

DOI:10.16356/j.1005-2615.2025.03.005

空间桁架自主装配轨迹规划与控制策略

孟凡奇^{1,2}, 陈 萌^{1,2}, 马晓龙^{1,2}, 高金忠^{1,2}, 高 洋^{1,2}

(1. 宇航空间机构全国重点实验室, 上海 201108; 2. 上海宇航系统工程研究所, 上海 201108)

摘要: 针对空间中大型桁架的在轨组装需求, 设计了一套空间桁架在轨装配系统, 包括装配机器人、基于构件级模块单元的桁架系统。考虑整个装配过程的安全性及有序性, 构建了基于邻接矩阵的桁架杆件装配流程数学表达, 用于规划立方体桁架单元各杆件的装配序列。同时, 提出了面向任意装配位置的弧形轨迹规划方法, 保证杆件装配全流程的平滑性以及对接阶段的正对齐。最后, 利用一种根据接触力动态调整参数的自适应柔顺控制算法, 确保桁架杆接触装配的安全性与柔顺性。基于本文搭建的空间桁架在轨装配系统仿真软件 ADAMS 与 Simulink 联合仿真模型, 表明本文所提出的自主装配轨迹规划与控制策略能够实现空间桁架的自主平滑柔顺装配, 且装配过程中的接触力小于 10 N。

关键词: 在轨装配; 空间桁架; 机械臂; 轨迹规划; 自适应柔顺控制

中图分类号: TP242

文献标志码: A

文章编号: 1005-2615(2025)03-0441-10

Autonomous Assembly Trajectory Planning and Control Strategy for Space Trusses

MENG Fanqi^{1,2}, CHEN Meng^{1,2}, MA Xiaolong^{1,2}, GAO Jinzhong^{1,2}, GAO Yang^{1,2}

(1. National Key Laboratory of Aerospace Mechanism, Shanghai 201108, China; 2. Aerospace System Engineering Shanghai, Shanghai 201108, China)

Abstract: Aiming at the on-orbit assembly of large-scale trusses in space, an on-orbit assembly system for space trusses is designed, including an assembly robot and a truss system based on component-level modular units. Considering the safety and orderliness of the whole assembly process, a mathematical expression of the truss rod assembly process based on the adjacency matrix is constructed, which is used to plan the assembly sequence of each rod of the cubic truss unit. At the same time, an arc trajectory planning method for arbitrary assembly positions is proposed to ensure the smoothness of the whole process of rod assembly and the positive alignment in the docking stage. Finally, an adaptive smoothing control algorithm that dynamically adjusts the parameters according to the contact force is utilized to ensure the safety and smoothness of the truss rod contact assembly. Based on the joint simulation model of ADAMS and Simulink for space truss on-orbit assembly system constructed in this paper, it is shown that the autonomous assembly trajectory planning and control strategy proposed in this paper can realize the autonomous smooth and compliant assembly of space truss, and the contact force in the assembly process is less than 10 N.

Key words: on-orbit assembly; space truss; robotic arm; trajectory planning; adaptive compliance control

基金项目: 上海市优秀学术带头人项目(23XD1403800); 上海市“科技创新行动计划”启明星项目(扬帆专项)(23YF1411200); 国家自然科学基金联合基金(U21B6002)。

收稿日期: 2025-03-01; **修订日期:** 2025-04-25

通信作者: 陈萌, 男, 研究员, E-mail: workmailcm@126.com。

引用格式: 孟凡奇, 陈萌, 马晓龙, 等. 空间桁架自主装配轨迹规划与控制策略[J]. 南京航空航天大学学报(自然科学版), 2025, 57(3): 441-450. MENG Fanqi, CHEN Meng, MA Xiaolong, et al. Autonomous assembly trajectory planning and control strategy for space trusses[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics(Natural Science Edition), 2025, 57(3): 441-450.

目前,空间结构呈现大型化发展趋势,例如大型空间网状天线^[1]、大面积空间太阳能电池阵^[2]、大口径空间光学望远镜^[3]、大型深空探测机构^[4]等。通过大面积、大跨度的空间桁架结构实现上述大型空间设施在轨组装是一种重要手段^[5]。空间桁架单元为桁架系统的单元级组成模块,包括立方体单元、正三棱柱单元等多种构型,其中立方体桁架单元因其结构简单、易于装配的特性得到了广泛的研究^[6-8]。

由于火箭整流罩设计复杂度以及运载能力的限制,空间大型平台难以一次性完成建造并送入轨道^[9],因此,在轨装配成为构建大型桁架系统的有效解决方案。

在轨装配主要分为 3 类:航天员手动装配^[10-12]、在轨遥操作装配^[13-15]和在轨自主装配^[16-18]。最初的在轨装配需要宇航员通过危险的出舱活动在失重情况下执行。由于宇航员独立进行空间装配作业负担过重,目前绝大多数的大型空间桁架结构的在轨装配任务主要通过宇航员在机械臂的辅助下进行舱外作业完成^[19]。即使在机械臂的协助下,当前的装配任务仍面临着航天员出舱活动风险大、劳动强度大且空间作业任务日趋复杂化的问题,理想情况下是机械臂可以独立自主地完成装配作业,但这对机械臂自主装配的精细操控提出了极强的需求。

轨迹规划与控制策略是自主装配任务中的两个关键技术。机械臂轨迹规划是指通过特定算法规划机械臂末端工具从起始点出发经过若干预设点最终到达目标点的路径,对保障在轨装配安全高效意义重大。离线轨迹规划是空间机械臂常采用的一种轨迹规划方式,包括基于优化的轨迹规划和基于采样的轨迹规划。基于优化的轨迹规划算法有明显的收敛速度优势,但可能陷入局部最优解。基于采样的规划算法可以保证轨迹的最优性,但收敛速度相对比较缓慢^[20]。

常见的基于优化的轨迹规划算法有梯度投影法^[21]、随机轨迹优化运动规划(Stochastic trajectory optimization for motion planning, STOMP)^[22]等。Liu 等^[23]提出一种改进的梯度投影算法,通过在可能碰撞点附近为机械臂施加偏向速度保证避障的成功率。刘聪等^[24]将启发信息引入了 STOMP 算法,很大程度上提高了原算法的规划效率,能够实现无碰平滑的关节轨迹规划。快速扩展随机树(Rapidly-exploring random trees, RRT)算法是一种典型的基于采样的轨迹规划算法。Ji 等^[25]提出了一种椭圆形快速探索随机树方法,用椭圆形替换线段来连接相邻节点,便于为具有角度限制的

机械臂进行路径规划,相较其他算法信息引导速度更优,适用于狭窄环境。Xiao 等^[26]提出了一种双向快速探索随机树算法,采用了启发式节点扩展,包括选择性扩展策略和垂直探索策略,可以在更短的时间内生成可行路径。此外,经典的基于采样的轨迹规划算法还包括遗传算法^[27]、粒子群算法^[28]等。以上的算法为轨迹规划的研究工作提供了很多宝贵的经验,然而太空视觉定位受光线、噪音等因素限制,且桁架装配对接位姿要求严苛,因此上述算法难以保证装配轨迹的准确性。

在轨装配时,机械臂末端执行器的作业属具与作业对象多为刚性接触,如果机械臂控制不具备一定的柔顺性,将会对零件作业对象产生较大的振动冲击,甚至有可能损坏作业对象甚至是作业属具本身,严重影响机械臂的作业能力。所以,机械臂的主动柔顺控制是保证整个装配过程安全稳定进行的关键环节。

相较于传统柔顺控制,如阻抗控制、导纳控制等,自适应柔顺控制具有较强的适应性,可以根据力/位反馈不断调整操作策略,使得机械臂在装配、抓取等复杂任务中及时精确应对未知变化,对于人力难以干预的太空环境中的装配工作具有重要的应用价值。Li 等^[29]提出一种带有自适应控制器的可变导纳控制策略,该策略可以在机械臂末端执行器与人或环境交互时产生时变刚度,较为有效地解决了非接触到接触的过渡阶段状况复杂的问题。Tong 等^[30]通过采用具有 Lyapunov 自适应律的模糊系统,设计了一种无模型模糊自适应动态表面控制器,机械臂控制系统具有更快的响应速度和更小的稳态误差,解决了由于模型不确定性和环境复杂性造成的控制器跟踪性能明显下降的问题。Jiang 等^[31]设计了一种阻抗学习的方法,用于迭代更新末端执行器的刚度和阻尼参数,以达到任务所需的性能,并通过自适应干扰观测器,使末端执行器控制性能在抗击外部干扰能力方面大大提高。Lin 等^[32]提出了一种新的冗余机械臂的统一任务空间控制方法,该方法能够在任务执行中灵活切换控制目标,并能适应性地响应未知的接触。陈书清等^[33]提出了一种柔顺控制方法,通过装配过程中的接触力和状态信息,根据不同环境刚度自适应地调整柔顺控制的目标位置和控制参数。该方法收敛速度更快,残余接触力更小,为航天器部件的机器人自主装配奠定了理论和技术的基礎。

本文面向空间桁架结构的机器人自主装配任务,设计了一套空间桁架在轨装配系统,并以此为基础提出了一种空间桁架自主装配轨迹规划与控制策略。在该装配策略中,首先提出一套桁架杆件

装配流程,便于机械臂更安全高效地完成整体装配任务。其次设计一种弧形轨迹以保证机械臂移动过程的连续性以及对接阶段的正向对齐。最后提出一种针对桁架杆件装配的自适应柔顺控制算法,通过参数自适应保证整个装配过程既能快速响应接触力变化,又能保持稳定柔顺的运动特性,并适应各种复杂工况。此外,通过大量仿真实验验证了所提策略的可行性与有效性。

1 空间桁架在轨装配系统设计

由于可拓展空间直立桁架包装紧凑、装配灵活、通用性好等特点,其已成为目前主流的在轨装配方案之一。在先前研究的基础上^[34],本文通过装配构件级模块单元形成单个立方体桁架单元,并在推送机构辅助下拓展桁架单元形成整套大型桁架系统。其中,构件级模块单元包括桁架杆与球节点,桁架杆由杆件和公接头构成,球节点由球点和母接头构成。一旦公母接头配合紧固,则表明该杆件装配完成。图1展示了构件级模块单元与其组成零件,及装配完全的单个立方体桁架单元。该单元构成的大型桁架系统可在大型空间站、空间大型天线和大型太阳能电池阵等大型空间基础设施的构建中起到主支撑结构的作用。

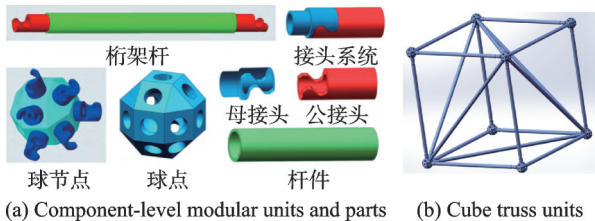


图1 空间桁架系统各级组成

Fig.1 Space truss system components at all levels

机械臂系统(图2)是可扩展桁架结构在轨装配的操作设备,是用于实现模块化、标准化的桁架

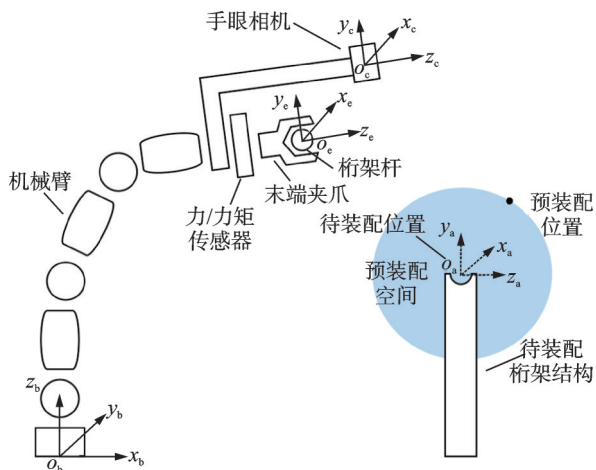


图2 机械臂系统示意图

Fig.2 Schematic diagram of robotic arm system

组装,主要包括:六自由度机械臂1套、力/力矩传感器1个、夹持工具1套、深度相机1台、支撑底座1台。

根据上述系统组成,在确定装配顺序后,使用手眼相机对待装配桁架杆几何中心需安装的位置进行预定位,利用多项式插值方法规划装配轨迹,而后机械臂抓取桁架杆向目标位置移动,桁架杆几何中心进入预装配空间时将产生一个预装配位置,此时手眼相机对待装配位置再定位以确保装配的高精度,规划柔顺弧形轨迹保证最后对接方向与正对齐方向($-y_a$)一致,并使用自适应柔顺控制算法完成柔性对接,机械臂回到原位置,此时单根杆件装配完成,而后判断是否仍有待装配杆件,若有则按序重新执行上述操作,直至装配完成。给出完整的装配流程图如图3所示。

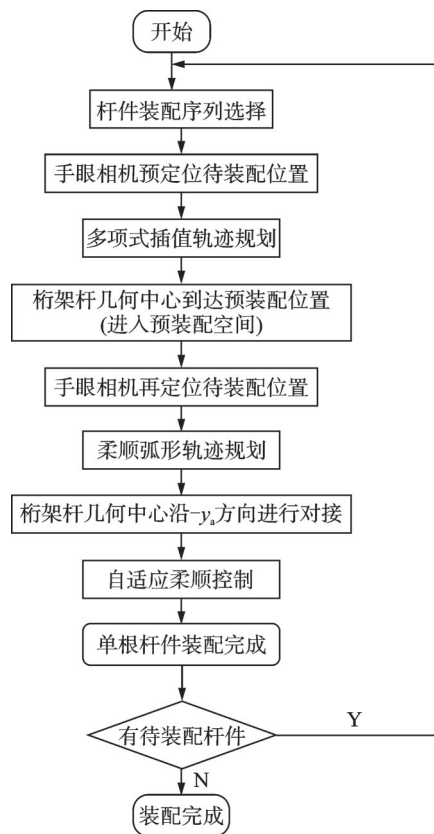


图3 整体装配流程图

Fig.3 Overall assembly flow chart

2 机械臂自主柔顺装配策略

本文首先对桁架杆件装配流程进行数学描述,随后进行弧形轨迹规划及自适应柔顺控制算法设计,满足装配过程的柔顺性与平滑性以及机械臂对末端反馈力的快响应速度,从而保证机械臂自主装配技术的泛化性。

2.1 基于邻接矩阵描述的桁架杆件装配流程

为保证整个装配过程的安全性有序性,显然

按照从后至前,从下至上的装配策略是较为合理的。图4展示了立方体桁架单元的结构示意图,该单元共有8个球节点、12根桁架短杆、6根桁架长杆。图4中的数字代表球节点与桁架杆的装配顺序。

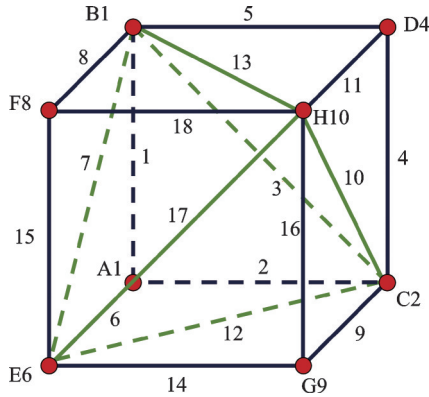


图4 立方体桁架单元结构示意图

Fig.4 Schematic diagram of cubic truss unit structure

使用邻接矩阵描述该立方体的装配过程,式(1)中从 S_0 到 S_{18} 表示从开始装配到装配完成的整个过程变化的状态矩阵。其中:若元素 $s_{i,j}$ 为1表示该构件已完成装配; $s_{i,j}$ 为0表示未完成装配,且对角线元素表示球节点的装配状态,其他位置元素表示 i,j 球节点间的桁架杆的装配状态。

$$S_0 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$S_1 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$S_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$S_3 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\vdots$$

$$S_{17} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$S_{18} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

给定装配序列矩阵 O ,其元素 $o_{i,j}$ 用于描述对应构件的装配次序, $o_{i,j}$ 的求解过程如式(2)所示。

$$o_{i,j} = \begin{cases} n+1 - \sum_{k=0}^n s_{i,j}^k & \sum_{k=0}^n s_{i,j}^k \neq 0 \\ 0 & \sum_{k=0}^n s_{i,j}^k = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: n 表示需装配桁架杆件个数, $s_{i,j}^k$ 表示状态矩阵 S_k 的第 (i,j) 号元素。若 $o_{i,j}=0$,则表明该位置没有桁架杆件或尚未装配桁架杆件。按照以上方法,给出图4中桁架单元的装配序列矩阵 O_{cube} 如下

$$O_{\text{cube}} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 2 & 0 & 6 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 3 & 5 & 7 & 8 & 0 & 13 \\ 2 & 3 & 2 & 4 & 12 & 0 & 9 & 10 \\ 0 & 5 & 4 & 4 & 0 & 0 & 0 & 11 \\ 6 & 7 & 12 & 0 & 6 & 15 & 14 & 17 \\ 0 & 8 & 0 & 0 & 15 & 8 & 0 & 18 \\ 0 & 0 & 9 & 0 & 14 & 0 & 9 & 16 \\ 0 & 13 & 10 & 11 & 17 & 18 & 16 & 10 \end{bmatrix} \quad (3)$$

2.2 柔顺弧形装配轨迹设计

在得到装配序列后则需要进一步考虑单根桁架杆件的装配方法。设单个桁架单元的几何中心为 $[m_1, m_2, m_3]$,桁架边长为 $2h$,则可以构建出短杆待装配位置 $M_s[m_1 \pm h, m_2 \pm h, m_3]$,长杆待装配位置 $M_l[m_1 \pm h, m_2, m_3]$,共有18个待装配位置。

为保证矩阵变化的便捷性,待装配姿态始终保证待装配坐标系中 x 轴沿桁架杆轴向方向, y 轴为对齐下压方向的负方向, z 轴通过右手定则得到。

利用多项式插值得到的直线轨迹往往路径更短、速度更快,但依靠单次视觉定位得到的目标位置往往并不精确,且在单根桁架杆件的装配过程中,考虑到公母接头的不规则性与强耦合性,实际在轨装配任务要求以正对齐的方式完成接头的接触对接。此外,若以多段折线方式规划轨迹,机械臂将进行多段加减速,不利于轨迹的平滑性。因此本文先进行视觉预定位,令机械臂抓取桁架杆向待装配位置方向移动,采用五次多项式插值规划一条直线轨迹,在桁架几何中心进入预装配空间中生成一个预装配位置。此时实际路径会与期望路径产生偏差,进行视觉再定位。以预装配位置为起点,设计了一条柔顺弧形轨迹,以保证装配过程的平稳与安全。图5展示了装配过程的简略示意图。其中, A 、 B 两点分别为空间中杆件的预装配点和杆件中心点期望到达的装配点。 $\mathbf{n}_x$ 沿 x 轴正方向,表示桁架杆轴向方向; $\mathbf{n}_y$ 沿 y 轴负方向,表示装配过程的对接下压方向,也是期望的接头对接方向。在此基础上进行柔顺装配轨迹设计。

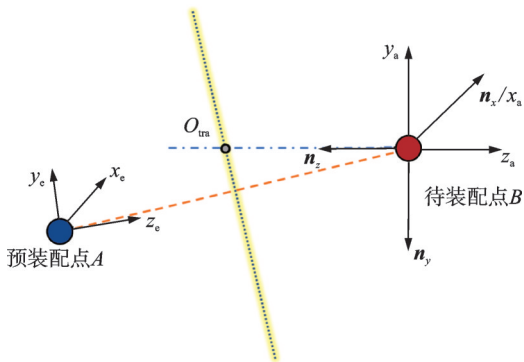


图5 装配过程简略示意图

Fig.5 Abbreviated diagram of assembly process

为计算出该圆弧轨迹,需要先确定该圆弧所在的球面。由上述装配需求可知,该球面相切于 $\mathbf{n}_x$ 、 $\mathbf{n}_y$ 平面且经过 A 、 B 两点,根据几何关系可以发现, A 、 B 两点的中垂面 M 与法线 $\mathbf{n}_z(a, b, c)$ 的交点即为球心,这里记作 $M \cap \mathbf{n}_z = O_{tra}$ 。设中垂面任意一点 P 的坐标为 (x, y, z) ,点 A 的坐标为 (x_A, y_A, z_A) ,点 B 的坐标为 (x_B, y_B, z_B) 。由于中垂面上任意一点到两端距离相等,所以有

$$\|L_{PA}\| = \|L_{PB}\| \quad (4)$$

即

$$\sqrt{(x-x_A)^2 + (y-y_A)^2 + (z-z_A)^2} = \sqrt{(x-x_B)^2 + (y-y_B)^2 + (z-z_B)^2} \quad (5)$$

将式(5)展开整理可得中垂面方程为

$$(x_B - x_A)x + (y_B - y_A)y + (z_B - z_A)z + \frac{1}{2}(x_A^2 - x_B^2 + y_A^2 - y_B^2 + z_A^2 - z_B^2) = 0 \quad (6)$$

给出过点 B 且方向向量为 (x_0, y_0, z_0) 的直线参数方程为

$$\begin{cases} x = x_B + at \\ y = y_B + bt \\ z = z_B + ct \end{cases} \quad (7)$$

将式(7)代入式(6),经过整理可得球心 O_{tra} 坐标为

$$O_{tra} = \left[x_B - \frac{a \cdot C}{D}, y_B - \frac{b \cdot C}{D}, z_B - \frac{c \cdot C}{D} \right] \quad (8)$$

式中

$$\begin{cases} C = \frac{1}{2} [(x_B - x_A)^2 + (y_B - y_A)^2 + (z_B - z_A)^2] \\ D = (x_B - x_A)a + (y_B - y_A)b + (z_B - z_A)c \end{cases} \quad (9)$$

所以,该球面为以 O_{tra} 为球心、 $\|L_{O_{tra}A}\|$ 为半径。

为保证公式的简洁性,令

$$\begin{cases} x_0 = x_B - \frac{a \cdot C}{D} \\ y_0 = y_B - \frac{b \cdot C}{D} \\ z_0 = z_B - \frac{c \cdot C}{D} \\ r = \sqrt{(x_0 - x_A)^2 + (y_0 - y_A)^2 + (z_0 - z_A)^2} \end{cases} \quad (10)$$

式中: (x_0, y_0, z_0) 为球心坐标, r 为球心半径。则球面 Ω_{sphere} 方程为

$$(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2 = r^2 \quad (11)$$

同时,给出过 A 、 B 、 O_{tra} 这3点的平面 Ω_{plate} 的方程

$$\mathbf{n} \cdot L_{OQ} = 0 \quad (12)$$

式中: Q 为平面 Ω_{plate} 上任意一点, $\mathbf{n}$ 为平面 Ω_{plate} 的法向量,表示 $\mathbf{n} = L_{OA} \times L_{OB} = (n_1, n_2, n_3)$,则平面 Ω_{plate} 方程为

$$n_1(x-x_0) + n_2(y-y_0) + n_3(z-z_0) = 0 \quad (13)$$

球面与平面相交形成圆轨迹,考虑到轨迹以 A 点为起点、 B 点为终点,需要限制角度范围保证轨迹为一段圆弧。令

$$\begin{cases} \mathbf{u} = \frac{\mathbf{L}_{OA}}{r} = [u_x, u_y, u_z] \\ \mathbf{v} = \mathbf{n} \times \mathbf{u} = [v_x, v_y, v_z] \\ p = \mathbf{n}_y \cdot \mathbf{u} \\ \varphi = \arccos\left(\frac{\mathbf{L}_{OA} \cdot \mathbf{L}_{OB}}{r^2}\right) \end{cases} \quad (14)$$

式中: p 为判断参数, 当 $p > 0$ 时表示轨迹为优弧, 当 $p < 0$ 时表示轨迹为劣弧; φ 为 $\overrightarrow{OA}$ 、 $\overrightarrow{OB}$ 的夹角。

则给出弧形轨迹的参数方程形式

$$\begin{cases} x(\theta) = x_0 + r \cdot (u_x \cos \theta + v_x \sin \theta) \\ y(\theta) = y_0 + r \cdot (u_y \cos \theta + v_y \sin \theta) \\ z(\theta) = z_0 + r \cdot (u_z \cos \theta + v_z \sin \theta) \\ \theta \in [0, \varphi], p < 0 \\ x(\theta) = x_0 + r \cdot (u_x \cos \theta - v_x \sin \theta) \\ y(\theta) = y_0 + r \cdot (u_y \cos \theta - v_y \sin \theta) \\ z(\theta) = z_0 + r \cdot (u_z \cos \theta - v_z \sin \theta) \\ \theta \in [0, 2\pi - \varphi], p > 0 \end{cases} \quad (15)$$

所给出的弧形轨迹如图 6 所示。

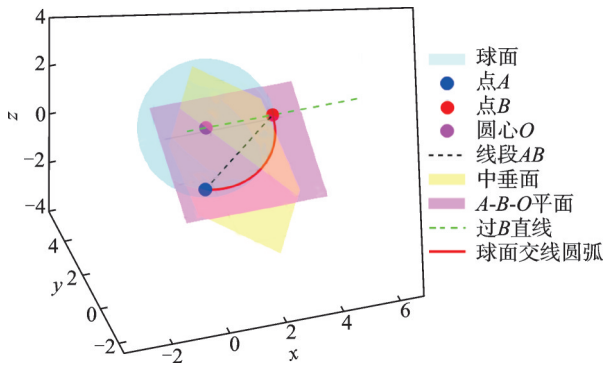


图 6 弧形轨迹示意图

Fig.6 Schematic diagram of compliant trajectory

至此, 完成了装配位置的弧形轨迹规划, 还需进行装配姿态的弧形轨迹规划。根据抓取位置坐标系、待装配位置坐标系与基坐标系, 分别计算出抓取位置坐标系相对于基坐标系的 ZYX 欧拉角 $\omega_1 = [\alpha_1, \beta_1, \gamma_1]$ 与待装配位置坐标系相对于基坐标系的 ZYX 欧拉角 $\omega_2 = [\alpha_2, \beta_2, \gamma_2]$ 。在 t_f 时长内采用五次多项式插值方法以实现平滑的姿态变换, 定义为

$$\omega(t) = \mathbf{a}_0 + \mathbf{a}_1 t + \mathbf{a}_2 t^2 + \mathbf{a}_3 t^3 + \mathbf{a}_4 t^4 + \mathbf{a}_5 t^5 \quad (16)$$

式中

$$\begin{cases} \mathbf{a}_0 = \omega_1 \\ \mathbf{a}_1 = 0 \\ \mathbf{a}_2 = 0 \\ \mathbf{a}_3 = \frac{10 \times (\omega_2 - \omega_1)}{t_f^3} \\ \mathbf{a}_4 = \frac{-15 \times (\omega_2 - \omega_1)}{t_f^4} \\ \mathbf{a}_5 = \frac{6 \times (\omega_2 - \omega_1)}{t_f^5} \end{cases} \quad (17)$$

至此已完成装配位姿弧形轨迹的规划设计。

2.3 控制算法设计

装配的最后阶段为公母接头对接过程, 在此过程中可能由于桁架杆件的刚度过大使得桁架系统出现损害, 因此采用一种自适应柔顺控制算法避免接触力过大是一种有效的解决思路。本文提出了一种适用于桁架装配的自适应柔顺控制算法, 通过输入的对接触力动态调整导纳控制参数 (M, C, K), 使机械臂末端在桁架装配过程中既能快速响应接触力变化, 又能保持稳定柔顺的运动特性。

首先基于导纳控制框架, 建立二阶质量-弹簧-阻尼模型, 将三维装配接触力映射为位置矫正量

$$\mathbf{M} \Delta \ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{C} \Delta \dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K} \Delta \mathbf{x} = \mathbf{F}_{\text{ext}} \quad (18)$$

式中: $\mathbf{F}_{\text{ext}} \in \mathbb{R}^3$ 为装配接触力; $\Delta \mathbf{x} \in \mathbb{R}^3$ 为输出位置矫正量; $\mathbf{M}, \mathbf{C}, \mathbf{K} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ 为对角参数矩阵。

接下来, 推导基于李雅普诺夫稳定性的参数更新律, 以保证 M, C, K 参数的自适应调整。为证明系统稳定性, 构造包含机械能量和参数误差的复合李雅普诺夫函数

$$V = \frac{1}{2} \Delta \mathbf{x}^T \mathbf{K} \Delta \mathbf{x} + \frac{1}{2} \Delta \dot{\mathbf{x}}^T \mathbf{M} \Delta \dot{\mathbf{x}} + \frac{1}{2} \text{tr}(\tilde{\boldsymbol{\Theta}}^T \boldsymbol{\Gamma}^{-1} \tilde{\boldsymbol{\Theta}}) \quad (19)$$

式中: $\tilde{\boldsymbol{\Theta}} = \boldsymbol{\Theta} - \boldsymbol{\Theta}^*$ 表示参数误差 ($\boldsymbol{\Theta} = [\mathbf{M}, \mathbf{C}, \mathbf{K}]^T$, $\boldsymbol{\Theta}^*$ 为理想参数), $\boldsymbol{\Gamma} = \text{diag}(\gamma_M, \gamma_C, \gamma_K)$ 为正定自适应增益矩阵。函数的前两项表示系统的机械能 (势能 + 动能), 确保物理能量有界, 第 3 项表示参数估计误差的能量, 用于驱动参数收敛到理想值。对 V 求时间导数, 有

$$\begin{aligned} \dot{V} = & \Delta \dot{\mathbf{x}}^T \mathbf{K} \Delta \mathbf{x} + \Delta \dot{\mathbf{x}}^T \mathbf{M} \Delta \ddot{\mathbf{x}} + \frac{1}{2} \Delta \mathbf{x}^T \dot{\mathbf{K}} \Delta \mathbf{x} + \\ & \frac{1}{2} \Delta \dot{\mathbf{x}}^T \dot{\mathbf{M}} \Delta \dot{\mathbf{x}} + \text{tr}\left(\tilde{\boldsymbol{\Theta}}^T \boldsymbol{\Gamma}^{-1} \dot{\tilde{\boldsymbol{\Theta}}}\right) \end{aligned} \quad (20)$$

将式 (20) 代入系统动力学方程式 (19), 化简可得

$$\begin{aligned} \dot{V} = & \Delta \dot{x}^T F_{\text{ext}} - \Delta \dot{x}^T C \Delta \dot{x} + \frac{1}{2} \Delta x^T \dot{K} \Delta x + \\ & \frac{1}{2} \Delta \dot{x}^T \dot{M} \Delta \dot{x} + \text{tr}(\tilde{\Theta}^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{\Theta}}) \end{aligned} \quad (21)$$

为确保 $\dot{V} \leq 0$, 需消除正定项并构造负定项。设计参数更新律使得后三项之和小于等于0。假设各参数独立调整(对角矩阵), 分项推导:

(1) 质量矩阵 M 更新率

令

$$\tilde{M}_i = M_i - M_i^* \quad (22)$$

设计更新率为

$$\dot{M}_i = -\gamma_M \Delta \dot{x}_i^2 \quad (23)$$

对应能量项为

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \Delta \dot{x}_i^2 \dot{M}_i + \gamma_M^{-1} \tilde{M}_i \dot{M}_i = & -\frac{\gamma_M}{2} \Delta \dot{x}_i^4 + \\ & \gamma_M^{-1} \tilde{M}_i (-\gamma_M \Delta \dot{x}_i^2) \end{aligned} \quad (24)$$

可化简为

$$-\frac{\gamma_M}{2} \Delta \dot{x}_i^4 - \tilde{M}_i \Delta \dot{x}_i^2 \leq 0 \quad (25)$$

(2) 阻尼矩阵 C 更新率

同理, 可得

$$\dot{C}_i = -\gamma_C \Delta \dot{x}_i^2 \quad (26)$$

能量项贡献为负定。

(3) 刚度矩阵 K 更新率

引入泄漏因子防止参数漂移

$$\dot{K}_i = \gamma_K (F_{\text{ext}, i} \Delta x_i - \sigma_K K_i) \quad (27)$$

对应能量项为

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \Delta x_i^2 \gamma_K (F_{\text{ext}, i} \Delta x_i - \sigma_K K_i) + \\ \gamma_K^{-1} \tilde{K}_i \gamma_K (F_{\text{ext}, i} \Delta x_i - \sigma_K K_i) \end{aligned} \quad (28)$$

化简为

$$\begin{aligned} \frac{\gamma_K}{2} F_{\text{ext}, i} \Delta x_i^3 - \frac{\gamma_K \sigma_K}{2} K_i \Delta x_i^2 + \\ \tilde{K}_i F_{\text{ext}, i} \Delta x_i - \sigma_K \tilde{K}_i K_i \end{aligned} \quad (29)$$

通过选择 σ_K 调节正负项平衡。

合并所有项后, 有

$$\dot{V} = -\sum_{i=1}^3 (C_i \Delta \dot{x}_i^2 + \sigma_K \tilde{K}_i K_i) \leq 0 \quad (30)$$

满足李雅普诺夫稳定性条件, 系统全局渐近稳定。此外应对参数进行限幅, 防止极端值的产生。

最后, 将连续时间模型离散化为

$$\begin{cases} \Delta \dot{x}_{k+1} = \Delta \dot{x}_k + \frac{F_{\text{ext}, k} - C_k \Delta \dot{x}_k - K_k \Delta x_k}{M_k} \Delta t \\ \Delta x_{k+1} = \Delta x_k + \Delta \dot{x}_k \Delta t \end{cases} \quad (31)$$

将 Δx 叠加到期望轨迹上, 实现柔顺装配。自适应柔顺控制算法的流程如图7所示。

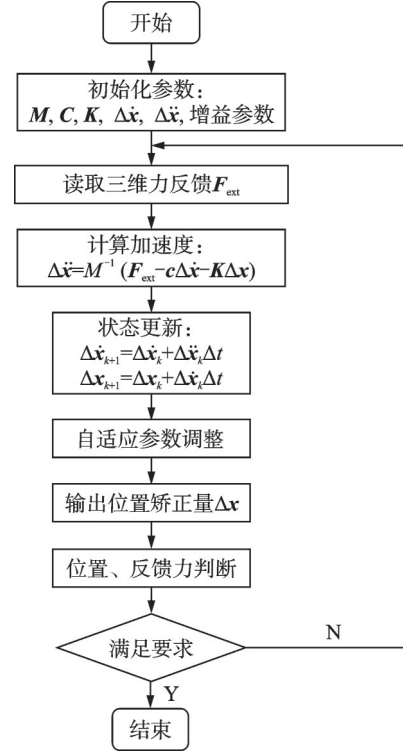


图7 自适应柔顺控制算法流程图

Fig.7 Flowchart of adaptive compliance control algorithm

3 仿真实验与结果

3.1 仿真平台搭建

为验证所提出的基于弧形轨迹与自适应控制的自主装配策略, 本文在ADAMS中搭建了6自由度优傲机械臂与桁架单元装配仿真场景, 并与Simulink联合仿真, 在Simulink中搭建轨迹规划与柔顺控制平台, 本文仿真系统的控制频率为10 Hz, 单根杆件装配总时长为30 s。装配机器人初始构型为 $q_0 = [0, -\pi/2, 0, -\pi/2, \pi, 0]$, 以水平短桁架杆件、竖直短桁架杆件、倾斜长桁架杆件3类杆件试验装配策略。图8展示了机械臂拟装配水平短桁架杆件的初始状态。

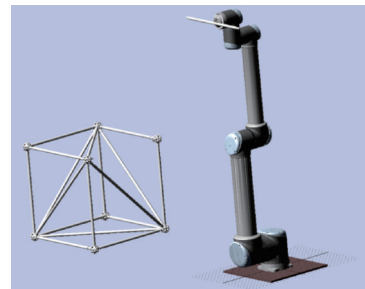


图8 仿真环境搭建

Fig.8 Simulation environment construction

3.2 自主装配仿真结果

基于给定的不同装配序列矩阵, 实验设计了3种场景, 包括装配水平短杆、装配竖直短杆和装配倾斜长杆, 3种场景均能有效地完成组装任务, 装配精度较高, 设置仿真时间为30 s, 装配结果如图9所示。

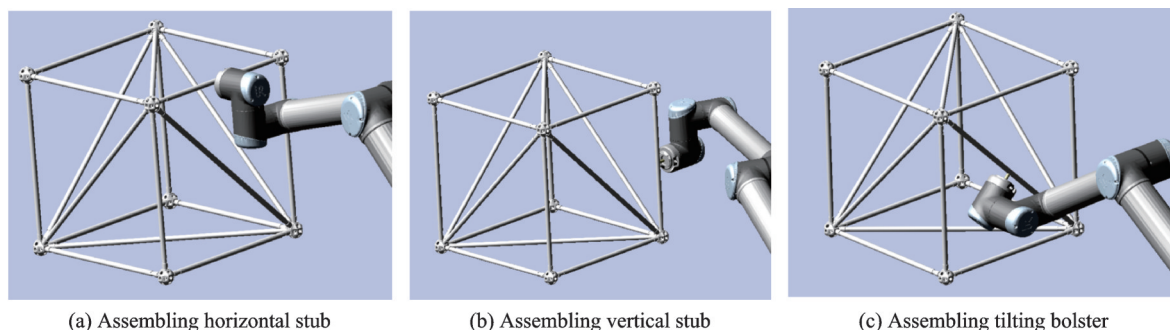


图 9 不同任务场景下杆件装配结果

Fig.9 Rod assembly results for different task scenarios

基于提出的一种弧形轨迹,实验保证了机械臂移动过程的连续性以及装配对接的正向对齐。图 10 展示了桁架装配的弧形轨迹的 4 个节点位置,分

别表示起始位置、预装配位置、2/3 弧位置 and 实际装配位置。仿真结果表明,该弧形轨迹规划方法可以实现杆件接头的正向柔性对接。

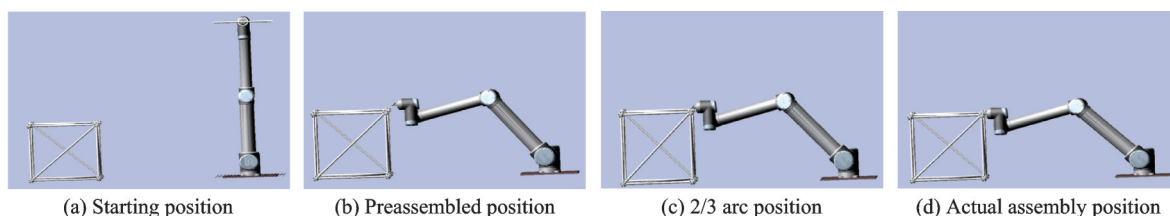


图 10 弧形轨迹节点位置

Fig.10 Location of nodes of compliance trajectory

接下来对控制算法是否能通过实时调整参数进而减小反馈力并提高装配精度进行验证。根据本文式(23,26,27),利用机械臂监测得到的末端位移/接触力实时更新控制参数。其中 ADAMS 中的桁架材料设置为铝,其刚度设置为 $3.5 \times$

10^4 N/m。分别采用多项式路径规划的导纳控制算法(固定 M 、 C 、 K 参数)和柔顺路径规划的自适应柔顺控制算法进行实验对比,在装配水平短杆、装配竖直短杆和装配倾斜长杆的 3 种场景下,得到装配反馈力结果如图 11 所示。

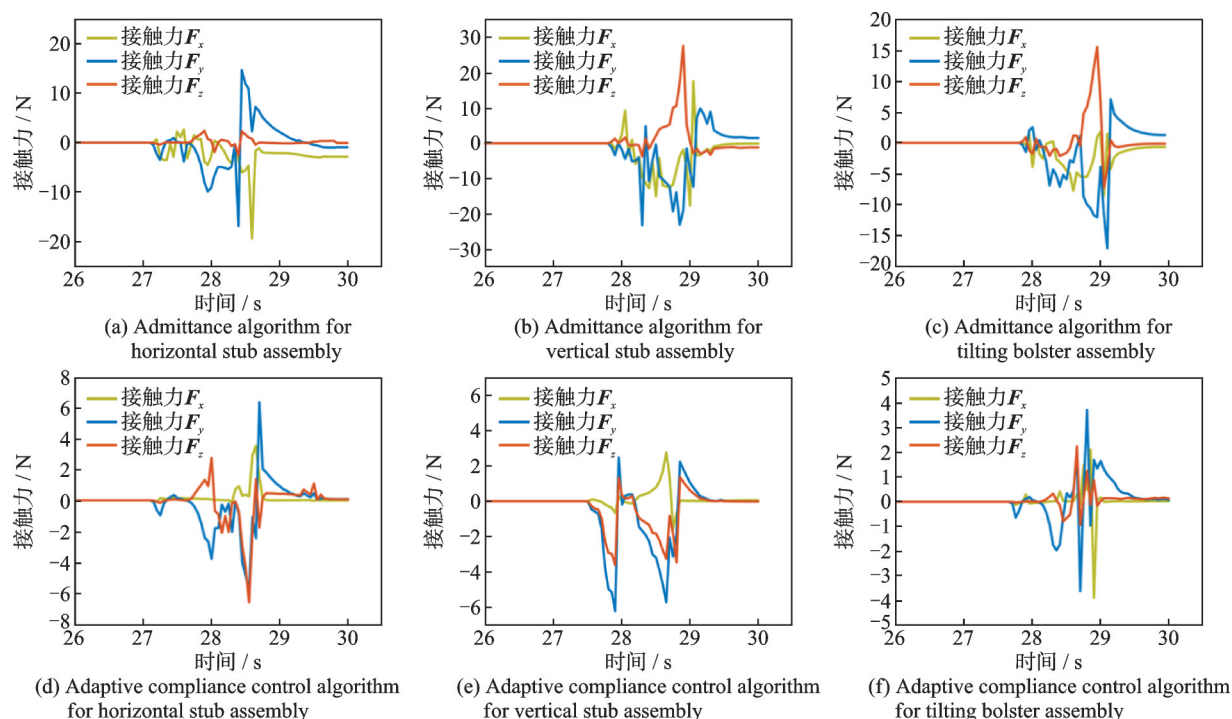


图 11 自适应柔顺控制算法与导纳控制算法效果对比

Fig.11 Comparison of effectiveness of adaptive compliance control algorithm and admittance algorithm

由图11可以发现,两种算法都表现出了反馈力先为0,后增大,最后减小的趋势,这与实际装配过程中机械臂以平滑的速度移动杆件,而后接头相互接触导致反馈力增大,最后由于算法调节反馈力减小的过程是相符的。但是传统的导纳控制由于调节参数固定,装配结果并不理想,不仅反馈力调节效果微弱,甚至竖直短杆装配过程都出现了不收敛的现象。然而采用基于柔顺路径的自适应柔顺控制算法输出的反馈力皆小于10 N,且最后全部收敛至0附近,保证了装配对接过程的柔顺与安全。这表明本文提出的基于弧形轨迹与自适应控制的自主装配策略是有效可行的。

4 结 论

本文针对空间中大型桁架系统的在轨组装任务,提出了一种自主装配轨迹规划与控制策略。首先,设计了一套空间桁架在轨装配系统,主要包括桁架系统与6自由度机械臂系统。其次,提出了一种基于邻接矩阵的桁架杆件装配流程描述,用于对立方体桁架单元各杆件的装配序列进行规划。然后,设计了一条柔顺弧形装配轨迹,以保证杆件移动过程的平滑性与对接阶段的正对齐。最后,提出了一种基于自适应柔顺控制算法,通过动态调整参数保证最终对接过程的柔顺性与安全性。本文通过ADAMS与Simulink联合仿真进行了验证,保证了各工况下装配反馈力不大于10 N,证明了所提出的空间桁架自主装配策略的有效性与可行性。

后续将继续丰富该自主装配策略,下一步将引入改进渐进最优快速探索随机树(Rapidly-exploring random tree star, RRT*)算法与碰撞检测算法,在柔顺弧形轨迹基础路径的前提下针对路径上遇到的障碍物实时避障并成功完成柔顺装配。

参考文献:

- [1] AN K, SUN P, DENG Y, et al. A large-scale high-gain transparent grid array antenna for millimeter-wave communication[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2024, 23(5): 1598-1602.
- [2] 姜钊,吕伟,林君毅,等.国外空间太阳能电池阵先进制造技术综述[J].*电源技术*, 2024, 48(5): 806-811.
JIANG Zhao, LYU Wei, LIN Junyi, et al. Overview of advanced manufacturing technology of space solar arrays abroad[J]. *Chinese Journal of Power Sources*, 2024, 48(5): 806-811.
- [3] 郭崇岭,陈佳夷,陈传志,等.大口径空间光学望远镜桁架结构关键技术研究进展[J].*南京航空航天大学学报*, 2024, 56(1): 31-43.
GUO Chongling, CHEN Jiayi, CHEN Chuanzhi, et al. Review on critical technologies for truss structure of large-aperture space optical telescope[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2024, 56(1): 31-43.
- [4] 盛聪,罗敏,柴洪友,等.我国深空探测器结构与机构技术发展[J].*航天器工程*, 2024, 33(6): 72-81.
SHEN Cong, LUO Min, CHAI Hongyou, et al. Development of structure and mechanism technology for China's deep space probes[J]. *Spacecraft Engineering*, 2024, 33(6): 72-81.
- [5] 王明明,罗建军,袁建平,等.空间在轨装配技术综述[J].*航空学报*, 2021, 42(1): 47-61.
WANG Mingming, LUO Jianjun, YUAN Jianping, et al. In-orbit assembly technology: Review[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2021, 42(1): 47-61.
- [6] 康鹏,徐国梁,邵将,等.金属-复合材料组合桁架结构设计及力学性能分析[J].*机电信息*, 2024(1): 45-49.
KANG Peng, XU Guoliang, SHAO Jiang, et al. Structural design and mechanical properties analysis of metal-composite combined trusses[J]. *Mechanical and Electrical Information*, 2024(1): 45-49.
- [7] 王丁丁,李伟,罗玉祥,等.航天器大型空间桁架结构变形监测方法研究[J].*计算机测量与控制*, 2022, 30(1): 1-6, 14.
WANG Dingding, LI Wei, LUO Yuxiang, et al. Research on deformation monitoring method of large truss structure based on inverse finite element method[J]. *Computer Measurement & Control*, 2022, 30(1): 1-6, 14.
- [8] 曹东兴,秦源,孙杰,等.空间桁架结构等效连续体建模及固有特性分析[J].*应用力学学报*, 2023, 40(2): 282-293.
CAO Dongxing, QIN Yuan, SUN Jie, et al. Equivalent modeling and vibration analysis of space truss structure[J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2023, 40(2): 282-293.
- [9] 李清歌,骆海涛,何凤霞,等.空间大型桁架结构模型试验与动力相似研究[J].*制造技术与机床*, 2025(1): 33-40.
LI Qingge, LUO Haitao, HE Fengxia, et al. Model test and dynamic similarity study of large space truss structure[J]. *Manufacturing Technology & Machine Tool*, 2025(1): 33-40.
- [10] RIVERA A, STEWART A. Study of spacecraft deployables failures: NASA-TM-123456[R]. Washington DC: NASA, 2018.
- [11] ALHORN D C. Autonomous assembly of modular structures in space and on extraterrestrial locations [C]//*Proceedings of AIP Conference*. New Mexico, USA: AIP, 2005: 1121-1128.
- [12] WATSON J J, COLLINS T J, BUSH H G. A history of astronaut construction of large space structures at NASA langley research center[C]//*Proceedings of the IEEE Aerospace Conference*. Big Sky, MT, USA: IEEE, 2002: 3569-3587.
- [13] PENNINGTON J E. Teleoperation to robotics-at

- langley research center[J]. Applied Intelligence, 1992, 2(2): 155-162.
- [14] 郭祥艳,刘传凯,王晓雪.加拿大移动服务系统地面遥操作模式综述[J].深空探测学报,2018,5(1): 78-84. GUO Xiangyan, LIU Chuankai, WANG Xiaoxue. A survey on teleoperation of Canada's mobile servicing system[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2018, 5(1): 78-84.
- [15] GUO Y, FREER D, DELIGIANNI F, et al. Eye-tracking for performance evaluation and workload estimation in space telerobotic training[J]. IEEE Transactions on Human-Machine Systems, 2022, 52(1): 1-11.
- [16] HOYT R, CUSHING J, JIMMERSON G, et al. SpiderFabTM: Process for on-orbit construction of kilometer-scale apertures: NASA-TM-123456[R]. Washington DC: NASA, 2019.
- [17] VARSHA B, YOGES K, AYUSH D, et al. Humanoid robots using optimization technique—A brief review[J]. International Journal of Scientific & Technology Research, 2020, 9: 651-655.
- [18] LI D, ZHONG L, ZHU W, et al. A survey of space robotic technologies for on-orbit assembly[J]. Space Science and Technology, 2022. DOI: 10.34133/2022/9849170.
- [19] NAIR M H, RAI M C, POOZHIVIL M. Design engineering a walking robotic manipulator for in-space assembly missions[J]. Frontiers in Robotics and AI, 2022, 9: 995813.
- [20] 王证普,曹宝石,刘阳,等.基于甲虫搜索算法的空间机械臂轨迹规划技术研究[J].载人航天,2024,30(6): 784-790. WANG Zhengpu, CAO Baoshi, LIU Yang, et al. Research on trajectory planning technology of experimental module manipulator based on beetle antennae search algorithm[J]. Manned Spaceflight, 2024, 30(6): 784-790.
- [21] MU Z G, XU W F, LIANG B. Avoidance of multiple moving obstacles during active debris removal using a redundant space manipulator[J]. International Journal of Control, Automation and Systems, 2017(2): 815-826.
- [22] WANG Y F, GUO X. Memory-based stochastic trajectory optimization for manipulator obstacle avoiding motion planning[C]//Proceedings of the 7th Asia-Pacific Conference on Intelligent Robot Systems (ACIRS). Tianjin, China: IEEE, 2022: 188-194.
- [23] LIU J, TONG Y, JU Z, et al. Novel method of obstacle avoidance planning for redundant sliding manipulators[J]. IEEE Access, 2020, 8: 78608-78621.
- [24] 刘聪,李海峰,王明明,等.空间桁架在轨装配机器人的运动规划方法[J].系统工程与电子技术,2024,46(2): 715-721. LIU Cong, LI Haifeng, WANG Mingming, et al. Robot motion planning method for space truss on-orbit assembly[J]. Systems Engineering and Electronics, 2024, 46(2): 715-721.
- [25] JI H, XIE H, WANG C, et al. E-RRT*: Path planning for hyper-redundant manipulators[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2023, 8(12): 8128-8135.
- [26] XIAO G, ZHANG L, WU T, et al. FBi-RRT: A path planning algorithm for manipulators with heuristic node expansion[J]. Robotica, 2024, 42(3): 644-659.
- [27] ZHANG J W, CHENG L, LIU C, et al. Cost-aware scheduling systems for real-time workflows in cloud: An approach based on genetic algorithm and deep reinforcement learning[J]. Expert Systems with Applications, 2023, 234: 120972.
- [28] 陈午,成磊.基于自适应纠正粒子群算法的机械臂轨迹规划[J].组合机床与自动化加工技术,2025(1): 74-78. CHEN Wu, CHENG Lei. Trajectory planning of manipulator based on self-correcting particle swarm optimization algorithm[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2025(1): 74-78.
- [29] LI H Y, PARANAWITHANA I, YANG L J, et al. Stable and compliant motion of physical human-robot interaction coupled with a moving environment using variable admittance and adaptive control[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2018, 3(3): 2493-2500.
- [30] TONG M, LIN W, HUO X, et al. A model-free fuzzy adaptive trajectory tracking control algorithm based on dynamic surface control[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2020, 17(1): 578-587.
- [31] JIANG Y, YANG C, WANG Y, et al. Multi-hierarchy interaction control of a redundant robot using impedance learning[J]. Mechatronics, 2020. DOI: 10.1016/j.mechatronics.2020.102348.
- [32] LIN Y, CHEN Z, YAO B. Unified method for task-space motion/force/impedance control of manipulator with unknown contact reaction strategy[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2022, 7(2): 1478-1485.
- [33] 陈书清,李铁民.基于自适应柔顺控制的航天器部件装配[J].清华大学学报(自然科学版),2023,63(11): 1808-1819. CHEN Shuqing, LI Tiemin. Assembly of spacecraft components based on adaptive compliance control[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2023, 63(11): 1808-1819.
- [34] 陈萌,杨美丽,张崇峰,等.空间桁架的人-机协作装配规划与试验验证[J].集成技术,2022,11(4): 56-69. CHEN Meng, YANG Meili, ZHANG Chongfeng, et al. Human-robot collaborative assembly planning and experiment verification of space trusses[J]. Journal of Integration Technology, 2022, 11(4): 56-69.