

基于悬链线载荷模型的飞机加油车机械臂结构设计

浦俞轩, 杨丽红

上海理工大学机械工程学院, 上海

收稿日期: 2025年6月25日; 录用日期: 2025年7月18日; 发布日期: 2025年7月28日

摘要

本研究针对飞机管线加油车机械臂的结构强度、收纳空间及稳定性问题, 提出了一种基于悬链线载荷模型建模的设计方案。通过SolidWorks完成机械臂三维建模, 基于悬链线理论计算油管载荷, 结合Workbench进行静力学与滑移仿真, 验证结构薄弱点及底座抗倾覆性能; 同时利用MATLAB建立D-H坐标系, 生成机械臂可达空间点云图, 可视化工作范围, 便于后续安装开发。结果表明, 该机械臂最大伸展距离达12.28 m, 滑移位移控制在0.1 mm以内, 折叠态关节盲区占比低于4.5%。该研究为航空加油设备智能化升级提供了理论与技术支持。

关键词

悬链线模型, 可折叠, Workbench仿真模型, D-H运动学

Catenary-Based Structural Design of Robotic Arm for Aircraft Refueling Vehicles

Yuxuan Pu, Lihong Yang

School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Jun. 25th, 2025; accepted: Jul. 18th, 2025; published: Jul. 28th, 2025

Abstract

This study addresses the structural strength, compact storage, and stability challenges of robotic arms for aircraft pipeline refueling vehicles by proposing a design framework based on catenary-based load modeling. A 3D model of the robotic arm was constructed in SolidWorks, and the dynamic loads induced by fuel hoses were calculated using catenary theory. Static mechanics and sliding simulations were performed in Workbench to identify structural weak points and validate the

anti-overturning performance of the base. Simultaneously, the Denavit-Hartenberg (D-H) coordinate system was implemented in MATLAB to generate a point cloud diagram of the robotic arm's reachable workspace, visualizing the operational range to guide subsequent installation and development. The results demonstrate that the optimized robotic arm achieves a maximum extension distance of 12.28 meters, limits sliding displacement to within 0.1 mm, and reduces joint blind zones in the folded configuration to below 4.5%. This research provides theoretical and technical foundations for the intelligent upgrading of aviation refueling equipment.

Keywords

Catenary Model, Foldable, Workbench Simulation Model, D-H Kinematics

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着航空运输业的快速发展,飞机管线加油车作为机场地面保障核心装备,其作业效率与可靠性直接影响航班调度效率。当前外置油管与加油口连接多采用人工拖拽,油管与地面摩擦易导致管体磨损,且拖拽角度不当可能引发接头脱落或油液泄漏[1]。此外,油管释放与回收需多人配合调整冗余长度,劳动强度大、时间成本高、机械化程度低,这一状况亟待改善。

为适配新能源加油车,俞斌[2]对现有管线加油车底盘进行改进,上装升降平台的位置优化有效减少了加油作业的移动距离。近年来,机械臂辅助加油系统逐渐成为解决这一问题的关键技术,其通过自动化与智能化手段显著降低人力消耗并提升作业精度。例如,机械臂系统可通过零力控制模块实现油管自重承载[3],作业员仅需引导油管对准受油口。然而,现有机械臂系统在复杂机场环境下的适应性、结构轻量化及动态稳定性方面仍存在不足,亟需进一步优化设计。

此外,在面向 A380 型宽体客机及 C-17 运输机等大型航空器的地面勤务保障中,鉴于国际航空地面设备安全操作规范(IAGD-SOP)第 4.2.7 条款关于翼下安全间距的强制性规定,管线加油车距离飞机翼下加油接口需保持一定安全距离,对大尺寸机械臂的设计和应用提出了新的要求。

本文聚焦于上述管线加油车不足,设计可折叠六自由度机械臂,用于夹持加油软管至飞机翼下加油口。首先基于 SolidWorks 平台构建关节模型,通过参数化驱动优化关节刚度,降低运动干涉风险。随后,引入悬链线理论建立油管负载动力学模型,结合 ANSYS Workbench 进行非线性静力学仿真,识别臂架薄弱点。针对底座固定螺栓的滑移风险,采用极端工况下静态模型仿真模拟连接件应力分布,确保抗倾覆安全性。最后,基于 MATLAB 建立 D-H 坐标系模型,通过蒙特卡洛法生成可达空间点云图,可视化机械臂覆盖范围。本文结构安排如下:第二部分详述可折叠机械臂建模与悬链线载荷分析;第三部分探讨仿真分析;第四部分展示运动学建模与工作空间验证结果;第五部分总结。

2. 机械臂建模与悬链线载荷分析

2.1. 机械臂建模

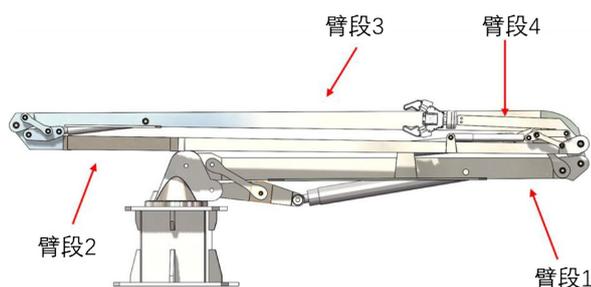
该四节折叠式机械臂系统主体由基座、四节臂段及末端执行器构成,系统共包含 5 个主动自由度(基座旋转 + 四节臂折叠)及 1 个末端旋转自由度。核心参数如表 1 所示,其中,重心位置指各臂段重心到上一关节点的距离。

Table 1. Parameters of each boom section**表 1.** 各臂段参数

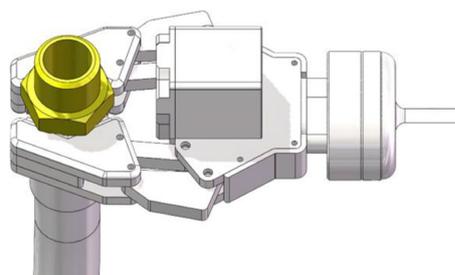
臂段	长度(m)	质量(kg)	重心位置(m)
1	3	146.7	1.43
2	4.2	206.3	2.72
3	4.18	205.0	2.66
4	0.9	44.1	0.61

底座系统：底座高度为 610 mm，顶部配置半圆形旋转基座(中心至底座上表面垂直距离 310 mm)，基座与底座间通过回转支承实现 360°水平旋转。

臂段拓扑：各臂段间通过辅助支板连接，液压缸实现臂展与收缩。收纳状态下相邻臂段可实现接近 180°折叠，收展比可达 2.8:1，显著提升空间紧凑性。机械臂结构如图 1 所示。

**Figure 1.** Structural schematic diagram of the robotic arm**图 1.** 机械臂结构示意图

末端执行器：第四臂段末端安装工作装置夹爪，通过蜗轮蜗杆传动机构实现末端执行器绕臂轴线 360°连续旋转，满足临近加油口接合时多角度作业需求，工作示意图如图 2 所示。

**Figure 2.** Gripper operational schematic diagram**图 2.** 夹爪工作示意图

在材料选择上，臂段主体采用 7075-T6 铝合金；底座与地面连接处采用马氏体时效钢 AISI 4340。

2.2. 悬链线模型分析

悬链线(Catenary)是一种描述柔性物体在均匀重力场中自然下垂形态的数学模型，其核心特征为两端固定、仅受自身重力作用时形成的稳定曲线[4]。机械臂外固定夹持软管的情况下，为精确量化软管对机械爪的张力载荷，考虑在飞机管线加油车机械臂的软管系统设计中引入悬链线模型以提升系统性能与可靠性。

悬链线方程通过微分平衡关系描述软管在重力作用下的自然下垂形态, 假设:

- 1) 软管为均质柔性体, 单位长度质量为 $\mu(\text{kg}/\text{m})$;
- 2) 仅受重力作用, 忽略空气阻力、弯曲刚度(忽略弯曲强度的适用性判断见式(11))等次要因素;
- 3) 两端固定在同一水平线上, 下垂形成对称曲线。

同时, 定义悬链线最低点为坐标原点 $(0,0)$, 软管下垂方向为 y 轴正方向; 水平张力 T_0 在最低点处沿 x 轴方向, 且任一点 (x,y) 处张力 T 方向与曲线切线一致。

取软管上一小段微元 ds 进行受力分析, 其水平投影为 dx , 垂直投影为 dy , 此时受力平衡方程为:

$$T \cdot \cos \theta = T_0 \quad (\text{水平张力平衡}) \quad (1)$$

$$T \cdot \sin \theta = \mu \cdot g \cdot ds \quad (\text{重力平衡}) \quad (2)$$

联立水平与垂直平衡方程并带入几何关系 $\tan \theta = \frac{dy}{dx}$ 和 $ds = \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} dx$, 整理得到微分方程:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{\mu \cdot g}{T_0} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} dx \quad (3)$$

分离变量并积分可解得:

$$\sinh^{-1} y' = \frac{\mu \cdot g}{T_0} \cdot x + C \quad (4)$$

由对称性得积分常数 C 为零, 有:

$$y' = \sinh \left(\frac{\mu \cdot g}{T_0} \cdot x \right) \quad (5)$$

对 y' 积分, 得到:

$$y = \frac{T_0}{\mu \cdot g} \cdot \cosh \left(\frac{\mu \cdot g}{T_0} \cdot x \right) + C \quad (6)$$

由边界条件 $x=0$ 时, $y=0$, 得到 $C = -\frac{T_0}{\mu \cdot g}$ 。最终悬链线方程为:

$$y = \frac{T_0}{\mu \cdot g} \cdot \left[\cosh \left(\frac{\mu \cdot g}{T_0} \cdot x \right) - 1 \right] \quad (7)$$

假设软管总长度为 L , 两端固定点水平间距为 $2a$, 下垂高度(中点下垂量)为 h 。

在 $x=a$ 处, 下垂高度为:

$$h = \frac{T_0}{\mu \cdot g} \cdot \left[\cosh \left(\frac{\mu \cdot g \cdot a}{T_0} \right) - 1 \right] \quad (8)$$

总软管长度满足:

$$L = \int_{-a}^a \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} dx = \frac{2T_0}{\mu \cdot g} \cdot \sinh \left(\frac{\mu \cdot g \cdot a}{T_0} \right) \quad (9)$$

联立 L 与 h 的方程, 消去 a , 得到水平张力 T_0 的隐式表达式:

$$T_o = \frac{\mu \cdot g \cdot L^2}{8h} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{4h^2}{3L^2}}} \quad (10)$$

在开展油管夹持作业的机械臂运动仿真分析过程中, 是否能够忽略油管的弯曲刚度而仅采用悬链线模型来开展相关研究, 通常需要借助无量纲刚度参数来进行准确判断[5] [6]。本算例中, 无量纲刚度数。

$$\beta = \frac{E \cdot I}{\mu \cdot g \cdot L^3} = \frac{300}{1.32 \times 9.81 \times 15^3} \approx 0.0069 < 0.01 \quad (11)$$

故认为在该特定工程应用场景下, 油管的弯曲刚度效应相对较小, 可予以忽略不计。

该模型能够精确计算软管在不同倾角下的几何形态与张力分布, 误差可控制在 $\pm 2.5\%$ 以内[7]。相较于传统刚体模型, 悬链线方程更贴合软管真实的柔性力学行为, 尤其适用于机械臂末端夹持的加油软管在重力、风载及运动惯性力耦合作用下的动态响应分析。

3. 仿真分析

在工业自动化领域, 机械臂结构强度与可靠性不仅直接决定了作业精度、负载能力等工作性能指标, 更深刻影响着设备的使用寿命与维护成本。在复杂工况下, 机械臂需承受多种载荷(如重力、惯性力、末端负载力及关节驱动力)的耦合作用, 杆件变形、关节磨损及应力集中等问题若得不到有效控制, 可能导致结构失效、精度下降甚至安全事故[8]。因此, 对机械臂进行精细化的力学分析与结构优化, 是提升其工程应用价值的关键环节。有限元仿真技术凭借其其对复杂结构的建模能力、对多物理场耦合的模拟优势, 以及对参数化设计的支持, 成为现代工程分析的核心工具。通过构建机械臂的三维有限元模型, 可在虚拟环境中精确施加边界条件与载荷, 模拟其静态、动态及疲劳工况下的力学响应, 从而高效评估结构的应力分布、变形特性及潜在失效风险。

3.1. 载荷分析

在本设计中, 拟采用 HJS-63A 型航空压力加油接头, 其设计符合 ISO 45:1980 标准, 通径 63 mm, 适用于飞机翼下压力加油系统, 净重(不含胶管接头总成)约为 3.6 kg。配套飞机加油软管的材料采用 ELAFLEX UTS 32 软管, 其设计符合 ISO 8913:2006 EN 标准。采用三层复合软管设计。内层材料使用超高分子聚乙烯(UPE), 符合 FDA 标准, 适用于化工、石油等介质; 增强层采用热塑性编织材料, 结合钢螺旋线提高抗拉强度; 外层材料采用三元乙丙橡胶(EPDM), 降低燃油传输中的静电风险。其整体线密度约为 1.32 kg/m。取软管最大中点下垂量 $h = 2.0$ m, 带入(10)计算得到水平张力大小约为:

$$T_o = \frac{\mu \cdot g \cdot L^2}{8h} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{4h^2}{3L^2}}} = \frac{1.32 \times 9.81 \times 15^2}{8 \times 2} \times \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{4 \times 2^2}{3 \times 15^2}}} = 179.978 N \quad (12)$$

在机械臂的张力计算与仿真分析中, 动态运动特性的引入是提升模型精度的关键。除静态工况下的重力与悬链线张力外, 机械臂在加速、减速或急停时产生的加速度会引发惯性力, 影响软管张力及机械臂的力学响应[9]。在(12)式的基础上引入惯性力放大张力:

$$T_{dynamic} = T_o \cdot \left(1 + \frac{a}{g}\right) = 179.978 \times \left(1 + \frac{1.0}{9.81}\right) = 198.324 N \quad (13)$$

此外, 软管由卷曲态转变为拉直态的过程中, 需克服因材料弹性而蓄积的弯曲势能, 该阻力与软管的初始形变量呈正相关关系。此处, 基于经验公式得到[10]。

$$F_{bend} = k_{bend} \cdot \Delta L + c \cdot v = 15 \times 0.3 + 0.15 \times 0.5 = 4.575 N \quad (14)$$

在力学分析中, 该力的方向垂直于形变方向, 且指向物体恢复初始状态的方向。在本算例所研究的弯曲情境下, 该力的方向为径向向外, 即垂直于弯曲平面。鉴于该力的数值相对较小, 在后续的仿真分析过程中, 为了简化模型并提高计算效率, 对其进行了忽略处理。

同时, 软管及接头的质量总和:

$$m_{total} = m_{hose} + m_{connection} = 1.32 kg / m \times 15 m + 3.6 = 23.4 kg \quad (15)$$

总垂直重力:

$$W_{total} = 23.4 kg \times 9.81 N / kg = 229.554 N \quad (16)$$

考虑典型工况: 软管两端分别刚性固定于机械爪钳口与卷管器的收放装置, 形成两端约束的静态支撑结构。其自重产生的重力载荷需由两端支撑结构(机械臂末端与卷管器)共同承担。根据静力学平衡原理, 每端所受重力载荷为总重力的一半。则约 115 N 的重力沿竖直方向(笛卡尔坐标系-Z 方°向)作用于机械臂末端, 形成额外的弯曲力矩, 在静态结构仿真中作为集中力载荷施加于末端节点。

3.2. 机械臂结构强度仿真

在航空加油装备领域, 翼下加油口高度普遍低于 4 米的工程约束, 决定了机械臂需通过多关节协同运动实现空间定位。其中, 第一臂节(基座至肩部关节)作为纵向高度抬升的核心驱动单元, 实现在竖直平面内俯仰运动(最大抬升高度包括第一节臂长度、机械臂底座高度和管线加油车底盘高度, 满足波音 737、空客 A320 等主流机型需求); 二三四节臂(肘部至末端夹爪)则沿水平方向完全展开(总伸展距离可达 9 米), 形成“竖直支撑 + 水平悬臂”的典型工作构型。该工况下, 机械臂承受复杂载荷耦合作用, 其受力形式包括机械臂工作部件处水平张力、加油接头和加油软管重力及机械臂自身重力, 是验证结构强度与刚度的关键场景。基于该工况, 展开机械臂结构强度仿真。

本设计采用 Ansys Workbench 2020 R1 作为仿真平台。规则杆件(如第一、二臂节矩形截面): 使用六面体扫掠网格(Sweep Mesh), 单元尺寸设定为 50 mm, 沿壁厚方向保证 3 层网格, 确保弯曲应力梯度的精确捕捉; 关节复杂区域(轴承座、铰接孔)处使用四面体网格(Tetrahedrons), 启用曲率自适应加密(Curvature Based Refinement), 避免应力集中处的网格畸变; 连接法兰与螺栓孔处采用柱坐标系下的扫掠网格, 确保接触分析时的载荷传递精度。

最终生成包含 130,031 个节点、68,379 个单元的有限元模型, 网格质量指标(Equisize Skew < 0.8, Jacobian Ratio > 0.6)满足工程分析要求。

约束条件上模拟机械臂的实际安装状态, 在底座法兰底面施加全自由度固定约束(Fixed Support), 限制三向平动与转动, 通过节点耦合确保底座螺栓孔区域的刚性连接, 避免局部刚体位移。

机械臂结构主体采用 7075-T6 铝合金, 该材料屈服强度 $\sigma_{0.2} = 505 \text{ Mpa}$, 抗拉强度 $\sigma_u = 570 \text{ Mpa}$, 泊松比 $\nu = 0.33$ 。仿真结果如图 3 所示。

基于冯·米塞斯(von-Mises)等效应力准则开展静态结构应力分析[11], 结果表明: 机械臂杆件主体区域的等效应力分布处于较低水平(120~200 MPa), 远低于材料屈服极限, 表明其在轴向载荷与弯曲载荷耦合作用下仍处于线弹性变形阶段。关节连接区域与杆件端部连接界面呈现显著的应力梯度特征, 应力值攀升至 250~320 MPa, 表明上述区域为结构受力的关键敏感部位。具体而言, 肘部关节铰接点附近形成局部应力集中区域(峰值 320 MPa), 该现象归因于多杆件交汇导致的复杂载荷工况——此处同时承受关节驱动力矩引发的弯曲应力、相邻杆件传递的轴向拉应力及接触界面的剪切应力, 三维应力状态致使等效应力显著叠加。通过应力云图可视化分析, 发现应力分布呈现明显的非均匀性, 铰接孔边缘的应力值较

远端区域高出 40%，符合圣维南原理的应力衰减规律[12]。液压缸连接区域的应力集中现象尤为突出，在杆件与关节的装配接口过渡处，等效应力达到 280 MPa。该区域的几何不连续性与载荷传递路径的阶跃变化，导致局部出现应力放大效应。

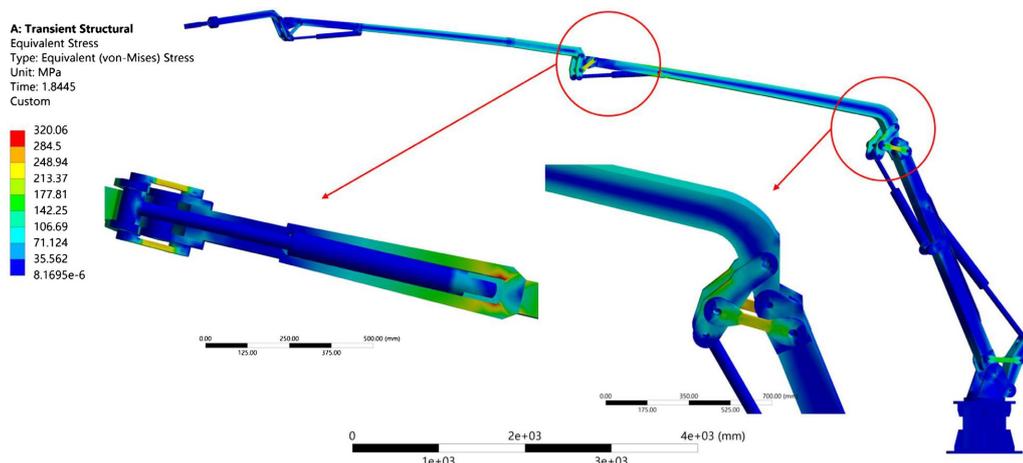


Figure 3. von Mises stress contour

图 3. 冯·米塞斯应力云图

材料力学性能参数表明，7075-T6 铝合金的 0.2%屈服强度为 505 MPa，本次仿真提取的全域最大等效应力为 320 MPa，对应安全系数 $n = \frac{\sigma_{0.2}}{\sigma_{VM,max}} = 1.58$ ，满足机械臂结构设计规范中 1.5 以上安全系数的要求，表明当前工况下结构整体处于安全可靠状态。

3.3. 机械臂底座固定性能仿真分析

在大型机械臂的工程设计中，底座螺栓连接的可靠性直接决定其抗倾覆能力与运行稳定性。针对四足螺栓固定结构(每组 3 + 1 颗 M30 规格 10.9 级螺栓)，采用 Ansys Workbench 开展静态滑移特性仿真，螺栓预紧力设为 230 kN，以验证螺栓对底座的有效固定能力。

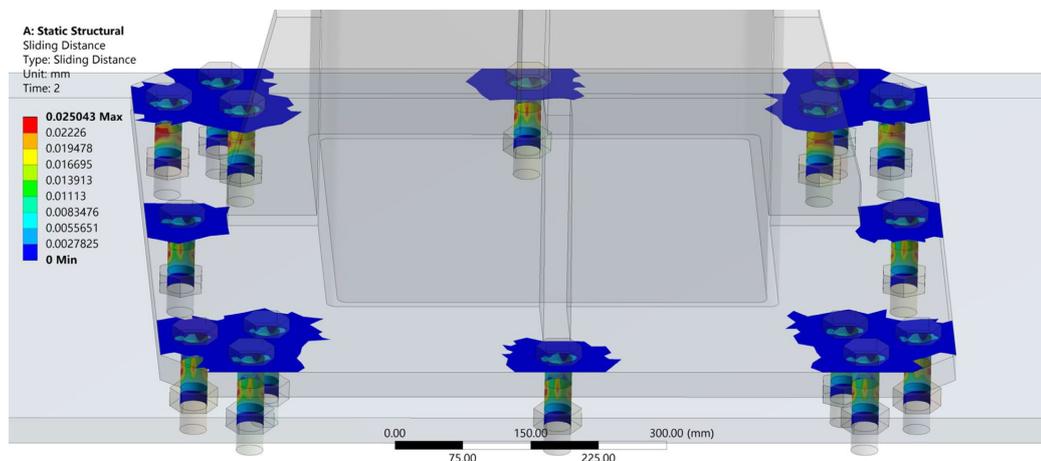


Figure 4. Bolt slip distance contour

图 4. 螺栓滑移距离云图

仿真结果显示, 图 4 呈现梯度分布, 最大滑移量为 0.025043 mm (位于主承载螺栓组边缘螺栓), 低于 0.1 mm 的工程允许阈值。接触界面摩擦阻力($\mu = 0.15$)与预紧力协同作用, 计算得到抗滑移安全系数 $n_s = 1.82$, 满足 GB/T 11365-2005 中安全系数 ≥ 1.5 的要求, 表明螺栓组可有效抑制底座相对滑移。

对螺栓力学性能开展分析可得, 10.9 级 M30 螺栓屈服强度 690 MPa, 仿真提取轴向应力峰值 420 MPa (由预紧力与倾覆力矩附加拉力叠加), 强度安全系数 $n_\sigma = 1.64$, 确保螺栓处于弹性变形阶段。

4. 机械臂运动学建模与可达工作空间分析

机械臂的工作空间是其能够到达的所有位姿的集合, 直接决定了机器人的作业范围与应用场景。本章基于 D-H (Denavit-Hartenberg) 参数法[13]建立机械臂运动学模型, 通过数值计算与蒙特卡洛方法生成可达空间点云图, 分析其几何特性与边界条件, 直观呈现工作空间的几何形态、边界特征及可达性分布, 克服了解析法在高维空间中的描述局限, 为工程设计提供直观的空间约束。为机械臂的任务规划与结构优化提供理论依据。

4.1. 运动学建模

本章的运动学建模基于 D-H 参数法建立机械臂的位姿变换模型, 其核心思想是为每个关节定义四个参数(θ, d, a, α), 分别描述关节转角、连杆偏移、连杆长度和连杆扭角, 从而构建相邻关节间的齐次变换矩阵。通过 MATLAB Robotics Toolbox 实现正运动学求解。各关节的参数如表 2 所示(单位: m, 角度: 度)。

Table 2. Denavit-Hartenberg parameters table

表 2. D-H 参数表

关节	关节角 θ	连杆偏移 d	连杆长度 a	连杆扭角 α
1	θ_1	0	0	90
2	θ_2	0	3.0	0
3	θ_3	0	4.2	0
4	θ_4	0	4.18	0
5	θ_5	0	0.9	-90
6	θ_6	0.4	0	0

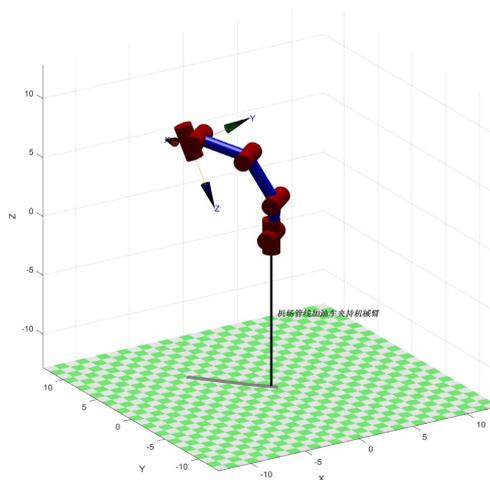


Figure 5. Denavit-Hartenberg coordinate system
图 5. D-H 坐标系统

4.2. 可达工作空间分析

基于 D-H 参数法该机械臂, 采用蒙特卡洛方法生成 50,000 组关节角度, 得到如图 6 所示的三维工作空间点云图。图中坐标系 X、Y、Z 轴单位为米, 点云颜色梯度表示末端执行器距原点的距离(蓝色为近距, 红色为远距), 直观反映机械臂于不同位置的可达姿态组合多寡情况。

点云分布呈对称球形, 由六轴旋转关节的对称性决定。各关节的旋转能力(实际受限于机械结构, 三四五节臂取 $3^\circ \sim 175^\circ$)使工作空间在 X、Y、Z 轴上均匀扩展, 形成类球形覆盖。最大距离(红色区域)约 10 米, 对应机械臂完全伸展(各关节协同旋转至极限角度); 最小距离(蓝色区域)接近原点, 为机械臂收拢状态。

中心区域(蓝绿色, 距离原点 ≤ 5 米)点云密集, 表明该区域运动冗余度高, 关节可通过多种组合到达, 便于轨迹规划与避障; 边缘区域(红黄色, 距离原点 ≥ 8 米)点云稀疏, 对应关节极限位置(如多关节同时伸展至最大角度), 此时逆运动学解的唯一性降低, 后续控制算法设计时优先确定运动路径以避免运动卡顿。六轴旋转关节的耦合运动使工作空间在中远距离(6~10 米)形成过渡区域(黄绿色), 该区域的点云密度适中, 反映了机械臂在复杂姿态下的运动能力, 其中 θ_4 (第三节臂)与 θ_5 (第四节臂)的组合对工作空间的对称性贡献最大, 而 θ_1 (基座旋转)主要影响水平方向的覆盖范围。

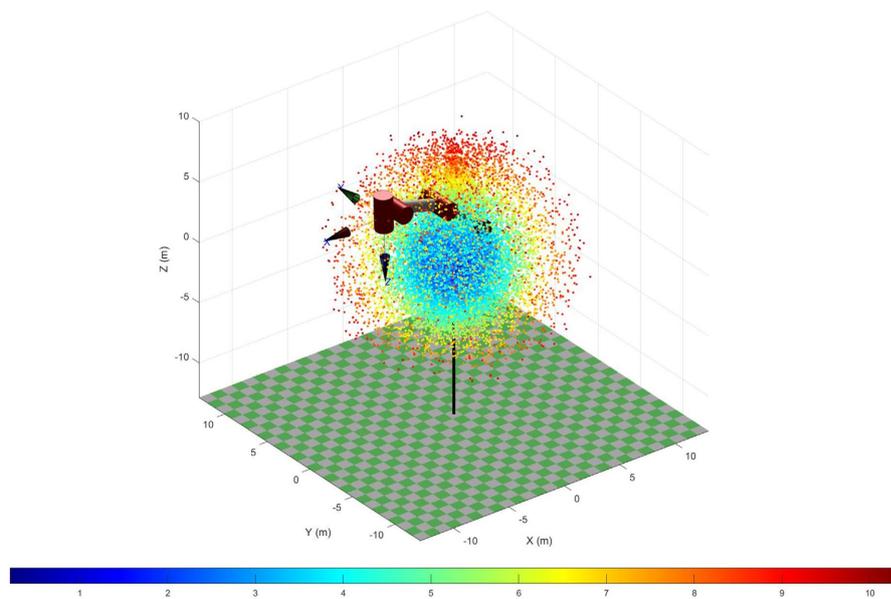


Figure 6. Monte Carlo point cloud plot
图 6. 蒙特卡洛点云图

4.3. 运动空间盲区分析

在此基础上, 建立基座二维平面可达性量化评估模型。通过在基座坐标系(范围: $\pm 4 \text{ m} \times \pm 4 \text{ m}$)内构建高分辨率网格(精度: 5 cm), 统计末端执行器在网格单元内的可达位置点数, 定义可达性指数(Accessibility Index, AI)为连续标量函数:

$$AI(x, y) \in [0, 1], \text{ 其中 } \begin{cases} AI = 0 (\text{不可达}) \\ AI = 1 (\text{高可达}) \end{cases} \quad (17)$$

基于此模型, 可识别基座邻近区域的空间约束特征, 为卷管器等辅助设备的布局优化提供理论依据。

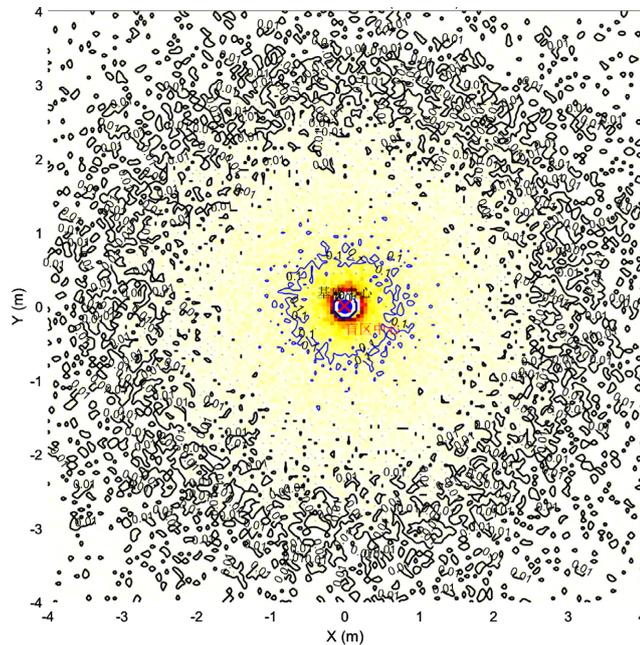


Figure 7. Base plane blind spot diagram
图 7. 基座平面盲区示意图

由图 7 分析得到该机械臂结构的可达性分布特征:

核心盲区为以基座为中心、半径 $r \leq 0.7\text{m}$ 的圆形区域, AI 均值低于 0.01 (图 8 深红色区域), 表明该区域存在显著运动学奇异性[14], 末端执行器无法覆盖。

过渡带位于 $0.7\text{m} < r \leq 2\text{m}$ 的环形区域, AI 呈非均匀渐进提升 (均值 $\text{AI} \approx 0.15 \sim 0.45$), 但受机械臂构型限制仍处于低可达性状态(图 8 黄 - 橙色渐变)。

当 $r > 2\text{m}$ 时, AI 梯度显著增大, 处于高可达区域, 高值区 ($\text{AI} > 0.8$) 呈放射状分布(图 8 淡黄 - 无色)。由此, 工程应用方面, 卷管器等设备应避免 $r \leq 2\text{m}$ 的低可达性环形带, 以避免工作空间盲区。

5. 总结

本文相关设计的可折叠机械臂结构可实现最大 12 m 工作半径, 典型工况下承受约 230N 加油接头及软管负载。融合悬链线模型与 D-H 坐标法, 建立运动工作空间模型, 提出面向柔性负载的机械臂动力学联合仿真框架, 为同类设备研发提供理论参考。

参考文献

- [1] Mangold, J., Silberhorn, D., Moebs, N., Dzikus, N., Hoelzen, J., Zill, T., *et al.* (2022) Refueling of LH2 Aircraft—Assessment of Turnaround Procedures and Aircraft Design Implication. *Energies*, **15**, Article No. 2475. <https://doi.org/10.3390/en15072475>
- [2] 俞斌. 新能源飞机管线加油车底盘设计项目[J]. 内燃机与配件, 2024(7): 122-124.
- [3] 张建华, 刘延超, 黄志平, 等. 基于关节双位置反馈的柔性协作机械臂零力控制[J]. 计算机集成制造系统, 2024, 30(5): 1798-1809.
- [4] 胡灵斌, 唐军. 悬链线方程的求解及其应用[J]. 船舶, 2004(1): 17-20.
- [5] 杨新航, 肖奉英, 肖先志, 等. 考虑弯曲非线性效应的修正悬链线方程及其对悬链线垂弧的影响[J]. 南昌大学学报(理科版), 2024, 48(6): 511-520.
- [6] Wang, Z., Wang, Y. and Zhang, B. (2023) Development and Experiment of Clamp Type Submarine Cable Inspection

-
- Robot. *Machines*, **11**, Article No. 627. <https://doi.org/10.3390/machines11060627>
- [7] 刘志杰, 宋丛丛, 梁金源, 等. 空中加油机加油软管系统建模和控制研究进展[J]. 工程科学学报, 2021, 43(1): 150-160.
- [8] Zhang, L., Meng, X., Ding, Z. and Han, H. (2023) Simulation-Based Reliability Design Optimization Method for Industrial Robot Structural Design. *Applied Sciences*, **13**, Article No. 3776. <https://doi.org/10.3390/app13063776>
- [9] Arakelian, V. (2017) Inertia Forces and Moments Balancing in Robot Manipulators: A Review. *Advanced Robotics*, **31**, 717-726. <https://doi.org/10.1080/01691864.2017.1348984>
- [10] 钟韡, 张世富, 胡永攀, 等. 水域危化品输送管线波流作用研究现状分析[J]. 当代化工, 2020, 49(7): 1541-1547.
- [11] 庄妍, 王康宇. 基于 Von-Mises 屈服准则的结构安定性研究[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(S1): 170-174+191.
- [12] 宋少云, 尹芳. 有限元网格划分中的圣维南原理及其应用[J]. 机械设计与制造, 2012(8): 63-65.
- [13] 张旭, 郑泽龙, 齐勇. 6 自由度串联机器人 D-H 模型参数辨识及标定[J]. 机器人, 2016, 38(3): 360-370.
- [14] 赵智远, 杨晓航, 徐梓淳, 等. 新型 SSRMS 构型可重构空间机械臂的运动学奇异性分析[J]. 机械工程学报, 2024, 60(5): 19-35.