

# 高速铣削 GH4169 切削力及表面粗糙度研究

## Study on Cutting Force and Surface Roughness During High-Speed Milling GH4169

西北工业大学现代设计与集成制造技术教育部重点实验室 尉 渊 刘维伟 李晓燕 李 锋

**[摘要]** 使用 TiAlN 涂层硬质合金刀片进行高温合金 GH4169 的高速铣削正交试验,利用最小二乘法对试验数据进行了回归分析,建立了铣削力和表面粗糙度的经验公式,分析了高速铣削高温合金 GH4169 条件下切削参数对切削力和表面粗糙度的影响规律。结果表明:切削深度对切削力影响最大,其次是切削速度和每齿进给量;进给量是影响表面粗糙度的最主要因素,其次是切削深度和切削速度。

**关键词:** 高温合金 高速铣削 切削力 表面粗糙度

**[ABSTRACT]** The orthogonal experiment is designed for high-speed milling superalloy GH4169 by PVD-TiAlN carbide inserts. The empirical formulas of cutting force and surface roughness are established by the least-squares regression method. And the effect of cutting parameters on cutting force and surface roughness is studied. The research results indicate that cutting depth has highly obvious influence on surface roughness, followed by cutting speed and feed rate; Feed rate is the main influence factor of the surface roughness, followed by cutting depth and cutting speed.

**Keywords:** Superalloy High-speed milling Cutting force Surface roughness

高温合金 GH4169 是一种时效硬化的镍-铬-铁基变形合金,具有良好的抗疲劳、抗辐射、抗氧化和耐腐蚀性能,在 600~1000℃ 的高温氧气环境和燃烧腐蚀条件下能够长时间承受较大的应力,在航空航天领域占有很重要的地位,是火箭发动机和航空喷气发动机中的关键材料。但由于 GH4169 在一定温度范围内仍能保持相当高的强度和韧性,而且导热率很低,加上大量金属间化合物的作用,成为最难加工的材料之一<sup>[1-3]</sup>。高速切削加工技术由于具有生产效率高,切削过程中的热量传导少,切削力小,以及能提高加工精度和表面质量等优点,越来越广泛地应用于 GH4169 零部件的加工<sup>[4-5]</sup>。

国内外学者对高温合金的高速铣削技术进行了多方面的研究。Ng 等<sup>[6]</sup>研究了不同涂层刀具在干式切削

条件下高速铣削 Inconel 718 的切削性能; Altin 等<sup>[7]</sup>利用不同形状陶瓷刀具对 Inconel 718 进行了切削试验,研究了切削过程中刀具的磨损形态;季德生等<sup>[8]</sup>利用涂层硬质合金刀具对 Inconel 718 进行了高速正交车削试验,研究了切削参数对切削力的影响规律;肖茂华等<sup>[9]</sup>利用陶瓷刀具对镍基高温合金进行了高速车削试验,主要分析了刀具的沟槽磨损情况。然而,目前国内对于高温合金 GH4169 的高速切削性能的研究还不多,尤其是新型涂层刀具高速铣削 GH4169 的研究更少。

本文采用正交试验法,使用 TiAlN 涂层硬质合金刀片进行了高温合金 GH4169 的高速铣削试验,建立了铣削力和表面粗糙度的经验公式,分析了高速铣削条件下切削参数对切削力和表面粗糙度的影响规律。

### 1 GH4169 高温合金高速铣削正交试验

#### 1.1 试验条件

试件材料为高温合金 GH4169,长方体,几何尺寸为 225mm×90mm×30mm;试验机床选用乔福 VMC850 立式数控加工中心,最大功率为 22kW,主轴最高转速为 8000r/min;刀具选用 SANDVIK 公司生产的 R300-052C5-12M 镶片式立铣刀,刀体直径为  $\phi 52\text{mm}$ ,可安装 4 个圆形刀片;刀片选用 SANDVIK 的 TiAlN 涂层硬质合金铣刀片,刀片直径为 12mm,牌号为 R300-1240E-PL;试验中采用两刃端面铣削,铣削方式为顺铣,采用乳化液冷却。刀体和刀片如图 1 所示。

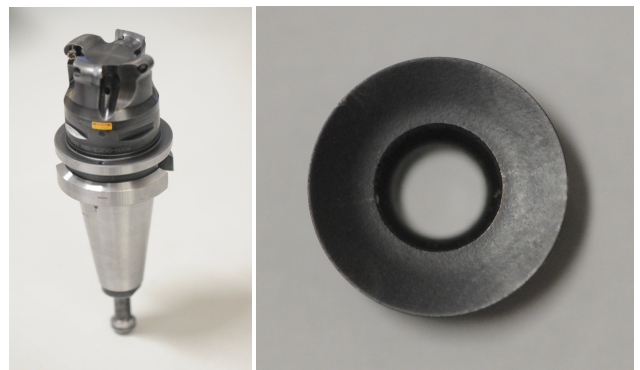


图1 刀体和刀片照片

Fig.1 Photos of cutter body and cutting tip

铣削力测量系统由 Kistler 9255B 三向动态压电式测力仪、Kistler 5017A 电荷放大器和 DEWE3010 数据采集与处理系统组成,铣削力测试系统如图 2 所示。

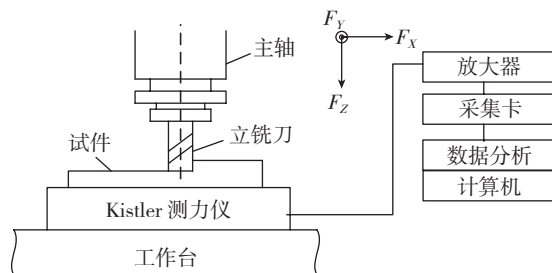


图2 铣削力测试系统  
Fig.2 Test system of milling force

粗糙度测量采用北京时代公司的 TR240 表面粗糙度仪,每组参数下选取 6 个点测量粗糙度值,取平均值作为最终结果,如图 3 所示。取样长度为 0.8mm,评定长度为 4mm。

## 1.2 试验方案

对于镍基合金的高速切削,切削速度应该大于 50 m/min<sup>[10]</sup>,本文针对的是高温合金 GH4169 高速精加工时的铣削性能研究,试验中切削参数的选取见表 1。

采用 3 因素 3 水平正交试验的方法进行高温合金 GH4169 高速铣削试验,并测量其铣削力大小和表面粗糙度值,试验方案及结果如表 2 所示。将试件首先加工成 9 个等宽台阶,每个台阶宽 25mm、高 0.5mm,每个台阶完成 1 组参数的加工,如图 3 所示。

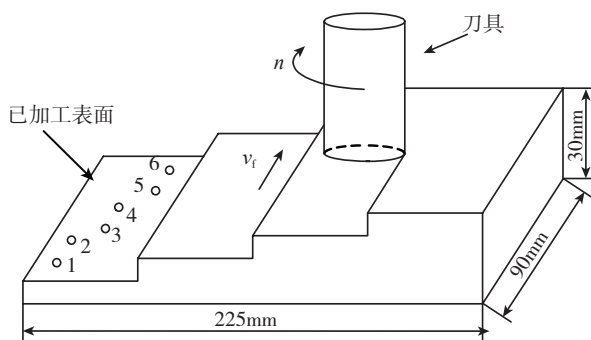


图3 表面粗糙度测量过程  
Fig.3 Measurement process of the surface roughness

表1 试验因素及其相应水平

因素	水平		
	-1	0	1
轴向切深 $a_p/\text{mm}$	0.1	0.3	0.5
铣削速度 $v_c/(\text{m}\cdot\text{min}^{-1})$	70	90	110
每齿进给量 $f_z/(\text{mm}\cdot\text{z}^{-1})$	0.02	0.04	0.06

表2 试验方案及结果

序号	$a_p/\text{mm}$	$v_c/(\text{m}\cdot\text{min}^{-1})$	$f_z/(\text{mm}\cdot\text{z}^{-1})$	$F_x/\text{N}$	$F_y/\text{N}$	$F_z/\text{N}$	$R_a/\mu\text{m}$
1	0.1	70	0.02	63	47	178	0.234
2	0.1	90	0.04	79	56	227	0.290
3	0.1	110	0.06	85	48	190	0.344
4	0.3	70	0.04	198	90	301	0.220
5	0.3	90	0.06	176	98	325	0.189
6	0.3	110	0.02	99	64	297	0.144
7	0.5	70	0.06	372	150	391	0.260
8	0.5	90	0.02	158	96	340	0.149
9	0.5	110	0.04	242	136	420	0.195

## 2 结果与讨论

### 2.1 经验公式的建立

根据最小二乘原理,应用正交回归分析法,得到三向铣削力与切削用量之间的经验模型为:

$$\begin{aligned} F_x &= 10^{4.569} a_p^{0.714} v_c^{-0.623} f_z^{0.538} \\ F_y &= 10^{3.247} a_p^{0.550} v_c^{-0.306} f_z^{0.287} \\ F_z &= 10^{2.665} a_p^{0.410} v_c^{0.097} f_z^{0.104} \end{aligned} \quad (1)$$

得到表面粗糙度的经验模型:

$$R_a = 10^{0.219} a_p^{-0.262} v_c^{-0.258} f_z^{0.376} \quad (2)$$

采用  $F$  值检验法对回归方程的显著性进行检验。 $F$  值检验法规定: 试验因素数为  $m$ , 试验次数为  $n$ , 给定显著性水平为 0.05, 若  $F < F_{0.05}(m, n-m-1)$ , 则称  $Y$  与  $X_i$  间没有明显的线性关系, 回归方程不可信; 若  $F_{0.05}(m, n-m-1) < F < F_{0.01}(m, n-m-1)$ , 则称  $Y$  与  $X_i$  间有显著的线性关系; 若  $F > F_{0.01}(m, n-m-1)$ , 则称  $Y$  与  $X_i$  间有非常显著的线性关系。本文  $m=3, n=9$ , 查  $F$  分布表得  $F_{0.05}(3, 5)=5.41, F_{0.01}(3, 5)=12.1$ 。

从表 3 可以看出, 3 个方向的铣削力回归方程的  $F$  值均大于  $F_{0.01}(3, 5)=12.1$ , 方程非常显著; 粗糙度  $R_a$  的回归方程  $F$  值大于  $F_{0.05}(3, 5)=5.41$ , 方程显著。这表明 3 向切削力和表面粗糙度的回归方程与实际情况拟合较好, 建立的经验公式可信。

### 2.2 切削参数对铣削力的影响规律

由式(1)可以看出, 使用 TiAlN 涂层刀具铣削高温

表3 回归方程方差分析表

差异源	平方和	自由度	均方	$F$ 值	显著性
$F_x$	0.514	3	0.172	84.887	非常显著
$F_y$	0.265	3	0.088	29.729	非常显著
$F_z$	0.133	3	0.044	32.04	非常显著
$R_a$	0.106	3	0.035	8.182	显著

合金 GH4169 时,3 个方向铣削力受切削深度  $a_p$  的影响最大,其次为切削速度  $v_c$  和进给量  $f_z$ 。Z 轴方向铣削力  $F_z$  远大于 X 和 Y 轴方向的力  $F_x$ 、 $F_y$ 。

图 4 为  $f_z=0.04\text{mm/z}$ ,  $v_c=110\text{m/min}$  时铣削力随切削深度的变化曲线。从图中可以看出,铣削力随着切削深度  $a_p$  的增大而逐渐增大。这是因为随着切削深度的增大,刀具与工件接触的圆弧长度增加,会使切削面积增大,所以铣削力一直保持增大趋势。

图 5 为  $a_p=0.3\text{mm}$ ,  $v_c=90\text{m/min}$  时铣削力随进给量的变化曲线,铣削力随着每齿进给量  $f_z$  的增大而增大,  $F_z$  变化幅度很小,从 291N 增加到 326N。从图中可看出,铣削力的增加并不与进给量的增加成正比,这是因为随着每齿进给量的增加,每齿切削厚度增大,所以切削面积增大,铣削力也会随之增大;但同时进给量  $f_z$  增大,使得前刀面上的法向力增加,摩擦角变小,导致剪切角增大,从而引起铣削力减小<sup>[11]</sup>。但前者对铣削力的影响大于后者,因此铣削力保持增大趋势。

图 6 为  $a_p=0.5\text{mm}$ ,  $f_z=0.04\text{mm/z}$  时铣削力随切削速度的变化曲线,切削速度对铣削力  $F_x$ 、 $F_y$  的影响与其他两个参数相反,即铣削力随着切削速度的增加而减小,但变化幅度不大。这是因为随着切削速度的提高,切削温度升高,使得切屑底层软化,形成薄薄的微熔层,切屑

与前刀面的摩擦系数减小,剪切角增大,使切屑的变形系数减小,单位切削面积上的切削力也相应减小,从而引起铣削力的减小。同时,铣削速度的提高导致力的高频冲击力逐渐增大,但高频冲击力的增大程度小于单位切削面积切削力的减小程度,所以铣削力总体呈减小趋势<sup>[12]</sup>。随着切削速度的增加,铣削力  $F_z$  只有略微增大,从 376N 增加到 393N,增幅只有 17N,说明切削速度对铣削力  $F_z$  的影响不大。

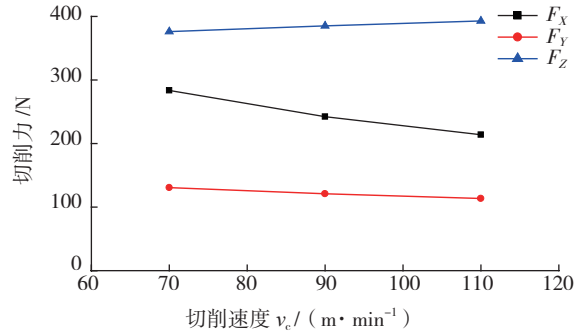


图6 切削力随切削速度的变化曲线  
Fig.6 Changing curves of cutting force with cutting speed

### 2.3 切削参数对表面粗糙度的影响规律

表面粗糙度是高速精加工表面质量指标中的一个重要评价参数,粗糙度值的大小直接影响着零件的耐磨性、耐腐蚀性和耐疲劳性,同时也影响着零件的装配精度和质量。影响表面粗糙度的因素很多,其中在其他工艺系统确定的条件下,切削用量的选取是主要因素。由式(2)可以看出,粗糙度受进给量  $f_z$  的影响最大,其次为切削速度  $v_c$  和切削深度  $a_p$ 。

图 7 为  $a_p=0.5\text{mm}$ ,  $v_c=90\text{m/min}$  时表面粗糙度随进给量的变化曲线,从图中可以看出每齿进给量  $f_z$  在 0.02~0.06mm/z 间变化时,表面粗糙度值逐渐增大,并在 0.143~0.216  $\mu\text{m}$  范围内变化。这是因为随着进给量增加,一方面加工单位体积材料时走刀次数减少,增加了工件表面的残留高度,从而使表面粗糙度有所增加;另

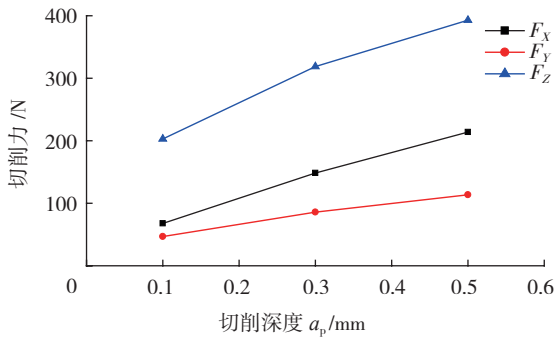


图4 切削力随切削深度的变化曲线  
Fig.4 Changing curves of cutting force with cutting depth

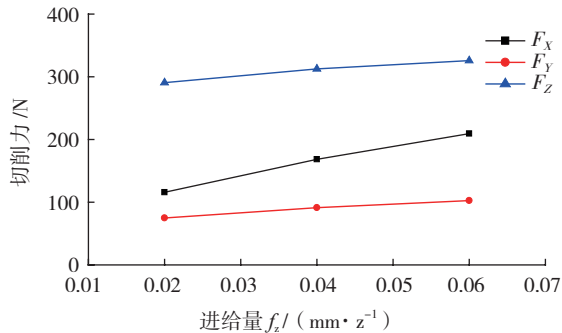


图5 切削力随每齿进给量的变化曲线  
Fig.5 Changing curves of cutting force with feed rate

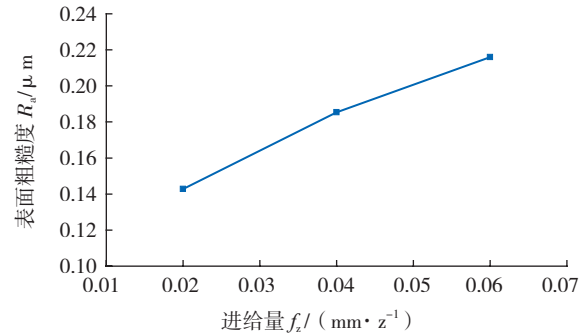


图7 表面粗糙度随每齿进给量的变化曲线  
Fig.7 Changing curves of surface roughness with feed rate

一方面,进给量的增加使得切削厚度增加,表面金属塑性变形的体积增加,切削力也随之增加,从而导致表面粗糙度增加<sup>[13-14]</sup>。

图8为 $f_z=0.02\text{mm/z}$ ,  $v_c=110\text{m/min}$ 时表面粗糙度随切削深度的变化曲线,从图中可以看出切削深度 $a_p$ 在 $0.1\sim 0.5\text{mm}$ 间变化时,表面粗糙度值逐渐减小,并在 $0.207\sim 0.136\mu\text{m}$ 范围内变化。这与正常切削不一样。正常切削条件下,随着切削深度的增加,切削面积增大,切削力也增大,加之前刀面塑性变形也会增大,由此导致试件的表面粗糙度值增大。但是这里则不然,一方面,试验的参数选取较小,而且变化范围也比较小;另一方面,由于刀片的形状特殊,使得前刀面塑性变形小,后刀面的碾压作用明显,导致了这样的结果。

图9为 $a_p=0.3\text{mm}$ ,  $f_z=0.04\text{mm/z}$ 时表面粗糙度随切削速度的变化曲线,从图中可以看出切削速度 $v_c$ 在 $70\sim 110\text{m/min}$ 间变化时,表面粗糙度值呈减小趋势,但趋势平缓,在 $0.226\sim 0.201\mu\text{m}$ 范围内变化。这是因为随着切削速度的增加,大量的切削热被切屑带走,传递给加工表面的热量不断减少,工件材料的塑性变形也减少,因而表面粗糙度有降低的趋势。另外,随着切削速度增大,切削区温度增加,使金属韧性增加,在切削热的

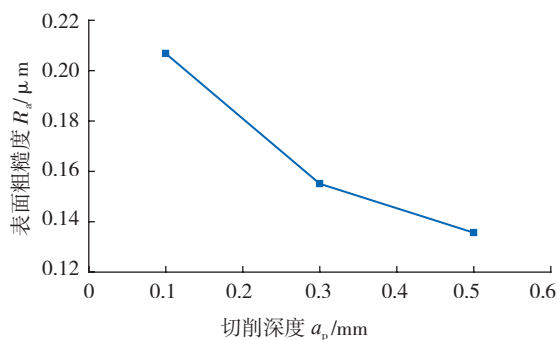


图8 表面粗糙度随切削深度的变化曲线

Fig.8 Changing curves of surface roughness with cutting depth

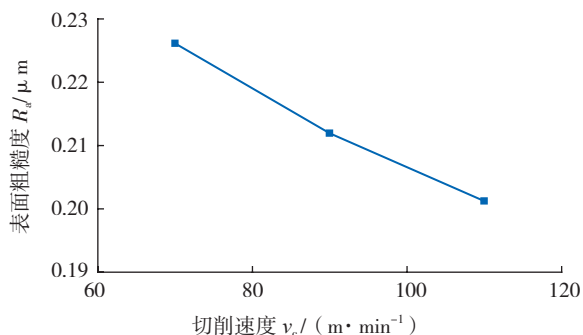


图9 表面粗糙度随切削速度的变化曲线

Fig.9 Changing curves of surface roughness with cutting speed

高温作用下,切屑底层软化,这就使摩擦系数降低,切削力降低,切削过程平稳,工件表面粗糙度值进一步降低<sup>[15]</sup>。

### 3 结论

通过TiAlN涂层硬质合金刀片高速铣削高温合金GH4169试验研究了切削用量对切削力和表面粗糙度的影响规律,得出了以下结论。

(1)涂层刀具高速铣削镍基高温合金GH4169过程中,3向力中Z轴方向切削力 $F_z$ 最大;切削深度对切削力影响最大,其次是切削速度和每齿进给量。

(2)进给量是影响高温合金GH4169高速铣削加工中表面粗糙度的最主要因素,其次是切削速度和切削深度。

(3)切削力随着每齿进给量和切削深度的增加而增大,X和Y轴切削力 $F_x$ 、 $F_y$ 随着速度的增加而减小,Z轴切削力 $F_z$ 随切削速度的增加略微增大,但增加幅度很小;表面粗糙度随着进给量增加而增大,但切削速度和切削深度对表面粗糙度的影响与进给量的影响相反。

### 参考文献

- [1] Ezugwu E O, Bonney J, Yamane Y. An overview of the machinability of aeroengine alloys. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, 134: 233-253.
- [2] Dudzinski D, Devillez A, Moufki A, et al. A review of developments towards dry and high speed machining of Inconel 718 alloy. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2004, 44(4): 439-456.
- [3] 师昌绪,李恒德,周廉.材料科学与工程手册.北京:化学工业出版社,2004.
- [4] 艾兴.高速切削加工技术.北京:国防工业出版社,2003.
- [5] Schulz H, Abeled E, 何宁.高速加工理论与应用.北京:科学出版社,2010.
- [6] Ng E G, Lee D W. High speed ball nose end milling of Inconel 718. *CIRP Annals—Manufacturing Technology*, 2001, 49(1): 41-46.
- [7] Altin A, Nalbant M, Taskesen A. The effects of cutting speed on tool wear and tool life when machining Inconel 718 with ceramic tools. *Materials & Design*, 2007, 28: 2518-2522.
- [8] 季德生,黄雪红.高速车削Inconel 718切削力的试验研究. *工具技术*, 2012, 46(2): 23-25.
- [9] 肖茂华,何宁,李亮,等.陶瓷刀具高速切削镍基高温合金沟槽磨损试验研究. *中国机械工程*, 2008, 19(10): 1188-1192.
- [10] Schulz H, Moriwaki T. High-speed machining. *CIRP Annals—Manufacturing Technology*, 1992, 41(2): 637-643.
- [11] 龙震海,王西彬,袁光明.高速铣削Mg-Al-Zn-Mn系镁合

(下转第76页)

伤的故障特征。停机后,经过维修人员仔细检查,发现丝杠在该位置确实存在轻微损伤。

由时域图可看出,虽然丝杠在3个方向振动的总体趋势相同,但是不同方向振幅相差很大,异常点的幅值突变程度也不相同;频域图中,在振动异常点出现的新频率成分在3个方向表现也不尽相同。因此,对丝杠副的3个方向同时进行监测是必要的。

综合以上分析,可以确定滚珠丝杠传感器布局方案(如图10):在螺母座上靠近丝杠螺母的位置布置1个三向振动传感器;在两端轴承座沿丝杠径向分别布置1个单向振动传感器,靠近轴承的位置布置1个温度传感器。

#### 4 导轨副部件的传感器布局

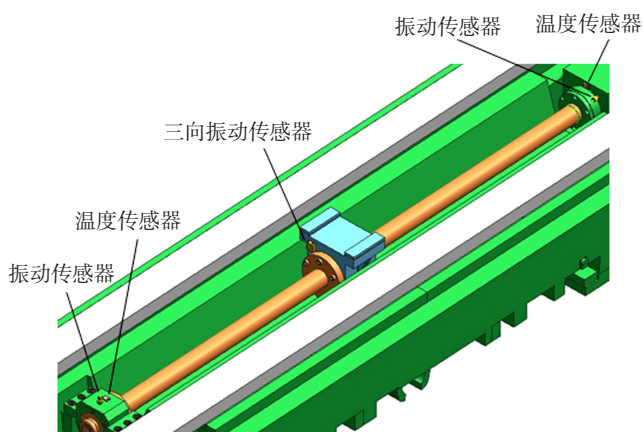


图10 滚珠丝杠副的传感器布局方案  
Fig.10 Sensor placement of screw

直线导轨和镶钢导轨都属于滚动导轨,工作原理基本相同,即依靠导轨副之间的滚动摩擦,通过导轨滑块的循环式滚动体与导轨配合实现相对运动。由于滚动导轨副安装得比较紧凑,受空间限制,可以将振动传感器安装在导轨滑块或者滑块的安装座上,以监测导轨副的工作状态。

为确定导轨副传感器安装的合理位置,可以利用有限元分析软件对不同位置的瞬态振动情况进行比较,分析方法与滚珠丝杠相似,在此不再赘述。

导轨副传感器布局方案如图11所示:将三向振动传感器安装在导轨滑块上,以监测导轨在3个方向的振动情况。

#### 5 结论

传感器布局对获取机床状态特征信号的真实性和准确性有重要影响,是实现机床机械部件故障诊断的基础和关键。本文通过对数控机床机械部件的结构特点、运转方式及故障特征的研究分析,确定以对机床性能影

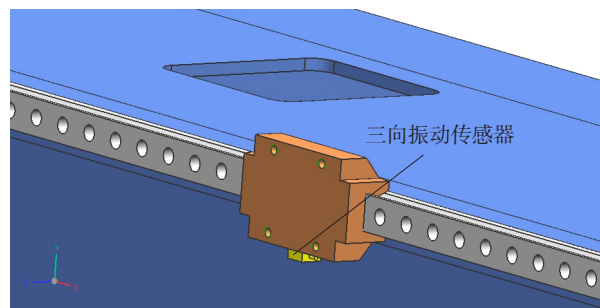


图11 滚动导轨副的传感器布局  
Fig.11 Sensor placement of guide

响最大的机械主轴、丝杠、导轨等传动部件作为机械部件故障诊断的研究重点,以振动、噪声、温度3类特征信号表征机床的主要机械故障,并采用多传感器技术实现对特征信号的提取,确立了数控机床传感器合理布局的通用规则和实施方案。

#### 参考文献

- [1] 罗永顺. 数控机床故障信号分析与特征提取 [D]. 长沙: 中南大学, 2007.
- [2] 张来斌, 王朝晖, 张喜廷, 等. 机械设备故障诊断技术及方法. 北京: 石油工业出版社, 2000: 142-151.
- [3] 陈心昭, 权义鲁. 现代实用机床设计手册. 北京: 机械工业出版社, 2006: 1480-1481.
- [4] 张莹. 数控机床机械诊断方法的研究及应用 [D]. 大连: 大连理工大学, 2005.

(责编 谷雨)

(上接第71页)

金时切削力影响因素析因回归研究. 制造技术与机床, 2004(8): 67-70.

[12] Liu W W, Zhu L J, Shan C W, et al. Effect of cutting parameters on the cutting force in the end milling of GH4169 superalloy// Proceeding of the international conference on E-Product E-Service and E-Entertainment, 2010: 3756-3759.

[13] Ezugwu E O, Fadare D A, Bonneya J, et al. Modelling the correlation between cutting and process parameters in high-speed machining of Inconel 718 alloy using an artificial neural network. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2005, 45(12-13): 1375-1385.

[14] 刘维伟, 李锋, 任军学, 等. 基于标准粒子群算法的GH4169高速铣削表面粗糙度研究. 中国机械工程, 2011, 22(22): 2654-2771.

[15] Arunachalam R M, Mannan M A, Spowage A C. Residual stress and surface roughness when facing age hardened Inconel 718 with CBN and ceramic cutting tools. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2004, 44(9): 879-887.

(责编 谷雨)