

项目编号: _T020PRP40011_

上海交通大学

本科生研究计划 (PRP) 研究论文 (第 40 期)

论文题目: 基于磁悬浮齿轮的力感知-变刚度一体化关节设计

项目负责人: 陈根良 学院(系): 机械与动力工程学院

指导教师: 陈根良 学院(系): 机械与动力工程学院

参与学生: 顾恩霖

项目执行时间: 2021 年 9 月 至 2023 年 2 月

基于磁悬浮齿轮的力感知-变刚度一体化关节设计

摘要

与传统齿轮相比，磁悬浮齿轮虽然在精度上无法比较，但具有制造精度要求低、安静无磨损等特点；另外，通过控制两个磁悬浮齿轮之间的间距，可以改变这一啮合机构的刚度。在本项目中，通过控制间距，我们完成了可变刚度的磁悬浮齿轮的搭建。通过实验，发现用磁极之间斥力的性能要优于引力性能；另外，斥力驱动的齿轮结构，在 10 转/秒的转速下依旧可以持续传动，在变间距的时候也可以明显感受到刚度变化，验证了其作为关节机构的可行性；同时也通过跳齿实验发现这一机构对跳齿有阻碍、基本只会跳两到三齿，有传统齿轮所没有的优势。我们基于传统的啮合齿轮，以及面齿轮的构型，设计了两个版本的带有电机驱动器的关节，发现这一传统的齿轮模型很难做到高度集成化，难以作为一个机械臂关节大小的单元。

摆线针减速机是一种高效率、低噪声、高扭矩、高精度的减速机。这一可靠的传动机构经常用于机床、机器人、航空航天等领域。我们采用摆线针减速机的构型，设计并制造了一个基于同名磁极斥力的摆线针减速机，将其连接在电机上测试性能。我们选取了 10 到 60N·m 的输入，每隔 10N·m 做一次测试。结果表面，在恒定的输入力矩下，输出力矩的上下浮动均在 70%左右。虽然完全无法与工业减速机相比较，但整体效果而言可以实现传动，可以在这一版设计的基础上，加入可调间距的机构，可以进一步实现变刚度的设计。在未来，我们计划实现力感知-控制-变刚度的闭环，并用模仿人体抵抗外力的机械臂做测试。

关键词：磁悬浮；力感知；变刚度；齿轮；机械臂关节

Force Perception – Variable Stiffness Joint Design Based on Maglev Gears

ABSTRACT

Compared with conventional gears, maglev gears are quiet and wear-free, with low manufacturing precision requirements, though they are not comparable in terms of accuracy; in addition, the stiffness of this mechanism can be changed by controlling the distance between two maglev gears. In this project, by controlling the distance, we have completed the construction of a maglev gear with variable stiffness. The maglev-repulsion-driven gear structure can continue to drive at 10 rpm, and the change in stiffness can be obviously felt when distance is changed, which verifies its feasibility as an articulated mechanism; also, the teeth jump experiment shows that this mechanism has the advantage that traditional gears do not have: it has an obstacle to jumping teeth and basically only jumps two to three teeth. We designed two versions of the joint with motor actuator based on the traditional meshing gear and face gear configuration, and found that this traditional gear model is difficult to achieve a high degree of compactness as a robotic arm joint size unit.

The cycloid gearbox is a high efficiency, low noise, high torque and high precision gearbox. This reliable transmission mechanism is often used in machine tools, robotics, aerospace, and other fields. We designed and built a cycloidal needle reducer based on the eponymous magnetic pole repulsion using the cycloidal needle reducer configuration, and connected it to a motor to test its performance. We selected inputs from 10 to 60 N-m and did tests at 10 N-m intervals. The results surface that the output torque fluctuates up and down by about 70% for a constant input torque. Although it is not at all comparable to industrial speed reducers, the overall effect can be realized in terms of transmission, and the adjustable pitch mechanism can be added to this version of the design, which can further realize the design of variable stiffness. In the future, we plan to achieve a closed-loop force perception-control-variable stiffness and do tests with a robotic arm that mimics the human body's resistance to external forces.

Key words: Maglev; Force-perception; Variable Stiffness; gear trains; robotic joints;

目 录

第一章 绪论.....	1
1.1 磁悬浮齿轮概述.....	1
1.2 力感知-变刚度关节研究现状	1
1.3 摆线针减速机基本原理.....	2
第二章 磁悬浮齿轮的原理验证.....	3
2.1 磁悬浮齿轮的变刚度-力感知设计	3
2.2 磁悬浮齿轮模型效果.....	3
2.3 加入驱动关节设计及迭代.....	4
第三章 磁悬浮减速机设计与实验.....	6
3.1 磁悬浮减速机设计.....	6
3.2 磁悬浮减速机实验设计.....	7
3.3 磁悬浮减速机实验结果及讨论.....	8
第四章 结论与展望.....	11
4.1 项目总结	11
4.2 未来展望	11
参考文献.....	13
致谢	14

第一章 绪论

1.1 磁悬浮齿轮概述

磁铁是一种十分常见的材料，其具有高强度、高硬度等特点。由于磁性是一种十分特殊的性质，具有重大应用价值。在机械系统中，目前常见的应用包括磁悬浮、电磁阀等。

然而，磁铁的使用也存在一些局限性，包括磁力衰减、温度敏感性、氧化、磁场不稳定等问题。此外，磁铁也比较脆、抗冲击性能不佳。这一些都限制着磁铁在机械工程应用中的进一步发展。

磁悬浮齿轮，以及磁传动，是一个新颖的概念。利用磁力原理实现动力传导，与传统机械相比，具有一些独特的优点。如磁悬浮齿轮无需机械接触，无需润滑油，因此它可以有效帮助减少机械零件的磨损，无需定期维护可以降低维护成本。同时也不会产生铁屑对其它元件产生影响，这对于有特定需求的环境下十分实用。同时磁悬浮齿轮也避免了因接触而产生的噪声问题，适用于家用电器，医疗设备等需要低噪声的场景。

1.2 力感知-变刚度关节研究现状

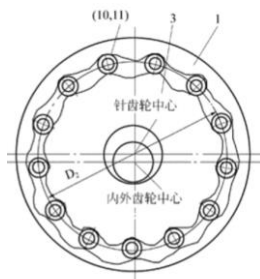
仿人体关节是仿生机器人中的一个重要组成部分，具有可变刚度和可感知力的特点。“串联弹性驱动器”这一概念最早由 MIT 提出^[1]，随着机器人技术的快速发展，仿人体关节作为机器人领域中的一个热点，得到了越来越广泛的关注。

一般的机械臂关节遵循如下设计：齿轮传动机构和电机可实现关节的驱动和控制，而弹簧和减震器可提高关节的稳定性和安全性^[2]。现代仿人体关节的过往研究，通常采用微控制器、传感器和信号处理器等技术，实现对关节位置、速度和力矩的控制和监测。此外人工神经网络和模糊逻辑控制等，也被应用于仿人体关节的控制和决策中，以提高其运动控制的精度和效率^[3]。

然而，受 MIT 原文献的影响，这些变刚度驱动器大多数都是由弹簧系统组装，而感知系统又往往涉及的过于复杂。而我们想要获得一种能实现力感知-变刚度的简洁方式，但目前学术界达到这一效果都是基于比较先进的材料科学技术^[4]。于是，我们想到了使用磁传动。

1.3 摆线针减速机基本原理

摆线针减速机是一种高效率、低噪声、高扭矩、高精度的减速机，其工作过程如下图所示^[5]：



当内部齿轮逆时针旋转时，摆线针沿着内部齿轮的齿廓线向左下方滚动，同时与外部齿轮的齿廓线相切。当内部齿轮继续旋转时，摆线针开始沿着外部齿轮的齿廓线向右上方滚动，同时与内部齿轮的齿廓线相切。如此往复摆动，就实现了从内部齿轮到外部齿轮的传动。

摆线针的轮廓线决定了减速机的传动比例。通常情况下，摆线针的轮廓线是一条摆线，即一种具有平滑转动特性的曲线。由于摆线针的轮廓线在整个传动过程中与内部齿轮和外部齿轮的齿廓线相切，因此可以保证摆线针在整个摆动过程中始终保持相对平稳的转速和扭矩输出。此外，摆线针的轮廓线具有自修复性，即在传动中由于外力作用而产生的轻微偏移可以通过摆线针自身的滚动摆动进行修复，从而保证了减速机的精度和可靠性。

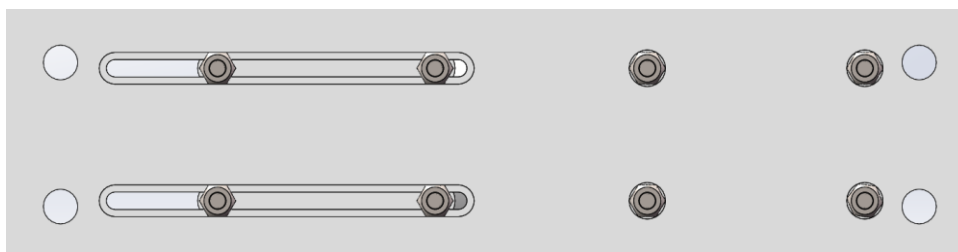
这一可靠的传动机构经常用于机床、机器人、航空航天等领域。

第二章 磁悬浮齿轮的原理验证

2.1 磁悬浮齿轮的变刚度-力感知设计

对于磁性齿轮，其作用力随着距离有所衰减——也即，通过控制两块磁性齿轮的间距，他们之间的阻力也是可以控制的。这体现在宏观的物理性质上就是，倘若对传统齿轮，这一轴间输入-输出传递的环节的刚度，就是齿轮材料的刚度（因为依靠弹力进行传动）；而对于两磁悬浮齿轮，齿轮之间的间隙可以调节了，传动过程中这一环节的刚度也可以调节了。

具体设计，可以通过一个滑轨，如下图所示：



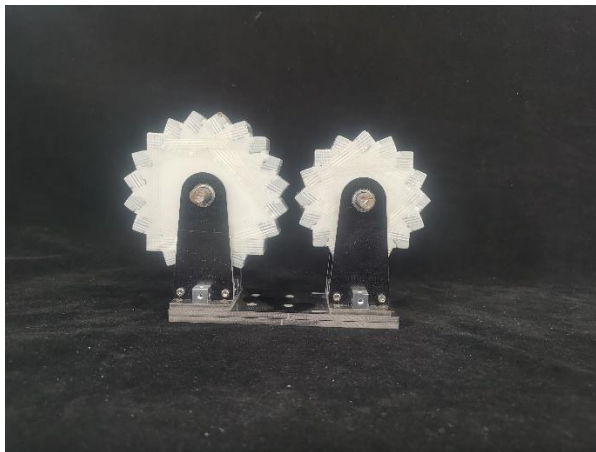
将一个齿轮固定，另一个可沿着滑槽滑动，即可控制间距、改变关节刚度。

而对于力感知，可以使用两个编码器分别读取两个齿轮的转动角度。对两个编码器读取角度进行差分，所得的结果这与作用在拉杆上的作用力是正相关的，但是其相互关系的建模与计算较为复杂，我们计划通过实验得取大量数据，从而通过神经网络实现力与角度之间的关系。为此，在项目过程中，另一个同学也对神经网络进行了一定的学习，虽目前尚未对二者关系进行建模，但是已经找到了一些别的数据利用 `matlab` 实现了简单的神经网络的映射，跑通了整个方法。因而之后只需要通过大量的实验积攒数据就可以完成网络的搭建。由此得到力之后，我们可以根据需求控制电机转速与力的关系，实现变刚度的想法，进而实现力感知-变刚度一体设计。

由于磁悬浮的不确定性，决定先简单制作第一版实物进行可行性分析，通过实物的演示发现磁悬浮齿轮传动可能存在的问题以及限制，从而更好地设计之后的实验。

2.2 磁悬浮齿轮模型效果

第一代样机如下：



初次实验中，由于我们最开始认为磁铁间的斥力会造成偏心等问题，吸引力更为可靠，更利于装配，故采用引力进行传动。但实际做出来时，引力会导致齿与齿之间容易互相吸住：一旦出现受力不平衡，近处的引力增大、远处的引力减小会让这一吸引过程变得无可挽回；又由于磁铁很脆，容易打坏；而且一旦飞出或压到手指的情况，有伤害他人的可能性。

因此，我们重新改回了使用斥力进行传动。为了防止斥力造成的偏心（斥力造成的偏心与引力造成的失稳一样，是一个一旦发生变越来越不可逆的过程），我们加固了两端支撑板，并使用高精度的齿轮-轴-轴承结构代替了精度不高的打印件结构。

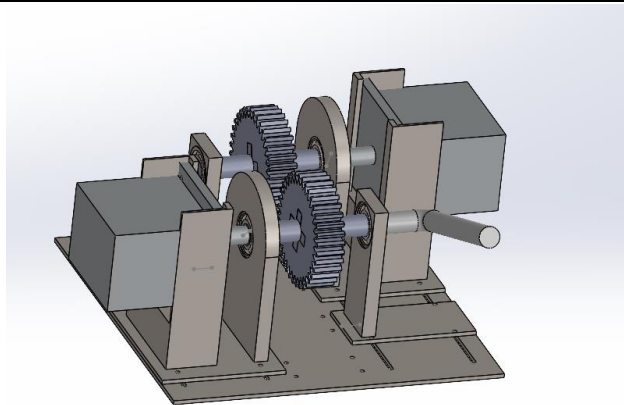
最终的实验效果比较理想，这一斥力驱动的齿轮结构，在 10 转/秒的转速下依旧可以持续传动。在变间距的时候也可以明显感受到刚度变化。

我们对这一结构进行了跳齿测试：将一个齿轮固定，用手去拨动另外一个齿轮。随着手拨动的力量逐渐增加，会出现跳齿的情况，即磁铁所提供的磁力不够。结果表明，斥力本身会在跳齿发生后抵抗下一个齿轮的跳动，在跳过两到三齿之后便会摇摆着停下。传统齿轮的跳齿虽然大多数情况下只会跳一次，但严重损害齿轮的性能。可见，磁悬浮齿轮在这一方面相较传统齿轮，有很大优势。

2.3 加入驱动关节设计及迭代

原理验证完毕后，我们便考虑加入电机驱动，验证是否可以一次设计一个机械臂关节。

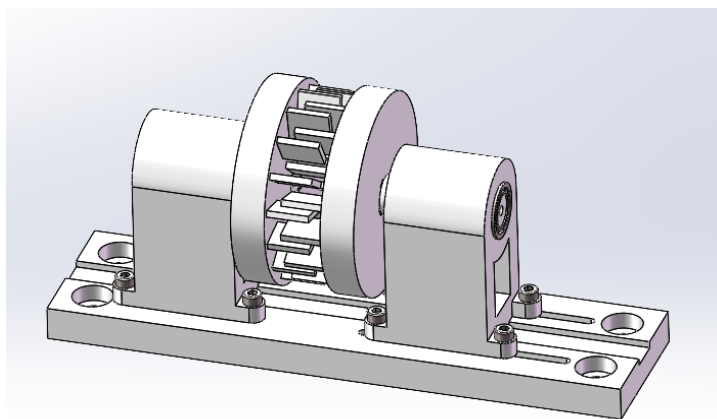
第一版设计如图所示：两个相互靠近的齿轮结构，一个齿轮连接电机与编码器，通过电机控制齿轮的转动。另一个齿轮连接编码器，读取齿轮的转速。将齿轮固定在底座上，并且底座可以改变齿轮间距离。



齿轮间的距离可以得到控制，电机轴以及编码器轴不会承受轴向以外的力。也可以实现拉动拉杆，使得对应的齿轮转动，对应的编码器可以读取齿轮转动的，改变控制齿轮的电机转速，从而实现变刚度的关节设计。

但经过讨论，我们认为，结构整体体积过大，本项目的期望是可以将这一设计应用于机械臂等设备，因为变刚度的设计对于机械臂的交互而言是一个非常不错的特性。但是该设计体积过于庞大不紧凑，没有利用好磁悬浮齿轮传动的特点，其投入实际使用的可能性非常低，因而我们尝试继续迭代，合理利用磁悬浮齿轮传动的特点，对整体体积进行一定的优化。

下一次改进时，我们采用的面齿轮的概念，改变了齿轮间的传动方式与摆放方法。大大缩小了装置所需的体积，也更为美观。同时，这一结构也可以实现间距的控制。相对我们前一版的设计有了较大的进步，实用性大大增强。但是它的体积依旧较大，还是无法应用于大部分的设备当中。



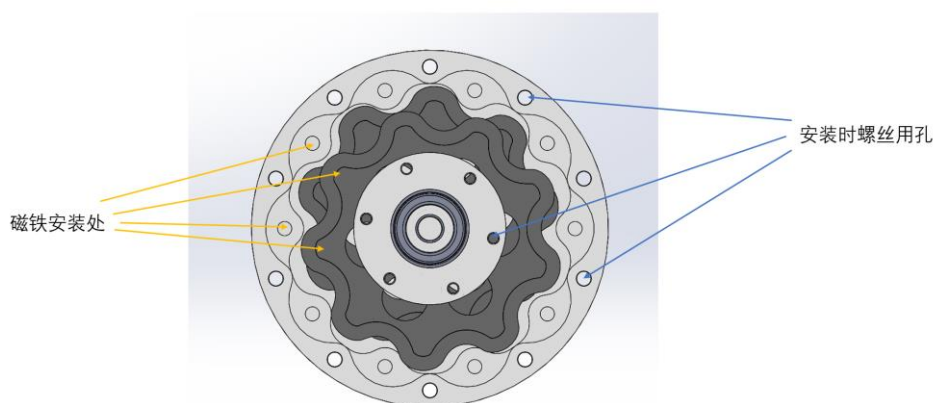
然而这种改进对于体积的改进，我们仍不满意。所以我们决定更换思路，用尺寸减小的同时力会相应减小，但为了达到原效果，采用多级、高度集成的设计：摆线针式减速机。

第三章 磁悬浮减速机设计与实验

3.1 磁悬浮减速机设计

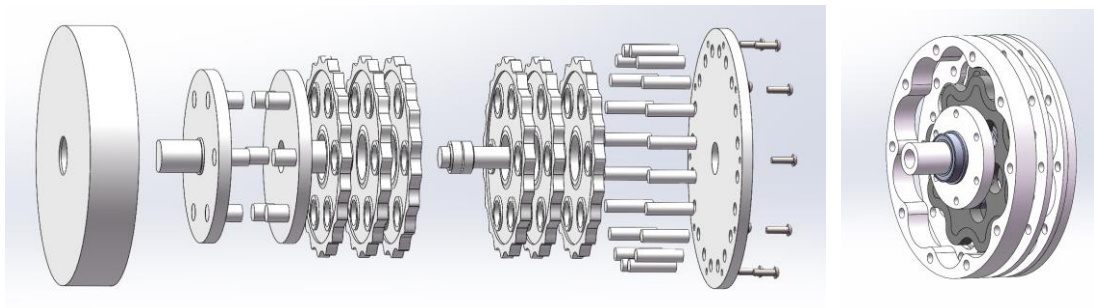
此前两版两版的设计，无效体积仍然很大。为了进一步集成化、减小无效体积，我们将目光放在了摆线针减速机上。由于其经常被用于机械人关节处、且高度集成化，我们决定用摆线针减速机进行改进。

由于摆线针齿轮高度集成化的特点，狭小体积内部布置多块磁铁，会不会导致干涉、或者互相之间吸引排斥，引入很大内应力，或是无法传递较大扭矩等问题。所以，仿照着摆线针减速机的设计，我们设计了基于磁悬浮齿轮的摆线针减速机，进行原理验证：



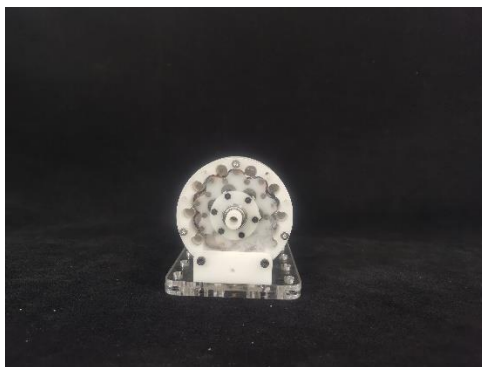
如上图所示：摆线轮外侧齿廓曲线、内侧柱销孔具有磁性，同时，均匀布置于外壳和输出轴上的针齿和柱销也具有磁性；而且摆线轮外侧齿廓曲线与针齿在啮合处极性相同，存在一定间隙；摆线轮内侧柱销孔与柱销在啮合处极性也相同，存在一定的间隙。由于之前已经验证过，互相咬合的齿使用斥力的性能更好，故这一版直接使用斥力作为传动力，实现摆线针轮减速器中摆线轮外廓线与针齿、摆线轮柱销孔与柱销之间的无接触啮合传动。磁铁卡进黄箭头所指的位置：一块磁铁固定于外部的内齿轮（基座）上，一块磁铁固定于动齿轮上。

整机的侧视与爆炸图为：



3.2 磁悬浮减速机实验设计

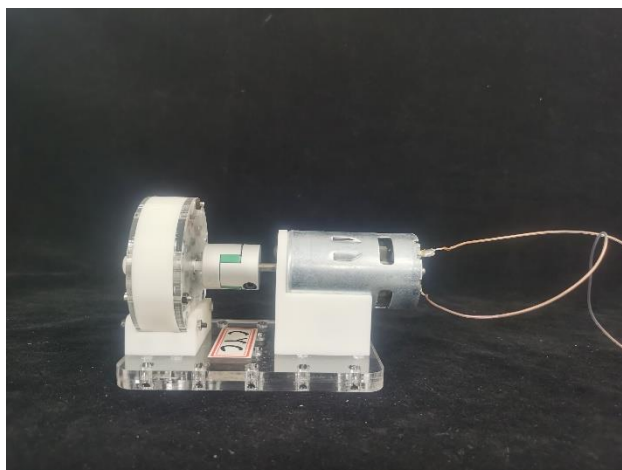
实物搭建完成后，如下图所示：



为了验证样机的效果，我们设计了如下实验：使用电机驱动减速器，进行固定扭矩的输入，利用力传感器测试输出端的输出力矩对时间的相应。我们也同时获取了电机电流数据作为辅助，可以一定程度上反映减速机系统对于输入端的反馈。

为了获取较为全面的减速机性能，我们对 10 到 $60\text{N} \cdot \text{m}$ 的输入，每隔 $10\text{N} \cdot \text{m}$ 做一次测试；实验设备采样频率 2kHz ，分辨率 0.002 ，取 1 秒作为分析依据。

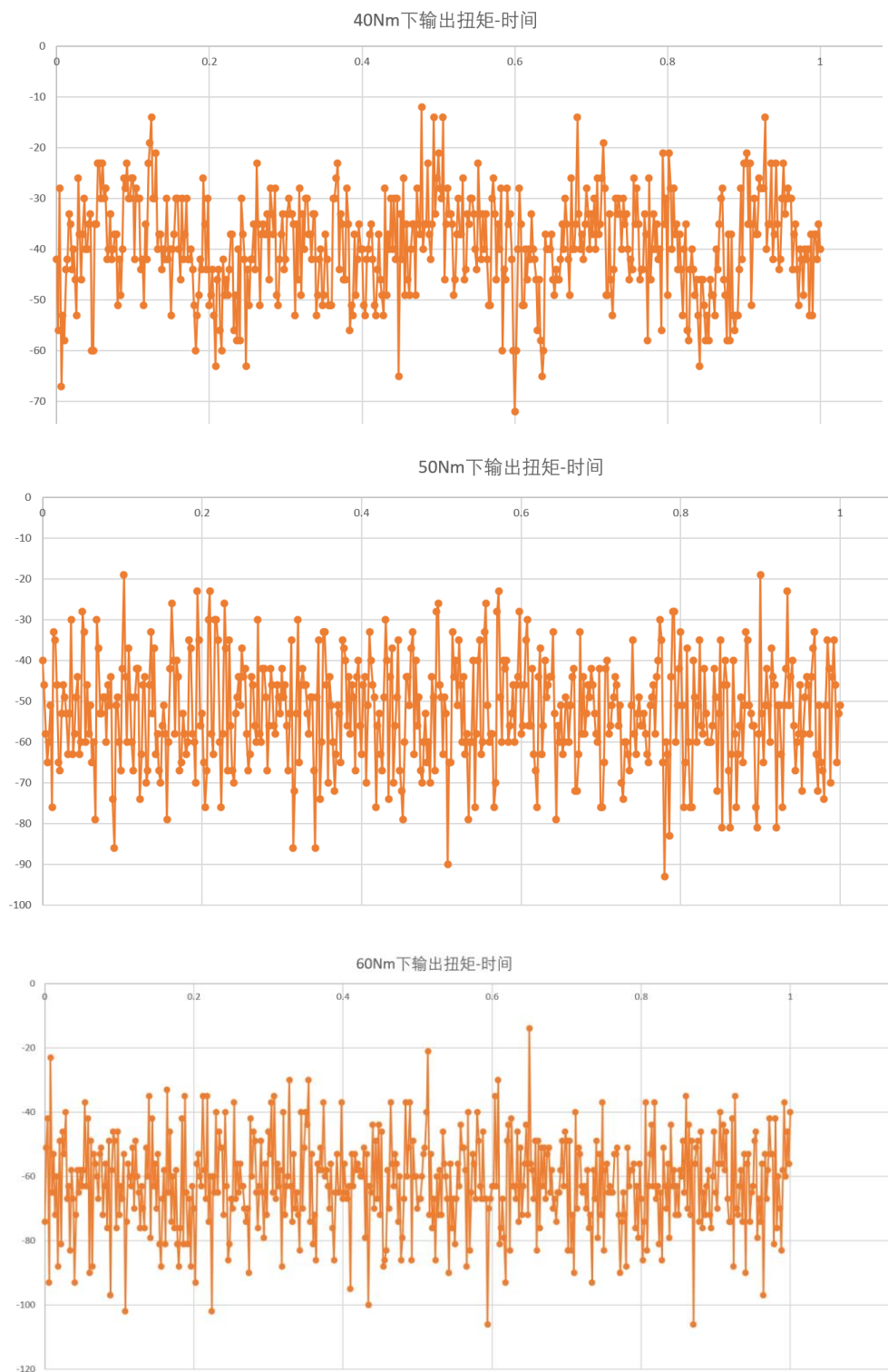
具体使用设备如图所示：



3.3 磁悬浮减速机实验结果及讨论

对不同的输入扭矩，每一实验的输出扭矩-时间结果如下：





结合六次实验结果可以看出：

在恒定的输入力矩下，输出力矩的浮动比较大，上限可以达到自己的 170%，下限可以达到自己的 40%，总体浮动在 70%。就这一点而言，性能比传统工业使用的摆线针减速机要相差不少。

总体来看，输出力矩的平均值仍在输入力矩的大小，整体效果而言可以实现

传动。这和我们实验时的直观感受相符，我们认为作为一个机械臂关节，其紧凑程度、输出力矩上已经足够。

造成一现象的主要是由于使用了磁悬浮的传动方式，输出-输入在一开始便有一个迟滞，到稳定时必然会遗留一定的振动，导致与工业上的性能相差很多。但与使用传统的接触式摆线针轮减速器相比，基于磁悬浮的摆线针减速机对加工精度要求低、传动部件摩擦磨损小、传动间隙调节可减轻冲击载荷。

为了减小误差，可以采取重新思考磁铁的安装，装配过程中尽可能将每一块磁铁的相对位置变得统一等方式。同时，因为已经验证了其可以作为机械臂关节，故可以在这一版设计的基础上，加入可调间距的机构，可以进一步实现变刚度的设计。

第四章 结论与展望

4.1 项目总结

在本项目中，基于磁悬浮齿轮的变刚度概念，我们完成了可变刚度的磁悬浮齿轮的搭建。通过实验，发现用磁极之间斥力的性能要优于引力性能；另外，斥力驱动的齿轮结构，在 10 转/秒的转速下依旧可以持续传动，在变间距的时候也可以明显感受到刚度变化，验证了其作为关节机构的可行性；同时也通过跳齿实验发现这一机构对跳齿有阻碍、基本只会跳两到三齿，有传统齿轮所没有的优势；

随后我们又基于这一齿轮的构型设计了带有电机驱动器的关节，一版为传统的啮合齿轮、一版为面齿轮啮合，发现，这一传统的齿轮模型很难做到高度集成、作为一个机械臂关节大小的单元。

因此，我们转而采用摆线针减速机的构型。我们设计并制造了一个基于同名磁极斥力的摆线针减速机，将其连接在电机上测试其作为机械臂关节的性能。我们选取了 10 到 60N·m 的输入，每隔 10N·m 做一次测试；实验设备采样频率 2kHz，分辨率 0.002，取 1 秒作为分析依据。结果在恒定的输入力矩下，输出力矩的浮动比较大，上限可以达到自己的 170%，下限可以达到自己的 40%，总体浮动在 70%。虽然完全无法与工业减速机相比较，但整体效果而言可以实现传动，可以在这一版设计的基础上，加入可调间距的机构，可以进一步实现变刚度的设计。

4.2 未来展望

我们期望进一步完善这一项目，具体在如下方面：

- 1、在磁悬浮减速机的两端加上编码器，先通过静态实验进行标定，随后在动态实验中验证其效果，实现“力感知”这一功能；
- 2、将力感知与关节放入一个倒立摆系统，实现“力感知-控制”的闭环；
- 3、在磁悬浮摆线针减速机的一个或多个齿轮上设计变间距机构，实现可控的“变刚度”；
- 4、将以上工作结合到一起，制作出一个可变刚度的机械臂关节，并用抵抗外力来展示“力感知-控制-变刚度”的闭环；

参考文献

- [1] Pratt G A, Williamson M M. Series elastic actuators[C]//Proceedings 1995 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Human Robot Interaction and Cooperative Robots. IEEE, 1995, 1: 399-406.
- [2] Lee C, Kwak S, Kwak J, et al. Generalization of series elastic actuator configurations and dynamic behavior comparison[C]//Actuators. MDPI, 2017, 6(3): 26.
- [3] Mirvakili S M, Hunter I W. Artificial muscles: Mechanisms, applications, and challenges[J]. Advanced Materials, 2018, 30(6): 1704407.
- [4] McEvoy M A, Correll N. Materials that couple sensing, actuation, computation, and communication[J]. Science, 2015, 347(6228): 1261689.
- [5] 高兴岐, 摆线轮齿形的 CAD 设计[J].鞍山钢铁学院学报,1987(03), 81-90.
- [6] 钟永先, 一种摆线针轮或少齿差式差动减速装置以及减速机, CN, A, CN112762147A, filed Mar 07, 2021, and issued May 07, 2021.
- [7] 李伟达, 李轩, 径向磁力传动双联减速, CN, U, CN209925525U[P], filed Apr 29, 2019, and issued Jan 10, 2020..
- [8] 胡茂弘, 姚贵福. 少齿差摆线针轮行星传动[J]. 辽宁机械, 1980(03), 1-7.

致谢

非常感谢本项目的指导老师陈根良老师，在项目进行过程中对我们关怀备至，经常给我们一些启发性的点子，定期跟进我们的进度并给与建议；项目之外也非常关注我们的学业与规划、并给了我们非常多很宝贵的建议，对我的科研经历与本科学习有着深远的影响。

感谢柴宇宸师兄这一年多来帮助我们两个更好地完成 PRP 项目。柴师兄在机械设计、实验规划等方面很有造诣，给了我们很多很有用的指导。也很感谢龙泳舟师兄、刘嘉乐师兄、严威师兄、罗俊杰师兄、刘瑞睿师兄、唐术杰师兄等同组的师兄，都对我们 PRP 项目给出过很有参考价值的意见与建议、帮助我们完成一些对本科生来说比较困难的工作。因为有师兄们在，我们的能力获得了很大的提升。

我也很感激我同组的同学夏乾骏。他和我一起学习相关知识、一起搭建样机，在我有疑问的时候愿意和我一起探讨、一起研究。平时也经常与我一起学习、一起聊天，让我每一天都过得很快乐。

感谢身边的家人与朋友在我项目进行时对我的关怀。