面,如冷藏车、空调车的应用上具有其他燃料不可比拟的优势,是今后车用天然气的主要发展方向。

参 考 文 献

- [1] 李东. 液态喷射式 LPG 系统简介[J]. 汽车技术, 2001(12):30-31.
- [2] 李西秦. LPG 喷射形式对发动机性能的影响[J]. 内燃机工程, 2004, 25(2):43-45.
- [3] DEMIRBAS A. Fuel properties of hydrogen, liquefied petroleum gas (LPG), and compressed natural gas (CNG) for transportation [J]. Energy Sources, 2002, 24(7):601-610.
- [4] 邵千钧. 电控 LPG 发动机机器缸内直接喷射技术的研究[D]. 杭州:浙江大学, 2003.
- [5] SILVIU DUMITRESCU, PHILIP G H, GUOWEI G LI, et al. Effects on injection changes on efficiency and emission of a diesel engine fueled by direct injection of natural gas[D]. SAE Paper 2000-01-1805, 2000.
- [6] 李西秦, 黎苏. CNG 汽车发动机电控系统开发及匹配研究[J]. 车用发动机, 2005(2):32-34.
- [7] 刘亮欣, 黄佐华. 不同喷射时刻下缸内直喷天然气发动机的燃烧特性[J]. 内燃机学报, 2005(5).
- [8] CHAN A K. Ignition assist system for direct-injected, diesel cycle, medium duty alternative fuel engines Final report phase 1[R]. NREL/SR-540-27502.
- [9] 方祖华. 气体燃料发动机缸内喷气技术及燃烧特性的研究[D]. 长春:吉林工业大学, 1997.
- [10] 孙嗣炎. 缸内直喷式天然气发动机的试验研究[J]. 农业机械学报, 2005, 36(10):13-15.
- [11] 蓝志波. 可达到柴油机效率的天然气发动机的设计[J]. 国外内燃机, 2003(4):43-44.
- [12] 郑清平. 压燃式天然气发动机燃烧过程模拟计算和试验研究[D]. 天津:天津大学, 2006.
- [13] 李浩荡. 燃烧室形状和喷射时刻对 CNG 发动机燃烧影响的研究[D]. 长春:吉林大学, 2006.
- [14] 王舜琰. 488 可调增压天然气发动机的模拟计算[J]. 内燃机工程, 2005, 26(1):74-76.
- [15] 蹇小平. 电喷汽油—CNG 两用燃料汽车动力性恢复研究[J]. 汽车工程, 2007, (29)9:745-748.
- [16] DAESU JUN, NORIMASA LIDA. A study of high combustion efficiency and low CO emission in a natural gas HCCI engine[D]. SAE Paper 2004-01-1974, 2004.
- [17] RYUIEHI TOMINAGA, SATOSHI MORIMOTO, YASUHARU KAWABATA. Effects of heterogeneous EGR on the natural gas fueled HCCI engine using experiments, CFD and Detailed Kinetics [D]. SAE Paper 2004-01-0945, 2004.
- [18] http://www.nexgenfueling.com/p_onboard.html.

(修改回稿时间 2009-02-20 编辑 何明)