

文章编号: 1674-8085(2017)01-0078-05

基于相对误差的最小二乘法在切削力预测中的应用

刘朝晖, 肖忠跃, 肖寿仁, *谢世坤

(井冈山大学机电工程学院, 江西, 吉安 343009)

摘 要: 对比分析高斯最小二乘法和基于相对误差的最小二乘法, 后者的相对误差均值更小, 适合保证实际值更小时的精度, 更适合应用实际工程分析。在机械加工研究中, 切削力通过应力、应变或测力仪传感器测量获得, 使用成本较高, 因此, 提出了一种基于数控机床伺服参数的测量方法。测量得到电流环伺服参数 TCMD 和切削力, 采用基于相对误差的最小二乘法, 两者之间的关系模型, 并将此关系模型应用于切削力的预测中。试验结果表明切削力可通过伺服参数进行预测, 基于相对误差的最小二乘法的预测模型具有较高的精度。

关键词: 相对误差; 伺服参数; 最小二乘法; 切削力; 预测

中图分类号: TG659

文献标识码: A

DOI:10.3969/j.issn.1674-8085.2017.01.015

APPLICATION OF RELATIVE ERROR BASED LEAST SQUARE METHOD IN CUTTING FORCE PREDICTION

LIU Zhao-hui, XIAO Zhong-yue, XIAO Shou-ren, *XIE Shi-kun

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Jinggangshan University, Ji'an, Jiangxi 343009, China)

Abstract: Comparative analyzing Gauss least square method and relative error based least squares method, the latter method has smaller mean relative error and is more suitable for practical engineering application analysis. In the study of mechanical processing, cutting force is obtained by stress, strain sensors or dynamometer, which is of higher cost; this paper proposes a cutting force measuring method based on CNC machine tool servo parameters. Measure and obtain current loop servo parameters TCMD and cutting force, build the relationship model through relative error based least square method, and apply this model for cutting force prediction. The experiment results show that the cutting force can be predicted by using the servo parameters, and the relative error based least square prediction model has high precision.

Key words: relative error; servo parameters; least square method; cutting force; prediction

0 引言

在工程研究时, 最小二乘法被广泛用于根据试验数据建立模型, 并将模型用于曲线拟合, 优化分析、趋势预测等^[1-2]。常用的高斯最小二乘法的评价依据是针对等精度数据而言的——观测数据具有

大体相同的绝对误; 这导致对于绝对值较小的数据, 其相对误差就表现得大^[3-4]。工程应用中对模型预测值与实际值之间的相对误差要求较高时, 普通的高斯最小二乘法就无法达到要求, 因此需要对其进行改进, 可采用基于相对误差的最小二乘法进行回归分析^[3-4]。

收稿日期: 2016-04-19; 修改日期: 2016-09-23

基金项目: 江西省教育厅科技计划项目 (GJJ150774)

作者简介: 刘朝晖(1979-), 男, 江西安福人, 副教授, 主要从事机械制造、数控研究(Email: jgsucad@126.com);

肖忠跃(1974-), 男, 江西泰和人, 副教授, 主要从事机械制造、数控研究(Email: xiao_zhongyue@163.com);

肖寿仁(1969-), 男, 江西安福人, 副教授, 主要从事机电一体化研究(Email: xsr72@126.com);

*谢世坤(1973-), 男, 江西永丰人, 教授, 博士, 主要从事机械设计制造研究(Email: xskun@163.com)。

在机械加工工艺研究中,切削力的监测是一种重要的手段。切削力可采用测力仪测量获得,也可通过应力应变传感器采集后处理得到;前者精度高,但价格较贵,使用成本高;后者价格虽然便宜,但是接线方式复杂,精度相对较差^[5]。近年来,随着数控机床技术的发展,数控机床中大量采用数字伺服控制器和集成了内、外置传感器的部件^[6]。采用伺服控制软件可以读取数控机床内部控制参数,而控制参数与电机扭矩等密切相关,其中关系模型尚待继续研究^[7]。

本文中拟对比分析高斯最小二乘法 and 基于相对误差的最小二乘法对伺服参数与切削力数据关系建模,并将基于相对误差的最小二乘法模型应用于连续加工预测分析其精度。

1 原理分析

1.1 基于相对误差的最小二乘法

文献[3-4]中,在分析通过数据组 (x_i, y_i) , $i=1, 2, \dots, N$ 求解一个 $m(m \ll N)$ 次多项式时,高斯最小二乘法总误差计算公式为(1)。其系数求解过程可归结为求解以系数 a_j 为自变量的多元函数 Q 的极值问题,即绝对误差和 Q 的极小值。而在基于相对误差的最小二乘法回归中,其相对误差计算公式为(2)。类似高斯最小二乘法,通过求解 Q 的极值得到系数 a_j ,计算结果能保证相对误差均值极小。测量数据绝对值范围变化较大时,后者方法建立的模型更精确。

$$Q = \sum_{i=1}^N (y_i - \sum_{j=0}^m a_j x_i^j)^2 \quad (1)$$

$$Q = \sum_{i=1}^N \left[\frac{y_i - \sum_{j=0}^m a_j x_i^j}{y_i} \right]^2 \quad (2)$$

1.2 伺服参数与切削力关系

由伺服电机原理可知,除电机输入电流接近0值或达到饱和状态,电机扭矩与电机电流具有较好的关系^[8]。而对于现代数控机床伺服控制系统,一般采用电流环、速度环、位置环的“三环”控制方式。其中电流环与电机输入电流具有线性关系^[7]。

数控系统可直接读取电流环参数,因此可以通过电流环参数对电机扭矩计算分析。以FANUC 16i数控系统为例,其三环控制方式如图1所示,其中TCMD参数为电流环指令扭矩参数,它与电机等效电流呈线性关系^[9]。

由文献[10]可知,电机扭矩 T 与等效电流 I_{rms} 关系如式(3),同时电机扭矩 T 与伺服参数TCMD成正比,即如式(4)所示。文献[11]考虑到摩擦力矩的存在,切削力矩与摩擦力矩关系如式(5);同时对于采用滚轴丝杠传动的伺服轴系统,切削力与切削扭矩的关系如式(6)。

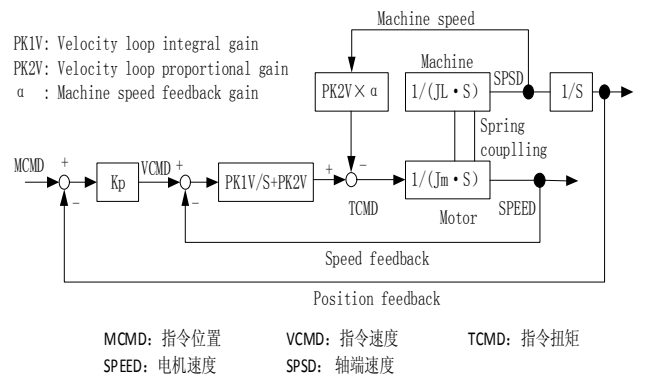


图1 Fanuc 数控系统的三环控制结构

Fig.1 The three-loop control structure of Fanuc CNC system

$$T = K_t * I_{rms} \quad (3)$$

$$T \propto TCMD \quad (4)$$

$$T_c = T - T_{fs} \quad (5)$$

$$F_c = \frac{2\pi i T_c \eta_G \eta_{SM}}{h_{sp}} \quad (6)$$

式中: T —电机输出扭矩; K_t —电机常数; I_{rms} —交流电机的等效电流; J_s —转动部件总惯量; ω_s —电机角速度; T_{fs} —摩擦扭矩; T_c —切削力扭矩; F_{CL} —进给轴上切削力; i —减速比; η_G —机械传动装置效率; η_{SM} —滚珠丝杠螺母副传动效率; h_{sp} —滚轴丝杠螺距。

为了消除摩擦力矩对计算的影响,可以在分别测量空载下和切削状态下的指令扭矩参数,分别记为 $TCMD_i$ 和 $TCMD_w$,由式(3)一式(6),可知切削力 F_c 与 $TCMD_w - TCMD_i$ 具有线性关系,即满足式(7)。

$$F_c = k_1 * (TCMD_w - TCMD_i) + k_0 \quad (7)$$

2 试验研究

2.1 试验设备

实验采用 CINCINNATI 公司 HTC200M 数控车床，其数控系统为 Fanuc16i，Z 轴伺服控制器 $\alpha iF12/3000HV$ （额定功率 3 kW，最大扭矩 35 Nm）。工件材料为 45 钢（HBS 205），外径 $\phi 140$ mm，内径 $\phi 90$ mm，长度 180 mm。工件采用卡盘装夹，顶尖支撑方式，SANDVIK 公司的 DCLNL2525M 刀柄和 SECO 公司 SMG4Ver1 刀片。采用 Kistler 9129A 测量仪监测 Z 轴切削力 F_z 。现场接线如图 2 所示。

2.2 实验方案

a) 外圆纵车试验

拟对对管状工件进行外圆纵车实验。工艺参数 a_p : 0.2~2.5 mm， f : 0.1~0.5 mm/r， V_c : 170~550 m/min。通过 SERVO GUIDE 记录试验中 Z 轴空载和切削状态下的 TCMD 值 $TCMD_i$ 和 $TCMD_w$ ；同时通过 Kistler 测力仪采集记录 Z 轴切削力。基于上述数据，分别采用两种最小二乘法回归得到切削力与 TCMD 参数关系模型，并对比分析模型。

b) 锥面切削试验

在相同的机床上采用相同的刀具对工件材料进行锥面车削加工。其中背吃刀量 a_p 从 2.2 mm 到 0.2 mm 连续变化。通过 SERVO GUIDE 记录试验中 Z 轴空载和切削状态下的 TCMD 值 $TCMD_i$ 和 $TCMD_w$ ；同时通过 Kistler 测力仪采集记录 Z 轴切削力。验证方案 a) 中基于相对误差的最小二乘法模型的正确性。

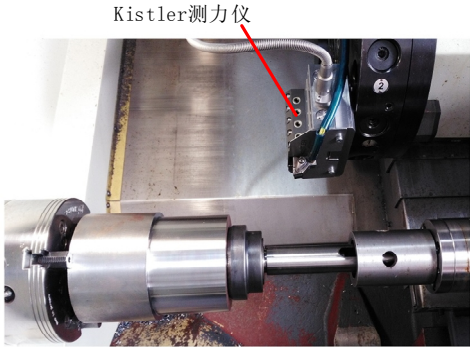
3 实验结果与分析

a) 外圆纵车试验

记录得到切削力 F_z ，空载和切削状态下的 TCMD 值 $TCMD_i$ 和 $TCMD_w$ 如表 1 所示，根据文献[3-4]中所述的回归系数计算方法，得到高斯最小二乘法回归方程（8），基于相对误差的最小二乘法回归方程（9）。



(a) 测试仪器



(b) 切削力测量

图2 试验现场图

Fig.2 Experimental field

表1 外圆纵切试验方案与测量数据

Table 1 Cylindrical longitudinal cutting scheme and measurement data

序号	a_p (mm)	f (mm/r)	V_c (m/min)	FZ (N)	$TCMD_i$ (%)	$TCMD_w$ (%)	序号	a_p (mm)	f (mm/r)	V_c (m/min)	FZ (N)	$TCMD_i$ (%)	$TCMD_w$ (%)
1	0.2	0.1	370	30.19	4.195	4.359	16	1.2	0.4	170	486.4	3.676	6.379
2	0.2	0.2	475	49.65	3.751	4.039	17	1.2	0.5	193	512.7	3.599	6.35
3	0.2	0.3	550	54.44	3.701	3.996	18	1.6	0.2	240	444.4	4.149	6.622
4	0.4	0.1	475	75.83	4.071	4.537	19	1.6	0.3	217	564.5	3.895	6.877
5	0.4	0.2	550	81.19	3.765	4.263	20	1.6	0.4	193	646.9	3.66	7.14
6	0.4	0.3	370	107.1	3.708	4.293	21	1.6	0.5	170	722.9	3.597	7.489
7	0.6	0.1	550	115.1	4.079	4.772	22	2	0.2	193	525.5	4.164	7.107
8	0.6	0.2	370	152.8	3.854	4.683	23	2	0.3	170	708.1	3.96	7.728
9	0.6	0.3	475	163.5	3.766	4.672	24	2	0.4	240	843.2	3.895	8.409
10	0.8	0.2	170	215.4	4.214	5.546	25	2.25	0.225	170	717.9	4.129	7.989
11	0.8	0.3	193	246.7	3.975	5.292	26	2.25	0.3	205	707.7	4.107	7.934
12	0.8	0.4	217	273.1	3.811	5.273	27	2.25	0.375	240	732.8	3.895	7.795
13	0.8	0.5	240	302	3.666	5.27	28	2.5	0.225	205	800.4	3.828	8.078
14	1.2	0.2	217	290.6	4.067	5.825	29	2.5	0.3	240	712.5	4.021	7.803
15	1.2	0.3	240	405.4	3.755	5.979	30	2.5	0.375	170	762	3.833	7.852

$F_z = 189.101 * (TCMD_w - TCMD_i) - 10.857 \quad (8)$

$F_z = 186.513 * (TCMD_w - TCMD_i) - 5.448 \quad (9)$

分别将实验数据代入式（8）和式（9），计算得到高斯最小二乘法与相对误差误差如表 2 所示。可知采用高斯最小二乘法：误差值均值 0.00014303；

相对误差值均值：-1.68%；基于相对误差的最小二乘法：误差值均值：-0.42033；相对误差值均值：0.01%。由此可知基于相对误差的最小二乘法具有更高的相对误差精度。

表 2 外圆纵切试验切削力不同拟合方法误差分析

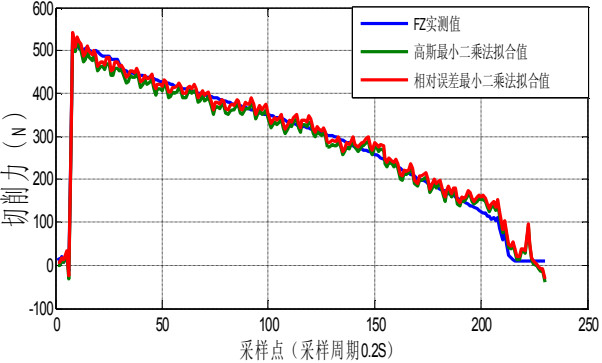
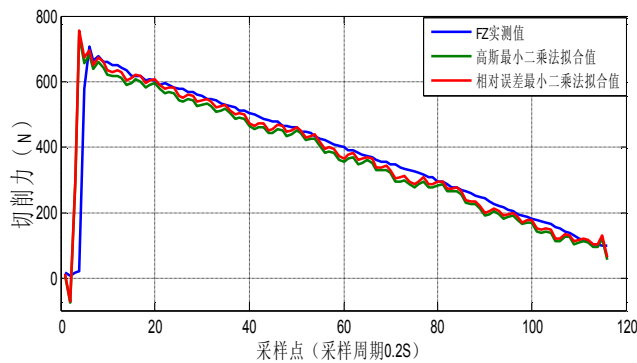
Table 2 Cylindrical longitudinal cutting force fitting error analysis

序 号	高斯最小二乘法		相对误差最小二乘法		序号	高斯最小二乘法		相对误差最小二乘法	
	误差值	相对误差	误差值	相对误差		误差值	相对误差	误差值	相对误差
1	-10.04	-33.24%	-5.05	-16.73%	16	13.86	2.85%	12.31	2.53%
2	-6.05	-12.18%	-1.38	-2.78%	17	-3.33	-0.65%	-5.08	-0.99%
3	-9.51	-17.47%	-4.87	-8.94%	18	12.40	2.79%	11.38	2.56%
4	1.43	1.89%	5.63	7.43%	19	-11.46	-2.03%	-13.77	-2.44%
5	2.13	2.62%	6.24	7.69%	20	0.32	0.05%	-3.30	-0.51%
6	-7.34	-6.85%	-3.44	-3.21%	21	2.24	0.31%	-2.46	-0.34%
7	5.09	4.42%	8.70	7.56%	22	20.18	3.84%	17.97	3.42%
8	-6.89	-4.51%	-3.62	-2.37%	23	-6.44	-0.91%	-10.76	-1.52%
9	-3.02	-1.85%	0.03	0.02%	24	-0.42	-0.05%	-6.75	-0.80%
10	25.63	11.90%	27.59	12.81%	25	1.15	0.16%	-3.37	-0.47%
11	-8.51	-3.45%	-6.51	-2.64%	26	5.17	0.73%	0.64	0.09%
12	-7.48	-2.74%	-5.87	-2.15%	27	-6.16	-0.84%	-10.85	-1.48%
13	-9.54	-3.16%	-8.27	-2.74%	28	-7.60	-0.95%	-13.21	-1.65%
14	30.98	10.66%	31.85	10.96%	29	-8.19	-1.15%	-12.54	-1.76%
15	4.30	1.06%	3.97	0.98%	30	-12.88	-1.69%	-17.83	-2.34%

b) 锥面切削试验

分别选择基于高斯最小二乘法和相对误差的最小二乘法公式（9）作为预测公式，将锥面切削过程测量得到伺服参数 $TCMD_w$ 和 $TCMD_i$ 代入公式计算预测值。得到 F_z 与预测值之间的关系如图 3 所示。其中采用相对误差最小二乘法时，即采用式

（9）时，（a）组参数的相对误差均值为-4.09%；（b）相对误差均值为 1.29%，均具有较高的精度。而使用高斯最小二乘法拟合公式（8）计算时，（a）组参数的相对误差均值为-5.93%；（b）相对误差均值为 1.31%。其计算结果相对误差均高于高斯最小二乘法。



(a) $a_p=2.2 \sim 0.2$ $f=0.2$ $V_c=475\text{m/min}$; (b) $a_p=2.2 \sim 0.2$ 、 $f=0.1$ $V_c=550\text{m/min}$

图 3 预测值与实测值对比分析

Fig. 3 Comparison of predicted and measured values

4 结论

1) 采用基于相对误差的最小二乘法得到的平均相对误差比高斯最小二乘法得到的平均相对误差更小, 更适合试验数据绝对值变化范围大的建模。

2) 可以通过建立伺服参数实现对切削力的模型进行切削力的监测, 试验证明该模型具有较高的精度。

通过伺服参数进行切削力监测的方法, 只需要读取伺服参数, 无需额外使用传感器, 可方便使用, 并适合集成在数控系统。后续的研究中可进一步细化模型, 将模型扩展应用到切削力、切削功率、能耗等监测系统开发中。

参考文献:

- [1] 梁振锋, 康小宁, 宋国兵. 利用最小二乘拟合算法的三相重合闸永久性故障判别[J]. 西安交通大学学报, 2013, 47(6): 85-89.
- [2] 陈昌, 汤宝平, 吕中亮. 基于威布尔分布及最小二乘支持向量机的滚动轴承退化趋势预测[J]. 振动与冲击, 2014, 33(20): 52-56.
- [3] 李颖, 林洪生. 基于相对误差的曲线最小二乘拟合[J]. 沈阳师范大学学报: 自然科学版, 2012, 30(3): 338-342.
- [4] 李成思. 基于相对误差意义下的最小二乘法[J]. 数理统计与管理, 2003, 22(4): 36-40.
- [5] 沈序康, 吕鹏. 车削力的实验验证[J]. 西南大学学报: 自然科学版, 2011, 33(9): 152-156.
- [6] Teti R, Jemielniak K, O'Donnell G, et al. Advanced monitoring of machining operations [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2010, 59(2): 717-739.
- [7] 李郝林, 方键. 机床数控技术[M]. 2版. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [8] 吴朝霞, 张瑾, 化建宁, 等. 控制电机及其技术[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2012.
- [9] B-65404EN/01, FANUC SERVO GUIDE OPERATOR'S MANUAL[Z]. FANUC 公司
- [10] 李斌, 张琛, 刘红奇. 基于主轴电流的铣削力间接测量方法研究[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2008, 36(3): 5-7.
- [11] 龚仲华. FANUC-0iC 数控系统完全应用手册[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2009.