DOI: 10.3901/JME.2021.21.001

面向在轨装配的八索并联机构构型设计与工作空间分析*

于金山¹ 李 潇² 陶建国¹ 王浩威² 孙 浩³

- (1. 哈尔滨工业大学机电工程学院 哈尔滨 150001;
2. 中国空间技术研究院北京空间飞行器总体设计部 北京 100094;
3. 福州大学机械工程与自动化系 福州 350108)

摘要: 针对大型空间结构的在轨装配任务, 提出了由八根绳索驱动的索并联机构, 具有结构简单、质量轻、工作空间大的特点; 针对绳索并联机构的构型综合问题, 定义了出线点和绳索与中心执行器连接点的关联矩阵, 在此基础上考虑约束条件综合出了八索并联机构的18种有效构型; 计算了不同构型的力封闭工作空间以及针对在轨装配任务时的力螺旋可行工作空间, 以工作空间体积为指标筛选出了最佳构型; 分析了绳索拉力范围以及绳索与中心执行器连接点的位置变化对机构力螺旋可行工作空间的影响, 并且对连接点的位置参数进行了优化。

关键词: 在轨装配; 索并联机构; 构型设计; 工作空间

中图分类号: TP242

Configuration Design and Workspace Analysis of Parallel Mechanism Driven by Eight Cables for On-orbit Assembly

YU Jinshan¹ LI Xiao² TAO Jianguo¹ WANG Haowei² SUN Hao³

- (1. School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001;
2. Institute of Spacecraft System Engineering, China Academy of Space Technology, Beijing 100094;
3. Department of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108)

Abstract: For the on-orbit assembly task of large space structures, a parallel mechanism driven by eight cables is proposed, which has the characteristics of simple structure, light weight and large workspace; for the design of the configuration of the cable-driven parallel mechanism, the correlation matrix of the outlet points and connection points between the cable and the central actuator is defined, on the basis of which the constraints are considered, the 18 effective configurations of the cable-driven parallel mechanism are synthesized; the force-closure workspace and the feasible wrench workspace of different configurations are calculated. The best configuration is selected based on the volume of the workspace; the effect of changing the cable tension and the position of the connection points between the cables and the central actuator on the feasible wrench workspace of the mechanism is analyzed, and the position parameters is optimized.

Key words: orbit assembly; cable-driven parallel mechanism; configuration design; workspace

0 前言

随着航天技术的快速发展, 航天器的尺寸将越

来越大。受火箭运载能力、火箭整流罩包络尺寸以及机构复杂度的影响, 目前的折展机构难以满足未来深空探测、天文观测、战略侦察等工程所需的大跨度空间结构的构建要求, 因此需要采用在轨装配的方式对大跨度空间结构进行在轨构建^[1]。按照有无无人直接参与, 在轨装配可分为有人在轨装配和无人人在轨装配^[2]。有人在轨装配需要宇航员直接操纵

* 中国空间技术研究院预研资助项目。20200727 收到初稿, 20201123 收到修改稿

工具进行在轨装配作业。受空间环境限制,该方法具有较大的局限性。无人在轨装配是指利用空间机械臂或机器人通过遥操作进行装配作业,从而避免了宇航员直接暴露在危险的太空环境中,同时可以满足长期的工作要求。因此,无人在轨装配成了在轨装配作业的主要方式。

本文针对大型空间结构在轨装配任务,提出了大跨度索并联机构的设计方案,即通过驱动多根绳索牵引中心执行器完成在轨装配工作。相对于目前机械臂采用的杆支撑串联机构形式^[3],索并联机构具有结构简单、质量轻、工作空间大的特点,运动过程中能耗较低,并且具有较高的刚度,可以实现很高的运动速度和加速度^[4],因此,索并联机构十分契合大跨度空间结构的在轨装配要求。针对索并联机构,国内外学者进行了广泛研究,研究成果被应用于起重^[5]、天文观测^[6]、飞行器风洞试验^[7]、虚拟现实^[8]等领域。

机构的工作空间是指机构末端执行器所能到达的空间点的集合,是评价机构性能的一个重要因素。因此,工作空间是索并联机构的一项重要研究内容。绳索具有单向受力性,即只能承受拉力而不能受压,学者们考虑绳索的这一特性,结合绳索的拉力要求,分别定义了力封闭工作空间^[9]、可控工作空间^[10]、动力学工作空间^[11]等,PHAM 等^[12-13]提出一种递归降维算法来验证力封闭条件,从而确定力封闭工作空间,DIAO 等^[14-15]提出一种求解索并联机构的结构矩阵中多个线性无关列矢量的法矢量,进而判断法矢量与剩余列矢量的点积符号的方法验证力封闭条件来求解索并联机构的力封闭工作空间,该方法在索并联机构的冗余度较大时,计算量较为复杂。LIM 等^[16]以索并联机构结构矩阵的列矢量能否正张为 $\mathbf{R}^n$ 为力封闭判别条件,定义了一个能被绳索拉力矢量正表达的矢量,设计了相应的力封闭工作空间算法,通过仿真验证了算法的有效性。TANG 等^[17]针对一种四索三自由度平面索并联机构,设计了一种通过矩阵变换求解力可行工作空间的算法,并且分析了不同尺寸时机构的工作空间质量。张耀军^[18]等分析了一种平面四索三自由度索并联机构的定姿态工作空间,并采用坐标轮换法对机构的结构参数进行了优化,于亮亮等^[19]针对一种用于高速摄像的柔索牵引并联机器人,提出了一种基于最小二范数的索力快速优化方法,通过仿真计算了机器人的动力工作空间。张立勋等^[20]研究了一种用于航天员虚拟作业训练的竖面平面四索三自由度并联机构,分析了末端执行器不同位姿以及不同人机交互力下的

力螺旋可行工作空间,对比了交叉柔索不同布局方式以及机构不同结构参数对力螺旋可行工作空间的影响。以上研究均是对给定构型的索并联机构进行工作空间分析,缺少对索并联机构构型设计的方法以及不同构型的索并联机构工作空间的对比分析。

本文针对面向在轨装配的索并联机构的构型设计及不同构型的工作空间展开研究,首先针对索并联机构的构型设计问题,提出了出线点和绳索与中心执行器连接点的关联矩阵,以此为基础综合出了 18 种八索并联机构的有效构型;然后,建立了索并联机构的运动学和静力学模型;进一步地,分析了不同构型的力封闭工作空间以及针对在轨装配任务时的力螺旋可行工作空间,以工作空间体积为指标筛选出了最佳构型;最后,分析了绳索拉力范围以及绳索与中心执行器连接点位置变化对力螺旋可行工作空间的影响,对连接点的位置参数进行了优化。

1 构型综合

面向在轨装配的大跨度索并联机构,主要由框架、驱动单元、绳索以及中心执行器组成(图 1)。驱动单元通过驱动绳索牵引中心执行器实现大跨度的运动。中心执行器上装有多种适配器(图 2 为国际空间站机械臂末端适配器^[21]),用于执行装配过程中工件的旋拧、夹持等操作。

图 1 面向在轨装配的大跨度索并联机构示意图

图 2 国际空间站机械臂末端适配器

VERHOEVEN 指出, 针对索并联机构, 最少需要 $n+1$ 根绳索才能实现对机构 n 个自由度的完全约束^[22], 在轨装配作业中, 中心执行器需要实现 6 个自由度的运动, 本文所设计的索并联机构的预期安装空间为一长方体区域, 中心执行器形状设计为长方体, 底部装有用于执行装配操作的多功能工具。机构的几何参数如表 1 所示。为了使机构满足自由度要求, 同时使机构的布局具有对称性, 选取绳索根数为 8, 机构的出绳点位于长方体区域的 8 个顶点, 绳索与中心执行器的连接点位于中心执行器的 8 个顶点。由排列组合相关知识, 存在 $8!=40320$ 种可能的构型。为便于分析, 将索并联机构的框架和中心执行器简化为长方体, 对位于框架顶点的出绳点以及中心执行器顶点的绳索连接点进行编号(图 3)。

表 1 索并联机构几何参数

几何参数	数值
框架长度 L_1/m	50
框架宽度 L_2/m	50
框架高度 L_3/m	25
中心执行器长度 L_4/m	1.5
中心执行器宽度 L_5/m	1
中心执行器高度 L_6/m	2.5

图 3 索并联机构简化示意图

针对索并联机构的构型综合问题, 提出了出绳点和绳索与中心执行器连接点的关联矩阵 $\mathbf{G}_k$ 表示如下

$$\mathbf{G}_k = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1e} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2e} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{v1} & a_{v2} & \cdots & a_{ve} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, k 为构型编号, v 为出绳点数量, e 为中心执行器顶点数量, a_{ve} 为出绳点与中心执行器顶点的连接关系。若出绳点与中心执行器顶点存在绳索连接, 则取值为 1, 否则, 取为 0。

考虑实际安装要求, 提出索并联机构构型的 4 个约束条件。

- (1) 绳索与中心执行器不能产生干涉。
- (2) 每个出绳点都有绳索连接。
- (3) 中心执行器每个顶点都有绳索连接。

(4) 构型具有对称性。定义机构框架前后面、二等分面和左右面的二等分面为对称面, 即构型具有前后对称性和左右对称性。

当绳索与中心执行器连接点位于中心执行器顶点位置时, 在绳索交叉布局情况下会存在绳索之间发生干涉的情况, 这种情况可以通过将连接点进行十分微小的位置移动防止交叉绳索共面的方法来避免, 且不会对整个机构的性能产生明显影响。对于不同构型, 连接点需要进行微小位置移动的方向也不同, 为便于对不同构型的工作空间进行对比分析, 在约束条件中暂不考虑绳索干涉。移动连接点的位置对机构性能的影响会在第 4.2 节中详细讨论。

对于本文提出的面向在轨装配的 8 索并联机构, 出绳点和绳索与中心执行器连接点的关联矩阵 $\mathbf{G}_k$ 为 8×8 方阵。考虑约束条件, 方阵每行(列)有且只有一个元素为 1, 其余均为 0, 得到所有满足要求的有效构型如图 4 所示。

2 运动学建模和静力学分析

2.1 运动学建模

由于本文所设计的面向在轨装配的索并联机构工作在太空环境中, 绳索不会产生由于重力作用导致的悬链线变形, 因此绳索可以直接建立为直线模型。以构型(1)为例, 建立索并联机构的运动学模型如图 5 所示。图中, $Oxyz$ 为全局坐标系, $Pxyz$ 为局部坐标系。点 P 为局部坐标系原点, 位于中心执行器中心位置。 $\mathbf{b}_i$ 为出绳点在全局坐标系中的位置矢量, $\mathbf{p}$ 为全局坐标系原点与局部坐标系原点之间的平移矢量, $\mathbf{p}_i$ 为绳索与中心执行器连接点在局部坐标系中的位置矢量, $\mathbf{l}_i$ 为绳索矢量 $\mathbf{P}_i\mathbf{B}_i$, ${}^o\mathbf{R}_p$ 为局部坐标系到全局坐标系的旋转矩阵。

$$\mathbf{l}_i = \mathbf{b}_i - \mathbf{p} - {}^o\mathbf{R}_p\mathbf{p}_i \quad (i=1,2,\cdots,8) \quad (2)$$

单位绳索矢量为

$$\mathbf{u}_i = \frac{\mathbf{b}_i - \mathbf{p} - {}^o\mathbf{R}_p\mathbf{p}_i}{\|\mathbf{b}_i - \mathbf{p} - {}^o\mathbf{R}_p\mathbf{p}_i\|} \quad (i=1,2,\cdots,8) \quad (3)$$

2.2 静力学分析

对索并联机构进行受力分析, 如图 6 所示。图中, $\mathbf{t}_i = t_i\mathbf{u}_i$ ($i=1,2,\cdots,8$) 为绳索拉力矢量, t_i 为绳索

拉力值, f_p 为中心执行器所受外力, τ_p 为中心执行器所受外力矩。

图 4 索并联机构构型

图 5 索并联机构运动学模型

由静力平衡条件得到

$$\sum_{i=1}^8 t_i + f_p = 0 \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^8 p_i \times t_i + \tau_p = 0 \quad (5)$$

将式(4)和式(5)合并为

$$J^T T + F = 0 \quad (6)$$

式中, J^T 为结构矩阵, $J^T = \begin{bmatrix} u_1 & \cdots & u_8 \\ p_1 \times u_1 & \cdots & p_8 \times u_8 \end{bmatrix}$; T 为绳索拉力矩阵, $T = [t_1 \cdots t_8]^T$; F 为中心执行器所受力旋量, $F = [f_p \quad \tau_p]^T$ 。

图 6 索并联机构受力分析图

3 工作空间分析

3.1 力封闭工作空间分析

索并联机构的力封闭工作空间(Force-closure workspace, FCWS)是指满足力封闭条件(即一组大于零的绳索拉力可以平衡中心执行器所受任意力旋量)的位姿集合^[13], 其数学表示如下。

$$\forall \mathbf{F} \in \mathbf{R}^6 \exists \mathbf{T} > 0: \mathbf{J}^T \mathbf{T} + \mathbf{F} = 0 \quad (7)$$

可以看出力封闭工作空间没有限制绳索拉力以及中心执行器所受外部力旋量, 该工作空间只与索并联机构的结构参数以及中心执行器的位姿有关, 因此对于索并联机构的设计具有重要的意义。

对于力封闭工作空间的求解问题, 为了简化力封闭的判定, 有以下等价条件^[23]

$$\text{rank}(\mathbf{J}^T) = n \cap \exists \mathbf{N}(\mathbf{J}^T) > 0 \quad (8)$$

式中, $\mathbf{N}(\mathbf{J}^T)$ 为结构矩阵 $\mathbf{J}^T$ 的零空间矢量, 即当结构矩阵 $\mathbf{J}^T$ 的秩满足机构自由度要求, 且存在严格大于零的零空间矢量 $\mathbf{N}(\mathbf{J}^T)$ 时, 位姿满足力封闭。

充分性证明: 式(7)的解可表示为

$$\mathbf{T} = -\mathbf{J}^{T+} \mathbf{F} + c \cdot \mathbf{N}(\mathbf{J}^T) \quad (9)$$

式中, $\mathbf{J}^{T+}$ 为 $\mathbf{J}^T$ 的伪逆矩阵, 若 $\exists \mathbf{N}(\mathbf{J}^T) > 0$, 则当 c 趋于正无穷时, $\mathbf{T} > 0$, 充分性得证。

必要性证明: 对于式(7), 取 $\mathbf{F} = 0$, 则有 $\mathbf{J}^T \mathbf{T} = 0$, 且 $\mathbf{T} > 0$, 必要性得证。

设计索并联机构的力封闭工作空间算法如下。

Input: 出绳点坐标 B_i ; 绳索与中心执行器连接点坐标 $P_i(i=1, 2, \dots, 8)$; 中心执行器姿态角 (α, β, γ) ; 运动范围 $(X_{\min}, X_{\max})$ 。

Output: 力封闭工作空间 FCWS。

初始化中心执行器位置 $\mathbf{X} = \mathbf{X}_{\min}$

While $X \leq X_{\max}$

 计算 $\mathbf{J}^T$

 if $\text{rank}(\mathbf{J}^T) = n$

 if $\exists \mathbf{N}(\mathbf{J}^T) > 0$

$\text{FCWS} = \text{FCWS} \cup X$

 end

 end

$X = X + \Delta X$

end

Return FCWS

针对本文设计的面向在轨装配的索并联机构, 设定中心执行器的运动范围为 $45 \text{ m} \times 45 \text{ m} \times 22 \text{ m}$

的长方体区域, 在工作过程中, 为了避免绳索与中心执行器的干涉, 中心执行器主要表现为三个平动自由度的运动, 因此将中心执行器的三个姿态角 (α, β, γ) 设为 0, 将运动范围均匀离散为 486 68 个点, 得到所有构型的工作空间如图 7 所示, 为便于分析, 将工作空间分层显示, 图中浅色区域为属于力封闭工作空间的部分, 深色区域为不属于力封闭工作空间的部分。

由图 7 可以看出, 当中心执行器的姿态角为 0 时, 不同构型索并联机构的力封闭工作空间均呈六面体, 其中, (1)、(5)、(9)、(10)、(14)、(18)号构型的力封闭工作空间为长方体, 且覆盖全部运动范围, 其余构型的力封闭工作空间侧面呈梯形, 这是中心执行器上下部分绳索连接方式不同导致的, 其工作空间侧面部分体积会相应减小, 使得力封闭工作空间不能覆盖全部运动范围。因此, 采用上下相同的绳索连接方式有利于提高索并联机构的力封闭工作空间。

3.2 力螺旋可行工作空间分析

由式(7)可知, 力封闭工作空间并没有考虑绳索拉力限制, 可以为无穷大。但在实际应用中, 受到驱动器驱动力矩以及绳索许用拉力的限制, 绳索拉力存在安全上限值 $t_{\max}$ 。此外, 为了避免绳索在运动过程中发生虚牵, 并使机构保持一定的刚度, 绳索拉力不应低于最小拉力 $t_{\min}$, 即绳索拉力的约束条件为

$$0 < t_{\min} \leq t_i \leq t_{\max} (i=1, 2, \dots, 8) \quad (10)$$

本节在力封闭工作空间的基础上, 进一步分析考虑绳索拉力约束条件的力螺旋可行工作空间(Feasible wrench workspace, FWWS)^[24], 其满足的条件为

$$\text{rank}(\mathbf{J}^T) = n \cap \mathbf{J}^T \mathbf{T} + \mathbf{F} = 0 \quad \mathbf{T}_{\min} \leq \mathbf{T} \leq \mathbf{T}_{\max} \quad (11)$$

$$\mathbf{T}_{\min} = [t_{\min} \quad \dots \quad t_{\min}]^T \quad \mathbf{T}_{\max} = [t_{\max} \quad \dots \quad t_{\max}]^T$$

由于索并联机构采用冗余驱动的方式, 因此绳索拉力解不唯一。在实际应用过程中, 为了降低系统的振动, 提高索并联机构的工作性能, 需要绳索拉力变化具有连续性。为满足上述要求, 本文采用力封闭拉力分布算法^[25]求解绳索拉力。

首先将绳索拉力矩阵拆分为两部分

$$\mathbf{T} = \mathbf{T}_m + \mathbf{T}_v \quad (12)$$

式中, $\mathbf{T}_v$ 为任意拉力矩阵; $\mathbf{T}_m$ 为平均可行拉力矩阵,

$$\mathbf{T}_m = \frac{\mathbf{T}_{\min} + \mathbf{T}_{\max}}{2}。$$

图7 不同构型索并联机构力封闭 workspace

把式(12)代入式(6), 得

$$\mathbf{J}^T \mathbf{T}_v = -\mathbf{F} - \mathbf{J}^T \mathbf{T}_m \quad (13)$$

式(13)左右同乘结构矩阵 $\mathbf{J}^T$ 的伪逆 $\mathbf{J}^{T+}$, 整理, 得

$$\mathbf{T} = \mathbf{T}_m - \mathbf{J}^{T+} (\mathbf{F} + \mathbf{J}^T \mathbf{T}_m) \quad (14)$$

索并联机构在轨装配过程中, 与中心执行器相连的适配器主要进行夹持、旋拧操作, 由于工作在太空环境中, 夹持过程装配体不会受到重力的影响, 因此中心执行器主要受旋拧操作时来自适配器的反力 $\mathbf{f}_p$ 和反力矩 $\boldsymbol{\tau}_p$, 其中反力 $\mathbf{f}_p$ 是由中心执行器对装配体作用的用于保持装配过程稳定的按压力产生的, 其作用方向垂直于装配体向上。反力矩 $\boldsymbol{\tau}_p$ 是由适配器对装配体作用的垂直于装配体的旋拧力矩产生的。针对本课题所要研究的大跨度索并联机构, 其装配对象面向空间大型面状结构, 因此主要考虑装配过程中垂直于面状结构的反力和反力矩, 所受反力和反力矩的方向均沿 z 轴方向, 如图8所示。

图8 旋拧操作中心执行器受力图

设定 $\mathbf{f}_{p\max}$ 为 50 N, $\boldsymbol{\tau}_{p\max}$ 为 50 N·m, 则中心执行器所受力旋量 $\mathbf{F} = [0 \ 0 \ 50 \ 0 \ 0 \ 50]^T$, 限定绳索拉力最小值 $t_{\min}$ 为 100 N, 最大值为 1200 N, 针对(1)、(5)、(9)、(10)、(14)、(18)号构型, 计算所有满足式(11)条件的点, 得到几种构型的力螺旋可行 workspace, 如图9所示, 不同构型的力螺旋可行 workspace 点数如表2所示。

(1)号构型

图9 几种构型的力螺旋可行工作空间

表2 几种构型的力螺旋可行工作空间点数

构型编号	力螺旋可行工作空间点数/个
1	15 136
5	16 652
9	16 334
10	18 472
14	20 368
18	19 946

由图9看出,上述构型的力螺旋可行工作空间呈上下窄,中间宽的不规则形状,这表明中心执行器在中心位置处时,系统具有较高的承载能力。对比底层和上层的力旋量可行工作空间面积,发现底层面积均小于上层面积,这说明相对于底部区域,中心执行器在上部时机构的承载能力更大,这是因为中心执行器在上部时,与机构底部的四个出绳点相连接的绳索可以产生更大的垂直向下的分力,有利于抵抗在轨装配时中心执行器受到的反力 f_p ,而当中心执行器在底部时,与机构底部的四个出绳点相连接的绳索产生的垂直向下的分力较小,对于反力 f_p 的承载能力较差。由此也可以得出,采用上下倒置的绳索连接方式(构型10、14、18)有利于抵抗反力 f_p 。对比几种构型的中层力旋量可行工作空间面积,采用交叉式绳索布置方式(构型5、9、14、18)的中层面积较大,这表明交叉式绳索布置方式有利于承载反力矩 τ_p 。综合来看,构型10、14、18的力螺旋可行工作空间更大,考虑到构型14和构型18绳索布置方式较为复杂,在应用过程中易产生干涉,本文选取构型10作为索并联机构的布局方式。

4 力螺旋可行工作空间影响因素分析

4.1 绳索拉力对力螺旋可行工作空间的影响

式(10)给出了绳索拉力的约束条件,当绳索拉力范围发生变化时,力螺旋可行工作空间也会有所变化。通过计算得到绳索拉力对力螺旋可行工作空间点的影响如图10所示,不同绳索拉力范围下力螺旋可行工作空间点数如表3所示。

图10 绳索拉力对力螺旋可行工作空间点的影响

表 3 不同绳索拉力范围下力螺旋可行工作空间点数

力螺旋可行工作空间 点数/个	绳索拉力下限 $t_{\min}/\text{N}$			
	50	80	100	150
800	20 646	15 784	13 252	8 722
绳索拉力 上限 $t_{\max}/\text{N}$				
1 000	23 420	18 708	16 186	11 454
1 200	25 472	21 006	18 472	13 754
1 500	27 736	23 622	21 296	16 608

由图 10 可以看出, 绳索拉力下限越小, 拉力上限越大, 索并联机构的力螺旋可行工作空间越大。因此, 提高绳索拉力范围可以有效增大索并联机构的力螺旋可行工作空间。同时, 绳索拉力上限受驱动器驱动力矩以及绳索许用拉力的限制, 为了使绳索保持张紧状态, 并且使索并联机构具有一定刚度, 还需要绳索的拉力下限达到一定值。因此, 合理选择绳索拉力范围可以有效提高机构的工作性能。

4.2 中心执行器连接点位置对力螺旋可行工作空间的影响

当绳索与绳索之间发生干涉时, 会限制中心执行器的运动, 从而严重影响索并联机构的工作过程。因此, 不同绳索之间应保持一定距离, 如图 11 所示。

图 11 构型 10 的绳索布置方式

当中心执行器连接点的位置变化时, 索并联机构对装配反力和反力矩的承载能力也会发生变化, 从而使力螺旋可行工作空间受到影响。分别对移动连接点位置时机构对装配反力 $\mathbf{f}_p$ 和反力矩 $\boldsymbol{\tau}_p$ 的承载能力进行分析。由图 12 易知, 对于装配反力 $\mathbf{f}_p$, 主要由与机构下部的四个出绳点相连接的绳索 1, 2, 3, 4 产生的垂直向下的分力来抵抗, 以中心执行器位于工作空间中心位置为例, 每根绳索产生的垂直向下的分力为 $t_i \mathbf{u}_{iz} (i=1, 2, 3, 4)$, t_i 为绳索拉力值, $\mathbf{u}_{iz}$ 为单位绳索方向矢量 z 向分量, 其值 $\|\mathbf{u}_{iz}\|$ 越大, 则机构抵抗反力 $\mathbf{f}_p$ 的能力越强。

图 12 构型 10 在轨装配受力图

以绳索 1 为例, 分析其与中心执行器连接点 P_1 在距离中心执行器顶点处不同长度时单位绳索方向向量 z 向分量绝对值 $\|\mathbf{u}_{iz}\|$ 的变化, 如图 13 所示。

图 13 P_1 距离中心执行器顶点处不同长度时单位绳索方向向量 z 向分量绝对值 $\|\mathbf{u}_{iz}\|$ 的变化

由第 2.2 节静力学分析, 每根绳索对中心执行器产生的力矩为 $t_i \mathbf{p}_i \times \mathbf{u}_i (i=1, 2, \dots, 8)$, 令 $(\mathbf{p}_i \times \mathbf{u}_i)_z$ 为单位绳索方向矢量作用在中心执行器上力矩的 z 向分量, 由图 12 易知不同绳索对中心执行器产生的力矩的 z 向分量方向不同。反力矩 $\boldsymbol{\tau}_p$ 主要由对中心执行器力矩的 z 向分量为负的绳索来平衡。考虑到机构的对称性, 以与出绳点 B_5 相连接的绳索 5 为例, 分析点 P_5 与中心执行器连接点距离不同时, 单位绳索方向向量作用在中心执行器上力矩的 z 向分量值的变化, 如图 14 所示。

图 14 P_5 距离中心执行器顶点处不同长度时单位绳索方向向量作用在中心执行器力矩 z 向分量值的变化

由图 13、14 发现, 当连接点靠近中心执行器顶点位置时, 机构承载反力 f_p 的能力较强, 而对反力矩 τ_p 的承载能力较差, 随着连接点远离顶点位置, 机构承载反力 f_p 的能力降低, 而承载反力矩 τ_p 的能力增加。

对中心执行器连接点的位置参数进行优化, 设定连接点 P_1 与 P_4 以及 P_2 与 P_3 的距离以 0.1 m 的步长由 0 到 1.5 同步变化, 连接点 P_5 与 P_6 以及 P_7 与 P_8 的距离以 0.1 m 的步长由 0 到 1 同步变化, 得到不同中心执行器连接点在不同位置时的力螺旋可行工作空间点数, 如图 15 所示。表 4 给出了中心执行器连接点变化时力螺旋可行工作空间点数的具体数值。

图 15 中心执行器连接点位置变化对力螺旋可行工作空间点的影响

由图 15 看出, 连接点 P_1 与 P_4 以及 P_5 与 P_6 的距离越小, 力螺旋可行工作空间越大。通过减小连接点 P_1 与 P_4 以及 P_5 与 P_6 的距离最多可提升 30% 的力螺旋可行工作空间。

表 4 连接点在不同位置处力螺旋可行工作空间点数

力螺旋可行工作空间 点数/个		中心执行器连接点 P_1P_4 距离/m			
		0	0.5	1.0	1.5
中心执行器 连接点 P_5P_6 距离/m	0	24 160	23 816	22 134	19 942
	0.4	24 116	23 576	21 834	19 510
	0.8	23 534	22 312	20 312	18 816
	1.0	22 944	21 188	18 616	18 472

此外, 针对大跨度绳索牵引并联机构, 绳索弹性会对系统的刚度产生一定程度的影响, 使得中心执行器在受到外力作用时产生较小的偏移量。因此, 机构实际工作空间边界会与理论工作空间边界存在微小的偏差, 该差异相对于整个工作空间较小, 且与绳索刚度、中心执行器位置以及绳索拉力有关, 具有较强的耦合性。有关绳索弹性对机构定位精度的影响会后续进行进一步研究。

5 结论

(1) 本文提出了一种面向在轨装配的索并联机构。

(2) 针对索并联机构的构型综合问题, 提出了出线点和绳索与中心执行器连接点的关联矩阵, 通过设定约束条件, 综合出了 18 种索并联机构的有效构型。

(3) 分析了不同构型的力封闭工作空间以及针对在轨装配任务考虑绳索拉力的力螺旋可行工作空间, 并以工作空间体积为指标筛选出了最佳构型。

(4) 进一步地, 分析了绳索拉力以及绳索与中心执行器连接点的位置变化对力螺旋可行工作空间的影响, 并对连接点的位置参数进行了优化。

参 考 文 献

- [1] 沈晓凤, 曾令斌, 靳永强, 等. 在轨组装技术研究现状与发展趋势[J]. 载人航天, 2017, 23(2): 228-235.
SHEN Xiaofeng, ZENG Lingbin, JIN Yongqiang, et al. Status and prospect of on-orbit assembly technology[J]. Manned Spaceflight, 2017, 23(2): 228-235.
- [2] 时月天, 侯绪研, 饶笑山, 等. 面向空间太阳能电站在轨装配的爬机器人关键技术[J]. 空间电子技术, 2018, 176(2): 110-116.
SHI Yuetian, HOU Xuyan, RAO Xiaoshan, et al. Research on the key technology of crawler robot orbiting on space solar power station[J]. Space Electronic Technology, 2018, 176(2): 110-116.
- [3] 刘宏, 蒋再男, 刘业超. 空间机械臂技术发展综述[J]. 载人航天, 2015(5): 435-443.
LIU Hong, JIANG Zainan, LIU Yechao. Review of space manipulator technology[J]. Manned Spaceflight, 2015(5): 435-443.
- [4] PHAM C B, YEO S H, YANG Guilin. Workspace analysis and optimal design of cable-driven planar parallel manipulators[C]// Proc. of the 2004 IEEE Inter. Conf. on Robotics, Automation, and Mechatronics, 2004, Singapore. IEEE, 2004: 219-224.
- [5] ALBUS J, BOSTELMAN R, DAGALAKIS N. The NIST robocrane[J]. Journal of Robotic Systems, 1993, 10(5): 709-724.
- [6] 南仁东. 500m 球反射面射电望远镜 FAST[J]. 中国科学: G 辑, 2005, 35(5): 449-466.
NAN Rendong. 500m spherical reflector radio telescope FAST[J]. Science in China Ser. G, 2005, 35(5): 449-466.
- [7] LAFOURCADE P, LIBRE M, ROULET C. Design of a

- parallel wire-driven manipulator for wind tunnels[C]// Proceedings of the Workshop on Fundamental Issues and Future Directions for Parallel Mechanisms and Manipulators, October, 2002, Quebec City, Canada. Quebec: Kluwer Academic Publishers, 2002: 187-194.
- [8] WILLIAMS R L, GALLINA P. Planar cable-direct-driven robots: Design for wrench exertion[J]. Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications, 2002, 35(2): 203-219.
- [9] DIAO X, MA O. A method of verifying force-closure condition for general cable manipulators with seven cables[J]. Mechanism & Machine Theory, 2007, 42(12): 1563-1576.
- [10] VERHOEVEN R, HILLER M. Estimating the controllable workspace of tendon-based stewart platforms[J]. Advances in Robot Kinematics, 2000(1): 277-284.
- [11] BARRETTE G, GOSSELIN C M. Determination of the dynamic workspace of cable-driven planar parallel mechanisms[J]. Journal of Mechanical Design, 2005, 127(2): 242.
- [12] PHAM C B, YEO S H, YANG G, et al. Force-closure workspace analysis of cable-driven parallel mechanisms[J]. Mechanism & Machine Theory, 2006, 41(1): 53-69.
- [13] PHAM C B, YEO S H, YANG G, et al. Workspace analysis of fully restrained cable-driven manipulators[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2009, 57(9): 901-912.
- [14] DIAO X, MA O. Force-closure Analysis of 6-DOF cable manipulators with seven or more cables[J]. Robotica, 2009, 27(2): 209-215.
- [15] DIAO X, MA O. A method of verifying force-closure condition for general cable manipulators with seven cables[J]. Mechanism & Machine Theory, 2007, 42(12): 1563-1576.
- [16] LIM W B, YANG G, YEO S H, et al. A generic force-closure analysis algorithm for cable-driven parallel manipulators[J]. Mechanism & Machine Theory, 2011, 46(9): 1265-1275.
- [17] TANG X, TANG L, WANG J, et al. Workspace quality analysis and application for a completely restrained 3-Dof planar cable-driven parallel manipulator[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2013, 27(8): 2391-2399.
- [18] 张耀军, 张玉茹, 戴晓伟. 基于工作空间最大化的平面柔索驱动并联机构优化设计[J]. 机械工程学报, 2011, 47(13): 29-34.
- ZHANG Yaojun, ZHANG Yuru, DAI Xiaowei. Optimal design for planar cable-driven parallel mechanism with respect to maximizing workspace[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(13): 29-34.
- [19] 于亮亮, 仇原鹰, 苏宇. 高速柔索牵引摄像机器人动力工作空间研究[J]. 工程力学, 2013(11): 253-258.
- YU Liangliang, QIU Yuanying, SU Yu. Dynamic workspace of a high-speed cable-driven camera robot[J]. Engineering Mechanics, 2013(11): 253-258.
- [20] 张立勋, 宋达, 李来禄, 等. 柔索牵引式力觉交互机器人工作空间分析[J]. 宇航学报, 2018, 39(5): 103-111.
- ZHANG Lixun, SONG Da, LI Lailu, et al. Analysis of the workspace of flexible cable driven haptic interactive robot[J]. Journal of Astronautics, 2018, 39(5): 103-111.
- [21] 闫海江, 靳永强, 魏祥泉, 等. 国际空间站在轨服务技术验证发展分析[J]. 中国科学, 2018, 48(2): 185-199.
- YAN Haijiang, JIN Yongqiang, WEI Xiangquan, et al. Review of on-orbit servicing technique demonstrations on international space station and developments[J]. Sci. Sin. Tech., 2018, 48(2): 185-199.
- [22] VERHOEVEN R. Analysis of the workspace of tendon based stewart platforms[D]. Verlag Nicht Ermittlbar, 2004.
- [23] 欧阳波, 尚伟伟. 6 自由度绳索驱动并联机器人力封闭工作空间的快速求解方法[J]. 机械工程学报, 2013, 49(15): 34-41.
- OU Yangbo, SHANG Weiwei. Efficient Computation method of force-closure workspace for 6-DOF cable-driven parallel manipulators[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(15): 34-41.
- [24] 桑秀凤, 陈笋, 陈柏, 等. 绳驱动并联机器人绳索拉力及工作空间求解方法研究[J]. 应用科技, 2014, 41(4): 51-55.
- SANG Xiufeng, CHEN Sun, CHEN Bai, et al. Research of rope tension and workspace of wire-driven parallel robot[J]. Applied Science and Technology, 2014, 41(4): 51-55.
- [25] POTT A, BRUCKMANN T, MIKELSONS L. Closed-form force distribution for parallel wire robots[C]// Proceedings of the 5th International Workshop on Computational Kinematics. Duisburg, Germany, 2009: 25-34.

作者简介: 于金山, 男, 1994 年出生, 博士研究生。主要研究方向为绳索牵引并联机器人及运动控制。

E-mail: 18322518051@163.com

陶建国(通信作者), 男, 1964 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为宇航空间机构及控制、特种机器人。

E-mail: jgtao@hit.edu.cn