

上海交通大学

SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY

学士学位论文

THESIS OF BACHELOR



论文题目：基于气动人工肌肉的软体操作手
设计及应用

学生姓名：陈 涛

学生学号：5120209356

专 业：机械工程及自动化

指导教师：谷 国 迎

学院(系)：机械与动力工程学院

基于气动人工肌肉的软体操作手设计与应用

摘要

软体机器人由软体材料构成,因其柔韧性高,灵活度大,适应性强,质量轻等优点而受到国内外众多学者的关注,加快了软体机器人的研究与应用。本文主要以气动软体机器人作为研究对象,详细探讨了多腔式气动软体驱动器的有限元分析以及其实际应用。首先,本文运用有限元分析的方法对多腔式气动软体驱动器进行了参数分析。有限元分析中运用了网格收敛指数方法确保数值解的收敛性,并对多腔式软体驱动器弯曲角度以及末端作用力受气压变化影响和驱动器几何尺寸的影响进行了关系探究,通过拟合分析结果提出驱动器弯曲角度与气压成线性关系,末端作用力与气压成二次函数关系。然后,本文基于多腔式气动软体驱动器设计了两款气动软体操作手,分别应用于物体抓取以及手指康复训练。实现抓取功能的软体操作手由四个多腔式软体驱动器组成,适用于抓取脆性大或者表面易受损的物体。接着,利用软体操作手对实验结果以及有限元分析结果进行对比,证实了有限元分析模型的正确性以及拟合函数的合理性。最后,实现康复功能的软体操作手采用类人手形状设计,关节数与人手指关节相同,使得每个驱动器弯曲时最大程度地接近真实手指弯曲的形状,从而将驱动器的弯曲作用力充分作用于手指,提高康复训练效果。此外,该软体操作手由于材料柔软,力量适中,可以充分保护病人手指不在康复训练过程中受到二次伤害。

关键词: 软体机器人, 多腔式软体驱动器, 软体操作手, 康复训练, 有限元分析

DESIGN AND EXPERIMENTAL TESTING OF SOFT GRIPPER AND SOFT HAND FOR REHABILITATION WITH PNEUMATIC ACTUATORS

ABSTRACT

Soft Robots, which are mainly made of soft materials, have gained wide attention in the past years due to their unique and conspicuous characteristics including high flexibility, agility, and adaptability as well as small weight. This thesis mainly focuses on pneumatic soft robotics, especially soft actuators with multiple pneumatic networks. The thesis utilized the finite element method tool to analyze the effects of pressure magnitude and actuator geometry on actuator's bending angle and force at the distal tip. In particular, FEM analysis is implemented with grid convergence index method, which is a reliable and fast way to find the convergent solution, to ensure the convergence of the FEM solutions. It reveals that soft actuator with pneumatic networks has a linear relationship between the bending angle and pressure inside the air chamber, while its force at distal tip can be described in a second order polynomial with respect to the pressure. The thesis delineates the design, fabrication and application of a soft gripper, which consists of four soft actuators with pneumatic networks. The soft gripper is especially useful when grasping delicate and fragile objects. The fitting functions between the actuator's bending angle and pressure, force at distal tip and pressure are verified via the experiments with soft gripper. This thesis also designed a soft hand for rehabilitation. The device mimics the shape and distribution of joints in fingers and is optimized to exert as much of the generated force as possible on fingers. The experiments proved that the rehabilitation device can generate force that is large enough to get the fingers to bend so as to help recover the patients' finger movements effectively. And the device's softness and flexibility ensure that patients' fingers are fully protected and will not be further harmed during the rehabilitation process.

Key words: Soft robotics, actuators with pneumatic networks, soft gripper, rehabilitation, finite element analysis

目录

第一章 绪论.....	1
1.1 研究背景及意义.....	1
1.2 软体机器人研究现状.....	2
1.2.1 气压或液压驱动.....	3
1.2.2 介电弹性体驱动.....	7
1.2.3 形状记忆合金驱动.....	8
1.2.4 化学作用.....	9
1.3 本章小结.....	9
第二章 气动软体驱动器驱动原理与理论模型.....	11
2.1 气动软体驱动器驱动原理.....	11
2.2 理论分析.....	12
2.3 本章小结.....	14
第三章 有限元分析.....	16
3.1 有限元理论模型.....	16
3.2 有限元建模过程.....	17
3.3 有限元分析收敛解.....	18
3.4 驱动器有限元分析结果.....	19
3.5 驱动器几何因素对其性能的影响.....	22
3.5.1 不同横截面形状.....	23
3.5.2 不同空腔数目.....	25
3.5.3 不同内腔高度.....	26
3.5.4 不同侧面、顶面厚.....	27
3.5.5 连接部位不同的高度.....	29
3.6 本章小结.....	31
第四章 软体操作手应用.....	33
4.1 制造工艺.....	33
4.1.1 模具设计.....	33
4.1.2 制造流程.....	34
4.2 气动软体操作手抓取应用.....	35
4.3 气动软体操作手康复应用.....	40

4.4 本章小结.....	43
第五章 总结.....	44
参考文献.....	46
谢辞.....	48

第一章 绪论

1.1 研究背景及意义

刚性机器人由若干刚性结构借助刚性的运动副连接而成。运动副的驱动多采用电机、内燃机、液压等主要由刚性材料构成的驱动器，能够实现准确、快速的运动。刚性机器人运动学与动力学模型完备，控制理论成熟，承载能力大，运动精度高，但是也具有缺乏环境适应性，运动笨重，成本高昂，操作危险等缺点。即使如哈佛大学的 Perez-Arancibia N O 等人设计的一款微型飞行机器人^[1]，飞行灵巧，仿生性好，但是内部的微小刚性机械零件使得机器人结构脆弱，在外力作用下易受损坏。

相比之下，软体机器人充分体现了生物界中普遍存在的软体特征。自然界中大多数的生物都由软体构成，即使是脊椎动物的身体内也含有大量的软体组织。例如，人体内的骨骼质量仅仅占据了全身质量的 11% 左右，而骨骼肌肉平均占据了身体 42% 的质量。软体机器人的研究与发展让机器人更加具备仿生特性，赋予了机器人更加出色的灵活性与环境适应能力，能够弥补刚性机器人在安全性、灵活性、适应性等方面的缺陷。表 1-1 列举了刚性机器人与软体机器人的特性差异。

软体机器人模拟生物界中的软体动物，以软体材料为支撑，可以实现大范围大尺度的变形运动、改变自身形状、适应不同环境。软体机器人的身体变形是连续的，具有无限自由度，通过模仿软体生物形态特征，能够实现扭动、弯曲、蠕动、爬行等运动，通过狭小的空间，实现采样、抓取等操作。其特有的柔性特征也适用于对脆性物体的抓取、操作，并且可以保护机器人本体抵抗机械破坏，同时具有更好的人机交互性^[2]。哈佛大学的 Martinez R V 等人曾进行软体弹性体与不锈钢材料在相同条件下的抗压实验^[3]。实验发现当相同的压力作用在软体材料上时，当不锈钢材料发生断裂时，弹性体仍然未出现明显裂纹，而且在压力去除后能够恢复原状。软体机器人能够在医疗手术、灾区救援、家庭服务、人机交互、深海探测、军事应用等领域得到广泛应用。

表1-1 刚性机器人与软体机器人的特性比较^[4]

	刚体	离散冗余度	硬质连续体	软体
自由度	少	多	无限多	无限多
驱动器	少，离散	多，离散	连续	连续
材料应变	无	无	小	大
材料	金属，塑料	金属，塑料	形状记忆合金	橡胶，形状记忆合金，电活性聚合物
精确度	非常高	高	高	低
承载能力	高	较低	较低	低
安全性	低	低	低	高
灵活性	低	低	低	高
工作环境	结构化环境	结构化及非结构化环境	结构化及非结构化环境	结构化及非结构化环境

	刚体	离散冗余度	硬质连续体	软体
操作对象	固定尺寸	变尺寸	变尺寸	变尺寸
与障碍物相容性	无	好	较好	最好
可控性	容易	中等	难	难
路径规划	容易	较难	难	难
定位检测	容易	较难	难	难

本文主要研究气动软体驱动器（气动人工肌肉）的变形机理，通过有限元分析方法对驱动器的几何尺寸以及气压大小对驱动器弯曲角度与末端作用力大小进行分析，以期能够为设计多腔式气动软体驱动器提供指导意见。本文详细论述了气动软体驱动器的制作流程，并进行了多腔式气动软体驱动器的应用探究。本文主要将气动软体驱动器应用于物体抓取以及指关节康复训练两方面。通过实验验证，本文证实了软体驱动器在机械抓手与康复器材两大应用领域的实用性与可行性。

1.2 软体机器人研究现状

软机器人技术自诞生起的短短数年内即迅速成为机械人学领域的研究前沿和热点。与传统工业机器人不同，软机器人无需外置的传统刚性驱动装置，采用软物质智能材料（如液体、凝胶、软聚合物和其他软物质）元件，在电、磁、光、热、气、压、酸碱度等外加能场的作用下直接实现机器人本身的大尺度整体变形和运动。

哈佛大学的 Morin S A 等人提出了一种制作复杂软体三维结构的制作方法^[5]，采用设计具有凹凸结构的弹性体单元，通过凹凸体之间的贴合组装成复杂结构。如图 1-1（左）所示，哈佛大学的 Kwok S W 等人设计了一种软体材料与硬质材料相结合而具备重组功能的结构^[6]，软体材料采用硅胶弹性体，硬质材料采用 ABS 塑料，两者通过内嵌的环状磁铁相连。该结构可以通过气压作用后的软体材料膨胀的作用力克服磁铁之间的吸引力，使得原本靠磁铁吸引而连接的结构分离。而磁铁的磁性又赋予了结构再次相互吸引连接的功能。哈佛大学的 Overvelde J T 等人还提出了一种针对软体传感器的基于有限元分析的数值分析方法^[7]，能够模拟内嵌电路的软体传感器的机械与电子特性。麻省理工学院的 Homberg B S 等人将内嵌弯曲软体驱动器安装于 Baxter 机器人的末端执行器上^[8]，通过多次实验积累实验数据后，采用机器学习中的 k 近邻聚类算法能够通过每个手指的弯曲情况较为准确的识别出软体抓持器所抓持的物体，但仅限于实验中已经识别过的物体。如图 1-1（右）所示，哈佛大学的 Galloway K C 等人首次将软体机器人技术运用到水下机器人中^[9]，利用软体抓手在深海进行脆弱的生物样本的抓取，如珊瑚标本采样。

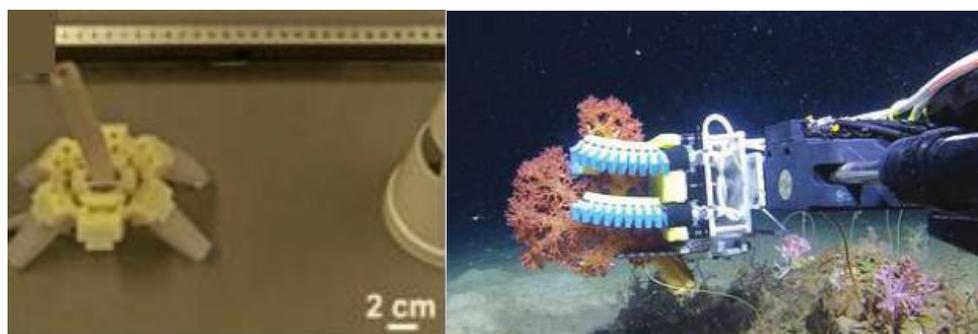


图 1-1 具备重组功能的软体机器人^[6]（左）与软体机器人海底采样（右）^[9]

近年来国内对软体机器人的研究也呈现上升趋势。北京化工大学的焦志伟等人提出了一种基于静电斥力与表面恢复力的新型致动机理^[10]，其中静电斥力为电磁单元通电时产生的互相排斥力，表面恢复力为断电时表皮结构形成的收缩恢复力。焦志伟等人基于此致动机理设计了一款仿蚕形机器人。上海交通大学的邓韬设计了一套将软体机器人与手术机器人结合的完整控制系统^[11]，用于心脏微创手术。如图 1-2 所示，上海交通大学费燕琼等人设计了一种模块化软体机器人^[12]。它是由若干可变形的球形模块组成，依靠球形模块的膨胀和收缩，能改变自身的尺寸产生向前运动。

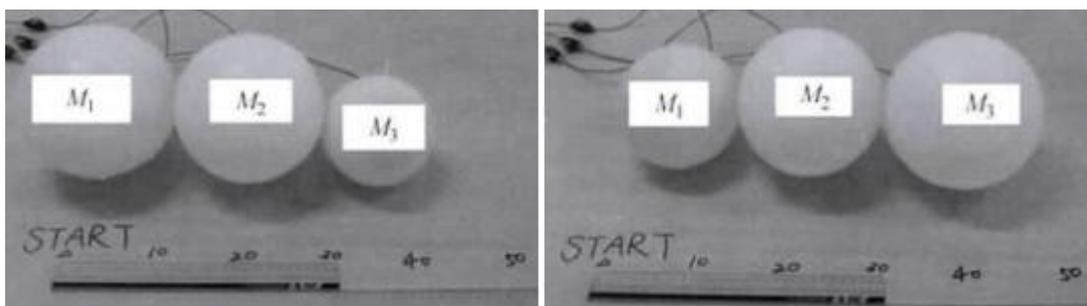


图 1-2 模块化软体机器人^[12]

驱动设计是软体机器人设计中非常关键的一个环节，目前常用的驱动方式有气压或液压驱动，介电弹性体驱动（Dielectric Elastomeric Actuator, DEA），形状记忆合金驱动（Shape Memory Alloy, SMA），化学作用驱动等。后文将从驱动设计的角度对软体机器人发展现状进行更深入的探讨。

1.2.1 气压或液压驱动

气压或液压驱动以压缩气体或者压缩液体为动力，驱动软体材料产生大幅度的形变，以形成宏观上软体机器人的整体运动。

气压或液压驱动已经在软体机器人领域得到了非常广泛的运用。华盛顿大学的 Klute G K 等人通过实验验证了 McKibben 人工肌肉具有真正肌肉的力与速度的响应关系^[13]。而 McKibben 人工肌肉就是以气压为动力产生较高的作用力和位移。

如图 1-3 所示，哈佛大学的 Shepherd R F 等人基于气动驱动器制作了一种具有多种运动步态的长度为 13.6cm 的四足机器人^[14]。该机器人由低压空气驱动，可以穿过 2cm 的缝隙。但是该机器人必须有气管供气，因此运动范围受限。



图 1-3 四足有缆软体机器人^[14]

如图 1-4 所示，哈佛大学的 Tolley M T 等人设计了一个具有相同结构的长达 65cm 的软体机器人^[15]，具备很好的耐燃性、耐压性、抗水性、抗剪性。并且该机器人将气源，控制器等整合至自身躯体内，因此可以实现无缆操作，增大了活动范围。



图 1-4 无缆软体机器人^[15]

如图 1-5 所示，哈佛大学的 Morin S A 等人^[16]在软体机器人内设置不相通的独立腔体通道，通过将不同颜色的液体注入腔内，一方面以液压驱动机器人，另一方面可以像变色龙一样实现在不同环境下的变色伪装功能。



图 1-5 变色软体机器人^[16]

如图 1-6 所示，哈佛大学的 Ilievski F 等人设计了一种连体多腔式结构^[17]，以 7 至 28kPa 气压为气源，每个空腔之间紧密相连，相互作用，当驱动器受气压作用时，内部空腔膨胀，以其厚度最小的方向为主要膨胀方向，使得驱动器产生弯曲变形。

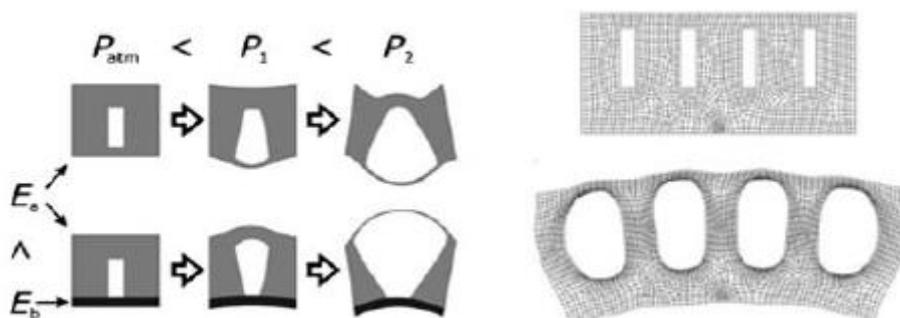


图 1-6 连体多腔式软体驱动器^[17]

如图 1-7 所示，哈佛大学的 Mosadegh B 等人在连体多腔式结构的基础上设计了一种分离式多腔结构^[18]，相比与连体多腔式具有驱动响应速度快，所需气体体积少的优点。该驱动器由多个互相分隔的气囊组成，分为上下两层，上层为多个由硅胶制成的空腔，下层为纸层。利用充气后上层膨胀以实现驱动器的弯曲运动。多个空腔相互分隔，减少了相互间的束缚，加快了响应速度。当气压为 345kPa 时，该驱动器能在 50ms 内弯曲 360 度。

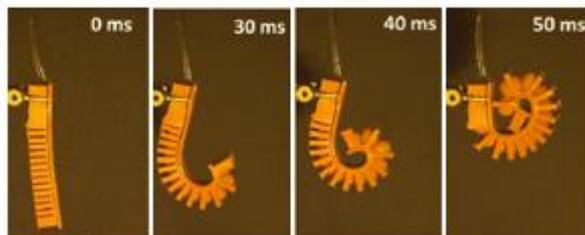


图 1-7 分离多腔式软体驱动器^[18]

如图 1-8 所示，哈佛大学的 Polygerinos P 等人基于多腔式气动软体驱动器设计了一款各驱动器间相互分离的软体手^[19]，用于辅助相关患者的手部康复运动。

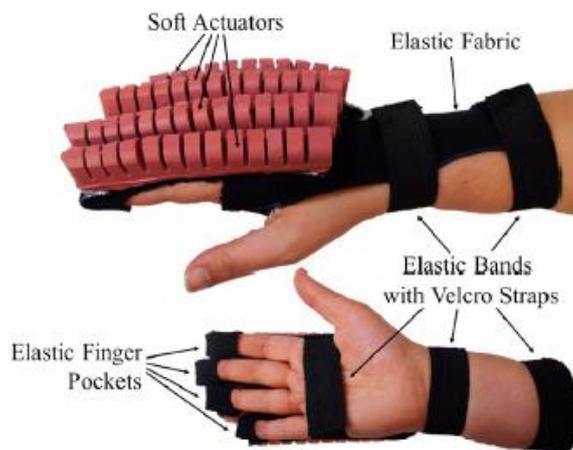


图 1-8 软体手^[19]

如图 1-9 所示，哈佛大学的 Polygerinos P 等人设计了一种绕线单腔式的驱动器^[20]，并且对该类驱动器建立了一个简化的理论模型，从实验与有限元分析两个方面对理论模型进行了验证分析。

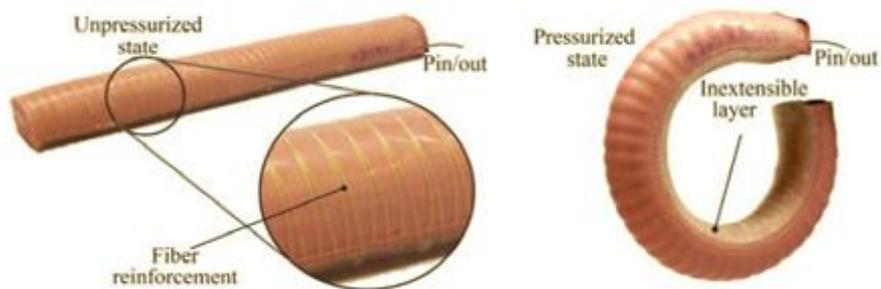


图 1-9 单腔式驱动器无压状态（左）与受压状态（右）^[20]

如图 1-10 所示，哈佛大学的 Galloway K C 等人基于绕线单腔式驱动器的基础上设计与制作了一种鲁棒的具有机械“可编程”性的纤维增强式的软体驱动器^[21]。通过在驱动器外不同部位添加一层覆盖材料，可以控制驱动器实现预先设计的弯曲形状。

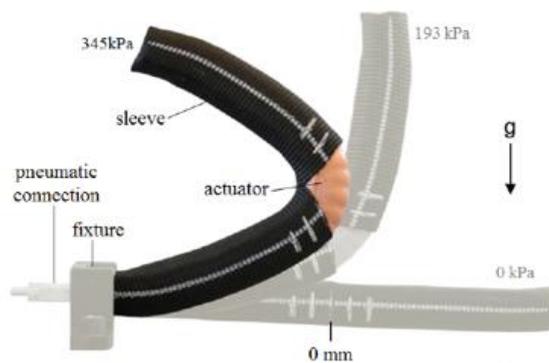


图 1-10 “可编程”式驱动器^[21]

如图 1-11 所示，哈佛大学的 Connolly F 等人研究绕线角度对纤维增强式的单腔软体驱动器的影响^[22]。通过改变绕线角度，驱动器可以实现轴向伸展，径向扩张，以及扭转运动。

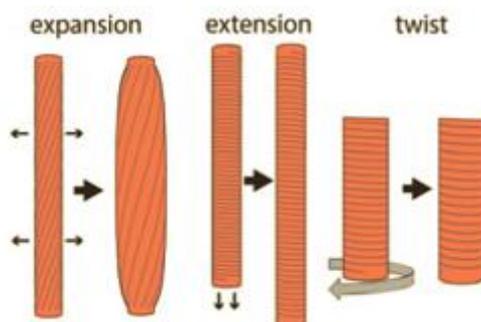


图 1-11 驱动器不同绕线角度^[22]

如图 1-12 所示，哈佛大学的 Polygerinos P 等人利用纤维增强的软体驱动器制作了一款能够帮助病人手部康复的手套^[23]。病人可以借助该手套，重新获得手部抓取物体的功能。



图 1-12 康复手套^[23]

如图 1-13 所示，哈佛大学的 Martinez R V 等人设计了一种具有三腔式结构的软体气动驱动器^[24]。该驱动器在圆周上均分三腔，每一个腔的膨胀都会导致驱动器在向背离该方向的朝向弯曲。通过三个腔的组合膨胀，能够使驱动器在三维空间产生多样化的弯曲形态。

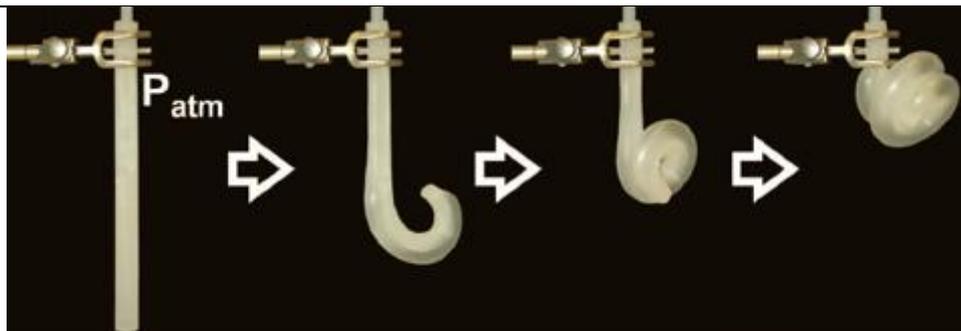


图 1-13 三腔式气动驱动器^[24]

如图 1-14 所示，印度甘露大学的 Udupa G 设计了一种具有偏心式的多腔结构的软体气动驱动器^[25]，其偏心结构能够使驱动器相比于普通的对称结构产生更大的弯曲变形。他们还基于 FMA(Flexible Micro Actuator)设计了一款偏心单腔式驱动器^[26]，并基于该驱动器设计了一款灵巧软体抓手。

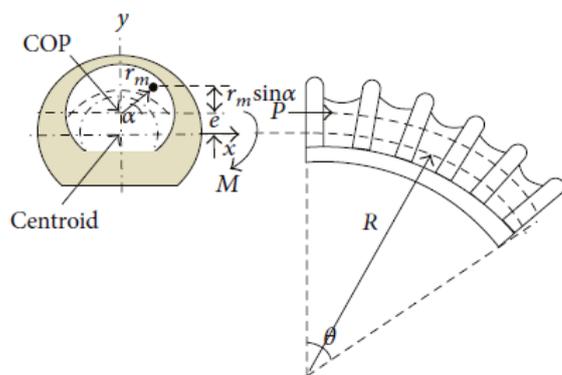


图 1-14 偏心多腔结构（左）^[25]与偏心单腔结构（右）^[26]

如图 1-15 所示，宾夕法尼亚州立大学的 Grissom M D 等人设计了一款基于章鱼形状的软体机械臂^[27]，以气压为驱动力，每一段机械臂能够实现两个方向的弯曲与伸长，在 8.27 bar 气压作用下，能够在竖直方向提供 890N 的负载能力，在水平方向提供 250N 的负载能力。

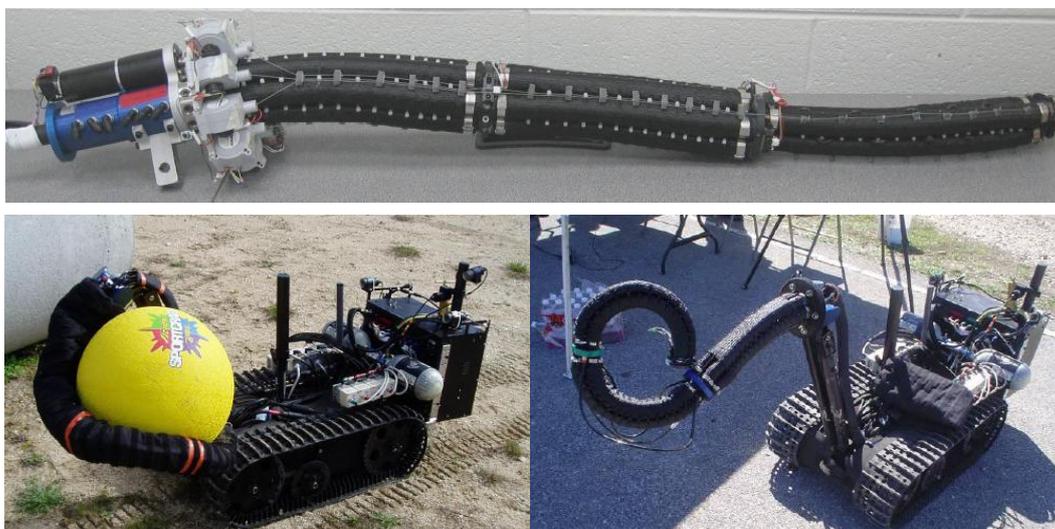


图 1-15 软体机械臂^[27]

1.2.2 介电弹性体驱动

介电弹性体驱动器由软体材料组成，通过静电作用力产生驱动力^[28]。如图 1-16（左）所示，SRI International 的 Pelrine R 等人利用由介电弹性体和弹簧构成的驱动器设计了一种六足机器人^[29]，其行进速度可以达到 3.5cm/s。如图 1-16（右）所示，韩国成均馆大学的 Nguyen C T 等人设计了一种基于介电弹性体的四足机器人^[30]。该机器人利用曲柄滑块机构将介电弹性体驱动器产生的直线运动转化为旋转运动，进而带动足部的运动。为了使得介电弹性体的直线运动具有足够的位移量，他们采用了多层介电弹性体堆积的方法来扩大介电弹性体产生的运动行程。

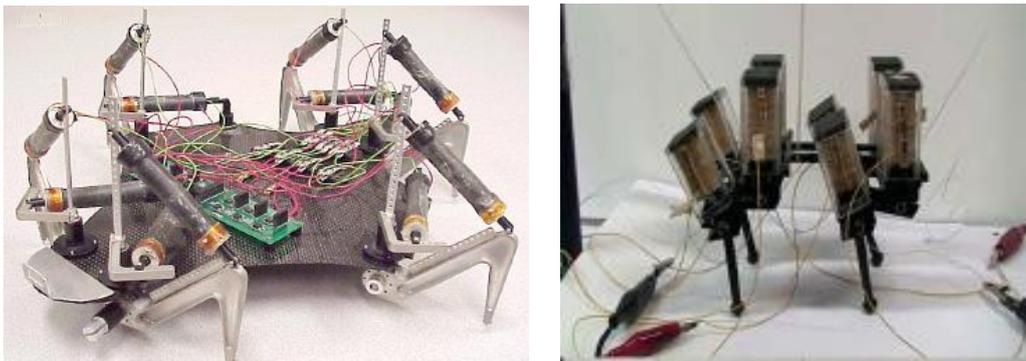


图 1-16 SRI 四足软体机器人（左）^[29]与成均馆大学四足软体机器人（右）^[30]

如图 1-17 所示，德国马克斯普朗克研究所的 Hines L 等人将介电弹性体与气压驱动相结合，设计了一款具有可逆稳态的软体驱动器^[31]。驱动器内密封一定量的空气，表面留有多由介电弹性体组成的膨胀膜。通过驱动不同的介电弹性体膨胀指定的腔体，增大密封腔的容积，减小密封腔内的压强，使得其余未受驱动的介电弹性体因受到的气压减小而收缩。如果取消施加在受驱动的介电弹性体上的电压，那么密封腔总体容积缩小，内部气压上升，其余球体因空间内气压增大而开始膨胀，最终达到平衡状态。通过这一过程可以实现同一气压条件下多种平衡态的转换（各腔体间不同稳态体积的交换）。

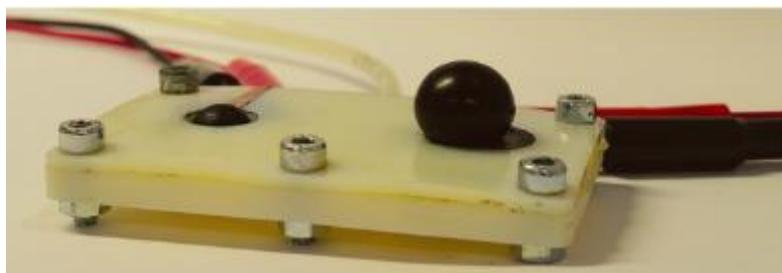


图 1-17 可逆稳态驱动器的腔体间平衡态^[31]

DEA 具有较高的驱动性能，包括较高的应变应力比与质量功率比。但是，DEA 也有一些固有的缺陷。例如，介电弹性体需要硬质框架对材料进行预拉伸。即使国外有些 DEA 设计没有使用硬质框架，它们仅能产生很低的应力，并且其制造工艺也是非常复杂^[32]。另外，介电弹性体驱动通常需要很高的电压（千伏级），尚无法投入实际应用。

1.2.3 形状记忆合金驱动

形状记忆合金因具有质量轻且作用力大的特点而在软体驱动领域得到广泛应用。如图 1-18 所示，麻省理工学院的 Seok S 等人设计了一种由一定长度的多节段式的径向形状记忆合金组成的驱动器^[33]，某一段的 SMA 收缩会带动相邻段径向形状记忆合金伸长，产生于蠕动前进的动力。浙江大学的刘伟庭等人设计了一种利用记忆合金驱动的仿生蚯蚓^[34]。

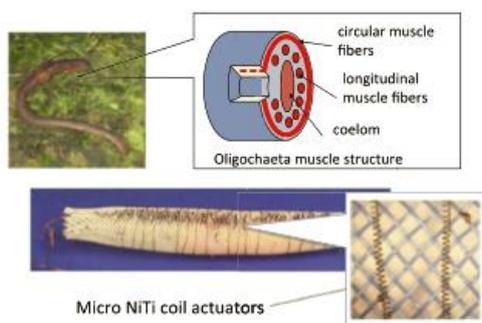


图 1-18 麻省理工学院蠕虫 SMA 驱动器^[33]

由于常用的镍钛合金应变变量较小,所以研究人员通常需要将镍钛合金细丝绕成线圈状以扩大总体的应变变量。这使得形状记忆合金能够在软体机器人中形成具有很高柔韧性的网格状的弹簧结构。但是,形状记忆合金的作用力取决于温度的变化,所以 SMA 驱动需要有一套鲁棒的温度控制系统以适应不同温度环境条件。另外, SMA 驱动的能量转换效率很低,约 1%,大部分能量在加热 SMA 金属丝时耗散。SMA 在过热或者过度拉伸的情况下容易产生永久性的损伤。

1.2.4 化学作用

化学作用驱动的软体机器人依靠化学反应释放能量以驱动机器人运动。早稻田大学前田真吾等人利用化学能驱动设计了一种的仿生尺蠖^[35]。该软体机器人基于 Belousov-Zhabotinsky 反应,利用凝胶的周期性伸缩变化转化为机器人的前进运动。如图 1-19 所示,哈佛大学的 Tolley M T 等人设计了一种弹跳型的软体机器人^[36]。该机器人利用气动驱动器实现四肢的弯曲以实现身体的移动,并且利用丁烷燃烧、气体膨胀产生的瞬间冲击力实现身体的跳跃。



图 1-19 弹跳软体机器人^[36]

1.3 本章小结

软体机器人近年来成为机器人领域的一个新兴研究热点。软体机器人主要由软体材料构成,具备很好的柔韧性、灵活性、变形性、轻质性等,可以弥补刚性机器人在质量、成本、刚性等方面存在的劣势。软体机器人驱动方式主要有介电弹性体驱动,形状记忆合金驱动,气压或液压驱动,化学作用驱动等方式。介电弹性体驱动主要依靠电极材料之间的静电作用产生运动。形状记忆合金驱动主要利用不同温度下记忆合金的形状变化产生运动。气压或液压驱动依靠流体压力作用使驱动器内部空腔受压膨胀产生运动。化学驱动通过化学反应将化学能转化为驱动器机械能。软体机器人能在灾区救援、海洋探测、食品包装、家庭服务、人

机交互、军事应用等方面能够发挥重大作用。

本文后续章节将围绕气动软体驱动器进行展开分析。气动驱动器可以分为单腔式以及多腔式驱动器两类。针对单腔式驱动器，哈佛大学提出了较为完善的理论模型。而对于多腔式驱动器，理论模型尚不完备，因此本文将使用有限元分析方法对该类模型进行分析。第二章主要论述对气动软体驱动器的结构设计以及针对单个腔体的理论模型。第三章将针对多腔式驱动器借助有限元分析工具详细讨论驱动器的弯曲角度以及末端作用力受腔体内气压作用的影响，以及驱动器几何尺寸对其性能的影响。第四章主要基于多腔式软体驱动器设计了两款软体操作手，分别应用于物体抓取以及指关节康复训练。两者均采用类人手形状设计，第一款软体操作手主要用于轻质或者易碎物体的抓取，第二款软体操作手能够帮助病人运动手指以实现康复功能。本文第五章对全文主要内容进行总结。

第二章 气动软体驱动器驱动原理与理论模型

2.1 气动软体驱动器驱动原理

气动软体驱动器由单个或多个弹性腔体组成,可以分为单腔式驱动器与多腔式驱动器两类。图 2-1, 图 2-2 为多腔式软体驱动器。驱动器主要由弹性层(如硅胶层)与不可拉伸层(如纸层)构成。当驱动器受气压作用时,空腔充气膨胀。因为驱动器的底层由不可拉伸的材料构成,因此上层弹性材料膨胀拉伸,下层保持原长,综合作用使得驱动器产生向下层方向的弯曲。空腔受气压作用时主要膨胀方向位于驱动器最具柔性的方向,即硅胶层最薄的方向。由图 2-2 驱动器剖面图可以看到,驱动器设计时将各个腔体相对面设计硅胶最薄面,以使得驱动器膨胀主要发生在腔体间的相对面。为了改善驱动器的外观,图 2-1 所示的驱动器末端加有延伸的弧状结构,该结构不影响驱动器功能的实现。驱动器底层有多个凸起(如图 2-2 所示),可以使驱动器与物体之间接触更稳定,增强驱动器弯曲时对物体的作用力。

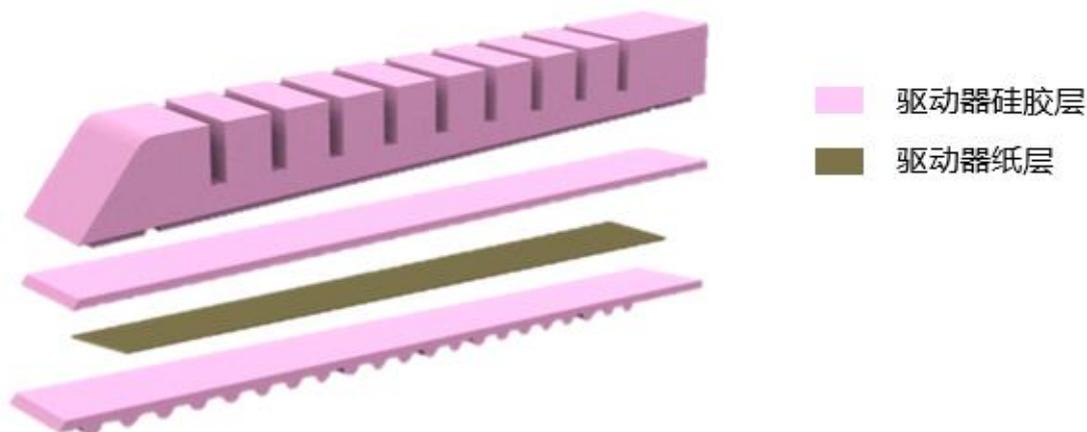


图 2-1 多腔式气动软体驱动器的分层示意图

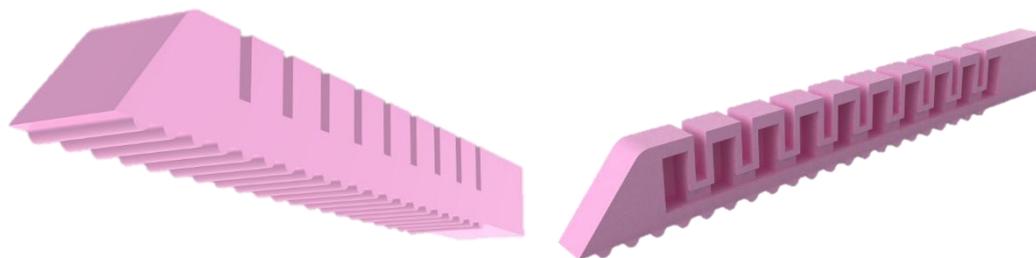


图 2-2 多腔式气动软体驱动器的底面及剖面

图 2-3 为单腔式驱动器^[27]。驱动器整体为一体化铸造而成,内部仅有一个气腔,底层依然加有不可伸长材料,驱动器外层缠绕有纤维细线以限制驱动器周向膨胀,促进其沿长度方向弯曲。

因为驱动器外层有细线缠绕约束，因此周向不伸长， $\lambda_2 = 1$ 。

由于材料不可压缩，因此：

$$I_3 = \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 = 1 \quad (2-4)$$

由此可得：

$$\lambda_1 = \lambda, \lambda_2 = 1, \lambda_3 = \frac{1}{\lambda} \quad (2-5)$$

由于驱动器径向不发生膨胀，因此假设径向应力为0，即 $s_3 = 0$ 。

综合上述各式可得：

$$s_1 = \frac{\partial W}{\partial \lambda_1} - \frac{p}{\lambda_1} = \mu \left(\lambda - \frac{1}{\lambda^3} \right) \quad (2-6)$$

$$s_2 = \frac{\partial W}{\partial \lambda_2} - \frac{p}{\lambda_2} = \mu \left(\lambda - \frac{1}{\lambda^2} \right) \quad (2-7)$$

$$s_3 = \mu \lambda_3 - \frac{p}{\lambda_3} = 0 \quad (2-8)$$

$$p = \mu \lambda_3^2 = \frac{\mu}{\lambda^2} \quad (2-9)$$

单腔式驱动器 λ 通常是在 $1 \leq \lambda < 1.5$ ，由图 2-5 可见， $s_2 < s_1/2$ ，所以下述模型中主要考虑 s_1 ，忽略 s_2 。

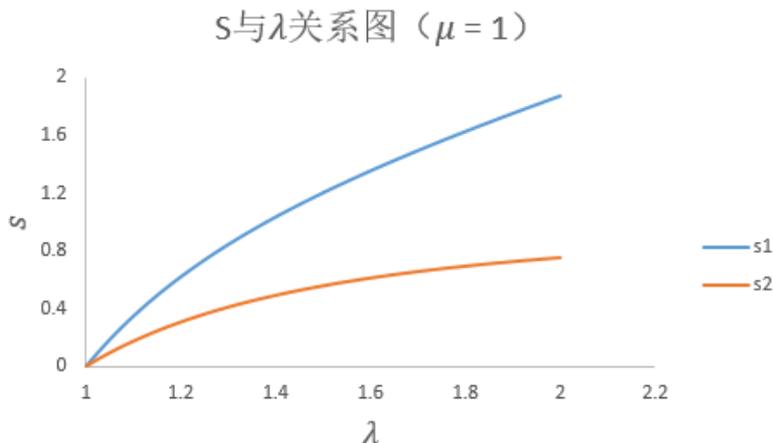


图 2-5 s_i 与 λ 的关系

如图 2-5 所示，驱动器弯曲状态下以 O 为支点形成力矩平衡。

$$M_a = M_\theta \quad (2-10)$$

式中， M_a 为驱动器内部气压作用在驱动器末端形成的力矩。 M_θ 是由驱动器上层硅胶与底层硅胶内部应力在驱动器末端形成合力矩。硅胶截面形状为半圆形状，半径为 a 。

$$\begin{aligned} M_a &= (P_1 - P_{atm}) \int_0^{\frac{\pi}{2}} 2a \cos\theta * (a \sin\theta + b) d(a \sin\theta) \\ &= 2(P_1 - P_{atm}) \int_0^{\frac{\pi}{2}} (a \sin\theta + b) a^2 \cos^2\theta d\theta \\ &= \frac{4a^3 + 3\pi a^2 b}{6} (P_1 - P_{atm}) \end{aligned} \quad (2-11)$$

$$\begin{aligned}
 M_{\theta} &= \int_0^b s_{\beta} \cdot 2(a+t)\beta d\beta + \int_0^t \left(\int_0^{\frac{\pi}{2}} 2s_{\tau,\phi}(a+\tau)((a+\tau)\sin\phi + b)d\phi \right) d\tau \\
 &= \int_0^b s_{\beta} \cdot 2(a+t)\beta d\beta + 2 \int_0^t \left(\int_0^{\frac{\pi}{2}} s_{\tau,\phi}((a+\tau)^2\sin\phi + b(a+\tau))d\phi \right) d\tau
 \end{aligned} \tag{2-12}$$

综合(2-10), (2-11), (2-12), 可以得到气腔内气压大小与驱动器弯曲角度的关系:

$$P_{in} = P_1 - P_{atm} = \frac{6M_{\theta}(\theta)}{4a^3 + 3\pi a^2 b} \tag{2-13}$$

式(2-12)中:

$$\lambda_{\beta} = \frac{R+\beta}{R} = \frac{\frac{L}{\theta} + \beta}{\frac{L}{\theta}} = \frac{\beta\theta}{L} + 1 \tag{2-14}$$

$$s_{\beta} = \mu \left(\lambda_{\beta} - \frac{1}{\lambda_{\beta}^3} \right) \tag{2-15}$$

$$\lambda_{\tau,\phi} = \frac{R+b+(a+\tau)\sin\phi}{R} \tag{2-16}$$

$$s_{\tau,\phi} = \mu \left(\lambda_{\tau,\phi} - \frac{1}{\lambda_{\tau,\phi}^3} \right) \tag{2-17}$$

由(2-12), (2-14), (2-15), (2-16), (2-17)可知 M_{θ} 是关于 μ , a, b, t 和 θ 的函数。

M_{θ} 求解需要运用数值分析的方法进行二次数值积分, 可以使用 Matlab 中现有函数 integral2 进行求解。

为了求取驱动器末端作用力与气压的关系, 需要固定驱动器末端点。因此假设驱动器弯曲角度为 0, 所以 $M_{\theta} = 0$ 。

因此, 驱动器关于 O 点的力矩平衡为:

$$M_f = FL_f = M_a = \kappa P_{in} \tag{2-18}$$

式中, F 为驱动器末端产生的接触力, L_f 为驱动器末端硅胶部分长度, M_f 为由接触力产生的弯曲力矩。

由(2-11)可得:

$$\kappa = \frac{4a^3 + 3\pi a^2 b}{6} \tag{2-19}$$

因此, 驱动器末端作用力与气压关系为:

$$F = \frac{\kappa P_{in}}{L_f} \tag{2-20}$$

式 (2-20) 描述的是驱动器弯曲角度为 0 时末端作用力与气压之间额关系。当驱动器弯曲角度不为 0 时, 驱动器内气压产生的力矩需要克服硅胶内部因形变而产生的力矩 M_{θ} , 因此在相同气压作用下, 式 (2-20) 获得的末端作用力大小为该气压下驱动器末端能产生的最大作用力。

2.3 本章小结

本章主要介绍了气动软体驱动器的结构设计与驱动原理。气动软体驱动器以气压为动力源, 作用于驱动器内部空腔表面, 使空腔在硅胶层最薄的方向产生主要膨胀, 因驱动器底层

有不可拉伸材料构成，因此驱动器上层膨胀伸长，下层保持原长，综合作用最后使驱动器产生弯曲运动。针对单腔式驱动器，哈佛大学提出了较为完善的理论模型。本章简述了此理论模型，建模中使用了 Neo-Hookean 材料模型，假设驱动器产生圆弧状弯曲，以力矩平衡为主要工具推导得出驱动器内部气压与弯曲角度、末端作用力的关系。针对多腔式软体驱动器，理论模型尚不成熟，因此本文将主要采用有限元分析方法对其进行分析。第三章即将介绍针对多腔式驱动器的有限元分析方法。

第三章 有限元分析

3.1 有限元理论模型

有限元模型能够提供驱动器非线性响应的仿真模拟结果，并且能够以可视化的方式呈现分析结果，更加清晰展现出驱动器应力分布等。

在有限元分析过程中，硅胶材料 (Elastosil M4601) 采用 Yeoh 超弹性体模型进行建模。Yeoh 模型适用于非线性弹性体材料，如硅胶，橡胶等。Yeoh 模型基于 Rivlin R 对橡胶弹性特性的研究。Rivlin R 研究发现橡胶的弹性特性可以由应变能密度函数来描述。而应变能密度函数又可以由三个应变不变量 (I_1, I_2, I_3) 来描述。

I_i 为主不变量，具体形式为：

$$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \quad (3-1)$$

$$I_2 = \lambda_1^{-2} + \lambda_2^{-2} + \lambda_3^{-2} \quad (3-2)$$

$$I_3 = \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \quad (3-3)$$

Yeoh 模型中应变能密度函数为：

$$W = \sum_{i=1}^n C_i (I_i - 3)^i \quad (3-4)$$

式中， C_i 为材料常数。 $2C_1$ 即为材料的初始剪切模量，即 $2C_1 = \mu$ 。当 $n = 1$ 时，Yeoh 模型即为 neo-Hookean 模型。

本文运用 Abaqus 软件对气动驱动器进行了有限元分析。有限元模型中对 Elastosil M4601 硅胶材料采用 $n = 2$ 的 Yeoh 模型进行分析， $C_1 = 0.11$ MPa， $C_2 = 0.02$ MPa。纸层采用普通弹性材料模型建模。具体材料参数表 3-1 所示。

表3-1 硅胶与纸层材料参数

材料	参数	取值
Elastosil M4601 硅胶材料	模型	Yeoh 超弹性模型，各向同性
	密度	1130 kg/m ³
	C_1	0.11 MPa
	C_2	0.02 MPa
	纸	模型
	密度	750 kg/m ³
	杨氏模量	6500 MPa
	泊松比	0.2

3.2 有限元建模过程

有限元模型建模步骤如下：

- (1) 运用 Solidworks 三维建模软件建立驱动器各层（至少分为上、中、下三层）的三维模型。
- (2) 在 Abaqus 中新建 Part,将三维模型文件保存为 step 格式文件分别导入,如图 3-1 所示。



图 3-1 驱动器三层模型

- (3) 在下层模型的上表面建立 surface, 用于赋予与其他部位材料不同的纸层材料。
- (4) 设置 Elastosil M4601 和纸层材料参数, 并根据两种材料分别建立 Section 属性。
- (5) 对 part 中下层模型的上表面赋予纸层材料, 其余模型均赋为 Elastosil M4601 材料。
- (6) 利用共面约束将各个模型装配为一个整体, 并进行保留边界特征的融合 (merge)。
- (7) 在 load 目录下添加重力作用与末端固定的边界条件约束, 并在驱动器内表面施加压力作用。边界条件在模拟驱动器弯曲运动与模拟驱动器末端作用力的两种分析情况下具有不同的设置。Abaqus 分析驱动器弯曲运动时只能在驱动器的根部进行端面固定, 无其他边界条件约束。而在分析驱动器末端作用力大小时需要在驱动器的末端底边也添加固定约束, 如图 3-2 所示。

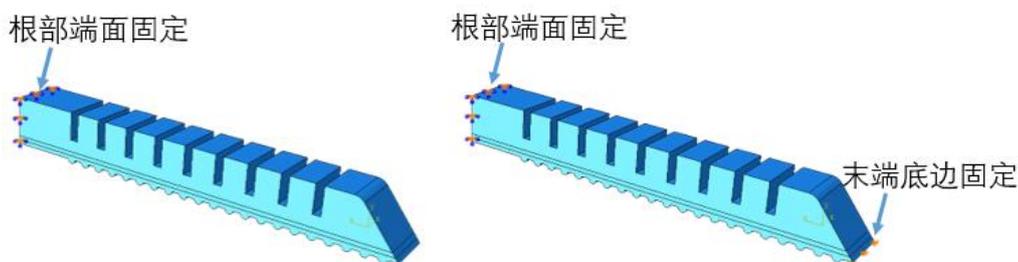


图 3-2 求取弯曲角度（左）与末端作用力（右）的边界条件

- (8) 对各腔相邻表面添加接触约束, 避免有限元分析结果出现各腔膨胀后表面相互干涉交错的不合理结果。
- (9) 对模型划分网格, 采用 Tet 结构单元自由划分网格, 并采用二次单元, 实现 C3D10H 网格生成。
- (10) 提交分析任务, Abaqus 进行有限元分析。

有限元分析生成的 FEM 模型具有的参数列于表 3-2 内。

表3-2 FEM模型参数

参数	值
节点数	133587
单元数	83930
网格种子大小	1.0
网格类型	C3D10H

3.3 有限元分析收敛解

有限元分析结果对于网格大小以及网格种类（线性，二次，三次……）等较为敏感。如果网格的选择使得有限元结果尚未达到接近收敛值的水平时，有限元分析会产生显著不同的结果。为了保证得到接近收敛值的有限元分析结果，常用两种方式使得结构更加逼近收敛值。第一种方式为采用更高次的单元类型（h 型），即针对每个有限元微元，可以采用线性拟合，也可以采用二次函数拟合，三次函数拟合等高次拟合方式。第二种方式为减小网格大小（p 型）。Abaqus 中主要采用减小网格大小的方式（p-型）逼近稳定的收敛解。

为了在 Abaqus 中得到收敛解，需要多次调整网格大小以确定得到的结果为稳定收敛值。Kwasniewski L 提出在有限元分析中运用网格收敛指数（Grid Convergence Index）方法来计算收敛解^[37]。

假设 f 为 FEM 分析的数值解， h 为网格大小。则根据泰勒展开式可得：

$$f = f_{h=0} + g_1 h + g_2 h^2 + \dots \quad (3-5)$$

式中， f 为给定网格下的 FEM 数值解， $f_{h=0}$ 为稳定收敛解， g_i 为泰勒展开式系数， h 为网格单元大小。

进一步，可以得到：

$$f_1 = f_{h=0} + g_1 h_1 + g_2 h_1^2 + \dots \quad (3-6)$$

$$f_2 = f_{h=0} + g_1 h_2 + g_2 h_2^2 + \dots \quad (3-7)$$

式中， $h_1 = \frac{h_2}{r}$

根据(3-5)，(3-6)及(3-7)，可以推导出：

$$f_{h=0} \approx f_1 + \frac{f_1 - f_2}{r^{p-1}} \quad (3-8)$$

式中， p 为收敛阶数。

二阶收敛公式为：

$$f_{h=0} \approx f_1 + \frac{f_1 - f_2}{r^2 - 1} \quad (3-9)$$

在具体应用该法计算稳定收敛解时，收敛阶数可以由式(3-10)计算而得：

$$p = \frac{\ln \left(\frac{f_3 - f_2}{f_2 - f_1} \right)}{\ln(r)} \quad (3-10)$$

网格收敛指数（GCI）定义为：

$$GCI = \frac{f_1 - f_2}{f_1} \frac{F_s}{r^p - 1} \quad (3-11)$$

式中， F_s 为安全系数。

$$F_s = \begin{cases} 1.25, & \text{当有两类大小的网格时} \\ 3.0, & \text{当有三类或以上大小的网格时} \end{cases}$$

GCI 可以作为表示相对误差的指标，GCI 越小，所求解与稳定收敛解越接近。

综上所述，为了求得有限元分析的稳定收敛解，至少需要对同一个模型采用 3 种成等比关系（比值即为 r ）的网格大小分别进行计算得到 f_1, f_2, f_3 。然后可以计算收敛阶数 p ，进而可以计算近似的稳定收敛解 $f_{h=0}$ 以及 GCI。

3.4 驱动器有限元分析结果

由于多腔式气动软体驱动器建模理论尚不完善，因此有限元方法成为分析该类驱动器运动形态的主要方法。运用 Abaqus 等有限元分析软件可以实现对驱动器受气压作用后的运动状态的仿真模拟，并呈现可视化的仿真结果。经过有限元方法的仿真，可以得到多腔式气动软体驱动器的弯曲运动形态，如图 3-3 所示。驱动器在 0.08 MPa 气压作用下逐渐产生弯曲至接近圆形。

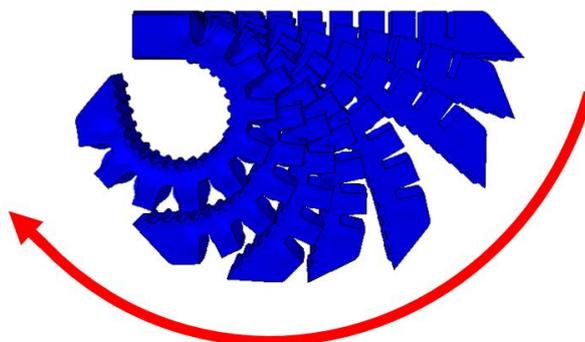


图 3-3 驱动器在 0.08 MPa 气压作用下的弯曲运动

Abaqus 软件的有限元分析能够清晰地展现驱动器的弯曲过程。多腔式软体驱动器的弯曲依靠每一个腔体的膨胀。如图 3-4 所示，每一个空腔受气压作用后产生球形状膨胀，各腔体间相对的硅胶面为最薄，因此这些硅胶面膨胀最为显著。驱动器主要绕 z 轴产生弯曲，因此空腔应当以初始状态 x 轴方向为主要膨胀方向。当所受气压大小相同时，硅胶层厚度最小的方向为主要膨胀方向。

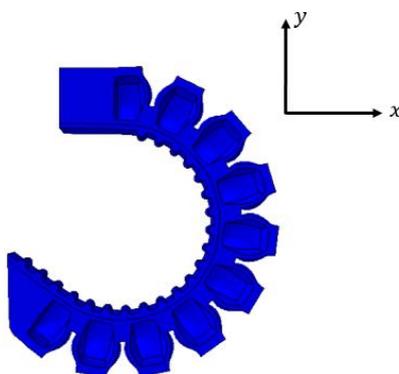


图 3-4 驱动器膨胀状态的剖面图

多腔式气动驱动器的弯曲角度与气压大小有直接关系。本文中对多腔式气动软体驱动器进行了在不同气压作用下的弯曲角度有限元分析。驱动器尺寸参数列于表 3-3 内。

表3-3 驱动器几何尺寸

参数	数值
截面形状	正方形
空腔数目	10
内腔高度	8mm
侧面与顶面厚度	2mm
腔体正面厚度	1mm
腔体外宽度	6mm
腔体内宽度	4mm
腔体连接部位高度	5mm
驱动器高度	12mm
驱动器上层高度	10mm
驱动器中层高度	1mm
驱动器下层高度	1mm
腔体连接部位宽度	2mm
腔体连接部位内气道边长	2mm

驱动器模型的工程图如图 3-5 所示。

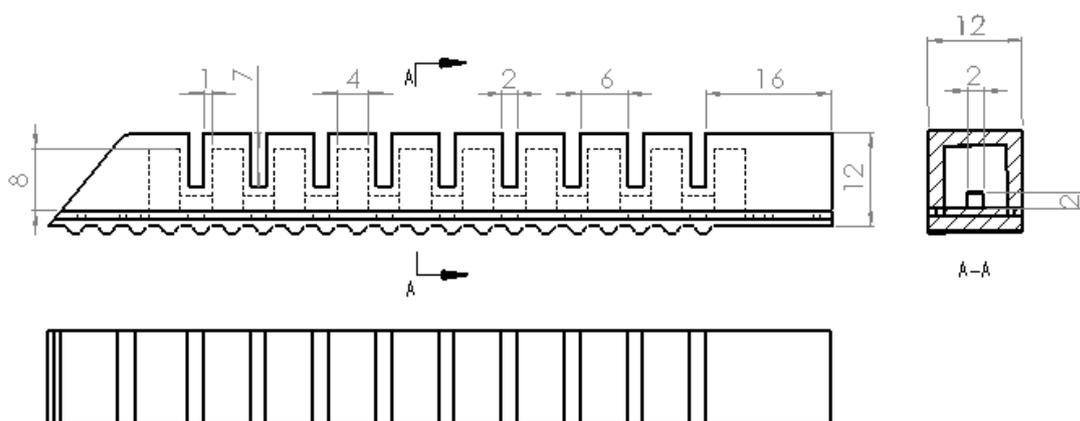


图 3-5 驱动器模型工程图

针对多组在不同气压大小作用的驱动器分别进行有限元分析,结果显示驱动器弯曲角度与气压大小成线性关系。具体数值分析结果如表 3-4、图 3-6 所示。采用一次函数拟合数据点得到的拟合函数为:

$$\theta = 3828.6P - 9.5714 \quad (3-12)$$

式中, θ 为驱动器的弯曲角度, 单位为度 ($^{\circ}$)。 P 为驱动器所受的气压大小, 单位为 MPa。

表3-4 驱动器弯曲角度与气压大小的关系表

气压 (MPa)	弯曲角度 (°)
0.01	35
0.02	66
0.03	102
0.04	138
0.05	180
0.06	221
0.07	263

驱动器弯曲角度与气压的关系图

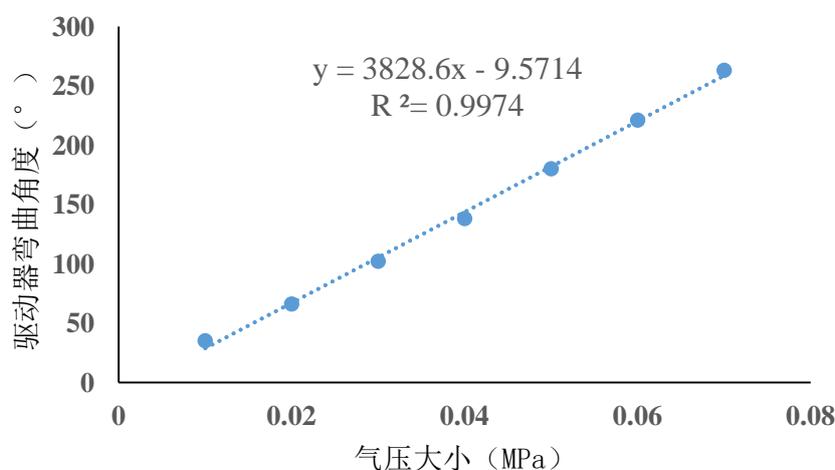


图 3-6 驱动器弯曲角度与气压关系

本文使用均方根误差与决定系数评价拟合函数。

均方根误差(Root Mean Squared Error, $RMSE$):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (3-13)$$

式中, n 为数据组数, y_i 为真实结果值, \hat{y}_i 为拟合函数值。

决定系数 (R^2):

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{res}}{SS_{tot}} \quad (3-14)$$

式中, SS_{res} 为残差平方和, SS_{tot} 为总平方和:

$$SS_{res} = \sum_i (y_i - f_i)^2 = \sum_i e_i^2 \quad (3-15)$$

$$SS_{tot} = \sum_i (y_i - \bar{y})^2 \quad (3-16)$$

根据上述公式, 可以计算得到 FEM 分析结果所得的驱动器弯曲角度与气压大小的拟合函数产生的 $RMSE = 3.9175$, 属于可以接受的小范围误差。 $R^2 = 0.9974$, 拟合优度较高。因此, 驱动器的弯曲角度与气压大小可以用线性关系描述。

本文对驱动器末端作用力及气压大小也进行了有限元分析。如表 3-5、图 3-7 所示, 驱动器末端作用力的大小与气压大小的关系可以使用二次函数拟合进行描述。拟合函数为:

$$F = 57.15P^2 - 0.401P + 0.0436 \quad (3-17)$$

式中, F 为驱动器末端作用力大小,单位为 N。 P 为驱动器所受的气压大小,单位为 MPa。

表3-5 驱动器末端作用力与气压关系

气压 (MPa)	末端作用力(N)
0.01	0.0314
0.03	0.0971
0.05	0.179
0.07	0.296
0.1	0.549
0.13	0.97

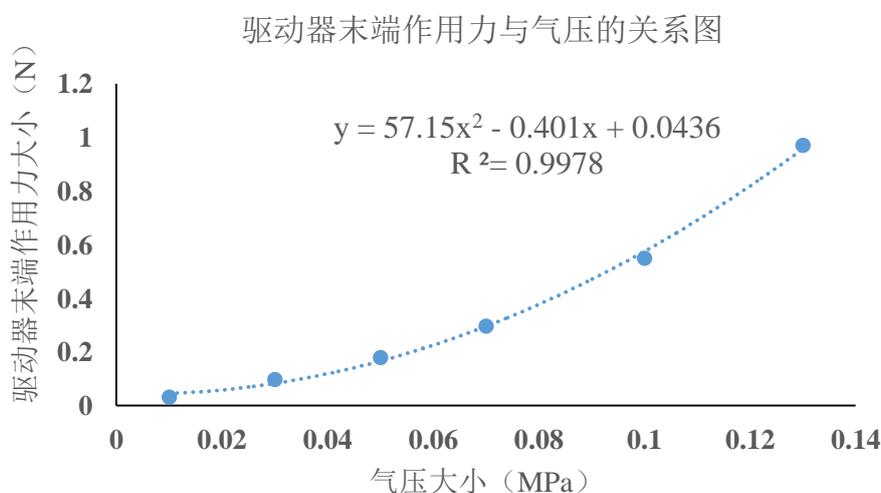


图 3-7 驱动器末端作用力与气压关系

根据均方根误差及决定系数的公式计算可得:

$$RMSE = 0.0152, R^2 = 0.9978 \quad (3-18)$$

因此,使用二次多项式可以较为准确的描述驱动器末端作用力大小以及驱动器内部空腔所受气压大小的关系。

3.5 驱动器几何因素对其性能的影响

本文借助有限元分析的方法对驱动器的重要几何参数进行了分析。几何参数包括:截面形状,空腔数目,内腔高度,侧面与顶面厚度,各腔体间连接部位高度。图 3-8,图 3-9 为驱动器参考组的上层、中层、下层(中层、下层模型一致)的三视图。此驱动器与 3.4 节中的驱动器略有不同。为了加快有限元分析的运行速度,减少计算时间,在研究几何参数对驱动器性能的影响时在模型中省去了驱动器前端的弧形结构等,简化驱动器模型。

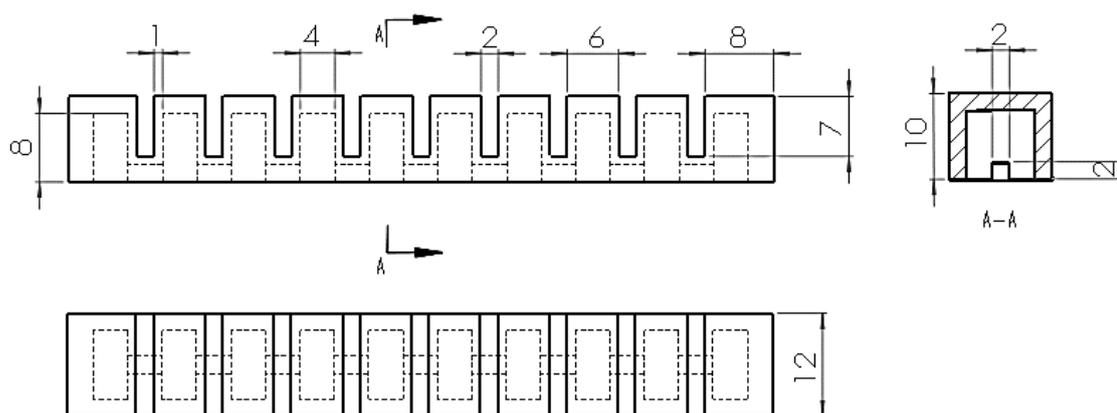


图 3-8 驱动器上层三视图

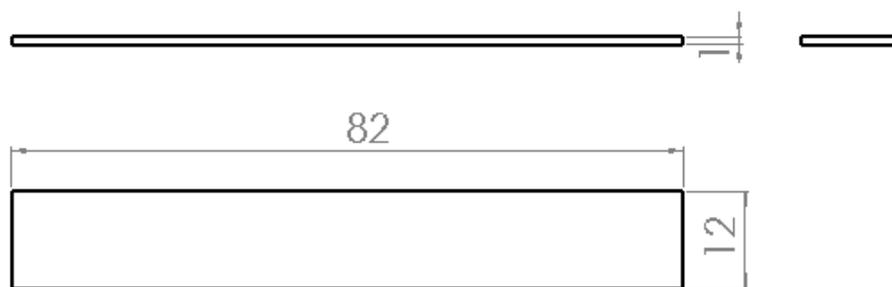


图 3-9 驱动器中层及下层三视图

3.5.1 不同横截面形状

本文针对不同截面形状的驱动器进行了有限元分析。分析过程中采用了控制变量的方法（下文其余参数的分析均采用该方法）。在本参数分析中，各个驱动器的横截面积、壁厚、腔体间连接部位的高度、腔体数目等均保持相同。分析结果列于表 3-6，图 3-10，图 3-11，图 3-12 中，所有数值解均采用 GCI 方法求取近似收敛解。

表3-6 FEM对横截面形状的分析结果

横截面形状	重力作用下弯曲角度 (°)	0.035MPa 气压作用下弯曲角度 (°)	0.05MPa 气压作用下末端作用力 (N)
半圆	26	93	0.146
半圆、顶部截平	26	82	0.118
正方形	33	121	0.137
三角形	29	88	0.121

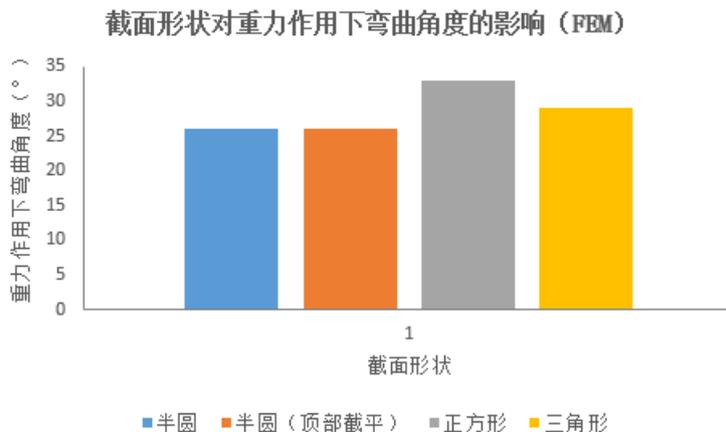


图 3-10 驱动器弯曲角度 (重力作用) 与截面形状关系

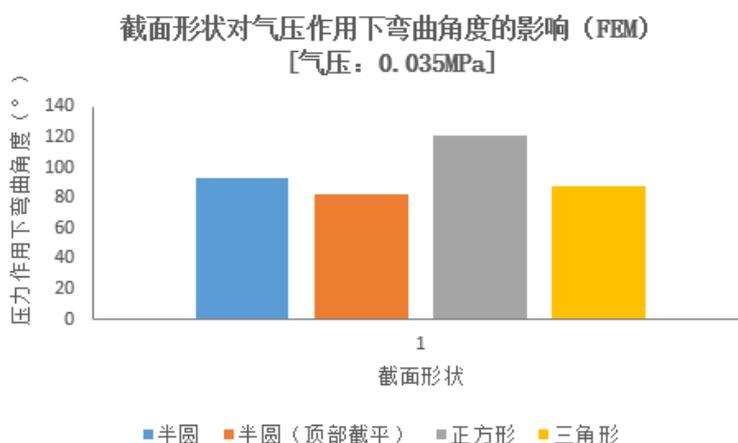


图 3-11 驱动器弯曲角度 (气压作用) 与截面形状关系

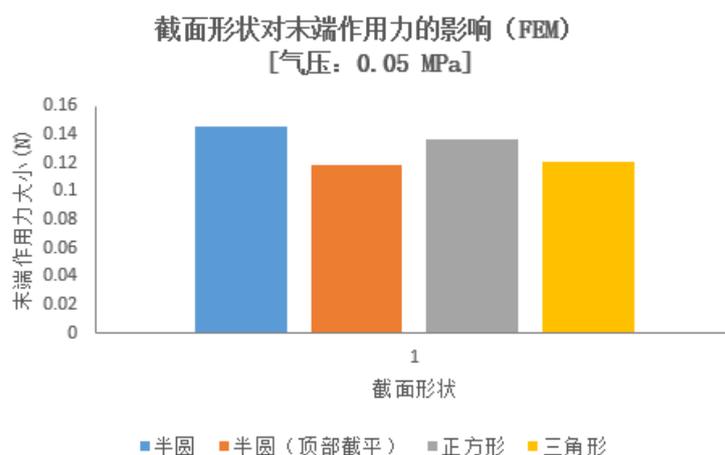


图 3-12 驱动器末端作用力与截面形状关系

在其他条件相同的情况下, 正方形截面形状能使驱动器产生最大程度的弯曲形变, 但其能提供的末端作用力不如半圆形截面驱动器。半圆形截面形状能使驱动器产生最大末端作用力, 但此类驱动器产生的弯曲形变不如正方形截面驱动器。半圆且顶部截平的形状产生的弯曲角度与末端作用力最小。三角形截面的性能表现处于中等水平。由此可见, 驱动器截面形状会对驱动器性能产生较为显著的影响, 应当根据实际的应用需求选择合适的截面形状。

3.5.2 不同空腔数目

空腔体的数量对驱动器的弯曲能力以及末端作用力也会有较大的影响。有限元分析的数值解列于表 3-7, 图 3-13, 图 3-14, 图 3-15 中。由图表可见, 空腔数越多, 驱动器下垂程度越大, 在气压作用下产生的弯曲程度也越大, 末端作用力也越大。多腔式气动驱动器的整体形变是每个腔体膨胀形变的累积, 因此空腔数越多, 一方面自身重力会越大, 从而在自身重力作用下弯曲角度更大, 另一方面在相同气压作用下, 更多的腔体发生膨胀形变, 驱动器产生的累积形变和越大, 所以气压作用下弯曲角度也更大。末端作用力是根据模拟驱动器抓取物体时末端作用点静止形态计算所得, 因此当驱动器具有更多的腔体时, 受气压作用下, 其内部储备的弹性势能越高, 因驱动器末端固定无法产生大幅的弯曲, 弹性势能无法得到释放, 所以驱动器末端会产生更大的作用力。

表3-7 FEM对空腔数目的分析结果

空腔数	重力作用下弯曲角度 (°)	0.035MPa 气压作用下弯曲角度 (°)	0.05MPa 气压作用下末端作用力 (N)
7	18	95	0.114
8	20	112	0.131
9	33	122	0.137
10	42	140	0.155

空腔数目对弯曲角度（重力作用）的影响

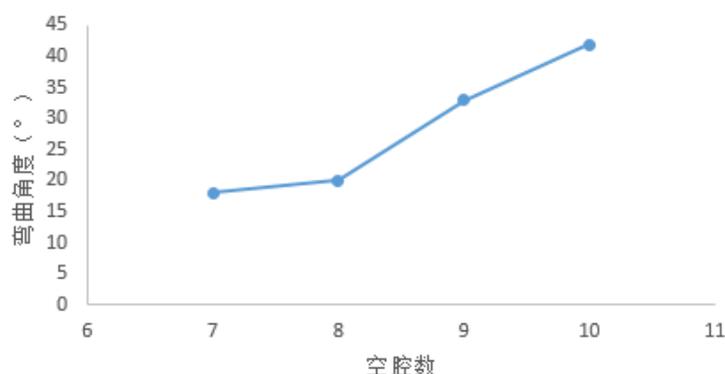


图 3-13 驱动器弯曲角度（重力作用）与空腔数目关系

空腔数目对弯曲角度（气压作用）的影响
[气压: 0.035 MPa]

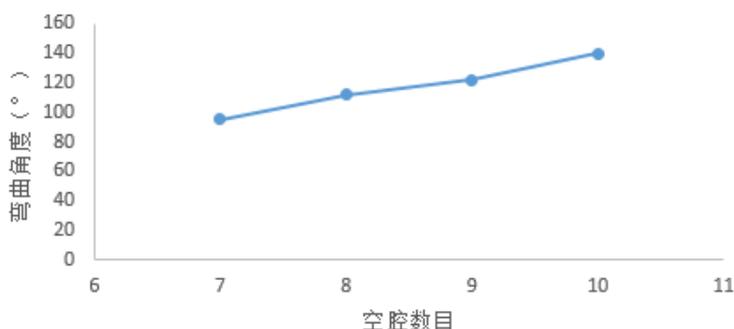


图 3-14 驱动器弯曲角度（气压作用）与空腔数目关系

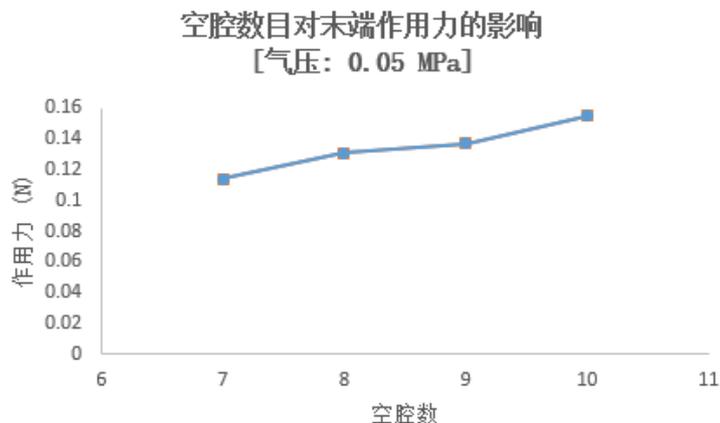


图 3-15 驱动器末端作用力与空腔数目关系

3.5.3 不同内腔高度

驱动器内部空腔的高度（图 3-16）亦会对驱动器的性能产生显著的影响。由表 3-8，图 3-17，图 3-18，图 3-19 可见，内部空腔高度越高，驱动器下垂程度越大，在气压作用下产生的弯曲程度也越大，末端作用力也越大。这是因为内部空腔高度越高，自身重力越大，而且其表面积也会增加，因此在相同气压作用下受力面积会越大，驱动器所受的作用力也就越大，因而产生的弯曲程度会加大，末端作用力也会增大。

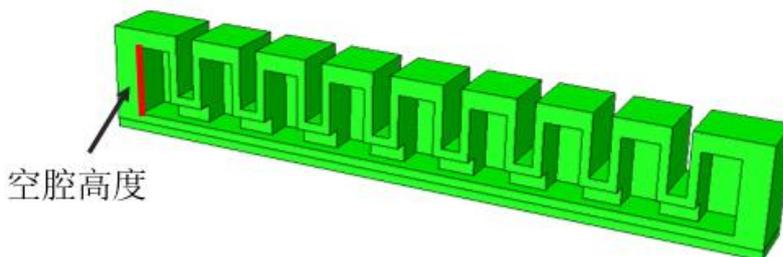


图 3-16 空腔高度示意图

表3-8 FEM对空腔高度的分析结果

内腔高度 (mm)	重力作用下弯曲角度 (°)	0.035MPa 气压作用下弯 曲角度 (°)	0.05MPa 气压作用下末 端作用力 (N)
4	23	78	0.0415
6	29	138	0.109
8	35	166	0.137

空腔高度对弯曲角度（重力作用）的影响

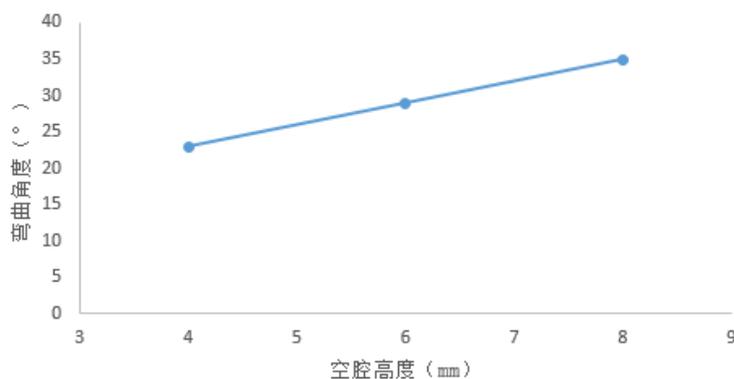


图 3-17 驱动器弯曲角度（重力作用）与空腔高度关系

空腔高度对弯曲角度（气压作用）的影响
[气压: 0.05 MPa]

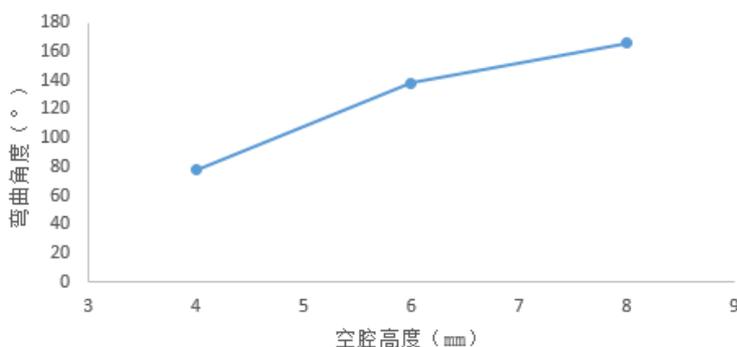


图 3-18 驱动器弯曲角度（气压作用）与空腔高度关系

空腔高度对末端作用力的影响
[气压: 0.05 MPa]

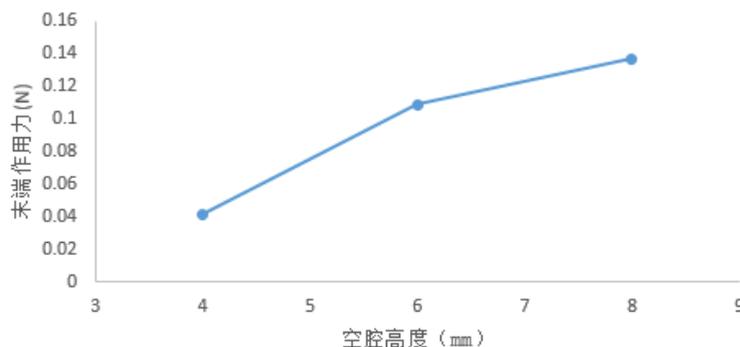


图 3-19 驱动器末端作用力与空腔高度关系

3.5.4 不同侧面、顶面厚

本文对驱动器侧面以及顶面厚度（图 3-20）对驱动器性能的影响进行了有限元分析。根据表 3-9，图 3-21，图 3-22，图 3-23 所示结果可知，随着侧面及顶面厚度加大，驱动器下垂程度呈下降趋势，在气压作用下产生的弯曲程度也相继减弱，末端作用力亦趋于下降。这是因为侧面及顶面厚度越大，侧面与顶面对驱动器纵向伸张的约束能力越强，减小了每个腔体膨胀程度，进而减小了驱动器整体的弯曲角度。当驱动器末端自由状态所能产生的弯曲程度减小时，其在末端固定的状态下具有的弹性势能就越小，末端能够产生的作用力也随之

减小。

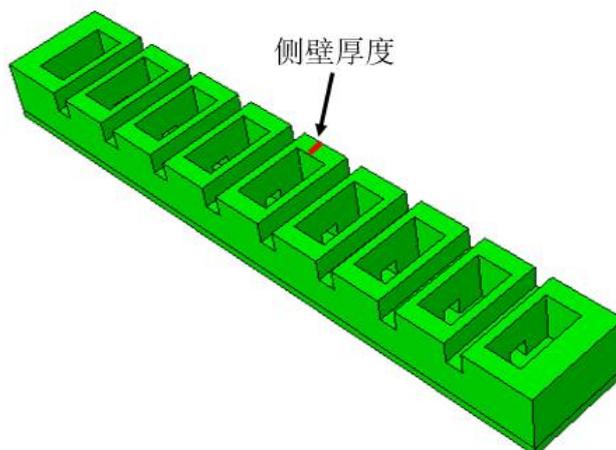


图 3-20 侧壁厚度示意图

表3-9 FEM对侧面顶面厚度的分析结果

侧面、顶面厚 (mm)	重力作用下弯 曲角度 (°)	0.05MPa 气压作用下 弯曲角度 (°)	0.05MPa 气压作用下 末端作用力 (N)
1	42	287	0.234
1.5	39	205	0.17
2	35	166	0.137
2.5	33	122	0.0975
3	30	99	0.066

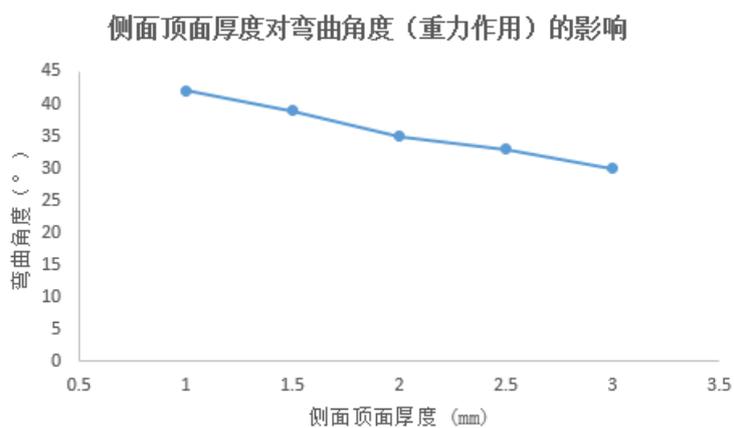


图 3-21 驱动器弯曲角度（重力作用）与侧面顶面厚度关系

侧面顶面厚度对弯曲角度（气压作用）的影响
[气压：0.05 MPa]

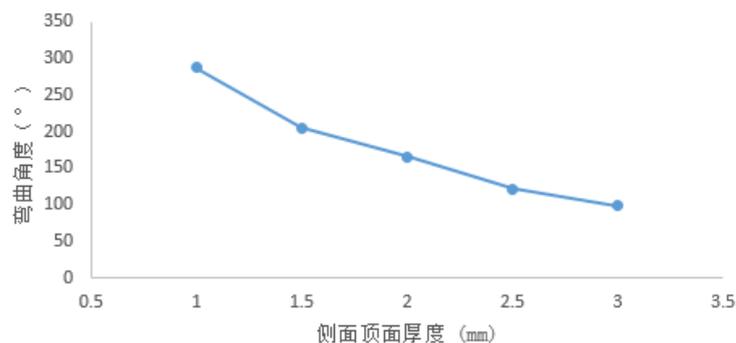


图 3-22 驱动器弯曲角度（气压作用）与侧面顶面厚度关系

侧面顶面厚度对末端作用力的影响
[气压：0.05 MPa]

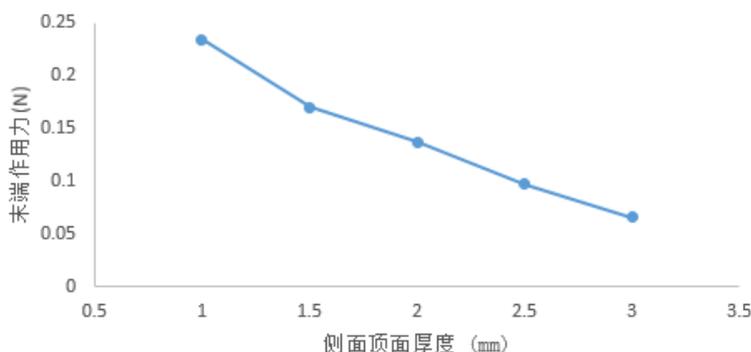


图 3-23 驱动器末端作用力与侧面顶面厚度关系

3.5.5 连接部位不同的高度

各腔体之间由一小段实体硅胶相连(仅在中留有横截面积较小的通道以使各腔体间气道相通),连接部位的高度(图 3-24)对驱动器的性能会产生明显影响。根据表 3-10,图 3-25,图 3-26,图 3-27 可知,各腔体间连接部位高度越高,受重力作用的下垂幅度越小,受相同大小气压作用下产生的弯曲程度也越小,末端作用力也越小。随着腔体间连接部位高度的增大,各腔体之间的相互约束力以及牵制力会不断加大,各个腔体之间连接也更加紧密,后一腔体的膨胀弯曲会受到前一腔体的牵制,因此驱动器形变程度降低。再者,因为连接部位硅胶厚度大不易弯曲,所以连接部位高度增大,减小了空腔的有效受力面积,这也减小了空腔膨胀的能力。当驱动器的弯曲能力下降时,其末端能够产生的作用力也就随之下降。

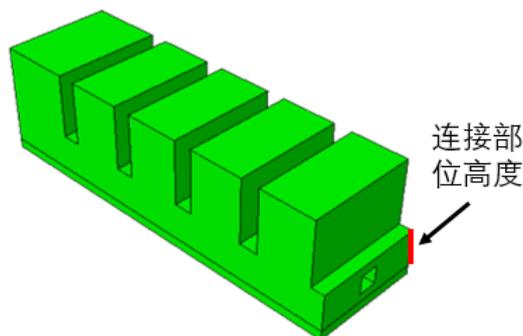


图 3-24 连接部位高度示意图

表3-10 FEM对连接部位高度的分析结果

连接部位高度 (mm)	重力作用下弯曲角度 (°)	0.05MPa 气压作用下弯曲角度 (°)	0.05MPa 气压作用下末端作用力 (N)
3	35	166	0.137
4	21	138	0.136
5	15	110	0.128
7	8	61	0.0805

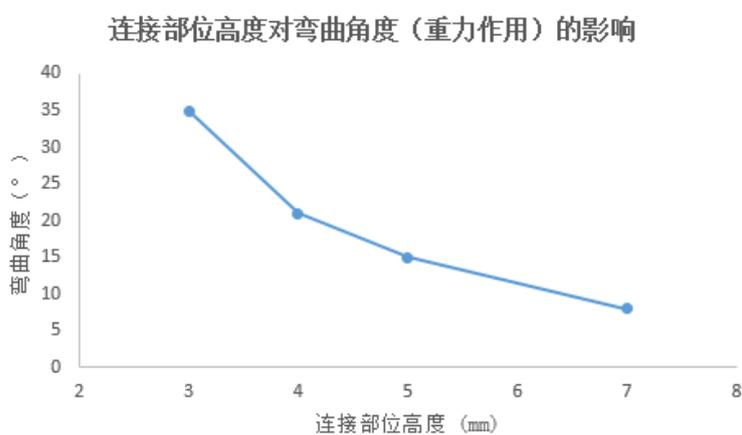


图 3-25 驱动器弯曲角度（重力作用）与连接部位高度关系

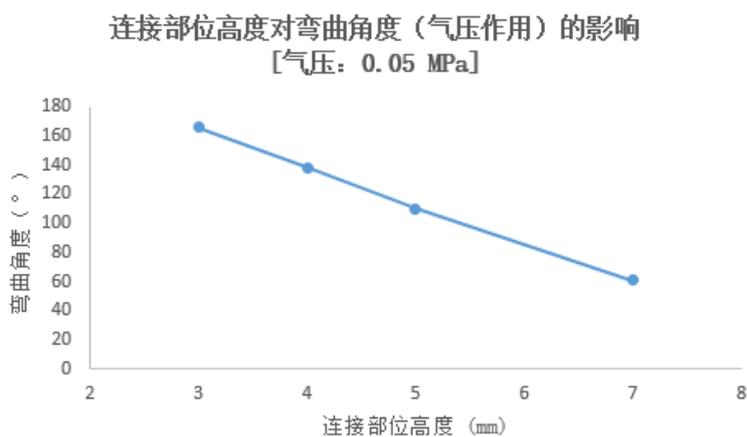


图 3-26 驱动器弯曲角度（气压作用）与连接部位高度关系

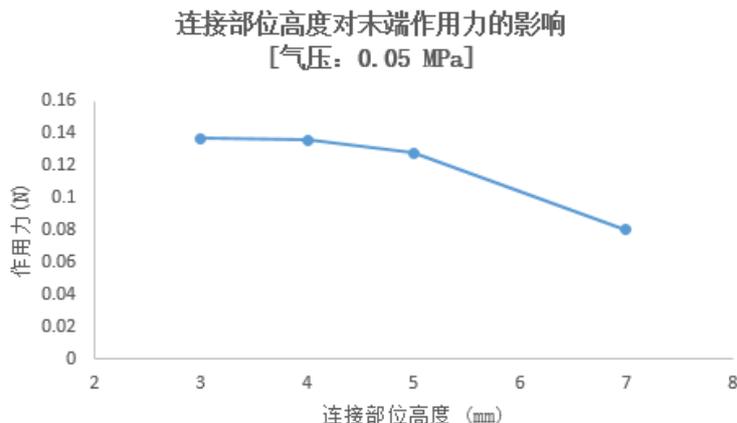


图 3-27 驱动器末端作用力与连接部位高度关系

上述结论可以在模具驱动器几何尺寸时提供一定的参考原则。本文还利用 Abaqus 有限元分析软件对驱动器受气压作用膨胀后的应力分布情况进行了分析。如图 3-28 所示, 驱动器受压膨胀后主要在边角处 (如各气腔间气流连接通道的转角处, 气腔的高度方向及侧面方向的边角处) 存在应力集中。当气压超过安全气压时, 这些部位最容易发生破裂情况。因此, 驱动器的设计不仅要考虑几何因素对其性能的影响, 而且要在应力集中处采用分散应力的设计, 如在边角处倒角形成圆弧以减小应力集中。

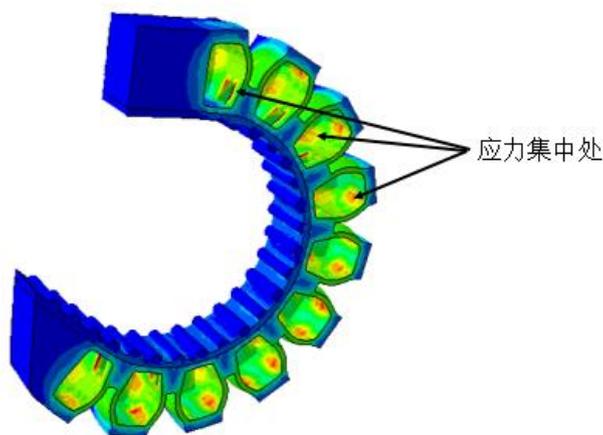


图 3-28 驱动器膨胀状态应力集中处

3.6 本章小结

本章主要介绍了利用有限元分析的方法对多腔式驱动器进行仿真分析, 使用的软件为 Abaqus。有限元建模中, 硅胶材料 (Elastosil M4601) 运用了 Yeoh 模型, 不可拉伸材料 (纸层) 运用了普通弹性材料模型。本章中详细列举了有限元建模过程中使用的参数以及有限元建模过程。由于 Abaqus 采用 p 型方法控制解的收敛性, 因此有限元建模过程中网格大小的选取对于 FEM 结果的收敛程度有很大影响。为了减少网格大小试验次数, 同时保证 FEM 分析结果十分接近收敛解, 本章详细介绍了网格收敛指数 (GCI) 方法。GCI 方法需要以成等比关系的三组网格大小分别使用 Abaqus 软件进行有限元分析计算, 根据三组计算结果可以求取与收敛解十分接近的近似解。GCI 可以作为表示相对误差的指标, GCI 越小, 所求解与稳定收敛解越接近。

本章使用 GCI 方法对多组参数进行了有限元分析。结果显示驱动器弯曲角度与输入气压（表压）可以认为成线性关系，驱动器末端作用力与输入气压可以使用二次多项式关系描述。

本章最后探究了驱动器相关几何尺寸对驱动器弯曲角度和末端作用力的影响。相比与半圆截面，三角形截面、半圆但顶部截平的截面驱动器，正方形截面形状的驱动器能够在相同气压作用下产生最大程度的变形。而半圆形截面形状能使驱动器产生最大末端作用力。空腔数越多，气动软体驱动器下垂程度越大，在气压作用下产生的弯曲程度也越大，末端作用力也越大。内部空腔高度越高，驱动器下垂程度越大，在气压作用下产生的弯曲程度也越大，末端作用力也越大。随着侧面及顶面厚度加大，驱动器下垂程度呈下降趋势，在气压作用下产生的弯曲程度也相继减弱，末端作用力亦趋于下降。各腔体间连接部位高度越高，受重力作用的下垂幅度越小，受相同大小气压作用下产生的弯曲程度也越小，末端作用力也越小。

第四章 软体操作手应用

4.1 制造工艺

4.1.1 模具设计

软体驱动器主要由硅胶材料组成。韩国首尔大学的 Kyu-Jin Cho 等人总结了软体机器人制作的常用方法^[38]，主要包括铸造技术，纳米压印技术，激光成像技术，激光消融技术，熔融沉积造型技术等。根据 2.1 节内对单腔式与多腔式驱动器的对比，本文采用多腔式驱动器进行操作手的设计与制作。本文中采用铸造的方式制作软体驱动器，并在实验过程中对模具设计不断优化，总结出以下三种模具设计方式。

第一种模具设计为“拔除模具式”，即铸造过程中使用上下两层模具，铸造时将两层模具堆叠贴合，将液态硅胶浇入模具内，待硅胶凝固后，先拔除上层模具，然后拔起已凝固成型的硅胶驱动器。模具样例如图 4-1 所示。

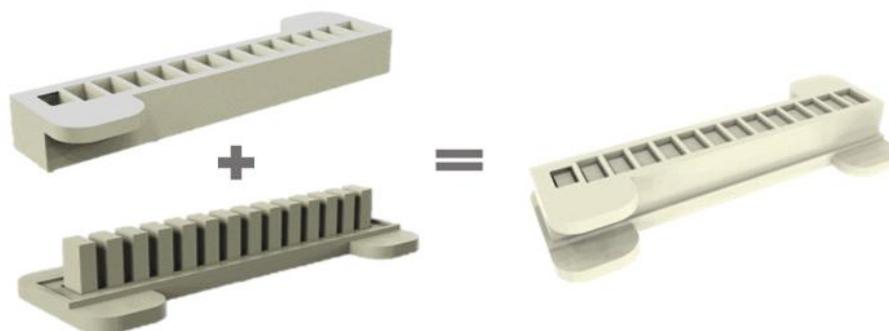


图 4-1 “拔除模具式”模具

第二种模具设计为“压板式”。模具分为三部分，下层模具与两个上层模具。每个上层模具都有一块延伸的压板结构，在模具内浇入硅胶，待硅胶凝固成型后，下压上层模具的压板，分离两个上层模具，而后拔取硅胶驱动器。模具样例如图 4-2 所示。

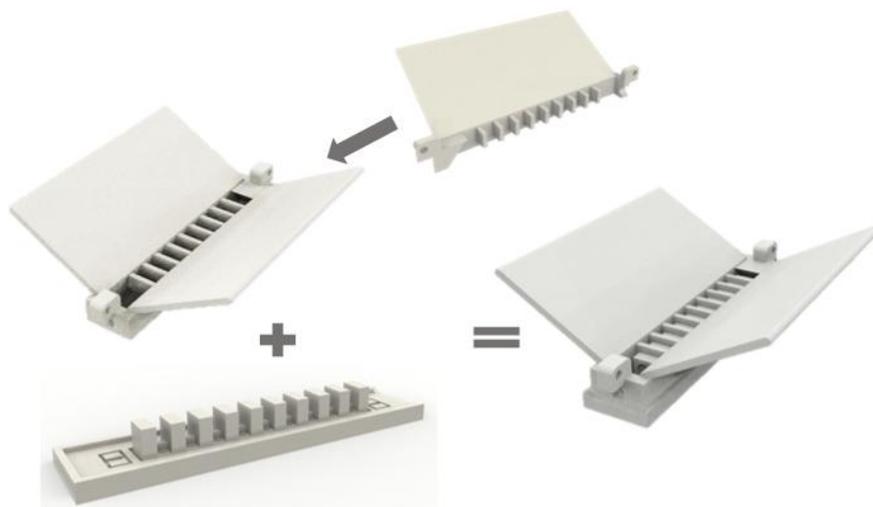


图 4-2 “压板式”模具

第三种模具设计为“拔除硅胶式”。“拔除硅胶式”与上述两种铸造方式不同，模具设计过程中考虑了拔取驱动器时不采用先拔除模具的方式，而是采用直接拔取硅胶的方式。模具含有多个隔板以及一个尾板，隔板和尾板均为可拆除型。模具使用时先插入隔板，固定好尾板，而后浇入硅胶。待硅胶凝固后，先拔除隔板与尾板，然后从尾板位置处即可拔取硅胶。模具样例如图 4-3 所示。



图 4-3 “拔除硅胶式” 模具

经过实验验证，第三种模具设计方式“拔除硅胶式”最优。第一种模具设计方式“拔除模具式”能够使硅胶凝固成型后具有最佳的表面质量，铸造所得的驱动器形状符合驱动器设计的形状。但是它在制造过程中存在较大的缺点：拔除上层模具十分困难。因为硅胶与模具贴合面积大，且硅胶与模具之间的粘合力大，所以模具直接拆除难度大。第二种模具设计方式“压板式”具有的优点就是下压模具压板所需外力小，拆除模具简单。但是它的缺点是因为上层模具沿中心面分为两半，因此在铸造过程中上层两个模具间的分割面间会渗入液态硅胶，导致凝固后驱动器空腔间相对面上有凸起，影响驱动器表面质量与外观。第三种模具设计方式“拔除硅胶式”综合了上述两种方式的优点，摒弃拔除模具的设计理念，采用逐步拔取硅胶的方式既减小了拔取所需的外力大小，又能保证驱动器的表面质量，使得腔体相对面的表面平整光滑。

4.1.2 制造流程

气动软体驱动器的制作主要设计 3D 打印以及铸造成型技术。下文以“压板式”模具为例，具体流程如下：

- (1) 设计驱动器三维模型，并且根据驱动器的三维模型设计铸造所需模具的三维模型。驱动器模型应至少分为上下两层，并且两层分别设计模具。驱动器设计过程中需要在驱动器上层的底表面添加若干凸块，以增加上层模型与下层模型在二次粘和时相互之间的粘合力，确保上下层模型在受气压作用时不分离。凸起结构如图 4-4 所示。模具设计完成后采用 3D 打印技术打印模具。

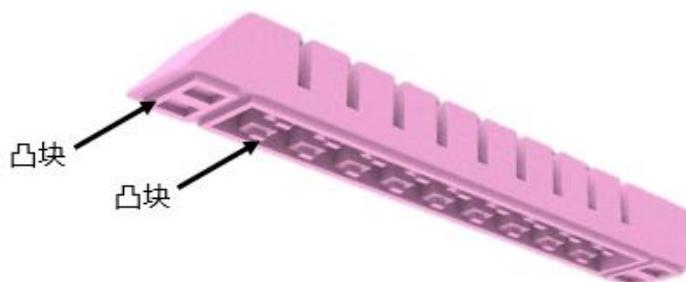


图 4-4 驱动器上层模型凸块结构

- (2) 组装模具，得到铸造上层模型 (A) 与下层模型 (B) 的两套模具 (图 4-5)。并以驱动器模型下层的截面形状 (沿高度方向的截面) 裁剪合适大小的纸层。



图 4-5 驱动器制作模具

- (3) 量取体积比为 9:1 的 Elastosil M4601 A 胶与 B 胶，充分搅拌混合，置于真空箱内去除硅胶内融入的空气。
- (4) 向 A 套模具内缓慢倒满硅胶，B 模具倒入 1mm 深的硅胶，并将纸层贴于硅胶上表面，然后将 A、B 模具均放入恒温箱内 70℃ 保温 20 分钟。
- (5) 取出模具，下压 A 套模具的两块压板，拆除上层模具，拔取已凝固成型的硅胶。在 B 模具内继续倒入液态硅胶至满，将从 A 套模具中拔取的固态驱动器上层贴合至 B 模具表面，将模具即系放回恒温箱 70℃ 保温 20 分钟。
- (6) 取出模具，将 B 模具与硅胶分离，即可得到完整的气动硅胶驱动器。

其余模具设计方式亦可使用上述铸造流程。在制造过程中，硅胶混合后需要进行真空环境去除空气的操作，以除去硅胶搅拌过程中融入的大量空气。如果液态硅胶内含有过多的气泡，会直接影响硅胶凝固后的质量。

4.2 气动软体操作手抓取应用

本文以气动驱动器作为致动器，设计了一款能够实现抓取功能的气动软体操作手。驱动器采用与 3.4 节中所提的驱动器相同的结构。单个驱动器具体尺寸如图 4-6 所示。该款气动软体操作手由四个多腔式气动软体驱动器组成，呈对称分布。

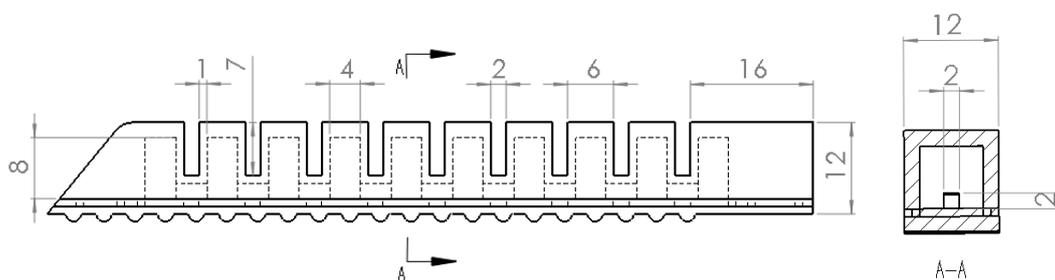


图 4-6 操作手单个驱动器的工程图

在实际制作过程中，本文充分考虑了驱动器与气管间的连接问题，设计了图 4-7 左图显示的连接结构。图 4-7 右图为驱动器与连接机构一体图。连接结构一端嵌入驱动器内部，一端嵌入软体操作手根部的固定装置 (图 4-10)，螺纹孔处用于连接气管快速接头。

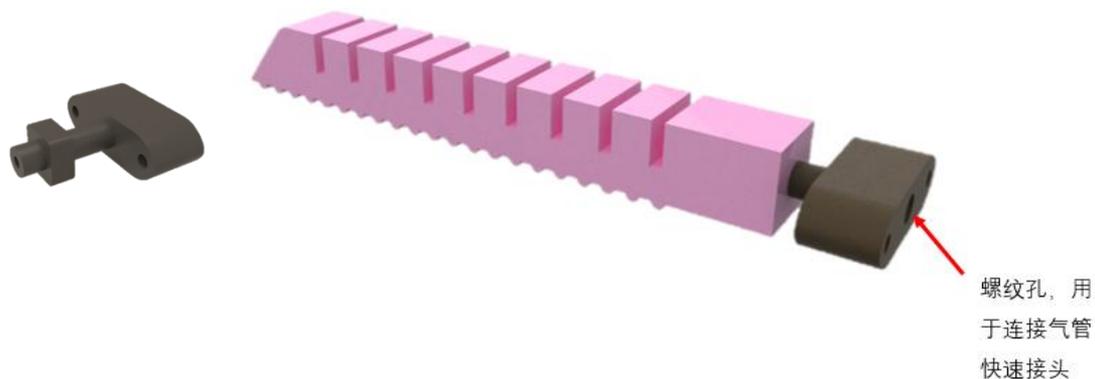


图 4-7 连接结构示意图（左）与驱动器与连接结构一体图（右）

驱动器的制作采用“压板式”方式。铸造模具模型如图 4-8 所示（含连接机构）。

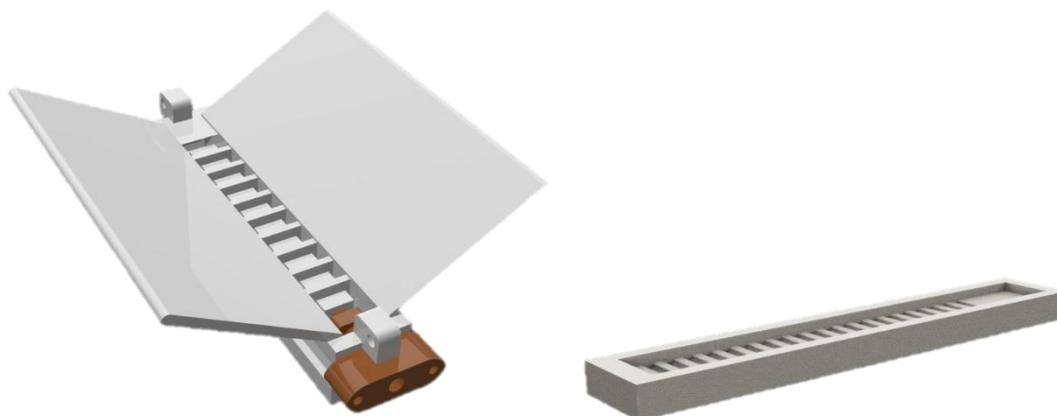


图 4-8 操作手驱动器制作模具

依照 4.1.2 节中所述的制作流程制作气动软体操作手的驱动器。成型后应图 4-7，图 4-9 所示。



图 4-9 单个驱动器受压膨胀状态图

软体操作手根部有固定装置，用于四个驱动器的定位于固定。具体结构见图 4-10。软体操作手总共由气动软体驱动器、连接结构、固定装置、气管快速接头、气管五部分组成。

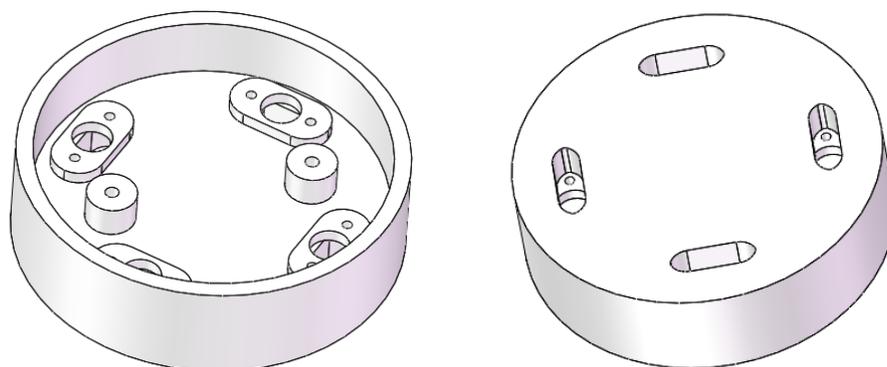


图 4-10 固定装置正面、反面

本文首先对单个驱动器进行了验证性分析,针对有限元分析与实验结果进行对比分析。如下图所示,单个多腔驱动器在重力作用下自然下垂弯曲约 25° , Abaqus 有限元仿真分析显示驱动器弯曲角度约为 22° 。在 0.05 MPa 大气压(表压)作用下驱动器弯曲约为 169° , Abaqus 有限元仿真分析显示驱动器弯曲角度约为 162° 。因此实验结果与 Abaqus 有限元分析结果十分接近,可以判定 Abaqus 有限元分析结果能够较好地预测驱动器在相同条件下实验状态的真实响应。

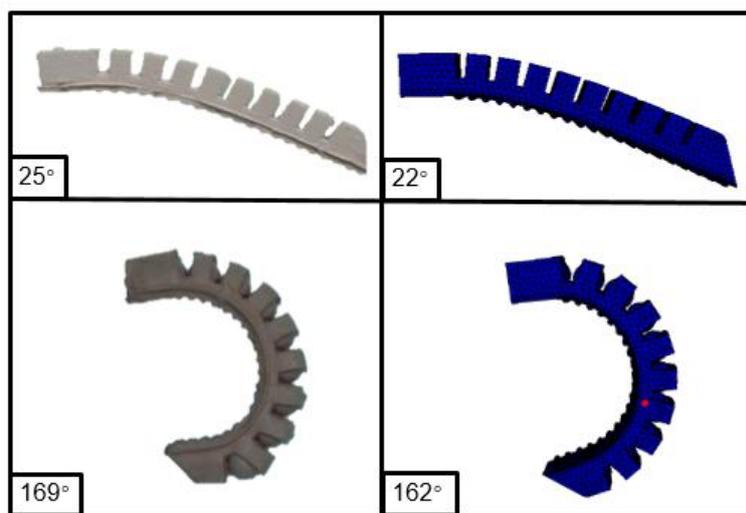


图 4-11 驱动器实验结果与 FEM 结果对比图

实验结果与有限元分析结果存在一定的误差。其误差主要来源于驱动器的制作误差,气压误差,角度测量误差等。在人工制作硅胶驱动器时,由于液态硅胶凝固较快,且流动性低,容易出现硅胶驱动器局部厚度与周边厚度不同的状况,与有限元软件内建立的理想模型形成一定的误差。另外,在实验中充气压时,气压表的精度只有 0.01 MPa ,且控制设备简单,无法精确控制气压大小,因此实验中的气压读数存在误差。实验获得的照片与 Abaqus 有限元分析结果的角度测量也会存在误差。本文中角度测量采用如图 4-12 所示的方法,定义为驱动器末端变形后与变形前的角度差。由于驱动器初始位置角度与变形后位置角度的选线存在人为因素,因此角度测量会存在误差。

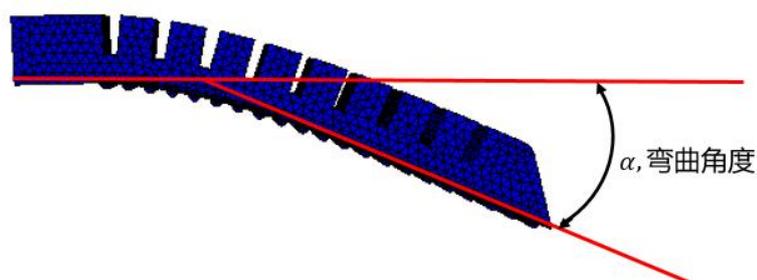


图 4-12 驱动器弯曲角度示意图

如下图所示，该款气动软体操作手由于主要由软体材料组成，适用于抓取轻质、脆性、易碎的物体。软体操作手具备很好的柔韧性，与刚性操作手相比，能够在抓取物体时弯曲自身以充分贴合物体表面，使得抓取接触面更大，抓取更加稳定。另外，软体操作手的柔性材料保证操作手在抓取物体时能够充分保护物体表面，不会因为抓取力量过大而对物体表面造成破坏。

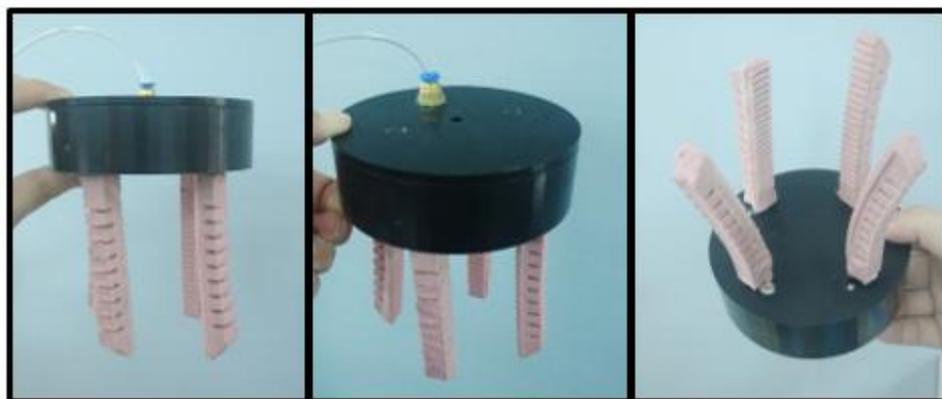


图 4-13 软体操作手

经过实验验证（图 4-14），气动软体操作手能够顺利抓取蔬菜、水果、食品、电子元器件、学习用品等。实验使用气泵以及气阀控制气流。实验中，操作手对于脆性物体表现出很好的柔性优势。操作手能够顺利抓取薯片、面条等易碎易断的物体，并且保持物体的完整性。实验器材如图 4-15 所示。因此，气动软体操作手在食品加工包装、电子元器件加工包装等领域具有很好的应用潜力。

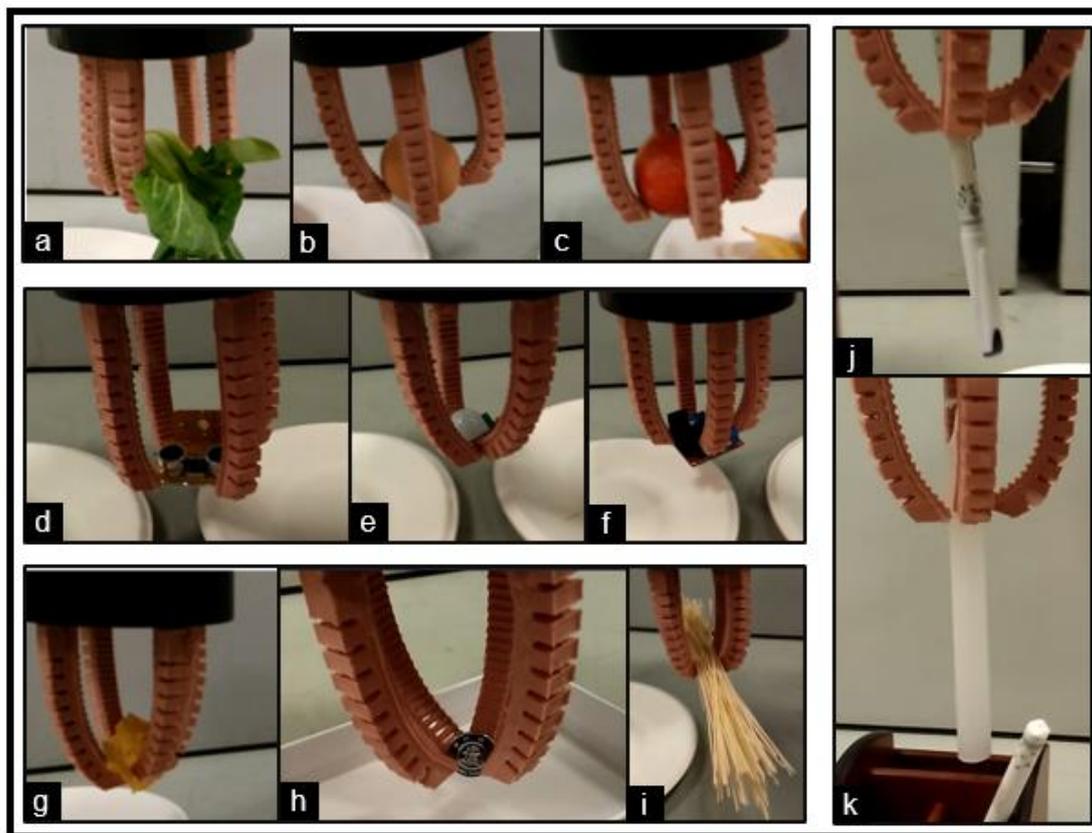


图 4-14 软体操作手抓取实验图

注：a. 青菜 b. 鸡蛋 c. 李子 d. 超声波传感器 e. 人体感应传感器 f. 电机驱动模块
g. 薯片 h. 徽章 i. 面条 j. 笔 k. 蜡烛



图 4-15 实验器材图

本文对软体操作手进行了负载能力测试，如图 4-16 所示。使用该软体操作手抓取一定重量的物体，具体过程如图 4-16 所示。经过实验得到，该软体操作手能够在安全气压范围内轻松抓取重量为 300 g(气压为 0.11 MPa), 350g(气压为 0.12 MPa), 400g(气压为 0.13 MPa) 的重物。气压测量所用的气压表精度为 0.01 MPa。该软体操作手的安全气压为 0.14 MPa。

在加大气压的状况下，软体操作手也能抓取重量为 450g（气压为 0.14 MPa）的物体，但抓取过程不稳定，重物容易掉落。且气压过大，容易导致软体驱动器薄弱处出现爆裂。

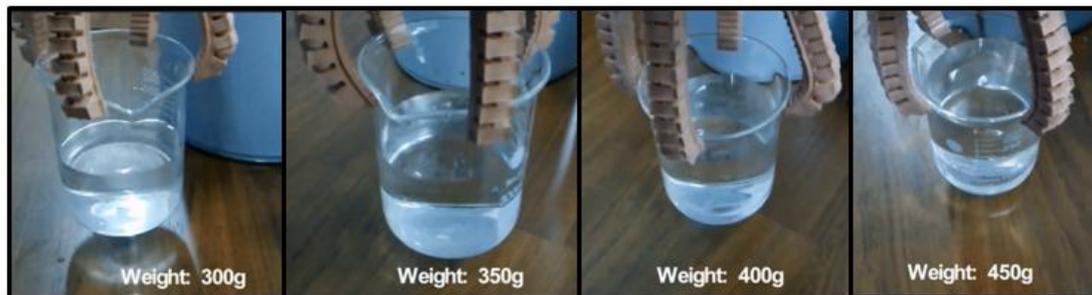


图 4-16 操作手负载重量测试

实验过程中的安全气压数值一般小于 Abaqus 有限元仿真中的允许气压值。主要原因在于制作过程中液态硅胶搅拌过程中会融入大量的空气，即使采用真空泵抽取空气，也不能完全去除模具内成型硅胶含有的空气，在气压超过安全值时，腔体膨胀，气泡处硅胶尤为薄弱，容易出现破裂。另外，制作中驱动器上、中、下层之间为分别凝固后再粘结，所以如果制造质量较低，在气压较高的情况下驱动器各层之间也会出现裂缝。而在有限元分析过程中，模型为理想模型，不含有杂质、空气等，各层之间粘结紧固，因此驱动器耐压程度更高。

根据 3.4 节得到的驱动器末端及气压之间的二次拟合关系（式 3-17）：

$$F = 57.15P^2 - 0.401P + 0.0436$$

可以计算得到，当气压为 0.13 MPa 时，单个驱动器末端能够产生的作用力为：

$$F = 0.9573 \text{ N} \quad (4-1)$$

因此软体操作手四个软体驱动器末端共同作用能产生

$$F_{total} = 3.829 \text{ N} \quad (4-2)$$

所以根据有限元分析结果及拟合结果，软体操作手在 0.13 MPa 气压作用下能在末端对抓取物体施加 3.829 N 的作用力，相当于能够抓取 390.7 g 质量的物体。这与实验结果（400 g）十分接近。其余气压状态下与实验结果的对比如表 4-1 所示。

表4-1 操作手抓取重物实验数据表

气压值(MPa)	FEM 预测软体操作手能 抓取的重物质量(g)	实验中抓取的质量 (g)	相对误差
0.11	282	300	6.38%
0.12	334	350	4.79%
0.13	390	400	2.56%
0.14	452	450	0.44%

从上表可知，有限元分析结果能够较为准确的预测软体操作手在相应气压作用下能抓取的物体质量。由于实验中所用的气压表精度较低，所以实验中实际施加在软体操作手内的气压大小与理想值会存在误差，影响实验结果与有限元预测结果的比较。

4.3 气动软体操作手康复应用

对于手部受伤或者手指部位经过手术的患者，术后需要时常锻炼手指以辅助手部康复。

但是，患者术后手指往往缺乏足够的力量以弯曲手指，无法完成锻炼。因此，此类患者需要手指康复器作为辅助康复器材进行康复训练。

软体驱动器因为采用软体材料，具有很好的柔韧性、亲肤性、抗损性，同时具有成本低廉的优点，因此在康复器的应用上相比于硬质机械康复器具有独有的优势。瑞士洛桑联邦理工学院 Yun Seong Song 等人基于气动软体驱动器对脊髓受损的老鼠进行了步态康复辅助训练^[39]。本文基于多腔式软体驱动器设计了一款能够实现康复训练功能的软体操作手。

该操作手采用“拔除硅胶式”的模式进行铸造模具的设计与制作。操作手软体部分采用一体化式制作模式，增强各个驱动器之间的整体性。模具设计如图 4-17 所示。



图 4-17 操作手上层铸造模具



图 4-18 操作手中、下层铸造模具

使用上述模具以及“拔除硅胶式”的方法可以制得图 4-19 与图 4-20 所示的操作手。

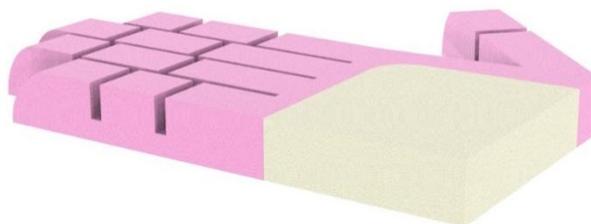


图 4-19 操作手模型图



图 4-20 操作手实物图、康复训练示意图

本文中重点在于试验软体驱动器在康复器中应用的可行性，因此并不侧重设计如何将康复器固定至患者手部。在实验过程中，使用魔术贴将手部关节与驱动器腔体连接，可以达到试验的效果。

经过实验，操作手在手指部位能够产生明显的弯曲力作用，带动使用者手指往复运动。实验过程见图 4-21。

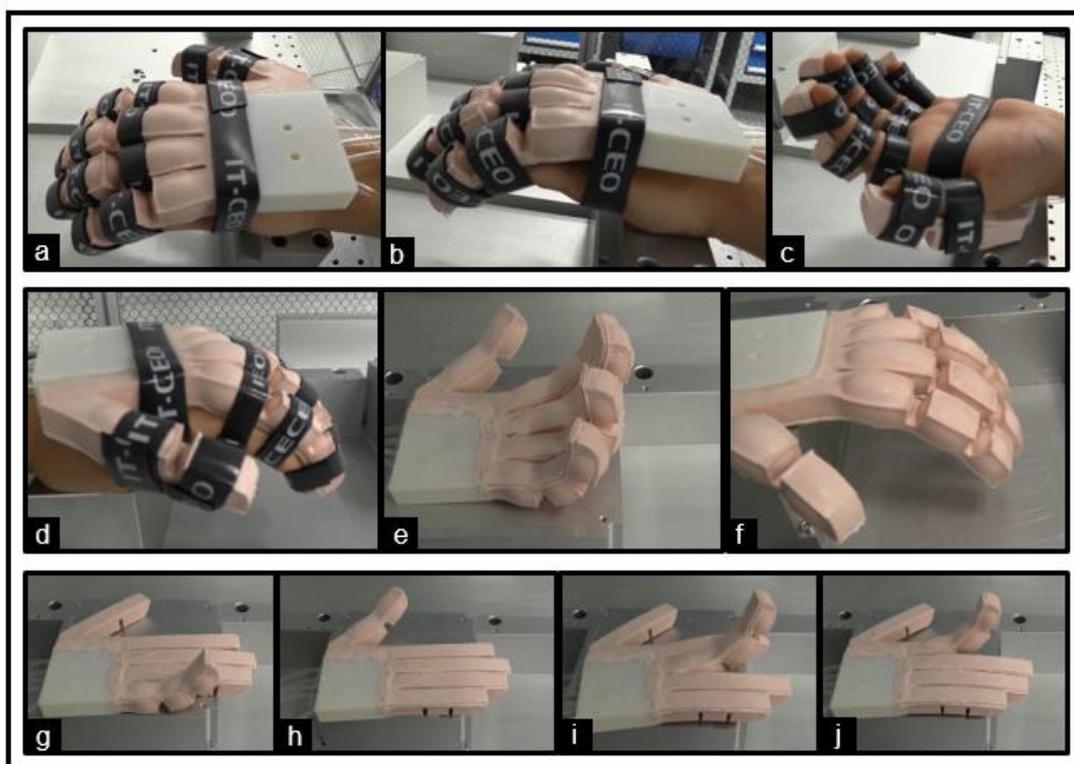


图 4-21 操作手实验图

由图 4-21 可知，该款软体操作手五个驱动器在共同弯曲时能够产生类人手的运动，可以对手指无法自行运动的患者起到较好地辅助康复运动。每个驱动器的腔体数与人手指的关节数目保持一致，因此驱动器的弯曲运动更加贴近手指关节的真实运动，避免驱动器在非关节连接处发生过多的弯曲。

因此,软体驱动器应用于康复医疗设备具有可行性。软体驱动器应用于康复器上,既可以发挥其软体材料柔软的特性,不易对接触体产生损坏,又可以在弯曲过程中弯曲驱动器本体以适应接触体的弯曲,即在弯曲的整个过程中都能保持驱动器与接触体的充分接触。而且,相比于由刚性机械材料组成的操作手,软体操作手成本非常低廉,适用于大规模推广应用。

4.4 本章小结

本章首先介绍了气动软体驱动器的制造工艺。本文中主要使用铸造技术进行制造。本文在实验中探索了三种铸造模具设计方式:“拔除模具式”,“压板式”,“拔除硅胶式”。“拔除模具式”铸造的驱动器表面质量较好,但是模具上下层拆分困难。“压板式”拆除模具简单省时,但是驱动器中分面易出现突起,影响表面质量。“拔除硅胶式”结合了“拔除模具式”以及“压板式”的优点,既能保证模具铸造质量,又能保证硅胶容易拔取。本章简要介绍了铸造流程,重点强调了在铸造过程中控制硅胶内空气含量。

本章中详细介绍了基于气动多腔式软体驱动器而设计的两款气动软体操作手。第一款软体操作手主要应用于物体的抓取,采用3D打印与“压板式”方式制作而成。驱动器与操作手基部的固定装置之间采用特殊设计的连接结构,便于驱动器与固定装置之间的快速拆装。本章内对单个驱动器进行了实验结果以及有限元分析结果的对比,证实了有限元分析结果的正确性。气动软体操作手因为其独有的柔韧性,尤其适用于脆性或者表面易受损的物体。本章选取了一些常见食物、电子元器件、文具用品等进行了实验,实验证明软体操作手能够顺利完成上述物品的抓取。本章也对软体操作手的负载能力进行测试。操作手能够稳定抓取400 g 之内的物体。实验结果与前文所述的驱动器末端作用力与气压成二次多项式关系的拟合结果进行比较后证实了二次拟合的正确性。

另外一款软体操作手应用于辅助指关节受损的病人进行手指康复训练。操作手使用“拔除硅胶式”模具设计方式进行制作,五指相连,使得各驱动器融为整体。经过实验验证,操作手能够产生类人手运动,并且能够产生足够的力量带动患者手部进行弯曲运动。

第五章 总结

本文主要研究软体驱动器，重点在于气动式软体驱动器。本文在参考诸多近年来发表的软体机器人领域论文的基础上，总结了软体机器人的发展现状以及常用驱动模式，其中重点总结了气动软体机器人领域成果。

本文在哈佛大学研究成果的基础上阐述了气动驱动器的变形机理以及单腔式绕线驱动器的理论建模模型。单腔式绕线驱动器主要使用 neo-Hookean 材料模型以及力矩平衡的方法进行建模。

本文主要使用有限元分析方法对多腔式气动驱动器进行仿真分析。为了保证仿真结果的收敛性，本文使用了 GCI 方法根据 3 组等比网格大小的仿真结果计算求得接近收敛值。

借助有限元分析方法，本文得出了下述结论：

- (1) 多腔式软体驱动器弯曲角度与输入气压成线性关系。
- (2) 多腔式软体驱动器末端作用力大小与输入气压的关系可以使用二次多项式进行描述。
- (3) 正方形截面的多腔式软体驱动器比半圆截面、三角形截面、半圆但顶部截平截面的多腔式软体驱动器能在相同气压作用下产生更大程度的弯曲形变。而半圆形截面形状能使驱动器产生最大末端作用力。
- (4) 空腔数越多，多腔式软体驱动器在相同气压作用下弯曲程度以及末端作用力均越大。
- (5) 驱动器内部空腔高度越高，多腔式软体驱动器在相同气压作用下弯曲程度以及末端作用力均越大。
- (6) 驱动器侧面及顶面厚度越大，多腔式软体驱动器在相同气压作用下弯曲程度以及末端作用力均越小。
- (7) 各腔体间连接部位高度越大，多腔式软体驱动器在相同气压作用下弯曲程度以及末端作用力均越小。

本文在有限元分析的基础上通过实验验证的方式证实了 FEM 仿真结果的正确性。本文实验过程中使用了三种模具设计方式：“拔除模具式”，“压板式”，“拔除硅胶式”，其中“拔除硅胶式”综合效果最佳。本文简要概括了铸造流程，强调了铸造过程中控制硅胶内空气含量的重要性。本文基于多腔式气动软体驱动器设计了一款应用于物体抓取软体操作手。通过实验验证，本文进一步证实了使用二次多项式表述驱动器末端作用力与气压之间关系的可行性。软体操作手尤其适用于抓取质量轻，脆性大的物体，如薯片、面条等食品。本文还设计了一款用于指关节康复的软体操作手。该操作手每个手指都具有与人手关节数相同的腔体数量，使得每个驱动器的弯曲最大程度上贴近人手的自然弯曲，并且能够在气压作用下产生足够的作用力带动患者指关节运动。

本课题有待增强与优化的内容包括：

- (1) 铸造方式进一步改进，从多层铸造（二次凝固）改进为驱动器一体化一次成型制作。由于多层分别铸造成型后再相互粘结成为完整的驱动器容易导致驱动器在各层之间粘结薄弱，从而成为高气压下的破裂点。因此，最佳制作方法为驱动器整体一次凝固成型，避免二次凝固。
- (2) 设计气压控制系统。本文中的实验均采用手动控制气阀的方式进行气压控制，可以改进为使用单片机进行自动控制。
- (3) 应用于康复训练的操作手可以增加其他自由度使得手掌部位也能发生弯曲。本文中



的操作手能带动患者指关节的弯曲，但是无法带动患者手掌的弯曲运动。因此，本课题可以在操作手的手掌部位增加更多的气动驱动器，使得手掌部位也具有运动能力。

- (4) 有限元分析可以进行更多组模型的分析。由于有限元分析多腔式气动驱动器消耗时间非常长，因此本文针对几何形状对驱动器性能的影响分析属于定性分析。本课题可以进一步对每个几何尺寸设置更多的变化范围，得到更多的数据点，探索是否可以通过拟合的方式得到几何形状与驱动器弯曲角度、末端作用力之间的函数关系。
- (5) 针对单腔式驱动器，利用有限元分析方法进行变量分析，探究驱动器弯曲角度以及末端作用力受驱动器内部气压，驱动器壁厚，截面形状，绕线角度，绕线粗细等的影响，从而与多腔式软体驱动器进行更为全面的对比。

参考文献

- [1] Pérez-Arancibia N O, Ma K Y, Galloway K C, et al. First controlled vertical flight of a biologically inspired microrobot[J]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2011, 6(3): 036009.
- [2] Lipson H. Challenges and opportunities for design, simulation, and fabrication of soft robots[J]. *Soft Robotics*, 2014, 1(1): 21-27.
- [3] Martinez R V, Glavan A C, Keplinger C, et al. Soft actuators and robots that are resistant to mechanical damage[J]. *Advanced Functional Materials*, 2014, 24(20): 3003-3010.
- [4] Trivedi D, Rahn C D, Kier W M, et al. Soft robotics: Biological inspiration, state of the art, and future research[J]. *Applied Bionics and Biomechanics*, 2008, 5(3): 99-117.
- [5] Morin S A, Shevchenko Y, Lessing J, et al. Using “Click - e - Bricks” to Make 3D Elastomeric Structures[J]. *Advanced Materials*, 2014, 26(34): 5991-5999.
- [6] Kwok S W, Morin S A, Mosadegh B, et al. Magnetic assembly of soft robots with hard components[J]. *Advanced Functional Materials*, 2014, 24(15): 2180-2187.
- [7] Overvelde J T, Meng üç Y, Polygerinos P, et al. Mechanical and electrical numerical analysis of soft liquid-embedded deformation sensors analysis[J]. *Extreme Mechanics Letters*, 2014, 1: 42-46.
- [8] Homberg B S, Katzschmann R K, Dogar M R, et al. Haptic identification of objects using a modular soft robotic gripper[C]. *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2015 IEEE/RSJ International Conference on*, 2015: 1698-1705.
- [9] Galloway K C, Becker K P, Phillips B, et al. Soft Robotic Grippers for Biological Sampling on Deep Reefs[J]. *Soft Robotics*, 2016, 3: 23-32.
- [10] 焦志伟, 程祥, 张罗等. 电磁力致动的新型软体机器人[J]. *制造业自动化*, 2013, (11): 58-61.
- [11] 邓韬. 面向心脏微创手术的软体机器人系统研究[D]. 上海交通大学, 2014.
- [12] 费燕琼, 吕海洋, 沈星尧. 模块化软体机器人运动模式[J]. *上海交通大学学报*, 2013, (12): 1870-1873+1880.
- [13] Klute G K, Czerniecki J M, Hannaford B. McKibben artificial muscles: pneumatic actuators with biomechanical intelligence[C]. *Advanced Intelligent Mechatronics, 1999. Proceedings. 1999 IEEE/ASME International Conference on*, 1999: 221-226.
- [14] Shepherd R F, Iliovski F, Choi W, et al. Multigait soft robot[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2011, 108(51): 20400-20403.
- [15] Tolley M T, Shepherd R F, Mosadegh B, et al. A resilient, untethered soft robot[J]. *Soft Robotics*, 2014, 1(3): 213-223.
- [16] Morin S A, Shepherd R F, Kwok S W, et al. Camouflage and display for soft machines[J]. *Science*, 2012, 337(6096): 828-832.
- [17] Iliovski F, Mazzeo A D, Shepherd R F, et al. Soft robotics for chemists[J]. *Angewandte Chemie*, 2011, 123(8): 1930-1935.
- [18] Mosadegh B, Polygerinos P, Keplinger C, et al. Pneumatic networks for soft robotics that actuate rapidly[J]. *Advanced Functional Materials*, 2014, 24(15): 2163-2170.
- [19] Polygerinos P, Lyne S, Wang Z, et al. Towards a soft pneumatic glove for hand rehabilitation[C]. *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2013 IEEE/RSJ International Conference on*, 2013:

- 1512-1517.
- [20] Polygerinos P, Wang Z, Overvelde J T, et al. Modeling of Soft Fiber-Reinforced Bending Actuators[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2015.
- [21] Galloway K C, Polygerinos P, Walsh C J, et al. Mechanically programmable bend radius for fiber-reinforced soft actuators[C]. Advanced Robotics (ICAR), 2013 16th International Conference on, 2013: 1-6.
- [22] Connolly F, Polygerinos P, Walsh C J, et al. Mechanical Programming of Soft Actuators by Varying Fiber Angle[J]. Soft Robotics, 2015, 2(1): 26-32.
- [23] Polygerinos P, Wang Z, Galloway K C, et al. Soft robotic glove for combined assistance and at-home rehabilitation[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2015, 73: 135-143.
- [24] Martinez R V, Branch J L, Fish C R, et al. Robotic tentacles with three - dimensional mobility based on flexible elastomers[J]. Advanced Materials, 2013, 25(2): 205-212.
- [25] Udupa G, Sreedharan P, Sai Dinesh P, et al. Asymmetric bellow flexible pneumatic actuator for miniature robotic soft gripper[J]. Journal of Robotics, 2014, 2014.
- [26] Udupa G, Sreedharan P, Aditya K. Robotic gripper driven by flexible microactuator based on an innovative technique[C]. Advanced Robotics and its Social Impacts (ARSO), 2010 IEEE Workshop on, 2010: 111-116.
- [27] Grissom M D, Chitrakaran V, Dienno D, et al. Design and experimental testing of the OctArm soft robot manipulator[C]. Defense and Security Symposium, 2006: 62301F-62301F-62310.
- [28] Brochu P, Pei Q: Dielectric Elastomers for Actuators and Artificial Muscles[M], Electroactivity in Polymeric Materials: Springer, 2012: 1-56.
- [29] Pelrine R, Kornbluh R D, Pei Q, et al. Dielectric elastomer artificial muscle actuators: toward biomimetic motion[C]. SPIE's 9th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials, 2002: 126-137.
- [30] Nguyen C T, Phung H, Nguyen T D, et al. A small biomimetic quadruped robot driven by multistacked dielectric elastomer actuators[J]. Smart Materials and Structures, 2014, 23(6): 065005.
- [31] Hines L, Petersen K, Sitti M. Inflated Soft Actuators with Reversible Stable Deformations[J]. Advanced Materials, 2016.
- [32] Cianchetti M, Mattoli V, Mazzolai B, et al. A new design methodology of electrostrictive actuators for bio-inspired robotics[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2009, 142(1): 288-297.
- [33] Seok S, Onal C D, Cho K-J, et al. Meshworm: a peristaltic soft robot with antagonistic nickel titanium coil actuators[J]. Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on, 2013, 18(5): 1485-1497.
- [34] 刘伟庭, 方向生, 陈裕泉. 仿生“蚯蚓”机器人的 SMA 执行器实现[J]. 传感技术学报, 2005, (03): 623-626.
- [35] Maeda S. A study on self-oscillating gel actuator for chemical robot[J], 2008.
- [36] Tolley M T, Shepherd R F, Karpelson M, et al. An untethered jumping soft robot[C]. Intelligent Robots and Systems (IROS 2014), 2014 IEEE/RSJ International Conference on, 2014: 561-566.
- [37] Kwaśniewski L. Application of grid convergence index in FE computation[J]. Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences, 2013, 61(1): 123-128.
- [38] Cho K-J, Koh J-S, Kim S, et al. Review of manufacturing processes for soft biomimetic robots[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2009, 10(3): 171-181.
- [39] Song Y S, Sun Y, Van Den Brand R, et al. Soft robot for gait rehabilitation of spinalized rodents[C]. Intelligent Robots and Systems (IROS), 2013 IEEE/RSJ International Conference on, 2013: 971-976.

谢辞

弹指之间，四年的本科生涯即将划上句号，我将迎来又一次新的征途。在论文即将付梓之际，我要向我的毕业设计导师谷国迎教授致以最衷心的感谢和最诚挚的敬意。这篇论文的完成，离不开谷老师给予的帮助、指导与支持。每当课题研究陷入困境时，谷老师总能提供建设性意见，帮助我开拓思路，并且给予我各方面的最大支持。在谷老师的指导下，我的科研能力有了很大的提高。

另外，我也要感谢邹江学长在实验过程中给予的帮助与支持。邹江学长在提供实验设备，打印模具，实验过程指导等方面提供了许多帮助。本课题实验的顺利完成受益于邹江学长的悉心指导。此外，我还要感谢王力为学弟在制作单腔式软体驱动器过程中提供的帮助。

最后，我要感谢家人，感谢父母的养育与教诲之恩。父母的支持与鼓励给了我奋斗的动力。

DESIGN AND EXPERIMENTAL TESTING OF SOFT GRIPPER AND SOFT HAND FOR REHABILITATION WITH PNEUMATIC ACTUATORS

Robots which consist of rigid structural components like motors and internal combustion engines have shown superior abilities in performing tasks which require fast responses, accurate operations, and large forces. However, the rigid materials have constrained the robots' capabilities from flexibly adapting to various environments, resisting external impact which may cause components failure inside the robot. What's more, robots which are made of rigid materials usually have high prices and heavy weights, which are not desirable in many situations.

In contrast, soft robots which are largely composed of soft materials have demonstrated their great potential in equipping robots with high agility, flexibility, and adaptability as well as light weight and low cost in the past years, and thus, have gained wide attention around the world. Soft robots have continuous deformation and theoretically infinite degree of freedom. They are able to pass through narrow space by twisting, bending, extending their bodies which mimic the way soft animals behave. Their softness and flexibility are especially advantageous when robots are grasping delicate and fragile objects, and thus, soft actuators can be good candidates for mechanical gripper's actuator. Even more, soft robots can be useful in medical operations, disaster response, deep ocean exploration, human-machine interface, etc.

This thesis first reviewed the status quo of soft robotics developments and applications, including four main ways of actuating mechanisms which are dielectric elastomer actuators, shape memory alloy actuators, pneumatic actuators, and chemical actuators respectively.

This thesis mainly focused on pneumatic soft robotics, especially soft actuators with multiple pneumatic networks. Pneumatic actuators are usually composed of two kinds of layers which are elastomer layer and inextensible layer respectively. When pressurized, the actuator's elastomer layer will be inflated while the its inextensible layer at the bottom side will keep its original length, which together bend the actuator. Before stepping into detailed analysis of soft actuators with multiple pneumatic networks, the thesis reviewed a theoretical model for soft actuators with fiber-reinforcement proposed by Polygerinos P, et al, at Harvard University.

The thesis performed a thorough finite element analysis regarding the effects of pressure magnitude and actuator geometry on actuator's bending angle and force at the distal tip. Abaqus is used as the analysis software and Grid Convergence Index(GCI) method is implemented to ensure the convergence of the solution. The actuator is made of Elastosil M4601 as the elastomer layer and paper as the inextensible layer. Elastosil M4601 is modeled in Yeoh hyperelastic material model with $C_1 = 0.11MPa$, $C_2 = 0.02MPa$. Paper layer is modeled in elastic material model with elastic modulus = $6500MPa$ and Poisson ratio = 0.2. Based upon these two material models, a complete finite element analysis process is illustrated.

According to the solutions attained from finite element analysis, a linear relationship between

the actuator's bending angle and pressure inside the air chamber can be derived by using Least Square Regression method. More specifically, $\theta = 3828.6P - 9.5714$. The root mean squared error $RMSE = 3.9175$ and coefficient of determination $R^2 = 0.9974$ for the linear fitting function. And a second order polynomial can be used to correlate the actuator's force at distal tip and the pressure inside the air chamber. The fitting function is $F = 57.15P^2 - 0.401P + 0.0436$, whose $RMSE = 0.0152$, $R^2 = 0.9978$. Therefore, the linear function that shows how the bending angle is related to pressure and the quadratic function used to connect force at distal tip with pressure are reasonable and have low fitting errors based on their $RMSE$ and R^2 values.

The thesis analyzed how cross section shape, number of air chambers, height of air chamber, thickness of side walls, and height of connection parts between air chambers influence the actuator's bending angle and force at distal tip under same pressures. The analysis result reveals that square cross section shape can generate maximum bending angle among all the analyzed cross section shapes. And half circular cross section shape produced the maximum force at distal tip among all the analyzed cross section shapes. As for the number of air chambers, the more air chambers there are, the larger bending angle and the larger force at distal tip the actuator can generate. If the air chamber height goes up, the actuator's bending angle and force at distal tip will be augmented. And if the side wall thickness is increased, the actuator's bending angle and force at distal tip will decrease. The last variant is the height of the connection part between air chambers. The actuator's bending angle and force at distal tip will be reduced as the height of the connection part decreases. The thesis provided detailed analysis about the rationale behind the above mentioned conclusions. And the potential weak locations on the actuator is explained under the actuator's inflated state. Those locations should be taken care of when the actuator is designed so as to avoid possible material failure like cracks on those positions. Pertinent measures include filleting the corners to release the stress concentration.

The final part of the thesis is about experimental tests and applications of the pneumatic actuators. The actuator is made of Elastosil M4601 silicone by using casting fabrication method. A systematic way of actuator casting is delineated in the thesis. The thesis proposed three different ways to design casting mold in order to ensure the surface quality of the actuator and make the mold easily separable after the silicone is cured inside the mold. The advantages and disadvantages of each design method are explicitly illustrated.

A soft gripper building upon the pneumatic soft actuators with multiple air chambers is designed, fabricated and experimented. The thesis explained how to design the actuator and casting molds, how to connect the actuator with the gripper base in a fast way, how to connect the actuator with the hose in a reliable way in detail. The actuator is tested and the results were compared with the FEM solutions. The comparison verifies the effectiveness of the FEM analysis. The soft gripper is used to grasp noodles, potato chips, eggs, electronic pcb boards, pens, etc. It demonstrates its superb performance when grasping the delicate and fragile objects. The softness and flexibility of the actuators fully protected the target object from being scratched or damaged. And the actuators themselves can be bent, thus, the contact area between the actuators and target object is maximized during the whole grasping process. This makes the grasping more reliable and stable. The soft gripper can grasp object with weight up to 400g steadily. By grasping objects with different weights and comparing the pressure needed in the experiments and the pressure calculated from the second order polynomial relationship between the actuator's force at distal tip and pressure, the fitting function between the force and pressure is proved to be able to reasonably

connect the two variants and make predictions.

This thesis also applies the pneumatic actuators on the human-hand-like rehabilitation device for fingers. The soft hand mimics the shape and distribution of joints in fingers and is optimized to exert as much of the generated force as possible on fingers. It can bend each actuator in the same way that human beings bend fingers. The experiments proved that the soft hand can generate enough force to get the fingers to bend so as to help recover the patients' finger movements effectively. And the device's softness and flexibility again ensure that patients' fingers are fully protected and will not be further harmed during the rehabilitation process. Therefore, soft actuators have their unique and undeniable advantages to be used in the rehabilitation device.

To sum up, the thesis reviewed the soft robotics developments in recent years, especially the pneumatic soft robotics. Then the pneumatic soft actuators' deformation mechanism and theoretical model for pneumatic actuator with fiber-reinforcement are discussed. Next, finite element analysis with Abaqus and GCI method is fully explored with regard to the effect of different pressure and actuators' geometric dimensions on the actuator's performance. The thesis concluded a linear relationship between the actuator's bending angle and pressure, and a second order polynomial relationship between the actuator's force at distal tip and pressure. Finally, a soft gripper and a soft rehabilitation device for fingers are illustrated during which the fabrication process is also described. The thesis proved the applicability of pneumatic actuators in these two fields.