

柴油/天然气电控双燃料技术研究

唐努, 郑翱昱, 刘开敏, 钱波

(宁波中策动力机电集团有限公司, 浙江 宁波 315032)

摘要: 针对双燃料发动机的特点介绍了电控双燃料系统的原理; 并对所研究的双燃料发动机的失效模式及效应进行了分析。性能试验表明: 在不对原柴油机喷油角度、压缩比等参数进行任何改动, 只增加燃气供应系统和电控双燃料系统的情况下, 在 75% 负荷下天然气的替代率达到 83%, 经济性好; 同时, 排放较纯柴油有较大的改善; 发动机的排温、最高燃烧压力及调速性能与柴油机的相近。

关键词: 电控; 双燃料; 天然气

中图分类号: TK433 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2015)04-0006-05

Research on Diesel/Natural Gas Electronic Control Technology

Tang Nu, Zheng Aoyu, Liu Kaimin, Qian Bo

(Ningbo C. S. I. Power & Machinery Group Co., Ltd., Zhejiang Ningbo 315032)

Abstract: Based on the characteristics of duel fuel engines, the principle of electronic control duel fuel system is introduced. The failure mode of the duel fuel engine and its effect is analyzed. Performance test shows that: without any changes to parameters such as original diesel engine's injection angle and compression ratio, only with the modification of gas supply system and electronic control duel fuel system, the engine can achieve 83% replacement ratio of natural gas under 75% load, and boasts good economic performance; meanwhile, the emission is tremendously improved; the exhaust temperature, maximum combustion pressure and speed governing performance are similar to the diesel engine's.

Key words: electronic control; duel fuel; natural gas

0 引言

目前, 柴油价格虽有所回落, 天然气价格有上升的趋势, 但不足以降低人们对天然气的使用信心。从排放方面讲, 柴油的排放高于天然气的, 对环境污染以及人类的健康带来极大的威胁。从储量方面来讲, 天然气的使用期限要比石油多 50 年。在价格方面, 天然气刚刚由家用天然气向车用及陆用发电天然气转型, 其固定使用还处于上升时期。因此各主机厂纷纷开展柴油/天然气双燃料技术的研究, 特别是电控双燃料技术。

1 电控双燃料系统原理介绍

柴油/天然气电控双燃料技术是在不改变原发动机机械结构的基础上进行的, 是在原机上增加了燃气进气系统、油气切换系统以及电控模块 ECU 来实现的。

双燃料发动机的燃气供气系统主要有 LNG 气罐、蒸发器、流量计、过滤器、调压阀、压力平衡调节阀、速断电磁阀组成。蒸发器的主要作用是汽化天然气, 汽化后的天然气压力瞬间增大, 再通过一个高压减压器后暂时储存在缓冲罐中, 缓冲罐也

可弥补加速时供气不足所带来的缺陷。压力平衡调节阀主要用于控制燃气与空气间压差。速断电磁阀用于紧急情况时快速地切断气源。

燃气喷射采用多点喷射系统，即在发动机每缸的进气道支管上布置单独的燃气喷射阀。控制系统由多点喷射控制器、电喷阀、电子调速器、传感器等组成，其原理如图 1。

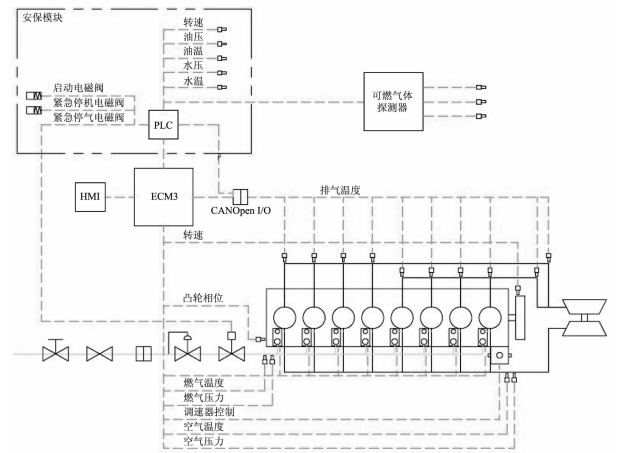


图 1 控制系统原理图

在双燃料模式下由多点喷射控制器（ECU）直接控制电喷阀的喷气时间，从而决定参与缸内混合的燃气量，达到一定的替代率。电喷阀的喷气时间由发动机转速、油门位置、燃气热值、燃气与增压空气间压差、排温等因素决定。

采用多点喷射控制方案，可以对单缸的燃烧进行优化，消除由于制造组装的差异引起的各缸不均匀现象；同时使进气道喷射燃气不会产生回火现象；而且由于燃气进气系统距离气缸较近，有利于提高负荷突变时的响应性。

在多点喷射控制系统中，当系统满足双燃料运行模式要求后，发动机进入“双燃料运行模式”运行。负荷设定变化时，燃油由调速器模块自动控制，燃气供应量根据预先设定的替代率增加或减少。同时，控制器检测燃油的输出功率，通过与发动机设定燃油功率对比，判断发动机当前实际的燃气替代率，来增加或减少燃气供给，使发动机运行在设定的替代率。同时，控制器检测各缸排温、水温、燃气压力/温度等信号，通过预先设定的曲线或脉谱图对替代率进行修正。

对于多点双燃料系统，控制器通过采集发动机转速和凸轮轴上止点位置，自动判断喷射持续期。

燃气是在进气道中混合的，所以对燃气压力要求较高，如果采用压差型的燃气调压阀，一般要高于运行时进气道压力 0.05 ~ 0.15 MPa。如果燃气

压力过高，可能会导致低负荷时燃气喷射阀动作时间过短，喷射量控制不精确。燃气喷射阀驱动曲线见附图 2。在双燃料模式下，燃气电喷阀的开启时刻由发动机的配气相位决定，配气相位图见附图 3。控制燃气喷射阀的开启时刻，避开进排气重叠角，能有效降低燃气的逸散以及排气管后燃的可能性。燃气阀的开启持续时间是以其所占的曲轴转角为计量的。

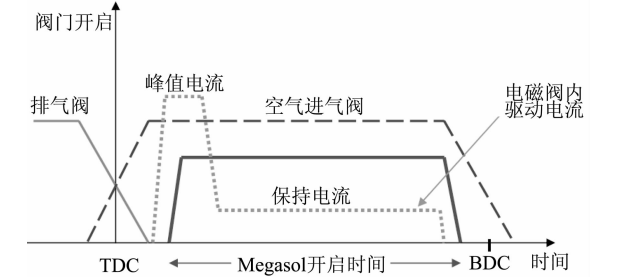


图 2 燃气喷射阀驱动曲线

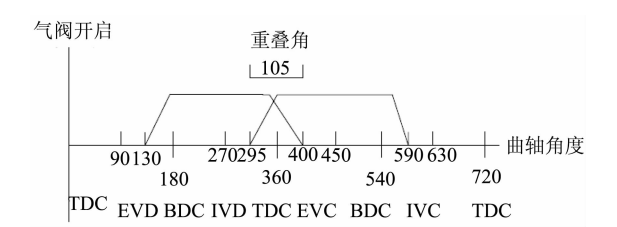


图 3 配气相位

2 试验样机

DF8300 型发动机主要技术规格和性能参数见表 1。

表 1 DF8300 型发动机主要技术规格和性能参数

型式	直列、四冲程、水冷、直喷、增压中冷、不可逆转
气缸数	8
气缸直径/mm	300
活塞行程/mm	380
持续功率/kW	2 000
转速/(r · min ⁻¹)	720
活塞平均速度/(m · s ⁻¹)	9.12
平均有效压力/MPa	1.55
活塞排量/L	215
压缩比	13
发火次序	1-5-7-3-8-4-2-6
各缸排温/℃	470
涡轮前排温/℃	570
起动方式	压缩空气起动

燃气进气管部件见图 4。

燃气从进气管支管喷入，在气缸盖的进气道与空气混合进入燃烧室。在排气阀关闭后开始喷气是为了避免天然气在重叠角被扫到排气管中。

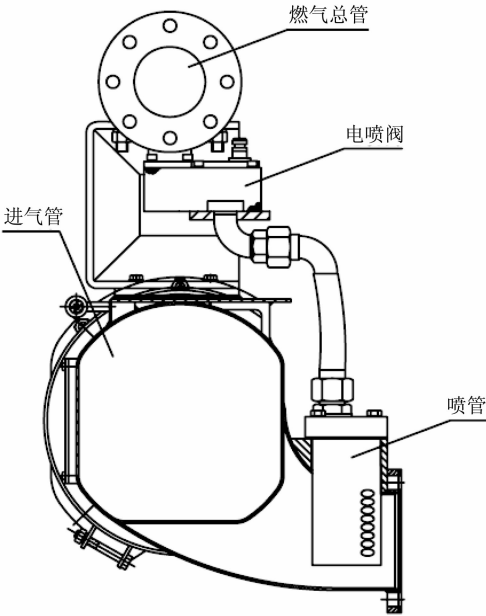


图 4 燃气进气管部件

在进气管及排气管加装带阻火焰的防爆阀，以便在发生意外时防爆阀能迅速打开释放压力。

在曲轴箱安装轴瓦温度探测器，检测轴瓦温度，温度过高时自动报警及停车。

在进气管、排气管、呼吸器、环境空间安装可燃气体浓度探测装置，任何一个可燃气体探测装置检测到可燃气体浓度超过 30% LEL 时，自动转换成纯柴油模式，超过 40% LEL 时自动停机。

3 失效模式及效应分析

在前期，针对发动机各个系统，包括引燃油系统、燃气系统、电喷系统、电喷系统、监控系统、双燃料切换系统、紧急停车系统等，可能存在的失效模式、失效影响、失效原因、探测方法、严重程度及频率等进行分析。具体见表 2。

通过 FMEA 失效模式及效应分析，确定系统可能存在的风险，以及控制系统及其他系统应该具备的一些功能。如当发动机发生排温不均匀、空气与燃气压差过大或过小、可燃气体浓度过高、燃烧故障等问题时，发动机是否都能探测到，并及时地转换成纯柴油模式或者停机；如果不能，则系统应适当增加相应功能。

4 性能试验研究

双燃料发动机试验数据如表 3 所示。

表 2 失效模式及效应分析

系统 / 元器件	潜在的失效模式	失效原因	失效影响	探测方法	失效补偿措施	改进措施	严重程度等级 (S)	频率数 (O)	探测度 (D)	风险优先级 (RPN)
引燃油系统	高压油泵需要喷油时不工作	装配不良，零件变形或因进入杂质	某缸失火、排温不均、柴油机运行不稳、功率下降	排气温度巡检	单缸排气温度与平均排气温度差超过 35℃ 报警	提高配套油泵的可靠性，减少燃油中杂质含量，及时清洗燃油滤清器	7	2	1	14
	喷油器失效	装配不良，零件变形或因进入杂质	某缸失火、排温不均、柴油机运行不稳、功率下降	排气温度巡检	单缸排气温度与平均排气温度差超过 35℃ 报警	提高配套油泵的可靠性，减少燃油中杂质含量，及时清洗燃油滤清器	7	2	114	
燃气系统	进气管燃气泄漏	焊缝缺陷、连接件密封失效	机舱或机器处可燃气体浓度过高	环境可燃气体浓度探测	环境中可燃气体浓度超过 30% LEL 报警	提高焊接质量，装配前进行焊接处 X 光探伤，管路整体做压力试验，提高装配工艺	9	2	1	18
	曲轴箱燃气泄漏	活塞环、活塞、缸套间隙过大或油膜失效	曲轴箱内可燃气体浓度过高	呼吸口可燃气体浓度探测	曲轴箱内可燃气体浓度超过 30% LEL 报警，并驱动曲轴箱抽风机工作	提高配套活塞、活塞环、缸套精度	9	3	1	27
	排气管燃气泄漏	燃气喷气相位异常或燃气喷射阀泄漏	排气管内可燃气体浓度过高	排气管可燃气体浓度探测	排气管内可燃气体浓度超过 30% LEL 报警	提高配套燃气喷射阀可靠性，提高电喷系统可靠性	9	2	1	18
	燃气调压阀、压力平衡调节阀失效	阀体卡死、膜片破损	燃气进气压力过高或过低	燃气进气压力检测	燃气进气压力与空气进气压力压差大于 0.15MPa 或小于 0.02MPa 报警，并转换为纯柴油模式	提高配套调压阀可靠性，提高压力平衡调节阀可靠性	7	1	1	7
	速断电磁阀失效	速断电磁阀失效或线路断线	应急停车时燃气供应管路无法切断	无	燃气电喷阀关闭	提高配套速断电磁阀可靠性，加强电器接口强度及密封性	6	2	5	60
	燃气电喷阀不动作	燃气电喷阀失效或线路断线	双燃料模式无法使用	排气温度巡检	燃气电喷阀断线时报警，并转换为纯柴油模式	提高配套电喷阀可靠性，做好防尘处理，加强电气接口强度	7	5	3	105

续表 2

系统 /元器件	潜在的失效模式	失效原因	失效影响	探测方法	失效补偿措施	改进措施	严重度等级(S)	频率数(O)	探测度(D)	风险优先级(RPN)
电喷系统	转速传感器时效	传感器失效或线路断线	双燃料模式无法使用	转速检测	断线报警，并转换为纯柴油模式	保证转速传感器安装间隙，加强电气接口强度及密封性	7	3	1	21
	相位传感器时效	传感器失效或线路断线	双燃料模式无法使用	相位检测	断线报警，并转换为纯柴油模式	保证相位传感器安装间隙，加强电气接口强度及密封性	7	3	1	21
	油门位移传感器时效	传感器失效或线路断线	双燃料模式无法使用	油门位置检测	断线报警，并转换为纯柴油模式	保证油门位置传感器安装角度，加强电气接口强度及密封性	7	3	1	21
	油门位移传感器移位	安装位置移位	控制出错	油门位置检测	油门位置保护，并转换为纯柴油模式	加强油门位置传感器安装后的定位及紧固	9	2	6	106
	压力传感器时效	传感器失效或线路断线	显示出错	压力检测	断线报警	保证测量压力不超限，加强电气接口强度及密封性	4	2	1	8
	温度传感器时效	传感器失效或线路断线	显示出错	温度检测	断线报警	加强电气接口强度及密封性	4	2	1	8
	控制模块失效	线路故障或模块崩溃	双燃料模式无法使用	系统检测	系统报警，并转换为纯柴油模式	确保系统线路正确及供电稳定	7	3	1	21
监控系统	转速传感器时效	传感器失效或线路断线	超速保护失效	转速检测	双转速传感器	保证转速传感器安装间隙，加强电气接口强度及密封性	5	3	1	15
	温度传感器时效	传感器失效或线路断线	温度保护失效	温度检测	停机保护独立开关	加强电气接口强度及密封性	4	2	1	8
	压力传感器时效	传感器失效或线路断线	压力保护失效	压力检测	停机保护独立开关	加强电气接口强度及密封性	4	2	1	8
	系统失效	线路故障或模块崩溃	监控系统失效	监控仪报警	系统报警	确保系统线路正确及供电稳定	6	1	1	6
双燃料模式切换	双燃料失效	转速旋钮或线路故障，误操作，其他系统故障	无法切换至双燃料模式	系统报警	检测其他故障	确保系统线路正确及加强电气接口强度，提高操作人员技能	6	4	4	96
	纯柴油失效	转速旋钮或线路故障，误操作	无法切换至纯柴油模式	无	应急停机	确保系统线路正确及加强电气接口强度，提高操作人员技能	6	1	1	6
应急停车	应急停车失效	转速旋钮或线路故障，误操作	无法应急停车	无	检测其他故障	确保系统线路正确及加强电气接口强度，提高操作人员技能	6	1	4	24

表 3 双燃料试验数据

工况	25%	50%	75%	90%	100%
功率/kW	500	1000	1500	1800	2000
转速/ ($r \cdot min^{-1}$)	454	571	654	695	720
喷油提前角/ $^{\circ}CA$	18	18	18	18	18
燃气起始角度/ $^{\circ}CA$	320	320	320	320	320
压差/ MPa	0.077	0.076	0.073	0.074	0.072
纯柴油燃油耗/ ($g \cdot (kW \cdot h)^{-1}$)	227	211	202	203	206
双燃料燃油耗/ ($g \cdot (kW \cdot h)^{-1}$)	58	40.8	35.2	37.4	48.7
燃气流量/ ($Nm^3 \cdot h^{-1}$)	115	240	390	470	502
1 缸排温/爆压/ $^{\circ}C/MPa$	217/6.5	265/8.5	271/11.6	290/12.9	317/13.5
2 缸排温/爆压/ $^{\circ}C/MPa$	253/6.5	293/8.0	321/12.5	284/12.6	336/13.7
3 缸排温/爆压/ $^{\circ}C/MPa$	312/6.4	325/8.0	328/10.6	306/13.9	316/14.5

续表 3

工况	25%	50%	75%	90%	100%
4 缸排温/爆压/ $^{\circ}C/MPa$	269/7.0	287/8.4	300/11.6	305/13.2	321/13.9
5 缸排温/爆压/ $^{\circ}C/MPa$	250/7.1	269/8.6	296/11.3	325/13.0	349/13.9
6 缸排温/爆压/ $^{\circ}C/MPa$	223/6.7	262/9.7	299/11.6	331/13.4	348/13.9
7 缸排温/爆压/ $^{\circ}C/MPa$	269/7.5	298/9.0	323/12.5	298/13.7	325/14.0
8 缸排温/爆压/ $^{\circ}C/MPa$	232/6.1	283/8.0	296/11.8	329/13.9	337/14.3

在不对原柴油机喷油角度、压缩比等参数进行任何改动，只增加燃气供应系统和电控双燃料系统 的情况下。在 75% 负荷下天然气的替代率能达到 83%。

试验证明：在高工况下运行时，适当加大供油提前角度和提高燃气与空气的压差能有效提高天然气的热效率。

在试验过程中，进行了纯柴油和双燃料的相互转换，两种模式能迅速切换并平稳运行。

在调速性能方面，双燃料模式下稳态调速率≤

2.5%，动态调速率 $\leq 4.5\%$ ，恢复时间 $\leq 4\text{ s}$ 。基本与纯柴油模式下的调速率接近。

在 NO_x 排放方面，进行了 NO_x 排放检测，台架测得双燃料模式下的 NO_x 排放量约为IMO Tier II 限值的70%，低于纯柴油模式下的 NO_x 排放量。在整个功率范围内无可视烟色，排气管中未检测出可燃成分。

在扭振方面，进行了扭振测试。结果表明：该发动机台架轴系在发动机转速 $698.48\text{ (r}\cdot\text{min}^{-1})$ （即2阶4.5谐次）、 $561.52\text{ (r}\cdot\text{min}^{-1})$ （即2阶5.5谐次）、 $493.74\text{ (r}\cdot\text{min}^{-1})$ （即2阶6.5谐次）左右存在明显的共振点，但在共振转速处，曲轴的最大扭振应力满足CCS的有关规定要求。在所测得的发动机工作转速范围内，无转速禁区。

在经济性方面，按试验情况：基本上1 t天然气替代1 t柴油。目前柴油价格有所下降，大约7000元/t，LNG价格大约为6500元/t，在目前情况下使用LNG替代柴油的经济性不是非常明显。

（上接第5页）

4 结 论

本文从声源识别技术、进排气噪声控制设计技术、低噪声设计预报技术、有源消声技术等方面入手，总结了柴油机振动噪声控制技术的研究现状和发展趋势。

须要指出的是，柴油机的振动噪声控制应该在柴油机研制时的顶层设计阶段考虑。在柴油机整机设计过程中进行振动噪声设计，是为了尽早提供全面的包含各部套、零件或各专业、各阶段设计方案的分析结果。柴油机的振动噪声控制需要各个部件质量、刚度、阻尼系数以及连接方式和相关载荷等相关数据，这些都需要非常细节的设计，并协调各参数之间的匹配。但是很多时候在整机设计过程中等待这样的细节设计是不现实的，因此在设计的不同阶段只能使用不同细节程度的结构、性能结果，

但长期而言，天然气存量远远大于柴油的存量，使用天然气/柴油双燃料发动机是较好的一个选择。而在国内及国外部分地区，管道天然气价格大大低于柴油价格，每立方天然气价格为0.1~0.2元，在以双燃料机作为陆用发电机组时，使用天然气运行成本将远低于使用柴油及重油的运行成本。

5 结 论

柴油/天然气电控双燃料技术能做到较高的燃气替代率，燃料使用灵活，经济性好，比纯柴油运行成本低；排放性能比纯柴油有较大的改善；同时发动机的排温、最高燃烧压力及调速性能与柴油机相近。表明柴油/天然气电控双燃料技术有较好的发展前景。

参考文献

[1] 陈永义, 张幽彤, 刘兴华. 压缩天然气发动机电控系统 的开发 [J]. 内燃机, 2003 (1): 9-14.

因此需要多次反复和验证，这种反复和验证显然不是单纯的计算或试验所能承担的，需要相互交叉，从而使得研究更加复杂，也更显得协同设计的重要性。

参考文献

[1] Yamazaki Tatsuo, Maeda Ryouiehi, Yamashita Kikuo. Noise and vibration reduction techniques adopted for the new V6 Twin-Cam VQ engine [J]. JSAE Review, 1995, 16 (1): 96-97.

[2] French C. Advanced techniques for engine research and design [J]. Proc Instn Mechs Engrs 2009, 203 (2): 169-183.

[3] 舒歌群, 梁兴雨. 降低柴油机噪声的措施及评价 [J]. 天津大学学报, 2006, 39 (4).

[4] T Dawn. Active noise control on the brink [J]. Noise & Vibration Worldwide, 1994, 25 (12).