

# 基于 ADAMS 的 90 度关节型取放装置设计与运动学仿真

赵文波<sup>1</sup>, 尚毅<sup>1</sup>, 李晓科<sup>2</sup>, 熊延举<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> 洛阳天浩泰轨道装备制造有限公司, 河南洛阳, 中国

<sup>2</sup> 郑州轻工业大学, 河南郑州, 中国

\*通讯作者

**【摘要】**针对自动化生产线中工件取放效率低以及人工搬运成本高等问题, 本文设计了一种四自由度的 90 度关节型取放装置。通过分析关节型机器人的结构特点, 选用伺服电机驱动与齿轮传动方案, 结合 SolidWorks 完成三维建模。并基于 ADAMS 软件进行运动学仿真, 通过 STEP 函数规划关节运动轨迹, 模拟取放装置的运动路径。仿真结果表明, 各关节运动角度变化平稳, 末端执行器位移连续, 验证了设计的合理性与稳定性。本研究为工业搬运机器人的结构优化与运动规划提供了理论支持。

**【关键词】**取放装置; SolidWorks; ADAMS; 运动学仿真; 伺服电机

## 1. 引言

在当今全球化和工业 4.0 的背景下, 制造业正经历着深刻的转型升级。传统的生产模式已无法满足现代工业对高效、精准、低成本生产的需求<sup>[1]</sup>。自动化生产线作为提升生产效率、降低人力成本的重要手段, 已成为制造业发展的核心方向。在自动化生产线中, 工件的搬运与取放是生产流程中的重要环节。传统的搬运方式主要依赖人工操作, 这种方式不仅效率低下, 而且在高强度、高重复性的工作环境中容易导致工人疲劳和操作失误<sup>[2]</sup>。此外, 在一些危险或恶劣的工作环境中(如高温、高粉尘、有毒有害环境), 人工操作还可能对工人的健康和安全造成威胁<sup>[3]</sup>。因此, 开发一种高效、精准、可靠的自动化取放装置, 已成为现代制造业的迫切需求。

90 度取放装置作为一种新型的搬运机器人, 能够在自动化生产线上实现工件的高效抓取与安放。拥有高精度、高灵活性、低噪音和长使用寿命等特点。近年来, 关节型机器人凭借其结构紧凑、动作灵活的优势, 逐渐成为取放任务的主流方案, 针对 90 度取放装置的研究, 国内外学者主要集中在结构设计、驱动方式选择、传动系统优化以及运动学仿真等方面。例如, Mustafa Bugday 等<sup>[4]</sup>通过优化工业机器人的臂结构, 显著降低了冗余重量, 提高了装置的运动性能。Jun Xia 等<sup>[3]</sup>提出了一种基于积分障碍 Lyapunov 函数的自适应神经控制方法, 用于机器人操纵系统的轨迹跟踪控制, 取得了良好的实验效果。帖秋菊<sup>[2]</sup>设计了一种基于机械手的自动化搬运系统, 通过合理的结构设计

和控制算法优化, 实现了高效、稳定的工件搬运。莫坚等<sup>[5]</sup>设计了一种三自由度气动机械手, 并对夹紧气缸进行了优化选型, 通过合理的传动设计和控制策略, 显著提高了机械手的搬运效率和精度。赵竹强<sup>[6]</sup>对工业机械手的概念设计关键技术进行了深入分析, 提出了一种基于功能模块化的机械手设计方法。郭卫东<sup>[7]</sup>基于 ADAMS 平台验证了多自由度机械手的运动学可行性。

尽管已有研究取得了一定的成果, 但现有 90 度取放装置在精度、灵活性和适应性方面仍有提升空间。特别是在复杂工况下的路径规划、动力学性能优化以及末端执行器的设计等方面, 仍需进一步深入研究。本文提出一种 4 自由度关节型取放装置, 面向 90 度取放场景实现高效稳定的工件搬运。

## 2. 90 度取放装置的设计与三维模型的建立

### 2.1 取放装置的总体设计

90 度取放装置是一种能够实现 90 度取放工件的智能装置, 考虑到取放装置在进行工件的抓取与安放时, 所取放的工件总体的体积与质量均不大, 所以取放装置的设计应重点突出其取放精度高、运动灵活、结构紧凑等特点, 因此取放装置的设计采用关节型结构<sup>[8]</sup>。装置的整体结构通过底座与地面或其他固定物相连, 腰部与底座相连并可绕底座旋转, 大臂与腰部相连并可绕腰部摆动, 摆动时最大角度可达 120 度, 小臂与大臂相连并可绕大臂摆动, 摆动的最大角度为 150°, 腕部与小臂相连并可绕小臂摆动, 摆动的最大角度为 150°, 末端执行器用于抓取和放置工件<sup>[9-11]</sup>。为了使取

放装置能够满足取放要求，到达所设计的工作位置，与此同时能够合理的对工件进行抓取与安放，确定取放装置主要技术参数如表 1 所示。

表 1.主要技术参数

| 名称          | 参数                |
|-------------|-------------------|
| 自由度         | 4                 |
| 操控方式        | 人工/自动             |
| 最大伸出长度      | 340mm             |
| 最大取放工件质量    | 10kg              |
| 最大取放工件长/宽/高 | 200mm/200mm/240mm |
| 底座所占面积      | 0.1m <sup>2</sup> |
| 取放装置总高      | 700mm             |

2.2 驱动与传动装置设计

90° 取放装置的驱动方式设计，在考虑整个装置的功率负载和控制功能以及取放装置的工作环境、取放要求、制造成本以及日常维护成本等实际情况。最终选择伺服电机作为驱动方式，与液压驱动和气压驱动相比，伺服电机无需复杂的供能装置，且对环境无污染，因此更适合中小型机器人。与步进电机相比，伺服电机运动平稳性好，在低速时可以稳定运行。准确度也较步进电机有了极大的提升，在维持位置、速度以及输出扭矩的同时也解决了步进电机失步的难点<sup>[12]</sup>。同时，伺服电机可以适用于多种复杂恶劣的场合，有的伺服电机还具有一定的过载能力，能够有效的满足实际工作中使用<sup>[13]</sup>。

伺服电机是取放装置各部分驱动力的来源，伺服电机的输出容量要满足取放装置的工作要求，所选的电机容量既不能过大也不能过小，若容量过小会造成取放装置各关节过载工作，影响工作精度的同时也会造成电机寿命下降，若电机容量过大则会造成取放装置各关节的容量浪费增加了生产成本<sup>[14]</sup>。与此同时，伺服电机在驱动时必须要考虑负载对转速以及扭矩的要求，通过对取放装置的小臂、大臂以及腰部伺服电机的选型计算<sup>[15-16]</sup>，得到的各部位电机型号与参数如表 2 所示。

表 2.各部位伺服电机型号与参数

| 名称     | 小臂电机         | 大臂电机         | 腰部电机 |
|--------|--------------|--------------|------|
| 型号     | MHMF082L1U2M | MDMF102L1G6M |      |
| 电机额定输出 | 750W         | 1000W        |      |
| 电源电压   | AC200V       | AC200V       |      |
| 额定转矩   | 2.4N·m       | 4.77N·m      |      |
| 重量     | 2.3KG        | 4.6KG        |      |

为了将伺服电机的高速旋转转换为装置

各关节的低速运动，设计中采用了齿轮传动作为主要的传动方式，齿轮传动精度高，结构紧凑能够满足取放装置各部分的设计要求，在多方面优于带传动以及链传动等传动类型。根据各关节的运动需求和结构特点，采用了不同的齿轮传动方式。腰部与大臂之间采用直齿圆柱齿轮传动，这种传动方式具有较高的效率和稳定性，能够满足腰部带动大臂进行较大角度摆动的需求。大臂与小臂之间以及小臂与腕部之间均采用锥齿轮传动，锥齿轮传动适用于空间交叉轴之间的传动，能够在保持传动效率的同时，实现不同方向的运动转换，满足装置在空间中灵活取放工件的要求。这样的传动设计确保了装置各关节运动的精确性和稳定性，同时提高了装置的整体性能和使用寿命。

2.3 取放装置三维建模

为了验证 90 度取放装置的设计方案并为后续的运动学仿真提供基础，本文基于 SolidWorks 软件完成取放装置的三维建模，采用模块化设计策略，将装置分解为底座、关节传动、末端执行器三大功能模块，兼顾结构紧凑性与运动可靠性。整体三维模型如图 1 所示。

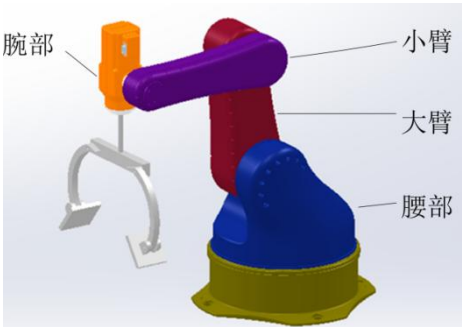


图 1.取放装置三维模型

取放装置的腰部是为了支撑取放装置的手臂部分，带动手臂的回转运动同时与手臂的运动相结合进而实现末端执行机构的取放作用，需要有足够的刚度、强度与较高的承载能力；大臂的一端与腰部相连接，另外一端与小臂相连接。大臂主要起到支撑小臂、手腕以及末端执行器与所夹持的工件，并与小臂运动组合将执行机构移动所需的工作位置进行工件的取放与放置。大臂部分的设计要求除了要满足刚度、强度以及承载能力的要求以外还要有较大的摆动角度；小臂的两端分别与大臂以及末端执行器件相连接，主要用来支撑末端执行器与外部取放工件负载，同时与其他部分配合将末端执行器运送到指定的工作位置进行工件的取放；腕部的一端连接小臂，另外一端连接末端执行器，取放装置通过手腕调整、改变

工件的位置,同时腕部具有相对独立的自由度便于取放装置的末端执行器满足复杂的取放动作。

### 3.ADAMS 运动学仿真

#### 3.1ADAMS 仿真模型的建立

ADAMS 是一款广泛应用于机械系统动力学仿真的软件,能够对复杂的机械系统进行运动学和动力学分析。与传统的物理样机相比,ADAMS 建立的虚拟样机可以显著缩短研发周期,降低开发成本,并能够快速验证设计的合理性和可行性。本研究利用 ADAMS 对 90 度取放装置进行运动学仿真,具体过程和参数设置如下:

为实现高效仿真计算,对取放装置模型进行适当简化,忽略一些不影响运动学分析的非关键零部件(如螺栓、螺母等),保留主要运动部件;所有部件材质统一定义为钢材;底座与地面通过固定副连接,限制其全部自由度,腰部-大臂、大臂-小臂、小臂-腕部分别以旋转副约束,共定义 4 个自由度;验证模型无过定位与欠定位情况。建立 90 度取放装置的仿真模型,如图 2 所示。

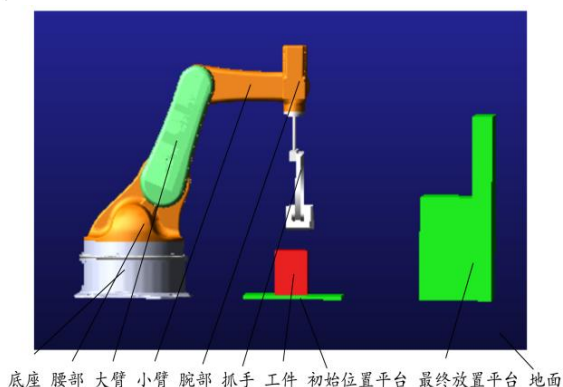


图 2.90 度取放装置仿真模型

#### 3.2 驱动函数的设计

取放动作规划为“抓取-搬运-复位”三阶段,运动路径依次经过①→②→③→①,如图 3 所示。各关节运动通过 STEP 函数分时控制,函数格式如下:

$$\text{STEP}(a,b,c,x,h) \quad (1)$$

其中,  $a$  表示 STEP 函数所要表示的变量在此处设置为  $\text{time}$ ; 变量  $b$  为关节运动的开始时间,  $c$  为对应于变量  $b$  的函数值, 变量  $x$  为关节运动的结束时间,  $h$  为对应于变量  $x$  的函数值。

假设总时长为 7.5 秒,基于此设计各个关节的驱动函数,从①→②过程中末端执行器放下,驱动函数如下:

大臂:

$$\text{step}(\text{time},0,0,1,14d) \quad (2)$$

小臂:

$$\text{step}(\text{time},0,0,1,12d) \quad (3)$$

腕部:

$$\text{step}(\text{time},0,0,1,18d) \quad (4)$$

从②→③过程中,工件从初始位置平台移动到最终放置位置平台,驱动函数如下,

大臂:

$$\text{step}(\text{time},3,0,4,-11d) + \text{step}(\text{time},4,0,5,15d) + \text{step}(\text{time},5,0,5.5,12d) \quad (5)$$

小臂:

$$\text{step}(\text{time},3,0,4,-10d) + \text{step}(\text{time},4,0,5,-19d) \quad (6)$$

腕部:

$$\text{step}(\text{time},4,0,5,68d) \quad (7)$$

从③→①位置,工件放下,取放装置快速退回,驱动函数如下,

大臂:

$$\text{step}(\text{time},6,0,6.5,-15d) + \text{step}(\text{time},7,0,7.5,-15d) \quad (8)$$

小臂:

$$\text{step}(\text{time},7,0,7.5,17d) \quad (9)$$

腕部:

$$\text{step}(\text{time},6,0,7,-68d) + \text{step}(\text{time},7,0,7.5,-21d) \quad (10)$$

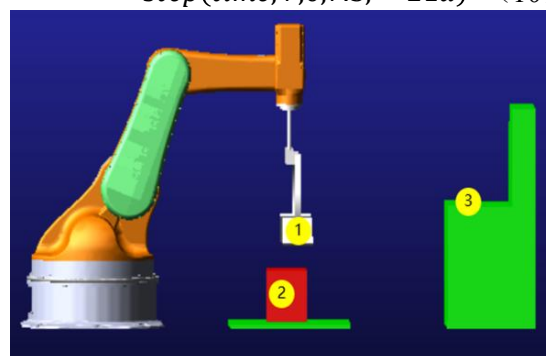


图 3.取放装置运动路径图

#### 3.3 仿真结果分析

通过对 90 度取放装置的运动学仿真,得到了大臂、小臂及腕部关节角度随时间的变化曲线,如图 4 所示,图中纵坐标为关节运动角度,横坐标为关节运动时间(s)。可以看出,大臂、小臂以及腕部关节角度变化情况基本一致,此时在大臂、小臂以及腕部关节的协调运动下完成抓手放下开始进行工件的取放,对应图 3 中由①→②位置的过程。之后在 3~6s 内,

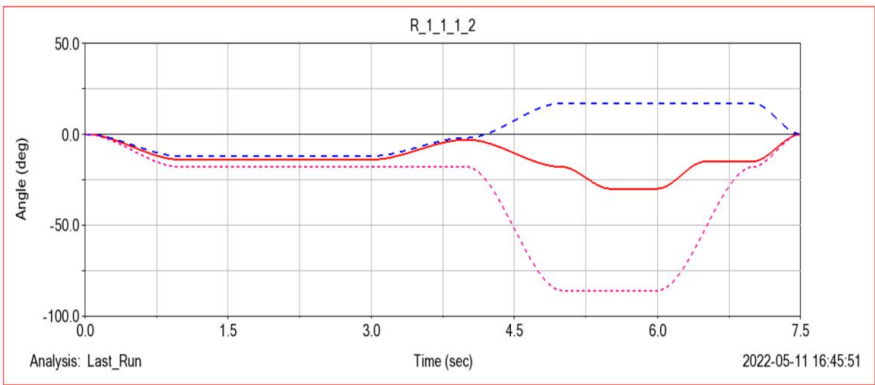


不同关节出现了不同的运动趋势，此时主要完成将工件放到规定的位置，对应图 3 中由②→③位置的过程。从 6~7.5s 内，此时工件已经放到规定的位置，取放装置处于空载状态，各关节快速退回到原来位置，对应图 3 中由③→①位置的过程。

通过曲线看出在整个 0~7.5s 模拟时间内，取放装置各关节运动连续平稳并无明显突变，同时取放装置关节角度变化率不大，不会出现大幅度抖动现象，整个运动过程平稳无重大冲击振动不会造成关节处的零部件的剧烈磨损，

延长了取放装置的使用时间。

在得到取放装置各关节角度变化的同时，利用 ADAMS 的后处理模块对取放装置的末端执行器进行运动学的特性分析，可得到其运动位移随时间的变化情况，如图 5 所示，图中纵坐标为末端执行器的运动位移长度（mm），横坐标为运动时间。可以看到，在整个仿真过程中，末端执行器的位移变化趋势较为平缓，没有出现突变或不连续的情况。这表明取放装置的路径规划合理，末端执行器能够准确到达目标位置，满足工件取放的精度要求。



— 大臂关节 — 小臂关节 - - - 腕部关节  
图 4.关节角度变化曲线

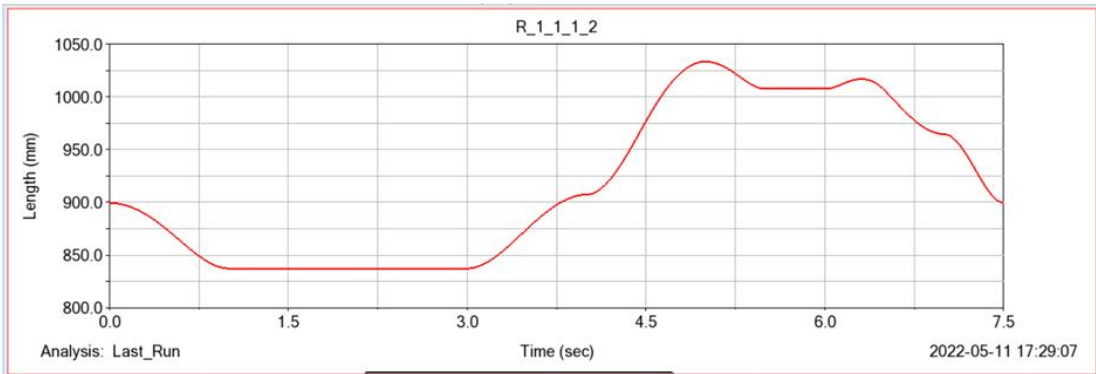


图 5.末端抓手位移

4.结论

针对自动化生产线中工件取放效率低、精度不足的问题，本文设计了一种四自由度关节型 90 度取放装置，并基于 ADAMS 软件对其进行了运动学仿真验证。通过分析现有取放装置的不足，采用伺服电机驱动与齿轮传动方案，结合 SolidWorks 完成三维建模，优化了装置的结构紧凑性与运动可靠性。仿真结果表明，各关节角度变化平稳，末端执行器位移连续无突变，运动路径规划合理，验证了设计的可行性与稳定性。本文提出的 90 度取放装置设计方案为工业搬运机器人的结构优化与运动规划提供了理论支持，在提升生产效率、降低人

工成本方面具有实际应用潜力。

参考文献

[1]王宇.对工业机器人应用与发展的探讨[J].中国科技信息, 2022 (07): 134-136.  
[2]帖秋菊.基于机械手搬运工件的自动化系统设计[D].电子科技大学, 2019.  
[3]Jun Xia, Yujia Zhang, Chenguang Yang, Min Wang, Andy Annamalai. An improved adaptive online neural control for robot manipulator systems using integral Barrier Lyapunov functions[J]. International Journal of Systems Science, 2019, 50(1-4): 638-651.  
[4]Mustafa Bugday, Mehmet Karali. Design

- optimization of industrial robot arm to minimize redundant weight[J]. Engineering Science and Technology, an International Journal, 2019, 22(1): 346-352.
- [5]莫坚, 左继红.基于物料搬运三自由度气动机械手设计及夹紧气缸选用[J].技术与市场, 2022, 29(03): 35-37.
- [6]赵竹强.关于工业机械手概念设计关键技术的分析[J].橡塑技术与装备, 2021, 47(24): 54-57.
- [7]郭卫东, 李守忠, 马璐.ADAMS 2013 应用实例精解教程[M].机械工业出版社, 2015.
- [8]刘文剑.工业机器人设计与应用[M].黑龙江科学技术出版社, 1990.
- [9]高红红, 马保吉, 杨恒, 李志超.六自由度上料机械手控制系统的设计与测试[J].仪表技术与传感器, 2022, (01): 57-61.
- [10]孙江波, 王翠, 荆强.镁合金材质智能机械手系统的开发与设计[J].世界有色金属, 2016, (19): 183+185.
- [11]李亚昆.基于 PLC 的液压机械手系统设计[J].煤矿机械, 2017, 38(05): 167-169.
- [12]程宪平.机电传动与控制[M].华中科技大学出版社, 2003.
- [13]唐中燕.机电传动控制[M].中国电力出版社, 2009.
- [14]马兵.运动控制中伺服电机选型需求分析[J].现代工业经济和信息化, 2020, 10(12): 103-104.
- [15]田乐帅.冲床上下料机械手的设计与研究[D].青岛科技大学, 2016.
- [16]范磊.一种精密旋转工作台的特点和伺服电机选型计算[J].汽车工艺与材料, 2022, (03): 65-70.