

# 基于线性回归理论的数控机床精度检测及误差补偿分析

潘志成

(广东大钧机械有限公司 广东 广州 510800)

**摘要:** 在机械工业产业化发展的大背景下,数控机床的精度检测工艺直接影响着数控行业的智能化与信息化发展。本文以数控机床的精度检测作为研究基础,在展开误差补偿分析的过程中,采用线性回归理论进行科学的误差影响因素分析,利用误差函数递归表达式进行误差补偿处理,并构建数控机床检测模型验证数控机床的检测精度。经双频激光干涉仪检测证明,基于线性回归理论的数控机床空间误差偏差较小,该方法能够有效提高数控机床工件的检测精度,并能够降低刀具与工件之间的摩擦磨损。

**关键词:** 数控机床检测模型; 误差补偿分析; 工艺技术; 线性回归

## 0 引言

信息化时代的数控加工技术,需要针对加工工件的结构特点展开机械加工工艺设计<sup>[1]</sup>,采用多元化手段分析工件加工的误差影响因素,并通过一系列的误差补偿处理,来优化数控机床工件加工的整体工艺流程,从而有效降低在工件数控加工过程中,由于不同原因导致的机械工件加工误差。线性回归算法作为一种精度检测数学计算方法,能够与误差补偿算法相融合,进而针对工件的加工特征进行补偿参数设置,并以此来提高机械工件的加工精确度与制造准确度。从实践应用角度来说,线性回归理论的分析与方法优化,对数控机床行业的发展而言,具有重要的技术应用价值与实用意义。

## 1 线性回归理论相关概念简述

从数学应用的角度来看,线性回归理论以科学的区间分割采集作为前提<sup>[2]</sup>,通过对加工空间若干检测点位置的数据采集与统计分析,获取最佳的数据拟合匹配函数,并结合机械工件相关数据的线性关系,预测机械加工误差大小,并进行相关的误差补偿。也就是说,线性回归理论主要利用误差最小值来构建每一个点位的平均误差,并通过数学模型建立误差曲线数据,从而通过线性补偿实现误差修正。

### 1.1 一阶线性回归

在数控机床精度检测的线性回归理论应用过程中,最简单的线性回归方法为一阶线性回归。这种回归方法需要设定两种或两种以上变量,并通过两种变量的相互依赖关系,实现误差值的正态分布。对应的线性回归表达形式为:

$$y = w^T x + e$$

式中:  $e$  - 均值为 0 的误差正态分布。

### 1.2 最小二乘线性回归

针对一阶线性回归方程表达式,展开影响因素的进一步划分,假设影响变量  $y$  的因素有  $k$  个,则对应的影响因素线性关系表达式,可以拓展为:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon$$

对  $y$  与  $x_1, x_2, \dots, x_k$  展开  $n$  次影响因素观察,则能够获得  $n$  组线性关系观测值  $(x_{t1}, x_{t2}, \dots, x_{tk})$ ,并可以获得新的影响因素线性关系表达式:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_{t1} + \beta_2 x_{t2} + \dots + \beta_k x_{tk} + \varepsilon_t$$

式中:  $t=1,2,\dots,n$  ( $n > k+1$ )。

最终得到最小二乘法的使用最小二乘法得到  $\beta$  的解为:

$$\hat{\beta} = (X^T X)^{-1} X^T Y$$

## 2 构建数控机床精度检测模型

以基于线性回归理论的数控机床检测方法作为算法基础,设计数控机床精度检测模型,并深入分析整体检测结果的精度可靠性,是构建数控机床精度检测模型的重要应用手段与实现措施。一般来说,数控机床精度检测的影响因素主要包括以下几个方面:

- (1) 机床构件自重影响参数;
- (2) 工件不同部件的制造尺寸与标准尺寸之间的误差影响参数;
- (3) 动力传动误差影响参数;
- (4) 部件变形影响参数;
- (5) 刀具及工件磨损影响参数。

与此同时,在数控机床等生产加工过程中,伴随生产加工时间的不断增长,促使数控机床在使用性能方面,会呈现出一定程度的性能下降趋势,进而导致机床加工的精度的逐渐降低<sup>[3]</sup>。因此,在实施数控机床检测模型构建时,需要提前预测数控机床的使用性能,并深入分

析机床各部件之间的内部连接关系，从而建立不同部件之间的拓扑关系，并针对数控机床不同单元体的姿态特点，建立各部件的三维依附坐标系，获得机床不同部件单元体的精准坐标位置。

然后，采用齐次坐标表示数控机床不同部件单元体上的点与矢量，并结合多体坐标变换理论，实现数控机床单元体三维数据坐标变换，利用基于“启发式”测试策略模型 HTMS 的齐次坐标变换法，进行数控机床精度检测数学算法建模。在建模过程中，通过齐次变换矩阵，能够获得机床的不同运动轴局部坐标系，并能够针对相关影响参数，进行运动轴局部坐标系位置补偿分析。

### 3 计算误差函数表达式

根据数控机床几何误差变化曲线特点，以多项式的方式来描述数控机床误差函数表达式，通过误差补偿的方式来计算精度数据信息<sup>[4]</sup>。结合多项式有界性的特征，本文在计算误差表达式时，以递归函数的方法来描述数控机床潜在的误差系数值，对应的误差表达式为：

$$f(t) = a_0T_0(t) + a_1T_1(t) + a_2T_2(t) + \dots + a_nT_n(t)$$

式中： $n$  - 误差函数表达式的递归阶数；

$a_n - T_n(t)$  的误差系数。

以递归方程的方式来表述该表达式，则能够获得  $T_i(t)$  所对应的递归表达式方程为：

$$T_0(t) = 1$$

$$T_1(t) = t$$

$$T_n(t) = 2tT_{n-1}(t) - T_{n-2}(t)$$

由此，可以进行数控机床的随机误差补偿处理，并可以根据数控机床机械工件或刀具的误差类型不同，而针对性地进行函数表达式的“差异性”修正。在计算过程中，根据数控机床工件加工制造过程中各运动轴的工作特点，设定不同运动轴的运动参数（该参数值为变量数值），并根据运动参数变量推导出不同运动轴的螺旋运动参数，就可以根据数控机床的多项式算法，获得数控机床生产加工机械工件过程中的机床加工精度变化曲线，并根据数控机床的精度检测推定值，获取数控机床不同工作部件的加工运动“伸缩量”。

### 4 基于线性回归理论的精度检测

在确定计算误差函数表达式的递归方程后，还需要根据误差源在机床工件加工过程中所占比重，进行误差源的定量与定性分析<sup>[5]</sup>。通过 3D 虚拟软件在数控机床控制平台建立虚拟工件加工模型，能够以数字计算的方

式，获取数控机床工件加工的运动轨迹，进而能够以各个加工运动轴运动轨迹误差，来测算数控机床的传动轨迹精确度系数<sup>[6]</sup>。结合线性回归理论，采用最小二乘法实现数控机床的误差精度数学计算，来实现数控机床的数字化检测。以双频激光干涉仪作为数控机床的误差部位检测设备，进行数控机床的精度测定。其中，双频激光干涉仪的工作原理如图所示。

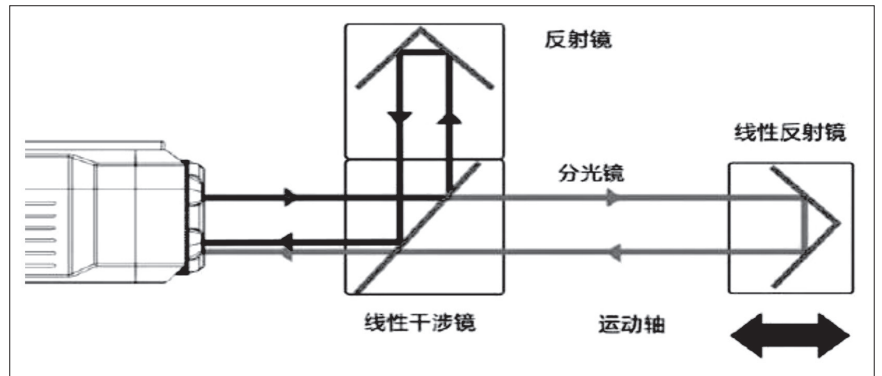


图 双频激光干涉仪的工作原理

通过双频激光干涉仪，可以对数控设备的加工中心与三坐标测量机进行位置精度测量，并能够重复定位数控设备的定位精度，对数控设备的几何精度进行精密测量与数据推算。在对数控机床补偿轴的数值初始化处理中，将线性回归理论与数控机床补偿算法有机融合，为数控机床设备设置坐标轴机械原点，并针对数控机床检测点来自适应地选取双频激光干涉仪测量步距，输入相关部件的检测参数。当相关参数输入完毕后，启动数控机床。

在检测过程中，采集数控机床的二维直角坐标数据信息，分别为  $(x_1, y_1)$ 、 $(x_2, y_2) \dots (x_n, y_n)$ ，并将这些数据信息带入线性回归表达式中，由此可以推出线性回归理论的最小二乘法  $\beta$  解。在最小二乘法线性回归表达式的推算过程中，首先设定  $x$  取值为  $x_{t1}$ ，然后根据最小二乘法线性回归表达式来预测  $y_i$  的线性回归方程：

$$y = \beta_0 + \beta_1x_{t1} + \beta_2x_{t2} + \dots + \beta_kx_{tk} + \epsilon_t$$

依次设定  $x$  取值为  $x_2 \dots x_k$ ，当所预测线性回归方程差值最小时，则可以断定其精度检测的所有预测推定值与数控加工的各个部件实际误差值最小，进而得出数控机床系列数据的回归方程分布表达式。

利用双频激光干涉仪，采用线性角锥反射镜系统，对数控机床传动的轴线进行精度监测数据检测。在检测中，首先需要将双频激光干涉仪初始化并预热，当干涉仪预热稳定后，再输入线性回归精度检测数据，并通过相关检测数据，初步分析与判断数控机床不同部件的定位精度。在精度检测过程中，将出现误差补偿的精度检测数据记录下来，并实施二次精度检测以保障误差补偿

系数的精准性。当数控机床各个部分部件的影响因素参数在检测中都符合精度检测标准后,将相关数据进行最后记录,并停止检测。由此获得的最终定位数据,则是满足误差补偿分析的线性回归数控机床精度检测结果。

## 5 基于线性回归理论数控机床工件加工实验分析

### 5.1 数控机床检测实验准备

想要获得最小二乘法线性回归数控机床精度检测方法的有效性,就必须展开数控机床检测实验测试,只有通过数控机床检测结果对比,才能获得线性回归精度检测的最终效果。在进行数控机床检测实验前,首先准备LM20激光器、光学镜组设备,并预先准备好TB12环境补偿器。与此同时,还需要针对数控机床的坐标轴线方向,来测量光学测量装置的安装位置,以保证测量的精确度。

针对数控机床各个部件的影响因素情况,对数控机床的主要构件进行详细的影响数值划分。其中,对导轨、立柱、机床滑座、刀具位置与位移、工作导轨、旋转台和机械加工工件位置进行不同编码处理,并分别测量出机床各个部件的具体部件尺寸与尺寸参数。在参数设定时,统一将所有部件的长、宽、高参数设置为mm,以方便函数表达式的计算。同时,将不同部件的参数数据输入到数控机床控制单元,以此来实现对数控机床的空间误差建模,并根据建模特性,来设定不同部件单元体的二维(或三维)坐标系。

结合线性回归的函数模型,在数控机床运行中,可以通过对不同部件坐标系的位置和姿态观察,描述与修整导轨起始点对称中心,以保证在相对静止状态下,获得不同精度误差特征矩阵,从而更好地检测数控机床运作过程中的空间误差大小,确保检测结果的正确性。

### 5.2 数控机床检测结果分析

针对基于最小二乘法线性回归理论算法的数控机床的精度检测,规划与布设测量点,并建立测量点路径数据库。同时,以检测结果精度作为数控机床检测的约束条件,展开6次数控机床精度检测,将不同测量点的误差检测结果进行数据信息记录,如表所示。

通过6次测量结果的对比分析来看,基于最小二乘法线性回归理论的数控机床精度检测,所对应的测量影响因素参数设定与测量实施方法,均能够获得良好的测量点的空间误差。无论从空间误差平均值还是实际偏差平均值角度来看,线性回归理论算法的X方向、Y方向

表 线性回归理论算法数控机床测量点空间误差检测结果/mm

编号		1次	2次	3次	4次	5次	6次
空间 误差	X方向	0.183	0.241	0.253	0.158	0.166	0.175
	Y方向	0.149	0.167	0.157	0.153	0.237	0.241
	Z方向	0.085	0.124	0.135	0.128	0.152	0.120
实际 偏差	X方向	0.003	0.024	0.021	0.006	0.008	0.026
	Y方向	0.001	0.003	0.023	0.101	0.164	0.034
	Z方向	0.005	0.052	0.037	0.016	0.034	0.028

与Z方向偏差平均值较小,检测结果可以证明,本检测方案所对应的检测结果满足实际工艺制造需求,能够降低刀具与工件之间的摩擦磨损,并且具有极高的加工生产精度优势。

## 6 结语

综上所述,基于最小二乘法线性回归理论的数控机床精度检测,能够科学地控制数控机床工件产品加工精度,并能够以有效地误差补偿分析实现对数控机床不同部件的精度补偿,该检测方法的优化设计在降低数控机床工件加工误差方面,具有较大的误差补偿与精度控制优势,其技术应用价值较高且具有良好的数控行业应用前景。

### 参考文献:

- [1] 余蔚荔,王素娟.基于模糊C均值聚类法和多元线性回归理论的铣床热误差研究[J].机床与液压,2018,46(01):32-35.
- [2] 林海华,覃佳照.基于线性回归理论的数控机床精度检测研究[J].今日制造与升级,2022(02):83-85.
- [3] 田国富,胡军,郭玉学.多元线性回归理论在数控机床热误差补偿中的应用[J].机械工程与自动化,2013(02):128-131.
- [4] 刘昀晟.基于区间优化的数控机床稳健性热误差建模研究[D].合肥:合肥工业大学,2021.
- [5] 冯锐,周洋.基于多元线性回归分析法的数控机床热误差补偿的研究[J].内燃机与配件,2018(13):129-130.
- [6] 李荣钢,唐晓林,张寒,等.数控机床热误差实时补偿[J].成都大学学报(自然科学版),2018,37(01):75-79.

**作者简介:**潘志成(1990.06-),男,汉族,广东广州人,硕士研究生,工程师,研究方向:机械设计与制造、机械电子。