

综述与机型

Z6170ZLCZ/S-8 型双燃料发动机开发

闫 丽¹, 辛强之¹, 黄 猛¹, 孙立红², 陈小猛¹, 张 英¹

(1. 淄博柴油机总公司, 山东 淄博 255077; 2. 淄博市科技职业学院, 山东 淄博 255314)

摘要: 介绍了 Z6170ZLCZ/S-8 型双燃料发动机的总体设计方案, 重点阐述了双燃料发动机的天然气进气及控制系统, 以及如何实现双燃料模式燃烧。在纯柴油模式及双燃料模式下进行了发动机性能对比分析。试验结果表明: Z6170ZLCZ/S-8 型双燃料发动机燃油替代率最高可达 75%, 综合燃油替代率为 70%, 其它性能均达到设计要求。

关键词: 双燃料发动机; 控制系统; 燃油替代率; 性能

中图分类号: TK46⁺4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2014)01-0001-04

The Development of Z6170ZLCZ/S-8 Dual Fuel Engine

Yan Li¹, Xin Qiangzhi¹, Huang Meng¹, Sun Lihong², Chen Xiaomeng¹, Zhang Ying¹(1. Zibo Diesel Engine Parent Company, Shandong Zibo 255077;
2. Zibo Vocational Institute, Shandong Zibo 255314)

Abstract: The overall design of Z6170ZLCZ/S-8 dual fuel engine is introduced focusing on the inlet and control system of natural gas, as well as how to realize dual fuel combustion. Comparison was conducted between the two modes of pure diesel and dual fuel, and the results show that the replacement rate of diesel with natural gas could reach as high as 75%, and the average fuel replacement rate is 70%, and other performance parameters have all reached the design requirements.

Keywords: dual fuel engine; control system; fuel replacement rate; performance

0 引言

随着石油资源日渐减少, 燃油价格不断攀升; 同时, 排放法规日趋苛刻, 能源矛盾愈演愈烈。在各种替代燃料中, 天然气以其储量丰富、污染小、热值高等特性日渐受到重视, 所以, 开发代用燃料发动机成为一个重要的研究方向。其中以天然气为主要燃料, 以少量柴油作为引燃燃料工作的发动机称作为双燃料发动机。双燃料发动机可实现较高的燃油替代率, 经济性十分可观; 而且排放尤其是微粒排放有明显降低。天然气发动机经济性高、排放低, 因此前景十分广阔。

Z6170ZLCZ/S-8 型双燃料发动机是以 Z6170ZLCZ-8 型柴油机为母型机, 在充分吸收国内外先进技术和

设计思想, 保持其良好的动力性、经济性、可靠性等的基础上, 设计开发的新型节能环保发动机。新机主要增加了天然气供给及控制系统, 实现了以少量柴油作为引燃燃料、以天然气作为主要燃料的燃烧模式。该型发动机既可以使用 LNG/柴油双燃料工作, 也可以单独使用柴油工作; 排放性能好; 安全性高, 具有硬件及软件的双重保护; 经济性好, 常用负荷点燃油替代率达到 75% 以上, 综合燃油替代率高于 70%。

1 基本结构

1.1 总体方案

Z6170ZLCZ/S-8 型双燃料发动机采用预混进气方式, 空气与天然气经混合器混合后进入增压器, 增压后的混合气进入进气管, 再由各缸进气歧管分

收稿日期: 2013-04-02; 修回日期: 2013-08-08

作者简介: 闫丽(1972-), 女, 工程师, 主要研究方向为双燃料发动机设计与性能优化, E-mail: zcjszx@126.com。

配到各缸。天然气的进气量由双燃料控制系统控制，同时获得相应的燃油替代率。该型号双燃料发动机主要参数见表 1。

表 1 Z6170ZLCZ/S-8 型双燃料发动机主要技术参数

气缸数	6
气缸直径/mm	170
活塞行程/mm	200
压缩比	14.5
额定转速/(r·min ⁻¹)	1 500
有效功率/kW	450
平均有效压力/MPa	1.322
燃油消耗率/(g·(kW·h) ⁻¹) (纯柴油模式)	200
发动机热耗率/(MJ·(kW·h) ⁻¹) (双燃料标定工况)	≤10
综合燃油替代率	70%

1.2 天然气供给及控制系统

1.2.1 天然气进气方式

双燃料发动机的关键技术之一是天然气供给系统，目前气体燃料供给形式可分为两大类：缸内供气和缸外供气。前者包括进气道混合器预混合式和进气道喷射式；后者包括缸内高压喷射和低压喷射式。机械控制混合器预混合式供气方式是通过安装在进气总管上的混合器将空气和天然气的混合气送入发动机，通入混合器的燃气的压力由机械装置如执行器控制，通过调节供气管道中的蝶阀开度来调节供气量。这种方式的双燃料发动机结构较为简单，成本投入低；天然气并不参与调速，主要是靠“气进油退”来实现双燃料燃烧模式，获得好的经济性与排放。

各缸天然气进气单独控制，这样对配气系统的改动较少，有两种方案：一种是采用燃气电控多点喷射式，在各缸进气支管上安装天然气喷射阀，通过电控单元控制开启时间；另一种是在一个进气阀导管上将天然气引入缸内，气阀导管设计成双层壁结构，此方案要受到缸盖结构的限制，相对复杂。

为了缩短研发周期，采用预混方式进行 Z6170ZLCZ/S-8 型双燃料发动机开发。

1.2.2 天然气供给及控制系统

(1) 天然气供给系统主要包括 LNG 储罐、气化器、减压器、过滤器等。LNG 储罐用于储存液化天然气，具有可充装功能；气化器通过发动机循环水将液化天然气气化成气态天然气；过滤器的功能是滤出天然气中的水分及杂质；减压器的作用是使天然气以一个设定的压力输出，达到系统的要求，保障供气稳定。选定空燃比调节阀(俗称零压阀，能够供给接近于大气压力的介质)。

天然气供给系统见图 1。



图 1 天然气供给系统示意图

(2) 天然气控制系统主要包括控制器、执行器、蝶阀、混合器、控制柜、传感器等，见图 2。在增压器前进气管上安装混合器(文丘里式)，空气与天然气从不同进口进入混合器混合，然后进入增压器，再进入进气总管，并通过连在各缸的进气歧管进入各燃烧室燃烧。天然气的供给量由连接在管道上的蝶阀的开度控制；控制器采集油门位置等信号，发出控制信号至执行器，执行器通过拉杆控制蝶阀的开度。

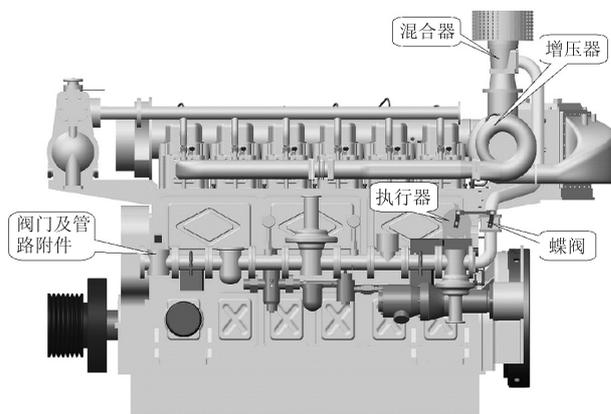


图 2 Z6170ZLCZ/S-8 双燃料发动机

1.3 柴油供给系统

双燃料发动机与普通柴油机在燃油供给系统上最大不同在于：双燃料发动机需要检测发动机的油门位置，控制器通过传感器接收到的油门位置信号向执行器发出控制指令，控制蝶阀开度，即控制天然气进气量，达到目标替代率。选用电子调速器，不仅能够获得精准的调速率，而且能够反馈油门位置，为双燃料控制系统提供精确的信号。

1.4 安保系统

由于进气系统为预混进气系统，如突遇负荷波动过大，会造成可燃混合气反应不及，剩余部分气体可能造成回火放炮情况。为此，分别在曲轴箱、进气管、排气管各安装了一个阻燃式防爆门，保证安全；同时加装了爆震传感器、排温传感器，有效保证双燃料发动机运行安全、稳定。

2 控制系统及运行模式

双燃料发动机控制系统基本原理见图 3。

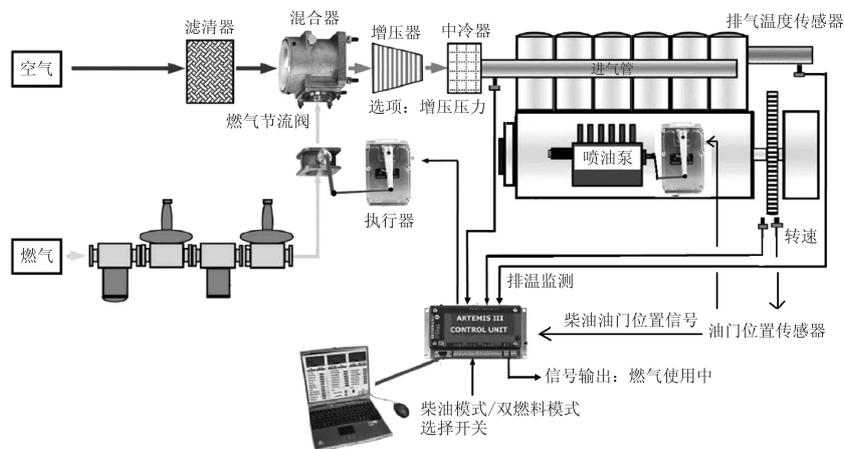


图3 双燃料发动机控制系统基本原理图

2.1 起动与怠速

双燃料发动机在纯柴油模式下起动，起动性能与原柴油机相同；怠速阶段也是在纯柴油模式下进行，因为此时发动机所需燃油量很低，如果使用双燃料模式，加入天然气燃烧，一是会造成各缸燃烧不均匀，二是体现不出经济性的优势，三是天然气的供给量控制精度要求高，控制难度加大，如遇到天然气量过多，油量过少，有可能造成个别缸不发火，甚至会有回火放炮现象。

2.2 运行

程序设定当发动机负荷达到额定负荷的25%以上才能转换成双燃料模式，切换时对应的负荷点的选择应根据发动机的本身特性和实际需要而定（低于额定负荷的25%或高于额定负荷时不能使用双燃料模式）。燃气控制部分完全独立于发动机的柴油供给及调速系统，控制器会实时监测电子调速器反馈的油门位置信号。发动机标定时，首先绘制一条不同转速下的空载油门位置曲线，可以称作“最低燃油位置曲线”，这相当于一道油门保护线，双燃料模式下的油门不会低于这条线；当条件满足时，切换到双燃料模式，天然气开始燃烧做功，转速会稍有提高，此时，调速器会自动减小油泵油门，维持至原来设定的转速；随着天然气进气蝶阀开度的加大，天然气进气量逐渐增加，油门位置会持续降低，直至其达到设定的目标位置（这个目标位置不会低于最低燃油位置曲线），从而获得相应的替代率；各负荷点目标油门位置的确定应同时考虑发动机各缸排温、燃烧粗暴程度等，不能一味追求高替代率；找到每个负荷点对应的目标油门位置之后，将其连接起来绘制出一条全程的目标油门位置曲线；当发动机在双燃料模式下自动运行时，控制器会根据当前工况控制天然气进气蝶阀开度，逐步逼近当前工况的目

标油门位置，以此获得相应的替代率。

控制策略中，会采集天然气压力、排气温度、气缸盖爆震、增压压力等信号，对双燃料发动机进行安全保护。

2.3 停机

正常停机：先将柴油/双燃料切换开关切到纯柴油模式，发动机以柴油模式运行，待达到停机条件时，将停车开关切到停车位置，发动机停车；

紧急停机：可按下紧急按钮，柴油电磁阀和燃气电磁阀关闭，同时控制器自动切换到纯柴油模式。

3 试验及分析

3.1 试验过程

在纯柴油模式下起动双燃料发动机，试验在纯柴油模式下按照450 kW/1 500 (r·min⁻¹)推进特性、负荷特性进行，记录各工况下的油门位置；在50%负荷工况时切换到双燃料模式，开始加入天然气燃烧，根据两种模式下的燃油消耗率推算出替代率，控制器记录此时的蝶阀开度，并绘制转速、油门位置、天然气进气蝶阀开度三者之间的MAP图；另外，增压压力作为反映负荷变化最直接的参数，被采集作为发动机安全保护参数，当增压压力变化过大即负荷波动过大时，控制器会发出指令，减小蝶阀开度、减少天然气供气、降低替代率，保证双燃料发动机运行安全、可靠。

3.2 试验结果

台架试验共进行了纯柴油模式与双燃料模式下的推进特性、负荷特性、90%等扭矩速度特性、100%等扭矩速度特性试验；在50%负荷工况时切换到双燃料模式，分别进行50%、75%、90%、100%的负荷特性试验。推进特性曲线见图4，负荷特性曲线见图5（图中带“o”线为双燃料模式下的试验

数据)。由图可知双燃料模式下, 燃油替代率最高达到了 75% 左右, 达到设计要求。双燃料模式下的平均排温比纯柴油模式下高 15 ~ 25℃; 双燃料模式下的增压压力比纯柴油模式下低 0.01 ~ 0.02 MPa。

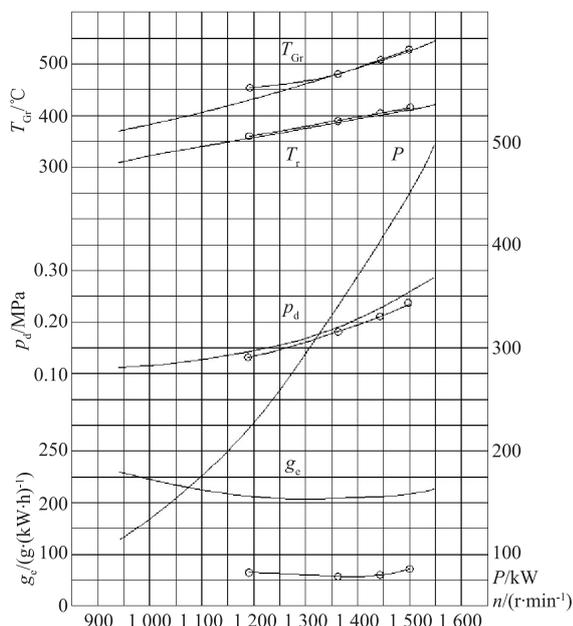


图 4 推进特性曲线

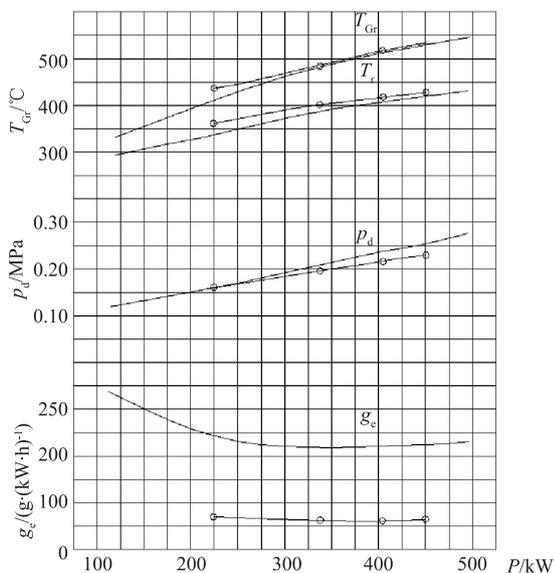


图 5 负荷特性曲线

发动机在双燃料模式和纯柴油模式下分别进行了排放、烟度和振动的测试, 双燃料模式下 NO_x 排放较纯柴油模式降低了 10% 左右; 双燃料模式下在 100% 负荷工况时的烟度仅为纯柴油模式的 1%; 双燃料模式下振动测试的试验结果符合船规的要求。

3.3 燃油替代率及经济性分析

3.3.1 燃油替代率

对于双燃料发动机, 天然气对于燃油的替代率

是表征其性能的主要参数之一, 通常定义为: 在发动机工况相同的条件下, 在双燃料模式下, 天然气所替代的燃油量 m_{dg} ($\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$) 与纯燃油工作模式下的燃油消耗量 m_{dt} ($\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$) 之比。即:

$$\phi_m = \frac{m_{dg}}{m_{dt}} \times 100\% \text{ 或 } \phi_m = 1 - \frac{m_d}{m_{dt}} \times 100\%$$

式中: m_d ($\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$) 指双燃料工作模式下的柴油消耗量。

如果想要改变燃油替代率, 就需稳定发动机负荷, 通过控制器与执行器调整蝶阀的开度, 改变天然气进气量, 即实现不同的燃油替代率。替代率过低, 经济性体现不够充分; 替代率越高, 对燃油喷射系统要求越高。过高的燃油替代率会影响双燃料发动机的可靠性、稳定性, 一般燃油替代率理论上不能超过 85%。

3.3.2 经济性分析

以 Z6170ZLCZ/S-8 型双燃料发动机为例进行经济性分析。按照满负荷下运行 1h, 燃油替代率 70%, 燃油消耗率 200 ($\text{g}\cdot(\text{kW}\cdot\text{h})^{-1}$), 标况下 1 m^3 天然气完全燃烧获得 3 kW 的功率(根据实际试验情况), 柴油 8.6 元/kg, 天然气 3.5 元/ m^3 等条件计算。纯柴油模式下耗费约: $450 \times 200 \div 1000 \times 8.6 = 774$ (元); 双燃料模式下耗费约: $450 \times 0.3 \times 200 \div 1000 \times 8.6 + 450 \times 0.7 \div 3 \times 3.5 = 599.7$ (元)。

使用双燃料模式时每小时节约费用约为 174.3 (元), 节省约 23%, 由此可以看出经济效益十分可观。

4 结束语

从燃油消耗量看, Z6170ZLCZ/S-8 型双燃料发动机控制系统能够满足综合替代率 70% 以上的要求, 燃料成本降低, 经济性明显提高, 而且在双燃料模式下能够实现稳定运行, 热负荷较纯柴油模式稍高。综上所述, Z6170ZLCZ/S-8 型双燃料发动机达到了设计要求, 性能稳定, 运行可靠。

参考文献

- [1] 周龙保. 内燃机学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [2] 郭子锐. 气体发动机技术的发展[J]. 柴油机, 2011, 33(6): 3-9.
- [3] 陈家瑞. 汽车构造(上册)[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [4] 中国船级社. 钢质海船入级规范[M]. 北京: 人民交通出版社, 2009.