

用于低剪切力生物样品处理的模块化旋转装置的设计 与原型制作

于济铭 王东川 苏子奥 张淮峻

北京师范大学第二附属中学国际部 北京 100088

【摘要】：用于生物组织处理的商业实验室通常依赖紧密集成的专用硬件和耗材。此类设计虽能够提供标准化的性能，但往往会导致购置成本高昂且适应性有限，尤其对于中小型或资源受限的实验室而言。鉴于此，我们报告了一种低成本、单通道、可编程旋转平台的设计和原型制作，该平台专为生物样本处理的探索性研究而开发。该平台采用模块化机械架构，结合了电机驱动的旋转单元、用户自定义的容器支架和可配置的传动接口，从而实现可控的低剪切旋转运动。结构组件采用 SolidWorks 软件设计，并通过桌面级 3D 打印技术制造。这种方法支持开发过程中的快速迭代，并允许根据实际装配和对准情况进行设计调整。为了适应不同的实验室工作流程，该平台采用电池供电和交流电源供电，并实现了可调节速度和时间参数的电气控制，使其适用于诸如培养箱等多种操作环境。在初步实验室评估中，观察到该平台在处理软性生物样本时能够产生稳定且可重复的旋转运动，这对于在机械操作过程中保持细胞完整性至关重要。同时，开放式的机械接口允许用户使用内置旋转元件的容器，体现了实际实验室场景所需的灵活性。该原型机总材料成本约为 500 元人民币，展示了易于操作的制造方法如何在牺牲功能可靠性的前提下，大幅降低实验硬件开发的门槛。综上所述，本研究证明了构建低成本模块化旋转研究平台的可行性，并为未来开发可定制的实验室仪器提供了一个实用的参考框架。该装置仅用于探索性研究，并非旨在替代任何商业系统。

【关键词】：3D 打印；低成本；生物学仪器

DOI:10.12417/3041-0630.26.02.082

1 介绍

从固体生物组织中可靠地获取具有活性的单细胞悬液的操作，在包括细胞培养、功能分析和分子谱分析在内的众多生物学和生物医学研究领域变得日益重要。无论是处理肝脏、肿瘤还是神经组织，研究人员通常都需要对脆弱的生物样本进行机械处理，以兼顾效率和细胞完整性的保持。实际上这种平衡很难实现，尤其是在手动解离方法会造成操作者之间以及不同实验批次之间显著差异的情况下。

为了应对这些挑战，人们开发了各种自动化或半自动化的实验室设备来标准化组织机械处理。这些系统通常将电机驱动平台与专用耗材集成在一起，在减少人工操作时间的同时，提供可控且可重复的机械运动。然而，在日常实验室工作中，尤其是在学术或教学环境中，一个反复出现的局限性显而易见：此类系统的复杂性和成本通常与其所涉及的基本机械原理不成比例。因此，对于预算有限的小型实验室或研究团队而言，尽管他们的实验需求可能同样苛刻，但获得标准化机械加工工具的机会仍然有限，这一问题在关于科研设备开源化与低成本化的讨论中已被广泛指出^[1]。

这种差距在我们自身的实验室工作中也直接显现出来：我们需要可靠的机械加工设备，但同时又面临着设备可用性和采购方面的限制。虽然产生稳定、低剪切力的旋转运动的核心功能需求在概念上很简单，但市售解决方案却将这种功能集成到

封闭系统中，导致其适应性有限且购置成本高昂。这些观察结果促使我们提出一个根本性的问题：能否开发一种机械结构透明、成本低廉的平台，在提供类似旋转控制的同时，保持足够的灵活性以适应不同的实验环境？

我们从工程学的角度出发，着重研究机械组织加工所需的关键功能元件。我们的目标并非复制现有系统，而是探索能否利用易于实现的制造方法构建模块化旋转平台，从而使设计决策能够根据迭代测试和实际实验室的限制条件进行指导。在此框架下，模块化不仅被视为一种设计偏好，更被视为一种实际需求，它能够快速修改机械接口，简化维护和故障排除。

桌面 3D 打印和低成本电子控制系统的最新进展，使得研究团队在内部定制实验室硬件原型变得越来越可行。除了降低成本之外，这种方法还具有另一优势：设计迭代可以直接根据实验反馈进行调整，包括对准公差、振动特性以及在诸如培养箱等封闭实验室环境中操作的便捷性。这些因素虽然在商业规格中很少被强调，但往往对日常实验的可靠性起着决定性作用，这也反映了近年来开放硬件在科研环境中逐渐受到重视的趋势^[2]。

在本研究中，我们展示了一种低成本、单通道、可编程旋转平台的设计和原型制作，该平台旨在用于生物样本处理的探索性研究。通过将模块化机械结构与可调节的电气控制和易于操作的制造技术相结合，我们旨在展示一条实现可定制实验室

仪器的实用途径。这项工作并非将该设备定位为现有商业系统的替代品，而是强调可行性、适应性和工程透明度，其更广泛的目标是降低资源受限的研究环境中实验硬件开发的门槛。

2 设备设计与机械结构

2.1 总体设计考虑因素

旋转平台的设计并非基于理想化的规格，而是受到日常实验室使用中产生的各种限制。在日常组织处理中，最重要的往往不是峰值转速，而是负载下运动的稳定性、重复运行中能否保持对准，以及出现细微机械故障时能否快速维修。如稳定性、对制造误差的容忍度和可维护性等因素成为我们设计决策的参考框架，尤其因为像桌面3D打印这样的低成本制造方法不可避免地会引入虽小但意义重大的尺寸偏差。

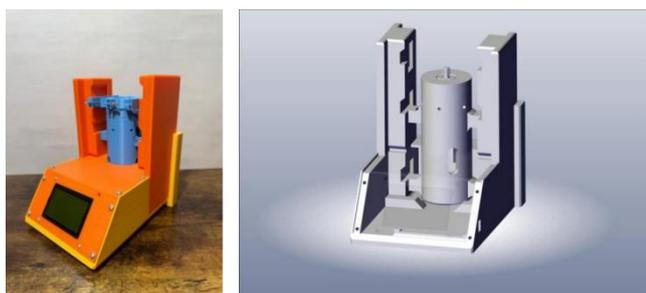


Fig1 实拍与电脑渲染的设备总装图

2.2 结构框架和模块化布局

在系统层面，框架定义了执行器和样品容器支架之间的相对几何形状，但框架本身不应成为不必要的刚性来源。因此，我们采用了模块化安装方式：关键功能模块设计成可滑入预设槽位，无需重新设计整个组件即可更换。实际上这种模块化设计有两个目的。首先，当某个组件需要调整或更换时，它可以减少停机时间；其次，它为可控的变更提供了空间——可以更换不同的支架、不同的垫片或不同的电机安装座，以适应不断变化的实验要求。

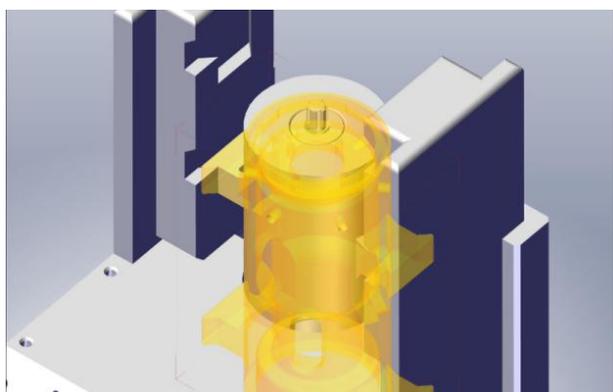


Fig2 用于固定电机安装座的模块化安装槽位

这种灵活性并非仅仅是为了方便，它改变了设备在实际实

验室中的使用方式。例如，在一种工作流程中，实验室可能优先考虑培养箱的紧凑性。模块化设计允许通过有针对性的替换来满足这些需求，而无需进行彻底的重新设计。

2.3 传动系统和对准公差

低成本制造中反复出现的机械挑战之一是对准公差。在我们的案例中，3D打印引入的微小偏差足以在旋转过程中导致传动轴产生可测量的角度偏移。尽管偏移量很小，但其下游影响在容器界面处被放大：摩擦力增大，磨损更加明显，旋转平稳性也会随时间推移而下降。我们没有试图消除所有误差来源（这需要高精度制造），而是将公差视为一种预期情况，并专注于提高系统的抗干扰能力。我们的措施被证明非常有效。解决方案是在关键界面附近添加一个带有嵌入式轴承的稳定元件，以限制轴的运动，从而限制角度偏差的传播，并提高运行的重复性。从系统层面来看，模块化设计再次展现了其实际优势：轴的几何形状、稳定环和电机联轴器都可以独立更换。当实验室遇到不同的容器几何形状、不同的磨损模式，或者仅仅是不同的打印公差时，通常只需进行针对性的更换，而无需进行全面检修，即可恢复系统的稳定运行。

2.4 容器支架的弹性悬挂

虽然轴稳定装置减少了角度偏差，但容器界面处的摩擦和磨损仍然是一个需要关注的问题，尤其是在负载下仍存在轻微倾斜的情况下。这促使我们做出了一项设计决策，事后看来，这项决策成为了原型机中最实用有效的特性之一：通过弹性悬挂机构，有意地赋予容器支架有限的角度柔性。容器支架并非刚性锁定在固定位置，而是使用四个拉伸弹簧进行悬挂，使其能够在可控范围内“跟随”旋转轴的微小角度变化。

这种弹簧悬挂式支架并非纯粹出于理论设计，而是源于反复试验。在刚性支架结构中，轻微的角度偏移会增加旋转内部元件与容器壁之间的接触压力，从而加速磨损。引入弹性柔性改变了机械相互作用：支架可以进行小角度的自调节，从而减少导致摩擦损失的相对偏差。在长时间运行过程中，与早期的刚性安装相比，磨损显著减少，并且该系统在重复运行中保持了更平稳的旋转性能。

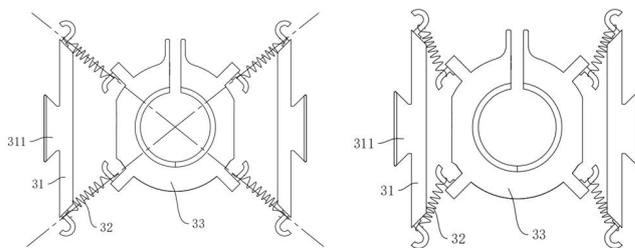


Fig3 弹簧减震器的设计草图

这种悬挂策略也受益于模块化设计。由于减震器是一个可

更换的模块,因此可以通过简单的替换来调节悬挂系统而无需更改平台的其他部分,例如更换不同刚度的弹簧、不同的容器固定夹具。

3 电气控制和电源配置

控制电子设备的设计基于一个实际假设:生物样品处理可能在多种环境下进行,包括便携式实验台和封闭环境(例如培养箱)。因此,该系统支持电池供电和外部交流电源,用户能够在不更换硬件的情况下,根据便携性选择延长运行时间。系统集成可调节的速度和时间参数,以便根据不同的实验需求调整运行曲线,并且速度读数可在运行过程中提供即时反馈。这种基于通用电子模块的设计思路,与近年来在科研仪器中采用开放式电子系统以提高可维护性和可替代性的实践相一致^[3]。

虽然显示的电机速度与内部接口处的实际转速并不完全一致(机械链中不可避免地存在传输损耗),但我们的观察表明,读数仍然足以提供足够的信息,以确保在预期范围内实现可重复的操作。电气模块也被设计为可更换的:只要平台提供稳定的电源、可控的速度和定时功能,就可以根据可用性和用

户偏好更换特定的控制器板或电源子系统,这种设计选择符合在资源受限的环境中实现长期运行的目标。

4 总结

综上所述,该平台展现了一种设计理念,即把制造公差、工作流程差异和组件可用性等可变性视为预期现实而非例外。通过结合模块化结构、针对性地稳定传动链以及在容器支架处特意引入柔性,该系统在初步使用中实现了稳定的旋转性能,同时保持了机械结构的透明性和适应性。这种适应性并非无关紧要的附加优势:它允许关键子系统在约束条件发生变化时进行替换,无论这种变化是由新的容器几何形状、不同的耐久性要求还是零件采购的实际限制所驱动。

由此可见,该原型可作为可定制实验室仪器开发的参考框架。它表明,当设计重点放在对准公差、磨损管理和可维护性上时,低成本方案也能保持功能可靠性——当设备旨在支持在难以获得昂贵集成系统的环境中开展的探索性研究时,这些特性尤为关键。该设备仅用于探索性研究目的,并非旨在替代任何商业系统。

参考文献:

- [1] Pearce,J.M.(2012).Building research equipment with free,open-source hardware.Science,337(6100),1303-1304.
- [2] Wenzel,T.(2023).Open hardware:From DIY trend to global transformation in access to laboratory equipment.PLoS Biology,21(1): e3001931.
- [3] Oellermann,M.(2022).Open Hardware in Science:The Benefits of Open Electronics.