

基于激光干涉仪的数控机床定位精度检测 与误差补偿方法

Position Accuracy Measuring and Error Compensation Method of NC Machine Tool Based on Laser Interferometer

上海航天精密机械研究所 王 堃 孙程成 钱 锋 王 玮 郑 巍

[摘要] 针对RIFA80数控机床定位精度大幅度下降的问题,介绍了利用英国雷尼绍(RENISHAW) ML10激光干涉仪对该机床的定位精度和重复定位精度进行精度检测和误差补偿的方法,并对误差补偿前后的检测数据进行了分析。结果表明,通过精度检测和误差补偿,RIFA80机床的各项精度指标已达到工作要求。

关键词: 激光干涉仪 数控机床 精度 误差补偿

[ABSTRACT] Aimed at the sharp decline of the position accuracy, the experiment method of using ML10 Laser interferometer to measure the machine accuracy of position is introduced. Furthermore through the analysis of the measure data, it is demonstrated that the error compensation is feasible.

Keywords: Laser interferometer NC machine tool Accuracy Error compensation

随着使用年限的增长,数控加工中心的精度将不可避免地出现不同程度的下降。数控机床的加工精度由刀具与工件之间的相对位置决定,其影响因素很多,而机床的动态误差是影响加工精度的主要因素。提高精度主要有2种途径,一是“硬件”方法,即提高机床部件的加工、装配精度,此方法不仅受到加工机床精度等级的制约,而且随着加工精度的提高,加工成本呈指数级数增加,效益不高;二是“软件”的方法,该方法通过使用激光干涉仪采集数控机床的定位精度,再利用数控机床的可编程、智能性,对机床误差进行补偿从而达到提高机床精度的效果。采用这种精度检测加误差补偿的方法,无需对数控机床硬件进行改造便可较大幅度地提高数控机床的加工精度。

1 ML10 激光干涉仪原理

雷尼绍 ML10 激光干涉仪是一种检测线性误差的高精度仪器,其精度高,可达到 $\pm 1.1\text{PPM}$ ($0\sim 40^\circ\text{C}$),测量范围大(线性测长 40m,位选 80m),测量速度快(60m/min),分辨率高($0.001\mu\text{m}$),便携性好。由于雷尼

绍激光干涉仪具备自动线性误差补偿能力,可方便检测出机床的定位精度。

如图1所示,激光干涉仪利用光的干涉原理和多普勒效应产生频差的原理来进行位置检测。2束振幅相同,频率分别为 f_1 和 f_2 的左右圆偏振光由激光器1发出,经 $\lambda/4$ 片之后变为振动方向垂直的线偏振光。分光器3将一部分光束反射,经检偏器4形成频率分别为 f_1 、 f_2 的

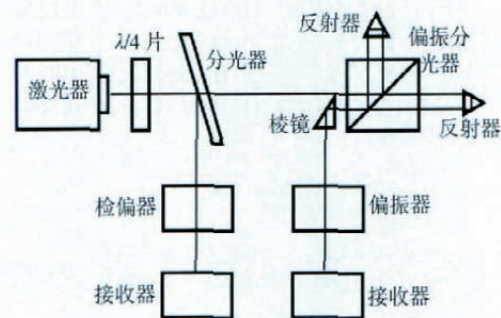


图1 激光干涉仪原理

Fig.1 Elements of Laser interferometer

信号,由接收器5接收为参考信号;另一部分光束通过分光器3进入偏振分光器6,其中平行于分光面的频率为 f_2 的线偏振光完全通过分光器6,到达可动反射镜8。从反射镜7和8发射回来的2束光到偏振分光器6的分光面汇合,再经转向棱镜9、偏振器10,由接收器11接收为测量信号,测量信号与参考信号的差值即为多普勒频率差 Δf 。计数器在时间 t 内计取频率为 Δf 的脉冲数 N ,相当于在 t 区间内对 f 积分,即

$$N = \int_0^t \Delta f dt$$

由于 $\Delta f = 2(v/c)f$, 而 $v = dL/dt$, $f = c/\lambda$, 所以

$$N = \int_0^t \Delta f dt = (2/\lambda) \int_0^t dL = 2L/\lambda$$

故测量距离

$$L = (\lambda/2)N$$

式中, N 为累计脉冲数; λ 为激光波长; c 为光速。

测量时系统的布局如图2所示,激光干涉镜放置在 ML10 激光头和线性反射镜之间的光路上,从 ML10 发

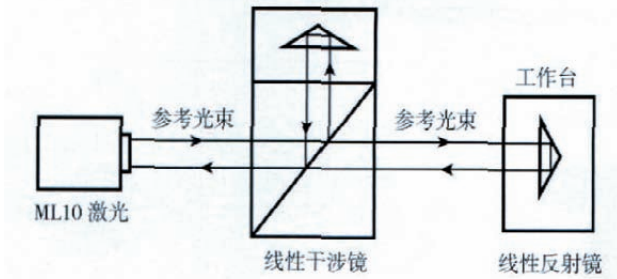


图2 激光干涉仪系统
Fig.2 System of Laser interferometer

出的光束在线性干涉镜处分裂为2束相干光束，一束光束从附加在线性干涉镜上的反射镜反射回激光头，而另一束光束要经由另一个线性反射镜反射回激光头。这2束反射光线在干涉镜内汇合，由激光头内检波器监控这2束光束的干涉情况^[1-2]。

2 机床线性轴的误差算法

国家标准 GB/T 17421.2—2000 规定了通过测量机床的单独轴线来检验和评定数控机床的定位精度和重复定位精度的方法。主要指标包括轴线的定位精度 A 、轴线的重复定位精度 R 、轴线的反向差值 B 、平均位置偏差 M 。其中，以重复定位精度 R 和反向差值 B 对加工精度的影响最为明显。机床的重复定位精度是指重复定位时坐标轴的实际位置和理想位置的符合程度，重复位置的不准确会导致工件的尺寸误差。而重复定位精度 R 的高低在很大程度上取决于滚珠丝杠的螺距累积误差和位置检测系统的误差。反向差值是指机床在同一位置往返移动时重合程度，反向差值过大会直接影响工件的加工精度。影响反向差值 B 的因素有：测量轴线与被测机床运动坐标标准装置轴线（滚珠丝杠或光栅尺）存在偏置，运动部件移动时产生偏角，运动部件往返移动时产生阿贝误差 B 、滚珠丝杠副的加工误差、传动链各个部件的间隙误差、被测机床传动链连接和紧固元件松动等。

目标位置的选择： $P_i = (i-1)p+r$ ，

式中， i 为目标位置的序号（全行程内不小于5）； P 为目标位置的间距，应使测量行程内的目标位置之间的间隔均匀； r 为常数，也可随机数。

轴线反向差值： $B = \max [|B_i|]$ ；

轴线平均反向差值： $\bar{B} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^n B_i$ ；

轴线单向重复定位精度： $R \uparrow = \max [|R_i \uparrow|]$ ，
 $R \downarrow = \max [|R_i \downarrow|]$ ；

轴线双向重复定位精度： $R = \max [|R_i|]$ ；

轴线单向定位系统偏差：

$$E \uparrow = \max [\bar{X}_i \uparrow] - \min [\bar{X}_i \uparrow] ;$$

$$E \downarrow = \max [\bar{X}_i \downarrow] - \min [\bar{X}_i \downarrow] ;$$

轴线双向定位系统偏差：

$$E = \max [\bar{X}_i \uparrow; \bar{X}_i \downarrow] - \min [\bar{X}_i \uparrow; \bar{X}_i \downarrow] ;$$

轴线双向平均位置偏差：

$$M = \max [\bar{X}_i] - \min [\bar{X}_i] ;$$

轴线单向定位精度：

$$A \uparrow = \max [\bar{X}_i \uparrow + 2S_i \uparrow] - \min [\bar{X}_i \uparrow - 2S_i \uparrow] ,$$

$$A \downarrow = \max [\bar{X}_i \downarrow + 2S_i \downarrow] - \min [\bar{X}_i \downarrow - 2S_i \downarrow] ;$$

轴线双向定位精度：

$$A = \max [\bar{X}_i \uparrow + 2S_i \uparrow; \bar{X}_i \downarrow + 2S_i \downarrow] -$$

$$\min [\bar{X}_i \uparrow - 2S_i \uparrow; \bar{X}_i \downarrow - 2S_i \downarrow] .$$

其中，实际位置为 P_{ij} ；位置偏差 $X_{ij} = P_{ij} - P_i$ ；位置偏差不确定度为 S_i ；符号“ \uparrow ”、“ \downarrow ”表示从正、负方向趋近所得的参数^[3]。

3 检测与误差补偿

3.1 数控机床误差检测及补偿系统

数控机床误差检测及补偿系统主要由数控加工中心、ML10 激光干涉仪、误差测量接口、误差补偿接口、计算机和打印机等环节组成。该系统以 RIFA80 数控加工中心为测试对象，雷尼绍 ML10 激光干涉仪为测量工具，计算机是系统的核心，其具体工作流程如图 3 所示。

使用激光干涉仪对数控机床的线性轴进行样本点采集，将采集到的点位数据输入计算机中，计算机根据定位误差算法计算出被测轴的各项精度指标，如果发现误差值超出允许极限则系统进入误差环节，再通过特定的方法（绝对型补偿或增量型补偿）对机床数控系统进行软补偿，如此循环往复以达到调整设备精度的目的。此外，测试及误差补偿工作应该在机床几何精度（床身水平、平行度、垂直度等）调整完成后进行，这样可以尽量减少几何精度对定位精度的影响。

3.2 误差补偿方法研究

所谓补偿就是指通过特定方法对机床的控制参数进行调整，其参数调整方法也因各数控系统不同而各有差异。误差补偿功能的实现方法分为增量型和绝对型^[4]。增量型是指以被补偿轴上相邻2个补偿点间的误差差值为依据来进行补偿，而绝对型是指以被补偿轴上各个补偿点的绝对误差值为依据来进行补偿。

(1) 绝对型。

绝对型补偿是以补偿点的绝对误差值（位置偏差）作为补偿值进行机床参数的补偿，这种方法不需要复杂

的拆分计算,经激光干涉仪检测出的数据可以直接输入数控系统进行误差补偿。

如检测到1组Y轴位置偏差值 $E_Y = [X_1, X_2, X_3, \dots, X_{20}]^T$, 在数控系统中对应Y轴的补偿参数号为 $Y = [101, 102, 103, \dots, 120]^T$, 那么将 E_Y 以倒序形式依次输入到系统的补偿参数中, 即将 $E'_Y = [X_{20}, X_{19}, X_{18}, \dots, X_1]^T$ 依次输入到 $Y = [101, 102, 103, \dots, 120]^T$ 中来完成单次补偿(图4)。

绝对型的补偿方法不需要进行额外的数据处理, 补偿简单快速, 适用于误差线性度较高的情况, 而对离散型误差补偿效果不明显。

(2) 增量型。

增量型补偿是指以补偿轴相邻两补偿点间的误差差值作为补偿依据的误差补偿方法, 这种方法需要对检测出的单点位置偏差值进行较为复杂的数据处理。

现经检测得到1组Y轴位置偏差值 $E_Y = [X_1, X_2, X_3, \dots, X_n]^T$, 令 $\Delta\sigma = X_{n-1} - X_n$, 于是得到1组新的数据 $E'_Y = [\Delta\sigma_1, \Delta\sigma_2, \Delta\sigma_3, \dots, \Delta\sigma_{n-1}]^T$, 这时得到的数据还不能直接用于系统的误差补偿, 需要对 $\Delta\sigma$ 进行圆整拆分。

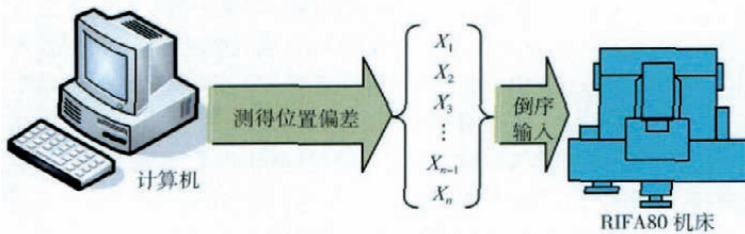


图4 绝对型误差补偿方法
Fig.4 Flow of position accuracy measuring of exact error compensation

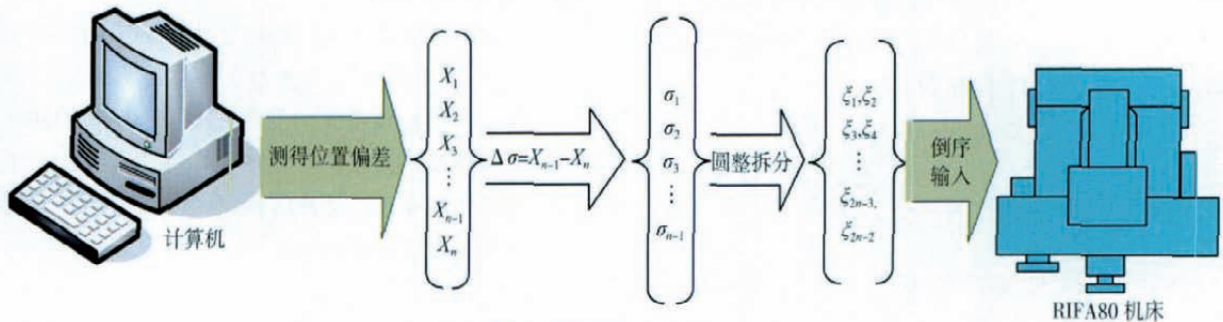


图5 增量型误差补偿方法
Fig.5 Flow of position accuracy measuring of relative error compensation

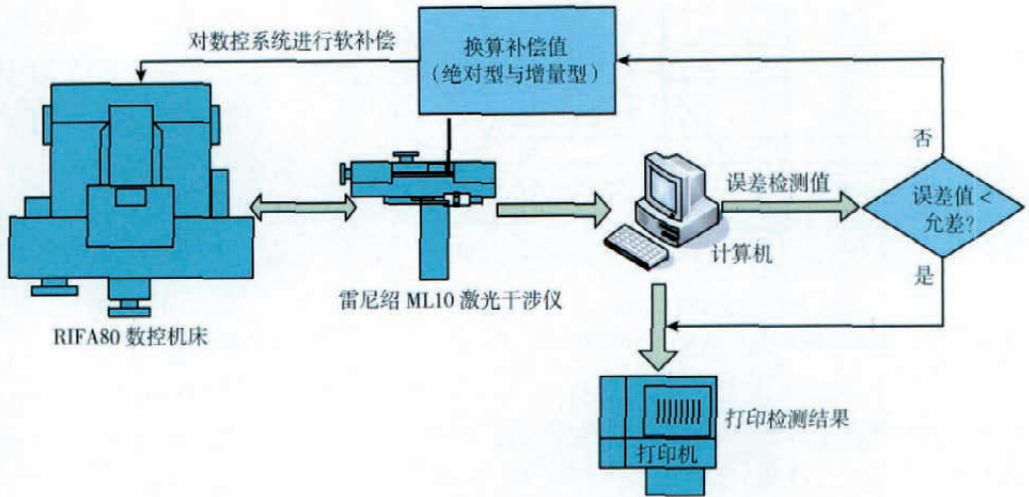


图3 数控机床误差检测与补偿流程
Fig.3 Position accuracy measuring and error compensation of NC machine tool

例如, -2 可拆分为 (-1, -1), 0.4 可圆整拆分为 (0, 0), 此时便得到1组维数为 2 (n-1) 的数据 $E''_Y = [(\xi_1, \xi_2), (\xi_3, \xi_4), \dots, (\xi_{2n-3}, \xi_{2n-2})]^T$ (其中 ξ 为 $\Delta\sigma$ 的圆整拆分值), 而 E''_Y 便是需要的最终数据, 将其以倒序形式依次输入系统补偿参数表中即可完成单次的补偿(图5)。

增量型的补偿方法需要对原始检测数据进行一系列处理, 过程比较繁琐, 但这种方法普适性强, 不仅对线性误差有很好的补偿效果, 同时也适用于误差线性度不高的情况, 是机床误差补偿中较为有效的方法。本课题中 RIFA 机床的误差补偿便是采用增量型的补偿方法。

(3) 实际检测补偿过程。

精度的测量按照 GB/T 17421.2—2000 数控机床位置精度的评定方法执行。需要特别注意的是, 环境温度保持在 $(20 \pm 0.5)^\circ\text{C}$, 测量应在机床预热以后(开机运行大约 0.5h)进行, 可以保证补偿数据的可靠性。

RIFA80 三轴数控加工中心 X、Y、Z 行程为 800mm、500mm、600mm, 采用三菱数控系统。以 Y 轴检测过程为例, 当机床没有进行任何软件补偿之前, 在 Y 轴 0~450mm 行程上按照

50mm的等间距取10个点(取点越多检测结果越真实),用雷尼绍ML10激光干涉仪跟踪检测Y轴,来回运动3趟,来时为正向,返回时为负向。通过对目标点实际空间位置的捕捉,根据GB/T 17421.2—2000所规定的算法对其进行数据分析,可得到如图6所示的结果。

激光干涉仪的检测表明,RIFA80的Y轴的定位精度误差呈累计增大状态,最大误差已经超过50μm,而反向差值虽然比较平稳但也接近20μm,与机床出厂时的8μm允差相比,精度严重下降,数控加工无法正常进行,必须进行误差补偿。通过对数据的分析,采用增量法对检测数据进行误差补偿,经过多次数据采样、分析、补偿可得到比较满意的补偿结果,如图6所示。

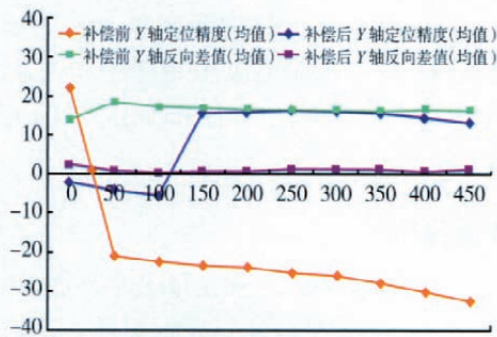


图6 补偿前后RIFA80机床Y轴精度
Fig.6 Y-axis accuracy of RIFA80 before and after compensation

经过一系列的数据补偿,机床的Y轴的各项精度都得到了很大的提高。使用相同的方法可对X轴、Z轴进行检测和误差补偿,误差补偿后的最终结果如表1所示。

表1 误差补偿结果

检测项目	补偿结果			备注
	X轴/ μm	Y轴/ μm	Z轴/ μm	
定位精度A	29.580	23.392	19.941	可用于粗加工、半精加工任务
平均位置偏差M	11.533	21.417	16.867	
反向差值B	10.267	2.333	1.867	
重复定位精度R	18.889	5.378	2.760	

4 结束语

试验表明,使用激光干涉仪对数控机床位置精度和重复位置精度的检测,并根据所得的检测结果进行误差补偿可以使精度下降的数控机床在一定程度上重新焕发“青春”。但对机械部件、伺服器件等受损的数控机床,这种“软补偿”是无法恢复其原有的功能和精度的。

参 考 文 献

[1] 张敏. 基于激光干涉仪的数控机床几何误差检测与辨识. 机械工程师,2006(9):76-78.
 [2] 张江华. 三坐标数控机床运动误差的分析与检测. 机械工程师,2005(9):21-22.
 [3] GB/T 17421.2—2000 机床检验通则 第2部分:数控轴线的定位精度和重复定位精度的确定. 北京:中国标准出版社.
 [4] 陶晓杰,王治森. 机床误差的补偿方法探讨. 制造业自动化,2005,27(5):18-24

(责编 良辰)

(上接第89页)

根据供应商的各指标的得分情况和权重,计算出供应商的综合权重,并选择最满意的供应商。根据表3的计算结果,对于 S_1 、 S_2 、 S_3 这3个候选供应商而言,在比较了财务、客户、学习与成长和内部流程4个准则和14个指标的情况下,选择 S_1 为最好的方案,其次是 S_2 , S_3 最差。

5 结束语

BSC和AHP在供应商选择的问题上起到了相辅相成的作用,使用BSC可以选择到综合实力比较强的供应商,再使用AHP则可以实现在优中选优,强中选强。案例分析也表明该方法具有可操作性,为采购企业如何具体选择最合适的供应商提供了参考。

参 考 文 献

[1] Lee C. Design of an intelligent supplier relationship management system: a hybrid case based neural network approach. Expert Systems With Applications, 2003, 24: 225-237.
 [2] Yun D H B. The AHP approach for selecting an automobile purchase model. Information & Management, 2000(38): 289-297.
 [3] Maggie C Y, Tam V M, Rao T. An application of the AHP in vendor selection of a telecommunications system. Omega, 2001(29): 171-182.
 [4] 朱建军,刘士新,王梦光. 供应商选择及订购计划的分析. 东北大学学报(自然科学版),2003,24(10): 956-958.
 [5] Yang, Kuo T C. A hierarchical AHP/DEA methodology for the facilities layout design problem. European Journal of Operation Research, 2003, 147(1): 128-136.
 [6] Morlacchi P. Small and medium enterprises in supplier performance evaluation model and some empirical results. Proceedings IFPMM Summer School, 1997.
 [7] 王建军,杨德礼. 供应商选择的AHP/PROMETHEE决策方法. 管理评论,2006,18(7):57-61.
 [8] 刘晓,李海越,王成恩. 供应商选择模型与方法综述. 中国管理科学,2004,12(1):139-148.
 [9] 黄惠琴,盛江. 管理会计. 北京:科学出版社,2004:281-281.
 [10] 赵健梅,刑颖. 管理会计学. 清华大学出版社,北京交通大学出版社,2006,318-318.
 (责编 小颖)