DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2108433

刀库及其自动换刀装置的换刀精度检测方法和衰退规律研究*

汪满新[1],卞程飞[1],韩 军[1],欧 屹[1],管 强[2]
(1.南京理工大学 南京 210094; 2.纽威数控装备(苏州)股份有限公司 苏州 215000)

摘 要:刀库及其自动换刀装置是数控机床用于储存和交换刀具的关键功能部件,其性能状态特别是换刀精度直接影响数控机床能否准确、迅速地完成换刀,是影响数控机床可靠性的关键因素。通过在主机现场搭建盘式刀库换刀精度检测试验台,并提出基于两个激光位移传感器的换刀精度检测方法,借助加工中心工作台位置可通过数控系统精确控制,提出激光位移传感器位置参数标定方法。制定换刀精度试验方法,并开展 100 万次换刀试验,揭示刀库及其自动换刀装置换刀精度随载荷和试验次数的变化规律,以及插刀前、拉刀前和拉刀后刀柄精度的变化规律,进而为如何减少刀柄插刀过程中对主轴的冲击提供重要参考。

关键词: 刀库及其自动换刀装置;换刀精度;衰退规律
中图分类号: TG71 TN92 TH133 **文献标识码**: A **国家标准学科分类代码**: 416.20

Research on the measuring method and decline rule of the tool change accuracy of the tool magazine and automatic tool changer

Wang Manxin[1], Bian Chengfei[1], Han Jun[1], Ou Yi[1], Guan Qiang[2]
(*1. Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China*;
2. Newway CNC equipment (Suzhou) Co., Ltd., Suzhou 215000, China)

Abstract: Tool magazine and automatic tool changer are key functional components used for storing and exchanging tools of CNC machine tools. Their performance condition, especially the tool change accuracy, directly affects whether CNC machine tools can accurately and quickly complete tool change. They are key factors that affect the reliability of CNC machine tools. By setting up the tool change accuracy test bed of the tool magazine and automatic tool changer on CNC machine tools, the measuring method for tool changing accuracy is proposed based on two laser displacement sensors. Then, the positioning parameter calibration method of the laser displacement sensor is proposed by means of the position of machining center workbench, which can be precisely controlled by the numerical control system. By developing the tool change accuracy test method, one million tool changing tests are implemented to reveal the change rule of the tool change accuracy of the tool magazine and automatic tool changer with load and test times, and the change law of the precision of the holder before the insert, before the broach and after the broach. In this way, an important reference is provided for how to reduce the influence of the tool holder on the spindle in the process of the insert.

Keywords: tool magazine and automatic tool changer; tool change accuracy; performance decay law

0 引 言

刀库及其自动换刀装置(后文简称刀库)[1-2]是数控机床关键功能部件,其作用是储存和交换刀具,实现刀库上指定刀具和主轴上加工刀具快速交换,从而减少零件加工的辅助时间,提高生产效率,降低制造成本。刀库系统是一种集机械、电子、液压、控制等于一体的复杂装置,是数控机床上最容易发生故障的功能部件,刀库的性能状态直接影响着数控机床本身的状态和可靠性。值得指

收稿日期: 2021-08-18 Received Date: 2021-08-18
*基金项目:国家科技重大专项项目(2018ZX04039001)资助

出,故障往往是某项性能衰退的结果,并非一蹴而就的,因此有必要针对刀库的关键性能进行长期监测[3-4],以便获取发生故障的具体原因,并获得刀库关键性能随换刀次数和载荷等条件的变化规律,从而为预估故障发生及其可靠性提升提供重要依据。

随着检测技术的发展,诸多学者根据实际需求,针对刀库电机电流、气缸气压、振动等性能检测和可靠性监测方法开展了研究[5-14]。如在电机电流方面,张跃明等[6]设计了圆盘式刀库电机电流监测试验台,实现了对刀库工作时电机电流的实时检测,从而能够发现引起电机电流过载的机械原因;李国发等[7]采用一种改进的相邻系数法对采集的状态信号进行降噪处理,并建立刀库电机电流能量的时变模型,实现了电机堵转故障报警。在气压监测研究方面,黎园亮等[10]设计了包括机械结构、控制系统和检测系统的综合性能检测系统,该系统能够探究气/液缸压力值和换刀时间的变化情况,最后根据分析得到的结果来评价被测链式刀库及机械手性能的优劣程度。在刀库及主轴振动方面,国内外学者研究了多种不同的振动信号采集及处理方法,并对刀库运行状态进行了有效预测,如夏仰球等[12]利用换刀系统无量纲化的动力学模型研究了换刀系统在换刀过程中的随机振动,并提出了一种利用峰值超越法评估系统振动可靠性的分析方法;石靖楠[13]在利用无线振动传感器收集振动信号后,通过短时傅里叶变换进行时频分析,也取得了良好的实验效果。

除了上述性能之外,换刀精度是刀库及其自动换刀装置的最重要的性能之一,将直接影响着换刀成功与否。事实上,精度作为很多机械装备的关键性能之一,故其检测方法得到不断发展,可为刀库换刀精度检测提供重要参考。如国内外诸多学者研究了减速器、导轨、数控机床、机器人等精度的检测方法[15-19]。路遥环等[16]通过对检测仪的整体结构设计、传感器安装方式及位置设计、测量后的误差补偿等方面研究了卧式减速器角位移精度的测量技术;赵艺兵等[17]基于激光跟踪仪搭配探测器和上位机实现对 6 自由度串联机器人的精度检测;李泽宇等[18]利用激光位移传感器研究了导轨型面精度的检测方法,进而用于导轨型面参数不确定度的分析和评价。针对刀库精度的检测,李强等[20]提出了一种基于激光位移传感器和标准刀柄补偿的链式刀库运动精度检测方法,用以估算链式刀库的故障阈值范围;熊杰[21]设计了以 PLC 为核心的控制系统对刀库及自动换刀装置中刀套翻转定位精度进行了测试,但无法做到实时监测;张跃明等[22]采用 VC6.0 编写了检测程序,实现了刀柄定位数据的实时采集和自动存储,并捕捉了刀柄的位置轨迹。值得指出,虽有诸多学者针对刀库精度检测进行了研究,但大都试验次数较少,无法完全激发出刀库性能随换刀次数的变化规律。且前人换刀试验大都是在实验室台架上进行的,鲜有在主机上开展,难于得出换刀精度在刀柄插刀过程中对主轴冲击的影响

本文首先提出刀库换刀精度检测方法,并在主机现场搭建刀库及其自动换刀装置换刀精度检测试验台,进而在不同的载荷条件下共开展 100 万次换刀试验,揭示换刀精度随载荷和试验次数的变化规律,以及插刀前、拉刀前和拉刀后刀柄精度的变化规律,可为如何减少刀柄插刀过程中对主轴的冲击提供重要参考。

1　换刀精度检测方法

刀库及其自动换刀装置的换刀精度主要是指换刀刀柄到达机床主轴时的位置精度,如图 1 和 2 所示为主机现场的盘式刀库及其自动换刀装置换刀精度检测模块示意图,该模块主要由两个激光位移传感器及其工装和工控机等组成。在此,将两传感器的测距并通过计算得出的刀柄圆心位置作为刀库换刀精度的衡量指标。

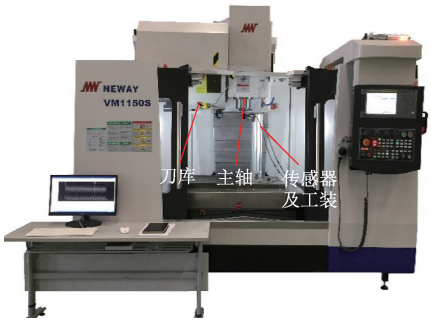


图 1　主机现场盘式刀库换刀精度检测试验台

Fig. 1　Test bench for tool change accuracy of disc tool magazine in machine tool on-site

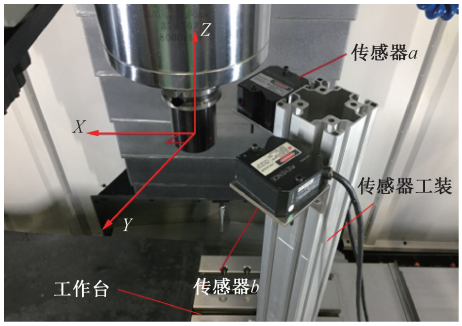


图 2　盘式刀库换刀精度监测模块现场试验

Fig. 2　Field test of tool change accuracy monitoring module of disc tool magazine

为描述方便,如图 2 和 3 所示,以主轴圆心为坐标原点建立参考坐标系 $O-XYZ$,其中 X 轴方向平行于工

作台移动方向且水平向左，Z 轴与主轴轴线同轴且方向向上，Y 轴满足右手定则。设传感器 a 与 b 参考坐标系下的坐标分别为 $A(X_a,Y_a)$ 及 $B(X_b,Y_b)$，两激光出射线与 X 轴的夹角分别为 α 和 β，出射线与检测刀柄的交点分别为 $A_1(X_{a1},Y_{a1})$ 及 $B_1(X_{b1},Y_{b1})$，检测刀柄的直径为 d，第 i 次换刀时两传感器的测距输出分别为 $l_{1,i}$ 和 $l_{2,i}$，设刀柄圆心坐标为 (X_i,Y_i)，因 $OA_1=\frac{d}{2}$，$OB_1=\frac{d}{2}$，则有：

$$\begin{cases}(X_a+l_{1,i}\cos\alpha-X_i)+(Y_a+l_{1,i}\sin\alpha-Y_i)^2=\left(\frac{d}{2}\right)^2\\(X_a+l_{1,i}\cos\beta-X_i)+(Y_a+l_{1,i}\sin\beta-Y_i)^2=\left(\frac{d}{2}\right)^2\end{cases}\tag{1}$$

式(1)中仅有两个方程，但存在 8 个未知数，即 X_i、Y_i 以及 X_a、Y_a、X_b、Y_b、α、β。故为了求解 X_i 和 Y_i，还需获取激光位移传感器的位置信息 X_a、Y_a、X_b、Y_b、α、β 共 6 个参数，因激光位移传感器固定在机床移动工作台上，而工作台的位置可通过机床数控系统精确控制，故上述参数可借助机床移动工作台测得。

图 4 示出了标定激光传感器位置时机床移动工作台相对位置的示意图。

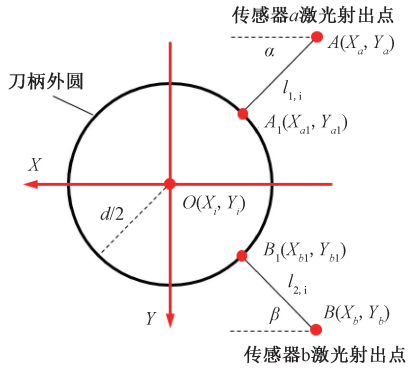


图 3 激光位移传感器位置及所建坐标系示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the laser displacement sensor position and the established coordinate system

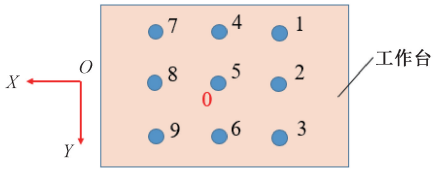


图 4 机床移动工作台相对位置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of relative position of mobile worktable of machine tool

图 4 中 0 点为最终测试刀库换刀精度的位置，若通过机床数控系统的精确控制，将工作台的位置移动至第 $m(m=1,2,3,\cdots,9,)$ 点时(其中第 5 点与 0 点重合)，两个激光位移传感器的读数分别变为 l_{1m} 和 l_{2m}，记 $(\Delta x_m,\Delta y_m)$ 为工作台位置位于第 m 点时与其位于 0 点的位矢，则有：

$$\begin{cases}(X_a+\Delta x_m+l_{1m}\cos\alpha-X_{r,m})^2+\\(Y_a+\Delta y_m+l_{1m}\sin\alpha-Y_{r,m})^2=\left(\frac{d}{2}\right)^2\\(X_b+\Delta x_m+l_{2m}\cos\alpha-X_{r,m})^2+\\(Y_b+\Delta y_m+l_{2m}\sin\alpha-Y_{r,m})^2=\left(\frac{d}{2}\right)^2\end{cases}\tag{2}$$

在标准刀柄下，刀柄拉刀后的圆心与主轴同心，故有 $X_{r,m}=Y_{r,m}=0$。由式(2)可知，一个独立测点可建立 2 个独立方程，故 6 个未知数需联合任意 3 个独立测点的方程组方可求得。选取多组 3 个测点的组合并将几组计算数值的均值作为激光位移传感器的位置参数标定值。

2 换刀动作辨别及其换刀精度计算

图 5 示出了刀柄一次插刀过程中激光位移传感器 a 的读数变化情况，由图 5 可知，当刀柄达到主轴下方、刀柄往主轴向上插刀、以及完成拉刀后的刀柄位置是有细微变化的。

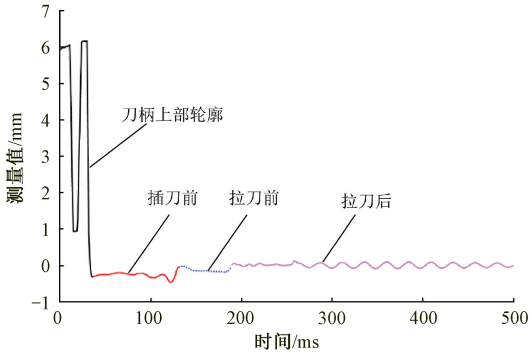


图 5 插刀过程中激光位移传感器 a 的读数变化规律

Fig. 5 Reading change law of laser displacement sensor a during tool insertion

为准确测量出换刀装置在插刀过程中的精度变化，进而分析主轴与刀柄间位置误差及前者对后者的校正作用，根据换刀动作的时间前后关系，将插刀过程分为如图 6 所示的 3 个阶段，即插刀前、拉刀前、拉刀后。

1)插刀前：表示换刀机械手将刀柄翻转到主轴正下方，此时刀柄未与主轴接触，因此主轴对其没有校正作用，此时刀柄的位置精度最差，如图 5 中第 2 段曲线所示。

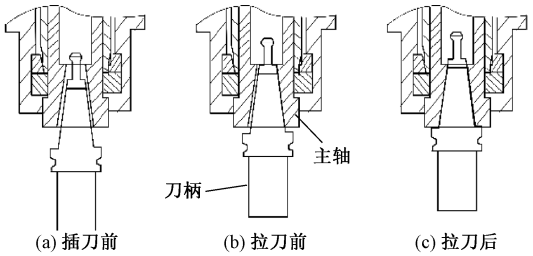


图 6　刀柄插刀 3 阶段示意图

Fig. 6　Schematic diagram of three stages of tool holder inserting

2)拉刀前:表示刀柄已进入主轴,但未进行拉刀,由于机械手手爪的环槽比刀柄的环槽小、刀柄的自重和机械手换刀本身的翻转到位精度与主轴圆心之间的误差,刀柄上锥面与主轴虽有接触但未贴紧,此时刀柄的位置精度有所改善,如图 5 中第 3 段曲线所示。

3)拉刀后:表示主轴已完成拉刀动作,由于系统的拉刀力相对于刀柄自重和机械手对刀柄的夹持力大很多,此时刀柄上锥面与主轴锥面完全贴合,此时刀柄的位置与主轴重合,精度最高,如图 5 中第 4 段曲线所示。

分别取图 5 中第 2 段、第 3 段、第 4 段曲线所对应激光传感器读数的均值作为插刀前、拉刀前和拉刀后的激光位移传感器的测距,并将第 i 次换刀时插刀前、拉刀前和拉刀后两个激光位移传感器的测距分别记为 n_k 和 $l_{2,p,i}(p=1$ 代表插刀前,$p=2$ 代表拉刀前,$p=3$ 代表拉刀后),将其分别代入式(1)即可得到插刀前、拉刀前和拉刀后在第 i 次换刀时的刀柄圆心位置,并将其记为 $(X_{p,i},Y_{p,i})$。

为了精确分析每个阶段换刀精度随换刀次数和载荷的变化规律,现以相邻 1 千次换刀后的刀柄圆心距离作为换刀精度波动值:

$$D_{p,k,j}=\sqrt{(X_{P,1\,000j}-X_{P,1\,000(j-1)})^2+(Y_{P,1\,000j}-Y_{P,1\,000(j-1)})^2} \tag{3}$$

式中:$D_{p,k,j}$ 为第 j 千次($j\geqslant 1$)试验所测定刀柄圆心与第 $j-1$ 千次试验所测定刀柄圆心的距离;$X_{p,1\,000j}$、$Y_{p,1\,000j}$ 分别为第 j 千次试验时刀柄圆心在基准坐标系下 x、y 轴坐标。

假设第 k 个阶段共进行了 n_k 千次换刀试验,为了避免单次测量造成的误差,将该阶段每 1 千次的试验结果的平均值作为该试验阶段的精度波动的评价指标。则第 k 个阶段的精度波动值可表示为:

$$D_{p,k}=\frac{\sum_{j=1}^{n_k}D_{p,k,j}}{n_k} \tag{4}$$

3　换刀精度检测试验方法

搭建如图 1 和 2 所示的主机现场刀库及其自动换刀装置换刀精度检测试验台,所用仪器设备主要包括 24 把刀柄及配重、2 个激光位移传感器、1 套激光位移传感器工装、1 个工控机和 1 台立式加工中心。换刀精度检测的主要步骤如下:

1)激光位移传感器安装。利用激光位移传感器工装将 2 个激光传感器固定在加工中心的移动工作台上,安装时需保障两个激光传感器射出的光束处于同一水平面内,且均通过刀柄圆心。如图 7 所示,因激光位移传感器工装中的型材有竖直方向的 T 形槽,支架开有 U 形孔,且 U 形孔的尺寸大于螺钉的直径,使得支架一方面可以沿竖直 w 方向移动用于调节传感器的安装高度,且可绕 u 轴方向小幅度转动使传感器的光线处于水平面内,上面两个方向的调节可使得两个激光位移传感器的光线处于同一平面内。此外,与激光位移传感器安装的支架 U 形孔也比螺钉直径大,使得激光位移传感器可绕 w 轴小幅度转动,可用于调节激光传感器的方位使其光线通过刀柄圆心。具体可利用如下方法实现:利用水平仪调节激光位移传感器的光束使之水平;使两光束相交于一点,以保障两光束位于同一水平面;在水平面内调节光束方向,使得传感器测距最短,以保障光束通过刀柄圆心。

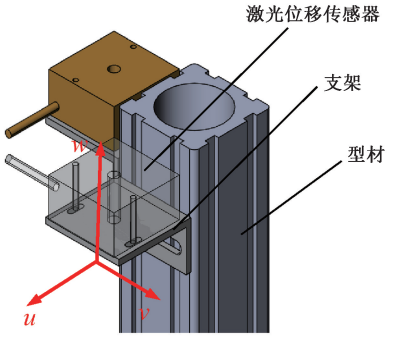


图 7　激光位移传感器工装局部放大图

Fig. 7　Partial enlarged view of laser displacement sensor tooling

2)标定激光传感器的位置参数。首先在主轴上安装 1 把刀柄,进而在机床手轮模式下,将加工中心的移动工作台工装依次移动到图 4 所示的标定点位,并记录对应点位下的激光位移传感器测量值,进而通过式(2)计算出激光传感器的位置参数。在此,应注意工作台移动的距离不可太大,不能超出激光传感器的测距范围。标定结束后需将工作台移回至检测点 0。

3)开展换刀试验。在刀库上安装 23 把刀柄及配重,其中一号刀位为空刀,设定换刀频率,开展连续换刀试验,并记录激光位移传感器的示数值。在此,设定换刀频

率为 6 s/次,并采用逐渐增加刀柄配重的方法开展换刀试验。自 2019 年 4 月 28 日至 2020 年 12 月 9 日,刀库累计完成 100 万次的换刀试验。各阶段试验次数及其相关信息见表 1。

表 1 试验阶段及相关信息

Table 1 Test stage and relevant information

试验次数/(万次)	刀柄及配重质量分布	总质量/kg
0~5	一号刀位为空刀,其余 23 个刀位均为同质量刀柄(刀柄质量均为 1.3 kg)	1.3×23=29.9
5~25	一号刀位为空刀,其余 23 个刀位按照"刀柄、刀柄、刀柄+3.4 kg 配重"为周期进行分配	1.3×23+3.4×7=53.7
25~100	一号刀位为空刀(用于周期定位),2~10 号刀位为刀柄+3.4 kg 配重,11~21 号刀位为刀柄+4.96 kg 配重,22 号为刀柄+6.44 kg 配重,23~24 号为无配重刀柄	1.3×23+3.4×9+11×4.96+6.44=121.5

4 试验结果分析

4.1 激光传感器位置参数标定

首先进行激光传感器位置参数的标定,工装在各个点位的移动值以及对应激光位移传感器测量值见表 2,故根据式(2)可求得激光位移传感器的位置信息如下:$X_a=-53.829$ mm,$Y_a=-52.143$ mm,$\alpha=0.806\ 4$ rad,$\beta=0.806\ 4$ rad。

表 2 各个标定位点坐标值和传感器示数值

Table 2 Coordinate value of each positioning point and indication value of the sensor mm

位点 m	Δx_m	Δy_m	l_{1m}	l_{2m}
1	-2	-2	-0.509	-2.876
2	-2	0	-1.667	-1.629
…	…	…	…	…
9	2	2	0.082	2.789

4.2 换刀精度变化规律

在完成传感器位置信息标定后,开展了 100 万次换刀试验。分别提取插刀前、拉刀前和拉刀后两激光传感器的测距,对测试数据进行分析,得到刀柄圆心随换刀次数的变化规律如图 8 所示。值得指出,0~5 万次测试刀柄的质量为 1.3 kg,5~25 万次测试刀柄的质量为 1.3+3.4=4.7 kg,25~45 万次测试刀柄的质量为 1.3+4.96=6.26 kg,45~100 万次测试刀柄的质量为 1.3+6.44=7.74 kg。

根据变化规律图,可得到以下结论:

1)换刀精度随载荷变化规律

刀柄圆心坐标波动幅度随载荷增大而增大,且插刀前刀柄圆心坐标变化幅度最大,在试验后期该变化更明显,其后依次为拉刀前圆心和拉刀后的圆心坐标。

从圆心坐标变化趋势看,插刀前及拉刀前刀柄圆心坐标均随载荷增大始终向同一方向增大,拉刀后刀柄圆心坐标随载荷增加出现来回变化现象。

2)换刀精度随试验次数变化规律

前 5 万次试验中,刀柄圆心坐标基本无变化;第 5~45 万次试验中,各阶段刀柄圆心坐标均有小幅增大,总体比较稳定;第 45~100 万次试验阶段,插刀前及拉刀前刀柄圆心坐标波动均随试验次数的增加不断增大,特别是在 75 万次之后增幅较明显,拉刀后的圆心坐标波动在 75 万次之后也有小幅度增大。

3)换刀 3 阶段的圆心变化规律

插刀前刀柄圆心离基准坐标系原点较远,且随着载荷的增加和试验次数的增加,偏离原点的趋势最明显;拉刀后的圆心精度远优于拉刀前和插刀前的圆心精度,说明在插刀的过程中主轴对刀柄圆心精度具有修正作用。

4.3 换刀精度波动分析

由于不同载荷下的换刀次数不一致,不可避免导致波动值因试验次数的增多而增大,无法精准探究载荷变化对换刀精度的影响程度,为解决该问题,以每 5 万次为一次考察段,将 4 种载荷下的 100 万次换刀试验可划分如下 20 个考察段:

第 1 种载荷:1.3 kg 载荷:0~5 万次,按每 5 万次为一次考察段可划分为 1 段;

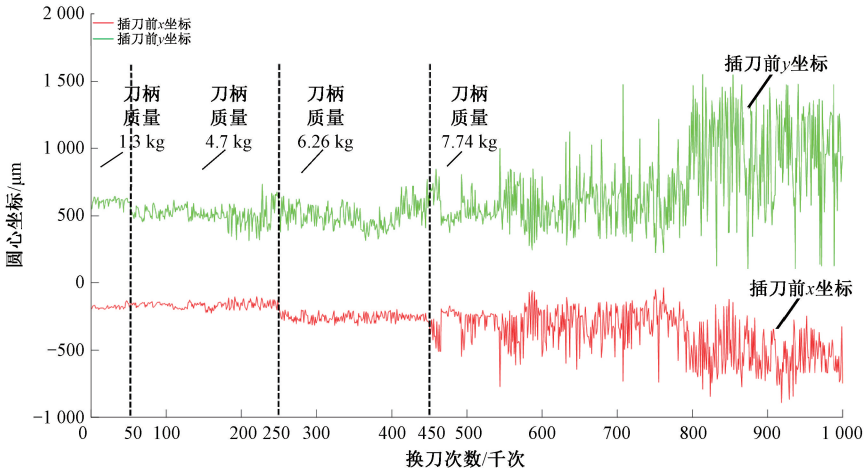
第 2 种载荷:4.7 kg 载荷:5~25 万次,按每 5 万次为一次考察段可划分为 4 段;

第 3 种载荷:6.26 kg 载荷:25~45 万次,按每 5 万次为一次考察段可划分为 4 段;

第 4 种载荷:7.74 kg 载荷:45~100 万次,按每 5 万次为一次考察段可划分为 11 段;

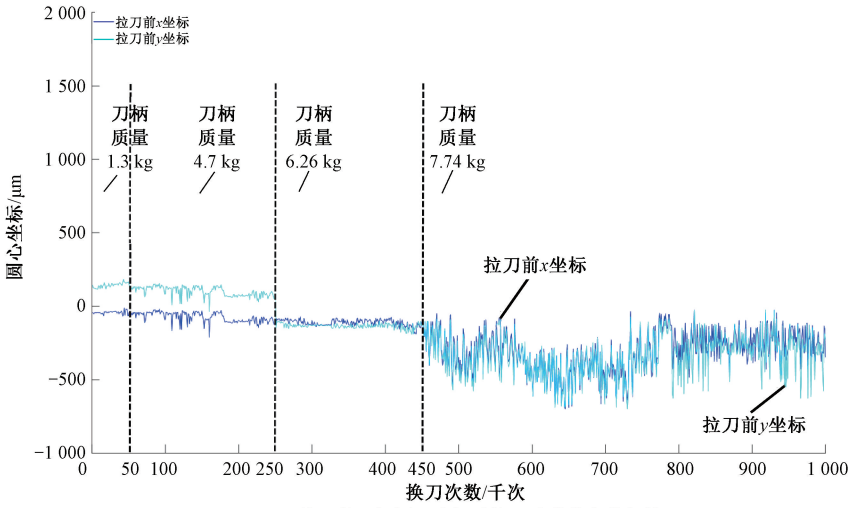
根据上述试验阶段划分方法,可得各个考察段的波动值如表 3 和图 9 所示,将相同载荷的试验条件统计汇总后的精度波动信息如表 4 所示。

由图表可知,4.7 kg 载荷下(5~25 万次)换刀精度波动较 1.3 kg 载荷下(0~5 万次)在插刀前、拉刀前和拉刀后的增幅分别为 32.86、8.95、5.35 μm;6.26 kg 载荷下(25~45 万次)换刀精度波动较 4.7 kg 载荷下



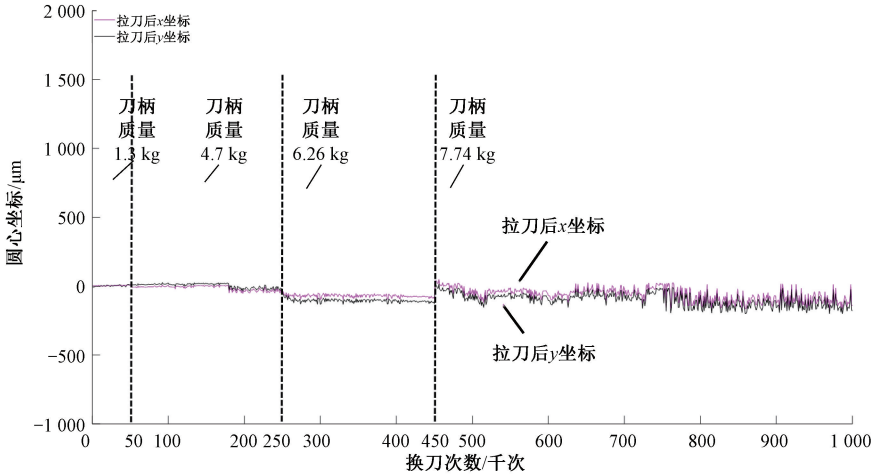
(a) 插刀前刀柄圆心坐标随换刀次数的变化规律

(a) Variation law of center coordinates of tool handle with tool change times before tool insertion



(b) 拉刀前刀柄圆心坐标随换刀次数的变化规律

(b) Variation law of center coordinates of tool handle with tool change times before broach



(c) 拉刀后刀柄圆心坐标随换刀次数的变化规律

(c) Variation law of center coordinates of tool handle with tool change times after broach

图 8　刀柄圆心坐标随换刀次数的变化规律

Fig. 8　Variation law of center coordinates of tool handle with tool change times

表 3 各试验阶段 *D* 值

Table 3 D value of each test stage

阶段编号	次数/万次	插刀前/μm	拉刀前/μm	拉刀后/μm
1	0~5	26.4	14.4	3.3
2	5~10	32.2	20.4	4.0
3	10~15	39.2	24.4	6.8
4	15~20	67.9	25.2	9.9
5	20~25	99.7	23.4	13.9
6	25~30	89.2	34.6	19.8
7	30~35	69.7	34.7	18.2
8	35~40	71.4	35.2	13.6
9	40~45	106.3	49.6	15.7
10	45~50	99.5	187.9	28.3
11	50~55	115.2	174.5	27.0
12	55~60	281.8	158.5	27.3
13	60~65	234.5	214.8	25.9
14	65~70	200.7	207.6	38.3
15	70~75	272.6	191.5	29.7
16	75~80	272.1	143.5	76.5
17	80~85	465.8	232.3	64.3
18	85~90	425.1	135.2	68.6
19	90~95	478.6	196.5	72.4
20	95~100	476.3	206.2	78.5

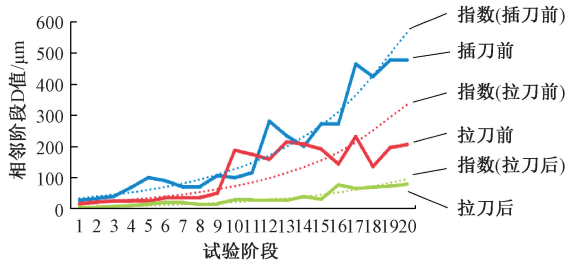


图 9 3 个刀柄插刀过程的刀柄圆心波动图

Fig. 9 Fluctuation diagram of tool handle center in the process of inserting three tool handles

表 4 不同载荷下的换刀精度波动值

Table 4 Fluctuation value of tool change accuracy under different loads

刀柄质量/kg	试验次数/万次	插刀前 D 均值/μm	拉刀前 D 均值/μm	拉刀后 D 均值/μm
1.3	0~5	26.4	14.4	3.3
4.7	5~25	59.75	23.35	8.65
6.26	25~45	84.15	38.525	16.825
7.74	45~100	263.03	182.86	42.878

(5~25 万次)在插刀前、拉刀前和拉刀后的增幅分别为 24.4、15.17、8.17 μm;7.74 kg 载荷下(45~100 万次)换刀精度波动较 6.26 kg 载荷下(25~45 万次)在插刀前、拉刀前和拉刀后的增幅分别为 178.88、144.34、26.05 μm。从精度波动幅度的增加值及载荷的增加值比对分析看,前 3 种载荷下换刀精度波动的逐渐增加主要原因是载荷的增加,而第 4 种载荷下换刀精度波动的增加除了载荷影响之外,试验次数由于已经较大,故试验次数的累积导致零部件的磨损也是精度波动值变大的主要原因之一。

从整体情况看,拉刀后的精度波动值远小于插刀前和拉刀前的精度波动,拉刀前的精度波动小于插刀前的精度波动,其主要原因是主轴对刀柄精度具有修正作用,且拉刀后主轴修正作用大于拉刀前的修正作用。

此外,从表 3 可发现,在第 75 万次换刀后,拉刀后的精度波动也大幅上升,其原因是在 75 万次之后主轴碟簧破损和主轴拉杆磨损(如图 10 所示),故主轴对刀柄的修正作用大大减弱。由此也说明,换刀精度极大影响着刀柄拉刀时对主轴的冲击作用,换刀精度差可导致主轴内部零件发生损坏。

图 10 主轴内部碟簧和拉杆损坏

Fig. 10 The damaged disc spring and pull rod inside the main shaft

4.4 圆心位置变化趋势及其原因分析

为了得到刀柄圆心位置在换刀过程中的变化特征,图 11 示出了插刀前、拉刀前和拉刀后刀柄圆心散点图随换刀次数的变化规律。

从图 11 中可以看出:1)刀柄圆心离散程度随载荷的增大以及试验次数的增加而逐渐变大;2)拉刀后的刀柄圆心最集中;3)在 5 万次特别是在 45 万次换刀试验之后,刀柄圆心呈现出沿某一固定的方向偏移的趋势,且其分布可近似拟合为一条直线,偏移方向已在图 11 中示出。图 12 进一步将刀柄圆心位置的变化趋势在换刀装置参考坐标系中示出。

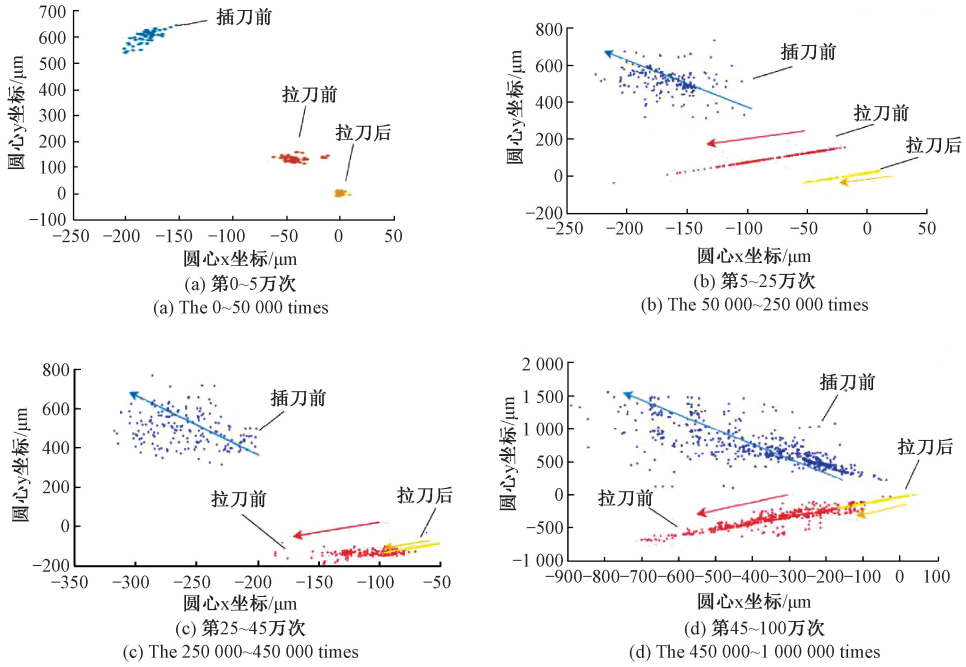


图 11　各阶段换刀刀柄圆心散点图及其变化趋势

Fig. 11　Scatter diagram of circle center of tool change handle at each stage and its change trend

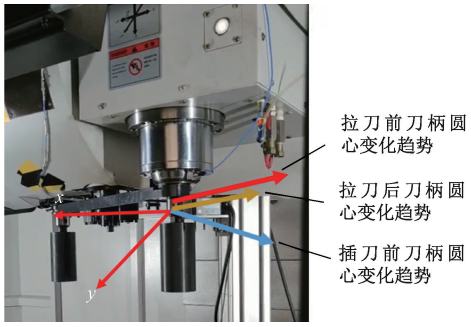


图 12　刀柄圆心位置变化趋势

Fig. 12　Change trend of tool handle center position

由图 11 和 12 可知,插刀前的刀柄圆心轨迹基本在刀柄转轴中心与主轴中心的连心线上,且呈远离刀柄转轴中心的趋势,通过查看刀臂发现,刀臂刀爪在换刀过程中出现磨损,如图 13 所示,故在顶杆的推力作用下,刀柄将进一步被推至刀爪磨损处,使得刀柄圆心进一步远离刀柄转轴中心。同时可以发现拉刀前和拉刀后的刀柄圆心位置沿扣刀方向偏移,这主要是因为在扣刀作用力下,刀柄与主轴在内壁的碰撞和压力增大,导致在插刀和拔刀的过程中刀柄向主轴内侧偏移。

图 13　刀爪磨损情况

Fig. 13　Wear of the tool claw

因此,为了避免换刀精度差而使得插刀过程对主轴造成较大的冲击,在刀爪出现磨损时应及时更换。

5　结　　论

本文搭建主机现场刀库及其自动换刀装置换刀精度检测试验台,并完成了 100 万次换刀试验,得到如下结论:

1)提出基于两个激光位移传感器的换刀精度检测方法,并借助加工中心工作台位置可通过数控系统精确控制,提出激光位移传感器位置参数标定方法,可实现换刀精度的精准检测。

2)试验表明,换刀精度随试验次数及载荷增大而降低,且刀柄圆心位置向刀爪磨损区域偏移。此外,拉刀后的精度和精度波动均好于插刀前和拉刀前的精度和精度波动,说明主轴对刀柄圆心位置具有修正作用。但在 75 万次之后,由于主轴内部碟簧和拉杆损坏,主轴对刀柄圆心位置的修正作用降低。

3)换刀精度影响着刀柄拉刀时对主轴的冲击作用,换刀精度差可导致主轴内部零件发生损坏。为了避免换刀精度差而使得插刀过程对主轴造成较大的冲击,在刀爪出现磨损时应及时更换。

参考文献

[1] 韦杰, 刘显玉, 王文韬,等. 盘式刀库及自动换刀装置可靠性评价[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2013(8):113-115.
WEI J, LIU X Y, WANG W T, et al. Reliability evaluation of circular tool magazine and automatic tool changer [J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2013(8): 113-115.

[2] 牛红伟, 阴艳超. 链式刀库自动换刀装置的运动分[J]. 制造业自动化 2015, 37(1):15-17.
NIU H W, YIN Y CH. Motion analysis of automatic tool changer in chain tool magazine [J]. Manufacturing Automation, 2015, 37(1):15-17.

[3] ZHEN L, FEI C, HE J, et al. Signal processing of time domain load signals of CNC lathe based on improved neighbor block [C]. 2016 Annual Conference on Information Science and Systems (CISS). IEEE, 2016.

[4] LU X H, HAN P Z, WU W Y. Reliability evaluation of chain-type tool magazine and ATC [J]. Applied Mechanics & Materials, 2013, 271:461-465.

[5] QIU Z, RUAN J, HUANG D, et al. Mechanical fault diagnosis of high voltage disconnector based on motor current detection[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(13): 3459-3466.

[6] 张跃明, 王立博, 牟宏明,等. 盘式刀库电机电流监控系统设计[J]. 机械设计与制造, 2014(5):75-78.
ZHANG Y M, WANG L B, MOU H M, et al. The design of the motor current real-time monitoring system about tool magazine [J]. Machinery Design & Manufacture, 2014(5):75-78.

[7] 李国发, 李屹, 王大川,等. 盘式刀库可靠性试验状态监测及故障预警研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2018(8):86-89.
LI G F, LI Y, WANG D CH, et al. Research on status monitoring and fault warning for reliability testing of circular tool magazine [J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2018(8):86-89.

[8] XIAO G X. For the measurement of air pressure in weak signal detection circuit [J]. Medical Device, 2010. 23(3): 13-16.

[9] 蔡奇善. 数控车床气压机械手臂的 PLC 控制系统[J]. 科学大众·科学教育, 2015(3):170-171.
CAI Q SH. PLC control system of pneumatic manipulator of CNC lathe[J]. Popular Science · Science Education, 2015 (3):170-171.

[10] 黎园亮, 苟卫东, 李积元,等. 链式刀库及机械手综合性能检测规范研究[J]. 机床与液压, 2017, 45(4):154-159.
LI Y L, GOU W D, LI J Y, et al. Research on comprehensive performance test specification for chain tool magazine and manipulator [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2017, 45(4):154-159.

[11] RODRIGUEZ G Y, CORRES J M, JAVIER G. Vibration detection using optical fiber sensors [J]. Journal of Sensors, 2010, 2010:1-12.

[12] 夏仰球, 胡秋. 基于峰值超越法的盘式刀库随机振动可靠性分析[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2015(2):58-60,64.
XIA Y Q, HU Q. Random vibration reliability analysis of disc magazine based on the peak beyond method [J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2015(2):58-60,64.

[13] 石靖楠. 链式刀库可靠性试验与状态监测系统研制[D]. 长春:吉林大学,2015.
SHI J N. Development of reliability test and condition monitoring system of chain-type tool changer [D]. Changchun: Jilin University, 2015.

[14] 李强,韩军,汪满新,等. 基于信号共振稀疏分解的自动换刀装置故障诊断[J]. 组合机床与自动化加工技术,2019(4):107-110.
LI Q, HAN J, WANG M X, et al. The fault diagnosis of automatic tool changer on the resonance-based sparse signal decomposition [J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2019 (4): 107-110.

[15] SAU N V, NGO Q M, PHAN T B, et al. Optical biosensor using near infrared laser for enhancement of detection accuracy[J]. Journal of Electronic Materials, 2020, 49(12):7420-7426.

[16] 路遥环, 裘祖荣, 尤悦,等. 精密减速器角位移测量系统设计[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(7): 14-20.
LU Y H, QIU Z R, YOU Y, et al. Design of angular displacement measuring system for precision reducer[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021: 42(7): 14-20.

[17] 赵艺兵, 温秀兰, 康传帅, 等. 零参考模型用于工业机器人定位精度提升研究[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(5):76-84.
ZHAO Y B, WEN X L, KANG CH SH, et al. Research on improvement of industry robot positioning accuracy based on ZRM [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(5):76-84.

[18] 李泽宇,欧屹,王凯, 等. 导轨型面检测装置不确定度分析[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2021, 6: 104-109.
LI Z Y, OU Y, WANG K, et al. Uncertainty analysis of

detection device of guide profile[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2021, 6: 104-109.

[19] 阮大文, 茅健, 刘钢, 等. 双五轴数控铣削机床旋转轴误差辨识方法[J]. 中国机械工程, 2020, 31(13): 1548-1554.
RUAN D W, MAO J, LIU G, at al. A method for error identification of rotation axes of dual-five-axis CNC milling machines[J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31(13): 1548-1554.

[20] 李强, 韩军, 汪满新,等. 链式刀库运动精度检测方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(9):135-145.
LI Q, HAN J, WANG M X, et al. Research on the detection method of chain tool magazine motion accuracy[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(9):135-145.

[21] 熊杰. 加工中心自动换刀装置换刀定位精度试验系统研发[J]. 数字技术与应用, 2014(6):146.
XIONG J. Research and development of test system for tool-changing positioning accuracy of automatic tool-changing device in machining center[J]. Digital Technology and Application, 2014(6):146.

[22] 张跃明, 王高波, 牟宏明,等. 刀库及自动换刀装置换刀精度检测研究[J]. 机械设计与制造, 2014(4): 65-67.
ZHANG Y M, WANG G B, MOU H M, et al. Research on tool change accuracy detection of tool magazine and automatic tool changer[J]. Machine Design and Manufacturing, 2014(4):65-67.

作者简介

汪满新(通信作者),2009 年于天津大学获得学士学位,2015 年于天津大学获得硕士和博士学位,现为南京理工大学副教授,主要研究方向为机构学、机器人技术和功能部件。

E-mail: mxwang@ njust. edu. cn

Wang Manxin (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Tianjin University in 2009, and received his M. Sc. degree and Ph. D. degree in 2015 both from Tianjin University. He is currently an associate professor at Nanjing University of Science and Technology. His main research interests include robotics, robot technology and functional components.