·实验技术·

超声刀耐久性试验平台的研制

何倩鸿，刘逸伦，王科盛，罗　建

（电子科技大学 机械与电气工程学院，成都 611731）

摘要：为满足国产超声手术刀耐久性能试验的需求，设计制作了一种超声刀耐久性能试验平台。该平台使用步进电机带动滚珠丝杠构成的龙门结构实现超声刀的三轴平移；使用改进的力矩闭环电动推杆实现超声刀手柄的可控扭矩推动；自主设计可同时夹持 6 部超声刀头的夹具，使用微型电动推杆控制超声刀的激发。根据超声刀耐久性能试验的需求对平台各模块进行了设计验证，证明平台可实现 0~1.5 ms 的速度调节、0~5 000 ms 的按压时间调节以及 0~100 N 的按压力度调节，能同时稳定开展 6 把刀 10 万次以上的耐久性能试验，可用于超声手术刀耐久性能的试验评价。

关　键　词：超声刀；试验平台；耐久试验；设计验证

中图分类号：TB126　　**文献标志码：**A　　DOI: 10.12179/1672-4550.20240152

Development of a Durability Test Platform for Ultrasonic Scalpels

HE Qianhong, LIU Yilun, WANG Kesheng, LUO Jian

（School of Mechanical Science and Electrical Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China）

Abstract: In order to meet the requirement for durability test of domestically produced ultrasonic surgical scalpels, a durability test platform for ultrasonic scalpels is designed and manufactured. The platform uses a stepping motor to drive the gantry structure composed of a ball screw to achieve the three-axis translation of the ultrasonic scalpel. An improved torque-closed-loop electric actuator is employed to achieve controllable torque actuation of the ultrasonic scalpel handle. A self-designed fixture capable of simultaneously holding six ultrasonic scalpel heads is developed, and a micro electric actuator is used to control the activation of the ultrasonic scalpel. According to the requirement for durability test of ultrasonic scalpels, each module of the platform is designed and verified. The results prove that the platform can achieve a speed adjustment of 0~1.5 ms, a pressing time adjustment of 0~5 000 ms, and a pressing force adjustment of 0~100 N. It can stably carry out more than 100 000 durability tests for six scalpels simultaneously, and can be used for the experimental evaluation of the durability performance of ultrasonic surgical scalpels.

Key words: ultrasonic scalpel; test platform; durability test; design verification

超声刀一般指用于软组织切割、止血、整形的超声手术设备，相较传统手术刀具有精确、快速、出血少、术后恢复快等特点，在临床外科手术中有广泛运用[1]。超声刀在临床应用时工作频率较高，如 55.5 kHz 的超声刀，工作 1 h 振动 1.99×108 次，不可避免的会出现材料疲劳损伤，超声刀头的手术效能也会随之出现退化，甚至出现刀头断裂等医疗事故[2–3]。因此需要使用超声刀耐久性能评价方法，用于验证超声刀在真实工况下的耐久性能。

文献 [4] 使用信号发生器、功放以及激光测振仪、热成像设备搭建了一台针对超声换能器的测试设备，并验证了在 20 kHz 和 10.6 MHz 共振频率驱动下产生的纵向位移。文献 [5] 针对 55 kHz 的超声刀研制了超声疲劳试验装置，通过手摇丝杠滑台实现对载荷的预置，使用激光测微仪和力传感器测量试验数据。目前已有的设备均为直接对超声刀施加应力的超声刀疲劳寿命相关的测试设备，或对超声刀主机或换能器进行测试和测量的设备，没有可以针对超声刀整机的耐久性能进行测试，且能模拟实际临床手术切割状态的测试设备。

超声刀耐久性能测试试验中，一般会进行超

收稿日期：2024−03−25

作者简介：何倩鸿，硕士，高级实验师，主要从事机器人技术与智能装备可靠性及其优化方向的研究。E-mail: robin_hqh@uestc.edu.cn

过 1 万次的超声刀切割动作[6–7]。使用人工进行切割，不仅耗费人力和时间，而且人手切割所造成的不确定因素较多。因此需要一台能使超声刀完成“下刀—夹持—激发—抬刀”标准切割流程的自动化切割设备，快速准确地完成数万次的超声刀模拟切割，辅助进行超声刀的耐久性能评价。

本文研制了一个超声刀耐久性能试验平台，可以模拟临床手术的切割过程，单次同时稳定开展 6 把刀 10 万次以上的耐久性能试验。平台可以实现毫米级的运动精度，具有基于物理按压方式的按钮寿命测试能力，基于改制力矩控制推杆的手柄握持力测试能力，以及能够可靠完成耐久性能测试试验的能力。

1　试验平台设计

1.1　平台的功能和构成

根据耐久性能测试试验的流程[8–9]，需使用规定生物组织进行 500~1 000 次模拟切割与指标测试，该过程一般循环测试 5~20 次，根据所记录数据的变化趋势评判超声刀的耐久性能。

为模拟手术场景，超声刀耐久性试验平台具有带动超声刀在整个试验盘面积范围内移动、稳定夹持超声刀、以及沿待切物体平面 30°~40°进行切割的能力；具有推杆机构可以自动按压手柄和激发按钮，且按动时间和力度确定；具有人机交互功能，切割范围及激发时间等参数可调，方便测试人员操作；具有同时测试多把超声刀的能力从而加快实验进度。

超声刀试验平台结构与实物组成如图 1 和图 2 所示。平台的龙门滑台模组由 4 组滚珠丝杠模组和滑块模组搭建，滚珠丝杠采用台湾 TBIMOTION 公司的 C7 级滚珠丝杠，导轨滑块采用台湾 HIWIN 公司的滑块模组，理论上可实现精度 0.05 mm 的空间三轴平移运动；使用深圳汇达机电公司的 57 步进电机为丝杠提供动力，自制的驱动板集成在电机上，减小了外部板卡的体积；驱动板采用控制器局域网总线（controller area network，CAN）协议对外通信，延迟低，提高了通信稳定性[10]；电源模块使用台湾明纬公司的 AC/DC120 W 开关电源，为整个平台提供 24 V 电压；控制部分包括主控板与显示屏，主控板用于规划整体运动逻辑，控制各电机运动；显示屏选用武汉中显科技公司的 LCD 电容触摸屏，用于与操作人员进行交互，供操作人员设置相关参数以及获取信息。

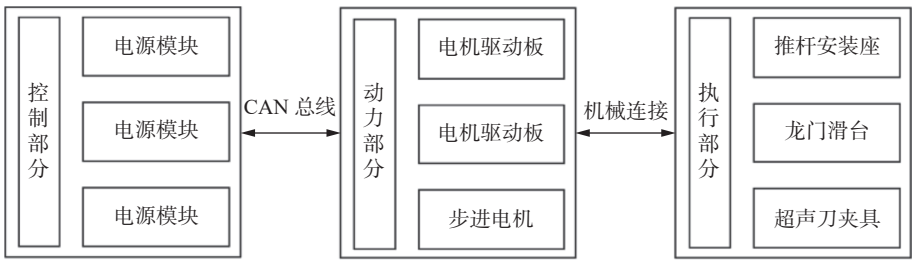


图 1　超声刀试验平台结构框架图

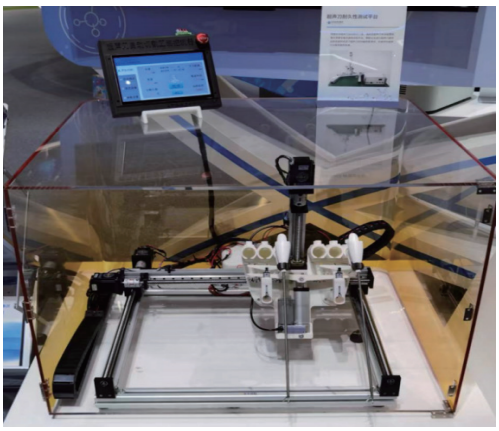


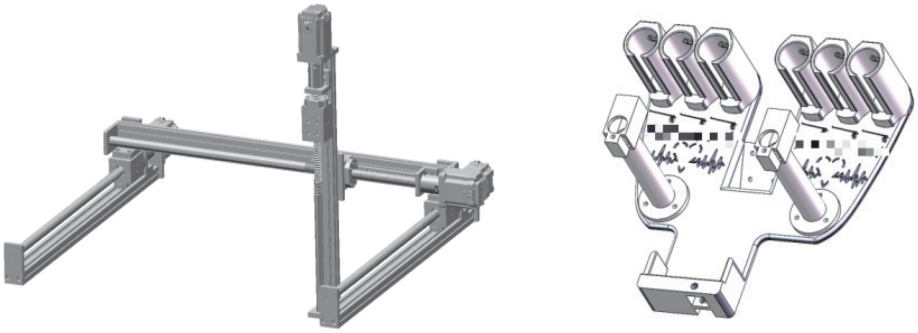
图 2　超声刀试验平台实物图

1.2　平台的机械结构设计

平台的机械结构主要包括龙门滑台模组和超声刀夹具其模型，如图 3 所示。龙门滑台模组由 4 个丝杠滑台模块组合为双 y 轴，单 x、z 轴的龙门结构组成，丝杠滑台模块由 57 步进电机和滚珠丝杠、滑块与滑台构成，电机带动丝杠转动以实现平台 3 轴的移动。龙门结构的双 y 轴相比于其他滑台结构更能保证平台运动的稳定性[11]。

超声刀夹具主要用于稳定夹持超声刀，夹具使用模拟人手握持手柄的方式，设有 6 个并排的圆柱桶，便于适应市面上手柄不同大小的超

声刀。采用快拆式设计，拧动背部旋钮即可快速实现超声刀的夹持与拆卸，无需使用螺丝刀等工具，同时设有推杆电机的安装孔位及走线槽，保证可正常激发按钮和手柄。为了提升测试效率，平台最多支持同时夹持 6 把超声刀进行测试。



(a) 龙门滑台模组三维模型　　(b) 超声刀夹具三维模型

图 3　龙门滑台模组和超声刀夹具模型图

1.3　平台的硬件设计

平台采用自制的步进电机驱动板，驱动板使用 STM32F103 作为主控芯片，基于 MCP2562 实现 CAN 总线通信功能，采用 8 个 MOS 管驱动步进电机。使用 EG3112 作为 MOS 管驱动芯片，设计两相四线步进电机的双全桥驱动电路，电路支持最大 5 A 通过电流，数字部分与功率部分使用光耦进行隔离，防止电机工作时对驱动板产生干扰。编写电机位置及速度控制算法，便于通过总线发送指令快速进行控制，编写 S 曲线加减速算法，减少了平台启停时产生的振动[12]。

4 个电机驱动板使用 CAN 通信与主控板进行连接，使用 1 Mb/s 通信速率，可保证 y 轴两电机接收指令的时间差小于 100 μs，保证两轴的同步低延迟，在保持通信稳定性的同时保证了通信速度以及减少了布线数。

主控板采 STM32F405 作为主控芯片，预留 USB 接口和 SD 卡接口，构建 FATFS 文件系统，可以将试验中记录的力矩、切割次数、运行轨迹等数据记录在 SD 卡或通过虚拟串口功能发送至上位机，便于试验后的数据分析工作。

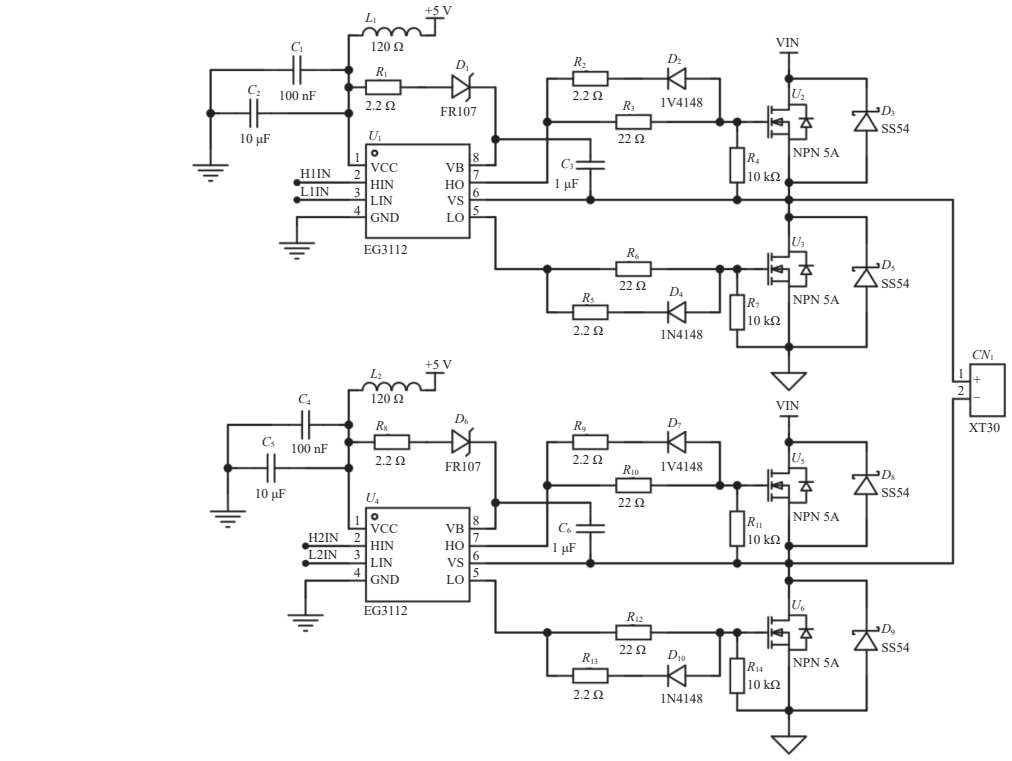
推杆的电流采样电路使用 INA240 芯片，通过采样电阻对推杆电流进行采样，使用比例、积分、微分(proportion, integral, differential coefficient，PID)算法对电机电流进行控制，以实现保持电机转矩的效果。部分电路原理图如图 4 所示。

1.4　平台软件及人机交互设计

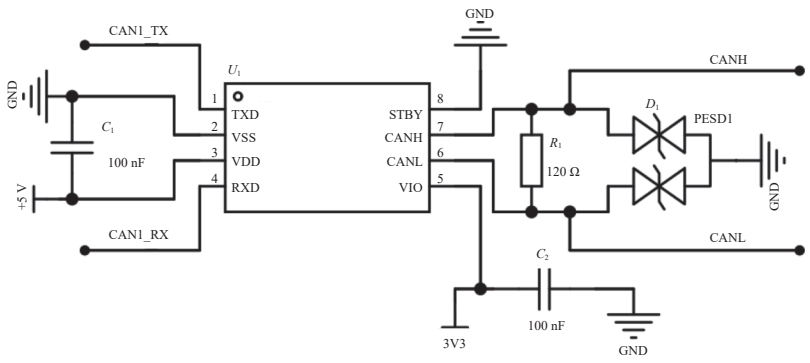
平台可以根据输入自动计算切割范围，输入的参数主要有长度、宽度、切割次数、激发时间、下刀距离。平台根据待切组织的面积和需要的切割次数计算出每个切割点的平均间隔，根据平均间隔确定每个下刀点的位置以及是否需要多次循环切割，由于待切组织的厚度一般不同，因此需要输入下刀距离对平台每次切割的下降高度进行微调，以此完成“下刀—夹持—激发—抬刀”的标准切割流程。

使用 ARM 内核的 STM32F405 芯片进行运动的轨迹规划，使用 FREERTOS 操作系统实现状态机、显示屏数据轮询、FATFS 写入等多任务的执行与切换。系统运行后首先创建显示屏轮询和 FATFS 写入任务，显示屏轮询任务循环检测串口 DMA 存储的数据，并通过修改全局变量或释放信号量的方式与其他任务同步。当轮询检测到屏幕上的开始按钮按下时，系统会进入切割任务初始化函数，主要将用户输入的参数进行计算，得到需要的步进和切割距离，并创建 3 个任务表示运行的 3 种状态。切割运动的轨迹使用状态机编写，包括 x 轴步进状态，y、z 轴步进状态以及切割状态，在每个状态通过 CAN 总线发送不同的电机控制指令实现沿设定的轨迹在区域内进行切割。平台运动的算法流程图如图 5 所示。

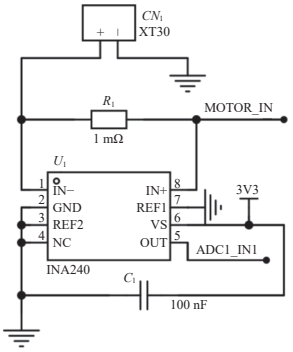
显示屏使用串口 LCD 电容触控屏幕模块，该屏幕模块集成降压电路、ROM 和用于驱动 LCD 的 MCU，使用 UART 进行通信，大大减少了复杂的 UI 和 LCD 驱动的开发流程。



(a) 步进电机驱动单全桥电路



(b) TTL 转 CAN 总线电路



(c) 电流采样电路

图 4　部分电路原理图

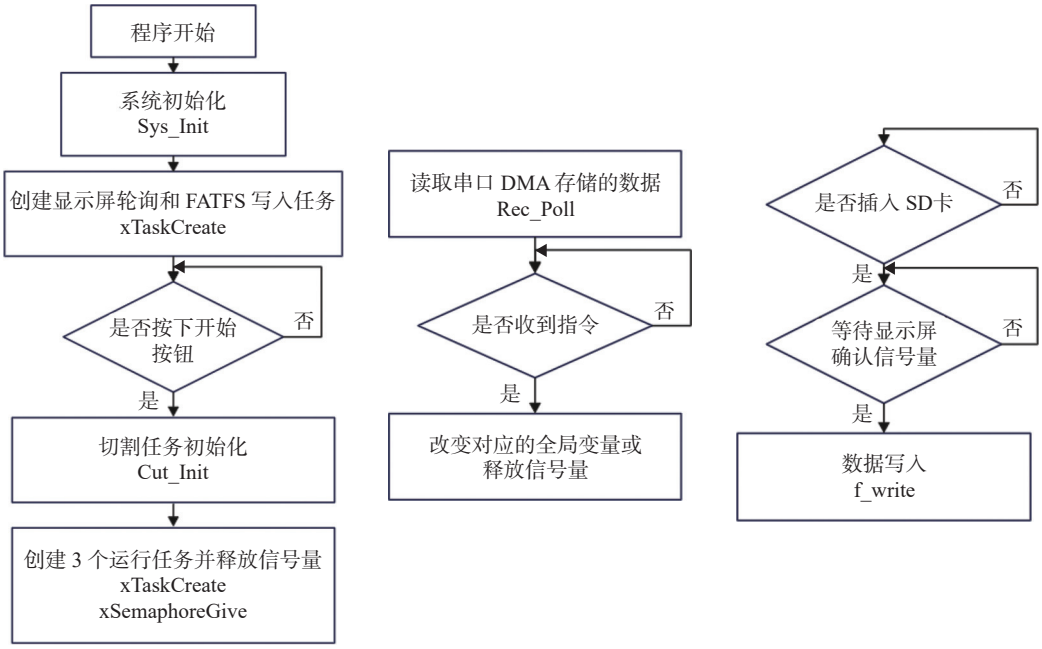
2　平台性能设计验证

2.1　精度和稳定性测试

超声刀耐久试验中，首要保证切割过程刀头运动的稳定[13–14]。要求平台带动超声刀的位置精度达到 1 mm，刀头在切割时的抖动偏移在 5 mm 以内。在平台运行速度 0.3 m/s，电机不进行加减速运动，刀头连接换能器进行切割的状态下，使用激光测距传感器分别开展 6 个放刀位置的 x、y、z 3 个方向的位移测试。

位移偏差测量过程如图 6 所示。测量使用深圳 MyAntenna 公司的 L1-40 激光测距传感器，采样频率为 10 Hz。将传感器分别架设在刀杆右侧水平与上侧竖直位置，激光点打在距刀头 5 cm 的刀杆处，操作平台单向运动 10 mm。测得位移曲线如图 7 所示。

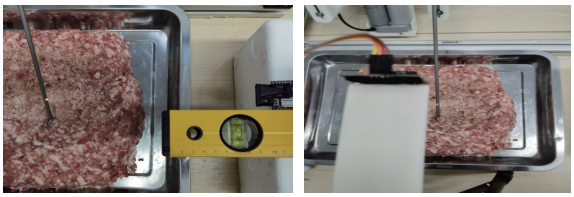
图 7(a)展示了 x 轴运动 10 mm 的刀杆位移曲线，在刀杆移动到位之后出现了 2~3 次晃动，后趋于平稳，晃动幅度在 3 mm 以内；图 7(b)展示了 x 轴在不启停的情况下运动 1 s 的刀杆位移曲线，为较为稳定的匀速运动。结果表明平台运动精度可达 1 mm，运行时的最大抖动偏移为 3 mm，达到试验中对于精度和稳定性的要求。



(a) 系统初始化流程　(b) 显示屏轮询任务　(c) FATFS 写入任务

(d) 切割任务　(e) 显示屏轮询任务　(f) 切割任务

图 5　平台运动算法流程图



(a) 横向位移测量　(b) 竖向位移测量

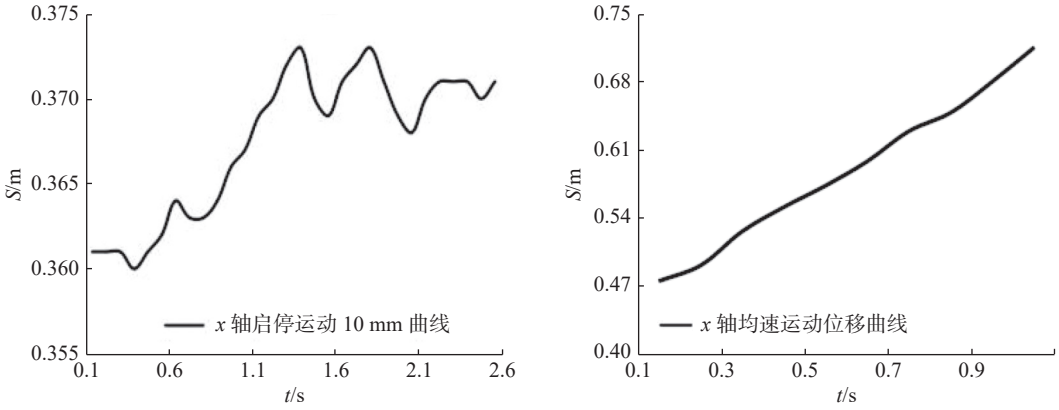
图 6　位移偏差测量过程图

2.2　按压力度测试

由于超声刀手柄的握持力与刀头的夹持力直接相关，超声刀手柄的握持力也会影响超声刀的切割速度[15]。耐久性能测试中通常需要保证超声刀手柄的握持力在一定范围内，或需要收集握持力数据。使用力传感器对推杆推理进行采集，测试过程如图 8 所示。

将压力传感器安装在力控推杆运动范围内，操作推杆输出 46.5 N 推力推动力传感器，测得在单次推动的情况下输出的电流和力传感器实际受力值如图 9 所示。

力传感器采用中皖金诺的 JLBS-M2 传感器，量程 0~10 kg，采样频率为 50 Hz。展示变化前后各 1 s 的数据，在图中时间为 1 s 左右时推杆开始挤压力传感器。如图 9(a)所示，推杆在未接触力传感器之前电流有一定的波动，在接触力传感器后电流几乎不变；如图 9(b)所示，力传感器在与推杆接触后，输出数据达到 46.5 N 左右轻微跳动。结果表明推杆的电流可控，推力控制误差在 0.5 N 以内，达到该次试验中对于推力控制的要求。



(a) x 轴启停运动位移 10 mm 曲线　　(b) x 轴匀速运动位移曲线

图 7　测得 x 轴位移曲线图

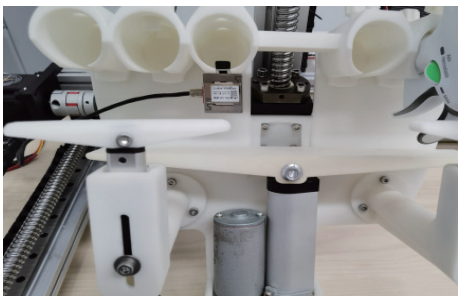
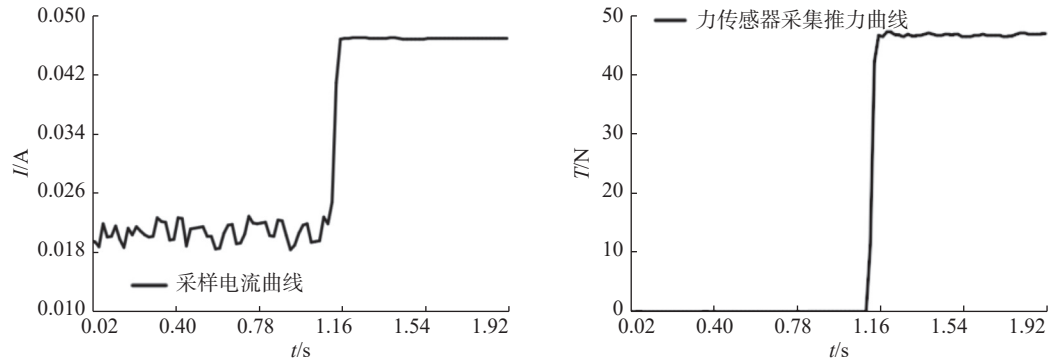


图 8　使用力传感器测量推杆推力实物图

2.3　平台耐久性测试

进行了 HARMONIC HD 1000i 超声手术刀的 10 万次切割试验。试验切割过程如图 10 所示。试验选择了 10 台超声手术刀样机，在试验平台上均完成 1 万次 MAX 档位的自动切割，设置平台运行速度 0.3 m/s，激发时间为 5 s，单次下刀抬刀高度为 25 mm，自动切割过程中分阶段进行数据采集，单次切割耗时 12 s，试验共耗时 70 h 左右。试验完毕后，平台所有功能正常，精度和刀杆偏移均没有明显下降。结果表明平台的可靠性较高，可以达到一般耐久试验要求的试验次数。



(a) 单次推动采样电流曲线　　(b) 单次推动采集推力曲线

图 9　测得单次推动的推力和电流曲线图

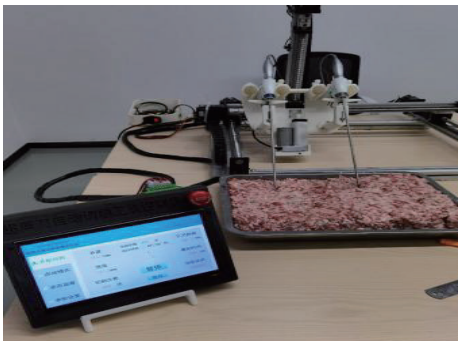


图 10　超声刀耐久试验平台切割过程图

3　结束语

本文研制了一种超声刀耐久性能试验平台，具有实现单次 6 把刀 10 万次切割测试的能力。该平台能实现激发按钮物理测试、手柄握持力测试等功能，并通过激光传感器位移测试、按压力度测试、耐久性测试验证了平台的功能及可靠性。结果表明，平台 3 轴运动位移误差均在 1 mm 以

（下转第 39 页）