
上海交通大学

SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY

学士学位论文

BACHELOR'S THESIS



论文题目：机电一体机器人关节模块的开发

学生姓名：吕石磊

学生学号：5130209122

专 业：机械工程

指导教师：曹其新

学院(系)：机械与动力工程学院

机电一体化机器人关节模块的开发

摘要

伴随着中国经济转型和制造业工业变革浪潮推进,我国机器人销量连续四年世界第一,尽管各级政府、研究部门和相关企业发展机器人产业放置首位。因受国外机器人的核心技术垄断,自主品牌机器人销量只占总销量的 8%。为了能够突破国外品牌垄断,进行变道超车,打破传统市场上的机器人大多采用固定形式的机械结构,各成体系的控制系统,以及互不通用不开放现状。机器人模块化设计,即用标准集成关节的不同组合,构建各种种类的机器人的研究思路已经被越来越多用户认同。

本文以基于 ROS 驱控一体化机器人关节组件研究目标,针对紧凑型、轻量化机电一体化机器人关节模块进行了系统研究和实践。设计一种集机械结构、控制、驱动及通信于一体的模块化机器人关节单元,主要内容如下:

1. 在分析了国内外模块化机器人关节技术现状基础上,提出了关节模块采用中心孔走线的方式避免由于机器人手臂工作环境以及手臂运动造成导线损坏,电机驱动、谐波减速、绝对码盘定位、温升测量、姿态和加速度感知采用一体化设计方案;
2. 对紧凑型的机电一体化机器人关节模块结构强度进行了有限元理论分析和优化,在关节间连杆设计上采用平行轴或垂直轴的结构,在保证构型多元化的前提下降低连杆的加工经费,避免使用过于复杂且加工难度高的连杆设计;
3. 根据两款直流无刷伺服电机分别设计了中空和半中空机器人关节模块,每个关节单元含有独立的控制,驱动和通信系统,可完成一个自由度的回转运动,独特的机械结构设计实现电机驱动和运动控制一体化。
4. 设计了基于霍尔传感的绝对码盘,提高可靠性减少的关节的整体体积,创新地在关节模块中加入温度传感器和陀螺加速度传感器提升的关节智能性和可靠性。
5. 本文的最后,对于单关节模块的各项技术指标进行了实验验证,实验结果表明,本文设计的模块化关节满足各项设计指标。

关键词: 机电一体化; 机器人关节模块; 伺服控制

THE DEVELOPMENT OF MECHANICAL AND ELECTRONIC ROBOT JOINT MODULES

ABSTRACT

With China's economic restructuring and manufacturing industry changes, China's robot sales maintain the top position in the world and it has held for four consecutive years. Although all levels of government, research departments and related enterprises place the development of the robot industry first, China's own brand of robot sales accounted for only 8% of total sales due to the core technology of foreign robots monopoly,. In order to break through the foreign brand monopoly, in order to change the road overtaking, in order to break the traditional market robots most of the use of fixed form of mechanical structure, in order to change the individual control system, robot modular design has been more and more users agree.

In this paper, targeting the drive and control integrated modular joint component based on ROS, the system research and practice of the compact and lightweight electromechanical integrated robot joint module are carried out. We plan to design a set of mechanical structure, control, drive and communication in one of the modular robot joint unit, the main contents are as follows:

1. Based on the analysis of the status quo of modular robot joint technology in China and abroad, this paper puts forward that the joint module adopts the way of the center hole to avoid the damage of the wire due to the working environment of the robot arm and the arm movement. The motor drive, the harmonic deceleration, the absolute disc positioning, temperature measurement, attitude and acceleration perception adopt an integrated design;

2. The finite element theory analysis and optimization of the structural strength of the compact man-machine integrated robot joint module are carried out. The structure of the joint shaft is designed with the parallel shaft or vertical axis. And we avoid the use of too complex and difficult processing of high connecting rod design. The structure of the connecting rod is reduced to reduce the processing funds under the premise of ensuring the diversification of the configuration;

3. According to two DC brushless servo motor, there are two types of robot joint module a hollow one and a semi-hollow one. The modularized joint has independent driving, control and communication system. It can rotate with a single freedom of motion. Its unique mechanical structure guarantees integration motor driving and control.

4. Designed the absolute encoder based on Hall sensor to improve the overall volume of the joint with reduced reliability, and innovatively add the joint intelligence and reliability of the joint

between the temperature sensor and the gyro accelerometer in the joint module.

5. At the end of this paper, the technical indexes of the single joint module are verified experimentally. The experimental results show that the modular joints designed in this paper can meet the design indexes.

Key words: mechanical and electrical integration, robot joint module, servo control

目 录

第一章 绪论.....	1
1.1 课题研究的背景和意义.....	1
1.2 驱控一体关节发展概述.....	1
1.2.1 国外驱控一体关节发展概述.....	1
1.2.2 国内驱控一体关节发展概述.....	3
1.3 驱控一体关节研究现状.....	4
1.4 本课题研究内容.....	5
第二章 机械结构设计.....	6
2.1 引言.....	6
2.2 一体化关节设计基本要求.....	6
2.3 关节半中空设计.....	7
2.3.1 基本元件选型.....	7
2.3.2 结构设计.....	8
2.3.3 关节主要参数计算.....	11
2.3.4 典型零件的有限元分析.....	12
2.4 关节中空设计.....	13
2.4.1 基本元件选型.....	13
2.4.2 结构设计.....	15
2.4.3 关节主要参数计算.....	17
2.4.4 典型零件的有限元分析.....	17
2.5 本章小结.....	18
第三章 机械连接与构型设计.....	20
3.1 引言.....	20
3.2 连接组件设计.....	20
3.2.1 设计要求分析.....	20
3.2.2 直连杆设计.....	21
3.2.3 角连杆设计.....	22
3.3 连接组件的有限元分析.....	23
3.3.1 建立有限元分析模型.....	24
3.3.2 仿真结果分析.....	25
3.4 一体化关节机器人构型设计.....	27
3.5 一体化关节机器人选型与工作空间分析.....	29
3.5.1 六自由度机械臂型一体化关节机器人.....	29
3.5.2 四自由度机械臂型一体化关节机器人.....	31
3.6 本章小结.....	33
第四章 驱控一体关节驱控系统硬件设计.....	34
4.1 引言.....	34
4.2 模块设计与选型.....	34
4.2.1 控制模块设计.....	34



4.2.2 驱动模块设计.....	35
4.2.3 通讯模块设计.....	35
4.2.4 传感模块设计.....	36
4.2.5 电源模块设计.....	37
4.2.6 其它模块设计.....	37
4.3 PCB 设计与加工.....	38
4.4 硬件功能测试.....	40
4.5 本章小结.....	41
第五章 关节负载测试.....	42
5.1 单关节负载测试.....	42
5.2 多关节运动测试.....	44
第六章 总结.....	45
参考文献.....	46
附录.....	49
谢辞.....	69

第一章 绪论

1.1 课题研究的背景和意义

机器人在日常的生产生活中得到更广泛的应用。面对不同的应用环境,对机器人的构型、工作空间、自由度等属性提出了更为复杂的要求^[1-3]。目前市场上售卖的传统机械臂受限于综合成本、市场需求、批量化等限制,常常不利于用户根据自身应用场景自定义机器人。为此,机器人标准一体化关节的概念应运而生^[3]。采用一体化关节自由组合的方式,不仅可以缩短机器人的开发周期,还可适应各类特殊任务,同时降低了采购商业机器人的成本。

关节组件是关节型机器人的关键部件,是其运动机构的最小单元。单关节的结构一体化是指机械传动结构、驱控模块、传感通讯等组件融合于同一结构中,实现关节设计的模块化。

传统的机械臂设计每次都需要进行全新的设计,设计耗时费力,研发成本高,开发周期长,结构一体化使得用户在进行机械臂的设计不需要从头开始设计,只需要根据实际的具体要求,选择所需要的模块进行简单的拼装即可完成机械臂的设计,结构一体化满足了用户自定义的需求。

结构一体化的模块化特点也减少了机械臂生产和维护的成本,厂家不再需要生产结构各异的机械臂,而只是需要生产一系列模块化的关节,降低了生产难度,同时用户再维修时也只需要更换坏掉的模块即可,降低了维护的成本。

单关节的驱控一体化是指将单关节驱动模块和控制模块集成在同一块关节驱控电路板上,以便于单个关节的闭环控制与各个关节之间的相互协作。也就是说,关节所需实现的功能都可以由该驱控电路板提供,而控制关节所需的信息也可以通过该驱控电路得到。

驱控一体化的可使关节的体积大幅减小。由于驱动模块和控制模块集成在同一块电路板上,所以几乎所有接线都在关节内部。而内部走线,无论是在体积、复杂程度还是效率方面,都优于外部走线。驱控一体化还能在每个关节内部实现闭环控制,减少通讯量,提升控制效率与精度。例如关节转速、电机电流等信息都可以由驱控电路得到,反馈回路在关节内部完成,信息更为准确。而板内信息交换的速度要远大于板间信息通讯的速度,实时性更强,单次控制的时间周期得以减小。这样每个关节都能独立运作,实现模块化。最后,驱控一体化还强化了关节的可编程性,增加了关节的通用性,更利于后续功能的增加,如运动轨迹规划、机器视觉等。

1.2 驱控一体关节发展概述

1.2.1 国外驱控一体关节发展概述

德国雄克公司的 PowerCube 模块化关节^[4]将驱动电机、控制器、传感器和通信电路等集成在标准模块中,如下图 1-1 所示。



图 1-1 德国雄克公司的一体化关节

德国 IGUS 公司的 robolink 系列模块化关节^[5]可以像人体肘部一样进行摆动和转动，且有线驱动。该公司为用户提供 7 种关节。利用这 7 种关节用户可以进行大量的组合，组成的机械臂摆动角度灵活可变，关节外形如下图 1-2 所示。



图 1-2 德国 Igus 公司的一体化关节

DLR 是德国宇航中心专门为空间灵活操作而设计的机械臂^[6]，它采用完全模块化的设计思想。关节的机械结构剖视图如图 1-3 所示。

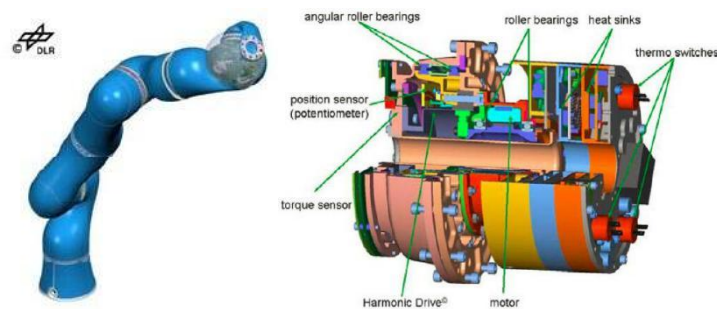


图 1-3 德国宇航中心 DLR 机械臂及关节

加拿大 Kinova 公司设计的三款不同输出的关节^[7]，分别为 K75、K75+、K58，其特征在于快速机械接插，能感应力矩、速度、位置等多类数据，使用 RS485 总线通讯。尤其重要的是，Kinova 开发的关节面向 ROS，有相应的 ROS 驱动可供用户使用，便于高级开发用户重点着力于控制和规划算法的研发中。



图 1-4 Kinova 一体化关节性能特征

1.2.2 国内驱控一体关节发展概述

中国智能空间机器人系统也采用了完全模块化的概念还进行可重构机器人的设计^[8]。一些结构性产品制造采用了钛合金来匹配的热膨胀轴承,同时做到了最小化质量,关节的结构如下图 1-5 所示。

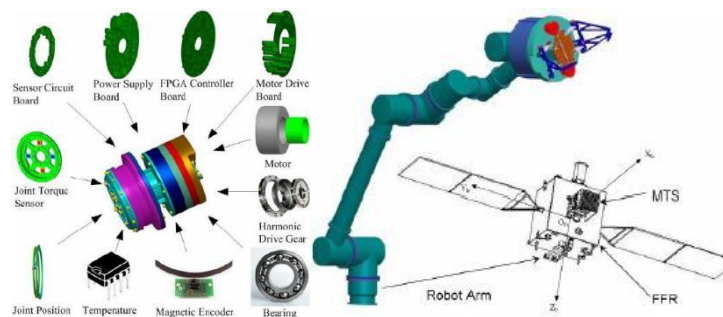


图 1-5 中国智能空间机器人系统机械臂及关节

下图 1-6 即哈尔滨工业大学开发的关节组成的机器人^[9-10]。采用分布式控制策略,以 RS485 为总线通讯协议,沟通于上位机与各个关节之间。上位机主要完成整个机械臂的任务分析和路径规划,单关节内也有相应的控制器可以对关节电机进行运动控制,从而达到多关节协调合作的方式。



图 1-6 哈尔滨工业大学开发的可重构机械臂

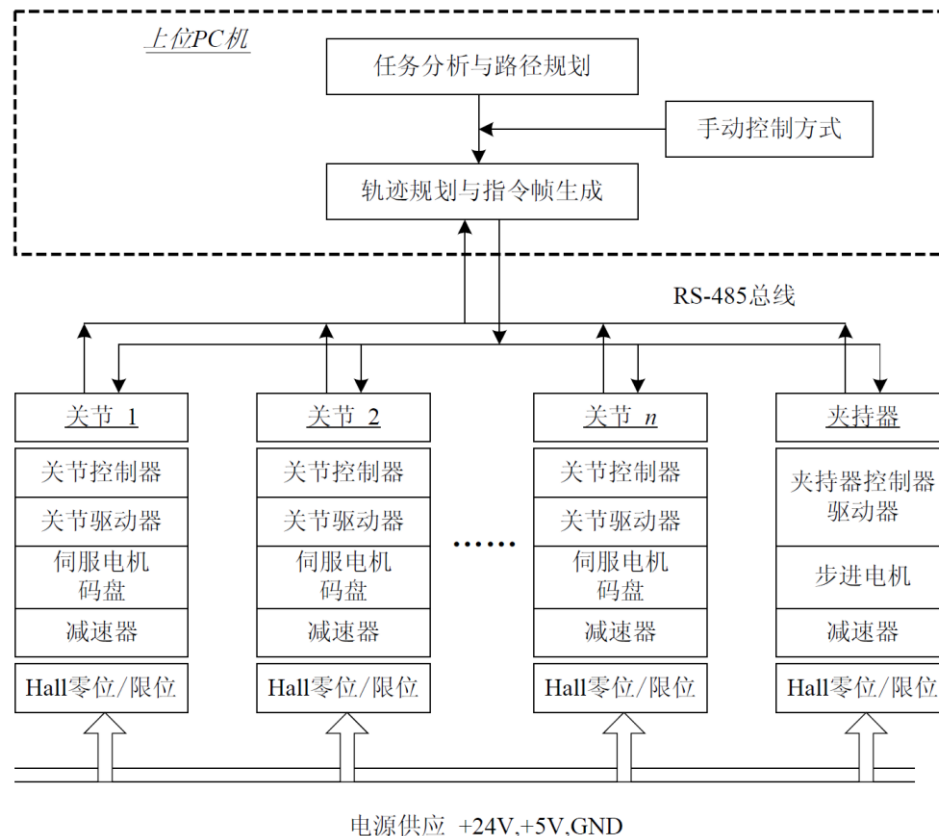


图 1-7 哈尔滨工业大学开发的可重构机器人控制系统组成框图

1.3 驱控一体关节研究现状

驱控一体关节的研究由来已久，可研究的内容也很多，涵盖了机械、电子、软件多个方面^[11-12]。尤其是随着机器人在人们生产生活中的应用不断扩大，驱控一体关节的研究也随之被越做越深。总结起来，已有的研究可以归纳为以下几点。

（1）驱控一体关节的结构设计

关节结构作为影响关节使用性能最显著的一环，首当其冲地被研究者视为重点研究对象。结构设计的不断迭代与优化主要围绕关节的轻量化、紧凑布局、快速连接三个方面^[13-17]。从关节整体结构来看，不同研究者设计出的关节主要区别就在于其面向的任务不同。因此设计出的驱控一体关节形状各异，机械输出参数的差异性也很大。就结构内部细节来看，目前研究的驱控一体关节使用功率密度更高的电机，从而达到减轻重量、缩小体积的目的。关节内关键元件如电机、减速器、制动器、编码器、驱动器等，也在不停地压缩空间。另外还同时兼顾到关节间的机械连接和电气连接，不仅是让关节与关节更快连接，还能满足牢固和稳定的连接。这些零配件小型化和轻量化的设计正是为了满足关节整体结构往紧凑轻量的方向发展。

（2）驱控一体关节的构型设计

在自主设计的关节基础上，很多学者研究如何利用有限的关节结构来搭建更多元的机器人构型^[18-20]，使用的方法如遗传算法、神经网络、迭代算法等等。而设计出这些特异的构型也是为了利用该构型下的运动学模型，实现关节在指定工作空间内以自定义方式完成需求的任务。关节自身也对应不同的结构需求设计了单旋转关节、双垂直旋转关节和平动关节，关节间连杆设计了平行轴连杆、垂直轴连杆、异型传动角度连杆等。通过这些关节和连杆的自定义连接，可以满足不同应用场合的需求。为此，关节设计时对于未来多元化连

接和搭建的可能也要予以考虑并且预留相应的安装位置。

（3）驱控一体关节的驱控系统的设计

关节组件内使用到的技术也因实际应用情况而不断变化。前人对于驱控系统研究的主要着眼点大多集中在关节内部信号反馈、分布式控制、适应性控制方法等^[22-28]。有学者在关节内同时集成驱动和控制模块，让单关节可以控制自身的运动，上位机完成机械臂总的控制和规划等复杂高级算法后，根据时序相应地地下发单关节的控制指令，最后可以实现整个机器人的运动控制。也有从传感器信号角度考虑的，比如在关节内加上力矩测量的传感器，既可以从根本满足力矩控制研究的硬件需求，又可以降低开发成本。

1.4 本课题研究内容

本课题主要研究以下内容：

（1）驱控一体关节组件与结构设计

面向服务行业对于协作机器人关节的需求，确定本课题计划开发的关节组件的详细功能需求，制定合理的系统架构和各部分细节设计要求。

机械结构设计重点就在于减轻关节质量，压缩关节体积，提高输出扭矩。为此，使用大减速比的谐波减速器，保证关节的传动精度和高扭矩输出。

关节间连接首先要在关节上设置多种接口，利用关节的各个连接面，让用户可以更自主地选择需要使用的连接面。其次是在关节间连杆设计上采用平行轴或垂直轴的结构，在保证构型多元化的前提下降低连杆的加工经费，避免使用过于复杂且加工难度高的连杆设计。

（2）驱控一体关节驱控系统的设计

对应结构采用的直流无刷电机。利用安装在结构中的增量式相对编码器，实现高精度速度和位置控制。在基本的运动控制基础上，将关节内的各类传感器数据采集处理，与控制指令整合起来，通过总线式的通讯系统传递于上下位机之间。针对不同的应用要求，同时设计 CAN 和 EtherCAT 两种通讯总线模式，满足高速通信的需求。

第二章 机械结构设计

2.1 引言

随着现代社会的发展，人们的需求不断增加，服务业的增长也越来越迅速，服务业的成本也在逐渐提升，引入服务型机器人就成为了一种必然的趋势。与传统机械臂技术相比，一体化关节具有轻量化、结构紧凑、扭矩大等优点，同时使得服务型机器人的机械臂不需要重新设计，只需要选择合适的一体化关节进行拼装，缩短了研发周期，进一步降低了成本，然而，这也对一体化关节的设计提出了诸多要求^[29-33]。

本文在对传统机械臂关节的研究之上，结合当前一体化关节的实际使用需求，得出了一体化关节设计的基本要求，并且根据这个要求进行了基本元件选型，最终设计出来两款一体化关节结构。

2.2 一体化关节设计基本要求

由于我们希望设计一款通用的一体化关节，用户可以将我们的一体化关节应用于各种场景之中，因此我们的一体化关节结构需要为用户提供多种连接方案，同时结构需要尽可能紧凑，降低重量，实现轻量化设计，并且具有大扭矩，使得用户可以方便地将我们的一体化关节应用于他们自身的设计之中。

由于使用一体化关节的用户对于相关的专业知识并不是十分了解，因此我们希望将一体化关节做成一个黑箱，用户不需要了解我们关节的内部结构，只需要利用我们提供的一些接口就可以使用我们的关节。

此外，由于我们一体化关节在使用中需要与人进行接触，因此一体化关节的设计除应满足基本的机械臂关节规范与标准外，还应注意安全性问题。

根据上述分析，一体化关节在设计中除了满足基本的机械臂设计条件外，还应符合以下设计要求，具体的技术指标如下表 2-1 所示：

1. 外形尺寸以人体关节为依据，大约直径 90mm，长度 100mm；
2. 关节以成人肘部为依据，最大力矩约 10.9Nm，旋转速度 8rpm；
3. 提供多种连接方案，用户可以自由、方便地将一体化关节应用于设计之中；
4. 定位精度及旋转幅度与人体肘关节指标相对符合；
5. 驱动硬件及软件集成在一体化关节之内；
6. 具有方便的电气接头，接口尽量简单，保证关节的可靠性，方便调试和维修。

表2-1 技术指标

技术指标	期望效果
重量	<3 Kg
额定扭矩	>10 N·m
额定转速	90 %s-180 %s(15-30 r/min)
定位精度	<0.1°
刹车	能够在可预见的空间环境中刹车

2.3 关节半中空设计

2.3.1 基本元件选型

● 编码器

我们的一体化关节上一共采用了两种编码器，一种是相对式编码器，用来测量电机转速和位置，另一种是绝对式编码器，用来确定机械臂的位置。

为了使我们的关节结构更加紧凑 我们的相对式编码器采用的是磁电式的编码器。

我们的绝对式的编码器采用的是霍尔传感器，不但可以实现机械臂的精确定位，而且价格十分低廉可以降低关节的成本，在机械臂启动运行后，通过旋转一定角度来找到零位。

● 电机

考虑到质量、体积、成本等因素，经过多种品牌电机的调研，选用 Nidec 公司的 35R 直流无刷电机。该款电机共有三个不同功率的型号，分别为 50W、70W 和 90W。这种盘式电机是专门面向机器人的需求设计的，它实现了现有马达系列没有的高转矩密度化，在较小的尺寸下实现了高转矩密度，不仅它的力矩较大，并且体积很小，有利于缩减我们关节的体积，使得结构更加紧凑，同时电机壳体随着转轴旋转，可以降低电机表面温度，防止电机过热。其具体外形如下图 2-1 所示。



图 2-1 Nidec 盘式电机 35R

表2-2 Nidec 35R参数

功率	50W	70W	90W
额定转速	3861rpm	4705rpm	6236rpm
额定转矩	70mNm	121mNm	138mNm
重量	106g	128g	144.5g

● 谐波减速器

我们选定了我们所要用的减速器为 HD 公司的 SHF14-100-2UH 中空谐波减速器，其具体外形如下图 2-2 所示。



图 2-2 SHF-14-100-2UH 谐波减速器

2.3.2 结构设计

在经过了认真而细致的选材之后我们就开始正式的一体化关节结构设计。由于我们所采用的 35R 电机不具有中空走向轴，无法实现中空走线，为了解决总线问题，我们打算采用齿轮加带轮换向的方式来实现中心孔布线，我们先后设计出了如下图 2-3 所示的三个方案。

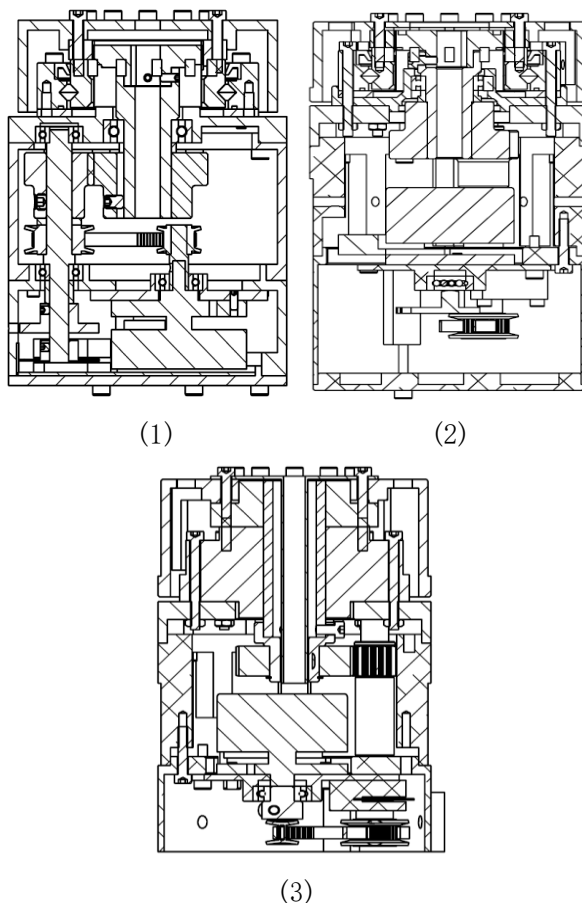


图 2-3 三种半中空设计方案

第一种设计方案如图 2-3 (1) 所示，通过齿轮和带轮进行来实现中空走线，线在经过谐波减速器和大齿轮之后经过换向从下方的外壳与之后的控制电路板相连，在有了这个想法之后，我们沿着这个思路又设计出了如图 2-3 (2) 和 (3) 所示的两种设计方案，相比于方案一，这两种方案将更改了电机的朝向，使得结构不仅变得更加紧凑，而且电机受到更加完善的保护，不易受到干扰，而且避免了存在与人发生接触的可能，增加了安全性。

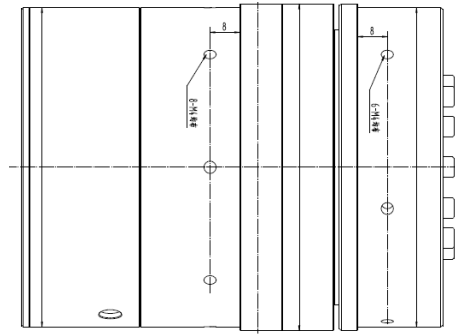


图 2-4 第一代半中空关节结构图

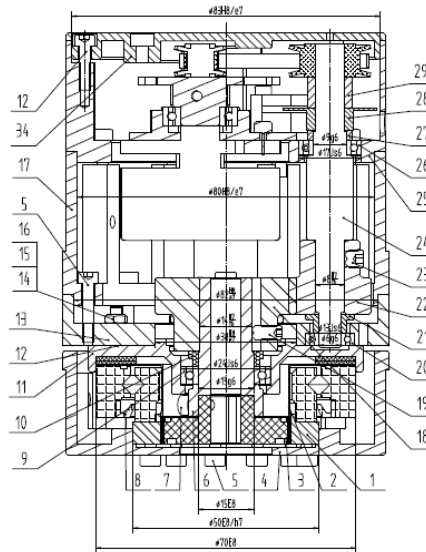


图 2-5 第一代半中空关节装配图

1. 钢轮 2. 柔轮 3. 波发生器 4. 输出端 5. 螺钉 6. 波发生器转接轴
7. 螺钉 8. 轴承 9. 轴承 10. 大齿轮轴套 11. 输入端支撑 12. 螺钉
13. 外壳 14. 螺钉 15. 螺钉 16. 螺母 17. 外壳 18. 齿轮 19. 螺钉
20. 轴承 21. 轴套 22. 齿轮 23. 螺钉 24. 带轮轴 25. 外壳 26. 轴承
27. 轴套 28. 编码器光栅 29. 轴套



图 2-6 第一代半中空关节实物图

我们的第一代半中空关节的结构图和装配图，如图 2-4 和 2-5 所示，第一代半中空关节

的实物，如图 2-6 所示，上下壳体大小不一致，根据内部设计确定上下壳体大小，缩小了关节的整体体积，采用齿轮和谐波减速器两级减速，通过带轮改变电机轴输出的方向，编码器安装在中空输出轴下端，检测输出轴的位置，为绝对编码器，可以定零位并保证意外断电情况下位置的记录，整个内部零件与外壳相连。

第一代一体化关节的主要优点为具有两级减速比，输出力矩较大，主要的缺点是零件数量过多，结构复杂，加工困难，加工成本比较高，因此我们在总结这一代关节的基础上，重新进行设计。

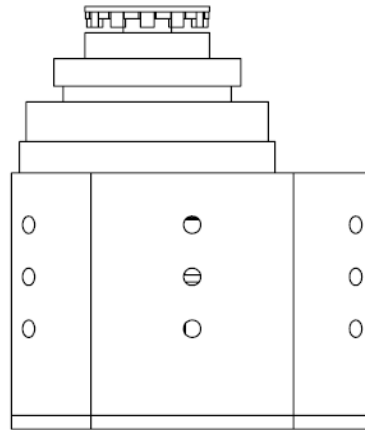


图 2-7 第二代半中空关节结构图

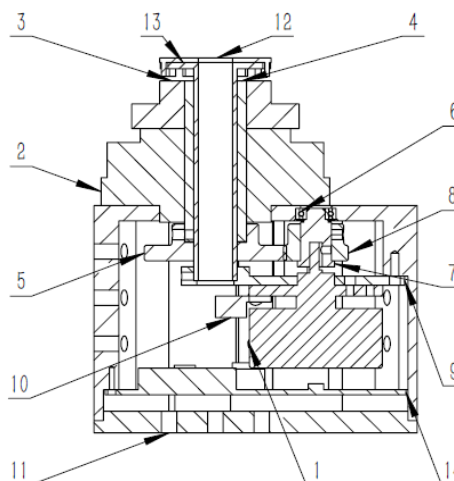


图 2-8 第二代半中空关节装配图

1. 外壳 2. 柔轮 3. 钢轮 4. 谐波轴 5. 大齿轮 6. 轴承 7. 电机连轴
8. 小齿轮 9. 电机支架 10. 35R 电机 11. 后盖 12. 定零位盘 13. 走线管 14. 电路板



图 2-9 第二代半中空关节实物图

我们在前几种方案和第一代关节实物测试的基础上，又经过了多次方案修改，最终确定了我们的最终加工方案制作出了第二代半中空关节，我们的第二代关节的结构图和装配图，如图 2-7 和 2-8 所示，第二代关节的实物，如图 2-9 所示，

我们的一体化关节外壳采用八边形的外形，我们在八边形之中的七个侧面和底面都设计了连接所用的孔，用户可以通过其中任意一面来进行连接。

不仅如此，我们还大幅度简化了减速机构，采用了双减速机构，去掉了在第一代关节设计中采用的三减速设计，去掉的原因主要是因为我们在测试第一代关节的过程中发现，三减速设计需要很高的加工精度，如果加工精度不够的话，就会造成齿轮的不良啮合，产生较大的噪音，而双减速结构可以实现与三减速机构同样的中空走线目的，并且可以占用更少的轴向空间，使得结构更加简单，紧凑，而且加工精度要求较低，这样进一步降低了我们一体化关节的成本。

除此以外，我们还对于电路板的布局进行了优化，从图 2-8 所示的装配图中我们可以看出电机只占据了关节右侧的空间，关节左侧的空间相对空闲，因此我们在进行电路板设计的过程中，将一些较高的元件都移动到了关节的左侧，使得轴向的高度可以进一步降低，结构更加紧凑。

2.3.3 关节主要参数计算

● 减速比计算

我们的一体化关节一共有两级减速，分别为谐波减速器，齿轮，减速比的计算公式如下式 2-1 所示。

$$i = i_a \times \frac{Z_a}{Z_b} \quad (2-1)$$

式中： i 为关节的总减速比； i_a 为谐波减速器的减速比； Z_a 为大齿轮的齿数； Z_b 为小齿轮的齿数。将数据带入公式 2-1 中可知总减速比为 225。

● 输出扭矩的计算

我们的一体化关节的动力源为 35R 盘式电机，通过齿轮组和中空谐波减速器输出扭矩，输出扭矩的计算公式如下式 2-2 所示。

$$T = T_a \times i \times \eta_a \times \eta_b \times \eta_c \quad (2-2)$$

式中： T 为关节的总输出扭矩； i 为总减速比； T_a 为电机的扭矩； η_a 为电机的效率； η_b

为谐波减速器的效率； η_c 为齿轮的效率。将数据带入式 2-2 中可知输出扭矩 T 为 8.15 N·m。

● 最大连续转矩时转速

最大连续转矩时转速的计算公式如下式 2-3 所示。

$$n = \frac{n_a}{i} \quad (2-3)$$

式中： n 为关节最大连续转矩时转速； n_a 为电机最大连续转矩时转速； i 为关节的总减速比。将数据带入 2-3 中可知最大连续转矩时转速 n 为 17.16rpm。

由于篇幅限制，第二代关节的其它技术指标不在详细介绍计算过程，第二代半中空关节的其它参数如下表 2-2 所示。

表2-2 第二代半中空关节参数

技术指标	参数
重量	1.5 kg
额定转矩	8.15 N·m
峰值扭矩	41.86 N·m
额定转速	17.16rpm
空转转速	21rpm
外径	104.5 mm
高度	107 mm

2.3.4 典型零件的有限元分析

为了产品的安全，我们以根部关节为例进行了有限元分析，其它关节的分析与下面类似，不再赘述。

● 外壳的有限元分析

我们采用 SolidWorks 绘制三维模型，并导入了材料属性的定义。三维实体结构比较简单，我们采用了自动的网格划分，划分的结果如下图 2-10 所示。

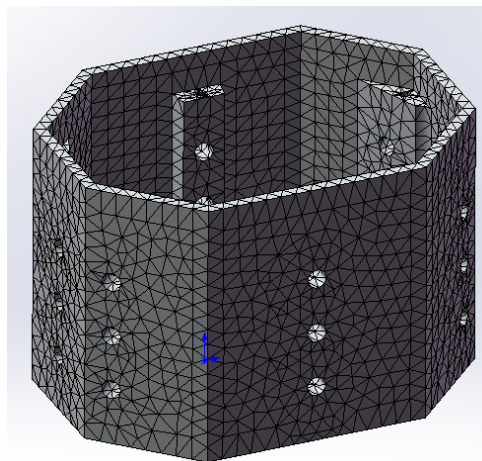


图 2-10 外壳网格划分结果

在完成了网格的划分后，我们再向该零件上施加力矩，零件的受力主要由两部分组成，一部分是电机所产生的扭转力矩，另一部分是前端其它关节所产生的力矩，具体的应力强度情况如下图 2-11 所示。

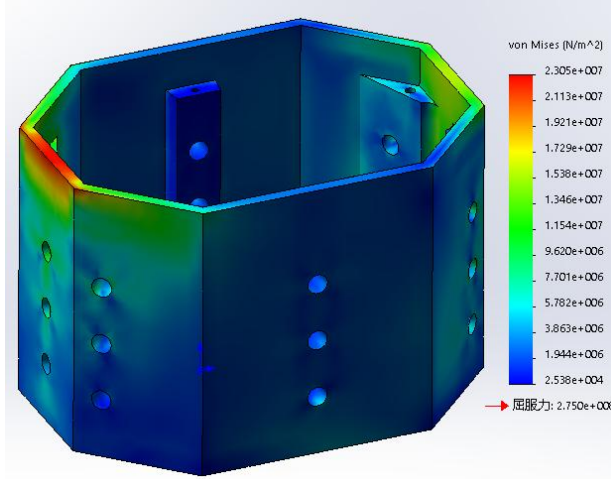


图 2-11 外壳有限元分析结果

最大应力变化为 23MPa，位置在外壳的底面上，外壳所采用的材料为 6061T6 铝，其屈服强度为 275Mpa，根据强度准则，取安全系数 $s=5$ ，则屈服极限为 55Mpa，故外壳的强度满足设计要求。

2.4 关节中空设计

2.4.1 基本元件选型

● 编码器

在一体化关节的设计之中一共需要采用两种编码器，一种是相对式的编码器，其精度要求较高，用来进行电机的速度和位置的测量，另一种是绝对式的编码器，其精度要求较低，与输出端连接在一起，用来进行机械臂零位的确定。

目前市场上的光电编码器主要有如图 2-16 所示的两种编码器，分别为反射式光电编码器和透射式光电编码器，相对编码器经过我们的考虑之后，工作原理决定选用反射式光电编码器而不是透射式光电编码器，首先因为我们的一体化关节的体积较小，需要选用更加小巧的编码盘，从尺寸图中我们可以看到透射式编码器的尺寸很大，不符合我们轻量化的设计标准，会占用我们一体化关节的很大空间，而反射式光电编码器可以很好的符合我们的要求，因为它是编码盘中体积相对来讲最小的，透射式光电编码器的编码盘需要连接在电机轴上来获取电机的转速和位置，这样的结构会使得我们的一体化关节在轴向上的长度增加，而反射式光电编码可以放在。不仅如此反射式光电编码器比较精密，本身分辨率可以很高，可以实现更加精确的控制，除此之外，反射式光电编码器因为技术比较成熟，目前价格也比较合理，可以降低我们一体化关节的价格。我们选用的编码器是长江智动科技公司的 CJMCU-83 AEDR- 8300 型编码器，该款编码器是一种反射式光电编码器，其具体外观及尺寸如下图 2-16(1)所示。

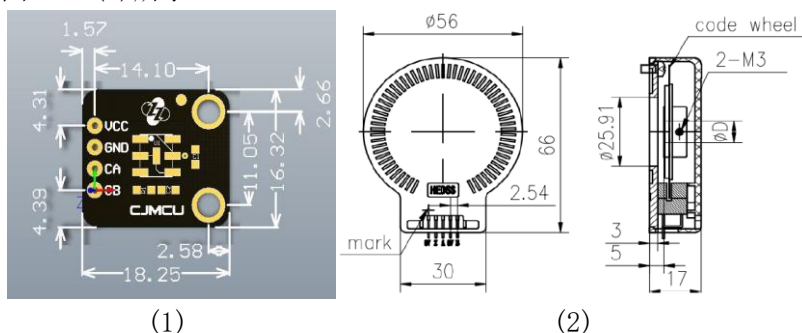


图 2-16 两种光电编码器

1. 反射式光电编码器 2. 透射式光电编码器

绝对编码器经过我们的考虑之后，工作原理决定选用霍尔传感器，因为我们的绝对编码器只需要确定关节的零位即可，不需要对于关节进行十分精确的位置控制，霍尔传感器的体积更小，价格低廉，已经可以满足我们的要求。我们计划采用在电路板上加装多个霍尔传感器来减少机械臂确定零位所需要转动的角度。

● 电机

目前市场上的中空电机主要有如图 2-17 所示的三个电机品牌，分别为 Maxon、Parker 和 Kollmorgen，他们的具体参数对比如表 2-3 所示。其中 Kollmorgen 电机正是目前最成功的机械臂厂商之一 UR 所采用的电机，但是这种电机成本很高，而且与 Parker 电机一样，没有与之完善对应的驱动装置，需要自行研发相关的驱动，这样会导致我们的产品周期延长，因此经过慎重的考虑，最终我们电机采用的是 maxon 的 EC60 中空直流无刷电机。

该款电机具有很高的功率密度，具有高灵活性的直驱集成，并且可以利用 maxon 提供的驱动控制电路实现精密的转矩、转速和位置控制，不仅如此改款电机的中空直径达到了 20mm，使得我们的走线方便了许多。



图 2-17 不同厂家的中空电机

1. Maxon 2. Parker 3. Kollmorgen

表2-3 不同电机对比

技术指标	MaxonEC60	ParkerK064	Kollmorgen TBM(S)-6013-B
额定转矩(mNm)	319	490	390
额定转速(rpm)	3490	3000	3540
重量(g)	270	290	221
中心孔径(mm)	20	24	28.7
直径(mm)	60	64	59
高度(mm)	38.2	45	16.76

● 减速器

我们选定了我们所要用的减速器为中空谐波减速器。我们的中空谐波减速器采用的是我国绿的公司自主研发生产的 LHSg 系列编码器，具体如下图 2-18 所示

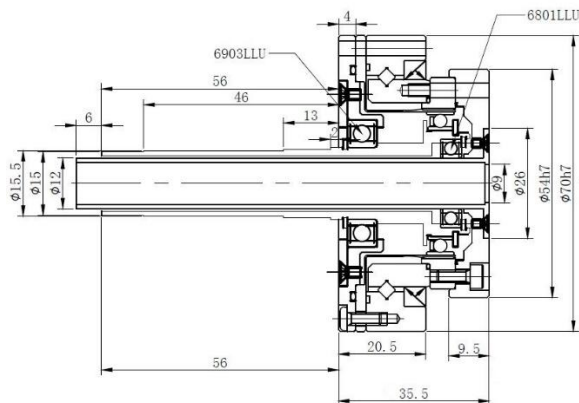


图 2-18 中空谐波减速器

2.4.2 结构设计

在经过了认真而细致的选材之后我们就开始正式的一体化关节中空结构的设计。由于我们采用了 maxon 公司的 EC60 电机，具有中空走线轴，解决了之前中空结构存在的中空走线问题，电机可以直接连接在谐波的输入轴上面，根据这一思路，我们先后设计出了如下图 2-19 所示的三个方案。

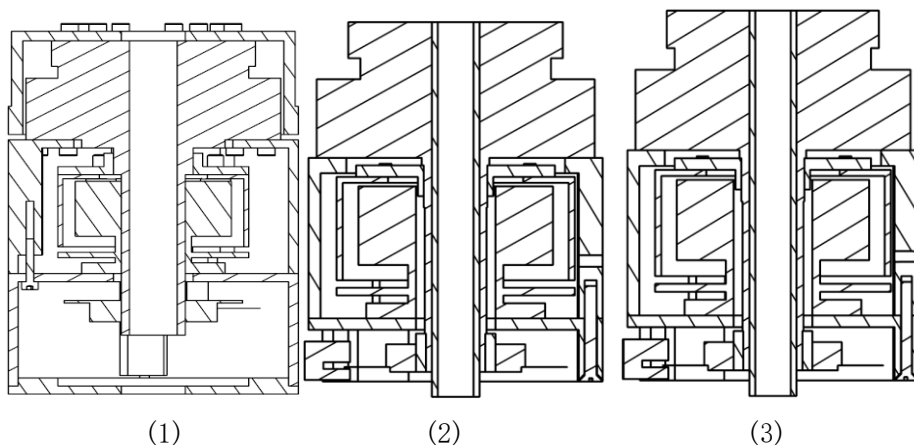


图 2-19 三种中空设计方案

这三种设计思路主要是模仿现有的中空结构的一体化关节，将谐波减速器、中空电机、编码器、控制电路等部件在轴向方向串排布，这样设计的话可以使得直径上的尺寸达到最小，但是我们发现这样的设计思路，会使得我们的一体化关节过于细长，并且由于直径上尺寸过小，导致留给电路板的尺寸不足。

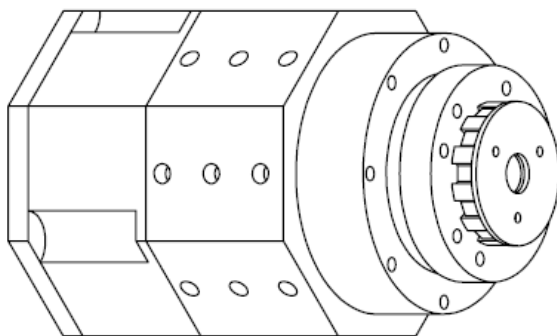


图 2-20 第一代中空关节结构图

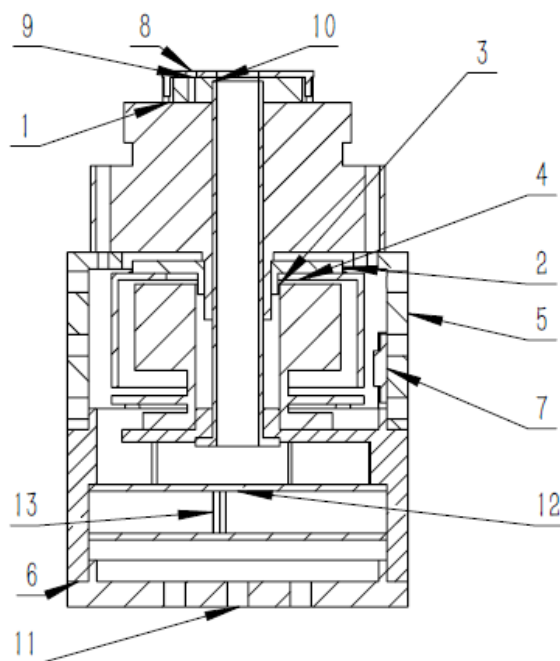


图 2-21 第一代中空关节结构图

1. 中空谐波减速器 2. 法兰 3. 中空直流无刷电机定子 4. 中空直流无刷电机转子 5. 外壳一 6. 外壳二 7. 光电反射式相对编码器 8. 霍尔式绝对定零度盘 9. 中空走线管盘 10. 中空走线管 11. 后盖 12. 控制装置 13. 铜螺柱



图 2-22 第一代中空关节实物图

在总结前三种设计不足的基础之上，确定了我们的最终加工方案，制作出了第一代中空关节，我们第一代中空关节的结构图和装配图，如上图 2-20 和 2-21 所示，实物图 2-22 所示。我们的中空结构的一体化关节与半中空结构采用了一样的八边形外壳，方便用户的使用。我们在中空结构的一体化关节中采用了两种编码器，一种为霍尔式绝对定零度盘，采

用霍尔传感器对关节的零位进行确定，利用霍尔元件来进行关节零位的测量，厚度相较于传统的绝对式光栅编码器缩减了很多，并且价格大幅度下降，有利于工业生产中成本的控制；另一种为光电反射式相对编码器，安装在外壳与电机之间进行电机转速的确定。由于直径上尺寸过小，因此我们的电路板采用了双层式设计，一层通过外壳二上的凸台进行固定，另一层通过铜螺柱与第一次电路板进行连接，为了进一步减少轴向的高度，我们在后盖上面开了一些凹槽用来容纳一些高度较高的电路元件。

2.4.3 关节主要参数计算

● 减速比计算

我们的中空结构的一体化关节只有一级减速，就是谐波减速器，减速比的计算公式如下式 2-4 所示。

$$i = i_a \quad (2-4)$$

式中： i 为关节的总减速比； i_a 为谐波减速器的减速比。将数据带入公式 2-4 中可知总减速比为 100。

● 输出扭矩的计算

我们的一体化关节的动力源为 EC60 中空电机，通过绿的中空谐波减速器输出扭矩，输出扭矩的计算公式如下式 2-5 所示。

$$T = T_a \times i \times \eta_a \times \eta_b \quad (2-5)$$

式中： T 为关节的总输出扭矩； i 为总减速比； T_a 为电机的扭矩； η_a 为电机的效率； η_b 为谐波减速器的效率。将数据带入式 2-5 中可知输出扭矩 T 为 19.14 N·m。

● 最大连续转矩时转速

最大连续转矩时转速的计算公式如下式 2-2 所示。

$$n = \frac{n_a}{i} \quad (2-6)$$

式中： n 为关节最大连续转矩时转速； n_a 为电机最大连续转矩时转速； i 为关节的总减速比。将数据带入 2-6 中可知最大连续转矩时转速 n 为 34.9rpm。

由于篇幅限制，第二代关节的其它技术指标不在详细介绍计算过程，第一代中空关节的其它参数如下表 2-4 所示。

表2-4 第一代中空关节参数

技术指标	参数
重量	1.5 kg
额定转矩	19.14 N m
峰值扭矩	74.4 N m
额定转速	34.9 rpm
外径	81 mm
高度	119.5 mm

2.4.4 典型零件的有限元分析

在我们的一体化关节的结构中，主要的受力零件为外壳。为了产品的安全，我们以根部

关节为例进行了有限元分析，其它关节的分析与下面类似，不再赘述。

我们采用 SolidWorks 绘制三维模型，并导入了材料属性的定义。三维实体结构比较简单，我们采用了自动的网格划分，划分的结果如下图 2-23 所示。

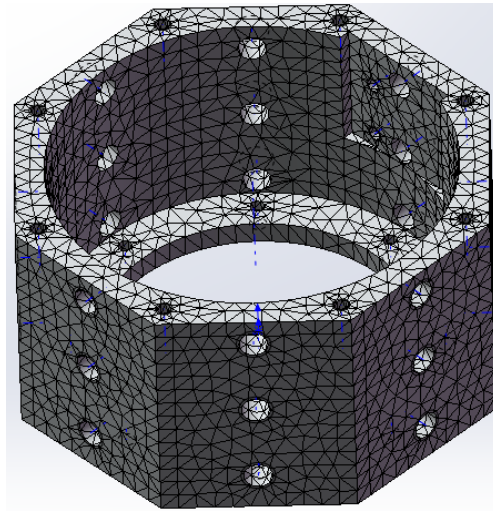


图 2-23 外壳网络划分结果

在完成了网格的划分后，我们再向该零件上施加力矩，零件的受力主要由两部分组成，一部分是电机所产生的扭转力矩，另一部分是前端其它关节所产生的力矩，具体的应力强度情况如下图 2-24 所示。

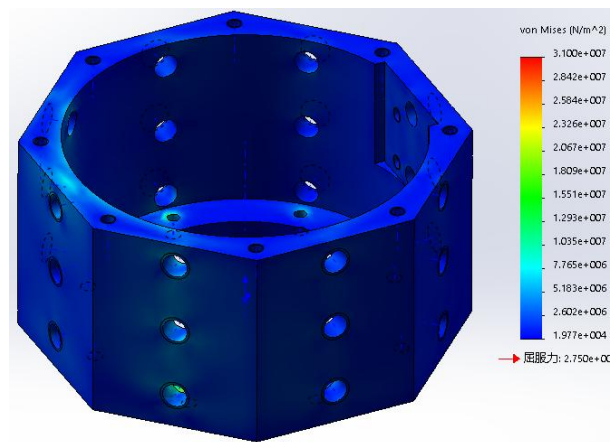


图 2-24 外壳的有限元受力分析结果

最大应力变化为 31MPa，位置在外壳的底面上，外壳所采用的材料为 6061T6 铝，其屈服强度为 275Mpa，根据强度准则，取安全系数 $s=5$ ，则屈服极限为 55Mpa，故外壳的强度满足设计要求。

2.5 本章小结

我们一共做出来了三代关节，其中有两代采用的是半中空的结构设计思路，一代采用的是中空的结构设计思路，本节将对这三代关节进行总结和对比。

表2-5 三代关节的参数对比

技术指标	第一代半中空结构 一体化关节	第二代半中空结构 一体化关节	第一代中空结构一 体化关节
重量(kg)	1.44	1.5	1.3
额定转矩(N·m)	10.29	8.15	19.14
峰值扭矩(N·m)	18	41.86	74.4
额定转速(rpm)	39.3	17.16	34.9
外径(mm)	88	104.5	81
高度(mm)	114	107	119.5

上表 2-5 为三代关节的参数对比，我们从表中可以看出，采用中空结构设计出的一体化关节具有最小的外径，这主要是由于中空结构的一体化关节采用了中空走线的方案，中空谐波减速器与中空电机直接相连，线直接从中间的走线轴进行走线，免去了通过齿轮组换向来实现走线的复杂结构，不仅缩减了外径上所需的尺寸，与此同时，还减少了齿轮组所占用的轴向上的高度，使得结构更加紧凑，重量也得到减少，实现了轻量化。

除此以外，去掉齿轮组还有一个好处就是可以降低加工所需精度，齿轮的完美啮合需要较高的加工精度，一旦加工精度不满足要求，就会出现齿轮啮合不良的问题，影响关节的正常运行，并且会造成很大的噪音，第一代中空结构一体化关节由于去掉了齿轮组，因此降低了加工精度要求，降低了外壳的加工成本。

但是，我们可以看出第一代中空结构一体化关节虽然去掉了半中空结构所采用的齿轮组，可是在高度上面相比于两代半中空结构一体化关节并没有什么优势，这主要是因为，直径上的尺寸过小导致无法将全部的电子元件都放置在一层电路板上，必须要采用了两层电路板，两层电路板之间通过铜螺柱相连接，这样的布局无疑比半中空结构所采用的单层电路板设计要厚很多，抵消了中空结构去掉齿轮组所带来的轴向尺寸上的缩减，使得高度增加。

在转矩方面，我们可以看出由于中空结构设计出的一体化关节采用了 Maxon 生产的 EC60 电机，这款电机具有比半中空结构的两代一体化关节所采用的 Nidec35R 电机更大的扭矩，因此即使半中空结构具有多级减速机构，扭矩仍然要远远小于中空结构的一体化关节，同时由于第二代半中空结构一体化关节采用了两级减速，即只通过中空谐波减速器和齿轮组来进行减速，去掉了第一代半中空结构一体化关节采用的带轮减速，因此它的减速比要略小于第一代半中空一体化关节，但是两者的区别并不十分明显。

最后在价格方面，由于中空结构的一体化关节必须要采用中空谐波减速器和中空电机，这两种设备虽然已经有一些国产企业在尝试研发，但目前仍然需要从国外进口，这样使得中空结构一体化关节的研发周期和研发成本都上升了很多，而半中空结构的一体化关节由于所采用的半中空电机目前技术已经比较成熟，因此采购起来非常方便，研发周期和研发成本相对均比较低。

综上所述，中空结构的一体化关节主要优势体现在小直径，大扭矩等特点上面，更适合应用于一些对于外形尺寸要求比较严格，所需扭矩比较大的产品上面，而半中空结构的一体化关节主要优势体现在价格低廉，易采购的特点上面，更适合应用于希望大规模生产，外形尺寸要求宽松，不需要特别大扭矩的产品上面。

第三章 机械连接与构型设计

3.1 引言

一体化关节集驱动、控制、传感、通信和运动执行于一体，是一个十分独立的功能模块。但是，单个一体化关节只提供给用户单个自由度的旋转运动，用户若要完成更为复杂的空间操作，则需要将多个一体化关节进行组合，形成可以满足相应运动学和动力学需求的一体化关节机器人。

对于搭建这样一个由一体化关节组合形成的关节型机器人，在机械结构的需求上，除了多个一体化关节外，还需要一套连接组件^[38]，能够对多个一体化关节进行机械连接，让用户可以像搭积木一样搭建相应的一体化关节机器人。

与普通机器人产品固定的工作参数（如：整体构型、工作空间和末端最大负载）相比，一体化关节机器人可以满足用户更为柔性的工况需求^[39]；在机械结构上，利用连接组件，用户可以对一体化关节进行多种多样的组合，由此构建多种自由度、多种构型的关节型机器人；根据实际操作空间和工作负载需求的不同，用户可以对一体化关节和连接组件的型号进行调整和选取，以满足工况要求。这样不仅使一体化关节机器人能够有更广的使用范围，也极大地缩短了机器人产品的开发周期，有效的提升了生产效率。

3.2 连接组件设计

3.2.1 设计要求分析

连接组件作为构成一体化关节机器人的重要机械结构，在设计上具有以下要求：

（1）一套组件，形成多种构型

连接组件的主要作用是连接不同的一体化关节，组合形成多种构型的关节型机器人。在连接组件的设计过程中，要充分考虑一套连接组件，搭建多种构型机器人的可行性。

（2）连接方便，容易安装操作

在搭建一体化关节机器人的过程中，关节之间的机械连接应当要利于操作，整个机器人的装配要切实可行。并且，机械连接要可重复拆卸，方便用户在需要改变机器人构型时的重新安装操作。

（3）结构安靠，保证强度刚度

在一体化关节机器人搭建完成后，连接组件需要承受机器人运行过程中由负载和一体化关节施加的载荷作用，强度上保证连接件不会因此发生断裂是基本要求，更重要的是为了保证一体化关节机器人的末端执行精度，连接组件需要具有较大的刚度。

（4）降低质量，实现轻量化

一体化关节和连接组件在机械结构上共同构成一体化关节机器人，在保证连接组件强度刚度的同时，尽可能的降低连接组件的质量，可以减轻对一体化关节输出扭矩的影响，使得整个机器人在运行上更为流畅。

（5）利于加工，降低成本

相比一体化关节而言，连接组件是构成关节型机器人的辅助模块，设计利于加工的机械结构，降低其生产制造成本，符合面向制造的设计基本原则，对于推广一体化关节机器人的使用，也具有重要的实际意义。

3.2.2 直连杆设计

通过对连接组件设计要求的充分分析，选取了铝合金作为制造材料，铝合金具有刚度大和密度低的特点，完全符合我们的设计需求。

种类上把连接组件分为两类：直连杆和角连杆^[40]。

直连杆由铝合金板切割制造，主要用于与肩关节和与肘关节进行连接，通常作为一体化关节机器人的大臂和小臂，是决定关节型机器人工作空间的主要构件。根据中心距 d 的大小，一共设计了 4 种型号的直连杆，其中心距分别为：200mm, 150mm, 120mm, 75mm。

其结构如图 3-1 所示。

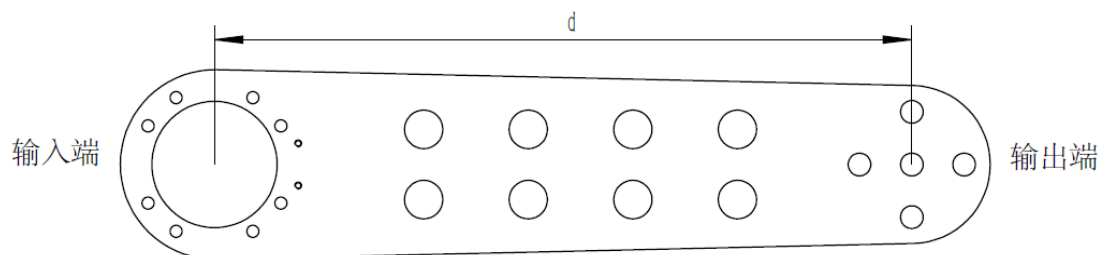


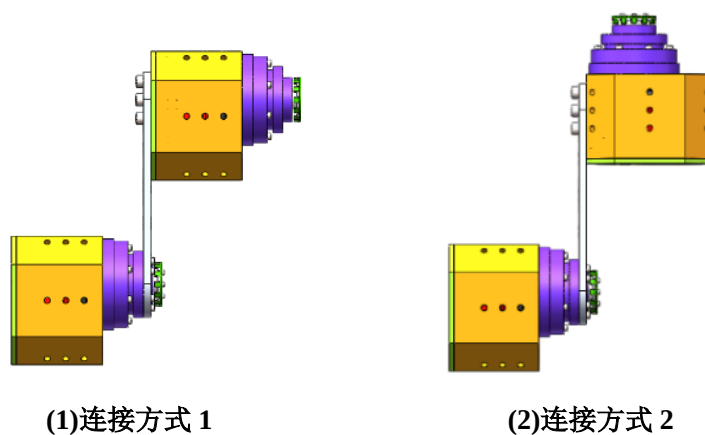
图 3-1 直连杆结构图

直连杆左侧输入端与一体化关节的谐波减速器端相连接，输入端的大孔用于通过一体化关节的霍尔定零位盘，同时在安装时起到定位作用；大孔周围有 8 个直径为 3.5mm 的安装孔，利用 8 个 M3 螺栓，可以将直连杆与谐波减速器的钢轮相固定；大孔一侧还有两个 M2 螺栓孔，用于安装定零位的小磁铁。

右侧输出端与一体化关节的后盖或外壳相连接，输出端共有 5 个直径为 6.5mm 的安装孔，利用 5 个 M6 螺栓，可以与关节后盖相连接；或者只用其中的 3 个孔，可以与关节外壳相连接。

中间加工多个通孔目的是减轻直连杆重量，而且打孔过程也可以起到局部应力强化的作用。同时，根据中间通孔的数目，可以直观判断直连杆的型号。

图 3-2 列举了四种两个一体化关节使用直连杆进行连接的三维效果，实际可以有的连接方式要大大多于此。



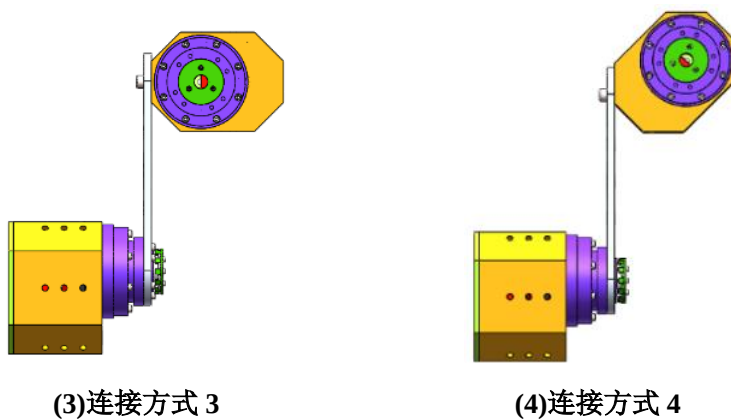


图 3-2 直连杆连接方式

3.2.3 角连杆设计

角连杆由切割直角型铝合金材料制造，主要用于与腰关节和与腕关节进行连接，通常构件一体化关节机器人的腕结构，而腕结构与机器人的末端工作姿态密切相关。

其结构如图 3-3 所示。

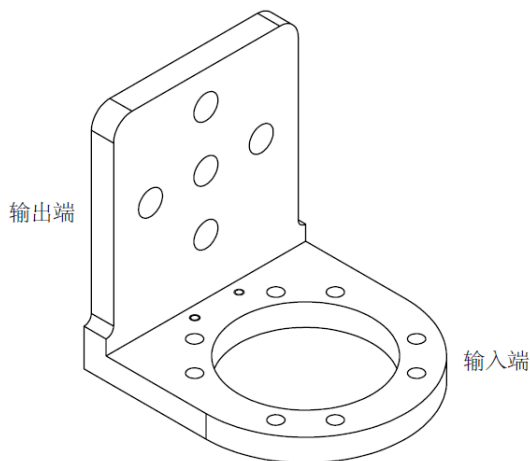
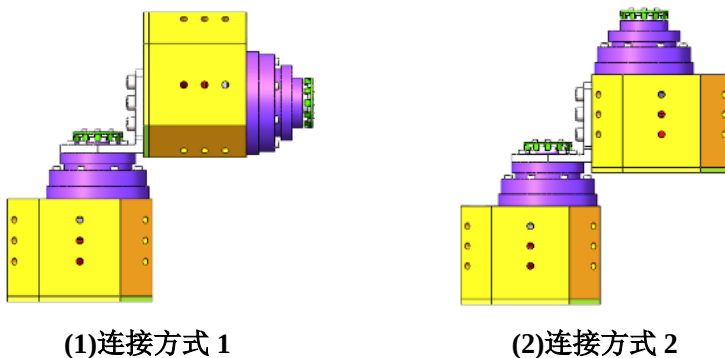


图 3-3 角连杆结构图

角连杆在结构上与直连杆不同，其输入端和输出端相互垂直。但在连接操作上，与直连是一样的。

图 3-4 列举了两种一体化关节使用角连杆进行连接的三维效果，实际可以有的连接方式要大大多于此。



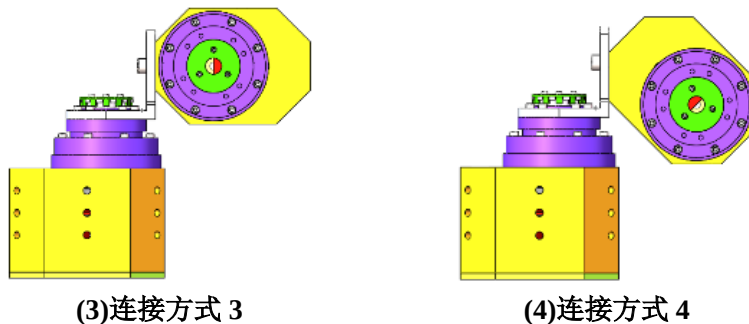


图 3-4 角连杆连接方式

多种型号的连接组件如图 3-5 所示，相应的技术参数如表 3-1 所示。

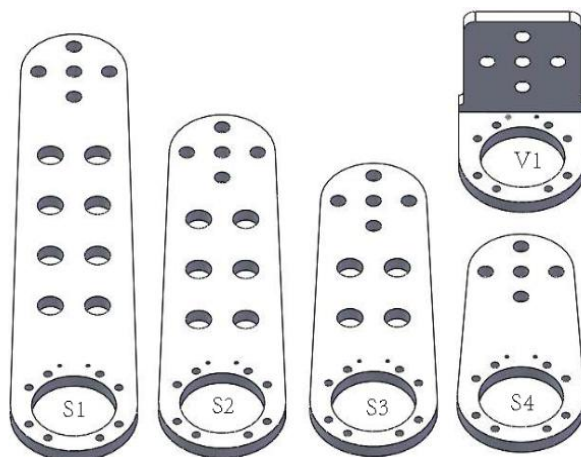


图 3-5 多种型号的连接组件

表 3-1 连接组件技术参数表

材料	铝合金 6061-T6(SS)				
类别	直连杆				角连杆
连杆号	S1	S2	S3	S4	V1
长度 mm	d=200	d=150	d=120	d=75	l=33 h=36
质量	160g	120g	100g	70g	70g
用途	肩关节	肩关节 肘关节	肩关节 肘关节	腰关节 腕关节	腰关节 腕关节

3.3 连接组件的有限元分析

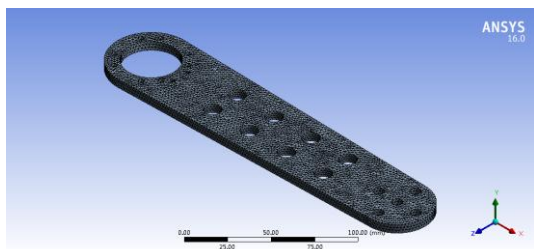
连接组件在一体化关节机器人运行过程中，需要承受由负载和关节施加的载荷，强度要求是保证机器人能安全运行的基本条件，而刚度的大小影响着一体化关节机器人的末端执行精度。因此，有必要在连接组件加工制造前，对其在工作条件下的受力情况进行仿真分析，校验其力学性质是否到达设计目标。

将在 SolidWorks 2016 下建模完成的连接组件三维模型，导入到 ANSYS Workbench 16.0 中，进行静力学有限元分析^[41]。

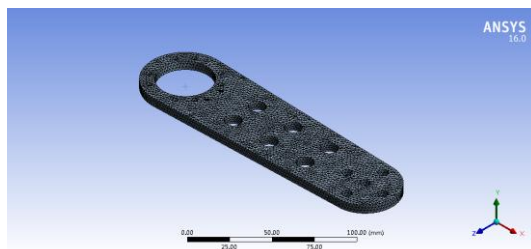
3.3.1 建立有限元分析模型

在 ANSYS Workbench 16.0 中赋予连接组件相应的铝合金材料性质，由于连接组件的机械结构并不复杂，所以直接利用 ANSYS Workbench 16.0 的自动划分功能进行连接组件模型的网格划分，网格 Size 为 2mm。

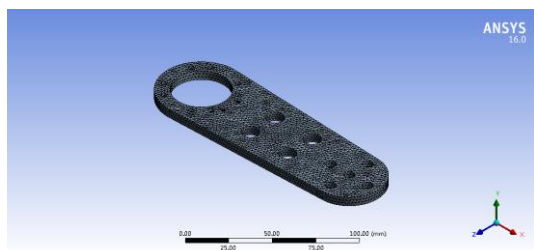
网格划分的结果如图 3-6 所示。



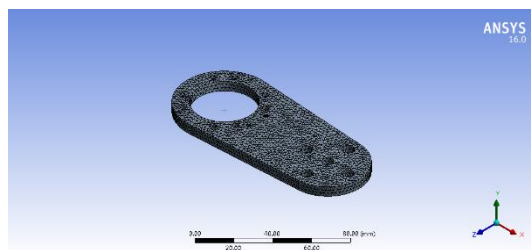
(1) 直连杆 S1



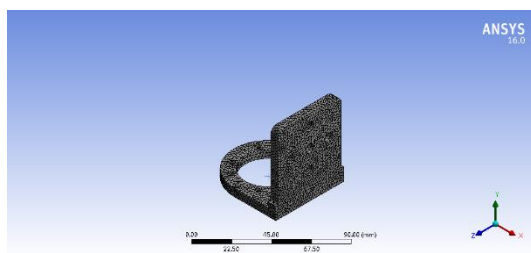
(2) 直连杆 S2



(3) 直连杆 S3



(4) 直连杆 S4



(5) 角连杆 V1

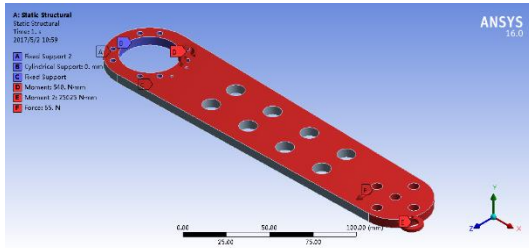
图 3-6 网格划分结果

一体化关节机器人的构型多样，不同构型的机器人在同一工作条件下也会有不同的受力情况。

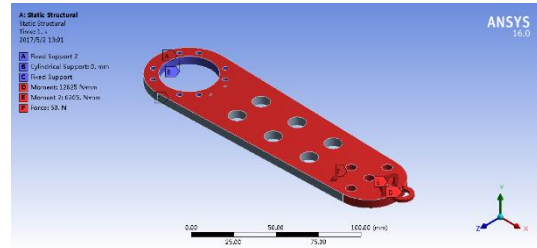
但考虑在实际应用中，以六自由度机械臂型的机器人最为常见，所以在施加约束和载荷时，主要考虑六自由度机械臂型一体化关节机器人的受力情况。

在考虑连接组件受力情况时，应当以一体化关节机器人施加到连接组件的极限载荷作为计算依据，同时在机器人末端应当附加相应负载以模拟真实工况，综合一体化关节自身扭矩大小，末端负载定为 500g。

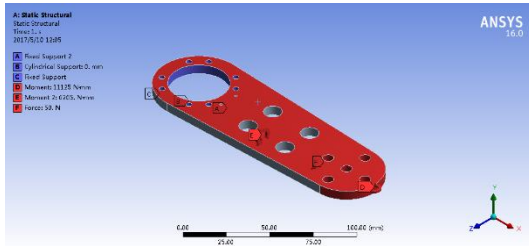
约束和载荷的施加结果如图 3-7 所示。



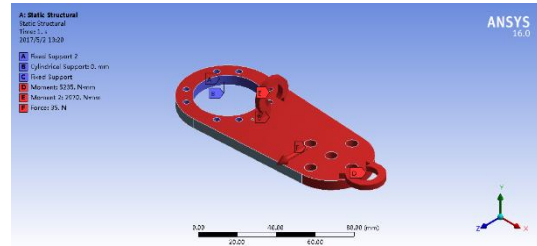
(1) 直连杆 S1



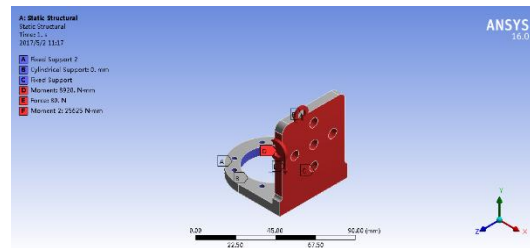
(2) 直连杆 S2



(3) 直连杆 S3



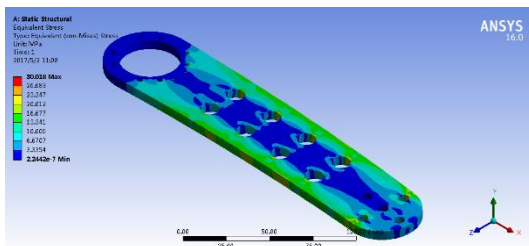
(4) 直连杆 S4



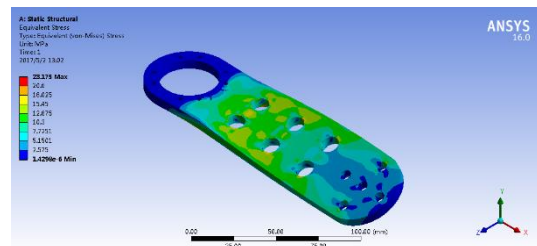
(5) 角连杆 V1

图 3-7 约束和载荷施加结果

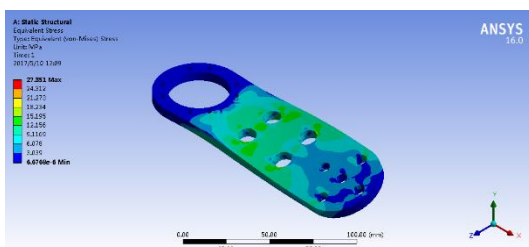
3.3.2 仿真结果分析



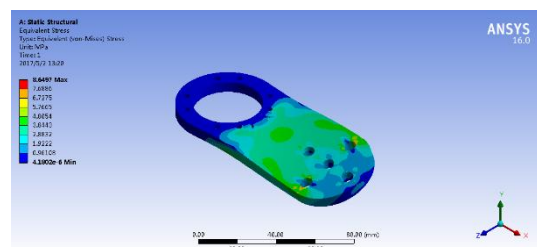
(1) 直连杆 S1



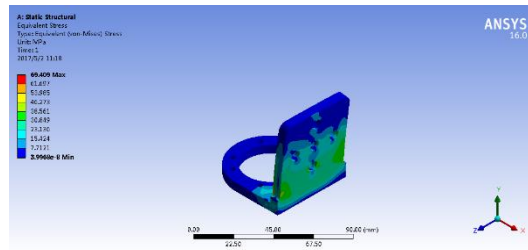
(2) 直连杆 S2



(3) 直连杆 S3



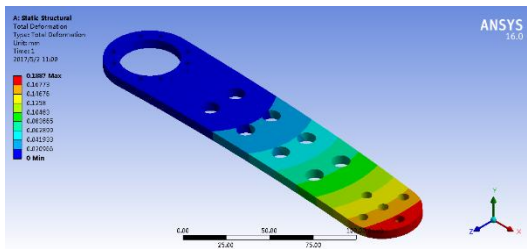
(4) 直连杆 S4



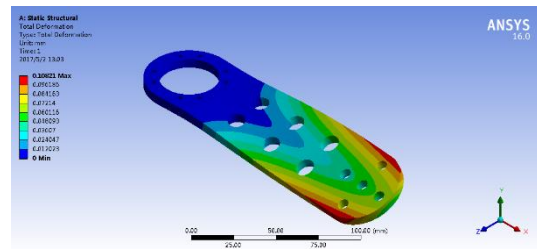
(5) 角连杆 V1

图 3-8 有限元应力仿真结果

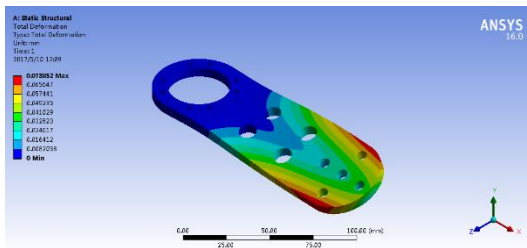
连接组件的有限元位移仿真结果如图 3-9 所示。



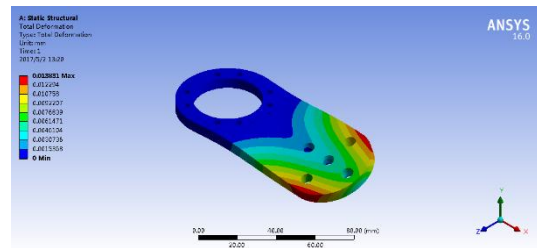
(1) 直连杆 S1



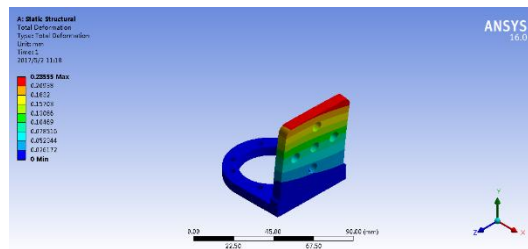
(2) 直连杆 S2



(3) 直连杆 S3



(4) 直连杆 S4



(5) 角连杆 V1

图 3-9 有限元位移仿真结果

表 3-2 连接组件的最大应力和最大位移计算结果

材料	铝合金 6061-T6(SS)				
类别	直连杆				角连杆
连杆号	S1	S2	S3	S4	V1
最大应力(Mpa)	30.018	23.175	37.351	8.650	69.409
最大位移(mm)	0.1887	0.1082	0.0739	0.0138	0.2356

强度方面，取安全系数为 $S=3$ ，以角连杆受到的最大应力作为连接组件的最大应力，考

虑到铝合金 6061-T6(SS)的屈服应力为 275Mpa，计算得到：

$$\sigma_{\max} = 69.409 \text{ MPa} < [\sigma] = \frac{\sigma_{6061-T6(SS)}}{S} = 91.667 \text{ MPa} \quad (3-1)$$

所以连接组件的设计符合强度要求。刚度方面,各连杆的最大位移均 0.25mm,若组成一个六自由度机械臂,换算得到末端位移约为 0.5mm,符合刚度上的基本要求。

经过有限元仿真计算,连接组件的设计符合各项要求,可以进行加工制造。使用铝合金 6061-T6(SS)加工后的连接组件还进行了表面阳极氧化处理,使得连接组件的强度和刚度有进一步的提升。

加工得到的连接组件实物如图 3-10 所示。

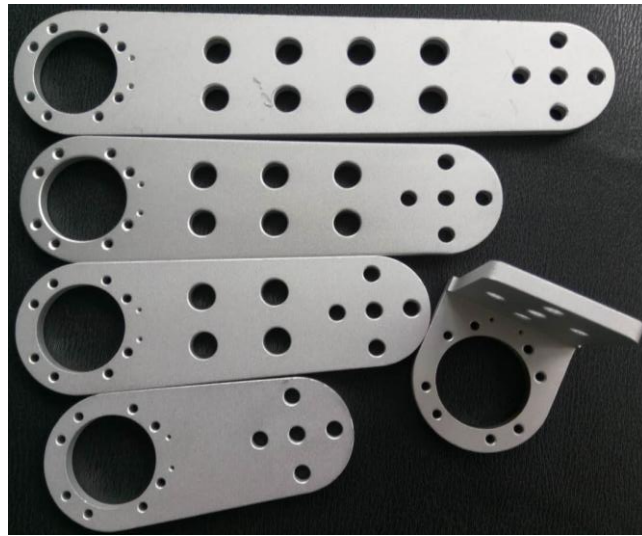


图 3-10 连接组件实物图

3.4 一体化关节机器人构型设计

一体化关节自身是一个独立的功能模块,集驱动、控制、传感、通信和运动执行于一体,但是用户若需要完成更为复杂的空间操作,单个一体化关节是不够的。这就需要将多个一体化关节利用连接组件进行组合,搭建一体化关节机器人,去实现用户想要达到的空间操作目的。

与普通机器人产品固定的工作参数不同,一体化关节机器人可以满足用户更柔性的需求,其重要特点便是:一套组件,多种构型^[39]。用户可以根据工作条件的需求,对一体化关节机器人的构型做出调整,以到达最佳目的。

通常以六自由度机械臂型机器人最为常见。利用六个一体化关节,可以顺利搭建一个六自由度机械臂。

图 3-11 给出了一种六自由度机械臂型一体化关节机器人的三维模型。

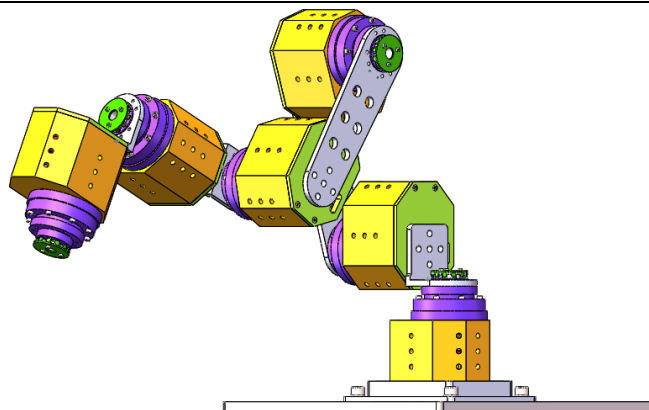


图 3-11 六自由度机械臂型一体化关节机器人

四自由度机械臂虽然在末端姿态上六自由度机械臂少了两个自由度，但是，在一些只对末端定位上有要求的应用场合，相对于六自由度机械臂，四自由度机械臂不仅有更高末端的定位精度，而且在末端负载上也能承受更大。利用四个一体化关节，可以顺利搭建一个四自由度机械臂。

图 3-12 给出了一种四自由度机械臂型一体化关节机器人的三维模型。

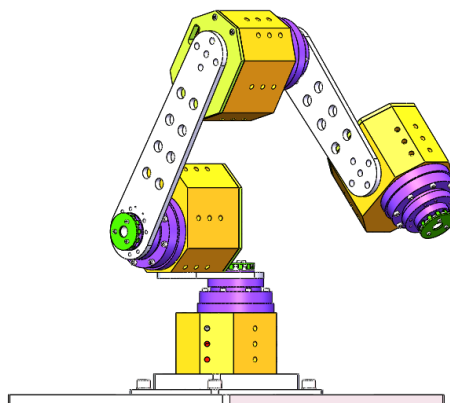


图 3-12 四自由度机械臂型一体化关节机器人

在一些特殊的应用场合，比如需要在托克马克腔内部进行操作的机器人^[42]，为了适应特殊的腔体操作空间，并不需要在整个空间的自由度，而往往以多自由度冗余的形式构建。利用一体化关节也可以顺利搭建这样的冗余型机器人。

图 3-13 给出了一种冗余型一体化关节机器人的三维模型。

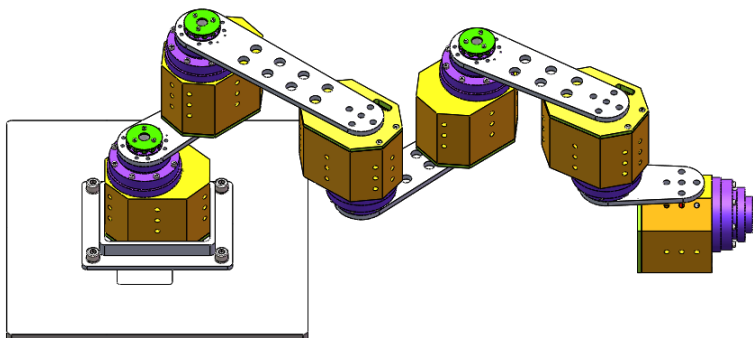


图 3-13 冗余型一体化关节机器人

另外, 在完成多个小零件组装时, 例如要完成多电子元器件的装配时, 常采取协作型机器人, 以到达多自由度协作操作的目的, 其中较为著名的便是 ABB 公司与 2014 年推出的协作机器人 YuMi^[43]。利用一体化关节, 也可以顺利搭建协作型机器人。

图 3-13 给出了一种双臂协作型一体化关节机器人的三维模型。

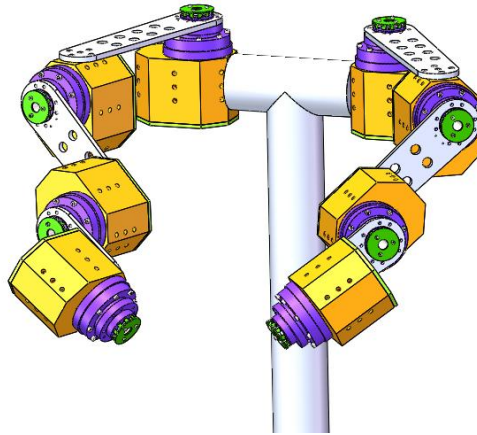


图 3-14 双臂协作型一体化关节机器人

以上给出的四种典型构型的机械臂, 用户还可以根据实际工况在机械连接方式、自由度的安排以及连接组件的型号上进行调整和变化。当然, 一体化关节机器人的构型并不止这四种, 鉴于篇幅原因, 其它构型的一体化关节机器人就暂不讨论。

3.5 一体化关节机器人选型与工作空间分析

对于已经确定构型的一体化关节机器人, 在进行机器人机械结构的搭建过程中, 一体化关节和连接组件的选型, 直接决定了一体化关节机器人的末端负载和工作空间。

用户可以根据分析结果, 选择符合工况负载和工作空间要求的相应型号, 提升开发设计效率。

3.5.1 六自由度机械臂型一体化关节机器人

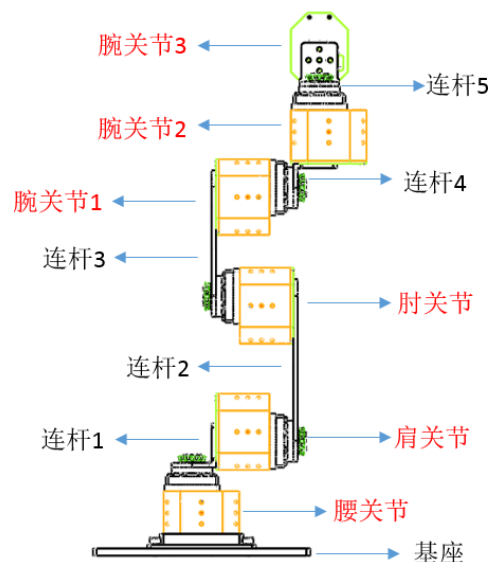


图 3-15 六自由度机械臂型一体化关节机器人机械结构

根据末端负载与各个关节输出扭矩的关系，计算得到在空载、末端负载 100g 和末端负载 500g 工况下，一体化关节与连接组件选型结果，如表 3-3 所示。

表 3-3 六自由度机械臂型一体化关节机器人负载选型表

负载	关节组 (腰,肩,肘,腕 1,腕 2,腕 3)	连杆组 (杆 1,杆 2,杆 3,杆 4,杆 5)
--	(JL601, JL601, JL602, L50, L50, L50)	(V1, S2, S2, V1, V1)
100g	(JL601, JL601, L90, L70, L50, L50)	(V1, S2, S3, V1, V1)
500g	(JL601, JL601, JL602, L70, L70, L50)	(V1, S3, S3, V1, V1)

利用选型表，用户可以根据负载要求进行快速选型。

为了进一步分析相应的机器人工作空间，首先建立六自由度机械臂型一体化关节机器人的 D-H 坐标^[44-45]，如表 3-4 所示。

表 3-4 六自由度机械臂型一体化关节机器人 D-H 坐标参数

连杆 i	a_i	α_i	d_i	θ_i
1	0	$-\pi/2$	d_1	θ_1
2	a_2	0	0	$-\pi/2 + \theta_2$
3	a_3	0	0	θ_3
4	0	$\pi/2$	d_4	$\pi/2 + \theta_4$
5	0	$-\pi/2$	d_5	$\pi/2 + \theta_5$
6	0	0	d_6	θ_6

其中待定参数的值取决于所选择的负载型号。根据 D-H 坐标，利用 MATLAB Robotic Toolbox 建立六自由度机械臂型一体化关节机器人的机构模型^[46]，如图 3-16 所示。

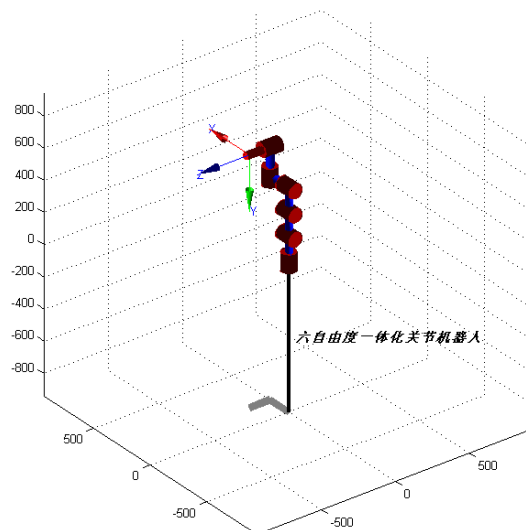


图 3-16 六自由度机械臂型一体化关节机器人机构模型

调用MATLAB Robotic Toolbox前向运动学函数fkine(), 计算不同负载型号的六自由度机械臂型一体化关节机器人工作空间^[47]。

各型号工作空间计算结果如图3-17所示。

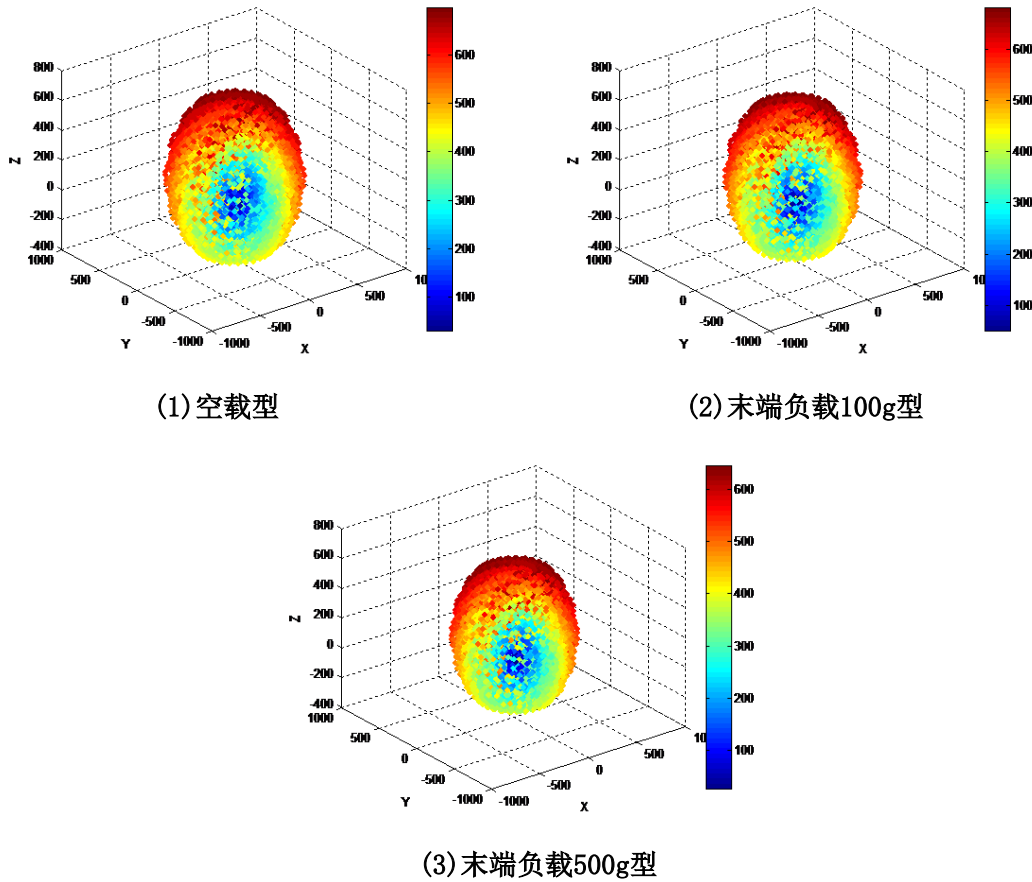


图 3-17 各型号六自由度机械臂型一体化关节机器人工作空间

有了负载选型表和工作空间分析, 用户可以根据所需末端负载和工作空间需求, 进行一体化关节机器人的快速选型。

3.5.2 四自由度机械臂型一体化关节机器人

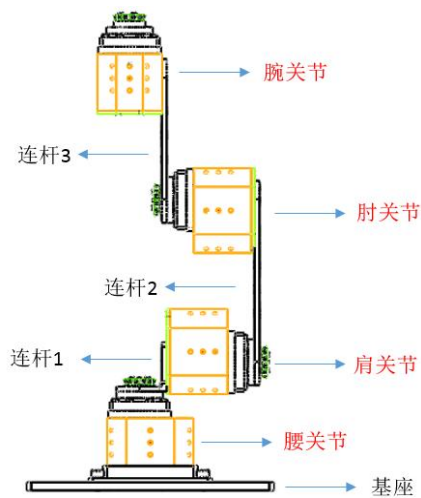


图 3-18 四自由度机械臂型一体化关节机器人机械结构

根据末端负载与各个关节输出扭矩的关系，计算得到在末端负载 1.5kg、末端负载 2.5kg 和末端负载 4kg 工况下，一体化关节与连接组件选型结果，如表 3-5 所示。

表 3-5 四自由度机械臂型一体化关节机器人负载选型表

负载	关节组 (腰,肩,肘,腕)	连杆组 (杆 1,杆 2,杆 3)
1.5kg	(JL601, JL601, L70, L50)	(V1, S1, S1)
2.5kg	(JL601, JL601, L70, L50)	(V1, S1, S2)
3.5 kg	(JL601, JL601, L90, L70)	(V1, S2, S3)

进一步建立四自由度机械臂型一体化关节机器人的D-H坐标^[44-45]，如表3-6所示。

表 3-6 四自由度机械臂型一体化关节机器人 D-H 坐标参数

连杆 i	a_i	α_i	d_i	θ_i
1	0	$-\pi/2$	d_1	θ_1
2	a_2	0	0	$\pi/2 + \theta_2$
3	a_3	$\pi/2$	d_3	$\pi/2 + \theta_3$
4	0	0	d_4	θ_i

其中待定参数的值取决于所选择的负载型号。

根据 D-H 坐标，利用 MATLAB Robotic Toolbox 建立四自由度机械臂型一体化关节机器人的机构模型^[46]，如图 3-19 所示。

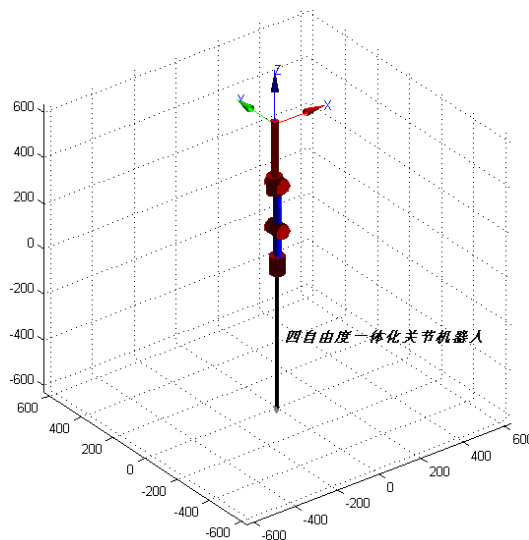
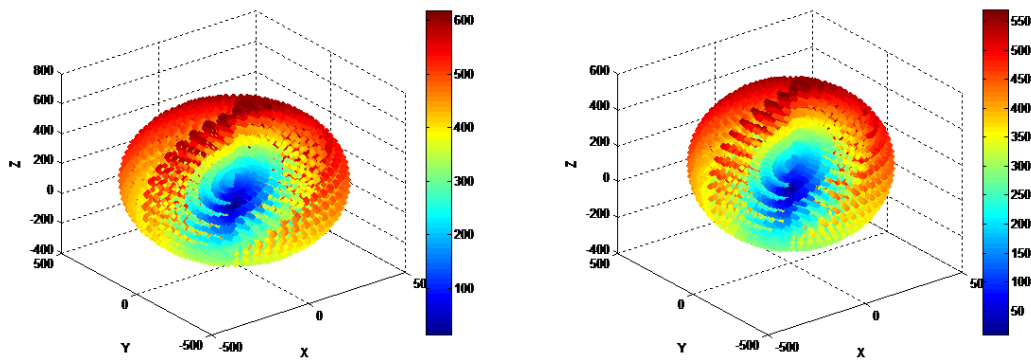


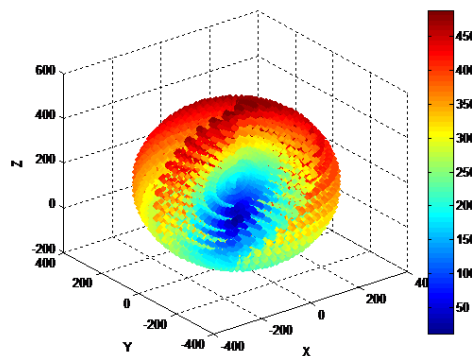
图 3-19 四自由度机械臂型一体化关节机器人机构模型

调用MATLAB Robotic Toolbox前向运动学函数fkine(), 计算不同负载型号的四自由度机械臂型一体化关节机器人工作空间^[47]。各型号工作空间计算结果如图3-20所示。



(1) 末端负载1.5kg型

(2) 末端负载2.5kg型



(3) 末端负载3.5kg型

图 3-20 各型号四自由度机械臂型一体化关节机器人工作空间

通过以上分析结果不难看出，六自由度型机器人的优势在于拥有较大的工作空间，而且腕部自由度完整，可以实现末端多种姿态的定位，缺点在于随着关节数量和机械臂长度的增加，造成末端负载的减少和成本的增加。四自由度型机器人虽然缺少两个腕部自由度，但是末端负载能力大大增加，而且关节减少使得成本更低，控制难度也相应降低，在一些负载较大、操作简单的搬运工作中，仍具有优势。

3.6 本章小结

多个一体化关节在机械结构上，可以利用连接组件进行组合，自由搭建多种构型的一体化关节机器人，以满足用户更为柔性的工作需求。

本章首先提出了一体化关节外部连接件的设计要求和目标，由此设计了结构简单、功能强大的连接组件，在设计过程中结合有限元仿真，对连接组件结构上的强度和刚度进行反复校验，并最终实际加工制造了连接组件成品。

之后，结合一体化关节和连接组件，进行了一体化关节机器人的整体构型分析和设计，并给出了四种常见的机器人构型实现方法。

在构型设计的基础上，进一步选取了其中更为通用的六自由度和四自由度机械臂型一体化关节机器人作为分析对象，最终给出了两种构型的一体化关节机器人的负载选型表以及相关工作空间分析结果。用户可以根据负载选型表和工作空间分析结果，结合实际工况要求，进行一体化关节和连接组件的快速选型，进一步缩短机器人开发周期，提升工作效率。

第四章 驱控一体关节驱控系统硬件设计

4.1 引言

标准的机器人关节不仅需要一体化的关节机械结构，对于其相应的驱控系统也有特殊要求。如：关节间电气连接要能够便捷连接，在完成机械安装的同时完成关节间电气连接；驱控电路板要与机械结构相契合，合理布局在关节结构中；驱控系统能够按照上位机的指令准确驱动关节内电机运动；驱控系统能为上位机反馈更多关节内外的传感参数。

单关节内的驱控系统以 ARM (Acorn RISC Machine)板为核心处理芯片^[48]，通过转发上位机程序计算的速度、电流指令，实现驱动直流无刷电机的功能。周期性采集多类传感器的数据，将传感数据和驱动器反馈数据经由 CAN (Controller Area Network)总线或 EtherCAT (Ethernet for Control Automation Technology)总线传输至上位机。整个系统由机器人各关节的总线引入供电，系统内实现 5V 和 4.3V 的降压稳压，供应各类芯片工作电压。其系统结构框图可见图 4-1。

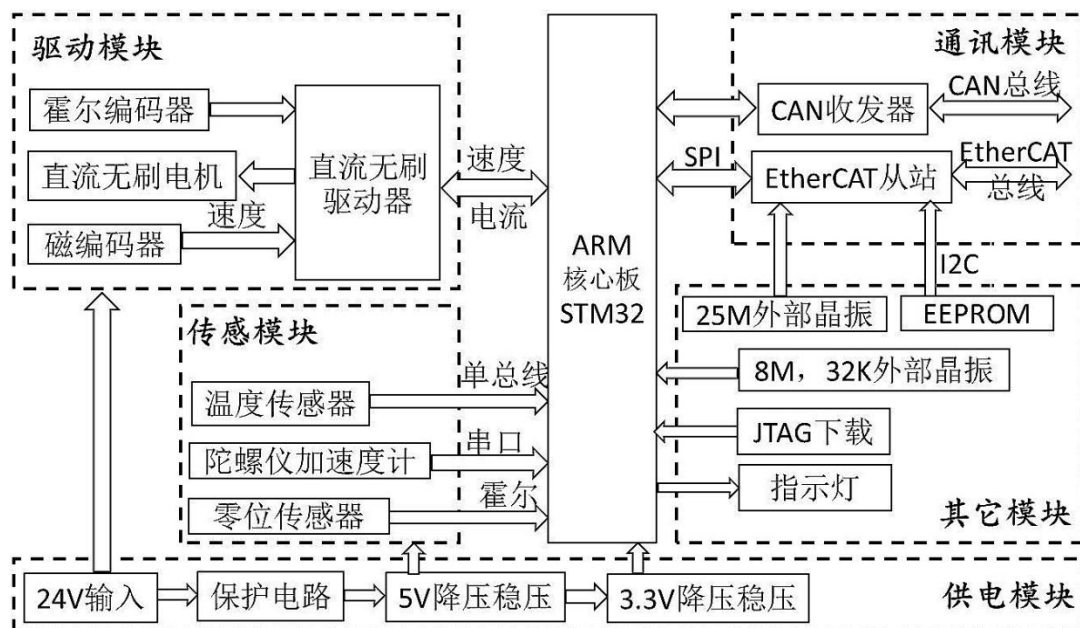


图 4-1 一体化机器人关节驱控系统结构框图

4.2 模块设计与选型

4.2.1 控制模块设计

单关节的核心处理器选用 ARM 芯片^[49]，型号为意法半导体公司的 STM32F103RET6，该芯片拥有 1 路 CAN2.0 通讯、3 路 16 通道 A/D 转换、1 路两通道 D/A 转换、3 路 SPI 通讯、72MHz 运算主频、512K ROM、64K RAM、8 个定时器以及 51 路 IO 电平输入输出等^[50]。

STM32 与驱动模块的接口为两个 DA 端口和两个 AD 端口，用于下发电机运动控制指令，如速度、电流、使能、制动等。STM32 与通讯模块中 CAN 收发器的接口为 CAN_Tx

和 CAN_Rx，从内部的 CAN 控制器指挥收发器接入总线；与 EtherCAT 从站芯片的接口为 SPI 通讯，通过 EtherCAT 从站芯片接入到总线。STM32 与传感模块中的温度传感器的接口为数字单总线，读取温度传感器对应地址寄存器的值；与 IMU 的接口为串口，读取加速度和角速度值；与零位霍尔的接口为 10 路 GPIO，每个引脚对应绝对位置中的一个，读取是否被磁铁触发。STM32 与电源模块的接口为 4.3V 的稳压输入。另外从 STM32 的 IO 引出 JTAG 下载调试脚，一个红色 LED 指示灯，和一个绿色 LED 指示灯。

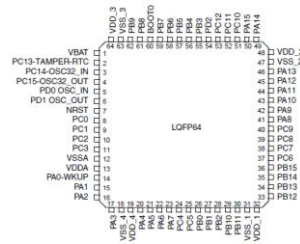


图 4-2 STM32F103RET6 封装

4.2.2 驱动模块设计

非中空关节应用的电机为 Nidec 公司的 35R 高功率密度电机，选用 Maxon 公司的 ESCON Module 50/5 为驱动功能部件，直流无刷电机所需的换相霍尔信号由 35R 电机提供，驱动模块的电路原理如图 4-3 所示。精确的速度信息由可编程增量式磁编码器提供，型号为 AS5145。磁编码器通过检测电机尾部轴上安装的小磁铁同步旋转，感应出 AB 相增量式脉冲信号，输入到 ARM 芯片的引脚，作为关节的速度、位置闭环控制的反馈。中空关节使用的 Maxon 公司的 EC60 直流无刷电机，同样使用 ESCON Module 50/5 作为驱动部件，不同之处在于使用了反射式编码器作为相对编码器，将黑白等距条码打印在光面纸上贴在 EC60 转子的外壳上，转动时可以触发关节内壁的反射式光电编码器，从而输入到驱动模块中，为速度和位置控制提供反馈。

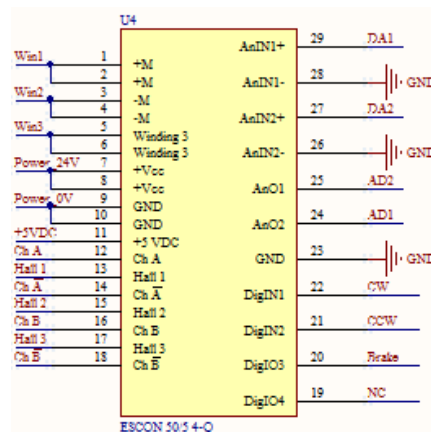


图 4-3 ESCON Module 驱动电路原理图

4.2.3 通讯模块设计

多关节机器人各关节驱动常采用总线式控制方式，如 RS485 总线，CAN 总线等，以上位机为主站，主从式发布控制指令。本关节出于适应不同上位机系统和不同使用者使用要求的考虑，采用 CAN 和 EtherCAT 双通讯的方式。选用的 ARM 芯片自带 CAN 控制器，CAN 收发器电路如图 4-4 所示。

EtherCAT 则略有不同，需要使用 EtherCAT 从站芯片，本系统选用 LAN9252 芯片，该芯片与 ARM 板之间通过 SPI 通讯，即可将单关节接入到 EtherCAT 总线中去。EtherCAT 在

使用中还需要周边最小系统电路：如 25MHz 的晶振电路、电源输入滤波稳压电路、EEPROM 存储电路等等。原本 EtherCAT 在使用中物理层借助于以太网通信接口，但由于此处关节内部空间限制，调研得知，在 100Mbps 传输速率以下只需要使用到网线中的四根线，分别为：TXRA、TXRB、TXNA、TXNB，因此可以不用水晶头的接头形式，而直接引出输入输出分别四根线接入总线中，与 CAN 通信的两根线一起放在一根六芯双绞屏蔽线中，如此可以同时提供 CAN 和 EtherCAT 两种通信方式，便于用户选择，由于在实际使用中不会遇到两种通信都使用的情况，因此不必考虑两种传输信号的干扰问题。

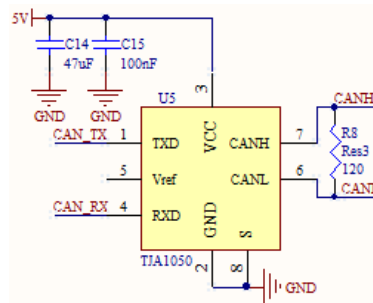


图 4-4 CAN 收发器电路原理图

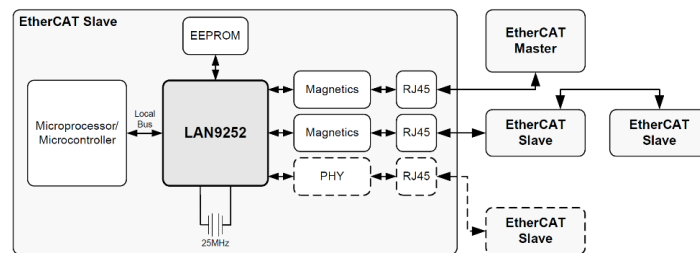


图 4-5 EtherCAT 从站框图

4.2.4 传感模块设计

上位机完成诸如运动规划等复杂控制需要参考关节的基本数据,如速度、位置、电流反馈信号。除此之外,也希望能采集到关节内的温度、关节零位。本系统在囊括了以上传感数据的基础上,还加上了陀螺仪加速度计,选用的 MPU6050 模块自带数据处理芯片,能直接通过串口输出卡尔曼滤波后的加速度、角速度以及三轴姿态角,其加速度测量范围为 $\pm 16g$,角速度测量范围为 $\pm 2000^\circ/s$ 。温度传感器使用单总线通讯的 DS18B20,可测量的温度范围在 $-55^\circ C \sim 125^\circ C$ 之间,误差为 $\pm 0.5^\circ C$ 。陀螺仪加速度计和温度传感器的采样电路如图 4-7 所示。速度和位置信号为磁编码器的反馈信号和霍尔零位传感器的综合信息,其中霍尔零位传感器使用的传感器型号为 44E,输出开关量表示是否检测到小磁铁经过,霍尔传感器安装在关节输出低速端,沿圆周等间距安装了 12 个,小磁铁安装在连杆上,可用于上电零位查找和位置估计校正。电流信号来自于 ESCON Module 模块的电流环 PI 采样,采样频率可达 54.6kHz。

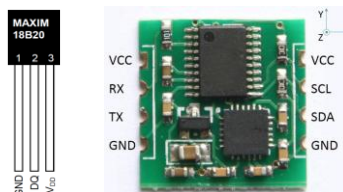


图 4-6 温度传感器和陀螺仪加速度计实物图

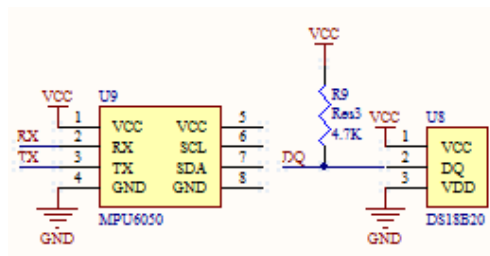


图 4-7 陀螺仪加速度计和温度传感器电路原理图

4.2.5 电源模块设计

由于选用的直流无刷电机为 24V 供电，因此输入到每个关节的总线电压也为 24V。该 24V 输入电源首先经过保护电路，保护电路选用保险丝、TVS 瞬变二极管和电解电容组成，如图 4-8 所示。使用的降压芯片为 MP1596，其降压电路如图 4-9 所示。5V 输出的电源供给部分传感器芯片和 CAN 收发器使用，另一部分再次降压为 4.3V 作为 ARM 芯片和 EtherCAT 从站芯片的电源。

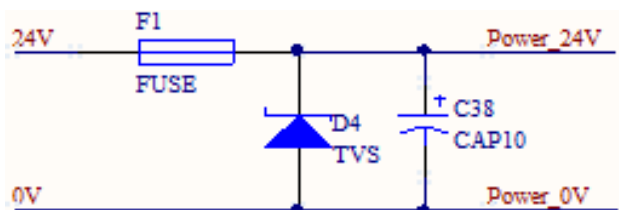


图 4-8 输入保护电路原理图

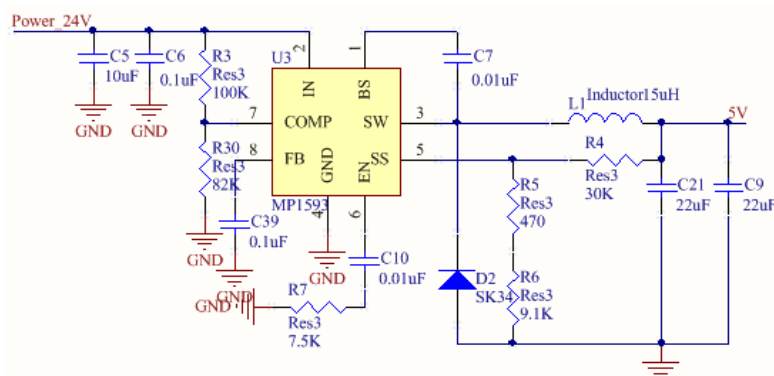


图 4-9 24V 转 5V 降压电路原理图

由于中空关节使用的 Maxon 电机为 48V 供电，因此还需要另外设计一个 48V 转 5V 的电路，选用 LM2596HV 为降压芯片，购买相应的可调降压模块，在输入端接入 48V 后旋转调节器，将其调整到 5V 稳定输出后，固定调节器的位置，再将其焊接固定到中空关节的 PCB 上。

4.2.6 其它模块设计

除了上述模块以外，还有一些周边电路模块。主要包括：JTAG 调试下载，外部晶振，外部存储，指示灯。其中 JTAG 接口用于成品之前的下载调试，也作为后期维护入口。外部晶振电路包括了 ARM 芯片的 8MHz 和 32KHz 晶振，以及 EtherCAT 从站芯片所需的 25MHz 晶振。EtherCAT 从站芯片同时还需要一个 512K 内存的 EEPROM 芯片，使用 I²C 通讯方式与从站芯片交换数据。另外，为了让关节在掉电的情况下可以保持当前位置，采用掉电短

接电机的两根相线的方式产生制动的效果，其制动因素在于电机相线短接后从输出端输入扭矩，相当于把电机作为发电机，显然有一定的阻力效果，选用常闭式光耦继电器，负载可达 1.5A。最后是指明灯电路，使用了一个红色 LED 和一个绿色 LED 表示关节驱控系统状态。

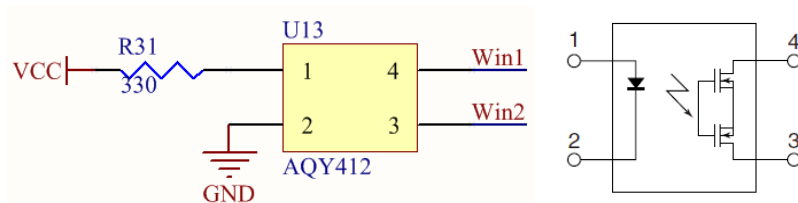
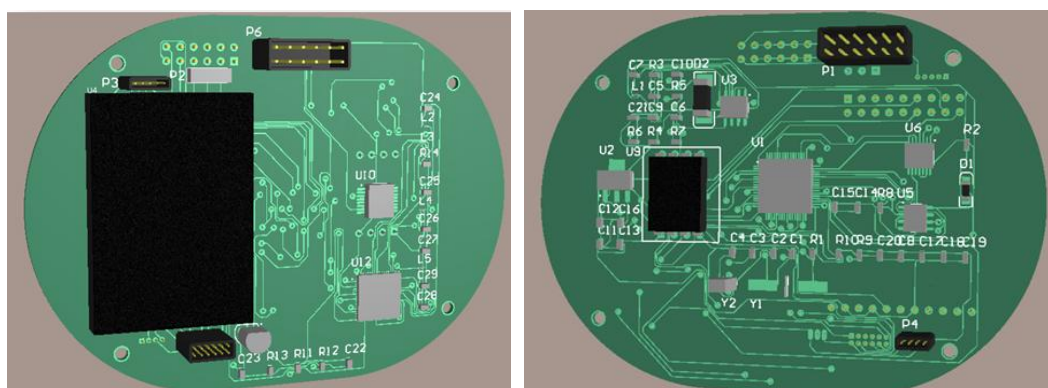


图 4-10 常闭式光耦继电器制动电路

4.3 PCB 设计与加工

完成了以上各个模块的电路原理图设计和主要芯片选型后，相应地设计其 PCB 布局走线图。在设计过程中，考虑到信号隔离与干扰的问题，将输入输出和驱动等大电流元件与处理器存储器等小信号元件分隔开摆放。还在正反两面元件信号层的基础上增加了中间的电源层和地层，加工为四层板使用，降低信号干扰，提高 PCB 稳定性。元件多选用贴片封装和 0603 封装，提高空间的利用率。另外在走线中选用 8mil 到 60mil 不等的走线宽来适应不同的电流需求。

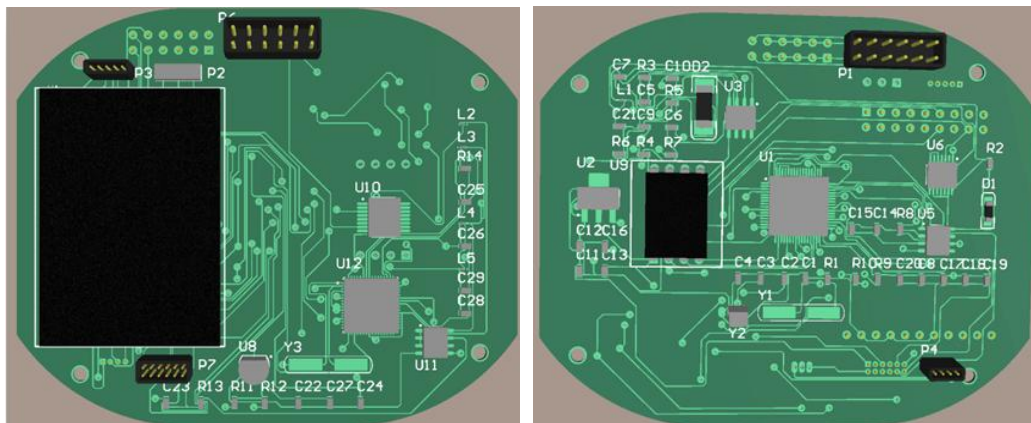
根据关节结构的不断变化，PCB 的外形和布局也有了多代的更替，其中变化较大的三个版本如下图 4-11 到图 4-14：



(a) PCB 正面

(b) PCB 背面

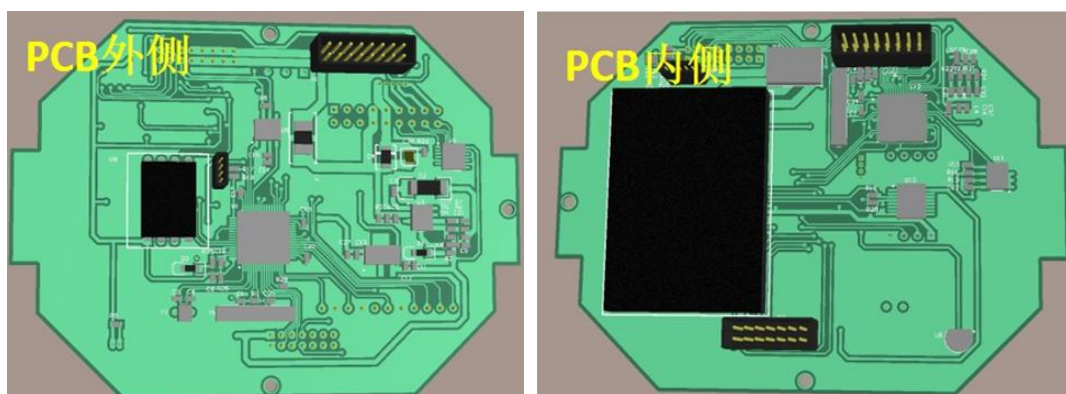
图 4-11 第一版 PCB 设计 3D 效果图



(a) PCB 正面

(b) PCB 背面

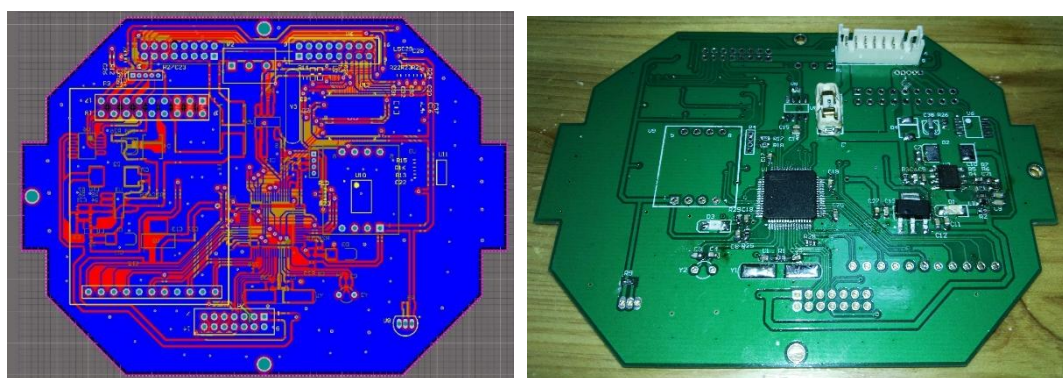
图 4-12 第二版 PCB 设计 3D 效果图



(a) PCB 正面

(b) PCB 背面

图 4-13 第三版 PCB 设计 3D 效果图

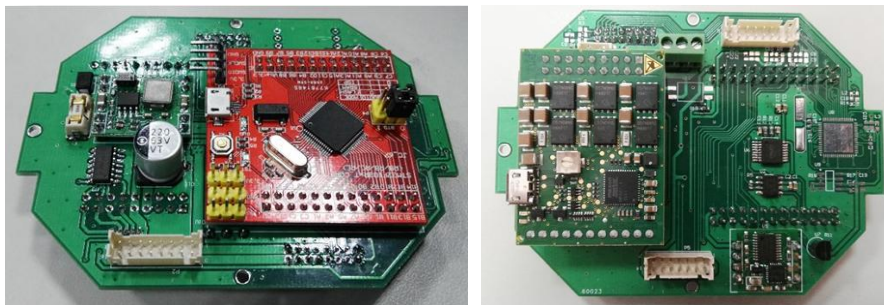


(a) PCB 设计图

(b) PCB 实物图

图 4-14 驱控一体关节 PCB 硬件

在测试以上电路板性能以后发现电路设计的问题，于是优化设计以后再次加工设计，最终使用的焊接好以后的 PCB 如下图 4-15:

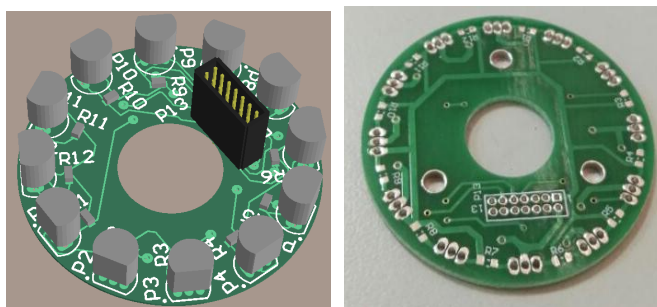


(a) PCB 实物正面

(b) PCB 实物背面

图 4-15 驱控一体关节最终 PCB

另外，在输出端还有一块定零位的霍尔 PCB，其设计图与实物图如图 4-16：



(a) 霍尔 PCB 设计图

(b) 霍尔 PCB 实物图

图 4-16 输出端霍尔 PCB 硬件

4.4 硬件功能测试

在完成以上的 PCB 设计加工后，将完整的 PCB 控制板投入到使用之前，先对各个关键功能进行测试。首先对电源模块进行测试，参照芯片本身的数据表，将各电源模块的输入接到额定电压附近，测试输出是否稳定，同时检测其带负载能力。

表 4-1 电源模块数据表

模块名称	降压芯片	输入电压	输出电压	输出电流
48V 转 5V	LM2596HV	45-60V	固定 5V	<3A
24V 转 5V	MP1584EN	18-28V	固定 5V	<3A
5V 转 4.3V	LM1117-4.3	<15V	固定 4.3V	<1A

其次对传感器数据进行测试，将各类传感器的读写程序烧录到关节控制器中，通过调试软件将这些测量值反馈到上位机。

表 4-2 传感器数据表

传感器	反馈量	范围	精度或频率
温度传感器	温度	-55℃ ~+125℃,	0.5℃
陀螺仪加速度计	加速度	±16g	100Hz
	角速度	±2000 °/s	100Hz
霍尔位置传感器	零位	开关量	15°
速度传感器	速度	4000rpm	0.35°
电流传感器	电流	0~5A	54.6kHz

由于通讯功能牵涉到上位机软件驱动部分，因此直接在上位机对整个机械臂进行演示

实验的时候进行测试，此处不予描述。

根据关节组件的实际情况设计了两款 PCB，相应的制定以下的参数列表便于用户选用。

表 4-3 PCB 参数列表

PCB 适用关节	非中空型关节	中空型关节
单板最大功耗	100W	110W
最大电流	5A	
额定电流		2.78A
工作电压	18-28V	45-60V
PCB 尺寸	94mm*70mm*12mm	Φ71mm*18mm
PCB 层数	2 层信号+电源层+地层	
总线最大电流	12A	20A
驱动器最大功率	90W	100W
总线线缆	10pin 供电+2pin CAN+4pin EtherCAT	

4.5 本章小结

在明确了本课题所研究的驱控一体关节特点以后，相应地设计了用于完成电机驱动、数据采集、总线通讯的电路原理，并将其设计为实际电路板后加工制造。经过测试后以上功能均可正常使用，以此电路板为硬件基础，可以进行后续的研究工作。

第五章 关节负载测试

5.1 单关节负载测试

在我们的单关节和 PCB 板加工完毕后,我们对其进行了组装,并且对于单关节的负载进行了实验。

首先,建立一体化关节的性能测试系统,由于实验设备有限,没有专门的设备来检测一体化关节的输出力矩,所以本文采用简单的方法来测量一体化关节的输出力矩,实验设备如图 5-1 所示。

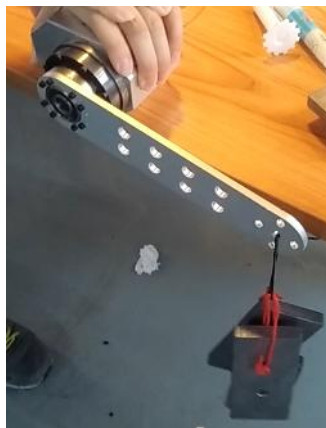


图 5-1 单关节负载实验

为了测试我们一体化关节输出力矩,我们制作了一些标准质量块,如图 5-2 所示。每个质量块是 1kg,回转半径为 0.2m,所以每个质量块会使负载力矩增加 2N,我们把它们用钩子一个接一个地挂到一体化关节上面,直到负载使我们的电机达到最大额定电流值,这个时候的所加的负载力矩我们就认为是我们关节的最大转矩值。



图 5-2 标准质量块

我们开始在我们的关节上开始增加负载,在转速稳定后记录相应的电流值,我们测得了不同负载下电机的电流值,如下图 5-3 所示。

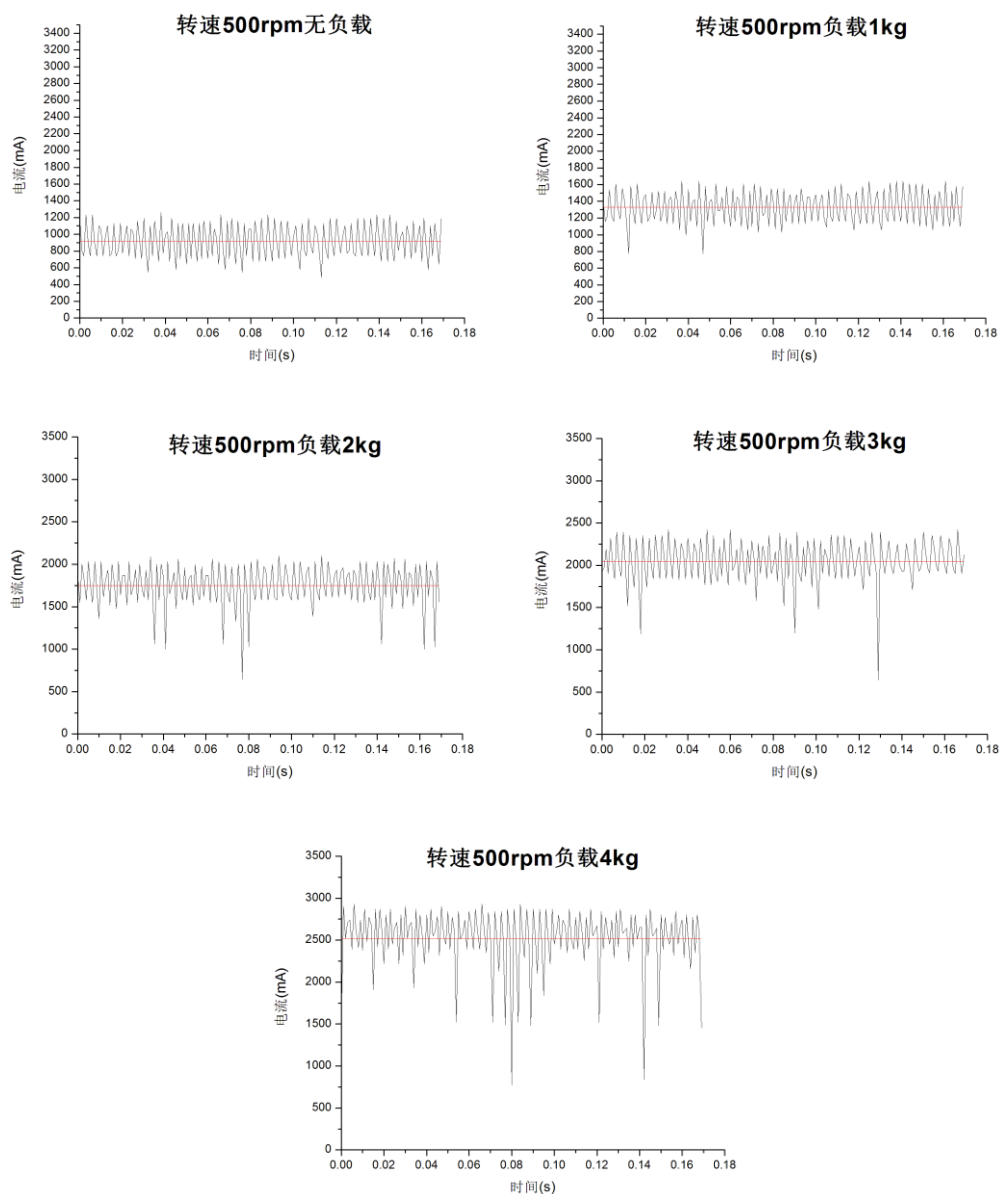


图 5-3 500rpm 时不同负载下的电流值详细图

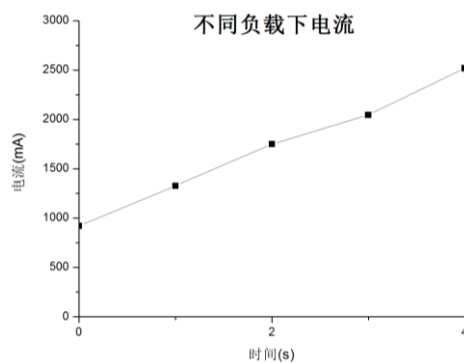


图 5-4 500rpm 时不同负载下的电流折线图

当电流值超过电机的额定电流值后结束，负载与电机电流值的对应关系，如上图 5-4 所

示，由图中可以看出我们关节的最大转矩大概是 $8\text{N}\cdot\text{m}$ 左右，略小于我们的理论计算值，这可能是由于关节内部摩擦造成，测试验证了我们机构和 PCB 设计的合理性，。

5.2 多关节运动测试

单关节测试完成后，我们利用两个关节和两个连杆，搭建了一个两自由度的演示系统，演示系统如下图 5-5 所示，该系统可以根据电脑传过来的指令，进行相应的动作，验证了我们整个系统功能的实现。

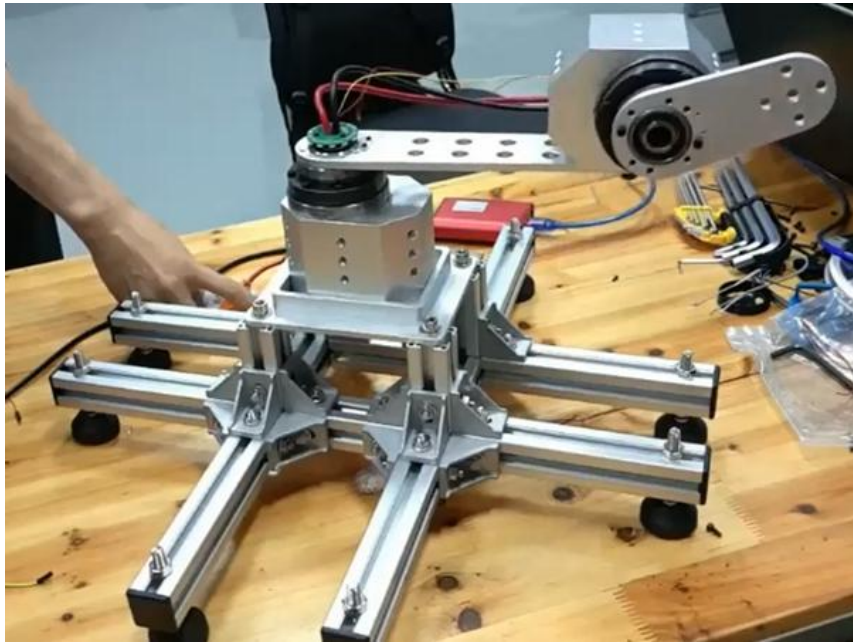


图 5-5 演示系统

第六章 总结

随着现代社会的发展,服务业的增长越来越迅速,人员的需求量日益增长,但是我国的人口红利正在逐渐消失,服务业的成本也在逐渐提升,引入服务型机器人就成为了一种必然的趋势,目前,我国机器人的销量全球领先,并且还在稳步增长,但是传统的服务型机器人成本较高,功能针对性强,不通用,这些都在一定程度上限制了服务机器人的大规模应用。模块化和组件化技术被公认解决以上问题的最有效方法。机电一体机器人关节模组可以利用关节组件通过“搭积木”重构的方式进行重新组合,满足不同用户对于不同任务的使用需求。

本文在经过对于国内外科学研究和商业产品调研后,总结并分析了当前面向服务机器人的关节组件研究特点,在确定了关节组件的研发目标后,设计并制作了多款集成驱动和控制的大扭矩、轻量化机器人关节模组,并以此为实验设备,测试关节运动控制方法的有效性,通过总线通讯接入上位机软件驱动,验证完整机械臂的控制效果。

研究课题共得出以下成果:

1. 设计了半中空和中空两种驱控一体机器人关节组件的机械结构,选用大扭矩、小体积的直流无刷电机和大减速比的中空型谐波减速器,将关键元件集成到一个紧凑的关节结构内,并采用中空走线,避免了磨损。
2. 在关节外部多面设计了连接孔,方便用户完成更多元的连接搭建,并且制作出了关节和连接件的选型表,用户可以根据自己的使用场合,通过查询选型表购买自己所需要的关节和连接件。
3. 提出了驱控一体的集成控制系统,并设计其硬件 PCB 电路,将驱动、控制芯片和各类传感器及其周边电路集成到一块 PCB 上。将其嵌入机械结构设计中,接插件可以满足牢固连接和快速连接的要求。
4. PCB 板中集成了两种通讯模块,为用户的开发提供了选择。同时还引入了 EtherCAT 通讯方式,在硬件上加入 EtherCAT 从站芯片电路,将 EtherCAT 这种更优的通讯方式应用在了标准化的模块关节中。

驱控一体关节组件技术包含了机器人研究中的许多关键技术,各个技术的深入研究都有较大难度,总结以下方面可以继续深入研究:

1. 考虑到现有电机及谐波减速器的限制,设计不依赖于谐波减速器的减速机构,并使用特制的电机来缩小轴向尺寸,使电机结构与减速器结构达到更好的配合,使关节组件更加紧凑。
2. 使用自主研发的驱动器,替换目前集成的 Maxon 驱动器。
3. 优化关节和连杆的外观,将走线封装进连杆中,并适当改变连杆的长度,使得组成的机械臂可以有更大的工作空间和灵活性。

参考文献

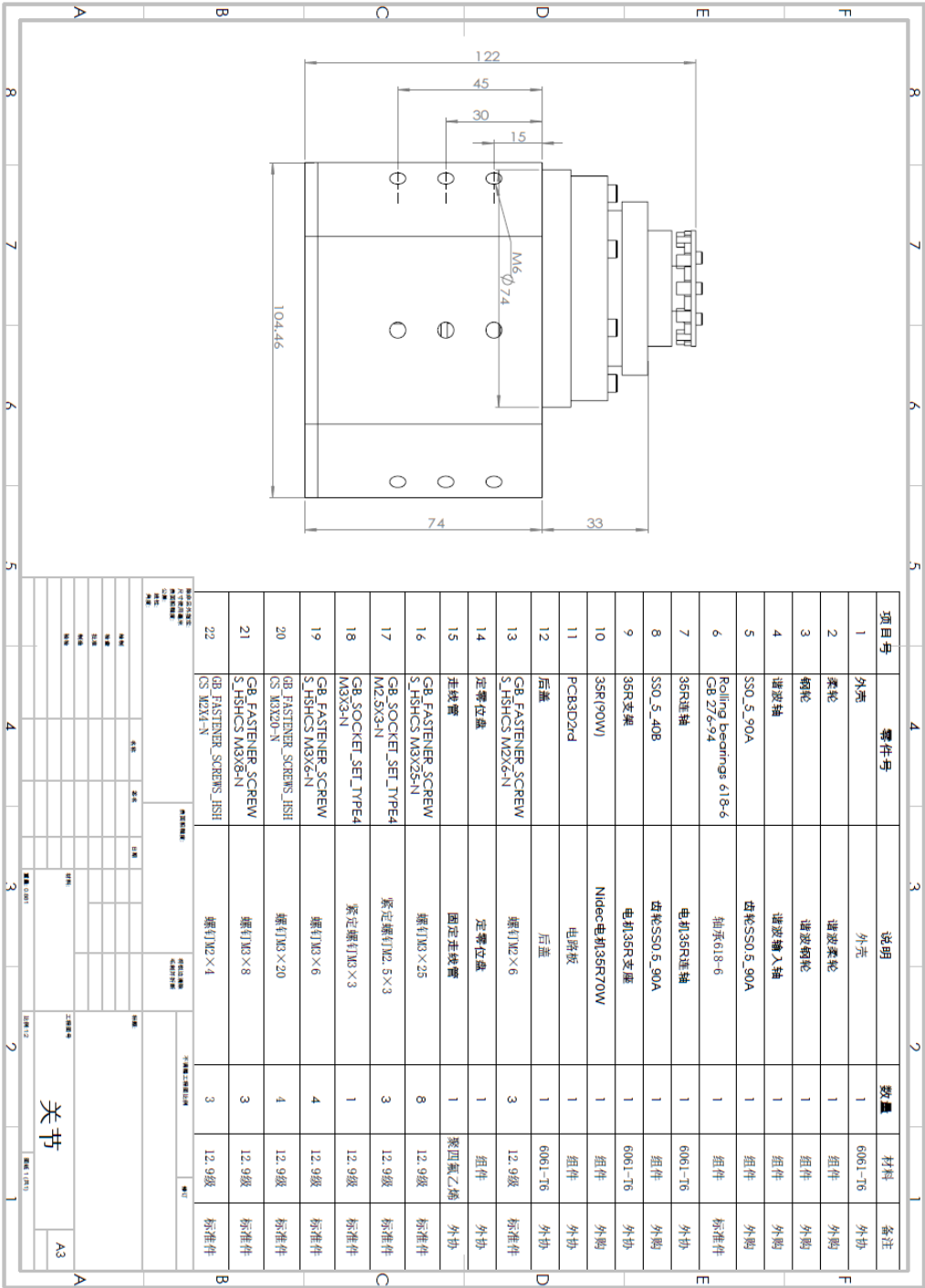
- [1] Pagala P, Ferre M, Armada M. Design of modular robot system for maintenance tasks in hazardous facilities and environments[C]//ROBOT2013: First Iberian Robotics Conference. Springer International Publishing, 2014: 185-197.
- [2] Wang P, Cao Q, Gu K. The modular robot joint design and experience verification for small openings and enclosed space[C]//Information and Automation (ICIA), 2014 IEEE International Conference on. IEEE, 2014: 897-901.
- [3] 魏延辉,朱延和,赵杰等.基于柔性化工作的可重构机器人系统设计[J].吉林大学学报(工学版),2008,38(2):449-453.
- [4] Schunk. Description of Gripping System Type: PW V6 [EB/OL]. [2016-12-15]. https://cn.schunk.com/cn_en/gripping-systems/series/pw-v6/.
- [5] IGUS. Robolink - Components kit to make movable robotic systems [EB/OL]. [2016-12-15]. http://www.igus.com/wpck/17210/productoverview_robolink#Section_4.
- [6] DLR. ROKVISS - Robotics Component Verification on ISS [EB/OL]. [2016-12-15]. http://www.dlr.de/rm/en/desktopdefault.aspx/tabid-3825/5963_read-8761/.
- [7] Kinova Robotics. Assistive Robotics Actuator Type: K-58 & K-75+ [EB/OL]. [2016-12-15]. <http://www.kinovarobotics.com/innovation-robotics/products/actuators/>.
- [8] S. Shi, D. Wang, S. Ruan, R. Li, M. Jin and H. Liu, "High integrated modular joint for Chinese Space Station Experiment Module Manipulator," 2015 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), Busan, 2015, pp. 1195-1200.
- [9] 魏延辉. 可重构机器人运动及其控制的研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2008.
- [10] 王卫忠. 可重构模块化机器人系统关键技术研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2007.
- [11] Yim M, Shen W M, Salemi B, et al. Modular Self-Reconfigurable Robot Systems [Grand Challenges of Robotics][J]. Robotics & Automation Magazine IEEE, 2007, 14(1):43-52.
- [12] 刘明尧, 谈大龙, 李斌. 可重构模块化机器人现状和发展[J]. 机器人, 2001, 23(3):275-279.
- [13] Østergaard, Esben Hallundbæk, Kassow K, Beck R, et al. Design of the ATRON lattice-based self-reconfigurable robot[J]. Autonomous Robots, 2006, 21(2):165-183.
- [14] Johansson B, Pettersson M, Ölvander J. A Component Based Optimization Approach for Modular Robot Design[C]// ASME 2007 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. 2007:911-920.
- [15] Goldenberg A A, Kircanski N, Kircanski M, et al. Reconfigurable modular joint and robots produced therefrom: CA, US6084373[P]. 2000.
- [16] Deng J, Wang P, Meng Q, et al. Design and Development on a Reconfigurable Modular Joint of the Robot Arm[M]// Advances in Reconfigurable Mechanisms and Robots II. Springer International Publishing, 2016.
- [17] 张波, 吴正勇, 周保牛. 双臂机器人模块化关节与中心轴制造工艺研究[J]. 现代制造技术与装备, 2016(6):91-92.
- [18] 吴文强, 管贻生, 朱海飞, 等. 面向任务的可重构模块化机器人构型设计[J]. 哈尔滨工

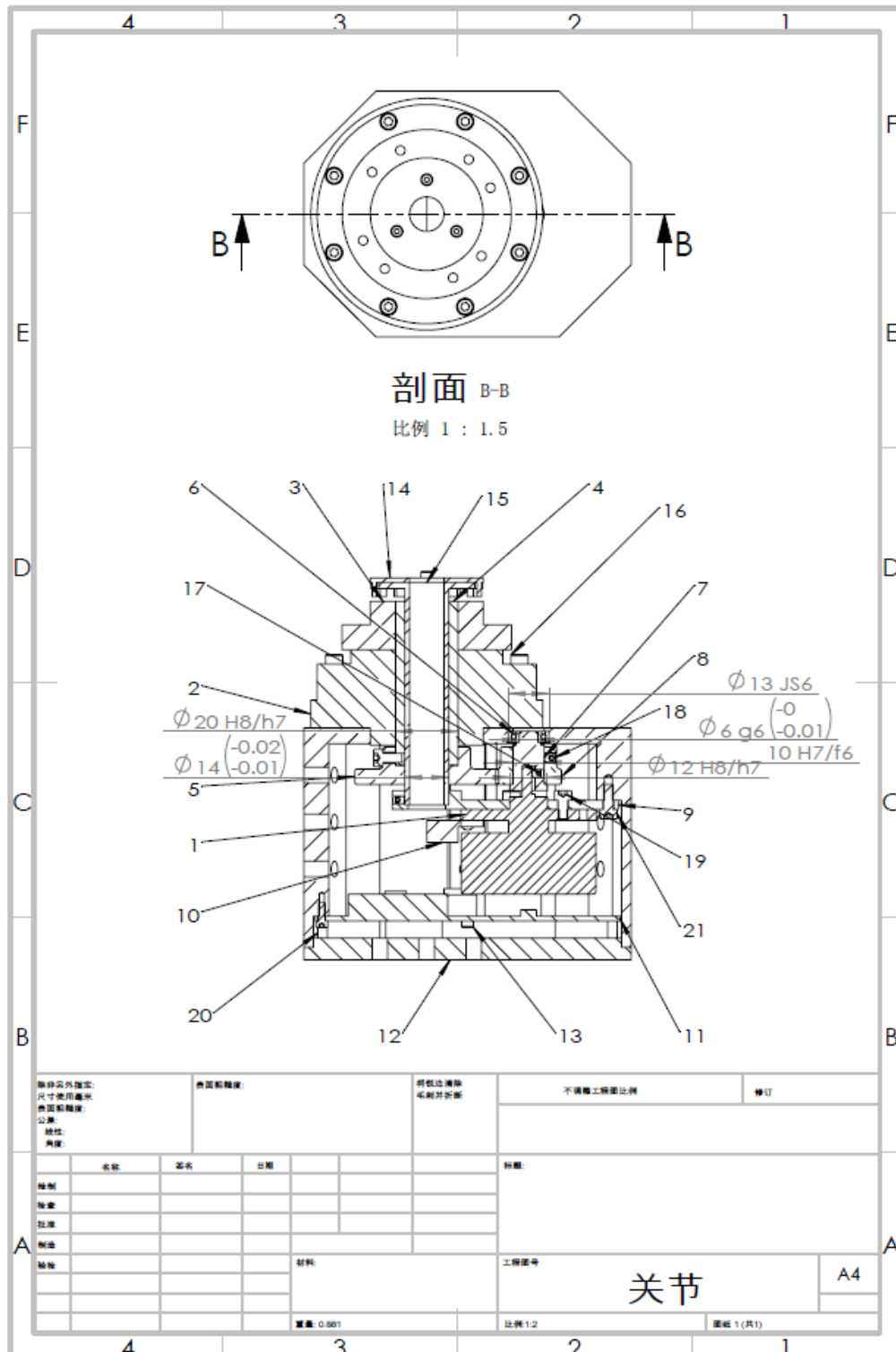
- 业大学学报, 2014, 46(3): 93-98.
- [19] 闫继宏, 郭鑫, 刘玉斌, 等. 一种模块化机械臂的设计与运动学分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2015, 47(1):20-25.
- [20] 周冬冬, 王国栋, 肖聚亮, 等. 新型模块化可重构机器人设计与运动学分析[J]. 工程设计学报, 2016, 23(1):74-81.
- [21] Ahmad S, Liu G. Model-based fault detection of Modular and Reconfigurable Robots with joint torque sensing[C]// IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. IEEE, 2013:134-139.
- [22] Lohmeier S, Buschmann T, Ulbrich H, et al. Modular joint design for performance enhanced humanoid robot LOLA[C]// IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA 2006, May 15-19, 2006, Orlando, Florida, Usa. DBLP, 2006:88-93.
- [23] 高文斌, 王洪光, 姜勇, 等. 模块化可重构机器人标定方法研究[J]. 机械工程学报, 2013, 49(17):92-100.
- [24] 曹其新, 张镇, 张炜. 基于 CORBA 技术的机器人模块化设计的研究进展[J]. 机器人技术与应用, 2007(3):20-24.
- [25] Oh Y T. Development of Humanoid Joint Module for Safe Human-Robot Interaction[J]. Lancet, 2014, 9(4):264-271.
- [26] Hartono P, Nakane A. Robotics Modules with Realtime Adaptive Topology[J]. 2011, 3(3):185-192.
- [27] Kim H S, Kim I M, Cho C N, et al. Safe joint module for safe robot arm based on passive and active compliance method[J]. Mechatronics, 2012, 22(7):1023-1030.
- [28] K. Wang, H. Qian, Y. Yang and Y. Xu, "A novel Differential Modular Robot Joint — Design and implementation," 2013 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), Shenzhen, 2013, pp. 2049-2054.
- [29] Min J K, Yu H S, Ahn K H, et al. Robot Joint Module Equipped with Joint Torque Sensor with Disk-Type Coupling for Torque Error Reduction[M]//Intelligent Robotics and Applications. Springer International Publishing. 2015:371-378
- [30] Fang L, Luo M, Chen J, et al. Dual-arm robot modular joint design and error analysis[M]. 2014.
- [31] Kim I M, Kim H S, Song J B. Design of joint torque sensor and joint structure of a robot arm to minimize crosstalk and torque ripple[C]//International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence. IEEE, 2012:404-407.
- [32] Gerd Hirzinger, Klaus Landzettel, Bernhard Brunner, et al. DLR's robotics technologies for on-orbit servicing [J]. Advanced Robotics, 2012, 18(2):139-174.
- [33] 强欢.六自由度机械臂关节模块化技术研究[D]. 北京邮电大学, 2015
- [34] 孙健鹏. 模块化可重构机器人控制系统的研究与设计[D]. 哈尔滨理工大学, 2013
- [35] 李宪华, 郭永存, 张军, 等. 模块化六自由度机械臂逆运动学解算与验证[J]. 农业机械学报, 2013,44(4):246-251
- [36] 张飞.大型空间机械臂关节性能测试平台研制及参数辨识研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2012
- [37] 付大鹏.服务机器人手臂模块化关节的研制[D]. 哈尔滨工业大学, 2008 B.
- [38] Benhabib, M.Q. Dai, Mechanical design of a modular robot for industrial applications, Journal of Manufacturing Systems, Volume 10, Issue 4, 1991, Pages 297-306.
- [39] 魏延辉,朱延和,赵杰等.基于柔性化工作的可重构机器人系统设计[J].吉林大学学报 (工

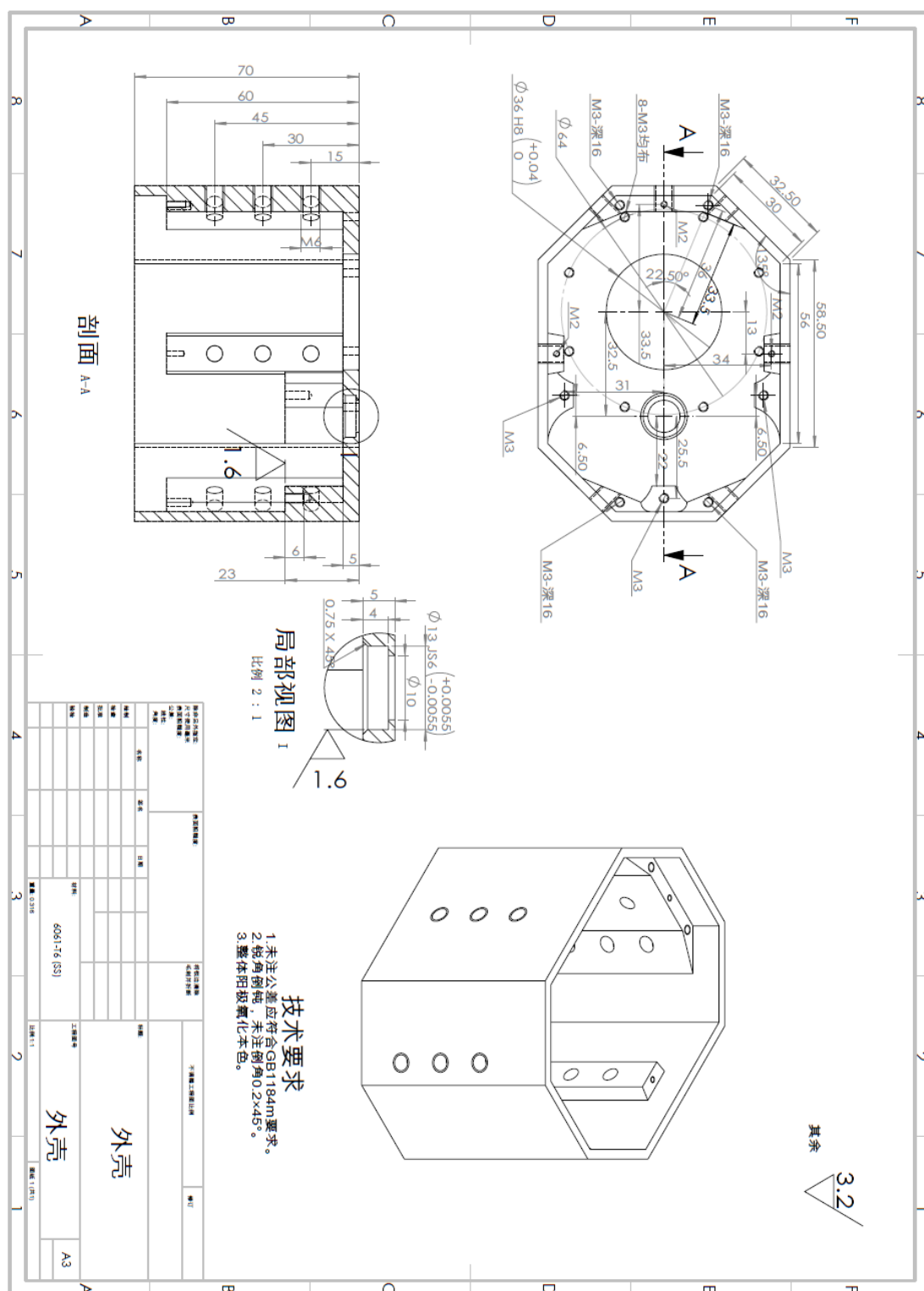
- 学版),2008,38(2):449-453.
- [40] 闫继宏,郭鑫,刘玉斌等.一种模块化机械臂的设计与运动学分析[J].哈尔滨工业大学学报,2015,47(1):20-25.DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.2015.01.004.
- [41] 莫维尼,王崧,刘丽娟,等.有限元分析:ANSYS 理论与应用[M].电子工业出版社,2013.
- [42] P. Wang, Q. Cao and K. Gu, "The modular robot joint design and experience verification for small openings and enclosed space," 2014 IEEE International Conference on Information and Automation (ICIA), Hailar, 2014, pp. 897-901.
- [43] Robotics A B B. ABB YuMi[J]. URL: <http://new.abb.com/products/robotics/yumi/>. Last visited, 2015, 9.
- [44] Siciliano B, Sciavicco L, Villani L, et al. Robotics: modelling, planning and control[M]. Springer Science & Business Media, 2010.
- [45] 蔡自兴. 机器人学基础[M]. 机械工业出版社, 2015.
- [46] 罗家佳,胡国清.基于 MATLAB 的机器人运动仿真研究[J].厦门大学学报(自然科学版),2005,44(5):640-644.DOI:10.3321/j.issn:0438-0479.2005.05.013.
- [47] 张艳丽,车金峰,李树军等.可重构模块化机器人正运动学和工作空间的分析[J].机械设计与制造,2010,(10):146-148.DOI:10.3969/j.issn.1001-3997.2010.10.057.
- [48] 徐建明,张健,吴世民,等.基于 ARM 的机械手运动控制系统设计[J].浙江工业大学学报,2014,42(3): 243-248.
- [49] 邱铁.ARM 嵌入式系统结构与编程[M].清华大学出版社,2009.
- [50] Li W, Guo L, Liu Z. Design of STM32-Based CANopen Motion Control Master in Transfer Robot[C]// Third International Conference on Instrumentation, Measurement, Computer, Communication and Control. IEEE Computer Society, 2013:1609-1612.

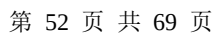
附录

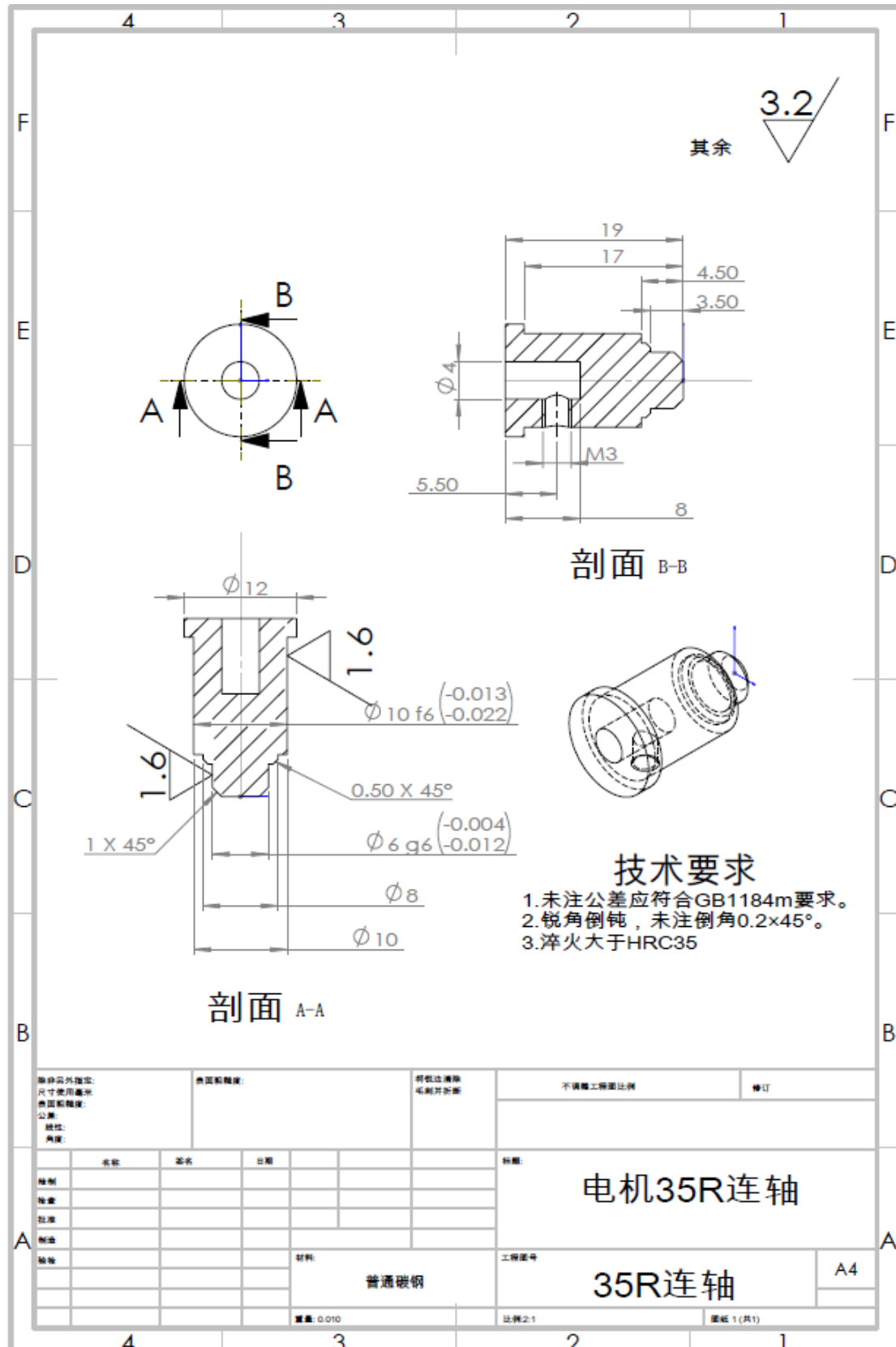
附录一 半中空关节加工图纸

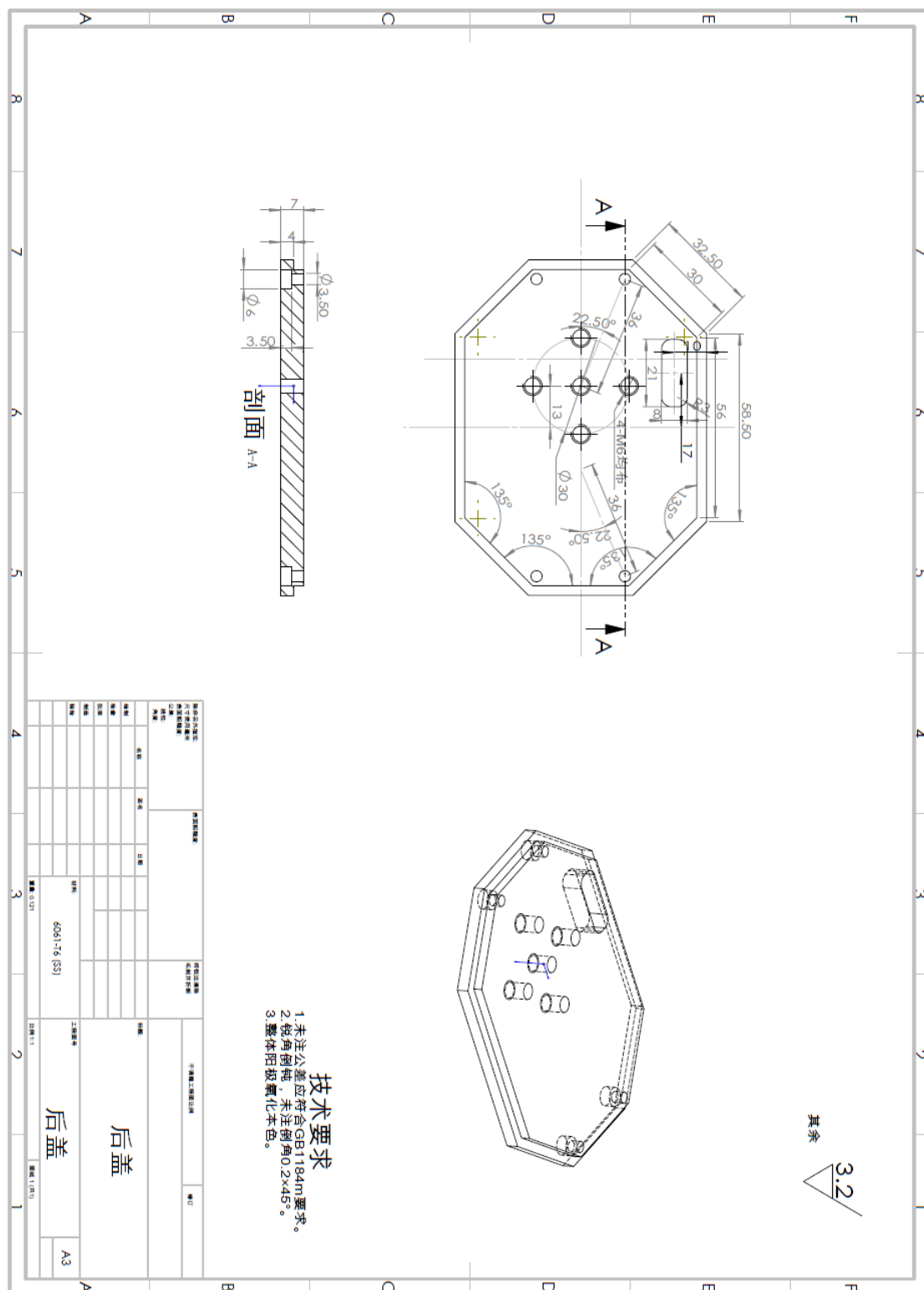


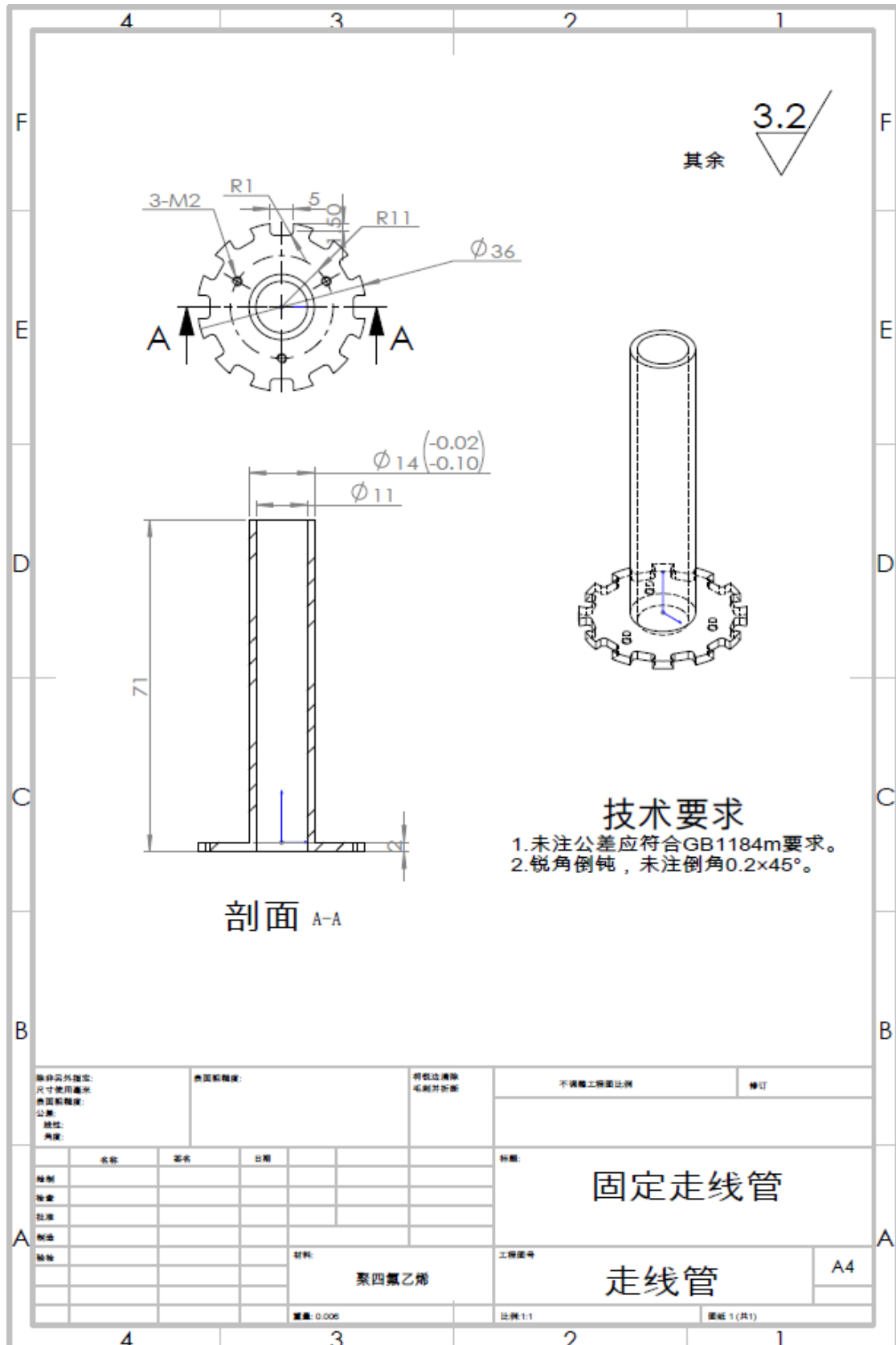


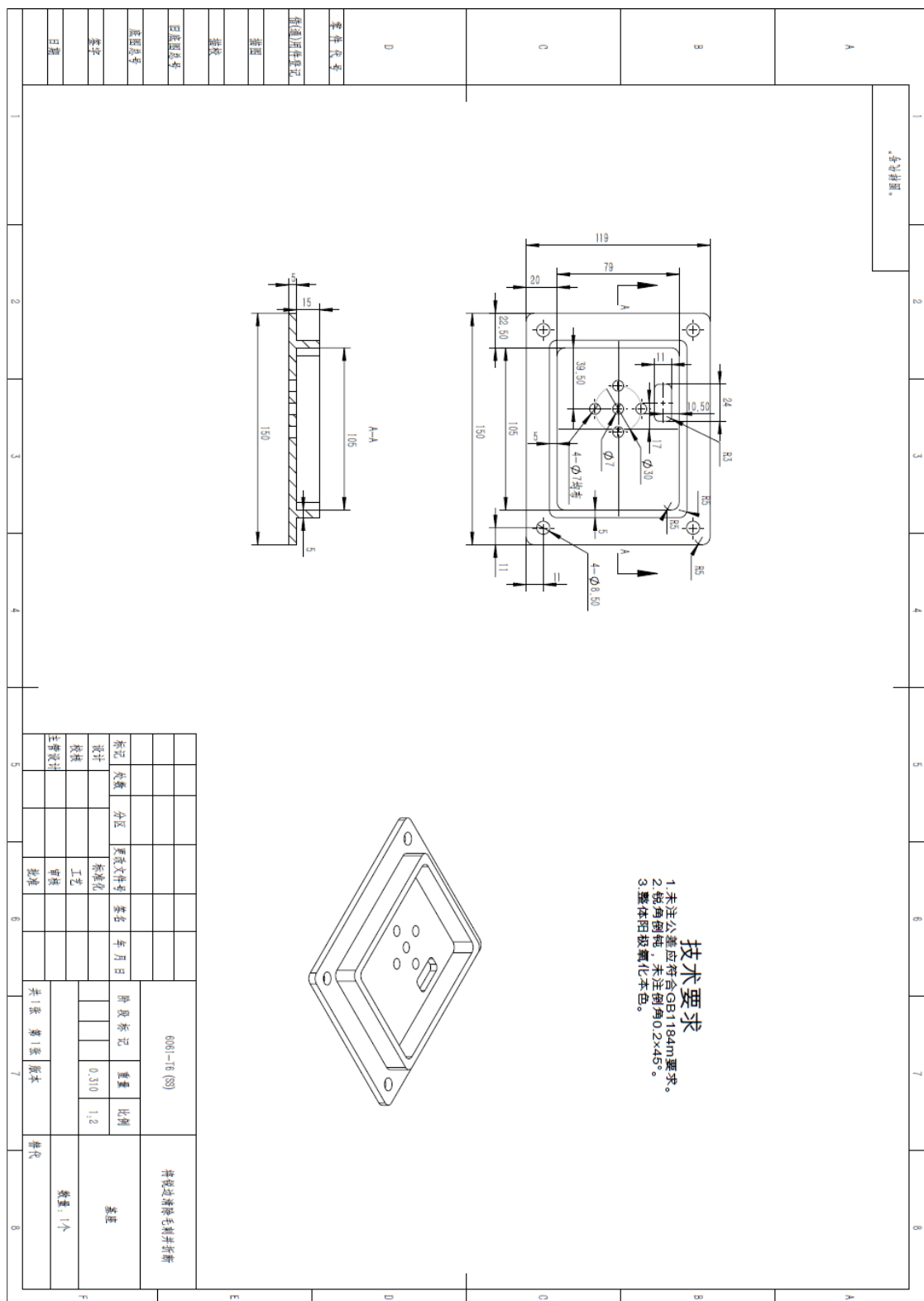


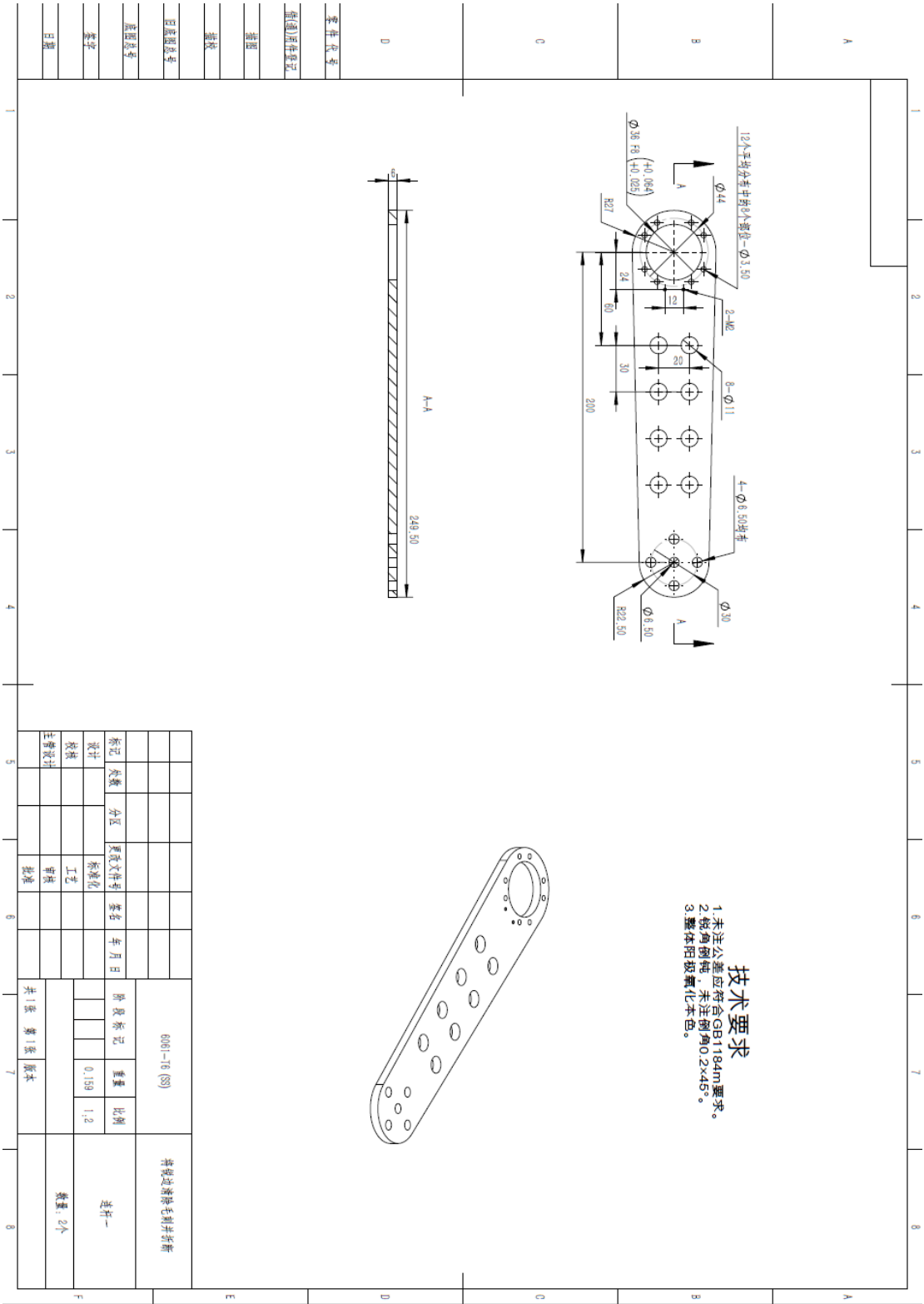


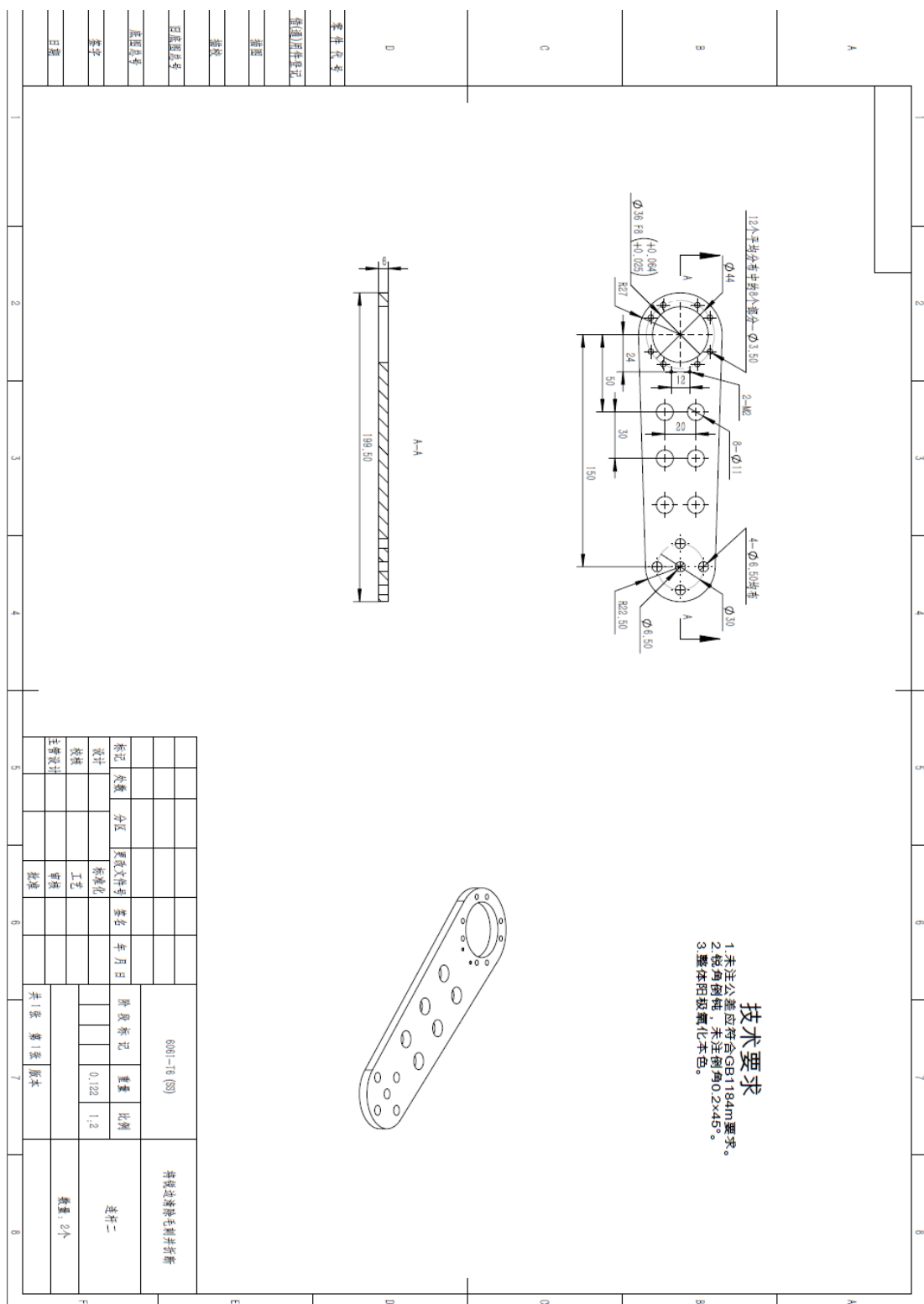


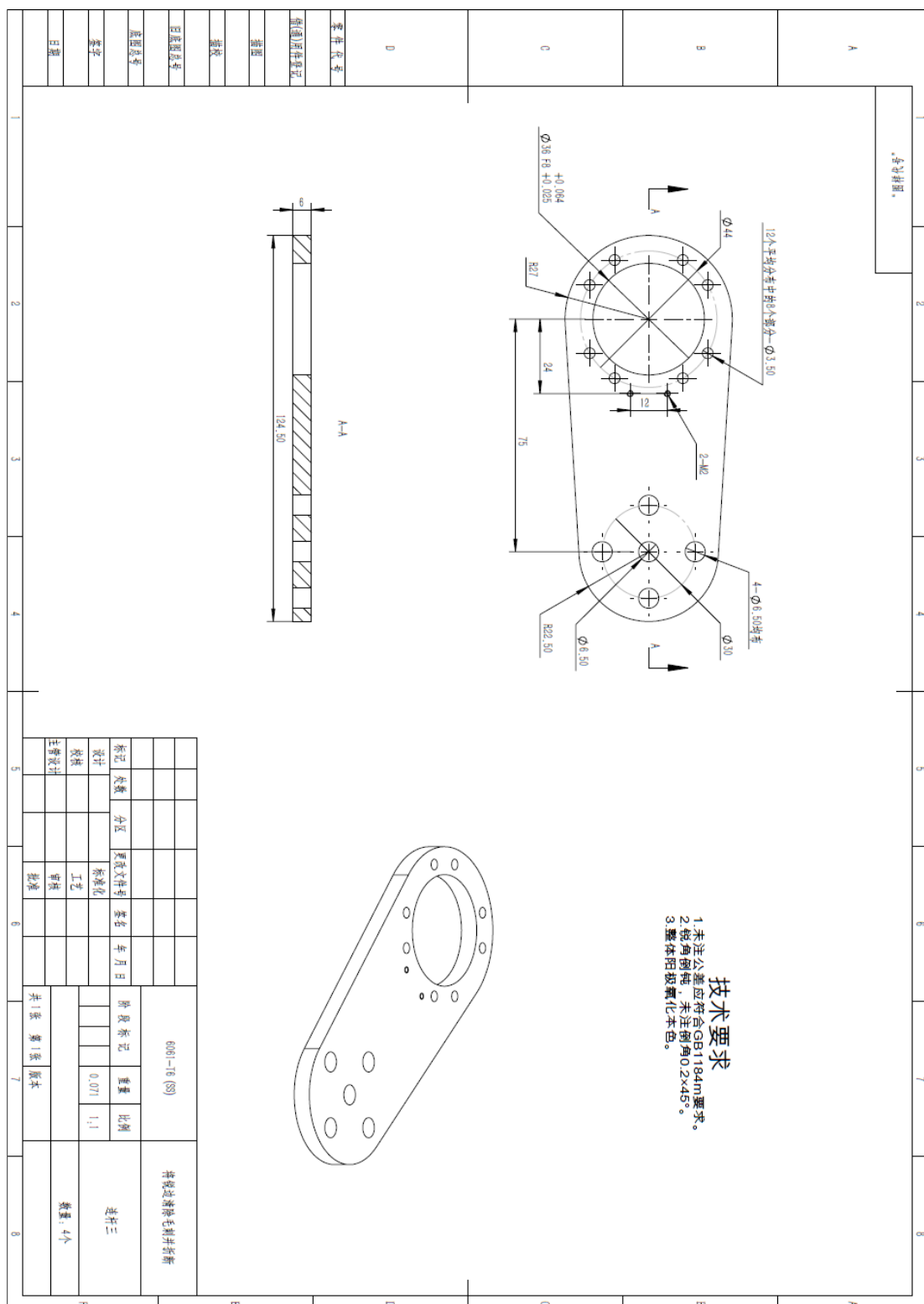


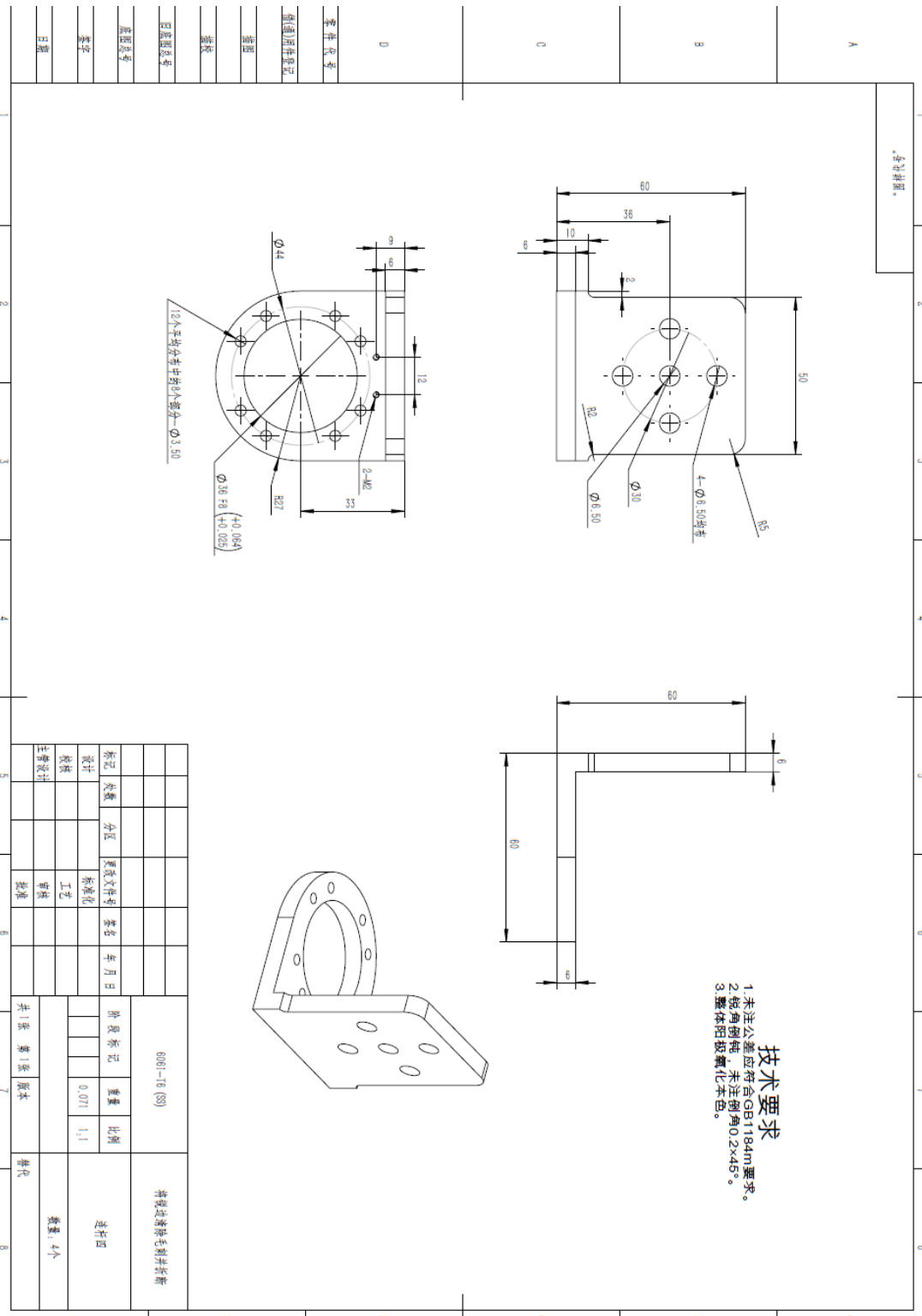








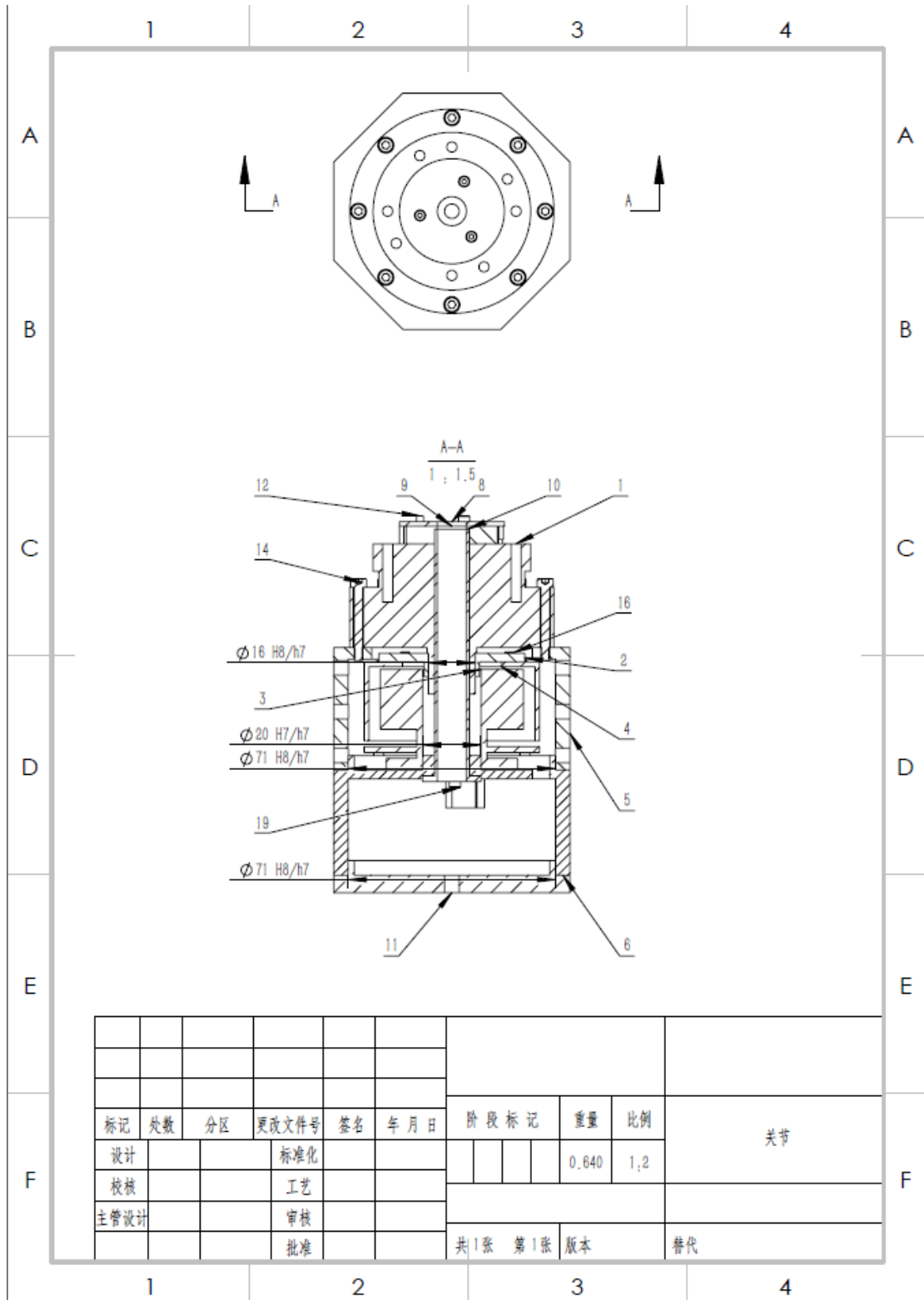


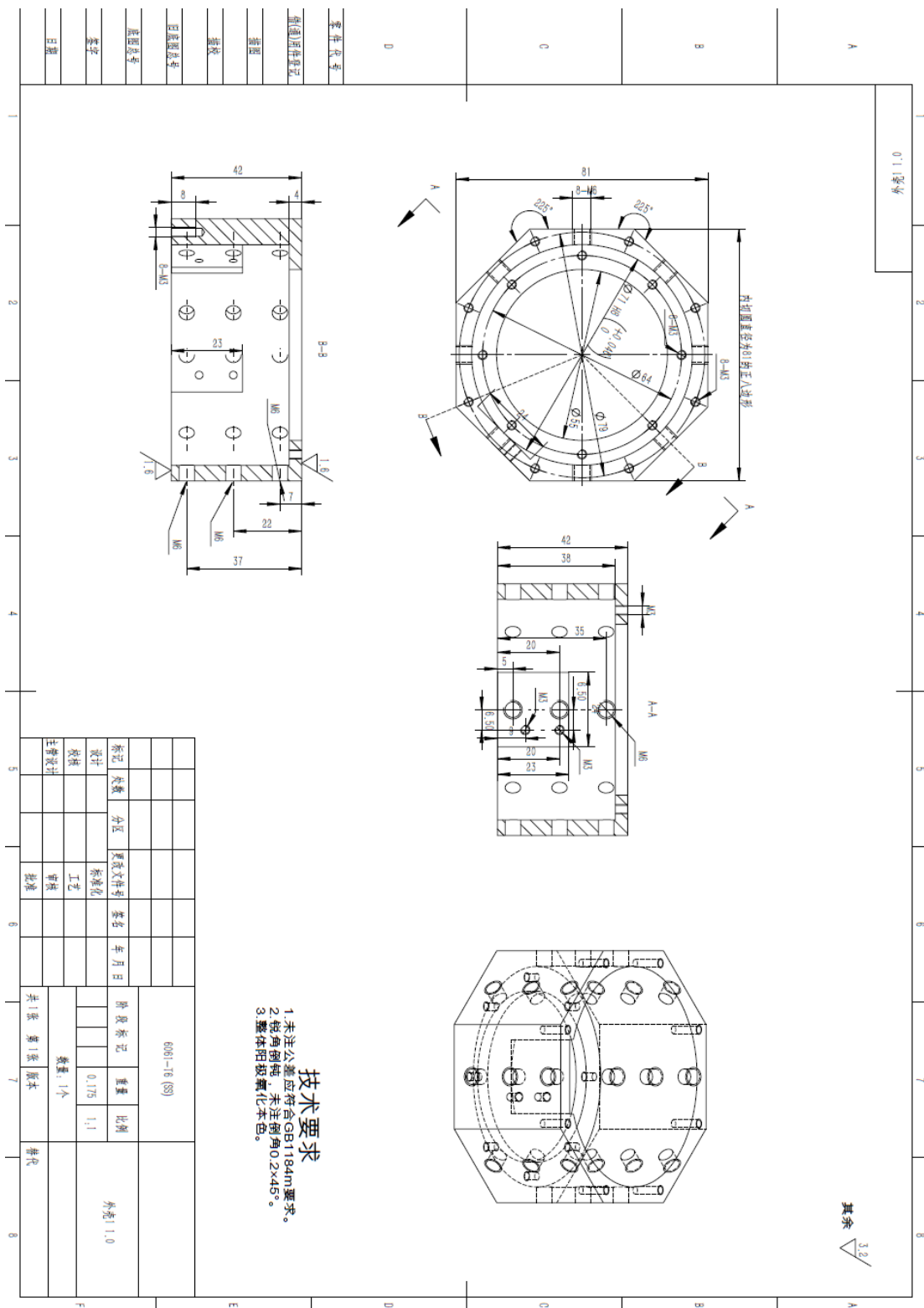


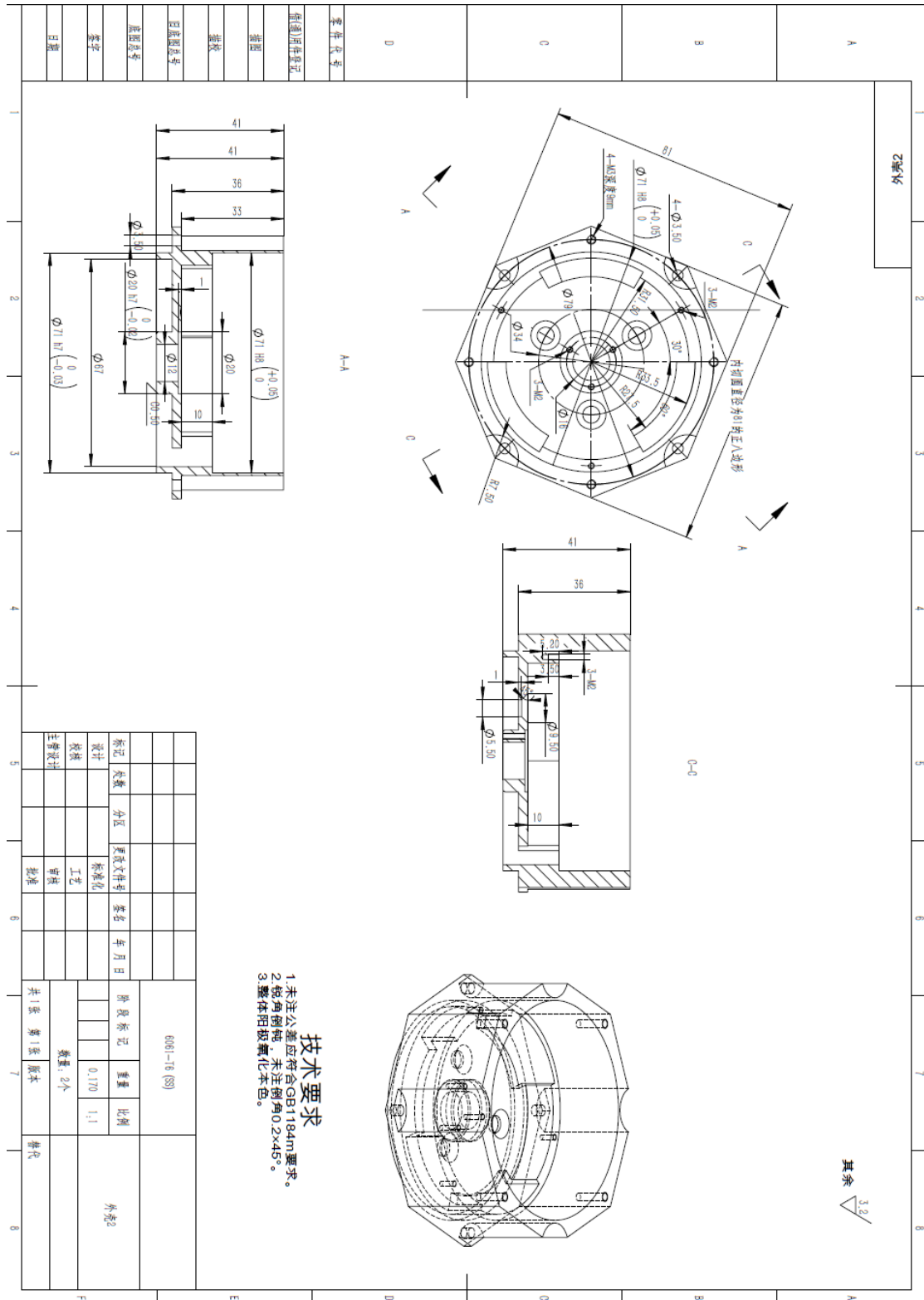


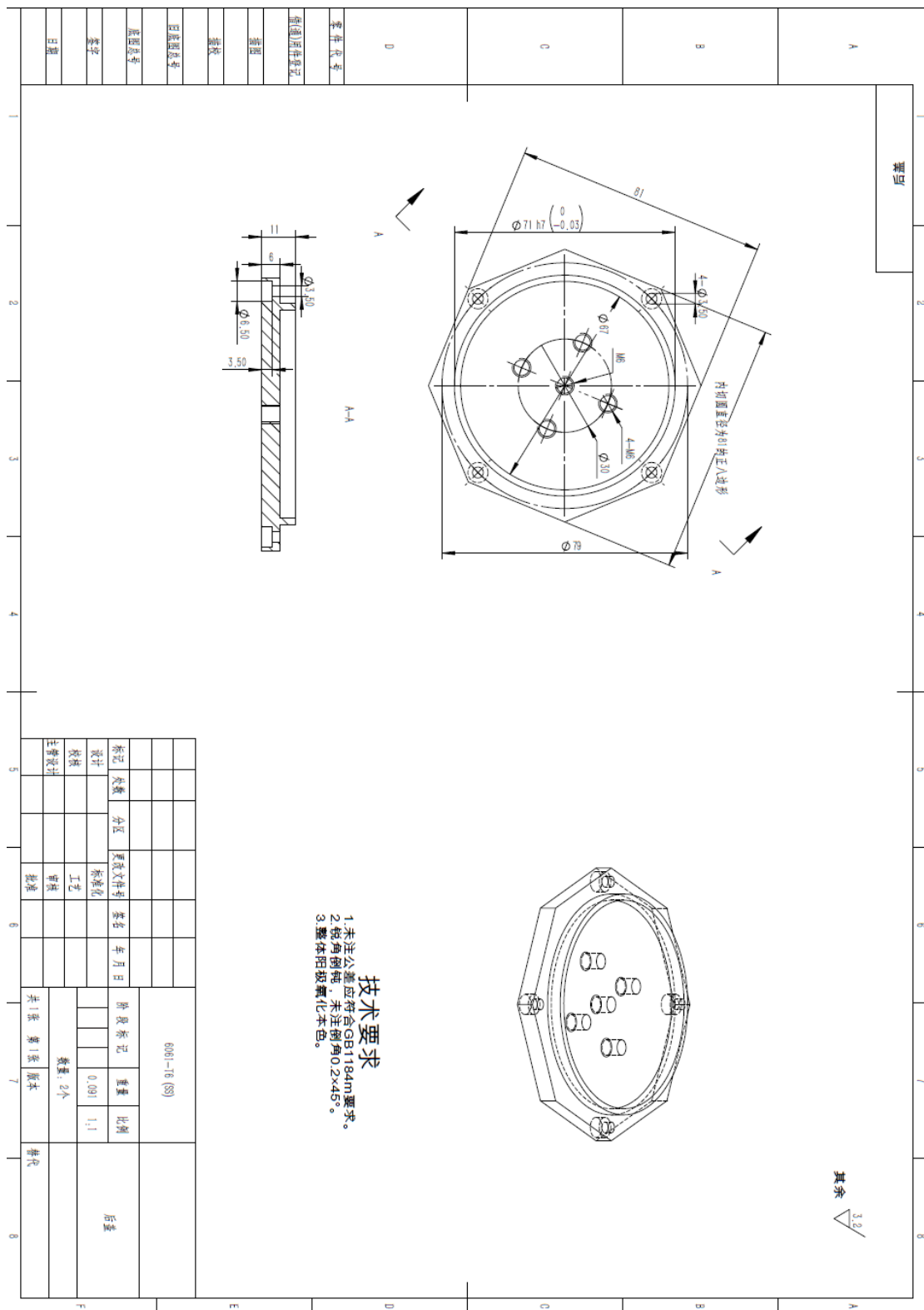
附录二 中空关节加工图纸

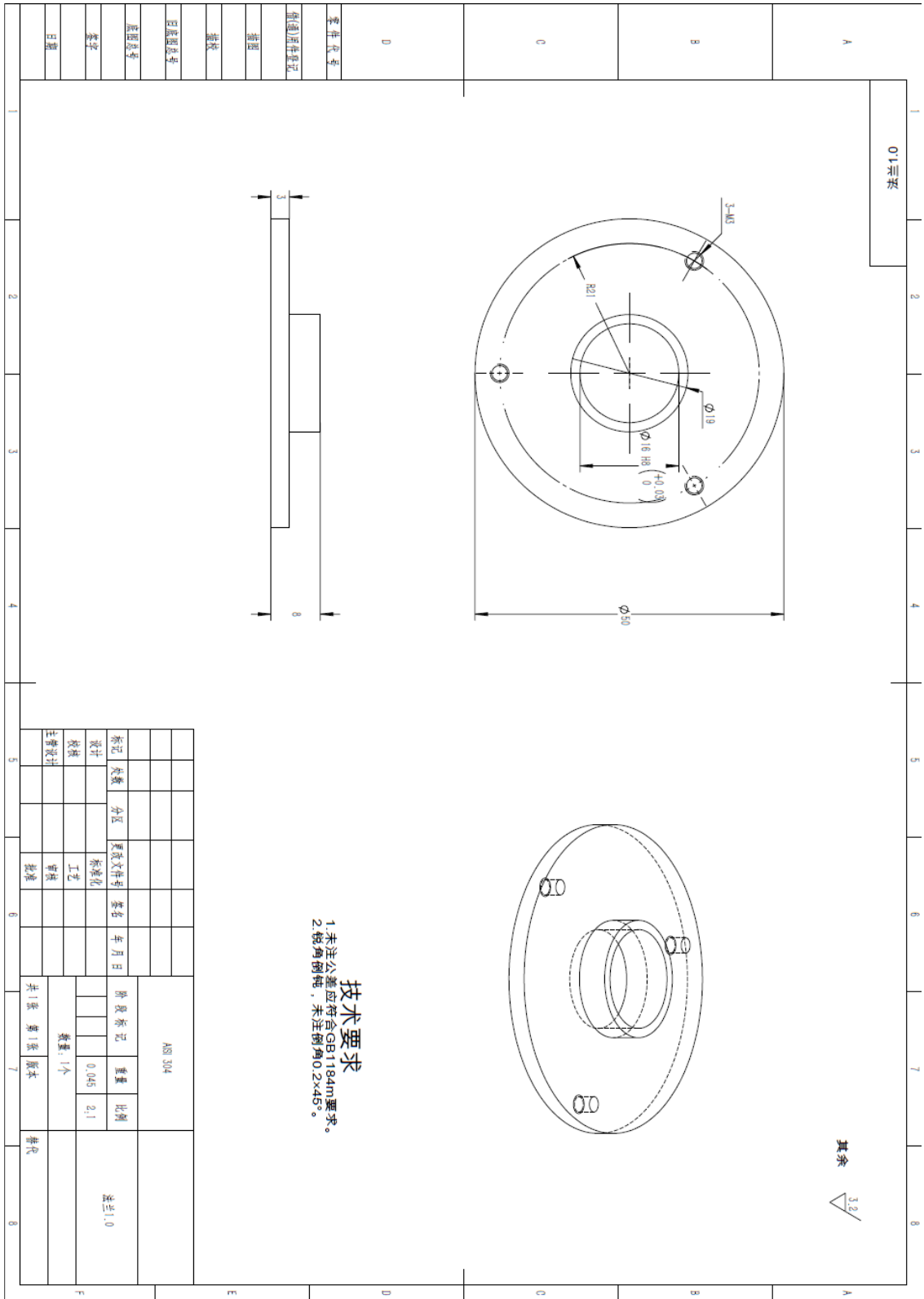
图 样										技 术 要 求										备 注																																																											
1										2										3										4										5										6										7										8									
1										2										3										4										5										6										7										8									
1										2										3										4										5										6										7										8									
1										2										3										4										5										6										7										8									
1										2										3										4										5										6										7										8									
1										2										3										4										5										6										7										8									
1										2										3										4										5										6										7										8									
1										2										3										4										5										6										7										8									
1										2										3										4										5										6										7										8									
1										2										3										4										5										6										7										8									
1										2										3										4										5										6										7										8									
1										2										3										4										5										6										7										8									
1										2										3										4										5										6										7										8									
1										2										3										4										5										6										7										8									
1										2										3										4										5										6										7										8									
1										2										3										4										5										6										7										8									
1										2										3										4										5										6										7										8									
1										2										3										4										5										6										7										8									
1										2										3										4										5										6										7										8									
1										2										3										4										5										6										7										8									
1										2										3										4										5										6										7										8									
1										2										3										4										5										6										7										8									
1										2										3										4										5										6										7										8									
1										2										3										4										5										6										7										8									
1										2										3										4										5										6										7										8									
1										2										3										4										5										6										7										8									
1										2										3										4										5										6										7										8									
1										2										3										4										5										6										7										8									
1										2										3										4										5										6										7										8									
1										2										3										4										5										6										7										8									
1										2										3										4										5										6										7										8									
1										2										3										4										5										6										7										8									
1										2										3										4										5										6										7										8									
1										2										3										4										5										6										7										8									
1										2										3										4										5										6										7										8									
1										2										3										4										5										6										7										8									
1										2										3										4										5										6										7										8									
1										2										3										4										5										6										7										8									
1										2										3										4										5										6										7										8									
1										2										3										4										5										6										7										8									
1										2										3										4										5										6										7										8									
1										2										3										4										5										6										7										8									
1										2										3										4										5										6										7										8									
1										2										3										4										5										6										7										8									
1										2										3										4										5										6										7										8									
1										2										3										4										5										6										7										8									
1										2										3										4										5										6										7										8									
1										2										3										4										5										6										7										8									
1										2										3										4										5										6										7										8									
1										2										3										4										5										6										7										8									
1										2										3										4										5										6										7										8									
1										2										3										4										5										6										7										8									
1										2										3										4										5										6										7										8									
1										2										3										4										5										6										7										8									
1										2										3										4										5										6										7										8									
1										2										3										4										5										6										7										8									
1										2										3										4										5										6										7										8									
1										2										3										4										5										6										7										8									
1										2										3										4										5										6										7										8									
1										2										3										4										5										6										7										8									
1										2										3										4										5										6										7										8									
1										2										3										4										5										6										7										8									
1										2										3										4										5										6										7										8									
1										2										3										4										5										6										7										8									
1																																																																															

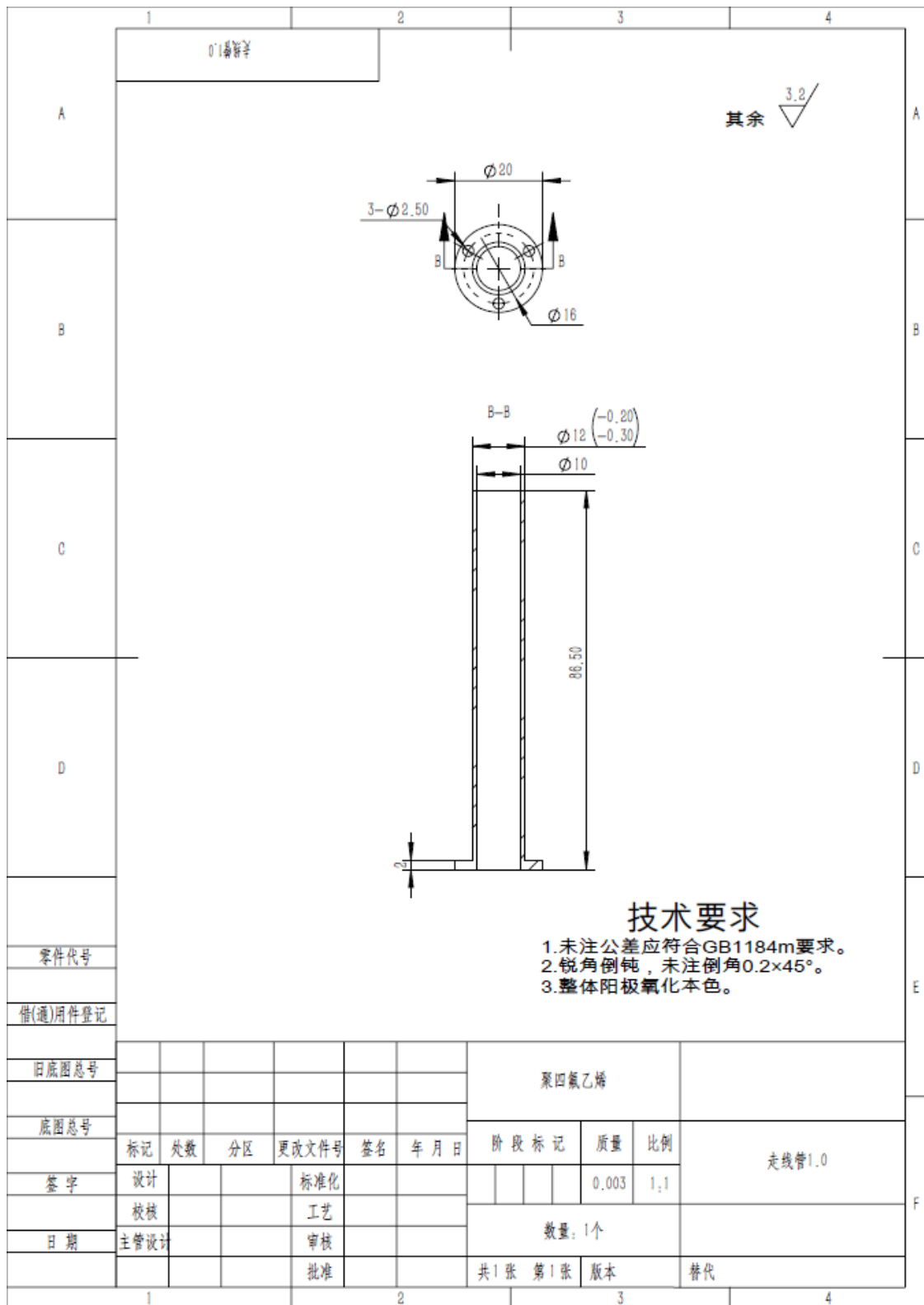












0.1局部放大																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
---------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

谢辞

在毕业设计期间，我们得到了导师曹其新教授为时五个多月的悉心指导，从而积累下了扎实的研究基础，最终顺利完成本课题的研究。曹老师精益求精的精神和敏锐洞察的思维都使我受益终生。由衷感谢曹老师在研究上为作者指明方向，为我们提供了有利的研究条件和环境。

课题研究还得到了新松机器人有限公司中央研究院邹凤山副院长的指导，邹院长作为本课题的企业导师，从产业界的角度对课题研究提出挑战和具体的研究建议。衷心敬佩邹院长对行业的宏观把握。谨向邹院长致以诚挚谢意。

感谢实验室冷春涛老师、朱笑笑老师等对课题研究的支持与帮助；感谢博士生王鹏飞、邱强、顾凯，陈鹏硕士等师兄在技术上的协助。

感谢养育我的父母，培养我的老师，关心我的朋友和同学，正是他们默默无闻的支持，保障了我顺利完成学业和课题研究。

THE DEVELOPMENT OF MECHANICAL AND ELECTRONIC ROBOT JOINT MODULES

With the sales of robots in China for four consecutive years ranked first, the robot industry has become the focus of development of all sectors of our country. Limited by the core technology and innovation, the core components of the robot has never been able to break through foreign brands monopoly. Service robot as one of its common core technology, one of the robot joint module technology has not yet formed a monopoly, the joint component is a key component of the joint robot, is the smallest unit of its movement. Single joint structure integration refers to the mechanical transmission structure, drive module, sensor communication and other components integrated in the same structure, to achieve the modular design of the joint. Currently on the market selling traditional robotic arm is limited by the comprehensive cost, market demand, batch and other restrictions, often not conducive to the user according to their own application scenarios custom robot. To this end, the concept of robot standard integration joints came into being. The use of integrated joint free combination of ways, not only can shorten the robot development cycle, but also to adapt to all kinds of special tasks, while reducing the cost of purchasing commercial robots. Therefore, the breakthrough of one of the robotic joint components will bring the huge market of service robots.

Compared with the traditional manipulator technology, the integrated joints have the advantages of light weight, compact structure and large torque, and make the robotic robotic arm do not need to be redesigned. Only need to choose the appropriate integrated joints to assemble and shorten the research and development Cycle, further reducing costs. The modularity of structural integration also reduces the cost of arm manufacturing and maintenance, and manufacturers no longer need to produce robots with different structures, but only need to produce a series of modular joints that reduce the difficulty of production, while the user to repair It is only necessary to replace the broken module can be, reducing the cost of maintenance. However, this also makes a lot of demands for the design of an integrated joint.

The integration of joint development is divided into four parts: institutional design, electrical hardware, drive control, software algorithms. For the service industry for the joint component of the application requirements, the function of the joint required a detailed analysis to determine the subject of the study to achieve the desired joint component function. The overall design simplifies the following functional objectives:

1. The mechanical and electrical connections between joints can be easily plugged quickly and plug and play
2. Joint structure can provide a variety of connections
3. Can collect the location, speed, current, temperature, acceleration sensing information
4. The user can use the position, speed control mode to control joint movement
5. At the same time provide CAN bus and EtherCAT dual communication mode

The institutional design mainly includes the design of the joint drive and transmission

mechanism, as well as the joint shell and the design of the joints between the joints. Driving one of the joint components as the smallest unit of the robot, the user can be our integrated joints applied to a variety of scenes, so our integration of the joint structure needs to provide users with a variety of connection programs, while the structure needs to be as compact as possible, Reduce weight, achieve lightweight design, and have high torque, allowing users to easily integrate our integrated joints in their own design. Through the quick connection of the joint link to achieve the robot assembly, thereby simplifying the user to develop custom robot arm steps. Compared with the fixed working parameters (such as the overall configuration, the working space and the maximum load of the end) of the common robot products, the integrated joint robot can meet the more flexible working conditions of the user. In the mechanical structure, Can be a variety of integrated joints for a variety of combinations, thus the construction of a variety of degrees of freedom, a variety of configuration of the joint robot; according to the actual operating space and workload requirements, the user can integrate the joint and connection components Models to adjust and select to meet the requirements of the conditions. This will not only enable the integration of joint robots can have a wider range of use, but also greatly shorten the development cycle of the robot products, effectively enhance the production efficiency.

The electrical hardware is controlled by the drive, and is limited to the design of the mechanism, which integrates the electrical components required for the drive control system into the joint mechanism and simplifies the connection of the joints. Standard robotic joints not only need to integrate the mechanical structure of the joint, for its corresponding drive system also has special requirements. Such as: the electrical connection between the joints to be able to easily connect, in the completion of mechanical installation at the same time to complete the electrical connection between the joints; drive circuit board to fit with the mechanical structure, reasonable layout in the joint structure; drive system in accordance with the host computer instructions Accurately drive the motor movement within the joint; drive system for the host computer feedback more inside and outside the sensor parameters for the host computer to do advanced control and planning to provide data reference; between the joints and joints and the host computer to be able to exchange in real time Data, so that control instructions and sensor data in the communication line stable and fast transmission. Single-joint drive system to ARM board as the core processing chip, by forwarding the host computer program to calculate the speed, current instruction to achieve the function of driving DC brushless motor. Periodically collect data from multiple types of sensors, the sensor data and drive feedback data via the CAN bus or EtherCAT bus to the host computer. The entire system by the robot joints of the bus power supply, the system to achieve 5V and 4.3V buck regulator, the supply of various types of chip operating voltage.

We build intelligent and connected building blocks for creating robotic solutions and uses these building blocks to deliver these solutions faster, better, and cheaper than current technology. Well-defined interfaces, internet-enabled connectivity, and smart software tools allow implementers to spend their time focusing on the task at hand rather than low-level implementation details, resulting in faster development. The flexibility and reconfigurability of these tools allow robotic solutions to be more appropriately customized for their tasks, resulting in better robots. Finally, these both result in solutions that are cheaper, both due to reduction in development time and because customization means that only necessary parts are purchased.

The mechanical and electronic robot joint modules that we develop allow engineers, researchers, and industrial integrators to quickly and easily create world-class custom robots of

any configuration. These actuators are packed with sensors that enable controllable position, velocity, and sensitive torque control as well as three axis inertial measurement.

Each module is a series-elastic actuator that integrates a brushless motor, geartrain, spring, encoders, and control electronics into a compact package that runs on anything 220V and communicates using CAN/EtherCat.

This module is designed to function as a full-featured robotic component as opposed to a simple servo motor. The output rotates continuously, requires no calibration or homing on boot-up, and contains a thru-bore for easy daisy-chaining and wiring. This enables these modules to be used in everything from wheeled robots to multi degree of freedom collaborative robotic arms.

To sum up, this thesis develops a series of mechanical and electronic robot joint modules, whose key thought is to develop multiple types of modular robotic joint, and combine these joints to meet particular needs of configuration and parameters in a similar way as building Lego blocks. After determining the use requirements, users can select the desired joint according to the selection table. Users are free to program and control the robot through short-time learning of the software, thus broaden the application of robot in service, medical and industry.