

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2020.05.020

微型晶体谐振器预封定位装置动作时序优化研究*

胡小华¹, 喻信东², 单小荣², 胡 剑¹, 李刚炎^{1*}

(1. 武汉理工大学 机电工程学院, 湖北 武汉 430070; 2. 泰晶科技股份有限公司, 湖北 随州 441300)

摘要:针对微型晶体谐振器预封定位装置结构复杂、动作时序难以规划的问题,对微型晶体谐振器预封定位装置的动作时序,及其有限状态机模型仿真优化进行了研究。基于预封定位装置的结构,结合工艺流程要求,分析了预封定位装置各执行元件的动作、动作顺序与位置,提出了预封定位装置的性能指标;以预封定位装置传感器的状态参数和执行元件的位置为依据,设计了其动作时序;基于有限状态机理论,利用 Simulink/Stateflow 建立了预封定位装置的动作时序模型;依据模型仿真结果,对预封定位装置动作时序进行了优化,确定了最终动作时序;利用样机试验对预封定位装置动作时序进行了验证。研究表明:优化后的动作时序满足预封定位装置性能指标要求。

关键词:微型晶体谐振器;预封定位装置;动作时序;有限状态机

中图分类号:TH-39;TP23

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2020)05-0572-06

Optimization of action sequence for micro-crystal resonator pre-sealed positioning device

HU Xiao-hua¹, YU Xin-dong², SHAN Xiao-rong², HU Jian¹, LI Gang-yan¹

(1. College of Mechanical and Electric Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;
2. TKD Science and Technology Co., Ltd., Suizhou 441300, China)

Abstract: Aiming at the problems of complex structure and difficult to plan the action sequence of the micro-crystal resonator pre-sealed positioning device, the simulation optimization of the action sequence of the micro-crystal resonator pre-sealed positioning device and its finite state machine model was studied. Based on the structure of the pre-sealed positioning device and the requirements of the process flow, the sequence of movement and position of each actuator of the pre-sealed positioning device were analyzed, and the performance index of the pre-sealed positioning device was put forward. Based on the state parameters of the sensor and the position of the actuator of the pre-sealed positioning device, the action sequence was designed. Based on the theory of finite state machine, the action sequence model of pre-sealed positioning device was established by using Simulink/Stateflow. According to the simulation results of the model, the action sequence of the pre-sealed positioning device is optimized to determine the final action sequence, and the action sequence of the pre-sealed positioning device was verified by the prototype test. The results show that the optimized action sequence meets the performance requirements of the pre-sealed positioning device.

Key words: micro-crystal resonator; pre-sealed positioning device; action sequence; finite state machine model

0 引 言

微型晶体谐振器在电子产品中的主要作用是提供

频率信号^[1]。随着科技的发展,市场对高频率、高精度的微型晶体谐振器的需求逐步提升^[2-3]。微型晶体谐振器的生产工艺较为复杂,封装是其最后一道工序,

收稿日期:2019-08-20

基金项目:湖北省高新技术产业发展专项(1440)

作者简介:胡小华(1994-),男,湖北荆州人,硕士研究生,主要从事机电一体化方面的研究。E-mail:1239465398@qq.com

通信联系人:李刚炎,男,教授,博士生导师。E-mail:2778554971@qq.com

封装质量直接决定了微型晶体谐振器的频率稳定性。国外对于微型晶体谐振器封装技术与装备的研究较早,日本 AVIO 公司研制的微型晶体谐振器封装设备具有良品率高、报警率低等特点,但价格昂贵。因此,开发具有独立知识产权的微型晶体谐振器封装设备有着重要意义。

预封定位装置是微型晶体谐振器封装设备的重要组成部分,用于谐振器封装前定位并预封封盖和封装底座。预封定位装置应满足稳定性、可靠性和高速性等性能要求。为此,需综合考虑各执行机构的运动时长和动作衔接,优化预封定位装置动作时序。

针对微型晶体谐振器预封定位装置结构复杂、动作时序难以规划的问题,笔者对微型晶体谐振器预封定位装置的动作时序进行研究。

1 预封定位装置性能要求

预封定位装置有两种工作模式:视觉检测模式和自动运行模式。载料盘上的封装底座共 25 行、30 列,预封定位装置加工前 20 列,余下 10 列由下一工位加工。预封定位装置结构示意图如图 1 所示。

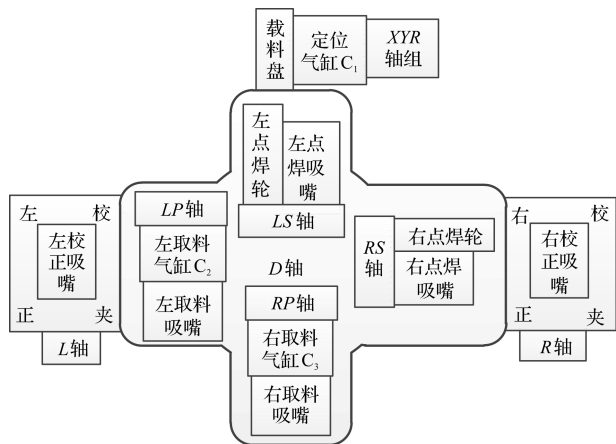


图 1 预封定位装置结构示意图

由图 1 可知:(1)左取料机械臂由 LP 轴、左取料气缸 C₂、左取料吸嘴组成,LP 轴可使左取料吸嘴到达各工作位;左取料气缸可使左取料吸嘴偏转,便于吸嘴与封盖吸合;右取料机械臂由 RP 轴、右取料气缸 C₃ 和右取料吸嘴组成,其结构功能与左取料机械臂一致。(2)左点焊机械臂由 LS 轴、左点焊轮和左点焊吸嘴组成,LS 轴可使左点焊吸嘴和左点焊轮到达各工作位,左点焊轮可放电完成产品的焊接;右点焊机械臂由 RS 轴、右点焊轮和右点焊吸嘴组成,其结构功能与左点焊机械臂一致。

D 轴为直驱电机,可带动 4 个机械臂转动。L 轴

可使左校正夹松开夹紧,配合校正夹中间的左校正吸嘴,可限定封盖位置,保证移栽时的位置精度,R 轴、右校正夹的结构功能与上述一致。XYR 校正平台由载料盘、定位气缸 C₁ 和 XYR 轴组组成,XYR 轴组可移动校正平台至各工作位,定位气缸可使载料盘顶起缩回,工业相机位于载料盘上方,可对载料盘上的封盖进行视觉校正。

左点焊吸嘴由电磁阀线圈 R₅、R₆ 控制,R₅ 通电吸真空,R₆ 通电破真空,右点焊吸嘴由线圈 R₇、R₈ 控制,控制方式与左点焊吸嘴一致;左取料吸嘴、右取料吸嘴、左校正吸嘴、右校正吸嘴由电磁阀线圈 R₉、R₁₀、R₁₁、R₁₂ 控制,线圈通电时吸真空、断电时停止吸真空。

预封定位装置除应满足基本动作要求外,还应满足稳定、可靠和高效的要求。

具体性能要求及其指标如表 1 所示。

表 1 预封定位装置性能要求及其指标

性能要求	评价指标	指标参数
稳定性	不合格品率 η	$\eta \leq 1\%$
可靠性	故障报警率 μ /(次/天)	$\mu < 1$
	点焊机械臂点焊耗时 t/s	$t \leq 1.2$
高速性	点焊机械臂取料耗时 t/s	$t \leq 1.0$
	取料机械臂取料耗时 t/s	$t \leq 1.2$
	取料机械臂放料耗时 t/s	$t \leq 1.0$
	单焊接周期耗时 t/s	$t \leq 2.68$
	视觉检测模式耗时 t/s	$t \leq 9.50$
	焊接一盘耗时 t/s	$t \leq 675$

2 预封定位装置动作流程设计

笔者首先对各传感器的状态参数进行定义,如表 2 所示。

表 2 传感器状态参数定义

名称	定义	名称	定义
定位气缸 C ₁ 上位	S _{1U}	定位气缸 C ₁ 下位	S _{1D}
左取料气缸 C ₂ 上位	S _{2U}	左取料气缸 C ₂ 下位	S _{2D}
右取料气缸 C ₃ 上位	S _{3U}	右取料气缸 C ₃ 下位	S _{3D}
视觉校正	V	载料盘检测传感器	S ₄
左点焊吸料真空表	S ₅	右点焊吸料真空表	S ₇
左取料吸料真空表	S ₉	右取料吸料真空表	S ₁₀
左校正吸料真空表	S ₁₁	右校正吸料真空表	S ₁₂
封盖检测传感器	S ₁₃		

V 为 1—视觉校正完成;S₄ 为 1—载料盘到位,可进行预封定位作业;S₅、S₇、S₉、S₁₀、S₁₁、S₁₂ 状态值为 1—吸真空,状态值为 0—不吸真空,状态值为 -1—破真空;S₁₃ 为 1—封盖到位,可供取料机械臂取料

同时,需定义各轴位置及其状态值。D 轴、L 轴、LP 轴、LS 轴和 XYR 轴组的位置及其状态值定义如表

3 所示(R 轴、 RP 轴、 RS 轴位置编号与 L 轴、 LP 轴、 LS 轴一致,此处不予赘述)。

表 3 轴动作位置及其状态值

位置	状态值	位置	状态值	位置	状态值
0°位	D_0	初始位	LS_0	左视觉位	XYR_3
45°位	D_1	点焊位	LS_1	右视觉位	XYR_4
90°位	D_2	滚轮位	LS_2	左滚动位	XYR_5
松开位	L_0	取料位	LS_3	右滚动位	XYR_6
夹紧位	L_1	视觉位	LS_4	左加工位	XYR_7
初始位	LP_0	初始位	XYR_0	右加工位	XYR_8
取料位	LP_1	左滚轮位	XYR_1		
放料位	LP_2	右滚轮位	XYR_2		

2.1 预封定位装置主控流程规划

主控流程负责整体控制,系统状态切换如图 2 所示。

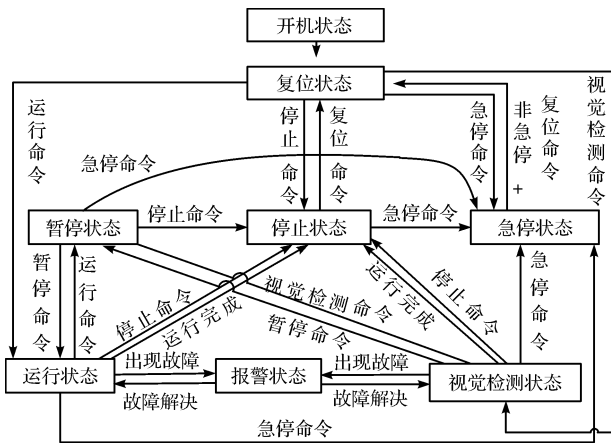


图 2 预封定位装置系统状态切换图

根据图 2,任意状态下发出急停命令,系统进入急停状态。只有急停状态解除,系统才能进入其他状态。

2.2 预封定位装置动作时序设计

在视觉检测模式下,以左视觉检测为例, XYR 轴组移动至左视觉位, D 轴转至 90°位,左取料机械臂取料;取料完成后 D 轴转至 0°位,左取料机械臂放料; D 轴再转至 90°位,左点焊机械臂取料;取料完成后 D 轴转至 0°位,左点焊机械臂放料。

该过程完成后对视觉校正模型修正,模型修正后再以相反步骤将封盖取回。

自动运行时,预封定位装置周期性进行焊接, XYR 轴组移动至左加工位, D 轴向 0°位转动,视觉校正系统在转动间隙对封装底座进行校正; D 轴转至 0°位后,同时执行右取料机械臂取料、左取料机械臂放料、左点焊机械臂点焊、右点焊机械臂取料 4 种动作;4 种动作执行完毕后 D 轴转至 90°位,视觉校正系统对封装底座进行视觉校正;转至 90°位后执行左取料机械臂取料、右取料机械臂放料、右点焊机械臂点焊、左点

焊机械臂取料 4 种动作。

4 种动作完成后本焊接周期结束, D 轴转至 0°位,开始下一周期,直至焊接完成。

引入参数 $Done$ 代表自动运行是否完成,其初始值为 0,为 1 表示完成;引入参数 n 、 m 分别代表载料盘上被加工产品的行数与列数,其初始值均为 0, n 值最大为 24, m 值最大为 19。

自动运行时,装置以“蛇形方式”焊接,焊接单数列时,每焊接一个产品, n 值加 1,当 n 值小于等于 25 时,令 n 值变为 24, m 值加 1,开始焊接相邻双数列;此时,每焊接一个产品, n 值减 1,当 n 值小于等于 -1 时,令 n 值变为 0, m 值加 1,开始焊接相邻单数列。当 m 值大于等于 20 时,表示该盘产品焊接完毕,令 $Done$ 为 1,可焊接下一盘。

焊接产生的高温对点焊轮有损伤,因此,每焊接 200 次,需执行点焊轮滚动动作,即 XYR 轴组移至滚轮位, LS 轴移至滚轮位,此时点焊轮与载料盘恰好接触,再移动 Y 轴使点焊轮在载料盘上滚动;每焊接 100 000 次,需更换点焊轮。设置参数 E 、 G 记录左右点焊轮滚动后焊接次数, E 、 G 值升至 200 后,复位为 0,并执行点焊轮滚动动作;设置参数 C 、 F 记录左右点焊轮总焊接次数, C 、 F 值升至 100 000 后,复位为 0,并更换点焊轮。

笔者以左点焊机械臂点焊动作为例介绍其动作时序流程设计方法,如图 3 所示。

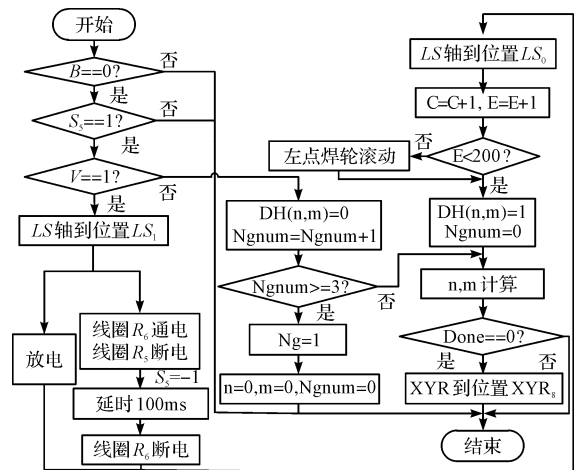


图 3 左点焊机械臂点焊流程

图 3 中,用参数 B 表示单右边点焊按钮, B 为 1 代表按钮按下,左点焊机械臂点焊动作不执行, B 为 0 则左点焊机械臂点焊动作可执行; $DH[25][20]$ 为二维数组,记录当前加工的第 n 行、第 m 列的产品是否焊接完成,为 1 表示焊接完成,为 0 表示焊接异常; $Ngnum$ 记录连续焊接异常个数, $Ngnum$ 值为 3 时令参数 Ng 为 1,表示需停机检修。

点焊动作开始,需确定此刻工况,若单右边点焊按钮按下, B 不为0,则动作直接结束;若左点焊吸料真空表 S_5 不为1,则左点焊吸嘴上无封盖,点焊动作也直接结束;若 V 不为1,表示视觉校正错误,则当前产品加工失败, $DH(n,m)$ 为0, $Ngnum$ 值加1,此时若 $Ngnum$ 等于3,则表示系统故障,点焊动作结束;若 $Ngnum$ 小于3,则计算 $n,m,Done$ 的值。此时若 $Done$ 为1,表示自动运行完成,点焊动作结束;若 $Done$ 为0,则 XYR 轴组移至下一加工位,点焊动作完成。

当 B 为0, S_5 为1且 V 为1时,工况判定通过,可进行点焊动作。 LS 轴移动至点焊位 LS_1 ,左点焊轮放电焊接,同时线圈 R_5 断电, R_6 通电,对产品吹气降温,100 ms后停止吹气,焊接完成; LS 轴回原位,并令 C,E 加1,判断 E 是否小于200,不小于200则执行左点焊轮滚动动作,小于200则设置 $DH(n,m)$ 为1, $Ngnum$ 为0,表示当前加工产品焊接正常; E 值判定完成后计算 $n,m,Done$ 的值,并判断 $Done$ 是否为0,不为0表示运行完成,点焊动作停止,为0则继续进行预封定位作业, XYR 轴组移至下一加工位,本次左点焊臂点焊动作完成。

3 预封定位装置动作时序的仿真优化

笔者运用 Simulink/Stateflow 搭建预封定位装置的有限状态机模型,构建状态转移图并进行仿真^[4-6]。根据仿真结果对时序流程进行优化。

3.1 动作时序模型的参数定义

笔者定义气缸伸出和缩回状态分别对应状态值1、0;表3中各轴位置编号对应各轴状态值。

笔者设置 XYR 轴组运行速度300 mm/s,启动初期加(减)速度 300 mm/s^2 ,由于启动时间较短,可忽略其加(减)速时间;设置 L 轴、 R 轴、 LP 轴、 RP 轴、 LS 轴、 RS 轴运行速度150 mm/s,启动初期加(减)速度 150 mm/s^2 。同理,可忽略其加(减)速时间;设置 D 轴速度 $300^\circ/\text{s}$ 。已知定位气缸冲程耗时1.2 s,回程耗时1.5 s;左右移栽气缸冲程回程均耗时0.08 s;点焊耗时0.1 s。

笔者分别计算各轴运动位移及其时间。本研究以左取料机械臂和左点焊机械臂为例介绍各轴位移与时间,如表4所示。

表4 各轴运动位移与时间

位移	行程	时间/s	位移	行程	时间/s
$L_0 - L_1$	1.2	0.18	$LS_0 - LS_4$	3.4	0.3
$LP_0 - LP_1$	2.8	0.27	$XYR_0 - XYR_7$	153.3	1.43
$LP_0 - LP_2$	2.6	0.26	$XYR_7 - XYR_1$	149.59	1.41
$LS_0 - LS_1$	3.3	0.3	$XYR_0 - XYR_3$	98	1.14
$LS_0 - LS_2$	3.15	0.29	$XYR_1 - XYR_5$	2	0.1
$LS_0 - LS_3$	2.5	0.26	$XYR_7 - XYR_0$	34.4	0.67

3.2 基于 Stateflow 的动作时序模型设计

装置动作时序模型的系统主控图如图4所示。

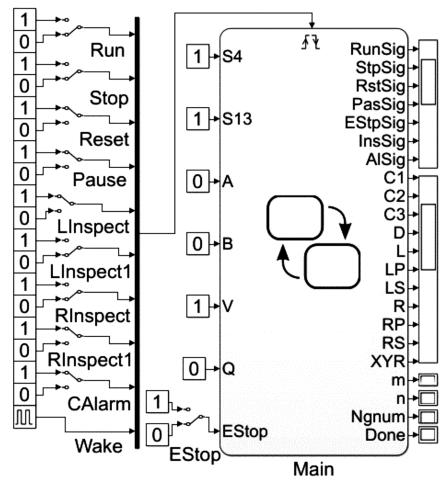


图4 系统主控图

图4中,以屏幕按钮、开关和传感器的信号作为系统输入^[7-9]。笔者运用 Simulink 模块库中的常数模块表示 True 和 False,利用手动开关模块 Switch 切换 True 或 False^[10]。系统输出主要有两部分:(1)系统运行状态,以7个参数 $RunSig, RstSig, StpSig, EStpSig, PasSig, AISig, InsSig$ 对应系统的运行状态、复位状态、停止状态、急停状态、暂停状态、报警状态、视觉检测状态,参数值为1时表明系统进入对应状态,任意时刻最多只能有一个参数值为1;(2)各执行元件状态,以 $C1, C2, C3$ 对应各气缸运动状态,以 $L, R, LP, RP, LS, RS, D, XYR$ 对应各轴运动状态。

3.3 预封定位装置动作时序仿真及优化

预封定位装置仿真时,点焊机械臂点焊耗时1.02 s,点焊机械臂取料耗时0.71 s,取料机械臂取料耗时1.01 s,取料机械臂放料耗时0.72 s,单焊接周期耗时2.63 s,视觉检测模式耗时8.97 s,焊接一盘耗时669.68 s,满足高速性各指标要求。

若在保证功能、避免碰撞的前提下,使部分执行元件的动作顺序由依次执行变为同步执行,则可显著提升系统的运行效率。根据装置动作时序仿真结果可知,一个焊接周期内点焊机械臂点焊、点焊机械臂取料、取料机械臂取料、取料机械臂放料4个动作同时进行,但点焊机械臂点焊动作耗时最长,而 D 轴在4个动作全部执行完毕后才能转动至下一工位,为减少 D 轴等待时间,可使点焊机械臂点焊的最后一步动作与 D 轴转动同时进行。

根据上述思路修改动作时序模型,并再次仿真,此时4个机械臂中取料机械臂取料动作耗时最长。同

理,可使取料机械臂取料的最后一步动作与 D 轴转动同时进行。

笔者对优化完毕后的动作时序模型进行仿真。优化前后单焊接周期动作时序对比如图 5 所示。

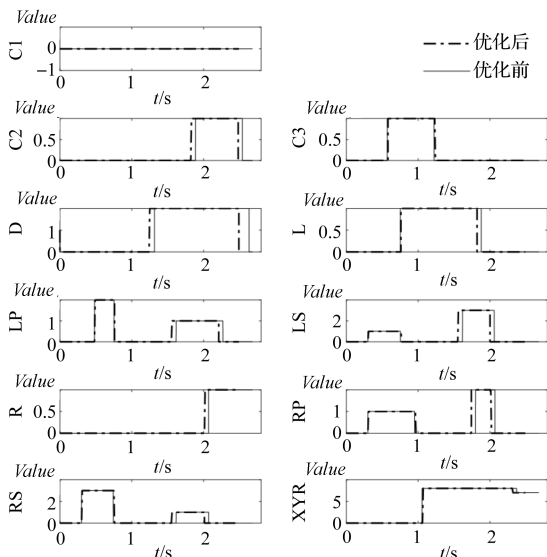


图 5 优化前后时序对比

由图 5 可知:优化后点焊机械臂点焊耗时 0.76 s,点焊机械臂取料耗时 0.71 s,取料机械臂取料耗时 0.93 s,取料机械臂放料耗时 0.72 s,单焊接周期耗时 2.45 s,视觉检测模式耗时 8.89 s,焊接一盘耗时 621.76 s。可见,性能较优化前提升 7.17%。

4 预封定位装置动作时序验证

为验证上述动作时序设计的合理性,笔者进行样机制试,样机如图 6 所示。

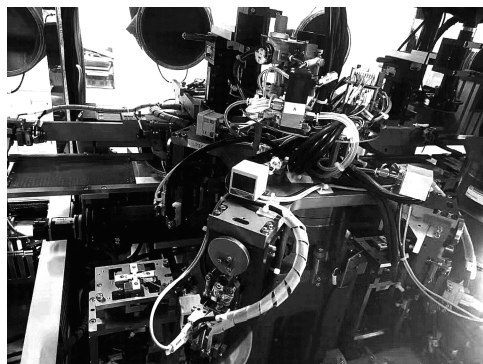


图 6 预封定位装置样机

本研究试生产 28 盘共 14 000 个产品,其中封盖丢失、未焊合、封盖歪斜的不合格品数分别为 3、2、4,不合格品率 η 为 0.64‰,满足稳定性要求。

笔者记录装置 12 天内的报警次数,如表 5 所示。

表 5 系统报警次数统计结果

日期	次数	日期	次数	日期	次数
4/17	1	4/21	0	4/25	0
4/18	0	4/22	0	4/26	1
4/19	0	4/23	2	4/27	0
4/20	1	4/24	0	4/28	1

由表 5 可知,系统报警率 μ 为 0.5 次/天,满足可靠性要求。

笔者依次测定装置各动作耗时,并计算各动作耗时的平均值,可知点焊机械臂点焊平均耗时 0.76 s、点焊机械臂取料平均耗时 0.70 s、取料机械臂取料平均耗时 0.93 s、取料机械臂放料平均耗时 0.71 s、单焊接周期平均耗时 2.45 s、视觉检测模式平均耗时 8.90 s、焊接一盘平均耗时 646.72 s;与仿真结果对比,偏差为 4.01%,满足高速性要求。

由测试结果可知:预封定位装置实际动作时间与仿真结果较吻合,验证了流程设计的正确性;且焊接不合格情况满足稳定性要求,装置报警次数满足可靠性要求,各动作耗时满足高速性要求。

5 结束语

针对微型晶体谐振器封装设备的预封定位装置,笔者运用仿真分析与样机试验的方法对其动作时序进行了设计和优化,设计了预封定位装置的动作时序,得到了各动作的流程图;基于有限状态机理论,使用 Simulink/Stateflow 构建了预封定位装置的动作时序模型;以模型仿真结果为依据对预封定位装置动作时序进行优化,得到优化后各动作的时序图与时间理论值。

样机试验表明:动作时序设计的合理性与正确性,预封定位装置的各种性能均满足预期性能要求。

参考文献 (References):

[1] YU X, CHEN X D, DING X, et al. A high-stability quartz crystal resonator humidity sensor based on tuning capacitor [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2018, 67(3): 715-721.

(下转第 587 页)

本文引用格式:

胡小华,喻信东,单小荣,等. 微型晶体谐振器预封定位装置动作时序优化研究[J]. 机电工程,2020,37(5):572-576,587.

HU Xiao-hua, YU Xin-dong, SHAN Xiao-rong, et al. Optimization of action sequence for micro-crystal resonator pre-sealed positioning device[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2020, 37(5): 572-576, 587. *《机电工程》杂志*: <http://www.meem.com.cn>

- [3] 崔鑫,闫秀天,李世鹏. 保持特征的散乱点云数据去噪[J]. 光学精密工程, 2017, 25(12): 3169-3178.
- [4] 史皓良. 三维点云数据的去噪和特征提取算法研究[D]. 南昌:南昌大学机电工程学院, 2017.
- [5] 王丽辉. 三维点云数据处理的技术研究[D]. 北京:北京交通大学电子信息工程学院, 2011.
- [6] YUAN Shuai, ZHU Shuai, LI Dong-shuang, et al. Feature preserving multiresolution subdivision and simplification of point clouds: a conformal geometric algebra approach[J]. *Mathematical Methods in the Applied Sciences*, 2018, 41(11): 4074-4087.
- [7] 苏本跃,马金宇,彭玉升,等. 基于 K-means 聚类的 RGBD 点云去噪和精简算法[J]. 系统仿真学报, 2016, 28(10): 2329-2334, 2341.
- [8] 柳红凯,徐昌荣,徐晓. 基于渐进加密三角网机载 LiDAR 点云滤波改进算法研究[J]. 江西理工大学学报, 2016, 37(3): 50-55, 60.
- [9] 李仁忠,杨曼,冉媛,等. 基于方法库的点云去噪与精简算法[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(1): 251-257
- [10] BUYERA, SCHUBERT W. Calculation the Spacing of Discontinuities from 3D Point Clouds [J]. *Procedia Engineering*, 2017(191): 270-278.
- [11] 董锦菊. 逆向工程中数据测量和点云预处理研究[D]. 西安:西安理工大学机械与精密仪器工程学院, 2007.
- [12] 朱黎,胡涛,郑明辉. 基于点云和高清影像数据的文化遗产多分辨率三维重建[J]. 测绘通报, 2017(10): 111-114, 119.
- [13] 肖巍峰,田鑫,李朝奎,等. 利用连续变形技术的三维点云简化方法[J]. 遥感信息, 2018, 33(5): 9-14.

[编辑:李辉]

本文引用格式:

刘菲菲,杨铎. 基于二维截面筛选标记的点云简化方法研究[J]. 机电工程, 2020, 37(5): 582-587.

LIU Fei-fei, YANG Duo. Point cloud simplification method based on two-dimensional section filtering marking[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2020, 37(5): 582-587.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>

(上接第 576 页)

- [2] Research and Markets. Global quartz crystal oscillators market analysis, growth, trends, forecast 2018-2023 [Z]. Dublin: Business Wire, 2018.
- [3] CHRISTIAN E, LARS S. A 491.52 MHz 840 uW crystal oscillator in 28 nm FD-SOI CMOS for 5G applications[C]. ES-SCIRC 2017-43rd IEEE European Solid State Circuits Conference, Leuven: IEEE, 2017.
- [4] 张威. Stateflow 逻辑系统建模[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 2007.
- [5] 贾秋玲,袁冬莉. 基于 MATLAB7. x/Simulink/Stateflow 系统仿真分析及设计[M]. 西安:西北工业大学出版社, 2000.
- [6] THIERBACH M E. Finite state machine[Z]. Santa Clara: Google Patents, 1985.
- [7] 夏计军. 自动捞菜机交流伺服控制系统设计与研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学机电工程学院, 2009.
- [8] 张俊. 基于 MBD 的包装机械 PLC 控制软件开发[D]. 武汉:华中科技大学机械科学与工程学院, 2015.
- [9] 邱强杰. 基于有限状态机的风电机组状态监控系统设计[D]. 长沙:长沙理工大学电气与信息工程学院, 2016.
- [10] 薛定宇. 基于 MATLAB/Simulink 的系统仿真技术与应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2011.

[编辑:李辉]