

船用天然气发动机技术发展综述

赵国锋, 姚 崇, 孙 军

(哈尔滨工程大学, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要: 综述了国内外主要发动机公司的柴油/天然气双燃料发动机和纯天然气气体燃料发动机的发展概况和主要技术特点, 以及各公司应对 IMO Tier III 和 EPA Tier IV 排放法规的主要技术策略; 综合分析了天然气发动机面临的主要技术问题和研究方向以及未来的发展趋势。

关键词: 天然气发动机; 技术特点; 发展趋势

中图分类号: TK431 文献标识码: A 文章编号: 1001-4357(2017)04-0001-06

Technology Development Review of Marine Natural Gas Engines

Zhao Guofeng, Yao Chong, Sun Jun

(Harbin Engineering University, Heilongjiang Harbin 150001)

Abstract: The development of diesel/natural gas dual fuel engines and pure natural gas engines produced by main engine manufactures both home and abroad are reviewed with the main technical characteristics, as well as their respective IMO Tier III and EPA Tier IV compliant technical strategies. Comprehensive analysis of technical problems, research direction, and development trend of natural gas engines is presented.

Key words: natural gas engine; technical characteristic; developing trend

0 引 言

目前, 世界范围内对船舶发动机的排放提出了日益严格的法规要求, 具体见图 1。美国环保署(EPA)规定: 发电机组氮氧化物(NO_x)排放限值为 $0.67 (\text{g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1})$; 最严格的欧 V 法规的内河船舶 NO_x 排放限值为 $0.4 (\text{g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1})$; IMO 对于中高速发动机 NO_x 排放的限值为 $2.5 (\text{g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1})$ 以下。总之, 新的排放法规要求 NO_x 排放下降 45% ~ 90%, PM 排放下降 80% ~ 88%。2013 年第 27 届 CIMAC 会议上, 天然气发动机作为船舶动力应对严苛的排放法规的一项主要技术手段已初见端倪。经过三年的技术发展, 各大公司纷纷推出燃气发动机产品^{[1]-[15]}。表 1 总结了世界范围内各发动机厂商的燃气发动机的主要技术参数和技术特点。本文还将从发动机气

路、缸内过程、零部件优化设计以及控制技术等角度总结分析天然气发动机最新技术进展。

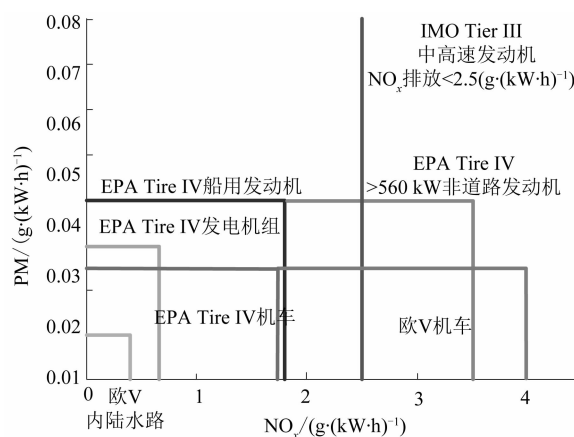


图 1 世界主要排放法规对 NO_x 和 PM 的限制值

收稿日期: 2016-12-01

作者简介: 赵国锋(1989-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为动力装置电控技术、天然气发动机控制技术, E-mail: zhaoguofeng@163.com。

表 1 世界主要发动机厂商制造的天然气发动机概览

公司	发动机型号	功率范围/ kW	额定转速/ ($r \cdot \min^{-1}$)	主要技术手段	排放	备注
日本大发公司	6DE28DF	1 730	720/750	米勒循环 高压比涡轮增压 可变配气定时 主喷油嘴水冷 进气中冷 (维持恒定的进气温度以减少爆震和失火) 微喷引燃	TMO Tier III	BMEP 2.0 MPa
日本洋马	EY26DF EY26L	1 530	720	预燃室优化设计 (以减小 NO_x) 空燃比前锁预测控制 燃料热值估计以修正空燃比控制 (通过燃料喷射量和曲轴输出功) 进气旁通技术改善双燃料发动机的加速性	与柴油机相比: NO_x 减少 79% SO_x 减少 99% CO_2 减少 25%	BMEP 2.0 MPa
MTU	MTU4000 系列气体机	1 000 ~ 2 000	600 ~ 800	适用于直驱货船 单级涡轮增压和两级增压并行 闭式曲轴通风 (以减少 NO_x 排放) 独立低温进气中冷回路 基于 MAP 的进气旁通和废气旁通控制 分缸控制 (基于缸压传感器反馈) 怠速到满负荷加速时间 10 s	IMO Tier III EPA 4	
日本三菱重工	KU30GSI KU30GSI-Plus	3 650 ~ 5 750	720/750	米勒循环 高压比涡轮增压 (压比为 5, 高效率) 降低缸盖和气阀附近的裂缝以及缸套和活塞之间的裂缝, HC 排放降低了 60% 优化火花塞周围冷却, 火花塞寿命 4 000 h, 并有望将火花塞寿命提高至 8 000 h 优化活塞、活塞环以及缸套, 降低润滑油消耗	$\text{NO}_x < 300 \times 10^{-6}$	发电效率达到 49.5%
美国卡特比勒	G20CM34 气体机	10 000	720/750	基于缸压的控制 柔性冷却系统设计 降低活塞头高度以降低活塞和缸套之间的裂缝容积, 使得未燃 HC 排放降低了 50% 分缸平衡控制扩展爆震边界, 深度发掘发动机的潜力, 增加工况范围, 使得发动机效率提升了 5% 优化预燃室	TA-1aif2	BMEP 2.18 MPa 发电效率 48.9%
MAN 公司	35-44 51-60 中速双燃料	500 ~ 21 600	720/750	米勒循环 两级增压 预燃室点燃	IMO Tier III	效率大于 50%
WinGD	X62DF X72DF 低压双燃料 低速机	193 500	89	球面液力喷气阀 预燃室内微喷引燃 (使用的是小尺寸共轨系统) 废气旁通 爆震和失火监测控制 低负荷下双燃料模式运行	IMO Tier III	BMEP 1.73 MPa 原柴油机为 2.1 MPa
美国卡特彼勒	M46DF	965/cycl	500	废气旁通 微喷引燃, 引燃量 1% 气体模式进行发动机启动 (减缸启动法) 节气门和废气旁通阀实现空燃比控制 可变气阀米勒循环 气缸旁通技术		BMEP 2.28 MPa
日本川崎重工	I30KG 气体机	3 670 ~ 4 005	750	400 ($r \cdot \min^{-1}$) 低速运行, 直驱变距桨 基于缸压反馈的点火正时控制 基于发动机状态的点火正时控制 VAT 和 JET Assit 用以帮助瞬态工况增压器加速	IMO Tier III	发电效率 达到 49.5%
三井集团	MD36G 稀薄燃烧 气体机	3 000 ~ 7 000	600	优化燃烧室设计, 采用新的预混合燃烧方式 减少活塞环数量以减小摩擦 涡轮机液力系统 (回收多余的能量) 引燃喷射分段提高热效率 2.3%		直列发电效率 47.8% V 型机发电效率 48.8% 增加涡轮液力系统 发电效率可以达到 51.7%
瓦锡兰公司	W20DF-B	160/185/cycl	1 000/1 200	高增压比和空燃比控制, 燃烧室优化设计具有良好的负荷特性, 可用于电站		
瓦锡兰公司	W34DF	480/cycl 3 000 ~ 10 000	720/750	排气阀座圈水冷 气阀旋转 单脉冲排气系统、单涡轮增压		
瓦锡兰公司	W46DF	1 145/cycl 6 870 ~ 18 320	600	改善新一代空气燃气混合, 优化燃烧稳定性 缸压监测, 爆震检测, 传感器失效指示 燃气模式下低负荷热效率底 新一代 UNIC 控制系统		
瓦锡兰公司	W31DF	530/550/cycl 4 200 ~ 16 000	720/750	两级增压压比 7.0 (NO_x 减小 40%), 增压器效率提升 10% 模块化设计 液压阀	IMO Tier III	
日本新泄	28-AHXDF	1 920 ~ 2 880	800	良好的空燃比控制和微引燃喷油点火, 可以实现良好的负荷特性 加载时间为 15 s	IMO Tier III	BMEP 2.0 MPa
韩国现代重工	HIMSEN H35 (2012 年推出)	480/500/cycl	720/750	基于缸压的分缸平衡 废气旁通阀控制空燃比	IMO Tier III	BMEP 2.08 MPa
韩国现代重工	H54DF	8 820 ~ 26 460	600	两级增压 (高压比) 加米勒循环 最高燃烧压力高 DVT (Dual Valve Timing) 有效降低启动和低负载情况下的 PM 排放	IMO Tier III	BMEP 2.14 MPa

1 双燃料发动机工作方式概述

气体燃料作为发动机的燃料主要有三种工作方式。第一种是纯气体燃料发动机, 高速气体机使用火花塞点火, 如 MTU4000 发动机; 中低速机为了实现稳定的点火, 一般采用预燃室的方式, 如三菱公司的 KU30GSI、卡特彼勒公司的 G20CM34。第二种是低压双燃料发动机, 该种方式气体燃料在进气冲程喷入气缸, 在压缩上止点喷入少量柴油引燃天然气。微引燃低压双燃料是现在应用比较多的天

然气发动机模式, 如瓦锡兰的 31DF、现代公司的 35DF。低压双燃料和高压双燃料发动机工作原理见图 2。第三种气体应用方式是气体燃料在压缩上止点喷入气缸, 实现和柴油机类似的扩散燃烧。这种应用方式虽然能避免爆震和失火等异常燃烧现象的发生, 但是 NO_x 排放与柴油机相当^[13], 并且须要对发动机本体进行大幅度重新设计。这种天然气发动机目前市场上还没有成熟的产品。天然气发动机相比于柴油机的排放性能对比见图 3。

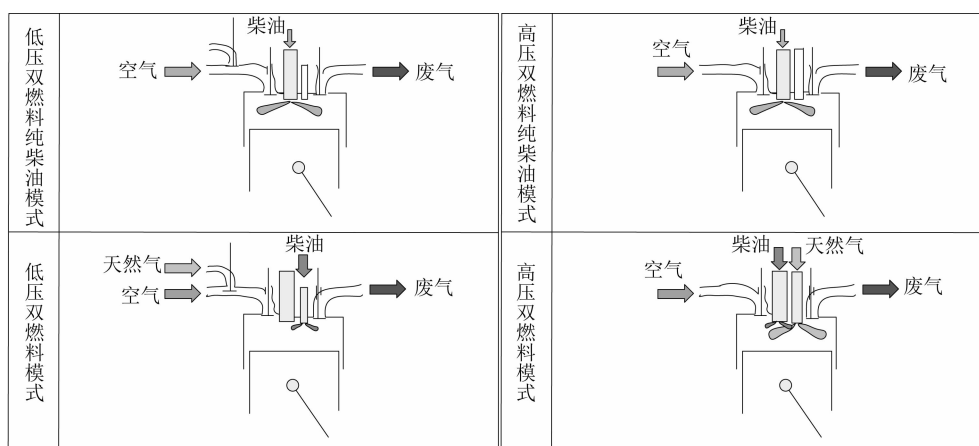


图 2 低压双燃料和高压双燃料发动机工作示意图

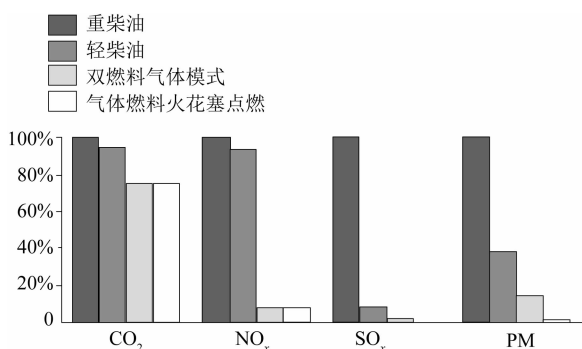


图 3 柴油机和天然气燃料发动机排放数据对比

2 天然气发动机主要技术研究方向

目前, 天然气发动机的主要技术研究方向有以下几点。

(1) 带负荷特性与加速性。燃料预混合的工作方式属于 Otto 循环, Otto 循环本身的带负荷特性劣于 Diesel 循环, 同时涡轮滞后现象会使得发动机加速过程中空燃比过小而导致出现爆震, 限制双燃料发动机的应用。

(2) 空燃比控制。天然气发动机易于出现爆震和失火等现象, 并且功率密度越高, 爆震和失火

之间的操作串口越窄, 这须要快速准确的空燃比控制。空燃比控制涉及增压器、进气中冷系统、进气节气门以及燃气喷射等多个子系统, 全工况范围实现准确的空燃比控制具有极大的挑战。

(3) 功率密度提升。由于失火和正常燃烧的限制, 由柴油机改造而成的双燃料发动机功率密度都会有一定程度的下降, 实现和柴油机相同的功率密度是双燃料设计的一个主要目标。

(4) 未燃 HC 排放。未燃 HC 的温室效应是 CO_2 的十倍, 必须严格限制未燃 HC, 一方面要避免失火, 更为主要的是减少缸盖裂隙, 通过优化活塞头设计以减小裂隙效应, 优化预燃室设计, 从根本上解决 HC 排放^[10]。

(5) NO_x 排放。燃用气体燃料时, 如果引燃油量是满负荷时的燃油量的 1.5% ~ 10%, NO_x 的排放能够控制在 $6.5 (\text{g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1})$; 如果想进一步降低 NO_x 的排放须进一步降低引燃油量; 而如果欲将 NO_x 排放降低到 $1 (\text{g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1})$, 则须增强微量燃油喷射的贯穿距与喷射模式^[16]。

2.1 气路控制改善

天然气发动机的空燃比控制效果直接决定了发动机的性能, 急降速失火和急加速爆震等异常燃烧

现象已成为气体燃料发动机发展的瓶颈。空燃比的控制涉及新鲜空气量的控制和燃气喷射量的控制,单就新鲜空气充量的控制就涉及节气门控制、增压压力控制以及米勒循环匹配等多个环节,快速准确的空燃比控制已成为一大技术难点。从结构上看,新型天然气发动机采用的技术有米勒循环、EGR、两级增压、废气旁通、进气旁通、气缸旁通、涡轮液力系统、先进的进气中冷等。天然气发动机典型气路系统示意图见图 4。

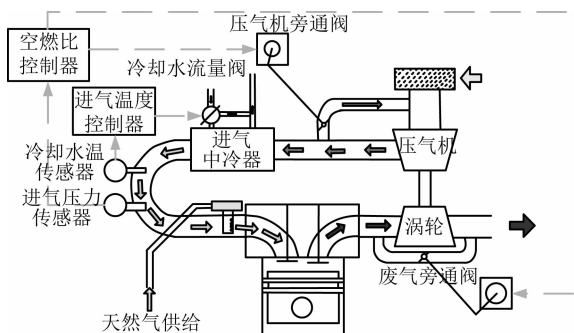


图 4 燃气发动机典型气路系统组成图

米勒循环即进气门早关技术,是一种能够兼顾油耗和 NO_x 排放的排放控制技术。其通过在下止点之前关闭进气门从而降低缸内充量温度,提高压缩比,拓展爆震边界,提高发动机效率。三菱公司的研究表明:米勒循环还可以降低以峰值压力为表征的循环变动系数。进气门早关 20° , KU30GSI 气体机的循环变动系数下降 50% ^[11]。但是,米勒循环会导致缸内进气量减少,为了维持合适的空燃比,不得不增加进气压力。现有的单级涡轮增压技术增压比一般为 $5 \sim 6$,这会将进气门限制在进气下止点前 30° 。为了进一步挖掘双燃料发动机的性能,带中冷的两级涡轮增压技术被广泛采用。瓦锡兰的 31DF 采用两级涡轮增压技术,增压比达到 7, NO_x 排放进一步下降了 40% ,同时涡轮增压器效率提高 10% ,见图 5。按照涡轮增压器效率和发动机效率 $10:1$ 的经验,采用两级涡轮增压技术可使发动机效率提升 1% ^[13]。目前采用两级涡轮增压技术基本上已经成为天然气发动机的标配。MAN 公司在两级增压匹配方面提出了系统的解决方案。卡特彼勒的 FlexCam 可变气阀技术可实现强米勒循环^[10]。

良好的推进特性须要发动机有宽广的功率范围,但是发动机的功率范围受压气机喘振和涡轮前排气温度的限制。废气旁通技术是在高工况时通过调节废气旁通阀,使得一部分废气不流向涡轮,进而达到调节增压压力,控制空燃比的目的。压气机

旁通技术是将增压之后的一部分空气重新引回压气机入口,以提高加速时的供气量响应速度。日本洋马公司采用这种技术使得气体燃料模式实现了和柴油模式相同的加速性, EY26LW 机从怠速到满载只需要 15 s ^[14]。为了改善气体燃料发动机的加速性,日本三井公司设计了涡轮液力系统,该系统在高负荷时通过变量泵回收部分增压器的能量用于曲轴输出功,高负荷效率提升了 3.4% ;而在瞬态工况时采集曲轴功作用到增压器上以改善发动机带负荷特性,使得怠速到满载的加速时间缩短了 50% ^[5]。卡特彼勒公司使用气缸旁通技术将增压后的空气直接引入排气管,以优化涡轮效率,增加空气压力,拓展压气机喘振边界^[7]。

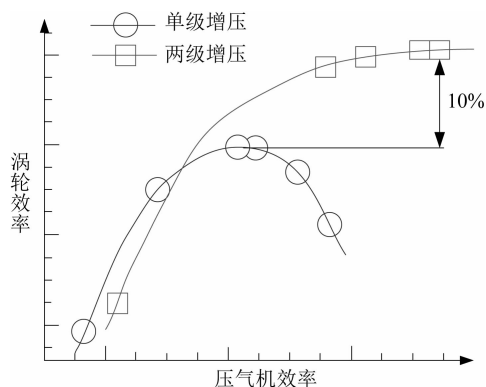


图 5 单级涡轮增压和两级涡轮增压压气机效率和涡轮效率对比

2.2 缸内优化

燃气发动机缸内过程优化的主要目标是控制非正常燃烧,降低 NO_x 和 HC。缸内稳定燃烧的先决条件是稳定的点火,同时优化预燃室与活塞头凹坑的匹配,达到提高燃烧效率,减小爆震倾向,提高燃烧稳定性的目的。WinGD 通过优化预燃室和预燃室喷嘴降低缸内过程对引燃油喷射压力和喷射持续期的敏感性^[8]。三井公司研制的 MD36G 发动机将引燃柴油分两段喷入气缸,第一段引燃油在压缩冲程开始之前喷入,而第二段则在压缩上止点附近喷入。采用分段喷射可以加快气缸外围区域的火焰传播速度,燃烧效率提高了 2.3% ,同时由于降低了失火现象发生的几率,IMEP 循环变动系数下降 25% ^[5]。裂隙附近剧烈的传热使得混合气易出现失火现象,造成未燃 HC 增加。卡特彼勒公司通过降低火力岸高度将发动机裂隙容积减小了 65% , HC 排放下降了 50% ;同时还通过优化气缸盖设计,使在供气压力变化范围较大情况下,均能形成良好的混合气分布,这就允许使用较低的供气压力,有利于提高供气系统的安全性^[10]。三菱公司

通过优化气缸盖和气阀附近的裂隙设计, 使在 HC 排放减少了 30%, 进一步通过减小火力岸和缸套之间的裂隙, 使 HC 排放再下降了 30%^[11]。

2.3 部件优化

双燃料发动机的主要挑战之一来自引燃喷油器。喷油器面临过热、喷油嘴堵塞以及维持稳定的小喷油量等挑战。比较普遍的解决方案是主喷油器和引燃喷油器独立, 优点是便于维护和安装, 但同时会加大原本空间就不宽裕的缸盖的设计难度。韩国现代公司 HiMEN 中速双燃料发动机、三井 MD36G、卡特彼勒、WinGD 的 RTFlex50DF、MAN 公司的双燃料发动机都采用这种设计方案。另一种方案是使用主喷油和引燃喷油集成的双针阀喷油器, 如瓦锡兰使用的双针阀喷油器, 见图 6。大针阀采用液力机械控制模式, 用于柴油模式; 小针阀采用电子控制, 用于双燃料模式。小针阀可以独立运行, 优化喷油正时和喷油持续期, 引燃油量可控制为满负荷时的 1%, 大幅度降低了 NO_x 排放^[3]。日本大发公司设计了主喷油嘴水冷, 以提高微引燃发动机引燃设备的寿命^[15]。

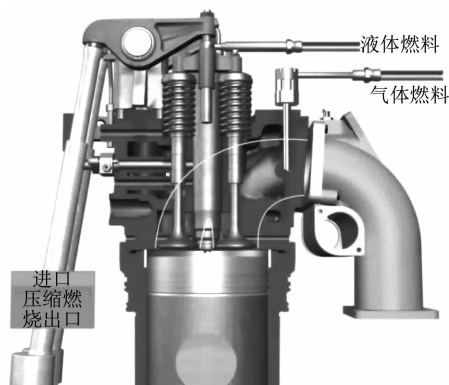


图6 瓦锡兰双针阀喷油器

进气中冷器优化设计的目的是提供稳定的进气温度, 以避免恶劣工况下的异常燃烧。如日本大发公司和卡特彼勒公司都针对天然气发动机中冷器进行了优化设计; MTU 更是设计了独立于高温循环外的低温冷却循环, 这样无论发动机处于什么工况都能提供有效的进气充量冷却, 改善发动机的瞬态响应特性和低负载时的带负载能力^[12]; 瓦锡兰 W34DF 使用气门座圈水冷和气门旋转技术, 降低气门的热负荷和磨损^[3]; MTU4000 气体机采用闭式曲轴箱通风以降低 HC 排放^[12]。

2.4 控制技术

天然气发动机的控制技术主要围绕空燃比、爆震、燃料供给等核心控制内容展开, 目标是实现发动机良好的瞬态性能、快速的燃料模式切换。

MTU4000 发动机基于缸压传感器的测量数据实时控制每一缸的气体混合和点火, 在全工况范围内提高燃烧效率、降低排放; 同时使用基于 MAP 的涡轮增压控制技术实现废气旁通阀和压气机旁通阀各个工况点的配合^[12]。卡特彼勒公司在 G20CM34 发动机上应用了分缸平衡技术。分缸平衡技术本身并不能提高发动机性能, 但是由于单缸平衡技术能够拓展气体机爆震边界, 增大点火提前角和压缩比, 进而可以提高发动机的功率密度, 避免恶劣环境下的功率下降。因此分缸平衡和高级发动机控制技术对于深度挖掘燃气发动机的潜力是十分必要的。卡特彼勒的原型机验证表明: 使用分缸平衡技术可以拓展发动机工况范围, 特别是可以增大点火提前角, 拓展爆震边界, 发动机效率提升 5%, NO_x 下降 10%^[10]。卡特彼勒在双燃料发动机上应用减缸起动法, 在起动时一部分气缸喷入空燃比合适的燃气并使用柴油引燃, 其余气缸只喷入引燃柴油, 以降低起动时的 PM 排放; 同时这一技术也可用于双燃料发动机低负荷下的高效低排放燃气模式运行^[7]。空燃比控制方面, 洋马公司的 EY26LW 机采用基于预测控制的方法预测负载波动, 以改善空燃比控制^[15]; 瓦锡兰 W31DF 使用前馈控制优化瞬态工况的空燃比控制^[17]; 洋马公司使用发动机轴输出功和燃料喷射量数据来估计燃料的甲烷值, 进而修正喷射持续期, 优化空燃比控制^[14]; 川崎重工 L30KG 气体燃料发动机使用基于缸压信号经快速傅里叶变换得到的爆震强度来控制点火正时, 但是这种控制方式无法实现点火正时的快速改变^[6]。在控制系统结构设计方面, 各公司都采用模块化的控制系统, 分为喷射控制模块、主控模块以及安保模块等, 详见图 7。

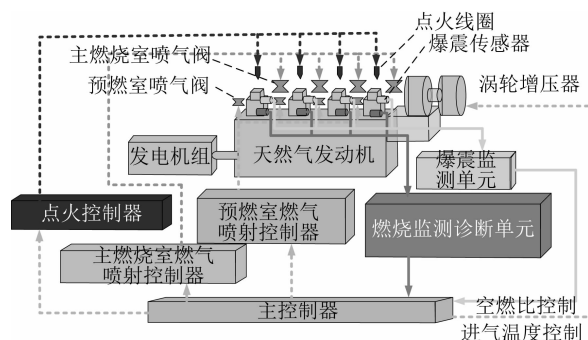


图7 典型天然气发动机控制系统组成

3 低速双燃料发动机

低速双燃料发动机燃气管理的目标: 燃气混合均匀, 不出现过浓区域, 并且尽量出现分层的燃气

分布。研发的目标：提高燃料利用率；提高功率密度；燃料共享模式，即 LNG 船可以使用气体燃料和液体燃料，免去天然气液化的麻烦。低速双燃料发动机的 BMEP 由柴油机的 2.1 MPa 下降到 1.73 MPa。迄今 WinGD 低速双燃料发动机已经有 35 台的订单，其燃气供给系统使用球面液力喷气阀，在压缩开始前在缸套上喷射，喷射压力为 1 ~ 1.2 MPa。为了实现良好的 HC 排放控制，一方面通过调节喷气正时和扫气过程，使得甲烷在到达上止点之前排气阀关闭；另一方面由于 HC 排放的主要原因是火焰淬熄和活塞火力岸死体积，因此应尽量减少火焰碎粒。二冲程发动机的 HC 排放要比四冲程发动机低得多，因为可燃物在缸内有更长的滞留氧化时间，且二冲程燃烧室容积面积比更大，使火焰淬熄减少。试验表明：最高燃烧压力循环变动系数由柴油模式下的 1% 增大到双燃料模式下的 4.5%。瓦锡兰低速双燃料发动机能够在 5% 负荷下以双燃料模式运行^[8]。

4 结 论

能源危机和排放法规的双重压力下使得各大发动机公司纷纷将目光投向天然气发动机，气体燃料发动机和双燃料发动机纷纷亮相。米勒循环配合两级增压技术成为天然气发动机的标配；以减少裂隙容积为目的的缸内部件优化是降低燃气发动机 HC 排放的重要方法；快速准确的空燃比控制技术是拓展燃气发动机应用领域的关键技术环节；高效、低排放、高性能的双燃料发动机须要从进气、燃料供给、缸内过程、控制系统等多角度进行优化设计。

参考文献

- [1] YOON W, SEO J, LEE Y, et al. Development of HiMS-EN dual fuel engine line-up [C]. CIMAC 2016, 201.
- [2] DILLEN E, YERACE D, TRASK L, et al. GE transportation dual fuel locomotive development [C]. CIMAC 2016, 214.
- [3] AALTONEN P, JARVI A, VAAHTERA P, et al. New DF engine portfolio (Wartsila 4-stroke) [C]. CIMAC 2016, 251.
- [4] JAY D, JARVI A, DELNERI D, et al. Development of CR technology in the last decade—4 stroke Wartsila engines [C]. CIMAC 2016, 232.
- [5] MAYUZUMI K, KONDO M, OKA T, et al. Latest development of large gas engine (MD36G) [C]. CIMAC 2016, 86.
- [6] NONAKA Y, ISHII H, FUJIHARA S, et al. Development of Kawasaki green gas engine for marine L30KG series [C]. CIMAC 2016, 159.
- [7] BANCK A, SIXEL E, RICKERT C. Dual fuel engine optimized for marine applications [C]. CIMAC 2016, 47.
- [8] OTT M, NYLUND I, ALDER R, et al. The 2-stroke low-pressure dual-fuel technology: from concept to reality [C]. CIMAC 2016, 233.
- [9] AUER M, BAUER M, KNAFL A, et al. MAN Diesel & Turbo SE's medium speed gas engine portfolio—a modular matrix design [C]. CIMAC 2016, 163.
- [10] WOLFGRAHM M, RICKERT C, HEROLD H, et al. G20CM34 - A highly flexible 10 MW gas engine concept [C]. CIMAC 2016, 27.
- [11] YOSHIKUMI H, ESAKI M, SUZUKI H, et al. Improvement of power generation efficiency and heat recovery of cooling energy in Mitsubishi KU30GSI gas engine for better heat and power utilization [C]. CIMAC 2016, 189.
- [12] SANDER U, MENZEL S, FRIEDL P, et al. MTU series 4000 for natural gas operation in ships—challenges for high speed gas engines in mobile applications [C]. CIMAC 2016, 53.
- [13] MURAKMI S, KAMMERDIENER I, STRASSER R, et al. Holistic approach for performance and emission development of high speed gas and dual fuel engines [C]. CIMAC 2016, 273.
- [14] ISSEI O, NISHIDA K, HIROSE K. New marine gas engine development in YANMAR [C]. CIMAC 2016, 49.
- [15] KAWASE K, OKADA A, YAMADA T. Development of the new DAIHATSU 2MW class dual-fuel engine for marine use [C]. CIMAC 2016, 77.
- [16] SENGHAAS G, WILLMANN M, KOCH H J. Simplified L'Orange fuel injection system for dual fuel applications [C]. CIMAC 2016, 39.