

# 高速干式切削滚齿机刀架部件滚刀轴优化设计\*

陈碧楠<sup>1</sup>, 宋昆<sup>2</sup>

(1. 中冶赛迪工程技术股份有限公司, 重庆 400013; 2. 重庆工学院 重庆汽车学院, 重庆 400050)

**摘要:** 分析影响高速干式切削滚齿机滚刀轴动态特性的因素, 用 ANSYS 软件分别从轴承支承跨距和轴承刚度两个方面对滚刀轴进行建模和优化设计, 并对优化结果进行模拟验证。

**关键词:** 滚齿机; 滚刀轴; 优化设计; 有限元

中图分类号: TG721

文献标识码: A

文章编号: 1571 - 0924(2008)11 - 0038 - 04

## Optimum Design of Hobbing Shaft of Hob-head Part for High-speed Dry-cutting Gear Hobbing Machine

CHEN Bi-Nan<sup>1</sup>, SONG Kun<sup>2</sup>

(1. CISDI Engineering Co. Ltd., Chongqing 400013, China; 2. Chongqing Institute of Automobile, Chongqing Institute of Technology, Chongqing 400050, China)

**Abstract:** This paper analyzes and takes into account the factors which can influence dynamic characteristics of hob shaft. By using ANSYS, this paper builds the model and completes the optimum design from the aspects of bearing span and bearing rigidity, and validates the analysis result with simulation method and comes to a conclusion.

**Key words:** gear hobbing machine; hobbing shaft; optimum; finite element analysis

随着我国制造业的快速发展, 齿轮的需求量日益增加, 各行业对齿轮加工的效率、质量及加工成本的要求愈来愈高, 使得滚齿机朝着高速高效化、全数控化、环保化、智能化以及网络化的方向发展。高速干式切削滚齿机是满足上述需求的新一代的滚齿机, 它将滚刀轴(B轴)与工件轴(C轴)之间的联动关系交由数控系统或者专门的电子齿轮模块处理, 让滚刀轴和工件轴从冗长的差动传动链中解放出来, 分别由内置主轴电机和内置力矩电机直接驱动, 从而使滚刀轴和工件轴的

转速数量级得到提升, 其中滚刀轴的转速可达到3 000 r/min以上, 满足干式切削的速度要求, 不仅极大地提高了生产效率, 而且由于干式切削不需要任何油液冷却, 使加工的过程更加环保。

刀架部件是高速干式切削滚齿机的核心部件之一, 其设计的关键在于滚刀轴轴系的设计。由于滚刀转速很高, 使得加工过程中切削力的激振频率很高, 所以设计的难点不仅在于静刚度是否能满足精度要求, 如何提高滚刀轴轴系的动态特性, 避开共振区更是其设计的重中之重。一般说来, 一

\* 收稿日期: 2008 - 08 - 13

基金项目: 重庆市科委攻关项目(CSTC, 2005AC3033)。

作者简介: 陈碧楠(1965—), 女, 福建人, 教授级高级工程师, 主要从事冶金设备设计研究。

阶固有频率应高于切削激振力频率的 25% 以上才能保证静刚度成为影响主轴精度的主要因素。本研究以 YKS3610 型高速滚齿机滚刀轴为例,采用有限元方法,通过 ANSYS 对刀架主轴系统进行建模和分析,以固有频率为优化目标,完成对其的优化设计。

## 1 模型建立

YKS3610 型滚齿机刀架部件主轴轴系包含电主轴、刀杆以及活动支承 3 个部分。电主轴由主轴、轴承、电机、壳体组成,其中壳体固定不动,电机定子固定在壳体上,进行分析时将两者看做刚体,可以不加考虑。电主轴的主轴是阶梯轴,中空,由 2 组轴承支承,采用一端固定一端游动的支承方式,靠近加工区域的一端固定,远离加工区域的一端游动,固定端采用双列圆柱滚子轴承和 60 接触双列推力球轴承配对支承,浮动端采用双联角接触球轴承支承,既能保证刚度和加工精度,又为主轴热膨胀留下伸缩空间。主轴与刀杆刚性联接,可将两者看作一体。刀杆由滚针轴承支承,这样,主轴-刀杆系统由 3 组轴承支承,为静不定结构。

要全面地分析主轴的动静态特性,必须将主轴、轴承、刀杆以及辅助支承的轴承看作一个系统进行分析。主轴单元结构对称、形状简单,可作为空间弹性梁来处理,选用 ANSYS 程序中空轴特征的 BEAM23 单元来模拟,对不同的轴径采用不同的实参数。对主轴-刀杆系统更为详细的简化:将轴承组简化为单个弹性支撑,根据技术资料,选用的背对背双联角接触球轴承的作用点在 25.3 mm 处,双列圆柱滚子轴承-双向推力角接触球轴承组由于前者不能承受径向力,作用点定在圆柱滚子轴承的中线处,滚针轴承的作用点在其中线处;认为轴承只具备径向刚度,不具有角刚度,进一步将轴承简化为径向的压缩弹簧质量单元;忽略轴承负荷及转速对轴承刚度的影响,将轴承刚度看成一个常数,用 COMBIN14 弹簧单元进行模拟;将电机转子和转子套等效为同密度轴材料,将其与主轴看成一体;当主轴内孔阶梯度不大时,简化为当量内孔。

根据上述简化原则,将主轴单元划分为 14 段,15 个节点,其中节点 1~10 为电主轴,节点 10~15 为刀杆。建立的有限元模型如图 1 所示,共 15 个关键点,14 段。

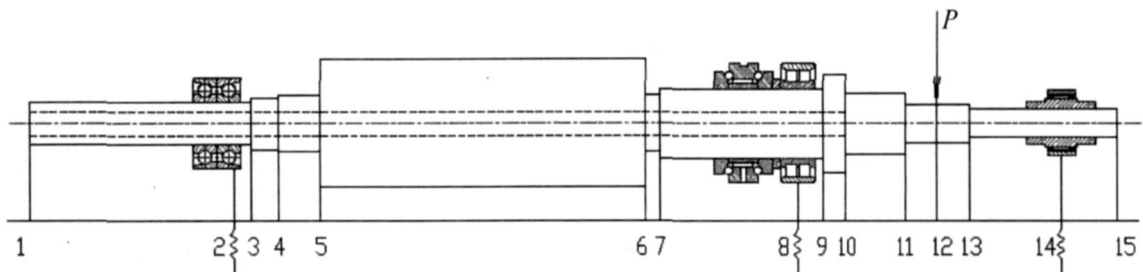


图 1 刀架主轴单元简化模型

## 2 优化设计

由于机械系统是典型的欠阻尼系统,如果发生共振,即切削激振力的频率与机械系统的固有频率一致或者相当接近时,机械强度会成倍地下降,所以在高速切削的条件下,静刚度不再是设计的焦点,如何提高系统的动态特性,避免共振才是设计的重点。干式切削滚齿机滚刀轴转速很高,设

计时应当采取措施尽量提高主轴系统的一阶固有频率,使之至少超过切削力频率的 25% 以上,所以将固有频率作为优化的目标是合适的。

固有频率跟系统的刚度和质量有关,随着前者的增大和后者的减小而非线性的增大。那么,轴系本身的结构、质量、刚度以及支承刚度都是影响固有频率的因素。选定合适的内置主轴电机后,主轴的轴径、轴阶的长度都根据电机数据定出,而刀杆轴径和长度也依据滚刀数据定出,即轴系的结

构和质量基本确定,对轴系固有频率的影响几乎是不可调的.因此,对轴系固有频率影响最大的参数就是电主轴轴承支承的跨距及轴承自身的刚度.下面就这两个因素对滚刀轴轴系固有频率的影响加以分析,并提出优化策略.

### 2.1 轴承支承跨距的优化

以固有频率为目标的优化必须在模态分析的基础上进行,按照图 1 所示模型,在 ANSYS 软件界面建模,如图 2 所示.

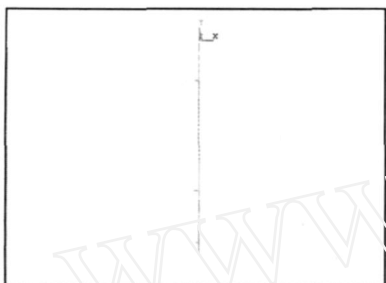


图 2 滚刀轴轴系 ANSYS 分析几何模型

在设计中,为保证前端悬伸量不变,固定端轴承组的支承位置不变,通过改变游走端双联轴接触球轴承的支承位置,即图 1 所示的节点 2 的位置来改变跨距.按实际加工情况施加约束后,用子空间法进行模态分析,可得到不同跨距下轴系的一阶固有频率,如图 3 所示.

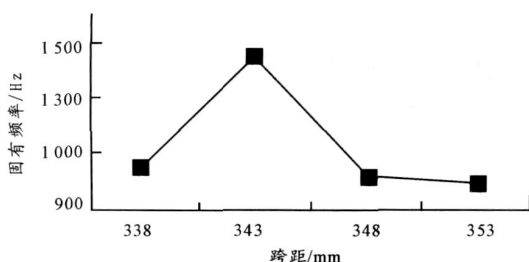


图 3 支承跨距对轴固有频率的影响

由图 3 可见,跨距对主轴系统刚度的影响不是单调的,在跨距为 343 mm 时,主轴系统的一阶固有频率达到最大值.由于实际结构的限制,选取跨距为 348 mm.在此跨距下,轴系一阶固有频率为 1 018 Hz,该型滚齿机滚刀轴最高设计转速为 4 000 r/min,滚刀有 12 个容屑槽,则切削力最高激振频率为  $4\ 000 \times 12 / 60 = 800$  Hz,轴系一阶固有频率高于最大激振频率 25% 以上,满足设计要求.

### 2.2 轴承预紧刚度对轴系固有频率的影响

首先研究固定端双列圆柱滚子轴承对固有频率的影响.确定轴系跨距为 348 mm,维持另外两个轴承组刚度不变,改变双列圆柱滚子轴承预紧量,使其刚度变为 25.24 N/ $\mu$ m、252.4 N/ $\mu$ m、2 524 N/ $\mu$ m、25 240 N/ $\mu$ m,通过 ANSYS 软件的分析,可得到主轴系统固有频率的变化,如图 4.

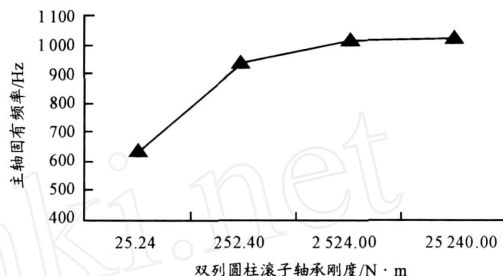


图 4 双列圆柱滚子轴承对主轴系统固有频率的影响

同理,改变刀杆活动支承的滚针轴承过盈量,使之刚度变为 37.86 N/ $\mu$ m、378.6 N/ $\mu$ m、3 786 N/ $\mu$ m、37 860 N/ $\mu$ m,其余轴承刚度维持不变,经分析得到主轴系统固有频率的变化,如图 5.

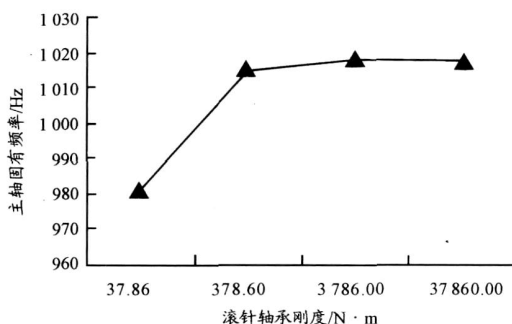


图 5 滚针轴承对主轴系统固有频率的影响

由上面的分析结果可以看到,主轴系统的固有频率随着轴承刚度的增加而单调增加,开始增长很明显,到后面增长则相当平缓.当设计的预紧过盈量为 2  $\mu$ m 时,两种轴承预紧刚度分别为 2 524 N/ $\mu$ m 和 3 786 N/ $\mu$ m,此时轴系固有频率为 1 018 Hz,满足要求.若要进一步明显提升轴系固有频率则需要成数量级的提高轴承预紧刚度,这意味着相当大的轴承过盈量,会极大增加装配难度,得不偿失,甚至根本无法实现.此外,大的预紧力意味着大的摩擦力矩,在高速下极易导致轴承和主轴的温升,不利于主轴速度的提高,共振幅

也可能大幅度增加。

对比两图可发现,双列圆柱滚子轴承的刚度对主轴系统的固有频率的影响很大,预紧不好,会使主轴系统的固有频率掉入共振区(800 Hz以下),因此认真调整轴承预紧力,对保证其刚度非常重要。

### 3 模拟验证

根据优化结果,可以确定最佳的跨距和可实现的轴承最佳预紧刚度,下面通过轴系切削点处对切削力的谐响应分析对优化结果进行模拟。

#### 3.1 确定加工时激振力

为了分析简单,可将最大径向力与平均径向力之差作为简谐激振力的幅值,滚刀轴承受的最大径向力为402 N,平均径向力为最大径向力的45%,则激振力的幅值为221 N,将最大转速下切削力的变化频率800 Hz作为强迫振动频率,相位角近似取为0,这样就把激振力完全确定了。此时主轴系统受到的力可以描述为

$$P(t) = P_0 + P_1 \sin(t + \phi) = 181 + 221 \sin(t + \phi)$$

#### 3.2 静力分析

首先对切削点处在最大径向切削力402 N作用下的变形进行静力分析,得到变形如图6所示,此时的变形量为0.945 7  $\mu\text{m}$ 。相同的方法,在181 N径向力作用下,切削点处变形量为0.425 8  $\mu\text{m}$ 。

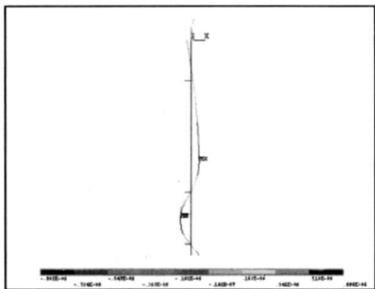


图6 主轴单元静力变形

#### 3.3 对激振力的谐响应分析

取激振力的频率为700~1500 Hz,载荷子步为100,得出切削点对激振力的径向响应位移随激振频率变化的曲线,如图7所示。

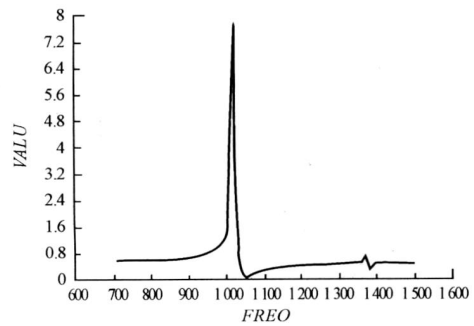


图7 切削点的位移响应位移-频率曲线

由图7可知,在700 Hz至1500 Hz的频率范围内切削点有2个位移响应峰值,分别在1018 Hz和1376 Hz附近,这2个频率正好是主轴系统的一阶和二阶固有频率。最高工作频率为800 Hz,因此能够有效避开共振区,800 Hz处切削点的变形为0.6  $\mu\text{m}$ ,加上稳态力181 N产生的静力变形,实际加工过程中变形量为 $0.6 + 0.4258 = 1.0248 \mu\text{m}$ ,与最大径向力作用下的静力变形量0.945 7  $\mu\text{m}$ 相比,仅仅增加了8%左右。可见优化设计后的结果是可行的。

### 4 结论

1) 支承跨距对轴系的动态特性影响不是单调的,选择合适的跨距可以有效地提高整个主轴系统的固有频率和刚度。

2) 轴承自身刚度对轴系固有频率有直接影响,并且是单调的,轴承预紧刚度越好,轴系的固有频率越高,在可能的情况下应尽量选用刚度较高的轴承,但预紧不是无限的,要考虑装配和发热。

3) 靠近加工区域的轴承组的刚度对轴系刚度和固有频率影响最大,应选用较高刚度轴承,同时轴承支承内结合表面的精度和刚度要求较高,以保证内径均匀受力。

4) 尽可能减少激振源及激振力的振幅,避免共振现象的产生。主轴单元的激振力除了切削力外,还有主轴自身产生的惯性力、不平衡力等,因此必须采用严格的对称设计原理,并对其进行动平衡。

(下转第46页)

制炉内 SiC 粉源的填充密度和透气性,填充密度与导热系数 及对流换热系数 有一定关系.增加粉源的透气性有利于热量的传递及升华,但要求透气性的增加不影响到 SiC 粉源的填充密度.通过采用合理的工艺如采用调 SiC 粉源晶粒的尺寸、减少杂质含量等措施可以既增加粉源的透气性又增加炉料的填充密度;三是减少生长炉外表的散热损失及防止热量对操作人员的影响,应当适当增加保温料的厚度.通过以上几个方面的改进,可以改善 SiC 单晶生长区域的温度分布,从而提高 SiC 单晶的生长率和成品率.

## 5 结论

1) 有限元法计算无内热源非稳态温度场的基本计算方程为

$$\frac{\partial T^D}{\partial T_l} = \iint_V \left[ kr \left( \frac{\partial W_l}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial W_l}{\partial r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) + c_p W_{lr} \frac{\partial T}{\partial r} \right] dx dr -$$

$$kW_{lr} \frac{\partial T}{\partial n} ds = 0, (l = 1, 2, \dots, n)$$

2) 改善 SiC 单晶炉生长腔内温度场分布的措施,除了改变石墨坩埚的形状、感应加热线圈的位置

及籽晶底座之外,还可改变感应线圈中的载荷和石墨坩埚的厚度.

## 参考文献:

- [1] Cree. Cree 是 LED 芯片、高功率 LED、LED 背光源、开关电源器件和无线通信器件的市场领导者[EB/OL]. [1996 - 04 - 11]. www.cree.com.
- [2] Erwin Schmitt, Thomas Straubinger, Michael Rasp, et al. Andreas Wohlfart, Polytype stability and defects in differently doped bulk SiC[J]. Journal of Crystal Growth, 2008, 310:966 - 970.
- [3] 李人宪. 有限元法基础[M]. 北京:国防工业出版社, 2004.
- [4] Arka Majumdar. Bulk Growth Of Silicon-Carbide Crystals, Dept. of Electronics & Electrical Communication Engineering[M]. Kharagpur: Indian Institute of Technology, 2002.
- [5] 张国智. 热力学有限元分析实例指导教程[M]. 北京:机械工业出版社, 2007.
- [6] 孔祥谦. 有限单元法在传热学中的应用[M]. 北京:科学出版社, 1998.

(责任编辑 陈 松)

(上接第 41 页)

## 参考文献:

- [1] 张朝晖. ANSYS8.0 机构分析及实例解析[M]. 北京:机械工业出版社, 2005.
- [2] 刘润爱, 张根保. 滚齿机及滚齿加工技术的发展趋势

[J]. 现代制造工程, 2003(11):84 - 96.

- [3] 胡爱玲. 高速电主轴动静态特性的有限元分析[D]. 广州:广东工业大学, 2004.
- [4] 陈碧楠, 杨涛. 双螺杆压缩机转子型线构形及计算机辅助设计[J]. 重庆工学院学报:自然科学, 2008(9):36 - 39.

(责任编辑 陈 松)