

内燃机可调参数对燃料经济性敏感性的研究

李炳军^① 朱秉兰 朱永达

(河南农业大学机电工程学院)

提 要 为提高投入运行使用的内燃机经济性,系统研究了影响内燃机燃料经济性的各项可调参数的敏感性,提出了敏感性系数的概念和计算式,建立了可操作的模型体系,运用模型对 X195 型内燃机的几个主要参数进行了敏感性分析,找出了不同参数的敏感特性及敏感性序列,进一步讨论了不同参数交互作用下对敏感性的影响;指出了内燃机设计改进及运用时应注意的问题。

关键词 内燃机 可调参数 燃料经济性 敏感性

Study on the Sensitivity of the Adjustable Parameters of Internal-combustion Engine to Fuel Economy

Li Bingjun Zhu Binglan Zhu Yongda

(Mechanical Electrical Engineering College of Henan Agricultural University)

Abstract The paper studies the sensitivity of the adjustable parameters of internal-combustion engine to fuel economy with test research and model calculation methods. Based on the concept of sensitivity, the mathematical models of internal-combustion engine fuel economy and their parameter sensitivities are established. Using these models, several parameter sensitivities to internal-combustion engine fuel economy are analyzed. The sensitive characters of effecting on fuel economy of different parameters and some adjustable parameter sensitivity orders are found, and the influence of cross rule in different parameters to sensitivity is analyzed. Some considerable matters in internal-combustion engine design, transformation and application are pointed out.

Key words Internal-combustion engine Adjustable parameter Fuel economy Sensitivity

1 引 言

为缓解有限石油资源与内燃机保有量不断增长的矛盾,提高内燃机燃料经济性问题成了人们极为关注的研究方向,世界各国都投入了大量研究力量,在提高热效率和提高机械效率两方面取得了许多可喜的进展。但迄今为止的研究,主要侧重于研制新的更好的机型,对已投入运行使用的内燃机经济性问题则重视不够,已有的一些研究也只是对某个或某几个影响因素作分析,缺少对各项影响因素作全面系统的分析。作者从实际应用的角度出发,在大量实验的基础上,系统研究了影响内燃机燃料经济性的各项可调参数的敏感性,提出敏感

收稿日期:1995—05—10

① 李炳军,博士生,郑州市文化路 河南农业大学机电工程学院,450002

性系数的概念和计算式,建立了一个可操作的模型体系,并以 X195 型柴油机为例作了实证分析,取得了满意的结果。

2 内燃机燃料经济性可调参数的数学模型

内燃机燃料经济性是内燃机主要特性之一,通常都用内燃机特性曲线来分析研究,但基于离散的采样点绘制特性曲线的传统方法,精度低,难以满足实际工作要求,因此,我们在微机上建立了一套能精确地反应各可调参数影响的数学模型。

2.1 原始数据的采集

从郑州第二柴油机厂成品库随机抽取 4 台相同规格的 X195 型柴油机作试验样机,按 GB3743—84 发动机性能试验方法,在台架上分别作下列各项试验:①负荷特性;②速度特性;③喷油压力调整特性;④供油提前角调整特性;⑤针阀升程调整特性;⑥气门间隙调整特性试验。各项试验完毕后,对所有试验机器相应试验项中等参数点所对应的标准大气压状况下的耗油率取平均值,作为各组试验数据(见表 1)

表 1 影响内燃机燃料经济性的主要可调参数试验结果

序号	参数	采 样 点									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	x_1	2	4	6	7	8	8.2	8.5	8.8	9	9.7
	g_e	423.9	295.8	262.1	254.3	249.6	249.3	249.5	251.6	258.3	259.8
2	x_2	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800	1900	2000
	g_e	276.5	268.1	264.7	262.5	262.1	261.7	261.3	260.3	256.1	251.6
3	x_3	10	12	14	15	16	18	19	20	22	24
	g_e	271.8	263.3	257.1	254.9	253.2	251.5	251.9	252.0	254.8	259.9
4	x_4	0.2	0.3	0.4	0.45	0.5	0.55	0.6	0.7	0.8	0.94
	g_e	255.7	253.1	250.4	249.0	249.0	250.4	250.4	251.7	252.4	255.8
5	x_5	0.2	0.3	0.35	0.4	0.45	0.5	0.55	0.6	0.7	0.8
	g_e	258.2	251.7	251.5	251.6	252.5	252.7	254.6	257.2	270.8	292.9
6	x_6	0.2	0.3	0.35	0.4	0.45	0.5	0.55	0.6	0.7	0.8
	g_e	255.8	252.4	251.6	251.5	251.8	252.8	253.7	254.7	260.1	268.1
7	x_7	80	90	100	110	120	125	130	135	140	160
	g_e	280.1	263.9	255.8	252.3	251.7	251.5	251.6	251.8	252.4	255.8

表中: x_1 —负荷/kW, x_2 —转速/r·min⁻¹, x_3 —供油提前角(°), x_4 —针阀升程/mm, x_5 —进气门间隙/mm, x_6 —排气门间隙/mm, x_7 —喷油压力/MPa, g_e —燃料消耗率/g(kW·h)⁻¹

2.2 建立模型

为了对内燃机的各种特性都能找出满意的数学模型,本文采用改变多项式的幂次,按多元线性回归进行拟合的方法,用相关指数 R^2 和剩余标准差 s 来作评价指标,用相邻两次回归方程的回归差方和之差的 F 检验的显著性,作为多项式拟合方程的合理幂次确定的评价准则。按上述原则,编制了一个专用软件,运用表 1 的试验数据进行多次运算比较后,得到一系列可调参数的调整特性数学模型。用 y 表示耗油率(g/kW·h),各模型为:

1) 负荷特性

$$y = 761.1333 - 248.9358x_1 + 48.30913x_1^2 - 4.380551x_1^3 + 0.1544688x_1^4$$

2) 速度特性

$$y = 343.3417 - 0.171767x_2 + 1.520058 \times 10^{-4}x_2^2 - 1.054866E \times 10^{-7}x_2^3 + 2.864431 \times 10^{-11}x_2^4$$

3) 供油提前角调整特性

$$y = 348.778 - 10.41211x_3 + 0.2812389x_3^2$$

4) 针阀升程调整特性

$$Y = 267.7951 - 72.35028x_4 + 76.38218x_4^2 - 6.950689x_4^3$$

5) (a) 进气门间隙调整特性

$$y = 270.9962 - 50.96657x_5 - 103.523x_5^2 + 252.1038x_5^3 + 0.8848738x_5^4$$

(b) 排气门间隙调整特性

$$y = 267.6819 - 69.02201x_6 + 59.39408x_6^2 + 35.76009x_6^3$$

6) 喷油压力调整特性

$$y = 729.7506 - 109.3674x_7 + 8.204859x_7^2 - 0.2014695x_7^3$$

各参数的最佳模型计算值与实测值比较表明,偏差均较小,所得数学模型是可用的,存在的相对误差远远小于试验所允许的误差范围。

3 敏感性分析

3.1 敏感性及其计算公式

敏感性指内燃机燃料经济性对有关参数变动时作出响应的性能。某项参数作微小的变动就对其产生较大影响,则称内燃机燃料经济性对此参数的敏感性大;反之,敏感性小。衡量敏感性程度的系数,称敏感性系数,以 S 表示。其计算方法为:

如果自变量 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 与因变量 y 之间有函数关系: $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$, 则第 i 个自变量 x_i 对因变量 y 的敏感性系数为:

$$S_{y, x_i} = \frac{\partial y}{\partial x_i} \cdot \frac{x_i}{y}$$

$S=0$, 表示因变量在该点对自变量不敏感; $S>0$, 表示自变量与因变量的变化趋势相同, S 值越大, 表示因变量对这个自变量在该点越敏感; $S<0$, 表示自变量与因变量的变化趋势相反, S 值越小, 则表示因变量对这个自变量在该点越敏感。

由于 S 越趋近于 0, 因变量对自变量越不敏感, 为了减少机器在使用过程中的维修工作量和保持机器性能的稳定性, 总是希望 S 都尽可能的趋近于 0, 然而实际上是不可能的。那么 S 究竟为何值时, 自变量对因变量的影响可以忽略呢? 这里用理想敏感性系数 S_m 来表示, 指在一定条件下因变量变化达到它所允许的极限值时所对应的系数。为了以后分析方便, 定义敏感性系数 $|S|$ 不大于理想敏感性系数 $|S_m|$ 的所有点所在区域为非敏感区域, 非敏感区域内的各点是等价点。不同技术条件下理想敏感性系数是不同的。

理想敏感性系数确定了参数的非敏感区域, 即确定了参数的理想变化范围。因此, 用理想敏感性系数也可作为衡量燃料经济性敏感性的一个指标。如果 $|S_m|$ 越大, 则该自变量的理想变化范围相对越宽广, 因变量对自变量的敏感性相对越小; 如果 $|S_m|$ 越小, 则说明该自变量的理想变化范围相对越狭窄, 因变量对自变量的敏感性相对越大。

理想敏感性系数的基本计算方法为:

若因变量 y 与自变量 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 之间有下列关系: $y=f(x_1, x_2, \dots, x_n)$, 且有其反函数: $x_i=g(y)$ (x_i 表示第 i 个自变量), 则自变量 x_i 对因变量 y 的理想敏感性系数为:

$$S_m = \frac{\partial y}{\partial x_i} \cdot \frac{g_i(y_0)}{y_0}$$

其中: y_0 为某一特定条件下 y 的最大允许值。

3.2 参数的敏感性系数公式

从敏感性及敏感性系数基本概念出发, 对上述建立的燃料经济性数学模型加以处理, 可导出各参数的敏感性系数公式。

- 1) 负荷敏感性系数 $S_{\rho, x_1} = (-248.936x_1 + 96.618x_1^2 - 13.143x_1^3 + 0.615x_1^4)/y$
- 2) 转速敏感性系数 $S_{\rho, x_2} = (-0.172x_2 + 3.04 \times 10^{-3}x_2^2 - 3.165 \times 10^{-7}x_2^3 + 1.146 \times 10^{-10}x_2^4)/y$
- 3) 供油提前角敏感性系数 $S_{\rho, x_3} = (-10.412x_3 + 0.562x_3^2)/y$
- 4) 针阀升程敏感性系数 $S_{\rho, x_4} = (-72.350x_4 + 142.764x_4^2 - 20.853x_4^3)/y$
- 5) 进气门间隙敏感性系数 $S_{\rho, x_5} = (-50.967x_5 - 207.046x_5^2 + 756.311x_5^3 + 3.395x_5^4)/y$
- 6) 排气门间隙敏感性系数 $S_{\rho, x_6} = (-69.022x_6 + 118.788x_6^2 + 107.28x_6^3)/y$
- 7) 喷油压力敏感性系数 $S_{\rho, x_7} = (-109.367x_7 + 16.41x_7^2 - 0.6044x_7^3)/y$

3.3 单一参数的敏感性分析

假设在其它参数不变的条件下, 仅变动某一参数, 根据上述各参数的敏感性系数数学模型, 计算使用范围内各参数的敏感性系数, 列于表 2。从表 2 可知:

表 2 各参数敏感性系数

负荷/kW	x_1	2	4	6	8	8.8	9.7	$\bar{S}$
敏感性系数	S_{ρ, x_1}	-0.487	-0.450	-0.225	-0.091	0.061	0.433	0.291
转速/ $r \cdot \min^{-1}$	x_2	1200	1400	1600	1800	2000	2200	$\bar{S}$
敏感性系数	S_{ρ, x_2}	-0.322	-0.321	-0.210	-0.093	0.024	0.420	0.231
供油提前角/ $^\circ$	x_3	10	12	14	16	22		$\bar{S}$
敏感性系数	S_{ρ, x_3}	-0.183	-0.171	-0.138	-0.086	0.168		0.149
针阀升程/min	x_4	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	$\bar{S}$
敏感性系数	S_{ρ, x_4}	-0.034	-0.023	-0.002	0.028	0.068	0.114	0.045
气门间隙/mm	$x_5(x_6)$	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	$\bar{S}$
敏感性系数	S_{ρ, x_5}	-0.048	-0.053	0.02	0.07	0.288	0.454	0.146
敏感性系数	S_{ρ, x_6}	-0.032	-0.028	-0.007	0.034	0.096	0.179	0.063
喷油压力/MPa	x_7	8.829	9.81	10.791	11.772	12.753	13.734	$\bar{S}$
敏感性系数	S_{ρ, x_7}	-0.388	-0.251	-0.114	-0.003	0.082	0.109	0.158

注: 其中, $\bar{S} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |S_i|$ ($i=1, 2, \dots, n$)

1) 在标定转速下, 燃料经济性的敏感程度, 随负荷 x_1 的减小而逐渐增大; 随负荷的增大也逐渐增大, 但是大于负荷减小时的增大程度。在实际中, 负荷在 8kW 左右比较理想。

2) 不同转速时, 燃料经济性的敏感程度是不同的。随着转速的提高而敏感性逐渐减小, 当转速达到 1900r/min 左右时, 极不敏感, 当转速过高时, 其敏感性有增大的趋势。

3) 供油提前角的理想敏感性系数: $S_{m1} = -0.021$ $S_{m2} = 0.023$ 。

燃料经济性对供油提前角变化的响应是极其敏感的,当供油提前角为 18° 左右时,其敏感性极小;随着供油提前角的进一步减小,则燃料经济性对它的变化越来越敏感。

4) 针阀升程的理想敏感性系数: $S_{m1} = -0.03$ $S_{m2} = 0.055$

燃料经济性的敏感性随针阀升程的增大而逐渐变小,当针阀升程增大至 $0.5 \sim 0.6 \text{ mm}$ 之间时,敏感性极小;当针阀升程继续增大时,敏感性又逐渐增大,且增大越来越明显。

5) 进气门间隙理想敏感性系数: $S_{m1} = -0.024$ $S_{m2} = 0.023$

排气门间隙理想敏感性系数: $S_{m1} = -0.028$ $S_{m2} = 0.026$

随着进气门间隙的增大,在达到 0.4 mm 以前,燃料经济性的敏感程度变化不大,当超过 0.4 mm 继续增大时,燃料经济性的敏感程度要比进气门间隙过小时更加明显。

排气门间隙在 0.4 mm 左右时比较理想,随着排气门间隙的减小,其敏感性增大;随着排气门间隙的增大,其敏感性也增大,且比间隙减小时显著。

6) 喷油压力理想敏感性系数: $S_{m1} = -0.008$ $S_{m2} = 0.018$

燃料经济性对喷油压力敏感程度以喷油压力在 $120 \sim 130$ 之间的某一值为分界点。在分界点前,随着喷油压力的减小而增大;在分界点后,随着喷油压力的增大也逐渐增大,但增大程度不如喷油压力减小时明显。

从以上分析可以看出,X195 型柴油机燃料经济性的最敏感因素应是负荷,其次为转速等使用因素;就燃料经济性对柴油机的技术状态因素的敏感性序列应为:喷油压力 x_7 、供油提前角 x_3 、进气门间隙 x_5 、排气门间隙 x_6 和针阀升程 x_4 。

4 多参数交互作用下的敏感性分析

内燃机燃料经济性的好坏,主要取决于燃烧系统、供油系统和配气系统的合理匹配。在各个系统对内燃机燃料经济性的影响因素是很多的,并且系统与系统之间,系统内的因素与因素之间又存在着一定的相互联系。为研究多参数交互作用下内燃机的燃料经济性,在单参数分析的基础上,采用“正交试验法”对较敏感的 x_7 、 x_3 、 x_5 、 x_6 4 个因素进行了综合试验,以确定参数间的交互作用对敏感性的影响,同时进一步确定各参数的敏感性序列。

4.1 试验方案的确定

根据参数敏感性数学模型的计算及分析结果,定出 4 因素 3 水平表选择相应的正交表 $L_9(3^4)$,按正交表的试验号,分别进行台架试验,试验结果的评定参数用燃料消耗率 $g_e(\text{g/kW} \cdot \text{h})$ 表示(见表 3)。其结果分析如表 4,表中 A_1 、 A_2 、 A_3 为表 3 中相同因素下相同水平的试验结果相加值; a_1 、 a_2 、 a_3 分别为相应的 A_1 、 A_2 、 A_3 值除以 3 的平均值; R 为 a_1 、 a_2 、 a_3 中最大一个数减去最小一个数之差,称极差; r 为各因素下所得结果的极差除以各自因素的变化率,称相对极差。 r 的大小就反应了各因素对燃料经济性影响的敏感程度。

4.2 结果分析

从表 4 可知,试验中虽然存在着各因素之间的交互作用,但结果仍明显地反应出各因素的独立效应。由相对极差 r 分析表明,对 X195 型柴油机燃料经济性影响最敏感的可调因素是喷油压力,它决定了混合气的形成和燃烧过程;其次依次为供油提前角、进气门间隙、排气门间隙,其序列与单参数分析结果是一致的。它表明参数间的交互作用对敏感性虽然有一定影响,但并不能打乱各参数的敏感性序列。

表3 试验方案及结果

序号	因 素				g_e
	x_7	x_3	x_5	x_6	
1	1	1	1	1	253.3
2	1	2	2	2	251.6
3	1	3	3	3	257.1
4	2	1	2	3	252.1
5	2	2	3	1	251.5
6	2	3	1	2	253.8
7	3	1	3	2	260.6
8	3	2	1	3	258.4
9	3	3	2	1	261.6

表4 结果分析表

评定值	因 素			
	x_7	x_3	x_5	x_6
A_1	762.0	766.0	767.7	765.9
A_2	757.4	761.5	762.1	766.0
A_3	780.1	772.0	769.7	767.6
a_1	254.0	255.3	255.9	255.3
a_2	252.5	253.8	254.0	255.3
a_3	260.0	257.3	256.6	255.9
R	7.5	3.5	2.6	0.6
τ	97.75	15.77	9.09	2.40

通过与单参数的实验结果对比,发现:多参数交互作用强化了喷油压力、进气门间隙对燃料经济性的影响,而弱化了排气门间隙的影响。这是由于喷油压力与供油提前角、进气门间隙与排气门间隙对燃料经济性的影响相关联的结果。

5 结 论

- 1) 建立的 X195 柴油机数学模型,验证表明有相当高的精确度,有一定使用价值;
- 2) 提出并运用内燃机燃料经济性敏感性的方法,得出了影响 X195 型柴油机燃料经济性的有关部分因素的敏感性序列;
- 3) 结果分析表明:要提高 X195 型柴油机燃料经济性,在转速和负荷合理的情况下,必须对较敏感的影响因素给予足够地重视;
- 4) 应用敏感性分析研究内燃机特性,建立起能作实证分析的模型体系,是新的尝试,得到了一些有意义的结果。关于在非标定工况下各参数的敏感性分析,有待继续研究。

参 考 文 献

- 1 西安交通大学内燃机教研室编. 内燃机原理. 北京:中国农业机械出版社,1981.
- 2 沈恒荣等编. 内燃机性能研究. 北京:机械工业出版社,1981.
- 3 金良超. 正交设计与多指标分析. 北京:中国铁道出版社,1988.
- 4 闵光泽等编. 柴油机试验. 北京:中国农业机械出版社,1989.
- 5 潘旭峰. 诊断、建模、灵敏度分析和优化设计. 汽车工程,1989(1)
- 6 何 仁. 汽车燃料经济性对设计参数的灵敏性分析. 陕西汽车,1990(3)