



北京大學

2023 年秋季学期先进机器人控制 课程报告

题 目： 上肢动力外骨骼机器人设计

姓 名： 徐明 许诺 朱文铎 王润 孟凡旭

院 系： 工学院先进制造与机器人系

2023 年 12 月

目 录

第 1 章 上肢外骨骼机器人整体方案设计.....	3
1.1 人体上肢解剖学分析	3
1.1.1 人体上肢结构.....	3
1.1.2 人体上肢运动规律.....	4
1.2 上肢外骨骼机器人设计要求	5
1.3 上肢外骨骼机器人方案设计	6
1.3.1 自由度与主要参数确定.....	6
1.3.2 动力源选择.....	7
1.3.3 传动方式选择.....	8
1.3.4 肩关节自动对心原理.....	8
1.3.5 重力补偿原理.....	9
第 2 章 上肢外骨骼机器人机械结构设计.....	11
2.1 外骨骼机器人结构设计	11
2.1.1 机械臂模块.....	11
2.1.2 肩关节自动对心模块.....	14
2.1.3 重力补偿模块.....	14
2.1.4 动力源模块.....	15
2.1.5 机器人整体装配效果.....	15
2.2 传动策略与实施方式	16
第 3 章 机械臂运动学分析与仿真.....	18
3.1 运动学理论分析	18
3.1.1 正运动学理论分析.....	18
3.1.2 逆运动学理论分析.....	21
3.2 运动学仿真	24
3.2.1 机械臂运动学模型的建立.....	24
3.2.2 正运动学仿真.....	25
3.2.3 逆运动学仿真.....	25
第 4 章 机械臂工作空间分析与轨迹规划.....	26
4.1 机械臂工作空间分析	26
4.1.1 理论基础.....	26

4.1.2 仿真分析.....	26
4.2 机械臂轨迹规划	27
4.2.1 理论基础.....	27
4.2.2 仿真分析.....	28
第5章 机械臂动力学分析与仿真.....	30
5.1 动力学理论分析	30
5.1.1 机械臂的动能.....	30
5.1.2 机械臂的位能.....	31
5.1.3 机械臂的拉格朗日方程.....	32
5.2 ADAMS 动力学仿真.....	32
5.2.1 仿真前的准备工作.....	33
5.2.2 仿真过程与结果.....	34
第6章 上肢外骨骼机器人控制策略设计.....	36
6.1 有限状态机控制策略	36
6.2 阻抗控制方法	37
6.3 位置控制方法	39

第 1 章 上肢外骨骼机器人整体方案设计

本章首先从人体解剖学角度分析人体上肢的结构特征与运动规律，然后提出上肢外骨骼的设计要求。最后，基于这两方面内容确定外骨骼整体设计方案。

1.1 人体上肢解剖学分析

结构决定功能。上肢外骨骼机器人的作用对象为人体上肢，分析人体上肢结构，进而确定其运动规律，对于外骨骼结构设计具有指导意义。本小节主要基于人体解剖学原理分析人体上肢的骨骼结构与运动规律。

1.1.1 人体上肢结构

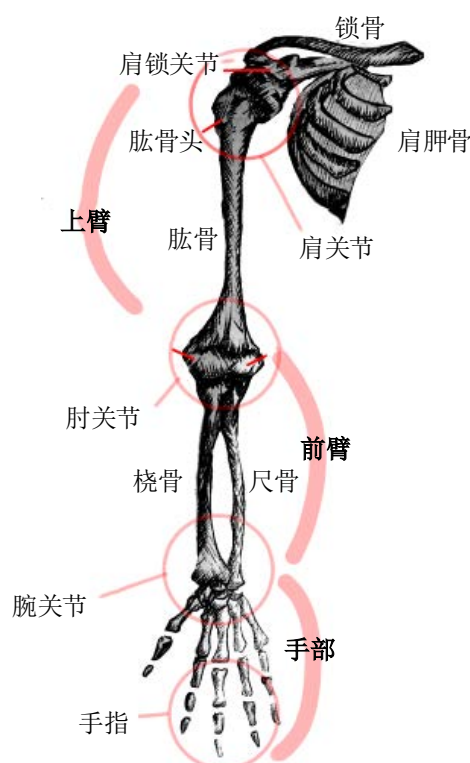


图 1-1 人体上肢结构图

人体上肢骨骼结构如图 1-1 所示。自人体远端至人体近端，上肢由手部、前臂、上臂三部分组成，其中，手部与前臂通过腕关节相连，前臂与上臂通过肘关节相连，上臂与躯干通过肩关节相连。手部的指骨、前臂的桡骨与尺骨、上臂的肱骨、肩部的肩胛骨与锁骨是主要的上肢骨骼。

肩关节、肘关节与腕关节是人体上肢的主要关节，本文所设计的外骨骼机器人不涉及腕关节的运动训练。因此，本文重点讨论肩、肘关节的结构特征与运动规律，分别介绍如下：

(1) 肩关节：肩关节又名盂肱关节，是人体活动范围最大，活动最灵活的关节，由肱骨头和肩胛骨的关节盂构成，为球窝式关节。肩关节可看作为一个空间球铰机构，肱骨头绕盂肱关节转动中心有三个旋转自由度。

(2) 肘关节：桡骨、尺骨上端与肱骨下端构成肘关节。肘关节为滑车式关节，具有两个自由度。

1.1.2 人体上肢运动规律

据上文分析可知，人体上肢肩、肘关节具有五个自由度，在日常生活中使用非常频繁，各自由度详细介绍如下：

肱骨头绕盂肱关节转动中心的三个旋转自由度分别产生上臂外展/内收、前屈/后伸与外旋/内旋运动，如图 1-2 所示。

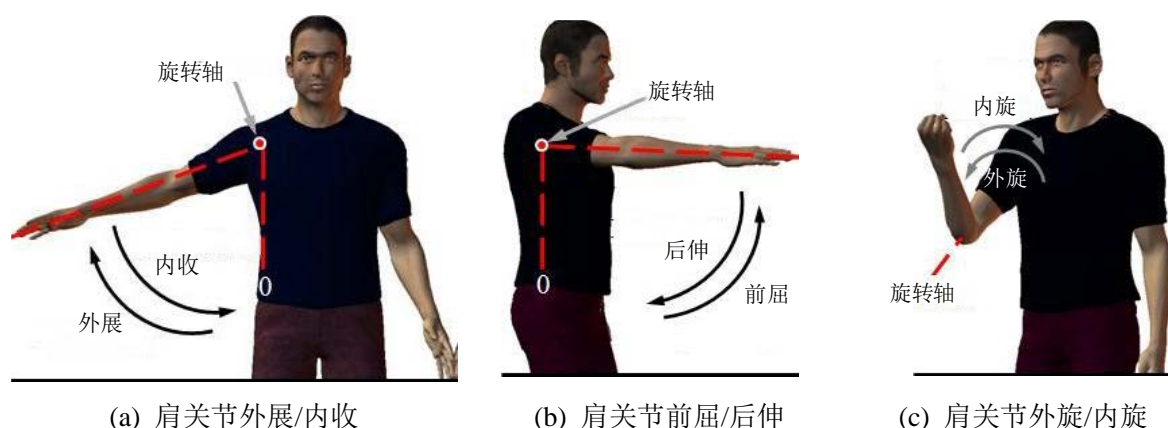


图 1-2 肩关节运动形式

肘关节的两个自由度分别产生前臂前屈/后伸、外旋/内旋运动，如图 1-3 所示。

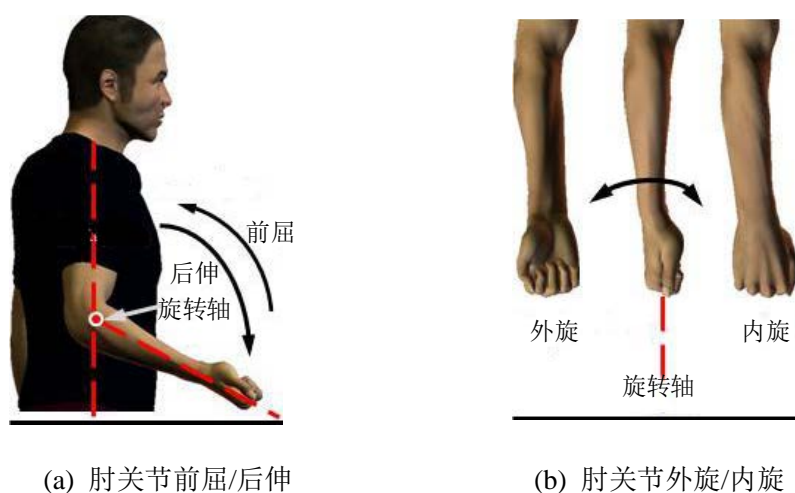


图 1-3 肘关节运动形式

此外，由于肩锁关节与胸锁关节的带动作用，在上肢运动过程中肱骨头与肩胛骨的

关节盂构成的肩关节本身会在空间内的三个方向移动，其中，移动幅度以竖直方向为最。如肩关节在做外展运动时，会伴随着肩胛骨旋转的节律性变化，导致盂肱关节转动中心在空间内移动，称为肩肱节律^[24]。盂肱关节转动中心移动原理如图 1-4 所示。在进行上肢外骨骼结构设计时应考虑盂肱关节转动中心在空间内的移动。

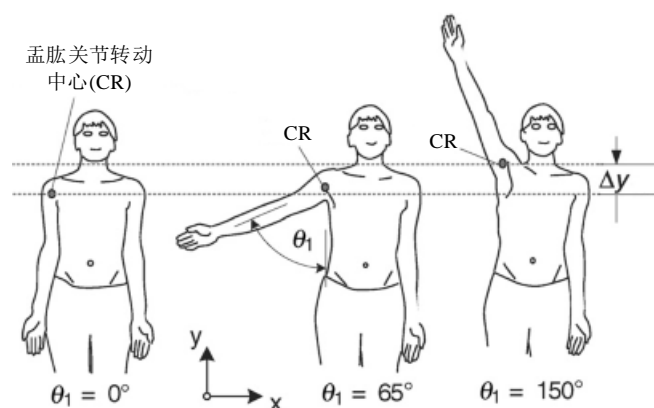


图 1-4 盂肱关节转动中心移动原理图

由于控制上肢实现各个运动自由度的骨骼与肌肉结构各不相同，上肢关节各自由度的运动范围也不同。人体肩、肘关节各自由度的运动范围如表 1-1 所示。表中运动范围测量的初始姿态为上肢平伸与肩同高，垂直于冠状面，手掌朝内与矢状面平行^[25]。其中，极限运动范围是指人体生理特征所允许的最大运动范围，功能运动范围是指日常生活中经常用到的运动范围。

表 1-1 人体上肢肩、肘关节运动类型与运动范围

运动类型	极限运动范围	功能运动范围
肩关节 外展/内收	$0^{\circ} \sim 105^{\circ} / 0^{\circ} \sim 45^{\circ}$	$0^{\circ} \sim 90^{\circ} / 0^{\circ}$
肩关节 前屈/后伸	$0^{\circ} \sim 45^{\circ} / 0^{\circ} \sim 115^{\circ}$	$0^{\circ} \sim 30^{\circ} / 0^{\circ} \sim 90^{\circ}$
肩关节 外旋/内旋	$0^{\circ} \sim 50^{\circ} / 0^{\circ} \sim 80^{\circ}$	$0^{\circ} \sim 20^{\circ} / 0^{\circ} \sim 75^{\circ}$
肘关节 前屈/后伸	$0^{\circ} \sim 135^{\circ} / 0^{\circ} \sim 5^{\circ}$	$0^{\circ} \sim 130^{\circ} / 0^{\circ}$
肘关节 外旋/内旋	$0^{\circ} \sim 50^{\circ} / 0^{\circ} \sim 50^{\circ}$	$0^{\circ} \sim 50^{\circ} / 0^{\circ} \sim 50^{\circ}$

1.2 上肢外骨骼机器人设计要求

上肢外骨骼机器人是具有特定应用场景的机械装备，为实现其功能，应根据其应用场景与使用条件制定合理、全面的设计要求，在根本上保证机器人设计的有效性。基于上文分析结果，现将上肢外骨骼机器人设计要求总结如下：

(1) 人-机相容性：上肢外骨骼机器人带动人体上肢运动以实现运动训练，机器人运动规律应与人体上肢自然运动规律相一致，不能引入超出人体上肢生理范围的运动，以免对用户造成二次伤害。由于盂肱关节转动中心会在肩锁关节与胸锁关节的带动下做

复杂空间运动,在进行肩关节康复机构设计时应考虑人机相容性要求,使康复机构转动中心自动适应肩关节转动中心的空间运动,实现关节转动中心“自动对齐”。

(2) 普适性:接受上肢运动训练的用户身高、体重等特征往往个体差异较大,而进行用户个性化设计,生产专用于某类用户的外骨骼机器人会大幅增加成本,不利于产品推广。因此,应对上肢康复机器人进行普适性设计,研发适用于绝大部分用户的上肢外骨骼机器人。

(3) 轻量化:外骨骼是一种可穿戴式机器人,而患者的承载能力本就显著低于正常人,这就要求机器人的本体质量应尽可能小,而且应专门设计为患肢提供重量补偿的机械结构。

(4) 安全性:上肢外骨骼机器人直接作用于人体肢体,出现故障时可能引入超出人体生理范围的运动,轻则对患肢韧带、肌肉等组织造成一定损伤,重则可能造成骨折。因此,应在机械结构、控制系统等多维度进行安全防护,防止意外情况发生。

1.3 上肢外骨骼机器人方案设计

根据人体上肢运动特征与机器人设计要求确定总体设计方案是进行上肢外骨骼机器人设计的第一步,在整个设计周期内扮演重要角色。首先,本小节将基于上文内容确定所设计上肢外骨骼的自由度及其分布特征;其次,根据人体上肢测量学数据确定外骨骼主要结构参数;然后,选择合适的动力源与传动方式;最后,完成肩关节自动对心机构与重力补偿机构的原理方案设计。

1.3.1 自由度与主要参数确定

本文旨在设计一款为肩、肘关节提供运动训练的上肢动力外骨骼,为达成这一目标,需设置五个主动自由度,分别对应肩关节外展/内收、前屈/后伸、外旋/内旋与肘关节前屈/后伸、外旋/内旋运动,如图 1-5 中 $J_1 \sim J_5$ 所示。与此同时,考虑人机相容性要求,应设置三个移动自由度以适应肩关节转动中心在空间内的运动,如图 1-5 中 $P_1 \sim P_3$ 所示。 $P_1 \sim P_3$ 设置为被动型,无动力源驱动,使外骨骼肩关节转动中心被动适应人体肩关节转动中心,具体实现原理将在本节肩关节自动对心原理部分阐述。为满足普适性设计要求,设置 P_4 与 P_5 用于调整杆件长度,这两个自由度在外骨骼工作时被锁定,仅在调整外骨骼参数时起作用。外骨骼各个主动自由度的运动范围与相应人体关节的功能运动范围一致。

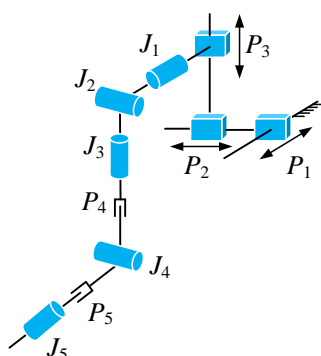


图 1-5 上肢外骨骼自由度简图

为保证所设计的外骨骼的现实使用价值，根据国家标准 GB/T 10000-1988^[26]中的人体上肢测量学统计数据确定外骨骼主要结构参数。国标中所涉及的中国成年人臂长统计数据如表 1-2 所示。

表 1-2 中国成年人臂长统计数据

百分位数	男	女	男	女
	上臂长/mm	上臂长/mm	前臂长/mm	前臂长/mm
1%	279	252	206	185
5%	289	262	216	193
10%	294	267	220	198
50%	313	284	237	213
90%	333	303	253	229
95%	338	308	258	234
99%	349	319	268	242

上表中，百分位数为统计学概念，50%表示中国成年人人体臂长的中位数，在人群中出现的频率最高。由于该标准制定于 1988 年，1989 年开始实行，距今时间较长，考虑到人民生活水平的提高，现在的成年人臂长尺寸与当时相比应该有所增长，因此选择 90%的数据为设计基准，同时保证外骨骼能够适应处于 50%~99%范围内的成年人人体臂长。基于此，设置外骨骼上臂长调整范围为 300~350mm，前臂长调整范围为 230~270mm。

1.3.2 动力源选择

目前，上肢外骨骼机器人的驱动方式主要有电机驱动、液压驱动与气压驱动三种。其中，采用液压驱动虽然可精确、快速地产生大扭矩，但由于其需要布置复杂油路，且

液压油容易泄露从而造成环境污染，因此在外骨骼中较少采用；采用气压驱动虽然无污染，但气压驱动设备一般较笨重，占用空间较大，且驱动精度较低，不太适用于作为外骨骼的动力源；相比之下，电机驱动由于其高速、高精度等优点，在外骨骼康复机器人驱动领域脱颖而出。

在外骨骼中，常用的电机有直流无刷电机、直流有刷电机、直流永磁力矩电机、伺服电机、步进电机等。其中，伺服电机可实现闭环控制，更加精确，综合考量后选其作为本文所设计的外骨骼的动力源。

1.3.3 传动方式选择

传统的机械传动方式如齿轮转动等应用于外骨骼会大幅增加其本体重量，与轻量化设计要求相矛盾，不利于改善用户体验。采用柔索远程驱动可降低外骨骼本体重量，在外骨骼机器人领域应用较为广泛。本文创新性地选用柔索(Cable)-鲍登线(Bowden Cable)联合传动方式，取得了一些有益效果，具体叙述如下：柔索作为一种远程传动元件，具有负载自重比大、速度精度比高等优点，但其只有在绷紧状态下才可传递拉力，这就使得动力源与执行机构间的相对位置不可调，大大限制了机械装置内部布局的灵活性。鲍登线的结构类似车闸线，由外鞘和钢丝绳两部分组成。外鞘起导向作用，可将内部的钢丝绳灵活地引导至任意固定点，靠钢丝绳与外鞘之间相对运动传递力。但是由于钢丝绳与外鞘之间的摩擦力通常较大，鲍登线的传动效率较低。本文在执行机构即外骨骼机械臂的内部采用柔索传动，在机械臂与动力源之间采用鲍登线传动，设计柔索连接器将柔索与鲍登线内部的钢丝绳相连，成功将二者优点结合在一起，使传动既灵活又高效。

1.3.4 肩关节自动对心原理

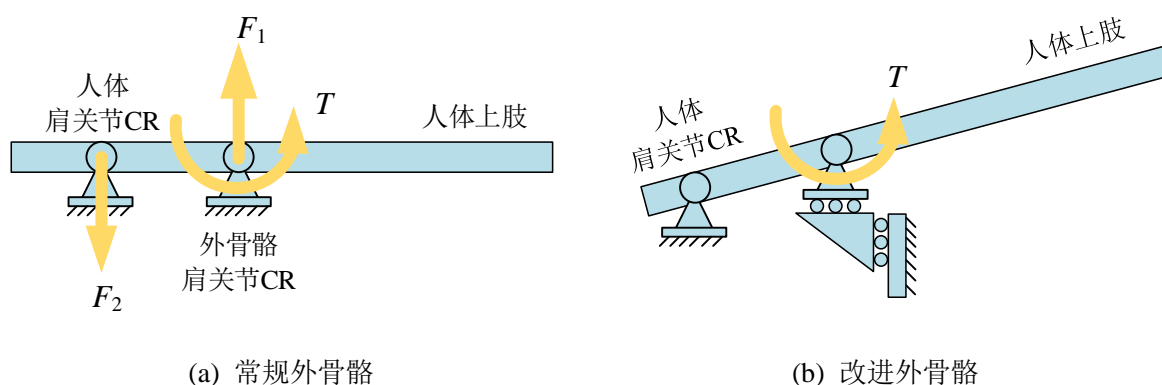


图 1-6 肩关节自动对心原理图

上文提到，若外骨骼肩关节转动中心与人体肩关节转动中心不重合，运动训练过程会对患肢造成二次伤害。本小节将详细阐述伤害产生的机理，并提出肩关节自动对心机

构的设计方案。

图 1-6 为以二维形式展示的肩关节自动对心原理图。不考虑肩关节转动中心在空间中的运动而设计的常规外骨骼工作原理如图 1-6(a)所示。正常状态下，外骨骼肩关节转动中心与人体肩关节转动中心重合，但是当肩关节转动中心在肩锁关节与胸锁关节的带动下偏离原位置时，两转动中心不再重合，外骨骼对患肢施加的驱动力矩 T 会对人体肩关节转动中心产生作用力 F_2 ，相当于外骨骼对人体肩关节产生“撬动”作用。在这种情况下，只有通过使人体软组织变形才能实现旋转，而若驱动力矩过大或两转动中心间的距离过长，导致人体软组织变形量超过正常生理范围，便会对患肢造成二次伤害。改进后的外骨骼工作原理如图 1-6(b)所示，外骨骼肩关节转动中心可在空间内移动，阻止了“撬动”作用力的产生，使用户可以更安全、更舒适地进行运动训练。在三维空间内的自动对心原理与二维形式相同。

目前已有的肩关节自动对心机构大多由直线运动滑块导轨组成，随动性较差，且承受扭矩时会严重影响其运动灵活度。基于此，本文创新性的采用双万向节连杆机构来提供肩关节自动对心所需的被动自由度，具体结构将在第 2 章中详细阐述。

1.3.5 重力补偿原理

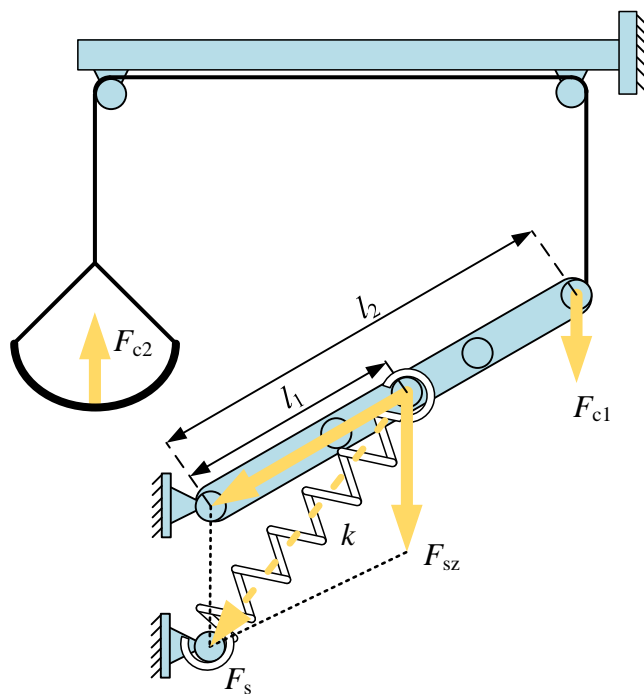


图 1-7 重力补偿原理图

需要进行运动训练的用户运动能力与承载能力均较弱，因此应为外骨骼机械臂本体和患者患肢提供重力补偿，降低患者完成运动训练的难度以提高患者的积极性。本文

所采用的重力补偿机构原理如图 1-7 所示。图中，弹簧的弹性系数为 k ，变形量为 x ， F_s 为弹簧力， F_{sz} 为弹簧力在竖直方向的分量， l_1 、 l_2 为杆件长度， F_{c1} 、 F_{c2} 为补偿力。由图 1-7 中所示几何关系，可得到式(1-1)、式(1-2)与式(1-3)。可通过改变 l_1 的长度调节补偿力的大小。

$$F_s = kx \quad (1-1)$$

$$F_{c1} = \frac{F_{sz} l_1}{l_2} \quad (1-2)$$

$$F_{c2} = F_{c1} \quad (1-3)$$

第 2 章 上肢外骨骼机器人机械结构设计

在第 1 章中只确定了外骨骼设计的原理方案，并未涉及具体机械结构的设计。本章将承接第 1 章所讨论的外骨骼整体设计方案，完成机器人主体结构设计，并利用 SOLIDWORKS 软件绘制三维模型。

2.1 外骨骼机器人结构设计

本文所设计的上肢外骨骼机器人主要由机械臂模块、肩关节自动对心模块、重力补偿模块、动力源模块与座椅、支架等组成，整体装配效果如图 2-1 所示。本小节将分别介绍每个模块的结构组成与装配关系。

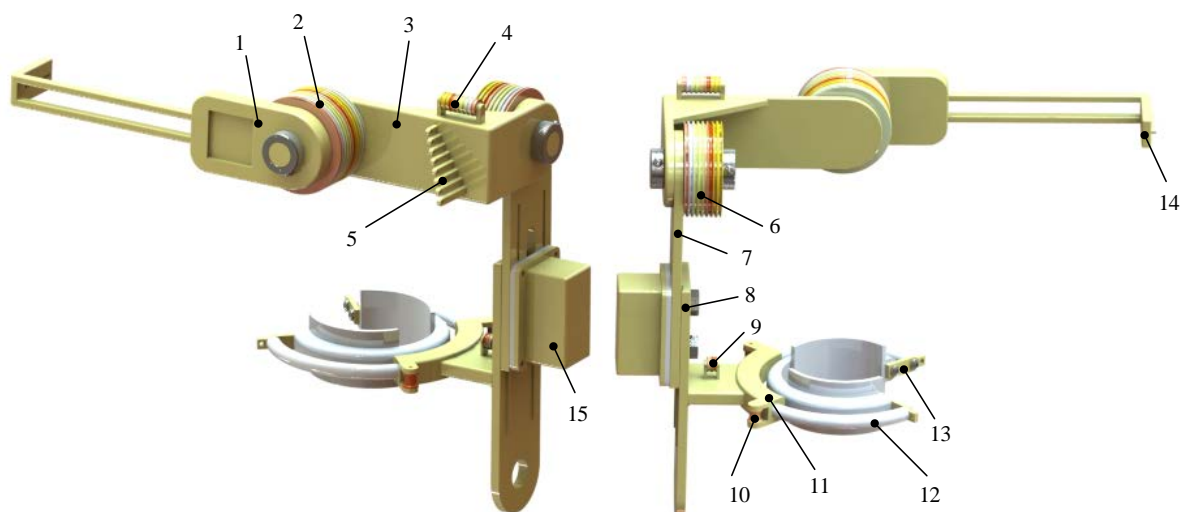


图 2-1 外骨骼机器人整体结构图

2.1.1 机械臂模块

机械臂模块是本文所述的外骨骼机器人的核心模块，其直接与人体上肢相接触，是整个机器人的执行机构。该模块由肩关节运动模块与肘关节运动模块两部分组成。

(1) 肩关节运动模块：



1 小肩板；2 滑轮组 A；3 大肩板；4 导向轮组；5 导向孔组；6 滑轮组 B；7 上臂板_固定；

8 上臂板_滑动；9 大导向轮组 A；10 小导向轮 A；11 上臂环_固定；12 上臂环_滑动；13 小垫板；

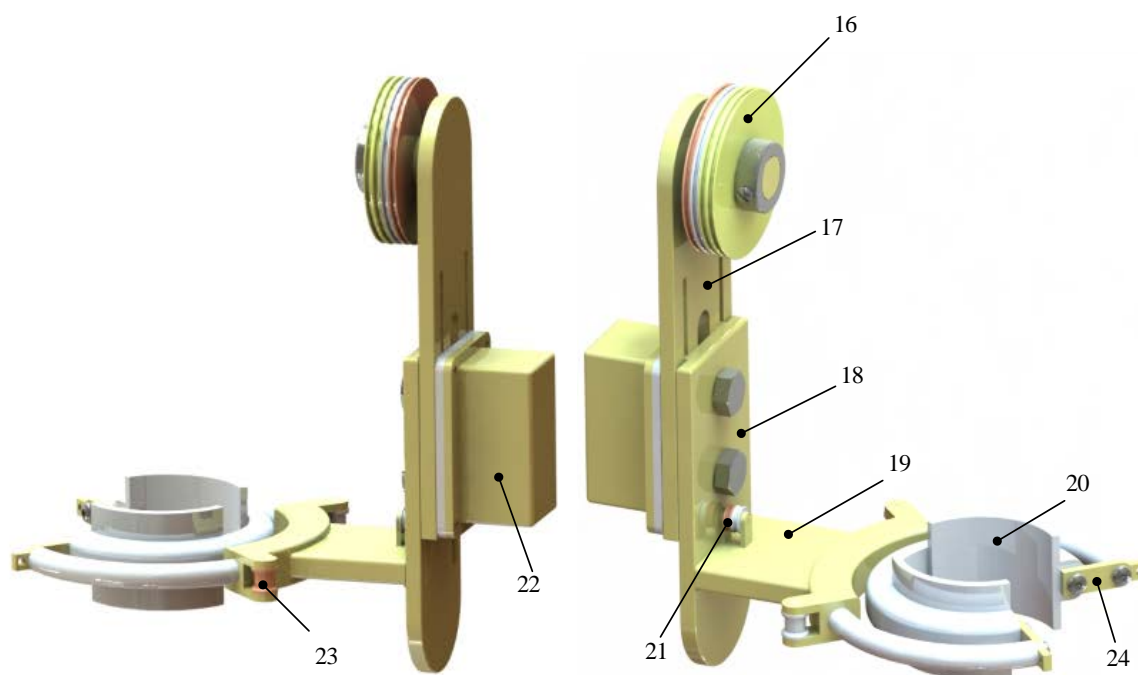
14 鲍登线固定端 A；15 螺栓罩

图 2-2 肩关节运动模块结构图

肩关节运动模块结构如图 2-2 所示，滑轮组 A(2)与小肩板(1)安装在大肩板(3)一端的轴上，利用轴端挡圈与锁紧螺钉定位。小肩板(1)一侧设计有鲍登线固定端 A(14)，用于固定鲍登线外鞘。滑轮组 A(2)由 9 个滑轮组成，自靠近小肩板(1)的一侧开始依次为滑轮组 A_1 至滑轮组 A_9。其中，滑轮组 A_9 为驱动滑轮，其上有两个绳槽，滑轮通过键与轴相连，可传递动力；其余为浮动滑轮，均只有一个绳槽，空套在轴上，只起导向作用。大肩板(3)上设计有导向孔组(5)与导向轮支架，导向轮支架上安装有导向轮组(4)。导向孔组(5)由 8 个导向孔组成，自靠近导向轮组(4)的一侧开始依次为导向孔_1 至导向孔_8。导向轮组(4)由 8 个导向轮组成，自靠近滑轮组 A(2)的一侧开始依次为导向轮_1 至导向轮_8。大肩板(3)的无轴端设计有轴孔，与上臂板_固定(7)一端的短轴配合，依靠轴端挡圈与锁紧螺钉定位。上臂板_固定(7)一端的长轴上安装有滑轮组 B(6)，利用轴端挡圈与锁紧螺钉定位。滑轮组 B(6)由 7 个滑轮组成，自靠近大肩板(3)的一侧开始依次为滑轮组 B_1 至滑轮组 B_7。其中，滑轮组 B_7 为驱动滑轮，其上有两个绳槽，滑轮通过键与轴相连，可传递动力；其余为浮动滑轮，均只有一个绳槽，空套在轴上，只起导向作用。上臂板_固定(7)上开有尺寸调整槽，两个螺栓穿过尺寸调整槽将上臂板_固定(7)与上臂板_滑动(8)连接在一起，两者间的竖直相对位置可调。螺栓罩(15)将两个螺栓的露出端遮挡起来，防止刮伤操作者。上臂板_滑动(8)下部固连有上臂环_固定(11)，上臂环_固定(11)上安装有大导向轮组 A(9)与小导向轮 A(10)。大导向轮组 A(9)由两个大导向轮组

成，均位于上臂环_固定(11)的对称面上，两个小导向轮 A(10)在上臂环_固定(11)两侧对称分布。上臂环_固定(11)与上臂环_滑动(12)的圆环面配合，上臂环_滑动(12)可沿上臂环_固定(11)内槽滑动。上臂环_滑动(12)分内外两部分，小垫板(13)与螺钉将二者固连在一起，上臂环_滑动(12)内侧贴附有气垫，充气后与人体上臂紧密贴合。上臂板_固定(7)的下端设有轴孔，与肘关节运动模块相连。

(2) 肘关节运动模块：



16 滑轮组 C；17 前臂板_固定；18 前臂板_滑动；19 前臂环_固定；20 前臂环_滑动；21 大导向轮组 B；

22 螺栓罩；23 小导向轮 B；24 小垫板

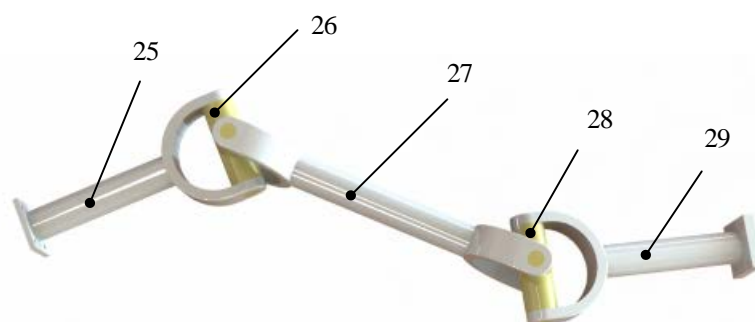
图 2-3 肘关节运动模块结构图

肘关节运动模块结构如图 2-3 所示，滑轮组 C(16)、上臂板_固定(7)的轴孔与前臂板_固定(17)一端的轴配合，利用轴端挡圈与锁紧螺钉定位。滑轮组 C(16)由 3 个滑轮组成，自靠近前臂板_固定(17)的一侧开始依次为滑轮组 C_1 至滑轮组 C_3。其中，滑轮组 C_3 为驱动滑轮，其上有两个绳槽，滑轮通过键与轴相连，可传递动力；其余为浮动滑轮，均只有一个绳槽，空套在轴上，只起导向作用。前臂板_固定(17)上开有尺寸调整槽，两个螺栓穿过尺寸调整槽将前臂板_固定(17)与前臂板_滑动(18)连接在一起，两者间的竖直相对位置可调。螺栓罩(22)将两个螺栓的露出端遮挡起来，防止刮伤操作者。前臂板_滑动(18)下部固连有前臂环_固定(19)，前臂环_固定(19)上安装有大导向轮组 B(21)与小导向轮 B(23)，大导向轮组 B(21)由两个大导向轮组成，均位于前臂环_固定(19)的对称面

上，两个小导向轮 B(23)在前臂环_固定(19)两侧对称分布。前臂环_固定(19)与前臂环_滑动(20)的圆环面配合，前臂环_滑动(20)可沿前臂环_固定(19)内槽滑动。前臂环_滑动(20)分内外两部分，小垫板(24)与螺钉将二者固连在一起，前臂环_滑动(20)内侧贴附有气垫，充气后与人体前臂紧密贴合。

2.1.2 肩关节自动对心模块

肩关节自动对心模块为双万向节连杆机构，结构如图 2-4 所示。连杆 A(25)一端与小肩板(1)固连，另一端通过十字轴 A(26)与连杆 B(27)的一端连接在一起，连杆 B(27)的另一端通过十字轴 B(28)与连杆 C(29)的一端相连，连杆 C(29)的另一端固定在支架上。连杆 C(29)与支架相连的一端为整个机构的固定端，连杆 A(25)与小肩板(1)相连的一端为机构末端。其末端工作空间为两球面所夹区域，半径由连杆 A(25)与连杆 B(27)的长度决定，合理设计两连杆长度参数便可使外骨骼肩关节转动中心在空间内的运动范围满足人体盂肱关节转动中心在空间各方向的移动要求。

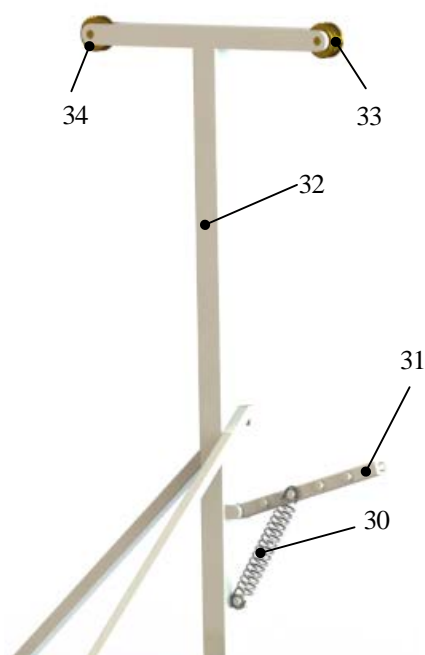


25 连杆 A；26 十字轴 A；27 连杆 B；28 十字轴 B；29 连杆 C

图 2-4 肩关节自动对心模块结构图

2.1.3 重力补偿模块

重力补偿模块结构如图 2-5 所示，重力补偿杆(31)一端与支架(32)铰接，另一端设计有柔索固定环。弹簧(30)一端固定在支架(32)上，另一端与重力补偿杆(31)上的卡槽之一相连。大滑轮 A(33)与大滑轮 B(34)安装在支架(32)上。柔索一端固定在重力补偿杆(31)的柔索固定环上，经大滑轮 A(33)与大滑轮 B(34)导向后与小肩板(1)相连，通过弹簧变形产生的拉力为外骨骼提供重力补偿。

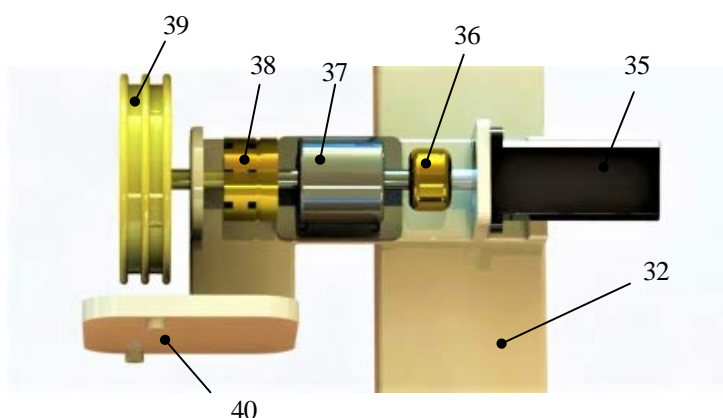


30 弹簧；31 重力补偿杆；32 支架；33 大滑轮 A；34 大滑轮 B

图 2-5 重力补偿模块结构图

2.1.4 动力源模块

动力源模块共有五组，平行布置安装在支架(32)上，结构均如图 2-6 所示。伺服电机(35)通过螺栓固定在支架(32)上，联轴器(36)将电机轴与扭矩传感器(37)相连，扭矩传感器(37)通过电磁离合器(38)与驱动滑轮(39)相连，支架(32)上设计有鲍登线固定端 B(40)。



32 支架；35 伺服电机；36 联轴器；37 扭矩传感器；38 电磁离合器；39 驱动滑轮；40 鲍登线固定端 B

图 2-6 动力源模块结构图

2.1.5 机器人整体装配效果

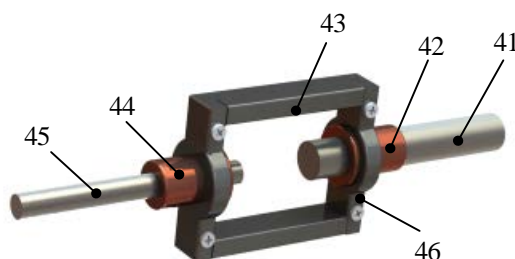
上肢外骨骼机器人整体装配效果如图 2-7 所示。



图 2-7 机器人整体装配效果图

2.2 传动策略与实施方式

本文所设计的上肢外骨骼采用柔索-鲍登线联合传动，柔索与鲍登线内部的钢丝绳直径不同，因此需设计柔索连接器将二者相连。柔索连接器结构如图 2-8 所示，鲍登线内部钢丝绳(41)与柔索(45)末端分别装有大卡环(42)与小卡环(44)，利用两个连接挡板(46)和四个螺钉将大卡环(42)与小卡环(44)分别固定在连接架(43)的两端。柔索连接器在装配体中位于滑轮组 A(2)与鲍登线固定端 A(14)之间。



41 鲍登线内部钢丝绳；42 大卡环；43 连接架；44 小卡环；45 柔索；46 连接挡板

图 2-8 柔索连接器结构图

该外骨骼具有五个主动自由度，而柔索与鲍登线均单向提供拉力，因此需要十根柔索与十根鲍登线传动，分别驱动外骨骼的五个主动关节正反旋转。根据各关节提供运动训练形式的不同，分以下五部分介绍传动装置的布置与具体实施方式。

(1) 肩关节外展/内收训练：滑轮组 A₉ 的两个绳槽上分别固连有一根柔索，两根柔索通过柔索连接器分别与两根鲍登线内部的钢丝绳相连，鲍登线外鞘的一端固定在鲍登线固定端 A(14)处，另一端固定在第一组动力源的鲍登线固定端 B(40)处，两根鲍登线内部钢丝绳在外鞘的引导下分别与该组动力源的驱动滑轮(39)上的两个绳槽相连，该组动力源的伺服电机(35)正反转时分别实现肩关节外展与内收训练。

(2) 肩关节前屈/后伸训练：滑轮组 B₇ 的两个绳槽上分别固连有一根柔索，其中一根柔索经导向轮₁、导向孔₁与滑轮组 A₁ 导向后通过柔索连接器与一根鲍登线内部的钢丝绳相连；另一根柔索经导向轮₂、导向孔₂与滑轮组 A₂ 导向后通过柔索连接器与另一根鲍登线内部的钢丝绳相连；鲍登线外鞘的一端固定在鲍登线固定端 A(14)处，另一端固定在第二组动力源的鲍登线固定端 B(40)处，两根鲍登线内部钢丝绳在外鞘的引导下分别与该组动力源的驱动滑轮(39)上的两个绳槽相连，该组动力源的伺服电机(35)正反转时分别实现肩关节前屈与后伸训练。

(3) 肩关节内旋/外旋训练：上臂环_滑动(12)上的两个小垫板(13)上分别固定有一根柔索，其中一根柔索经小导向轮 A(10)、大导向轮 A(9)、滑轮组 B₆、导向轮₃、导向孔₃与滑轮组 A₃ 导向后通过柔索连接器与一根鲍登线内部的钢丝绳相连；另一根柔索经小导向轮 A(10)、大导向轮 A(9)、滑轮组 B₅、导向轮₄、导向孔₄与滑轮组 A₄ 导向后通过柔索连接器与另一根鲍登线内部的钢丝绳相连；鲍登线外鞘的一端固定在鲍登线固定端 A(14)处，另一端固定在第三组动力源的鲍登线固定端 B(40)处，两根鲍登线内部钢丝绳在外鞘的引导下分别与该组动力源的驱动滑轮(39)上的两个绳槽相连，该组动力源的伺服电机(35)正反转时分别实现肩关节内旋与外旋训练。

(4) 肘关节前屈/后伸训练：滑轮组 C₃ 的两个绳槽上分别固连有一根柔索，其中一根柔索经滑轮组 B₄、导向轮₅、导向孔₅与滑轮组 A₅ 导向后通过柔索连接器与一根鲍登线内部的钢丝绳相连；另一根柔索经滑轮组 B₃、导向轮₆、导向孔₆与滑轮组 A₆ 导向后通过柔索连接器与另一根鲍登线内部的钢丝绳相连；鲍登线外鞘的一端固定在鲍登线固定端 A(14)处，另一端固定在第四组动力源的鲍登线固定端 B(40)处，两根鲍登线内部钢丝绳在外鞘的引导下分别与该组动力源的驱动滑轮(39)上的两个绳槽相连，该组动力源的伺服电机(35)正反转时分别实现肘关节前屈与后伸训练。

(5) 肘关节内旋/外旋训练：前臂环_滑动(20)上的两个小垫板(24)上分别固定有一根柔索，其中一根柔索经小导向轮 B(23)、大导向轮 B(21)、滑轮组 B₂、导向轮₇、导向孔₇与滑轮组 A₇ 导向后通过柔索连接器与一根鲍登线内部的钢丝绳相连；另一根柔索经小导向轮 B(23)、大导向轮 B(21)、滑轮组 B₁、导向轮₈、导向孔₈与滑轮组 A₈ 导向后通过柔索连接器与另一根鲍登线内部的钢丝绳相连；鲍登线外鞘的一端固定在鲍登线固定端 A(14)处，另一端固定在第五组动力源的鲍登线固定端 B(40)处，两根鲍登线内部钢丝绳在外鞘的引导下分别与该组动力源的驱动滑轮(39)上的两个绳槽相连，该组动力源的伺服电机(35)正反转时分别实现肘关节内旋与外旋训练。

第 3 章 机械臂运动学分析与仿真

运动学分析是不考虑力和力矩对机构的影响，仅在几何角度分析机械结构运动特性的研究方法，是机器人可行性验证的重要环节。机器人运动学分析分为正运动学分析与逆运动学分析两部分。其中，正运动学分析是指已知机器人各关节运动参数，求解机器人末端执行器的位置和姿态；与之相反，逆运动学分析是已知末端位置和姿态进而求解达到这一位置和姿态时各关节的运动参数^[27]。本文利用 1955 年 Denavit 与 Hartenberg 提出的标准 D-H 参数法进行上肢外骨骼机械臂正、逆运动学理论分析，并借助 MATLAB Robotics Toolbox 完成仿真验证。人体盂肱关节转动中心在空间的移动范围与人体上肢的活动范围相比很小，可以忽略不计，因此，在本章及后面的章节中仅以外骨骼机械臂为研究对象，忽略肩关节自动对心机构的影响。

3.1 运动学理论分析

3.1.1 正运动学理论分析

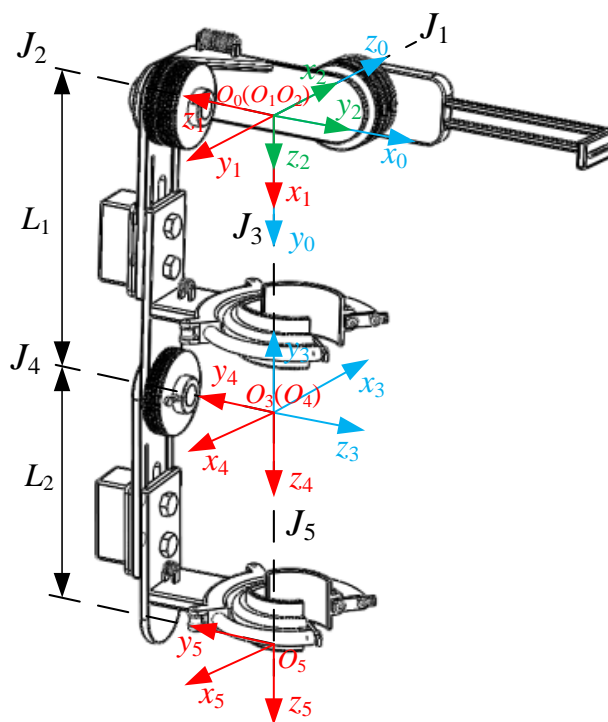


图 3-1 机器人 D-H 坐标系

首先，基于 D-H 参数法建立如图 3-1 所示的坐标系。其中，{0}系为基座坐标系，{1}至{4}系为关节坐标系，{5}系为末端工具坐标系；{0}系、{1}系与{2}系的坐标原点均位于肩关节转动中心处，{3}系与{4}系的坐标原点位于肘关节转动中心处，{5}系的坐

标原点位于腕关节转动中心处； $J_1 \sim J_5$ 为机械臂的五个旋转轴，依次对应肩关节外展/内收、前屈/后伸、外旋/内旋与肘关节前屈/后伸、外旋/内旋训练； L_1 为机械臂上臂长， L_2 为机械臂前臂长。

根据标准 D-H 参数法坐标系建立原则， $\{i\}$ 系是由 $\{i-1\}$ 系先绕 z_{i-1} 轴旋转 θ_i ，再沿 z_{i-1} 轴平移 d_i ，然后沿 x_i 轴平移 a_i ，最后绕 x_i 轴旋转 α_i 得到的。因此，从 $\{i-1\}$ 系到 $\{i\}$ 系的齐次变换矩阵如式(3-1)所示。

$$\begin{aligned}
 {}^{i-1}T_i &= \text{Rot}(z_{i-1}, \theta_i) \text{Trans}(z_{i-1}, d_i) \text{Trans}(x_i, a_i) \text{Rot}(x_i, \alpha_i) \\
 &= \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i & 0 & 0 \\ s\theta_i & c\theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c\alpha_i & -s\alpha_i & 0 \\ 0 & s\alpha_i & c\alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} c\theta_i & -c\alpha_i s\theta_i & s\alpha_i s\theta_i & a_i c\theta_i \\ s\theta_i & c\alpha_i c\theta_i & -s\alpha_i c\theta_i & a_i s\theta_i \\ 0 & s\alpha_i & c\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{3-1}$$

上式中， θ_i 表示关节转角， d_i 表示关节偏移， a_i 表示杆件长度， α_i 表示杆件扭角， $s\theta_i = \sin\theta_i$ ， $c\theta_i = \cos\theta_i$ 。为简化矩阵，下文均用 $s\theta_i$ 代表 $\sin\theta_i$ ， $c\theta_i$ 代表 $\cos\theta_i$ 。

然后，根据各坐标系之间的关系与机械臂结构设计参数确定 D-H 参数表，如表 3-1 所示。其中，括号内的数据为机器臂处于图 3-1 所示状态时的关节转角 θ_i 的取值。

将表 3-1 所示数据代入式(3-1)可得到相邻坐标系间的齐次变换矩阵，如式(3-2)所示。

$$\begin{aligned}
 {}^0T_1 &= \begin{bmatrix} c\theta_1 & 0 & -s\theta_1 & 0 \\ s\theta_1 & 0 & c\theta_1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} {}^1T_2 = \begin{bmatrix} c\theta_2 & 0 & -s\theta_2 & 0 \\ s\theta_2 & 0 & c\theta_2 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 {}^2T_3 &= \begin{bmatrix} c\theta_3 & 0 & -s\theta_3 & 0 \\ s\theta_3 & 0 & c\theta_3 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & L_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} {}^3T_4 = \begin{bmatrix} c\theta_4 & 0 & -s\theta_4 & 0 \\ s\theta_4 & 0 & c\theta_4 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 {}^4T_5 &= \begin{bmatrix} c\theta_5 & -s\theta_5 & 0 & 0 \\ s\theta_5 & c\theta_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & L_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{3-2}$$

表 3-1 机器人 D-H 参数表

杆件 i	关节转角 θ_i	关节偏移 d_i	杆件长度 a_i	杆件扭角 α_i	θ_i 变化范围
1	$\theta_1(90^\circ)$	0	0	-90°	$90^\circ \sim 210^\circ$
2	$\theta_2(-90^\circ)$	0	0	-90°	$-120^\circ \sim 0^\circ$
3	$\theta_3(0^\circ)$	L_1	0	-90°	$-75^\circ \sim 20^\circ$
4	$\theta_4(180^\circ)$	0	0	-90°	$50^\circ \sim 180^\circ$
5	$\theta_5(0^\circ)$	L_2	0	0	$-50^\circ \sim 50^\circ$

根据矩阵的性质，由式(3-2)可求得从基坐标系{0}系到末端工具坐标系{5}系的齐次变换矩阵 0T_5 ，如式(3-3)所示。

$${}^0T_5 = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3T_4 {}^4T_5 = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-3)$$

上式中：

$$\begin{aligned} n_x &= c\theta_5 (c\theta_4 (s\theta_1 s\theta_3 + c\theta_1 c\theta_2 c\theta_3) + c\theta_1 s\theta_2 s\theta_4) - s\theta_5 (c\theta_3 s\theta_1 - c\theta_1 c\theta_2 s\theta_3) \\ n_y &= s\theta_5 (c\theta_1 c\theta_3 + c\theta_2 s\theta_1 s\theta_3) - c\theta_5 (c\theta_4 (c\theta_1 s\theta_3 - c\theta_2 c\theta_3 s\theta_1) - s\theta_1 s\theta_2 s\theta_4) \\ n_z &= c\theta_5 (c\theta_2 s\theta_4 - c\theta_3 c\theta_4 s\theta_2) - s\theta_2 s\theta_3 s\theta_5 \\ o_x &= -s\theta_5 (c\theta_4 (s\theta_1 s\theta_3 + c\theta_1 c\theta_2 c\theta_3) + c\theta_1 s\theta_2 s\theta_4) - c\theta_5 (c\theta_3 s\theta_1 - c\theta_1 c\theta_2 s\theta_3) \\ o_y &= s\theta_5 (c\theta_4 (c\theta_1 s\theta_3 - c\theta_2 c\theta_3 s\theta_1) - s\theta_1 s\theta_2 s\theta_4) + c\theta_5 (c\theta_1 c\theta_3 + c\theta_2 s\theta_1 s\theta_3) \\ o_z &= -s\theta_5 (c\theta_2 s\theta_4 - c\theta_3 c\theta_4 s\theta_2) - c\theta_3 s\theta_2 s\theta_3 \\ a_x &= c\theta_1 c\theta_4 s\theta_2 - s\theta_4 (s\theta_1 s\theta_3 + c\theta_1 c\theta_2 c\theta_3) \\ a_y &= s\theta_4 (c\theta_1 s\theta_3 - c\theta_2 c\theta_3 s\theta_1) + c\theta_4 s\theta_1 s\theta_2 \\ a_z &= c\theta_2 c\theta_4 + c\theta_3 s\theta_2 s\theta_4 \\ p_x &= -L_2 (s\theta_4 (s\theta_1 s\theta_3 + c\theta_1 c\theta_2 c\theta_3) - c\theta_1 c\theta_4 s\theta_2) - L_1 c\theta_1 s\theta_2 \\ p_y &= L_2 (s\theta_4 (c\theta_1 s\theta_3 - c\theta_2 c\theta_3 s\theta_1) + c\theta_4 s\theta_1 s\theta_2) - L_1 s\theta_1 s\theta_2 \\ p_z &= L_2 (c\theta_2 c\theta_4 + c\theta_3 s\theta_2 s\theta_4) - L_1 c\theta_2 \end{aligned}$$

当机械臂处于图 3-1 所示状态时，关节转角向量 $\theta = [90^\circ, -90^\circ, 0^\circ, 180^\circ, 0^\circ]$ ，代入式(3-3)可求得如式(3-4)所示的末端姿态矩阵。

$$T = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & L_1 + L_2 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-4)$$

根据第 1 章机械臂结构设计参数可知，在图 3-1 所示姿态下， $L_1=350\text{mm}$ ， $L_2=270\text{mm}$ ，

且 L_1 与 L_2 可根据用户上肢长度在一定范围内调整。

3.1.2 逆运动学理论分析

逆运动学分析是正运动学分析的逆过程，在机器人学中占有重要地位，直接影响着机器人控制的准确性与快速性。目前，逆运动学求解方法主要有迭代法、几何法与反变换法三种。其中，迭代法的计算量很大，而几何法仅适用于自由度较少的情况，因此，本文选用 1981 年 Paul 等人提出的反变换法进行逆运动学求解。反变换法的基本原理是用未知的逆变换逐次左乘末端工具坐标系相对于基坐标系的齐次变换矩阵，将各个关节变量分离求解。

由矩阵的性质可将式(3-3)变形为：

$$({}^4T_5)^{-1} {}^0T_5 = {}^0T_4 \quad (3-4)$$

求解式(3-4)等号左边部分：

$$({}^4T_5)^{-1} {}^0T_5 = \begin{bmatrix} c\theta_5 & s\theta_5 & 0 & 0 \\ -s\theta_5 & c\theta_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -L_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-5)$$

求解式(3-4)等号右边部分：

$${}^0T_4 = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3T_4 = \begin{bmatrix} {}^1n_x & {}^1o_x & {}^1a_x & {}^1p_x \\ {}^1n_y & {}^1o_y & {}^1a_y & {}^1p_y \\ {}^1n_z & {}^1o_z & {}^1a_z & {}^1p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-6)$$

(1) 求解 θ_2 ：由式(3-4)等号两边矩阵元素(3, 4)对应相等，可得：

$$p_z - L_2 = {}^1p_z = -L_1 \cos \theta_2 \quad (3-7)$$

解得：

$$\theta_2 = \arccos\left(\frac{L_2 - p_z}{L_1}\right) \quad (3-8)$$

由上式可知： θ_2 有唯一解。

(2) 求解 θ_3 ：由式(3-4)等号两边矩阵元素(3, 2)对应相等，可得：

$$o_z = {}^1o_z = -\sin \theta_2 \sin \theta_3 \quad (3-9)$$

解得：

$$\theta_3 = \pm \arcsin \frac{o_z}{\sqrt{1 - (\frac{L_2 - p_z}{L_1})^2}} \quad (3-10)$$

由上式可知： θ_3 有互为相反数的两个解。

由矩阵的性质还可将式(3-3)变形为：

$$({}^3T_4 {}^4T_5)^{-1} {}^0T_5 = {}^0T_3 \quad (3-11)$$

求解式(3-11)等号左边部分：

$$({}^3T_4 {}^4T_5)^{-1} {}^0T_5 = \begin{bmatrix} c\theta_4 c\theta_5 & c\theta_5 s\theta_4 & -s\theta_5 & 0 \\ -c\theta_4 s\theta_5 & -s\theta_4 s\theta_5 & -c\theta_5 & 0 \\ -s\theta_4 & c\theta_4 & 0 & -L_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-12)$$

求解式(3-11)等号右边部分：

$${}^0T_3 = \begin{bmatrix} {}^2n_x & {}^2o_x & {}^2a_x & {}^2p_x \\ {}^2n_y & {}^2o_y & {}^2a_y & {}^2p_y \\ {}^2n_z & {}^2o_z & {}^2a_z & {}^2p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-13)$$

(3) 求解 θ_4 ：由式(3-11)等号两边矩阵元素(3, 4)对应相等，可得：

$$-p_x \sin \theta_4 + p_y \cos \theta_4 - L_2 = {}^2p_z = -L_1 \cos \theta_2 \quad (3-14)$$

$$\text{令} \quad \begin{cases} p_x = \rho \cos \psi \\ p_y = \rho \sin \psi \end{cases} \quad (3-15)$$

$$\text{则} \quad \rho = \sqrt{p_x^2 + p_y^2} \quad (3-16)$$

$$\psi = \arctan\left(\frac{p_y}{p_x}\right) \quad (3-17)$$

将式(3-15)代入式(3-14)，解得：

$$\theta_4 = \psi - \arcsin\left(\frac{p_z}{\rho}\right) \quad (3-18)$$

由上式可知： θ_4 有唯一解。

由矩阵的性质还可将式(3-3)变形为：

$$({}^0T_1)^{-1} {}^0T_5 = {}^1T_5 \quad (3-19)$$

求解式(3-19)等号左边部分：

$$({}^0T_1)^{-1} {}^0T_5 = \begin{bmatrix} c\theta_1 & s\theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ -s\theta_1 & c\theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-20)$$

求解式(3-19)等号右边部分：

$${}^1T_5 = \begin{bmatrix} {}^3n_x & {}^3o_x & {}^3a_x & {}^3p_x \\ {}^3n_y & {}^3o_y & {}^3a_y & {}^3p_y \\ {}^3n_z & {}^3o_z & {}^3a_z & {}^3p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-21)$$

(4) 求解 θ_5 ：由式(3-19)等号两边矩阵元素(2, 1)、(2, 2)分别对应相等，可得：

$$-n_z = {}^3n_y = \sin \theta_2 \sin \theta_3 \sin \theta_5 - \cos \theta_5 (\cos \theta_2 \sin \theta_4 - \cos \theta_3 \cos \theta_4 \sin \theta_2) \quad (3-22)$$

$$-o_z = {}^3o_y = \sin \theta_2 \sin \theta_3 \cos \theta_5 + \sin \theta_5 (\cos \theta_2 \sin \theta_4 - \cos \theta_3 \cos \theta_4 \sin \theta_2) \quad (3-23)$$

联立式(3-22)与式(3-23)，可得：

$$n_z \sin \theta_5 + o_z \cos \theta_5 = -\sin \theta_2 \sin \theta_3 \quad (3-24)$$

$$\text{令} \quad \begin{cases} n_z = m \cos \phi \\ o_z = m \sin \phi \end{cases} \quad (3-25)$$

$$\text{则} \quad m = \sqrt{n_z^2 + o_z^2} \quad (3-26)$$

$$\phi = \arctan\left(\frac{o_z}{n_z}\right) \quad (3-27)$$

将式(3-25)代入式(3-24)，解得：

$$\theta_5 = -\arcsin\left(\frac{\sin \theta_2 \sin \theta_3}{m}\right) - \phi \quad (3-28)$$

上式中： θ_2 有唯一解，但 θ_3 有两解，因此 θ_5 有两个解，且当 θ_3 确定后 θ_5 取值唯一。

(5) 求解 θ_1 ：由式(3-4)等号两边矩阵元素(1, 4)、(2, 4)分别对应相等，可得：

$$p_x \cos \theta_5 + p_y \sin \theta_5 = -L_1 \cos \theta_1 \sin \theta_2 \quad (3-29)$$

$$-p_x \sin \theta_5 + p_y \cos \theta_5 = -L_1 \sin \theta_1 \sin \theta_2 \quad (3-30)$$

联立式(3-29)与式(3-30)，并将式(3-15)代入，解得：

$$\theta_1 = \arctan\left(\frac{\sin(\psi - \theta_5)}{\sin(\psi + \theta_5)}\right) \quad (3-31)$$

由上式可知： θ_1 有两个解，但当 θ_5 确定后 θ_1 取值唯一。

(6) 多解问题的处理：本文所设计的上肢外骨骼机械臂为满足运动训练要求，各关节均须在一定范围内转动，在逆运动学求解完成后，参照各关节转动范围逐级剔除多余解。

3.2 运动学仿真

采用 D-H 参数法建立的正、逆运动学求解方法一次只能进行一个特定位姿的求解，操作复杂，直观性差。因此，本小节借助 MATLAB 强大的矩阵计算能力、图形化显示能力与功能多元化的工具箱进行上肢外骨骼机械臂运动学仿真分析。

Robotics Toolbox 是澳大利亚学者 Peter Corke 基于 MATLAB 平台开发的致力于工业机器人建模，运动学、动力学仿真与轨迹规划的专业工具箱，当前最新版本为第 10 版。本文采用该工具箱 10.2 版本进行上肢外骨骼机械臂建模与运动学仿真。

3.2.1 机械臂运动学模型的建立

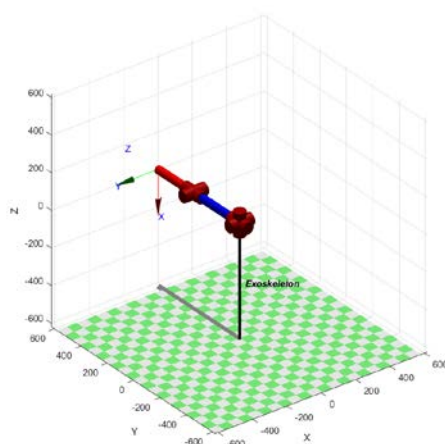


图 3-2 机械臂运动学模型图

(1) 调用 Link 函数：在 Robotics Toolbox 中，机器人各关节被简化为杆件的形式，调用 Link 函数可建立单个杆件模型并定义杆件参数。Link 函数调用规则如下：

$$L(i) = \text{Link}([\theta_i, d_i, a_i, \alpha_i, \sigma], \text{CONVENTION})$$

其中： i 表示第 i 个杆件； θ 表示关节转角； d 表示关节偏移； a 表示杆件长度； α 表示杆件扭角； σ 表示关节类型，可取 0 或非 0，0 表示旋转关节，非 0 表示移动关节；CONVENTION 可取 'standard' 或 'modified'，'standard' 代表标准型，'modified' 代表改进型。

(2) 调用 SerialLink 函数，将建立的各杆件连接成杆组，调用规则为：

$$\text{Robot} = \text{SerialLink}(L, 'name', \text{NAME})$$

其中，NAME 为机器人名。

(3) 调用 plot 函数，绘制机械臂运动学模型图，调用规则如下：

$$\text{plot}(\text{Robot}, \theta)$$

其中， θ 表示机械臂各关节转角向量。

最终，建立如图 3-2 所示的机械臂运动学模型。

3.2.2 正运动学仿真

在上节所建立的机械臂运动学模型的基础上，调用 fkine 函数进行正运动学仿真，以验证正运动学理论分析结果的准确性。fkine 函数调用规则为：

$$\mathbf{T} = \text{fkine}(\text{Robot}, \theta)$$

其中， \mathbf{T} 代表末端位姿矩阵， θ 代表机械臂各关节转角向量。

将 $\theta = [90^\circ, -90^\circ, 0^\circ, 180^\circ, 0^\circ]$ 代入 fkine 函数，可求得末端位姿矩阵 \mathbf{T} 如下：

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 620 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

上述末端位姿矩阵 \mathbf{T} 与式(3-4)对比可知，正运动学理论分析结果与 MATLAB 仿真结果一致，验证了正运动学理论分析的准确性。

3.2.3 逆运动学仿真

在机械臂运动学模型与正运动学仿真的基础上，调用 ikine 函数进行逆运动学仿真，ikine 函数调用规则为：

$$\mathbf{q} = \text{ikine}(\text{Robot}, \mathbf{T}, 'q0', \theta, 'mask', \mathbf{M})$$

其中： \mathbf{q} 为反解求得的各关节转角向量； \mathbf{T} 为要反解的末端位姿矩阵；‘q0’为函数关键字， θ 为各关节转角初始猜测值；‘mask’为函数关键字， \mathbf{M} 为 [1, 1, 1, 1, 1, 1]，默认机器人具有 6 个自由度，当机器人自由度少于 6 个时，要将 \mathbf{M} 中对应元素改为 0。

将正运动学仿真求得的末端位姿矩阵 \mathbf{T} 代入 ikine 函数，可得：

$$\mathbf{q} = [1.5708, -1.5708, 0, 3.1416, 0]$$

上式所示的反解结果与正运动学仿真时输入的各关节转角向量相一致，验证了逆运动学仿真分析的准确性。

第 4 章 机械臂工作空间分析与轨迹规划

机器人的工作空间是指机器人在运行时其末端执行器坐标系原点所能达到的空间范围，是衡量机器人实际应用性能的一个重要指标。在机器人学中，轨迹是指机器人各关节在运动过程中的位移、速度和加速度，对其进行规划，以期求得预期的任务轨迹。进行机械臂工作空间分析与轨迹规划可进一步验证外骨骼机器人的实际可行性。

4.1 机械臂工作空间分析

4.1.1 理论基础

本文基于蒙特卡洛法利用 MATLAB 软件计算外骨骼机械臂的工作空间。蒙特卡洛法又名统计模拟法，是指使用随机数或伪随机数解决计算问题的一种方法，将其应用于机器人工作空间分析中可快速、简单、准确地求解出机器人的工作空间，随机计算次数越多，求解结果越精确。

机器人的工作空间可用 $W(p)$ 表示， $W(p)$ 边界上的点所对应的机器人的位姿均为奇异位形。机器人位于奇异位形时，机器人各关节的速度反解不存在，关节力矩趋近于无穷大。基于蒙特卡洛法求解工作空间实质上是随机产生一系列处于机器人各关节运动范围内的关节运动角度，然后将这些随机关节运动角度代入基于 D-H 参数法建立的机器人正运动学方程，得到一系列机器人末端坐标系原点的空间位置，这些空间位置的集合便是机器人的工作空间。

机器人第 i 个关节的随机转动角度可由式(5-1)求得。

$$\theta_i = \theta_i^{\min} + (\theta_i^{\max} - \theta_i^{\min}) \times \text{rand}(N,1) \quad (4-1)$$

上式中， θ_i^{\max} 表示机器人第 i 个关节转动范围的最大值， θ_i^{\min} 表示机器人第 i 个关节转动范围的最小值， $\text{rand}(N,1)$ 为生成一系列位于(0, 1)之间的伪随机数。

4.1.2 仿真分析

在第 3 章所完成的机械臂正运动学仿真分析的基础上，利用 MATLAB 编程求解机械臂的工作空间，取随机计算次数 $N = 30000$ ，仿真结果如图 4-1 所示。

由图 4-1 可看出：机械臂的工作空间为 $-500\text{mm} \leq x \leq 250\text{mm}$ ， $-300\text{mm} \leq y \leq 600\text{mm}$ ， $-600\text{mm} \leq z \leq 200\text{mm}$ 。

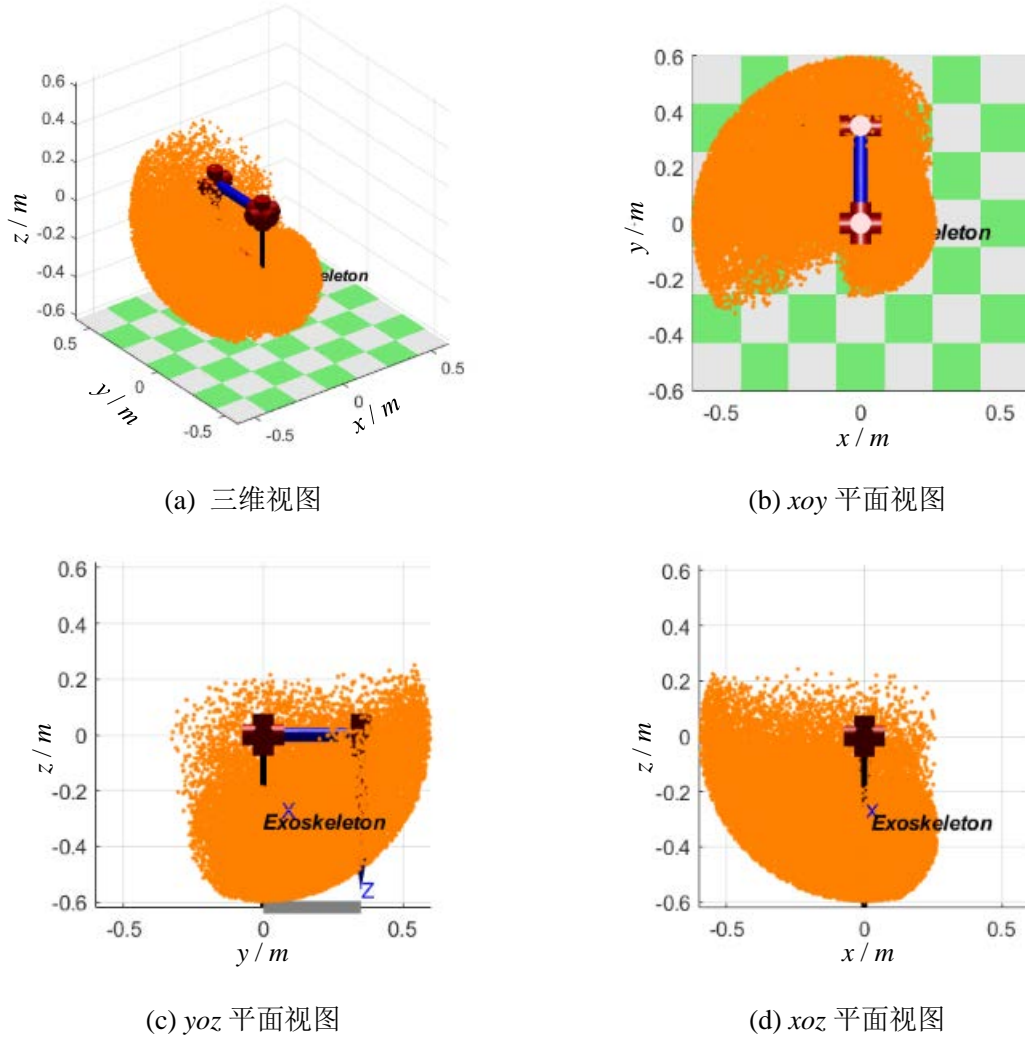


图 4-1 机械臂工作空间仿真图

4.2 机械臂轨迹规划

4.2.1 理论基础

常用的机器人轨迹规划方法有两种，第一种方法为关节空间内的轨迹规划，第二种方法为笛卡尔空间内的轨迹规划。本节选用五次多项式插值法进行机械臂关节空间内的轨迹规划。

在五次多项式插值法中，机器人各关节运动角度随时间的变化关系如式(4-2)所示。

$$\theta_i(t) = a_0 + a_1t + a_2t^2 + a_3t^3 + a_4t^4 + a_5t^5 \quad (4-2)$$

上式中各系数需满足如式(4-3)所示的约束关系。

$$\begin{cases} \theta_0 = a_0 \\ \theta_1 = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 + a_4 t^4 + a_5 t^5 \\ \dot{\theta}_0 = a_1 \\ \dot{\theta}_1 = a_1 + 2a_2 t + 3a_3 t^2 + 4a_4 t^3 + 5a_5 t^4 \\ \ddot{\theta}_0 = 2a_2 \\ \ddot{\theta}_1 = 2a_2 + 6a_3 t + 12a_4 t^2 + 20a_5 t^3 \end{cases} \quad (4-3)$$

上式中, θ_0 为初始关节角度, θ_1 为终止关节角度, t 为运动时间。

式(4-3)含有六个未知数和六个方程, 可联立解得:

$$\begin{cases} a_0 = \theta_0 \\ a_1 = \dot{\theta}_0 \\ a_2 = \frac{\ddot{\theta}_0}{2} \\ a_3 = \frac{20\theta_1 - 20\theta_0 - (8\dot{\theta}_1 + 12\dot{\theta}_0)t - (3\ddot{\theta}_0 - \ddot{\theta}_1)t^2}{2t^3} \\ a_4 = \frac{30\theta_0 - 30\theta_1 + (14\dot{\theta}_1 + 16\dot{\theta}_0)t + (3\ddot{\theta}_0 - 2\ddot{\theta}_1)t^2}{2t^4} \\ a_5 = \frac{12\theta_1 - 12\theta_0 - (6\dot{\theta}_1 + 6\dot{\theta}_0)t - (\ddot{\theta}_0 - \ddot{\theta}_1)t^2}{2t^5} \end{cases} \quad (4-4)$$

将式(4-4)代入式(4-2)便可得到机械臂轨迹规划所需的五次多项式插值函数。

4.2.2 仿真分析

本小节将承接上文内容, 利用 MATLAB Robotics Toolbox 进行外骨骼机械臂轨迹规划仿真。

首先, 设定外骨骼机械臂在进行轨迹规划时各关节初始角度与终止角度分别如式(4-5)、式(4-6)所示。

$$POS_1 = [90^\circ, -90^\circ, 0^\circ, 180^\circ, 0^\circ] \quad (4-5)$$

$$POS_2 = [180^\circ, -45^\circ, -45^\circ, 144^\circ, 30^\circ] \quad (4-6)$$

然后, 在第 3 章所建立的正运动学仿真分析模型的基础上, 调用 jtraj 函数进行机械臂轨迹规划仿真。jtraj 函数调用格式如下:

$$[q, qd, qdd] = \text{jtraj}(POS_1, POS_2, T)$$

其中, q 为函数返回的关节角位移矩阵, qd 为函数返回的关节角速度矩阵, qdd 为函数返回的关节角加速度矩阵, T 为给定的时间向量的长度。

仿真结果如图 4-2 至图 4-5 所示。图 4-2 中的蓝色曲线为机械臂末端运动轨迹。

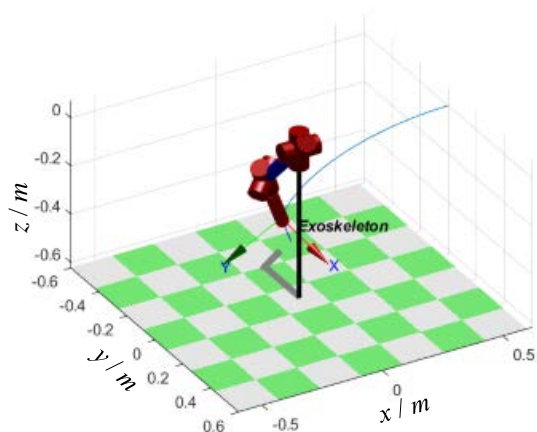


图 4-2 机械臂轨迹规划仿真图

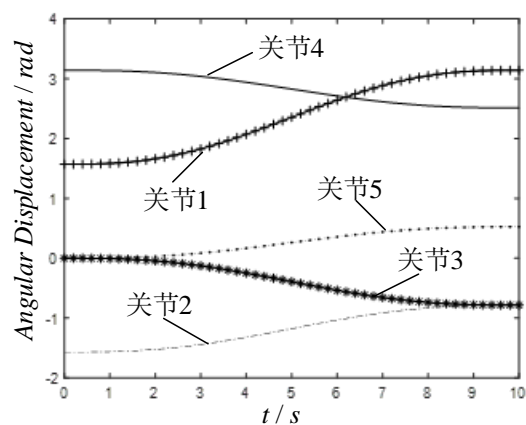


图 4-3 各关节角位移变化曲线

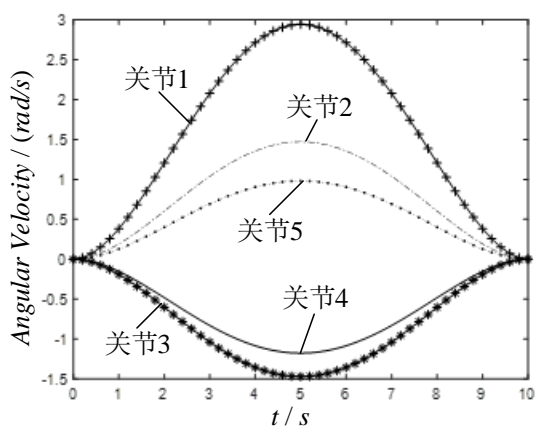


图 4-4 各关节角速度变化曲线

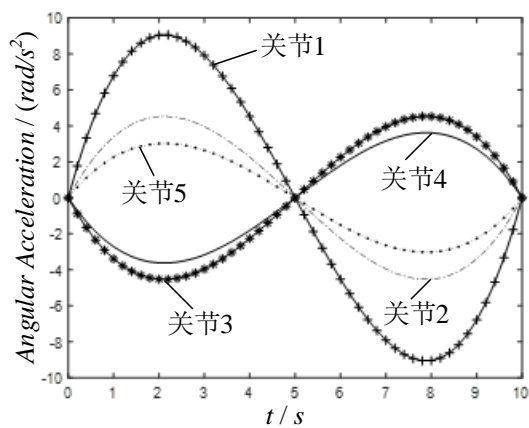


图 4-5 各关节角加速度变化曲线

由图 4-3 可看出：机械臂在轨迹规划过程中各关节初始角度、终止角度分别与式(4-5)、式(4-6)所示的设定值保持一致，验证了轨迹规划仿真的正确性。

由图 4-3 至图 4-5 可知：在轨迹规划过程中，机械臂各关节角位移、角速度与角加速度均平稳变化，曲线无尖点，无突变，验证了轨迹规划仿真的有效性。

第5章 机械臂动力学分析与仿真

进行机器人动力学分析的目的是找出机器人各关节驱动力矩与末端运动参数（位移、速度与加速度）之间的关系，为机器人控制系统的研究奠定基础，为机器人驱动系统的选择提供参考依据。动力学分析问题可分为两类，一类是已知机器人的驱动力矩求解各关节运动参数，称为动力学正问题；另一类与前者相反，称为动力学逆问题。本章主要以上文第3章、第4章研究结果为基础，分析外骨骼机械臂的动力学逆问题。

5.1 动力学理论分析

目前，常用的机器人动力学分析方法有拉格朗日方程法、牛顿-欧拉方程法、旋转代数法与凯恩方程法^[28]。本章选用拉格朗日方程法进行上肢外骨骼机械臂的动力学分析。

5.1.1 机械臂的动能

机械臂第 i 个连杆上任一质点的速度表达式如式(5-1)所示。其中， \mathbf{T}_i 为该连杆上的局部坐标系相对于基坐标系的齐次变换矩阵， q_j 为机械臂第 j 个关节的广义坐标， \dot{q}_j 为机械臂第 j 个关节的广义速度， ${}^i\mathbf{r}$ 为该点在局部坐标系中的位置矢量。

$$\mathbf{v} = \left(\sum_{j=1}^i \frac{\partial \mathbf{T}_i}{\partial q_j} \dot{q}_j \right) {}^i\mathbf{r} \quad (5-1)$$

该质点的质量为 dm ，则其动能为：

$$dK_i = \frac{1}{2} \text{Trace} \left[\sum_{j=1}^i \sum_{k=1}^i \frac{\partial \mathbf{T}_i}{\partial q_j} ({}^i\mathbf{r} \cdot dm \cdot {}^i\mathbf{r}^T) \frac{\partial \mathbf{T}_i^T}{\partial q_k} \dot{q}_j \dot{q}_k \right] \quad (5-2)$$

式中， Trace 表示矩阵的迹，其值为矩阵主对角元素之和。

对式(5-2)积分可得机械臂第 i 个连杆的动能，如式(5-3)所示。

$$K_i = \int_{\text{连杆} i} dK_i = \frac{1}{2} \text{Trace} \left(\sum_{j=1}^i \sum_{k=1}^i \frac{\partial \mathbf{T}_i}{\partial q_j} \mathbf{I}_i \frac{\partial \mathbf{T}_i^T}{\partial q_k} \dot{q}_j \dot{q}_k \right) \quad (5-3)$$

上式中， \mathbf{I}_i 为伪惯量矩阵，其表达式如式(5-4)所示， I_{ixx} 等表示连杆 i 的惯性积。

$$\begin{aligned}
 \mathbf{I}_i &= \int_{\text{连杆}i} {}^i\mathbf{r} \cdot {}^i\mathbf{r}^T \cdot dm \\
 &= \begin{bmatrix} \frac{I_{ixx} + I_{iyy} + I_{izz}}{2} & I_{ixy} & I_{ixz} & m_i \bar{x}_i \\ I_{ixy} & \frac{I_{ixx} - I_{iyy} + I_{izz}}{2} & I_{iyz} & m_i \bar{y}_i \\ I_{ixz} & I_{iyz} & \frac{I_{ixx} + I_{iyy} - I_{izz}}{2} & m_i \bar{z}_i \\ m_i \bar{x}_i & m_i \bar{y}_i & m_i \bar{z}_i & m_i \end{bmatrix} \quad (5-4)
 \end{aligned}$$

机械臂所有连杆的动能之和为机械臂的总动能 K_r ，其表达式如式(5-5)所示。

$$K_r = \sum_{i=1}^n K_i = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \text{Trace} \left(\sum_{j=1}^i \sum_{k=1}^i \frac{\partial \mathbf{T}_i}{\partial q_j} \mathbf{I}_i \frac{\partial \mathbf{T}_i^T}{\partial q_k} \dot{q}_j \dot{q}_k \right) \quad (5-5)$$

机械臂系统中除各连杆具有动能外，传动装置的动能 K_{ai} 也不可忽略。连杆 i 的传动装置的动能的表达式为：

$$K_{ai} = \frac{1}{2} I_{ai} \dot{q}_i^2 \quad (5-6)$$

上式中， I_{ai} 表示传动装置的等效转动惯量。

机械臂各连杆传动装置的总动能如式(5-7)所示。

$$K_a = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n I_{ai} \dot{q}_i^2 \quad (5-7)$$

式(5-5)与式(5-7)相加可得机械臂系统的总动能：

$$\begin{aligned}
 K &= K_r + K_a \\
 &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \text{Trace} \left(\sum_{j=1}^i \sum_{k=1}^i \frac{\partial \mathbf{T}_i}{\partial q_j} \mathbf{I}_i \frac{\partial \mathbf{T}_i^T}{\partial q_k} \dot{q}_j \dot{q}_k \right) + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n I_{ai} \dot{q}_i^2 \quad (5-8)
 \end{aligned}$$

5.1.2 机械臂的位能

机械臂第 i 个连杆上 ${}^i\mathbf{r}$ 位置处的质量为 dm 的质点的位能如式(5-9)所示。

$$dP_i = -\mathbf{g}^T \mathbf{T}_i {}^i\mathbf{r} dm \quad (5-9)$$

上式中， $\mathbf{g}^T = [g_x, g_y, g_z, 1]$ ， g 为重力加速度。

式(5-9)积分可得机械臂第 i 个连杆的位能：

$$P_i = \int_{\text{连杆}i} dP_i = -\mathbf{g}^T \mathbf{T}_i \int_{\text{连杆}i} {}^i\mathbf{r} dm = -m_i \mathbf{g}^T \mathbf{T}_i {}^i\mathbf{r}_i \quad (5-10)$$

上式中， m_i 为机械臂第 i 个连杆的质量， ${}^i\mathbf{r}_i$ 第 i 个连杆相对于其前端关节坐标系的重心位置。

由于机械臂传动装置的质量很小，其位能可忽略不计，因此机械臂系统的总位能约

等于机械臂各连杆的位能之和，其表达式如式(5-11)所示。

$$P = \sum_{i=1}^n (P_i + P_{ai}) \approx \sum_{i=1}^n P_i = -\sum_{i=1}^n m_i \mathbf{g}^T \mathbf{T}_i^i \mathbf{r}_i \quad (5-11)$$

5.1.3 机械臂的拉格朗日方程

根据拉格朗日方程的定义，机械系统的拉格朗日函数 L 为其动能与势能之差：

$$L = K - P \quad (5-12)$$

将式(5-8)、式(5-11)代入上式，可得：

$$L = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^i \sum_{k=1}^i \text{Trace} \left(\frac{\partial \mathbf{T}_i}{\partial q_j} \mathbf{I}_i \frac{\partial \mathbf{T}_i^T}{\partial q_k} \right) \dot{q}_j \dot{q}_k + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n I_{ai} \dot{q}_i^2 + \sum_{i=1}^n m_i \mathbf{g}^T \mathbf{T}_i^i \mathbf{r}_i \quad (5-13)$$

由式(5-12)所示的拉格朗日方程可推导出机械系统的动力学方程，如式(5-14)所示。

其中， τ_i 为机械臂第 i 个关节处的广义力， q_i 为机械臂第 i 个关节的广义坐标， \dot{q}_i 为机械臂第 i 个关节的广义速度。

$$\tau_i = \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial L}{\partial q_i} \quad (5-14)$$

将式(5-11)代入，可得：

$$\begin{aligned} \tau_i = & \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^j \text{Trace} \left(\frac{\partial \mathbf{T}_j}{\partial q_k} \mathbf{I}_j \frac{\partial \mathbf{T}_j^T}{\partial q_i} \right) \ddot{q}_k + I_{ai} \ddot{q}_i \\ & + \sum_{j=i}^n \sum_{k=1}^j \sum_{m=1}^j \text{Trace} \left(\frac{\partial^2 \mathbf{T}_j}{\partial q_k \partial q_m} \mathbf{I}_j \frac{\partial \mathbf{T}_j^T}{\partial q_i} \right) \dot{q}_k \dot{q}_m - \sum_{j=i}^n m_j \mathbf{g}^T \frac{\partial \mathbf{T}_j^i}{\partial q_i} \mathbf{r}_j \end{aligned} \quad (5-15)$$

可将式(5-15)化简为：

$$\tau_i = \sum_{j=1}^n D_{ij} \ddot{q}_j + I_{ai} \ddot{q}_i + \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n D_{ijk} \dot{q}_j \dot{q}_k + D_i \quad (5-16)$$

式中：

$$\begin{aligned} D_{ij} &= \sum_{p=\max(i,j)}^n \text{Trace} \left(\frac{\partial \mathbf{T}_p}{\partial q_j} \mathbf{I}_p \frac{\partial \mathbf{T}_p^T}{\partial q_i} \right) \\ D_{ijk} &= \sum_{p=\max(i,j,k)}^n \text{Trace} \left(\frac{\partial^2 \mathbf{T}_p}{\partial q_j \partial q_k} \mathbf{I}_p \frac{\partial \mathbf{T}_p^T}{\partial q_i} \right) \\ D_i &= -\sum_{p=i}^n m_p \mathbf{g}^T \frac{\partial \mathbf{T}_p^i}{\partial q_i} \mathbf{r}_p \end{aligned}$$

5.2 ADAMS 动力学仿真

ADAMS 全称为 Automatic Dynamic Analysis of Mechanical Systems (机械系统动力学自动分析)，是美国机械动力公司开发的一款虚拟样机分析软件。本文利用其进行外骨

骼机械臂动力学仿真。

5.2.1 仿真前的准备工作

利用 ADAMS 进行动力学仿真前，需完成以下准备工作：

(1) 环境设置：设置“单位”为“MMKS”；设置重力方向为“-Z”方向，大小为 9806.65mm/s^2 。

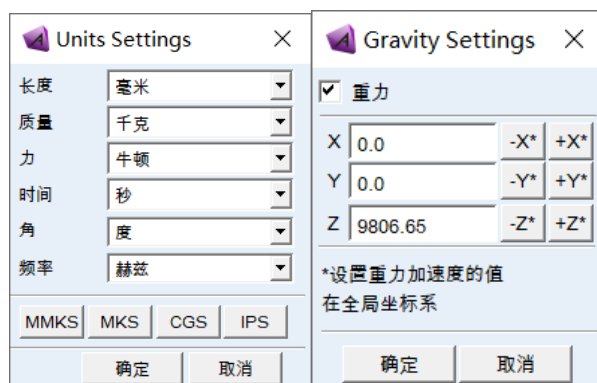


图 5-1 ADAMS 工作环境设置

(2) 导入机械臂三维模型：SOLIDWORKS 软件所建立的模型的默认文件格式为.SLDPRT 或.SLDASM，而 ADAMS 软件不能识别这两种文件类型。若要利用 SOLIDWORKS 软件所建立的模型在 ADAMS 中进行动力学仿真，需完成以下操作：首先，在 SOLIDWORKS 软件中将外骨骼模型导出为 parasolid 格式的文件，然后将其导入 ADAMS 中。

(3) 定义构件材料属性：为使仿真结果反映真实实验效果，在仿真前需要设置模型各构件的材料属性，软件在仿真过程中将自动计算出模型的质量、质心坐标等物理参数。为满足外骨骼设计轻量化要求，将机械臂主体构件材料定义为“Aluminum”。

(4) 修改构件名称与颜色：在仿真前修改各构件的名称、颜色等特征，以便清晰地区分机械臂各构件，使模型美观化，仿真结果直观化。

(5) 添加约束：上肢外骨骼机械臂具有 5 个转动自由度，须在 ADAMS 模型中添加五个转动副以满足机械臂的运动要求。此外，为使外骨骼在仿真空间中具有确定的位置，保证仿真准确稳定，应添加 1 个固定副。设置外骨骼机械臂 ADAMS 仿真模型各构件间的运动约束关系如表 5-1 所示。

表 5-1 机械臂各构件间的运动约束关系

构件 1	构件 2	运动约束关系	运动副名称
大地(ground)	小肩板	固定副	JOINT_Fixed
小肩板	大肩板	转动副	JOINT_1
大肩板	上臂	转动副	JOINT_2
上臂	上臂环	转动副	JOINT_3
上臂	前臂	转动副	JOINT_4
前臂	前臂环	转动副	JOINT_5

完成上述准备工作后得到的外骨骼机械臂 ADAMS 仿真模型如图 5-2 所示。

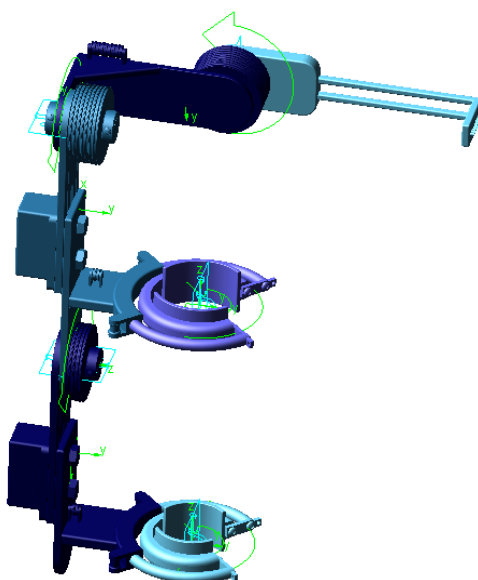


图 5-2 ADAMS 仿真模型

5.2.2 仿真过程与结果

本小节主要介绍上肢外骨骼机械臂在仅受自身重力情况下的动力学仿真，取第 4 章轨迹规划时机械臂各关节的运动参数为仿真条件，求取机械臂各关节的驱动力矩变化曲线。仿真过程主要分为以下三步：

(1) 导入运动轨迹：首先，从 MATLAB 中导出机械臂轨迹规划时各关节的角位移变化数据，将各关节的角位移变化数据分开处理成以时间为变量的数据格式，并分别保存为.txt 文件格式。在进行轨迹规划时各关节角度有初始值，不为 0，而在 ADAMS 中的驱动初始角度为 0，因此需要对数据进行处理。然后，在 ADAMS 界面中点击“文件”下拉菜单中的“导入”选项，将“文件类型”设置为“实验数据(*.*)”，选择“创建样条

线”选项，读取保存的.txt 文件，将各关节运动轨迹分别导入到 ADAMS 软件中。

(2) 添加驱动函数：ADAMS 中的 Spline 函数提供了 CUBSPL、CURVE 与 AKISPL 三种插值方法，本文选取 CUBSPL 函数作为机械臂各关节的驱动函数，调用格式为：CUBSPL(time, 0, SPLINE_NAME, 0)，其中，JOINT_1 至 JOINT_5 的样条轨迹依次为 SPLINE_1 至 SPLINE_5。

(3) 仿真分析与后处理：完成上述工作后，点击“仿真”选项卡中的“运行交互仿真”选项，进行机械臂动力学仿真。仿真运行结束后在 ADAMS 后处理模块导出机械臂各关节驱动力矩变化曲线，如图 5-3 所示。

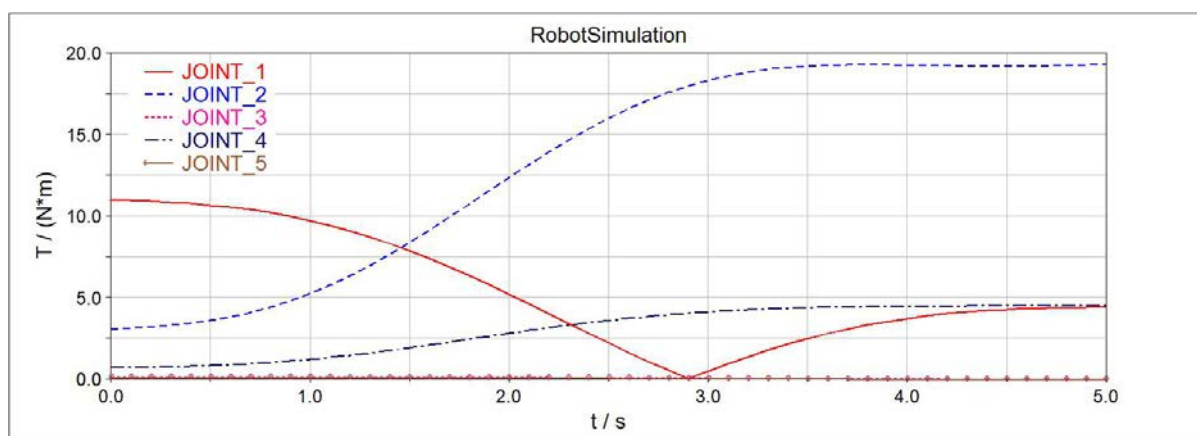


图 5-3 机械臂各关节驱动力矩曲线

由上图可知：机械臂各关节驱动力矩变化平稳，最大驱动力矩约为 19Nm，最小驱动力矩为 0。JOINT_1 驱动力矩先从 11Nm 减小为 0，后增大至 4.5Nm，JOINT_2 与 JOINT_4 的驱动力矩均逐渐增大后保持平稳。在仿真过程中机械臂各构件均仅受自身重力，JOINT_3 与 JOINT_5 均无负载，故关节驱动力矩始终为零。

第 6 章 上肢外骨骼机器人控制策略设计

本文设计的上肢动力外骨骼康复机器人的主要应用对象为人体上肢，主要应用场景为助力穿戴者上肢的自由运动与负重训练。由第一章分析可知，人体上肢肩、肘关节共有 5 个自由度，因此可以进行复杂的运动。本章将以上肢运动中基本的肘关节前屈、后伸为例，介绍机器人系统在负重情况下进行搬运运动的控制策略。其他更加复杂的运动可以分解为一系列在其他关节或其他方向上的类似的运动，采用类似的控制策略。

6.1 有限状态机控制策略

在上肢动力外骨骼康复机器人进行肘关节的前屈、后伸运动过程中，我们定义小臂和人体冠状面的夹角为肘关节角度 θ ，如图 6-1 所示，前屈为其正方向，前屈时肘关节角度增加，后伸时肘关节角度减小。

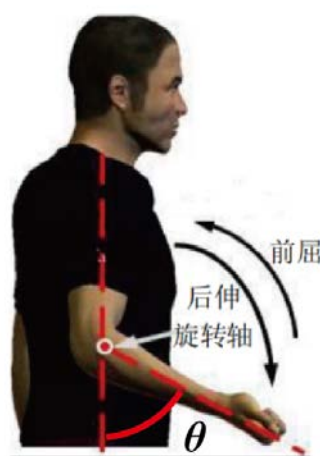


图 6-1 运动示意图

我们设计了一种有限状态机控制策略对外骨骼的搬运动作进行控制，如图 6-2 所示。工作状态共包括三种状态：提升状态，下降状态和支撑状态。提升状态，即进行肘关节的前屈运动，此时肘关节电机为主动模式，采用位置控制；下降状态，即进行肘关节的后伸运动，此时肘关节电机为阻尼模式，进行阻抗控制；支撑状态，即肘关节维持不动的状态，此时肘关节电机也为阻尼状态，进行刚度很高的阻抗控制。

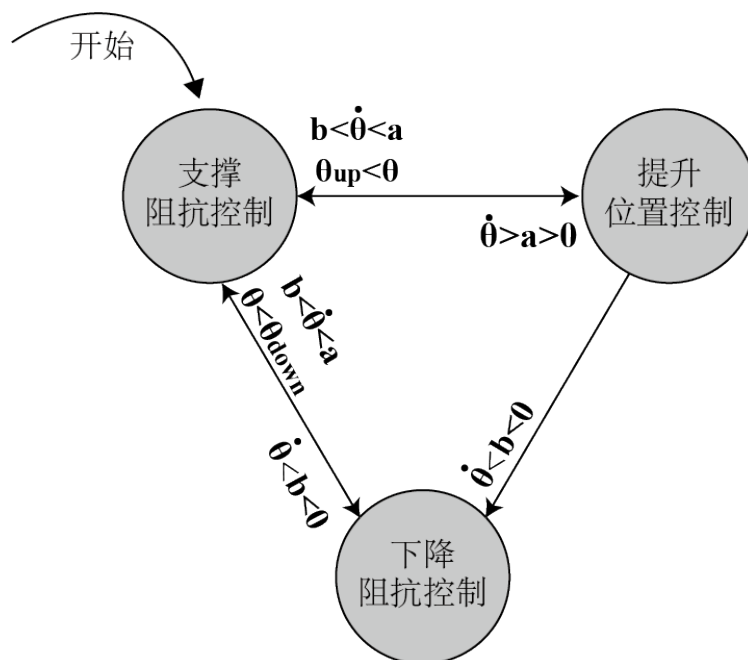


图 6-2 三种控制状态的相互转换

有限状态机的切换方法如图 6-2 所示，上肢动力外骨骼康复机器人的初始状态为某一角度下的支撑状态。当 $\dot{\theta} > a > 0$ 时，从支撑状态进入提升状态，电机进入主动模式，在位置控制下转动至指定位置。此时 $a > \dot{\theta} > b$ ，即角速度在 0 附近波动，且 $\theta > \theta_{up}$ ，从提升状态进入支撑状态，通过阻抗控制提供大阻尼力矩，维持上肢动力外骨骼康复机器人的稳定；随后当 $0 > b > \dot{\theta}$ 时，从支撑状态进入下降状态时，电机进入阻尼模式，上肢动力外骨骼康复机器人在负载与自重的共同作用下做后伸运动，并在阻尼控制提供的阻抗力矩作用下缓慢停止。下降状态的阻抗控制刚度小于支撑状态的刚度。当 $a > \dot{\theta} > b$ ，且 $\theta_{down} > \theta$ 时，从下降状态进入支撑状态。若提升时，还没有上升到特定位置便开始下降，则直接从提升状态切换到下降状态。

6.2 阻抗控制方法

由第一节的分析可知，上肢动力外骨骼康复机器人在下降状态与支撑状态下，肘关节电机都工作在阻尼模式，提供阻抗力矩。阻抗控制系统采用两级的闭环控制，其示意图如图 6-3 所示。

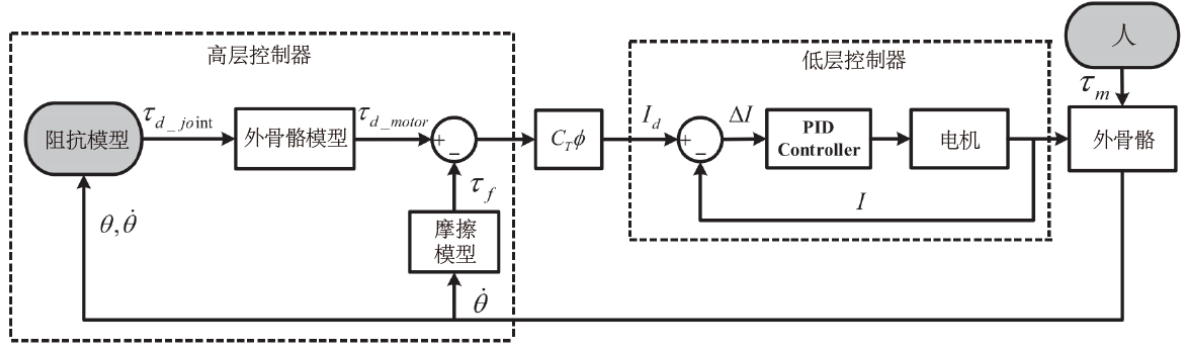


图 6-3 阻抗控制流程图

前一级的高级控制器根据外骨骼传感反馈获得的角度和速度信息，经过阻抗模型的计算得到关节力矩；关节力矩经过外骨骼模型的解算获得肘关节电机力矩；除此以外，还要考虑由传感反馈获得的速度信息经摩擦模型计算得到的摩擦力矩，得到最终的肘关节电机力矩控制值。阻抗模型公式如下：

$$\tau_{d_joint} = k_1(\theta - \theta_{eq}) + k_2(\theta - \theta_{eq})^2 + b\dot{\theta} \quad (6-1)$$

其中 k_1 、 k_2 、 b 为刚度系数， θ 为电机当前位置， θ_{eq} 为下降开始前支撑状态的平衡位置。在下降状态下， θ 越大，下降越多； $\dot{\theta}$ 越大，下降速度越快，阻抗力矩越大，起到阻止下降的效果。在支撑状态下，各刚度系数远大于下降状态下的控制系数，阻抗力矩也大得多。

外骨骼模型为通过传动机构传动比将关节力矩转换为电机力矩。

$$\tau_{d_motor} = G\tau_{d_joint} \quad (6-2)$$

G 为传动比。摩擦模型如下方公式所示，得到摩擦力矩。

$$\tau_f = b_f\dot{\theta} + c_f \cdot \text{sgn}(\dot{\theta}) \quad (6-3)$$

其中， b_f 是粘性阻尼系数， c_f 表示库仑摩擦力。 b_f 和 c_f 是根据离线数据进行线性拟合估算的。

后一级的低级控制器则是电机产生阻抗力矩的执行机构。电机阻尼模式的原理为，在阻尼模式下，电机不接电源，当上肢运动带动电机转动时，在磁场作用下，转动的电机可以切割磁感线产生感应电动势 E_a ：

$$E_a = C_E \Phi n \quad (6-4)$$

其中 C_E 为考虑了整流电路在内的电动势常数， Φ 为磁场强度， n 为电机转速。如果电机电枢绕组接通，就会在感应电动势作用下产生感应电流 I_a ：

$$I_a = \frac{E_a}{R_a} \quad (6-5)$$

其中 R_a 为电机电枢绕组的电阻值。在磁场作用下，感应电流会产生阻尼力矩 τ_b ：

$$\tau_b = C_T \Phi I_a = \frac{C_T C_E \Phi^2}{R_a} n = \frac{k_d}{R_a} n \quad (6-6)$$

其中 C_T 为电机的力矩常数， $k_d = C_T C_E \Phi^2$ 是等效的比例系数，在本文中为常数。由此我们可知，通过对电机电枢绕组的电阻值 R_a 进行控制，就可以控制电机电枢中的感应电流，从而对电机进行阻尼控制。通过对电机电枢中的可控电力电子器件进行控制，令电机电枢以一定频率接通和断开，就可以起到控制电机电枢电阻值 R_a 的效果。

在上肢动力外骨骼康复机器人系统中，通过高级控制器给出的电机力矩控制值，计算得出电机电枢电流的控制值，经过电机电枢电流负反馈的 PID 控制，作用于电机中的电力电子器件后，就完成了低级控制器对电机阻尼的控制。

除了上述的两级闭环控制系统，还要考虑人体对外骨骼作用的力矩 τ_m ，通过力矩传感器测量。

6.3 位置控制方法

由第一节的分析可知，上肢动力外骨骼康复机器人在上升状态下采用位置控制工作在主动模式。位置控制采用带有负反馈的 PID 控制，其过程与阻抗控制类似。外骨骼上的传感反馈获得实际位置的反馈，预期位置与其比较后得到误差经 PID 控制计算得到末端关节电机的控制力矩，而关节电机的力矩控制由控制电压实现，最终作用于外骨骼，实现上升状态下的位置控制。

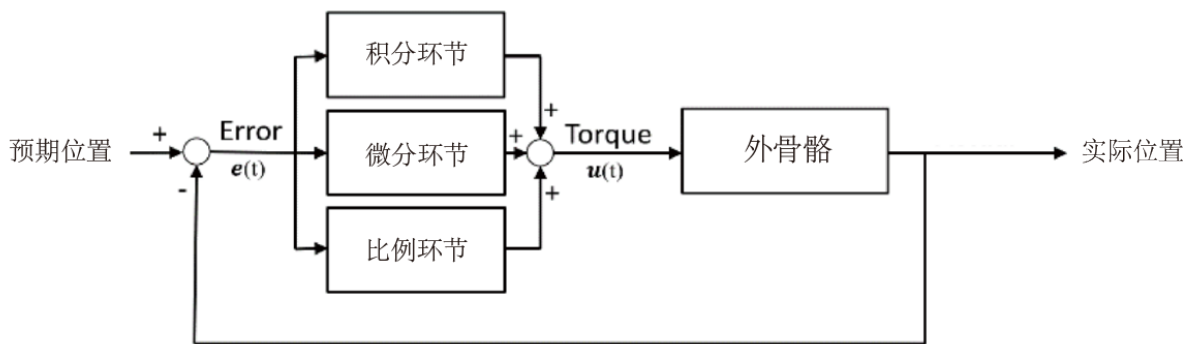


图 6-4 位置控制流程图

先进机器人控制课程报告——小组成员及分工

成员	主要分工
徐明	内容规划，机械结构设计
孟凡旭	资料汇总，运动学分析与仿真
许诺	工作空间分析与轨迹规划
王润	动力学分析与仿真
朱文铎	控制策略设计