

DOI: 10.7652/xjtuxb201601018

采用自适应遗传算法的机床公差分配研究

刘鹏, 洪军, 刘志刚, 郭俊康, 周强

(西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 针对当前机床几何精度建模忽视装配过程中的调整量,以及机床公差分配时缺乏科学可行的方法问题,利用状态空间模型描述机床实际装配过程,考虑装配过程中的调整控制量,建立了更加准确的机床装配精度模型,并引入种群多样性指标,构建了用于机床公差分配的自适应遗传算法。以 TKG46100 精密卧式坐标镗床为研究对象,建立了装配精度要求与基础大件角度误差之间的映射关系,以零件加工总成本最小为目标函数,采用构建的自适应遗传算法,完成了该机床基础大件角度公差的分配。结果表明:与不考虑装配调整量的偏差累积方法相比,该方法放宽了零件加工精度,最大放宽幅度达到了 36.4%,平均放宽幅度为 12.0%,从而在满足最终装配精度要求的前提下,降低了零件加工制造成本,为机床公差分配提供了更加准确的精度建模方法和可行合适的公差分配方法。

关键词: 公差分配;状态空间模型;自适应遗传算法

中图分类号: TH161 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2016)01-0115-09

Research on the Tolerance Allocation of Machine Tools Based on Adaptive Genetic Algorithm

LIU Peng, HONG Jun, LIU Zhigang, GUO Junkang, ZHOU Qiang

(State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The current modeling methods of machine tool's geometric precision often ignore the effects of adjustment, lacking of scientific and feasible approaches to allocate the tolerance of machine tools. This paper adopts the state space model to describe the actual assemble process of a machine tool, and the adjustments in the assemble process are considered. Thus a more accurate model is set up. By introducing the index of the species diversity, an adaptive genetic algorithm for tolerance allocation is built up. The method was applied in the tolerance distribution of the angular tolerance in TKG46100. Firstly, the relationship of assembly accuracy requirements and angle error of large parts is constructed. Then taking the total cost of parts machining as the objective function and using the adaptive genetic algorithm, the optimal angle tolerance is obtained. The results show that, compared with the deviation accumulation method without considering the assembly adjustment, the machining accuracy of parts is relaxed and the maximum relaxation rate reaches 12%, with an average of 36.4%. Hence the parts manufacturing cost is reduced when the final assembly accuracy requirements are met. This research provides an accurate modeling method for machine tools' tolerance distribution.

Keywords: tolerance allocation; state space model; adaptive genetic algorithm

机床公差分配主要研究在一定装配精度约束下,同时保证一定的装配率,合理地分配各组成零件

收稿日期: 2015-06-19。 作者简介: 刘鹏(1992—),男,硕士生;洪军(通信作者),男,教授,博士生导师。

网络出版时间: 2015-11-04 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20151104.2222.004.html>

的公差,使得机床组成零件的加工成本达到最低^[1]。进行机床公差分配首先需要建立机床精度模型,国内外学者对机床精度建模进行了广泛而深入的研究。Hocken 用矩阵变换法建立了三坐标测量机的误差模型^[2]。Kiridena 等用 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^[3]。Rahman 等基于齐次坐标矩阵建立了多轴数控机床的准静态误差综合空间误差模型^[4]。国防科技大学李圣怡等基于变分法与多体系统运动学,建立了多轴机床的通用精度模型,以三轴、五轴机床为例给出了理想运动模型、有误差运动模型和空间误差模型等的具体表达式^[5-8]。2011 年, Liu 等详细讨论了数控机床各项几何误差特征之间的关系^[9]。Zhu 等于 2012 年基于多体系统模型,提出了一种面向数控机床几何误差辨识与补偿的综合建模方法^[10]。2014 年, Tian 等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^[11]。2015 年, Fu 等基于运动微分矢量,提出了一种五轴机床的几何误差建模、辨识与补偿方法^[12]。Zhong 等基于多体系统理论和齐次坐标变换,对一种大型五轴加工中心的几何误差建模、变形及补偿方法进行了研究^[13]。但是,这些精度模型不符合机床实际装配过程,忽略了装配过程中的修配刮研等调整量和装配过程中测量误差等因素^[14]。

具体实现机床精度分配问题是一多元非线性函数在约束条件下求极值问题。在理论上往往把多元非线性极值问题归结为多元非线性方程组的求根问题,然后采用迭代法求解。但是,传统的求解算法,如牛顿迭代、最速下降法,需要将问题线性化,或者求解偏导数等,在某种程度上复杂化了问题,并增加了结果的不准确性,甚至在许多时候无法得到问题的最优解^[15]。

因此,本文利用状态空间方法^[14]对机床实际装配过程进行描述,使用最优控制方法获取机床装配过程中最优调整量,进而获得机床装配精度指标与组成零件误差之间的函数关系;然后,构建了基于浮点数编码的自适应遗传算法,实现对机床公差的最优分配;最后,使用该技术方案,对 TGK46100 精密坐标镗床进行了基础大件角度公差的分配。

1 机床装配精度与零件误差关系建立

1.1 机床装配过程的状态空间模型

在机床实际装配过程中,关注的是当前装配体

的误差状态。该误差状态受到零件误差、调整刮研等影响,同时为了了解当前装配体的误差状态,会进行测量操作,而在测量时也会引入测量误差。机床装配过程中的误差状态变化如图 1 所示。

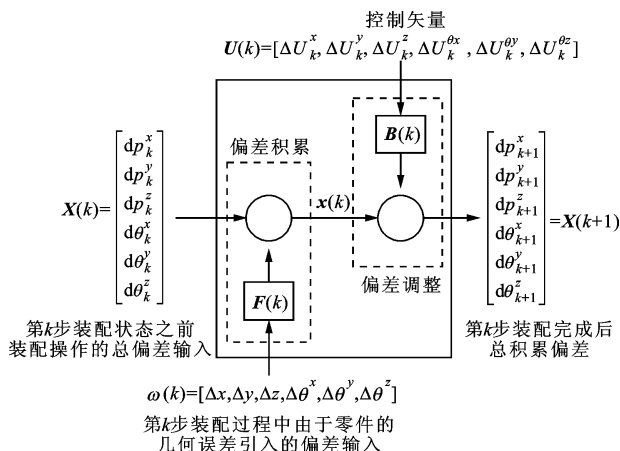


图 1 机床装配过程中误差状态转移情况

装配过程的状态空间方程^[16]为

$$\begin{aligned} \mathbf{X}(k+1) &= \mathbf{A}(k)\mathbf{X}(k) + \mathbf{B}(k)\mathbf{u}(k) + \mathbf{F}(k)\boldsymbol{\omega}(k) \\ \mathbf{y}(k) &= \mathbf{C}(k)\mathbf{X}(k) + \mathbf{v}(k) \end{aligned} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{X}(k)$ 为第 $k-1$ 步装配后的装配体误差状态; $\mathbf{X}(k+1)$ 为第 k 步装配完成后的装配体误差状态; $\mathbf{u}(k)$ 为在第 k 步装配时,刮研、修配等调整量; $\boldsymbol{\omega}(k)$ 为第 k 步装配引入的零件误差; $\mathbf{v}(k)$ 为测量时的噪声; $\mathbf{A}(k)$ 为装配体特征矩阵; $\mathbf{B}(k)$ 将 $\mathbf{u}(k)$ 从第 k 个零件的局部坐标系转换到基础坐标系; $\mathbf{C}(k)$ 为输出矩阵,与所关心的特定特征面相关; $\mathbf{F}(k)$ 将第 k 步装配时引入的零件误差从第 k 个零件的局部坐标系转换到基础坐标系。

1.2 机床装配精度成本函数

机床装配的目的之一是要在满足最终装配精度要求条件下,花费尽可能少的经济代价。结合装配过程中的测量、调整等,可以采用装配精度成本函数来表达,即

$$\begin{aligned} J &= \mathbf{y}^T(N)\mathbf{S}\mathbf{y}(N) + \sum_{k=0}^{N-1} [\mathbf{y}^T(k)\mathbf{Q}(k)\mathbf{y}(k) + \\ &\quad \mathbf{u}^T(k)\mathbf{R}(k)\mathbf{u}(k)] \end{aligned} \quad (2)$$

式中: $\mathbf{S}$ 表示最终装配精度对应的成本系数矩阵; $\mathbf{y}^T(N)\mathbf{S}\mathbf{y}(N)$ 表示该装配精度需要的经济成本; $\mathbf{Q}(k)$ 表示第 k 步装配时的装配精度对应的成本系数矩阵; $\mathbf{y}^T(k)\mathbf{Q}(k)\mathbf{y}(k)$ 表示第 k 步装配时,为了达到该精度需要的成本,权重矩阵 $\mathbf{R}(k)$ 为调整单位零件误差的成本系数矩阵; $\mathbf{u}^T(k)\mathbf{R}(k)\mathbf{u}(k)$ 为调整零件误差的成本, $\mathbf{S}$ 、 $\mathbf{Q}(k)$ 与误差状态相关。

1.3 机床装配最优调整序列

根据式(1),可以将装配过程中的最优调整序列 $u(k)$ 问题转化为离散随机线性系统最优输出问题。可以通过以下方法得到装配过程中第 k 步最佳调整量,即最优的装配调整序列为

$$u(k) = -K(k)\tilde{X}(k) \quad (3)$$

$$K(k) = [R(k) + B^T(k)P(k+1)B(k)]^{-1} \cdot$$

$$B^T(k)P(k+1)A(k) \quad (4)$$

$$P(k) = Q(k) + A^T(k)P(k+1) \cdot$$

$$[I + B(k)R^{-1}(k)B^T(k)P(k+1)]^{-1}A(k) \quad (5)$$

且有 $S=P(N)=Q(N)$,所以只要指定成本系数矩阵 R, S, Q ,就可以获得一组最优装配调整序列。

1.4 机床装配精度与零件误差关系建立

根据 1.2、1.3 节的方法,机床装配体误差的状态空间方程可以改写为

$$X_i(k) = A(k)X(k) + F(k)\omega(k)$$

$$X(k+1) = [I - B(k)T(k)K(k)]X_i(k) \quad (6)$$

式中: $T(k)$ 是调整特征选择矩阵,非对角线元素均为 0,通过给定对角元素为 1 表示对应几何特征在第 k 步可以进行调整,为 0 则表示对应特征不能被调整;随机变量 $X_i(k)$ 的概率密度函数由 $\rho(k) = E[X(k)]$ 以及 $D(k) = D(X(k))$ 确定, $D(k)$ 表示机床装配精度的公差带,即误差状态的变化范围。

利用式(6),可获得公差带的表达式为

$$D_i(k) = A^T(k)D(k)A(k) + F(k)V(k)F^T(k)$$

$$D(k+1) = [I - B(k)T(k)K(k)] \cdot$$

$$D_i(k)[I - B(k)T(k)K(k)]^T \quad (7)$$

式中: $V(k)$ 表示零件误差 $\omega(k)$ 的协方差, $\omega(k)$ 被定义为均值为 0,且互不相关的零件误差向量

$$E[\omega(k)] = 0$$

$$E[\omega(k)\omega^T(l)] = \begin{cases} V(k), & k = l \\ 0, & k \neq l \end{cases} \quad (8)$$

初始的 $D(0)=0$ 。

通过上述方法,便完成了机床装配精度指标与零件公差之间的函数关系建立。

2 自适应遗传算法构建

机床装配精度与零件公差的函数关系在忽略高阶项之后,形式变为

$$P_s = \sum_{j=1}^m k_{ij}t_{ij} \quad (9)$$

式中: m 为每个零件考虑的精度项目个数; k_{ij} 为第 i 个零件的第 j 项误差值系数; t_{ij} 为第 i 个零件的第 j 项误差值,在本文所构造的自适应遗传算法中, t_{ij} 为

第 i 条染色体上第 j 个基因。

在实际加工制造中,零件角度公差越小,那么加工成本越高。本文通过调研昆明机床厂,发现该厂零件公差与加工成本在一定范围内近似为一反比例函数。这种公差成本函数是文献[1]中负幂成本函数的特殊情况。以机床装配体零件加工总成本 W 为目标函数,在上述情况下可以表示为

$$W = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \frac{C_{ij}}{t_{ij}} \quad (10)$$

式中: n 表示机床装配体零件个数; C_{ij} 为反比例函数系数,根据机床厂零件加工制造能力确定。

此时机床公差最优化分配问题转化为了一多元非线性寻优问题,传统的拉格朗日乘子法、变尺度搜索等方法已经不再适用。这里采用一种基于浮点编码的自适应遗传算法来获得一组 t_{ij} ,既能满足机床装配精度要求,又能使得零件加工总成本最小。

2.1 初始零件误差种群产生方法

结合零件实际加工过程,组成机床的各个零件的可加工精度范围是不一致的,即遗传算法中染色体上各个基因片段的初值范围应该根据实际情况确定。每个基因的产生通过方程实现,即

$$t_{ij} = \frac{r}{c}(b_{i,j} - b_{l,j}) + b_{l,j} \quad (11)$$

式中: $b_{i,j}$ 、 $b_{l,j}$ 分别为第 i 条染色体第 j 个基因取值的上下限; r 表示一随机数; c 为一常数。

2.2 优选零件误差操作

机床公差分配问题受到装配精度要求 P_i 的约束,故首先需要将该问题转换为无约束问题。本文采用外点法实现转换。对于本文所述问题,外点法可定义为

$$F = W + \mu \sum_{i=1}^n h(t_i) \quad (12)$$

式中: μ 为惩罚系数; $h(t_i)$ 为惩罚函数; t_i 为第 i 条染色体所有基因片段($t_{i1}, t_{i2}, \dots, t_{im}$)构成的向量,即第 i 个零件所有误差构成的零件误差向量。在公差分配过程中, $h(t_i)$ 定义为

$$h(t_i) = \begin{cases} \frac{c_i}{\delta_i}, & \delta_i > 0 \\ 0, & \delta_i \leq 0 \end{cases} \quad (13)$$

式中: δ_i 为利用 t_{ij} ($j=1, 2, \dots, m$) 计算得到的 P_s 与装配体要求的精度项目的差值; c_i 为一给定的常数。

采用轮盘赌方式实现优选零件误差操作。目标成本函数 F 值越大,反映了精度总成本越高或者不满足装配要求,所以某一个体能够被选中的概率与

该个体对应的 F 值大小成反比。假设适应度 $f = \frac{1}{F}$, 那么某个个体 l (基因 t_{ij} 的集合, $i=1, 2, \dots, n$, $j=1, 2, \dots, m$) 被选中的概率为

$$P_l = \frac{f_l}{\sum_{k=1}^M f_k}$$

(14)

式中: f_l 为第 l 个个体的适应度值; M 是种群中个体的数目。

将这些概率映射到轮盘上, 然后通过产生一随机数, 即可实现选择操作。

2.3 零件误差染色体的交叉运算

假设用于交叉的两个基因为 t_a, t_b , 它们分别位于两条不同的零件误差染色体上, 交叉运算之后变为新的基因

$$\left. \begin{aligned} t'_a &= \alpha t_b + (1 - \alpha) t_a \\ t'_b &= \alpha t_a + (1 - \alpha) t_b \end{aligned} \right\}$$

(15)

式中: $\alpha \in (0, 1)$ 为一常数, 可以通过随机方法产生。

2.4 零件误差染色体的变异方案

采用非一致性变异方法, 即在演化初期, 变异范围相对较大, 而随着演化的推进, 变异范围越来越小。设某染色体上基因为 $t_i = (t_{i1} \ t_{i2}, \dots, t_{ik}, \dots, t_{im})$, m 为每条染色体上基因的个数, 此时基因 t_{ik} 会发生变异, 变异的规则为

$$t'_{ik} = \begin{cases} t_{ik} + \Delta(\xi, b_k - t_{ik}), & \text{rand}(0, 1) \leq 0.5 \\ t_{ik} - \Delta(\xi, t_{ik} - a_k), & \text{rand}(0, 1) > 0.5 \end{cases}$$

(16)

$$\Delta(\xi, y) = y[1 - r^{\xi}]$$

(17)

式中: ξ 为种群多样性指标, $\xi = \frac{D_k}{D_{\max}}$; a_k, b_k 为第 k 个基因取值的上下限; r 为 $[0, 1]$ 上的随机数; b 为决定 t 影响力大小的参数。

2.5 自适应的交叉概率及变异概率

采用王成栋等提出的使用种群多样性的指标 $\xi^{[17]}$ 来动态调整交叉概率和变异概率, 即当种群进化的多样性程度下降时, 交叉概率和变异概率适当增大, 以增加新个体的产生概率, 克服早熟问题。自适应交叉与变异概率具体计算公式为

$$P_c = P_{c0} \left[1 - \frac{f_q^i - f_{q, \min}}{f_{q, \max} - f_{q, \min}} \frac{1}{1.0 + \exp(-k_c \xi)} \right]$$

(18)

$$P_m = P_{m0} \left[1 - \frac{f_q^i - f_{q, \min}}{f_{q, \max} - f_{q, \min}} \frac{1}{1.0 + \exp(-k_m \xi)} \right]$$

(19)

式中: P_{c0} 为初始给定的交叉概率; P_{m0} 为初始给定的变异概率; k_c, k_m 为常数; f_q^i 为参与交叉的个体中较

大的适应度值; $f_{q, \max}, f_{q, \min}$ 表示第 q 代种群中适应度值的最大值和最小值。

本文实现机床公差最优化分配的详细技术路线如图 2 所示。

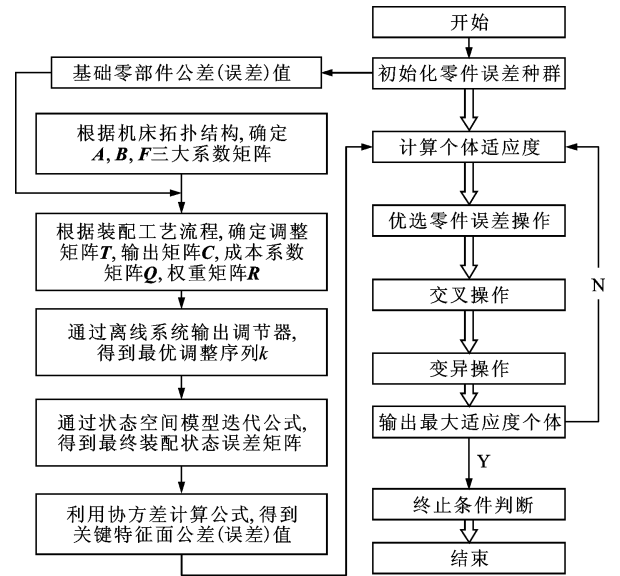


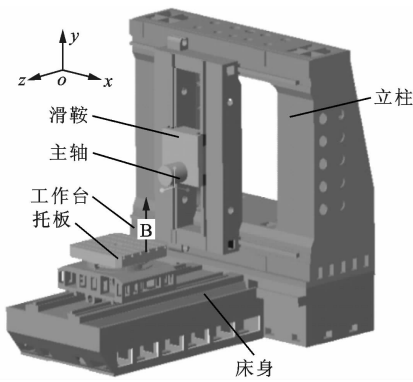
图 2 机床公差最优化分配技术路线

3 机床公差分配实例

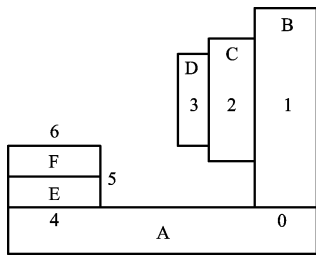
本文以昆明机床厂生产的 TGK46100 精密卧式坐标镗床为例, 对该机床完成基础大件角度公差的分配。该坐标镗床主要由床身、立柱、滑鞍、主轴箱、托板、工作台等 6 大基础部件构成, 如图 3a 所示, 机床的简化结构如图 3b 所示, 主要装配精度指标如表 1 所示。

表 1 TGK46100 主要装配精度指标

序号	误差项	说明	精度/ 10 ⁻⁵ rad
1	P_{XY}	X 轴与 Y 轴垂直度	1.6
2	P_{YZ}	Y 轴与 Z 轴垂直度	1.6
3	P_{XZ}	X 轴与 Z 轴垂直度	1.6
4	P_{OZ-X}	主轴轴线与 Z 轴平行度 (X 向)	2
5	P_{OZ-Y}	主轴轴线与 Z 轴平行度 (Y 向)	2
6	P_{OX-Y}	主轴轴线与 X 轴垂直度	2
7	P_{OY-X}	主轴轴线与 Y 轴垂直度	2
8	P_{TX-Z}	工作台台面与 X 轴平行度	1.25
9	P_{TZ-X}	工作台台面与 Z 轴平行度	1.25
10	P_{TY-Z}	工作台台面与 Y 轴垂直度 (Z 向)	2
11	P_{TY-X}	工作台台面与 Y 轴垂直度 (X 向)	2



(a) TKG46100 精密卧式坐标镗床简图



0~6: 装配特征面; A: 床身; B: 立柱;
C: 滑鞍; D: 主轴箱; E: 托板; F: 工作台
(b) TKG46100 简化结构图

图 3 TKG46100 精密卧式坐标镗床

假设该坐标镗床的装配顺序为:将床身 A 安装到地面上;将立柱 B 装到床身 A 上;将滑鞍 C 装到立柱 B 上;将主轴箱 D 装到滑鞍 C 上;将托板 E 装到床身 A 上;将工作台 F 装到托板 E 上。

装配完成之后,角度偏差可以表达为

$$\begin{bmatrix} \delta_1(N) \\ \delta_2(N) \\ \delta_3(N) \\ \delta_4(N) \\ \delta_5(N) \\ \delta_6(N) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\theta_B \\ \Delta\theta_C \\ \Delta\theta_D \\ \Delta\theta_A \\ \Delta\theta_E \\ \Delta\theta_F \end{bmatrix} \quad (20)$$

式中: $\delta_i(N)$ ($i=1,2,3,4,5,6$) 代表的是特征面 1~6 的偏差状态; $\Delta\theta_{A\sim F}$ 代表了零件 A~F 的零件误差。

在装配过程中,状态空间方程为

$$\begin{bmatrix} \delta_1(k+1) \\ \delta_2(k+1) \\ \delta_3(k+1) \\ \delta_4(k+1) \\ \delta_5(k+1) \\ \delta_6(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta_1(k) \\ \delta_2(k) \\ \delta_3(k) \\ \delta_4(k) \\ \delta_5(k) \\ \delta_6(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \Delta\theta(k) \quad (21)$$

式中: k 表示装配过程中的第 k 步。
在装配第 1 步的时候,调整特征矩阵为

$$T(0) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

定义权重矩阵 R 来表征消耗的经济成本系数。注意到,该系数矩阵的取值与机床厂调整单位零件误差的难易程度密切相关。本文例子中所有 R 矩阵的取值是根据昆明机床厂实际调研分析所得。因为此时只有床身已经进入到装配,所以给未进入装配的零件分配一个较大的成本系数,取为 500,所以

$$R(0) = \begin{bmatrix} 500 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 500 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 500 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 500 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 500 \end{bmatrix}$$

在第 2 步装配的时候,立柱装到床身上,所以调整矩阵和权重矩阵为

$$T(1) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$
$$R(1) = \begin{bmatrix} 5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 500 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 500 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 500 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 500 \end{bmatrix}$$

在第 3 步装配的时候,将滑鞍装到立柱上,调整起来相对困难,所以调整矩阵和权重矩阵为

$$T(2) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{R}(2)=\left[\begin{array}{cccccc} 20 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 5 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 500 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 500 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 500 \end{array}\right]$$

在第 4 步装配的时候,主轴箱装到滑鞍上,此时调整矩阵和权重矩阵为

$$\boldsymbol{T}(3)=\left[\begin{array}{cccccc} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array}\right]$$

$$\boldsymbol{R}(3)=\left[\begin{array}{cccccc} 20 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 20 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 500 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 500 \end{array}\right]$$

在第 5 步装配时,将托板装到床身上,调整起来相对困难,所以调整矩阵和权重矩阵为

$$\boldsymbol{T}(4)=\left[\begin{array}{cccccc} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array}\right]$$

$$\boldsymbol{C}_7=\left[\begin{array}{cccccccccccccccc} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \end{array}\right]$$

$\boldsymbol{Q}_1\sim\boldsymbol{Q}_6$ 为零矩阵, $\boldsymbol{Q}_7$ 为机床装配精度成本系数矩阵,与机床厂的装配能力密切相关。通过调研昆明机床厂得到对角阵

$$\boldsymbol{Q}_7=\text{diag}([0.3,0.3,0.3,0.20,0.20,0.20,0.20,0.32,0.32,0.20,0.20])$$

$$\boldsymbol{R}(4)=\left[\begin{array}{cccccc} 20 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 20 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 20 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 500 \end{array}\right]$$

第 6 步装配的时候,将工作台装到托板上,此时的调整矩阵和权重矩阵为

$$\boldsymbol{T}(5)=\left[\begin{array}{cccccc} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{array}\right]$$

$$\boldsymbol{R}(5)=\left[\begin{array}{cccccc} 20 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 20 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 20 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 20 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 5 \end{array}\right]$$

假设在装配过程中,不关心误差状态的变化,那么观测矩阵为零矩阵,根据该卧式坐标镗床的精度指标要求(见表 1),装配完成后的观测矩阵为

在此基础上,设床身的角度误差为 t_1 ,立柱的角度误差为 t_2 ,滑鞍的角度误差为 t_3 ,主轴箱的角度误差为 t_4 ,托板的角度误差为 t_5 ,工作台的角度误差为 t_6 。这六大基础部件的角度误差由 3 项组成,即

$$\begin{aligned} \boldsymbol{t}_1 &= \begin{bmatrix} t_{1x} \\ t_{1y} \\ t_{1z} \end{bmatrix}; \quad \boldsymbol{t}_2 = \begin{bmatrix} t_{2x} \\ t_{2y} \\ t_{2z} \end{bmatrix}; \quad \boldsymbol{t}_3 = \begin{bmatrix} t_{3x} \\ t_{3y} \\ t_{3z} \end{bmatrix} \\ \boldsymbol{t}_4 &= \begin{bmatrix} t_4 \\ t_4 \\ t_4 \end{bmatrix}; \quad \boldsymbol{t}_5 = \begin{bmatrix} t_{5x} \\ t_{5y} \\ t_{5z} \end{bmatrix}; \quad \boldsymbol{t}_6 = \begin{bmatrix} t_{6x} \\ t_{6y} \\ t_{6z} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

将这些数据引入到式(7)进行迭代,其中式(7)中矩阵 **A** 为单位矩阵,矩阵 **B** 与矩阵 **F** 相等,均为式(20)中的系数矩阵。忽略高阶项,得到该精密卧式坐标镗床装配精度指标与零件公差项目之间的函数映射关系为

$$\begin{aligned} P_{XY} &= 0.001\ 0t_{2z} + 0.503\ 1t_{3z} + 0.000\ 7t_{1z} \\ P_{XY} &= 0.001\ 0t_{2z} + 0.503\ 1t_{3z} + 0.000\ 7t_{1z} \\ P_{XY} &= 0.001\ 0t_{1z} + 0.503\ 1t_{3z} + 0.000\ 7t_{1z} \\ P_{OZ-X} &= 0.035\ 0t_{2x} + 0.067\ 2t_{3x} + 0.200\ 0t_{4x} + \\ &\quad 0.026\ 3t_{1x} \\ P_{OZ-Y} &= 0.065\ 6t_{2y} + 0.126\ 6t_{3y} + 0.190\ 2t_{4y} + \\ &\quad 0.048\ 8t_{1y} \\ P_{OX-Y} &= 0.010\ 8t_{2y} + 0.202\ 2t_{3y} + 0.260\ 9t_{4y} + \\ &\quad 0.008\ 0t_{1y} \\ P_{OY-X} &= 0.003\ 9t_{2x} + 0.007\ 5t_{3x} + 0.267\ 9t_{4x} + \\ &\quad 0.002\ 9t_{1x} \\ P_{TX-Z} &= 0.062\ 7t_{2z} + 0.035\ 1t_{3z} + 0.049\ 6t_{1z} + \\ &\quad 0.223\ 3t_{5z} + 0.406\ 8t_{6z} \\ P_{TZ-X} &= 0.002\ 4t_{2x} + 0.004\ 8t_{3x} + 0.239\ 3t_{5x} + \\ &\quad 0.425\ 0t_{6x} \\ P_{TY-Z} &= 0.047\ 9t_{2z} + 0.272\ 4t_{3z} + 0.037\ 9\ t_{1z} + \\ &\quad 0.218\ 4t_{5z} + 0.402\ 3t_{6z} \\ P_{TY-X} &= 0.040\ 0t_{2x} + 0.077\ 0t_{3x} + 0.003\ 2t_{4x} + \\ &\quad 0.030\ 1t_{1x} + 0.224\ 3t_{5x} + 0.410\ 9t_{6x} \end{aligned}$$

(22)

建立零件加工总成本函数,其中 $m=3,n=6$,代表 TGK46100 的 6 个基础部件,且每个基础部件有 3 项角度公差。设置遗传算法的基本参数如表 2 所示。

表 2 自适应遗传算法参数取值

项目	取值
种群大小	100
繁殖代数	100
交叉概率	0.8
变异概率	0.1

采用 Matlab 编写求解代码,实现该公差分配方案,自适应遗传算法的收敛情况如图 4 所示。

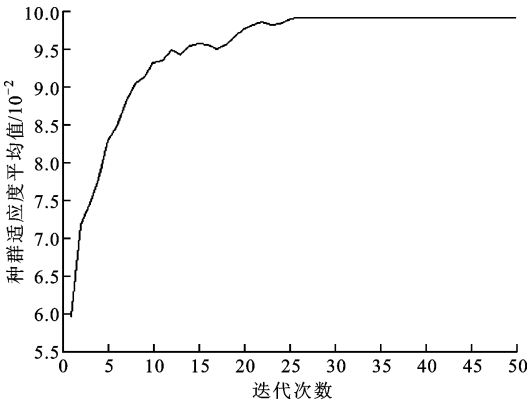


图 4 遗传算法收敛曲线

可以发现,本文所构建的自适应算法收敛性良好,得到的分配结果如表 3 所示,利用该结果,根据式(22)计算得到的装配精度指标均满足表 1 所列的装配精度要求。表 3 中第 4 列是采用李圣怡等提出的基于变分法与多体系统运动学的机床精度建模方法^[8],构建了 TGK46100 偏差传递精度模型,然后利用本文提出的自适应遗传算法进行计算,采用相同算法参数得到了分配结果。从表 3 中可以发现,不考虑装配调整量的偏差累积方法对零件加工精度提出的要求高,制造难度加大,而本文方法则放宽了零件精度要求,最大放宽幅度达到了 36.4%,平均放宽幅度为 12.0%,在同样满足装配精度要求的前提下,大大降低了零件制造成本。

4 结 论

本文建立了机床装配精度的状态空间模型,考虑了实际装配过程中多种影响装配精度的因素,与传统偏差累积传递模型相比,更加符合机床装配实际;在引入种群多样性指标的基础上,构建了用于机床公差分配的自适应遗传算法,且算法收敛速度快,为多元非线性函数在约束条件下寻优提供了一种可行快捷的思路;通过精密机床公差分配实例,验证了状态空间法构建的精度模型的正确性以及自适应遗传算法的有效性,分配结果与依靠多体系统偏差累积方法得到的结果相比,零件精度要求得到放宽,最大放宽幅度达到了 36.4%,平均放宽幅度为 12.0%,在满足装配精度要求的前提下,实现了降低制造成本的目标。

表 3 TKG46100 基础大件公差分配结果

零件	公差	精度/ 10^{-5} rad (本文方法)	精度要求/rad (偏差累积法)	描述
1-立柱	T_{1x}	2.3	1.9	X 轴导轨安装面与立柱床身安装面垂直度
1-立柱	T_{1y}	1.8	1.5	X 轴与 Z 轴垂直度,通过装配调整控制
1-立柱	T_{1z}	1.3	1.3	X 轴导轨安装靠面与立柱床身安装面平行度
2-滑座	T_{2x}	2.2	2.0	Y 轴导轨安装面与滑座滑块安装面平行度
2-滑座	T_{2y}	1.7	1.5	Y 轴导轨安装面与滑座滑块安装面平行度
2-滑座	T_{2z}	1.7	1.5	Y 轴导轨安装靠面与滑座滑块安装靠面垂直度
3-主轴箱	T_{3x}	2.3	2.1	主轴轴线与主轴箱滑块安装面垂直度
3-主轴箱	T_{3y}	2.4	2.0	主轴轴线与主轴箱滑块安装面垂直度
3-主轴箱	T_{3z}			
0-床身	T_{4x}	1.5	1.1	Z 轴导轨安装面与床身立柱安装面平行度
0-床身	T_{4y}	2.1	1.8	X 轴与 Z 轴垂直度,通过装配调整控制
0-床身	T_{4z}	1.2	1.0	Z 轴导轨安装面与床身立柱安装面平行度
4-托板	T_{5x}	1.5	1.2	B 轴转台轴承安装端面与托板滑块安装面平行度
4-托板	T_{5y}			
4-托板	T_{5z}	1.0	1.0	B 轴转台轴承安装端面与托板滑块安装面平行度
5-工作台	T_{6x}	1.1	1.0	工作台台面与转台轴承安装端面平行度
5-工作台	T_{6y}			
5-工作台	T_{6z}	1.0	1.0	工作台台面与转台轴承安装端面平行度

参考文献:

[1] 张大克,李振刚. 公差分配的优化模型及其解析最优解 [J]. 天津科技大学学报, 2008, 23(1): 53-57.
ZHANG Dake, LI Zhengang. Optimization model for tolerance allocation and its analytic solution [J]. Journal of Tianjin University of Science & Technology, 2008, 23(1): 53-57.

[2] HOCKEN R, SIMPSON J A, BORCHARDT B. Three dimensional metrology [J]. CIRP Annals: Manufacturing Technology, 1977, 26(2): 403-408.

[3] 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.

[4] RAHMAN M, HEIKKALA J, LAPPALAINEN K. Modeling, measurement and error compensation of multi-axis machine tools: I [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2000, 40(10): 1535-1546.

[5] 粟时平,李圣怡. 五轴数控机床综合空间误差的多体系统运动学建模 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2003(5): 15-21.
SU Shiping, LI Shengyi. Modeling the volumetric synthesis error of 5-axis machine tools based on multi-body system kinematics [J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2003(5): 15-21.

[6] 粟时平,李圣怡,王贵林. 基于空间误差模型的加工中心几何误差辨识方法 [J]. 机械工程学报, 2002, 38(7): 121-125.
SU Shiping, LI Shengyi, WANG Guilin. Identification method for errors of machining center based on volumetric error model [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2002, 38(7): 121-125.

[7] 粟时平,李圣怡. 基于多体系统运动学理论的坐标测量机误差自动建模 [J]. 机械设计与制造, 2002(4): 63-65.
SU Shiping, LI Shengyi. Error automation modeling of coordinate measuring machine based on multi-body system kinematics theory [J]. Machinery Design & Manufacture, 2002(4): 63-65.

[8] 粟时平,李圣怡,王贵林. 多轴数控机床的通用运动学综合空间误差模型 [J]. 国防科技大学学报, 2001, 23(4): 45-50.
SU Shiping, LI Shengyi, WANG Guilin. A universal synthetic volumetric error model of multi-axis NC machine tool based on kinematics [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2001, 23(4): 45-50.

[9] LIU Huanlao. Characteristics of and measurement methods for geometric errors in CNC machine tools

- [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2011, 54(1/2/3/4): 195-201.
- [10] ZHU Shaowei. Integrated geometric error modeling, identification and compensation of CNC machine tools [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2012, 52(1): 24-29.
- [11] TIAN Wenjie. A general approach for error modeling of machine tools [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2014, 79(4): 17-23.
- [12] FU Guoqiang. 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(3): 170-181.
- [13] ZHONG Gaoyan. Position geometric error modeling, identification and compensation for large 5-axis machining center prototype [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2015, 89(3): 142-150.
- [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): 1-16.
- [15] 张成现, 李建文. 多元非线性函数极值的通用数值解法 [J]. 西安工程科技学院学报, 2005, 19(4): 507-512.
- ZHANG Chengxian, LI Jianwen. An universal numerical algorithm of extremum for multivariate nonlinear function [J]. Journal of Xi'an University of Engineering Science and Technology, 2005, 19(4): 507-512.
- [16] 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]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(6): 114-121.
- [17] 王成栋, 张优云. 基于实数编码的自适应伪并行遗传算法 [J]. 西安交通大学学报, 2003, 37(7): 707-710.
- WANG Chengdong, ZHANG Youyun. Adaptive pseudo-parallel genetic algorithm based on real coding [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2003, 37(7): 707-710.

(编辑 赵炜 杜秀杰)

(上接第 77 页)

- MA Xiongwei. Diagnosis and empirical analysis on multicollinearity in linear regression model [J]. Journal of Huazhong Agricultural University: Social Sciences Edition, 2008(2): 78-81.
- [13] 徐峰, 郭烈锦. 超临界压力下水在螺旋管内的混合对流换热 [J]. 西安交通大学学报, 2005, 39(9): 978-981.
- XU Feng, GUO Liejin. Mixed convective flow and heat transfer of water in a helicoidal pipe under supercritical pressure [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2005, 39(9): 978-981.
- [14] 雷贤良, 李会雄, 于水清, 等. 超临界水在倾斜上升管内的非均匀传热特性数值模拟 [J]. 计算物理, 2010, 27(2): 217-228.
- LEI Xianliang, LI Huixiong, YU Shuiqing, et al. Numerical simulation on heterogeneous heat transfer in water at supercritical pressures in inclined upward tubes [J]. Chinese Journal of Computational Physics, 2010, 27(2): 217-228.
- [本刊相关文献链接]
- 吴毅, 王旭荣, 杨翼, 等. 以液化天然气为冷源的超临界 CO₂-跨临界 CO₂ 冷电联供系统. 2015, 49(9): 58-62. [doi: 10.7652/jxtxb201509011]
- 沈艳荣, 杨冬, 王龙, 等. 600 MW 超临界 W 火焰锅炉流动不稳定性数值分析. 2015, 49(5): 68-72. [doi: 10.7652/jxtxb201505011]
- 周士鹤, 郭亚丽, 沈胜强, 等. 低温多效蒸发海水淡化装置中流动阻力对传热温差的影响. 2015, 49(5): 30-35. [doi: 10.7652/jxtxb201505005]
- 霍文浩, 李军, 钟刚云, 等. 冷却结构对中压透平级蒸汽冷却性能的影响. 2015, 49(5): 36-42. [doi: 10.7652/jxtxb201505006]
- 李千军, 刘光耀, 韩伟, 等. 采用喷射式热泵提高火电机组给水温度的理论研究. 2013, 47(11): 25-28. [doi: 10.7652/jxtxb201311005]
- 王汉, 毕勤成, 杨振东, 等. 环形通道内超临界水的传热特性研究. 2013, 47(9): 28-34. [doi: 10.7652/jxtxb201309005]
- 霍文浩, 晏鑫, 李军, 等. 超超临界汽轮机高压缸旁路冷却系统冷却特性研究. 2013, 47(5): 24-30. [doi: 10.7652/jxtxb201305005]
- 霍文浩, 晏鑫, 李军, 等. 超超临界汽轮机高压缸旁路冷却系统流动特性的研究. 2013, 47(3): 42-47. [doi: 10.7652/jxtxb201303009]
- 杨珏, 张勇, 赵传奇, 等. 双排棒组件超临界水堆堆芯方案设计. 2012, 46(9): 78-82. [doi: 10.7652/jxtxb201209015]

(编辑 荆树蓉)