

文章编号 1004-924X(2009)01-0138-07

微流控芯片操作机器人碰撞保护装置的设计

刘 冲^{1,2}, 梁 勇¹, 李经民¹, 刘军山¹, 王晓东^{1,2}

- (1. 辽宁省微纳米技术及系统重点实验室, 辽宁 大连 116023;
2. 大连理工大学 精密与特种加工技术教育部重点实验室, 辽宁 大连 116023)

摘要:从避免芯片操作机器人与外界环境碰撞的角度进行了安全性设计研究。设计了一种能够感知碰撞发生信号, 基于继电器和电磁制动器实现机器人保护的碰撞保护装置, 计算分析了本装置对芯片操作机器人定位精度的影响。实验表明, 此装置能够精密控制前冲惯性位移 <1 mm, 适应性强, 不影响操作机器人定位精度, 有利于提高微流控芯片自动化制造系统的安全性和自动化水平。

关键词:操作机器人; 微流控芯片; 热压; 碰撞保护

中图分类号: TP242 **文献标识码:** A

Design of collision protection system of handling robot for microfluidic chip

LIU Chong^{1,2}, LIANG Yong¹, LI Jing-min¹, LIU Jun-shan¹, WANG Xiao-dong^{1,2}

- (1. *Key Laboratory for Micro/ Nano Technology and System of Liaoning Province, Dalian 116023, China*; 2. *Key Laboratory for Precision and Non-traditional Machining Technology of the Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China*)

Abstract: To ensure safety for a handling robot used in polymer microfluidic chip, a reliability design was presented by researching the collision protection between handling robot and objects around. A collision protection system mainly based on a relay and a electromagnetic brake was designed to distinguish collision signal and to complete protection for handling robot immediately. The position precision of the handling robot caused by the collision protection system was calculated and analyzed. The experimental results indicate that the inertial displacement can be controlled to less than 1 mm and the collision protection system has no affect on position precision. These results means that designed system is beneficial to reliability and automation of the microfluidic chip automated fabrication system.

Key words: handling robot; microfluidic chip; hot embossing; collision protection

1 引言

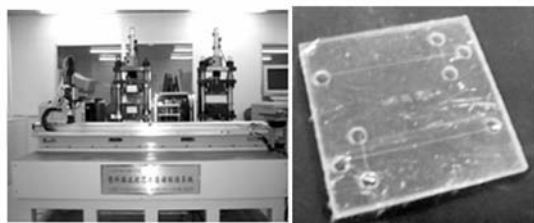
微流控芯片(Microfluidic chip)是一种采用微细加工技术,在数平方厘米大小基片上制作出微沟道网络结构和其它功能单元,以实现集样品制备、进样、反应、分离、检测于一体的快速、高效、低耗的微分析系统。微流控芯片在分析仪器微型化、集成化和便携化方面的巨大潜力为其在生物医学、高通量药物合成筛选、农作物的优选优育、环境监测与保护、卫生检疫、司法鉴定、生物战剂的侦检和天体生物学研究等众多领域的应用提供了广阔的前景^[1-2]。微流控芯片的广阔应用前景亟待芯片制备实现批量化和产业化。引入机器人技术能够保证稳定的芯片质量,并能提高芯片制作效率,对于开发微流控芯片自动化生产线,实现微流控芯片生产批量化、产业化具有非常重要的意义。

在微流控芯片自动化制作中,操作机器人的安全性是一项重要性能指标,是影响批量化生产的芯片性能参数一致性的重要因素。在芯片制作过程中,操作机器人典型的安全隐患表现为操作机械手违反既定的路径规划与外界环境发生碰撞,造成设备损坏或生产人员的伤害。机器人与外界环境碰撞后需要花费很长时间维修和重新调试才能恢复各项性能指标,费时繁琐。因而确保机器人安全地运行是提高其使用效能的关键^[3-4]。针对该问题,本文设计了一套微流控芯片操作机器人碰撞保护装置,实验表明,该装置动作迅速有效,操作简单,可控制惯性前冲位移 $<1\text{ mm}$,满足实际要求。

2 碰撞保护装置原理

大连理工大学微系统研究中心与北京航空航天大学机器人研究所联合研制的塑料微流控芯片自动化制造系统主要有以下几部分组成:芯片操作机器人、微结构热压成形机、芯片键合机、自动对准台、芯片上下料装置和主控计算机控制系统,操作机器人根据各个工位时间序列和动作序列,将芯片放到指定的工位。图1为本自动化制造系统及其制作的微流控芯片^[5-6]。

在塑料微流控芯片自动化制造系统中,为保



(a)微流控芯片制造系统 (b)芯片
(a) Fabrication system for microfluidic chip (b) Chip sample

图1 微流控芯片自动化制造系统及芯片成品

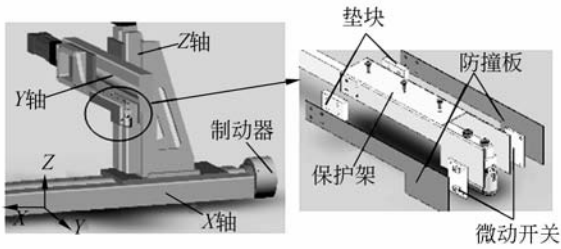
Fig. 1 Automatic fabrication system and microfluidic chip sample

证芯片操作机器人的安全性,防止碰撞等事故发生,在操作机器人的供电主电路中安装了手动急停开关。该急停开关是为现场操作人员设置的,要求现场操作人员在操作机械手与外界环境发生碰撞时能够及时按下急停开关断电停机,避免事故发生。然而,由于碰撞发生的随机性、突发性和人自身反应的延迟,该功能在实际操作过程中实现比较困难。

本文设计的碰撞保护装置在芯片操作机器人与外界环境发生碰撞时,能够及时断电停机,实现机器人保护。其基本原理是:利用防撞板与外界环境碰撞产生的微小位移触动微动开关动作;微动开关的开关信号通过控制电路给操作机器人断电停机,同时给电磁制动器通电抱闸,防止惯性前冲,实现操作机器人保护。操作机器人在 X 轴方向运动路径较长而且周围环境比较复杂,在本系统的生产历史记录中,碰撞主要发生在 X 方向,本文所述的碰撞保护装置主要是针对机器人 X 轴方向设计的。

2.1 机械结构设计

如图2所示,碰撞保护装置的机械部分由防撞板、保护架、微动开关、微动开关基板、垫块和电磁制动器组成。其中防撞板一端与保护架联接处垫有垫块,另一端自由,不管碰撞位置在防撞板何处,防撞板与外界环境碰撞产生弹性变形,弹性变形通过自由端可以触动安装在防撞板与保护架之间的微动开关。保护架可以在碰撞保护装置失效的情况下对操作机械手的末端进行保护。微动开关控制电路实现电磁制动器的通断电。



(a)操作机器人模型 (b)局部放大图

(a)Model of handling robot (b)Local detail view

图 2 芯片操作机器人模型及局部放大图

Fig. 2 Model of handling robot for microfluidic chip and detail view

2.2 控制电路设计

如图 3 所示,虚线框内为电磁继电器,包括三组常开(闭)触点(标号 1~9,图中所示触点位置为线圈不通电时的初始位置)和一对线圈供电触点(标号 10 和 11)。触点 1,4 和 7 完成继电器线圈供电的通断和自锁;触点 2,5 和 8 完成电磁制动器供电的通断;触点 3,6 和 9 完成机器人供电的通断。该控制电路的工作过程如下:操作机器人防撞板与外部环境碰撞产生微小位移触动微动开关,微动开关闭合导通,继电器线圈通电;触点 4 和 7 闭合,继电器线圈通电自锁,此时微动开关无论闭合或断开,继电器线圈总保持通电;触点 3 和 9 断开,操作机器人供电主电路断电;触点 5 和 8 闭合,电磁制动器通电抱闸制动,机器人停止运动实现保护。通过外接开关对继电器线圈断电,即可实现触点复位初始位置。

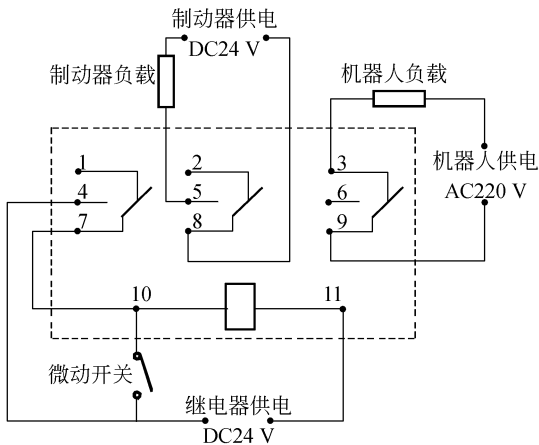


图 3 芯片操作机器人碰撞保护控制电路图

Fig. 3 Control circuit of collision protection equipment for handling robot

3 制动装置的设计

微流控芯片操作机器人的 X 轴选用的是美国 PARKER 公司的精密直线运动单元,如图 4 所示。该精密运动单元采用精密研磨滚珠丝杠传动,传动效率高达 80%,在较小的传动扭矩作用下可以传递很大的推力。其性能指标参数为:行程 1 750 mm,导程 10 mm/r,定位精度 350 μm ,双向重复精度 $\pm 5.0 \mu\text{m}$,滚珠丝杠直径 25 mm,最大速度 130 mm/s。在该精密运动单元中,滚珠丝杠一端与直流伺服电机连接,另一端被封闭于运动平台内部,无法直接加装制动器,因此在不影响运动平台内部结构的前提下,本文采用弹性联轴器将特制的高强度钢轴与传动丝杠末端联接,以便电磁制动器的安装。

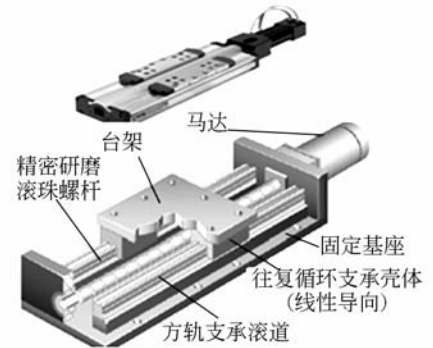


图 4 精密直线运动单元实物及内部结构图

Fig. 4 Picture of actual object and inside structure of precision beeline movement machine

3.1 制动器选择计算

电磁制动器是本文碰撞保护装置中的执行部件,它的性能直接决定着制动效果是否符合要求,因此需要对其进行必要的选择计算。在制动过程中,采用动静法分析,如图 5 所示有转矩平衡条件:

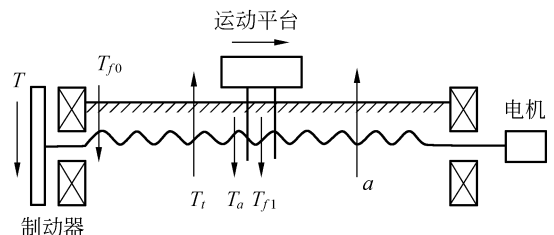


图 5 滚珠丝杠副制动分析模型图

Fig. 5 Torque analysis model of ball screw

$$T = T_i - T_f - T_a, T_f = T_{f1} + T_{f0}. \quad (1)$$

式中, T 为计算制动转矩; T_i 为载荷转矩, 此处为换算到制动轴上的系统惯性转矩; T_a 为螺母对丝杠的轴向载荷引起的扭矩; T_f 为摩擦转矩, 包括两部分, 其中 T_{f1} 为螺母对丝杠的预紧摩擦转矩, T_{f0} 为两端支撑轴承对丝杠的摩擦转矩, 由 PARKER 公司提供的技术资料查得 $T_f = T_{f1} + T_{f0} = 0.34 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。

3.1.1 计算载荷转矩 T_i

(1) 制动轴上总等效转动惯量 J_{system} 的计算^[7-8]

$$J_{\text{system}} = J_{\text{axis}} + J_{\text{coupling}} + J_L + J_M. \quad (2)$$

由电磁制动器制动的所有运动部件(包括移动和转动)都是制动器的载荷。分别对各部件计算, 并按一定规律叠加起来即可求得负载惯量 J_L 。电机的转动惯量 $J_M (\text{kg} \cdot \text{m}^2)$ 由所选电机决定。在本芯片操作机器人系统中, 初步选定的联轴器采用中间弹性体连接, 其转动惯量 $J_{\text{coupling}} = 8.5 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, 短轴尺寸初定为直径 $D = 9.5 \text{ mm}$, 长度 $l = 40 \text{ mm}$ 。计算出短轴的转动惯量为:

$$J_{\text{axis}} = \frac{1}{32} \pi \rho l D^4 = 2.5 \times 10^{-7} \text{ kg} \cdot \text{m}^2. \quad (3)$$

式中: ρ 为密度 (kg/m^3), 钢的为 $7.8 \times 10^3 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。负载惯量 $J_L (\text{kg} \cdot \text{m}^2)$, 按照动能守恒定律折算

$$J_L = \sum_i J_i \left(\frac{n_i}{n_m} \right)^2 + \sum_j m_j \left(\frac{v_j}{2\pi n_m} \right)^2, \quad (4)$$

式中, J_i, n_i 分别为各旋转件的转动惯量 ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$) 和转速 (rad/s); m_j, v_j 分别为直线运动件的质量 (kg) 和运动速度 (m/s); n_m 为电机的转速 (rad/s)。

$$J_L = J_{\text{LS}} + J_{\text{platform}}, \quad (5)$$

由 PARKER 公司提供的技术资料查得: $J_{\text{LS}} = 73.28 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, X 轴定位台上设备总重量 $M = 15.7 \text{ kg}$ 。

$$J_{\text{platform}} = M \left(\frac{v}{2\pi n} \right)^2, \quad (6)$$

$J_{\text{platform}} = 15.7 \times \left(\frac{0.13}{2\pi \times 13} \right)^2 = 4 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, 则负载惯量: $J_L = J_{\text{LS}} + J_{\text{platform}} = 77.28 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 。由技术资料查得, 驱动滚动丝杠的电机转动惯量 $J_M = 1.3 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 。综上, 系统转动惯量: $J_{\text{system}} = 17.53 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 。

(2) 载荷转矩 T_i 的计算^[9]

从芯片操作机器人安全可靠方面考虑, 初

步要求整个制动过程制动距离最大不超过 2 mm , 制动时间 $t_{\text{max}} = \frac{2s}{v} = \frac{2 \times 2}{130} = 0.03 \text{ s}$ 。

$$T_i = \frac{4gJ_{\text{system}}(n_1 - n_0)}{375t}, \quad (7)$$

式中, t 表示制动轴的转速从 n_1 降至 n_0 所需要的时间; J_{system} 表示制动轴上的总等效转动惯量; n_1, n_0 表示转速, 单位 r/min ,

$$T_i = \frac{4 \times 9.8 \times 17.53 \times 10^{-4} \times 13 \times 60}{375 \times 0.03} = 4.76 \text{ N} \cdot \text{m}.$$

3.1.2 计算扭矩 T_a

制动过程中, 制动器与定位台之间的丝杠会受到扭矩作用而产生扭转变形。运动平台对滚珠丝杠产生的轴向冲击载荷, 由动量定理可知:

$$F = \frac{M \cdot v}{t}, \quad (8)$$

$$F = \frac{15.7 \times 0.13}{0.03} = 68 \text{ N}.$$

克服定位台轴向载荷需要的扭矩:

$$T_a = \frac{F \cdot P_h}{2\pi\eta}, \quad (9)$$

$$T_a = \frac{68 \times 10}{2\pi \times 0.8} = 135 \text{ N} \cdot \text{mm}.$$

综上, 计算制动转矩 $T = 4.285 \text{ N} \cdot \text{m}$, 选用标准制动器应以计算制动转矩为依据, 参照标准制动器的制动转矩, 选取电磁制动器的制动转矩。本文选用的电磁制动器额定电压 $\text{DC}24 \text{ V}$, 最高转速 $3000 \text{ r}/\text{min}$, 额定转矩 $5 \text{ N} \cdot \text{m}$, 额定功率 8.6 W 。

3.2 制动器对丝杠性能影响计算

3.2.1 滚珠丝杠抗扭强度校核

选定该型号电磁制动器, 如果操作机器人发生碰撞, 在电磁制动器制动过程中, X 轴精密运动平台的滚珠丝杠受到惯性转矩的作用, 在危险截面处引起的最大切应力:

$$\tau_{k\text{max}} = \frac{T_i}{W_t}, \quad (10)$$

$$\tau_{k\text{max}} = \frac{T_e + T_f}{0.2d^3} = \frac{5000 + 340}{0.2 \times 10^3} = 26.7 \text{ MPa}.$$

滚珠丝杠副的常用材料为轴承钢、工具钢、表面硬化钢、高强度钢等, 许用剪切力 $[\tau_T] = 35 \sim 55 \text{ MPa}$, 因此 $\tau_{k\text{max}} < [\tau_T]$, 满足要求。

3.2.2 滚珠丝杠扭转变形计算

对于细长丝杠, 扭转刚度是不可忽视的因素, 因为扭矩引起的扭转变形会使轴向移动量产生滞

后,所以需要计算扭转变形量。

$$K_T = \frac{T}{\theta} = \frac{GI_p}{x}, I_p = \frac{\pi d^4}{32}, \quad (11)$$

式中,丝杠采用“固定-固定”安装方式时, $x=L/2$, L 为丝杠支撑安装距离^[4]。 K_T 为丝杠扭转刚度(N·mm/rad); θ 为扭转角(rad); T 为扭矩(N·mm); I_p 为截面惯性矩; G 为抗剪弹性模量,对钢材有 $G=8.24 \times 10^4$ MPa; d 为滚珠丝杠直径(mm); δ 为轴向变形量。

$$\theta_{\max} = \frac{T_{\max} \cdot x}{GI_p} = \frac{16 \times T_i \cdot L}{\pi G d^4}, \quad (12)$$

$$\theta_{\max} = \frac{16 \times 5\,340 \times 1\,750}{3.14 \times 8.24 \times 10^4 \times 25^4} = 0.001\,48 \text{ rad};$$

$$\delta_{\max} = \theta_{\max} \cdot \frac{P_h}{2\pi}, \quad (13)$$

$$\delta_{\max} = \frac{0.00148 \times 10 \times 10^3}{2\pi} = 2.35 \mu\text{m}.$$

4 结果及讨论

在电磁制动器有抱闸制动和不制动两种条件下,为了模拟操作机器人在实际工作过程中发生碰撞并测量惯性前冲位移量的大小,设计了对比试验,将机器人在 X 轴方向上的上下料装置、热压机、对准台、键合机 4 个工位设定为标记点位置,通过对操作机器人示教可以得到 4 个工位的绝对坐标值(远离电机方向为正方向),即:位置 1(-45 mm)、位置 2(-473 mm)、位置 3(-867 mm)和位置 4(-1 329 mm),如图 6 所示。各相邻位置之间的区间作为测量断电后机器人惯性前冲位移量的测量区间,即:测量区间 A[-45, -473]、测量区间 B[-473, -867]、测量区间 C[-867, -1 329]。

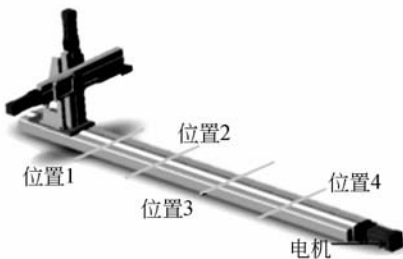


图 6 芯片操作机器人 X 轴标记点位置示意图

Fig. 6 Diagram of mark points in X axis of handling robot for microfluidic chip

操作机器人在任意测量区间的运动速度变化可以描述为:在初始位置起加速至目标速度,保持目标速度匀速运动,在到达目标位置前减速至停止定位于目标位置。在本实验中,机器人目标速度分别为 80 mm/s(实验参考速度)、110 mm/s(机器人工作速度)、130 mm/s(机器人最大允许速度)。为了试验结果的可靠性,本文在各测量区间的保持目标速度匀速运动阶段内进行碰撞试验。完成碰撞保护装置安装的微流控芯片操作机器人实物如图 7 所示。电磁制动器安装在 X 轴精密运动平台的末端,用于判断碰撞发生信号的装置安装在机械手的两侧位置。

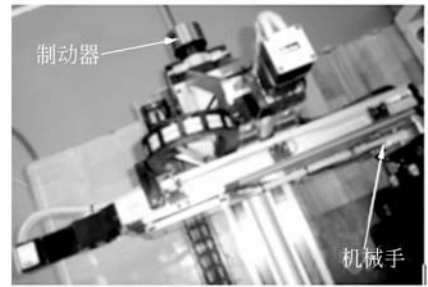


图 7 芯片操作机器人实物照片

Fig. 7 Picture of handling robot for microfluidic chip

试验过程可描述为:操作机器人复位完毕后,沿 X 轴运动到位置 1,然后按指令运动到位置 2,检测到碰撞发生,此时机器人断电抱闸制动停机。

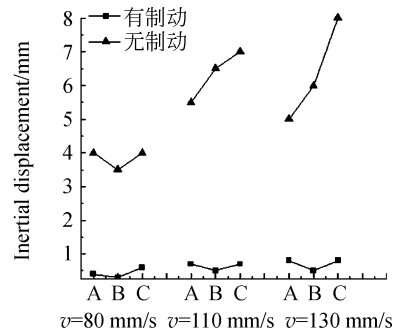


图 8 有制动和无制动情况下惯性位移量对比

Fig. 8 Comparison of inertial displacement with and without brakes

通过光栅尺反馈可以实时显示断电时机器人在 X 轴的绝对坐标值,将其与位置 1 的坐标值相减可得出断电时两位置之间的距离;利用精密

钢尺测出位置 1 和断电后机器人实际所停位置之间的距离,则两个距离的差值即为测量区间 A 内的惯性前冲位移量。利用类似方法测出操作机器人在测量区间 B、C 内的惯性前冲位移量,测量数据如表 1 所示。

表 1 芯片操作机器人碰撞试验数据

Tab. 1 Collision experiment data of handling robot for microfluidic chip

机器人速度(mm/s)		$v=80$		$v=110$		$v=130$	
是否抱闸制动		是	否	是	否	是	否
惯性位移量 (mm)	测量区间 A	0.4	4	0.7	5.5	0.8	5
	测量区间 B	0.3	3.5	0.5	6.5	0.5	6
	测量区间 C	0.6	4	0.7	7	0.8	8
X 轴标记点位置坐标 (mm)	位置 1	-45	-45	-45	-45	-45	-45
	位置 2	-473	-473	-473	-473	-473	-473
	位置 3	-867	-867	-867	-867	-867	-867
	位置 4	-1329	-1329	-1329	-1329	-1329	-1329

在制动和不制动两种情况下,机器人惯性前冲位移量对比曲线如图 8 所示,可以看出:在无电磁制动的情况下,操作机器人的惯性前冲位移量较大,而且随着机器人速度的增加而增大,在 $v=130$ mm/s 时,在测量区间 B 内高达 8 mm;在有电磁制动的情况下,操作机器人的惯性前冲位移较小,操作机器人惯性前冲位移量不超过 1 mm,符合设计目标。根据表 1 所示实验数据,X 轴 4 个标记点的绝对位置坐标值经过多次碰撞实验后没有变化,与碰撞实验前操作机器人示教位置重合,说明机器人在抱闸制动过程中由于丝杠扭转变形引起的惯性变形量很小,该碰撞保护装置对操作机器人定位精度的影响可以忽略。

理想情况下,对于同一精密运动平台的测量区间 A、B 和 C 内,同一速度条件下,机器人碰撞断电后的前冲惯性位移量应该是相等的,然而从图 8 和表 1 可以看出是不相等的。经过重复实验

和分析得知,该问题是由于精密钢尺的测量误差和机器人 X 轴精密运动平台自身运动性能两方面的原因导致产生的。

(1)有抱闸制动时,从图 8 和表 1 可以看出,在 3 种速度条件下,各测量区间 A、B 和 C 内的前冲惯性位移量很小,均 <1 mm,因此可以忽略机器人自身运动性能的影响;各测量区间之间的前冲惯性位移量最大差值分别是 0.3 mm,0.2 mm,0.3 mm,而钢尺的最小示值为 0.5 mm,在误差允许范围内,因此前冲惯性位移量的差别主要是由钢尺的测量误差引起的。

(2)无抱闸制动时,从图 8 和表 1 可以看出,在 3 种速度条件下,各测量区间 A、B 和 C 内的前冲惯性位移量比较大,各测量区间之间的前冲惯性位移量最大差值分别是 0.5 mm,1.5 mm,3 mm,反映了断电后机器人在没有计算机控制的情况下,X 轴精密运动平台自身运动性能的不稳定,这种问题在以往的机器人使用历史记录中也是出现过的。

5 结 论

本文从机器人的安全可靠角度出发,针对芯片操作机器人在塑料微流控芯片自动化制造系统中存在的碰撞问题,在保证机器人控制策略不改变的前提下,设计了一套操作机器人碰撞保护装置,并计算分析了该保护装置对精密运动平台定位精度的影响。实际应用表明,在芯片操作机器人与外界环境碰撞时,该保护装置断电抱闸动作迅速有效,可控制惯性前冲位移在 1 mm 以内,实现机器人保护。此芯片操作机器人碰撞保护装置提高了微流控芯片自动化制造系统的安全可靠性和智能化水平,有助于实现微流控芯片生产的批量化、产业化。

参考文献:

- [1] 方肇伦. 微流控分析芯片[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
FANG ZH L. *Microfluidic Chip* [M]. Beijing: Science Press, 2003. (in Chinese)
- [2] 罗怡, 王晓东, 杨帆, 等. 变温蠕变实验的 COP 微

流控芯片热压制备[J]. 光学精密工程, 2007, 15(7): 1090-1095.

LUO Y, WANG X D, YANG F, *et al.*. Variable temperature quasi-creep experiment for fabrication of microfluidic chip using Cyclo2olef in Polymer (COP) [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(7): 1090-1095. (in Chinese)

- [3] 王晓东, 刘冲, 王立鼎. 面向聚合物微结构制作的热压成形设备的研制[J]. 中国机械工程, 2005, 16(14):1229-1232.
WANG X D, LIU CH, WANG L D. Development of hot-embossing machines for fabrication of polymer microstructures [J]. *China Mechanical Engineering*, 2005, 16(14):1229-1232. (in Chinese)
- [4] LI J M, LIU C, QIAO H C, *et al.*. Hot embossing/bonding of apoly (ethylene terephthalate) (PET) microfluidic chip [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*; 2008(18):1-10.
- [5] 陈伟, 钟健. 面向工业机器人系统的三种可靠度配置策略的研究[J]. 光学 精密工程, 2002, 10(2): 165-170.
CHEN W, ZHONG J. Research on three reliability distribution methods of an industrial robot system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002, 10(2):165-170. (in Chinese)
- [6] 陈伟, 钟健. 基于精度成本控制的精密传输机器人系统可靠度优化配置方法[J]. 光学 精密工程, 2007, 15(8):1254-1256.
CHEN W, ZHONG J. Optimum reliability distribution of precise conveying robot system based on precision and cost controls [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(8):1254-1256. (in Chinese)
- [7] 戴曙. 第二讲 数控机床进给系统设计(之二)[J]. 制造技术与机床, 1994(11):49-52.
DAI SH. Lecture 2 Feed system design of CNC (section 2)[J]. *Manufacturing Technology & Machine Tool*, 1994, 11:49-52. (in Chinese)
- [8] 戴曙. 第二讲 数控机床进给系统设计(之三)[J]. 制造技术与机床, 1994(12):46-50.
DAI SH. Lecture 2 Feed system design of CNC (section 3)[J]. *Manufacturing Technology & Machine Tool*, 1994(12):46-50. (in Chinese)
- [9] 成大先. 机械设计手册(轴及其联接)[M]. 北京: 化学工业出版社.
CHENG D X. *Mechanical Design Handbook (Axis and Connection)* [M]. Beijing: Chemical Industry Press. (in Chinese)

作者简介:



刘冲(1963—),男,湖北武汉人,工学博士,教授,博士生导师,主要从事微机电工程、精密仪器及机械研究。E-mail: chongl@dlut.edu.cn.



刘军山(1975—),男,辽宁大连人,工学博士,副研究员,主要从事微机电系统和微流控芯片制作技术研究。E-mail: liujsh@dlut.edu.cn.



梁勇(1982—),男,山东单县人,硕士研究生,主要从事微流控芯片热压键合设备自动化技术和工艺研究。E-mail: liangyong1115@yahoo.com.cn.



王晓东(1967—),男,黑龙江哈尔滨人,工学博士,教授,博士生导师,主要从事微机电、微组装技术研究。E-mail: xdwang@dlut.edu.cn.



李经民(1979—),男,辽宁抚顺人,博士研究生,主要从事微流控技术研究。E-mail: jingminl@163.com