

甲醇柴油双燃料发动机甲醇掺烧比例的正交试验研究

王利军, 宋睿智, 邹洪波, 刘圣华, 李彧
(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 在一台 TY1100 单缸柴油机的进气管上安装了一套电控甲醇喷射装置, 采用柴油引燃甲醇双燃料工作模式, 开展了甲醇柴油双燃料发动机进气预混甲醇掺烧比例的正交试验, 对能耗及排放约束条件下的甲醇掺烧比例进行了研究. 结果表明: 在正交试验范围内各种工况下, 发动机按最低能耗率要求得到的最佳甲醇掺烧比例为 55%~60%; 以降低烟度为需求目标, 并以一定的能耗率作为约束时, 大部分工况下得到的最佳甲醇掺烧比例为 50% 以上, 受发动机压力升高率的限制, 掺烧比例不宜超过 70%.

关键词: 柴油机; 甲醇掺烧比例; 正交试验

中图分类号: TK42 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2007)11-1284-04

Orthogonal Test on Intake Methanol Ratio of Methanol/Diesel Dual Fuel Engine

Wang Lijun, Song Ruizhi, Zou Hongbo, Liu Shenghua, Li Yu
(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A TY1100 diesel engine was retrofitted with an electronic-controlled methanol injection system so that it can work with dual fuel, i. e., the methanol-air mixture can be ignited by pilot diesel. The orthogonal tests were conducted to investigate the effects of intake methanol ratio on energy consumption and emissions. The results show that the optimal methanol ratio was 55%-60% for achieving the minimum energy consumption under different operating conditions. The ratio over 50% could lead to the reduction of the smoke. Because of the limitation of pressure rise rate, the methanol ratio should be less than 70%.

Keywords: diesel engine; methanol ratio; orthogonal test

柴油机以其优越的动力性、经济性和耐久性而得到广泛的应用, 但减少其较高的 NO_x 和碳烟排放需要复杂的电子控制和后处理技术, 又制约着它的发展. 有关研究表明, 柴油机掺烧一定比例的甲醇, 可以同时降低 NO_x 和碳烟排放, 其经济性和动力性也有所改善.

在柴油机上燃用甲醇主要有以下 3 种方式: 甲醇与柴油混合; 甲醇与柴油缸内双喷射; 甲醇进气管低压喷射、柴油缸内引燃双燃料燃烧方式. 采用甲醇与柴油混合燃烧时, 由于甲醇的物性与柴油的相差较大, 二者互溶难度较大, 需要较多的助溶剂, 这会

使燃料价格提高. 采用双喷射系统, 需在一个缸盖上安装 2 套喷油器, 控制、制造难度大, 费用高. 因此, 采用第 3 种燃烧方式可以避免上述缺陷, 且根据工况变化可在线改变甲醇的掺烧比例, 同时发动机可以方便地进行双燃料与纯柴油工作方式的切换, 但这方面的研究还仅限于不同掺烧率下或不同引燃油量下一些性能参数的对比分析^[1-6], 尚未对不同工况下最佳甲醇掺烧比例作出过优化. 为此, 本文采用进气管电控喷射供醇方式, 在 TY1100 柴油机上进行了掺烧甲醇的正交试验, 对不同工况下甲醇的掺烧比例进行了优化.

1 试验条件和方法

试验用发动机为 TY-1100 型柴油机(立式、单缸、四冲程、强制水冷),主要性能和结构参数如下:缸径为 100 mm;活塞行程为 115 mm,燃烧室型式为 ω 型,压缩比 $\epsilon=18$;额定转速 $n=2300$ r/min,额定功率为 11 kW;活塞排量为 0.903 L. 为了实现甲醇进气管低压喷射,需在原机的进气管靠近缸盖处,加装一套电控甲醇喷射装置,此装置可以根据发动机的转速和负荷将一定量的甲醇喷入进气管中,随进气进入气缸形成均匀混合气,作为引燃燃料的柴油由原供油系统供给,供油提前角为 21° ,在上止点前喷入缸内,将甲醇空气均匀混合气引燃. 试验燃料为 0# 柴油和 1 级工业甲醇.

试验中控制的变量有发动机转速、甲醇掺烧比例及负荷. 试验按三因素二次正交回归旋转组合方法进行,主要测量了各次试验的燃料消耗量、烟度及排气温度等. 为了便于不同甲醇掺比之间双燃料发动机热效率的对比,将各工况下的燃料消耗量换算成了能量消耗率. 对于评价指标,本文选择了能耗率 E_e 及烟度 R_B ,其单位分别为 MJ/(kW·h)和 m^{-1} .

甲醇掺烧比例定义如下

$$\omega = \frac{b_M}{b_M + b_D}$$

式中: b_M 、 b_D 分别是甲醇、柴油的消耗率.

2 柴油机掺烧甲醇的正交试验及计算分析

根据二次正交旋转组合设计的方法,试验中各因素的编码分别见表 1.

按三因素二次正交回归旋转组合试验安排进行试验,试验安排及试验结果如表 2 所示.

表 1 各因素编码表

x_j	因素		
	转速 $n/\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$	甲醇掺烧比例 $\omega/\%$	负荷 $b_{\text{mep}}/\text{MPa}$
1.682	2 000	70.0	0.64
1	1 838	61.9	0.58
0	1 600	50.0	0.48
-1	1 362	38.1	0.38
-1.682	1 200	30.0	0.32

注: x_j 表示因子编码值.

试验结果按二次正交回归旋转组合设计的回归分析计算方法进行分析计算,得到能耗率 E_e 及烟度

R_B 随转速、甲醇掺烧比例及负荷变化的二次回归方程分别为

$$\begin{aligned} \hat{y}_{E_e} = & 9.577\,33 - 0.003\,77x_1 - 0.004\,88x_2 - \\ & 0.573\,60x_3 + 0.014\,57x_1x_2 - 0.330\,88x_1x_3 - \\ & 0.033\,74x_2x_3 + 0.255\,95x_1^2 + \\ & 0.296\,18x_2^2 + 0.477\,74x_3^2 \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \hat{y}_{R_B} = & 0.247\,79 + 0.052\,72x_1 - 0.075\,22x_2 - \\ & 0.004\,52x_3 - 0.031\,25x_1x_2 - 0.026\,25x_1x_3 - \\ & 0.038\,75x_2x_3 + 0.023\,22x_1^2 - \\ & 0.001\,70x_2^2 - 0.001\,70x_3^2 \end{aligned} \quad (2)$$

式中: x_1 、 x_2 、 x_3 分别是发动机转速、甲醇掺烧比例、负荷的编码值,其取值范围均为 $[-1.682, 1.682]$.

对各回归方程进行显著性检验,计算结果见表 3. 由表 3 可知,式(1)和式(2)满足

$$F_{E_e,1} < F_{0.05}(5,8) = 3.69$$

$$F_{R_B,1} < F_{0.05}(5,8) = 3.69$$

$$F_{E_e,2} > F_{0.05}(9,13) = 2.71$$

$$F_{R_B,2} > F_{0.05}(9,13) = 2.71$$

可见,2 个回归方程都拟合得很好,可用于柴油机掺烧甲醇的性能分析.

在式(1)、式(2)中,各变量是按二次正交旋转组合设计的方法进行归一化变换后得到的,且具有相同的取值范围,因此式中各项系数的绝对值大小就直接反映了各因子对各指标的影响程度. 由式(1)可知,对能耗率影响最大的是负荷. 由式(2)可以看到,甲醇掺烧比例对烟度影响较大. 将式(1)、式(2)转换成各变量的实际取值范围,可得下式

$$\begin{aligned} \hat{y}_{E_e} = & 705.232\,3 - 0.182\,0n - 4.796\,1\omega - \\ & 749.222\,3b_{\text{mep}} + 0.121\,3 \times 10^{-3}n\omega - \\ & 0.344\,2nb_{\text{mep}} - 0.702\,1\omega b_{\text{mep}} + \\ & 0.106\,5 \times 10^{-3}n^2 + 0.492\,9 \times 10^{-1}\omega^2 + \\ & 1\,242.914\,4b_{\text{mep}}^2 \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \hat{y}_{R_B} = & -1.388\,1 + 0.175\,6 \times 10^{-4}n + \\ & 0.290\,1 \times 10^{-1}\omega + 3.703\,5b_{\text{mep}} - \\ & 0.110\,5 \times 10^{-4}n\omega - 0.116\,1 \times 10^{-2}nb_{\text{mep}} - \\ & 0.342\,7 \times 10^{-1}\omega b_{\text{mep}} + 0.410\,6 \times 10^{-6}n^2 - \\ & 0.120\,3 \times 10^{-4}\omega^2 - 0.188\,0b_{\text{mep}}^2 \end{aligned} \quad (4)$$

式中: $n \in [1\,200, 2\,000]$; $\omega \in [30, 70]$; $b_{\text{mep}} \in [0.32, 0.64]$.

表2 二次回归正交试验安排及试验结果

试验号	x_0	x_1	x_2	x_3	$E_e/\text{MJ} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$	R_B/m^{-1}
1	1	1	1	1	9.571	0.16
2	1	1	1	-1	12.094	0.30
3	1	1	-1	1	9.625	0.40
4	1	1	-1	-1	11.679	0.48
5	1	-1	1	1	10.354	0.14
6	1	-1	1	-1	11.220	0.27
7	1	-1	-1	1	10.132	0.35
8	1	-1	-1	-1	11.196	0.23
9	1	-1.682	0	0	10.173	0.17
10	1	1.682	0	0	10.103	0.39
11	1	0	-1.682	0	10.451	0.34
12	1	0	1.682	0	10.050	0.08
13	1	0	0	-1.682	11.156	0.16
14	1	0	0	1.682	10.366	0.26
15	1	0	0	0	10.173	0.17
16	1	0	0	0	9.756	0.25
17	1	0	0	0	10.005	0.30
18	1	0	0	0	9.601	0.32
19	1	0	0	0	9.382	0.19
20	1	0	0	0	9.330	0.30
21	1	0	0	0	9.152	0.26
22	1	0	0	0	9.356	0.16
23	1	0	0	0	9.420	0.29

3 甲醇掺烧比例优化

本文采用了功效函数与线性加权相结合的优化方法. 利用式(3)、式(4), 以能耗率、烟度为目标函数对甲醇掺烧比例进行优化. 为了把多目标优化转化为简单的单目标优化, 取能耗率及烟度的线性加权和作为单一的优化目标函数, 即取目标函数为

$$y = \alpha \hat{y}_{E_e} + \beta \hat{y}_{R_B}$$

式中: α 、 β 为加权系数. 根据不同的目的需求, 可选择不同的 α 、 β , 这样可得到不同的随工况变化的优化甲醇掺烧比例脉谱图.

由于 $\hat{y}_{E_e}$ 、 $\hat{y}_{R_B}$ 具有不同的量纲, 且不属于同一数量级, 若直接以 $y = \alpha \hat{y}_{E_e} + \beta \hat{y}_{R_B}$ 作为目标函数, 则 α 、 β 并不能直观反映不同评价指标在整个多目标问题中的重要程度. 因此, 参考功效系数法, 通过引入一个功效函数, 以协调多个目标间的量级关系. 在这里, 采用常用的线性功效函数, 各评价指标的功效函数为

$$\hat{y}'_{E_e} = \frac{\hat{y}_{E_e} - \min(\hat{y}_{E_e})}{\max(\hat{y}_{E_e}) - \min(\hat{y}_{E_e})}$$

$$\hat{y}'_{R_B} = \frac{\hat{y}_{R_B} - \min(\hat{y}_{R_B})}{\max(\hat{y}_{R_B}) - \min(\hat{y}_{R_B})}$$

这样, $\hat{y}'_{E_e}$ 、 $\hat{y}'_{R_B}$ 转化成取值范围都是 $[0, 1]$ 的归一化量.

功效函数的线性加权为

$$y = \alpha \hat{y}'_{E_e} + \beta \hat{y}'_{R_B}$$

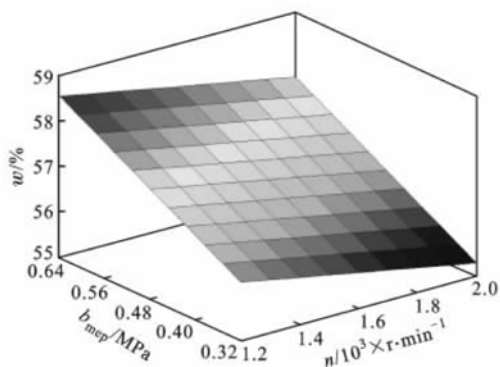
以其作为评价函数, 不同 α 、 β 就直观地反映了不同指标所具有的重要程度.

表3 显著性检验计算结果

$S_{E_e, T}/\text{MJ} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$	14.030	$S_{E_e, e}/\text{MJ} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$	0.923
$f_{E_e, T}$	22	$f_{E_e, e}$	8
$S_{R_B, T}/\text{m}^{-1}$	0.208	$S_{R_B, e}/\text{m}^{-1}$	0.030
$f_{R_B, T}$	22	$f_{R_B, e}$	8
$S_{E_e, E}/\text{MJ} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$	2.585	$S_{E_e, Lf}/\text{MJ} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$	1.661
$f_{E_e, E}$	13	$f_{E_e, Lf}$	5
$S_{R_B, E}/\text{m}^{-1}$	0.058	$S_{R_B, Lf}/\text{m}^{-1}$	0.028
$f_{R_B, E}$	13	$f_{R_B, Lf}$	5
$S_{E_e, R}/\text{MJ} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$	11.445	统计量 $F_{E_e, 1}$	2.879
$f_{E_e, R}$	9	统计量 $F_{R_B, 1}$	1.493
$S_{R_B, R}/\text{m}^{-1}$	0.150	统计量 $F_{E_e, 2}$	6.395
$f_{R_B, R}$	9	统计量 $F_{R_B, 2}$	3.736

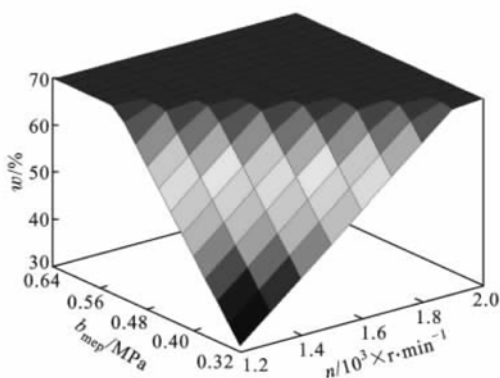
注: $F_{E_e, 1} = (S_{E_e, Lf}/f_{E_e, Lf})/(S_{E_e, e}/f_{E_e, e})$; $F_{R_B, 1} = (S_{R_B, Lf}/f_{R_B, Lf})/(S_{R_B, e}/f_{R_B, e})$; $F_{E_e, 2} = (S_{E_e, R}/f_{E_e, R})/(S_{E_e, E}/f_{E_e, E})$; $F_{R_B, 2} = (S_{R_B, R}/f_{R_B, R})/(S_{R_B, E}/f_{R_B, E})$; $S_{E_e, T}$ 、 $f_{E_e, T}$ 表示能耗率的总偏差平方和及其自由度; $S_{R_B, T}$ 、 $f_{R_B, T}$ 表示烟度的总偏差平方和及其自由度; $S_{E_e, E}$ 、 $f_{E_e, E}$ 表示能耗率的剩余平方和及其自由度; $S_{R_B, E}$ 、 $f_{R_B, E}$ 表示烟度的剩余平方和及其自由度; $S_{E_e, R}$ 、 $f_{E_e, R}$ 表示能耗率的回归平方和及其自由度; $S_{R_B, R}$ 、 $f_{R_B, R}$ 表示烟度的回归平方和及其自由度; $S_{E_e, e}$ 、 $f_{E_e, e}$ 表示能耗率的误差平方和及其自由度; $S_{R_B, e}$ 、 $f_{R_B, e}$ 表示烟度的误差平方和及其自由度; $S_{E_e, Lf}$ 、 $f_{E_e, Lf}$ 表示能耗率的失拟平方和及其自由度; $S_{R_B, Lf}$ 、 $f_{R_B, Lf}$ 表示烟度的失拟平方和及其自由度.

当发动机长时间以稳定工况运行时, 应使发动机按最低能耗的运行方式运行, 这时可取 $\alpha = 1$ 、 $\beta = 0$, 得到如图1所示的甲醇掺烧比例脉谱图. 由图1可以看出, 以能耗率为目标函数进行优化时, 甲醇掺烧比例随不同工况的变化范围为 55%~60%. 当转速一定时, 甲醇掺烧比例随着负荷的增加而增大, 这是因为在低负荷掺烧甲醇时, 甲醇掺烧比例对发动机滞燃期影响较大, 为了使燃烧放热集中于上止点附近, 此时采用较小的甲醇掺烧比例较为合适; 当负荷增大时, 甲醇掺烧比例增大, 滞燃期延长, 同时缸内温度随着负荷增大而升高, 在一定程度上削弱了甲醇对滞燃期的影响, 确保了发动机高的循环热效率; 对同一种负荷, 最佳甲醇掺烧比例随着转速的增大而有所减小, 这是由于随着转速的增大, 缸内温

图1 $\alpha=1, \beta=0$ 时甲醇掺烧比例脉谱图

度升高,但缸内温度对滞燃期的影响小于甲醇对滞燃期的影响。

当发动机按急加速等复杂工况频繁运行时,为减少碳烟排放,可取 $\alpha < \beta$, 本文取 $\alpha=0.3, \beta=0.7$, 同时又不希望能耗率高于原柴油机,需加上一个约束条件 $\hat{y}_{E_e} \leq y_{E_e,D}$, 由此得到的甲醇掺烧比例脉谱图如图2所示。

图2 $\alpha=0.3, \beta=0.7$ 时甲醇掺烧比例脉谱图

从图2中可以看出,在以降低烟度为主要目标时,甲醇掺烧比例随着转速的升高和负荷的增加均是增大的。在整个工况范围内,除在低转速、低负荷区域甲醇掺烧比例较小外,其他大部分工况掺烧比例均在50%以上,特别是在高转速、大负荷区域,甲醇掺烧比例可达到70%。这是因为甲醇不含有C—C链,燃烧过程不会产生碳烟,但受发动机压力升高率的限制^[2],掺烧比例不宜超过70%。

4 结 论

(1)采用甲醇进气管低压喷射、柴油缸内引燃的方式在TY1100柴油机上进行了掺烧甲醇的正交试验,试验结果的回归分析表明:在所考虑的因素当

中,负荷对能耗率的影响最大,而对烟度影响最大的因素是甲醇掺烧比例。

(2)按不同的需求目的进行优化,得到了不同工况下优化的甲醇掺烧比例脉谱图。当以能耗率最低为优化目标时,在正交试验工况范围内,得到的最佳甲醇掺烧比例为55%~60%;当以降低烟度为主要目标,并以一定的能耗率作为约束条件时,大部分工况的掺烧比例均在50%以上,但受发动机压力升高率的限制,掺烧比例不宜超过70%。

参考文献:

- [1] 姚春德,段峰,李云强,等. 柴油/甲醇组合燃烧发动机的燃烧特性和排放特性[J]. 燃烧科学与技术, 2005, 11(3):214-217.
Yao Chunde, Duan Feng, Li Yunqiang, et al. Combustions characteristics and emissions of the compound combustion of the diesel engine[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2005, 11(3): 214-217.
- [2] 王利军,刘圣华,邹洪波,等. 高比例甲醇柴油双燃料发动机燃烧与排放特性的研究[J]. 西安交通大学学报, 2007, 41(1):14-17.
Wang Lijun, Liu Shenghua, Zou Hongbo, et al. Study on combustion and emission characteristics of a DI Engine operating on high proportion of methanol-diesel dual fuel[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2007, 41(1):14-17.
- [3] 王利军,邹洪波,宋睿智,等. 引燃油量对甲醇柴油双燃料发动机燃烧特性的影响[J]. 西安交通大学学报, 2007, 41(5):517-520.
Wang Lijun, Zou Hongbo, Song Ruizhi, et al. Effect of pilot fuel quantity on combustion characteristics of a methanol-diesel dual fuel engine[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2007, 41(5):517-520.
- [4] Shi Shaoxi, Fu Maolin, Zhang Dexian. An investigation of burning methanol as alternative fuel by dual fuelling method in compression ignition engine[C]//Shi Shaoxi. The Articles of Professor Shi Shaoxi. Tianjin: Tianjin University Press, 1996:463-476.
- [5] Ramadan B H, Hamady F J, Gray C L, et al. Numerical evaluation of a methanol fueled directly-injected engine[J]. SAE Transactions, 2002, 111(4): 1264-1273.
- [6] Holt D J. Alternative diesel fuels[M]. Warrendale, USA:SAE Inc., 2004:21-32.

(编辑 王焕雪)