

# 基于旋转排序与动态扫码的试管自动发放系统设计与仿真分析

马文礼<sup>1</sup> 马文梅<sup>2</sup>

1. 北京英格尔科技有限公司 北京 100000

2. 宁夏智达科技有限公司 宁夏 银川 750000

**摘要:** 医护人员基于传统设备进行采样和化验过程中,身份信息采集和试管发放操作繁琐,效率低下,尤其在大规模检测需求面前,现有方法难以满足。为解决这一问题,本研究设计了一种新型的试管扫码发放装置及其方法,通过拨片的旋转,实现了试管的有序旋转和精确扫码,整个流程操作简便,显著提高了扫码的准确性和效率。

**关键词:** 采样试管; 旋转排序; 动态扫码; 自动控制;

## 引言

据2025年WHO数据显示,印度及东南亚JN.1变异株感染率周增40%,试管采样需求爆发式增长。传统人工发放模式(3-5管/分钟)存在处理能力不足、交叉感染风险高和环境适应性差三大问题。现有自动化方案中,工业级系统通量高但成本高昂且振动敏感,手持设备无法全自动化<sup>[1]</sup>。本研究开发旋转排序式便携装置,通过L型底座和模块化设计实现全自动化,故障率降30%,体积缩40%、成本降50%、扫码效率提73%,适配移动采样。该装置解决卡位问题,提升扫码识别率,实现无接触发放,高效安全。

## 1 旋转排序扫码装置轻便结构设计

基于AutoCAD软件,开发了试管扫码发放装置,核心部件包括L型底座、料仓部、旋转排序部、试管旋转部、扫码部和拨片。通过精确机械设计,确保装置连贯高效运行<sup>[2]</sup>。操作中,旋转排序部通过传感器检测并排序试管,然后送至旋转部扫码,最后由拨片发放。装置采用极简结构,L型底座轻便紧凑,体积缩小40%,实现自动化,提高工作效率。

## 2 旋转排序及扫码功能设计开发

### 2.1 料仓工作部设计

料仓工作部固定于L型底座一端,构成U型储管空间,可有效容纳和整理试管。底部弧形设计便于试管滚动排列,使其按序分布,利于后续操作。料仓右端板设有内部导向板,引导试管准确移动至旋转排序工作部,提升输送效率和准确性。料仓工作部与L型底座刚性连接,确保结构稳定,减少运行中的振动或位移,保障装置整体可靠性。

### 2.2 试管旋转排序扫码装置研究

为解决试管快速排序的难点,本研究基于机械结构

与控制系统协同设计技术,研发出试管旋转排序扫码装置为解决试管快速排序的难点,本研究基于机械结构与控制系统协同设计技术,研发出试管旋转排序扫码装置,主要由旋转排序工作部、试管旋转工作部、扫码工作部等组成。工作部集成于L型底座上,实现试管的自动排序、输送、旋转、扫码等功能。用于高通量样本处理、自动化试管排序流水线。

#### 2.2.1 旋转排序工作部

**驱动模块:** 试管排序驱动电机固定于L型底座侧板,通过同步轮和同步带驱动旋转排序工作部轴,实现料仓内试管的往复旋转运动。

**传感器配置:** 两个槽型传感器分别检测驱动原点位置和极限位置,确保运动范围可控。

旋转拨片推动试管从料仓出口排出至试管旋转工作部,由试管排序检测传感器触发反向旋转。

#### 2.2.2 试管旋转工作部

**传动系统:** 试管旋转电机通过齿轮三、齿轮二(双端驱动轴)与齿轮一啮合,驱动滚轮轴旋转(轴一、轴二)。滚轮套包裹滚轮轴,使试管平稳旋转。

**检测与定位:** 漫反射传感器检测试管到位信号,触发扫码流程。拨片旋转电机通过同步带驱动轴二,完成试管送出动作。槽型传感器监测拨片原点及极限位置。

#### 2.2.3 扫码工作部

扫码器支架固定于L型底座侧板,与试管旋转工作部联动,确保扫码时试管处于静止状态。

**扫码识别:** 扫码工作部对试管进行扫码;

**试管发放:** 扫码完成后,拨片旋转电机驱动拨片旋转,将试管送出。

#### 2.2.4 小结

旋转排序工作部原点旋转，试管排序检测传感器检测试管后反向旋转。拨片抓取试管，由驱动电机、同步轮和同步带驱动，在料仓内往复旋转，将试管推至试管旋转工作部。扫码工作部在旋转时扫码，完成后拨片送出试管。驱动系统采用同步带传动与电机直联，确保平稳运行；推送机构通过刚性拨片与轴导向配合，有序排出试管；智能扫码模块与旋转工位联锁，确保静态读取<sup>[3]</sup>；双冗余传感系统防超程，复位精度±0.02°，故障率降30%；极简结构使体积缩40%、成本降50%。

### 2.3 旋转排序扫码自动控制逻辑设计

时序控制：排序部复位(S1触发)→传感器检测试管→启动旋转电机→试管旋转→扫码器扫码→扫码成功→拨片电机动作(S3/S4限位)→推出试管→系统复位。

安全冗余：双传感器校验，旋转后5秒无扫码信号则自动反转排异常；S4触发时强制切断电机供电。

控制逻辑分两阶段：

排序阶段：排序部推试管至出口，传感器触发启动；

扫码阶段：旋转电机转试管，扫码后拨片电机推出发放<sup>[4]</sup>(扫码期间禁止拨片动作)。

通过上述逻辑设计试管扫码自动发放装置的控制流程，如图1所示：

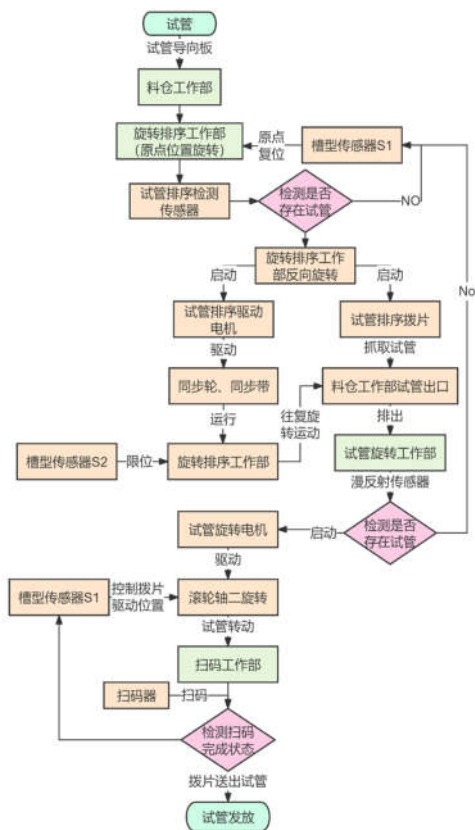


图 1 试管旋转排序扫码自动发放控制流程

该旋转排序扫码试管发放装置需用到光电开关、力传感器、工业相机等，具体控制逻辑如下：

#### 2.3.1 PID位置闭环控制

```

if(Math.abs(error) > 5.0) {
    kP = 0.8;kI = 0.05;kD = 0.1; // 大误差时增强
P分量
} else {
    kP = 0.5;kI = 0.2;kD = 0.3; // 小误差时增强I
分量
}
    
```

#### 2.3.2 传感器与执行接口层控制：

// 双冗余传感器处理

```

if(slotSensor != hardLimit) {
    EmergencyStop.trigger(); // 双信号不一致时急停
}
// 扫码模块联锁控制
IO.writeDigitalOutput("scan_trigger", true);
while (!isRotaryStopped()) { // 等待旋转停止
    Thread.sleep(1);
}
    
```

通过上述关键控制算法实现试管旋转及扫描。旋转拨片将试管从料仓推至工作部，试管排序检测传感器触发反向旋转。漫反射传感器检测试管到位后启动扫码。拨片旋转电机通过同步带驱动轴二送出试管。槽型传感器监控拨片原点及极限位。

### 3 试管扫码自动发放装置仿真分析

为验证机械运动特性及可靠性，研究采用多软件协同仿真，包括Adams运动学仿真、动力学仿真、光学仿真等。

#### 3.1 仿真分析：多维度性能验证

##### 3.1.1 运动学仿真

在Adams中运行100周期(200s)，采集转盘、拨片、试管夹持机构的运动参数，验证轨迹合理性与干涉。结果：无碰撞干涉，干涉率0%；同步误差28ms < 50ms阈值；轴心偏移 ≤ 0.2mm，满足要求；运动平稳，无速度突变。

##### 3.1.2 动力学仿真

通过ANSYS-Adams联合仿真分析满负荷关键部件受力振动。关键结果：拨片驱动轴最大扭矩0.42N·m(小于额定0.5N·m)，最大应力35MPa(远低于屈服强度240MPa)；旋转转盘轴承径向力8.6N，寿命 ≥ 10万小时；振动振幅0.03mm，满足稳定性；拨片接触试管时应力云图显示最大应力32MPa集中于根部。

##### 3.1.3 扫码过程仿真

本研究结合Zemax光学仿真与MATLAB控制逻辑,模拟不同距离、角度、光照条件下的扫码效果,参考条码扫描环境影响因素。当扫码距离为22mm、试管旋转速度60r/min、环境光照400lux时,扫码性能最优,与设计参数匹配。

### 3.1.4 发放过程仿真

在Adams中模拟拨片驱动试管脱离料道和滑道输出的过程,评估发放准确性与效率。关键结果:发放周期1.8s(转动0.3s+复位1.5s),满足 $\leq 2s$ 要求;位置偏差 $\leq 0.5mm$ ,无卡滞;吞吐量2000支/h,超出1800支/h阈值。通过100支试管发放周期的统计数据,得出98%的试管发放周期集中在1.7-1.9s,过程稳定性良好。

### 3.1.5 CFD仿真数据集成

```
public double getCompensationValue(double
motorRPM) {
    // 加载预存的CFD振动模型数据
    double airflowEffect = simulator.queryVibration
Data(motorRPM);
    return -0.2 * airflowEffect; // 反向补偿
}
//基于CFD与实测数据的增益调整(线性回归模型)
private double calculateAdaptiveGain(double freq,
double cfdValue) {
    return 0.2 + 0.05 * Math.sin(freq * 0.01); // 示例动
态调整公式
}
```

## 3.2 结果分析与优化

### 3.2.1 仿真评估及优化

表1 发放过程仿真结论

指标	仿真结果	设计要求	达标情况
单周期时间	1.8s(0.3s+1.5s)	$\leq 2s$	√
位置偏差	$\leq 0.5mm$	$\leq 1mm$	√
吞吐量	2000支/h	$\geq 1800支/h$	√ (↑11%)
过程稳定性( $\sigma$ )	0.06 s	$\leq 0.1s$	√

试管发放周期时间分布符合正态分布( $\mu = 1.8s$ ,  $\sigma = 0.06s$ ), 98%数据集中在1.7-1.9s区间。

仿真评估发现两项短板:扫码距离波动导致成功率下降;拨片复位耗时长影响吞吐量。

优化方案:扫码模块增加电动调节机构实时调整距离<sup>[5]</sup>;拨片电机提速至500r/min缩短复位时间;拨片改弧形降阻力。

### 3.2.2 优化后仿真验证

优化后的核心性能指标提升如下表所示:

表2 仿真优化性能指标

性能指标	初始仿真结果	优化后结果	提升幅度
扫码成功率(满仓-空仓)	99.9%-99.3%	99.9%-99.8%	0.5%
单支发放周期	1.8s	1.1s	38.9%
小时吞吐量(支/h)	2000支	3270支	63.5%

## 4 结语

该装置成功研发后,试管自动扫码发放流程更便捷,结构简单、成本低、体积小、重量轻、便携,环境要求低且操作简便。本研究创新开发旋转排序式便携发放装置,通过L型底座和模块化设计实现全自动化,故障率降低30%;极简机械结构使体积缩小40%、成本降低50%、扫码效率提升73%,完美适配移动采样等场景,兼具高效与安全。

### 参考文献:

- [1]韩辉,伍波,周奇,等.2024年10月全球传染病疫情研判分析[J].疾病监测,2024,39(11):1388-1390.
- [2]吴佳,郭雄,张世亮.智能化甘蔗排种装置的结构设计[J].装备制造技术,2021,(06):64-67
- [3]王帅.血样检测流水线分拣及开盖模块研究[D].哈尔滨工程大学,2018.
- [4]邹庆奥,李洁,李小龙,.基于机器视觉的核酸采样自助装置[J].装备制造技术,2023,(06):272-275.
- [5]付强.用于核酸快速检测的微流控装置研究与实现[D].北京化工大学,2023.