

# 高精度音叉晶片多线切割关键技术研究

包羽佳 柯易辰 程雾中 王蒙蒙 沈凯 徐君  
台州职业技术学院 浙江 台州 318000

**摘要:**为实现音叉晶片高精度的多线切割,提高音叉晶振的合格率,通过分析音叉振荡频率理论公式,结合投影测量不合格音叉晶片的轮廓尺寸,推断出工作台的传动精度和锁止稳定性是造成合格率低的主要原因。本文设计了一种应用了谐波减速机作为传动和锁止机构,配合叉底修弧控制程序的高精度多线切割机工作台。对本项目方案与原有方案进行对比试验,经分析检测数据,符合设计目标。

**关键词:**音叉晶片;多线切割机;振荡频率;谐波减速机;叉底修弧

## 引言

石英晶振是利用石英晶体的压电效应从而产生稳定的振荡频率,主要应用在计时的电子线路上,如石英手表,计时器,空调遥控器,时钟等,是许多电子产品中必不可少的电子元件。

音叉型石英晶振是指石英晶片外型类似音叉的晶振,如图1所示。音叉片主要尺寸有:3\*8mm、2\*6mm、1.5\*5mm。我国每年音叉晶振产量超过60亿只,产量约占全球40%。



图1 左:音叉型石英晶振 右:音叉晶片

多线切割是目前世界上最先进的脆硬材料加工技术,通过切割钢线高速往返运行,将待切工件一次同时切割为数百甚至上千薄片的一种切割加工方法(如图2)。由于其切割精度高,切割效率高,广泛应用于石英晶体、磁性材料和蓝宝石等脆硬材料的切割。

近年来,5G通讯、物联网、人工智能、工业互联网、大数据等新一代信息技术加速集成创新与突破,推动现有应用场景不断拓宽,新的应用场景也不断涌现,进而驱动石英晶体元器件市场不断增容,而这其中就广泛地应用到音叉晶振。

据调研某生产音叉晶片的上市公司,其产品的一次性合格率在90%左右,其不合格的原因是产生的振荡频率达不到要求(频差超过 $\pm 30\text{ppm}$ )。

对于几十亿数量级的产品,其合格率每提升一个百

分点都具有极其可观的经济效益,因此对能精准控制尺寸精度的关键技术进行研究,并将合格率提升至95%及以上是十分有意义的。

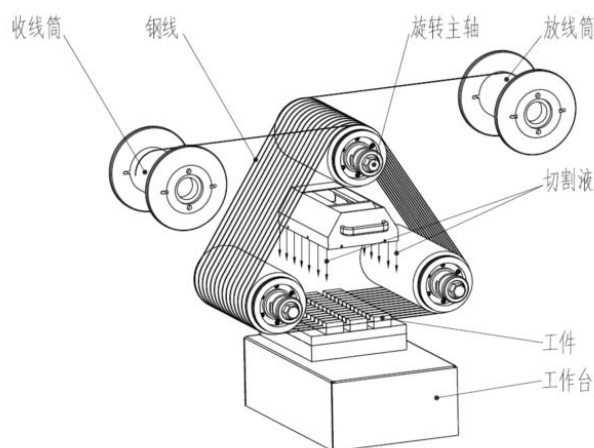


图2 多线切割原理示意图

## 1 音叉晶片精度分析

音叉晶片是石英晶振振荡频率产生的核心部件,是由石英晶体通过多线切割加工而来。将待切割的石英晶体材料放置在多线切割机工作台上,通过工作台前后和上下移动配合(如图3箭头所示),从而完成切割。

据实测和客户反馈,目前音叉晶片多线切割设备需解决以下几个问题:

### 1.1 音叉晶片振荡频率超标

通过投影检测不合格音叉晶片的外形轮廓尺寸,发现叉体深度的切割面不平整,存在波浪形,说明在切割叉体深度过程中工作台没有完全锁止,存在前后移动的间隙。另外测量分析两个叉臂宽度尺寸(如图4中 $t_1$ 和 $t_2$ ),发现偏差值超出合格范围( $\pm 0.03\text{mm}$ ),说明设定的移动宽度和实际切割的宽度不一致,也就是工作台传动定位不精确。

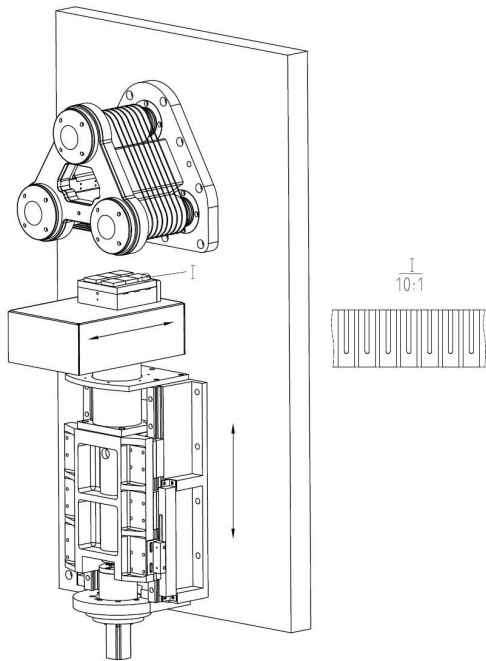


图3 工作台运行示意图

由音叉振荡频率公式可知（公式1），叉臂宽度 $t$ 和叉体深度 $L$ 的尺寸（如图4）是振荡频率超标的主要因素。

$$f = 0.161 \frac{t}{L^2} \sqrt{\frac{Eg}{\rho}} \quad (\text{公式1})$$

$t$ : 叉臂宽度;  $L$ : 叉体深度;  $E$ : 杨氏模量;  $g$ : 重力加速度;  $\rho$ : 叉体材质密度。

因此推断出工作台定位传动精度低和锁止不稳定是造成音叉晶片合格率低的主要原因，这也印证振荡频率公式的分析结果。

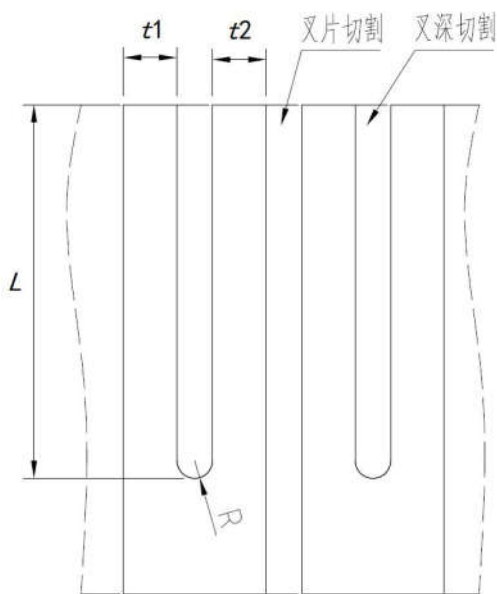


图4 音叉晶片外形尺寸图

## 1.2 音叉晶片之间叉体深度尺寸不一致

投影检测多片音叉晶片时，发现放置在工作台左右侧的叉体深度尺寸偏大，而放置在中间位置的尺寸偏小，最大尺寸偏差值约为0.05mm。观察发现在完成叉体深度切割后，设备立即停止了切割，由于切割钢线是柔性的，在切割截面上形成一个弓形（如图5），因而引起工作台左右侧的切割深度大，中间的切割深度小，这就是造成音叉晶片之间叉体深度不一致的原因。

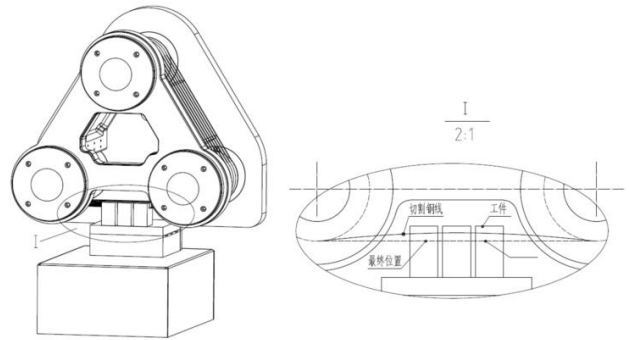


图5 切割钢线线弓示意图

## 2 关键技术研究

### 2.1 设计开发高精度进给定位和锁止机构，确保切割精度

经理论和试验数据的研究分析，得出工作台的移动精度和锁止稳定性是造成切割精度低的主要原因。

多线切割机的工作台是由伺服电机、减速机构和丝杠三部分零件实现移动，因此需要寻找一款既能高精度传动，还能稳定锁止的减速机构。

查阅相关资料，常用的减速机构有行星减速机、蜗轮蜗杆减速机和谐波减速机，对其相关性能进行对比分析，见表1。

表1 减速机性能特点对比

名称/特点	行星减速机	蜗轮蜗杆减速机	谐波减速机
背隙	≤ 1弧分	≤ 3弧分	接近0
传动精度	高	低	很高
体积	同轴传动 安装空间小	不同轴传动 安装空间大	同轴传动 安装空间小
减速比	单级 ≤ 10	单级 5 ~ 100	单级 50 ~ 500
锁止稳定性	可反向旋转	反向自锁	大力矩 反向锁止

由上表可知，行星减速机不能实现反向锁止，只有搭配锁止气缸，才符合本项目的要求；蜗轮蜗杆减速机传动轴不在同一平面，所需安装空间大，无法安装到工作台箱体内部；谐波减速机具备高传动精度和大力矩反向

锁止,符合本项目的要求。

目前谐波减速机广泛地应用在机器人传动关节上,具有结构简单紧凑、体积小、精度高、传动比大等优点,得到了有效的推广。

谐波减速机具有齿间几乎零间隙,传动精度高的特点,以此作为切割深度进给机构,可实现精准定位( $\pm 0.005\text{mm}$ );此外谐波减速机还具有传动比大(单级50~500)的特点,可实现反向大力矩锁止,避免了工作台在切割时受到反向力矩造成平移机构的漂移问题,如图6所示。

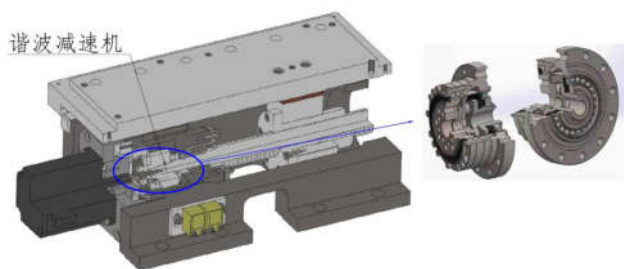


图6 谐波减速机定位和锁止结构

2.2 设计开发自动退刀程序,自动衔接切割工序,提高生产效率

在叉体深度切割完成后需对多线切割机进行运行停机、退刀、平移、对刀、运行启动等步骤操作,最后再进入叉片切割流程。由于没开发这部分程序,只能手动操作。

因此开发出自动退刀的程序,实现切割工序自动衔接控制。

人机操作界面实现音叉参数灵活设定,满足不同规格音叉晶片切割需求。

### 3 试验对比验证

机器人传动关节要求减速机具备传动精度高(保证动作的精准度),停止时需要大力矩锁止(保证动作的稳定性),同本项目的工作台要求一致。

因此我们对谐波减速机进行装机试验,并同现有方

式行星减速机搭配气缸锁止机构进行对比试验论证。

表2 切割数据对比

对比结构 对比项目	行星减速机 搭配气缸锁止	谐波减速机
叉体深度偏差 (mm)	$\pm 0.05\text{mm}$	$\pm 0.01\text{mm}$
叉臂宽度偏差 (mm)	$\pm 0.03\text{mm}$	$\pm 0.01\text{mm}$

由以上数据可知,应用谐波减速机可以有效地提高切割精度,符合设计预期目标。

### 4 总结

目前音叉晶片行业的整体合格率在90%左右,通过本项目全自动切割和高精度切割控制的设计开发,不但提升生产效率,还将合格率提升至95%以上。据调研某上市企业按年产量20亿只计算,单只售价约为0.03元,可直接增加企业年利润约300万元。因此作为生产音叉晶片的核心设备——全自动高精度多线切割机,必然有广泛的市场前景。

### 参考文献

- [1]金建华,林海波.数控多线切割机床高精度罗拉轴的关键技术研究[J].制造业自动化,2012,2.
- [2]金建华,林海波,蔡文辉.高精度石英晶体多线切割机的研制[J].工艺与装备.2010,8(1):85-88.
- [3]胡惠军.基于数字PID算法的台达运动控制器在音叉多线切割机上的应用[J].自动化信息.2012,008:81-83.
- [4]陈卫,徐恩生.用于加工晶振音叉片的多线切割设备:中国,201822110647.6[P].2019.09.27
- [5]陈卫,徐恩生.一种音叉晶振:中国,202022662895.9[P].2021.05.28
- [6]李经让,刘丽华.一种音叉式晶体谐振器:中国,202121859394.8[P].2022.01.04
- [7]李文广,冯国胜.多线切割机伺服电机控制系统设计与试验[J].电子工艺技术,2020,1.