

# 数控机床故障特征分析和传感器布局研究

## Research on Fault Feature Analysis and Sensor Placement of CNC Machine

中航工业北京航空制造工程研究所 杨洁 李初晔

**[摘要]** 针对数控机床传动部件的传感器布局展开研究,通过对主轴、丝杠、导轨的故障特征分析,选取振动、噪声、温度3类特征信号表征机床的主要机械故障,结合理论分析、有限元分析、试验论证3种研究方法,确立了数控机床传感器合理布局的实施方案,初步实现了对机械部件故障特征信号的提取。

**关键词:** 数控机床 故障诊断 特征信号 传感器布局

**[ABSTRACT]** This paper researches on optimal sensor placement of the transmission parts of CNC machine. Through the spindle, screw, guide fault features analysis, it selects vibration, noise and temperature as the feature signals to characterize mechanical faults of CNC machine. Combining with theoretical analysis, finite element analysis and experimental validation, optimal sensor placement scheme is established, and the fault feature signal extraction of the CNC machine is preliminarily realized.

**Keywords:** CNC machine Fault diagnosis Feature signal Sensor placement

数控机床是集机、电、液于一体的材料加工设备,功能结构复杂,一旦发生故障,诊断难度大。数控系统的自诊断功能可以解决数控系统及与之相连部件的基本故障,但对于故障率出现最高且成因复杂的机械部件故障却无能为力。

数控机床的机械部分主要包括支撑结构件(如床身、立柱)、主传动系统、进给传动系统、换刀机构、防护装置等。其中,换刀机构、防护装置等辅助部件的动作由PLC和电气控制系统实现控制,可以通过数控系统的自诊断功能完成故障的诊断和预警。支撑结构件是整个机床的基础部件,一般具有足够的刚度和强度,性能稳定,从实际使用情况看,支撑件的开裂非常少见。主传动系统和进给传动系统都属于传动部件,由于传动部件结构复杂,故障原因较多,且传动件一般包裹在机床外壳中,若发生磨损或损坏,无法从外观上直接看出来,因此,传动部件故障是数控机床最难以检测且对机床性

能影响最大的故障之一<sup>[1]</sup>。

机械故障会产生与之对应的各种故障特征信号,如温度、振动、噪声等,特征信号的获取是机械故障诊断的前提和基础,而多传感器技术是获取机械故障特征信号的有效手段。由于传动部件信号获取和分析困难,目前国内所见的数控机床上缺少相应的故障检测装置。本文结合机理分析、试验论证和有限元分析对机床传动部件的故障特征和传感器布局进行深入研究,从而为实现机床的故障诊断迈出关键的一步。

### 1 传动部件的故障特征

主轴是机床实现旋转运动的执行件,一般分为机械主轴和电主轴两种。一些国外品牌的电主轴内自带传感器和信号监测系统,不在本文的研究范围,本文重点针对机械主轴展开研究。机械主轴部件由主轴、电机、主轴箱体和安装在主轴上的齿轮、带轮、轴承、联轴器等组成,其故障主要是由于切削量过大、换向频繁、润滑不良等原因造成的齿轮或轴承损伤。

进给传动系统主要包括滚珠丝杠副和导轨副等。滚珠丝杠副和滚动导轨副的工作原理相似,都是通过滚动体在滚道内的循环滚动实现传动副的相对运动,其主要故障是由于预紧不当、润滑不良、载荷过大等原因造成的滚珠破损、表面损伤、热变形等。

由表1可看出,传动部件的故障一般会在其振动上有所表现,这是因为传动部件在运转过程中会不可避免地产生振动。传动部件在正常工作时,振动参数一般保持在特定的范围内。如果超出这一范围,说明某个传动部位配合运转不良。振动异常反映了机床工作状态的变化,是机械故障诊断的重要信息。通过对振动信号幅值范围和特征频率的分析,可以有效实现对故障的分析和判断,因此本文以振动信号作为故障特征信号的研究重点。

声音来源于物体的振动,因此噪声信号伴随着振动信号而产生。正常工作时,传动部件在运转过程中会产生均匀、规律的声音。如果运转过程中伴随着其他杂乱无章的异常声响,则标志着某一传动部件可能出现了局部损伤。

表1 数控机床传动部件的故障特征<sup>[1-2]</sup>

传动部件	故障形式	故障特征	特征信号
主轴部件	齿轮损伤 齿轮啮合不良 皮带传动不良 轴承损伤 轴损伤 联轴器松动 润滑情况不好	振动异常 噪声异常	振动信号 噪声信号
	轴承损伤 润滑冷却情况不好	发热异常	温度信号
滚珠丝杠部件	丝杠预紧不当 滚珠破损 丝杠损伤 轴承损伤 轴承润滑情况不好	振动异常 噪声异常	振动信号 噪声信号
	轴承损伤 轴承润滑情况不好	发热异常	温度信号
导轨副	导轨面研伤 滚动体滚珠破损 润滑情况不好	振动异常 噪声异常	振动信号 噪声信号

过热现象通常发生在主轴箱、轴承等部位。在正常工作状态下,这些部位应保持一定的工作温度,但如果这些部位的温度超过了规定的工作温度,则表明某一部位存在潜在的故障。如不及时诊断并加以排除,可能会引起零件烧损。

噪声信号和温度信号作为机床的故障特征信号,通过噪声的分贝和温度的数值可以非常直观地表现出机床可能存在的故障。但是由于这两种信号容易受到外界环境的干扰,很难通过单一信号的分析判断出机床是否出现故障以及故障源的位置。因此,本课题将温度信号和噪声信号的监测作为故障诊断的辅助手段。

## 2 机械主轴部件的传感器布局

主轴振动是变速齿轮、前后轴承、刀具切削等多方面振动因素的综合体现,在不同方向上反映出不同的振动特性,一般需要在水平、垂直、轴向3个方向进行检测。由于主轴高速旋转,振动传感器无法安装在主轴表面;而主轴前端盖法兰结构会造成振动的衰减,也不适合安装振动传感器;主轴箱体作为主轴、轴承和变速齿轮的支承,刚性较高,因此可以将传感器布置在主轴箱体前端靠近前轴承的位置(如图1所示)。

噪声传感器可用于监测齿轮、轴承等部件的噪声变化情况。根据噪声分贝值以及对噪声信号的频谱分析,可识别判断部件的故障状态,实现非接触式测量。但噪声传感器受外界因素影响很大,每次测量前必须对机床工作环境的背景噪声进行标定,以过滤背景噪声。因此,

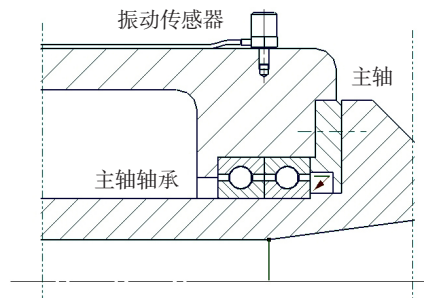


图1 振动传感器安装方式

Fig.1 Installation mode of vibration sensor

噪声传感器主要适用于主轴箱内部,这里结构封闭,受外界噪声影响较小,且有足够的安装空间。

主轴箱温度是机床上温度最高的。在正常工作状态下,主轴箱应保持一定的工作温度。根据 GB/T 9061—1988 的规定,主轴在最高转速下达到稳定温度时,滚动轴承温度不得超过 70℃<sup>[3]</sup>。在主轴箱体靠近前轴承位置安装温度传感器,如果此部位的温度超过了规定的工作温度(通常设定在 60℃左右),即表明主轴箱可能存在潜在的故障。

为准确把握振动传感器的安装位置,利用有限元分析软件对主轴及箱体部分进行瞬态响应分析,模拟在真实切削状态下主轴部件不同位置的瞬态振动情况,通过比较确定振动传感器的合理安装位置。

图2中A、B、C、D为主轴箱上4个标记点,分析这4点在施加三向铣削力状态下的瞬态振动响应值。图3是A、B、C3点沿X方向瞬态响应的比较,其中A点振幅最大,B点次之,C点最小;A、B两点振动波形相似,波谷和波峰明显,C点振动波谷和波峰不明显。图4是A、D两点沿X方向瞬态响应的比较,D点选在整个主轴振动最剧烈的主轴电机上。从瞬态响应曲线来看,A、

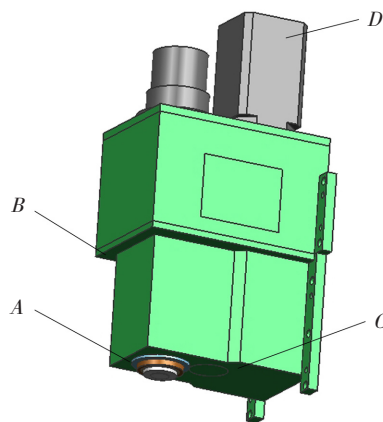


图2 机械主轴部件的标记点

Fig.2 Marked points of spindle

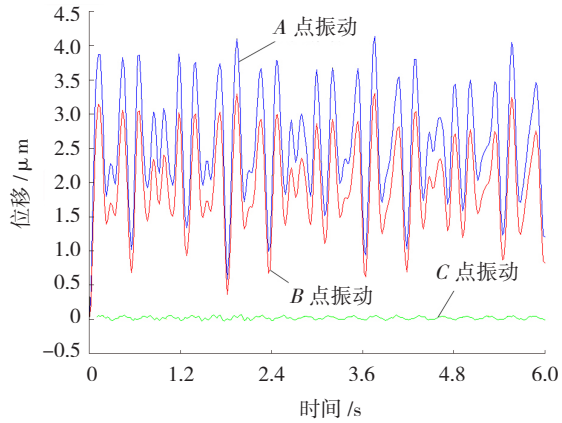


图3 主轴部件A、B、C点的X方向瞬态响应  
Fig.3 Transient response of point A, B, C of spindle in X direction

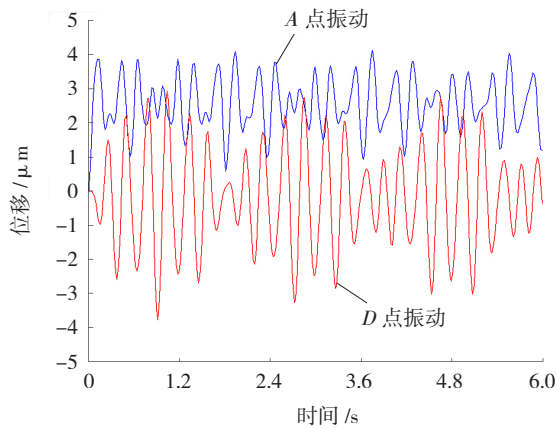


图4 主轴部件A、D点的X方向瞬态响应  
Fig.4 Transient response of point A and D of spindle in X direction

D 两点的振动波形相差很大,说明在电机上监测的振动信号并不能准确反映主轴整体结构的振动情况。由上述分析可知,A、B 点是安装传感器的较佳选点。由于 A 点更接近主轴前端和刀具,且 A 点信号包含了铣削加工及主轴旋转平稳性信号,因此选择 A 点或附近区域安装传感器是合理的。

综合以上分析,确定机床主轴部件的传感器布局方案(图 5):在主轴箱前端靠近前轴承的位置布置 1 个三向振动传感器和 1 个温度传感器,以监测主轴的振动情况和主轴的温度变化;在主轴箱体内布置 1 个噪声传感器,以监测主轴的噪声情况。

### 3 滚珠丝杠部件的传感器布局

滚珠丝杠部件包括滚珠丝杠副及两端的丝杠座。丝杠螺母内滚珠沿内外圈滚道的循环滚动实现螺母与丝杆的相对运动。螺母是整个丝杠副最敏感的部位,传动过程中产生的振动、噪声、温度信号在螺母上表现最为显著。由于丝杠旋转和法兰结构的丝杠螺母都不

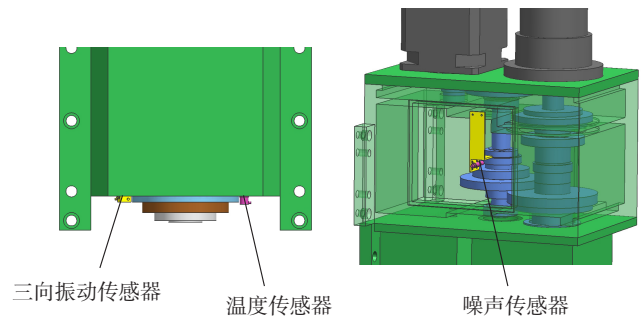


图5 机械主轴的传感器布局  
Fig.5 Sensor placement of spindle

适合安装传感器,因此,一般将传感器布置在螺母座上。当丝杠副存在局部损伤时,丝杠副其他零件会周期性撞击故障部位,引起冲击振动,并在丝杠的不同方向引起不同特性的振动<sup>[4]</sup>。至于此振动信号在哪个方向表现最显著是无法预知的,因此需要对丝杠的水平、垂直、轴向 3 个方向同时进行振动监测。

在丝杠两端的轴承座上,振动传感器的安装点应选择尽量靠近轴承的位置,并对轴承的径向和轴向振动分别进行监测。此外,通过在轴承座上安装温度传感器可以监测轴承的运行状况是否良好;其局限性是当温度有明显变化时,故障一般已经达到比较严重的程度,因此无法准确地检测早期故障。

为确定丝杠部件传感器安装的合理位置,对不同位置在模拟真实切削状态下的瞬态振动情况进行分析比较。

图 6 中 A、B、C 为丝杠上 3 个标记点,B 点在丝杠螺母位置,A、C 点分别位于两端丝杠座。图 7 为丝杠座 A、C 两点的 X/Y/Z 3 向瞬态位移响应曲线。A 点的 3 个方向振幅值接近,除了 Z 向与 X、Y 向反向外,3 者的振型也比较接近。C 点 Z 向(径向)振幅最大,其他情况与 A 点类似。因此,在此两点采用单方向振动传感器就能间接判断 3 个方向的振动情况。

图 8 为丝杠螺母 B 点的 Y/Z 向和 X 向瞬态位移响应曲线。Y 向和 Z 向两者振幅值接近,振动波形相似,基本不包含高频振动成分。X 向与 Y/Z 向相比,振幅小很多,但振型相差很大,属于高频振动,基本不包含低频

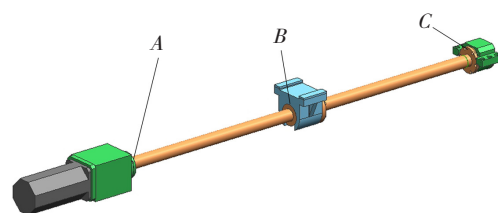


图6 丝杠部件的标记点  
Fig.6 Marked points of screw

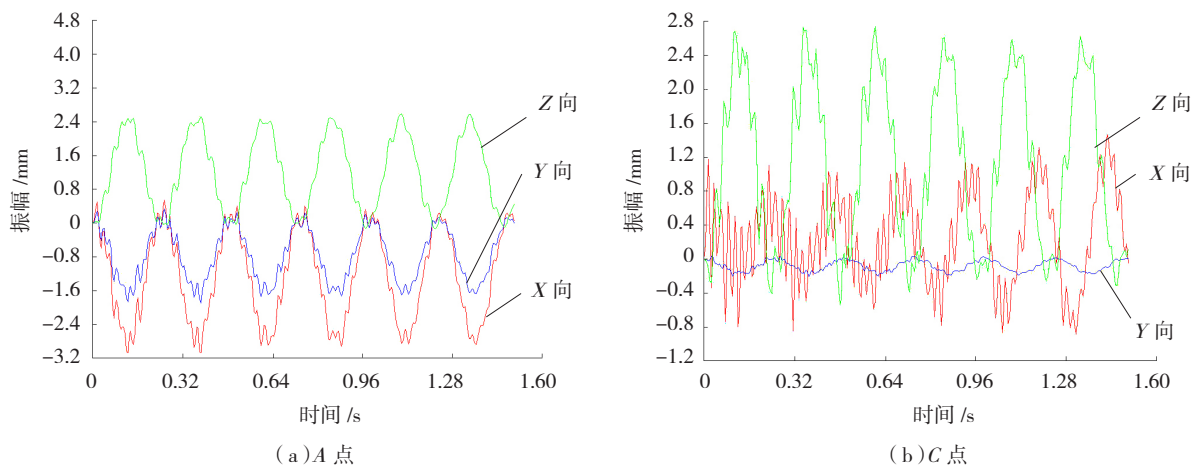


图7 丝杠座标记点A、C的X/Y/Z方向瞬态响应  
Fig.7 Transient response of point A, C in X, Y, Z directions

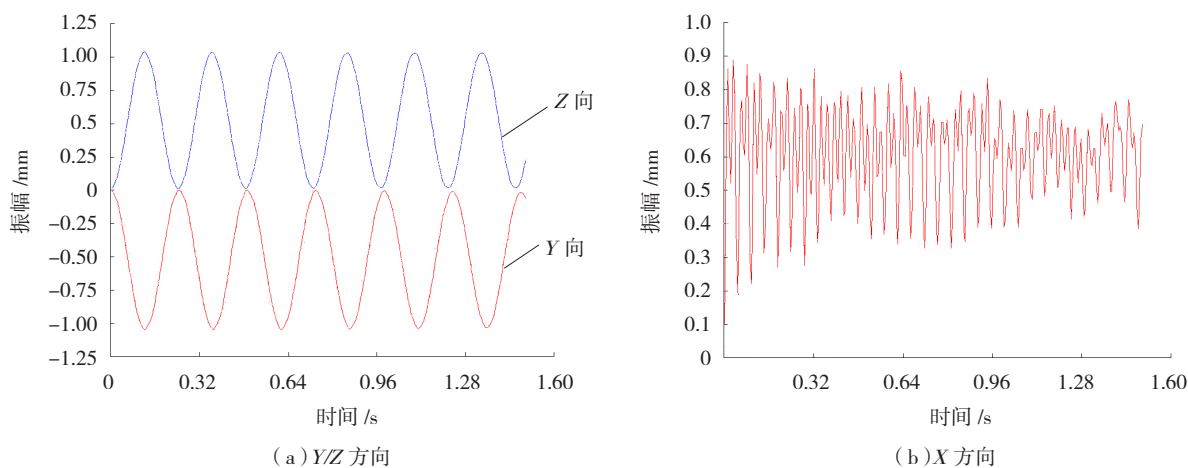
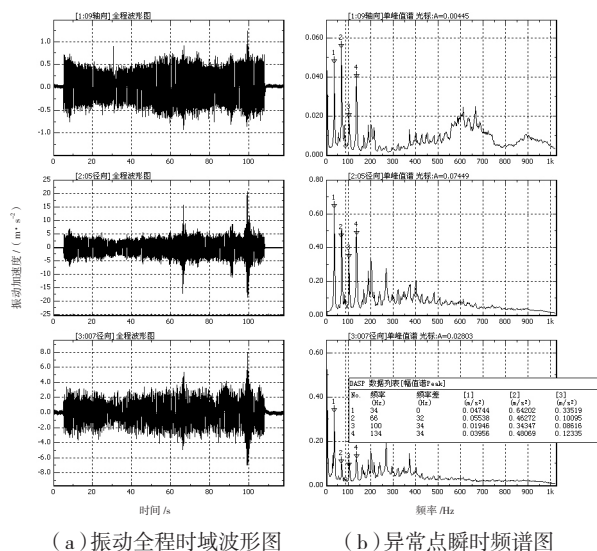


图8 丝杠螺母标记点B的X/Y/Z方向瞬态响应  
Fig.8 Transient response of point B in X, Y and Z directions

振动成分。因此,在B点应采用三向传感器监测丝杠螺母3个方向的振动情况。

A、B、C 3点综合比较,丝杠螺母B点振幅值最大,两端丝杠座A、C点振幅值接近,但比B点相差1个量级。

以某次试验中采集的某型机床X向丝杠副的振动数据为例,说明滚珠丝杠沿轴向、径向3个方向的振动特点,验证振动传感器布局的合理性。该试验测点布置为:丝杠螺母轴向布置1个振动传感器,径向沿水平和垂直各布置1个振动传感器,分别占据采集仪的第1、2、3通道。由时域的全程波形图(图9(a))可以看出,3个通道的振动信号出现周期性冲击振动,且冲击间隔随进给速度的提高而缩短,振幅加剧。记录各振动峰值出现的时间点,经计算得知,冲击振动均在螺母运动至丝杠同一位置时出现,而频谱图(图9(b))中也出现了以34Hz为主频、距离为34Hz的边频带,符合丝杠局部损



(a) 振动全程时域波形图 (b) 异常点瞬时频谱图

图9 丝杠振动采集波形图

Fig.9 Vibration waveforms of screw

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

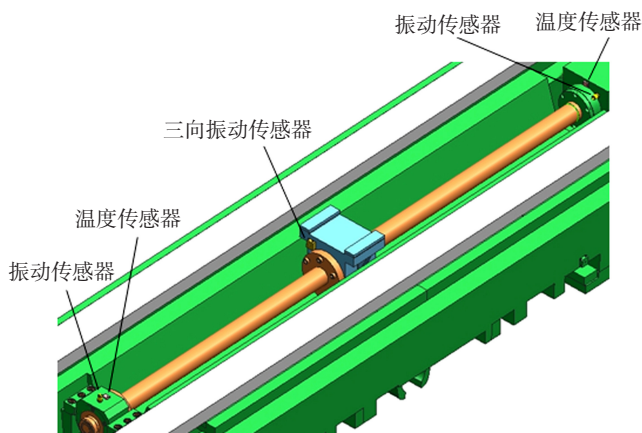


图10 滚珠丝杠副的传感器布局方案  
Fig.10 Sensor placement of screw

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

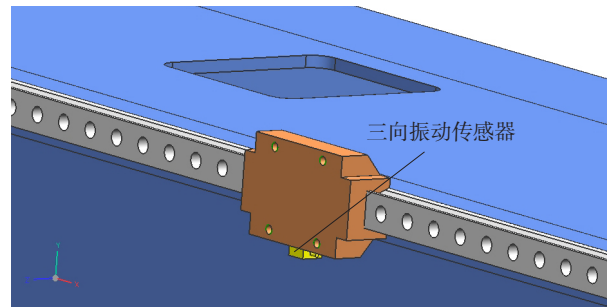


图11 滚动导轨副的传感器布局  
Fig.11 Sensor placement of guide

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)