



南方科技大学

SOUTHERN UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

# 本科生毕业设计（论文）

题    目： RHex 机器人的本体驱动与感知研究

姓    名： 张汐蔓

学    号： 12011639

系    别： 机械与能源工程系

专    业： 机器人工程

指导教师： 贾振中

2024 年 5 月 31 日

# 诚信承诺书

1. 本人郑重承诺所呈交的毕业设计（论文），是在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果，所有数据、图片资料均真实可靠。

2. 除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他人或集体已经发表或撰写过的作品或成果。对本论文的研究作出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确的方式标明。

3. 本人承诺在毕业论文（设计）选题和研究内容过程中没有抄袭他人研究成果和伪造相关数据等行为。

4. 在毕业论文（设计）中对侵犯任何方面知识产权的行为，由本人承担相应的法律责任。

作者签名:

\_\_\_\_\_年\_\_\_\_月\_\_\_\_日

# RHex 机器人的本体驱动与感知研究

张汐蔓

(机械与能源工程系 指导教师: 贾振中)

**[摘要]:** RHex 机器人是一款仿生六足移动机器人, 依靠简单的 C 型腿结构实现柔顺运动, 具有优秀的移动性、地形适应性和身体协调性。1999 年至今, 国内外对 RHex 机器人的研究主要集中在控制算法与动力学模型的优化, 以及探索以 RHex 机器人为移动平台的拓展功能等, 在 RHex 机器人的本体驱动与感知方面的研究十分欠缺。本次毕设希望采用反驱性能良好的 QDD 准直驱方案构建新型 RHex 机器人, 结合触觉传感器实现接触力估计, 探索 RHex 机器人的本体感知能力。本文介绍了使用 QDD 准直驱电机进行本体驱动的机电设计, 并展示了基于国内外研究经验建造出的 QDD-SmallRHex 和 QDD-RHex 两种尺寸的机器人。另外, 在性能更为强劲的 QDD-RHex 机器人上增加电容式触觉阵列传感器模块, 帮助更好地进行接触力的估计。研究上, 通过仿真实验验证步态设计; 并从两种单腿前置验证性测试中探索其本体驱动与感知能力, 最终通过实物测试探索 RHex 机器人自适应地形的可行性。

**[关键词]:** RHex 机器人; 本体驱动; 触觉传感

**[ABSTRACT]:** RHex robot is a bionic hexapod mobile robot that relies on a simple C-leg structure to achieve flexible movement, with excellent mobility, terrain adaptability and body coordination. Since 1999, research on RHex robots at home and abroad has mainly focused on the optimization of control algorithm and dynamic model, as well as exploring the extended functions of RHex robots as mobile platforms, etc., and there is a lack of research on RHex robots' ontology driving and perception. In this design, we hope to use QDD collimation drive scheme with good reverse drive performance to build a new RHex robot, and estimate the contact force combined with tactile sensors to explore the proprioceptive sensing capability of RHex robot. This paper introduces the mechanical and electrical design of body driven by QDD collimated motor, and shows the two sizes of QDD-SmallRHex and QDD-RHex robots built on the basis of domestic and foreign research experience. In addition, a capacitive haptic array sensor module is added to the more powerful QDD-RHex robot to help better estimate the contact force. In terms of research, gait design was verified by simulation experiment. Then, the ontology driving and sensing capabilities of RHex robot are explored through two kinds of single-leg pre-validation tests, and the feasibility of RHex robot adaptive terrain is verified by physical tests.

**[Key words]:** RHex robot, Proprioceptive Actuator, Tactile sensing

# 目录

<b>1</b>	<b>绪论</b>	<b>1</b>
1.1	研究目的	1
1.2	研究背景	2
1.2.1	国外研究进展	2
1.2.2	国内研究进展	4
1.3	研究内容与方法	5
1.4	预期结果与结论	6
<b>2</b>	<b>机电设计和实现</b>	<b>7</b>
2.1	引言	7
2.2	总体设计思路	7
2.2.1	机械结构设计	7
2.2.2	电机选择	7
2.2.3	传感模块选择	8
2.2.4	传动形式选择	9
2.2.5	实物展示	10
2.3	单腿测试平台设计	11
2.4	机电系统设计	12
2.4.1	RHex	13
2.4.2	单腿测试平台	14
2.5	本章小结	15
<b>3</b>	<b>仿真实验</b>	<b>16</b>

3.1	引言 . . . . .	16
3.2	Webots 仿真环境介绍 . . . . .	16
3.3	建模优化与参数设置 . . . . .	16
3.4	位姿分析 . . . . .	16
3.5	常见步态仿真 . . . . .	17
3.5.1	行走 . . . . .	17
3.5.2	转弯 . . . . .	18
3.5.3	爬楼梯 . . . . .	19
3.6	本章小结 . . . . .	19
<b>4</b>	<b>实物测试与实验 . . . . .</b>	<b>20</b>
4.1	引言 . . . . .	20
4.2	单腿验证性测试 . . . . .	20
4.2.1	实验方法与流程 . . . . .	20
4.2.2	数据处理与分析 . . . . .	21
4.2.3	实验结论 . . . . .	24
4.3	实物测试实验 . . . . .	25
4.4	本章小结 . . . . .	27
<b>5</b>	<b>总结与展望 . . . . .</b>	<b>28</b>
5.1	结论 . . . . .	28
5.2	存在的问题与未来期望 . . . . .	28
5.2.1	存在的问题 . . . . .	28
5.2.2	未来展望 . . . . .	29
	<b>参考文献 . . . . .</b>	<b>30</b>

致谢 .....	32
----------	----

# 1 绪论

## 1.1 研究目的

RHex 机器人是基于蟑螂的运动策略仿生设计的六足移动机器人，运动过程中借助柔性腿结构，表现出优秀的身体协调性以及地形适应性。RHex 机器人的原型最早可以追溯到 1999 年，由密歇根大学和麦吉尔大学合作建造<sup>[1]</sup>，通过简单的机械设计和时钟驱动的开环控制策略稳定实现高速稳定行走。随着技术发展，RHex 机器人经过多次的改进和迭代，开发出了多种尺寸类型，能够做到在平地连续高速运行<sup>[2]</sup>、翻转<sup>[3-5]</sup>，甚至能只通过后腿进行直立运动<sup>[6]</sup>，并在爬斜坡、爬楼梯<sup>[7]</sup>、翻越障碍物等多种带限制条件的地形中发挥出色，能够作为运动平台运用于救援、探索、运输等工作场景之中。另外，2019 年卡耐基梅隆大学建造出低成本、小型化的 MiniRHex 机器人<sup>[8]</sup>，在学习步态设计、腿部控制和探究传感器结合运用等教育教学之中使用。

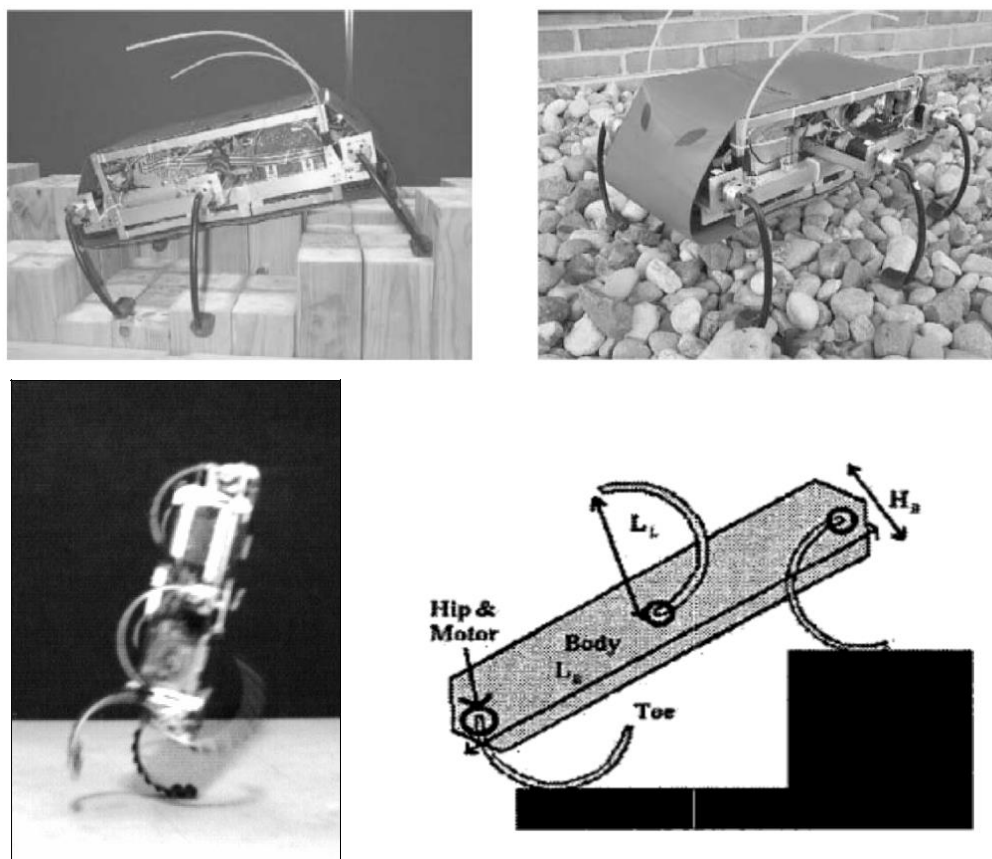


图 1.1 在不同地形与不同步态控制下表现出色的 RHex 类机器人

RHex 机器人结构简单，每个髋关节对应一个电机，具有较低的自由度，通过简单的控制即可实现运动，同时保持了腿式机器人的强机动性。比起传统腿式机器人，



其控制器设计非常简单、更易开发；同时比起常见的轮式或履带式移动机器人，通过能力优势明显。但现有的 RHex 机器人平台大都采用高减速比的驱动方案，减速系统自身的摩擦使其驱动系统的反驱能力差，虽然依靠 C 型腿特殊的柔性结构能实现弹簧倒立摆（SLIP）控制模型下的运动，但无法直接从电机的电流信号来估计接触力，因此无法给机器人赋予很好的本体感知能力，大大限制了 RHex 机器人研究的自动化、智能化。

本次毕设受其启发，拟采用反驱性能良好的 QDD（Quasi-Direct Driver）准直驱方案来构建新型 RHex 机器人，探索其本体感知能力，并与传统大减速比电机的使用进行对比。另外，对于腿式机器人，地面接触对其运动性能的影响很大。但现有 RHex 机器人的 C 型腿上少有布置触觉传感器，对外界接触力的感知研究很少，因此，本次毕设还拟在 C 型腿上增加压力传感器，结合 QDD 准直驱模块，通过多传感器融合技术进行更好的接触位置与力的估计。为 RHex 机器人未来区分地形类型，自动调整步态，提高运动效率的研究提供可能性。

## 1.2 研究背景

地面移动机器人的研究主要围绕其自主导航、智能感知和执行任务的能力展开，既可以在结构化环境中帮助人类完成复杂任务、提高工作效率，又能够代替人类在危险多变的环境下执行任务。地面移动机器人的研究发展历史悠久，轮式和腿式是两种最常见的移动方式。轮式机器人能在空旷平整的地面上快速且稳定的运动，但应对复杂地面与环境的能力很差，只在室内地面工作的扫地机器人、物流机器人是轮式机器人发挥优势的一类成功应用。相比之下，另一类主流的腿式机器人适应复杂地形能力强，可以模仿各类生物的步态在不同环境中运动，比如目前研究较好的行走机器人，四足机器狗等，但这些腿式机器人都不可避免地有机械结构设计、运动控制复杂，研究成本高的问题存在。RHex 机器人作为一种特殊的仿生六足机器人，能通过简单的结构设计和控制策略，保留良好的移动性、通行能力和地形适应性，在救援、探索、运输、教育等多方面可适用。

### 1.2.1 国外研究进展

RHex 机器人的仿生设计来自一种简单控制模型的提出应用。1998 年，密歇根大学的 Uluc Saranli<sup>[9]</sup>提出了一种新的多关节单足控制器，其姿态相位动力学模型基于

二自由度的“SLIP”腿，通过控制系统的跳跃高度、前进速度和占空比，实现无差拍控制策略下的稳定前进，证明控制器在仿生机器人上运行的可行性。在此控制策略研究的基础上，密歇根大学和麦吉尔大学合作，通过模仿蟑螂的运动方式开发出动力自主且动态稳定的柔性六足机器人，即 RHex 机器人，仿真通过 SimSect 建立简单的髋关节驱动模型和电池模型计算功耗，得到对电池寿命更友好的控制器参数。实验在地毯、油毡、湿草地和砾石四种地形上测量速度变化（标准偏差），平均速度，功耗（比电阻）等性能，展现了 RHex 在多种地形上高速、灵活、稳定的运动能力<sup>[1]</sup>。

2010 年，宾夕法尼亚大学高成本建造了性能强大的 X-RHex 机器人，如图1.2左，在保持与 RHex 机器人相似尺寸规模的同时，展现了更为出色的运动性能，并采用模块化设计，与其他传感器模块搭配使用，为更多拓展功能的实现提供可能。为了满足 X-RHex 所需要的高扭矩慢速爬行活动与合适扭矩的高速跑步或高占比步态行走需求，选择了无刷直流电机配合 18:1 的变速箱，并通过额外的绝对编码器对位置进行测量。虽然制造成本较高，但 X-RHex 机器人<sup>[10]</sup>作为优秀的“腿上实验室”在国防、救援等工作场景之中有着很好的应用。2019 年，卡内基梅隆大学建造出了一款微型 MiniRHex 机器人<sup>[8]</sup>，如图1.2右，以 3D 打印为主要制造方式，实现低成本，小尺寸的设计方案。尺寸上只有 X-RHex 机器人体积的 0.3 倍，重量的 0.04 倍。同时他们开发出配套的控制软件，供学生在教学中使用，学习步行机器人简单的设计与控制。但其牺牲了一定结构强度，无法支持强运动性能、搭配过多拓展功能。同年，斯坦福大学将设计的一款薄电容传感器<sup>[11]</sup>应用到了与 MiniRHex 相似大小的 SAIL-R 机器人上，在设计上只使用两个电机驱动，主要研究前腿传感阵列在地形分类中的应用<sup>[12]</sup>。



图 1.2 X-RHex 机器人（左）和 MiniRHex 机器人（右）

### 1.2.2 国内研究进展

相比国外，国内对 RHex 的研究较少。在控制方案上，浙江大学于 2014 年提出了一种新的自适应-模糊控制策略<sup>[13]</sup>，改进的算法能够帮助包括 RHex 机器人在内的柔顺控制的六足机器人提高环境适应能力。2016 年，哈尔滨工业大学模仿 RHex 机器人的结构设计<sup>[14]</sup>，研究对应的 SLIP 动力学模型并通过单腿仿真实验进行验证。2022 年，南方科技大学设计了一款兼顾性能与成本的 SmallRHex 机器人，如图 1.3，在 Webots 仿真环境中完成基础和极端步态的实现，并建造出了 SmallRHex 实物机器人<sup>[15]</sup>。

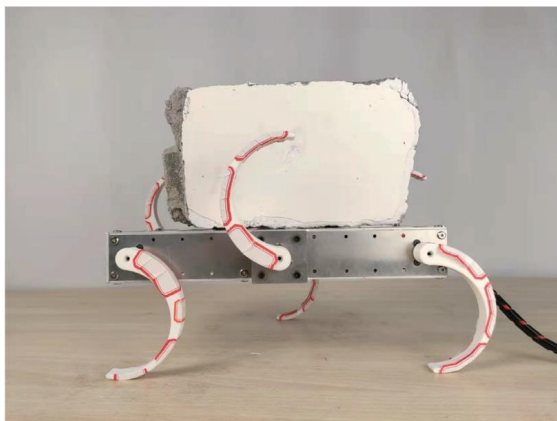


图 1.3 SmallRHex 机器人

然而，这些 RHex 类机器人使用的都是传统电机或 DD（Direct Driver）直驱电机，配合半圆 C 型腿的弹性结构实现机器人的被动柔顺运动，具有高转速、低扭矩的特点。驱动器通常由电机、伺服控制单元、减速齿轮等构成。对有高扭矩需求的机器人关节，常采用“减速增扭”的方式，即加入齿轮等减速机构在电机和输出端之间。机器人柔顺运动下驱动器实现力矩控制有三种常见的驱动范式。一是通过刚性扭矩传感器的主动柔顺；二是通过弹簧等柔性弹性体的被动柔顺；三是直接用电流环做力矩控制的驱动器直驱的本体驱动，即本次研究探索结合的方向。本体驱动范式中，主要有 DD 直驱和 QDD 准直驱两种形式，其中 QDD 准直驱方案在输出扭矩和反向驱动能力上都表现得更为出色<sup>[16]</sup>。新思界产业研究中心的《2023-2028 年准直驱驱动器行业市场深度调研及投资前景预测报告》<sup>[17]</sup>中提到以直驱技术为核心的准直驱驱动器，是可以替代传统刚性驱动器的产品。2022 年全球伺服驱动器市场规模达到 791.3 亿元，同比增长 6.9%。准直驱驱动器作为安全稳定、反驱特性好的高端伺服驱动器，有望在研究深入后成为高端伺服驱动器市场主流产品。

因此，在 RHex 机器人中应用综合性能更好的 QDD 准直驱电机，可以在保持良好反向驱动能力的同时提供更大扭矩，为 RHex 赋予更好的跳跃性能。同时，QDD 准直驱电机通过电流环实现力矩控制，无需外界传感，可以用来探索本体驱动方案下力的感知。另外，国内十分缺少对 RHex 机器人感知能力的研究，对有较强运动能力的原尺寸的 RHex 添加压力传感器，进行更好的接触位置与力的估计，将有利于 RHex 类机器人拓展出更多的应用可能。

### 1.3 研究内容与方法

综上所述，我们希望可以设计并制造 QDD 准直驱范式下的 QDD-RHex 机器人和 QDD-SmallRHex 机器人。通过 Webots 对步态进行仿真实验，验证代码可行性。通过单腿验证性测试（POC）测定单腿运动时电机工作的转矩电流、编码器位置，传感膜的力的阵列信息，通过不断训练，将以上数据与六维力传感器的真值进行数据拟合标定。最终在实物测试中通过电机和传感器的数据映射关系得到机器人在硬地和海绵地中行走的腿部受力情况，探索 QDD 版本的 RHex 机器人的本体驱动与感知能力。本文行文结构如图1.4：第 2 章主要介绍了 QDD-RHex、QDD-SmallRHex 与单腿测试平台的机械设计，以及机电系统、传感模块等方面的选型考量；第 3 章主要介绍了仿真实验的验证过程；第 4 章主要介绍了单腿验证性实验与实物验证实验的探索性研究；第 5 章主要总结了本次毕设的工作，存在的问题与未来的展望。

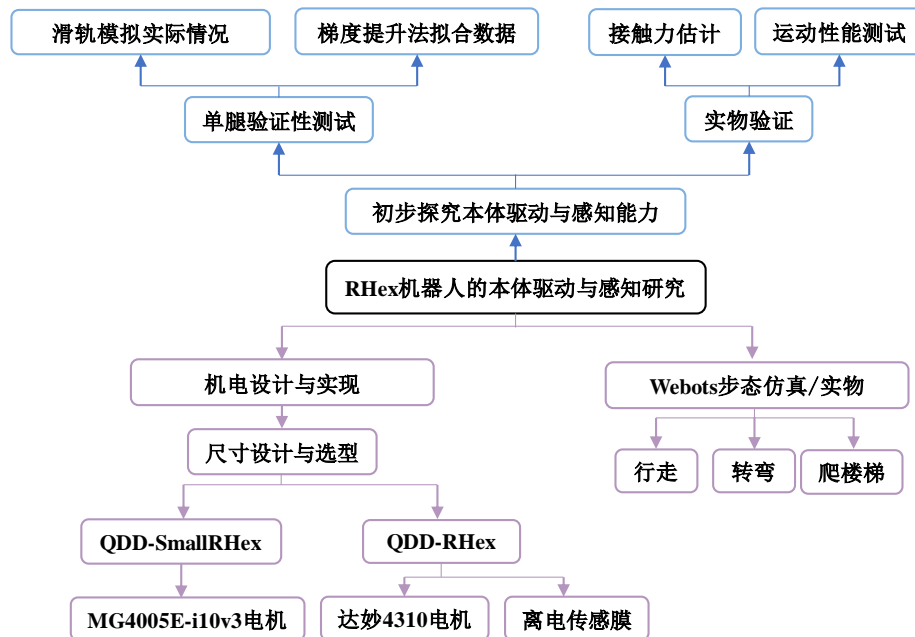


图 1.4 文章整体结构

## 1.4 预期结果与结论

本次毕设预期能够设计并迭代两种基于 QDD 电机的本体驱动 RHex 机器人。并在 Webots 仿真中完成对步态的代码实现，通过电机编码器位置信息图像验证代码可行性。另外在单腿平台上进行验证性测试中，预期得到的单腿转矩电流、编码器位置对地面接触力的估计的决定系数能达到 0.5 以上，结合传感器的使用能获得更为出色的受力估计结果。在 QDD-SmallRHex 的实物测试中，预期通过在不同地形（硬地，海绵地）中电机所产生的不同电流与位置大小来得到相应步态下力的估计值，能准确据此划分地形种类，同时能实现先前 ROMA 实验室直驱电机驱动的 SmallRHex 无法达成的大扭矩应用。

## 2 机电设计和实现

### 2.1 引言

本章节对本文实验所需的平台设计，包括 QDD-SmallRHex 和 QDD-RHex 的设计以及单腿测试平台的设计，进行了详细解释，包括各种零件的选型和设计等。

### 2.2 总体设计思路

本文设计 RHex 模型时参考了过去国内外研究中 RHex 的尺寸，包括 RHex、X-RHex 和 SmallRHex 等，选取具有优势的两种尺寸进行优化，确保模型的可靠性。

#### 2.2.1 机械结构设计

使用 SolidWorks 对 QDD-RHex 的三维模型进行设计，机器人的整体机身选取 6061 铝合金材料，厚度均为 3mm，确保零件强度高、制造误差小，在机身上设置多处镂空设计，降低机器人的整体质量。RHex 设计之初就被要求在各种恶劣及危险环境中完成运动，因此腿部设计采用具有一定形变能力的 C 型腿，在遭遇复杂路况时可以通过柔软的机械结构减少自身所受到的冲击，提高 RHex 机器人的稳定性和地形适应性。因此，本文使用 PLA 材料进行 3D 打印得到兼具强度和弹性的 C 型腿结构，如图 2.1 所示，在保证原先形变能力的基础上，可以满足 RHex 更稳定强劲的运动性能。



图 2.1 C 型腿结构

#### 2.2.2 电机选择

目前能够做到本体驱动的电机电主要有两种，一种是直驱电机（DD），另一种是准直驱电机（QDD）。其中，准直驱电机自带高效率的减速器，可以很方便的实现电机减速和增大扭矩的作用。同时，本文中的 RHex 机器人需要跨越各种各样的障

碍地形，电机的反驱能力与柔性 C 型腿相互配合，可以提升其运动能力，满足更多任务需求。因此，本文选用了两款运行顺滑的准直驱电机，分别用于 QDD-RHex 和 QDD-SmallRHex 机器人。电机选型综合考虑了扭矩大小、减速比和反驱性能等因素。表2.1为三种参考的 RHex 及本文 RHex 采用电机的数据对比，证明本文所使用的准直驱电机在保持性能的同时具有独特的优势，可以提供大且稳定的扭矩，为 RHex 提供更好的翻越障碍物的能力。

表 2.1 电机的数据比较表

属性	QDD-SmallRHex	QDD-RHex	X-RHex <sup>1</sup>	MiniRHex <sup>2</sup>	SmallRHex <sup>3</sup>
电机类型	直流无刷	直流无刷	无刷	伺服	直流无刷
最大转速 (rpm)	320	200	358	114	500
最大扭矩 (Nm)	2.5	7	4	N/A	1
电机宽度 (cm)	53	56	45	27	24.4
电机长度 (cm)	35	46	20.9	36	64.8
电机总质量 (g)	153	300	288	16.7	107
额定电压 (V)	24	24	37	7.4	24
减速比	10:1	10:1	28:1	31:6	36:1

<sup>1,2,3</sup> 数据来源: [6],[8],[13].

同时，本文所使用的两款电机均为 FOC（Field-Oriented Control）控制。FOC 是一种用于实现精确转速和扭矩控制的控制技术，其具有高效率、低噪音等特点。通过控制三相电流的大小应用在高性能控制场合，是 RHex 实现精确控制的基础。

### 2.2.3 传感模块选择

柔性压力传感器的工作原理是将机械刺激转换为电信号，感知周围环境，具有模仿人类皮肤的功能。其中，压电容式压力传感器的应用最为广泛，对静态压力的测量十分准确，但通常有响应松弛的问题存在。基于此，本文选择了借助结合的微结构界面提高动态力检测精确性的一种离电传感膜<sup>[18]</sup>，测量效果出色的同时，具有加工周期短、使用方便、易于迭代的研究优势。传感膜阵列的设计上选取六点测量，采用了差分结构和串联结构分别定做，如图2.2所示。差分结构的设计能通过交错排列的相邻感受元件的输出信号差异来减小误差，提高精度，但其覆盖面积会受到限制。因此，串联结构的设计能够很好地补足，可以覆盖更多的区域，获得低位步态和爬楼梯时的接触信息。



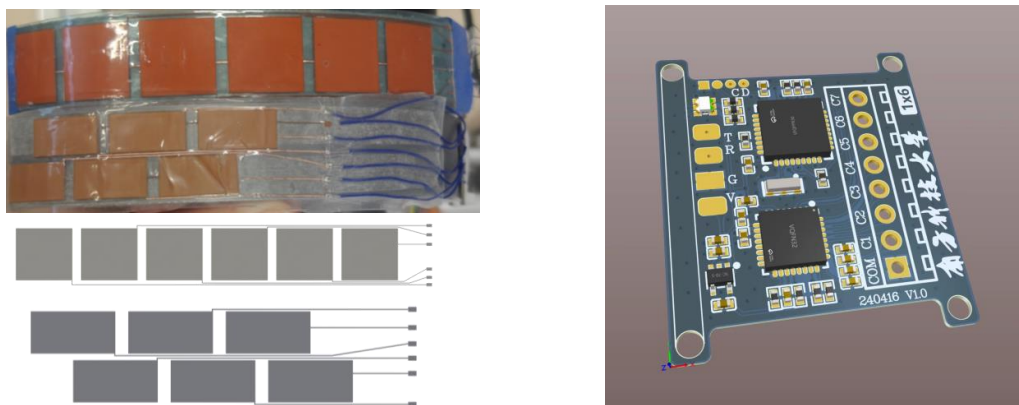


图 2.2 传感膜阵列（左）与电路板（右）

数据传输上，采用共阴极的方式减少串口线的数量，从传感器到电路板只需通过七条漆包线焊接连接，如图2.3所示。定做的传感膜可直接通过双面胶粘在 C 型腿表面，电路板通过绑带固定即可在运动过程中保持牢固，进行有效的数据读取。

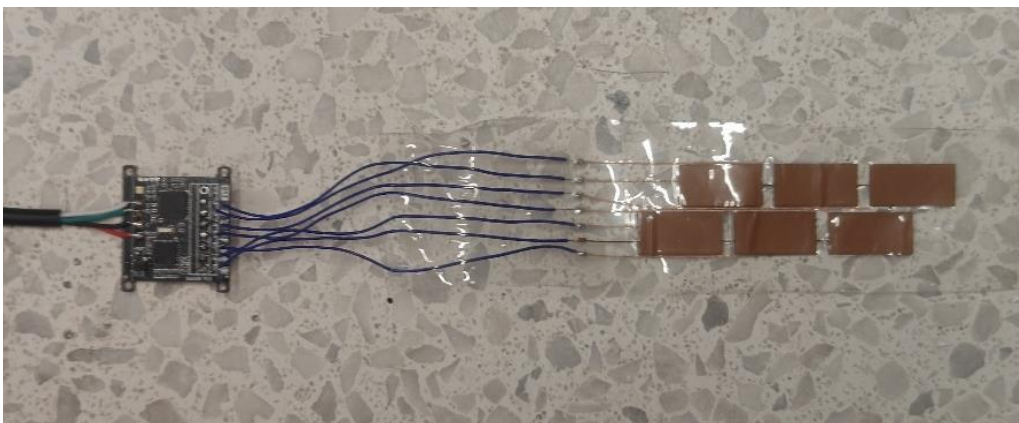


图 2.3 传感膜阵列与电路板实物连接

#### 2.2.4 传动形式选择

QDD-RHex 设计中的一大难点是如何将连续旋转的 C 型腿上的传感器信息稳定传输，如果采用传统直接接线的方式，容易造成线材的缠绕，存在危险性的同时会影响实验的过程和结果。

本次毕设选择通过滑环传输数据来解决这个问题。滑环是一种电气元件，一般安装在物体的旋转中心，主要由定子和转子两部分组成。在本文中，使用 4 路 5A 的 A 型法兰滑环，其旋转部分连接 RHex 腿上固定的电路板并随着腿的无限旋转而进行旋转，称为“转子”，滑环的静止部分与 USB 接口相接，称为“定子”。



为了方便腿上电路板的输出端可以顺利经过滑环并被树莓派接收，设计 QDD-RHex 的机械结构时就将 C 型腿的中心置为空心，与滑环同心。并且电机与 C 型腿之间通过同步带与同步带轮连接，如图2.4所示。本毕设采取 1:1 的传动比，通过垫块打印件进行同步带张紧的调节，使 C 型腿转速与电机转速一致。

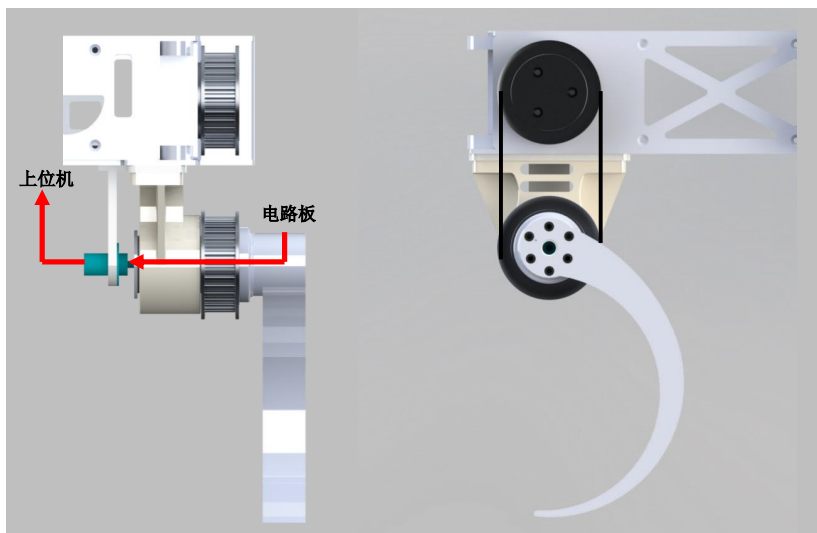


图 2.4 滑环及同步带轮实现

### 2.2.5 实物展示

经过以上所有选型与设计，最后得到 QDD-SmallRHex 和 QDD-RHex 的最终设计，机械模型整体效果如图2.5所示，实物如图2.6所示。

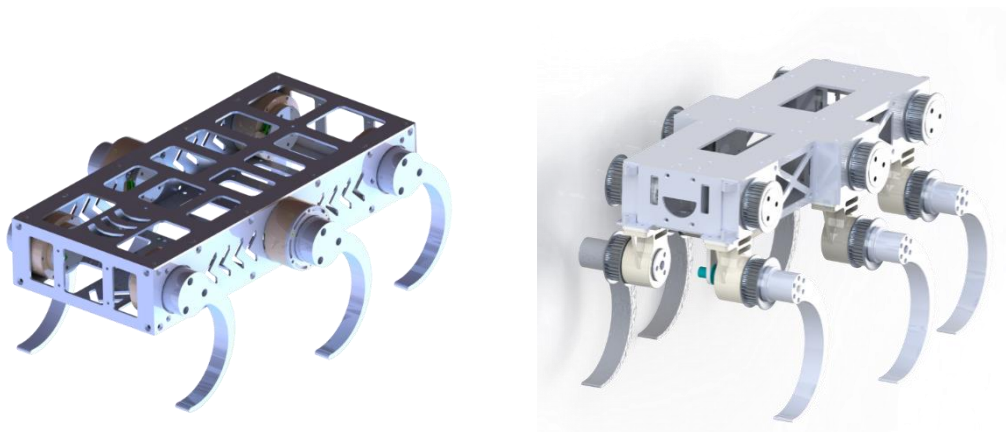


图 2.5 机械模型

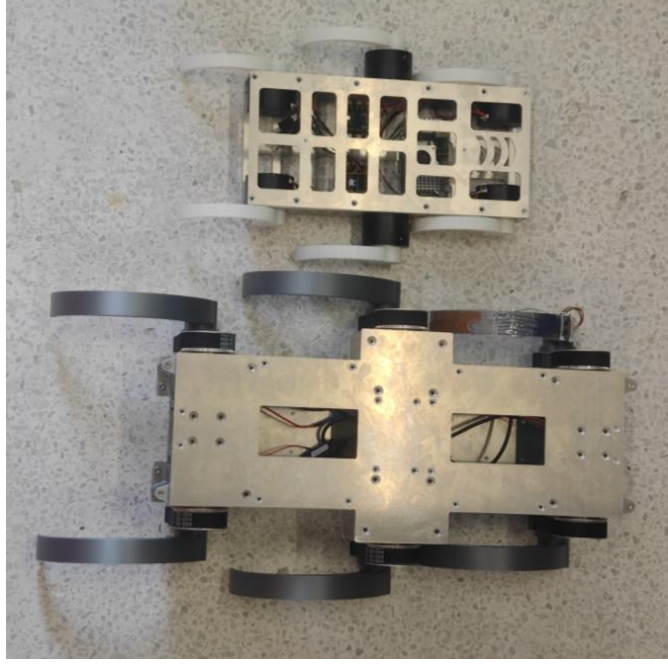


图 2.6 制造的 QDD-SmallRHex 机器人（上）与 QDD-RHex 机器人（下）

表2.2为本次设计的两种 RHex 机器人与主流的几款 Rhex 机器人的尺寸对比。由数据表可以看出 QDD 版本的 RHex 机器人在换用性能更强大且整体牢固的准直驱方案的同时，能够保持与对应参考的传统 RHex 机器人相当的尺寸和重量，能够较好的兼顾性能和成本。

表 2.2 RHex 类机器人的尺寸比较表

属性	QDD-SmallRHex	QDD-RHex	X-RHex <sup>1</sup>	SmallRHex <sup>2</sup>
总质量 (kg)	2.2	7	8.6-9.5	1.75
腿部直径 (mm)	110	157.5	175	100
身体长度 (mm)	316	473	570	300
最大宽度 (mm)	230	338	390	220

<sup>1,2</sup> 数据来源: [6],[13].

## 2.3 单腿测试平台设计

验证性测试（POC）是验证性能要求的常用实验，本文通过单腿测试平台的实验完成 QDD 电机的本体驱动研究，同时完成传感膜的标定。

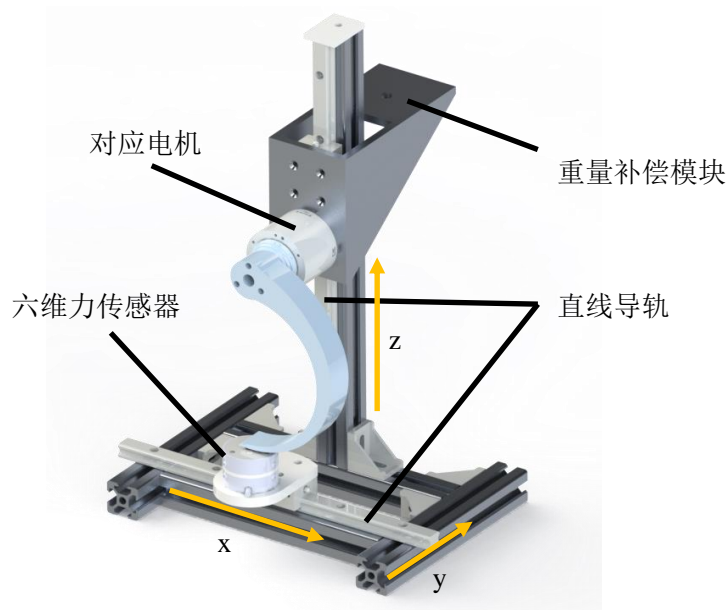


图 2.7 单腿测试平台模型

在设计时参考了斯坦福实验室的单腿实验研究，仅依靠一个对应的电机驱动，并模拟实际遇到的摩擦力情况。因成本和空间有限，本文对其整体实验平台进行简化，但在模拟还原机器人自身重量与载重方面进行了优化。图2.7展示了本文所设计的单腿测试平台。在零件选型上，使用 3030 铝型材作为整体框架，方便固定且成本低，可以按照有需求的长度进行二次修改。本平台中采用两个型号为 C-ELG15-300 的直线导轨，长度均为 300mm，该导轨拥有比直线轴承更高的额定荷重，可以用在精度比较高的情况下，且可以竖直放置使用，移动顺滑。本实验中用到的力传感器通过 PLA 材料进行 3D 打印后得到的连接件与水平导轨滑块固定，厚度为 8mm，可以保证足够的稳定性，不易产生弯折。该平台具备重量补偿模块，可通过将 1kg 标准砝码放置在上方实现增重效果，达到单腿实际受力与完整 RHex 机器人一致的效果，保证实验的有效性。

该单腿测试平台具有  $x$ 、 $y$ 、 $z$  三个方向的自由度， $x$  和  $z$  方向的自由度通过直线导轨提供， $y$  方向的自由度通过可调位置的铝型材确定位置后可进行固定。水平方向的自由度保证了当单腿被电机驱动运动时，六维力传感器可以随着单腿一起进行运动，模拟 C 型腿实际运动时与地面的接触情况。

## 2.4 机电系统设计

机电系统设计是模型设计和实现中重要的一部分，包括供电、通讯、控制和传感等一系列需要供电使能的电子元件。本章将分为两个部分对 RHex 和单腿测试平

台上的设备连线方法和通信方式进行分析。

#### 2.4.1 RHex

图2.8展示了 QDD-SmallRHex 的机电系统框图。

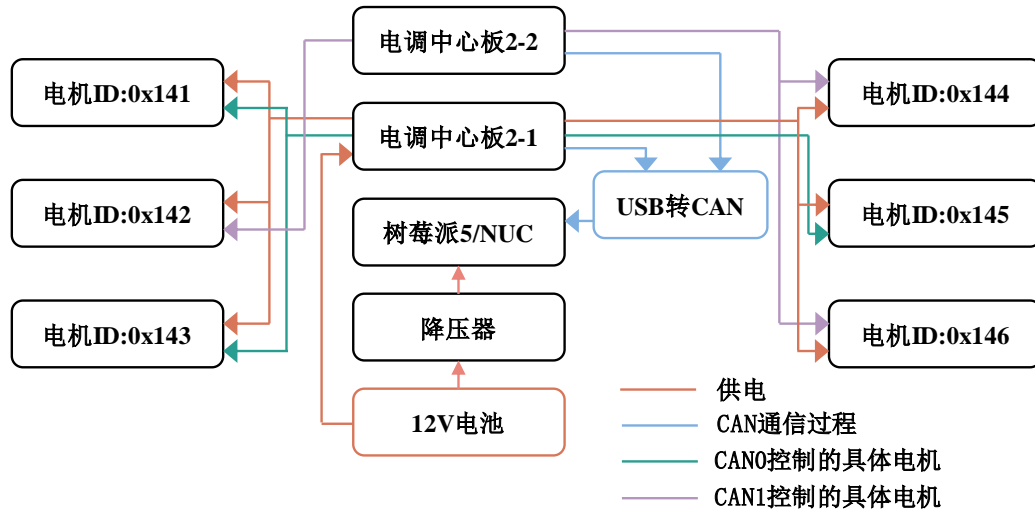


图 2.8 QDD-SmallRHex 机电系统

在 QDD-SmallRHex 的机电设计中选用格氏软包电池，电池总质量为 332g，容量为 5300mAh，工作电压为 12V，尺寸为 133×42×27mm，满足实验要求。选用的大疆电调中心板 2 是一款为实现电源及 CAN Bus 通信接口集成的转接板，可以同时驱动七个电机，使用效果好。因此，在 QDD-SmallRHex 中通过该中心板对六个 MG4005Ei10v3 电机供电及 CAN 通信集成。通过中心板出的 CAN Bus 通信无法直接与树莓派相连发送数据，需要一个带隔离的 USB 转 CAN 模块，再将 USB 插入到树莓派上完成 CAN 通信的整个过程。

在初次对 QDD-SmallRHex 的机电系统进行调试时发现，通过 CAN0 通信直接完成对六个电机的同步控制和数据读取可以完成，但部分电机会出现不受代码控制的情况，初步认为是 CAN0 上所挂载信息过多，导致发送数据紊乱。因此在一个电调中心板的基础上引入另一个电调中心板，将电机分为两组进行控制，刚好对应两种步态情况，使用 CAN0 与 CAN1 对电机进行控制。

图2.9展示了 QDD-RHex 的机电系统框图，在 QDD-RHex 中选用的电池同样为格氏软包电池，电池总质量为 550g，容量为 4000mAh，工作电压为 24V，尺寸为 45×44×141mm，满足 QDD-RHex 的尺寸要求。其机电系统仅在 QDD-SmallRHex 的

基础上加上了电容压力传感器的部分，六块压力传感器通过固定在腿上的定制电路板输出 4 路信号，通过滑环与 USB 串口连接在树莓派上，完成读取。

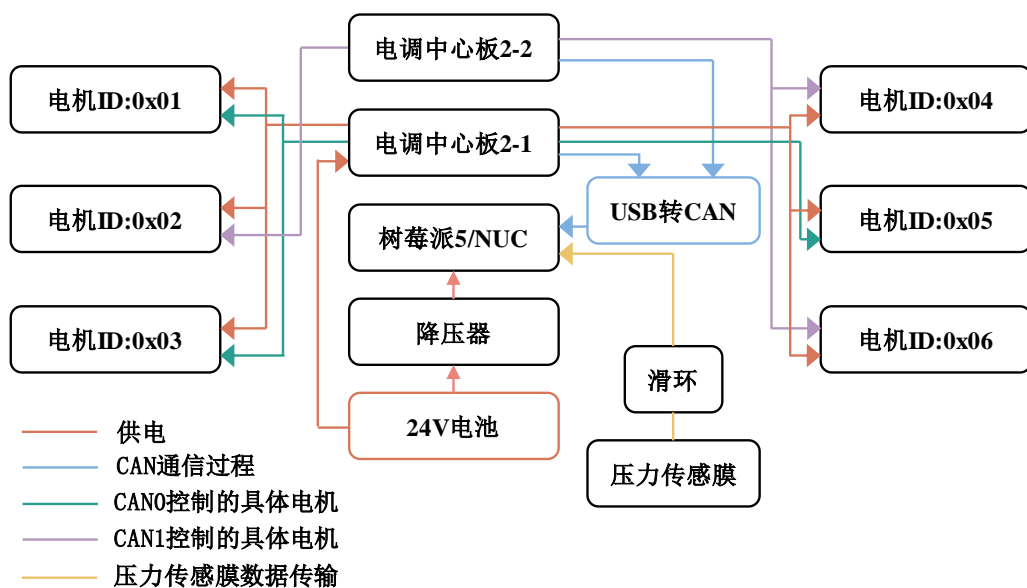


图 2.9 QDD-RHex 机电系统

#### 2.4.2 单腿测试平台

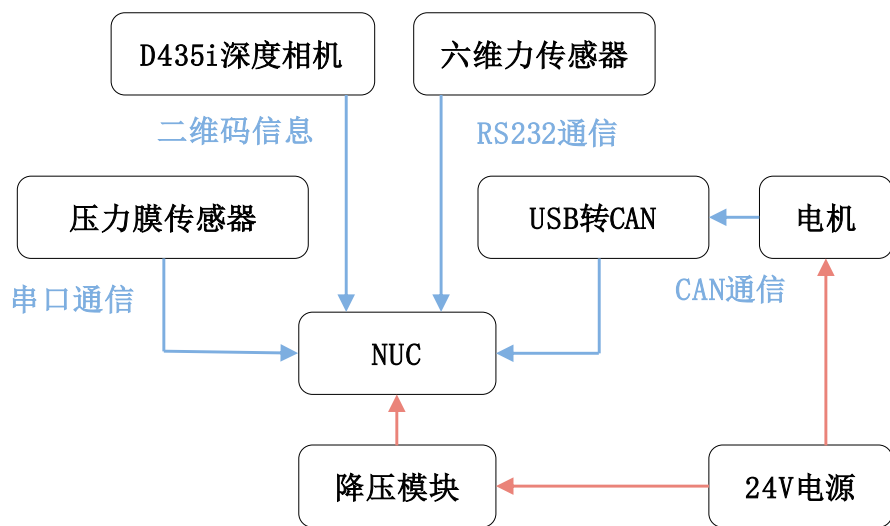


图 2.10 单腿测试平台机电系统

单腿测试平台上整体框图如图 2.10 所示。共有五个用电设备，均通过 24V 稳压电源进行供电。其中六维力传感器为宇立 M3613D，精度高，在实验中将频率设置为 500Hz，读取精准。六维力传感器需通过其自带的采集卡与 NUC 的网口相连，实现读取。压力膜传感器采用串口通信，通过 USB 接口与 NUC 相连。电机支持 CAN Bus

通信，通过 USB 转 CAN 模块后在 NUC 上对其电机电流、位置信息进行读取，同时进行控制。最后将相机与 NUC 相连，实现对 AprilTag 二维码的位置读取。

## 2.5 本章小结

本章节对 QDD-SmallRHex 和 QDD-RHex 的机电设计以及单腿测试平台的设计进行详细阐述，依次对 RHex 的机械结构设计、电机选型、传感模块选择以及传动形式选择进行讨论，展示 QDD-SmallRHex 和 QDD-RHex 实物，并与当前现有的 RHex 实物进行参数对比，说明模型设计的合理性。对单腿测试平台进行设计，使其满足验证性实验要求。

## 3 仿真实验

### 3.1 引言

RHex 机器人共有六条腿，对侧的两条腿通常为的一组进行运动，在不同步态中有所不同。本章节对 RHex 在不同文献中的不同位姿进行明确，探究不同位姿会对机器人运动造成的影响。同时对 RHex 机器人行走、转弯以及爬楼梯步态进行仿真，为现实实验的可行性提供验证。

### 3.2 Webots 仿真环境介绍

Webots 是一个很强大的仿真软件，它提供了完整环境让任何人都可以对机器人进行建模、编程和仿真，目前广泛应用于教育和研究行业，为机器人的机器学习研究提供了足量的场景，也为物理仿真提供了一种新的方法。

### 3.3 建模优化与参数设置

本文的仿真实验在 Webots2022a 上进行。在 Webots 中，模型越复杂对电脑和软件有着更高的运行要求，同时也非常容易出现计算失误的情况。因此，为了使仿真结果相对完善，首先将机械设计中所建模型进行大幅度简化，并在模型上方添加配重块，模拟现实世界的情况，再将其转为 urdf 文件，在 urdf 文件中对模型的一些基本参数进行设置，包括重量，相对位置等。设置完成后将 urdf 文件导入 Webots 中，在此将每条腿单独设置为一个旋转关节。同时对 Webots 代码的基础部分进行编写，包括电机的正确分组，确保程序的正常运行。

### 3.4 位姿分析

结合过往研究 RHex 机器人运动的参考文献，本文将 RHex 的位姿分为三种：高位、低位和超低位，图3.1从左往右分别为高位、低位和超低位。RHex 在三种位姿下的运动初始位置不同，导致 C 型腿与地面接触的时间和接触力大小在一个周期内有所差异。相比之下，高位运动更为稳定，适合走在平坦路面上；低位和超低位运动跳跃能力更强，更适合在路况复杂的情况下运动。



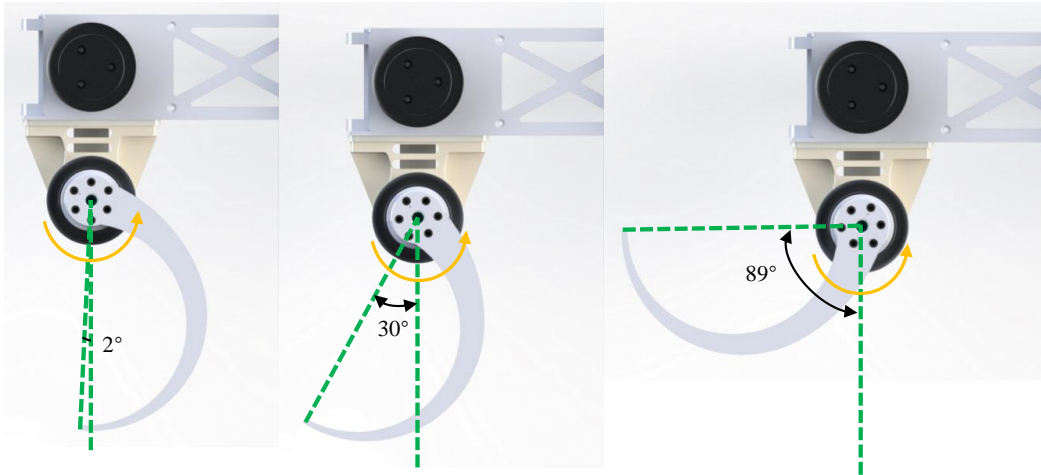


图 3.1 三种位姿变化展示图

### 3.5 常见步态仿真

对 RHex 的步态进行分析，RHex 共有六条腿，对每一条腿设定序号，方便后续进行分组编排控制。图3.2展示了本文中 RHex 的具体编号及运动方向。

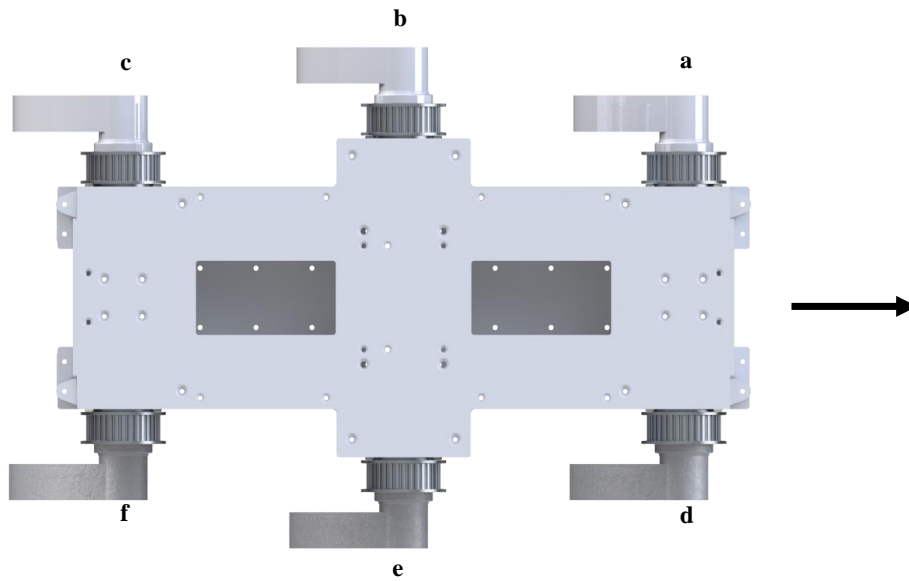


图 3.2 RHex 运动腿部编号说明图

#### 3.5.1 行走

根据后续实验需求，本次毕设在 Webots 仿真的测试主要集中在高位运动。

在最基础的行走步态上，将 a-f 六条腿分成两组，[a, c, e] 作为第一组，[b, d, f] 作为第二组，同一组腿的速度，方向是相同的。行走步态将一个周期分为两个部分，第一部分是第一组腿从初始位姿开始，在地上转动一个小角度，第二组腿同时在空中转动一个大角度，两组腿转动的时间是一样的，紧接着两组腿交替进行上述运动，即可



完成 RHex 的行走步态。可以通过调整 RHex 接触地面的角度在整个周期中的角度比例来调整机器人速度。在具体的 Webots 代码中，设置周期  $T=1.2s$ ，将六个电机分为 [1,3,5] 和 [2,4,6] 两组进行控制，设定两组速度分别为  $10\text{rad/s}$  和  $0.47\text{rad/s}$ ，每  $0.6s$  交替运行，完成高位行走设置。图3.3是 RHex 运动完后得到的位置变化图像。

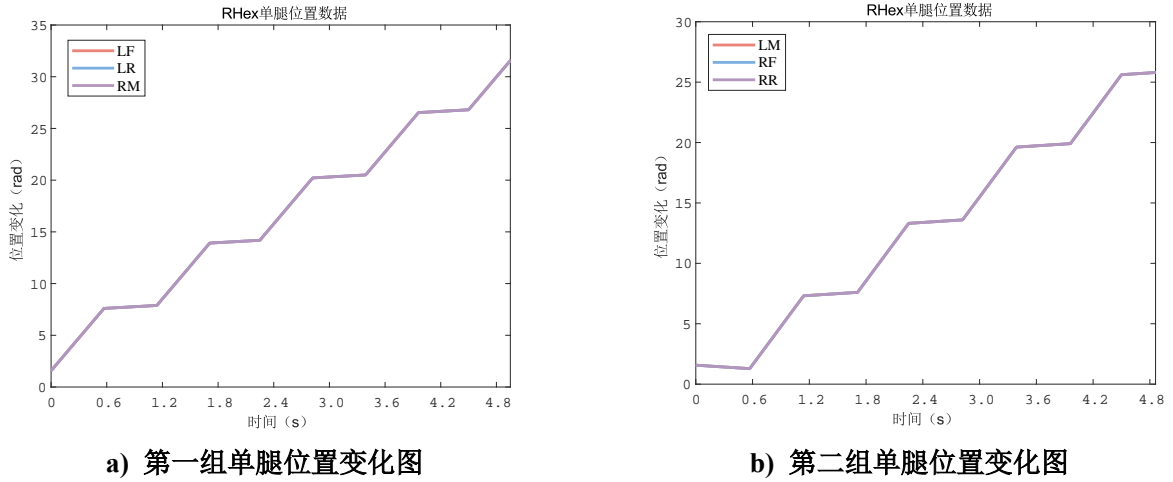


图 3.3 行走仿真位置变化图

### 3.5.2 转弯

将行走步态中的 [a, b, c] 三只腿的运动方向取反，另一边 [d, e, f] 三只腿的运动方向不变，即可完成原地右转运动，如果要完成原地左转运动只需将 [a, b, c] 三条腿保持行走步态，[d, e, f] 反向。在具体的 Webots 代码中，将原两组 [1,3,5] 和 [2,4,6] 中的 [1,2,3] 电机运行方向取反，其他基本保持不变，即可完成向左转弯；[4,5,6] 电机取反即可完成向右转弯。图3.4是 RHex 运动完后得到的位置变化图像。

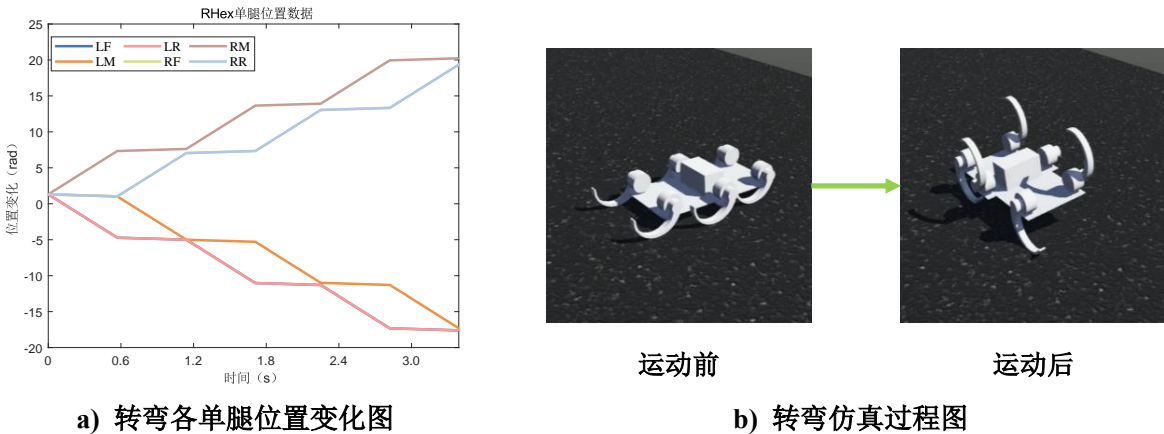
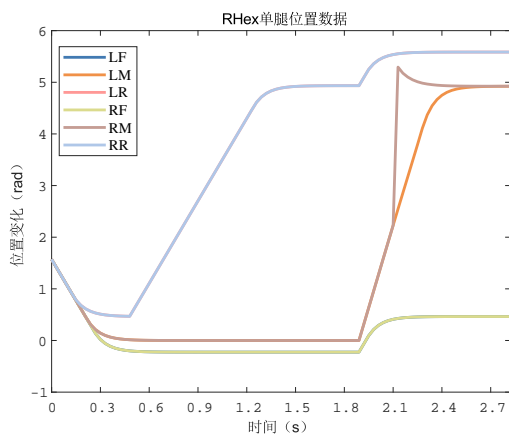


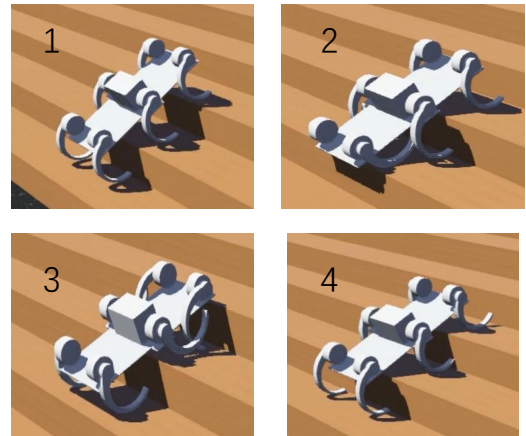
图 3.4 转弯仿真变化图

### 3.5.3 爬楼梯

爬楼梯和行走以及转弯的步态不一样，在该种步态中需要将六条腿分为三组，[a, d] 为第一组，[b, e] 为第二组，[c, f] 为第三组，同一组腿的方向和速度均相同。本次毕设爬楼梯仿真针对如图3.5形式的楼梯，三组腿分别跨越在三级楼梯上，最终达成的目标是一个周期运动可以整体向上挪动一级楼梯。在运动过程中主要分为四个阶段：第一阶段为第三组腿 [c, f] 向前转动，搭上第二组腿所在的楼梯；第二阶段为第二组腿 [b, e] 向前转动，搭上第一组腿所在的楼梯；第三阶段为第一组腿 [a, d] 向前转动，搭上目标楼梯；第四阶段为恢复初始状态。在机器人运行过程中，机器人机身相对于水平的倾斜角应与楼梯斜率基本相等。机器人也应该尽量靠近楼梯，避免在运行中出现其向后倾倒的情况。在具体的 Webots 代码中，通过不断调试合适的角度和速度，得到如图3.5所示的爬楼梯运动过程。



a) 爬楼梯各单腿位置变化图



b) 爬楼梯仿真过程图

图 3.5 爬楼梯仿真变化图

## 3.6 本章小结

本章首先对 RHex 机器人仿真所使用的环境进行介绍，再对 RHex 机器人的三种位姿（高位、低位、超低位）逐一进行分析，最后对三种常见步态（行走、转弯和爬楼梯）在 Webots 中进行仿真，分别得到六条腿的位置变化图像和实物运动过程图，完成仿真，为 RHex 实物的运动打好基础。

## 4 实物测试与实验

### 4.1 引言

本章节阐述了本文在 RHex 机器人的本体驱动与感知上的实验研究，主要分为单腿验证性实验及 QDD-SmallRHex 实物测试实验。在单腿验证性实验中，分别对 QDD-SmallRHex 和 QDD-RHex 的单腿进行测试实验，记录 QDD-SmallRHex 单腿的高位、低位及超低位数据、QDD-RHex 单腿的高位和低位数据，并对其进行分析。在实物测试实验中，对 QDD-SmallRHex 对地面压力的本体感知能力进行分析，得到一定的实验结论。

### 4.2 单腿验证性测试

#### 4.2.1 实验方法与流程

单腿验证性实验主要分为两部分，第一部分是 QDD-SmallRHex 的单腿实验，实验装置如图4.1左所示。在单腿验证性平台的侧面粘贴尺寸为  $45\text{mm} \times 45\text{mm}$  的 April Tag 二维码，在实验中通过 d435i 深度相机对二维码所处位置进行读取，记录单腿在三种不同步态初始位置的  $x$ ,  $y$  坐标，在实验过程中记录 QDD-SmallRHex 每种位姿在实际运动中需要跳跃的高度变化，再通过 AprilTag 二维码的实际尺寸和相机中记录的尺寸进行比例放大，准确估计 QDD-SmallRHex 机器人运动时机身的高度变化。将 MG4005 电机与 3D 打印的单腿相连，固定在验证性平台上。在三种步态实验过程中，均控制单腿以  $10\text{rad/s}$  的速度运动 0.3 秒，保证单腿运动后与六维力传感器完全脱离，模拟单腿与地面的交互情况。对每种位姿进行 40-50 次实验，记录电机在运动过程中的电流及编码器位置变化，并与六维力传感器得到的  $z$  轴压力进行对应。单腿运动是一个速度极快的过程，为了尽可能多的采集数据，将六维力传感器的频率设置为  $500\text{Hz}$ ，同时将电机反馈数据的频率也设置为  $500\text{Hz}$ ，保证六维力传感器数据与电机数据的采集时间戳基本同步，为后续数据处理提供便利。

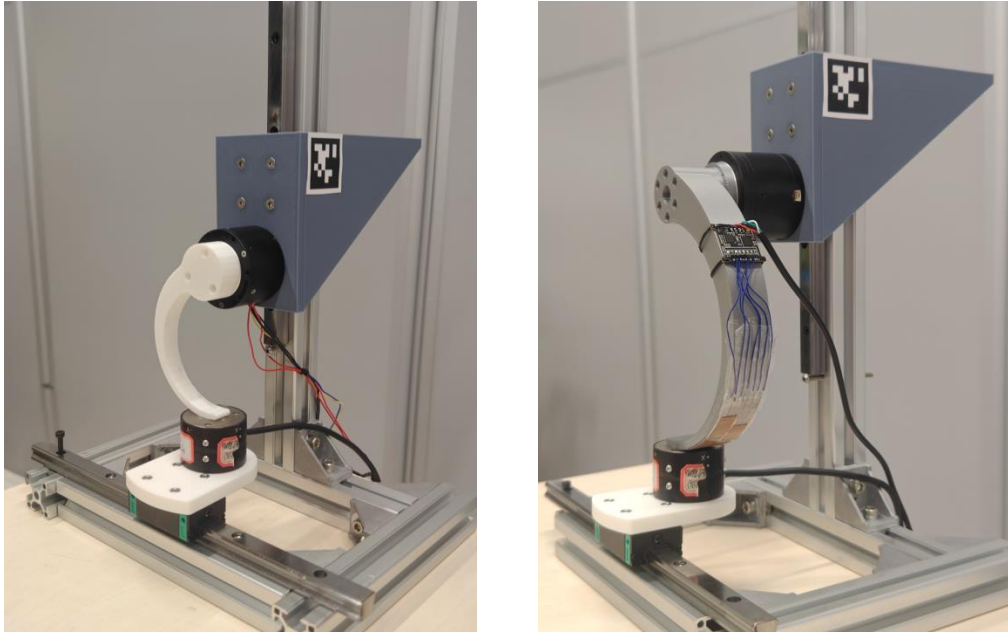


图 4.1 QDD-SmallRHex（左）和 QDD-RHex（右）单腿测试平台

第二部分是 QDD-RHex 的单腿实验，如图4.1右所示，通过 AprilTag 二维码对单腿运动时的高度变化进行记录，将达妙 4310v1.0 版本电机与 3D 打印的 C 型腿进行连接。整体实验流程与 QDD-SmallRHex 一致，与其最大的不同之处在于 QDD-RHex 的 C 型腿下半部分贴有两种样式的六块电容式压力传感器构成的传感膜，通过 I2C 串口通信可以得到六块传感器膜的数据。第一种样式为差分结构设计，但该压力传感器膜范围有限，因此仅可以测量高位与低位的情况；第二种样式为单列结构设计，其范围相对于第一种样式更大，可以测量高位、低位与超低位的情况。由于传感器对数据的读取速率有一定限制，频率仅能达到 100Hz，因此需要对六维力传感器和采集电机数据频率进行一定的调整，与传感器膜的频率进行同步。

在单腿验证性平台上分别进行 QDD-SmallRHex 和 QDD-RHex 的单腿实验，并进行验证。

#### 4.2.2 数据处理与分析

QDD-SmallRHex 的单腿实验数据主要分为两部分，包括采集的电机数据和采集的六维力传感器数据，其中电机数据包括了电机的温度信息、电流信息、速度信息以及位置信息。本实验主要使用电机的电流及位置信息与六维力传感器的压力数据进行对应拟合。

QDD-RHex 的单腿实验数据主要分为三部分，包括采集的电机数据、采集的电容式压力传感器数据以及采集的六维力传感器数据。其中电机数据包括电机的位置、速度和扭矩信息。在本实验处理中主要使用电机的位置和扭矩信息以及六块电容式力压力传感器的数据与六维力传感器的压力数据进行拟合。QDD-RHex 的单腿实验中受到导轨长度限制，并未进行超低位的实验，本实验重点在于研究高位和低位的情况。

图4.2分别展示了 QDD-SmallRHex 和 QDD-RHex 的一次低位位姿运动周期所得到的数据结果，其中单腿初始位置代表实验过程中将单腿放置在六维力传感器上的时刻，绿色部分是单腿开始运动的时刻，仅将单腿开始运动时的数据作为有效数据进行记录。

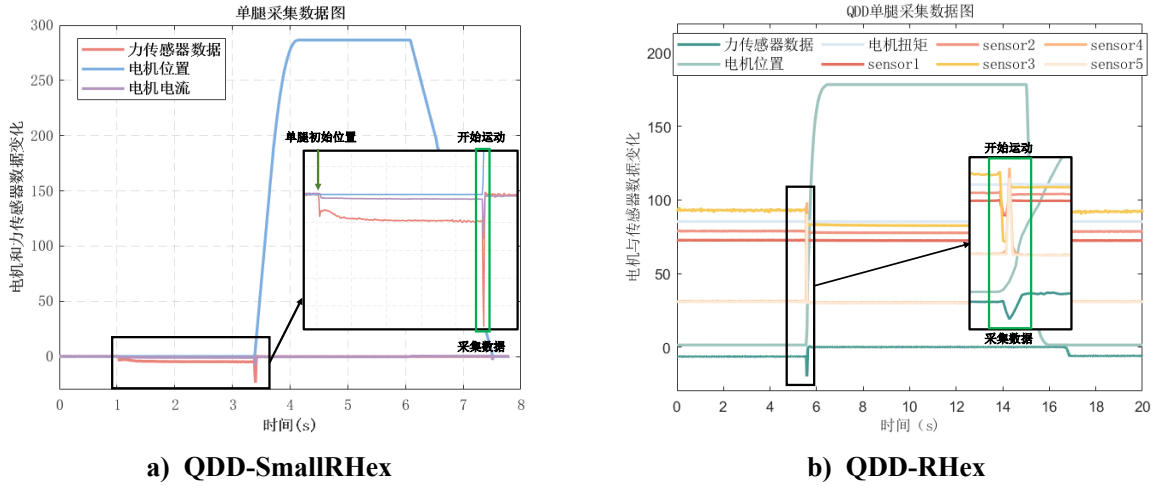


图 4.2 单腿数据分析图

在实验中，每次单腿实验电机均转过 270 度后停下，但实际与六维力传感器接触的时间并没有这么长。在 QDD-SmallRHex 的实验中，每隔 0.002 秒产生一条数据，而在 QDD-RHex 实验中，每隔 0.01 秒产生一条数据，因此每次实验所得到的的是一个由很多数据组成的阵列，如何选择其中的数据进行分析是本实验能否得到有效结论的关键因素。因此，在高位实验中，将电机位置在 30 度以后的数据进行剔除；在低位实验中，将电机位置在 60 度以后的数据进行剔除；在超低位实验中，将 90 度以后的数据进行剔除，再将其中仍存在的部分异常数据剔除，并将对应实验的所有数据进行整合，为接下来的接触力训练做好准备。

在接触力估计方面，使用 Scitkit 库中的 GradientBoostingRegressor 梯度提升回归算法对所得数据进行训练。Scitkit-learn 是 Python 中非常强大的机器学习工具之一，

其提供了多种预构建算法，可以执行各种有监督和无监督的机器学习。本实验中所使用的梯度提升回归算法是一种集成学习算法，通过集成一部分效果较弱的学习算法，并在前一学习算法的错误基础上不断进行学习，最后可以得到很好的准确率。

通过以上机器学习方法不断调整参数，包括使用的学习算法的数量以及每个学习算法所生成的节点数等，得到 QDD-SmallRHex 和 QDD-RHex 单腿的最佳训练结果，并将训练好的模型记录下来，方便后续进行使用。

**表 4.1 QDD-SmallRHex 单腿实验结果**

位姿	高位	低位	超低位
均方误差 (MSE)	0.361	16.504	23.906
决定因素 ( $R^2$ )	0.716	0.778	0.603
跳跃高度 (mm)	0	12.2	63.782

**表 4.2 QDD-RHex 单腿实验结果**

位姿	高位 (差分)	低位 (差分)	高位 (串联)	低位 (串联)
均方误差 (MSE)	0.455	5.140	1.543	7.783
决定因素 ( $R^2$ )	0.936	0.898	0.922	0.861
跳跃高度 (mm)	22.761	68.596	22.761	68.596

表4.1和表4.2分别展示了 QDD-SmallRHex 三种位姿和 QDD-RHex 两种位姿训练后的均方误差、决定因素和每种位姿的跳跃高度。均方误差越小，说明预测模型描述实验数据具有更好的精确度。决定系数越接近 1，说明数据拟合效果越好。

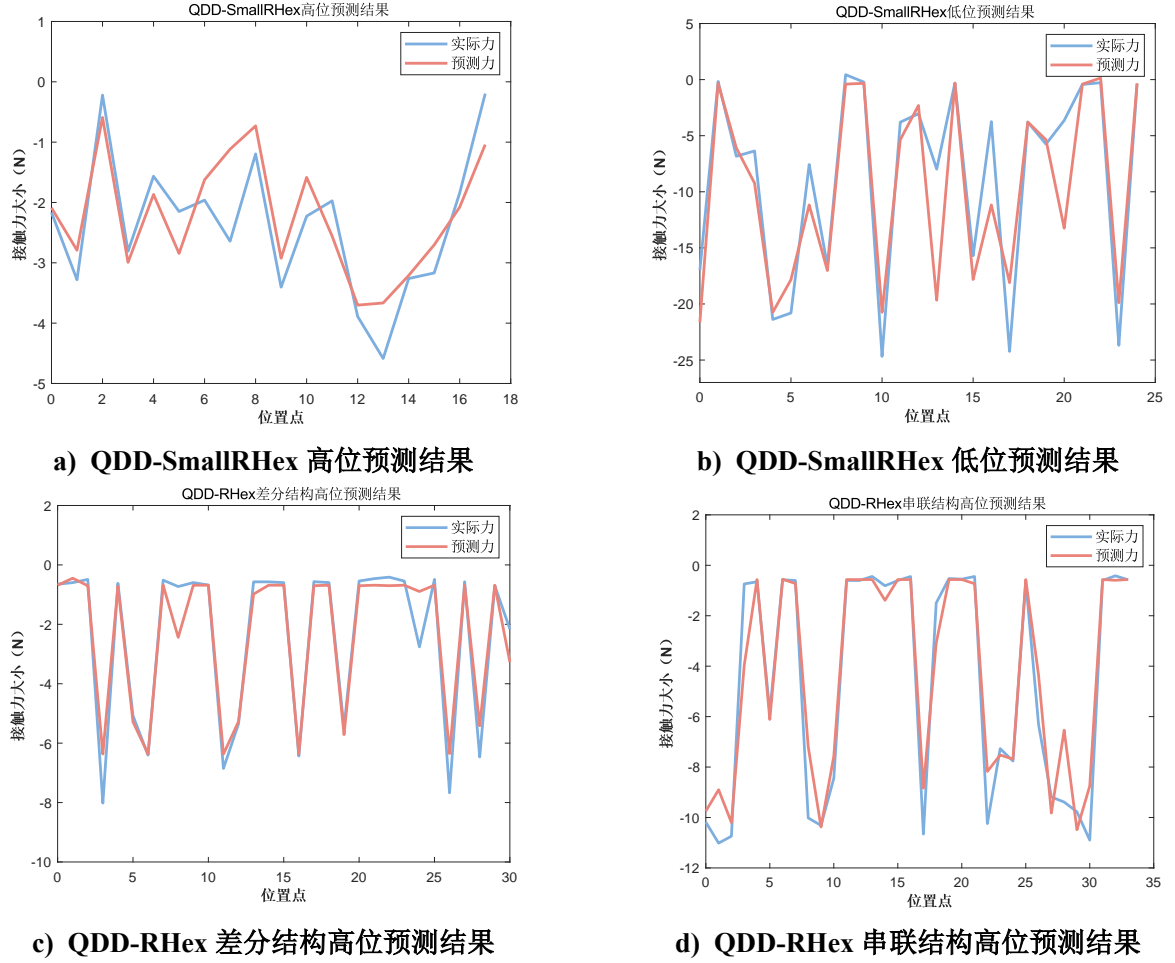


图 4.3 单腿预测效果展示图

图4.3则展示了单腿各实验实际接触力与预测接触力之间的重合程度。

#### 4.2.3 实验结论

对 QDD-SmallRHex 机器人的实验结果进行分析，可以看出：

(1) 在 QDD-SmallRHex 单腿验证性测试中，三种位姿的准确度虽达到预期的 50% 以上，为有效实验结果。但具体数值均不超过 80%，其中超低位的准确率只有 60% 左右。

(2) 在 QDD-SmallRHex 单腿验证性测试中，可以很明显的发现单腿因承受负载而产生形变，在超低位的变形情况最明显。综合发现 RHex 类机器人的柔性 C 型腿在负载情况下发生形变，会对准直驱电机直接通过电流信号估计接触力的过程带来误差。因此，在仅依靠 QDD 电机的电流和位置数据对单腿与地面接触力的情况进行预测时，应选择高位与低位行走，但其准确率依然会受到限制。

对 QDD-RHex 机器人的实验结果进行分析，可以看出：



(1) 相较于未在腿上加传感器膜的 QDD-SmallRHex 单腿而言, 其准确度大幅提高, 均大于 86%, 其中两种传感器膜的高位预测均达到 92% 以上。这证明了在 RHex 的腿上粘贴传感器膜能够直接测量与地面之间的接触力, 有效避免了 C 型腿在运动过程中因产生形变而导致结果不准确的情况。

(2) 实验中选用了差分式和串联式两种传感膜分别测量。差分式传感器膜的主要优势是不易受干扰变量的影响, 测量结果会更加准确, 这一点在实验中得到验证。在本实验中, 通过差分结构预测的数据整体相比串联结构准确率有一定提升, 证明其结构的优越性。在传感器覆盖面积满足需求的情况下, 差分式的传感膜是首选。

(3) 实验对 QDD-RHex 的在不同位姿下的跳跃高度进行了分析, 在两种 RHex 的高位位姿下, 跳跃高度基本为 0, 可以看出 RHex 机器人运行的稳定性。随着位姿越低, 跳跃高度越大, 同时 RHex 不稳定程度也会越高, 但该特性可以帮助其在穿越复杂地形和障碍物时给予帮助。

综合上述实验分析, 对本体驱动范式下的 RHex 机器人的接触力估计提出可行的提高准确率的方法如下:

- (1) 通过增加 C 型腿的厚度与材质减弱其弹性, 减小误差。
- (2) 加入不会被 C 型腿的变形影响的被测量, 比如在直接与地面接触的腿部增加传感膜。

(3) 该实验目前单次训练数据量为 500 组, 已经体现出较为准确的本体感知能力, 更丰富的数据量, 能够帮助达成更加准确的力的估计。

### 4.3 实物测试实验

因时间原因, 实物测试暂时只对 QDD-SmallRHex 机器人进行研究。本实验将 QDD-SmallRHex 放置在硬地和海绵地两种地形上进行测试, 如图4.4所示。在两种地形上分别用高位和低位进行多次测试, 记录第一条腿和第四条腿的电机电流及位置变化数据, 用于预测接触力的分析。通过接触力的结果观察其对于地形分类的可行性。



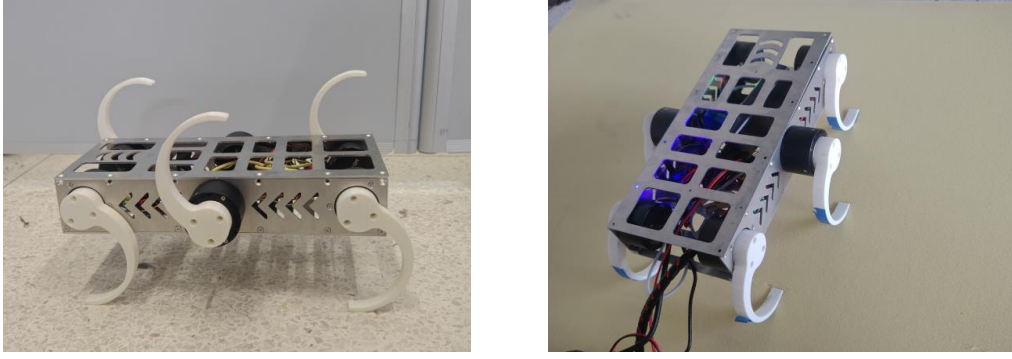


图 4.4 实物测试过程图（硬地、海绵地）

在分析过程中，选取与单腿平台测试中位置相近的数据，以便很好的使用前文所述实验所训练出来的模型进行预测。

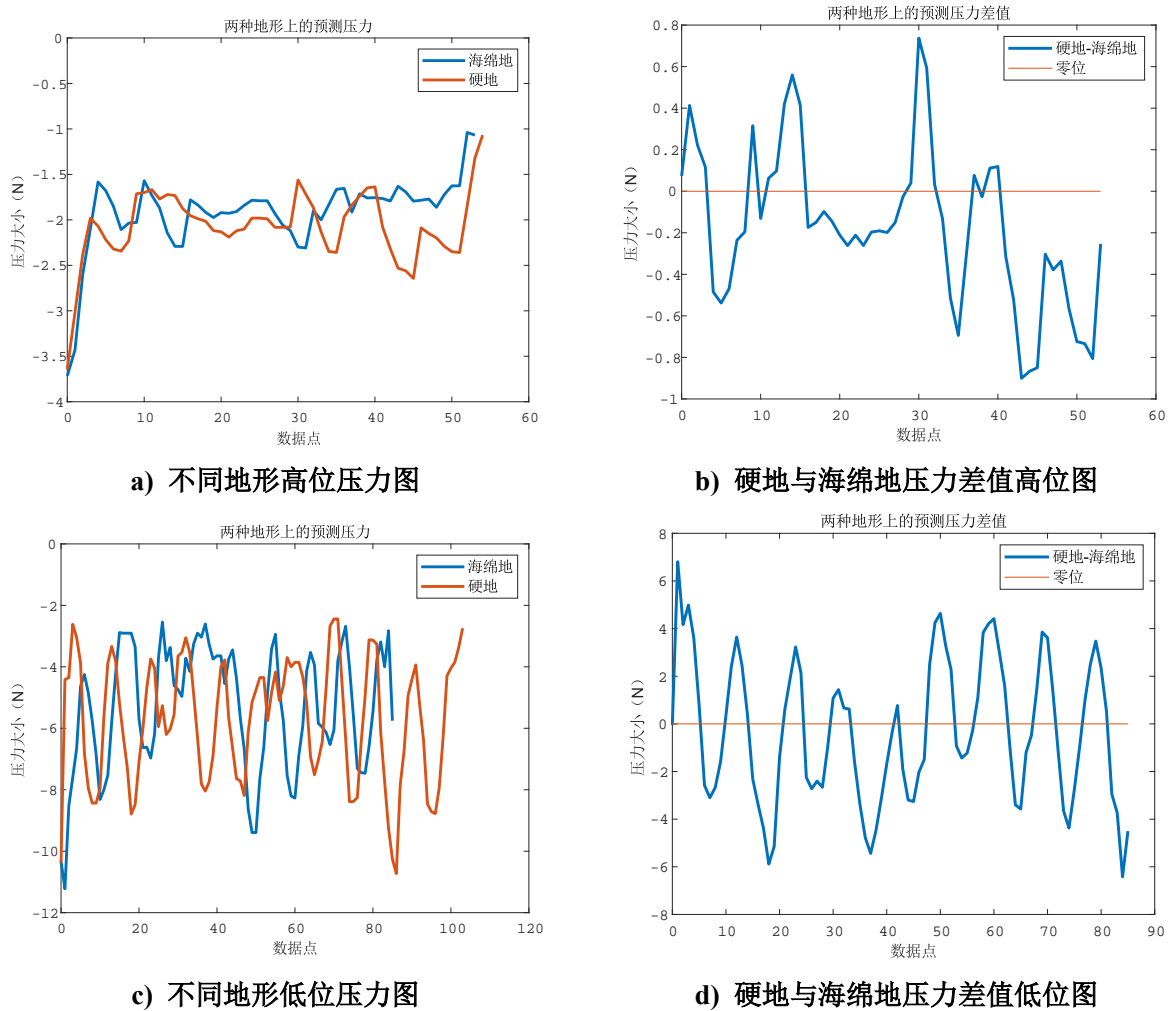


图 4.5 QDD-SmallRHex 实物测试数据图

预测后的实验数据与差值图像如图4.5所示，可以看到无论是在低位还是高位，海绵地上所受到的力都略大于硬地上受到的力，一定程度上有进行地形分类的可能。但

从数据原始图像可以看出，低位和高位数据交错的情况经常出现，在交错情况中海绵地的预测力相对更大一些，这并不利于实际数据处理。产生原始图像所示问题可能有多方面原因：（1）在单腿测试实验中，QDD-SmallRHex 的预测力实验结果并不理想，最高准确率仅达到 78%，因此在数据的预测上准确度受限；（2）在实际测试中，因 RHex 机器人机身重量整体略大于单腿测试重量，可能导致单腿形变量增加，导致电机电流测量数据不准确，影响后续对预测力的判断。

QDD-SmallRHex 机器人的本体驱动与感知的实物测试存在着难以避免的误差，这个误差一定程度上限制了其地形分类的能力。但实物实验成功将单腿验证性测试的结果应用在不同地形的实物测试中，并得到了存在一定区分性的结果，这为 QDD-RHex 机器人的实物实验提供了经验。实现 QDD-RHex 机器人结合传感膜测量下的实物测试，并将其应用在更多有区分度的地形之中，将是本部分实验后续的完善方向。

#### 4.4 本章小结

本章节进行了两种实验：单腿验证性测试实验及 QDD-SmallRHex 实物测试实验，对实验所得数据进行分析，得到实验结论。

## 5 总结与展望

### 5.1 结论

本次毕设设计并制造了两款 QDD 准直驱范式下的 RHex 类机器人平台，并对其本体驱动与感知能力进行了探索性的研究，实现了准直驱下的运动控制与力的估计。在仿真实验中，验证了三种步态（行走、转弯、爬楼梯）设计与代码的可行性，对三种位姿（高位、低位、超低位）进行设计。在实物实验中，通过单腿前置验证性测试的对比研究，发现传统柔性 C 型腿在本体驱动范式中存在的部分问题，采集数据经过机器学习算法进行拟合分析，探索出较为准确的拟合接触力的方式，特别在加上传感器膜的 QDD-RHex 机器人的单腿实验中，高位的准确率可以达到 92% 以上。通过实物测试得到 QDD-SmallRHex 机器人在海绵地形和硬地上的不同接触力结果，并对数据存在的问题进行详细分析，为后续 QDD-RHex 机器人的实物测试提供一定的参考。

### 5.2 存在的问题与未来期望

#### 5.2.1 存在的问题

对目前已做的实验和研究进行总结，还发现存在以下问题：（1）单腿平台实验中，因导轨长度限制，无法很好的进行 QDD-RHex 的超低位测试，强行测试容易产生设备损坏。因此，后续可以更换更长的直线导轨对该单腿进行超低位的步态研究，使整体实验流程更加完整；（2）QDD-SmallRHex 的实物测试中不稳定因素多，均对实验结果可能产生一定影响，后续应对每一个具体可能出现问题的因素进行详细分析，排除干扰后在更多地形上进行测试；（3）仿真实验上，运行过程中偶尔会出现某条腿脱离模型或不遵从物理规律的情况，因为仿真环境主要依靠电脑算力对物理环境和模型运动进行计算，不同设备运行会对结果有微小的影响，对此，期望未来有更优的简化模型，能够减少计算量，保证仿真实验的统一性，对三种位姿分别进行仿真测试，使结果更加真实可信；（4）在实验过程中发现，QDD-SmallRHex 的 C 型腿因其过薄导致其在低位和超低位实验腿部形变量过大，影响接触力估计的准确性。为了避免这样的情况，在后续进行实验过程中将腿部厚度少量提升，保证其在任何步态均不会出现明显形变量的基础上保证接触力感知的准确性。

在实验过程中可以看到 QDD 准直驱方案构建的新型 RHex 机器人，结合触觉传感器能进行较好的接触力估计，具有不错的本体驱动与感知能力，在自主化，智能化

自适应地形的研究上有较大潜力。

### 5.2.2 未来展望

为了对 RHex 机器人的本体感知能力进行进一步研究，后续将开展 QDD-RHex 的实物测试实验，在已做 QDD-SmallRHex 实物测试的基础上，对实验过程进行进一步优化，结合更多的传感器模块如 IMU 等在 QDD-RHex 上实现更好的地形分类，同时对不同位姿在地形分类上的不同情况进行更多探究。

## 参考文献

- [1] SARANLI U, BUEHLER M, KODITSCHKE D. Design, modeling and preliminary control of a compliant hexapod robot[C]. in: Proceedings 2000 ICRA. Millennium Conference. IEEE International Conference on Robotics and Automation. Symposia Proceedings (Cat. No.00CH37065): vol. 3. 2000: 2589-2596.
- [2] SARANLI U, BUEHLER M, KODITSCHKE D. RHex: A Simple and Highly Mobile Hexapod Robot[J]. Departmental Papers (ESE), 2001, 20.
- [3] MCMORDIE D, BUEHLER M. Towards pronking with a hexapod robot[C]. in: 2001.
- [4] KOMSUOGLU H, MCMORDIE D, SARANLI U E A. Proprioception based behavioral advances in a hexapod robot[C]. in: Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.01CH37164): vol. 4. 2001: 3650-3655.
- [5] SARANLI U, RIZZI A A, KODITSCHKE D E. Model-Based Dynamic Self-Righting Maneuvers for a Hexapedal Robot[J]. The International Journal of Robotics Research, 2004, 23: 903-918.
- [6] NEVILLE N, BUEHLER M, SHARF I. A bipedal running robot with one actuator per leg[C]. in: Proceedings 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2006. ICRA 2006. 2006: 848-853.
- [7] MOORE E, CAMPBELL D, GRIMMINGER F, et al. Reliable stair climbing in the simple hexapod 'RHex'[C]. in: Proceedings 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.02CH37292): vol. 3. 2002: 2222-2227.
- [8] MONICA BARRAGAN A M J, Nikolai Flowers. MiniRHex: A Small, Open-source, Fully Programmable Walking Hexapod[EB/OL]. <https://robomechanics.github.io/MiniRHex/>.
- [9] SARANLI U, SCHWIND W, KODITSCHKE D. Toward the control of a multi-jointed, monoped runner[C]. in: Proceedings. 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.98CH36146): vol. 3. 1998: 2676-2682.
- [10] GALLOWAY K, HAYNES G, ILHAN D, et al. X-RHex: A Highly Mobile Hexapedal Robot for Sensorimotor Tasks[J]. Technical Reports (ESE), 2010.
- [11] WU X A, HUH T M, MUKHERJEE R, et al. Integrated Ground Reaction Force Sensing and Terrain Classification for Small Legged Robots[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2016, 1(2): 1125-1132.
- [12] WU X A, HUH T M, SABIN A E A. Tactile Sensing and Terrain-Based Gait Control for Small Legged Robots[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2020, 36(1): 15-27.
- [13] 朱雅光, 金波, 李伟. 基于自适应-模糊控制的六足机器人单腿柔顺控制[J]. 浙江大学学报(工学版), 2014, 48(8): 1419-1426.1487.
- [14] 韩媛媛, 王生栋, 郑超, 等. 基于半圆形柔顺腿的六足机器人研究[J]. 机械与电子, 2016, 2: 72-75, 80.
- [15] WANG W, SHI W, LI Z E A. SmallRhex: A Fast and Highly-Mobile Hexapod Robot[C]. in: 2022 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO). 2022: 46-51.
- [16] 林世远. 准直驱机械手的系统设计与运动控制研究 [M]. 2022.

- [17] 北京新思思国际信息咨询有限公司. 2023-2028 年准直驱驱动器行业市场深度调研及投资前景预测分析报告[M]. 北京新思思国际信息咨询有限公司, 2023.
- [18] LUO Y, ABIDIAN M R, AHN J H E A. Technology Roadmap for Flexible Sensors[J]. ACS Nano, 2023, 17(6): 5211-5295.

## 致谢

四年来，十分感谢南方科技大学机械与能源工程系，为我提供宝贵的教育资源和难得的实习实验机会。尤其感谢我的指导老师贾振中教授，在本次毕设的选题、实验开展遇到问题等需要帮助的时候给予的细致指导。

另外，感谢南方科技大学材料系郭传飞教授课题组为传感器模块提供的技术支持，感谢 ROMA 实验室对本次毕设的帮助，在 RHex 机器人的设计与实验过程中提供十分有用的经验与建议。感谢李泽睿、王文晖同学对 SmallRHex 机器人相关的经验传授，感谢高骋远、李卓伦同学在设计与传感器选型方面提供的建议，感谢胡龙腾、龙嘉骏同学在实验过程中的帮助。