DOI: 10.3901/JME.2020.11.172

基于误差状态最优估计的精密机床 装配调整工艺决策*

郭俊康^{1,2} 李宝童^{1,2} 洪 军^{1,2} 李鑫波^{1,2}

(1. 西安交通大学机械工程学院 西安 710049;

2. 西安交通大学现代设计及转子轴承系统教育部重点实验室 西安 710049)

摘要: 精密机床作为现代装备制造业的工作母机,其设计与制造水平对国防与基础工业发展具有举足轻重的影响。几何精度是衡量机床性能的关键指标,是保证加工精度的首要因素。然而目前机床及精密机械装配工艺规划多依赖于设计人员经验,缺乏准确量化的装配测量与调整工艺研究,导致装配过程的反复装调,装配效率较低。提出了基于误差状态最优估计的精密机床装配调整工艺决策方法。基于精密机床装配过程误差传递状态空间模型,运用卡尔曼滤波方法基于测量数据对当前装配误差状态进行最优估计。在最优估计基础上,进一步采用最优控制方法,得到满足最终装配精度要求的最优调整工艺。该方法综合考虑了测量不确定度、装配精度、调整工时成本等因素,实现了精密机床装配过程调整工艺的准确决策。最后,通过卧式加工中心装配的实例分析,验证了所提出方法的可行性和有效性。

关键词: 机床; 装配; 调整工艺; 最优估计; 最优控制

中图分类号: TH161

Assembly Adjustment Process Planning of Precision Machine Tools Based on Optimal Estimation of Variation Propagation

GUO Junkang^{1,2} LI Baotong^{1,2} HONG Jun^{1,2} LI Xinbo^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049;

2. Key Laboratory for Modern Design & Rotor-Bearing System, Ministry of Education, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049)

Abstract: Precision machine tool is the base of modern equipment manufacturing industry. Geometric accuracy is the key requirement for machine tools. However, assembly process planning of machine tools mainly depends on the experience of designers. Adjustment process is usually repeated several times due to the lack of quantitative analysis and optimal planning. A method for assembly adjustment process planning of precision machine tools is proposed. Based on the state space model of assembly variation propagation of machine tools, Kalman filter is used to estimate the variation accumulation in each assembly step. Optimal control is introduced to obtain the optimal adjustment process to meet the final assembly accuracy based on estimation of the variation accumulation in the current step. Measurement uncertainty, assembly accuracy requirement and time cost of adjustment are taken into account in this method. The optimal adjustment process and the amount of adjustment can be calculated so that technicians only need to adjust one time to achieve the assembly accuracy. Finally, the feasibility and effectiveness of the proposed method are verified through the case study of a horizontal machining center assembly.

Key words: machine tool; assembly; adjustment process; optimal estimation; optimal control

0 前言

机床是现代装备制造业的工作母机,是实现制

造技术和装备现代化的基石。高端机床的技术水平和研发能力决定着一个国家的国防实力和经济实力,其先进设计理论及关键技术的研究已经成为各国科研力量重点投入的焦点之一。几何精度是衡量机床性能的关键指标,是保证加工精度的首要因素。机床几何精度来源于设计、加工、装配多个环节的共同保障。长期以来我国机床制

* 国家自然科学基金(51805419, 51635010)和中国博士后科学基金(2018M631147, 2019T120899)资助项目。20190521 收到初稿, 20191227 收到修改稿

造中, 以几何精度保障为目标的公差设计与工艺规划大多采用类比法, 很大程度上依赖于设计人员的工程经验。

精密机床对装配精度要求极为苛刻, 一味通过收紧零件设计公差控制装配误差积累会使零件加工成本急剧上升, 甚至无法加工。因此, 对于精密机床等精密机械来说, 在装配阶段进行几何误差精密测量与几何误差精准调控, 成为装配误差积累控制, 保证装配精度的关键。从工程实践角度, 针对精密机床几何精度保障, 需要解决如何依据工艺能力进行最优调整工艺确定、公差设计、装配工艺规程设计, 以及在实际装配过程中的误差状态最优估计与最优调整等问题。

在机床装配过程中, 主要通过调整工艺(刮研或再加工等)对装配过程误差累积进行调整。准确的装配调整工艺决策, 能够合理控制装配误差累积, 避免反复拆装调整, 提高精密机床装配效率和保证装配精度。精密机床几何精度与装配误差传递建模是掌握装配误差传递机理的基础。在此方面, PORTMAN^[1]提出以刚体运动学作为机床误差建模的理论基础。KIRIDENA 和 FERREIRA 等^[2]用 D-H 法建立了 TTTRR、RTTTR、RRTTT 形式的五坐标机床的空间几何误差模型, 研究了定位误差与体积误差之间的映射关系, 该研究也使 D-H 法被广泛地用于各种多轴机床的空间几何误差建模^[3]。TIAN 等^[4]借鉴机器人机构学中旋量理论提出了一种机床几何误差的构建方法, 该方法将可补偿与不可补偿误差直接区分开来, 为设计人员进行精度设计与误差补偿提供了指导。FU 等^[5]基于运动微分矢量, 提出了一种五轴机床的几何误差建模、辨识与补偿方法。以上机床几何精度建模研究主要借鉴运用机器人学中多体系统刚体运动方法, 洪军等^[6]在此基础

上, 提出了运用状态空间模型描述精密机床装配过程误差传递的模型, 实现了对精密机械装配中多步多工序特点及测量与调整工艺的描述。

在飞机及汽车车身等柔性件装配中, 一些学者提出了在线尺寸测量与控制的过程偏差估计方法^[7], 这种估计方法同样应用于偏差源辨识^[8]、传感器优化布置^[9]、定位方案设计^[10]等实际生产过程中。然而, 机床与柔性件装配工艺存在许多不同之处, 柔性件装配中每一步的偏差积累与控制主要决定于夹具精度^[11]。机床各关键几何特征误差状态本身的最优估计是机床装配过程偏差积累控制的主要内容, 需要针对机床装配过程的具体特点与需求, 进一步开展有关精密机械装配误差估计方法及调整工艺决策方面的研究。本文基于机床装配过程误差传递状态空间模型与误差最优估计提出装配过程调整工艺策略, 为精密机床装配工艺量化决策提供理论依据。

1 精密机床装配误差状态空间模型

1.1 基于关键几何特征的精密机床误差传递链

机床结构中, 进给系统与主轴系统都是安装于机床基础大件(支承件)的几何特征面上, 机床精度设计和装配过程中测量与调整工艺主要是针对这些几何特征面进行。因此, 定义这些几何特征面为机床装配误差传递的关键几何特征(Key characteristics, KC)。图 1 所示为典型的卧式加工中心机床结构, 该机床结构中包含 X , Y , Z 三个运动轴以及平行于 Y 轴的 B 轴回转轴。

在该机床结构中, 需要保证 X , Y , Z 三个运动轴相互垂直, 保证 Y 轴与 B 轴平行。为了描述机床结构空间及装配过程中几何误差状态, 基于关键几

图 1 卧式加工中心基准传递链及关键几何特征

何特征构建基准传递链(Datum flow chain, DFC)^[12]。床身通常是首先安装,因此以床身立柱安装面作为机床的基准特征。从基准特征出发,包含立柱-滑座-主轴箱与床身-转台滑座-工作台两条传递链。

1.2 精密机床装配过程误差传递状态空间模型

由于各运动轴之间的相对位置并不影响机床加工精度,在机床装配过程中,主要保证各运动轴在空间中的相对角度关系(一般为平行或垂直)。基于微分运动矢量,在基准传递链上第 n 个零件特征的变动坐标系总方位偏差相对于基准传递链上第一个零件的参考坐标系,通过其微分旋转矢量表达为

$$d\theta_n = \delta_n = [\delta_n^x \quad \delta_n^y \quad \delta_n^z]^T$$

第 n 个零件由于加工误差引入的两个特征之间的角度误差可以表示为

$$\Delta\theta_n = [\Delta\theta_{xn} \quad \Delta\theta_{yn} \quad \Delta\theta_{zn}]^T$$

具有如下关系

$$\delta_n = \begin{bmatrix} \delta_n^x \\ \delta_n^y \\ \delta_n^z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_{(5,1),1} & W_{(5,1),2} & \cdots & W_{(5,1),n} \\ W_{(5,2),1} & W_{(5,2),2} & \cdots & W_{(5,2),n} \\ W_{(5,3),1} & W_{(5,3),2} & \cdots & W_{(5,3),n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\theta_{x1} \\ \Delta\theta_{x2} \\ \vdots \\ \Delta\theta_{xn} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} W_{(7,1),1} & W_{(7,1),2} & \cdots & W_{(7,1),n} \\ W_{(7,2),1} & W_{(7,2),2} & \cdots & W_{(7,2),n} \\ W_{(7,3),1} & W_{(7,3),2} & \cdots & W_{(7,3),n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\theta_{y1} \\ \Delta\theta_{y2} \\ \vdots \\ \Delta\theta_{yn} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} W_{(9,1),1} & W_{(9,1),2} & \cdots & W_{(9,1),n} \\ W_{(9,2),1} & W_{(9,2),2} & \cdots & W_{(9,2),n} \\ W_{(9,3),1} & W_{(9,3),2} & \cdots & W_{(9,3),n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\theta_{z1} \\ \Delta\theta_{z2} \\ \vdots \\ \Delta\theta_{zn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

以状态变量 $\mathbf{x}(k)$ 表示装配过程第 k 步所有基准传递链上各关键几何特征的微分旋转矢量,得到

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}(k)\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}(k)\mathbf{u}(k) + \mathbf{F}(k)\mathbf{w}(k) \quad (2)$$

$$\mathbf{y}(k) = \mathbf{C}(k)\mathbf{x}(k) + \mathbf{v}(k)$$

式中, $\mathbf{A}(k)$ 为单位矩阵; $\mathbf{w}(k)$ 描述了装配过程中第 k 步新装配零件加工误差引入的几何误差。几何误差基于该零件的零件坐标系,通过测量或零件的公差要求得到。在机床装配中,只关心其角度误差,则有: $\mathbf{w}(k) = \Delta\theta(k)$; $\mathbf{F}(k)$ 是一个转换矩阵,将装配过程中第 k 步中基于零件坐标系的新装配零件误差转换为相对于基准传递链的基准坐标系误差,这里

$$\mathbf{F}(k) = \begin{bmatrix} W_{DFC1} & \mathbf{O} & \cdots & \mathbf{O} \\ \mathbf{O} & W_{DFC2} & \cdots & \mathbf{O} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{O} & \mathbf{O} & \cdots & W_{DFCm} \end{bmatrix}$$

式中, $\mathbf{u}(k)$ 为调整矢量,表示在机床装配过程中,对装配体的某些关键几何特征通过再加工或刮研方式进行几何精度的调整。其定义类似于 $\mathbf{w}(k)$, 同样表示零件坐标系中关键几何特征相对于基准特征的角度变化; $\mathbf{B}(k)$ 同样是一个转换矩阵。当在零件坐标系中 $\mathbf{u}(k)$ 和 $\mathbf{w}(k)$ 具有同样的定义时,转换矩阵 $\mathbf{B}(k)$ 与 $\mathbf{F}(k)$ 也完全相同; $\mathbf{C}(k)$ 是元素为 1、-1 或 0 的观测矩阵,其列数与状态变量(关键几何特征数)相同,用来定义装配过程中,第 k 步中测量的关键几何特征的相对方位。对于机床装配,通常为两个关键几何特征(特征面或运动轴)的平行度或垂直度; $\mathbf{v}(k)$ 为相应的测量噪声。

2 精密机床调整工艺决策

状态空间模型描述了包含测量与调整工艺的精密机床装配过程误差传递。基于状态空间模型,可以进一步运用控制论相关理论方法解决精密机床装配误差状态估计与调整工艺问题。在进行精度调整时,依赖于后续装配零件的几何误差信息,分为两种情况:零件公差或零件误差测量结果。零件误差信息不同,调整决策也不同。在设计阶段,仅有零件公差信息,此时需要依据零件公差与装配精度目标确定装配工艺规程,即控制每一步的装配误差状态。在实际装配阶段,可以通过测量获取零件实际误差信息以及装配体当前误差状态,实现更加准确的误差状态估计与调整工艺决策。

2.1 精密机床装配误差状态最优估计

精密机床装配误差传递状态空间模型建立了装配过程每一步误差输入、误差调整和误差观测的描述方法。在机床实际装配中,装配误差调控同样是一个输出反馈控制的过程。调整工艺(调整矢量) $\mathbf{u}(k)$ 取决于误差测量结果 $\mathbf{y}(k)$ 。因此,准确的误差状态估计是误差精准调控与装配精度保障的前提。基于误差传递的状态空间模型描述,可以运用卡尔曼滤波进行误差状态的最优估计。

在式(2)所描述的精密机床误差传递状态空间模型中, $\mathbf{w}(k)$ 中的元素定义为一个零件中两个关键特征之间相对角度误差。该几何误差来自于加工过程,并且误差大小受零件相关特征的公差设计约束。由于加工过程的不确定性,实际零件几何误差将有可能随机处于允许的公差带中的任意位置。在大多数加工过程的误差分析中,认为实际几何误差符合正态分布^[13]。本文中定义该几何误差为互不相关、零均值的随机矢量,即

$$\begin{aligned} E[\mathbf{w}(k)] &= \mathbf{0} \\ E[\mathbf{w}(k)\mathbf{w}^T(j)] &= \mathbf{Q}_k \delta_{kj} \end{aligned} \quad (3)$$

同时假设 $\mathbf{v}(k)$ 为决定于实际测量仪器选择以及测量方法的互不相关、零均值矢量。对于机床装配过程测量，可将该测量噪声直接代替为测量方法的测量不确定度，并且假设零件的加工误差与测量不确定度同样互不相关，有

$$\begin{aligned} E[\mathbf{v}(k)] &= \mathbf{0} \\ E[\mathbf{v}(k)\mathbf{v}^T(j)] &= \mathbf{R}_k \delta_{kj} \\ E[\mathbf{w}(k)\mathbf{v}^T(j)] &= \mathbf{0} \end{aligned} \quad (4)$$

式中， $\mathbf{0}$ 为零矩阵。

在机床装配的初始状态，没有零件被装配，没有零件误差引入，假设这时装配体为理论上不存在几何误差的理想模型。装配误差矢量和估计误差方差矩阵均为零矩阵。

基于卡尔曼滤波，不包含控制过程的机床装配过程误差状态矢量的最优估计可以表示为

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{x}}(k+1/k) &= \mathbf{A}(k+1, k)\hat{\mathbf{x}}(k/k) \\ \mathbf{P}(k+1/k) &= \mathbf{A}(k+1, k)\mathbf{P}(k/k)\mathbf{A}^T(k+1, k) + \\ &\quad \mathbf{F}(k+1, k)\mathbf{Q}_k\mathbf{F}^T(k+1, k) \\ \hat{\mathbf{x}}(k+1/k+1) &= \hat{\mathbf{x}}(k+1/k) + \mathbf{K}(k+1) \times \\ &\quad [\mathbf{y}(k+1) - \mathbf{C}(k+1)\hat{\mathbf{x}}(k+1/k)] \\ \mathbf{P}(k+1/k+1) &= [\mathbf{I} - \mathbf{K}(k+1)\mathbf{C}(k+1)]\mathbf{P}(k+1/k) \\ \mathbf{K}(k+1) &= \mathbf{P}(k+1/k)\mathbf{C}^T(k+1)[\mathbf{C}(k+1)\mathbf{P}(k+1/k) \times \\ &\quad \mathbf{C}^T(k+1) + \mathbf{R}_{k+1}]^{-1} \end{aligned} \quad (5)$$

式中， k 为第 k 步装配过程， $\hat{\mathbf{x}}(k+1/k)$ 为第 k 步装配过程的状态矢量一步最优预测， $\hat{\mathbf{x}}(k+1/k+1)$ 为第 $(k+1)$ 步中状态矢量的最优估计， $\mathbf{P}(k+1/k)$ 和 $\mathbf{P}(k+1/k+1)$ 分别为其估计误差方差矩阵， $\mathbf{K}(k)$ 为最优增益矩阵。

装配过程最优调整工艺取决于当前误差状态矢量的估计值 $\hat{\mathbf{x}}(k)$ 。估计误差方差 $\mathbf{P}(k)$ 作为评价估计值准确度的指标同样非常重要，其能够保证状态矢量的估计误差 $\tilde{\mathbf{x}}(k)$ 在一个确定的区间内，其中 $\tilde{\mathbf{x}}(k) = \mathbf{x}(k) - \hat{\mathbf{x}}(k)$ 。因此，机床装配过程中同样希望估计误差方差处于一个小的区间之内，这样就能保证误差传递估计的可靠性。估计误差方差主要受装配过程每一步输入误差方差矩阵 $\mathbf{Q}_k$ 、测量噪声方差矩阵 $\mathbf{R}_k$ 和观测矩阵 $\mathbf{C}(k)$ 三个因素的影响，也即通过控制零件误差方差，降低测量不确定度，优化测量工艺等可以减低估计误差方差。

当通过测量获取了零件实际误差信息时，在进行误差状态最优估计时，每一步输入误差的期望不

为零。这时将该装配步新安装零件的实测几何误差作为控制矢量 $\mathbf{u}(k)$ ，将其测量不确定度作为误差扰动 $\mathbf{w}(k)$ 引入状态空间方程中，且假设零件几何误差测量不确定度与装配过程误差测量不确定度互不相关，即仍满足式(4)中假设。此时，基于包含控制矢量的卡尔曼滤波最优估计，装配过程第 k 步的状态预测可改写为

$$\hat{\mathbf{x}}(k+1/k) = \mathbf{A}(k+1, k)\hat{\mathbf{x}}(k/k) + \mathbf{B}(k+1, k)\mathbf{u}(k) \quad (6)$$

其他各项与式(5)相比无变化。

2.2 基于最优估计的精密机床装配调整工艺

基于卡尔曼滤波方法可以实现对精密机床装配误差状态的最优估计，在误差状态最优估计的基础上，可以对当前装配误差进行调整，以使装配完成后机床精度满足要求。

当已知零件公差时，相当于精密机床误差空间累积中各个组成环节误差进行了约束，只需要进一步给定装配过程的装配序列与调整工艺，便可以得到装配过程每一步所需要达到的几何误差状态，即确定装配工艺规程。笔者在前期工作中提出了以装配精度和调整工时为目标的装配过程最优调整工艺确定方法^[14]。因此，当设计人员给定装配顺序与零件公差时，依据最优调整序列，即可直接获得装配过程各步误差累积的要求范围。在实际装配中，关键几何特征误差最优估计若超出装配工艺规程要求，即为需要进行误差调整的调整量。

相比于公差信息，对于精密机床等精密装配，在装配之前对各个零件关键几何特征实际误差进行准确测量，有助于实现更加精准的装配工艺决策与装配精度保障。针对第二种情况，即已知零件误差测量结果及其测量不确定度时，需要解决如何在当前装配工步进行装配调整工艺决策，既保证装配完成后几何精度满足要求，同时装配调整最合理，即调整工时花费最少，该目标可表示为

$$J = \mathbf{y}^T(N)\mathbf{Q}(N)\mathbf{y}(N) + \sum_{k=0}^{N-1} [\mathbf{u}^T(k)\mathbf{R}(k)\mathbf{u}(k)] \quad (7)$$

式中， $\mathbf{y}(N)$ 为机床最终装配完成后(第 N 步完成后)的几何误差测量结果， $\mathbf{Q}(N)$ 为权重系数矩阵，衡量装配完成后各项测量结果误差对整机精度“质量损失”的影响程度。测量结果对应的 $\mathbf{Q}(N)$ 矩阵中系数越大，说明该测量结果几何精度对整机精度影响越大，设计中对于该项几何精度指标关注程度越大。 $\mathbf{u}(k)$ 表示第 k 步调整量(角度误差)。 $\mathbf{R}(k)$ 为对应的权重系数，表示装配过程中每一步对关键几何特征调整所付出的工时成本。 $\mathbf{R}(k)$ 中对应的元素系数越大，

说明第 k 步装配中该关键几何特征误差调整越困难, 调整付出的工时成本越大。二次型性能指标 J 通过权重系数 $Q(N)$ 和 $R(k)$ 将两方面的因素统一考虑, 给出了全局的优化目标。

由最优控制理论^[15], 使得离散二次型性能指标 J 达到最小的最优控制序列 $u^*(k)$ ($k=0,1,\dots,N-1$) 为

$$u^*(k) = -K_c(k)\hat{x}(k) \quad (8)$$

与当前误差状态最优估计 $\hat{x}(k)$ 和 $K_c(k)$ 有关, $K_c(k)$ 为卡尔曼增益, 表示了当前装配步误差状态的最优调整系数^[14]。由此, 当给定装配序列, 以及最终装配完成后的质量损失和装配过程中调整工艺工时成本的权重系数 $Q_c(N)$ 和 $R_c(k)$, 便可以求得使离散二次型性能指标 J 最小的最优控制序列 $u^*(k)$, 进而确定装配过程最优调整工艺。

图2 基于误差状态最优估计的最优调整策略

基于此, 对基于零件几何误差测量结果及最优估计的精密机床调整工艺决策过程进行梳理: 首先, 在当前第 k 步装配步对关键几何特征误差状态进行最优估计。估计信息来源于装配过程前 k 步装配误差的测量结果及测量不确定度, 及各组成零件实测误差及测量不确定度。此时, 只需要由当前误差状态期望与后续装配零件的实测结果以及最优调整量, 递推预测得到的最终装配误差观测值 $y(N)$ 是否满足机床装配精度要求即可, 其中最优调整量(最优调整序列)取决于权重系数 $Q_c(N)$ 和 $R_c(k)$ 。因此, 当 $y(N)$ 的期望超出机床精度要求时, 只需要按比例增加 $Q_c(N)$ 权重, 直到得到满足装配精度要求的当前第 k 步最优调整量 $u^*(k)$ 。

3 实例分析

以图1中卧式加工中心为例, 对本文提出基于最优估计的精密机床调整工艺决策进行实例分析, 验证方法可行性。该机床包含7个关键几何特征, 主要关注其角度误差, 关键几何特征都可以通过分别绕 X 轴、 Y 轴和 Z 轴转动, 在构件误差传递模型中状态变量有18个元素。为了更清楚地对误差传递建模过程及调整工艺决策过程进行描述与分析, 不失一般性, 采用如图3所示的四个基础大件进行建模, 其中包括: 床身(A), 立柱(B), 滑座(C)与工作台(D)。各个数字表示装配体中的关键几何特征, 其中关键几何特征 KC0 定义为基准特征。此外, 简便起见, 假设各零件和特征只有绕 X 轴方向的转动, 即为二维几何误差问题。

装配前对四个零件几何误差(特征之间的角度误差)进行测量, 可得到表1所示结果。

图3 四个基础大件的关键几何特征及误差传递

表 1 零件关键特征角度误差测量结果

	$\Delta\theta_A$	$\Delta\theta_B$	$\Delta\theta_C$	$\Delta\theta_D$
测量结果/ $\times 10^{-5}$ rad	2	1	-1.5	1.5
测量不确定度/ $\times 10^{-5}$ rad	0.8	0.8	0.6	0.6

将零件 A 和零件 B 的配合面(KPC0)选择为建模过程中坐标定义的基础特征面, 则最终装配完成后其他四个关键几何特征的空间角度误差可以表示为

$$\begin{bmatrix} \delta_1(N) \\ \delta_2(N) \\ \delta_3(N) \\ \delta_4(N) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\theta_B \\ \Delta\theta_C \\ \Delta\theta_A \\ \Delta\theta_D \end{bmatrix} \quad (9)$$

状态空间方程可以表示为

$$\begin{bmatrix} \delta_1(k+1) \\ \delta_2(k+1) \\ \delta_3(k+1) \\ \delta_4(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta_1(k) \\ \delta_2(k) \\ \delta_3(k) \\ \delta_4(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} w(k) \quad (10)$$

装配顺序, 以及装配过程中每一步的输入误差

方差矩阵、关键几何特征测量对(包括观测矩阵和测量不确定度)如表 2 所示。

其中 u_{jk} 表示关键几何特征测量对 j 和 k 的测量不确定度, 该值取决于测量采用的测量仪器与方法, 这里将装配过程中测量不确定度设为 1×10^{-5} rad。

此外, 在装配过程中, 基于最优估计需要进行后续装配过程最优调整序列计算, 最优调整序列受装配完成后观测矩阵、各步调整矩阵及其权重影响。调整矩阵 $T(k)$ 表征了该装配步可调整的关键几何特征。假设装配过程调整权重 $R_c(k)$ 如表 2 所示, 调整权重矩阵中元素表征了该装配步对应几何特征调整单位角度时需要消耗的工时成本。当零件未装配时, 权重系数可取一个较大的数(如 1 000)表示该特征不可调整。当已装配零件特征面为固定连接面不便调整时, 同样可取较大的系数表示调整工艺的难易程度。

装配过程第一步, 床身安装于地基上, 引入床身几何误差 $\Delta\theta_A$ 。基于各零件误差测量结果与床身

表 2 零件关键特征角度误差测量结果

装配步 k	第 1 步	第 2 步	第 3 步	第 4 步
关键几何特征测量对
输入误差 $w(k) (= \Delta\theta(k))$	$[0, 0, \Delta\theta_A, 0]^T$ 零件 A 安装于地基上	$[\Delta\theta_B, \Delta\theta_C, 0, 0]^T$ 装配零件 B 和 C 形成组件 BC	$[0, 0, 0, 0]^T$ 无新装配零件	$[0, 0, 0, \Delta\theta_D]^T$ 安装零件 D 于零件 A 上
输入误差方差矩阵 $Q(k)$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_A & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \sigma_B & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_C & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_D \end{bmatrix}$
测量特征	// 3 相对 0	$\perp$ 1 相对 0 $\perp$ 2 相对 0 // 2 相对 1	$\perp$ 2 相对 3	$\perp$ 2 相对 4 // 3 相对 4
观测矩阵 $C(k)$	$[0 \ 0 \ 1 \ 0]$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$[0 \ 1 \ -1 \ 0]$	$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix}$
测量不确定度 $R(k)$	u_{03}^2	$\begin{bmatrix} u_{01}^2 & 0 & 0 \\ 0 & u_{02}^2 & 0 \\ 0 & 0 & u_{12}^2 \end{bmatrix}$	u_{23}^2	$\begin{bmatrix} u_{24}^2 & 0 \\ 0 & u_{34}^2 \end{bmatrix}$
测量结果 $y(k)$ ($\times 10^{-5}$ rad)	1.8	$[1.05 \ -0.52 \ -1.45]^T$	-1.05	$[-2.1 \ -1.52]^T$
调整矩阵 $T(k)$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
调整权重 $R_c(k)$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 10 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 20 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 20 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 20 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 5 \end{bmatrix}$

装配后测量结果(KC3 相对于基准特征 KC0 的平行度)得到4个关键几何特征相对于基准的角度误差最优估计为

$$\hat{\mathbf{x}}(1)=[0 \quad 0 \quad 1.922 \quad 1.922]^T \times 10^{-5} \text{ rad}$$

由于此时零件 B、C、D 尚未装配, KC1 与 KC2 对应的角度误差 $\delta_1(1)=\delta_2(1)=0$, KC3 与 KC4 由于零件 A 误差的引入, $\delta_3(1)=\delta_4(1)=1.922 \times 10^{-5} \text{ rad}$ 。以最终装配完成后4个关键几何特征两两之间的相互平行或垂直为目标, 评价最终装配精度的观测矩阵可以表示为

$$\mathbf{C}(4)=\begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix}$$

设权重系数 $\mathbf{Q}_c(4)$ 矩阵为对角阵, 其对角元素表示该误差项的权重系数。为简便起见, 这里令对角各元素相等且为 q , 并依据装配过程中调整工艺工时成本权重系数 $\mathbf{R}_c(k)$, 可以得到最优控制序列 $\mathbf{u}^*(k)$ 。依据后续装配零件测量结果, 判断在此调整工艺下最终装配精度的期望是否满足精度要求。若不满足则增大 q 值, 直到满足装配精度要求, 得到的当前工步调整量。如图4所示, 当 q 分别为 0.01, 0.1, 1, 10 时, 即装配精度权重不断增加时, 最终关注的各几何特征之间的角度误差越来越小。

图4 不同装配精度权重下最优调整得到的最终装配精度

假设该机床装配目标精度为 $0.5 \times 10^{-5} \text{ rad}$, 则由图4可知, 只需要 q 在 1 到 10 之间细化寻找, 得到 $q=4$ 时满足装配精度要求, 进而依据最优调整序列得到该步各几何特征调整量

$$\mathbf{u}^*(k)=[0 \quad 0 \quad -0.9257 \quad -0.9257]^T \times 10^{-5} \text{ rad}$$

即当床身安装后, 根据误差测量最优估计与最优调整工艺规划, 将关键几何特征 KC3 相对于基准 KC0

的角度误差由 $1.922 \times 10^{-5} \text{ rad}$ 调整至 $0.996 \times 10^{-5} \text{ rad}$ 以下即可。

在装配第二步, 将立柱与滑座零件合装, 引入立柱与滑座的几何误差 $\Delta\theta_B$ 和 $\Delta\theta_C$ 。此时按照测量工艺对立柱与滑座合件的 KC1 与 KC0 垂直度、KC2 与 KC0 垂直度、KC1 与 KC2 平行度进行测量, 并基于测量结果进行装配误差状态最优估计。需要指出的是, 虽然合件与床身并未合装, 但对于装配系统来说, 床身、立柱、滑座零件误差已经引入, 该步可对 KC1、KC2、KC3 特征进行最优估计。依据最优估计结果与装配精度目标, 获得最优调整工艺, 并对立柱与滑座合件进行角度误差调整。在装配第三步, 合件与床身装配, 无新零件(误差)引入。在装配第四步工作台安装, 完成装配。均可按照上述方法进行误差状态最优估计及基于最优估计的装配调整工艺决策。各装配步各关键特征角度误差变化, 及各装配步各零件角度误差调整量如图5、图6所示。

图5 装配过程各关键几何特征角度误差

图6 装配过程各零件角度误差调整量

其中, 将各装配步分别调整与本文提出的调整工艺决策方法进行对比。各装配步分别调整为依照当前精密机床装配中通常采用的每步装配中将误差状态调整至满足几何精度要求(各步目标精度取为 0.5×10^{-5} rad)。而本文基于误差状态最优估计的装配调整工艺决策为依据整机装配精度目标与各组成零件误差递归优化得到最优调整序列。依据最优调整序列进行角度误差调整, 最终装配完成后各角度误差相对值(平行度、垂直度)均小于 0.5×10^{-5} rad(图 5), 满足整机装配精度要求。

本文装配调整工艺决策方法同时考虑了角度调整量(调整工时成本), 各装配步各零件累积角度误差调整量为 3.55×10^{-5} rad, 明显小于采用各装配步分别调整方法的累积调整量 4.52×10^{-5} rad(图 6), 即只需要较小的角度调整即可满足整机装配精度要求。通过实例分析, 验证了本文提出工艺决策方法对于满足装配精度目标与减少装配调整工时的有效性, 为实际精密机床及精密机械高精度装配提供了可行的工艺规划与决策方法。

4 结论

(1) 提出了一种基于误差状态最优估计的精密机床装配调整工艺决策方法。该方法综合考虑了精密机械装配精度要求、装配精度质量损失、调整工艺工时成本等因素, 基于装配过程误差状态最优估计实现调整工艺的最优决策。通过卧式加工中心装配实例分析, 验证了所提出方法的可行性和有效性。

(2) 针对精密机械装配过程提出了基于最优估计的调整工艺决策方法。在实际装配过程中, 还需进一步考虑零件的形状误差、装配变形等因素, 这也是后续需要进一步开展的研究工作。

参 考 文 献

- [1] PORTMAN V T. A universal method for calculating the accuracy of mechanical devices[J]. Soviet Engineering Research, 1982, 1 (7): 11-15.
- [2] KIRIDENA V, FERREIRA P M. Mapping the effects of positioning errors on the volumetric accuracy of five axis CNC machine tools[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 1993, 33 (3): 417-437.
- [3] 要小鹏, 殷国富, 李光明. 数控机床进给轴综合误差解耦建模与补偿研究[J]. 机械工程学报, 2016, 52 (1): 184-192.
- YAO Xiaopeng, YIN Guofu, LI Guangming. Positioning error of feed axis decouple-separating modeling and compensating research for cnc machine tools[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52 (1): 184-192.
- [4] TIAN W J, GAO W G, ZHANG D W, et al. A general approach for error modeling of machine tools[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2014, 79: 17-23.
- [5] FU G Q, FU J Z, XU Y T, et al. Accuracy enhancement of five-axis machine tool based on differential motion matrix: Geometric error modeling, identification and compensation[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2015, 89: 170-181.
- [6] 洪军, 郭俊康, 刘志刚, 等. 基于状态空间模型的精密机床装配精度预测与调整工艺[J]. 机械工程学报, 2013, 49(6): 114-121.
- HONG Jun, GUO Junkang, LIU Zhigang, et al. Assembly accuracy prediction and adjustment process modeling of precision machine tool based on state space model [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(6): 114-121.
- [7] DING Y, ZHOU S Y, CHEN Y. A comparison of process variation estimators for in-process dimensional measurements and control[J]. Journal of Dynamic Systems Measurement and Control-Transactions of the ASME, 2005, 127 (1): 69-79.
- [8] 邹景明, 金隼, 储国平. 车身检测数据的多元贝叶斯建模与质量监控[J]. 上海交通大学学报, 2013, 47(5): 697-702.
- ZOU Jingming, JIN Sun, CHU Guoping. Multivariate empirical Bayes modeling and quality monitoring for autobody measuring data[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2013, 47 (5): 697-702.
- [9] CHEN N, ZHOU S Y. Detectability study for statistical monitoring of multivariate dynamic processes[J]. IIE Transactions, 2009, 41 (7): 593-604.
- [10] 邹景明, 储国平, 梁树勇, 等. 车身零件定位方案的多变量稳健设计[J]. 上海交通大学学报, 2013, 47(9): 1353-1357.
- ZOU Jingming, CHU Guoping, LIANG Shuyong, et al. Multivariable robust locating scheme design of body parts[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2013, 47(9): 1353-1357.
- [11] JIN J, SHI J. State space modeling of sheet metal assembly for dimensional control[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering-Transactions of the ASME, 1999, 121 (4): 756-762.
- [12] MANTRIPRAGADA R, WHITNEY D E. The datum flow chain: A systematic approach to assembly design and modeling[J]. Research in Engineering Design, 1998,

- 10(3): 150-165.
- [13] SINGH P K, JAIN P K, JAIN S C. Important issues in tolerance design of mechanical assemblies. Part 1: Tolerance analysis[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B-Journal of Engineering Manufacture, 2009, 223 (10): 1225-1247.
- [14] GUO J, LIU Z, LI B, et al. Optimal tolerance allocation for precision machine tools in consideration of measurement and adjustment processes in assembly[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 80(9): 1625-1640.
- [15] 李传江, 马广富. 最优控制[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- LI Chuanjiang, MA Guangfu. Optimal control[M]. Beijing: Science Press, 2011.
-
- 作者简介: 郭俊康, 男, 1984 年出生, 助理研究员。主要研究方向为尺寸工程、装配质量保障。
E-mail: guojunkang@gmail.com
- 李宝童(通信作者), 男, 1982 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为机械结构数字化设计、拓扑优化设计。
E-mail: baotong.mc@xjtu.edu.cn