

文章编号:1001-7372(2003)03-0100-05

## 汽车制动性能检测中制动力数据 拟合与优化方法研究

赵祥模<sup>1</sup>,南春丽<sup>1</sup>,马建<sup>2</sup>,郭晓汾<sup>2</sup>

(1. 长安大学 信息工程学院,陕西 西安 710064; 2. 长安大学 汽车学院,陕西 西安 710064)

**摘要:**在分析传统的汽车制动力检测数据拟合方法存在不足的基础上,提出了采用三次B样条函数拟合与优化的新方法,并对该方法进行了深入的理论分析。试验结果和应用情况表明:该方法很好地解决了汽车性能检测中难以解决的制动力检测数据的分析与处理问题,使其检测精度、数据重复性乃至整个检测系统的稳定性与可靠性都大为提高。最后,对该方法的软件实现技术作了简单介绍。

**关键词:**汽车工程;制动性能检测;数据拟合;优化

**中图分类号:**U463.5 **文献标识码:**A

### Study of braking data quasi-harmony and optimization method in auto brake function test

ZHAO Xiang-mo<sup>1</sup>, NAN Chun-li<sup>1</sup>, MA Jian<sup>2</sup>, GUO Xiao-fen<sup>2</sup>

(1. School of Information Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

2. School of Automobile, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

**Abstract:** By giving an analysis to weak points existing in traditional auto braking testing data quasi-harmony method, authors set forth the new method of application of cubic B spline quasi-harmony and optimization. A thorough analysis of the method is made in theory. The experimental result and actual practice show that the method has made available a better way for the solution to braking data analysis and treatment which is challenging in auto function test. And in this way, the testing accuracy, data repetition and the whole reliability and steadiness of the testing system can be greatly improved. The software designing technique for this method is also introduced in the paper.

**Key words:** automobile engineering; brake function test; data quasi-harmony; optimization

## 0 引言

对于汽车制动性能的检测,无论是在汽车的安全性检测中,还是在汽车的综合性能检测中,都是十分重要的检测项目<sup>[1]</sup>。特别是自1998年《GB7258-1997 机动车运行安全技术条件》颁布执行后,对汽车制动性能的检测提出了更高的要求,除了要检测各轮最大制动力、阻滞力、驻车制动力等常用参数外,还要

检测同轴左、右轮制动力上升过程差,制动力协调时间,整车制动比等核心参数。同时,为了满足对汽车制动系故障诊断的需要,还必须对整个制动力上升、保持及释放过程进行全面的测试<sup>[2,3]</sup>。因此,在汽车制动性能的检测中,关键是对汽车制动时其制动力变化全过程的检测,通过对制动力变化全过程数据的采集、处理和分析,得出反映汽车制动性能指标的各项参数,最终按国家标准对汽车制动性能进行评价,进而

收稿日期:2002-08-20

基金项目:陕西省科技攻关项目(99K11-G6)

作者简介:赵祥模(1966-),男,重庆大足人,长安大学副教授,工学博士研究生。

分析判断制动系存在故障的部位。

但是,在一般的汽车检测控制系统中,由于机械台架结构、传感器的非线性以及检测现场的各种干扰信号的影响等因素,导致系统采集的数据无法完全真实地反映制动力变化的过程,采集得到的制动

力变化曲线出现锯齿现象,严重影响到各项指标的测试精度和评价结果的准确性<sup>[4]</sup>。下面是在制动力检测过程中模拟信号数字化处理后得到的一组典型的试验数据,记作 $\{(x_i, y_i)\}_{i=1}^m$ ,如表 1 所示。

在图形环境下作出表 1 中数据的折线图,如图

表 1 数字化后制动力试验数据

$x_i$	2.3	3.75	5	6.25	6.55	8.1	9	11.5	12.5	14	15	17	19
$y_i$	-40	25	-20	48	5	20	0	-55	10	-10	50	80	80
$x_i$	20	21.5	22.5	24.1	26	27	28.5	30	31.8	33	34	36	37
$y_i$	-38	55	10	40	-15	58	-20	70	-35	100	20	55	25
$x_i$	38	39.5	42	44.8	47.2	48.2	49.1	51	52.5	54	57.5	58.7	62
$y_i$	27	75	50	900	745	760	640	650	595	645	655	530	680
$x_i$	64.5	65.5	68	71.3	72.5	74.5	76.3	77.5	80	80.8	81.2	81.4	82.5
$y_i$	600	640	620	665	630	630	650	575	615	275	80	-50	-50
$x_i$	84												
$y_i$	120												

1 所示。将该制动力试验曲线图(图 1)同无噪声(误差)条件下制动力曲线图(图 2)相比较,明显反映出试验结果数据在某区间内误差较大,而且不能准确表示制动力的变化特点及特征值。要解决此问题,必须对试验数据进行合理的拟合和优化。

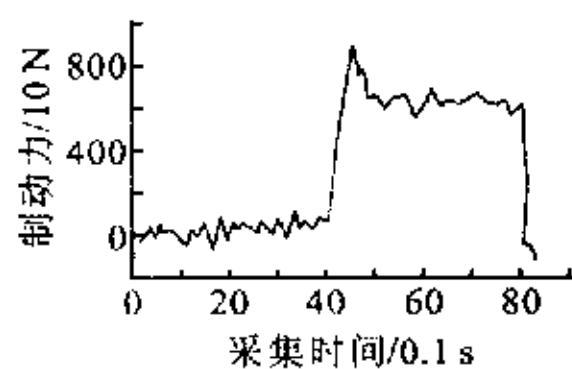


图 1 制动力试验数据折线

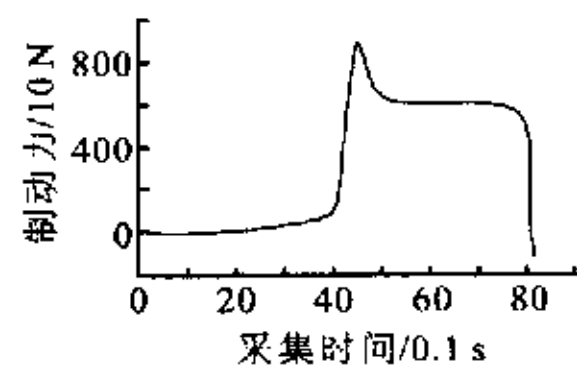


图 2 无噪声条件下制动力

## 1 制动力数据拟合方法的选取

数据拟合实质是数值逼近的一个分支。该设计中作为逼近工具的函数类应具有下述性质:

- (1) 函数类中的函数相对光滑;
- (2) 易于计算机实现;
- (3) 逼近函数对原始数据有良好的近似。

假设数据组 $\{(x_i, y_i)\}_{i=1}^m$ , 拟合函数为 $y = f(x; \alpha)$ , 其中 $\alpha = [\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n]^T$  是参数, 求 $\alpha$  使拟合函数 $f(x, \alpha)$  在 $x_i$  处的函数值 $f_i$  与对应的数据值 $y_i (i=1, 2, \dots, m)$  形成的平方和的平均值最小, 即

$$\min \left[ \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (f_i - y_i)^2 \right]$$

这就是最小二乘法数据拟合问题<sup>[5]</sup>。

对于制动力变化曲线的拟合, 传统的方法是通过多项式的最小二乘法进行拟合, 一般采用的是 5

次多项式拟合<sup>[4]</sup>, 拟合前后的效果如图 3 所示, 由图 3 可以看出, 虽然经过拟合后曲线变得平滑, 但在两处出现震荡, 未能较好地真实反映制动力的变化过程, 并且还丢失了重

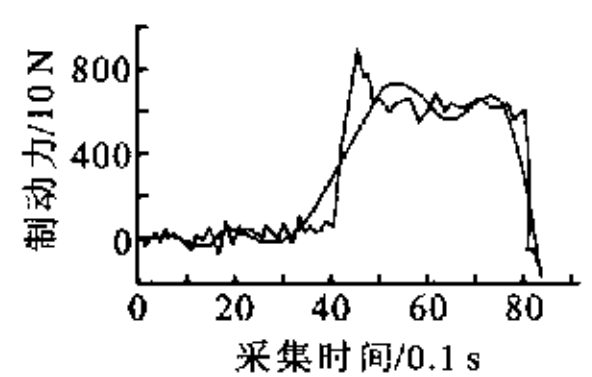


图 3 制动力信号的多项式拟合前后效果

要的拐点特征数据。最小二乘法数据拟合问题最重要的是确定拟合函数的类型。然而, 这往往是不容易的。经过分析和多次试验比较后得知, 由于无噪声条件下制动力曲线(图 2)根本无法用任何一个函数 $f(x)$  表达出来, 即制动力变化曲线的类型未知, 所以不宜用代数多项式(或其它基本初等函数)作为拟合函数。因为多项式可由它在很小的区间上的值完全确定, 当由多项式描述的曲线在一个小区间上被迫变弯时, 它在别处就可能剧烈震荡, 尤其高次多项式更是这样。用 B 样条函数 $B_i(x)$  的线性组合给出的样条函数 $S(x)$  作为拟合函数是解决这一问题的办法。况且, 以样条函数作为拟合函数有很大的优越性, 例如, 易于计算机实现、方法通用、逼近性能好等, 尤其当拟合函数类型无法确定时更有效。本设计中的问题属于节点给定的情况, 即固定节点样条最小二乘法。所以问题又转化为用 B 样条函数拟合制动力试验数据 $\{(x_i, y_i)\}_{i=1}^m$ 。

## 2 制动力数据的 B 样条函数拟合

### 2.1 B 样条构造

假定制动力试验数据的有限区间为 $[a, b]$ , 给定

分划

$$\Delta: a = x_0 < x_1 < \dots < x_{N+1} = b$$

加入新节点把分划扩展为

$$x_{-n} < \dots < x_{-1} < a = x_0 < x_1 < \dots < x_{N+1} = b < x_{N+2} < \dots < x_{N+n+1} \quad (1)$$

由样条函数定义及定理知,对于函数  $\varphi_n(x,t) = (t-x)_+^n$ ,令  $t$  分别取  $x_{-n}, \dots, x_{-1}, x_0, x_1, \dots, x_{N+1}, x_{N+2}, \dots, x_{N+n+1}$ ,则

$$\varphi_n(x, x_{-n}), \dots, \varphi_n(x, x_{-1}), \varphi_n(x, x_0), \dots, \varphi_n(x, x_{N+1}), \varphi_n(x, x_{N+2}), \dots, \varphi_n(x, x_{N+n+1}) \quad (2)$$

都是  $n$  次样条函数(亏数  $k=1$ )。如在这个序列中,截取后  $N+n+1$  个元素,则它们在区间  $[a,b]$  上是线性无关的并且形成  $S_n(\Delta)$  的一组基底。现在,要以这  $N+2n+2$  个  $n$  次样条函数的适当线性组合,构造具有局部严格正性的  $S_n(\Delta)$  的基底。

函数  $f(t)$  在点  $x_i, x_{i+1}, \dots, x_{i+n+1}$  的  $n+1$  阶差商  $f(x_i, x_{i+1}, \dots, x_{i+n+1})$ ,可表示为  $f(t)$  在点  $x_i, x_{i+1}, \dots, x_{i+n+1}$  的函数值的线性组合

$$f(x_i, x_{i+1}, \dots, x_{i+n+1}) = \sum_{k=i}^{i+n+1} \frac{f(x_k)}{\omega_{n+1,i}(x_k)} \quad (3)$$

式中:  $\omega_{n+1,i}(t) = \prod_{j=i}^{i+n+1} (t-x_j)$ ;

$$\omega_{n+1,i}(x_k) = \prod_{\substack{j=i \\ j \neq k}}^{i+n+1} (x_k - x_j)$$

令  $\{x_j\}$  为节点序列,函数

$$(x_{i+n+1} - x_i)\varphi_n(x,t)$$

关于  $t=x_i, \dots, x_{i+n+1}$  的  $n+1$  阶差商

$$B_{i,n}(x) = (x_{i+n+1} - x_i)\varphi_n(x, x_i, \dots, x_{i+n+1}) \quad (i = -n, \dots, N) \quad (4)$$

称为第  $i$  个  $n$  次规范 B 样条函数。常简称为  $n$  次 B 样条函数或 B 样条函数,在不会发生误会时也称为 B 样条。

由式(4)与差商表示式(3),可得

$$B_{i,n}(x) = (x_{i+n+1} - x_i) \sum_{k=i}^{i+n+1} \frac{(x_k - x)_+^n}{\omega_{n+1,i}(x_k)} \quad (5)$$

在不会产生误解的场合,常用  $B_i(x)$  代替  $B_{i,n}(x)$ 。 $B_{i,n}(x)$  有很多好的性质,无论用于实际计算或理论分析都很方便。

### 2.2 B 样条函数拟合

为了便于计算机编程,对于  $n$  次的 B 样条曲线有如下表达式

$$P_n(t) = \sum_{i=0}^n F_{i,n}(t)P_i \quad (0 \leq t \leq 1) \quad (6)$$

式中:  $P_i$  是  $n$  次 B 样条曲线的特征多边形顶点;

$F_{i,n}(t)$  是  $n$  次 B 样条曲线的基函数。根据 B 样条构造得到的式(5),对于三次 B 样条曲线,当  $n=3$  时,相应的三次 B 样条基函数为

$$F_{0,3}(t) = (-t^3 + 3t^2 - 3t + 1)/6$$

$$F_{1,3}(t) = (3t^3 - 6t^2 + 4)/6$$

$$F_{2,3}(t) = (-3t^3 + 3t^2 + 3t + 1)/6$$

$$F_{3,3}(t) = t^3/6$$

$$P(t) = F_{0,3}(t)P_0 + F_{1,3}(t)P_1 + F_{2,3}(t)P_2 + F_{3,3}(t)P_3$$

$$P(t) = [(-t^3 + 3t^2 - 3t + 1)P_0 + (3t^3 - 6t^2 + 4)P_1 + (-3t^3 + 3t^2 + 3t + 1)P_2 + t^3P_3]/6$$

$$(0 \leq t \leq 1)$$

绘制曲线时,写成以下参数表达式形式

$$x(t) = F_{0,3}(t)x_0 + F_{1,3}(t)x_1 + F_{2,3}(t)x_2 + F_{3,3}(t)x_3$$

$$y(t) = F_{0,3}(t)y_0 + F_{1,3}(t)y_1 + F_{2,3}(t)y_2 + F_{3,3}(t)y_3$$

$$(0 \leq t \leq 1)$$

对制动力试验数据

$\{(x_i, y_i)\}_{i=1}^m$ , 采用三次 B

样条函数作为拟合函数,

拟合曲线如图 4 所示。拟合

结果虽然比较光滑,与

原数据的近似也较好,但

与无噪声条件下制动力曲

线(图 2)相比,算法还需

进一步优化。

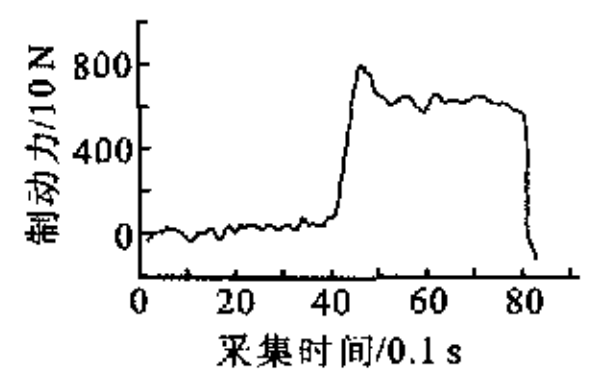


图 4 制动力试验数据 B 样条拟合曲线

### 3 拟合曲线的优化算法

由于制动力数据的拟合函数类型未知,解决的办法是作出分段多项式,但这时函数的光滑性显然不良;采用样条函数拟合,理论上完全可行,但是在该设计的实际中,主要问题是某区间节点过多,曲线不理想,如果人为减少某区间节点数,那么逼近函数对原始数据的近似性将受到影响。针对这些问题,优化算法的主要思想是利用三次 B 样条曲线重要性

质中的反算拟合性质,根据给定点反求它的控制点,再依这些控制点画出三次 B 样条曲线。该试验数据优化中关键问题是如何求得这些控制点。方法是每段按其数据分布特点,构造相应段拟合函数  $f(x)$ ,利用该拟合函数计算相应

节点处的值  $f(x_i)$  作为控制点,采用  $f(x_i)$  符号便于同试验数据中的  $y_i$  区别,最后对数据组  $\{(x_i, f(x_i))\}_{i=1}^m$  采用 B 样条函数拟合,式中  $m$  的值代表

优化时制动力数据分段

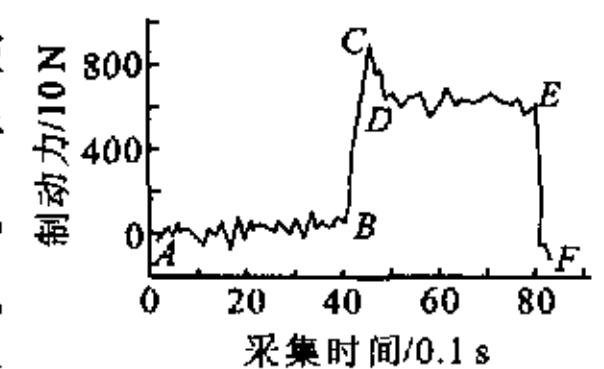


图 5 优化时制动力数据分段

整条曲线划分的段数。该设计中将制动力试验数据分为五段:AB、BC、CD、DE、EF,如图 5 所示。

### 3.1 AB 段拟合函数的构造

对于 AB 段数据,根据图 5 的曲线特征,从表 1 中取出前 29 组数据  $(x_i, y_i), i=1 \sim 29$ , 根据数据分布特点,选用二次多项式作为拟合函数,通过计算机运算,最小二乘拟合多项式为

$$y = 0.0352x^2 - 0.0591x - 2.1147 \quad (7)$$

表 2 反算出的 AB 段控制点  $(x_i, y_i)$

$x_i$	2.3	3.75	5	6.25	6.55	8.1	9	11.5	12.5	14	15	17	19
$y_i$	-2.1	-1.8	-1.5	-1.1	-1	-0.3	0.2	1.9	2.6	4	5	7	9.5
$x_i$	20	21.5	22.5	24.1	26	27	28.5	30	31.8	33	34	36	37
$y_i$	10.8	12.9	14.4	16.9	20	22	24.8	27.8	29.5	34.3	36.6	41.4	43.9
$x_i$	38	39	41										
$y_i$	46.5	49.1	54.6										

表 3 反算出的 BC 段控制点  $(x_i, y_i)$

$x_i$	42.7	43.4	44.1	44.8
$y_i$	262.4	474.9	687.4	900

### 3.3 其它段拟合函数的构造

其它段控制点的算法与 AB、BC 段算法相同,不再赘述。

### 3.4 优化后制动力曲线

根据上述优化算法,最后得到所有控制点集  $\{(x_i, f(x_i))\}_{i=1}^m$ , 依这些控制点画出三次 B 样条曲线,如图 6 所示。

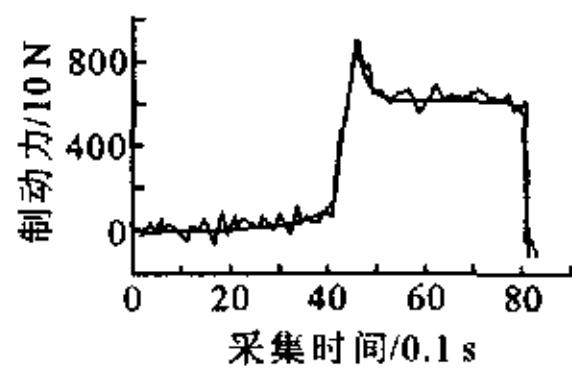


图 6 优化前后制动力曲线对比

## 4 软件实现

制动力曲线的生成由如图 7 所示的系统结构进行实现,在整个应用程序中,首先采用 VB6.0 调用 32 位动态链接库来驱动 A/D 采集卡对制动力原始信号进行采集并将其保存为磁盘文件,然后在 VB 中引用 Matlab 函数对制动力数据进行拟合和优化得到最终理想的制动力曲线。

在该软件中采用了两项关键技术:

(1)采用 Visual C++ 6.0 编写 PCL-818L A/D 采集卡的硬件驱动程序。由于 Visual Basic 本身不具备对硬件端口的读写,因此采用 Visual C++ 6.0 编写了一个 32 位的动态链接库对 A/D 卡进行驱动,在 VB 环境中调用该动态链接库实现单点或多点数据采集,最高采样速率达 20 kHz。

以式(7)作为反算函数,表 1 中  $\{x_i\}$  为节点,得到 AB 段控制点,见表 2。

### 3.2 BC 段拟合函数的构造

根据无噪声条件下 BC 段曲线特点,采用一次最小二乘逼近。经过计算机运算一次函数拟合式为

$$y = 303.57x - 12700 \quad (8)$$

以式(8)作为反算函数,得到 BC 段控制点,见表 3。

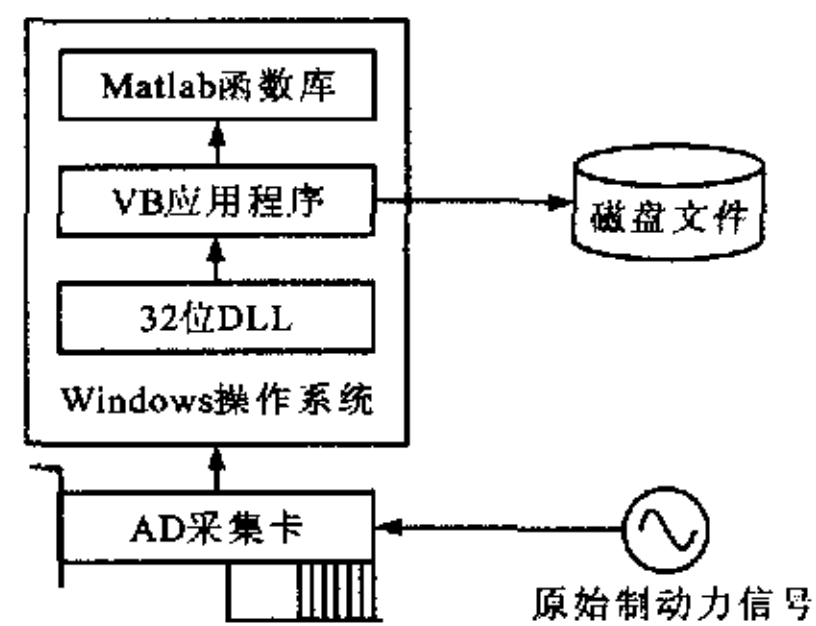


图 7 系统实现流程

(2)采用 Matlab 库函数对制动数据进行处理。在 VB 环境中,引用了一个 Matrix 插件,该插件是 Math Works 公司针对 VB 提供的一个 Matlab 库,它提供了 600 多个函数,包括基本的数学运算和功能强大的信号处理、线性变换、数值分析及图形图象处理等功能,在 VB 中使用该工具包可以避免重复性劳动,快速实现算法,减少计算量。

具体的软件程序框图如图 8 所示。

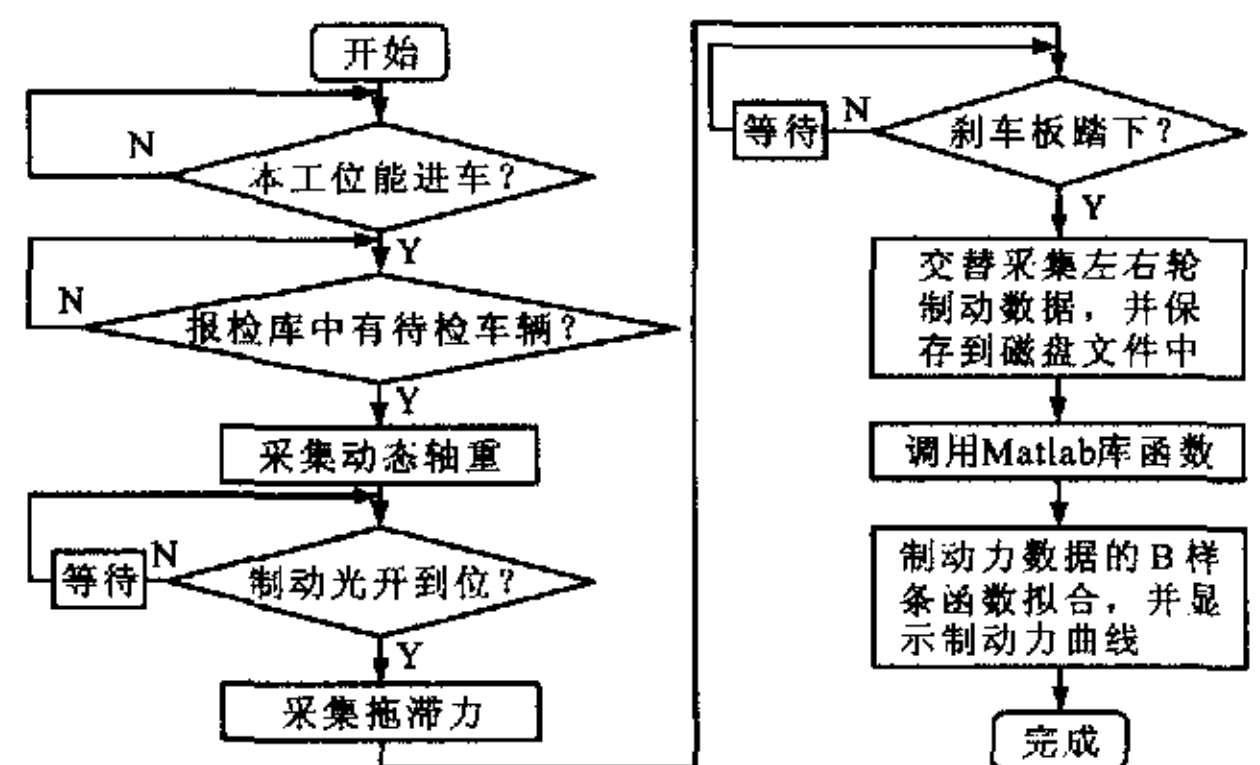


图 8 软件流程

## 5 标定检验

选择交通部成都汽车保修机械厂生产的通用型

FZ-10C 欧式制动试验台作为基础试验台架,引入笔者所述的数据处理方法后,对整个数据采集与处理系统进行了标定检验,试验数据见表 4。

表 4 制动力标定数据

标准值 /10 N	车轮	增载				减载				左右轮示值间差/%	
		采集示值/10 N			示值误差 /%	采集示值/10 N			示值误差 /%	增	减
		1	2	3		1	2	3			
120	L	124	122	120	+0.07	122	120	121	+0.03	0.1	0.05
	R	119	118	120	-0.03	120	118	120	-0.02		
300	L	300	304	302	+0.67	300	305	303	+0.89	1.23	1.22
	R	298	297	300	-0.56	298	299	300	-0.33		
600	L	600	606	604	-0.67	602	600	600	+0.17	1.06	0.73
	R	599	598	596	0.39	596	596	598	-0.50		
1200	L	1200	1205	1202	+0.19	1207	1203	1205	+2.42	0.52	0.7
	R	1198	1196	1194	-0.33	1196	1195	1199	-0.23		
1500	L	1500	1506	1504	+0.27	1500	1507	1510	+0.38	0.6	0.6
	R	1497	1490	1498	-0.33	1499	1495	1496	+0.60		
3000	L	3001	2997	3000	0.02					0.47	
	R	2982	2980	2994	0.49						

国家标准规定制动力采集最大示值误差及左右轮最大示值间差不得超过 $\pm 5\%$ <sup>[6,7]</sup>。由表 4 可以看出,采用笔者所述的数据处理方法后,制动力最大的示值误差仅为 0.67%(3000N 增载时)和 0.89%(3000N 减载时),左右轮最大示值间差仅为 1.23%(3000N 增载时),这说明整个系统的测量精度得到很大提高,远高于国家标准。

## 6 结 语

(1)对于汽车制动力数据采集后的处理问题,传统的多项式最小二乘拟合方法难以真实地反映制动力变化的过程,尤其是对于一些重要的制动力特征数据会出现严重的失真。用 B 样条函数  $B_i(x)$  的线性组合给出的样条函数  $S(x)$  作为拟合函数,并利用三次 B 样条曲线的反算拟合性质对拟合曲线进行优化,是解决该问题的一种较好的方法,并且易于计算机实现。

(2)提出的对汽车制动性能检测中制动力数据的 B 样条函数拟合及其优化方法,已在陕西汽车制造总厂、宝鸡车辆厂及西安市桃园检测站等十几家

用户的汽车检测线测控系统中得到了应用。大量的试验结果及应用情况表明,该方法很好地解决了汽车性能检测中难以解决的制动力检测数据的分析与处理问题,使其检测精度、数据重复性乃至整个系统的稳定性与可靠性都大为提高。

### 参考文献:

- [1] 中华人民共和国交通部公路司. 汽车综合性能检测[M]. 上海:上海科学技术文献出版社,1999.
- [2] 赵祥模,刘 纪. 汽车制动试验台计算机测控与故障诊断系统的研制[A]. 长安大学建校 50 周年学术论文集[C]. 北京:人民交通出版社,2001.
- [3] GB 18565-2001, 营运车辆综合性能要求和检验方法[S].
- [4] 马 建,赵祥模. 汽车综合性能分布式计算机网络自动测控系统研制[R]. 西安:陕西省科技厅,2002.
- [5] 程正兴,李水根. 数值逼近与常微分方程数值解[M]. 西安:西安交通大学出版社,2000.
- [6] GB 11798.2-89, 反力滚筒式制动试验台检定技术条件[S].
- [7] JJG 906-96, 滚筒反力式制动试验台检定规程[S].