

# 主轴—刀柄—刀具系统 动力吸振现象试验研究



扫码了解更多

■ 清华大学机械工程系、精密超精密制造装备及控制北京市重点实验室 (100084) 刘成颖 刘 巍

**摘要：**系统研究了刀具悬长对主轴系统动态特性影响规律。利用实验测量刀具不同悬长下的刀尖点频响函数，发现随着刀具悬长的增大，系统主模态频率减小，幅值增大，系统刚度逐渐降低，但增大到一定程度导致动力吸振现象发生时模态幅值反而减小，系统稳定性提高。

主轴系统的动态特性是主轴、刀柄和刀具通过结合面相互作用的结果，系统中无论是部件的结构尺寸或是结合面的状态发生变化，都可能会改变系统整体的动态特性。然而，哪些因素的变化对系统整体动态特性影响较大，这些因素又是如何影响系统整体动态特性的，对这些问题的研究有利于了解各个部件以及结合面在系统整体动态特性中的作用，从而可以通过改变系统局部的参数来定向改变系统整体的动态特性，这对于设计和优化电主轴的结构以及在实际使用中改善电主轴的稳定使用条件都具有重要的指导意义。

本文研究刀具悬长量的变化对主轴系统动态特性的影响规律，通过试验观察并研究动力吸振现象，提出改进主轴系统动态特性的思路和方法。

## 1. 刀具尺寸的影响分析

电主轴系统结构如图1所示。利用全解析法对电主轴系统建模

不仅包括对结构体的建模，还包括对结构体之间的结合面的建模。

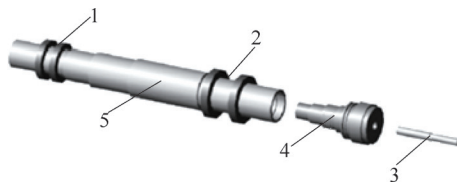


图1 电主轴系统结构

1.后轴承 2.前轴承 3.刀具 4.刀柄 5.主轴轴体

在电主轴的使用中，刀具是经常更换的部件之一，通常与同一刀柄匹配的刀具直径不变，改变的是刀具的悬长。

根据直角切削动力学模型推导的极限稳定切深公式：

$$b_{\lim} = \frac{-1}{2K_s \operatorname{Re}[G_{11}(\omega)]_{\text{Oriented}} m^*} \quad (1)$$

等式两边取极限得到无条件极限稳定性切深表达式：

$$b_{\lim, \text{crit}} = \frac{-1}{2K_s \min(\operatorname{Re}[G_{11}(\omega)]_{\text{Oriented}}) m^*} \quad (2)$$

式中， $K_s$ 是切削力系数， $m^*$ 表示平均切削齿数， $\operatorname{Re}[G_{11}(\omega)]$ 表示刀尖点频响函数的实部。

由上式可知，提高刀尖点频响函数的最大负实部有利于提高极限稳定切深，从而提高材料去除率和切削效率。

## 2. 刀具悬长的影响

为探究刀具悬长对刀尖点频响函数的影响，利用高速钢圆棒替代刀具进行锤击试验。如图2所示，将直径同为16mm，不同长度的圆棒安装在刀柄上，保证夹持长度均为30mm，测量刀尖点的频响函数。

当刀具悬长从60mm增加到100mm时，刀尖点频响函数变化如图3所

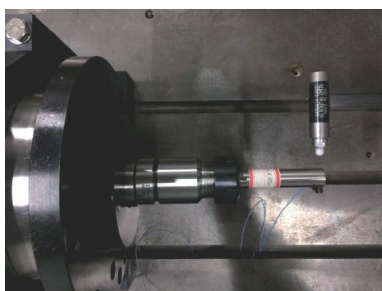


图2 刀具悬长影响试验

示。

由图3可以看出,随着刀具悬长的增加,刀尖点频响函数主模态频率逐渐左移,同时幅值逐渐增大,进一步提取其模态参数值,如表1所示。

分析比较系统100~1500Hz内两阶模态的变化,如图4所示,

系统第一阶模态始终在540Hz附近,基本不随刀具悬长变化,可以断定为主轴-刀柄系统的固有模态,而第二阶模态频率随着刀具悬长的增加而逐渐减小,可以称之为刀具模态。

随着刀具悬长的增加,不仅模态频率发生变化,模态频率所对应的幅值也随之改变,如图5所示,刀尖点频响函数最大负实部随着刀具悬长增加而逐渐增加,由式(2)可知,系统的极限稳定切深逐渐减小,主轴系统稳定性逐渐降低。

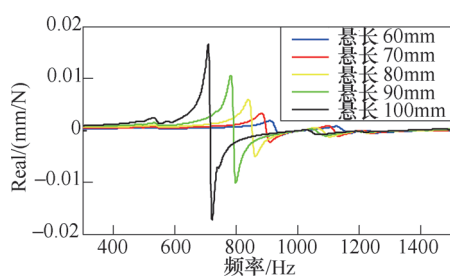
### 3.动力吸振现象

观察图3和图4,当刀具悬长

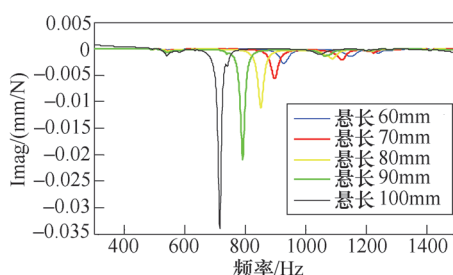
增加时,系统的第一阶模态和第二阶模态逐渐靠近,那么当刀具悬长进一步增加使得这两阶模态重合时,系统的模态频率和幅值将会如何变化?

采用锤击试验,测量刀具悬长从90mm增加到125mm时,刀尖点频响函数变化,如图6所示。

由图6可以发现,当刀具模态(第二阶模态)接近主轴-刀柄模态(第一阶模态)时,随着刀具悬长增大(增大到120mm),刀具模态频率继续减小,但幅值却在减小,而当悬长进一步增大使得刀具模态越过主轴-刀柄模态后,幅值又开始增大。为进一步



(a) 实频特性曲线



(b) 虚频特性曲线

图3 刀尖点频响函数随刀具悬长变化情况

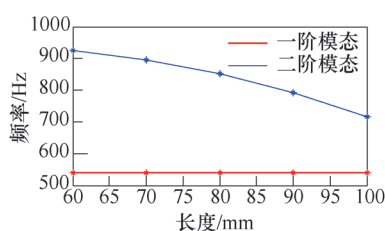


图4 主轴系统前两阶模态频率随刀具悬长变化

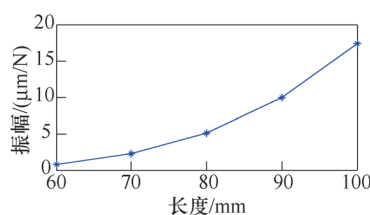


图5 刀尖点频响函数最大负实部随刀具悬长变化

表1 不同刀具悬长下系统模态参数值

| 悬长/mm            | 60      | 70      | 80      | 90      | 100     |
|------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 一阶模态频率/Hz        | 540.442 | 540.314 | 539.473 | 538.996 | 539.406 |
| 一阶模态阻尼 (%)       | 2.56    | 2.96    | 3.04    | 3.70    | 2.56    |
| 二阶模态频率/Hz        | 925.810 | 895.805 | 850.972 | 791.013 | 715.371 |
| 二阶模态阻尼 (%)       | 1.87    | 1.52    | 1.27    | 1.04    | 0.76    |
| 主模态最大负实部/ (μm/N) | 0.748 1 | 2.266   | 5.089   | 9.967   | 17.33   |

比较,提取各悬长模态参数值如表2所示。

同样比较主轴系统前两阶模态随刀具悬长的变化,如图7所示。

与图4不同的是,当悬长达到100mm后,系统第一阶模态开始逐渐减小,第二阶模态虽然也在逐渐减小,但减小的速度在逐渐降低。从模态频率上看两阶模态在相互靠近时相互排斥使得两阶模态不发生重合,也就是说达到一定悬长时,刀具模态开始与主轴-刀柄模态发生相互作用,这种相互作用不仅使频率发生变化,对幅值也产生了明显影响。

如图8所示,与图5中幅值随悬长增加加速增大不同,当悬长超过100mm后,幅值增大的速度开始降低,并且在悬长120mm时幅值骤减,减小到和悬长90mm时同等水平,而随着悬长超过120mm后继续增大,幅值又开始增大。

为进一步说明发生动力吸振现象时切削稳定性的变化,采用全离散法绘制叶瓣图,假设两齿铣刀直径为16mm,半齿切削,切削力系数取: $K_t=1.051 \times 10^6 \text{ N/m}^2$ ,  $K_c=505 \times 10^6 \text{ N/m}^2$ ,如图9所示为悬长为90mm、100mm、110mm和120mm时的稳

定性叶瓣图。

当刀具悬长由90mm增大到110mm的过程中,由于模态频率逐渐减小,导致叶瓣整体左移,而且无条件稳定切深和叶瓣交叉点最大切深均逐渐减小,表明系统稳定切削区域逐渐缩减,但当刀具悬长达到120mm发生动力吸振现象时,尽管叶瓣依然整体左移,但无条件稳定切深和叶瓣交叉点最大切深反而增大,增大到和悬长为90mm相当的水平,表明系统的稳定性得到了显著提高。

综上所述,当刀具模态逐渐靠近主轴-刀柄模态时,这两阶模

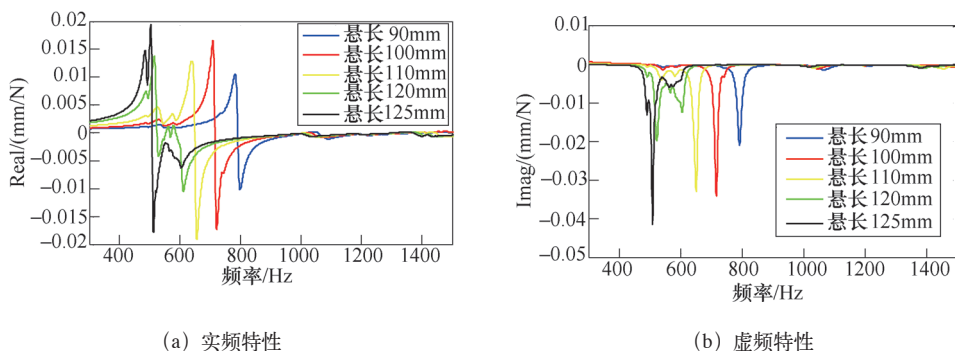


图6 刀尖点频响函数随刀具悬长变化情况

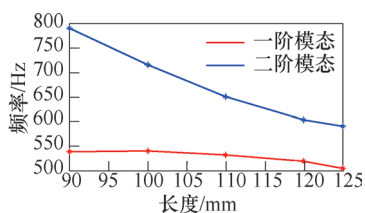


图7 主轴系统前两阶模态频率随刀具悬长变化

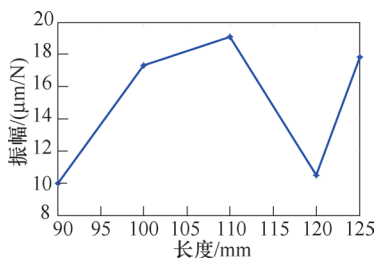


图8 刀尖点频响函数最大负实部随刀具悬长变化

表2 不同刀具悬长下系统模态参数值

| 悬长/mm                      | 90      | 100     | 110     | 120     | 125     |
|----------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 一阶模态频率/Hz                  | 538.996 | 539.406 | 531.13  | 518.486 | 504.107 |
| 一阶模态阻尼 (%)                 | 3.70    | 2.56    | 4.26    | 2.64    | 1.73    |
| 二阶模态频率/Hz                  | 791.013 | 715.371 | 650.007 | 603.086 | 590.975 |
| 二阶模态阻尼 (%)                 | 1.04    | 0.76    | 1.03    | 2.15    | 3.13    |
| 最大负实部/ ( $\mu\text{m/N}$ ) | 9.967   | 17.33   | 19.07   | 10.51   | 17.82   |

# 刃口钝化在刀具优化中的重要性



扫码了解更多

■ 无锡威孚高科技集团股份有限公司 (江苏 214000) 徐 庆

**摘要:** 在刀具优化过程中发现对刀具刃口进行适当的钝化处理,可以显著提升刀具性能、改善加工质量,从而起到了事半功倍的效果。本文主要介绍了刀具刃口钝化的必要性,三种钝化处理方式,以及几款成效显著的刀具钝化处理案例。

现代化高速切削加工和自动化机床的大量使用,对刀具的性能和稳定都提出了较高的要求。在刀具材料和涂层技术被人们所关注并广泛研究的前提下,刀具刃口处理还不被人们普遍重视,

但其在刀具的整个加工生命周期中却又是十分重要。经过钝化后的刀具能有效提高刀具的刃口强度,延长刀具寿命;提升刀具切削过程的稳定性,进而提高零件加工表面质量,其中刀具寿命的

延长最为明显。实践证明:有一个好的刃口形式和刃口钝化质量是刀具能否“多快好省”进行切削加工的前提。

## 1. 刀具刃口钝化的必要性

众所周知,刀具在加工过程

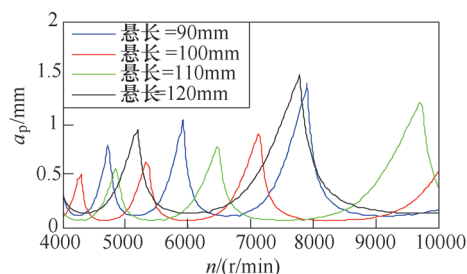


图9 不同刀具悬长下系统的稳定性叶瓣图

态不会重合形成一个幅值更大的模态,而会相互排斥形成两个模态,其中一个模态频率大于主轴-刀柄模态频率,一个模态小于主轴-刀柄模态频率,但它们对应的幅值都远小于原刀具模态幅值,即出现了“动力吸振”现象。当发生动力吸振现象时,尽管刀具悬长增加了,但系统刚性和稳定性反而提高了。动力吸振现象对于主轴优化带来了两条思路:一是从刀具角度,部分情况下,增大

刀具长径比反而能提高稳定性;二是从主轴-刀柄角度,合理设计主轴-刀柄的模态频率,使得动力吸收现象更容易发生。

## 4. 结语

本文研究了主轴系统中各个部件以及结合面特性对系统动态特性的影响规律。基于试验测量研究了刀具长度对刀尖点频响函数的影响规律,引入了“刀具模态”的概念,进一步观察和研究了动力吸振现象,在动力吸振

条件下,刀具长度增加反而会提高系统的稳定性,从而为主轴系统稳定性提升提供了一种优化思路。[基金项目:国家04科技重大专项课题(2014ZX04001031)]

## 参考文献:

- [1] 刘巍. 主轴系统刀尖点频响函数预测与动态特性研究[D]. 北京:清华大学, 2017.
- [2] Yusuf Altintas. 数控技术与制造自动化[M]. 北京:化学工业出版社, 2002: 55-79.
- [3] Ding Y, Zhu L M, Zhang X J, et al. A full-discretization method for prediction of milling stability[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2010, 50(5): 502-509.

MW (收稿日期: 20180322)