

Robot Creative Design Report

机器人创意设计报告

“仿虫型管道检测与修复机器人

Insect like Pipeline Inspection and Repair Robot”

Team A1 (A1 组)

- A. 张宸赫
- B. 刘俊俞
- C. 罗思奇
- D. 赵富钰

Prof. Bohui Ding 丁伯慧 教授

TA: Zilong Song 宋子龙 助教

Shengchao Li 李昇朝 助教

Innovative Design and Intelligent Manufacturing for the Future

面向未来的创新设计与智能制造

4/8/2023

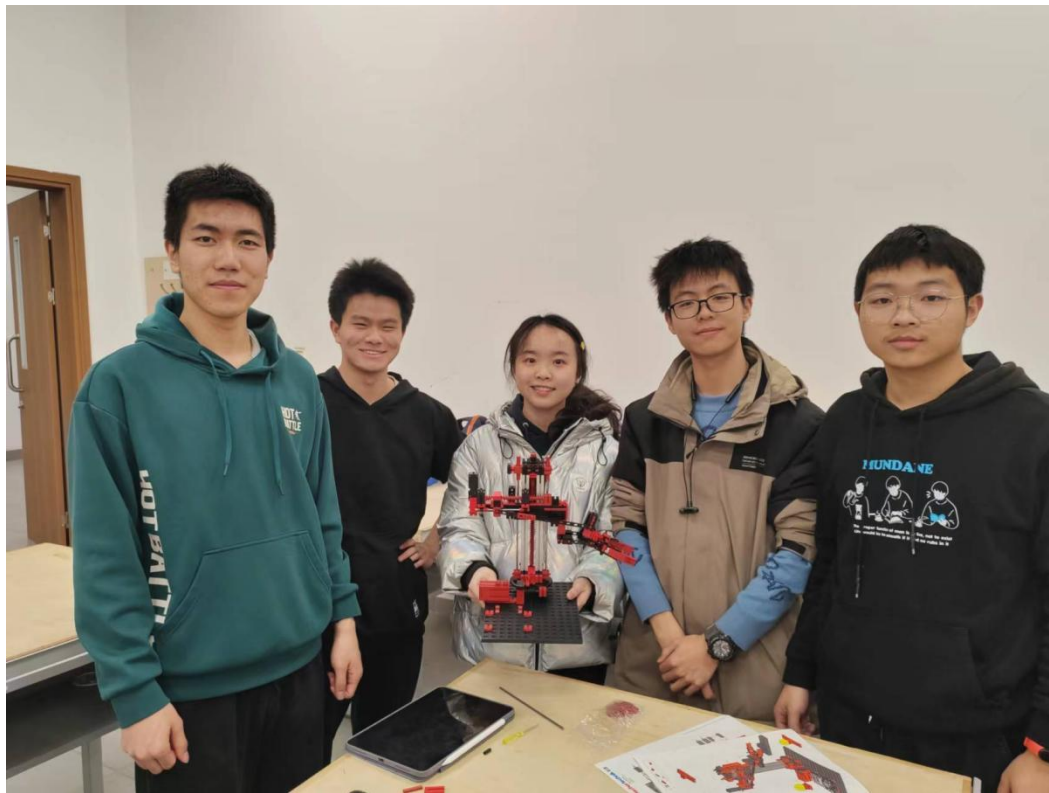


Figure 1: Team A1

- A. The first on the left:Chenhe Zhang
- B. The second on the left:Fuyu Zhao
- C.The first on the right:Junyu Liu
- D.The second on the right:Siqi Luo

图 1 A1 组

- A. 左一：张宸赫
- B. 左二：赵富钰
- C.右一：刘俊俞
- D. 右二：罗思奇

Table of Contents (目录)

- Abstract (摘要) 1
- Introduction (引言) 1
- 1 Design Requirements (设计需求) 2
- 2 Literature Review (文献综述) 2
- 3 Concept Development (设计方案) 3
 - 3.1 Design Concept 1 (方案 1) 3
 - 3.2 Design Concept 2 (方案 2) 4
 - 3.3 Design Choice (最终方案) 错误!未定义书签。
- 4 Design Specifications (设计说明) 4
 - 4.1 Final Design Description (整体设计) 4
 - 4.2 Device Components Design (部件设计) 5
 - 4.3 Device Parts Design (零件设计) 7
 - 4.4 Powering the Device (驱动系统) 9
- 5 Simulations and Analysis (仿真与分析) 10
- 6 Conclusions (结论) 12
- 7 References (参考文献) 13
- 8 Appendix (附录) 14
 - 8.1 A. Parts Drawings (零件图) 14
 - 8.2 B. Assembly Drawing (装配图) 16

摘要:

本文介绍了一种针对化工管道检测和修复的仿虫型六足管道检测与修复机器人。机器人具有精准定位、多传感器融合、可靠灵活的机身结构、远程控制和新材料修补等功能。设计方案考虑了机器人在管道内外工作的需求，采用仿虫型六足设计，实现了全方位运动。主要部件包括万向轴结构、减速装置与腿部连杆等。能有效应对复杂的工作环境

关键词: 管道检测与修复 虫型结构 仿生机器人

Abstract:

This article introduces a bio-inspired hexapod robot designed for the detection and repair of chemical pipelines. The robot features precise positioning, multi-sensor fusion, a reliable and flexible body structure, remote control, and new material repair capabilities. The design takes into account the robot's need to work both inside and outside pipelines, and employs a bio-inspired hexapod structure to achieve omnidirectional movement. The main components include universal joint structures, reduction devices, and leg linkages, among others, which effectively address complex working environments.

Keywords:

pipeline detection and repair, bio-inspired structure, hexapod robot

Introduction（引言）

化工行业历来顶着“高污染、高耗能、高风险”的帽子，安全事故频发，不仅造成高昂的经济损失，更给伤亡者及其家属、企业乃至整个行业带来阴霾。化工管道泄漏问题危害人们生命安全，未雨绸缪、及时修复是降低化工管道泄漏危害手段。为此，人们研究出一种能在管道内部运动并且能完成相关作业的设备，即智能管道机器人，其能在作业人员的控制下完成一系列的管道检修作业。本文设计的是针对化工管道检测和修复的仿虫型机器人，其集成的多种传感器使其能爬在管道表面发现管道泄漏的情况，并利用其自身的功能模块喷涂复合材料对泄漏位置进行维修处理，考虑实际工作环境，本文设计的机器人可

在管道外壁自由爬行，实时工作并不对管道内造成污染，又能在管道内工作以适应外部空间狭小的管道，可在天然气、石油、化工等多个行业中得到应用。

1 Design Requirements（设计需求）

该仿生机器人主要具有如下功能：

（1）精准定位：该机器人配备了高精度定位系统，能够在管道内外部实现准确的位置定位和路径规划。

（2）多传感器融合：机器人搭载了多种传感器，例如高清摄像头、激光雷达、超声波探测器等，可以全面监测管道内外部的情况。

（3）可靠、灵活和集成多种功能的机身结构：具有牢固可靠的机身结构和灵活的越障能力，可灵活适应不同管道大小，机器人可根据需要进行巡检、监测、修复等不同操作，具有丰富的用途。

（4）远程控制：工作人员可以远程控制机器人，无需工作人员亲自进入危险环境。

（5）新材料修补：机器人可喷涂纤维复合材料，借助于纤维材料^[1]的强度特性，来增强管道修复的韧度，从而保证管道的整体结构强度，避免在使用过程中，出现管道的二次受损。

2 Literature Review（文献综述）

Inuktun Spectrum 45TM 是一款多功能的轮式管道机器人，可用于污水处理、石油和天然气等行业的巡检和维护。但它不适用于所有管道，由于机器人的轮式设计，它可能无法适应某些形状和尺寸的管道。ECHOSCOPE 是一种基于超声波技术的管道机器人，可以进行精确的管道内部无损检测。哈尔滨工业大学姜生元等^[2]研制的六轮驱动式管道机器人，美国卡耐基梅隆大学研发的 COBRA (Compliant Omnidirectional Burns Robotic Articulate) 机器人^[3]是一种针对管道内部修复和维护的机器人，采用蠕虫式设计，能够在管道内部自由移动，并且能够适应不同形状和尺寸的管道。2019 年，IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) 会议^[4]上，研究者们展示了一款新型 COBRA 机器人，采用了更加先进的柔性材料和传感器技术。PipeDream 是由英国公司 Piip1 挑战设计的一种管道修复机器人，主要用于石油和天然气管道中的泄

漏问题，但 PipeDream 机器人的设计和技术方案较为复杂。

这些管道修复机器人都只能在管道内部工作，能适应的管道环境有限，为此本文研究的仿虫型管道修复机器人兼顾管道内外，既可在管道外壁实时工作并不对管道内造成污染，又能在管道内工作以适应外部空间狭小的管道。

管道机器人根据驱动方式和机动部件结构可大体分为 5 大类^[5]：仿生式、履带式、螺旋驱动式、车型式和支撑轮式。为达到适应多种管径和复杂的管道环境，本文研究的管道修复机器人采用仿虫型六足设计。

基于提出的这个模型，这篇文章将按如下顺序进行阐述：第三章是设计方案，介绍该机器人结构和功能完善的过程；第四章是设计说明，介绍该机器人用于体节间连接的万向轴结构、身体部分的细节、零件设计、驱动系统；第五章是仿真与分析，第六章是结论。

3 Concept Development（设计方案）

3.1 Design Concept 1（方案 1）

我们最开始设计的是机器人是可以在管道上部爬行的进行检测机器人；在维修检测方面，我们最开始想到的是在头部通过一个管来实现对修复材料的喷出。在深入探讨后，我们发现化工厂的管道的粗细大小是不同的，而且要修复的地方也不只是上表面，而是整个管道外表面。

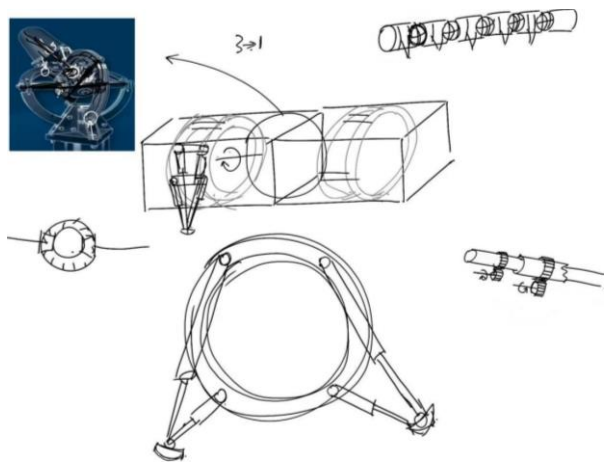


图 2 最初设计草图

3.2 Design Concept 2（方案2）

改进及其最终方案：设计该机器人的最终目的是为了检测和维修，所以头部的设计思路如下：头顶处设计一个可以检测化学物质泄露的装置，其次，在嘴部装备上可以喷出相关化学物质材料的喷口，实现检测维修一体化。

与此同时，我们还考虑了其如何在不同粗细的管道处的行进问题以及管道侧壁下段的检测和修复问题：通过多节身体通过多自由度的万向轴连接，我们可以实现机器人的多方向自由转动；而且在腿的接触部分模仿了壁虎的足部结构让它可以黏附在管道上，在不同的面上进行自由的爬行。

3.3 Design Choice（最终方案）

在上述基础上，我们还注意到，如果只是通过一个喷口喷出，如果原料在管道处凝固会导致堵塞。所以我们进行了一些改进。为了防止黏性化学高分子材料在喷管中凝固堵塞，我们还想到将两种不同的无黏性原料分别装在两个空间里，再通过两个喷口将其喷出，两者在外部融合反应生成需要的黏性修补材料进行修复的方法。这样完成我们的最终方案。

4 Design Specifications（设计说明）

4.1 Final Design Description（最终设计说明）

由于该机器人是虫形结构，因此有一定重复的体节单元，每一个体节单元的设计结构基本相同，因此只需分析单个体节的结构设计即可。在一个体节中有主要有两个部分组成。



图3 机器人的整机外观

4.2 Device Components Design（部件设计）

首先是用于体节间连接的万向轴结构，该结构采用两个套环结构组成，每个套环可以进行单维度的旋转，两个套环以 90 度重合，两个套环共同运动组合形成一个 360 度的环面旋转，保证了两个自由度的体节间运动。该套环通过内部的两个同心轴传动。由轴上的伞齿轮控制。两个半环绕中心点旋转。由两个半环上一个浮动的连接扣，控制该万向节的运动角度。

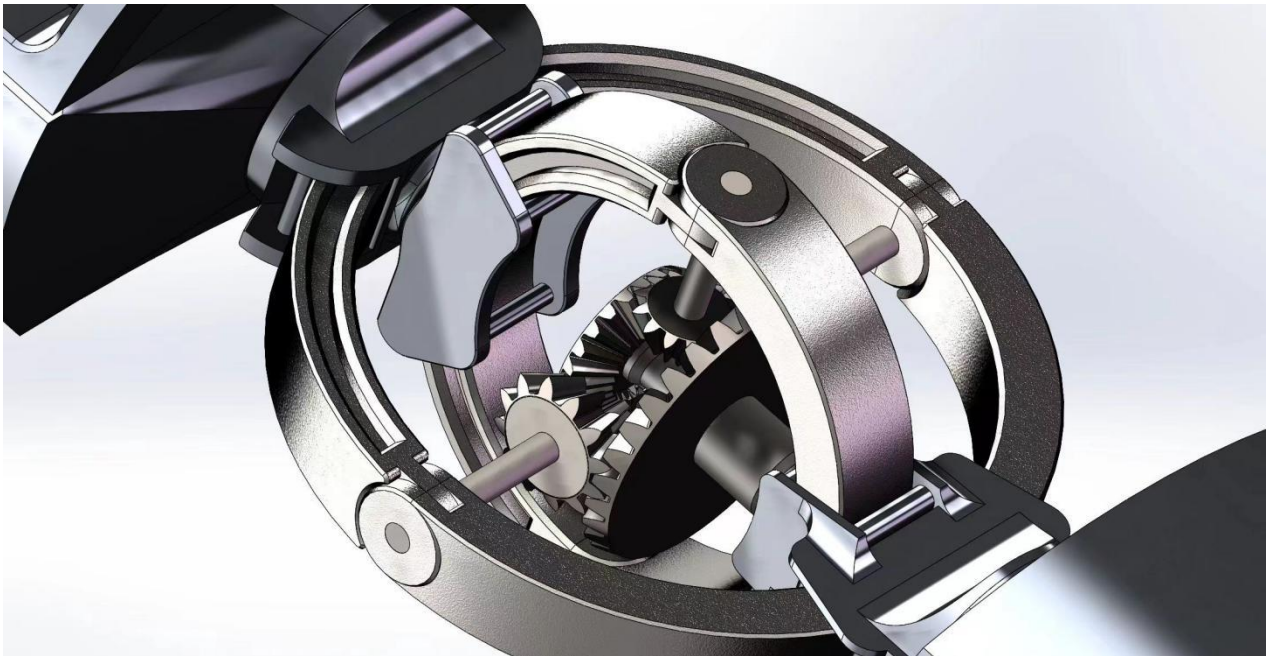
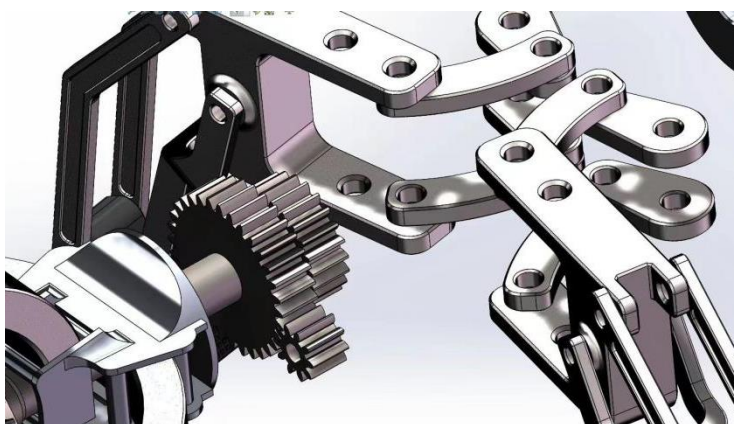


图 4 万向轴整体结构

第二个部分是身体部分。身体部分主要由驱动装置和腿部组成。驱动装置分两部分。前半部分是用来驱动万向轴的两个减速装置，后半部分是用来驱动腿部的连杆结构。腿部采用多连杆结构设计。机身内部的连杆控制了腿部在水平平面上的旋转。而腿部与机身连接的滑块驱动了腿在竖直平面上的运动。两种运动共同组合形成了腿在空间上的综合运动。



A) 齿轮减速装置与腿部连杆 外瞰



B) 齿轮减速装置与腿部连杆 内视

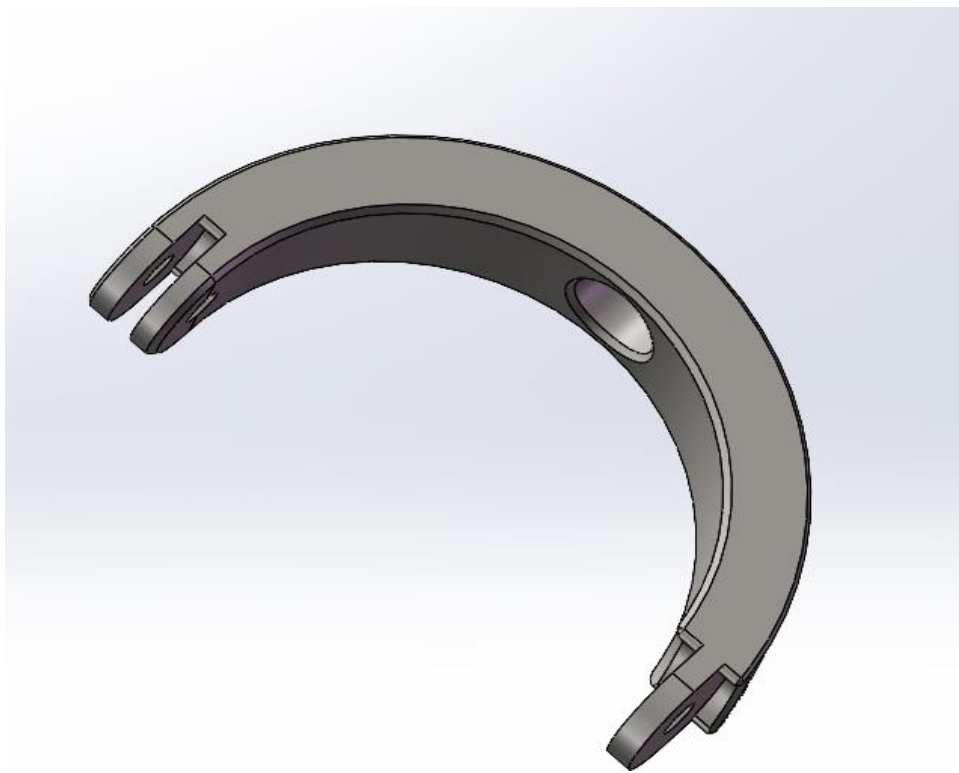
图 5 减速装置与腿部连杆

由多个体节的多个腿共同配合，完成了机器人爬行的运动模式。再结合上万向节的转动功能，实现了机器人的全方位运动。

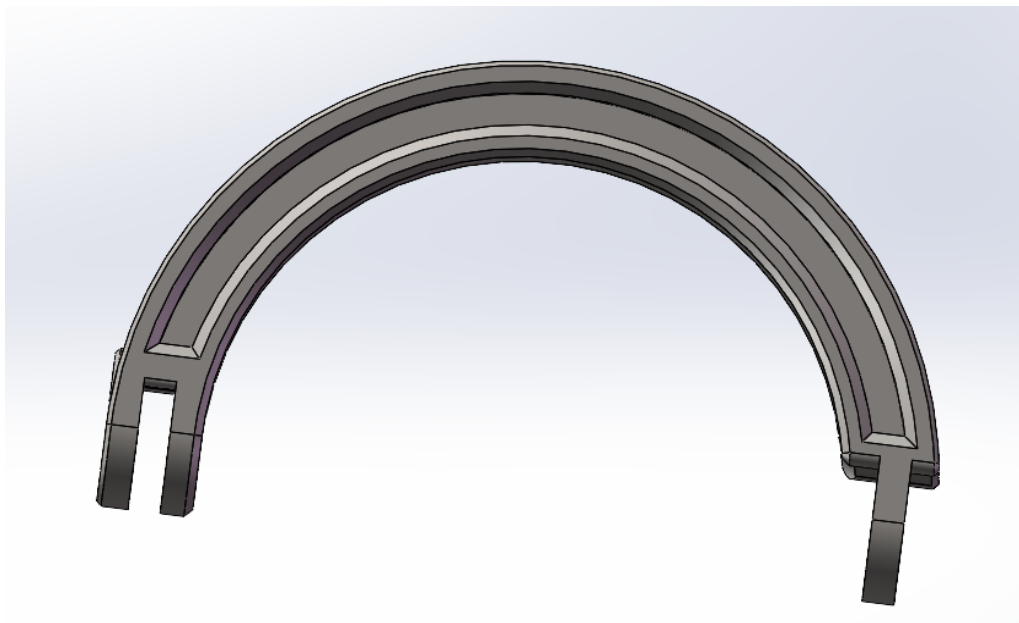
4.3 Device Parts Design（零件设计）

该机器人主要有以下零部件组成。首先是用于万向轴的两个环臂结构，分为内环臂和外环臂。每套环臂分固定环闭和可旋转环臂。该环臂的驱动由两套伞齿轮构成。每套伞齿轮有三个：两个对称的从动齿轮和中间的一个驱动齿轮。中心的两个驱动齿轮与两根同心的中心轴固定。该中心轴的动力来源于机身的减速电机。

为实现两个环臂的旋转运动向体节间角度变化的转换，有两个连接扣固定在环臂两端。在驱动远端的连接扣是可运动设计，该连接扣由内扣、外扣和中间的旋转环组成，可在两个环臂上滑动。为解决环壁在非正交状态下运动的适配，设计了中间的旋转结构。其次，有固定环扣存在于驱动近端，即两个固定环臂的相交位置。该环扣内外层不可旋转，既用于固定环臂的正交状态，也用于驱动轴的定位。两个环扣连接于前后两个主体上。



A) 内定环臂



B) 外定环臂

图 6 环臂

该机身主体除前述万向轴驱动装置外。还有一套用于足部驱动的驱动结构和足部连杆结构。用于足部在水平平面上旋转驱动的结构，由左右两套，每套上下两层的连杆构成。该连杆在水平 90 度角度内旋转，可实现足部在平面内 135 度角度的旋转控制。

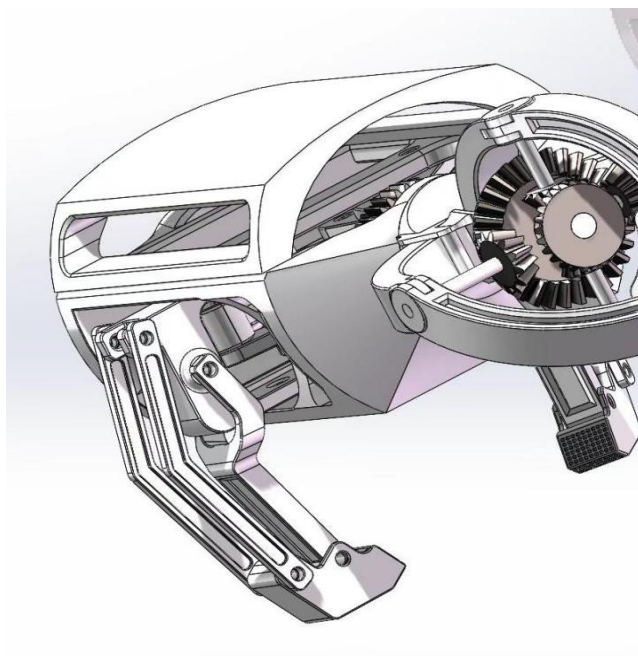


图 7 足部整体结构

每套足部由与机身主体连接的驱动滑块、足部内侧臂、两根足部外侧连杆，以及足趾构成。足部内侧壁在与机身主体连接的驱动滑块上的电机驱动下，在竖向平面内旋转。而足部外侧连杆则在内侧臂的旋转下，联动控制足趾旋转，使其贴合管道。

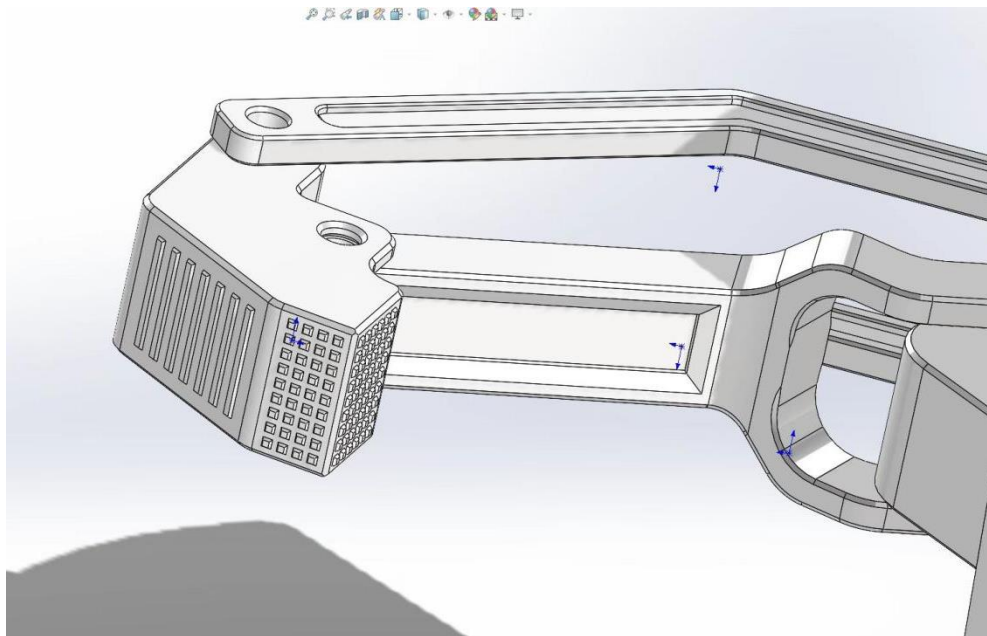


图 8 脚趾细节

4.4 Powering the Device（驱动系统）

该设计主要有三种驱动电机。第一种用于万向轴旋转的驱动，每个体节共有两个。第二种用于足部在水平平面上旋转，每个体节左右侧各一个，共两个。第三种用于足部在竖直平面上旋转驱动，每足一个，左右共两个。因此每个体节共六个驱动电机。

5 Simulations and Analysis（仿真与分析）

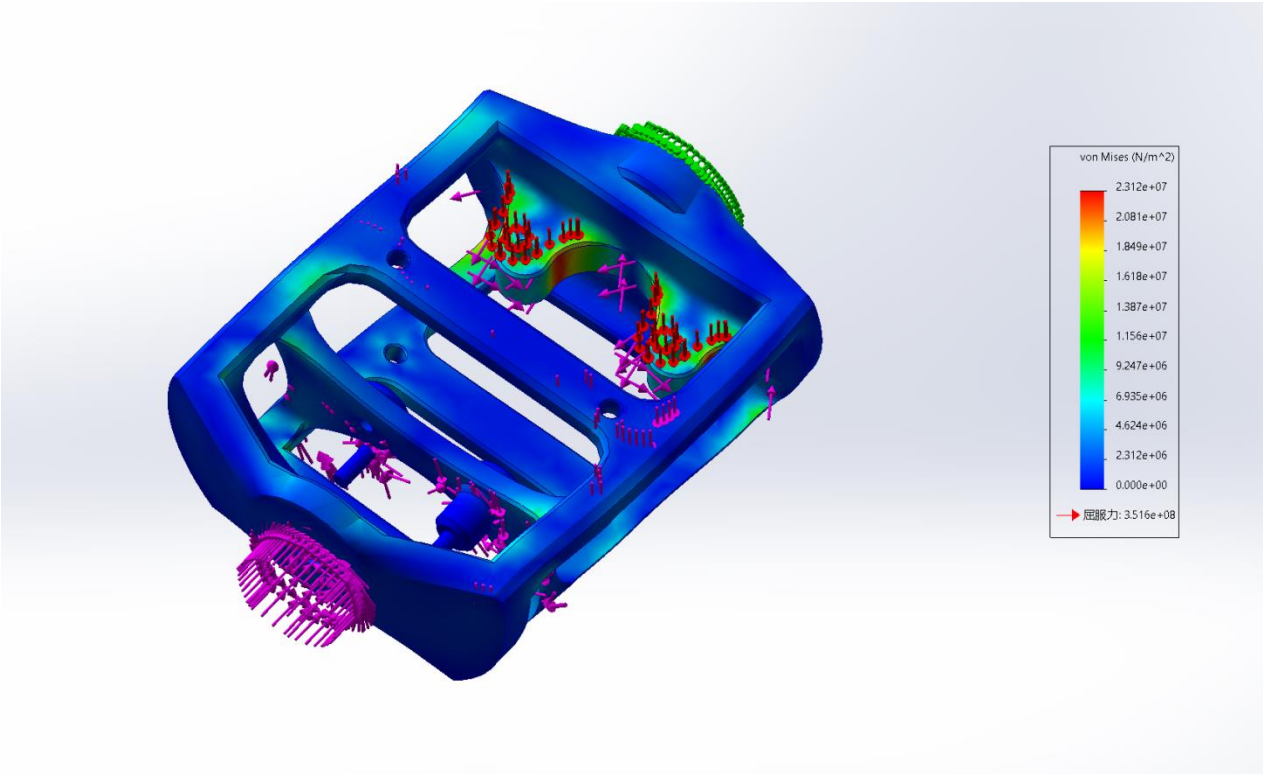


图 9 主框架的仿真分析图

模型名称: 主框架-底座 当前配置: 默认			
实体			
文档名称 和参考	视为	容积属性	文档路径/修改日期
凸台-拉伸 16[2]	实体	质量:0.000446734 kg 体积:5.65487e-08 m^3 密度:7,900 kg/m^3 重量:0.004378 N	D:\Project\InsectInspired- RepairRobot\SldPrt\主框架-底 座.SLDPRT Apr 17 00:30:43 2023
倒角 11	实体	质量:0.496051 kg 体积:6.27905e-05 m^3 密度:7,900.1 kg/m^3 重量:4.8613 N	D:\Project\InsectInspired- RepairRobot\SldPrt\主框架-底 座.SLDPRT Apr 17 00:30:43 2023

表 1: 物体的基本信息

6 算例结果

名称	类型	最小	最大
应力 1	VON: von Mises 应力	0.000e+00N/m^ 2 节: 1	1.879e+06N/m^ 2 节: 7255
主框架-底座-静应力分析 3-应力-应力 1			

名称	类型	最小	最大
位移 1	URES: 合位移	0.000e+00mm 节: 1	3.660e-04mm 节: 31366
主框架-底座-静应力分析 3-位移-位移 1			

名称	类型	最小	最大
应变 1	ESTRN : 对等应变	0.000e+00 单元: 1	5.511e-06 单元: 862
主框架-底座-静应力分析 3-应变-应变 1			

表 2: 力, 位移, 应变数据

由于我们为了方便展示而将主框架镂空, 所以通过仿真分析的结果我们发现在主框架的边框会有微小的形变, 在后续的加工制造过程中我们也可以改用更加高强度的材料或者对其进行加粗处理。

同时主框架尾部的突起连接处可以发现其会承受比较大的力, 虽然在设计过程中我们考虑了这个问题并对其进行加粗, 但在材料选择时也要注意, 对其进行加固处理。

6 Conclusions (结论)

本报告介绍了一种仿虫型六足管道检测与修复机器人，具有灵活的适应能力，可广泛应用于石油、化工、天然气等管道的检测与修复。机器人采用万向轴结构连接体节，仿壁虎足黏附方式的足等精巧设计，并采用新型材料修复，增强管道修复的韧度。

设计需求包括：精准定位、多传感器融合、可靠、灵活和集成多种功能的机身结构、远程控制和新材料修补。经过多次设计方案讨论，最终方案考虑了管道内外工作的需求。设计说明涵盖了设备组件设计、零件设计和驱动系统。

仿真与分析部分指出了主框架的形变和突起连接处的承受力问题，建议在材料选择和加工制造过程中加以改进和加固。

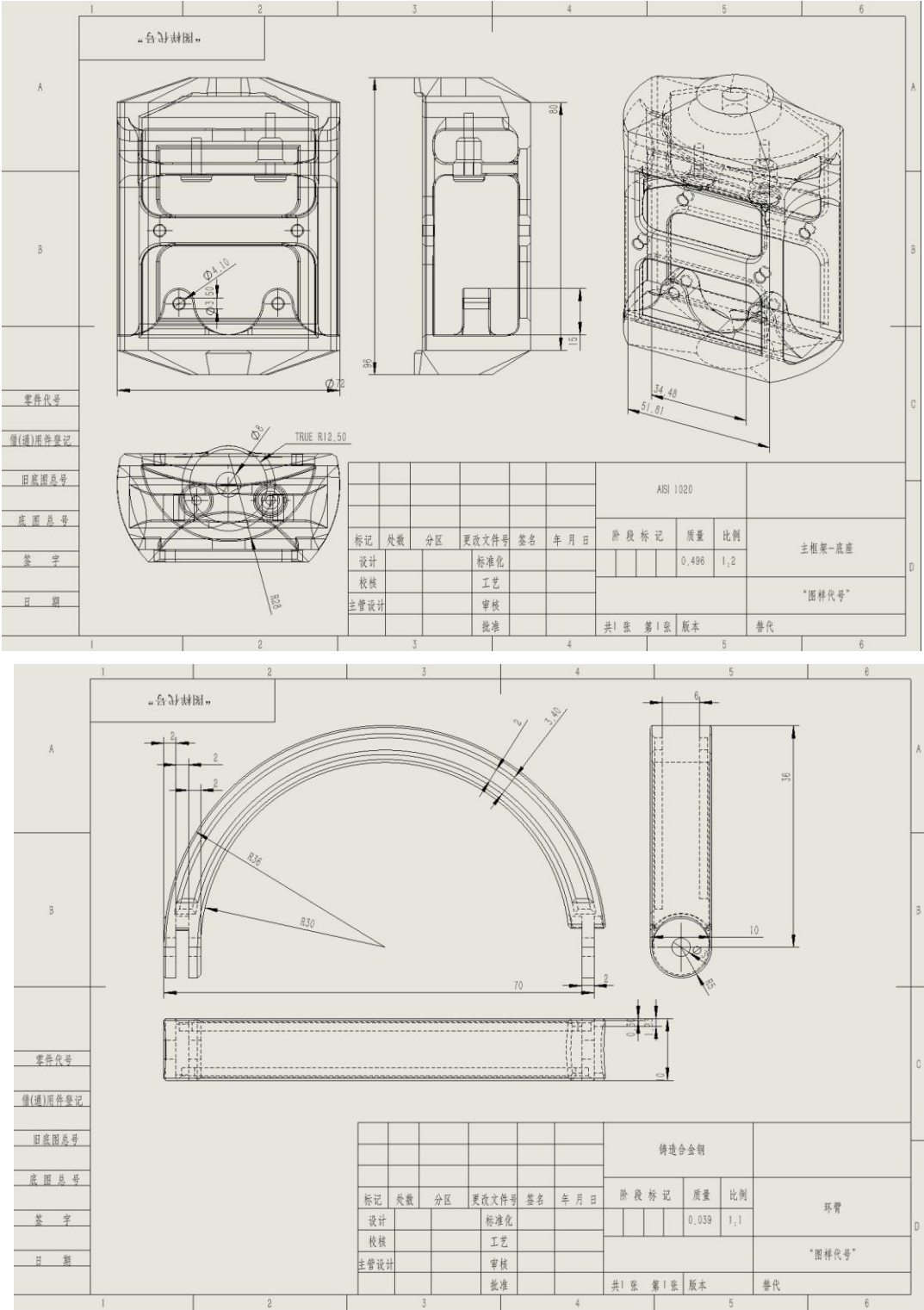
总体而言，这种仿虫型六足管道检测与修复机器人在降低管道泄漏发生、保障生产和运输安全方面具有重要作用。

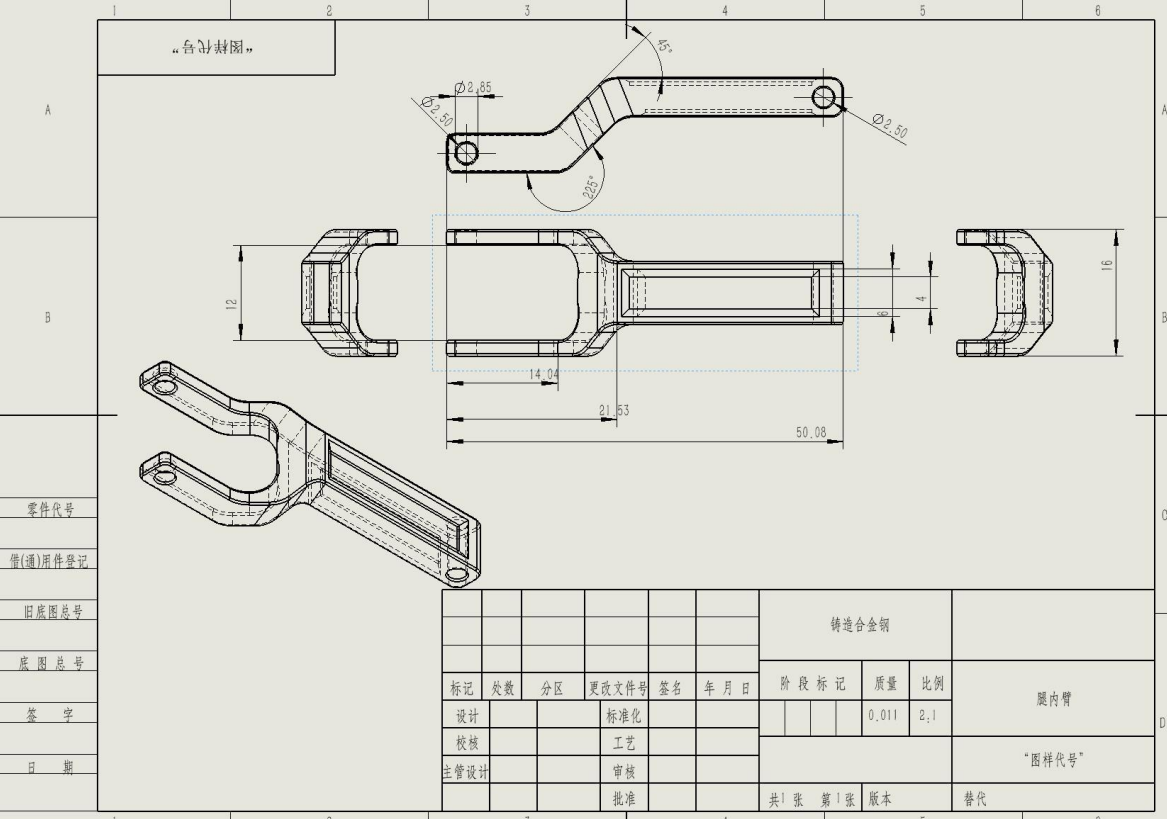
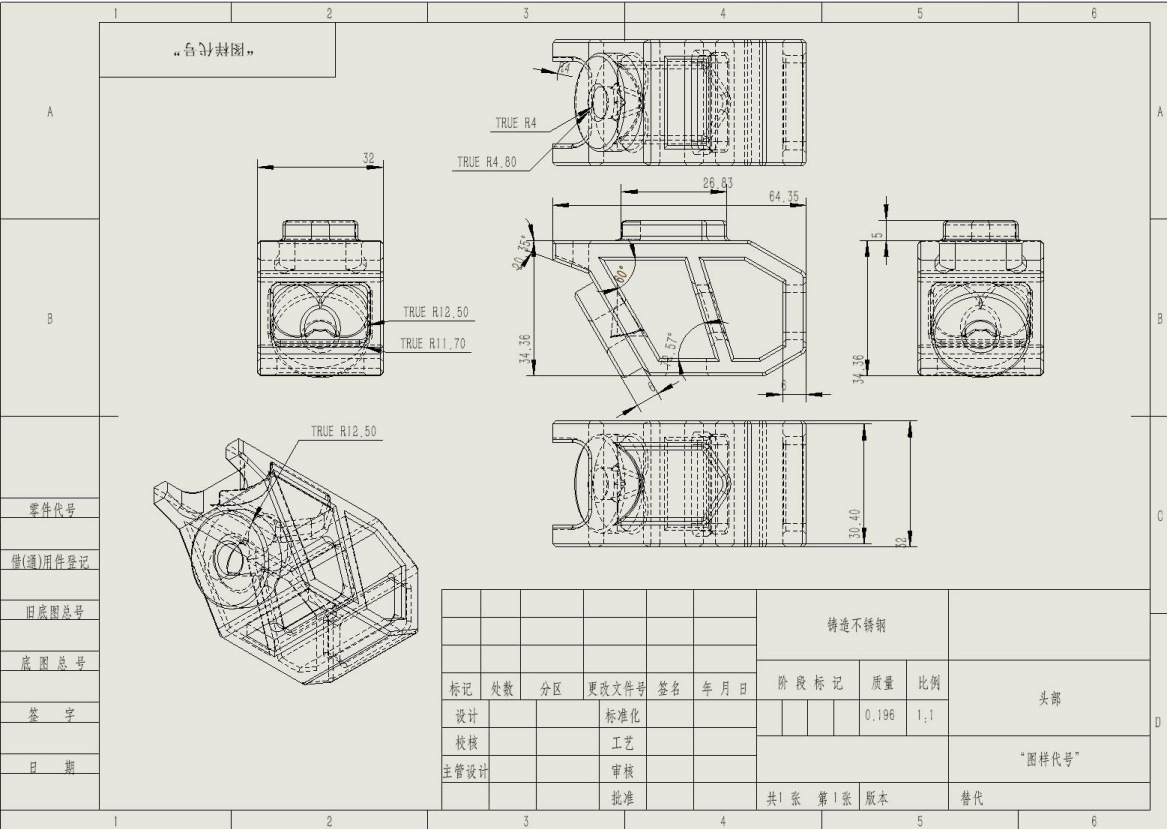
7 References (参考文献)

- [1]王鹏. 天然气长输管道缺陷修复技术综述以及典型实例应用[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2020, 40(07):160-167.
- [2]姜生元, 邓宗全, 李瑰贤. 三轴差速器及其在管道机器人驱动系统中的应用研究[J]. 中国机械工程, 2002, 13(10): 877-879.
- [3]Y. Menguc, M. Sitti.Compliant modular meshworm robot for autonomous navigation in confined spaces[J].IEEE Robotics and Automation Letters, vol. 1, no. 2, pp. 874-881, 2016.
- [4]H. Razavi, S. M. A. Rezazadeh, and M. Sitti.Design and Control of Robotic Softworms with Smart Actuation and Sensing[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, vol. 5, no. 4, pp. 4578-4585, 2020.
- [5]袁满, 高宏宇, 路敬祎, 杨丹迪, 侯轶轩. 油气管道泄漏检测技术综述[J]. 吉林大学学报(信息科学版), 2022, 40(02):159-173.

8 Appendix（附录）

8.1 A. Parts Drawings（零件图）





8.1 B. Assembly Drawing (装配图)

