

一种新型双燃料发动机控制系统的应用研究

张 晖, 张则亚, 张思国, 刘 东, 李全武, 李治朋, 孙乐美

(中国石油集团济柴动力有限公司, 山东 济南 250306)

摘 要: 在一款六缸多点喷射船用双燃料发动机上进行新型双燃料发动机控制系统的应用研究。为测试该控制系统的性能, 在纯柴油和双燃料模式进行了发动机推进特性试验。试验结果表明: 在控制系统的作用下, 该船用双燃料发动机运行平稳, 各项性能指标均达到设计要求。标定工况下: 燃气替代率大于 70%; 纯柴油模式下烟度为 1.90 FSN, 双燃料模式下烟度为 0.13 FSN。节能减排效果明显。

关键词: 双燃料发动机; 控制系统; 替代率; 试验

中图分类号: TK 427 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2018)05-0018-04

Application Research of a New Dual Fuel Engine Control System

Zhang Hui, Zhang Zeya, Zhang Siguo, Liu Dong, Li Quanwu, Li Zhipeng, Sun Lemei

(CNPC Jichai Power Co., Ltd., Shandong Jinan 250306)

Abstract: A new type of dual fuel engine control system was installed in a six cylinder multi-point injection marine dual fuel engine to conduct application research. The propulsion characteristics test under both pure diesel and dual fuel mode was carried out to test the performance of the control system. The application results showed that with the new control system, the marine dual fuel engine achieved stable operation, the performance indexes met with the design requirements. Under the rated condition, the LNG replacement rate could reach more than 70%; the soot emission is 1.90 FSN under diesel mode, and is 0.13 FSN under dual fuel mode. The effect of energy saving and emission reduction is obvious.

Key words: dual fuel engine; control system; replacement rate; test

0 引 言

某六缸多点喷射船用双燃料发动机采用了清洁能源 LNG, 降低了排放, 符合节能减排、绿色环保的发展要求^[1]。

在该船用双燃料发动机上应用了一种新型双燃料发动机控制系统, 为测试这种控制系统的性能, 进行了纯柴油和双燃料两种工作模式的推进特性试验, 并通过对控制系统的优化标定, 提高了发动机的性能。

1 控制系统的组成与功能

该新型双燃料发动机控制系统主要由发动机状

态管理模块、开关量处理模块、模拟量处理模块、曲轴和凸轮轴管理模块、燃气喷射控制模块、燃油喷射控制模块、故障诊断模块、数据通讯模块、数据标定管理模块等几部分组成。

当发动机处于不同的运行状态时, 应采用不同的控制策略, 如图 1 所示。在发动机状态管理模块中, 根据发动机转速、发动机状态标志位等信息确定发动机的状态。

开关量处理模块进行外部开关量输入的采集和处理, 以明确外部开关的状态。该模块同时也对已配置为开关量输出的单片机 I/O 端口进行管理, 输出开关量信号给安保控制器。

模拟量处理模块将单片机 A/D 模块转换得到的数字量转换为具有实际意义的物理量；对采集到的数字量进行滤波处理。

曲轴和凸轮轴管理模块进行转速计算，提供瞬时转速和平均转速；该模块同时采集上止点信号，配合曲轴转速传感器信号，进行燃气喷射正时的计算。

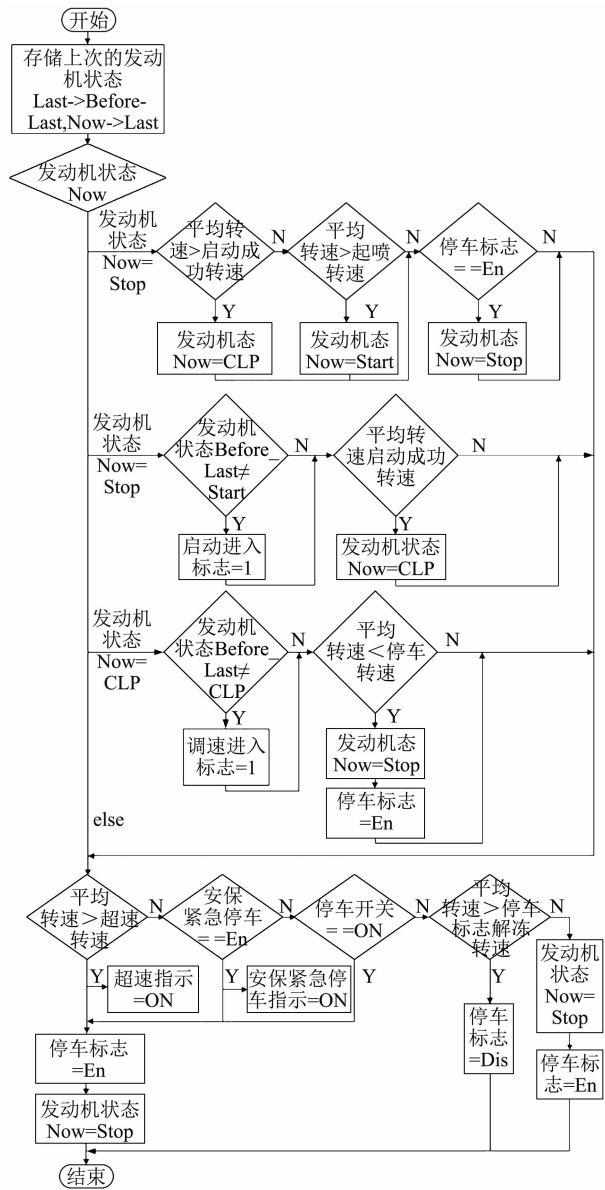


图 1 控制策略

燃气喷射控制模块在转速信号处理的基础上，根据燃气喷射正时和燃气喷射量对燃气喷射阀进行控制。燃气喷射控制采用开环控制的方法，在每缸进气冲程上止点前某个齿开始读取预先标定好的喷射脉宽，该值是根据发动机转速和负荷由试验标定得到；负荷的大小由齿条位移表示。同时，须检测

排气温度和冷却水温度是否达到双燃料发动机的限制值。如达到，则须减小当前的喷射脉宽，直至回到正常范围。当气源不是十分充足时，可根据燃气压力，适当增大喷射脉宽，但最大喷射脉宽不能超过各个转速下的限制值。

2 控制系统参数设置

2.1 凸轮上升沿对应曲轴齿号确定

2.1.1 确定 1 缸排气冲程上止点位置

打开气缸盖上罩壳，一边盘车一边观察排气门位置，当排气门关闭且指针指在飞轮 0 刻线时，即为 1 缸排气冲程上止点位置。

2.1.2 确定 0 号齿信号位置

定时盘上有一个凸齿，用霍尔传感器测量定时盘，用万用表测量霍尔传感器的输出电压。霍尔传感器输出为高低电平。

霍尔传感器遇到定时盘上的凸齿之前，输出电压一直是 5 V；当遇到凸齿时，输出电压变为 0；远离凸齿后，输出电压又变为 5 V。通过盘车，找到电压从 0 变到 5 V 的临界点。由 0 变为 5 V 的过程中，飞轮转了 26 °CA（由 5 V 变为 0 的过程中，飞轮也转 26 °CA）。1 缸排气冲程上止点的位置正好是霍尔传感器测到凸齿的这段时间的中间时刻，即电压为 0 的这段时间的中间时刻。

2.1.3 设定凸轮上升沿对应曲轴齿号

该双燃料发动机的飞轮齿圈共有 170 个齿。1 缸排气冲程上止点对应飞轮上的 0 刻线，即对应 0 号齿。计算电压从 0 变到 5 V 的临界点对应的曲轴齿号：

$$170 \div 360^{\circ} \times 26^{\circ} = 12.27 \text{ (齿)}$$

设定凸轮上升沿曲轴齿号为 12。

2.2 设置各缸排气冲程上止点对应齿号

计算 2 缸排气冲程上止点对应齿号：

$$170 \times 2 \div 6 = 56.67 \text{ (齿)}$$

2 缸排气冲程上止点对应 56 号齿。各缸排气冲程上止点对应齿号如表 1 所示。

表 1 各缸排气冲程上止点对应齿号

缸号	齿号
1	0 (340)
2	56
3	113
4	170
5	226
6	283

3 控制系统标定

图 2 所示 MAP 图用来调整燃气阀的开度。其中 X 轴表示转速； Y 轴表示负荷比例；中间区域（ Z 轴）为油门齿条位置，单位为 mm。 Y 轴中“0”行表示空负荷比例，“5”行表示切出负荷比例，“20”行表示目标负荷比例，“25”行表示切入负荷比例，“100”行表示满负荷比例。

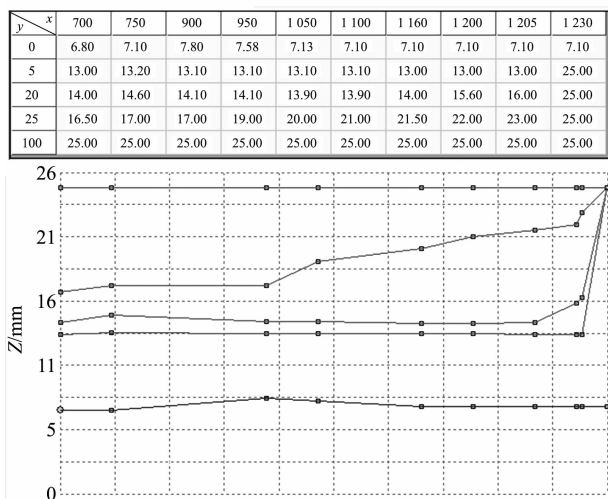


图 2 MAP 图

“25”行为切入双燃料模式限制线，当油门齿条位置值大于此值时，切入双燃料模式。如：750 ($r \cdot \min^{-1}$) 时，油门齿条位置值大于 17.00 时，进入双燃料模式。标定“25”行时，参考纯柴油模式下推进特性试验测得的各工况点的油门齿条位置，见表 2。“25”行数据标定比表 2 中相应的油门齿条位置数值小 1 mm 左右即可。如 756 ($r \cdot \min^{-1}$)，100 kW 时，油门齿条位置为 18.5 mm，以此为依据，标定 750 ($r \cdot \min^{-1}$)、“25”行的值为 17.00，即比 18.5 mm 小 1 mm 左右。标定“5”行时，比“20”行小 1 mm 左右即可。

表 2 纯柴油模式推进特性试验数据

序号	转速/ ($r \cdot \min^{-1}$)	功率/kW	油门齿条位置/mm
1	756	100	18.5
2	952	200	20.2
3	1 090	300	22.5
4	1 159	360	23.7
5	1 200	400	23.9

4 控制系统调试

4.1 燃气替代率试验调试

在替代率试验中，主要调“20”行，即油门齿条位置。若要增大替代率，则调小“20”行相应的值，也即多供气、少供油，减小油门齿条位置。在某一个工况点，逐渐调小“20”行的值，图 2 中 750 ($r \cdot \min^{-1}$) 对应的 14.60 即是按照这一原则得到。具体调试过程如下：根据经验填入 15，计算替代率，如没有达到要求，改为 14.80（一次减小 0.20），再计算替代率，如还没达到要求，改为 14.60，达到替代率要求，这一个工况点的数值就调好了。

例如，该双燃料发动机在标定工况（1 200 ($r \cdot \min^{-1}$)、400 kW）时，纯柴油模式下油耗率为 217.0 ($g \cdot kW^{-1} \cdot h^{-1}$)，替代率 71.8%，计算双燃料模式下的目标油耗率：

$$217.0 \times (1 - 71.8\%) = 61.2 (g \cdot kW^{-1} \cdot h^{-1})$$

随时观测台架上测得的油耗率，纯柴油模式下油耗率为 217.0 ($g \cdot kW^{-1} \cdot h^{-1}$)，切换到双燃料模式时的油耗率，若大于 61.2 ($g \cdot kW^{-1} \cdot h^{-1}$)，则须调整 MAP 图，直到油耗率等于 61.2 ($g \cdot kW^{-1} \cdot h^{-1}$)，则该工况点的 MAP 图调好，目标替代率达到。

4.2 单缸燃气修正

如某一缸排温高于或低于其他缸，则须进行单缸修正。修正目标是各缸排温差小于 30 °C。如图 3 所示， x 表示转速， y 表示缸号， z 表示喷气时长。例如，1 100 ($r \cdot \min^{-1}$) 时，1 缸排温较低，为 270 °C；其他缸排温在 310 °C 左右。此时将图中 $Z=1 200$ ，改为 1 250，一次改动量为 50 或 100，调至各缸排温差小于 30 °C 即可。

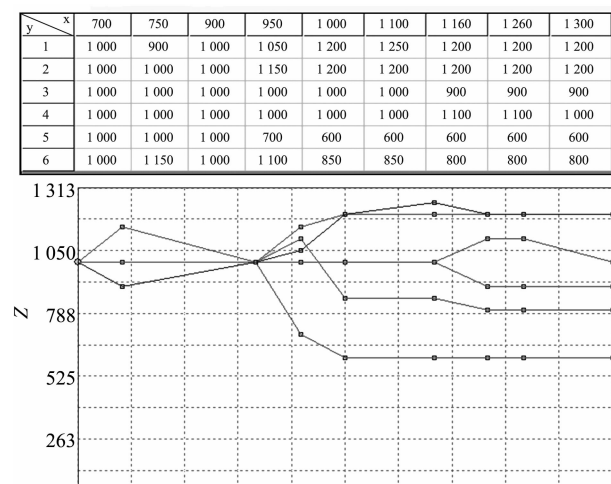


图 3 单缸燃气修正

5 控制系统应用试验

在船用双燃料发动机上进行该控制系统的应用

试验。该机标定转速为 $1\,200\ (\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$ ，标定功率为 $400\ \text{kW}$ 。

5.1 试验方法

船用双燃料发动机分别在纯柴油模式和双燃料模式按表 3 程序进行推进特性试验^[2]。

表 3 推进特性试验程序

序号	转速/ $(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	功率/ kW
1	756	100
2	952	200
3	1\,090	300
4	1\,159	360
5	1\,200	400

测量数据包括：油耗率、气耗率、替代率、烟度、最高燃烧压力、中冷后气压、涡轮前平均排温 and 增压器转速等。

5.2 试验结果及分析

根据推进特性试验数据绘制推进特性曲线，纯柴油模式的推进特性曲线如图 4 所示，双燃料模式的推进特性曲线如图 5 所示。

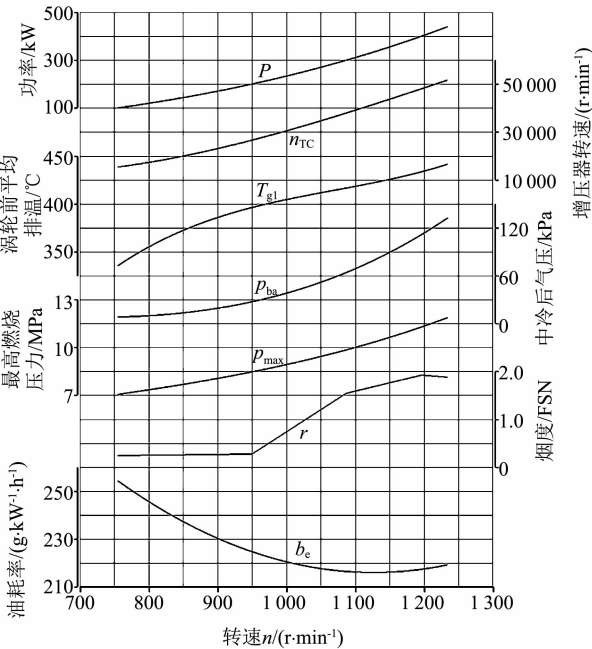


图 4 纯柴油模式下的推进特性曲线

试验结果表明：采用所研发的控制系统该六缸多点喷射船用双燃料发动机按推进特性运行时，发动机运行平稳，各项性能指标均达到或优于设计

要求。标定工况时：替代率大于 70%；纯柴油模式下烟度为 $1.90\ \text{FSN}$ ，双燃料模式下烟度为 $0.13\ \text{FSN}$ ，降低了 93%，节能减排效果明显^[3]。

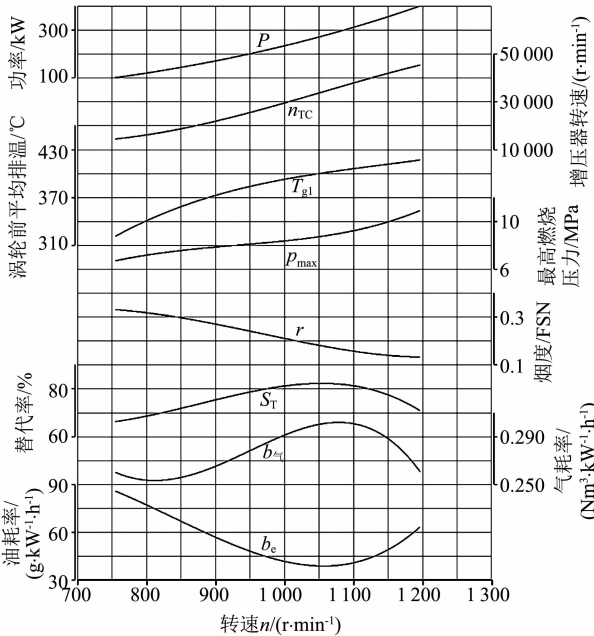


图 5 双燃料模式下的推进特性曲线

6 结 论

经六缸多点喷射船用双燃料发动机的应用试验，该双燃料发动机控制系统在船机上得以应用。用柴油/LNG 双燃料代替纯柴油，可以显著减少污染物排放，符合节约能源、降低排放的环保要求，而且满足 CCS 要求。标定工况下替代率大于 70%，经济效益非常可观。

参考文献

[1] 李克, 杨铁皂, 徐斌, 等. 天然气/柴油双燃料发动机研发现状及发展 [J]. 河南科技大学学报 (自然科学版), 2004, 25 (2): 28-32.

[2] 万德玉, 李树生. 柴油机试验测试与分析实用手册 [M]. 北京: 学苑出版社, 2000.

[3] PAPAGIANNAKIS R G, RAKOPOULOS C D, HOUNTALAS D T, et al. Emission characteristics of high speed, dual fuel, compression ignition engine operating in a wide range of natural gas/diesel fuel proportions [J]. Fuel, 2010, 89: 1397-1406.