

【设计研究】

基于 MATLAB 的发动机万有特性曲线绘制方法

周广猛¹, 郝志刚², 刘瑞林¹, 陈 东³, 管金发¹, 张春海⁴

(1. 军事交通学院 汽车工程系, 天津 300161; 2. 军事交通学院 训练部, 天津 300161;

3. 军事交通学院 基础部, 天津 300161; 4. 兰州军区 军械汽车技工训练大队, 陕西 西安 710111)

摘要: 利用 MATLAB 数学运算能力, 处理发动机性能 试验数据, 方法简单可靠, 绘制后的万有曲线直观明了, 把等燃油消耗率曲线、外特性曲线和等功率曲线较好地拟合在同 一张图上, 拟合程度较高。

关键词: MATLAB; 万有特性曲线; 绘图

中图分类号: TK402 **文献标识码:** A **文章编号:** 1673- 6397(2009)02- 0034- 03

Universal Characteristics Curve Plotting Method based on MATLAB

ZHOU Guang- meng¹, HAO Zhi- gang², LIU Rui- lin¹, CHEN Dong³, GUAN Jin- fa¹, ZHANG Chun- hai⁴

(1. Automobile Engineering Department, Academy of Military Transportation, Tianjin 300161, China;

2. Training Department, Academy of Military Transportation, Tianjin 300161, China;

3. General Course Department, Academy of Military Transportation, Tianjin 300161, China;

4. Ordnance Mechanic Training Brigade, Lan Zhou Theater, Xi'an 710111, China))

Abstract: Taking advantage of MATLAB mathematic operation, data from engine characteristic test was processed, the method is simple and credible, The universal characteristics curve plotted is intuitionistic and perspicuous, and was in good fit with data got in test.

Key Words: MATLAB; Universal Characteristics Curve; Plot

引 言

为了能全面反映发动机的性能, 把发动机的多个参数画在一张图上而形成的多参数的特性曲线叫做发动机的万有特性曲线^[1], 传统用作图法制取万有特性曲线是将不同转速下的负荷特性曲线绘制在同一张坐标图上, 形成曲线簇, 然后从曲线簇上把等油耗点逐一投影到万有特性图上, 并圆滑地连接成等油耗曲线, 再做出等功率曲线, 画出外特性曲线, 进而得到发动机的万有特性曲线, 这种万有特性曲线的手工绘制方法费时费力, 难以保证数据和图形的精度^[2], 而 MATLAB 软件具有强大的矩阵计算和数据可视化能力^[3], 为万有特性曲线的绘制提供了一种新的方法。国内开展了利用 MATLAB 进行万有特性曲线绘制的研究, 由于外特性曲线拟合较为简

单, 方法较为成熟, 研究的重点多集中在等燃油消耗率曲线的拟合与绘制上, MATLAB 中提供了二元插值函数、三次插值、V4 插值等多种插值方法, 但要求数据间隔要足够小, 而且对周围节点的精度要求高, 个别数据点的误差有可能造成数据畸变^[4]。由洛阳凯迈机电有限公司开发的 FST2D 发动机控制系统利用 MATLAB 的计算引擎, 可以利用发动机试验数据绘制万有特性曲线, 但对试验点的密度和准确度仍然要求较高^[5]。而文中所采用的方法能够很好地解决这个问题。其它方法如神经网络拟合方法需要重新训练网络, 比较繁琐; 从一元样条非张量积形式推广到薄板样条形式可较好光滑曲线, 但易出现多个插值点^[6]; 本文中利用的最小二乘法原理, 采用多元线性回归的方法, 但随着拟合条件增加, 也有产生奇点的可能。但在试验点采集受限等条件限制下仍

不失为一个较好的手段。

坐标的万有特性曲线运用最广^[7], 绘制该万有特性曲线需要画出等燃油消耗率曲线、等功率曲线和边界线, 具体绘制方法如表 1 所示。

1 利用 MATLAB 绘制万有特性曲线的过程

以转速为横坐标、平均有效压力(或扭矩)为纵

表 1 发动机万有特性曲线绘制方法

线型	绘制方法	采用(建立)的模型	拟合方式	MATLAB 命令(参数)
等燃油消耗率曲线	先建立燃油消耗率与转速和扭矩的关系模型, 绘出三维曲面图, 再生成二维的等值线图。	$b_e = f(T_{iq}, n)$	最小二乘法原理, 多元线性回归	meshgrid mesh contour NaN
边界线	根据发动机外特性曲线的数据绘制边界线。	$T_{iq} = f(n)$	样条插值拟合	interp1 plot
等功率曲线	公式 $P_e = T_{iq} n / 9550$ 绘制, 绘出三维曲面图, 再生成二维等值线图	$T_{iq} = f(n)$	样条插值拟合	interp1 NaN

发动机负荷特性试验的数据并不是矩阵格式, 需要首先将它们转化为绘制 MATLAB 所识别的、绘制三维图形的矩阵格式^[8], 才能绘制出转速 n (r/min)、有效扭矩 T_{iq} (N·m) 和燃油消耗率 b_e (g/(kW·h)) 的三维曲面图, 再利用 MATLAB 语言里的 contour 语句生成二维的等值线图(相当于用不同的 T_{iq} - n 平面去截 b_e 、 n 、 T_{iq} 的三维曲面图), 进而得到发动机的等油耗曲线, 而等油耗曲线模型的建立实际上是建立燃油消耗率 b_e 与转速 n 和平均有效压力 P_{me} 的函数, 采用多元线性回归的方法进行曲面拟合。

边界线的绘制实际上是把由外特性试验得到的

$$\begin{bmatrix} b_{e1} \\ b_{e2} \\ \dots \\ b_{eN} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & n_1 & T_{iq1} & n_1^2 & n_1 T_{iq1} & T_{iq1}^2 & \dots & n_1^l & n_1^{l-1} T_{iq1} & \dots & T_{iq1}^l \\ 1 & n_2 & T_{iq2} & n_2^2 & n_2 T_{iq2} & T_{iq2}^2 & \dots & n_2^l & n_2^{l-1} T_{iq2} & \dots & T_{iq2}^l \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & n_N & T_{iqN} & n_N^2 & n_N T_{iqN} & T_{iqN}^2 & \dots & n_N^l & n_N^{l-1} T_{iqN} & \dots & T_{iqN}^l \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \dots \\ a_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_0 \\ e_1 \\ \dots \\ e_N \end{bmatrix} \quad (1)^{[3, 9, 10]}$$

可表示为: $B = G \times A + E$, 式中 k 为多项式的项数, l 为多项式的最高次幂, 其中 $k = (l + 1)(l + 2)/2$, $(1, 2 \dots, N)$, 为不同的试验点, $A = (a_0, a_1 \dots, a_{k-1})$ 为模型中的待定系数, $E = (e_0, e_1 \dots, e_N)$ 为随机误差, 又称为残差。

2.2 边界线模型的建立

MATLAB 中一维插值函数 interp1(), 提供了三种插值方法可选‘linear’(线性的, 此选项是默认的, 它在两个点之间简单地采用直线拟合, 故效果并不光滑), ‘cubic’(三次的)和‘spline’(样条型)等, 本论文采用拟合效果较好的‘spline’型插值方法建立模型^[10]。

2.3 等功率曲线模型的建立

根据公式 $P_e = T_{iq} n / 9550$, 建立等功率曲线的模型。

T_{iq} 、 n 数据绘制在平面上, 形成 T_{iq} - n 关系曲线, 构成发动机万有特性曲线的边界线, 此时油量调节机构固定在标定循环供油量位置, 万有特性曲线上的转速和扭矩不可能超出边界线的范围。

根据公式 $P_e = T_{iq} n / 9550$, 选择不同的 T_{iq} 、 n , 利用 interp1 进行拟合, 得到函数 $P_e = f(T_{iq}, n)$, 绘制得到三维曲线, 利用 contour 命令得到的双曲线即是等功率曲线。

2 模型的建立

2.1 等油耗消耗率曲线模型的建立

根据多元线性回归理论, 建立模型如下:

3 曲线的绘制

根据某发动机外特性和负荷特性得到的数据来绘制该发动机的万有特性曲线, 外特性和负荷特性数据如表 2、表 3 所示。

表 2 外特性试验数据

转速 n (r/min)	1403	1597	1797	1986	2102	2199
扭矩 T_{iq} (N·m)	474	497	515	526	528.8	522.8
转速 n (r/min)	2303	2400	2507	2598	2700	2802
扭矩 T_{iq} (N·m)	509.5	492.2	471.2	448.4	408.3	357.4

由式(1), 根据最小二乘法原理, $J = \sum_{i=0}^N e_i^2 = E^T \cdot E$ 值为最小, 此时 $\frac{\partial J}{\partial A} |_{\bar{A}=A} = 0$ 。进而得到 $B = G \times A$, 从理论上讲系数矩阵 G 的阶数 l 越大越能更好地实现等燃油消耗率曲线的拟合, 然而 l 变大时,

函数可能出现病态,文章折衷选取了二次函数进行最小二乘拟合,此时拟合效果较好,得到 $b_e = f(T_{iq}, n)$ 的函数,而由公式 $P_e = T_{iq} \cdot n / 9550$ 得到 $P_e = f(T_{iq}, n)$,绘制燃油消耗率和功率的三维模型如

表 3 负荷特性试验数据

$n / r \cdot \min^{-1}$							
1400		1600		1800		2000	
$T_{iq} / N \cdot m$	$b_e / g \cdot (kW \cdot h)^{-1}$	$T_{iq} / N \cdot m$	$b_e / g \cdot (kW \cdot h)^{-1}$	$T_{iq} / N \cdot m$	$b_e / g \cdot (kW \cdot h)^{-1}$	$T_{iq} / N \cdot m$	$b_e / g \cdot (kW \cdot h)^{-1}$
399.8	222.8	409.1	222.0	408.3	226.0	425.6	206.5
354.1	220.4	365.7	221.7	368.3	225.3	380.3	231.1
318.5	232.4	328.3	235.4	328.3	226.4	332.7	231.1
278.1	228.5	284.1	226.5	289.0	233.9	290.9	233.0
236.2	227.8	243.7	230.5	244.4	242.1	244.4	242.0
203.6	232.6	203.2	236.8	208.8	283.3	205.1	244.9
185.3	248.5	164.3	249.1	167.7	253.9	160.2	265.0
157.2	245.9	123.9	276.1	132.1	271.4	114.5	299.8
117.2	272.4	83.5	407.9	89.5	323.5	68.8	398.0
80.8	329.7	39.7	487.0	46.1	468.6	30.7	596.8
2200		2400		2600		2800	
$T_{iq} / N \cdot m$	$b_e / g \cdot (kW \cdot h)^{-1}$	$T_{iq} / N \cdot m$	$b_e / g \cdot (kW \cdot h)^{-1}$	$T_{iq} / N \cdot m$	$b_e / g \cdot (kW \cdot h)^{-1}$	$T_{iq} / N \cdot m$	$b_e / g \cdot (kW \cdot h)^{-1}$
420.7	234.7	404.6	174.2	378.0	256.9	315.6	257.9
379.6	259.8	360.5	242.2	344.7	253.7	275.5	295.3
334.6	235.5	322.7	252.1	310.3	253.5	242.5	282.4
291.6	237.6	283.0	287.4	264.3	260.0	210.3	288.7
244.4	242.8	243.3	253.6	226.1	303.8	178.5	301.9
202.8	292.3	205.5	263.6	186.8	280.7	145.6	329.7
157.5	277.9	162.1	290.6	154.2	300.6	118.6	357.0
116.0	308.7	124.7	316.8	115.3	346.6	72.6	475.4
74.1	396.2	86.8	378.0	76.3	435.6	52.8	580.3
37.8	605.9	52.4	518.8	34.1	812.9	22.4	1080.1

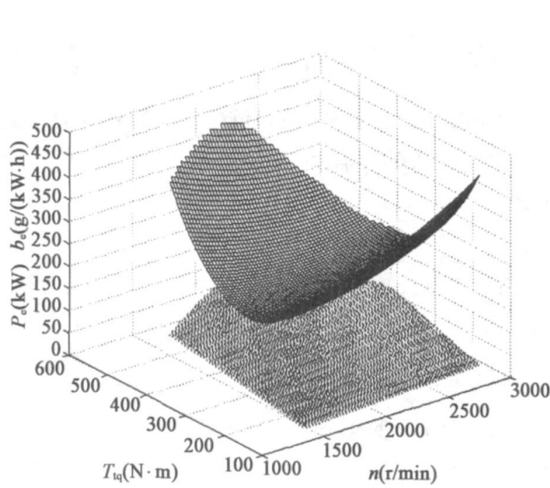


图 1 等燃油消耗率曲线和等功率曲线的三维拟合图

图 1 所示,利用 contour 命令绘制等油耗率曲线和等功率曲线的二维图,并利用外特性数据采用样条型插值方法绘制边界线,最终得到图 2 所示的万有特性曲线。

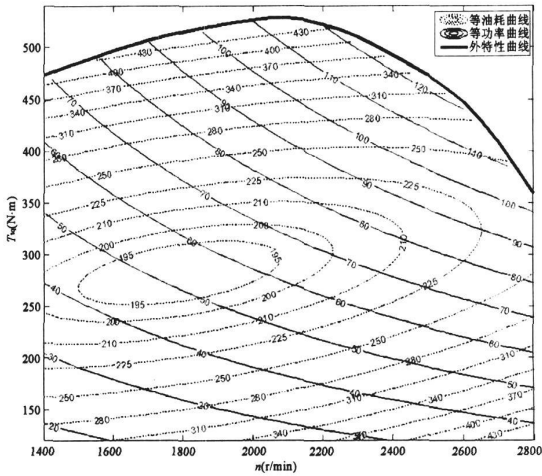


图 2 万有特性曲线

(下转第 48 页)

性消声器进行消声实验, 并且记录下相应数据; 在保持同一工况转速的情况下, 接通电源, 有源消声部分开始工作, 再次记录相应数据。根据摩托车发动机排气噪声的频谱特征及有源消声的特点, 本实验系统主要针对基频噪声及其一次谐波噪声进行控制, 从实验结果看其消声效果还是比较理想, 由于消声器特有的消声方式, 对高频部分也具备一定消声效果。基于扬声器参数的限制, 下限暂定为 125Hz。

表 1 降噪的实验结果

f/Hz	125	250	500	1000	2000	4000
LP1/dB	82	78	66	65	61	55
LP2/dB	66	64	51	60	59	54
$\Delta\text{LP}/\text{dB}$	16	14	15	5	2	1

表 1 中 LP1 指的是原有抗性消声器的消声效果, LP2 指的是带有有源消声部分的总的消声效果, ΔLP 指的是有源消声部分所达到的消声效果。在理想条件下, 各个频率点的消声指数应为无穷大, 但是由于幅值和相位的偏差, 传声器、扬声器和电路中一些元器件的延时和非线性, 对噪声消除能力都有不同程度的影响, 使得末端还保留一定的残余噪声, 另外消声器管道两端实际存在的声反射对实验结果也有一定影响。

2 结束语

(上接第 36 页)

4 结 论

(1) MATLAB 强大的数学运算能力, 方便实用的绘图功能为发动机万有特性曲线的绘制提供了一个很好的途径, 利用 MATLAB 绘制万有曲线, 作图方法简单, 拟合程度高, 提高了数据处理的速度和精度, 为发动机动力性、经济性的研究, 发动机参数的标定, 发动机与传动系的匹配提供了更可靠的依据;

(2) 与其它利用 MATLAB 绘制万有特性的方法相比, 文章所述的方法能够很好地把等油耗曲线、等功率曲线及外特性曲线拟合在一张图上, 图像更加直观可靠;

(3) 该绘图方法可以利用 MATLAB 图形用户界面设计技术进行进一步处理, 进而完成该绘图方法的图形界面设计。同时可以进一步探索利用更好的曲线拟合方法, 或采取分段拟合方法, 进一步提高拟合程度。

参考文献:

[1] 孙凤英. 汽车性能与使用技术[M]. 北京: 机械工业出版社,

(1) 针对内燃机排气噪声的特点, 提出了基于模拟电子技术的有源消声系统, 该系统把有源消声和无源消声相结合, 在不影响中高频消声效果的前提下, 对低频段噪声消声效果明显。

(2) 虽然受传声器、扬声器等器件好坏和非线性的影响, 但在实验消声过程中采取了较好的匹配措施, 信号处理部分采用纯模拟电路, 实时性好, 消声效果未受到很大影响, 可以实现宽带消声。

参考文献:

[1] 葛维晶, 王伟生, 张宝欢. 摩托车发动机排气消声器的研究与设计[J]. 小型内燃机, 1994, 23(3): 37- 41.
[2] 冯振东, 宋传学. 车内噪声主动控制系统初探. 汽车工程, 1991, 13(4): 202- 207.
[3] 吴斌. 发动机排气自适应有源消声关键技术的研究[D]: [学位论文]. 北京: 北京工业大学机械工程与应用电子技术学院, 2001, 13- 37.
[4] Krause P, Weltens H. Advanced design of automotive exhaust silencer systems[C]. SAE Paper 922088, 1992.
[5] Kim Heung- Seob, Hong Jin- Seok, Sohn Dong- Goo, et al. Development of an Active Muffler System for Reducing Exhaust Noise and Flow Restriction in a Heavy Vehicle[J]. Noise Control Engineering Journal, 1999, 47(2): 57- 63.

2002.
[2] 易雪梅, 吴伶. 用 MATLAB 语言绘制发动机万有特性的两种方法[J]. 北京汽车, 2005(5): 33- 35.
[3] 李金辉, 徐立友. 基于 MATLAB 语言的发动机特性研究[J]. 汽车科技, 2005(3): 40- 42.
[4] 倪计民, 陈源. MATLAB 软件在汽车动力传动系匹配计算中的应用[J]. 上海汽车, 2003: 24- 27.
[5] 洛阳凯迈机电有限公司, ESF2D 系统使用说明书[Z]. 洛阳.
[6] 李小华, 罗福强, 汤东. 多项式插值法绘制发动机万有特性曲线[J]. 农业工程学报, 2004, 20(5): 138- 141.
[7] 董敬. 汽车拖拉机发动机[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004, 149.
[8] 苏金明, 阮沈勇. MATLAB 实用教程[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
[9] Cuntis F. Gerald, Patrick O. Wheatley. Applied Numerical Analysis [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.
[10] 关志伟, 杨玲, 施继红. 基于 MATLAB 语言的发动机万有特性研究[J]. 吉林农业大学学报, 2003, 25(3): 339- 342.
[11] 薛定宇, 陈阳泉. 基于 MATLAB/Simulink 的系统仿真与应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.