

# 基于 Matlab 的回归分析在注塑翘曲预测中的应用

贾相武<sup>1</sup>,叶欢月<sup>2</sup>,徐冰冰<sup>3</sup>,王 耘<sup>3</sup>,胡树根<sup>3</sup>

(1. 浙江交通职业技术学院 机电系,杭州 311112;2. 浙江交通技师学院 汽车工程系,浙江 金华 321015;  
3. 浙江大学 机械与能源工程学院,杭州 310027)

**摘 要:** 以汽车外饰件观后镜注塑件成形质量中的翘曲量为优化目标,对注射温度、模具温度、注射时间、保压时间、冷却时间等影响翘曲量的工艺参数,以数值模拟得到的数据为实验数据,通过回归分析,建立预测注塑产品翘曲量的数学模型,并比较其预测精度从而得到有效的预测模型,最后达到对注塑工艺条件进行优化的目的。

**关键词:** 翘曲;工艺参数;正交试验;回归分析

**中图分类号:** TQ320.66;TP391.73

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1671-8798(2009)03-0274-04

## Application of regression analysis on warped forecast of plastic parts by using matlab

JIA Xiang-wu<sup>1</sup>, YE Huan-yue<sup>2</sup>, XU Bing-bing<sup>3</sup>, WANG Yun<sup>3</sup>, HU Shu-gen<sup>3</sup>

(1. Department of Mechanical and Electronic Engineering, Zhejiang Institute of Communications, Hangzhou 311112, China; 2. Department of Automotive Engineering, Zhejiang Traffic Technician Institute, Jinhua 321015, China;  
3. College of Mechanical and Energy Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** Taking rear view mirror for example, we set the warpage of the plastic as the goal of the optimization and the injection temperature, mold surface temperature, injecting time, filling pressure, cooling time as experiment genes. Based on the data from numerical simulation, we build mathematic model of injection moulding by regression analysis and compare the effects of the two modles. The results showed that the protective model is effective and the optimization of plastic molding process is realized.

**Key words:** warpage; process parameter; orthogonal experiment; regression analysis

塑料的机械性能和加工性能优良,而且具有质量轻、耐腐蚀、电绝缘性能好、比强度高优点,因而引起了人们的关注,在汽车、家电、仪器仪表、建筑装饰等领域得到了广泛的应用,并有以塑代钢、以塑代木的趋势<sup>[1]</sup>。汽车外饰件也朝着塑料化的趋势发展,

因此对注塑产品的成形工艺提出越来越高的要求。结合传统的 CAE 分析方法,本文基于 Matlab 软件,通过回归分析的方法对注塑件的翘曲预测进行研究。

**收稿日期:** 2009-07-07

**作者简介:** 贾相武(1974—),男,宁夏中宁人,讲师,硕士研究生,主要从事模具工程、机械设计理论依据、设计方法学等研究。

1 注塑成形的回归分析方法

回归分析是以概率论与数理统计为基础迅速发展起来的一种应用性较强的科学方法,是现代应用统计学的一个重要分支,用来处理变量之间的关系,解决预测、控制、生产工艺优化等问题,在科学研究、生产实践的各个方面都有广泛的应用。

注塑成形过程中的多元回归分析<sup>[2]</sup>,即在注塑机、塑料原料和模具确定的情况下,从统计过程控制中用统计学的方法和技术对过程进行预测与监控的观点出发,运用多元统计分析法,对注塑制品质量特性与工艺参数之间的关系进行量化,并建立其统计回归模型。以此定量分析注塑过程工艺参数与成形制品质量之间所存在的内在联系,分析各注塑工艺参数对制品质量特性贡献的大小,实现注塑工艺参数的最优控制,达到对制品质量的可靠预测和控制。该技术在外国已经得到成熟发展<sup>[3,4]</sup>,但在国内还鲜有报道。

2 实验数据的线性回归分析

本试验模型为某汽车观后镜,产品形状如图 1 所示。



图 1 仿真所用模型  
Fig. 1 The model

在注塑成形中,决定注塑产品翘曲量大小的工艺参数主要有<sup>[2]</sup>:注射温度  $T_1$ 、模具温度  $T_2$ 、注射时间  $t_1$ 、保压时间  $t_2$ 、冷却时间  $t_3$ 、注射压力  $P_1$ 、保压压力  $P_2$ 、锁模力  $F$ ,其中注射时间  $t_1$  决定了注射压力  $P_1$ 、保压压力  $P_2$  和锁模力  $F$  3 个参数。所以影响产品成形质量的工艺参数是:注射温度  $T_1$ 、模具温度  $T_2$ 、注射时间  $t_1$ 、保压时间  $t_2$ 、冷却时间  $t_3$ 。现对这些参数与翘曲量大小的关系进行回归分析。

本研究中所用的原始数据是通过注塑模拟软件 Moldflow 得到的,用它们来分析工艺参数对翘曲量的影响。应用正交试验法安排实验数据,通过数值模拟分析得到较优的参数因素及水平如表 1 所示。

表 1 复合参数因素及水平

Table 1 Compound parameter factor and level

水平	注射温度 $T_1/^\circ\text{C}$	模具温度 $T_2/^\circ\text{C}$	注射时间 $t_1/\text{s}$	保压时间 $t_2/\text{s}$	冷却时间 $t_3/\text{s}$
1	200	40	0.5	4	20
2	210	45	1.0	7	30
3	220	50	1.5	10	40
4	230	55	2.0	13	50
5	240	60	2.5	16	60

2.1 回归方程的建立

2.1.1 一般多元回归分析 首先对表 1 中通过数值模拟得到的数据进行一般多元回归分析,在 Matlab 软件中调用语句:[b,bint,r,rint,stats]=regress(y,x)

得到自变量的系数向量  $b=[0.016\ 0\ 0.015\ 7\ -0.020\ 9\ -0.023\ 7\ 0.002\ 3]$ ;

各系数的置信区间:

bint=[0.014 0 0.018 1;0.007 7 0.0236;-0.107 2 0.065 4;-0.036 7 -0.010 6;-0.001 9 0.006 6];

对应个案系数的残差  $r=[0.541\ 5\ 0.301\ 2\ 0.186\ 5\ 0.152\ 1\ 0.077\ 8\ 0.171\ 1\ 0.171\ 7\ 0.219\ 7\ 0.145\ 5\ 0.034\ 9\ 0.201\ 3\ 0.142\ 1\ -0.106\ 3\ -0.157\ 2\ -0.094\ 2\ -0.109\ 7\ -0.120\ 0\ -0.122\ 6\ -0.120\ 0\ -0.096\ 2\ -0.169\ 8\ -0.174\ 4\ -0.094\ 6\ -0.249\ 6\ -0.415\ 3\ 0.331\ 4\ 0.382\ 4\ 0.364\ 2\ 0.130\ 8\ 0.008\ 2\ 0.357\ 8\ 0.109\ 4\ 0.002\ 8\ 0.074\ 7\ 0.085\ 1\ 0.116\ 7\ 0.062\ 3\ -0.000\ 0\ 0.121\ 5\ -0.139\ 8\ 0.013\ 6\ -0.048\ 6\ -0.045\ 9\ -0.201\ 6\ -0.274\ 0\ -0.193\ 1\ -0.241\ 0\ -0.295\ 4\ -0.316\ 7\ -0.170\ 6]$ ;可见,各残差值较小;

Stats 向量的值分别为相关系数的平方、F 值和显著性概率  $p$ 。相关系数平方值  $R^2=20.771\ 7$  显著性概率  $p=0.000\ 0$ ,小于 0.05,故拒绝零假设,认为回归方程中至少有一个自变量的系数不为零,回归方程有意义。故全回归的回归结果为:

$$y=0.016\ 0x_1+0.015\ 7x_2-0.020\ 9x_3-0.023\ 7x_4+0.002\ 3x_5$$

通过一般多元回归分析得到的翘曲量为[3.768 7 3.788 7 3.784 9 3.804 9 3.824 9 3.821 4 3.841 3 3.746 3 4.145 5 4.217 6 3.782 8 4.181 9 4.201 9 4.250 4 4.155 3 4.238 3 4.119 6 4.191 7 4.211 7 4.610 9 4.176 0

4.248 1 4.647 3 4.552 2 4.548 5 3.623 8  
3.528 7 3.927 8 3.947 8 3.944 0 3.964 3  
3.984 2 3.980 5 3.885 5 3.957 7 3.902 0  
3.921 9 3.941 9 4.393 3 4.413 2 3.978 3  
4.377 4 4.334 6 4.330 9 4.350 9 4.318 9  
4.367 4 4.387 3 4.407 3 4.691 4]

2.1.2 回归诊断 由一般多元回归分析得到的翘曲量可以看出,其预测效果并不是很理想,预测翘曲量的大小跟数值模拟得到的结果有较大的差别,所以进行回归诊断<sup>[5]</sup>以提高预测精度。

在 Matlab 软件中调用回归诊断语句:regstats (y,x),得到回归诊断后自变量的系数向量

beta = [3.414 424 249 084 247 0.003 933 0.004 684 -0.053 88 -0.029 011 721 611 722 0.000 148];

所以回归诊断后的结果为:

y = 3.414 424 249 084 247 + 0.003 933x<sub>1</sub> + 0.004 684x<sub>2</sub> -0.053 88x<sub>3</sub> -0.029 011 721 611 722x<sub>4</sub> +0.000 148x<sub>5</sub>

回归数据的拟合值 yhat = [4.25 4.16 4.04 3.95 3.86 4.06 3.97 3.88 4.25 4.30 3.90 4.27 4.18 4.20 4.10 4.20 4.079 4.12 4.04 4.41 4.01 4.06 4.43 4.34 4.22 3.96 3.87 4.24 4.15 4.04 4.26 4.17 4.06 3.96 4.01 4.07 3.98 3.89 4.40 4.31 3.91 4.28 4.32 4.20 4.12 4.21 4.23 4.14 4.05 4.42];可以看出拟合结果的精度得到较大的提高。

2.1.3 逐步回归 5 个成形工艺参数对翘曲量大小的影响并不是相同的,因此希望从中挑选出影响显著的自变量来建立回归模型,这就涉及变量选择的问题。逐步回归是一种从众多变量中有效地选择重要变量的方法<sup>[6]</sup>。通过调用 Matlab 语句:

Stepwise(x,y,inmodel,alpha)  
提供一个交互式画面,通过此工具可以自由地选择变量,进行统计分析。其中 alpha 为显著性水平,默认值为 0.5。得到的回归图如图 2 所示。

图 2 所示窗口中包含的变量有均方差 (RMSE)、回归系数的平方 (R-square)、F 值 (F) 和显著性概率值 (P)。从图中可以看出,变量 x<sub>5</sub> 的 p 值较大,其对模型影响不显著。因此移去变量 x<sub>5</sub>,移去后的模型图如图 3 所示。

图 3 中,红色线(第 5 组数据)表示从模型中移

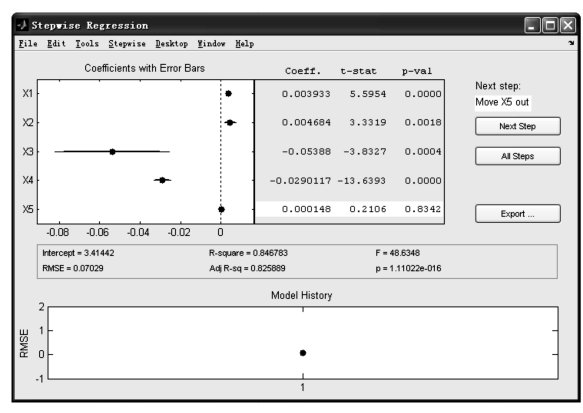


图 2 包含所有变量的模型图

Fig. 2 All of the variable model map

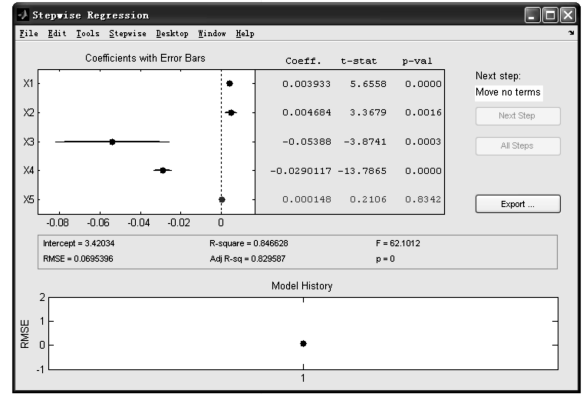


图 3 移去变量 x<sub>5</sub> 后的模型图

Fig. 3 The variable model map Except of x<sub>5</sub>

去的变量,蓝色线(前 4 组数据)表明存在模型中的变量。移去变量 x<sub>5</sub> 后得到的拟合方程为:

y = 3.420 344 249 084 247 + 0.003 933x<sub>1</sub> + 0.004 684x<sub>2</sub> -0.053 88x<sub>3</sub> -0.029 011 721 611 722x<sub>4</sub>

拟合数据为:y = [4.16 4.04 3.95 3.86 4.06 3.97 3.88 4.25 4.30 3.90 4.27 4.184 4.20 4.10 4.20 4.08 4.12 4.04 4.41 4.01 4.06 4.43 4.34 4.22 3.96 3.87 4.24 4.15 4.04 4.26 4.17 4.06 3.96 4.01 4.07 3.98 3.89 4.40 4.31 3.91 4.29 4.32 4.21 4.12 4.21 4.23 4.14 4.05 4.42];可以看出移除变量 x<sub>5</sub> 后得到的回归方程具有较小的均方差,并且变量个数较小,所以选择该模型较适合。

## 2.2 回归方程的显著性检验

方差分析给出了对回归方程进行检验的方差分析表,因为 F = 28.077 7 值大于其临界值,且 P = 0.000 < 0.05,所以回归方程拟合良好,线性回归模型适合对本次样本数据的拟合。

2.3 回归参数的显著性检验

以下给出的是对回归参数的检验结果。因为回归系数对应的  $T$  值都足够大,说明回归系数都是显著的,又  $P$  值都小于 0.05,以 95% 的置信度认为注射温度、模具温度、注射时间、保压时间都为显著项。

2.4 残差分析

残差即是观察值与预测值的差,可以度量用回归方程得到的预测值与实际观察值的偏离程度,是研究回归诊断的最基本、最重要的工具之一。以观测值序号为横坐标、残差为纵坐标所得到的散点图称为时序残差图,调用 Matlab `rcoplot(r,rint)` 画出时序残差图如图 4 所示。

图中用误差图显示残差的 95% 置信区间。可以看到其中有 2 条误差曲线没有通过零线,而其他 48 条均通过。红色(左起第 1 条和第 25 条)的 2 条误差曲线即为异常曲线。另外,残差分布比较随机、离散,未显示特别形状,不呈现有规律的现象。

3 回归分析结果精度检验

通过回归分析得到成形工艺和翘曲量之间的数

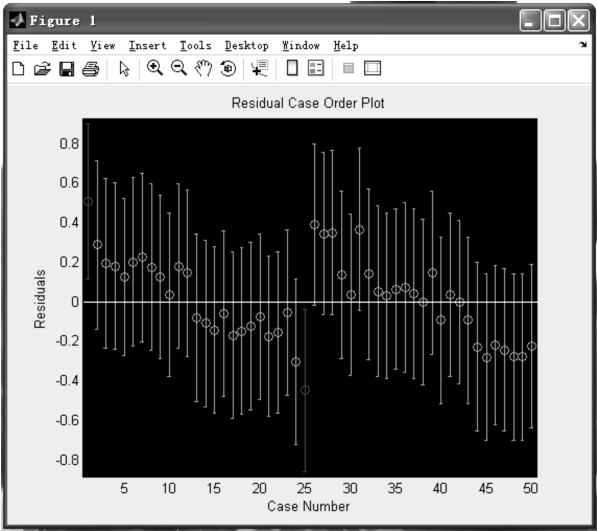


图 4 时序残差图

Fig. 4 The Map of rcoplot

值模型,该模型的最终目的是用来预测不同工艺条件下的翘曲量的大小。笔者设计了一个由 5 组数据组成的检验样本,运用该检验样本对回归模型进行检验,见表 2。

表 2 回归分析模型检验结果

Table 2 The experimental result of regression analysis

水平	注射温度 $T_1/^\circ\text{C}$	模具温度 $T_2/^\circ\text{C}$	注射时间 $t_1/\text{s}$	保压时间 $t_2/\text{s}$	冷却时间 $t_3/\text{s}$	翘曲量/mm	回归检验	检验误差/%
1	205	42.5	0.75	5.5	25	4.204	4.223 5	4.6
2	215	52.5	2.25	5.5	35	4.210	4.230 3	4.8
3	225	47.5	2.25	11.5	25	4.006	4.070 7	16.2
4	225	57.5	1.25	5.5	45	4.377	4.348 4	6.5
5	235	47.5	1.75	5.5	55	4.321	4.315 5	1.3

通过表 2 可以看出,回归模型能在一定程度上预测翘曲量的大小,第 1、2、4、5 组数据误差量较小,但第 3 组数据的误差量很大。

4 结 语

通过实验,在塑料原料、注塑机和模具确定的情况下,从统计过程控制的观点出发,建立了注射温度  $T_1$ 、模具温度  $T_2$ 、注射时间  $t_1$ 、保压时间  $t_2$ 、冷却时间  $t_3$  与翘曲量之间的线性回归方程。这是一种找出变量相关关系的统计方法,只要用生产原始数据经过回归分析得出接近生产实际的回归方程,就能确定变量之间的相关关系和主要影响因素,为调整工艺参数、进行优化控制、指导生产提供理论依据。

参考文献:

[1] 刘健. Moldflow 在塑件翘曲分析中的应用[J]. 模具工业,2007,33(2):50-89.

[2] 苏金明,张莲花,刘波. MATLAB 工具箱应用[M]. 北京:电子工业出版社,2003.

[3] 何晓群,刘文卿. 应用回归分析[M]. 北京:中国人民大学出版社,2001.

[4] NETER John, MICHAEL William Wasserman, KUTNER H. Applied linear regression models[M]. [S. l.]: Richard D. Irwin, INC., 1983:45-60.

[5] 何晓群. 实用回归分析[M]. 北京:高等教育出版社,2008.

[6] 张玲利,吴大鸣,张丽蕾. 注塑成型过程中的多元回归分析[J]. 塑料,2007,36(3):28-50.