

# 正交试验法在机械切削加工质量管理中的应用

李大芳 聂勇

(南京财经大学管科科学与工程学院, 210046, 15151864232, ldfcahty@163.com)

**摘要:** 在当今的制造业加工中, 机械切削加工的质量是对整体产品质量的重要保证。因此提高切削加工过程中的质量是保证最终产品的质量的重要一环。本文针对机械加工中常用的 45 号钢和灰铸铁材料进行试验, 以表面粗糙度和工时为主要衡量指标, 通过正交试验法对两种材料的切削过程影响因素进行分析, 并利用 Minitab 统计软件对试验的过程和结果进行统计分析。针对 45 号钢材料本文设计了三因素三水平的重复试验, 针对灰铸铁材料设计了三因素五水平的正交试验, 分析出两种材料在加工中的最佳参数, 提升了切削加工过程中产品的质量, 这对企业实际生产过程中的质量管理具有一定的参考价值和实践意义。

**关键词:** 正交试验法; 质量管理; 切削加工; 表面粗糙度

## 1 引言

随着机械加工技术的不断进步和革新, 车削加工技术逐渐替代了以磨削为主的加工过程, 车削相较于磨削而言有着速度快, 加工效率高的优点, 因此在机床加工中的应用也是越来越多<sup>[1]</sup>。当下对切削加工的要求也在不断提高, 如果只靠一线工人的操作经验或者查看加工手册进行加工参数的选择, 那么对零件的加工质量和加工效率是没有办法保证的。现在很多加工的产品都是新产品, 企业在以前的生产中可能并没有遇见过, 所以此时依靠经验或者查看历史资料的方法并不能解决生产中参数选择的问题, 此时必须要有一个具有广泛应用的方法来解决这样的问题。

正交实验法是在实际应用中适用范围非常广的一种试验设计方法, 它的优越之处是以部分试验代替全面试验, 因此使用正交实验法来根据特定的材料特性来确定合适的切削参数, 能够在一定程度上节约材料成本和时间。本文选取了机械加工中常用的 45 号钢和灰铸铁材料进行研究, 在借助 Minitab 软件的基础上通过使用正交试验法来探索出在切削加工中提高产品质量的参数组合, 确定实际切削加工中各参数的重要性排序, 解决在生产加工中参数选择不准确的问题, 用以提升企业的产品质量。

## 2 研究现状

近年来, 机械加工中对材料本身和其加工质量的相关研究受到学者们越来越多的关注。朱冰等[2]应用正交试验设计的方法, 以切割过程中的三个影响因素为试验的主要研究对象, 确定了螺纹铣削加工中的关键参数指标。陈婷婷[3]利用不同的加工刀具对灰铸铁等常用金属材料的加工过程进行研究, 并且借助遗传算法对加工工艺进行分析, 保证了产品质量并且降低了实际企业的加工成本。郑伶俐、高天友[4]利用加工试验平台, 针对 45 号钢材料进行加工过程分析, 在充分研究加工过程中的影响因素的基础上, 通过建立产品部件的加工预测模型来分析生产效率和保证产品质量。王玉龙[5]采用实际加工实验和模拟仿真研究相结合的方法对灰铸铁材料的切割过程进行了研究, 在分析影响切削力和表面质量的原因基础上, 运用稳健性设计的方法, 对加工过程参数进行了优化, 达到了优化实验设计的目的。

综上所述可以看出, 机械加工行业中, 现有文献中的研究更侧重于理论部分, 在实际操作方面并不具有简单易行的特点, 因此在现实生产中的应用范围较小。本文利用正交试验法对 45 号钢和灰铸铁的加工工程进行研究, 详细分析不同的加工参数的应用过程, 为在实际中应用正交试验法进行质量管理起到参考作用。

### 3 正交试验设计在机械切削加工中的应用与分析

#### 3.1 45号钢表面粗糙度的影响分析

##### 1. 本次试验探讨的问题及衡量指标

本次试验通过运用正交试验法对 45 号钢材进行切削的参数进行研究，以探究出最适合的参数组合，改善实际加工过程中的工艺方案。在实际切削加工中，评价产品加工质量的一个重要指标是表面粗糙度。表面粗糙度是指加工成品的零件表面具有的凹凸不平的程度。零件表面的凹凸之间的距离很小，人眼几乎不能观察到，所以是属于微观层面的变化。表面粗糙度是衡量加工工件的微观几何形状误差的重要指标。因此，本次试验的衡量指标是表面粗糙度，在一定意义上其值越小则表明加工的效果越好。

##### 2. 试验选取的因素和水平

影响表面粗糙度的因素较多，但是大致可以分为稳定因素和动态因素。稳定因素包括切削因素，即本次试验研究的切削速度  $V_c$  (m/min)、每齿进给量  $F_z$  (mm/z)、轴向切深  $A_p$  (mm) 这三大因素<sup>[6]</sup>。动态因素主要包括刀具因素，即刀具的材料、厚度、涂层材料等。还包括加工过程中的随机因素，即温度、震动、切削力等。因为动态因素的不确定性，所以本次试验主要针对稳定因素进行研究。对于每个因素选取三个水平，如表 1 所示。

表 1 45号钢材试验因素水平表

水平	因素		
	切削速度 $V_c$ (m/min)	每齿进给量 $F_z$ (mm/z)	轴向切深 $A_p$ (mm)
1	90	0.08	1
2	100	0.10	1.5
3	110	0.12	2

##### 3. 正交表的生成和试验

本次试验有三个影响因素，每个因素都选择了三个水平，因此选择三水平的正交表。由于本次试验不考虑交互作用，所以可以选用  $L_9$  ( $3^4$ ) 正交表，并进行重复试验来减小误差。根据生成的正交表安排试验因素，形成试验方案，并记录试验结果。为了降低试验过程中的系统误差提高试验精度，本次试验进行两组重复试验，取两次试验的均值为最终值。同时试验时可将试验的顺序随机进行，以减少系统误差。试验结果如图 1 所示。

图 1 45号钢加工的试验结果

	A切削速度 $V_c$ (m/min)	B每齿进给量 $F_z$ (mm/z)	C轴向切深 $A_p$ (mm)	表面粗糙度1Ra (nm)	表面粗糙度2Ra (nm)	均值
1	1	1	1	1.25	1.31	1.28
2	1	2	2	1.52	1.60	1.56
3	1	3	3	1.71	1.75	1.73
4	2	1	2	0.93	0.97	0.95
5	2	2	3	1.38	1.32	1.35
6	2	3	1	1.44	1.52	1.48
7	3	1	3	1.19	1.11	1.15
8	3	2	1	1.26	1.38	1.32
9	3	3	2	1.45	1.37	1.41

##### 4. 对结果进行极差分析

极差分析即直观分析，是指将因素和对应的水平用图表的方式表示出来，综合比较后确定最佳方案的方法，是对正交试验结果进行分析的最常用、最直观的方法。在进行极差分析时，如果某一

因素的水平平均值间的极差越大，则说明该因素对于表面粗糙度的影响越显著，此因素越重要。

根据正交试验结果计算 $K_{jm}$  的值。 $K_{jm}$  表示第  $j$  列因素的第  $m$  水平试验指标平均值。以第一列因素切削速度为例，计算方法如下：

$$KA1=(1.28+1.56+1.73)/3=1.523$$

$$KA2=(0.95+1.35+1.48)/3=1.260$$

$$KA3=(1.15+1.32+1.41)=1.293$$

利用 Minitab 直接计算出均值响应表和各因素与指标的关系趋势图，分别如下图所示：

水平	A切削速度 度 $V_c$ (m/min)	B每齿进给 量 $F_z$ (mm/z)	C轴向切 深 $A_p$ (mm)
1	1.523	1.127	1.360
2	1.260	1.410	1.307
3	1.293	1.540	1.410
Delta	0.263	0.413	0.103
排列	2	1	3

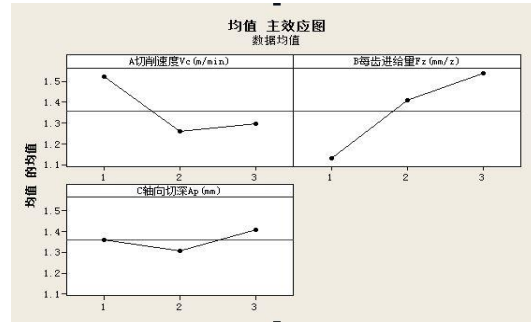


图 2 45 号钢试验的均值响应表

图 3 45 号钢试验的均值主效应图

根据图 2 可知，在此零件的切削过程中各因素对表面粗糙度的影响的大小关系为：每齿进给量（因素 B）>切削速度（因素 A）>轴向切深（因素 C），显然每齿进给量为此次试验的最主要的因素。根据正交试验设计的特性全面可知，对 A1、A2、A3 来说，三组试验的试验条件是完全一样的，所以其试验得出的结果可进行直接比较。如果因素 A 对试验指标无影响时，那么  $KA1$ 、 $KA2$ 、 $KA3$  的均值应该相等，但  $KA1$ 、 $KA2$ 、 $KA3$  的均值实际上不相等。说明，A 因素的水平变动对试验结果有影响。而  $KA1 > KA3 > KA2$ ，因此 A2 为 A 因素的最优水平。以此类推，不难发现 B1、C2 分别为 B 因素和 C 因素的最优水平，所以最优水平组合为 A2B1C2，即切削速度 100m/min、每齿进给量 0.08mm/z、轴向切深 1.5mm。根据图 3 可知，在本次试验选定的范围内，零件的表面粗糙度随着每齿进给量的上升而上升；而对于切削速度和轴向切深的增加，表面粗糙度都呈现出先下降后上升的趋势，这些趋势为进一步的试验指明方向。

### 5. 对结果进行方差分析

以表面粗糙度为指标进行方差分析，运用 Minitab 软件得到下图。

来源	自由度	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
A切削速度 $V_c$ (m/min)	2	0.24671	0.24671	0.12336	35.17	0.000
B每齿进给量 $F_z$ (mm/z)	2	0.53604	0.53604	0.26802	76.42	0.000
C轴向切深 $A_p$ (mm)	2	0.03204	0.03204	0.01602	4.57	0.036
误差	11	0.03858	0.03858	0.00351		
合计	17	0.85338				

图 4 45 号钢试验的方差分析

由上图的分析结果可知，切削速度（因素 A）、每齿进给量（因素 B）的 p 值均无限趋近于 0，这两个因素是影响表面粗糙度的高度显著因素，轴向切深（因素 C）的 p 值小于 0.05，但是大于 0.01，为显著因素。此结果与极差分析的结果基本吻合。

### 3.2 灰铸铁表面粗糙度和工时的影响分析

#### 1. 本次试验探讨的问题及衡量指标

本次试验选择了工业制造中常用的原料灰铸铁 HT200 进行试验，通过正交试验的方法探究出一

定范围内加工此种原料的最佳参数组合，节约单件加工时间，提升加工效率。本次试验选择了两个衡量指标分别为工时和表面粗糙度。工时表示加工单件零件所需的加工时间；表面粗糙度是衡量加工质量的重要指标。

## 2. 试验的因素和水平

本次试验主要切削速度  $V_c$  (m/min)、每齿进给量  $F_z$  (mm/z)、轴向切深  $A_p$  (mm) 三个因素考察其对零件质量和工时的影响。同时对于每个因素选取五个水平，如表 2 所示。

表 2 灰铸铁的因素水平表

水平	因素		
	切削速度 $V_c$ (m/min)	每齿进给量 $F_z$ (mm/z)	轴向切深 $A_p$ (mm)
1	80	0.05	1
2	100	0.10	1.5
3	120	0.15	2
4	140	0.20	2.5
5	160	0.25	3

## 3. 正交表的生成和试验

本次试验选取了 5 个水平、3 个因素，由于本次试验不考虑交互作用，所以选用  $L_{25}(5^3)$  正交表。因为本次试验未将交互作用考虑在内，所以在进行表头设计时可以随意放置试验的三个影响因素于各列中，每一个因素占据表格中的一列，剩余列作为误差列。按照生成的正交表安排试验的方案完成试验后将试验结果记录在正交表中，结果如下图所示：

A 切削速度 $V_c$ (m/min)	B 每齿进给量 $F_z$ (mm/z)	C 轴向切深 $A_p$ (mm)	误差1	误差2	误差3	工时 $t$ (s)	表面粗糙度 $R_a$ (mm)
1	1	1	1	1	1	270	0.99
1	2	2	2	2	2	261	1.11
1	3	3	3	3	3	263	1.26
1	4	4	4	4	4	238	1.44
1	5	5	5	5	5	222	1.66
2	1	2	3	4	5	257	1.03
2	2	3	4	5	1	241	1.17
2	3	4	5	1	2	232	1.34
2	4	5	1	2	3	224	1.54
2	5	1	2	3	4	249	1.28
3	1	3	5	2	4	254	1.09
3	2	4	1	3	5	237	1.24
3	3	5	2	4	1	220	1.42
3	4	1	3	5	2	243	1.19
3	5	2	4	1	3	231	1.36
4	1	4	2	5	3	223	1.15
4	2	5	3	1	4	215	1.31
4	3	1	4	2	5	236	1.11
4	4	2	5	3	1	227	1.27
4	5	3	1	4	2	204	1.45
5	1	5	4	3	2	218	1.21
5	2	1	5	4	3	211	1.04
5	3	2	1	5	4	201	1.18
5	4	3	2	1	5	196	1.35
5	5	4	3	2	1	183	1.55

图 5 灰铸铁试验的正交表

## 4. 对结果进行极差分析

(1) 首先以工时为指标对试验结果进行极差分析。利用 Minitab 软件得到了如下的均值响应表以及对应的因素与指标的关系趋势图。

水平	A切削速度 度Vc (m/min)	B每齿进给 量Fz (mm/z)	C轴向切 深Ap (mm)
1	248.8	244.4	241.8
2	240.6	233.0	235.4
3	237.0	228.4	229.6
4	221.0	225.6	222.6
5	201.8	217.8	219.8
Delta	47.0	26.6	22.0
排序	1	2	3

图 6 工时的均值响应图

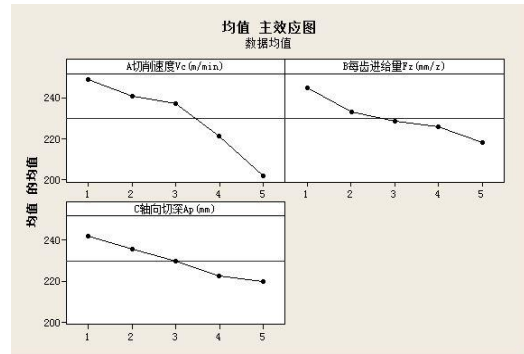


图 7 工时的因素趋势图

根据图 6 可知，在此零件的加工过程中各因素对工时的影响的大小关系为：切削速度（因素 A）> 每齿进给量（因素 B）> 轴向切深（因素 C），显然切削速度为此次试验的最主要的因素，这一点也与实践经验相符合。在工人的能力范围内，随着切削速度的提高，每个零件的加工时间是必然会缩短的，但是相对的工人加工的产品质量可能没有办法得到保障。分析均值响应表可知本次试验的最优水平组合为 A5B5C5，即切削速度 160m/min、每齿进给量 0.25mm/z、轴向切深 3mm。根据图 7 可知，在本次试验选定的范围内，加工零件的工时随着切削速度、每齿进给量和轴向切深的上升而下降，显然在试验选择的范围内零件的加工工时并没有达到最佳，这表明在实际加工中还可能存在着更好的试验组合，对工时的研究可以进一步试验。

(2) 其次再以表面粗糙度为指标进行极差分析。在 Minitab 软件中运用上述方法计算出均值响应表和对应的因素与指标的关系趋势图，分别如下图所示。

水平	A切削速度 度Vc (m/min)	B每齿进给 量Fz (mm/z)	C轴向切 深Ap (mm)	误差1	误差2	误差3
1	1.293	1.093	1.121	1.280	1.271	1.281
2	1.271	1.174	1.191	1.261	1.280	1.261
3	1.260	1.262	1.265	1.271	1.251	1.269
4	1.258	1.358	1.344	1.260	1.279	1.260
5	1.267	1.461	1.428	1.277	1.269	1.279
Delta	0.034	0.368	0.307	0.020	0.029	0.021
排序	3	1	2	6	4	5

图 8 表面粗糙度的均值响应表

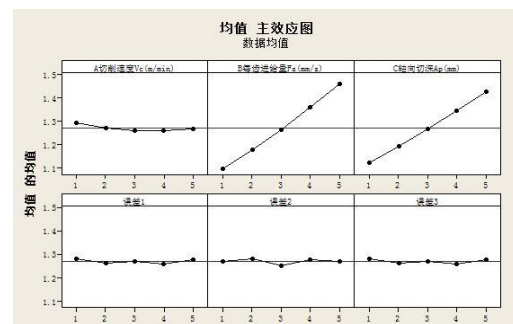


图 9 表面粗糙度的因素趋势图

根据均值响应表可知，在此零件的加工过程中各因素对表面粗糙度的影响的大小关系为：每齿进给量（因素 B）> 轴向切深（因素 C）> 切削速度（因素 A），不难发现每齿进给量为此次试验的最主要的因素。分析均值响应表可知本次试验的最优水平组合为 A4B1C1，即 140m/min、每齿进给量 0.5mm/z、轴向切深 1mm。根据图 9 可知，在本次试验选定的范围内，加工零件的表面粗糙度随着切削速度的上升呈现出先下降后上升的趋势，而其随着轴向切深、每齿进给量的上升呈现出急剧上升的趋势，因此对于表面粗糙度而言，轴向切深和每齿进给量可以尽量小一些，来达到降低零件的表

面粗糙度的目的，从而提升质量。

### 5. 对结果进行方差分析

(1) 以工时为指标对试验结果进行方差分析，通过 Minitab 软件生成方差分析表，具体过程可参看上文，具体结果如下图：

来源	自由度	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
A 切削速度 $V_c$ (m/min)	4	6954.56	6954.56	1738.64	38.37	0.000
B 每齿进给量 $F_z$ (mm/z)	4	1934.96	1934.96	483.74	10.68	0.001
C 轴向切深 $A_p$ (mm)	4	1636.16	1636.16	409.04	9.03	0.001
误差	12	543.68	543.68	45.31		
合计	24	11069.36				

图 10 工时的方差分析

由上图的分析结果可知，切削速度（因素 A）的 p 值无限趋近于 0，而每齿进给量（因素 B）和轴向切深（因素 C）的 p 值也接近于 0，所以这三个因素都是工时的高度显著因素，但是切削速度的显著性略高于其他两个影响因素，不难看出此结果也与上文的极差分析的结果相吻合。

(2) 以表面粗糙度为指标进行方差分析，运用 Minitab 软件得到下图：

来源	自由度	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
A 切削速度 $V_c$ (m/min)	4	0.003848	0.003848	0.000962	1.87	0.180
B 每齿进给量 $F_z$ (mm/z)	4	0.423205	0.423205	0.105801	205.72	0.000
C 轴向切深 $A_p$ (mm)	4	0.295738	0.295738	0.073934	143.76	0.000
误差	12	0.006172	0.006172	0.000514		
合计	24	0.728963				

图 11 表面粗糙度的方差分析

由上图的分析结果我们可以看出，轴向切深（因素 C）、每齿进给量（因素 B）的 p 值均无限趋近于 0，所以这两个因素是表面粗糙度的高度显著因素，然而切削速度（因素 A）的 p 值大于 0.05，所以在本次试验所选择的范围内，切削速度并不是高度显著因素。而且不难发现，三个因素在试验中都有较好的显著性。我们从图 9 中也能印证此结论。

### 3.3 45 号钢和灰铸铁的试验结果对比分析

针对此次试验的研究对象 45 号钢和灰铸铁而言，由于二者一个是塑性材料而另一个是脆性材料，两者本身的物理属性就存在着一定的差异，因此在不同的切削参数的作用下对二者的表面粗糙度影响区别也较为明显，具体表现为：对于 45 号钢而言，零件的表面粗糙度随着每齿进给量的上升而上升，而对于切削速度和轴向切深的增加，表面粗糙度都呈现出先下降后上升的趋势；而对于灰铸铁 HT200 而言，加工零件的表面粗糙度随着切削速度的上升呈现出先下降后上升的趋势，而其随着轴向切深、每齿进给量的上升呈现出急剧上升的趋势。上述结论表面在不同的切削参数的作用下，不同材料的表面粗糙度相对于某一因素的变化趋势是不一样的，从试验得出的结果可知依靠以往加工的经验参数是不能适合于所有的加工材料的。由此可见，不同的材料即便在相同的加工环境下，要想获得较好的表面质量仍然需要进行一定次数的试验获得准确的参数数据，不能单纯依靠以往的

加工经验进行加工。在加工以前未接触到的材料时需要依靠科学的试验方法来确定具体的加工参数，同时可以建立加工参数的数据库，利用本文所述的方法确定各类特定材料在一定范围内的较优的加工数据，使其能够获得较优的产品质量，降低产品的生产时间提升生产效率，以实现企业对产品进行质量管理的目的。

## 4 结论

本文选取了 45 号钢和灰铸铁作为研究的对象，采用了正交试验对其车削的因素的参数组合进行研究，研究的三个因素分别为：切削速度  $V_c$ 、每齿进给量  $F_z$ 、轴向切深  $A_p$ 。并对研究结果进行了极差和方差分析。其中 45 号钢以表面粗糙度为指标，灰铸铁则以表面粗糙度和工时为双指标进行研究，对这两种材料都分别获得了一定范围内的最优参数组合。首先，对于 45 号钢而言，各因素对表面粗糙度的影响的大小关系为：每齿进给量影响最大，切削速度次之，轴向切深最小。此次试验的最佳参数组合为：每齿进给量  $0.08\text{mm/z}$ 、切削速度  $100\text{m/min}$ 、轴向切深  $1.5\text{mm}$ 。其次，对于灰铸铁而言，以工时为指标时，工时随着切削速度、每齿进给量和轴向切深的上升而下降，其最佳的切割参数为切削速度  $160\text{m/min}$ 、每齿进给量  $0.25\text{mm/z}$ 、轴向切深  $3\text{mm}$ ；以表面粗糙度为指标时，其最佳的切削参数为切削速度  $140\text{m/min}$ 、每齿进给量  $0.5\text{mm/z}$ 、轴向切深  $1\text{mm}$ 。在实际加工中，工厂要实现利润的最大化，需要在保证加工质量的同时提升加工的速度，即在确保表面粗糙度合格的前提下，尽可能降低加工的工时，所以综合两种衡量指标而言，此次试验的最佳参数为：切削速度  $140\text{m/min}$ 、每齿进给量  $0.15\text{mm/z}$ 、轴向切深  $2\text{mm}$ 。本次试验针对两种材料选择出的两组切削加工数据在实际的加工中能够得到实际的应用，在很大程度上减少试验的次数，表明了正交试验法在车削加工中的实际应用的可行性和优越性。

### 参考文献

- [1] 杨浩金. 基于重型机床大型零件镗削加工参数优化的研究[D]: 苏州大学, 2012.
- [2] 朱冰, 袁光明, 崔庆. 基于正交试验的螺纹加工技术研究[J]. 现代制造工程, 2016 (10): 108-110.
- [3] 陈婷婷. 基于重型机床大型零件铣削加工性能及参数优化的研究[D]: 苏州大学, 2011.
- [4] 郑伶俐, 高天友. 45 钢车削表面粗糙度试验研究[J]. 新技术新工艺, 2016 (09): 59-61.
- [5] 王玉龙. 灰铸铁 HT250 铣削加工实验与仿真研究[D]: 昆明理工大学, 2016.
- [6] 郭思璇, 武艳, 韩铸完等. 基于正交试验的车铣切削参数优化研究[J]. 科技创新与应用, 2018 (02): 73-74.