

带冷却系统的 XK717 数控铣床 主轴部件热特性分析

王金生, 胡如夫, 巫修海

(台州职业技术学院, 浙江台州 318000)

[摘要] 机床主轴系统是机床的核心部件, 其热特性的好坏, 直接影响机床的加工精度; 以建立主轴系统的有限元模型, 结合主轴系统与普通水箱之间的冷却模型, 对带有冷却套的主轴系统进行了热特性分析, 得出了主轴系统的热特性曲线; 根据分析结果, 对 XK717 数控铣床主轴部件冷却套的布局进行了改进设计, 为优化数控铣床主轴系统提供了理论依据。

[关键词] 热特性; 有限元; 优化设计; 数控铣床

[中图分类号] TG502.15; TG547 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2005)08-0084-05

1 引言

机床主轴系统是机床的核心部件。在加工过程中, 主轴温度升高不仅影响主轴位置精度, 造成主轴轴承负载的增加, 而且, 作为机床热源之一, 将直接影响机床的加工精度。因此, 如何减少轴承发热, 提高机床主轴热特性, 是非常重要的。

目前, 很多学者通过试验和理论分析, 对主轴系统的热特性进行了研究。如 Kim Sun-Min 等人研究了主轴轴承的装配公差和主轴支承结构的热变形对高速主轴系统热特性的影响^[1]。Moriwaki 等通过实验研究了超精密机床的空气主轴系统的热特性^[2], 得出了热变形与主轴转速和环境温度之间的传递函数, 并通过热变形补偿方法减小了机床的热误差。Choi Jin-Kyung 等应用有限元方法对主轴轴承系统进行了热特性研究^[3], 根据试验结果与计算结果的比较, 通过修正主轴表面的换热系数, 使实验结果与计算结果十分吻合。蒋兴奇等以传热学、滚动轴承摩擦学和动力学为理论基础^[4], 以 B7005C/P4 轴承为例, 建立了考虑摩擦热和预紧方式影响的主轴轴承动力学模型, 分析了轴承的摩擦力矩、运动、载荷和刚度, 研究了轴承的热特

性, 并进行了试验验证。笔者通过建立主轴系统的有限元模型, 结合主轴系统与普通水箱之间的冷却模型, 对带有冷却套的主轴系统进行热特性研究, 从而为数控铣床主轴冷却系统的设计提供了理论依据。

2 主轴系统热模型的建立

主轴轴承产生的热量, 一部分传入主轴及主轴箱部件, 使其温度升高; 另一部分通过主轴及主轴箱的表面散发到周围空气中; 还有一部分则通过主轴冷却部分带出。所以, 在建模时, 把主轴及主轴箱作为整体进行分析更接近于实际。由于主轴冷却部分与水箱相连, 通过泵把水箱里的水送到铣床主轴冷却部分以降低主轴的温度, 同时把多余的热量带入水箱; 由于水箱与空气接触, 又把部分热量散发到空气中, 还有部分热量使冷却水的水温升高, 水温升高又影响主轴部件的温度; 由于主轴部件的结构相当复杂, 所以, 很难用数学函数来准确描述。笔者采用有限元方法主要是对边界条件进行处理。在所分析的主轴系统中, 冷却水的温度是随时间变化的, 故采用分段的方法将时间分成很多小段, 假设在每一小段时间内, 主轴冷却部分散热的

功率不变，根据它与水箱之间的能量是守恒的，便可求出冷却水的温度，把它作为下一时间段内主轴冷却部分的边界条件，就可以计算出普通水箱作为冷却箱时主轴系统的温度场，其流程图如图 1 所示。

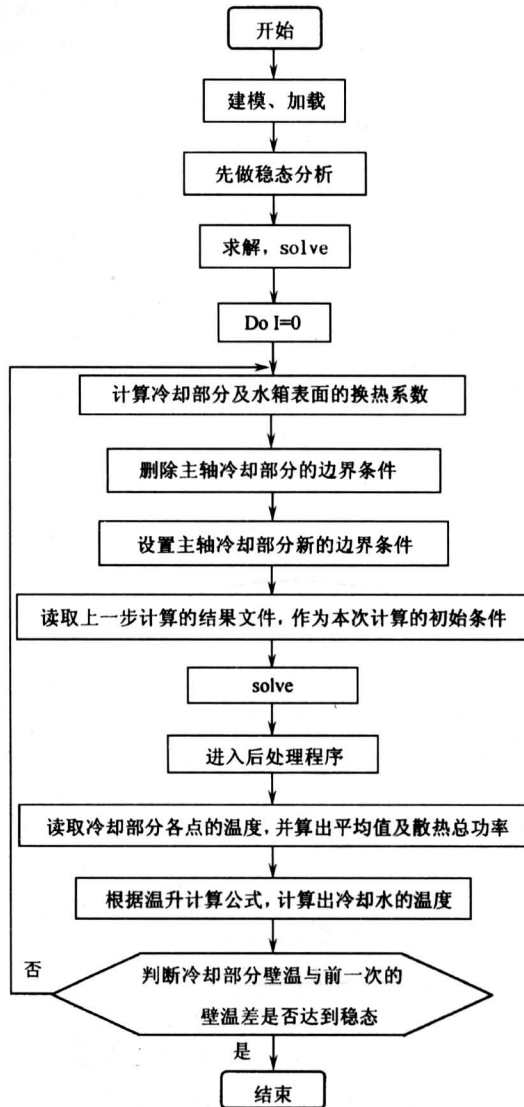


图 1 主轴系统热特性模拟流程图

Fig.1 The flow process diagram of simulating the thermal behavior of the spindle system

2.1 主轴系统的有限元模型

笔者在有限元建模时，选取 SOLID70 单元，采用智能网格划分，精度为 7 级。图 2 所示为主轴和主轴箱的有限元模型，图 3 为主轴部件示意图及冷却系统的布置情况。

采用有限元方法对铣床主轴系统进行热分析，主要是对边界条件的处理，一般只考虑热源和对流

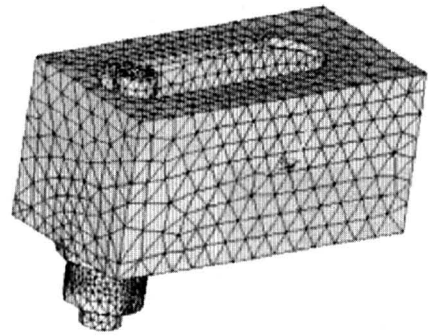


图 2 主轴及主轴箱有限元模型

Fig.2 The FE model of the main spindle and headstock

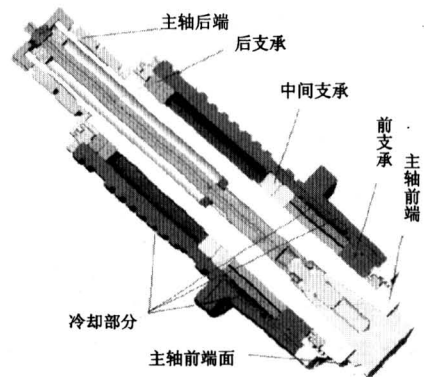


图 3 主轴部件及冷却系统示意图

Fig.3 Sketch of the main spindle and cooling system

换热两种情况。主要热源有轴承摩擦热，主要对流形式有自然对流（如主轴箱表面）、强迫对流（如主轴冷却部分）。边界条件的计算方法见参考文献 [5]。有限元设置对流边界条件时，需要对流换热系数和周围流体温度。对于主轴箱及主轴外表面来说，流体温度是环境温度（不变）；对于主轴冷却部分来说，流体温度就是冷却水的温度，而冷却水温是随时间变化的。以下是冷却水温计算公式的推导。

2.2 冷却水温升的数学模型

假设：a. 主轴冷却部分与水箱之间的环节是绝热的；b. 冷却水流回水箱时，马上能均匀混合。

将时间划分为 t_n 个点 ($n = 1, 2, 3 \dots$)，设 $\Delta t_{n-1} = t_n - t_{n-1}$ 为 t_n, t_{n-1} 时刻的时间差； ΔT_{n-1} 为 Δt_{n-1} 时段内水箱里水的温升； T_n 为 t_n 时刻水箱里水的温度； T_{n-1} 为 t_{n-1} 时刻水箱里水的温度； T_c 为环境温度； ρ 为水的密度； C 为水

的比热； V 为水箱体积； q_{n-1} 为 t_{n-1} 时刻主轴冷却部分散热的总功率； α_{n-1} 为 t_{n-1} 时刻水箱表面换热系数； β_{n-1} 为 t_{n-1} 时刻主轴冷却部分换热系数； S 为水箱表面积； S_1 为主轴冷却部分表面积； $\bar{T}_{(n-1)壁}$ 为 t_{n-1} 时刻主轴冷却部分各点的平均壁温。根据能量守恒定律，在 Δt_{n-1} 时段内

$$q_{n-1} \cdot \Delta t_{n-1} = \rho VC(T_n - T_{n-1}) + \alpha_{n-1} S(T_{n-1} - T_c) \cdot \Delta t_{n-1} \quad (1)$$

即

$$\Delta T_n = T_n - T_{n-1} = \frac{\Delta t_{n-1}}{\rho VC} (q_{n-1} - \alpha_{n-1} S(T_{n-1} - T_c)) \quad (2)$$

其中

$$q_{n-1} = \beta_{n-1} S_1 (\bar{T}_{(n-1)壁} - T_{(n-1)}) \quad (3)$$

这里的 $\bar{T}_{(n-1)壁}$ 可以利用有限元分析软件 ANSYS，通过瞬态分析计算出来。

3 结果分析

根据各边界条件的计算公式，计算出数控铣床各边界条件值，将其加载到有限元模型上，便可计算出主轴及主轴箱的温度场。图4为冷却泵流量为 $0.14 \text{ m}^3/\text{h}$ 、水箱尺寸 0.125 m^3 时，铣床主轴支承的温升变化曲线，A、B、C 分别表示前支承、中间支承、后支承的温升曲线。从图中可以看出，支承温升达到稳态是非常缓慢的过程，前、中、后支承温升变化过程基本上是相同的。以前支承温升为例（以下均以前支承为例），其过程基本上可分为三个阶段，0— a 为快速温升阶段， a — b 为稳态过渡阶段，它的前部分温升也基本上是线性增加的， b 之后为稳态阶段。

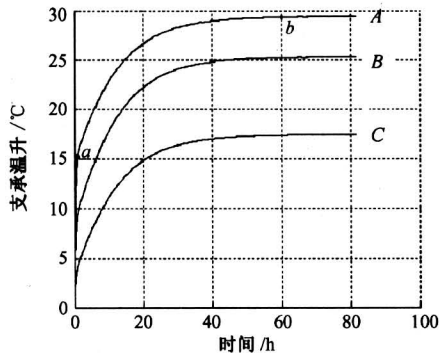


图4 铣床主轴支承温升变化曲线

Fig.4 Temperature rise curve of bearings on the main spindle

图5为主轴前端面（如图3所示）平均热变形量随时间的变化曲线。从图中可以看出，其变化过程与支承温升过程相似。从图4、图5中比较分析，可以得出 a 点的位置是非常重要的：在 a 点之前，支承温升的变化非常快，热变形也最快； a 点之后，温升和热变形量的变化就趋缓了。因此，若在加工之前，先对铣床进行预热，使之达到 a 点的位置，再对零件进行加工，就可以大大减少由于热变形引起的对加工精度的影响（以下称 a 点为拐点）。

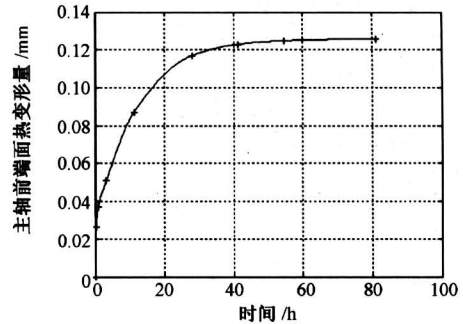


图5 铣床主轴前端面热变形量变化曲线

Fig.5 The thermal deformation curve of end plane of the main spindle

3.1 提高转速预热对主轴系统热特性的影响

对图4、图5前部分进行局部放大，如图6、图7所示。从图中可以看出，当温升和热变形随时间达到拐点时，约需1 h 时间。这对于实际加工来说，是不现实的。为了提前达到拐点温度，采用事先提高铣床转速使之快速达到预定温度。

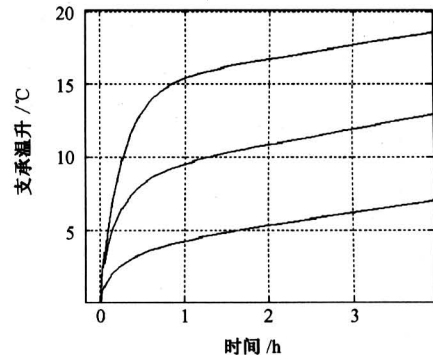


图6 温升变化的局部放大图

Fig.6 The partial enlarged view of the temperature rise of bearings

图8为先高速运转 500 s 再回到工作转速 ($3\ 500 \text{ r/min}$) 时，前支承温升的曲线变化，图中 A_1, A_2, A_3 分别表示高速运转速度为 $7\ 000$,

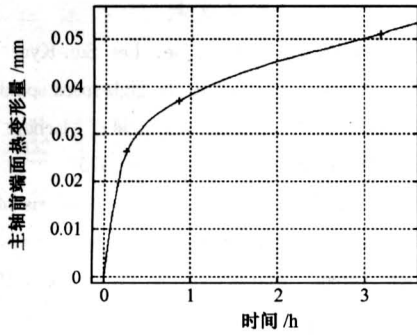


图 7 热变形的局部放大图

Fig.7 The partial enlarged view of the thermal deformation of the main spindle

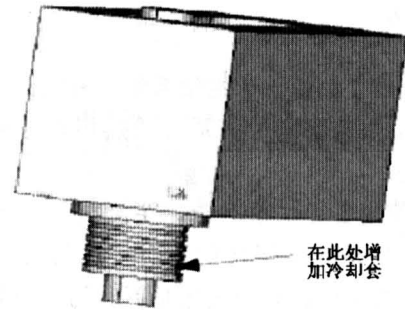


图 9 改进后的主轴及主轴箱示意图

Fig.9 Sketch of the main spindle and headstock after improving the structure

5 500, 3 500 r/min。从图中可以看出，用这种方法可以缩短快速温升阶段的时间。

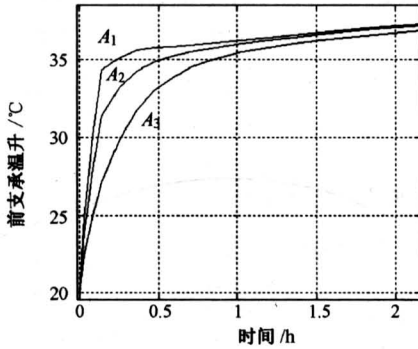


图 8 不同转速进行预热时温升的变化曲线

Fig.8 Temperature rise curve of bearings in different rotational speeds

改进方案的热变形值比原方案要小得多。这表明改进方案对提高主轴热特性是有效果的。

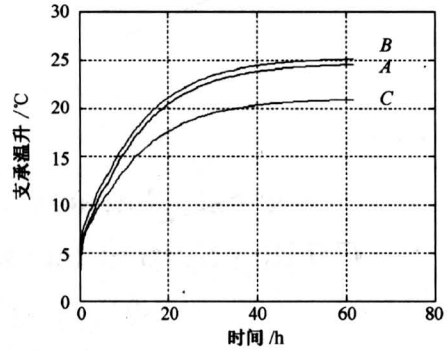


图 10 结构改进后支承的温升变化曲线

Fig.10 Temperature rise curve of bearings after improving the structure

3.2 改进冷却系统结构对主轴热特性的影响

从分析结果可以看出，数控铣床前支承部位的温度比其他部位的高，而且是影响主轴热变形最大的部位。为此，改进了 XK717 数控铣床主轴系统冷却套的布置，增加了直径为 10 mm、螺距为 20 mm 的冷却套，绕 5 圈，位置如图 9 所示。

图 10 是结构改进后冷却泵流量为 0.14 m³/h、水箱尺寸为 0.125 m³ 时支承的温升变化曲线。A 表示前支承；B 表示中间支承；C 表示后支承。从图中可以看出中间支承的温升比前支承的略大，这主要是由于轴套前面加了冷却套，使冷却效果明显加强。与图 4 相比，前支承的温升降低了近 5℃ 左右。图 11 为改进前后主轴前端面热变形的比较，图中 I 表示原方案；II 表示改进方案。可以看出，

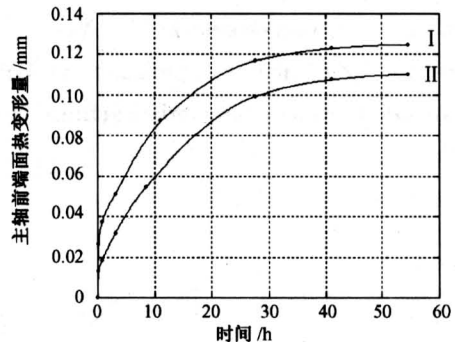


图 11 改进前后主轴热变形曲线的比较

Fig.11 Comparison of thermal deformation curve of the main spindle of original and new structure

4 结论

通过建立数控铣床主轴系统的有限元模型, 分析 XK717 数控铣床主轴系统的热特性, 可以得出以下结论:

1) 使用普通水箱对铣床主轴进行冷却, 其温升变化过程是非常缓慢的。对于进行长时间加工的、精度要求比较高的铣床是不利的, 而采用恒温水箱比较好。

2) 数控铣床在开始加工时, 先提高数控铣床的转速进行预热, 可以使温升和热变形随时间快速到达拐点, 避开数控铣床热变形最快的时段, 这对加工是非常有利的。

3) 在主轴轴套的前支承部位增加冷却套, 可以提高主轴系统的热特性。

参考文献

- [1] Kim Sun-Min, Lee Kang-Jae, Lee Sun-Kyu. Effect of bearing support structure on the high-speed spindle bearing compliance[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2002, 42(3): 365~373
- [2] Moriwaki, Toshimichi, Shamoto. Analysis of thermal deformation of an ultraprecision air spindle system [J]. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 1998, 47: 315~319
- [3] Choi Jin-Kyung, Lee Dai-Gil. Thermal characteristics of the spindle bearing system with a gear located on the bearing span [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 1998, 38: 1017~1031
- [4] 蒋兴奇. 主轴轴承热特性及对速度和动力学性能影响的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2001
- [5] 王金生, 翁泽宇, 姚春燕, 彭伟. ANSYS 在数控铣床热特性分析中的应用[J]. 浙江工业大学学报, 2004, 32(3): 255~259

Thermal Characteristics of the Main Spindle With Cooling System on the XK717 CNC Milling Machine

Wang Jinsheng, Hu Rufu, Wu Xiuhai

(Taizhou Vocational and Technical College, Taizhou, Zhejiang 318000, China)

[Abstract] The main spindle system is a key part on the machine tools. The quality of thermal behavior influences the machining accuracy of machine tools directly. In this paper, thermal characteristics of spindle system on the XK717 CNC milling machine are analyzed by combining finite element method with cooling model between spindle system and water tank. Effect rule to thermal characteristics of the main spindle system are obtained. The cooling jacket on the main spindle is improved by the results. This research provides the theoretical fundamentals for optimization design of CNC milling machine.

[Key words] thermal characteristics; finite element; optimization design; CNC milling machine