

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2017.06.003

TK13250E 数控转台立卧式安装下静刚度优化

陈为翰,倪受东,韦超

(南京工业大学机械与动力工程学院,江苏南京 211816)

摘要:针对 TK13250E 数控转台在不同安装方式下,因静刚度的波动而影响加工精度与表面质量的问题,提出了转台的静刚度优化分析方案。利用 ABAQUS 有限元软件,分析了立、卧式安装方式下的静刚度状况,研究了不同半径下轴向、径向刚度与工作台的非线性关系。采用工作台面的轴向、径向刚度的数学期望为评判标准,筛选出高于期望的工作区域,在所选区域进行加工操作分析,得出了此区域的刚度波动较于其他区域显著减小,有利于提高零件的加工质量。该研究方法对于转台的早期设计和优化有着重要的工程应用价值。

关键词:数控转台;转台轴承;加工位置;静刚度;ABAQUS 有限元软件

中图分类号:TB115.1;TG506

文献标志码:A

文章编号:1005-2895(2017)06-0011-06

Static Stiffness Optimization of TK13250E NC Turntable in Vertical and Horizontal Installation

CHEN Weihang, NI Shoudong, WEI Chao

(School of Mechanical and Power Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China)

Abstract: In order to solve the problem that the precision and surface quality of the TK13250E NC rotary table affected by the fluctuation of the static stiffness in different installation modes, the static stiffness optimization scheme was proposed. Using ABAQUS finite element software, the static stiffness of the vertical and horizontal installation was analyzed, and the nonlinear relationship between the axial and radial stiffness of the worktable was studied. The axial and radial stiffness mathematical expectation of the working table was as the evaluation criteria. The selected work area was higher than the expected. In the selected areas of processing and operation analysis, the regional stiffness fluctuation decreased significantly than the other area, and it improved the machining quality of parts. The research method has important engineering application value for the early design and optimization of the turntable.

Keywords: NC rotary table; turntable bearing; machining position; static stiffness; ABAQUS finite element software

TK13250E 立卧数控转台常装配在各类数控镗铣床和加工中心,作为机床的第四轴。机床的静刚度对机床加工精度和加工表面质量有很大的影响^[1],作为参与加工的主机配件其静刚度对加工精度和表面质量的影响不容忽视。国内外对于机床类的刚度进行了大量的研究:张功学分别对 O 型筋工作台、椭圆形筋工作台、井字形筋工作台进行静刚度分析,获得了 3 种工作台的复合静刚度图谱^[2]。孙永平通过有限元数值模拟的方法研究 G 型结构立式镗铣机床工作空间位置刚度随工作空间体的变化规律^[3]。李殿新在考虑

了机床结合面的影响下采用了有限元和细化试验相结合的方法对某型号的立式加工中心进行了静刚度研究^[4]。袁卫华运用有限元法研究了 MGK7350 数控高精度蜗轴圆台平面磨床的立柱、磨头处于不同位置时的静刚度^[5]。Wang 等人在分析电火花加工机床在极端加工位置时重力对机床的影响^[6]。Chen 等人在分析机床的主轴的静动特性时考虑了推力轴承和径向轴承对其的影响^[7]。KOTESWARA RAO 等人在分析并联机床的静刚度时同时考虑了丝杠、导轨、轴承以及螺母的影响并进行了等效处理^[8]。以上学者对机床的刚

收稿日期:2017-05-05;修回日期:2017-05-23

第一作者简介:陈为翰(1991),男,浙江温州人,硕士研究生,主要研究方向为动态测试、数控转台技术。E-mail:18260023035@163.com

度研究为本文转台静刚度的研究提供了方法思路。

笔者以 TK13250E 数控转台为研究对象,采用有限元分析的方法,在考虑了转台轴承的影响和不同安装方式的情况下,分析了转台的轴向和径向刚度。

1 转台模型的建立

1.1 结构介绍

在 Proe Wild 5.0 环境中建立转台的三维模型如图 1 所示。

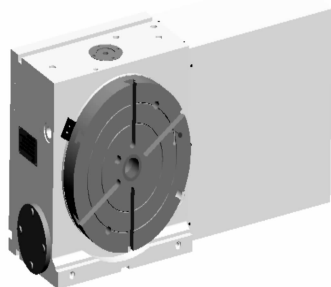


图 1 TK13250E 数控转台三维模型

Figure 1 Three dimensional model of TK13250E NC turntable

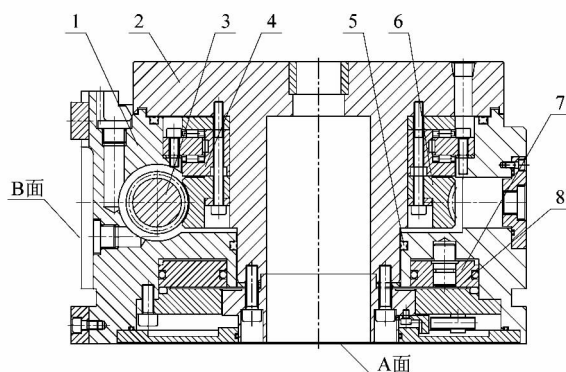
转台主要由工作台、转台本体、双导程蜗杆、蜗轮、YRT120 转台轴承、活塞、活塞盖和刹紧片等组成。图 2 为转台二维剖面图,图中 A 面为卧式安装面,B 面为立式安装面。其中双导程蜗杆和蜗轮组成转台的分度机构;活塞、活塞盖和刹紧片组成刹紧机构,在转台加工中抵抗转台的切向力矩使得转台在工作中不发生转动以保证转台平稳工作。转台轴承是一种能够同时承载轴向和径向载荷的 3 排滚子轴承,具有很高的回转精度、承载能力以及很高的转速,是数控转台的核心部件。转台工作台受到的切削力以及倾覆力矩等也主要传递到转台轴承上,所以转台轴承是转台的主要支承机构。

1.2 模型的简化

正确合理的有限元模型不仅方便动、静力学的分析而且能减少计算时间。文中所建模型保留转台重点结构,忽略对静刚度计算无影响或影响很小的部分,具体是将模型的相关影响的部件以及几何特征忽略,还对转台相关连接件进行了等效处理以达到方便计算加速收敛的目的。详细简化方法如下:

1) 忽略对转台静力计算影响不大的几何特征,如小凹槽、倒角、圆角、刹紧机构、分度机构等。

2) 忽略对转台承载无影响的部件如相关传感器等。



1—本体;2—工作台;3—蜗杆;4—YRT120 转台轴承;5—星型密封圈;6—蜗轮;7—刹紧片;8—活塞。

图 2 TK13250E 数控转台剖面图

Figure 2 Profile of TK13250E NC turntable

3) 固定关系。转台的各部件是螺栓连接,彼此之间无相对运动,即可用绑定接触模拟。

4) 转台轴承一般会承载转台的轴向和径向载荷。转台轴承自身有很高的刚度,因此在计算转台的静刚度时需要考虑轴承的刚度影响^[9]。转台轴承的轴向承载和径向承载结构都类似于圆柱滚子轴承,因此采用文献[10]的方法用弹簧单元模拟轴承。简化后的转台模型如图 3 所示。

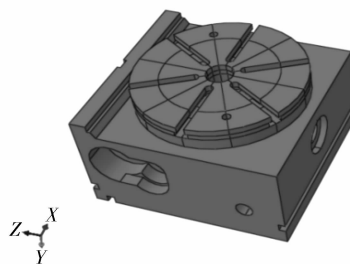


图 3 ABAQUS 的简化转台模型

Figure 3 Simplified turntable model of ABAQUS

1.3 转台轴承的刚度

YRT120 转台轴承由轴承外圈、轴承内圈、轴承第 2 内圈、保持架以及 3 排滚子组成。国内外关于这类转台轴承的研究相对较少。参考德国舍弗勒集团的 INA 轴承公司的 YRT120 转台轴承刚度以及承载能力等参数指标,如表 1 所示。表 1 中的 c_{aL} , c_{rL} , c_{kL} 都考虑了滚动体组件、轴承套圈和螺栓连接的刚度。

由表 1 可知,考虑了转台轴承的动体组件、轴承套圈和螺栓连接的刚度的情况下,优先选择轴承的轴向刚度为 $2\ 100\text{ N}/\mu\text{m}$ 、径向刚度为 $2\ 200\text{ N}/\mu\text{m}$ 。在进行“弹簧单元”模拟滚子时将每个滚子设定为相同刚度的弹簧,分别计算出单根轴向弹簧和径向弹簧额刚

表1 YRT120 轴承力学性能

Table 1 Mechanical properties of YRT120 bearing

轴承轴向刚度 $c_{aL}/(N \cdot \mu m^{-1})$	轴承径向刚度 $c_{rL}/(N \cdot \mu m^{-1})$	轴承位置倾斜刚度 $c_{kL}/(Nm \cdot mrad^{-1})$
2 100	2 200	7 000
滚动体轴向刚度 $C_{aL}/(N \cdot \mu m^{-1})$	滚动体径向刚度 $C_{rL}/(N \cdot \mu m^{-1})$	滚动体倾斜刚度 $C_{kL}/(Nm \cdot mrad^{-1})$
7 800	3 800	24 000

度,单根弹簧的刚度计算如下:

$$k_a = \frac{K_a}{i_a}; \quad (1)$$

$$k_r = \frac{K_r}{i_r}. \quad (2)$$

式中: K_a 为 YRT120 轴承的轴向刚度; k_a 为单根轴向弹簧的刚度; i_a 为轴向滚子数目; K_r 为 YRT120 轴承的径向刚度; k_r 为单根径向弹簧的刚度; i_r 为径向滚子数目。

2 静刚度分析方案

加工工件时需要用夹具将其安装固定在转台工作台上。当机床主轴设定相同切削力、切削速度、进给量,同一个工件处于工作台不同位置加工时,不同刚度对工件加工精度影响很大。为此,需要在转台设计阶段就要分析转台工作台的静刚度分布,进而优化提高转台整体的静刚度。

在研究机床工作台刚度分布时,理论上台面上工况越多越能反应其实际刚度分布情况。转台工作台和轴承均为回转体,回转中心为 Y 轴。虽然转台的本体外形并不是回转体,但其安装转台轴承的承载区结构是近似关于回转中心 Y 轴的回转体,因此选择工作台某条半径上不同的位置进行加载即可近似计算出整个台面的刚度分布。文中为了提高计算的准确性,选取转台 4 个方向的不同位置处进行加载,即当工作台处于 $\alpha=0^\circ$ 时,在 $L_1 \sim L_6$ 共 6 个位置进行加载。工作台每旋转 90° 均在 $L_1 \sim L_6$ 上进行加载,以此来模拟转台不同加工位置的工况。如图 4 所示,知 $L_1 \sim L_6$ 相邻 2 个点的距离为 20 mm,共 24 个工况来考察转台刚度分布。

3 静刚度计算

3.1 转台静刚度分析模型各部件材料

转台静刚度分析模型各部件材料见表 2。

3.2 网格划分

采用进阶算法扫略技术对转台轴承组成的 3 个回转体零件进行划分,单元形状为六面体,单元类型选择

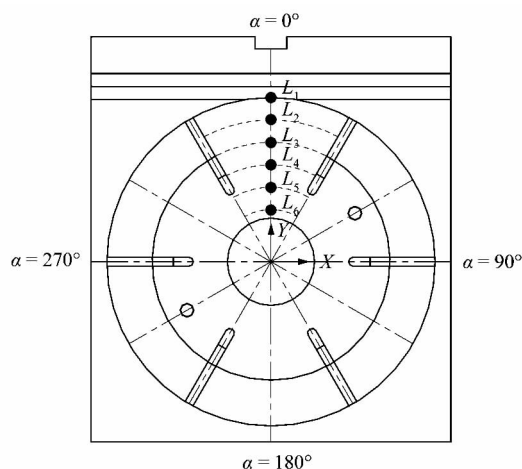


图4 转台加载位位置

Figure 4 Table loading position

表2 转台静刚度分析模型各部件材料

Table 2 Static stiffness analysis model of each part material

名称	材料	弹性模量/GPa	泊松比	密度/(kg · m ⁻³)
本体	HT200	148	0.310	7 200
工作台	HT250	138	0.156	7 280
第2内圈	GCr15	219	0.300	7 830
轴承外圈	GCr15	219	0.300	7 830
轴承内圈	GCr15	219	0.300	7 830

C3D8I,工作台采用中性轴算法扫略技术划分,单元形状为六面体,单元类型选择 C3D8I。本体由于其形状复杂采用四面体自由技术划分单元类型,选择 C3D4。网格划分后的模型如图 5 所示。

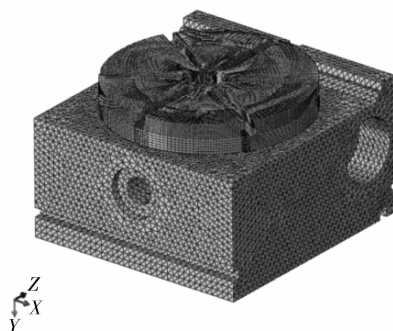


图5 网格划分后的转台模型

Figure 5 Model of turntable after grid partition

3.3 载荷与边界条件设定

该转台可以配备到多种数控镗铣床以及加工中心设备中去,故转台具体的实际工况也就难以确定。本课题组采用文献[10]的方法将载荷设定成轴向和径向载荷。假设轴向载荷 $F_{轴}$ 和径向载荷 $F_{径}$ 均为 1 000 N。

转台本体以卧式和立式2种方式安装在机床上。当为卧式加工时将其安装底面完全固定,设定工作台只有在载荷作用下发生偏移,保留轴向上的自由度 U_2 和径向载荷方向上的一个自由度 U_1 或 U_3 。转台轴承内圈与转台轴承外圈之间存在轴向滚子承载轴向载荷,设定其只在轴向移动,故保留轴向自由度 U_2 。轴承第2内圈与轴承外圈之间不仅有轴向滚子也有径向滚子,但轴承第2内圈底部由蜗轮支承并通过螺栓连接到工作台(如图2所示),不能发生轴向窜动只发生径向的移动故约束轴向自由度 U_2 。转台的内圈通过螺栓连接在本体支承部分,难以发生径向位移故约束径向自由度 U_1, U_3 。当为立式加工时将其安装侧面完全固定,其余边界条件不变。

3.3 静力计算

通过静力计算获得转台在卧式加工和立式加工2种安装姿态上不同加工位置处的复合变形量。本文只列出卧式在 $\alpha = 0^\circ$ 方向上的 L_1 处的轴向变形量和径向变形量,如图6~7所示。

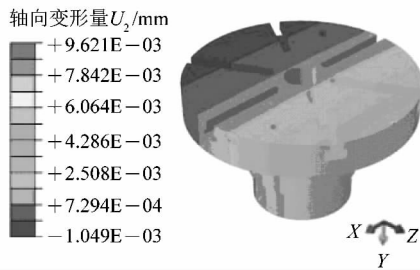


图6 卧式转台 $\alpha = 0^\circ$ 方向 L_1 处轴向变形量

Figure 6 Axial deformation of horizontal turntable L_1 in direction of $\alpha = 0^\circ$

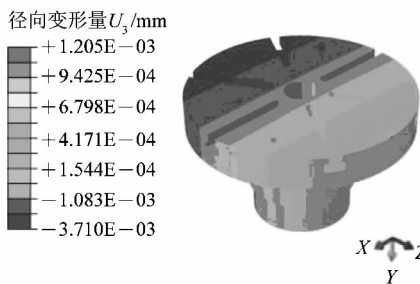


图7 卧式转台 $\alpha = 0^\circ$ 方向 L_1 处径向变形量

Figure 7 Radial deformation of horizontal turntable L_1 in direction of $\alpha = 0^\circ$

4 卧立两用转台静刚度分析

通过静刚度公式(3)~(4),分别计算卧式安装和立式安装下转台轴向静刚度 K_a 、径向静刚度 K_r 和复合刚度 K 并绘制曲线。

$$K_a = \frac{F_a}{Y_a}; \quad (3)$$

$$K_r = \frac{F_r}{Y_r}. \quad (4)$$

式中: K_a 为轴向静刚度; K_r 为径向静刚度; Y_a 为轴向变形量; Y_r 为径向变形量; F_a 为轴向力; F_r 为径向力。

4.1 卧式安装转台静刚度分析

图8~9所示为卧式安装下转台的静刚度曲线。

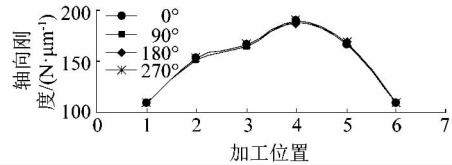


图8 卧式转台不同加工位置上轴向刚度

Figure 8 Axial stiffness at different machining position of horizontal turntable

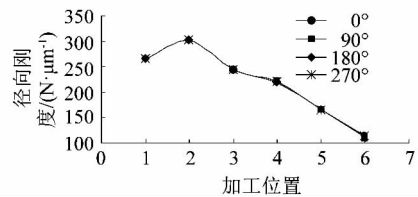


图9 卧式转台不同加工位置上径向刚度

Figure 9 Radial stiffness at different processing position of horizontal turntable

由图8~9可知,在转台工作台不同 α 角方向上,相同半径加工位置处的轴向刚度都几乎相同;径向刚度亦是如此。因此加工孔或轴时,只要其回转中心与转台工作台中心重合,工作台的静刚度对其的圆柱度误差影响不大。但相同 α 角方向上不同半径加工位置上的轴向刚度与径向刚度不同,2种刚度与工作台半径呈非线性关系,轴向刚度变化值为 $85.81 \text{ N}/\mu\text{m}$ 、径向刚度变化值为 $190.52 \text{ N}/\mu\text{m}$,加工尺寸较大的面会产生较大的平面度误差。为了选择出转台工作台加工质量较好的区域,以工作台的轴向刚度、径向刚度的数学期望来评判标准,选择高于数学期望值的区域即为加工质量较好的工作区域,公式如下:

$$\left. \begin{aligned} \overline{K_a} &= \sum_{i=1}^n K_a^i / n; \\ \overline{K_r} &= \sum_{j=1}^n K_r^j / n. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中: $\overline{K_a}$ 为平均轴向刚度; K_a^i 为不同加工位置上的轴向刚度; $\overline{K_r}$ 为平均径向刚度; K_r^j 为不同加工位置上的径向刚度。

由公式(5)计算出卧式转台 $\overline{K_a} = 147.15 \text{ N}/\mu\text{m}$, $\overline{K_r} = 218.67 \text{ N}/\mu\text{m}$ 。

综合图 8~9,转台刚度较好的工作区域为工作台面从 $\alpha = 0^\circ$ 到 $\alpha = 360^\circ$ 任意方向上 $L_2 \sim L_4$ 上的区域,该区域为图 10 中 C 所在的圆环,其范围为 $\varnothing 130 \sim \varnothing 210 \text{ mm}$ 。圆环中轴向刚度变化量为 $43.62 \text{ N}/\mu\text{m}$,径向刚度变化为 $84.28 \text{ N}/\mu\text{m}$,该区域内轴向刚度变化量减小了 49.2%,径向刚度变化量减小了 55.8%。为了更好地比较工作台面的圆环区域和整个工作台面的静刚度的波动情况,可采用工作台静刚度的标准差来评判,见式(6)。圆环区域和整个台面的静刚度标准差如表 3 所示,由此可见圆环区域的刚度波动很小,工件装夹在此区域有利于提高加工精度。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_a &= \sqrt{\frac{1}{N} \sum_i^N (\overline{K_a} - K_a^i)^2}; \\ \sigma_r &= \sqrt{\frac{1}{N} \sum_i^N (\overline{K_r} - K_r^i)^2} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中: σ_a 为轴向刚度标准差; σ_r 为径向刚度标准差。

表 3 卧式安装下黄色工作区和台面的静刚度标准差

Table 3 Standard deviation of static stiffness of horizontal working area and table

名称	轴向刚度标准差 $\sigma_a / (\text{N} \cdot \mu\text{m}^{-1})$	径向刚度标准差 $\sigma_r / (\text{N} \cdot \mu\text{m}^{-1})$
整个工作台面	31.89	64.49
圆环工作区域	17.49	35.98

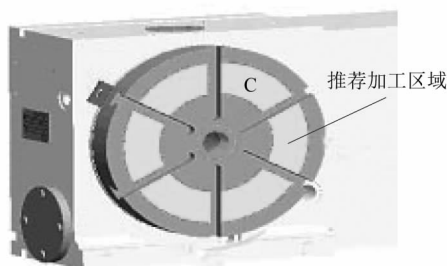


图 10 卧式转台刚度较好的工作区域

Figure 10 Working area with good stiffness of horizontal turntable

4.2 立式安装转台静刚度分析

利用公式(3)~(4)分别计算出立式转台轴向刚度和径向刚度并绘制静刚度曲线,如图 11~12 所示。

由图 11 可知,在 90° 和 270° 方向上相同半径加工位置上的轴向刚度几乎相同,但是 0° , 90° 和 180° 方向上相同半径加工位置上的轴向刚度逐渐减小,说明该转台立式安装下相同半径加工位置各方向上的轴向刚

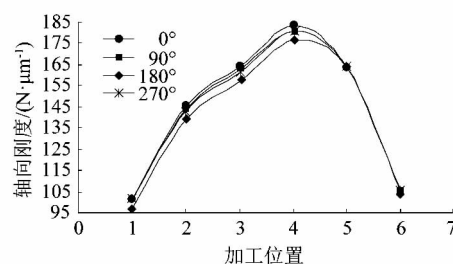


图 11 立式转台不同加工位置上轴向静刚度

Figure 11 Axial static stiffness at different processing position of vertical turntable

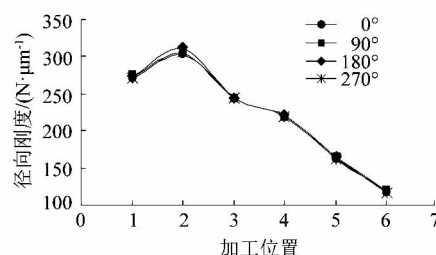


图 12 立式转台不同加工位置上径向静刚度

Figure 12 Radial static stiffness at different processing position of vertical turntable

度不同,并且离安装面越远轴向刚度越低。这主要是当载荷作用在工作台上时对安装底面产生了轴向力的同时又产生了倾覆力矩引起的。由图 12 可知在 $L_1 \sim L_3$ 之间,相同半径加工位置上的径向刚度不同。并且,相同半径上不同方向上的轴向刚度变化值为 $6.63 \text{ N}/\mu\text{m}$,径向刚度变化值 $7.38 \text{ N}/\mu\text{m}$,加工孔或轴时工作台的静刚度对其的圆柱度误差产生一定的影响。但 L_5 至 L_6 各方向上转台的轴向刚度、径向刚度接近,表明该区域加工孔或轴几乎不会产生圆柱度误差。但相同方向上不同半径加工位置上的刚度不同,轴向刚度变化值为 $84.63 \text{ N}/\mu\text{m}$,径向刚度变化值为 $195.61 \text{ N}/\mu\text{m}$,加工尺寸较大的面依然会产生较大的平面度误差。

5 结论

通过 ABAQUS 有限元软件对其进行静力学计算,分别获得了转台在卧式安装和立式安装的静刚度曲线。对转台在 2 种安装方式下转台工作台的静刚度进行了分析和对比,选择出 2 种安装方式下转台的合理的加工区域。

1) 转台工作台在相同半径不同方向下,卧式安装的轴向刚度基本相同,径向刚度的情况也类似。但在立式安装下,各方向上的轴向刚度存在着些许差异,径

(下转第 21 页)