

发动机性能试验数据处理方法的研究*

陈 军, 师帅兵, 席新明, 田晓琴

(西北农林科技大学 机械与电子工程学院, 陕西 杨陵 712100)

[摘 要] 研究了发动机性能试验数据处理的方法, 提出利用最小二乘分段多项式拟合方法对曲线进行拟合, 可提高工作效率和试验精度; 认为坐标变换法可提高拟合精度; 最后采用二元列表函数的线性插值法, 实现了大气修正的计算机处理。

[关键词] 发动机; 性能试验; 数据处理; 曲线拟合

[中图分类号] TK427

[文献标识码] A

[文章编号] 1000-2782(2001)04-115-03

数据处理是发动机特性试验的一个重要内容, 是测取发动机各项指标, 进行动力性、经济性分析的前提和基础, 试验数据的正确处理, 关系到是否能达到试验目的, 得出明确结论^[1], 因此发动机试验数据处理必须准确、可靠。传统的数据处理方法, 很难得到一条很好地适应所有点的曲线, 同时也无法估计所得曲线的精度, 由此所确定的特征值就可能有较大的误差, 且没有建立起由这些点构成曲线的数学模型, 直接影响利用数学方法进行解析分析^[2,3]。本研究提出利用数据处理程序化方法, 对试验数据采用最小二乘分段多项式拟合的方法进行曲线拟合, 得出较为精确可靠的曲线方程。

1 特性曲线的拟合

内燃机性能特性中的每 1 条曲线(如扭矩曲线、功率曲线、油耗曲线等)都可以用最小二乘法多项式拟合方法进行曲线拟合。当试验数据有拐点或者不圆滑和不规则, 但又不便于圆整时, 用分段计算可以得到较高的拟合精度^[2]。

设有 1 组观测数据 (x_i, y_i) ($i = 1, 2, \dots, n$), 其中 x_1, x_2, \dots, x_n 是分段单调的。在 x_1, x_2, \dots, x_n 中适当选取 m 个分界点, 则对于开形曲线可将其分为 $m + 1$ 段, 使每段内的 x_i 单调变化。

第 j 段需要拟合一个 p_j 次多项式, 则拟合曲线的数学模型为^[4]

$$\hat{y}_j = \sum_{i=0}^{p_j} b_{ji} x_j^i, \quad (j = 1, 2, \dots, m + 1)。 \quad (1)$$

其中, b_{ji} 为拟合系数; p_j 为多项式的阶次; \hat{y}_j 和 x_j 分

别表示任意一段特性曲线的纵坐标和横坐标。

为使拟合函数及其导数在中间各分界点处连续, 相邻两段的多项式在分界点上的函数值必须相等, 且要求 q_j 阶导数也相等 ($q_j < p_j$)。

最小二乘法的关键是确定多项式系数 b_{ji} , 使根据拟合的多项式算出的 \hat{y} 值与相应的各试验点的 y 值之间差值的平方和(残差平方和) w 为最小, 即

$$\min w = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2。 \quad (2)$$

其中, n 为特性曲线的试验数据点数。求解方法是计算 w 对各项系数 b_{ji} 的偏导数, 并令其为 0, 即可得到各项系数 b_{ji} 。

为了确定拟合曲线的精度, 可以采用剩余均方差来衡量。设实测值与估计值的剩余偏差向量为 $V = Y - XB$ 。其中 Y 与 X 向量为实测数据向量, B 为系数向量。如果 R^2 记为剩余平方和, 则有 $R^2 = V^T V$, 可以得出拟合曲线的剩余平方差为

$$s = \sqrt{V^T V / (n - k + r)}, \quad (3)$$

其中, $k = \sum_{j=1}^m (p_j + 1)$ 为未知数的个数; $r = \sum_{j=1}^m (q_j + 1)$ 为约束条件数。有了拟合公式, 利用它来计算 \hat{y} 值, 并对取值点加密, 再利用计算机语言进行编程, 就可绘制出相应的特性曲线。拟合多项式的阶次通常以 2~5 阶为宜^[3]。

2 利用坐标变换提高计算精度^[5]

尽管计算机具有计算精度高的优点, 但是运算

* [收稿日期] 2000-09-04

[基金项目] 西北农林科技大学青年科学基金资助项目(5210818)

[作者简介] 陈 军(1970-), 男, 宁夏固原人, 讲师, 硕士, 主要从事农机动力设备研究。

数据在计算机内只能用有限位数来表示。当运算数据有效位数超过机内能表示的最多位数时,由于计算机的舍入误差,会造成运算数据的有效位数丢失,影响计算结果的精度。如果观测数据有效位数较多或第一位有效数字较大时,通过轴的平移进行坐标变换则可达到减少观测数据有效位数和减少第一位数字大小的目的,进而提高计算结果的精确度。

设在平面坐标系 xoy 中,有 1 组观测数据 (x_i, y_i) ($i= 1, 2, \dots, n$), 对其进行拟合的数学模型为式 (1)。坐标轴平移后,新的坐标原点为 $o(x_0, y_0)$, 则新旧坐标系 x_0y_0 与 xoy 的坐标之间的关系为

$$\begin{cases} x = x_0 + x', \\ y = y_0 + y' \end{cases} \quad (4)$$

对观测的 1 组数据 (x_i, y_i) ($i= 1, 2, \dots, n$) 施行 (4) 式变换, 得到新坐标系下的 1 组数据为 (x'_i, y'_i) ($i= 1, 2, \dots, n$), 对这组数据进行拟合的数学模型为

$$y'_j = \sum_{i=0}^{p_j} b_{ji} x'^i_{j0} \quad (5)$$

要求得原坐标系下的分段多项式系数向量 B , 只需对坐标变换后求得的分段多项式系数向量 B' 进行线性变换即可。

3 标准大气修正的计算机实现

我国国标(GB 1105- 74)规定标准大气状况,对陆用内燃机为环境温度 20℃, 大气压力为 101. 325 kPa (760 mmHg), 相对湿度为 60% [6]。

如果试验时大气状况与标准状况不符合,对于柴油机其功率和燃油消耗率应按下列规定进行换算。

$$N_{e0} = N_e / C, \quad (6)$$

$$C = K + 0.7(K - 1)(1/\eta_h - 1), \quad (7)$$

$$K = (T_0/T)^{0.75} (p - \Phi_w) / (p_0 - \Phi_{w0}). \quad (8)$$

式中, C 为柴油机有效功率换算比; K 为柴油机指示

$$M_e = \begin{cases} 122.96 + 39.856 \times 10^{-2} \cdot n - 19.067 \times 10^{-5} \cdot n^2, & n \leq 1530 \\ 7.0329 - 4.1857 \cdot n; & n > 1530 \end{cases}$$

$$N_e = \begin{cases} -40.5198 + 0.11423 \cdot n - 3.82766 \times 10^{-5} \cdot n^2, & n \leq 1530 \\ 1.23326 - 0.73411 \cdot n; & n > 1530 \end{cases}$$

$$g_e = \begin{cases} 695.69 - 0.6243 \cdot n + 2.3627 \times 10^{-4} \cdot n^2, & n \leq 1610 \\ -8.9526 + 5.6529 \cdot n, & n > 1610 \end{cases}$$

$$G_T = \begin{cases} 3.326 + 8.1069 \times 10^{-3} \cdot n - 1.0348 \times 10^{-6} \cdot n^2, & n \leq 1610 \\ 193.01 - 0.1116 \cdot n; & n > 1610 \end{cases}$$

根据拟合公式作出的调速特性曲线见图 1。由图 1 可以看出,拟合所得曲线是 1 组连续、光滑的曲

率换算比; η_h 为发动机的机械效率; p 为实测大气压 (kPa); T 为环境温度 (K); Φ 为相对湿度 (%); p_w 为饱和蒸汽压 (kPa)。

$$g_{e0} = g_e / \beta, \quad (9)$$

式中, β 为柴油机有效耗油率换算比, $\beta = K / C$ 。注脚“0”表示标准状况下的数值。

由式 (7) (8) 可以看出,对于计算机实现大气修正关键在于 Φ_w 的获取。对于 Φ_w 的获取采用二元列表函数的线性插值法。其主要求解思路是,先确定在给定的二元列表中靠近插值点 $T(x, y)$ 相邻的 4 个节点,然后用三次一元插值方法求出相应插值点 $T(x, y)$ 的函数值 $Z(x, y)$, 其插值公式为

$$Z(x, y) = (1 - \alpha)(1 - \beta)Z_{i,j} + \beta(1 - \alpha)Z_{i,j+1} + \alpha(1 - \beta)Z_{i+1,j} + \alpha\beta Z_{i+1,j+1}, \quad (10)$$

$$\alpha = (x - x_i) / (x_{i+1} - x_i),$$

$$\beta = (y - y_j) / (y_{j+1} - y_j),$$

式中, $Z_{i,j}, Z_{i,j+1}, Z_{i+1,j}$ 和 $Z_{i+1,j+1}$ 为插值点 $T(x, y)$ 相邻 4 点上的函数值。

4 实例

某柴油机的调速特性试验数据如表 1 所示。

表 1 调速特性试验数据

Table 1 Test data of governing characteristic

试验号 Test No.	转速/ (r · min ⁻¹) Rev	扭矩/ (N · m) Torque	时间/s Time	油耗/g Oil consumption
1	1 680	0	18.62	30
2	1 646	200	12.14	30
3	1 620	350	8.58	30
4	1 540	390	8.11	30
5	1 500	405	8.08	30
6	1 380	425	8.57	30
7	1 184	455	9.57	30
8	930	470	10.82	30
9	780	465	12.02	30

对表 1 数据经用 Visual C++ 6.0 编写的程序处理后得到的拟合公式分别为:

线。经拟合后的调速特性曲线对原样本值中的一些特殊点都作了调整,因此不能完全真实地反映试验

结果, 但却是更规范的调速特性图, 它掩盖和削弱了一些异常点对调速特性的影响, 能较好地反映整个

机型在正常情况下性能指标的变化情况。由拟合所得方程可以求解整机特征值。

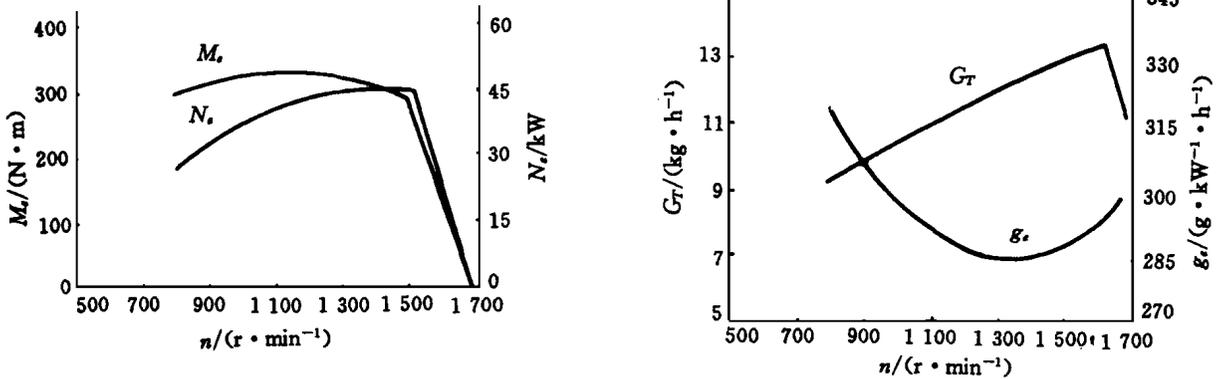


图 1 调速特性曲线

Fig 1 The governing characteristics curve

5 结 论

用计算机对发动机性能试验数据进行处理、拟合与作图, 迅速、方便, 大大提高了工作效率。

1) 利用最小二乘分段多项式拟合的方法对特性曲线拟合, 提高了数据处理的精度, 利用这种方法求出的多变量计算公式, 还能为发动机设计提供反映

参数变化规律的依据;

2) 利用坐标平移对原观测数据进行适当变换能减小计算机运算的舍入误差;

3) 采用二元列表函数的线性插值法, 对数据进行大气修正, 使数据处理全过程实现计算机处理, 大大提高了处理速度。

[参考文献]

- [1] 华中农业大学. 拖拉机汽车学[M]. 北京: 农业出版社, 1995
- [2] 史宗庄, 刘元阁. 内燃机特性曲线的数学拟合方法[J]. 柴油机, 2000, (3): 12- 15
- [3] 万德永, 王友林. 内燃机性能试验数据的计算机处理与作图[J]. 柴油机, 2000, (1): 18- 23
- [4] 邓建中, 葛仁杰, 程正兴, 等. 计算方法[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1995
- [5] 杨成海. 发动机的静动态动力性能研究及其计算机程序[D]. 陕西杨陵: 西北农林科技大学机械与电子工程学院, 1986
- [6] 张志沛. 汽车发动机原理[M]. 大连: 大连海运学院出版社, 1993

Study on the processing method of engine performance test data

CHEN Jun, SHI Shuai-bing, XI Xin-ming, TIAN Xiao-qin

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

Abstract: This paper studies the processing method of engine performance test data. Using the least square piecewise polynomial fitting method to fit curve, the working efficiency and test accuracy could get great improvement. Using the coordinate transformation method could further enhance the fitting accuracy. Using the linear interpolation method of binary schedule function, the computer processing of air correction could be realized.

Key words: engine; performance test; curve fitting; data processing