

关于龙门镗铣床主轴系统设计与模态分析

王顺江

齐重数控装备股份有限公司 黑龙江齐齐哈尔 161000

摘要: 为优化龙门镗铣床主轴机械结构设计, 本文建立了龙门镗铣床主轴和支撑参数的有限元模型, 采用块 Lanczos 特征值提取方法, 查找给定范围内的固有频率, 从仿真结果可以得出结论, 主轴系统在给定的速度范围内不会引起机械共振。

关键词: 龙门镗铣床; 模块化; 主轴; 转位、定位精度

引言:

当今现代造船、高铁、核工业需要大量高精、高精度的生产设备, 但目前国内的龙门镗、铣床、加工中心等产品技术水平还达不到精尖端。因此, 设计开发先进的龙门镗铣床和加工中心来替代进口设备, 现已成为我国龙门镗铣床和加工中心发展的主流。国产大型龙门镗铣床的设计制造水平和金属切削机床的产量和总拥有率, 也是衡量国民机械工业制造水平的重要指标。

根据研究和实践^[1], 龙门镗铣床的主轴精度受主轴系统的刚性和振动的影响, 而主轴系统的刚性受到多方面的影响。当前镗铣床的主轴速度升级要求通常基于现有主轴, 为了避免共振, 需要对优化主轴设计, 进行模态分析。

一、关于本文论述主题的相关背景

(一) 龙门镗铣床

1. 发展历史、分类

1958年, 北京第一机床厂与清华大学合作试制了我国第一台数控机床——X53K1三坐标数控机床。这款数控机床的诞生, 填补了我国在数控机床领域的空白。由清华大学和北京大学共同开发, 所有参与研发的员工, 包括教授、工程工程师、工人和学生, 平均年龄只有24岁。当时仅凭借一页“参考”信息卡和原理图, 他们克服了一个个障碍, 最终开发了一个数控系统。

据当时参加的研究员王尔乾教授介绍, 这是我工作以来参与并负责的第一个科研项目。当时非常沮丧和担心, 因为不知道如何做这个项目, 对数控机床了解不多, 也找不到任何相关的技术资料。当邹至圻教授从苏联旅游归来, 带来了一张A4尺寸的广告, 上面列出了数控机床的几个性能指标, 但没有提供数控零件的结构框图。大家决心要将数控机完成, 根据机床的特点、加工要求和纸带输入机的速度决定了数控机床的技术指标

和结构框图。”X53K1的诞生, 是数控机床领域的第一台机器。

龙门镗铣床自诞生以来, 在规格、机床配置、精度、主轴转速等方面经历了多次变革, 衍生出众多产品类别。根据横梁是否在立柱上移动, 分为活动横梁式和固定横梁式两种。

本文主要研究数控龙门镗铣床。独特的龙门结构, 多坐标驱动铣、镗、加工的数控龙门镗铣床, 主要用于加工较大金属零件的平面、曲面和孔表面的粗加工和精加工。可根据加工要求配置不同的附件铣头, 使机床一次装夹即可对工件五个表面进行镗孔、钻孔、铰孔、攻丝等多道工序加工。

2. 金属加工机床近年的进出口情况

随着我国国民经济发展进入新标准和《中国制造2025》出台, 各行各业对传统金属切削机床的需求明显减少, 对高精度数控金属切削机床的需求减少, 但仍然保持一定的水平。在综合性能上, 国产机床与国外进口机床存在较大差距。市场对机床的综合性能要求不断提高, 对国产机床提出了更严格的要求。可见, 我国机床制造业必须向高精度、高效率、可靠性、低成本的方向发展。

核电、船舶产业对制造装备的要求包括确保精度稳定提升。用于满足大型船舶和核电站可靠安全运行、无噪音、长寿命的基本要求, 并具有足够的精度储备, 保证连续可靠的加工精度。近年来, 高速列车和核电站所需的大型船用柴油机车体和底座、核装置的核岛、加氢反应罐、汽轮机外壳等核心零部件的加工精度, 已得到改进, 并提高了效率。

(二) 数控龙门镗铣床典型应用

现代高数控龙门镗铣床除了提高对机床基本性能和质的要求以满足加工精度和生产效率的高要求外, 还

必须满足以下条件:

该机床具有机床重量功率比小,能以低能耗达到机床最佳性能,使机床达到良好的动态性能;加工件的形状、尺寸和表面质量符合技术要求,批量产品稳定一致,减少辅助时间,提高机床的技术适应性;该机床功能多样,配备齐全的刀具及附件,一次装夹即可根据加工工艺要求实现多轴连接;数控龙门镗铣床可快速消除缺陷并传递信号,减少维护和停机时间,上述指标是衡量机床性能可靠性的重要指标。

从1980年代之前的IT8-IT9到今天的IT6-IT7,机械零件的精加工要求越来越高。在核电等重型零件加工应用中,很难将加工轮廓的绝对尺寸偏差控制在0.01mm左右。要进一步提高机械制造水平,机床的几何误差和位置精度必须进入0.001 mm精度,必须具有非常高的稳定性。

二、龙门镗铣床主轴支撑结构

与普通机床的主轴不同,镗铣床的主轴有两层,外层为铣轴,内层套有镗轴。铣轴只旋转,操作与普通铣床相同,但镗轴要加工一定深度的大孔,既可以膨胀,也可以进行旋转运动。主轴在进行直线运动的范围内。因此,铣削轴的轴向自由度受到限制,而镗削轴的轴向自由度并没有完全受到限制。龙门镗铣床的主轴一般采用三支座结构,前段采用两支铣轴,后端采用镗轴作为辅助支座,铣轴内表面有铣轴和a镗孔用于轴之间的支撑。

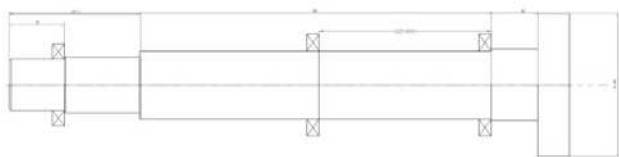


图1 镗铣轴轴承参数

(一) 主轴电机动态特性

数控龙门镗铣床的镗铣头主轴电机为SIEMENS 1PH7电机(4极鼠笼式异步电机),电机配有绝对编码器,用于检测电机的转速和位置。龙门镗铣床的镗铣头主轴转速不仅取决于切削速度,还取决于刀具直径。低速主要用于大直径刀具,此时需要增加输出扭矩,所以主运动的无级变速基本是恒定的。也就是说,输出扭矩应该随着速度的降低而增加。

(二) 主轴部件加工精度要求

龙门镗铣床主轴部分的回转精度是指机床装配后主轴端部工件或刀具部分的径向和轴向跳动量。回转精度直接影响功能附件的转位精度。镗铣头分度过程中,电机负载过大,电流不均匀,限角无触点开关工作不正

常,齿盘移动时齿盘反转、网格。另外,在对镗铣头主轴进行实测后,安装一个附件(方肩铣头)并进行分度,以指示主轴中心线的理论偏差。

(三) 主轴部件的传动方式及布置型式

为满足主轴高速旋转、传递大扭矩、防止齿轮箱热干扰、运行平稳等要求,采用长惯性传动轴连接齿轮箱与主轴。电机和齿轮箱连接在主轴单元上,传动的优点是:可以减少主轴的弯曲变形,实现纯扭矩传递,将主轴和电机产生的热量带入齿轮箱,可实现长Z向行程,满足加工。

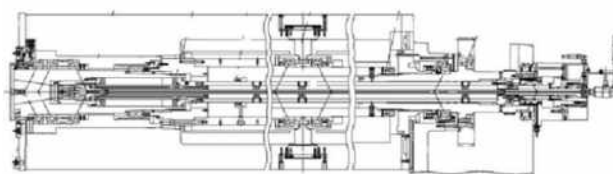


图2 主轴部件传动布置图

主轴零件的轴承必须具有高旋转精度、高刚性、承载能力强、抗振性好、极限转速高、适应范围广、摩擦功耗低、噪音低、使用寿命长等特点。前轴承是背靠背角接触球轴承,它是一种高速角接触球轴承,采用接触角为25°的低热轴承,这种组合使轴承能够支撑径向和轴向支撑,提高轴承的角刚度;采用定位预紧方式,施加一定的预紧力,使内外圈发生变形,成倍提高轴承刚性。

三、模态分析

(一) 主轴系统建模

在确保系统分析准确性的同时,改进系统建模和模态分析的有效性。

(二) 主轴、轴承简化

1. 主轴

倒角和底切等工艺结构由于尺寸小而被忽略,并可以减少网格数量;主轴材质为40Cr(密度 $=7\ 850\ \text{kg/m}^3$,弹性模量 $E=206\ \text{GPa}$,泊松比 $=0.3$)。假设主轴与镗轴连接牢固,省略两者之间的耐磨材料。

2. 轴承

三个轴承按一定的距离安装在主轴上,这个距离值是为了尽量减少主轴的变形。

(三) 主轴系统模态分析

主轴系统的分析考虑了现有的预应力。直接选择使用基于方程的直接消除方法的求解。根据主轴分析龙门镗铣床主轴系统的机械结构,分析前八阶振型,因为该情况仅考虑低阶模态。各阶模态的信息见下表。

表 1 主轴系统仿真计算

模态阶数	频率 /Hz	振型
1	1594.1	周向扭转
2	1564.7	周向扭转
3	1864.7	周向扭转
4	1563.9	周向扭转
5	1964.0	弯曲
6	4374.0	轴向平动
7	4698.5	弯曲
8	4074.5	弯曲

四、主轴系统的 FMECA 分析

(一) 主要问题

1、通过对数十台国产数控铣床一年半的跟踪记录,对缺陷零件进行统计分析,建立主轴系统可靠性数据库。根据已建立的数控机床主轴系统可靠性数据库,对数控机床主轴系统的故障件进行统计分析,找出故障件的频率和频率,轴承故障率最高为26%,皮带次之,由于丝杠故障率超过10%,减少轴承、皮带、丝杠和主轴部件的故障是提高主轴系统可靠性的关键。

2、主轴减速机是数控机床系统中最重要的设备之一,是连接动力机和主轴实现加减速的机械传动装置。由于主轴减速机的结构和密封设计不合理,主轴减速机经常出现漏油漏油现象,造成润滑油的浪费和环境的污染。如果主轴齿轮箱漏油严重,齿轮箱因缺油而不能正常润滑,加速齿轮的粘连和剥落,可能损坏齿轮,严重时会引起机械事故。

(二) 主轴系统危害性分析

轴承系统是数控机床主轴系统危害最大的系统,其次是检测系统,是可靠性方面最薄弱的环节,也是决定主轴系统可靠性的关键因素。轴承系统和检测系统中最危险的故障模式是噪音过大和主轴转速异常,而这些故障的原因是轴承磨削和编码器损坏。由于都是外购件,提高这两种外购件的质量,是提高主轴系统可靠性的关键。主轴系统轴承故障频发,是可靠性的薄弱环节。为了有效提高主轴系统的整体可靠性,需要对轴承的故障原因和机理进行综合分析。因此,建议使用有限元模拟分析来模拟主轴和轴承的实际工况,提出设计改进措施。

(三) 改进措施

利用传热理论,计算主轴系统各部分的表面传热系数,分析切削力的产生原理,计算切削力各分量的作用力大小,计算压轴力。并建立主轴系统的有限元模型,为后续有限元仿真分析准备载荷和边界条件。

主轴系统中的最高温度出现在前轴承处。后轴承温度低于前轴承,轴承周围温度略低于轴承内圈表面温度,

外壳外表面温度变化比较均匀。主轴的温度随着速度的增加而增加。转速低于4000r/min时,轴承温度不高于80摄氏度。

随着主轴转速的提高,主轴系统中应力最大的位置转移到后滚动轴承内圈与滚动体的接合处,转速为4000r/min时应力值最大,达到596.69Mpa。不同部位的应力分布比较均匀,应力值远小于最大应力。通过比较主轴系统各部分的材料强度极限得出结论:主轴系统部件的强度是可靠的,因为主轴全速运行时主轴上的应力远小于强度极限。

1、从问题一的故障原因频率可以看出,轴承损坏和间隙占故障原因频率的28%,而且由于轴承损坏没有达到疲劳极限,轴承损坏是由其他故障引起的。因此,要提高轴承的可靠性,要合理选择轴承的类型,同时相应改进轴承安装孔的制造工艺,合理控制轴承的预紧力。通过振动和声音信号检测轴承的位置,并进行实时在线检查,提前发现轴承的异常运行情况。皮带松动是由于使用过程中皮带逐渐松动或电机与轴的跑偏造成的,可通过改进电机与轴的连接结构来改善。通过使用通过联轴器驱动轴的伺服电机,提高带动轴的可靠性。针对轴承和丝杠的缺陷提出对策建议,并提供数控机床主轴系统的可靠性设计和分析。

2、由于丝杠螺母副具有预紧结构,因此预紧力大。小尺寸对丝杠的磨损有一定的影响,机床的加工精度降低。

3、由于主轴箱的制造过程中出现误差,主轴方向和间距的存在,从而增加了主轴箱的可制造性、工艺检测精度、装配工艺及主轴装配动平衡检测,对提高主轴的方向性和间隙有重要作用。

五、结语

数控机床是涉及材料工程、控制工程、先进制造等领域的常见机电、气液一体化设备,配置的核心模块、主轴伺服单元和主轴机床结构是关键影响因素。由主轴的振型由模态分析确定得出的结论是,在给定的速度范围内,主轴系统不会发生机械共振。由于轴承刚度与主轴固有频率呈正相关,分析结果可作为谐波响应分析的依据,可为后续龙门镗铣床主轴升级提供参考。

参考文献:

- [1]张鑫.龙门镗铣床主轴系统模态分析[J].南方农机,2021,52(20):116-118.
- [2]高帆.数控机床加工误差原因分析及改进措施[J].内燃机与配件,2020(16):89-90.

- [3]. HTM-35G 数控龙门镗铣床主轴档位故障分析及处理[C]//“田心杯”轨道交通金属加工技术征文大赛论文集.,2019:70-71.
- [4]史安娜,曹富荣,刘斯好,马晓波.数控车床主轴热变形误差检测及改善措施[J].制造业自动化,2019,41(01):1-4+28.
- [5]李嵩松.一种高精度数控工作台移动式龙门镗铣床的研制[D].北京工业大学,2017.
- [6]王广勇,郭正才,朱艳飞.数控机床主轴系统 FMECA 分析及改进措施[J].组合机床与自动化加工技术,2015(11):111-113.
- [7]Xiu Rong Zhu,Gui Ping Wang. The Analysis and Improvement Measures on Green Impact of CNC Machine Tool Spindle System[J]. Applied Mechanics and Materials,2014,3172(529-529).
- [8]盛元燕.提高数控龙门镗铣床镗铣头主轴转位、定位精度的研究[D].湖南大学,2014.
- [9]杨文,毛玉鹏,胡绪东.数控龙门镗铣床主轴减速箱密封结构的改进[J].润滑与密封,2012,37(04):99-101.
- [10]Yang Tianruo. Theoretical error bounds on the convergence of the Lanczos and block-Lanczos methods[J]. Computers and Mathematics with Applications, 1999(38): 19-38.
- [11]Robert L.Mott.Machine Elements in Mechanical Design. 英文版.原书第 3 版.北京:机械工业出版社,2003.
- [11]M.F.Spotts, T.E.Shoup.Design of Machine Elements. 英文版.原书第 3 版.北京:机械工业出版社,2003.
- [12]Hongqi Li, Shin, Y. C. Integrated dynamic thermo-mechanical modeling of high speed spindles, Part1:model development [J].Journal of Manufacturing Science and Engineering,2004(126):148-158.

