

编号:

# 哈尔滨工业大学

## 大一年度项目立项报告

项目名称: 用于狭小空间探测的藤蔓仿生机器人

项目负责人: 刘远霆 学号: 1190100211

联系电话                      电子邮箱                     

专业集群: 航天与自动化 辅导员: 张亚龙

指导教师: 林国昌 职称: 副教授

联系电话                      电子邮箱                     

院系及专业: 航天学院

哈尔滨工业大学基础学部制表  
填表日期: 2019 年 11 月 6 日

### 一、项目团队成员（包括项目负责人、按顺序）

姓名	性别	所在专业集群	学号	联系电话	本人签字
刘远霆	男	航天与自动化	1190100211		
王帅	男	航天与自动化	1190100219		
朱成涛	男	航天与自动化	1190100221		
刘伟峻	男	航天与自动化	1190100226		

### 二、指导教师意见

签 名：_____		
年      月      日		

### 三、项目专家组意见

批准经费：_____元	组长签名：_____	（ 学部盖章 ）
年      月      日		

## 四、立项报告

### （一）立项背景（研究趋势、现状等，参考文献和其它有关背景材料）

#### 1.研究趋势

近年来，在自动化需求的强劲带动下，全球掀起了一股机器人发展的热潮，形形色色、各具功能的机器人产品，开始频繁出现在我们的视野之中。但不管是工业级的机器人，还是消费级的机器人，它们普遍透露出冰冷和僵硬的感觉，“钢铁战士”的形象不仅拉远了与人的距离，还在一定程度上限制了自身的应用。在这样的背景下，“柔性机器人”概念开始逐渐被提出。通过柔软材料的利用，驱动方式的创新，人们希望机器人能够拥有更好的环境适应性、安全性以及人机互动能力，以此在先进制造业中可以发出更大的价值。

毫无疑问，柔性机器人作为一种新型产品，充满了科学家式的浪漫，但这却不是科学家们“柏拉图式”的空想。从 2015 年开始，伴随着我国科学家成功论证液态金属柔性机器人的可能性之后，柔性机器人便已经实现了理论与技术的突破，后续相关成果也越来越多的出现在我们面前。而从逐渐面世的产品中，我们也对柔性机器人有了更清晰的认识。简单来说，柔性机器人需要具备材料的柔软性、优良的环境适应性、超强的安全性，以及良好的人机互动性，需要破除传统机器人关节的僵硬和材料的刚强，朝着更轻、更软、更协调、更自主的方向发展。

#### 2.研究现状

柔性机器人主要分为两类：一类是工业柔性机器人，另一类是生物柔性机器人，它们因为领域应用的不同，其定义也相去甚远。其中工业柔性机器人是从制造业的角度定义的，专指运用机器视觉的六轴以上工业机器人；而生物柔性机器人则是从生物学角度来讲的，主要指模拟生物柔性与灵活性创造的仿生机器人。目前，柔性机器人在医疗、装备、生产、探索、军事等领域发展迅速。

(1)医疗领域。医疗领域是柔性机器人典型性和商业度较高的应用领域，潜力空间估值接近 75 亿美元。医疗机器人的柔性化运用可以分为手术、康复、护理、救援、转运等多个环节，以手术机器人的临床性和产业化程度为佳。而达芬奇手术机器人代表了柔性机器人在该领域的一定水平，其三个关键核心技术：可自由运动的手臂腕部、3D 高清影像技术、主控台的人机交互设计，分别对应了柔性机器的机器感知、机器行动和人机交互。业内专业人士预测，柔性化的手术机器人在国内潜在市场空间约为 136 亿元/年，考虑潜在购买方需求数量以及适应症市场规模两方面因素，中性估算未来国内手术机器人规模将达到 75 亿元/年。柔性机器人在医疗领域的发展空间十分巨大，其中，手术机器人在现阶段已经实现产业化和商业化，且大规模用于临床，如美国直觉外科公司（Intuitive Surgical）的达芬奇外科手术机器人（内窥镜手术器械控制系统）。实施手术时，主刀医师不与病人直接接触，通过三维视觉系统和动作定标系统操作控制，由机械臂以及手术器械模拟完成医生的技术动作和手术操作。

达芬奇手术机器人代表着当今手术机器人最高水平，它有三个关键核心技术：可自由运动的手臂腕部 EndoWrist、3D 高清影像技术、主控台的人机交互设计，这也分别对应了柔性机器的机器感知、机器行动和人机交互。

根据目前达芬奇手术机器人的技术水平以及全球其他相关技术的研发，申万宏源认为未来手术机器人的技术发展方向在于力触觉反馈系统、导航定位系统和自然腔道机器人系统，原因如下：

1)力触觉反馈系统：现阶段应用于腹腔镜临床手术的机器人大多采用视觉反馈系统，外科医生在控制机械臂做手术时，需要通过分析视觉信息，实时判断器械对组织的作用力以及其他组织特征，一定程度上影响手术效率。

2)导航定位系统：在手术导航系统出现之前，医生只能依靠内镜进行微创手术，或实施开放式手术。相比开放性手术，微创手术有创伤小的优势；相比内窥镜介导下的微创手术，手术导航系统导航下的微创手术有精度高、使用范围广的优势。

3)自然腔道机器人系统：是指通过自然孔口(口腔、肛门、阴道口、尿道口等) 进入腹腔或胸腔进行操作的一种外科手术。目前，有机构在达芬奇手术系统上进行 NOTES 动物实验，但临床推广极难<sup>[1]</sup>。

	传统开放手术	传统腹腔镜手术	达芬奇机器人手术
眼手协调	自然的眼手协调	眼手协调降低，视觉范围和操作机械的手不在一个方向	图像和控制手柄在同一个方向，符合自然的眼手协调
手术控制	术者直接控制手术视野，但不精细，有时受限制	术者须和持镜的助手配合，才能看到自己想看的视野	术者自行调整镜头，直接看到想看的视野
成像技术	直视三维立体图像但细微结构难以看清	二维平面图像，分辨率不够高，图像易失真	直视三维立体高清图像，放大若干倍，比人眼更清晰
灵活准确性	直观、灵活，但有时达不到理想的精度	机械只有 4 个自由度，不如人手灵活、精确	仿真手腕有 7 个自由度，比人手更灵活、准确
机械控制方式	直观的同向控制	套管逆转器械的动作，医生需反向操作器械	器械完全模仿术者的动作，直观的同向控制
稳定性	人手存在自然的颤抖	套管通过器械放大了人手的震颤	控制器自动滤除震颤，比人手稳定
创伤性	创伤较大，术后恢复慢	微创，术后恢复较快	微创，术后恢复较快
安全性	常规的手术风险	常规的手术风险外，存在一些器械故障的可能	常规的手术风险外，机械故障的概率大于腔镜手术系统
术者姿势	术者站立完成手术	术者站立完成手术	术者采取坐姿，利于完成长时间的手术

表 1 达芬奇手术机器人与传统手术方式的对比



图 2 医疗机器人功能模块图

(2)装备领域。提到外骨骼机器人，多数人想到的会是如钢铁侠一样的机械套装。但真正未来的外骨骼机器人应该是一种轻盈的、有弹性的外套。2018 年，哈佛一篇关于柔性外骨骼的文章发表在了《Science Robotics》上，这款机器人提供了整合面料设计、感应、机器人控制和驱动的新方法，以增加穿着者的力量、平衡和耐力。相比于硬邦邦的机械外骨骼，这种机器人具有很广的潜在应用价值。比如，他可以帮助老年人增强肌肉力量，支持他们的活动性和独立性，以及恢复因中风，多发性硬化症或帕金森病引起的运动障碍的儿童和成人等等。

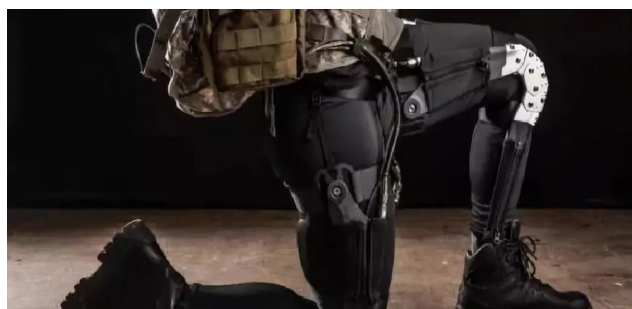


图 3 柔性外骨骼

(3)生产领域。英国机器人公司开发出一款蛇形机器人。该机器人是由短的部件，通过电缆链接的刚性管和制动器，最长有 202m。这个蛇形机器人是由电缆链接每个关节的电机和制动器，由机器人的基座进行控制操作。该机器人具有很大的灵活性，比人类的手臂活动范围要广，可弯曲超过 225 度，并与现实中的蛇一样轻盈精准的移动。这使得它能够进入人类维修工很难进入或者无法进入的环境中，绕过障碍物，精确的到达所需的位置。

这个装置采用“牵鼻子走算法（nose-following algorithm）”迫使身体其他部件准确的跟着头部路径前进。这意味着头部卷绕一个特定的障碍物或者特定的弯曲，身体的其余部分将执行完全一样的动作。它也能反方向复制动作，使它能够沿着相同的路径退回来。

迈阿密部署的蛇形机器人，能提供 6kg 的有效载荷，并配备了高压水枪和检查摄像头，使操作人员能够远程冲刷工程机械内部复杂的结构。这个装置还能配备其他各种工具，例如焊枪，以应付其他的需要。

该机器人被证明非常适合运行在悉尼 9km 长的 NorthConnex 隧道，检修里面的横向通风装置，以及城市现有的难以到达的通风装置，如 M5 隧道，Lane Cove and Cross City 隧道。它

也可以被用来维护和修理澳大利亚的资源行业，特别是地下采矿，以及高度复杂的大规模液化天然气设施，海上油气田等。

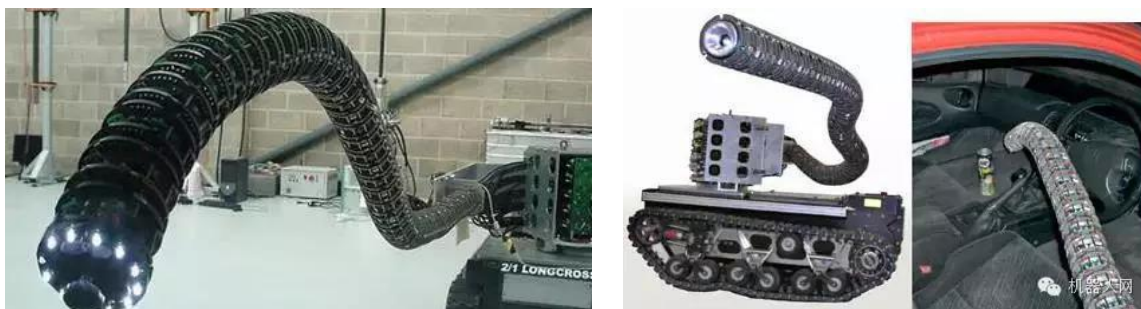


图 4 蛇形机器人(202m)

（4）探索领域。众所周知，海底世界是地球上资源最广又开采最少的自然环境，尽管人类可以说已经征服了海面，但海底依然是人们积极探索的一大宝库。除了丰富石油、矿物质等资源外，各种各样比人类存活要长很多很多的远古生物也是同样重要的科研素材，而这些生物大多是凝胶状的，非常不稳定，传统的捕获技术通常会破坏这些生物，并且神秘而未知的深海，对于潜水员来说也是一项极大的挑战，很有可能因为一个简单的失误，就会葬身海底。

哈佛大学的研究员们正在进行的研究，就是希望能使用一种柔性的机械臂以及机器人来代替人类完成这一工作。这是一款以折纸为灵感的机器人抓手，全名为 **rotary actuated dodecahedron** 缩写为 **RAD**，它看上去像一个 5 瓣的花朵，当机器人抓手的 5 个花瓣关合时，从外形上看是一个中空的十二面体，能够在观察到猎物时迅速关合并给猎物留下足够的空间。并在 AI 的控制下准确识别、追踪并对目标进行捕捉。

在测试中，这款成功的在水族馆中捕获并释放了水母，同时没有对其造成任何伤害，它还被搭载在一个小型水下机器人上，潜入海底 700m 进行深度测试，并捕获了鱿鱼、章鱼等标本。RAD 采样器的作者表示，这款机械臂的设计非常适合深海环境，因为它的控制非常简单，因此可以减少整体的负载，让机器人可以在水中运动更长时间。并且，它是模块化的，所以即便有什么部件坏了，我们可以简单地更换部件并将采样器送回水中，而且这种折叠设计也十分新颖，非常适合在太空中使用<sup>[2]</sup>。

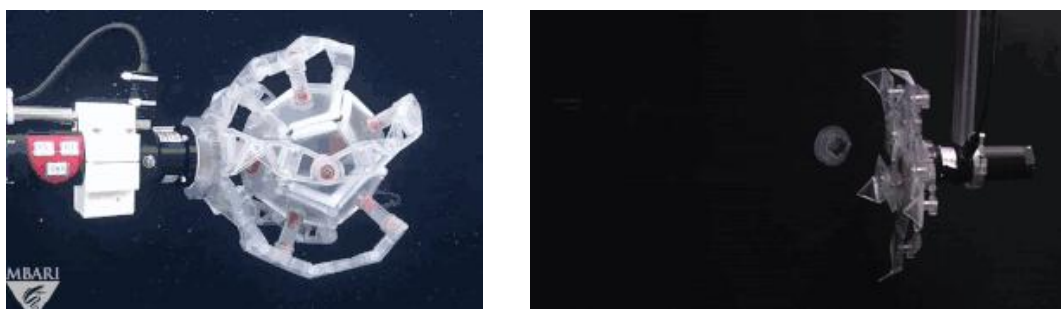


图 5 柔性机械爪

章鱼手机器人 **Octopus Gripper** 由气动的软硅胶结构构成。接通压缩空气后，触角将向内弯曲，并可根据各自外形，轻柔地包裹抓取物体。如同其自然原型一样，硅触角的内侧安装有两排吸盘。位于抓手顶端的小型吸盘被动发挥作用，而在较大的吸盘上则可以应用真空，以牢固地抓住物体。由此将吸附与缠绕两种方式结合，实现对多种不同形状、不同尺寸、不同摆放姿态物体的安全、无损、稳定抓持。相比传统刚性体机器人，仿生软体触手具备的柔性抓取特性使其可以更加高效、安全地与人类和自然界进行交互<sup>[3][4]</sup>。



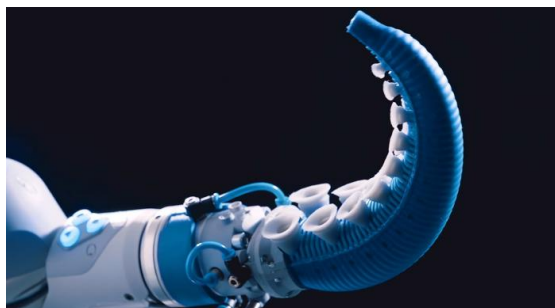


图 6 章鱼手机器人

(5) 军事领域。隐秘行动对于取得军事优势极为重要，有效的隐秘机动需要具备高度的结构柔性以及分布控制，能够模拟生物形态与适应性且长时间运转，以便潜入狭窄或受限空间。而美国陆军目前所使用的刚性结构机器人并不适合在城市环境中开展军事行动，两个主要的局限性限制了其进行柔性仿生运动：其一是这些机器人缺乏动态柔韧性，因为它们大多装有刚性的机械和电子部件；其二是刚性机器人需要复杂的机械结构和电子电路来实现主动致动以及复杂的运动模式。为克服当前军用机器人系统材料的刚性和运动限制，ARL 联合 UMN 展开了该项目研究。

在项目的起始阶段，研究团队首先研究了模拟无脊椎动物运动的新方法，这为其结构设计提供了启发，使得软分布式致动电路能够在没有骨骼支撑的情况下实现大幅弯曲运动。为了系统地了解各项参数的重要性，首先由 UMN 采用增材制造技术制造并测试与自然界中类似致动器的原型，其分布式致动电路包含柔软的弹性材料，物理性质与生物有机体（如头足类和蠕虫）类似。然后由 ARL 建立通用模型，对每个参数进行研究并预测最优致动机制。最终明确了使柔性仿生致动器实现大幅弯曲运动的两个关键机制：一是利用材料与力的非线性相互作用，优化材料的物理性质（力学和几何），从而实现运动增幅；二是通过分布式致动电路，增强电场与非线性结构刚度间的机电耦合。

该研究同时为士兵提供了一个可用于生产功能材料和设备的制造平台，士兵可以采用增材制造设备随时随地根据需求制造柔性致动器，这种完全采用增材制造技术制造的致动器，不需要装配、干燥、退火等后处理步骤。士兵仅需极少的专业技术、采用基本材料，即可充分发挥柔性 DEA 在狭小复杂空间的优点。这项研究表明，柔性致动器可以成为战场增材制造的主要候选产品。

## (二) 研究内容及实施方案

本项目主要研究内容如下：

- (1) 仿生蔓藤柔性机器人的结构设计
  - a) 主体结构设计；
  - b) 转向结构设计；
  - c) 气动控制设计
- (2) 仿生蔓藤柔性机器人的制备与试验测试
  - a) 柔性机器人的制备
  - b) 柔性机器人的运动试验测试

下面将根据研究内容详述实施方案：

### (1) 仿生蔓藤柔性机器人的结构设计的实时方案

本项目受藤蔓类植物的启发(如图 7 所示)，将设计一种可以可控伸展的柔性机器人。藤蔓

类植物是从顶端延长，所以不涉及植物本体与周围环境的相对运动，所以植物本体可以沿着约束路径延伸，而不与环境的接触而产生摩擦。此外，由于尖端的每一次移动都会导致植物本体的定向控制延长，植物本体将形成一个沿尖端路径的三维结构。项目基于藤蔓类植物的这种特性和能力，开发藤蔓类仿生机器人，可以实现顶端延伸和可控转向，用于探测狭小空间。



图 7 蔓藤类植物

该机器人基本模块设计如下图所示，主要由壳体（蓝色）、进气口排气口（红色）、电机（银色）、齿轮（绿色）、滚柱（黄色竖直圆柱）、延展体（黄色水平圆柱）组成，而其中的延展体又由外层、内层、延展尖端组成。壳体为密封结构，为维持内部气压提供条件；进气口连接泵气装置，在密封的条件下，通过增加内部气体体积使延展体的内层向前延伸；初始时，延展体像卫生纸把一样卷在滚筒上，延展后电机通过齿轮带动滚筒旋转从而使内层再次收回卷在滚筒上以实现回收。

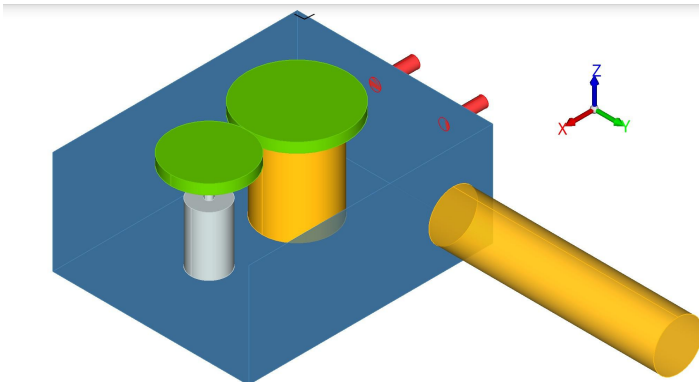


图 8 柔性机器人基本模块设计

**(1) 主体结构设计**

研究仿生机器人顶端延伸方法，顶端延伸的基本原理是基于内部压力驱动的薄膜的外翻使得在尖端处能够以相对较高的速度延伸。内部压力迫使倒置材料在尖端处翻转，同时通过主体的内芯从底部拉动更多薄膜材料。这种运动的原理是受生物界的脊椎动物展开内陷附肢方法所启发，在本项目中，使用气泵来驱动聚乙烯薄膜来实现该原理，气泵对仿生机器人本体内部施加压力，其原理如图 9 所示。该主体结构是可伸缩的设计，既可延长，也可回收；薄壁容器在几何缩放过程中，其外壁应力保持不变，可实现壁厚与直径的比值可以保持恒定。此外，该仿生机器人的延伸长度完全由事先存储的薄膜材料数量和气动系统所能提供的压力决定，具备相当强的可扩展性。



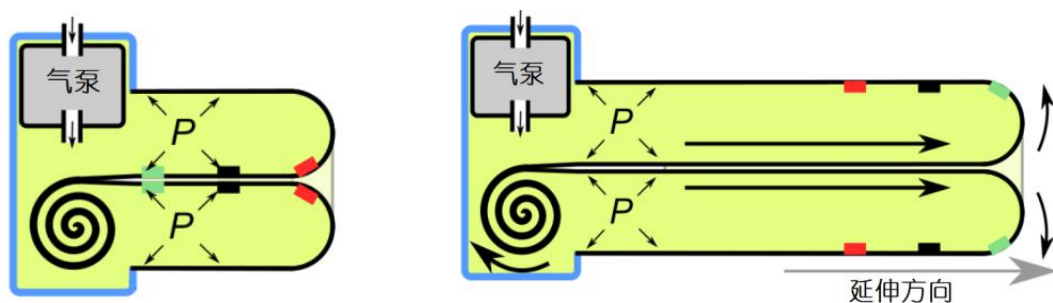


图 9 气泵驱动主体延伸原理

## (2) 转向结构设计

顶端主动弯曲的基本原理是利用机器人本体两侧的长度差来实现主动转向，通过有选择地允许机器人身体的一侧相对于另一侧的长度来实现这一目的，如图 10 所示。项目通过设计特殊的转向卡扣来存储额外的转向所需薄膜，使用独立气道来控制转向卡扣脱离，从而达到可控转向的目的。沿着仿生机器人本体两侧布置小型控制气道作为控制输入，用来控制转向卡扣脱离。为了使仿生机器人的转向是可控的，转向卡扣脱离需要同时满足两个条件，即转向卡扣处于机器人主体翻转顶端时，且此时控制气道内为正压。只有满足以上这两个条件，转向卡扣才会脱离，将存储的额外薄膜释放出来，使这一侧的薄膜变长，从而达到向反方向转向的目的。该转向控制方法简单且有效，既不需要增加额外的能量，也不需要其他庞大的驱动器来实现转向。

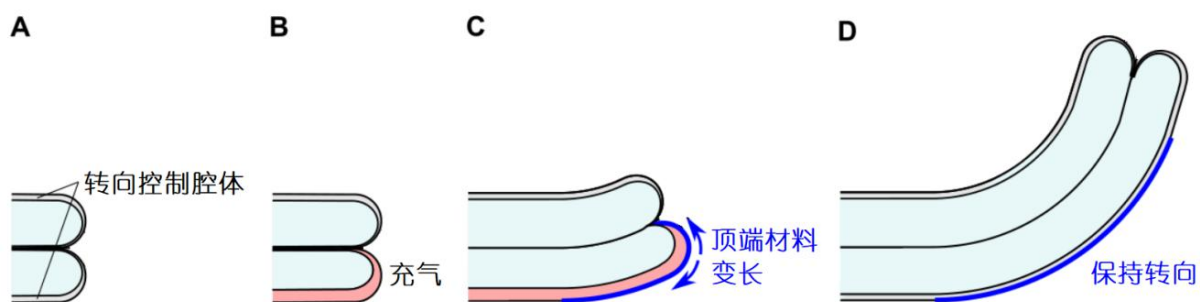


图 10 转向原理

## (3) 气动控制技术

研究气动系统与控制系统。仿生机器人采用气动驱动方式，驱动机器人主体延伸和主动弯曲。需要气动系统具备精确的气体输出和气压控制水平，同时对延伸和转弯进行控制。当主体部分气压升高时，主体顶端便会在压力的作用下延伸；当左侧通道充气时，尖端的左侧变长，导致主体顶端向右偏转。此外，还需协调薄膜拉伸电机和气动系统气压之间的配合关系，使仿生机器人顶端保持稳定的延伸速率。因此，气动控制对于仿生机器人而言是至关重要的，直接影响到仿生机器人的整体性能，气动控制系统结构如图 11 所示。

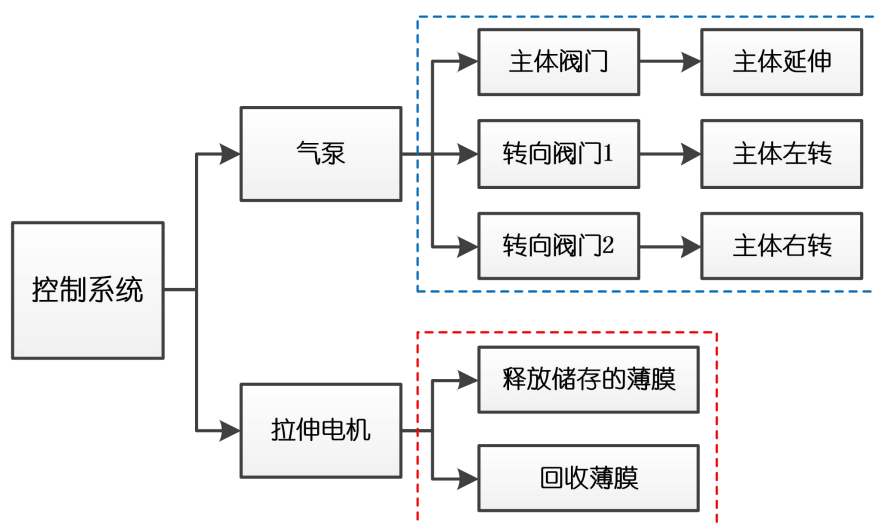


图 11 气动控制系统结构图

## (2) 仿生蔓藤柔性机器人的制备与试验测试的实施方案

仿生机器人主体由多种材料制成，包括塑料薄膜、树脂卡扣、粘接胶带等，机器人制备过程需要各类材料间的配合使用，包括薄膜与薄膜间的粘合、树脂卡扣与薄膜间的粘合、卡扣与卡扣间的固定、粘接胶带的使用层数和粘接面积等，此外还需解决机器人主体气密性、延伸所需的塑料薄膜存储形式、转向所需的塑料薄膜存储形式、树脂卡扣脱离形式等关键技术问题。

**壳体材料及制备：**壳体长 250mm、宽 200mm、高 120mm（不包括厚度）、厚 5mm。由透明热塑性塑料依靠 3D 打印技术制作而成。该壳体由上部和下部两部分组成，其中底面与侧面、侧面与侧面通过圆角连接组成下部，打印时制作成一个整体；顶面为上部，通过仿照保鲜盒的密封结构实现上部与下部的密封结合。在壳体正面有直径 30mm 的孔洞以便于延展体从中伸出；侧面为进气口、排气口预留出两个孔洞，尺寸视情况而定。

**滚柱材料及制备：**滚柱由高 90mm、直径 70mm、厚 2mm 的空心圆柱筒，直径 66mm、厚 5mm 中心与直径 22mm 厚 7mm 的滚珠轴承连接的下盖、直径 66mm 厚 5mm 中心有直径 10mm、高 12mm 的圆柱形凸起的上盖组成。圆柱筒内有特殊的凸起使上下盖能够固定于其内且能够拆卸。这三个零件皆由透明热塑型塑料依靠 3D 打印制得，如下图所示，其中黄色区域为用胶水粘合部位。

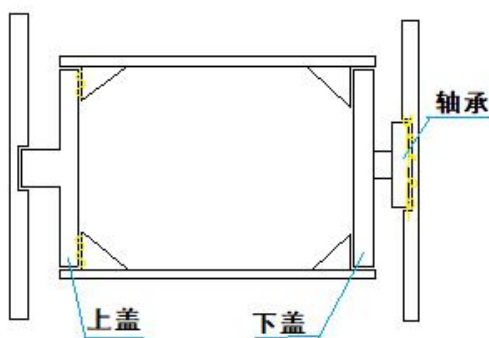


图 11 部件连接设计

**延展体材料及制备：**延展体由聚乙烯薄膜通过热合技术制成的长 4000mm 直径 50mm 的圆柱筒，其外层通过热合技术与塑料壳体密封连接。

排气口、进气口：根据气源的种类（手动打气筒、电动气泵）、阀门的型号来确定尺寸大小。由于其结构过于简单，故在此不做过多说明。

电机、齿轮、轴承：这些都可在网上购买，本人也已经与店家沟通可进行定制。其中，电机、轴承尺寸如下图所示。两个齿轮的尺寸分别为外径 106.2mm 节径 101.33mm 厚 10mm、外径 86mm 节径 81.19mm 厚 10mm。

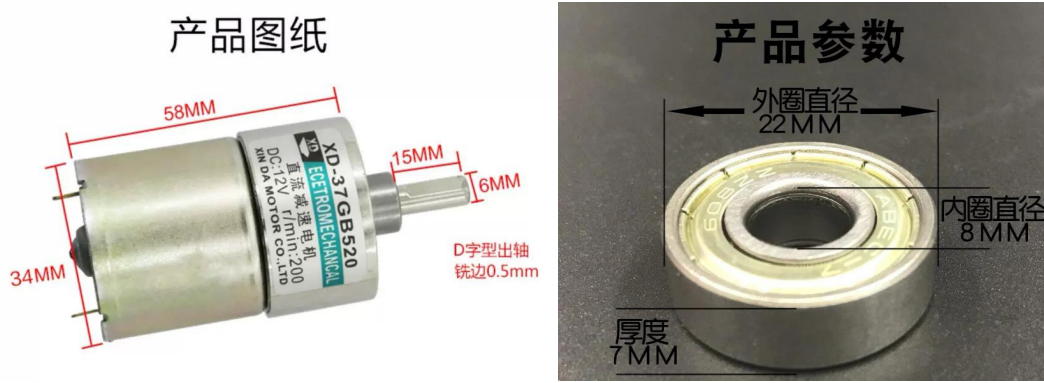


图 11 拟采用的电机和轴承

为检测藤蔓机器人是否具有预期的性能，符合预期要求，在藤蔓机器人组装完成后，将通过进行一系列实验，测试藤蔓机器人的性能。实验测试为基础测试、实地模拟测试和实验总结三个部分。

(1) 基础测试

实验目的	通过较为简单的人造障碍检验机器人的基本功能是否正常
实验器材	木板，木块等简易障碍物
实验步骤	1 释放机器人，向机器人内通气，使延展体内迅速充满气体，机器人向前伸展，观察机器人前进是否正常，折叠部分是否正常展开，摄像头是否能正常跟进，保持在固定位置，不滑落或者缩回，传出图像是否及时准确。
	2 设置木块、挡板等障碍物，以及缝隙等狭小空间。控制藤蔓机器人前进，并进行三维转向，绕过障碍物，穿过狭小缝隙。测试藤蔓机器人是否能够完成转向等较精准动作，正确完成指令。
	3 放出机器人内的气体，开启回收电动机，进行机器人回收。观测回收过程中材料折叠是否正常，摄像机是否回收正常。

(2) 实地模拟实验

实验目的	通过模拟实际生活中的场景以及地形，例如地震废墟等等，测试藤蔓机器人的性能。
实验器材	碎石等建筑废物，模拟待搜救人员
实验步骤	1. 将准备好的建筑废物放好，作为模拟废墟，并在模拟废墟下放置一个小球模拟待搜救人员。 2. 安置好机器人壳体，对机器人进行检查，释放机器人，通过前端摄像头传回的信息对机器人进行操控，控制延展体深入模拟废墟，通过其中的缝隙寻找模拟待搜救人员。 3. 发现目标后，回收机器人 4. 清理实验场地

### （3）实验总结

整理实验数据，对本次实验进行总结，对于实验过程中遇到的问题进行总结归纳，继续深入研究，寻找解决方案。

### （三）进度安排

本课程研究时间为一年，具体安排如下表所示。

时间	研究内容	人员安排	里程碑节点
2019.11.11~2020.01.10	搜集与藤蔓机器人,气动机器人,柔性机器人有关的相关文献，学习相关理论原理。突破现在的一些理论问题，形成完善的制备方案	所有小组人员	对藤蔓机器人有一定的了解,并形成初步的机器人制备方案
2020.01.11~2020.02.20.	1 购买相关的实验用具 2 学习相关的软件，如:CAD;学习 c 语言；以及提升自己的相关技术能力水平，如：3D 打印技术，手工制作能力。	刘远霆—挑选购买相关的实验材料,学习 3D 打印技术；王帅—学习 c 语言；朱成涛—学习 CAD；刘伟峻—学习一些简单的手工制作	为后期的机器人制备做准备,并具备制备机器人的相关能力要求
2020.02.21~2020.05.30	制备成型的藤蔓机器人,并进行相关的性能测试	所有小组人员	使柔性机器人能够进行狭小空间的探测和回收,以及进行简单地转向操作

### （四）中期及结题预期目标

中期目标：提出详细且完善可行的理论模型，提出延展尖端的摄像头的固定和转弯的实现的方法。

结题目标：制作出实物模型，且实物的各项功能达到预期。

## （五）经费使用计划

项目经费预算情况如下表所示：

序号	名称	具体内容	经费预算
1	材料费	薄膜材料 800 元 3D 打印材料 2400 元 摄像头 300 元 辅件 500 元	4000 元
2	试制费	充气控制装置 1000 元 转向控制装置 1200 元 辅助实验设备 1400 元	3600 元
3	办公费	打印复印 100 元 书籍资料 500 元	600 元
4	加工费	成型与试验设备加工 1800 元	1800 元
合计	10000 元		

## （六）主要参考文献

- [1] 杜祥民 张永寿.达芬奇手术机器人系统介绍及应用进展, 中国医学装备, 2011, 60-63
- [2] Zhi Ern Teoh, Brennan T. Phillips, Kaitlyn P. Becker, Griffin Whittredge, James C. Weaver, Chuck Hoberman, David F. Gruber, Robert J. Wood. Rotary-actuated folding polyhedrons for midwater investigation of delicate marine organisms. Science Robotics. 2018
- [3] Bishop-Moser, J.,Krishnan, G.,Kim, C.,Kota, S.. Design of soft robotic actuators using fluid-filled fiber-reinforced elastomeric enclosures in parallel combinations[P]. Intelligent Robots and Systems (IROS), 2012 IEEE/RSJ International Conference on,2012.
- [4] 张翔, 刘红卫, 刘卓群, 闫振国, 陈小前, 黄奕勇.空间智能软体机械臂动力学建模与控制, 智能科学与技术学报, 2019, 1(1): 52-61
- [5] Elliot W. Hawkes, Laura H. Blumenschein, Joseph D. Greer, Allison M. Okamura. A soft robot that navigates its environment through growth. Science Robotics.2017