

机床热变形误差综合*

庄有土

(精密机械工程系)

摘 要

本文作者提出一种新方法和方程式来综合按热变形规律变化的尺寸对机床精度的影响, 并建议采用机床的精度失控时间来评价机床的热态精度。

一、引 言

随着加工精度及自动化水平的日益提高, 机床热变形对加工精度的影响也日益突出。用调整法精加工, 热变形引起的误差往往占加工总误差的 50% 以上。

本文借用尺寸链的方法, 探讨按热变形规律变化的机床各有关零部件的尺寸对机床热态精度的影响, 提出“利用封闭环反映出的增环优势或减环优势而决策”的改善机床热态精度的新思路。

机床热变形尺寸链与机床装配尺寸链, 虽然都是研究各组成环对机床精度(封闭环)的影响, 但机床热变形尺寸链的结构及其解法与机床装配尺寸链应有许多重要区别。目前, 有关尺寸链的论著^[1-4]都本能注意到这些区别, 由于机床热变形尺寸链的组成环在某一时刻的热变形量不是随机数, 而是由规律决定的特定量, 因此机床热变形尺寸链既不能用概率法解, 也不能用极值法解。本文给出一表达式来综合各组成环热变形对机床热态精度的影响。

机床热平衡时间尽管是机床热态特性的重要参数, 但它只反映机床温度场及热变形场对于时间的关系, 未能直接反映机床精度与时间的关系。而有些机床热平衡后热态精度反而达不到要求, 而有些机床的热态精度在热平衡前早就稳定下来并符合要求。因此, 本文作者建议用机床的精度失控时间来评价一台机床的热态特性的优劣。它比用热平衡时间评价实用且便于测定。

本文通过对 M7130 平面磨床的热变形实验来探讨机床热变形尺寸链的结构及其解法。

本文 1986 年 12 月 16 日收到。

* 本文撰写及实验得到张伯霖、李易平和郑锦川等同志的帮助, 特此致谢。

二、热变形尺寸链的提出

M7130 普通卧轴矩台平面磨床是机械加工车间常用的平面精加工设备。由于加工常有间断、午休及非三班连续加工,机床绝大部分时间工作在热平衡前。精密机床可采用高速空运转,在较短的时间 1—2h 内达到准热平衡,然后才进行加工。普通精度的机床热平衡时间较长,在热平衡前必需进行加工,因此热平衡前机床的动态精度是至关重要的,探讨机床热变形尺寸链也就十分必要。

对于工件的尺寸精度,机床热平衡前的变形对其影响视加工方法而异,采用试切法影响较小,采用调整法则有较严重的影响,往往在热平衡前要作补充调整。

对于工件的位置精度,如两表面的平行度、垂直度等,机床热平衡前的变形对其影响就难于用改变加工方法来消减。只有依据机床热变形实验及热变形尺寸链的分析,找出对策改善机床的热态特性后,才可能确保工件的位置精度。

对于工件的几何精度,主要取决于机床的冷态精度。在许多场合下也受机床热变形的严重影响,但热变形尺寸链较短。

三、机床装配尺寸链

M7130 机床精度检验项目有八项。第 8 项:试件表面精磨后对其基面的不平行度,允差为 0.008/300 或 0.015/1000。第 8 项精度是机床精度的综合指标,是前七项一些误差的综合,其中第 3 及第 2 项的影响最大。

第 3 项:磨头横向移动对工作台面的不平行度,允差为 0.010/300。

工作台面是工件的位置基准,工件在工作台面上的定位,实质是对成形运动的定位。工作台面能否代表工件的成形运动基准,视工作台面纵横方位能否与机床纵横运动的方位一致。若不一致,工件的位置基准就会与其运动基准不重合,从而导致工件的加工表面与其定位基准面的不平行度误差。磨头横向移动对工作台面的不平行度,就是运动基准对于位置基准偏离,它将直接反映到加工误差中去。

第 3 项精度的装配尺寸链很长,其组成环包括 $\alpha_{\text{工作台}}$, $\alpha_{\text{床身}}$, $\alpha_{\text{立柱}}$, $\alpha_{\text{拖板}}$ (图 1)。

第 3 项精度并不是通过下式

$$\alpha_{\text{第3项}} \geq \alpha_{\text{工作台}} + \alpha_{\text{床身}} + \alpha_{\text{立柱}} + \alpha_{\text{拖板}}$$

或

$$\alpha_{\text{第3项}} \geq \sqrt{\alpha_{\text{工作台}}^2 + \alpha_{\text{床身}}^2 + \alpha_{\text{立柱}}^2 + \alpha_{\text{拖板}}^2}$$

来确保的,这样处理加工精度要求太高,不经济。达到第 3 项精度的工艺应是在确保各有关运动表面及接合面的平直度和接触质量的前提下就地配磨工作台面。在机床装配后用本机床的磨头砂轮来加工工作台面,工作台面与磨头的横向移动方向就能很好地平行。解第 3 项精度的装配尺寸链的办法实质是以 $\alpha_{\text{工作台}}$ 作为修配环进行就地修配。此尺寸链虽长,但

精度),而且取决于工艺系统的动态精度。

图4是以 $B_{\text{机床}}$ 为封闭环的机床装配尺寸链($B_{\text{机床}}$ 就是图3的 $A_{\text{机床}}$,它在 A 尺寸链中是一个组成环)。以 $B_{\text{机床}}$ 为封闭环的 B 尺寸链有六个组成环: $B_{\text{工作台}}$ 、 $B_{\text{床身}}$ 、 $B_{\text{立柱}}$ 、 $B_{\text{丝杠}}$ 、 $B_{\text{拖板}}$ 、及 $B_{\text{砂轮座}}$ 。由于 B 尺寸链的组成环中有一个动调节环 $B_{\text{丝杠}}$,故这种线性尺寸链在装配尺寸链中是毫无意义的。但是,当把 $B_{\text{机床}}$ 作为动态精度尺寸链的封闭环时,譬如,研究机床各有关零部件热变形对已调好的尺寸 $B_{\text{机床}}$ 的影响时,这条线性尺寸链就值得研究,而且变得甚为重要了。这是热变形尺寸链有别于装配尺寸链的一个方面。

2. 以 $C_{\text{机床}}$ (即 $B_{\text{机床}}$)为封闭环的热变形尺寸链与以 $B_{\text{机床}}$ 为封闭环的装配尺寸链的组成环结构也有重要区别。比较图5的 C 尺寸链与图4的 B 尺寸链可知:

(1) $B_{\text{床身}}$ 变为两环: $C_{\text{前床身}}$ 和 $C_{\text{后床身}}$ 。这是由于前床身的热膨胀不同于后床身,而且床身底面也常出现弯曲。

(2) 必须加上两个零值组成环: $C_{\text{纵导轨}}$ 和 $C_{\text{横导轨}}$ 。这是由于机床导轨副的热弯曲不一致引起的间隙,此间隙有时达 $30\mu\text{m}$ 以上。对于装配尺寸链,导轨副之间接触良好,装配时单位面积有接触点数的要求,使导轨副的配合良好。因此装配尺寸链一般不包含这种不具有实体尺寸的零值组成环。

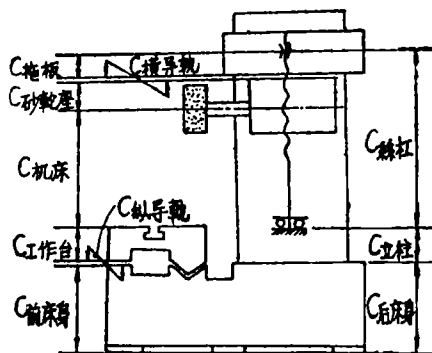


图 5

3. 用互换法装配的装配尺寸链各组成环的偏差出现是随机的,对于封闭环的贡献可用

$$\text{极值法} \quad \delta_{\text{封闭环}} \geq \sum_{i=1}^{n-1} |K_i| \cdot \delta_i \quad (1)$$

或

$$\text{概率法} \quad \delta_{\text{封闭环}} \geq \sqrt{\sum_{i=1}^{n-1} K_i^2 \cdot \delta_i^2} \quad (2)$$

其中, n 为包括封闭环的尺寸链总环数; K_i 为第 i 个组成环的传递比,在线性尺寸链中,增环的 $K_i = +1$,减环的 $K_i = -1$ 。

对于机床装配尺寸链,既可用极值法也可用概率法,来综合各组成环公差对封闭环的影响,而且当组成环数多、批量大时,用概率法更合适。

机床热变形尺寸链不能如此综合组成环的尺寸变异对封闭环的影响。这是因为 $C_{\text{机床}}$ 一经调整到加工尺寸,各组成环的尺寸也是既定的。机床开动后,各组成环的尺寸变化并不是随机的,而是按热变形的规律变化的。令 $\delta_{i\tau}$ 为组成环 C_i 在 τ 时刻的变形量, δ_{iB} 为组成环 C_i 达到热平衡后的变形量, τ_i 为组成环 C_i 的升温时间常数,根据大量实验数据的拟合,得到

$$\delta_{i\tau} = \delta_{iB} (1 - e^{-\frac{\tau}{\tau_i}}) \quad (3)$$

公式中的各参数可用图 6 表示。

$\delta_{\text{封}\tau}$ 的综合可以用下式表示

$$\delta_{\text{封}\tau} = \sum_{i=1}^{n-1} K_i \delta_{i\tau} \quad (4)$$

用式 (3) 代入式 (4) 得

$$\delta_{\text{封}\tau} = \sum_{i=1}^{n-1} K_i \delta_{iB} (1 - e^{-\frac{\tau}{\tau_i}}) \quad (5)$$

用式 (1) 或式 (2) 综合机床装配尺寸链组成环公差对封闭环的贡献；用式 (4) 或式 (5) 综合机床热变形尺寸链组成环按规律的尺寸变异对封闭环的贡献。此两种综合方法的主要区别在于：

(1) 热变形尺寸链组成环的传递比必须考虑其符号，不同符号对封闭环的贡献起抵消的作用。而装配尺寸链组成环的传递比的符号对封闭环不造成影响，不管是增环还是减环，它们的公差都会增大封闭环的公差。因此，封闭环的公差总是大于各组成环的公差。热变形尺寸链中，增环的热胀与减环的热胀之差才是封闭环的热位移。因此，封闭环的热位移往往可小于个别组成环的热位移。

(2) 热变形尺寸链组成环的尺寸变异是有规律的，不是独立随机变量，因此不能用概率法解。热变形尺寸链组成环在时刻的变异值 $\delta_{i\tau}$ 是一个特定值。没有变异幅，不能在一定范围内取值。因此热变形尺寸链的解法也不同于装配尺寸链的极值解法。

(3) 装配尺寸链的 $\delta_{\text{封闭环}}$ 只能取正值，热变形尺寸链的 $\delta_{\text{封}\tau}$ 是一个特定值，当增环优势时， $\delta_{\text{封}\tau}$ 为正值，当减环优势时， $\delta_{\text{封}\tau}$ 为负值。

图 7 是壁厚均匀且受热处处均匀的机床箱体组件，一件高 B ，另一件高 C ，它们有共同的装配基准，若尺寸 A 是封闭环，则

$$\delta_{A\tau} = K_B \delta_{B\tau} + K_C \delta_{C\tau}$$

由于 B 是增环， $K_B = +1$ ， C 是减环， $K_C = -1$ ，故

$$\delta_{A\tau} = \delta_{B\tau} - \delta_{C\tau} = \delta_{BB} (1 - e^{-\frac{\tau}{\tau_B}}) - \delta_{CC} (1 - e^{-\frac{\tau}{\tau_C}})$$

图 8 指明了各量之间的关系，根据物理条件， $\tau_B = \tau_C = \tau_A$ 。

封闭环的 $\delta_{A\tau}$ 为正值，说明增环的膨胀量 $\delta_{B\tau}$ 比减环的膨胀量 $\delta_{C\tau}$ 大，是属于增环优势的尺寸链。若热变态精度要求较高，则必须消减这种增环优势。如降低 B 的温升水平或提高 C 的温升水平，或者 B 的实体材料不同于 C ，使 C 材料的热胀系数略大于 B 都是消减增环优势的有效对策。

若 B 及 C 尺寸的热膨胀是由于底部共同的装配基准温度高引起的，物理条件变了，可能 τ_C 会小于 τ_B ，则 $\delta_{A\tau}$ 可

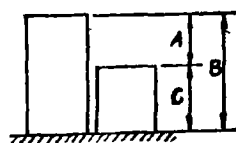
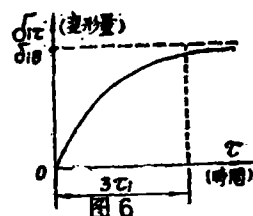


图 7

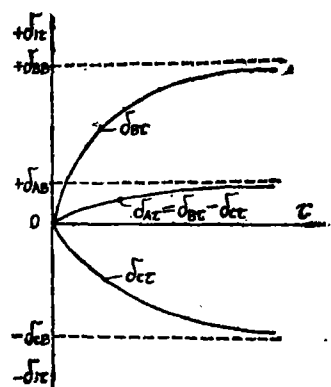


图 8

能出现非单调,如图9所示。先出现减环优势,后变为增环优势。

(4) 要提高机床的热态精度,只要设法消减增环优势或减环优势,使这种优势被控制在热态精度的允许范围之内,因此,在 $\delta_{\text{封}\tau}$ — τ 图中可增设两条精度控制线。图10为图12(C)的关于第2项精度的 $\alpha_{\text{封}\tau}$ — τ 图,其中

$$\alpha_{\text{增环}\tau} = \alpha_{\text{床身}\tau}$$

$$\alpha_{\text{减环}\tau} = \alpha_{\text{工作台}\tau} + \alpha_{\text{导轨}\tau}$$

$$\alpha_{\text{封}\tau} = \alpha_{\text{增环}\tau} - \alpha_{\text{减环}\tau}$$

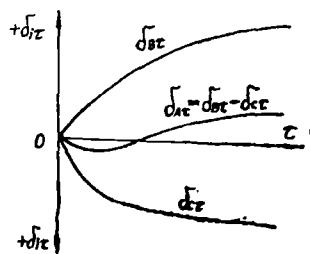


图9

一开机床便磨工作台。因此增减环都从零开始。由图10可见, $\alpha_{\text{封}\tau}$ 是负值,此尺寸链系减环优势,而且减环优势已超出精度控制线,此机床热平衡后仍然无法加工出合格工件,精度失控时间为无穷大。为了使 $\alpha_{\text{封}\tau}$ 移到精度控制线内,此机床开机42min磨工作台,精度失控时间由无穷大降到仅7min,这是削弱减环(工作台为减环)优势得到的效益(图11)。

由于各组成环的时间常数不一,因此 $\delta_{\text{增}\tau}$ 的曲线不一定很简单,可能出现数个拐点。为了使 $\delta_{\text{封}\tau}$ 在热平衡后能处于精度控制线内,有时可用冷态误差补偿法(如图11),有意造成一种冷态误差来补偿热变形,使 $\delta_{\text{封}\tau}$ 在热平衡前夕就处于精度控制线之内。例如,平磨横向不平行度允差为0.010/300,发现热平衡后为0.012/300,而冷态时为0.005/300,而且热态都是前高后低,对于这种情况,若能做到冷态是后高前低的0.005/300,则热态就只有0.002/300,取得较好的效果。

当封闭环的 $\alpha_{\text{封}\tau}$ 的变异幅超出精度控制线之间的宽度,不管如何移动 $\alpha_{\text{封}\tau}$, $\alpha_{\text{封}\tau}$ 的一部分总要超出精度控制线,造成超差。这时应先确保热平衡后 $\alpha_{\text{封}\tau}$ 处于精度控制线内,而热平衡前可允许 $\alpha_{\text{封}\tau}$ 部分超出控制线,出现较短的精度失控时间。当然,应使精度失控时间尽量短,而且 $\delta_{\text{封}\tau}$ 在热平衡后要尽量靠近零线。

机床的精度失控时间比机床的热平衡时间更有用,更能反映机床的热态精度及热态特性,机床热平衡了,它的精度可能是最坏的时候(图10),有的机床远未达到热平衡, $\delta_{\text{封}\tau}$ 却早已稳定在精度控制线内了(图11)。这就是大多数机床应有的品质。机床的精度失控时

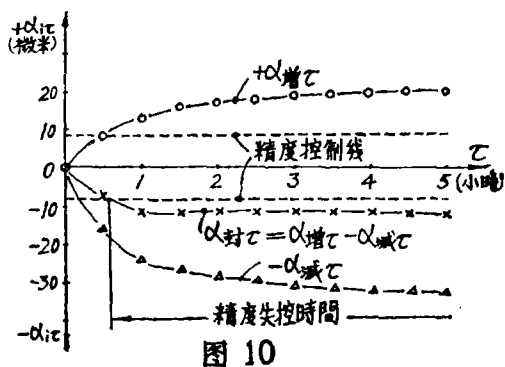


图10

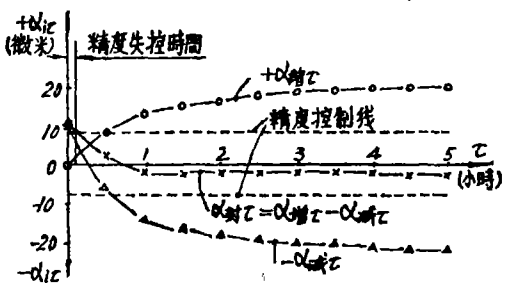


图11

间都必须通过就地配磨等办法限制在热平衡时间之内,最好通过实验研究,让优势环的优势从开机时就得到抑制,使 $\delta_{\text{封}r}$ 始终处于精度控制线之内,此机床就是热态精度合格、热态特性良好的机床。

精密机床往往用高速空运转使机床达到准热平衡才开始加工,说明这种机床在热平衡前精度难于控制,高速空运转所用的时间为该机床的精度失控时间。英国标准规定 4 级大型滚齿机的温升应控制在 1.1°C 以内,並需在空运转 40h 后才能进行切齿和校正,这 40h 就是此滚齿机的精度失控时间。

本文作者认为,用机床的精度失控时间来评价机床的热动态精度及机床的热态特性是很实用的,便于控制又便于测定。机床用户关心的是精度的动态特性而不是热平衡与否。因此,作者建议用精度失控时间作为一个比机床热平衡时间更基本的指标来评价一台机床的热特性。

参 考 文 献

- 【1】卞铭健,工艺尺寸链计算,福建科技出版社,(1983),245.
- 【2】哈尔滨工业大学、上海工大主编,机械制造工艺规程的制订及装配尺寸链,上海科技出版社,(1980),7,77.
- 【3】〔苏〕N.C.梭罗宁、C.N.梭罗宁,装配尺寸链和工艺尺寸链的计算,上海出版社,(1986),34.
- 【4】石振东,平面尺寸链的精度计算与分配,黑龙江科技出版社,(1986),269.

Combination of Error on Thermal Deformation of Machine Tool

Zhung Youtu

Abstract

This paper presents a new method and related equation to combine the effect of dimensions, which vary with thermal deformation, on the precision of machine tool. It proposes to appreciate thermal state precision of machine tool adopting time of precision losing control of machine tool.