

## 摘 要

本文以基于柔性铰链的微动工作台为研究对象，首先了解了微动工作台及柔性铰链的发展现状，研究了其一般设计选用方案，并分析了各种方案的优势与局限。然后对基于柔性铰链的微动工作台的总体结构设计、运动驱动系统设计、控制系统设计等主要设计过程做了一定的研究。

本文以一个压电陶瓷驱动的串联二维微动工作台机构作为设计示例，说明了基于柔性铰链的微动工作台的一般设计过程。设计了用于微动工作台的模块化柔性铰链机构，对柔性铰链机构做了有限元仿真分析，并进行了结构优化，最后表明设计的柔性铰链机构具有一定的运动放大功能，较强的运动缩放能力和运动解耦能力。该柔性铰链机构基于模块化设计，运动缩放机构和运动解耦机构可独立工作，运动缩放机构保留了输入和输出接口，其运动驱动器件可自由选择，可以灵活应用于各种微动工作台的搭建。

基于二维微动工作台，本文设计了微组装实验系统，并进行了微组装实验平台的实物搭建与功能实现。该实验平台基于微动工作台的微动运动实现微小器件的精密对准，基于宏动工作台的宏动运动实现器件较大范围内的传送，最终通过控制系统的设计，实现了微组装实验系统插补运动、自动组装等功能。

**关键词：**微动工作台   柔性铰链   微组装



## ABSTRACT

In this paper, the worktable based on flexible hinges as the research object, first understand the development status of the worktable and the flexible hinge, on the general design scheme, and analyzes the advantages and disadvantages of various schemes. Then, the overall design of the flexible worktable, the motion drive system and the design of the control system are studied.

In this paper, a two dimensional micro stage mechanism driven by PZT is used as a design example to illustrate the general design process of the micro Worktable Based on flexure hinges. For the worktable of modular flexible hinge mechanism is designed, and the flexible hinge mechanism is analyzed by finite element simulation, structure optimization, finally shows that the flexible hinge mechanism design has a certain motion amplification function, strong motion zoom ability and motion decoupling ability. The flexible hinge mechanism based on modular design, motion zoom mechanism and movement decoupling mechanism can work independently, and keep the input and output interface, the motion of the driver can be free to choose, can build flexible and applied to all kinds of micro motion worktable.

Based on the two-dimensional micro worktable, a micro assembly experiment system was designed, and the material structure and function realization of the micro assembly experiment platform were carried out. The experimental platform to realize the micro precision alignment device micro micro displacement worktable based on the macro table of the macro implementation of a wide range of transfer device based on through the design of the control system, realizes the micro assembly interpolation, experimental system of automatic assembly and other functions.

**Keywords:** inching workbench    flexure hinge    micro assembly

## ABSTRACT

---

## 目 录

<b>第一章 绪 论</b>	<b>1</b>
1.1 微动技术及微动工作台概述	1
1.1.1 微动技术概述	1
1.1.2 微动工作台概述	2
1.2 柔性铰链概述	3
1.2.1 柔性铰链机构原理概述	3
1.2.2 柔性铰链制造材料概述	4
1.2.3 柔性铰链制造技术概述	5
1.3 基于柔性铰链微动工作台的发展现状	5
1.3.1 柔性铰链微动工作台发展现状	5
1.3.2 关键技术与挑战	8
1.4 论文内容	8
<b>第二章 微组装实验系统设计</b>	<b>11</b>
2.1 微组装平台总体结构	11
2.2 微组装平台的工作原理	12
2.3 微组装实验系统硬件组成	13
2.4 微组装实验系统基础功能设计	15
2.4.1 初始定位功能	15
2.4.2 寸动运动功能	16
2.4.3 相对位置运动功能	16
2.4.4 绝对位置运动功能	16
2.4.5 直线插补运动功能	16
2.4.6 圆弧插补运动功能	17
2.5 微组装实验系统应用功能设计	18
2.5.1 自动组装功能	18
2.5.2 规定路线运动功能	19
<b>第三章 微动工作台系统设计</b>	<b>21</b>
3.1 微动工作台总体结构	21
3.2 微动工作台工作原理	21
3.3 微动工作台的运动驱动器件选用	22
3.3.1 压电陶瓷	22

3.3.2 音圈电机.....	24
3.3.3 滚珠丝杠模组.....	25
3.3.4 砵码滚轮机构.....	26
3.4.5 差动螺旋微位移机构.....	27
3.4 控制系统的开环与闭环设计 .....	27
3.4.1 开环控制系统.....	27
3.4.2 闭环控制系统.....	28
3.5 承载模块硬件组成 .....	29
<b>第四章 微动工作台柔性铰链机构设计 .....</b>	<b>31</b>
4.1 典型结构举例与分析 .....	31
4.2 柔性铰链机构的结构设计 .....	32
4.2.1 运动缩放机构的结构设计 .....	32
4.2.2 运动解耦机构的结构设计 .....	32
4.3 柔性铰链机构的有限元分析 .....	33
4.3.1 机构运动缩放能力分析 .....	33
4.3.2 机构运动解耦能力分析 .....	35
4.4 结构分析优化 .....	36
<b>第五章 微组装平台伺服系统介绍 .....</b>	<b>39</b>
5.1 伺服系统总体结构 .....	39
5.2 伺服系统硬件组成 .....	39
5.2.1 PC 及触摸屏 .....	39
5.2.2 运动控制器 .....	40
5.2.3 伺服电机及驱动器 .....	40
5.2.4 关电门开关及光栅尺 .....	40
5.3 伺服系统工作原理 .....	41
<b>第六章 微组装实验系统的软件系统设计 .....</b>	<b>43</b>
6.1 系统通讯设计 .....	43
6.2 底层软件设计 .....	43
6.3 触摸屏软件及计算机上位机软件 .....	46
6.3.1 触摸屏软件 .....	46
6.3.2 计算机上位机软件 .....	48
<b>第七章 总 结.....</b>	<b>49</b>
<b>致 谢.....</b>	<b>51</b>
<b>参考文献.....</b>	<b>53</b>

---

附录 A.....	55
附录 B.....	57
附录 C.....	59
附录 D.....	63
附录 E.....	65





## 第一章 绪 论

### 1.1 微动技术及微动工作台概述

#### 1.1.1 微动技术概述

微动技术是近年随着微电子、精密机械、航空航天以及生物工程等学科的快速 发展而形成的新兴技术。微动技术在高精度加工领域，大规模集成电路制造领域更 是关键技术所在。微动技术的发展，同时也推动着众多相关学科的迅速发展，微位 移技术亦是国家科技水平的标志之一。

微动系统是微动技术实现的载体，现有微动系统其行程一般小于毫米级，分辨 率可达纳米乃至压纳米级，精度则在微米级、纳米级。微动系统是一门精密机电综 合系统，微动运动机构是整个微动系统的重要驱动组成，高精密检测装置及控制系 统是对微动系统误差进行静态和动态补偿、功能实现的关键组成。微动系统的组成 如图 1.1 所示。

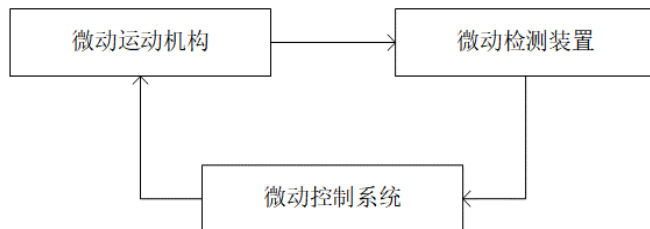


图 1.1 微动系统的主要组成

微动运动机构一般由精密的运动驱动器件和运动引导器件组成，运动驱动器 件为微动运动机构的动力来源，运动引导器件可以实现运动的传递，具有改变运动 形式或运动大小等特性。微动检测装置一般采用一个或多个高精度的微位移传感 器作为检测器件，微位移传感器可以实时以电信号的方式把微动运动机构的位移 输出反馈给控制系统。微动系统中的控制系统通过处理控制信号及反馈信号，实现 对微动运动机构的精确控制。微动检测装置和微动控制系统的协调工作，可以补偿 及修正微动运动机构因材质或机理产生的一些固有缺陷<sup>[1]</sup>。

### 1.1.2 微动工作台概述

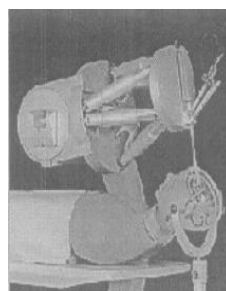
微动工作台是微动技术的实际应用，一个微动工作台可由一个或多个一维微动系统组成。微动工作台具有高分辨率、高定位精度和高重复定位精度等特性，微动工作台被应用于许多精密领域。微动工作台的结构设计有很多，一般来说微动工作台都由一个或多个微动系统以并联或串联的方式组成，并联方式组成的微动工作台具有较强的刚度，因此可以承受较大的负载，而且系统具有较高的稳定性。并联机构中各微动系统独立运行，只在最后的输出平台上接触，所以相比于串联机构其运动惯量低，系统响应速度快，系统不存在各轴误差相互累计等问题，因此一般并联机构更容易实现高精度。图 1.2 所示为三种 6 自由度的并联机构，其中 **stewart** 机构和 **delta** 为典型的 6 自由度并联机构，他们不仅在微动机构中可以见到，在许多宏动工作机构中也可以见到，**hexapod** 微动机器人是 **PI** 公司研发，用于高精度微对准领域。



(a) **stewart** 机构



(b) **delta** 机构



(c) **hexapod** 微动机器人

图 1.2 并联微动机构

多个微动系统串联使用在微动工作台结构中也常见，如图 1.3 所示为 **Thorlabs** 的 **MTS25** 系列微动工作台，该系列使用多个 **MTS25-Z8** 一维微动机构串联组合，可以方便的组成二维以及三维微动工作台。串联机构的特征是运动一级一级叠加，上一级微动机构需要驱动下一级机构的整体结构。由于串联机构的运动叠加特性，使得串联系统各轴误差相互累加，而其结构方式，也使得各轴的运动惯量不等，系统整体响应速度较慢。但串联结构的工作台结构简单，容易实现。

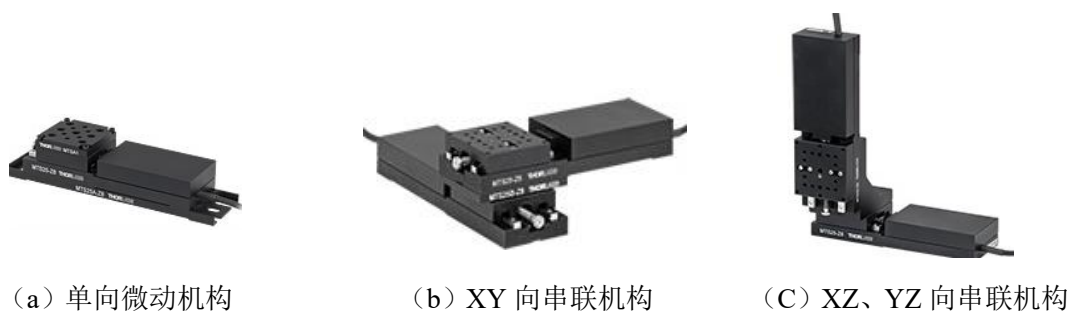


图 1.3 MTS25 系列串联机构

随着高密度集成电路制造，高精度加工等相关领域对微动工作台性能要求的不断提高，微动工作台正在向大行程、高分辨率、高定位精度、高响应速度、小体积快速发展。

## 1.2 柔性铰链概述

### 1.2.1 柔性铰链机构原理概述

柔性铰链可以实现小范围内偏转支撑，基于柔性铰链设计的运动机构具有无机械摩擦、无运动间隙等特性，且柔性铰链机构容易设计制造、体积小、重量轻、易维护，因此被广泛用于各种精密传动机构。

柔性铰链的基本结构形式多样，其分类方式也较多，如图 1.4 中所示的柔性铰链，按移动副分类可以分为转动副、万向铰、移动副等。柔性铰链中缺口铰链应用最广，按其缺口形状则可以分为多种类型，其中圆形、矩形缺口最为常见。

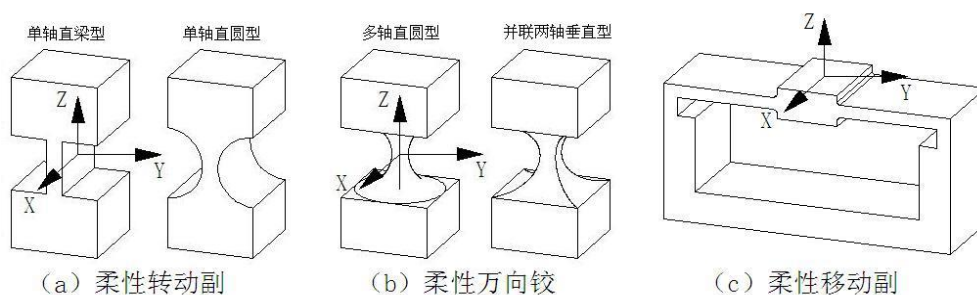


图 1.4 常见柔性铰链结构

在柔性铰链的众多结构中，以单轴直圆型缺口铰链在柔性机构中最为常见，其主要参数如图 1.5 所示<sup>[2]</sup>，图中  $R$  是柔性铰链的缺口的半径， $t$  是柔性铰链的最小厚度， $b$  是柔性铰链的宽度，一般来说也是整个柔性面板的厚度。柔性机构的主体

运动是由多个柔性铰链绕 Z 轴旋转的基本运动组合而成的运动。

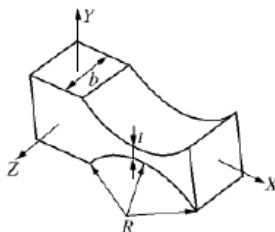


图 1.5 单轴直圆型缺口铰链

单轴直圆型缺口铰链的等效力学示意图如图 1.6 所示,若加在单轴直圆形缺口铰链上的驱动力为  $F$ , 则铰链在驱动力下产生的绕 Z 轴的转动角 $\theta$ 的关系如式 1-1 所示。

$$\theta = \frac{9\pi R^{3/2}}{2Ebt^{5/2}} F \quad (1-1)$$

式中:  $E$  为柔性铰链所用材料的杨氏模量。

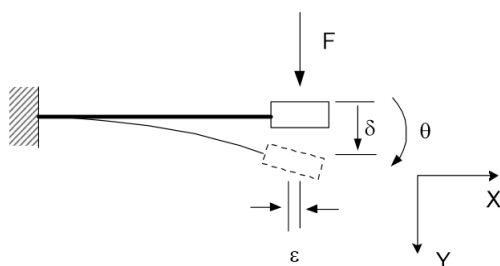


图 1.6 单轴直圆型缺口铰链力学示意图

柔性铰链在驱动力  $F$  的方向上产生位移 $\delta$ 以及绕缺口轴心的转角 $\theta$ , 同时在垂直于 $\delta$ 的方向上会产生寄生位移 $\epsilon$ 。在许多柔性机构的设计过程中, 因为 $\epsilon$ 非常小, 所以可以对其不加考虑从而忽略其运动, 将柔性杆轴向的两段固定, 但寄生位移 $\epsilon$ 对整个柔性机构的运动是不利的, 这是因为柔性铰链必须通过轴向拉伸变形来弥补位移 $\epsilon$ , 这会使轴向的拉力增大甚至产生强直现象, 影响整个系统运动。

### 1.2.2 柔性铰链制造材料概述

根据柔性机构的使用环境, 参数尺寸以及可用的加工方法等因素选用合适的材料。选用材料时应主要考虑材料的力学性能, 主要包括弹性模量、屈服强度、抗疲劳强度等。若工作环境较为恶劣, 材料的热学及化学性能都应被考虑。

常用来制造柔性机构的材料有弹簧钢、不锈钢、铝合金等。这些材料都具有极

佳的加工性能、良好的抗腐蚀性、高韧性及在加工后不易变形等特性。除了这些常见的材料,还有一些比较特殊的材料也被用于柔性机构的制造,比如玻璃钢材料被用于制造无人机表面的连接铰链<sup>[3]</sup>,用具有大变形能力的橡胶制造柔性铰链并用于扑翼式微型飞行器<sup>[4]</sup>。这些新材料的引入,使得柔性铰链具有特殊的性能,大大扩展了其应用范围。

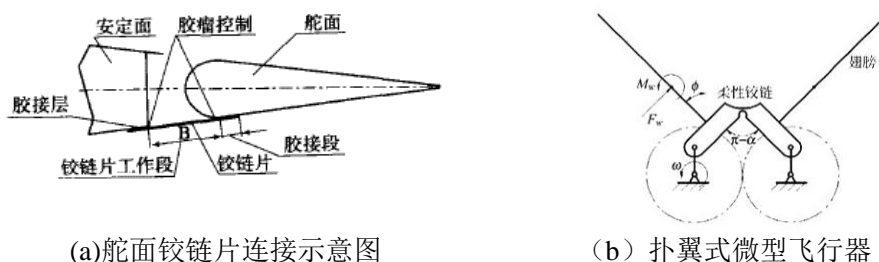


图 1.7 特殊材料铰链的应用

### 1.2.3 柔性铰链制造技术概述

柔性铰链的加工应考虑柔性铰链机构的参数尺寸、加工精度要求、材料的可加工性能等因素。一般使用的加工方法有电火花加工、水切割以及激光切割加工。电火花加工和水切割加工的加工能力较强,可以对加工性能较差的材料进行加工,激光切割的加工精度相对较高,但对加工材料的加工性能及材料的厚度有一定要求。随着新型制造技术的发展,如 3D 打印技术的成熟,采用 3D 打印技术制造柔性铰链也成为可能,与传统制造技术相比,3D 打印技术加工柔性铰链机构更加方便,其成本也更低,但限于制造材料及技术,该方法制造的柔性铰链的性能有待提高。

## 1.3 基于柔性铰链微动工作台的发展现状

### 1.3.1 柔性铰链微动工作台发展现状

近年微动驱动器件的不断发展,使得高分辨率、高精度的微动驱动器件更多的进入到柔性铰链机构的应用中,比如纳米及乃至亚纳米级分辨率的压电陶瓷致动器已经得到普及,使得基于压电陶瓷驱动的微动工作台的性能有了大幅度的提高,因此现有基于柔性铰链的微动工作台的设计大部分都是使用压电陶瓷作为微动驱动器件。压电陶瓷的位移驱动范围较小,一般在  $100\mu\text{m}$  以下,然而在特殊领域,微

动工作台需要较大的工作范围,所以,围绕压电陶瓷驱动的大行程微动工作台有许多研究,比如李仕华等人设计的三维工作台<sup>[5]</sup>,其结构如图所示,以压电陶瓷作为微动驱动器件,使用柔性铰链机构作为运动放大机构,最终测试结果表明每个分支都实现了 3 倍左右的运动放大比例。另一类大行程的微动工作台使用驱动范围较大的音圈电机作为微动驱动器件,以柔性铰链机构作为运动导向机构,也可以实现较大范围内的微动运动,图 1.9 (c)、(d)中所示便是这种结构。

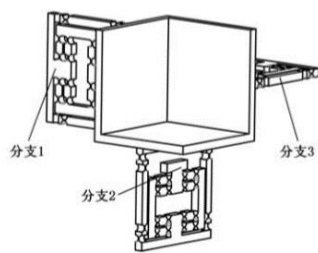


图 1.8 压电陶瓷驱动的大行程微动工作台

新型传感器的出现以及传统传感器在关键技术的突破,使得微位移传感器的定位精度大大提高<sup>[6]</sup>。以光纤为引导介质的新型激光干涉传感器,不仅具有大量程,更据有纳米级分辨率,其线性精度极高,且有较强的耐离轴偏差能力。传统的电容式微位移传感器具有高精度、高分辨率、低成本等诸多优点,但其最大测量范围一般在  $100\mu\text{m}$  以下,在工作范围较大的微动运动机构上无法使用,而近年随着电容式传感器技术的发展,其测量范围已达大大增大,可以满足绝大多数微动运动机构的检测要求。电阻应变片式传感器近年也在压电陶瓷上广泛使用。在微动驱动器件及微动检测器件都已得到发展的背景下,定位精度更高、分辨率更高的微动工作台被设计,但并联结构的微动工作台的运动耦合现象依然是影响整个微动机构最终工作精度的一个重要因素。针对该运动耦合问题,近年有许多研究者提出了各种运动解耦的设计,比如 Shorya Awtar 提出了如图 1.9 (a) 所示的运动解耦结构,该结构的等效力学模型如图 1.10 所示<sup>[7]</sup>。

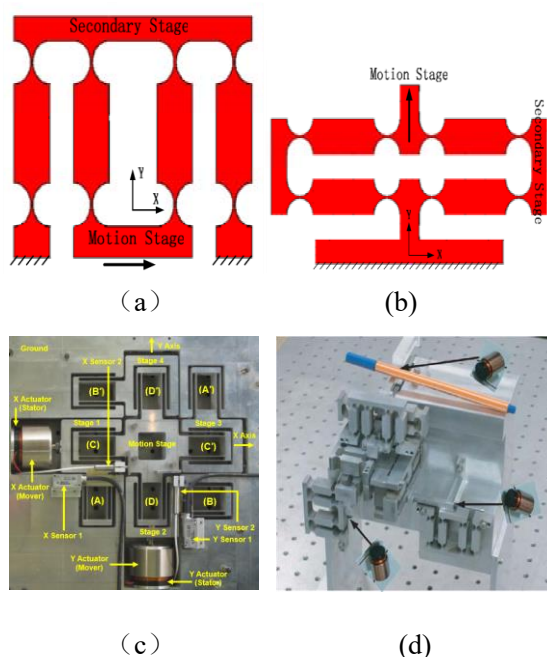


图 1.9 运动解耦机构及其应用

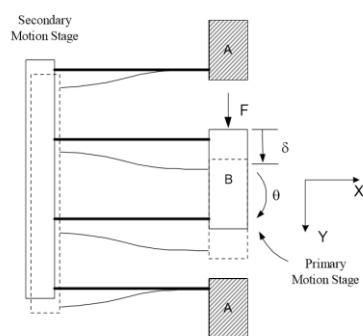


图 1.10 等效力学模型

Shorya Awtar 设计的运动解耦结构的工作过程为，工作台 B 在 Y 向驱动力  $F$  的驱动下产生力  $F$  方向的位移  $\delta$ ，连接杆件产生偏角  $\theta$  并带动辅助工作台运动。由于工作台 B 的连接采用平行四边形结构，且辅助工作台并未固定，所以工作台 B 不会产生偏角和 X 向寄生位移。

基于 Shorya Awtar 设计的运动解耦结构，Shorya Awtar 和 Gaurav Parmar 设计了如图 1.9(c)所示的二维微动工作台<sup>[8]</sup>，而 I-Ming Chen 等人则设计了图 1.9 (b)所示的运动解耦机构，并使用两种结构设计了如图 1.9(d)所示的三维微动工作台<sup>[9]</sup>。

可见，近年基于柔性铰链微动工作台的研究方向在于柔性铰链机构的设计，主要包括运动放大机构，运动解耦机构，二维工作台或三维工作台结构的设计。

### 1.3.2 关键技术与挑战

基于柔性铰链的微动工作台的发展是随着柔性铰链技术、微动驱动技术、高精度微动检测技术以及控制技术的发展而发展的。从现有技术来说,控制技术经过多年发展已趋于成熟。高分辨率,驱动能力强的微动驱动技术是整个微位移机构的关键技术,压电陶瓷技术以及音圈电机技术的成熟,使得基于柔性铰链的高精密微动工作台得以实现。高精度的微动检测技术虽然已经出现,但是受限于微位移传感器的量程、使用环境要求、控制系统限制、成本等问题,使得高精度微动检测装置无法在大部分微动工作台上得到普及,这也是许多微动工作台都是开环控制的原因。高精度、大量程、易于普及的微动检测技术是现阶段微动工作台发展的的一个挑战。在开环控制系统中,柔性铰链机构的非线性输出特性使得微动工作台的输出质量变低,所以,解决柔性铰链的非线性输出问题是开环控制的微动工作台发展的一个挑战。

## 1.4 论文内容

本文以基于柔性铰链的微动工作台作为研究对象,重点工作在微动工作台的设计及微动工作台的应用实验系统-微组装实验系统的设计与实现。本文设计了一种柔性铰链机构,其具有一定的运动缩放能力,可将微动运动放大,用于组成具有较大工作范围的微动工作台,也可以将较大的位移运动进行运动缩小,输出一定大小的微动位移。本文设计了一种运动解耦机构,用于解决并联结构的运动耦合现象。柔性铰链机构采用模块化设计,保留输入和输出接口,可以灵活的组成并联结构或串联结构的微动台。本文还设计了微组装实验系统,该系统使用微动工作台和宏动工作台,实现了大行程的搬运及一定范围内的精密对准,完成了微小器件精密组装,并在软件设计上实现了微组装实验系统的自动组装等功能。

论文首先介绍了微组装实验系统的总体组成及基本工作原理,介绍了微组装实验系统可以实现功能,然后详细介绍了微组装平台的微动工作台设计及系统功能实现过程,包括基于柔性铰链微动工作台的设计、柔性铰链机构的设计、微组装系统伺服系统组成、微组装实验系统的软件设计。具体的内容安排如下:



第一章，介绍了微动技术以及柔性铰链技术，分析了基于柔性铰链微动工作台的发展现状及关键技术，说明课题意义，介绍论文内容与安排。

第二章，介绍了微组装实验平台的主体结构及硬件组成，微组装实验系统的基本工作原理，微组装实验系统可以实现的功能及基本原理。

第三章，介绍了基于柔性铰链微动工作台的总体设计，包括总体结构设计、基本工作原理说明、微动驱动器件选用及控制系统的分析，最后介绍了基于微动工作台的承载模块的组成。

第四章，介绍了典型柔性铰链微动工作台的结构及工作原理，设计了运动缩放柔性铰链机构及运动解耦柔性铰链机构，通过有限元对其进行了仿真分析并进行了结构优化。

第五章，简单介绍了配合微动工作台工作的宏动工作台-传送模块的伺服系统的总体设计，包括其总体结构，硬件组成及工作原理。

第六章，简单介绍了微组装实验系统的软件设计，包括软件的总体通讯实现，微组装实验系统控制及主要运动功能的设计。



## 第二章 微组装实验系统设计

### 2.1 微组装平台总体结构

本课题搭建的微组装实验平台主体结构如图 2.1 所示,主要包括 X-Y-Z 三轴传动系统、承载模块、视觉检测模块、微夹持机构。

其中 X-Y-Z 传动系统用于实现微夹持模块的三轴大行程位移,三轴均采用由伺服电机驱动的滚珠丝杠机构作为驱动机构。

承载模块用于放置基板或器件,并实现基板的位置微调。承载模块主要由基于压电陶瓷驱动的微动工作台组成,该微动工作台为二维微动工作台,可以实现工作范围内的精密定位。

在 X-Y-Z 三轴传动机构的工作台上安装有微夹持模块,该模块通过工作头实现对器件小范围内的夹取及安装,主要由一个步进电机及一个由压电陶瓷驱动的柔性铰链夹持机构组成。

微组装系统的视觉检测系统主要由 CCD 像机、视频采集卡组成,主要是对微操作器件进行图像信息采集,并将图像送到图像处理系统对图像进行分析处理。通过视觉检测不仅可以获取图像内物体的精确位置信息,还可以获取微器的位姿信息、器件的姿态信息。

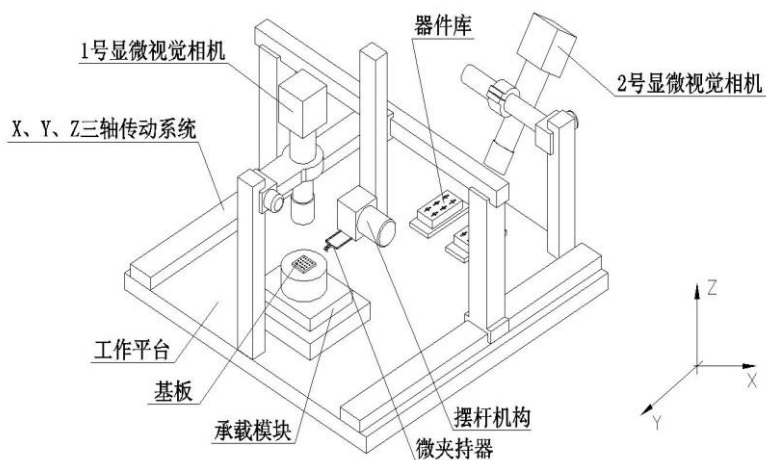


图 2.1 微组装平台结构图

## 2.2 微组装平台的工作原理

微组装实验系统涉及精密机械、柔性铰链、视觉检测、数字控制等多种技术，是机-光-电一体的产物<sup>[10]</sup>。其主要工作步骤为：系统通过传动机构把器件运速到基板上方，通过视觉检测系统确定其位置，通过对微动工作台进行控制带动基板进行微动调节，实现器件与基板上安装位置的精密对准，最后由微夹持器机构完成组装。组装过程主要包括元器件的拾取、传送、组装三个步骤，如图 2.2 所示。

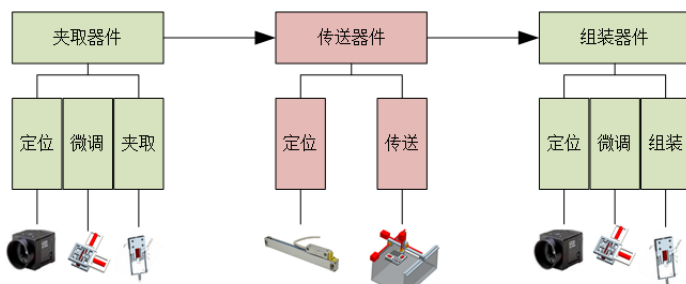


图 2.2 微组装主要过程

微组装的元器件拾取与组装过程主要由视觉检测定位环节、微动工作台微调定位环节、和微夹持机构执行环节组成。元器件的传送由 X-Y-Z 传动系统为主的传送模块进行，使用光栅尺对三轴位置定位。整个微组装系统的工作流程如图 2.3 所示。

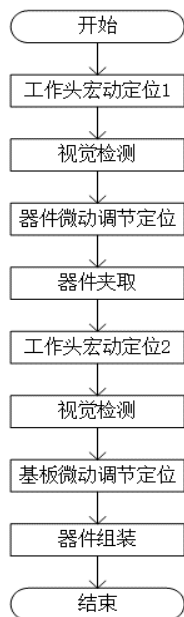


图 2.3 微组装主要流程

微组装实验系统工作开始时,根据系统设定,工作头先通过传动机构运动定位到拾取元器件的位置 1,因为传动机构存在定位误差,所以工作头实际物理位置可能出现的位置应在微动工作台的工作范围内。视觉检测系统对工作区域进行拍照,图像处理,计算微夹持器,器件的位置坐标,控制系统处理坐标并给出微动调节信号,微动工作台产生微动运动,调节器件到目的位置,微夹持器控制工作头工作,夹取器件。工作头通过传动机构定位到组装器件的位置 2,同样,工作头实际物理位置可能出现的位置应在微动工作台的工作范围内。视觉检测系统再次对工作区域进行拍照,图像处理,计算器件,基板上目标点的位置坐标,控制系统处理坐标给出微动调节信号,微动工作台产生微动运动,调节基板的装配点到目的位置,微夹持器控制工作头工作,装配器件。通过以上主要步骤,微组装系统可以完成一次组装。

在实际工作过程中,还包括系统参数设置、系统计算处理、传动路径设置等过程,在上诉工作过程中并未列出,系统参数的设置实现,传动功能的实现将在下面章节作为运动控制研究说明,而系统图像处理,微夹持机构的设计则不再本文的研究范围内。

## 2.3 微组装实验系统硬件组成

微组装实验系统的硬件系统可以分为五大模块,计算机及监视模块主要包括电脑主机、显示器。电脑主机负责整个系统上位机软件的运行、图像的处理、数据的运算及控制指令的发送,显示器负责系统界面的显示。承载模块包括基于压电陶瓷驱动的微动工作台、可调节的底座。微动工作台由柔性铰链机构、压电陶瓷及压电陶瓷驱动器组成,微动工作台可以对承载台面进行微动调节,底座用于安装微动工作台,同时该平台还可以使用差动螺旋机构灵活的对微动工作台的基准位置进行较大范围内的调节。传送模块基于 X-Y-Z 三轴传动系统,包含一个伺服系统,伺服系统由控制器件、运动器件、检测器件组成,控制器件采用计算机和触摸屏设备,运动机构采用伺服电机,滚珠丝杠及导轨等机构,系统的检测装置有光电门开关、伺服编码器、光栅尺,光电门开关用来做限位及原点回归监视,伺服编码器被集成在伺服电机尾部,用于检测伺服电机的运转位置,光栅尺被安装在各轴轴向,

用于测量各轴工作台的运动位置，这里的各轴工作台是指各轴的输出机构，本章下同。微夹持模块包括一套由控制器，步进电机驱动器，步进电机组成的微夹持器俯仰调节机构，用于在小范围内控制微夹持器工作头的上下，微夹持器由柔性铰链机构，压电陶瓷以及压电陶瓷驱动器组成，可以实现微夹持器工作头的闭合。视觉检测模块包含一个或多个 CCD 相机采集高清晰的图像，CCD 相机配备 1394 视频采集卡支持其工作。微组装实验系统的主要硬件组成如图 2.4 中所示，图中并未列出各种器件的驱动电源、支架、接口转换器、线材、开关等辅助器件及结构。

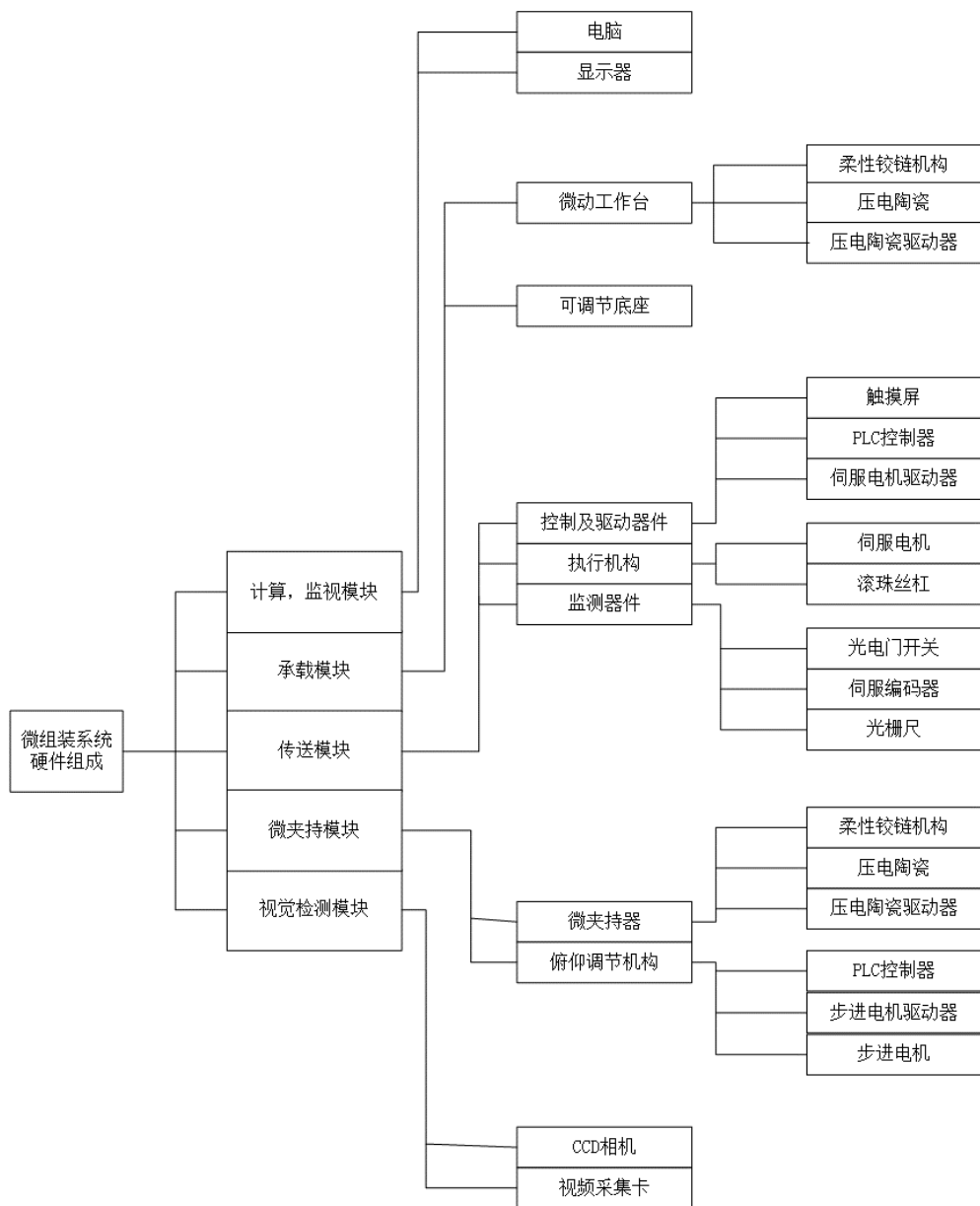


图 2.4 微组装系统硬件组成

## 2.4 微组装实验系统基础功能设计

以微组装实验系统传送模块作为主要运动载体，在平台其他模块的支持下实现了微组装平台的运动功能。该平台的传送功能是整个微组装实现系统运动实现的基础，传送模块主要由由伺服系统组成，通过对 DVP-20PMOON 的编程，伺服电机驱动器 ASDS-A2 的设定，人机交互界面为 DOP-B07S411 触摸屏应用设计，最后实现了传动系统初始定位、寸动、相对位置运动、绝对位置运动、直线插补运动、圆弧插补运动等基本运动功能。每轴的初始定位功能、寸动功能、相对位置运动功能、绝对位置运动功能都相互独立，可以单独或同时打开，插补运动则是三轴关联运动。为实现自动化组装在 PLC 底层设计了自动组装功能，并保留参数设置接口，考虑到在传送过程中工台上可能会有障碍物或其他原因造成工作头需要依照不规则的路线运动，在控制器底层保留并实现了部分通用 G 代码的执行的能力，可以实现工作头按任意规定路线的运动。

### 2.4.1 初始定位功能

传送模块的初始定位是用来确定传送系统的初始坐标系，初始坐标系确定后，传送系统的伺服机构将参照该坐标系对各轴的工作台进行驱动。初始定位功能的实现基于伺服系统原点回归功能<sup>[11]</sup>。单轴的原点回归的实现过程如图 2.5 所示。LSN, DOG, LSP 是光电门产生的位置信号，当该轴的驱动工作台挡住光电门开关时，该信号就会产生。[1], [2], [3], [4]代表原点回归起始时，该轴工作台可能存在的位置，当原点回归运动开始时，该轴工作台会从各自开始的位置以图示路径所表示的方向和路径运动，最终都会到达图示的原点位置并停止，在传送模块的坐标系中，我们把三轴的原点位置设为坐标系的基准零点，本系统采用绝对坐标系。

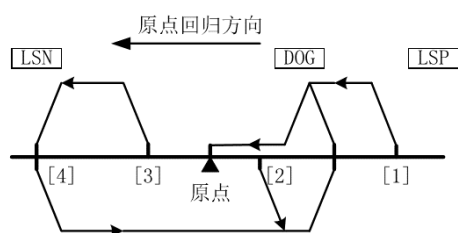


图 2.5 原点回归路径示意图

### 2.4.2 寸动运动功能

寸动功能是传送模块手动调试功能，通过打开寸动功能的开关可以实现各轴工作台向一个轴向方向以固定速度一直运动，要关闭此运动则必须手动关闭之前打开的寸动开关，若在寸动过程中此轴工作台达到此轴运动范围的边缘并触发了限位开关，则寸动运动会立即自动停止。要恢复寸动运动，需要关闭此寸动运动开关，然后打开反向寸动运动开关。该功能一般用于手动调节各轴工作台的位置，打开此功能时需要指定此轴的运行速度及运动方向。

### 2.4.3 相对位置运动功能

相对位置运动是指驱动工作台相对于现在的系统坐标位置进行移动，指定一轴相对位置运动的方向、速度、相对运动距离。打开相对位置运动的开关，则该轴驱动工作台向指定方向以指定速度移动指定距离后停止，若在相对位置运动过程中此轴工作台达到此轴运动范围的边缘并触发了限位开关，则相对位置运动会立即自动停止。

### 2.4.4 绝对位置运动功能

绝对位置运动是参照传送模块绝对坐标系零点的运动。绝对位置运动需要指定目的位置的绝对坐标、工作台运动到目标位置的速度。打开绝对位置运动的开关，该轴驱动工作台以设定的速度运动到指定的绝对坐标位置后停止。因为系统的绝对坐标相对固定，且运动范围固定，所以在设置目标位置坐标时只需要检测设置位置是否超出系统的运动范围，就可以避免触发限位。在多次运动后，绝对位置运动相比与相对坐标运动其定位精度更高，因为不存在误差累计。

### 2.4.5 直线插补运动功能

直线插补运动的运动示意如图 2.6 所示，指定目标位置的绝对坐标、直线方向上的运动速度，系统会在当前位置与目标位置之间插补计算出一条直线路径，直线插补启动时，三轴联动驱动工作台沿插补的直线路径以指定速度运动，工作台到达目标位置后停止。底层直线插补运动功能不需要指定直线插补运动的起点坐标，默



认为各轴当前位置为起点。在传送模块的直线插补功能设计时，在插补运动功能开始前添加了绝对位置运动功能，绝对位置运动完成后自动开始直线插补运动，使得直线插补可以从指定位置开始，所以，在此传送模块中使用直线插补运动功能可以直接指定起始位置坐标。

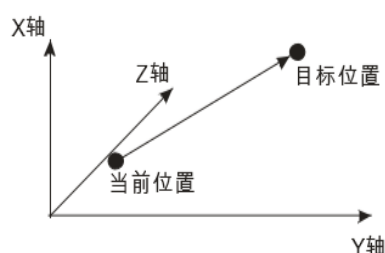


图 2.6 直线插补运动示意图

#### 2.4.6 圆弧插补运动功能

圆弧插补运动是指通过指定必要参数实现工作台沿一定圆弧轨迹运动的运动。圆弧插补运动功能的主要计算任务是圆弧路径的确定，传送模块的 PLC 伺服驱动器支持圆心模式参数设定和半径模式参数设定，两种模式都默认工作台当前位置为起始点。圆心模式需要设置圆心相对于起始点的相对坐标、目标点的绝对坐标、圆弧上的运行速度，通过顺时针运转或逆时针运转选择一个圆弧路径，运动路径如图 2.7 所示。

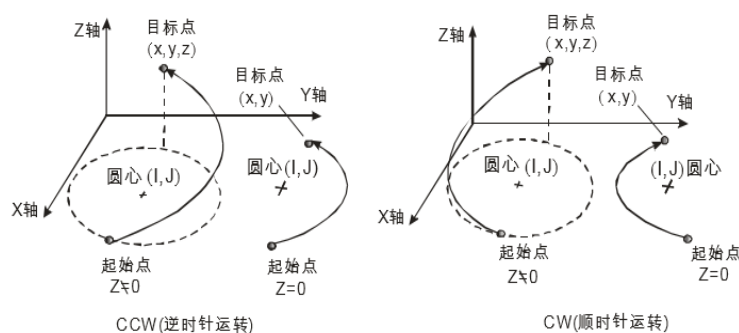


图 2.7 圆心模式运动路径示意图

半径模式需要设置圆弧半径、目标点绝对位置坐标、圆弧上的运行速度，当圆弧半径参数的符号为“+”时选择较短的圆弧，为“-”时选择较长的圆弧，配合顺时针运转或逆时针运转可以确定圆弧路径，路径选择如图 2.8 所示。

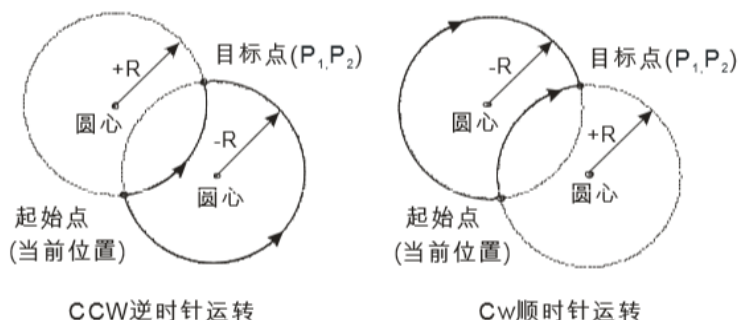


图 2.8 半径模式运动路径选择示意图

在上述系统底层圆弧插补运动执行之前,插入绝对位置运动功能,绝对位置运动完成后自动开始圆弧插补运动,所以在该传送模组使用圆弧插补功能时可以直接指定起始点坐标。

在底层软件设计时,为每个功能都设置了一组默认参数,开机后可以直接打开功能开关进行功能演示,主要默认参数见附录 A。

## 2.5 微组装实验系统应用功能设计

### 2.5.1 自动组装功能

微组装平台的自动组装功能是通过绝对位置运动功能实现的,自动组装的工作流程如图 2.9 (a) 所示,在自动程序开始前需要进行初始总数据的设置,这些数据包括基板数量、每个基板上需要装配器件的个数、基板上每个器件应该装配的位置坐标、器件库内每种器件的位置坐标、运行速度等。在自动组装开始时,系统按图 2.9 (a) 所示的流程从上到下执行一次完成一个器件的组装,通过下一段参数的读取与写入,自动设置该基板上第二个器件的位置信息,开始第二个器件的组装,如此循环,直到该基板上所有器件都组装完毕,若还有其他基板未组装,则更换基板,读取第一组数据,开始新基板上第一个器件的组装。当所有基板上的器件组装完成后,工作台运动到停止位置(位置 6)后停止,此时可以开始新一轮组装任务或进行其他工作。在自动组装过程中,可以随时取消自动组装任务,传送模块在完成当前正在执行的运动任务后会立即停止,所有自动组装数据重置为初始数据。

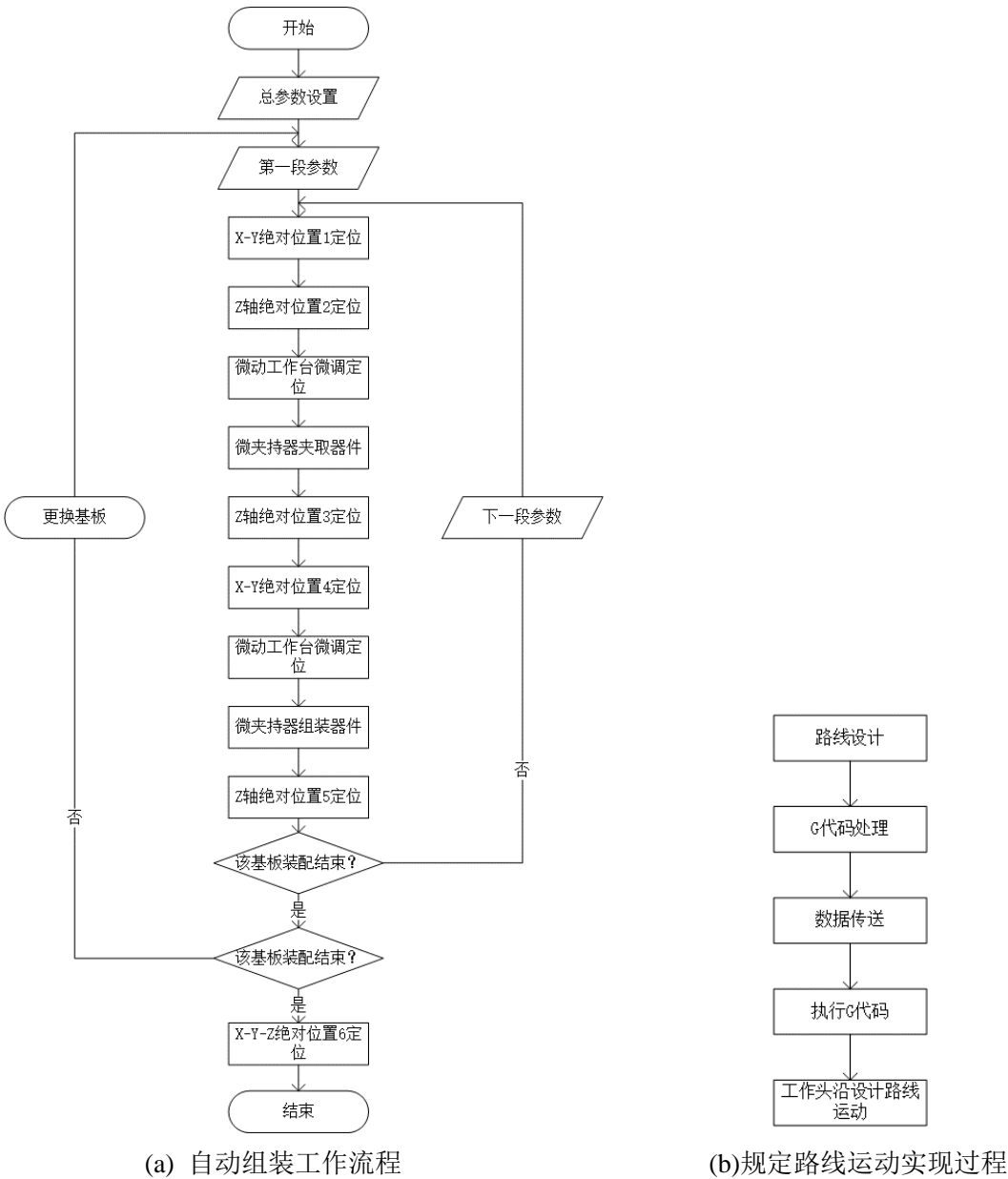


图 2.9 运行流程

2.5.2 规定路线运动功能

规定路线运动功能的实现过程如图 2.9（b）所示，将想要执行的路线设计好后使用软件将其转换为 PLC 控制器可以执行的 G 代码，然后发送到 PLC 控制器，控制器执行此运动代码，控制工作台沿规定路线运动。

传送模块中用的的 PLC 控制器支持 G 代码种类有限，不支持的代码自动忽略。因底层接口可使用的寄存器数量有限，在普通代码传送模式下且一次传送的 G 代码总数应控制在 5000 行以下，若要传送并执行较大数量的 G 代码，则需要在 DNC

模式下使用专用软件进行传送。

## 第三章 微动工作台系统设计

### 3.1 微动工作台总体结构

微动工作台用于微组装平台的承载模块，可以实现对承载模块工作面的位置微调。本文设计的基于柔性铰链的微动工作台主体结构如图 3.1 所示，图示为压电陶瓷驱动的串联型二维微动工作台，其主体由两个一维微动机构叠加串联而成，每个一维微动机构都由一个柔性铰链机构和一个压电陶瓷驱动器组成。压电陶瓷驱动器负责产生微动驱动，柔性铰链机构负责对压电陶瓷产生的微动驱动进行运动放大。图 3.1 中并未列出固定支架，连接机构等辅助结构。

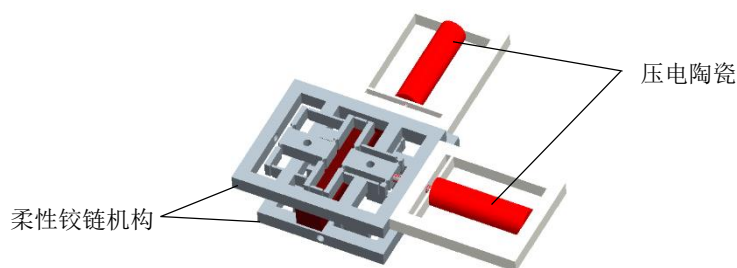


图 3.1 微动工作台主体结构示意图

### 3.2 微动工作台工作原理

微动工作台实现微动运动的过程如图 3.2 所示，控制器产生运动信号，压电陶瓷驱动器在接收到运动信号后产生一定的驱动电压，压电陶瓷在电压的驱动下产生微小的伸缩变形。柔性铰链机构以压电陶瓷的伸缩运动作为机构的运动输入，将运动放大后通过输出接口传递到工作台上，工作台的微动调节得以实现。二维微动工作台使用了完全相同的两个一维微动机构串联组成，其中一个一维微动机构的输出并没有直接输出到工作台上，而是输出在了另一个微动机构的运动基准结构上，用串联的方式实现了两个一维运动合成二维运动。并联机构是使用两个一维微动机构直接输出运动到工作台上。二维微动工作台的串连结构及并联结构的系统结构如图 3.3 所示。在工作台实物中，串联结构一般会因微动机构的重叠而占有较

少平面方向上的空间，较多的垂直方向上的空间，而并联结构一般会占用较多的平面方向上的空间，较少垂直方向上的空间。两种结构在运动性能上的差异在第一章有说明，不再重复。

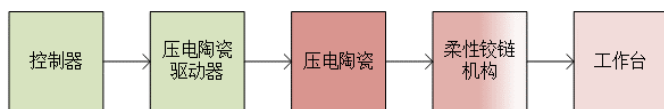
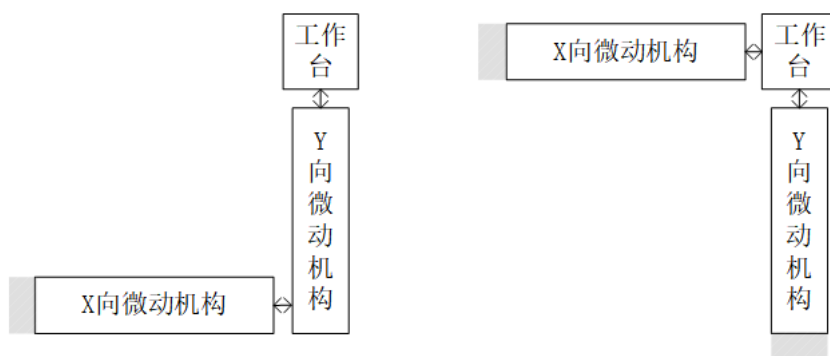


图 3.2 微动工作台系统控制过程



(a) 串联结构示意图

(b) 并联结构示意图

图 3.3 工作台结构

### 3.3 微动工作台的运动驱动器件选用

基于柔性铰链的微动机构的运动驱动器件是整个微动机构的动力来源，运动驱动器件的输出位移大小、负载能力及其分辨率等性能对整个微动工作台的输出质量有直接的影响，从现有的驱动方式来看，常见的驱动器件有压电陶瓷，音圈电机。在一些设备缺乏或基础实验场合，可以使用滚珠丝杠机构，砝码滑轮机构，差动螺旋微位移机构提供驱动。本文设计的柔性铰链机构保留了输入输出接口，可以支持多种形式的驱动输入，本节将重点介绍压电陶瓷、音圈电机，及配套设备选用时需要考虑的因素，同时也简单介绍滚珠丝杠机构、砝码滑轮机构、差动螺旋微位移机构在本设计中可行的使用方式。

#### 3.3.1 压电陶瓷

压电陶瓷是一种利用压电效应，将电能转化为机械能的一种高精度运动驱动器件，在微动工作台运动驱动器件中，压电陶瓷是最常见的运动驱动器件，压电陶

瓷产生的驱动运动在经过柔性机构放大后可以得到可观的运动行程及驱动能力。压电陶瓷具有诸多优点,比如其分辨率高、低发热、无噪声、定位精度高。已普及的压电陶瓷的分辨率已达到纳米乃至亚纳米级别,而其定位精度也在不断提高。虽然压电陶瓷有诸多优势,但传统 PZT 压电陶瓷自身存在着蠕变、迟滞等固有缺点。传统 PZT 压电陶瓷的研究方向主要集中在压电陶瓷驱动控制系统<sup>[12]</sup>,控制系统包含驱动硬件及驱动算法,此研究方向主要是为了提高传统 PZT 压电陶瓷的分辨率和精度,这种方式有效但会导致整个系统变得复杂且不可靠。现在另一个研究方向为新型无铅压电陶瓷的研究,新材料的使用不但可以解决传统 PZT 压电陶瓷中铅材料对环境的污染,还有机会从根本上解决传统 PZT 压电陶瓷蠕变、迟滞等固有确定。在微动工作台的设计及应用中,采用压电陶瓷作为运动驱动器件,应当考虑以下几点。

(1) 压电陶瓷参数:行程范围、分辨率、最大负载、固有频率、最大推力、使用环境、外形尺寸等。其中,压电陶瓷的行程范围一般在几十微米,最大可达几百微米,选取行程范围搭配位移放大机构可以实现位移输出要求的压电陶瓷,是整体设计时必须考虑的一个环节。压电陶瓷的分辨率,最大负载,最大推力依然要配合整个系统的输出要求进行考虑,防止在实际使用过程中出现压电陶瓷过载的情况,同时,对压电陶瓷的使用环境也需要进行考虑,温度,湿度是必须要考虑的因素。无论是过载使用还是恶劣环境使压电陶瓷产生损坏,传统的 PZT 压电陶瓷的损坏是不可修复的。压电陶瓷的外观尺寸也是微动工作台整体设计必须考虑的一个因素,根据压电陶瓷的尺寸在微动工作台机构内部预留空间用来安装压电陶瓷,或者柔性机构预留输入接口,采用合适的支架固定压电陶瓷,实现外部输入。

(2) 压电陶瓷驱动电源:电压输出型、电流输出型。压电陶瓷驱动电源是压电陶瓷驱动器中的电源模块。电压输出型电源本身的驱动方式对输出质量有很大的影响<sup>[13]</sup>。电压输出型电源自身的控制方式一般有开关式和直流放大式,开关式电源优点在于其体积较,电能转化效率高,损耗低,但在输出控制方面,开关式控制电源的频率响应范围窄,电压输出纹波大。而直流放大式控制的电源却在控制方面弥补了开关式电源的缺陷。这两种类型的电源各有其特点,根据使用场合进行选择,一般在高精度控制场合,直流放大式控制的电源应用更为广泛。

在压电陶瓷两端施加驱动电压或驱动电流时,压电陶瓷的表现有所不同,根据 C.V.Neweo 等人的研究,电流驱动方式能够有效地提高压电陶瓷位移的线性度<sup>[14]</sup>,在电流驱动方式中,又以交流方式更为理想,但电流输出型驱动器对电源控制及压电陶瓷设计提出了更高的要求,所以电流控制系统并未普及。

(3) 压电陶瓷控制系统:开环控制型、闭环控制型。压电陶瓷的控制系统一般采用开环控制,开环控制是基于模型的控制,在控制时需要对系统中的每个模块建立其数学模型。曲线拟合法常被用于开环控制,采集每个压电陶瓷特定的输入输出曲线,参照该曲线对压电陶瓷驱动系统进行调整,提高压电陶瓷的输出质量。除了曲线拟合法还有积分自校正算法,神经网络在线辨识、前馈模型控制等算法被研究者提出。开环控制的优势在于结构简单,反应迅速,成本低。缺点是需要对压电陶瓷进行精密检测得到其特性参数,然后在压电陶瓷驱动器上对输入-输出关系进行调节设置,而且这种方式对于提高精度及分辨率效果有限。

压电陶瓷的闭环控制系统是采用高精度微位移传感器作为反馈装置搭建的一套控制系统。这一套系统主要包括控制器、压电陶瓷驱动器、压电陶瓷以及高精度微位移传感器。微位移传感器检测压电陶瓷的输出位移,并将其转化为电信号后反馈给控制器(或驱动器),控制器将反馈的位移信号与目标值进行比较,计算得到二者偏差,对偏差进行运算后转化为压电陶瓷驱动电源的电信号输出,从而弥补压电陶瓷的输出偏差。闭环控制算法有很多,比较常用的为 PID 控制算法。闭环控制可以加快压电陶瓷系统的响应速度,还可以提高整个系统的定位精度。闭环控制系统因引入了压电陶瓷输出检测及反馈装置,所以整个驱动系统相比于闭环控制系统更为复杂且成本更高。

### 3.3.2 音圈电机

音圈电机:音圈电机是一种电磁致动型驱动器,具有动态响应快、定位精度高、噪声小、易于控制等特点。音圈电机运动形式可以为直线运动或者圆弧运动,柔性铰链机构一般选用直线型音圈电机作为运动驱动器件。直线型音圈电机作为微动工作台的运动驱动器件,相比于传统的压电陶瓷驱动器件其具有行程范围大、驱动电路简单、控制理论成熟、成本低等优势。在微动工作台系统设计中,考虑使用音



圈电机作为运动驱动器件，一般是利用其较大的位移输出直接组成工作范围较大的微动工作台，但基于此方法，系统的分辨率及精度无法提升，另一种方式是利用柔性机构将其运动进行缩小，组成工作范围较小，但分辨率高的微动工作台。音圈电机在微动工作台应用领域的研究方向包括，迟滞特性研究、高分辨率研究。选用音圈电机作为运动驱动器件，应考虑以下几点：

（1）音圈电机参数：最大负载、最大加速度、最大速度、最大行程、使用环境、外形尺寸等。根据系统负载设计确定音圈电机最大负载、最大加速度、最大行程等参数，考虑其外形尺寸及使用环境要求。使用环境中的工作温度范围应被考虑，不同于压电陶瓷的低发热特性，音圈电机在连续工作过程中会产生发热现象<sup>[15]</sup>，若音圈电机内产生的过多的热量无法顺利排出，聚集产生超出工作范围的高温，就会对音圈电机造成损毁，所以应根据环境温度，负载，工作时间等使用条件选取合适的音圈电机并考虑是否需要为其添加散热系统。一般情况下，将音圈电机的永磁结构作为动子，连接柔性铰链机构的运动输入接口，线圈结构作为定子固定在支架或基准结构上，这种做法将线圈内产生的热与柔性铰链的工作部分隔离，防止了柔性铰链机构的不均匀热变形，由于之间及基板的面积较大，也更有利于散热，线圈固定，也防止电机线缆成为运动干扰源。

（2）音圈电机驱动器：音圈电机为直驱式电机，因此其驱动电路较为简单，现有成熟的压控式驱动，即通过控制音圈电机的输入电压的大小来控制其输出位移的大小。

（3）音圈电机的控制系统：音圈电机的控制系统与压电陶瓷的控制系统有许多相同的地方，但因压电陶瓷与音圈电机工作原理的不同，使得控制系统的发展方向也有不同，音圈电机和压电陶瓷在工作中都具有迟滞现象<sup>[16]</sup>，通过控制系统对压电陶瓷和音圈电机的驱动电信号进行一定的补偿，都可以在一定程度上减小迟滞，这种方式对于压电陶瓷迟滞的减小效果是有限的，但对音圈电机的迟滞减小效果却是明显的，所以音圈电机的控制系统一般还要解决音圈电机的迟滞现象，关于在控制系统上进行设计以减小音圈迟滞的研究设计有很多，比如李盛培设计的双闭环前馈控制系统<sup>[17]</sup>，可以有效的减小音圈电机系统的迟滞。

### 3.3.3 滚珠丝杠模组

**滚珠丝杠模组：**滚珠丝杠模组主要包括运动驱动器、滚珠丝杠机构，导轨、轴承、模组支架等结构。其中，常见的运动驱动器有伺服电机、步进电机。滚珠丝杠机构可以把旋转运动转换成线性运动。而导轨的作用则是承重及运动导向。轴承起固定丝杠的作用。支架用来固定安装各个组件。

滚珠丝杠模组一般选用步进电机或伺服电机作为旋转运动的驱动器件。步进电机是开环控制方式，可以按一定的步进角逐步转动，通过脉冲信号来控制步进电机运转的步数。伺服电机与步进电机最大的不同就在于伺服电机通常具有精密的位置检测器件，如光电编码器或解角器，将其做为位置或速度的反馈器件。伺服电机是动作特性是进行位置定位运动和速度运动，运动位置和转速可以精确控制，位置定位精度高，速度控制范围广，并可以在额定功率范围内瞬间产生大转矩，输出功率大且效率也高。伺服系统不仅可以采用电机的编码器或解角器作为反馈对象，还可在控制对象机器外加装置如线性编码器等传感器作为反馈器件。伺服电机分为交流式和直流式两种，直流伺服电机机体较细长，因此转子惯性较小，具有线性反应佳与简单易于控制的特性。步进电机与伺服电机相比，步进电机一般具有体积小，成本低，控制系统简单的优点，但相比于由伺服系统中的伺服电机，其分辨、精度、负载能力、可控制性能都比较差。

滚珠丝杠具有平稳性高、定位精度高、使用寿命长及可靠性高等优点，缺点是不能自锁、有可逆性，另外制造工艺复、制造成本高。选用滚珠丝杠时应根据使用条件，确定系统对滚珠丝杠的驱动要求，包括滚珠丝杠的最大负荷、最大运动等参数，然后确定导程、轴长等其他参数，最后在生产或购买时因根据条件确定其精度等级。在滚珠丝杠模组的安装及使用过程中，应尽量避免机械误差的产生，使用精密且刚度较强的导轨作为负载的支撑结构，可以防止丝杠承受径向负载产生形变。使用预紧法可以控制轴向间隙<sup>[18]</sup>。

#### 3.3.4 砝码滚轮机构

采用砝码及滑轮机构为微动工作台提供驱动的装置如图 3.4 所示，通过悬挂不同重量的砝码，经过滚轮的转向后，可以得到大小不同的拉力作为柔性铰链机构的输入驱动力。在实际使用过程中，这种方式不仅可以作为输入驱动力使用，也可以

在实验系统里作为负载使用。砝码滑轮机构的优点在于，机构组成简单、易于实现、成本低，通过此机构可以方便地得到一定大小的驱动力。

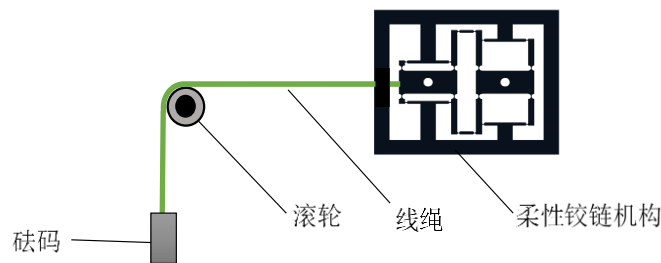


图 3.4 砝码滚轮机构使用示意图

3.4.5 差动螺旋微位移机构

手动微调机构有许多类型，图 3.5 所示为差动螺旋微位移机构的使用示意图，使用该机构可以手动调节得到一定大小的微动位移，通过刚性连接器件将该位移加载到柔性机构的输入接口，就可以作为位移输入使用。

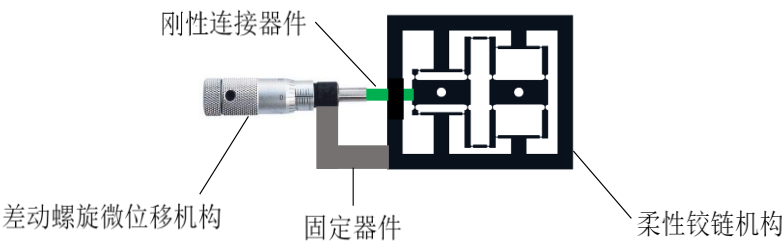


图 3.5 差动螺旋微位移机构使用示意图

3.4 控制系统的开环与闭环设计

根据微动工作台的压电陶瓷控制器与与压电陶瓷之间是否构成闭环伺控系统，微动工作台控制器与工作台之间是否构成闭环控制系统，可以将整个微动工作台的控制系统分成以下几种情况。

3.4.1 开环控制系统

开环控制系统是指系统的总控制器对末端执行机构的控制过程无来自于执行

机构的反馈信息作为参考的控制系统。对于微动工作台来说,电脑主机是总控制器,工作台是末端执行机构,工作台的位置信息是反馈信息。如图 3.6 所示,假设控制器产生的控制信号包含目标控制量的值为  $V_1$ ,压电陶瓷驱动器根据控制信息产生的驱动电压为  $V_2$ ,压电陶瓷在电压  $V_2$  的驱动下产生位移为  $W_1$ ,柔性铰链机构在  $W_1$  的驱动下产生位移为  $W_2$  的输出,在理想的情况,比例系数  $i$  和  $j$  应该为固定值,所以整个系统的输出  $W_2$  与控制信号  $V_1$  之间存在线性关系,如式 3-4 所示。

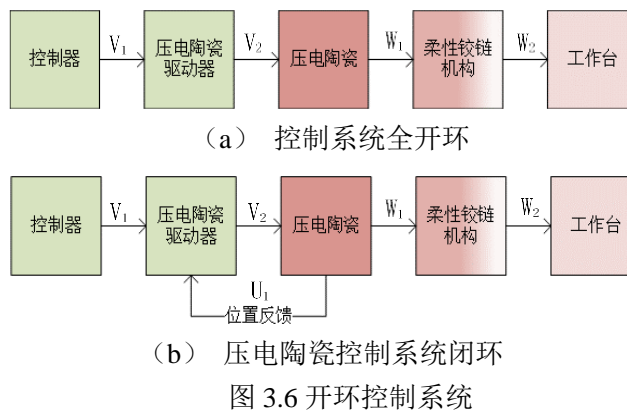
$$V_1 \rightarrow V_2 \quad (3-1)$$

$$W_1 = i * V_2 \quad (3-2)$$

$$W_2 = j * W_1 \quad (3-3)$$

$$W_2 = i * j * V_1 \quad (3-4)$$

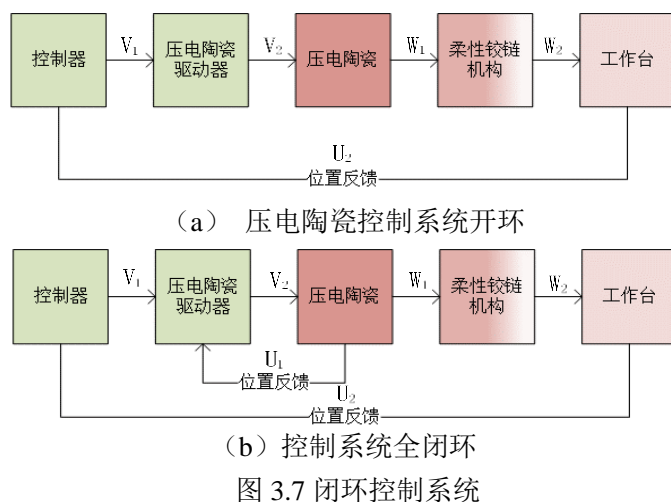
在如图 3.6 (a) 所示全开环控制系统的运动实现过程中,每个模块都根据上一级的输入产生相应的输出结果,在实际系统中,比例参数  $i$  和  $j$  并不是固定的常数,且  $i$  和  $j$  还会随温度等环境因素变化。在实际控制过程中,整个系统的输出为未知量,控制信号  $V_1$  与控制结果  $W_2$  之间的关系很难确定下来。在图 3.6 (b) 所示的控制系统中,压电陶瓷上的位置传感器将压电陶瓷的位置信息或位移变化量  $W_1$  作为反馈信号传递给压电陶瓷驱动器,压电陶瓷驱动器会参考该反馈信息对压电陶瓷的控制电压  $V_2$  做出调整以使  $W_1$  达到目标值,实现了压电陶瓷驱动环节的全闭环控制,但在该控制系统中,柔性铰链机构的运动缩放比例参数  $j$  依然会导致输出  $W_2$  的不可控,所以整个微动工作台的控制系统依然为开环控制系统。



### 3.4.2 闭环控制系统

图 3.7 (a) 所示的控制系统中,来自于工作台的位置信息  $U_2$  作为控制器的运

动控制参考信息，通过对反馈信息的处理，控制器通过不断调整控制信号  $V_1$  以实现末端输出  $W_2$  达到目标值，在此控制系统中，压电陶瓷的不稳定参数  $i$  和柔性铰链不稳定参数  $j$  依然存在，虽然这已经不会对整个系统输出结果造成影响，但会使整个控制系统的稳定性下降。图 3.7 (b) 所示的控制系统里压电陶瓷的控制环节是全闭环控制，这就消除了不稳定参数  $i$  的影响，整个系统的稳定性得到了提高。



### 3.5 承载模块硬件组成

承载模块的主体组成如图 3.8 所示，微动工作台是由两个一维的微动工作台叠加串联而成，使用压电陶瓷作为运动驱动器件。微动工作台被安装在可调节底座上，底座使用一个微调工作台和一个高度调节机构组合而成，可以实现三向较大范围内的手动微调，微调工作台使用两个一维的微调机构叠加串联组成，使用差动螺旋微位移机构作为运动驱动器件。压电陶瓷驱动器，承载模块主体的实物如图 3.9 所示，该压电陶瓷驱动器可以作为控制器实现对微动工作台的控制，但在微组装实验系统的控制系统中，使用计算机作为主控制器。每个一维微动工作台都装有位移传感器，与压电陶瓷驱动器连接可以实现闭环控制。

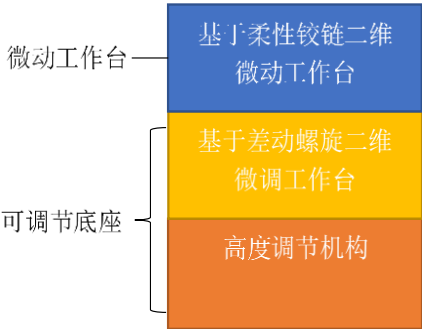
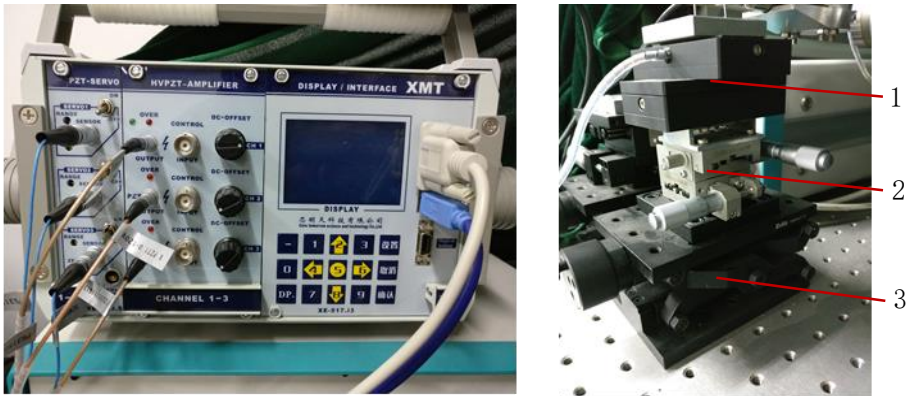


图 3.8 承载模块主体组成



(a) 压电陶瓷驱动器

(b) 承载模块主体结构

1, 基于柔性铰链二维微动工作台 2, 基于差动螺旋二维微调工作台 3, 高度调节机构

图 3.9 承载模块

压电陶瓷驱动器型号：芯明天 E01.D 系列-3 通道

一维微动工作台型号：芯明天 XP-631.1SL

该压电驱动器和压电陶瓷采用电阻应变片式传感器实现伺服控制<sup>[19]</sup>，工作台单向分辨率 1nm，重复定位精度 0.05%F.S.，最大工作范围 34μm±20%。压电陶瓷及微动工作台详细参数见附录 E。

## 第四章 微动工作台柔性铰链机构设计

### 4.1 典型结构举例与分析

基于柔性铰链的微动工作台比较经典的结构如图 4.1 中所示, 图 4.1 (a) 为美国国家标准局设计应用的一维微动工作台。工作时, 压电块产生驱动运动, 推动杆  $L_1$  上的 a 点绕 b 点转动, 杆  $L_1$  拉动杆  $L_2$  的 c 点绕 d 点运动, 杆  $L_2$  最终将运动传递到工作台 S 上。由于杆的运动是绕支点的旋转运动, 就如同杠杆一样输入与输出成比例关系, 所以根据杆件尺寸参数比例, 柔性铰链机构也可以具有运动缩放功能。假设图 4.1 (a) 机构的运动缩放比理论为  $K$ , 各杆件的尺寸如图中所示, 则  $K$  的计算方法式 4-1 所示。图 4.2 (b) 所示的单层二维微动工作台为清华大学研制, 在 A, B 处使用压电陶瓷驱动, 经柔性铰链机构运动叠加最后在工作面上可以实现二维运动。这两种柔性铰链机构都是单层铰链机构, 且为整体集成设计, 预留一定大小空间用于安装运动驱动器件, 这种结构结构紧凑、可靠性高, 但是扩展性较差, 且用途范围有限。另一类柔性铰链微动工作台则是使用各种功能模块组合而成, 如图 1.8 及图 1.9 中所示工作台就是组合式微动工作台, 工作台由多个一维微动工作台组合而成, 一维微动工作台的柔性铰链机构包含运动缩放机构、运动解耦机构等主要模块。这类组合型微动工作台机构的组成模块化, 通用性较强, 且方便维护, 但总体结构较为复杂, 且体积较大。本课题最后用于实验微动平台搭建, 为了保留其扩展性, 微动工作台选用多模块组合式结构。

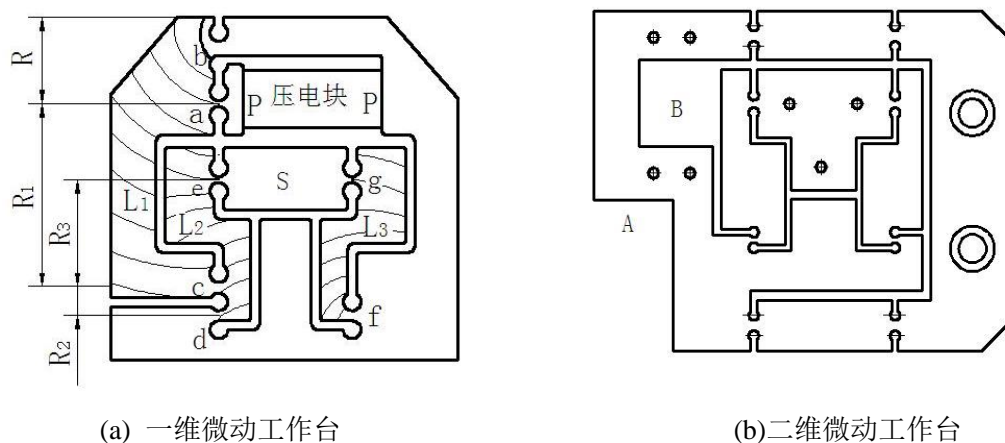


图 4.1 典型结构

$$K = \left(1 + \frac{R_1}{R}\right) * \left(1 + \frac{R_3}{R_2}\right) \quad (4-1)$$

## 4.2 柔性铰链机构的结构设计

### 4.2.1 运动缩放机构的结构设计

单个基于柔性铰链的运动缩放机构的结构如图 4.2 (a) 所示, 机构采用上下对称结构, 运动引导机构采用平行四边形结构, 设计了运动输入输出接口, 方便不同运动驱动器件的运动输入及机构运动输出。该机构从接口 1 输入驱动位移, 则在接口 2 处得到放大后的位移, 若从接口 2 输入驱动位移, 则在接口 1 处得到缩小后的位移。在使用该机构放大位移时其工作杆件的等效连杆机构如图 4.2 (b) 所示, 输入驱动推动杆  $L_1$  绕支点旋转,  $L_1$  通过杆  $L_2$  带动  $L_3$  绕支点转动, 若杆  $L_1$  和杆  $L_2$  在支点两边的等效长度为  $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$ , 则由杠杆原理可知输入与输出的关系如式 4-3 所示。该结构设计为缺口最薄处为  $0.4\text{mm}$ , 设计值  $j$  为 25, 输入、输出接口轴向最大偏移  $3\text{mm}$ 。

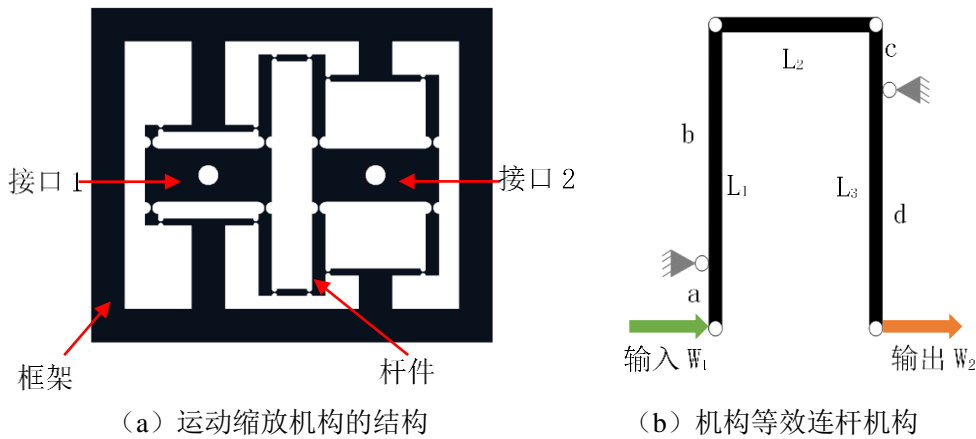


图 4.2 运动缩放机构

$$j = \frac{b}{a} * \frac{d}{c} \quad (4-2)$$

$$W_2 = j * W_1 \quad (4-3)$$

### 4.2.2 运动解耦机构的结构设计

上述的运动缩放机构不仅可以用于串联结构的微动工作台设计, 也可以用于



并联结构的微动工作台的设计,运动解耦机构用于并联机构的运动解耦,本课题设计的运动解耦机构的结构如图 4.3 (a) 所示,该结构的设计原理基于 Shorya Awtar 提出的柔性铰链结构, Shorya Awtar 提出的机构结构如图 4.3 (b) 中所示,该机构可以实现工作台 B 只进行驱动力  $F$  向的位移  $\delta$ ,而不产生转角及垂直于力方向的寄生位移。本设计的主要工作结构采用 3 个 Shorya Awtar 的结构,其中两个位于机构的两边对称分布,用于中间结构的单向运动引导,另一个机构位于中间,用于隔离其他工作轴向的运动影响。该结构设计缺口最薄处为  $0.2\text{mm}$ ,输入、输出接口最大轴向偏移  $1\text{mm}$ ,输出接口最大离轴偏差  $1\text{mm}$ 。

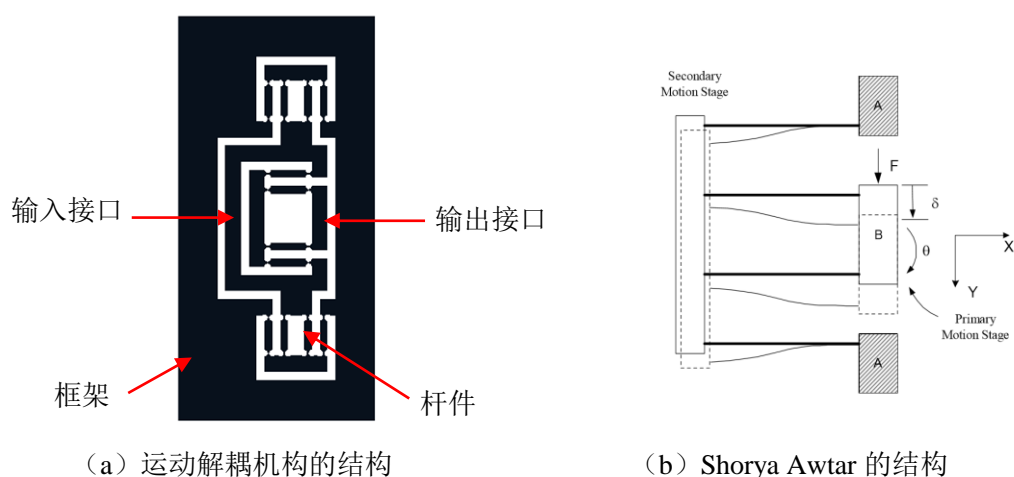


图 4.3 运动解耦机构

### 4.3 柔性铰链机构的有限元分析

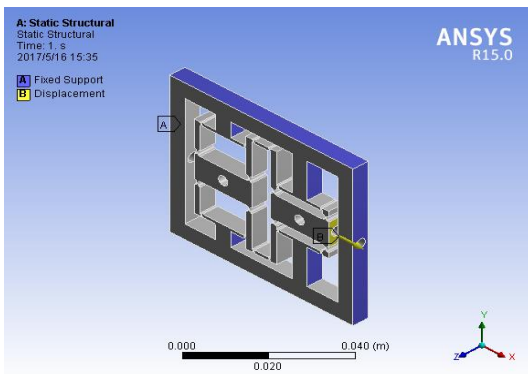
#### 4.3.1 机构运动缩放能力分析

柔性铰链机构的运动仿真分析基于有限元分析软件 Ansys R15.0 的静力学仿真分析功能进行<sup>[20][21]</sup>。主要操作过程有模型建立、网格细化、力学环境设置、结果计算等过程。仿真过程时柔性铰链机构的材料设置为标准弹簧钢。该仿真为验证初步设计的柔性铰链机构的运动缩放性能,固只考虑其运动位移状态,而暂时不考虑其内部力学状态。

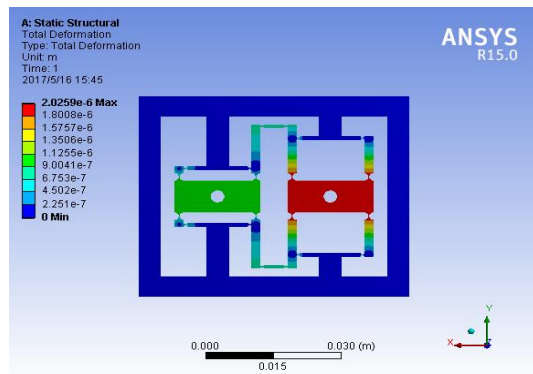
图 4.2(a)中所示机构作为运动放大机构时的仿真设置及结果如图 4.4 中所示。设置柔性铰链的支架结构为固定部分,在接口 1 处输入驱动位移,柔性铰链机构最终整体运动结果如图 4.2 (b) 中所示。当  $X$  向输入分别为  $1\mu\text{m}$ ,  $100\mu\text{m}$  时,其

X 向的运动结果如图 4.2 (c) 及 4.2 (d) 中所示。该机构作为运动缩小机构使用时的仿真设置及结果如图 4.5 中所示, 在接口 2 处输入驱动位移, 柔性铰链机构最终整体运动结果如图 4.5 (b) 中所示。当 X 向输入分别为 1mm, 500 $\mu\text{m}$  时, 其 X 向的运动结果如图 4.5 (c) 及 4.5 (d) 中所示。

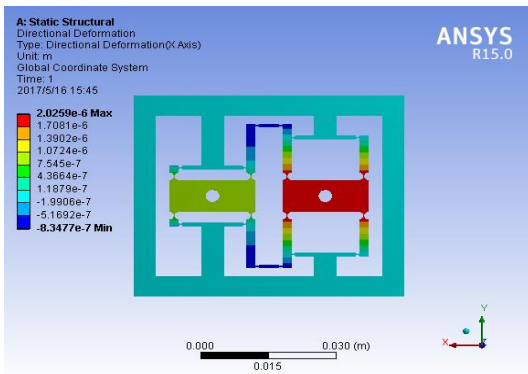
仿真结果表明, 该机构作为运动放大机构使用时, 运动放大比  $j$  在 2.0 左右。该机构作为运动缩小机构使用时, 运动缩小比  $j$  在 21.7 左右。



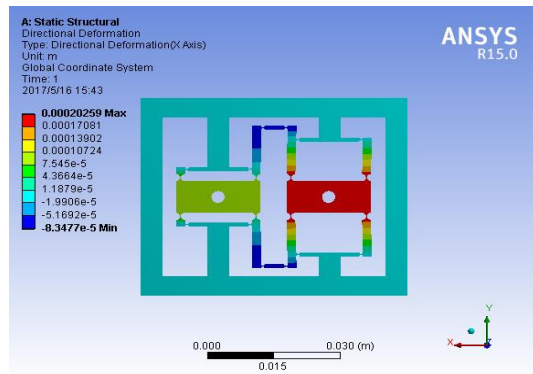
(a) 力学环境设置



(b) 总体运动

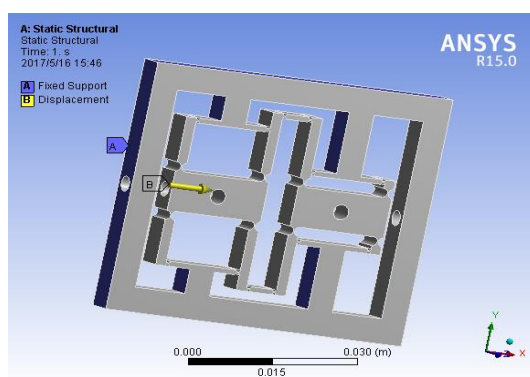


(c) 输入 1 $\mu\text{m}$  后 X 向运动

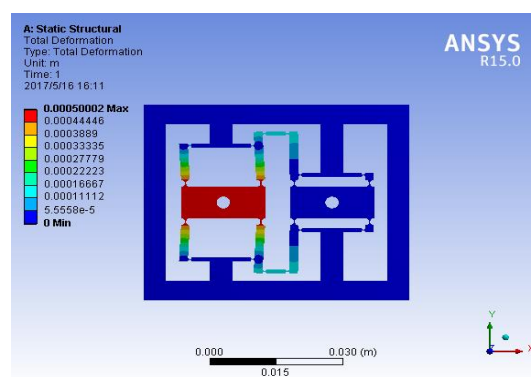


(d) 输入 100 $\mu\text{m}$  后 X 向运动

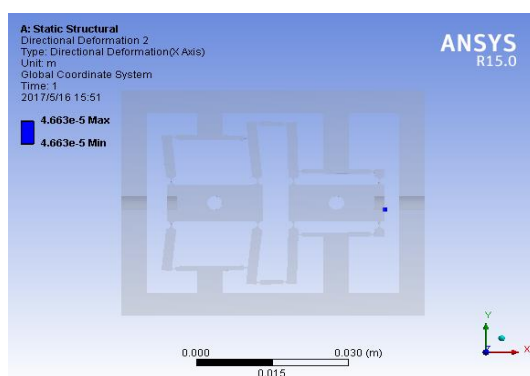
图 4.4 运动放大



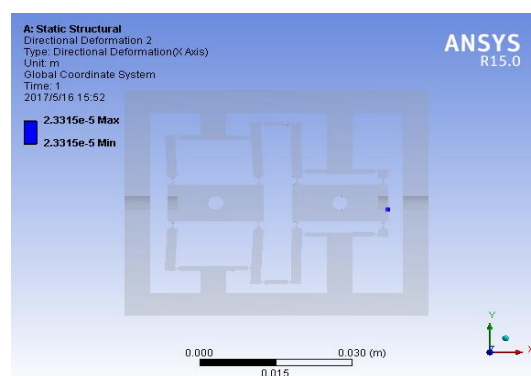
(a) 力学环境设置



(b) 总体运动



(c) 输入 1mm 后 X 向运动



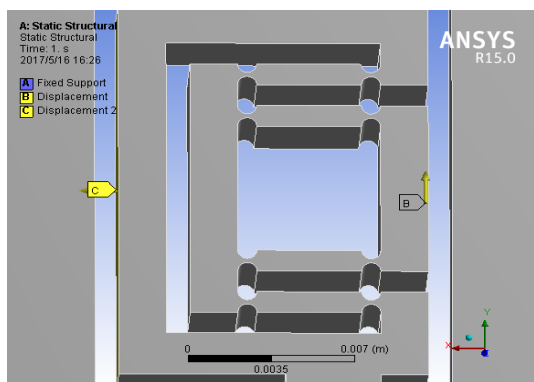
(d) 输入 500μm 后 X 向运动

图 4.5 运动缩小

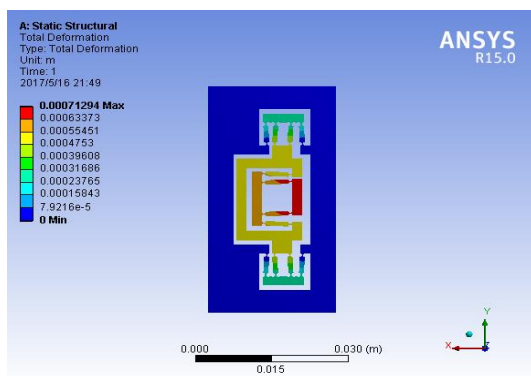
### 4.3.2 机构运动解耦能力分析

图 4.3 (a) 中所示机构的仿真设置及结果如图 4.6 中所示。在机构的输入端口设置一个 X 向的驱动位移  $500\mu\text{m}$ ，在机构的输出接口设置一个 Y 向的干扰位移  $500\mu\text{m}$ ，机构仿真后的整体运动结果如图 4.3 (b) 所示，机构在 Y 向的运动结果如图 4.3 (c) 所示，机构在 X 向的运动结果如图 4.3 (d) 所示

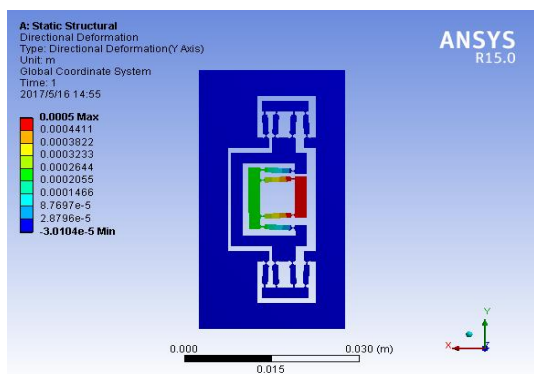
仿真结果表明，该机构可以实现输入接口与输出接口在 X-Y 向运动上的隔离，防止从输出接口进入机构的 Y 向运动对 X 向运动输入机构产生干扰，并能有效的将输入接口的运动引导到输出接口。



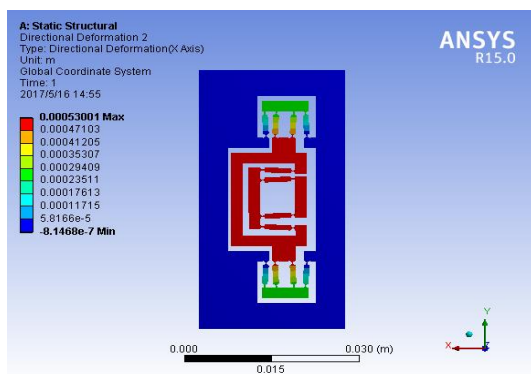
(a) 力学环境设置



(b) 总体运动



(c) Y 向运动



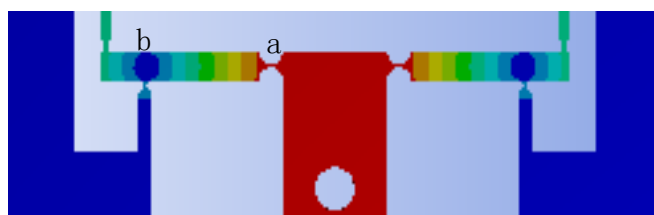
(d) X 向运动

图 4.6 运动解耦

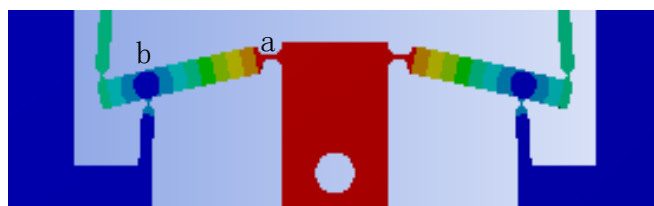
## 4.4 结构分析优化

从 4.3 节的仿真结果可以看出, 运动缩放机构的实际放大比与设计值差较大, 设计值  $j$  为 25, 但仿真结果表明,  $j$  在运动放大及运动缩小的的工作模式中分别在 2.0 与 21.7 左右。经过分析可知, 造成该结果的主要原因为机构中杆件出现了强直现象及杆件出现了变形。造成强直现象主要是因为输入, 输出平台的运动引导机构采用了平行四边形机构。每个平台两侧均有一组平行四边形机构作为运动引导, 平行四边形机构靠近中部的杆件同时也作为运动缩放机构的杆件, 如图 4.7 中所示。通过图中杆件在不同运动状态下对比可以看出, 在工作台的运动范围增大时, 杆件绕支点  $b$  转动的角度  $\theta$  增大且同时在  $a$  处产生寄生位移, 由于  $a$  点连接被固定, 所以该寄生位移由杆件的轴向变形及支点的位移补偿, 这导致了杆件轴向拉力的增大, 增加了系统的负载, 在工作台运动量相当时, 杆件  $a-b$  的长度越短, 杆件轴向拉力越大。系统的驱动运动大部分被用于客服系统内部负载, 造成输出不理想, 特

别是在以接口 2 作为输出接口时, 接口 2 的负载被放大后传递给驱动杆件, 造成驱动杆件较大的变形, 造成整个系统的输出受限。



(a) 工作台运动  $2\mu\text{m}$



(b) 工作台运动  $2\text{mm}$

图 4.7 运动缩放机构局部放大

根据仿真结果简单地优化了运动缩放机构的结构, 将支点改成了运动杆件。优化后结构的仿真结果如图 4.8 所示。作为运动放大机构使用时, 运动放大比例  $j$  的值上升为 2.8 左右。

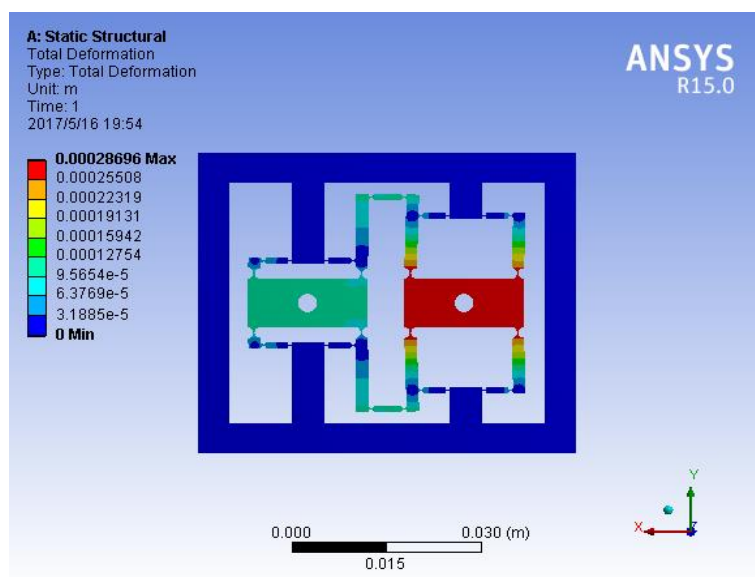


图 4.8 优化仿真结果



## 第五章 微组装平台伺服系统介绍

### 5.1 伺服系统总体结构

伺服系统是传送模块运动功能实现的基础，伺服系统的主要结构如图 5.1 所示，计算机和触摸屏同时作为总控制器，PLC 运动控制器作为中间控制器，伺服驱动器作为底层控制器及驱动器，伺服电机作为被控制的对象，滚珠丝杠机构，工作台等机构被视为传动机构。除图 5.1 所包含的主要对象外，还有伺服电机的编码器，光栅尺为反馈器件<sup>[22]</sup>。整个伺服系统包括关电门开关，电源，线缆，开关等辅助器件。系统分辨率  $1\mu\text{m}$ ，X-Y 平面定位偏差小于  $20\mu\text{m}$ ，工作范围  $X \times Y \times Z = 150 \times 360 \times 170\text{mm}^3$ 。

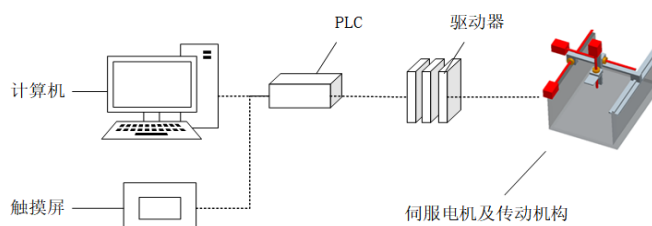


图 5.1 伺服系统总体结构

### 5.2 伺服系统硬件组成

#### 5.2.1 PC 及触摸屏

伺服系统采用计算机和触摸屏同时作为总控制器件，计算机运行上位机软件进行自动组装、规定路线运动等过程中的数据处理，同时也可以直接控制传送模块各功能的开关，进行运行参数的设置。触摸屏是辅助总控制器，也可以独立于计算机运行，相比于计算机，该触摸屏可以实现触摸控制传送模块各功能开关的控制，设置部分运行参数，通过界面直观的显示传送模块的运行状态、任务执行进度。在功能分配设计时，并未进行将大量数据处理任务放在触摸屏进行，所以若要进行自动组装，规定路线运动的装数据预处理，应在计算机进行处理处理。

计算机型号：惠普 PRO-3380

触摸屏型号：DOP-B07S411

### 5.2.2 运动控制器

PLC 运动控制器用于进行传送模块的三轴运动基本控制，控制器具有一定的数字运算能力，是一种工控计算机设备，在整个伺服系统中我们把他作为总控制设备的从机使用。在 PLC 中写入编写好的底层程序，PLC 会根据程序实现一定的功能，在本伺服系统中，PLC 主要的任务包括：与总控制器进行通信、开关控制量的监控、传送模块运动功能的控制实现、三轴伺服电机运转信号的控制、反馈信号的处理。该运动控制器的外部计数器接口有限，只能接受两轴的光栅尺反馈信号，所以使用一个 01HC-H 计数扩展模块用来接收第三轴光栅尺反馈信号。

PLC 型号：DVP-20PM00M

### 5.2.3 伺服电机及驱动器

伺服电机是整个传送模块的运动驱动器件，将电能转化为机械能。滚珠丝杠机构将伺服电机的旋转运动转换成直线运动，从而驱动工作台轴向方向的运动<sup>[23]</sup>，三个直线驱动机构以串联结构组成三维运动机构。由于伺服电机在断电时不会锁死，就会导致滚珠丝杠机构上的工作台可以被外力驱动，这就导致了竖直方向上的工作台会在重力的作用下推动工作台沿导轨下滑，为了防止这种情况的出现，竖直方向的伺服电机装有电磁刹车，电磁刹车可以在断电时将伺服电机的转轴锁死，阻止在外力作用下电机的转动。伺服电机驱动器是直接驱动伺服电机的底层控制及驱动器件，其通过接受来自于伺服电机尾部伺服编码器对伺服电机运转的检测信号，来准确控制伺服电机的运转状态。伺服电机驱动器接收来自 PLC 控制器的伺服电机控制信号，将其放大后驱动伺服电机运动。可以按照需求对伺服电机驱动器的电子齿轮比等功参数行设置，以实现对伺服电机更精准的底层控制。

伺服电机型号：ECMA-C10604SS

伺服电机驱动器型号：ASDA-A2

### 5.2.4 光电门开关及光栅尺

伺服系统采用光电门开关和光栅尺作工作台运动检测器件，每轴上安装有三个光电门开关，其中两个光电门开关用于限位检测，一个用于初始定位近点检测。



每轴在轴向上安装一个光栅尺，光栅尺可以检测工作台的位置变化量，将该检测信息提供给控制器，可以组成全闭环控制。

光电门开关型号：EE-SX671A

光栅尺型号：HXX-24V-1U

### 5.3 伺服系统工作原理

整个伺服系统的主要组成如图 5.2 所示，总控制器发出运动指令及运动参数，PLC 运动控制器根据运动指令打开相对应的运动控制功能，并写入运动参数，伺服电机驱动器根据 PLC 的指令按照预设驱动伺服电机运转，在控制伺服电机的运转时，伺服电机驱动器以伺服电机上编码器反馈的信息作为驱动参照。传动机构内的滚珠丝杠机构将伺服电机的旋转运动转换为线性运动，驱动工作台移动，光栅尺将工作台的位置变化信息反馈给 PLC 控制器，PLC 控制器通过处理此反馈信息并进行运动补偿处理。若伺服驱动器支持闭环控制功能，可以直接将光栅尺的反馈信号提交给伺服驱动器，此时伺服驱动器将以光栅尺的反馈脉冲作为伺服驱动参照。伺服系统的主体电路连接如图 5.3 所示。

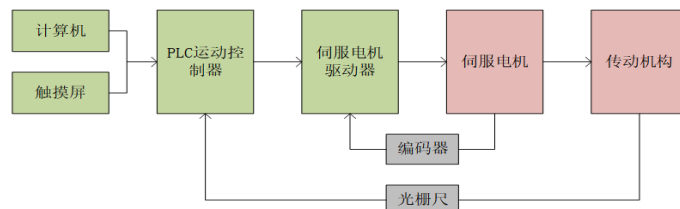


图 5.2 伺服系统总体组成

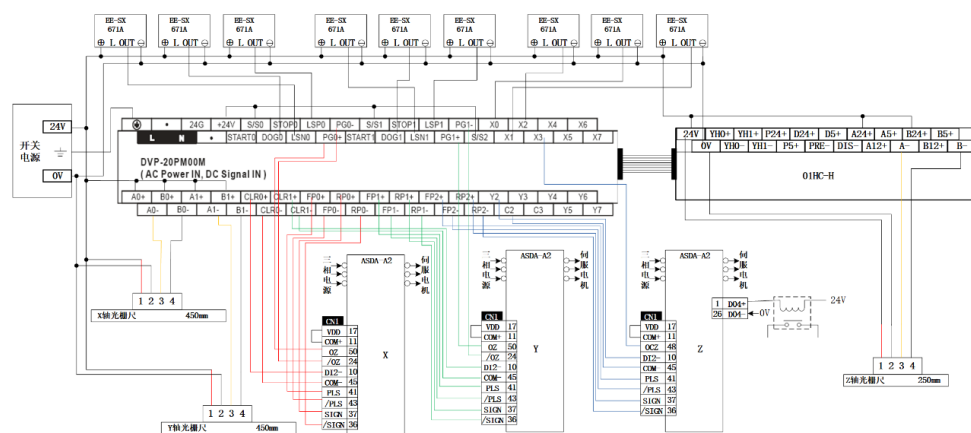


图 5.3 伺服系统主体接线示意图



## 第六章 微组装实验系统的软件系统设计

### 6.1 系统通讯设计

微组装实验系统的通讯系统主要由多个控制器之间的数据传输线路组成，以计算机为总控制器、触摸屏为辅助控制器、传送模块伺服系统的 PLC 控制器、微夹持模块的步进电机 PLC 控制器、压电陶瓷驱动器为从控制器设计了如图 6.1 所示的通讯连接线路，其中触摸屏可以根据需要方便地连接到其他底层控制器上对该模块进行独立的控制。计算机并没有 RS-485 通讯接口，所以使用计算机 USB 接口配合 USB 转 RS-485 转换接头得到 RS-485 通讯接口。系统通讯协议为 Modbus 通讯协议。RS-485 线路工作模式为 RTU，波特率 115200bps，数据长度 8 位，停止位 1 位，偶校验。RS-232 线路工作模式为 ASCII 模式，波特率 9600bps，数据长度 7 位，停止位 1 位，偶校验。

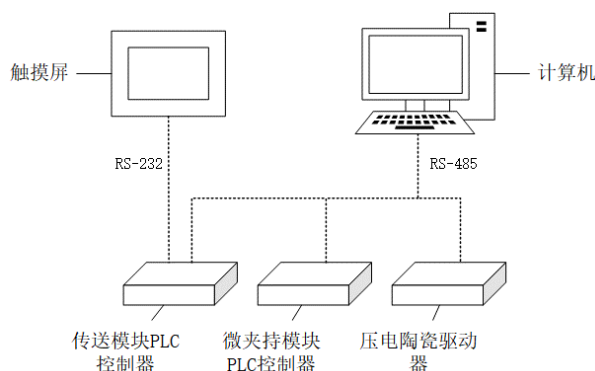


图 6.1 微组装平台通讯示意图

### 6.2 底层软件设计

微组装实验系统的底层软件指系统内的可编程 PLC 控制器，在 PLC 控制器内写入以一定格式编写的程序，可以实现 PLC 完成不同的工作。底层程序主要完成的任务一般有通讯设定、运动控制基本参数设定、各种功能的实现、系统硬件接口的调用、系统软件接口的设置等。传送模块伺服系统 PLC 控制器的底层软件设计在 PMSoft2.10 软件中进行，整个软件的运行流程如图 6.2 所示。

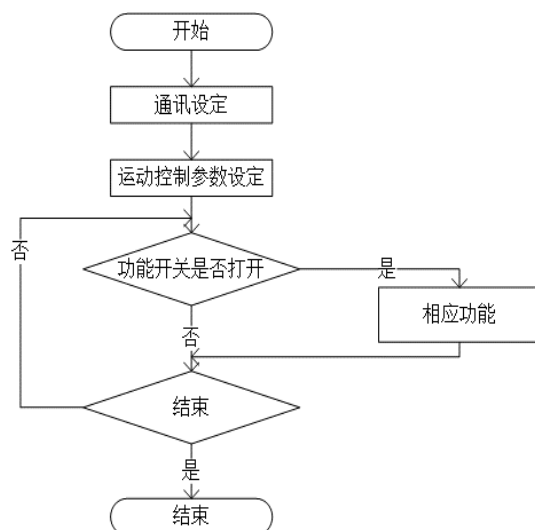


图 6.2 传送模块底层软件运行流程示意图

底层软件主要功能设计的说明如下：

(1) 通讯设定：设定 PLC 的 COM2 RS-485 通讯的通讯参数为：RTU 模式，波特率 115200bps，数据长度 8 位，停止位 1 位，偶校验，站号为 1。

(2) 运动控制参数设定：设定包括各轴的最大运行速度 30000pulse/s，减速速度 300pulse/s，加速时间 300ms，减速时间 300ms，速度输出曲线为梯形，单位系为机械单位，输出脉冲形式 P/D，伺服电机转一圈所需脉冲数 10000，伺服电机转一圈驱动工作台移动的距离 10000。运动控制参数的设置应根据机械系统的参数确定，滚轴丝杠导程为 10000 $\mu\text{m}$ ，伺服电机编码器的分辨率为 1280000pulse/rev，设置伺服驱动器电子齿轮为 128，即 PLC 控制器发出一个脉冲，驱动器控制伺服电机转动 128 个伺服电机编码器脉冲，伺服电机驱动滚珠丝杠机构的工作台移动 1 $\mu\text{m}$ 。

(3) 初始定位功能：初始定位功能是基于 PLC 底层原点回归功能，初始定位开关为 PLC 内部继电器 M4，各轴开关分别为 M1、M2、M3。原点回归功能运行过程如图 6.3 所示，当初始定位 M4 被打开时，三轴各自的原点回归开关被打开，三轴做原点回归运动，当三轴原点回归都完成后，用其完成信号触发预置参数写入程序，这里的预置参数包括程序用基本变量参数，本传送模块的运行速度，演示用坐标参数等，软件接口及开关设置详见附录 B。

(4) 寸动运动功能、相对位置运动功能、绝对位置运动功能：寸动运动功能，相对位置运动功能，绝对位置运动功能直接调用系统底层的对应功能实现，共设置寸动开关 6 个，寸动速度设置寄存器 1 个。相对/绝对运动开关 6 个，坐标设置寄

寄存器 6 个，运行速度设置寄存器 1 个。

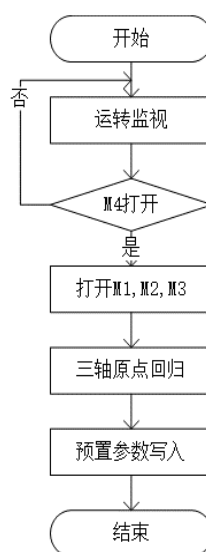


图 6.3 初始定位功能运行流程示意图

(5) 自动组装功能：自动组装功能是微组装系统的主要功能，该功能需要系统内各个模块的配合实现，自动组装程序的主要运行过程如图 6.4 所示。自动组装功能开关为 M5，元器件及组装位置的坐标数据由固定在工作台上的运动 CCD 相机拍照后通过图像处理得出，数据采用 32 位符号数，传送到 PLC 内部 D100 及其后面的寄存器中，拍照也可以使用两个固定的 CCD 相机对准固定位置拍摄。自动组装功能的组装统计，取消自动贴装等模块未在图中列出。虚线部分为其他控制器控制的主要工作任务，自动组装部分程序详见附录 C。

(6) 规定路线运动功能：规定路线运动功能是基于 PLC 控制器可运行部分基本 G 指令代码功能实现的，本设计在使用 PMSoft 软件进行 PLC 软件设计时，保留 OX0 子程序不被使用，并开启了除 OX0 子程序以外程序的存储保护，当计算机使用上位机软件向 OX0 子程序内写入 G 代码时，存储保护可以保证开启存储保护的程序不会被抹掉。开启 OX0 子程序，PLC 控制器会依次执行 OX0 子程序内的 G 代码，控制工作头沿设计路线运动。

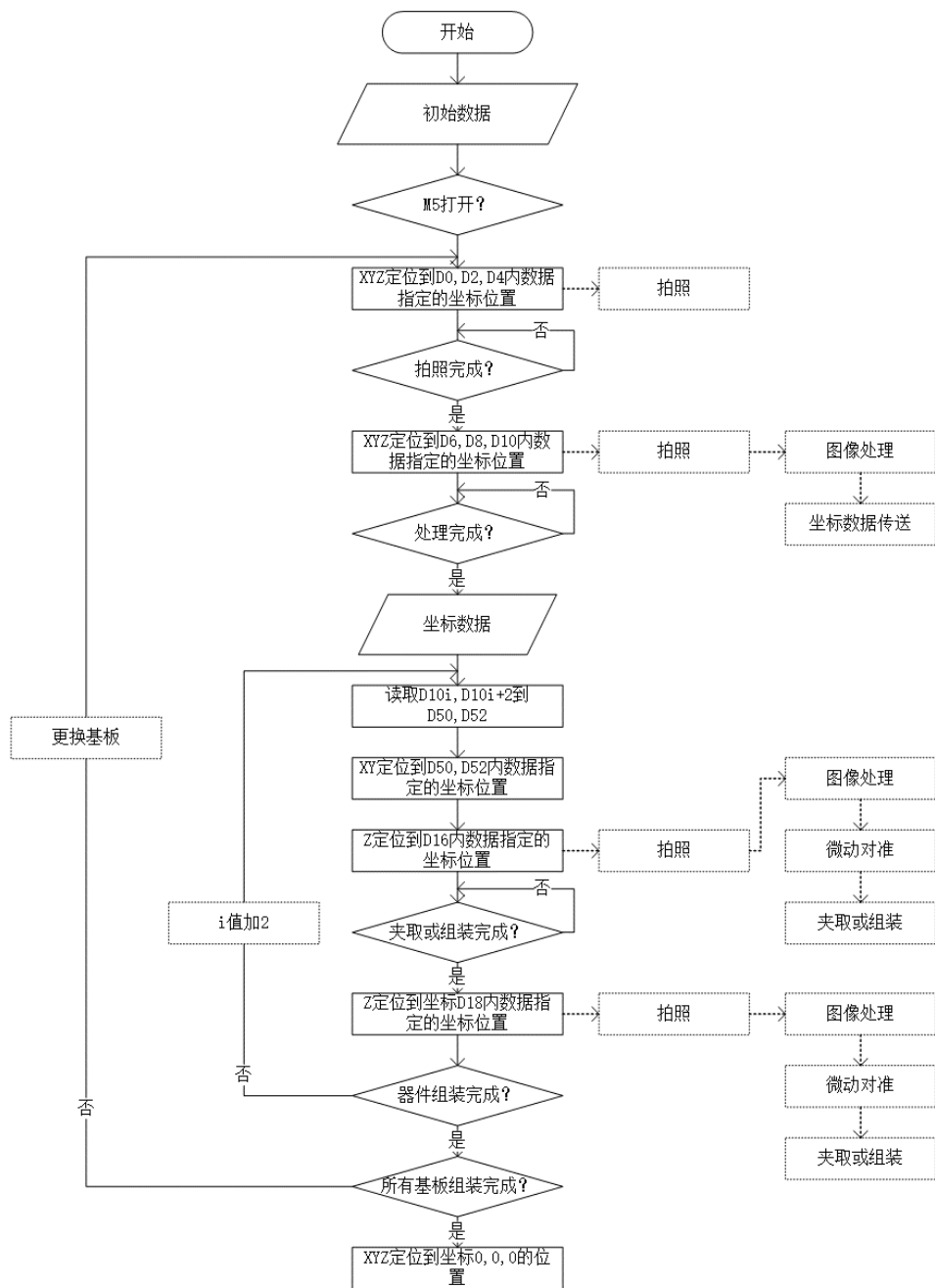


图 6.4 自动组装功能程序运行流程示意图

## 6.3 触摸屏软件及计算机上位机软件

### 6.3.1 触摸屏软件

触摸屏的软件是使用 DOPSoft2.00.20 集成开发环境设计的, 运行于 DOP-B07S411 触摸屏, 在软件设计的起始, 需要设置触摸屏型号, 通讯连接名称, 选择触摸屏的通讯端口并设置通讯参数。在控制传送模块 PLC 控制器时, 我们使用 COM1

端口，通讯方式为 RS232。传送模块的功能控制界面如图 6.5 所示。



(a) 寸动运动页面



(b) 绝对，相对位置运动页面



(c) 直线插补运动页面



(d) 半径模式圆弧插补运动页面



(e) 圆心模式圆弧插补运动页面



(f) 自动组装运动页面

图 6.5 触摸屏页面组成

在触摸屏上可以实现对传送模块的初始定位、寸动控制、相对位置运动、绝对位置运动、直线插补、圆弧插补、以及自动组装功能的开关控制，通过设置框可以设置该功能的部分运动参数，通过点击对应按钮打开或关闭此功能，在页面的右上方从上而下依次为 X、Y、Z 三轴的坐标数据，在初始定位完成后，可以在寸动及位置运动页面右下方通过进度条显示工作台相对物理位置。在自动贴装页面，可以设置工作台的工作位置，基板的数量，以及组装过程中各轴的运行速度，在页面右下方有器件及基板完成数量的进度显示。

### 6.3.2 计算机上位机软件

计算机上位机软件主要进行数据处理及整体控制，现阶段图像处理程序、PLC 控制程序、压电陶瓷驱动器控制程序还未整合到一起。以传送模块规定路线运动为例，说明计算机上位机数据处理、数据传送、功能控制的基本实现过程。

如图 6.6 所示，选取图片作为路线素材，对图片做灰阶处理后识别图中的线路路径，程序将路径转换成 G 代码文件。对上位机软件进行通讯设置，设置完成后打开 G 代码文件并传输到 OX0 程序区，传送完后可以通过 Start 按钮开启沿路径运动功能，通过 Stop 按钮可以停止执行。通过在工作台上安装画笔，可以看到执行结果如图 6.7 所示。



图 6.6 规定路线运动



图 6.7 沿路线运动结果



## 第七章 总 结

本文设计了一个基于柔性铰链机构的微动工作台，通过对柔性铰链机构进行有限元仿真，验证了该柔性铰链机构具有放大倍数为 2.8 左右的运动放大能力，缩小倍数为 21 左右的运动缩小能力，设计的运动解耦机构也具有良好的运动解耦能力。基于此柔性铰链放大机构，若采用芯明天 PSt150/7/40 VS12 压电陶瓷作为驱动，压电陶瓷参数见附录 D，则可以实现微动工作台单向分辨率 2.8nm，理论重复定位精度 0.14%F.S.，工作行程  $106.4\mu\text{m}\pm 10\%$ ，若采用微组装实验系统中的滚珠丝杠模组作为驱动，基于柔性铰链机构的运动缩小与运动解耦，也可以实现并联结构微动工作台的运动实现。本文设计的微组装实验系统也可以实现自动组装等功能，实现了微动工作台的应用，应用系统的整体控制。

本文设计的运动缩放柔性铰链机构在结构上依然有待改进，其运动放大比例与设计值相差太远，但其运动缩小性能良好，下一步可以使用驱动行程较大的音圈电机作为运动驱动器件，配合其运动缩小机构使用，组成具有一定范围内，高分辨率的微动微动工作台。组装实验平台现在将微动工作台放在固定位置工作，实现了固定区域能的精密对准，下一步可以考虑将其安装在 X-Y-Z 三轴传动机构的工作台上，在微动工作台上安装微夹持机构，实现大范围的精密对准，提高微组装实验系统的工作能力。微组装实验系统采用模块化设计，最终导致系统系统集成度不高，下一步可以进行软件控制系统的集成，及系统控制硬件的整合。



## 致 谢

本文的撰写及本文中设计项目的进行都是在指导老师的指导下完成的，老师给予了极大的帮助，并提出了宝贵的意见。在此也要感谢本院其他老师在微组装实验系统搭建过程中给予的指导。在此我真诚的感谢各位老师的帮助。

感谢学长及参与本项目的同学的帮助与支持。

感谢亲友的一直支持与鼓励。



## 参考文献

- [1] 叶鑫, 张之敬, 万毕乐等. 微动工作台的误差源分析. 机械工程学报. 2009,1. 45(1). 258-266.
- [2] 刘庆纲, 陈良泽, 梁君等. 基于有限元的柔性铰链微位移机构研究. 机械科学与艺术. 2015,7. 34(7). 985-988.
- [3] 张元明, 赵鹏飞, 张忠伟. 无人机舵面用玻璃钢柔性铰链片的研制. 工程塑料应用. 2013,8. 31(8). 36-38.
- [4] 贾明, 毕树生, 于靖军等. 大变形柔性铰链的静刚度分析及应用. 北京航空航天大学学报, 2005,7. 31(7). 740-743.
- [5] 李仕华, 韩雪艳, 马琦翔等. 新型并联柔性铰链微动精密平台的研究. 中国机械工程. 2016,4. 27(7). 888-893.
- [6] 颜景平. 精密检测技术. 南京: 东南大学出版社, 1992.
- [7] Shorya Awtar. Synthesis and Analysis of Parallel Kinematic XY Flexure Mechanisms. Department of Mechanical Engineering. 2003,12,19. 43.
- [8] Shorya Awtar. Gaurav Parmar, Design of a Large Range XY Nanopositioning System. Precision Systems Design Laboratory Mechanical Engineering. University of Michigan Ann Arbor MI 48109.
- [9] I-Ming Chen. A Large-Displacement and Decoupled XYZ Flexure Parallel Mechanism for Micromanipulation. International Conference on Automation Science and Engineering. 2006,10,7. 75-80.
- [10] [韩]Hyungsuck Cho 著, 李杰, 毛瑞芝, 王正杰, 黄科伟等译. 光机电系统手册---技术和应用. 北京: 科学出版社, 2010.
- [11] 台达电子工业股份有限公司. DVP-20PM 应用技术手册. 2013.
- [12] 邹峰. 基于压电陶瓷的精密定位系统的设计. 哈尔滨理工大学. 2016,3.
- [13] Yang Y T, Ding Y S, Liu J J. Design of Low-Voltage Power Supply Drive Circuit Based on the Piezoelectric Ceramic Transformer. ICCSEE-13, 2013.765-767.
- [14] 王婧媛. 压电陶瓷执行器位移高精度控制方法的研究. 吉林大学. 2014.
- [15] 兴连国, 周惠兴, 侯书林等. 音圈电机研究及应用综述. 微电机. 2011,4. 44(8). 82-87.
- [16] 王占军. 高频响应音圈电机的建模与控制研究. 桂林电子科技大学. 2016.
- [17] 李盛培. 直线电机伺服驱动控制器研究与实现. 西南科技大学. 2016.
- [18] 高宏伟, 张大兴等. 电子制造装备技术. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2015. 190.
- [19] 哈尔滨芯明天产品技术资料
- [20] 于月民. 压电式微动机构动力学与仿真分析. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2015.
- [21] [美]Saeed Moaveni 著, 王荪, 刘丽娟, 董春敏等译. 有限元分析---ANSYS 理论与应用 (第3版). 北京: 电子工业出版社, 2008.
- [22] [美]Paul R.Yoder,Jr.著, 周海亮, 程云芳译. 光机系统设计 (原书第3版). 北京: 机械工业出版社, 2013.
- [23] 李玉和, 郭阳宽. 现代精密仪器设计 (第2版). 北京: 清华大学出版社, 2010.



## 附录 A

表 A1 自动组装部分默认参数

总片数	1 片
每片总点数	8 点
每轴运行速度	10000 $\mu\text{m/s}$
Z 轴上行位置	150000 $\mu\text{m}$
Z 轴下行位置	160000 $\mu\text{m}$

表 A2 寸动调试部分默认参数

每轴运行速度	10000 $\mu\text{m/s}$
--------	-----------------------

表 A3 位置调试部分默认参数

每轴运行速度	10000 $\mu\text{m/s}$
--------	-----------------------

表 A4 直线插补部分默认参数

每轴运行速度	10000 $\mu\text{m/s}$
起始 X 位置	20000 $\mu\text{m}$
起始 Y 位置	150000 $\mu\text{m}$
起始 Z 位置	160000 $\mu\text{m}$
结束 X 位置	70000 $\mu\text{m}$
结束 Y 位置	50000 $\mu\text{m}$
结束 Z 位置	160000 $\mu\text{m}$

表 A5 圆心模式部分默认参数

每轴运行速度	10000 $\mu\text{m/s}$
起始 X 位置	20000 $\mu\text{m}$
起始 Y 位置	150000 $\mu\text{m}$
起始 Z 位置	160000 $\mu\text{m}$
结束 X 位置	80000 $\mu\text{m}$
结束 Y 位置	150000 $\mu\text{m}$
结束 Z 位置	160000 $\mu\text{m}$
圆心相对于起始点在 X 轴上的位置	30000 $\mu\text{m}$
圆心相对于起始点在 X 轴上的位置	0

表 6 半径模式部分默认参数

每轴运行速度	10000 $\mu\text{m/s}$
起始 X 位置	20000 $\mu\text{m}$
起始 Y 位置	150000 $\mu\text{m}$
起始 Z 位置	160000 $\mu\text{m}$
结束 X 位置	80000 $\mu\text{m}$
结束 Y 位置	150000 $\mu\text{m}$
结束 Z 位置	160000 $\mu\text{m}$
半径 R	50000 $\mu\text{m}$





## 附录 B

软件部分接口及开关设置

表 B1 自动组装参数设置寄存器

定义	X	Y	Z
相机坐标点 1	D0	D2	D4
相机坐标点 2	D6	D8	D10
总片数	D12		
每片总点数	D14		
Z 轴下位	D16		
Z 轴上位	D18		
三轴运动速度	D20		
定义	X	Y	
第一个运动点	D100	D102	
第二个运动点	D104	D106	
第 n 个运动点	D100+2n	D100+2(n+1)	

表 B2 自动组装用计数器

已完成片数计数	C0
已完成点数计数	C1

表 B3 自动组装运行状态继电器

初始化进行中	M75
初始化完成	M68
相机点一到达 xyz	M56,M57,M58
相机点二到达 xyz	M59,M60,M61
目标点到达 xy	M62,M63
Z 轴下降到最低点 z	M161
Z 轴上升到最高点	M165
程序取消中	M67
贴片结束返回运动到原点完成 xyz	M76,M77,M78

表 B4 自动组装功能开关继电器

三轴原点回归，初始化	M 4
自动贴片开始	M 5
自动贴片停止	M66

表 B5 寸动功能

寸动速度设置地址	D24	
定义	正向开关	负向开关
X 轴	M19	M20
Y 轴	M21	M22
Z 轴	M23	M24

表 B6 绝对运动功能

绝对运动速度设置地址	D26		
定义	坐标地址设置	开关	完成标准
X 轴	D28	M25	M191
Y 轴	D30	M26	M195
Z 轴	D32	M27	M199

表 B7 相对运动功能

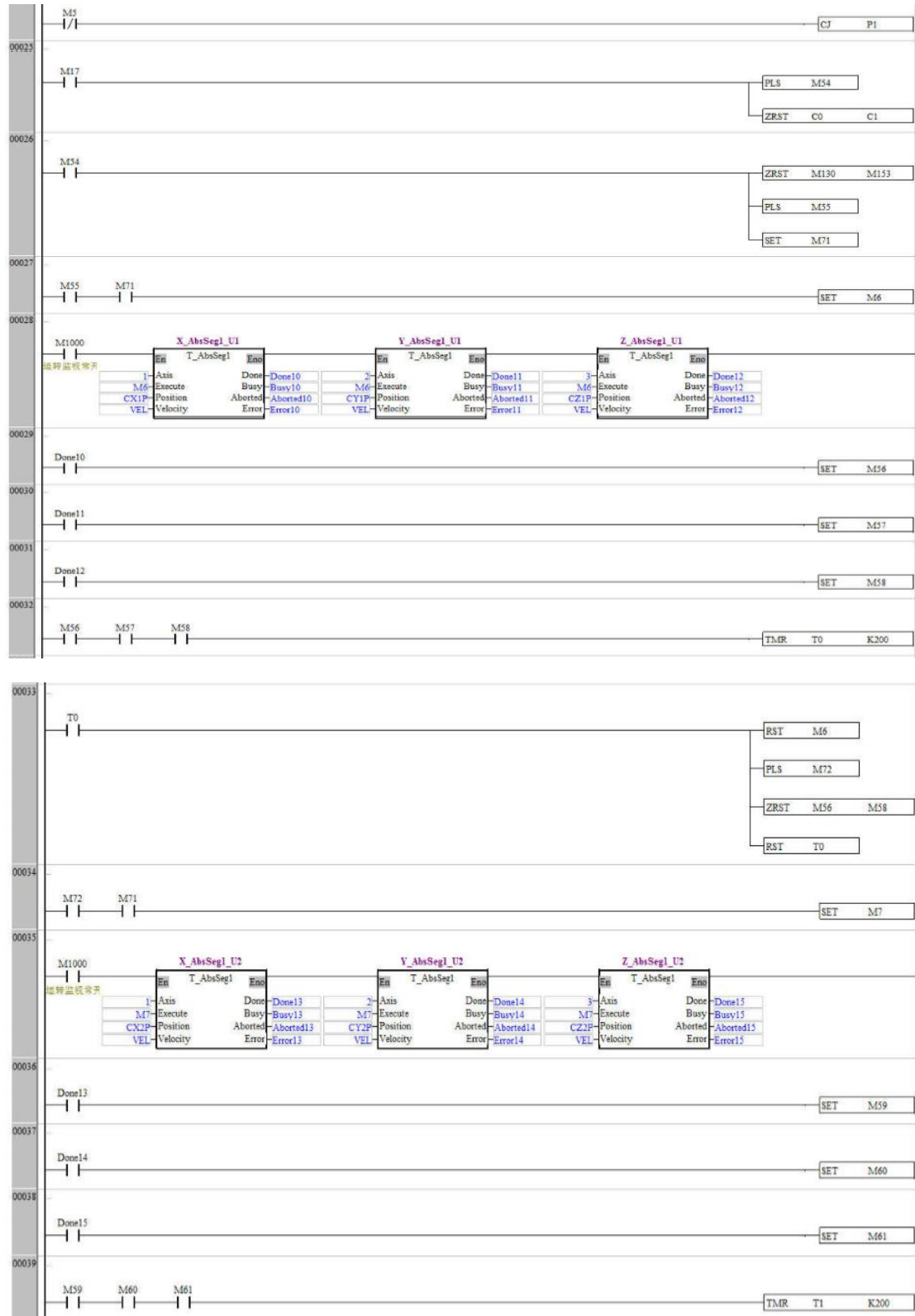
相对运动速度设置地址	D26		
定义	坐标地址设置	开关	完成标准
X 轴	D34	M28	M203
Y 轴	D36	M29	M203
Z 轴	D38	M0	M211

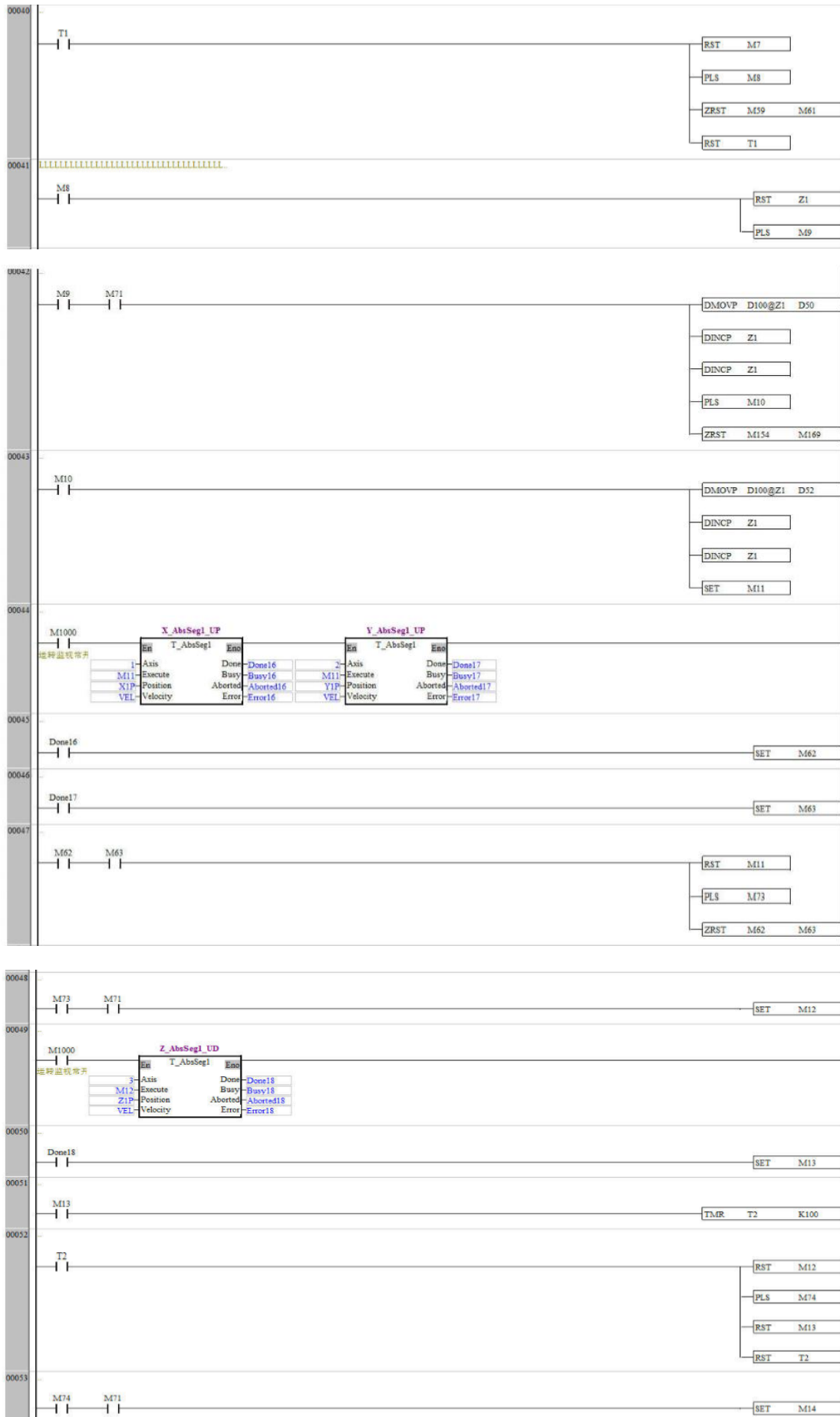
说明：数据 D 区全是单个 16 位寄存器，用两个组成 32 位寄存器，如 D1D0, 内部数据为十进制符号数。数据 C 是计数器数据，16 位。数据 M 区开关向下操作时置 ON 打开其功能，不需要置 OFF，下位机在其功能完成后会自动 OFF，再次使用此功能时再次置 ON 就行，读取标志信号 M 时，标志对应的运动完成时，该 M 会置 ON, 并保存一个扫描周期以上的状态，所以读取标志信号使用该信号的上升沿。

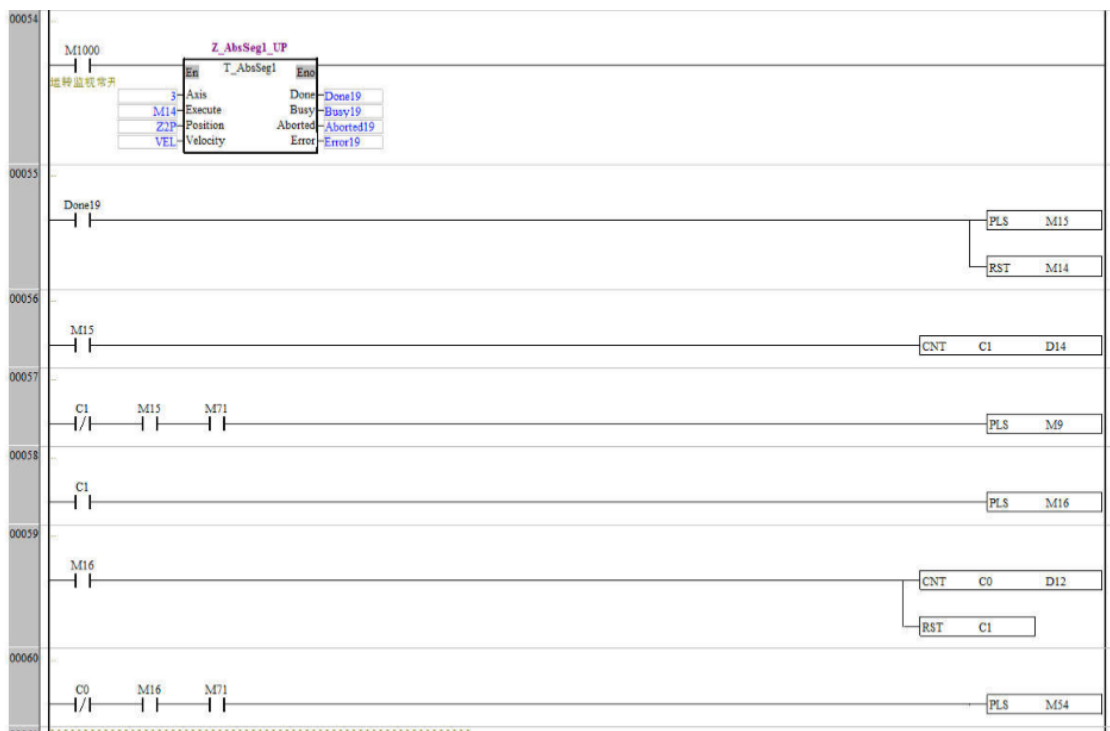
建议数据范围，绝对位置：X(-25000, 160000), Y(-24000, 360000), Z(-9000, 160000)。

## 附录 C

## 部分自动组装程序









附录 D

VS12技术参数（柱形）

型号	标称行程 [μm]±10%*	刚度 [N/μm]±20%	标称推力/拉力 [N]	静电容量 [μF]±20%	谐振频率 [kHz]	长度L [mm]±0.3
PSt150/7/7 VS12	9	120	1200/200	0.7	40	19
PSt150/7/20 VS12	19	60	1200/200	1.8	30	28
PSt150/7/40 VS12	38	25	1200/200	3.6	20	46
PSt150/7/60 VS12	57	15	1200/200	5.4	15	64
PSt150/7/80 VS12	76	12	1200/200	7.2	12	82
PSt150/7/100 VS12	95	10	1200/200	9	10	100
PSt150/7/120 VS12	114	8	1200/200	11	8	118
PSt150/7/140 VS12	133	7	1200/200	13	6	136
PSt150/7/160 VS12	152	6	1200/200	15	5	154

\*标称行程是在0~150V的驱动电压下的位移行程；对于高可靠的长期使用，建议驱动电压在0~120V。选择闭环，线性度、重复定位精度高。最大出力可达25000N，详情请咨询销售工程师。

图 D1 芯明天 VS12 系列技术参数：

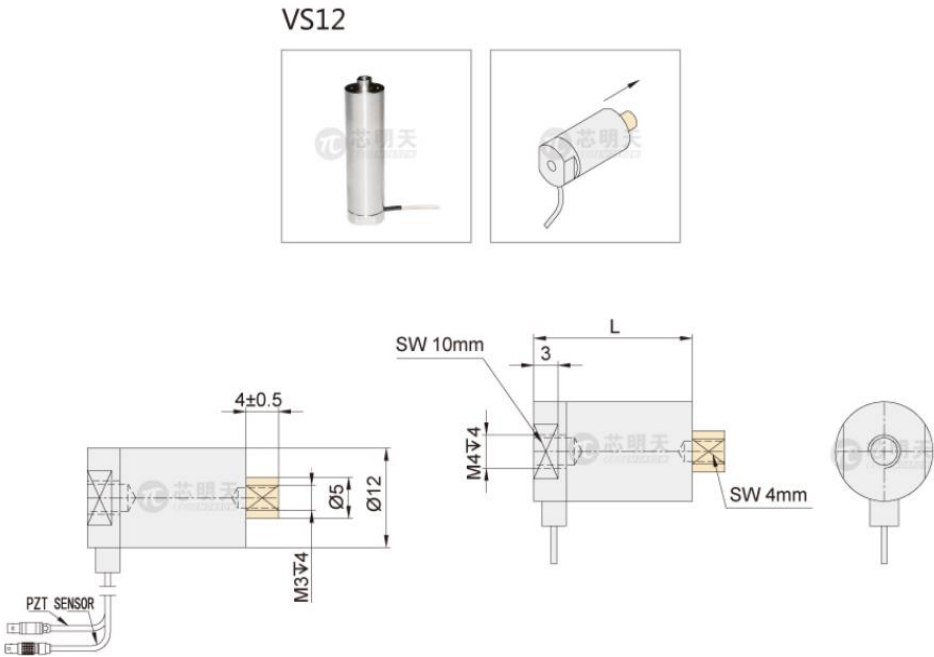


图 D2 芯明天 VS12 系列尺寸参数：





附录 E

XP-63X技术参数

型号	XP-630.1SL	XP-631.1SL	XP-633.1SL	XP-630.1OL XP-631.1OL XP-633.1OL	单位
运动自由度	X	X	X	X	
传感器类型	SGS	SGS	SGS	-	
标称行程范围 ( 0~120V )	12	24	48	同S	μm±20%
最大行程范围(-20~150V)	17	34	68	同S	μm±20%
分辨率	0.5	1	2	0.1/0.2/0.3	nm
闭环线性度	0.1	0.15	0.15	-	%F.S.
重复定位精度	0.115	0.05	0.1	-	%F.S.
运动方向的刚度	40	20	10	同S	N/μm±20%
运动方向的推/拉力	480/80	480/80	480/80	同S	N
空载谐振频率	4.2	3.3	2.5	同S	kHz±20%
最大承载	5	5	5	同S	kg
静电容量	1.8	3.6	7.2	同S	μF±20%
材质	铝	铝	铝	同S	
重量	0.15	0.155	0.220	同S	kg±5%
出线长	1.5	1.5	1.5	同S	m±10mm

最大驱动电压可在-20V~150V使用,对于高可靠的长期使用,建议驱动电压0~120V。

图 E1 芯明天 XP-63X 一维压电平移台技术参数

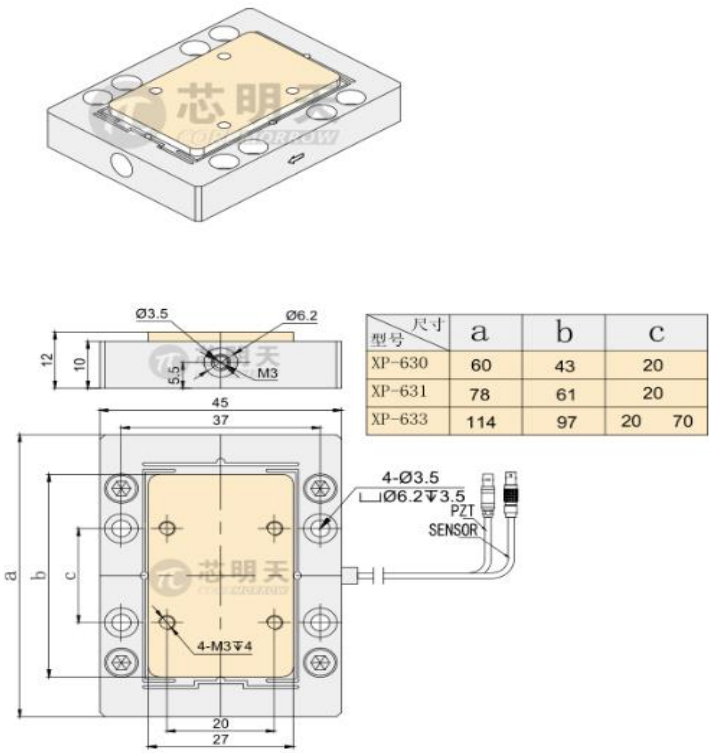


图 E2 芯明天 XP-63X 一维压电平移台尺寸参数

E01.D技术参数			
型号	E01.D		
仪扩展功率放大模块	1~6通道		
长×宽×深	280×360×170mm		
输入模拟信号	单极性0~+10V或0~+5V,双极性-10~+10V或-5~+5V		
可选输出电压	100V、150V、200V、300V、±150V	±200V、600V、±300V	900V、1800V、±900V
输出电压纹波	≤5mV	≤10mV	≤20mV
输出电压分辨率	16Bit(满量程的1/30000)、24Bit(满量程的1/100000)		
串口/USB通信接口	RS-232/RS-422(波特率9600)/USB 2.0		
电压稳定性	< 0.1%F.S. ( 满量程 ) /8hours		
模拟输入阻抗	100KΩ±20%		
空载带宽值带宽	可选择1k、10k、20k、50kHz		
功率放大模块通道数	1~3		
单通道平均功率	7W ~ 35W		
单通道峰值功率	20W ~ 110W		
平均电流	40mA ~ 350mA		
峰值电流	100mA ~ 11A		
带宽	1kHz ~ 50kHz		
电流限制	短路保护		
电压增益	10 ~ 90 ( ±0.1 )		
调节旋钮	10圈		
传感器模式	电阻式SGS、电感式LVDT、电容式CAP		
PZT传感器控制模块通道数	1 ~ 3		
PZT传感器控制模块输入接口	LEMO ERA.0S.304.CLL		
PZT传感器控制模块输出接口	LEMO ERA.0S.303.CLL ( 三路 ) /BNC ( 单路 )		
PZT传感器控制模块输出电压	单极性：0~+10V 双极性：-10~+10V		
显示与接口模块通道数	1~3		
D/A转换器	16/24 Bit ±10V输出		
A/D转换器	16Bit ±10V输入		
峰值输出电流	峰值输出功率/标称电压输出 ( 单通道 )		
平均输出电流	平均输出功率/标称电压输出 ( 单通道 )		
动态输出特性公式	峰峰值电压(V)×频率(Hz)×负载(F)≤平均输出电流 ( A )		
供电模式	AC 220V±10% 50Hz±10%		
功能表			
组合形式	可配备功率放大模块、PZT传感器控制模块、显示与接口模块		
外部特征	各模块间可任意组合，可升级		
基本控制方式	手动调节、模拟输入、计算机串口/USB接口、自发波形控制、开/闭环控制		
基本功能	过流保护功能，温度保护功能，动态功率保护		
软件配置	配有功能强大的标准计算机控制软件		
自发波形功能介绍	可自发输出正弦波，方波，三角波，锯齿波，频率在(1kHz~10kHz)以内不衰减、不失真		
液晶键盘通讯接口	标配 ( LCD，薄膜按键，RS-232/422，USB )		

图 E3 芯明天 E01.D 系列-3 通道压电陶瓷驱动器技术参数