

双燃料发动机速度特性数学模型的研究^{*}

张军昌, 李占锋, 师帅兵, 韩文霆

(西北农林科技大学 机械与电子工程学院, 陕西 杨凌 712100)

[摘 要] 采用回归分析方法对双燃料发动机速度特性试验结果进行分析, 建立了功率、扭矩与转速间的数学模型, 模型决定系数(R^2)均达到 0.99 以上。并对模型进行了数学分析, 获得了功率和扭矩的变化速率、最大功率及其置信区间、扭矩的拐点及最速下降区间等结果。最后通过实例分析讨论了模型的应用。

[关键词] 双燃料发动机; 速度特性; 回归分析; 数学模型

[中图分类号] TK46⁺4

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2004)01-0096-03

能源危机和环境污染是人类面临的两个重大问题, 机械化的发展和汽车等燃油机具的普及使开发车用燃油的替代燃料日益紧迫, 目前发展较快的代用燃料有天然气和液化石油气(LPG)。研究表明^[1], 燃用天然气或 LPG 的双燃料发动机的污染物排放较少, 且经济性较好, 但动力性能有所下降。在动力性能的试验研究中, 通常是通过速度特性试验, 采集不同转速下发动机功率、扭矩的数据, 绘制动力性能的散点连线图(速度特性曲线)来直观地说明发动机的动力性能^[2]。然而, 这种发动机动力性能的分析方

法比较繁琐, 难以实现定量分析。本研究针对采集到的功率、扭矩和转速数据采用回归分析方法建立模型^[3], 以期丰富双燃料发动机性能试验的分析方法。

1 数据特性与数学模型的建立

在发动机速度特性试验中, 通常是在不改变压缩比和点火提前角的前提下, 获得不同转速时功率和扭矩的数据。以往的试验研究表明(表 1^[4]): 开始时 P_e 随着 n 的增加而上升, 当 n 增加到一定程度后又下降; 而 M_e 随着 n 的增加呈倒“S”型单调下降。

表 1 双燃料发动机 34% 节气门开度时的功率和扭矩^[4]

Table 1 The dual-fuel engine's power and torque on 34% load

转速/ (r · min ⁻¹) Rev	功率/kW Power		扭矩/(N · m) Torque	
	汽油 Gasoline	LPG	汽油 Gasoline	LPG
1 200	26.5	22.9	210.6	182.5
1 400	29.3	25.7	200.1	175.5
1 600	31.8	27.9	189.5	166.7
1 800	33.1	29.8	175.5	157.9
2 000	33.4	30.5	159.6	145.6
2 200	33.1	30.7	143.7	133.4
2 400	31.8	30.4	126.3	121.0

经分析研究, P_e 与 n 的关系宜采用二次抛物线模型:

$$P_e = an^2 + bn + c_0 \quad (a < 0) \quad (1)$$

M_e 与 n 的关系宜采用倒逻辑斯蒂(倒 Logistic)模型:

$$M_e = \frac{B}{1 + Ae^{rno}} \quad (A, B, r > 0) \quad (2)$$

这些模型与实验数据拟合很好。

2 模型分析

2.1 模型(1)的分析

模型 $P_e = an^2 + bn + c$ 是通过 $x_1 = n, x_2 = n^2$ 经多项式回归得到的。由于 $a < 0$, P_e 的最大值及所对

应的转速分别为 $P_{e\max} = \frac{4ac - b^2}{4a}$, $n_m = -\frac{b}{2a}$ 。 (3)

* [收稿日期] 2003-02-26

[作者简介] 张军昌(1972-), 男, 甘肃通渭人, 在读硕士, 主要从事汽车拖拉机性能研究。

$$\text{令 } X = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix}, \bar{X} = \begin{bmatrix} \bar{X}_1 \\ \bar{X}_2 \end{bmatrix}, X_m = \begin{bmatrix} n_m \\ n_m^2 \end{bmatrix}。$$

L_{XX} 为 X 的离差阵, 则在 X_m 处 P_e 的观察值标准差为

$$S_{Pe} = \sqrt{\left[1 + \frac{1}{f} + (X_m + \bar{X})^T L_{XX}^{-1} (X_m - \bar{X}) \right] \hat{\sigma}_e^2}。 \quad (4)$$

P_e 的方差估计为

$$\hat{\sigma}_e^2 = \frac{1}{f-3} L_{pp} (1 - R^2)。 \quad (5)$$

其中, L_{pp} 为 P_e 观察值的偏差平方和, R^2 为决定系数, f 为样本容量。

在 n_m 处, P_e 观察值的 $(1 - \alpha) \times 100\%$ 置信区间为

$$[P_{e\max} - t_{\alpha} \cdot S_{Pe}, P_{e\max} + t_{\alpha} \cdot S_{Pe}], \quad (6)$$

t 分布的自由度为 $(f - 3)$, 由式(6)通过式(1)可计算出相应转速的范围。

2.2 模型(2)的分析

模型(2)的微分方程为

$$\frac{dM_e}{dn} = -M_e \left(\frac{M_e}{B} - 1 \right), \quad (B > 0, r > 0) \quad (7)$$

其中, B 为扭矩的上限。式(7)表明, $\frac{dM_e}{dn}$ 符合随 n 增大而下降的抛物线规律, 当 $M_e = 0$ 或 B 时, $\frac{dM_e}{dn} = 0$; 当 $M_e = \frac{B}{2}$ 时, $\frac{dM_e}{dn}$ 具有最小值 $-\frac{B \cdot r}{4}$ 。

令 $\frac{d^2 M_e}{dn^2} = 0$, 可得拐点的坐标

$$n_c = -\frac{1}{r} \ln A, M_{ec} = \frac{B}{2}。 \quad (8)$$

令 $\frac{d^3 M_e}{dn^3} = 0$, 可得 M_e 的最速下降区间为

$$\left[\frac{3 - \sqrt{3}}{6} B, \frac{3 + \sqrt{3}}{6} B \right], \quad (9)$$

其对应的转速区间为

$$\left[\frac{1}{r} \ln \frac{2 - \sqrt{3}}{A}, \frac{1}{r} \ln \frac{2 + \sqrt{3}}{A} \right]。 \quad (10)$$

3 实例分析

3.1 P_e 与 n 的关系及其分析结果

根据表1数据, 经拟合可知, 在燃用汽油情况下有

$$P_e = -0.00001086n^2 + 0.04358929n - 10.24047619, R^2 = 0.9982 (P < 0.01)。$$

最大功率与相应的转速分别为: $P_{e\max} = 33.5 \text{ kW}$; $n_m = 2006.9 \text{ r/min}$ 。

P_e 的方差及 n_m 处 P_e 的标准差分别为

$$\hat{\sigma}_e^2 = 0.0170, S_{Pe} = 0.1480。$$

在 n_m 处 P_e 的 99% 置信区间(kW) 为 [32.8, 33.88]; 相应的转速区间(r/min) 为 [1756.9, 2256.9]。

在燃LPG情况下有:

$$P_e = -0.00000830n^2 + 0.03616071n - 8.58571429, R^2 = 0.9987 (P < 0.01)。$$

最大功率与相应的转速分别为

$$P_{e\max} = 30.89 \text{ kW}, n_m = 2178.4 \text{ r/min}。$$

P_e 的方差及 n_m 处 P_e 的标准差分别为

$$\hat{\sigma}_e^2 = 0.0079, S_{Pe} = 0.1001。$$

在 n_m 处 P_e 的 99% 置信区间(kW) 为 [30.3, 31.3]; 相应的转速区间(r/min) 为 [1933.0, 2423.8]。

在试验条件下, 由以上分析可知:

1) 由于 n^2 项系数很小, 故 $\frac{dP_e}{dn}$ 近似等于 n 的系数。显然汽油 P_e 随 n 增大而增大的速率(0.0436) 大于LPG的 P_e 速率(0.0362), 表明燃用汽油的 P_e 随 n 的增大而增大的速度比燃用LPG快。

2) 燃用汽油的 $P_{e\max}$ (33.5 kW) 比燃用LPG的 $P_{e\max}$ (30.89 kW) 大, LPG相对于汽油来讲, 功率损失为 8.0%; 在最大功率下, 燃用汽油对应的转速 n_m (2006.9 r/min) 小于燃用LPG的 n_m (2178.4 r/min), 二者差为 171.5 r/min。表明在达到最大功率时, 汽油的转速超前 171.5 r/min, 说明燃用汽油时发动机的稳定性更好一些。

3) 从最大速率的置信区间及相应的转速区间看, 区间长短在两种燃料上基本相同(近似地为 1 kW 和 500 r/min), 然而, 汽油的转速下限为 1756.9 r/min, LPG为 1933.0 r/min, 燃用汽油时转速超前 176.1 r/min 进入最大功率区间。

3.2 M_e 与 n 的关系及其分析结果

(1) 在燃用汽油情况下有:

$$M_e = \frac{247.7}{1 + 0.0326e^{0.00141n}}, R^2 = 0.9998 (P < 0.01)。$$

其速率方程为 $\frac{dM_e}{dn} = 0.00141M_e \left(\frac{M_e}{247.7} - 1 \right)。$

当 $0 < M_e < 247.7 \text{ N} \cdot \text{m}$ 时, $\frac{dM_e}{dn} < 0$, 表明 M_e 随 n 增大而下降。当 $M_e = 123.8 \text{ N} \cdot \text{m}$ 时, M_e 随 n 增大而下降的速率最小值为 $-0.087 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{min/r}$ 。

M_e 随 n 下降的拐点坐标为 $n_c = 2428.0 \text{ r/min}$, $M_{ec} = 123.85 \text{ N} \cdot \text{m}$; M_e 随 n 下降的最速下

降区间($N \cdot m$)为[52 35, 195 4]; 对应的转速区间(r/min)为[1 494 0, 3 362 0]。

这表明, 当 M_e 降到 195 4 $N \cdot m$ 或转速上升到 1 494 0 r/min 时, M_e 进入最速下降区间, 功率开始快速上升。

(2) 在燃用 LPG 情况下有:

$$M_e = \frac{212.1}{1 + 0.0346e^{0.00129n}}, R^2 = 0.9996 (P < 0.01).$$

其速率方程为

$$\frac{dM_e}{dn} = 0.00129M_e \left(\frac{M_e}{212.1} - 1 \right).$$

当 $0 < M_e < 212.1 N \cdot m$ 时, $\frac{dM_e}{dn} < 0$, 表明 M_e 随 n 增加而下降。当 $M_e = 106.1 N \cdot m$ 时, M_e 随 n 增大而下降的速率最小值为 $-0.068 N \cdot m \cdot min/r$ 。

M_e 下降的拐点坐标为 $n_c = 2608.1 r/min$, $M_{ec} = 106.1 N \cdot m$; M_e 随 n 下降的最速下降区间($N \cdot m$)为[44 8, 167.3]; 对应的转速区间(r/min)为[1 587.3, 3 362.9]。

这表明, 在燃用 LPG 时, 当 $M_e = 167.8 N \cdot m$

或 $n = 1587.3 r/min$ 时, M_e 进入最速下降区间, 功率开始快速上升。

上述分析表明, 燃用汽油时 M_e 最速下降区间的上限(195 4 $N \cdot m$)比燃用 LPG 时(167.3 $N \cdot m$)大, 而燃用汽油相应的速率区间的下限(1 494 0 r/min)小于燃用 LPG(1 587.3 r/min), 相差 93 r/min 。因而, 燃用汽油在高扭矩低速率条件下功率优于燃用 LPG。

4 讨 论

在发动机速度特性试验分析中, 用 n , P_e 和 M_e 数据的连线图(速度特性曲线)与理论相结合而得出结论, 浪费了数据中的信息, 基本上属于定性分析方法。采用本文建立的数学模型分析方法, 可以获得 P_e 的速率、最大功率置信区间以及 M_e 的速率和最速下降区间等有用信息, 不但可以对各燃料进行定量的分析, 而且可以进行定量的比较分析, 从而有利于对发动机动力特性的深入了解, 为双燃料发动机的设计或改装提供有用的量化参数。

[参考文献]

- [1] 邱先文, 夏淑敏. 双燃料发动机的开发现状[J]. 农业机械学报, 2002, (2): 121-124
- [2] 武汉工学院, 河北工学院. 汽车拖拉机内燃机原理[M]. 北京: 中国农业机械出版社, 1981.
- [3] 袁志发, 周静芊. 多元统计分析[M]. 北京: 科学出版社, 2002
- [4] 赵新顺, 霍天强. LPG-汽油双燃料发动机试验研究[J]. 小型内燃机与摩托车, 2002, (3): 37-39

Study on the model of the velocity characteristics for dual-fuel engine

ZHANG Jun-chang, LI Zhan-feng, SHI Shua-i-bing, HAN Wen-ting

(College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: The regression analysis method was adopted to build mathematical models about the power and torque relative to rotation speed of dual-fuel engine based on velocity characteristic test results. The decisive coefficients of these models exceeded 0.99. Some technical parameters such as the variational rate of power and torque, the highest power and its confidence interval, the inflection point and its fastest descent zone of the torque were resulted from the analysis on the models. Finally, the applications of these models were put forward through case study.

Key words: dual-fuel engine; velocity characteristic; regression analysis; mathematical model