
哈爾濱工業大學

基于项目学习的毕业设计 项目进展报告

项目名称：基于介电弹性体的双稳态柔性驱动器设计

院（系）	机电工程学院
专 业	机械电子工程
学 生	刘一得
学 号	6140850511
班 号	1436305
指导教师	闫继宏
日 期	2018.3.29

哈尔滨工业大学机电工程学院

2018 年 3 月制表

说 明

一、进展报告应包括下列主要内容：

1. 阶段计划要点和调整情况；
2. 研究工作主要进展和阶段性成果；
3. 下一阶段工作计划；
4. 经费使用情况与下一阶段经费预算；
5. 项目执行过程中存在的问题及解决措施；
6. 论文按时完成的可能性。

二、报告的电子版请通过《机电学院本科毕业设计管理系统》上传，
由指导教师在线评阅。

三、报告需用 A4 纸双面打印，左侧装订，统一交所在院（系）保存，
以备检查。

四、此说明页不得删除。

1 阶段计划要点的调整情况

1.1 研究内容阶段划分

本课题基于介电弹性体作为柔性驱动器的电致变形响应特性，结合六杆机构的变形特性，设计一个由介电弹性体驱动的六杆运动机构，既可以作为一个电致动的驱动器，又可以作为一个独立的滚动机构。采用目前国际上通用的 3M 公司的 VHB 胶带作为介电弹性体，基于理论分析和实验测量获得这种材料作为驱动器的输入输出特性，设计出合适的驱动器搭载在六连杆上。对于六连杆采用 3D 打印的制造手段，改变其结构尺寸以适配所搭载的介电弹性体驱动器。

本课题研究的主要研究阶段如下：

1) 设计制造基于 VHB 的介电弹性体驱动器

采用国际上通用的 VHB4905(0.5mm 厚度)和 VHB4910(1mm 厚度)两种胶带作为介电弹性体。运用 neo-Hookean 模型和 gent 模型分析材料的双轴预拉伸对其电致变形的影响。并根据模型推导的结果设置合适的双轴拉伸比率并进行实验，制造合适的 VHB 驱动器。

2) 设计制造适配 VHB 驱动器的连杆机构

根据用 VHB 制成的驱动器的电致变形特性和力的输出特性，设计合理的连杆长度尺寸以便最大程度的发挥 VHB 的变形性能。设计合适的限位结构避免，VHB 的电致变形过大导致回复到平衡状态需要的电压超过其驱动的击穿电压。设计合适的结构以安装双轴预拉伸的 VHB 驱动器。设计合适的阻尼，以抵消 VHB 材料预拉伸的细微不对称，便于机构达到平衡。

3) 加载电压进行驱动实验

在完成运动机构的设计和安装工作后，对整体机构进行通电驱动实验，评估机构的输入输出特性。

1.2 研究进度及调整情况

已完成的工作有：1.VHB 材料的单轴拉伸实验，横向预拉伸并用框架固定后的纵向单轴拉伸实验，无横向单轴拉伸和有横向单轴拉伸的通电驱动实验;2.根据 neo-Hookean 模型和 gent 模型两种分析软材料电致应变的模型编写程序寻找合适的预拉伸比率用于设计实验并且已经取得了很好的成果;3.加工安装搭载 VHB 驱动器的连杆原型机并进行通电测试。在实验中发现，如果不对 VHB 驱动器进行横向预拉伸，通电情况下其纵向的形变太小，且驱动电压会显著提高。目前把工作重心放在寻找合适的横向预拉伸比率以提高驱动效果，降低驱动电压，

同时由于进行了横向拉伸的 VHB 驱动器尺寸相较于没有预拉伸的驱动器尺寸增大较多，因此需要改进连杆机构以适应驱动器的尺寸变化。

2 研究工作主要进展和阶段性结果

2.1 VHB 驱动器的分析和设计

2.1.1 VHB 材料的理论研究

对于单个 VHB 驱动器，其电致变形的本质是介电弹性体薄膜两侧涂覆的电极在被施加电压后积累了异性的电荷，电极上符号相反的带电粒子引起介电高弹聚合物薄膜变形。描述这一个电致变形的过程的模型有 neo-Hookean 模型、Arruda 模型、Boyce 模型和 Gent 模型。在一个高弹聚合物中，每一条单独的聚合物链都有有限的构型长度。在没有外载情况下，聚合物链是卷曲的，存在大量可能的构形。受到载荷后，聚合物的链部分拉直。荷载继续增加后，每条聚合物链的两端距离逐步达到有限的构型长度，高弹聚合物达到拉伸极限。接近拉伸极限的时候，高弹聚合物急剧刚化，neo-Hookean 模型不能反映该效应，但是 Arruda 和 Boyce 模型和 Gent 模型可以描述这个过程。

因此，选用 neo-Hookean 模型和 gent 模型这两种材料的本构模型编程研究材料的特性。在变形量较小时（拉伸比 $\lambda_1 < 2$ ）neo-Hookean 模型和 gent 模型都可以较好的拟合材料的电致变形特性但 neo-Hookean 模型的计算量较小。在变形量较大时（ $\lambda_1 \geq 2$ ）gent 模型可以较好的拟合材料的电致变形特性。

neo-Hookean 模型的形式是：

$$W_s = \frac{\mu}{2} (\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 - 3)$$

在厚度方向施加电压，厚度方向的形状变化可以忽略，对模型进行简化，

$$s_1 = \mu(\lambda_1 - \lambda_1^{-3}\lambda_2^{-2}) - \frac{D^2}{\varepsilon}\lambda_1^{-3}\lambda_2^{-2}$$
$$s_2 = \mu(\lambda_2 - \lambda_2^{-3}\lambda_1^{-2}) - \frac{D^2}{\varepsilon}\lambda_2^{-3}\lambda_1^{-2}$$

其中 s_1 是纵向的名义应力， s_2 是横向的名义应力， D 是厚度方向的名义电场强度 $D = \frac{\Phi}{H}\varepsilon\lambda_1^2\lambda_2^2$ 。对于横向有预拉伸，纵向有预拉伸，横向自由边界 $s_2 = 0$ ，解 λ_1 。最终解算出 λ_1 的形式是：

$$\lambda_1 = ((\frac{D^2}{\varepsilon} + \mu)/\mu \lambda_2^4)^{-\frac{1}{2}}$$

带入求解 s_1 。

设定加载电压 ϕ 和横向预拉伸比率 λ_2 ，材料厚度 $H = 0.001\text{m}$ ，材料的介电常数 $\varepsilon = 4.7 \times 8.85 \times 10^{-22}$ 编写程序。

gent 模型的形式是：

$$W_s = -\frac{\mu J_{\text{lim}}}{2} \log(1 - \frac{\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 - 3}{J_{\text{lim}}})$$

在厚度方向施加电压，厚度方向的形状变化可以忽略，对模型进行简化，

$$s_1 = \frac{\mu(\lambda_1^2 - \lambda_3^2)}{\lambda_1(1 - (\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 - 3)/J_{\text{lim}})} - \frac{D^2}{\varepsilon} \lambda_1^{-3} \lambda_2^{-2}$$

$$s_2 = \frac{\mu(\lambda_2^2 - \lambda_3^2)}{\lambda_2(1 - (\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 - 3)/J_{\text{lim}})} - \frac{D^2}{\varepsilon} \lambda_1^{-2} \lambda_2^{-3}$$

其中 s_1 是纵向的名义应力， s_2 是横向的名义应力， D 是厚度方向的名义电场强度 $D = \frac{\phi}{H} \varepsilon \lambda_1^2 \lambda_2^2$ 。对于横向有预拉伸，纵向有预拉伸，横向自由边界 $s_2 = 0$ ，解 λ_1 。最终解算出 λ_1 的形式是：

$$\lambda_1 = (\frac{1 - \frac{\lambda_2^2 + \lambda_3^2 - 3}{J_{\text{lim}}}}{\frac{1}{J_{\text{lim}}} + \frac{\mu \varepsilon}{D^2} \lambda_2^4})^{\frac{1}{2}}$$

带入求解 s_1 。

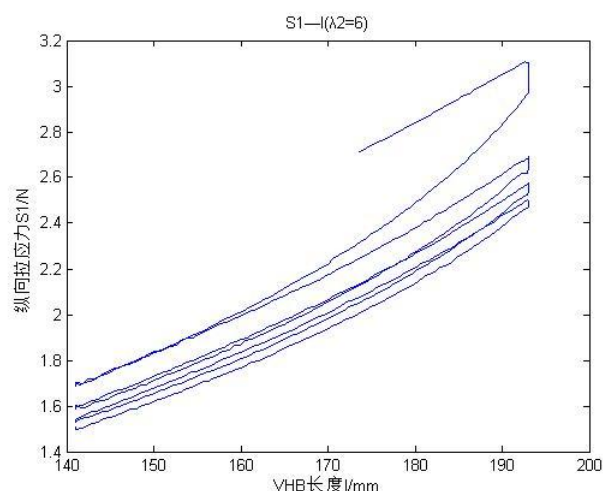
设定加载电压 ϕ 和横向预拉伸比率 λ_2 ，材料厚度 $H = 0.001\text{m}$ ，材料的介电常数 $\varepsilon = 4.7 \times 8.85 \times 10^{-22}$ 编写程序。

2.1.2 VHB 材料的性能测试

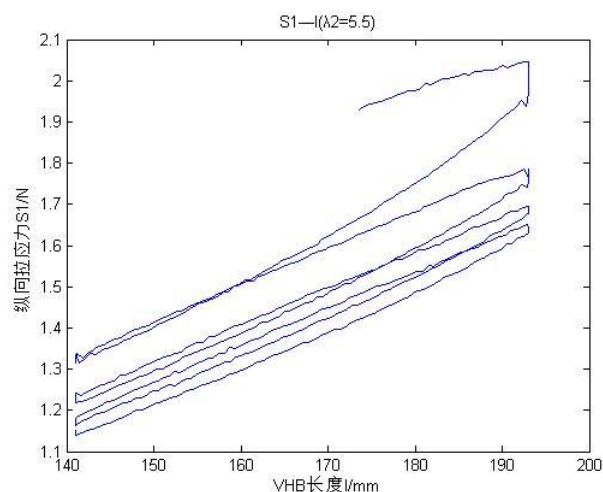
由于本课题以 VHB 这种介电弹性体作为驱动器设计机器人，所以 VHB 作为驱动器的输出能力和输入输出特性对于课题的研究和设计工作来说特别重要。

在结构设计中，计划将 VHB 拉到 173mm 长，因此取预拉伸比率为 3, 3.5, 4, 4.5, 5, 5.5, 6 这几个预拉伸比率计算 VHB 的原长计算其经过预拉伸后输出的力的量级，观察粘弹性材料在变形后的蠕变效应。

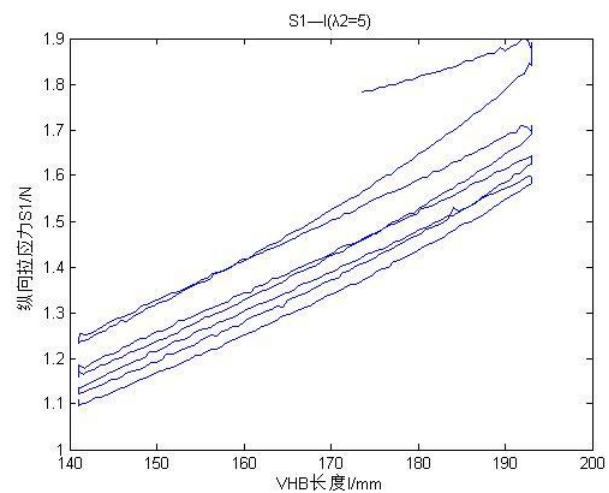
具体的实验方案为，剪下一系列长度的，宽为 15mm 的 VHB 胶带，固定在 HF-9002 电脑式拉力试验机上，编写测试程序同时记录数据。测试程序均为：先将 VHB 预拉伸到 173mm，然后夹具运动以 50mm/min 的速度将材料拉伸至 190mm，停滞十秒观察蠕变效应，又以 50mm/min 的速度移动到 140mm，停滞十秒观察蠕变效应，往复三次，同时仪器记录下材料的应力随变形的变化曲线。（图 2-1a,b,c,d,e,f,g）



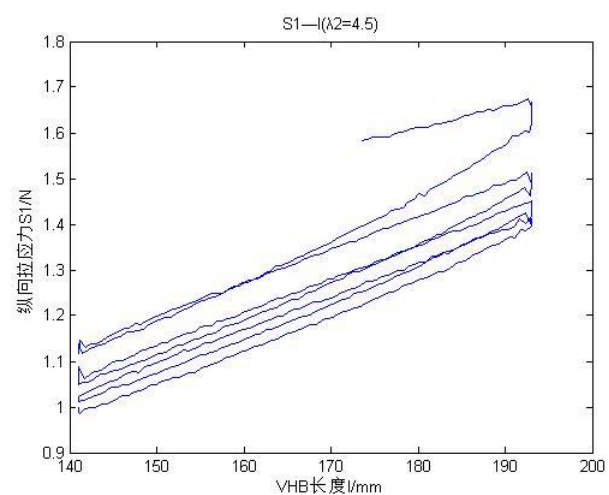
2-1 a 纵向初始预拉伸 $\lambda = 6$



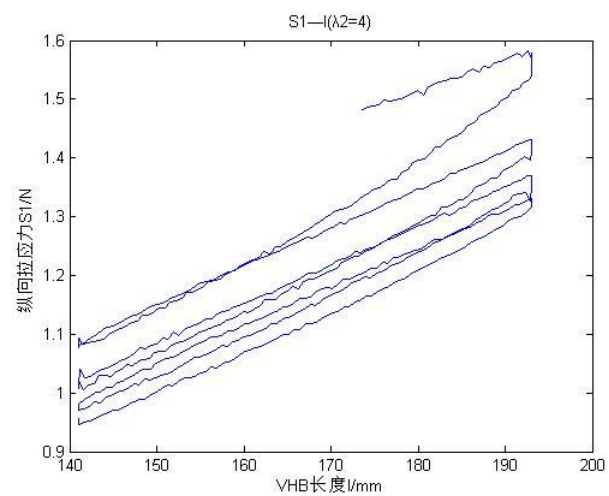
2-1 b 纵向初始预拉伸 $\lambda = 5.5$



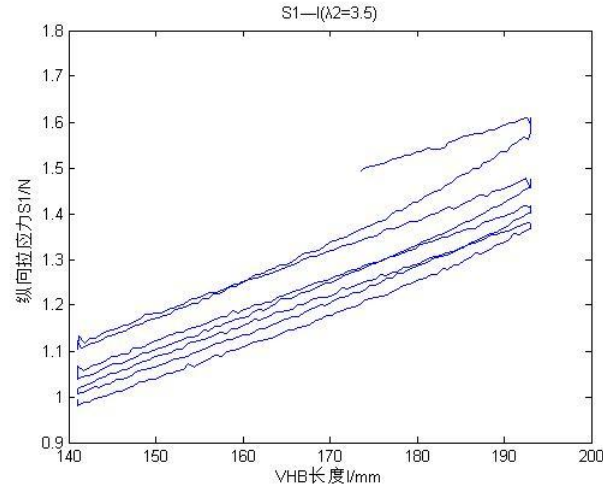
2-1 c 纵向初始预拉伸 $\lambda = 5$



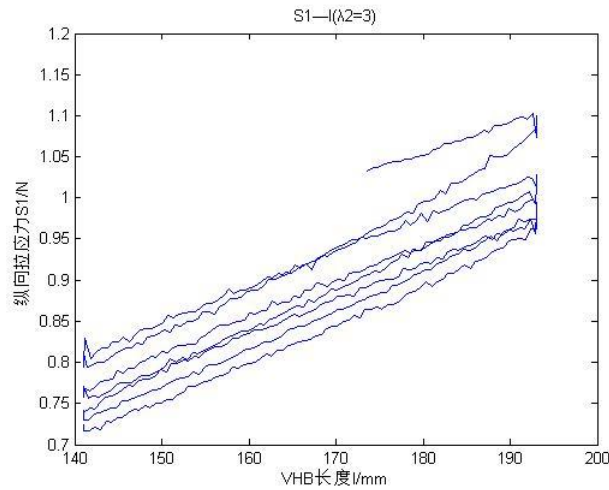
2-1 d 纵向初始预拉伸 $\lambda = 4.5$



2-1 e 纵向初始预拉伸 $\lambda = 4$



2-1 f 纵向初始预拉伸 $\lambda = 3.5$



2-1 g 纵向初始预拉伸 $\lambda = 3$

图 2-1 a,b,c,d,e,f,g 不同长度 VHB 拉伸的应力变化曲线

2.1.3 理论指导 VHB 驱动器的设计

VHB 作为驱动器时，如果横向设置了预拉伸，那么在加载电压作为驱动器后纵向的变形会更加容易。从 neo-Hookean 模型和 Gent 模型模型中都可以看出，如果横向的预拉伸较大，那么材料的厚度就会减小，因此施加同样的电压时有横向预拉伸的情况下，材料两侧名义电场就会变大，可以降低驱动电压，放大电致变形的效果。如果横向的预拉伸较大，通电后材料在纵向的名义应力变化也会更大。

本设计利用的是两个同等预拉伸的 VHB 驱动器，一根通电，一根不通电产

生的力的差来驱动，因此要将 VHB 的电致变形和电致应力变化尽量放大。

利用 gent 模型计算，设定加载电压为 5KV，计算在不同的横向预拉伸比率下，通电前后纵向名义应力的比值，并输出成一条曲线。（图 2-2）

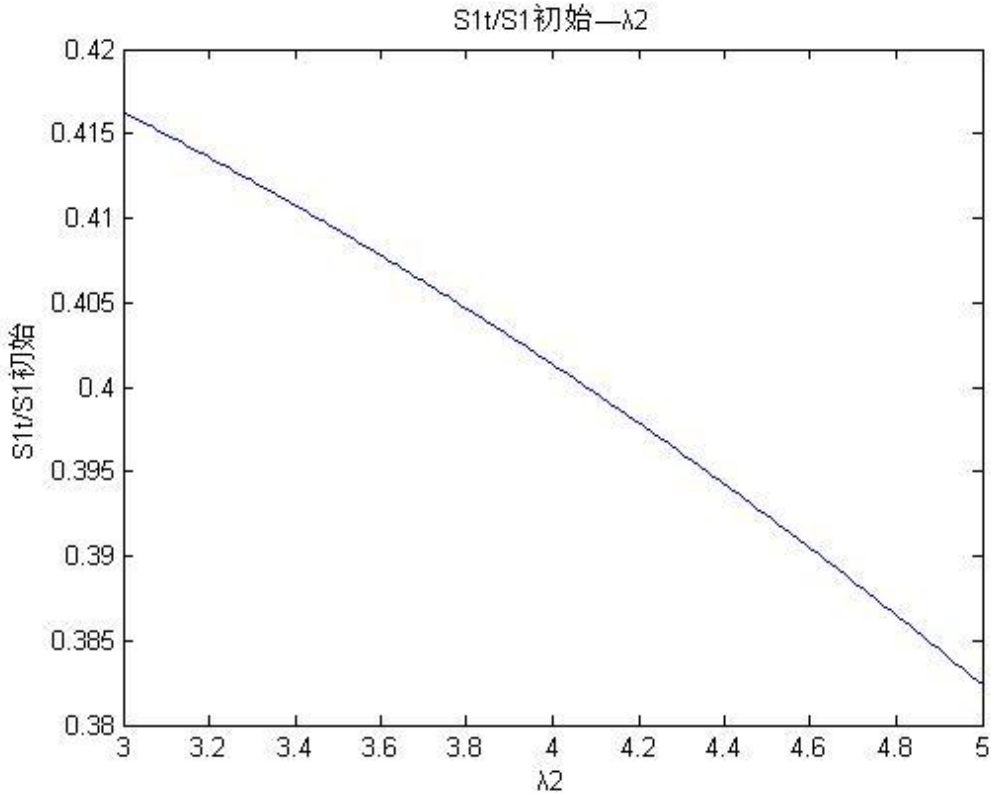


图 2-2 应力变化-预拉伸比率

图上的横坐标表示的是 VHB 的横向预拉伸比率，纵坐标表示的是材料通电前后名义应力的比值。可以发现随着横向预拉伸比率的提高，材料通电后纵向的名义应力相对于没有加载电压时的名义应力不断减小。在横向预拉伸比率为 4 时候，材料的通电后的纵向名义应力仅为通电前纵向名义应力的百分之四十，这较为符合机构的驱动特性，同时 4 倍的横向预拉伸较好控制，因此将材料的横向预拉伸比率设定为 4 制作 VHB 驱动器。

2.2 高性能 VHB 驱动器的制作和驱动实验

2.2.1 高性能 VHB 驱动器的制作工艺

对 VHB 驱动器实现横向预拉伸较为困难，整个过程需要先将两片 VHB 胶带先预拉伸到相同程度，在其中一片 VHB 上横向放置刚度较大的纤维以维持其预拉伸变形，再将另一边预拉伸的 VHB 粘贴在放置了纤维的 VHB 上，形成一个三明治的结构，纤维被夹在两层 VHB 中间，接着将包裹纤维的 VHB 沿着纵向剪下，即制成了横向有预拉伸的 VHB 驱动器。

为了解决将两个预拉伸的 VHB 粘到一起，我设计了一个简单的夹具，用亚克力切割拼装制作，可以维持 VHB 的横向预拉伸。（图 2-3）

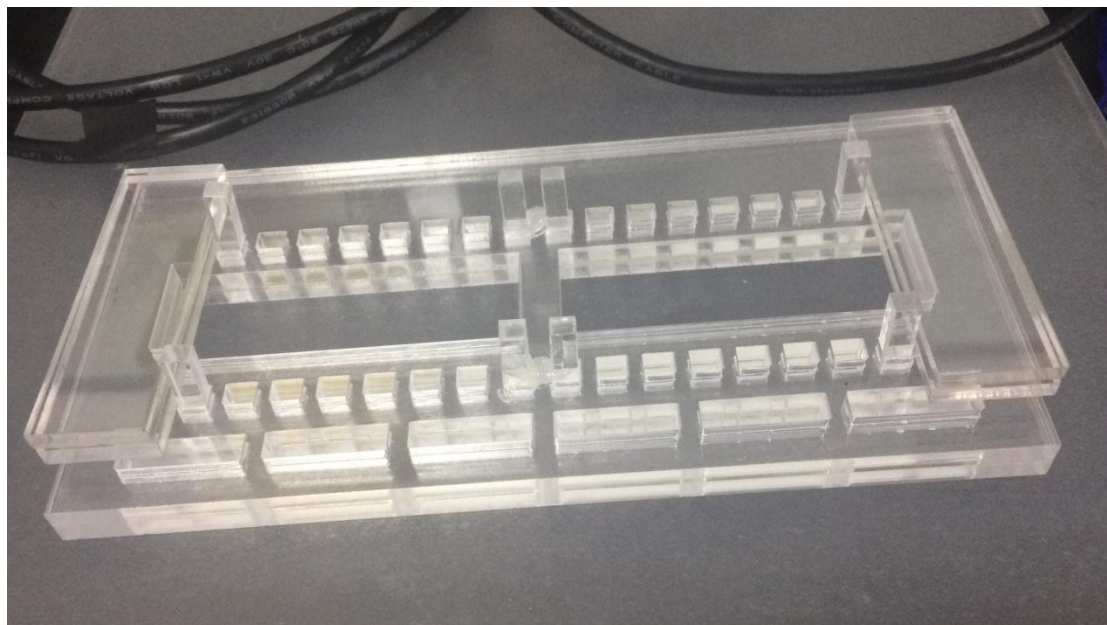


图 2-3 VHB 驱动器制作夹具

制作高性能的 VHB 驱动器遇到的另一个问题是用于维持横向预拉伸的纤维的选材和制作。参考文献中使用的是刚度较大的玻璃纤维和金属纤维，但是对于大尺寸的 VHB 驱动器来说这些材料的刚度仍然太小，因此我选用了鱼线作为支撑材料，制造出了一个 VHB 驱动器。（图 2-4）

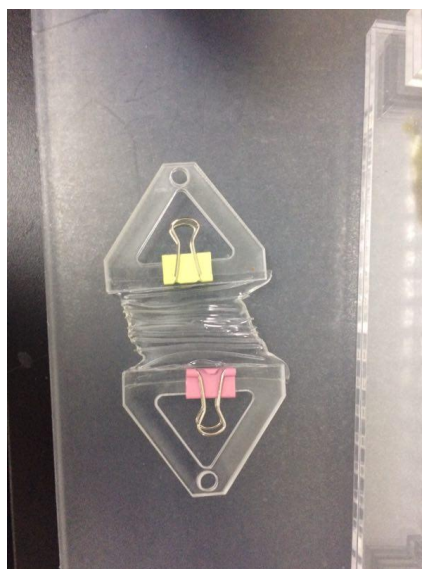


图 2-4 用鱼线维持横向预拉伸的 VHB 驱动器

经过实验发现，鱼线的刚度仍然不够，随着纵向的载荷增加，VHB 横向对鱼线的力太大导致了鱼线的错位和变形，使横向预拉伸的效果有明显的减弱，因此改变了方案，采用刚度更大的亚克力切割出规格为 $40\text{mm} \times 2.5\text{mm} \times 2\text{mm}$ 的

长条代替鱼线。(图 2-5)。

将第二层预拉伸的 VHB 粘贴上，剪下有亚克力维持的部分，即制成了用亚克力维持预拉伸的 VHB 驱动器。(图 2-6)

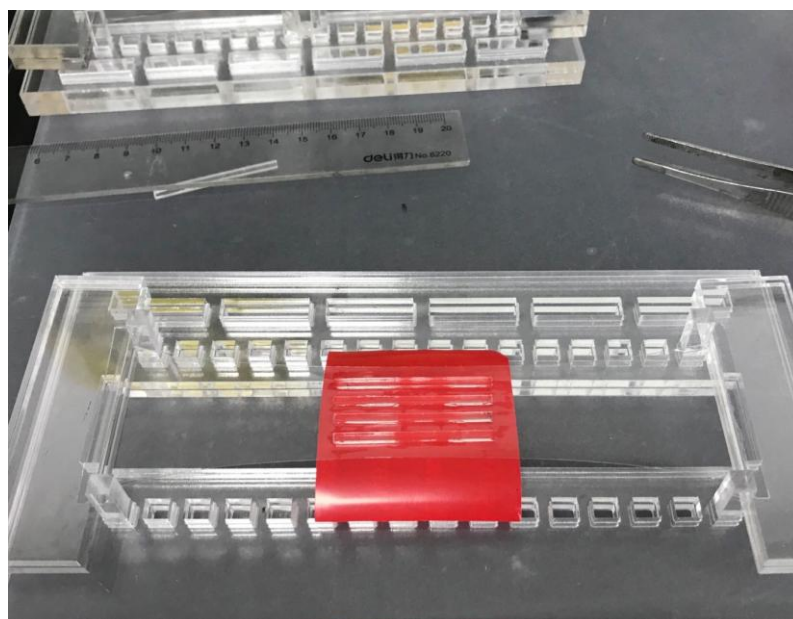


图 2-5 用亚克力条维持横向预拉伸的 VHB 驱动器

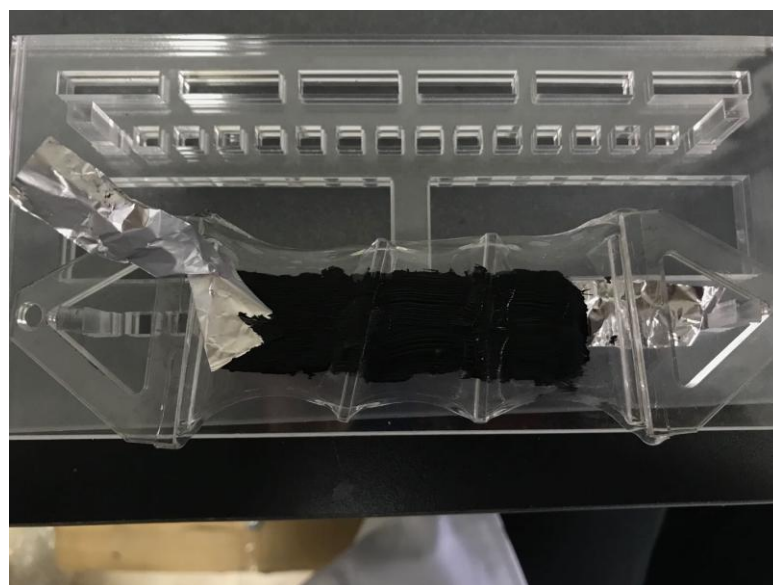


图 2-6 涂覆了柔性电极并用锡纸引出的 VHB 驱动器

2.2.2 高性能 VHB 驱动器的驱动实验

将 VHB 驱动器一端固定，另一端悬挂砝码提供静载荷，将型号为 TReK MODEL 610E 的高压电源夹头夹持在由电极两侧引出的锡纸上，通电并不断加压观察 VHB 驱动器的变形。(图 2-7)

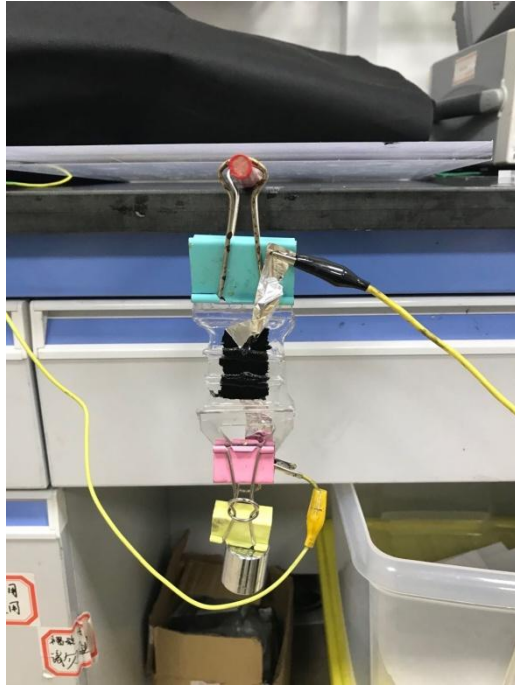


图 2-7 VHB 驱动器通电驱动实验

经过制造工艺的改进，最终制成了性能较好的 VHB 驱动器，纵向预拉伸静载荷 3.2N，在 4KV 时可以观察到变形，9.9KV 时击穿（图 2-8 2-9），在 8KV 时电致变形可以达到 4 倍（图 2-10）。

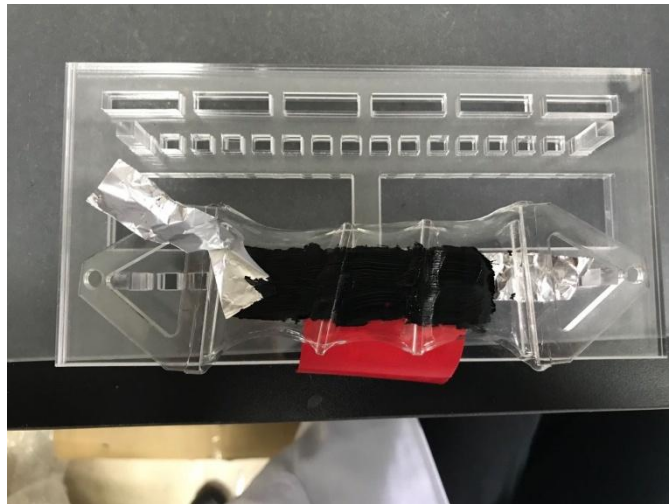


图 2-8 击穿的 VHB 驱动器

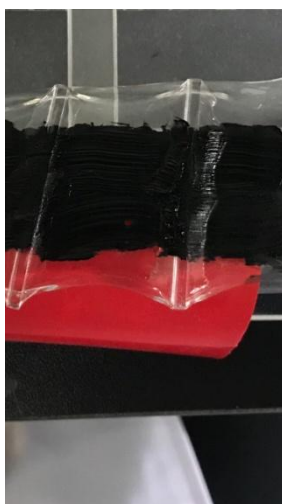


图 2-9 局部击穿的放大观察



图 2-10 纵向伸长量达到 4 倍的 VHB 驱动器

2.3 机构的设计加工和改进

2.3.1 原型机的设计加工和驱动实验

利用 Solidworks2014 绘制连杆的机构模型并利用 3D 打印机加工模型，安装 VHB，验证机构的平衡和运动原理。（图 2-11）



图 2-11 第一代机构原型机

2.3.2 连杆机构的改进

制造出原型机之后暴露了许多问题：1.使用的 VHB 太多，驱动时难以走线。2.在不通电的情况下，由于 VHB 的粘弹性，其应力一直在发生变化，因此结构很难维持平衡。3.由于缺少限位结构，VHB 很容易把连杆拉过死点导致机构难以复原。

针对以上三点问题，重新绘制了机构的三维模型（图 2-12），减少了 VHB 的使用数量，增加了一个阻尼设计用于帮助机构在初始状态下平衡，增加了一个纤维设计防止连杆转动到极端位置难以复原。

利用 3D 打印技术制造了新版本的连杆同时搭载 VHB 进行平衡测试（图 2-13），结构的稳定性有了极大的提高，但是由于减少了 VHB 驱动器的数量，因此驱动能力有不足，需要提升单根 VHB 驱动器的驱动能力，因此对这种材料进行了理论的模拟。

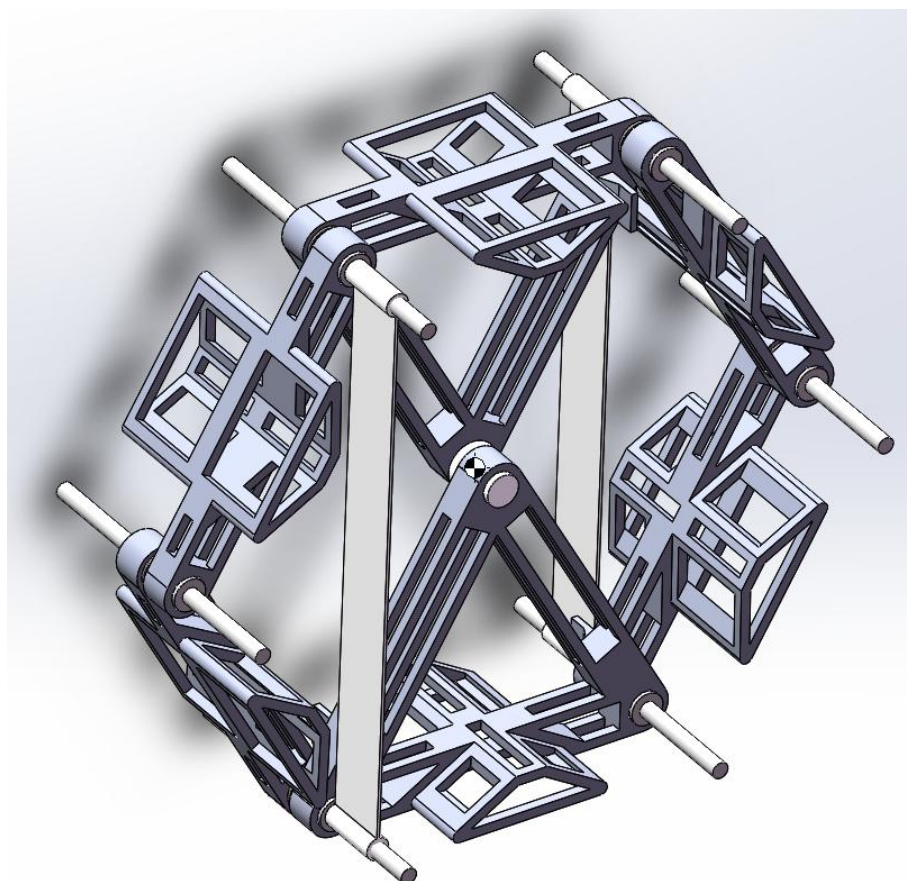


图 2-12 改进后机构的三维模型

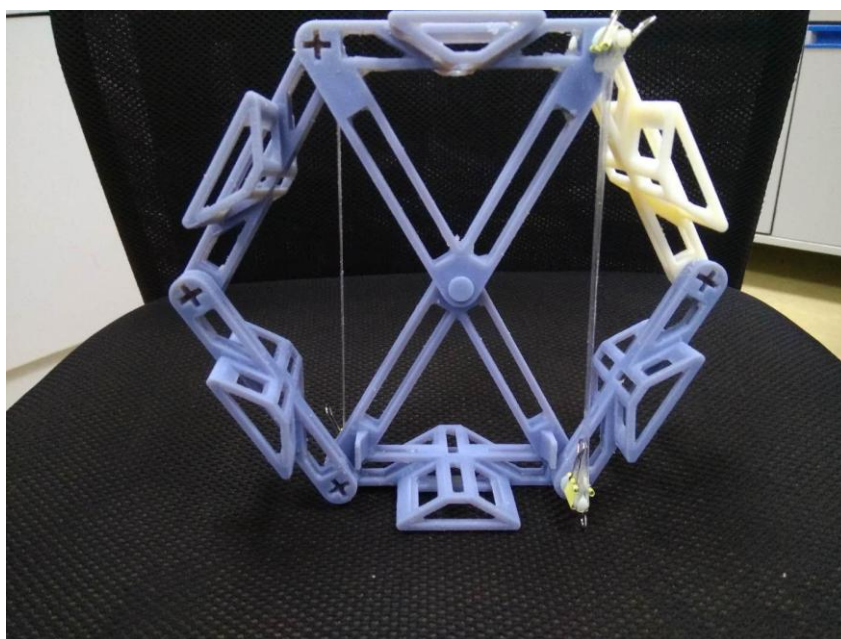


图 2-13 改进后的机构

3 下一阶段工作计划

3.1 后期拟完成的研究工作

(1)改进 VHB 驱动器的制作工艺和预拉伸得参数，降低驱动电压的同时提高驱动器的驱动特性。

(2)修改连杆的结构以适配搭载的 VHB 驱动器，提升机构的运动性能。

(3)装配出运动性能较好的的六连杆机器人并测试他的运动能力和作为驱动器的输入输出特性。

3.2 进度安排

表 3-1 进度安排表

时间安排	工作内容
2016.04-2016.05	制造出性能更好的 VHB 驱动器，改进连杆机构以适配驱动器的尺寸和驱动能力，加工并组装机器人。
2016.05-2016.06	对机器人进行通电驱动实验，分析处理实验数据，总结本课题研究的内容，撰写论文。

4 经费使用情况与下一阶段经费预算

目前经费主要用在 3D 打印制作机构上，下一阶段的经费也主要花费在 3D 打印机构零件上。VHB 胶带，碳膏，亚克力等属于正常的实验耗材。实验室经费充足。

5 项目执行过程中存在的问题及解决措施

(1) VHB 制成的驱动器在横向由于没有预拉伸导致驱动电压极大，通电加载后 Maxwell 力效应不明显，用作驱动器输出能力不好。解决措施是根据材料本构模型建立双轴拉伸的电致动计算机模型，寻找合适的横向预拉伸比率。

(2) 实现横线预拉伸需要在 VHB 胶带中加入纤维保持其横向预拉伸的效果，整个操作较为复杂。解决措施是设计一套夹具保持 VHB 的横向预拉伸同时进行加入纤维的操作。

(3) 维持横向预拉伸加入的纤维要求较高，以往的文献由于 VHB 的横向拉伸应力较小，驱动器的整体尺寸较小，使用玻璃纤维和纳米碳管就可以完成，而我

设计的 VHB 驱动器尺寸和输出的力都很大，上述材料的刚度都达不到要求。解决方法是使用 2mm 厚的亚克力切出 $40\text{mm} \times 2.5\text{mm}$ 的细条代替纤维做维持横向预拉伸的支撑，达到了较好的效果。

6 论文按时完成的可能性

已经完成了制定的计划中的目标，但同时在实验的过程中也暴露了许多问题。因此在上半学期的后两周我做了大量的理论工作以指导实验并达到了很好的效果，可以按时完成毕业论文。