

## 考虑平台质心偏置的索并联系统性能优化

白孟轩<sup>1</sup>, 曾建江<sup>1</sup>, 陈强<sup>2</sup>, 郑茂盛<sup>1</sup>, 尤禄杰<sup>1</sup>, 陈建平<sup>1</sup>, 童明波<sup>1</sup>

(1. 南京航空航天大学航空学院, 南京 210016; 2. 北京特种工程设计研究院, 北京 100028)

**摘要:** 索并联系统力控工作空间(Force controllable workspace, FCWS)和系统刚度是索并联系统的重要性能, 当运动平台质心偏离其形心位置时会产生额外力矩, 对索并联系统性能产生不利的影响。为减轻质心偏置所造成的不利影响, 本文针对 36 索 6 自由度索并联系统提出了一种新的绳索布局, 通过分类最小方差法求解冗余索并联系统动力学方程, 进而计算 FCWS 并分析了各组绳索在空间各点上对 FCWS 的不利影响, 计算了索并联系统理论静刚度。根据质心是否发生偏置, 比较分析典型布局与新布局在索并联系统性能上的优劣。结果表明: 质心位于形心时, 两种布局 FCWS 相差不大; 当质心发生偏置时, 交叉布局 FCWS 比典型布局提升约 31.9%, 两种布局的平动刚度相差不大, 而交叉布局的扭转刚度相比典型布局得到了明显的提升, 验证了新布局在改善系统性能上的有效性。所得结论为索并联系统结构布置提供了一定参考。

**关键词:** 力控工作空间; 系统刚度; 索并联系统; 低重力试验模拟平台; 航天返回

中图分类号: V19

文献标志码: A

文章编号: 1005-2615(2025)02-0301-09

## Performance Optimization of Cable-Driven Parallel System Considering Center of Mass of Platform

BAI Mengxuan<sup>1</sup>, ZENG Jianjiang<sup>1</sup>, CHEN Qiang<sup>2</sup>, ZHENG Maosheng<sup>1</sup>, YOU Lujie<sup>1</sup>,  
CHEN Jianping<sup>1</sup>, TONG Mingbo<sup>1</sup>

(1. College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. Beijing Institute of Special Engineering Design and Research, Beijing 100028, China)

**Abstract:** Force controllable workspace (FCWS) and system stiffness are important performance of cable-driven parallel system. When the center of mass of movable platform deviates from its centroid position, extra torque will be generated, which adversely affects the performance of cable-driven parallel system. To reduce the adverse effects caused by centroid bias, a new cable layout is proposed for the 36-cable 6-DOF cable-driven parallel system, and the dynamics equation of the redundant cable-driven parallel system is solved by the classified minimum variance optimization. Then the FCWS is calculated and the adverse effects of each group of cables on FCWS at each point in space are analyzed, and the theoretical static stiffness of the cable-driven parallel system is calculated. According to whether the center of mass is biased or not, the advantages and disadvantages of the typical layout and the new layout in the cable-driven parallel system are compared and analyzed. The results show that when the center of mass is in the centroid, there is little difference in FCWS between the two layouts. When the center of mass is biased, the FCWS of the cross layout is about 31.9% higher than that of the typical layout, and the translational stiffness of the two layouts is not much different, while the torsional stiffness of the cross layout is significantly higher than that of the typical layout,

**基金项目:** 航空科学基金(20230023052001); 江苏高校优势学科建设工程(PAPD)。

**收稿日期:** 2024-07-19; **修订日期:** 2024-10-11

**通信作者:** 童明波, 男, 教授, 博士生导师, E-mail: tongw@nuaa.edu.cn。

**引用格式:** 白孟轩, 曾建江, 陈强, 等. 考虑平台质心偏置的索并联系统性能优化[J]. 南京航空航天大学学报(自然科学版), 2025, 57(2): 301-309. BAI Mengxuan, ZENG Jianjiang, CHEN Qiang, et al. Performance optimization of cable-driven parallel system considering center of mass of platform[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics (Natural Science Edition), 2025, 57(2): 301-309.

which verifies the effectiveness of the new layout in improving the system performance. The conclusion can provide some reference for the structure layout of the cable-driven parallel system.

**Key words:** force controllable workspace; system stiffness; cable-driven parallel system; low gravity simulation test platform; space recovery

随着深空探测技术的迅速发展,利用航天器实现地外天体着陆起飞任务越来越受到航天发达国家的关注与重视。其中,开展低重力模拟试验是保证探测任务完成的关键环节。低重力模拟的方法主要可以分为两大类,一类是真实低重力环境模拟,另一类为等效低重力环境模拟。真实低重力环境模拟包括落塔法<sup>[1]</sup>和抛物线飞行法<sup>[2]</sup>,创造真实的低重力模拟环境;等效低重力环境模拟主要包括水浮法<sup>[3]</sup>、气浮法<sup>[4]</sup>和悬吊法<sup>[5]</sup>,通过外力抵消部分重力实现低重力模拟环境。悬吊法是通过吊索牵引实验目标,利用吊索提供的拉力实现实验目标的重力补偿。根据模拟系统中是否含有电机、电缸等主动驱动器件,悬吊法可以分为被动悬吊法和主动悬吊法两种<sup>[6]</sup>。被动悬吊法一般通过配重块和滑轮组结构实现重力补偿,精度较低,系统的响应较慢,在实验目标快速运动时动态误差大。主动悬吊法是通过电机、电缸等主动元件进行闭环控制,跟随目标运动并且使吊索上的拉力波动保持在允许范围内,以得到更高的模拟精度和更快的响应速度。综合来讲,主动悬吊法在实现对载荷的跟随过程中控制精度高,模拟时长不受限制,能实现空间 6 自由度的低重力模拟,因此悬吊法在低重力模拟实现中得到了广泛的应用。

国外的悬吊法模拟装置尺寸较小,旨在为宇航员提供低重力环境模拟,进行低重力适应性训练,例如 NASA 的宇航员低重力模拟器 POGO<sup>[7]</sup>和宇航员主动响应微板系统 ARGOS<sup>[8]</sup>。国内的悬吊法低重力模拟装置不仅为宇航员提供训练<sup>[9]</sup>,也有针对大型航天器的着陆起飞过程低重力模拟,例如嫦娥三号探测器的地面验证技术,通过三维随动系统为航天器提供低重力环境,实现了航天器悬停、避障、缓速下降的地面实验验证<sup>[10]</sup>。嫦娥五号的地面验证技术除需完成上述嫦娥三号的任务外,还需进行起飞阶段的地面实验验证<sup>[11]</sup>。天问一号火星探测任务通过一次发射实现火星环绕、着陆和巡视探测。在火星着陆试验航天器<sup>[12]</sup>低重力模拟三维随动系统研制中,首次全系统应用了并联索驱动技术,有效提升了系统刚度<sup>[13-15]</sup>,如图 1 所示。

力控工作空间 (Force controllable workspace, FCWS) 是绳索系统末端执行器的工作空间,是绳索系统设计之初就要考虑的重要性能指标,直接决定了末端执行器的行程。然而,绳索作为典型的柔



图 1 中国火星探测任务低重力实验平台

Fig.1 Low gravity simulation test platform for Chinese Mars exploration mission

性体,极大程度上影响系统的六维刚度,影响系统 FCWS。因此,在保证绳驱系统刚度的基础上,增大 FCWS 是绳驱系统的另一研究重点。于金山等<sup>[16]</sup>为了提高一种面向在轨装配的索并联机构的工作性能,提出了变刚度控制算法,通过仿真与试验对变刚度算法进行了验证。张耀军等<sup>[17]</sup>对平面 4 柔索 3 自由度并联机构的力螺旋可行工作空间算法和柔索布局进行了研究。陈强等<sup>[15]</sup>对并联索系统分别采用封闭优化法、常规最小方差优化法及分类最小方差优化法对绳索张力进行优化,以期得到最大化的力控工作空间。Verhoeven 等<sup>[18-19]</sup>给出了机械臂驱动系统运动平台的刚度、可控工作空间、张力极限计算公式,并通过仿真计算 2 自由度机械手在可控空间内的刚度以及机械臂所承受的力。黄宁宁等<sup>[20]</sup>以可重构 3-转动副转动副转动副并联机器人为研究对象,提出了一种能够实现“点对点”路径跟踪的规划算法,使得机器人重构之后到达任意指定的位姿且不经过奇异位形。

此外,相较于小型的低重力模拟装置而言,面向航天器的大型低重力模拟系统中的系统刚度问题更加突出。为航天器提供低重力环境模拟的并联索系统一般采用两级调节<sup>[21]</sup>,即快速随动平台在并联索系统的驱动下在三维空间内做跟随运动,快速随动平台下部的水平随动装置在平台范围内的二维空间做跟随运动,这会引起快速随动平台与其下载荷整体的质心发生偏移。然而,现有并联索驱动系统的刚度研究没有考虑运动平台质心位于对称面外的情形。在此基础上,以柔索吊点布局优化为核心所开展的 FCWS 分析与索并联系统刚度

分析存在不准确、不充分、不具体的工程缺陷。为此,本文针对36索6自由度索并联系统运动平台质心偏置情况,提出了一种柔索布局方案。针对不满足FCWS的空间点,分析了各组绳索对其的不利影响。与典型布局相比,从FCWS和索并联系统刚度两个角度说明了本文的布局方案的合理性与优越性。

## 1 索并联系统张力模型

由于绳索受自身重力影响而呈悬链线状,故需对索并联系统施加预紧力。因此,一方面绳索张力由于柔索需要绷紧而存在预紧力下限 $T_{\min}$ ,另一方面绳索张力由于电机功率、绳索强度等原因的实际限制而存在上限值 $T_{\max}$ 。在该约束下又因为冗余驱动导致绳索张力解不唯一,且为保证运动平台平稳运行,需保证各个索的张力在满足上述上下限的条件下连续且平稳,有必要对张力解添加额外的约束方程。本文采用分类最小方差法对张力进行优化可以得到较好的FCWS,同时对冗余约束方程进行求解。

### 1.1 系统动力学约束方程

建立如图2所示坐标系,其中 $O_p-X_pY_pZ_p$ 为平台局部连体坐标系,坐标原点位于平台的几何对称中心, $Z_p$ 垂直向上。 $O-XYZ$ 为全局惯性坐标系,坐标原点位于地面上索并联系统的重心, $Z$ 轴垂直向上。

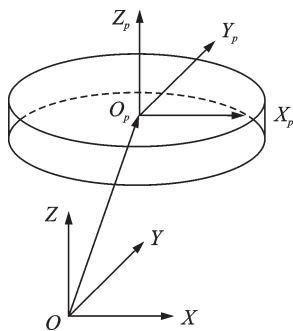


图2 全局坐标系与局部坐标系示意图

Fig.2 Schematic diagram of global coordinate system and local coordinate system

对于 $n$ 根绳索的系统,设其 $n$ 根绳索的拉力矢量矩阵为

$$T = (T_1 \ T_2 \ \cdots \ T_n)^T \quad (1)$$

运动平台所受到的合力与合力矩可以表示为

$$W = \begin{pmatrix} F \\ M \end{pmatrix} = JT = \begin{pmatrix} u_1 & u_2 & \cdots & u_n \\ r_1 \times u_1 & r_2 \times u_2 & \cdots & r_n \times u_n \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \\ \cdots \\ T_n \end{pmatrix}^T \quad (2)$$

式中: $W$ 表示系统的广义外力矩阵; $J$ 为与运动平

台位姿和索张力方向相关的结构矩阵; $u_i = (u_x \ u_y \ u_z)_i^T (i=1, 2, \cdots, n)$ 代表第 $i$ 根绳索的张力方向单位矢量; $r_i = (r_x \ r_y \ r_z)_i^T (i=1, 2, \cdots, n)$ 代表第 $i$ 根索力在运动平台上的作用点至平台局部坐标系的位置矢量; $F$ 和 $M$ 分别为运动平台受到的索力以外的合力和合力矩,在运动平台无转动,仅受重力的情况下,式(2)右端可简化为

$$\begin{pmatrix} F \\ M \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & m_0 g_z & m_0 y_c g_z & m_0 x_c g_z & 0 \end{pmatrix}^T \quad (3)$$

式中: $m_0$ 为运动平台质量, $g_z$ 为重力加速度, $C = (x_c \ y_c \ z_c)$ 为运动平台质心至平台局部坐标系 $O_p-X_pY_pZ_p$ 的位置矢量。

### 1.2 分类最小方差优化策略

本节采用分类最小方差优化策略对36根绳索的张力进行优化定解。将36根绳索按上、中、下分为3组,每组12根绳索,以各组绳索张力的方差最小为目标进行优化,使得到的各个索的张力平稳连续。基于最小方差优化方法可以得到优化的目标函数与约束关系如下

$$\min f(T) = \frac{1}{12} \left[ \sum_{i=1}^{12} \left( T_i - \frac{1}{12} \sum_{j=1}^{12} T_j \right)^2 \right] + \frac{1}{12} \left[ \sum_{i=13}^{24} \left( T_i - \frac{1}{12} \sum_{j=13}^{24} T_j \right)^2 \right] + \frac{1}{12} \left[ \sum_{i=25}^{36} \left( T_i - \frac{1}{12} \sum_{j=25}^{36} T_j \right)^2 \right] \quad (4)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} JT = W \\ T_{\min} \leq T \leq T_{\max} \end{cases} \quad (5)$$

综合上述方法,对FCWS的计算可按如图3所示的流程进行。

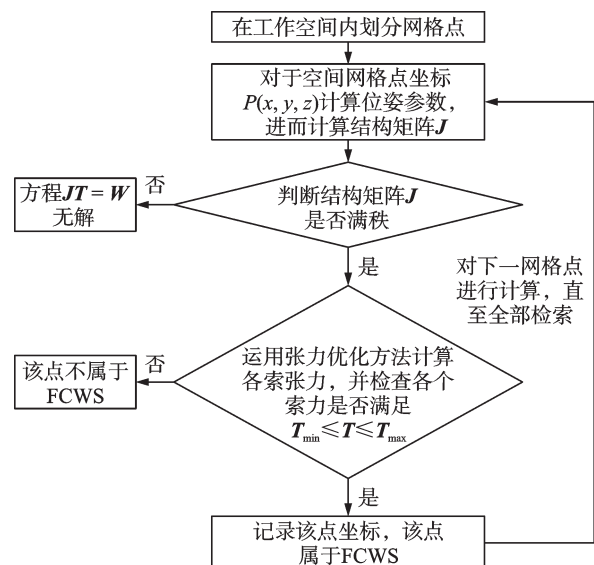


图3 FCWS计算流程图

Fig.3 FCWS calculation flow chart

## 2 索并联系统静刚度模型

建立静刚度理论计算模型,对并联索系统静刚度进行分析。设运动平台上任意一点相对于平台局部坐标系  $O_p-X_pY_pZ_p$  的位姿矢量为

$$S = (x^T \ \psi^T)^T = (x \ y \ z \ \phi_x \ \phi_y \ \phi_z)^T \quad (6)$$

式中:  $x = (x \ y \ z)^T$  为该点在局部坐标系位置的坐标矢量;  $\psi = (\phi_x \ \phi_y \ \phi_z)^T$  为动平台的姿态角矢量,其分量为 3 个欧拉角。索并联系统的静刚度满足如下关系

$$k = -\frac{dF}{dS} = -\frac{dJ}{dS}T - J\frac{dT}{dS} = k_1 + k_2 \quad (7)$$

由式(7)可以看出,刚度的计算可以分为两部分,即由平台位姿变化导致的结构矩阵变化产生的刚度  $k_1$  和由于平台位姿变化导致的索力变化产生的刚度  $k_2^{[22]}$ 。

### 2.1 位姿刚度

对  $k_1$  做如下展开

$$\begin{aligned} k_1 &= -\frac{dJ}{dS}T = \\ &= -r \times \frac{du}{d\psi} = \\ &= \frac{1}{L_c} \begin{pmatrix} r_y^2 + r_z^2 - (r_y u_z - r_z u_y)^2 & -r_x r_y - (r_y u_z - r_z u_y)(r_z u_x - r_x u_z) & -r_z r_x - (r_x u_y - r_y u_x)(r_y u_z - r_z u_y) \\ -r_x r_y - (r_y u_z - r_z u_y)(r_z u_x - r_x u_z) & r_x^2 + r_z^2 - (r_z u_x - r_x u_z)^2 & -r_z r_y - (r_x u_y - r_y u_x)(r_z u_x - r_x u_z) \\ -r_z r_x - (r_x u_y - r_y u_x)(r_y u_z - r_z u_y) & -r_z r_y - (r_x u_y - r_y u_x)(r_z u_x - r_x u_z) & r_x^2 + r_y^2 - (r_x u_y - r_y u_x)^2 \end{pmatrix} \\ &= -\frac{dr}{d\psi} \times u = \\ &= \begin{pmatrix} r_y u_y + r_z u_z & -r_x u_y & -r_x u_z \\ -r_y u_x & r_x u_x + r_z u_z & -r_y u_z \\ -r_z u_x & -r_z u_y & r_y u_y + r_x u_x \end{pmatrix} \quad (12) \end{aligned}$$

式中  $L_c$  为拉索矢量的模长,当拉索在预紧力作用下张紧时可近似为拉索两端的弦长。

### 2.2 位形刚度

对  $k_2$  做如下展开

$$\begin{aligned} k_2 &= -J \cdot \frac{dT}{dS} = -J \cdot \begin{pmatrix} \frac{dT_1}{dS} & \frac{dT_2}{dS} & \dots & \frac{dT_n}{dS} \end{pmatrix}^T = \\ &= -J \cdot \begin{pmatrix} \frac{dT_1}{dx} & \frac{dT_2}{dx} & \dots & \frac{dT_n}{dx} \\ \frac{dT_1}{d\psi} & \frac{dT_2}{d\psi} & \dots & \frac{dT_n}{d\psi} \end{pmatrix}^T = \\ &= J \cdot \begin{pmatrix} \nabla T_1 & \nabla T_2 & \dots & \nabla T_n \\ r_1 \times \nabla T_1 & r_2 \times \nabla T_2 & \dots & r_n \times \nabla T_n \end{pmatrix}^T \quad (13) \end{aligned}$$

对于本例中的冗余约束系统,施加预紧力的绳索为张紧状态,绳索的自重相对索张力可以忽略不计,绳索可近似为一条直线。索张力梯度值主要取

$$-\frac{d}{dS} \begin{pmatrix} u_1 & u_2 & \dots & u_n \\ r_1 \times u_1 & r_2 \times u_2 & \dots & r_n \times u_n \end{pmatrix} T = \sum_{i=1}^n \left[ -\frac{d}{dS} \begin{pmatrix} u \\ r \times u \end{pmatrix}_i T_i \right] \quad (8)$$

式(8)中右项满足

$$-\frac{d}{dS} \begin{pmatrix} u \\ r \times u \end{pmatrix}_i = \begin{pmatrix} -\frac{du}{dS} \\ -r \times \frac{du}{dS} - \frac{dr}{dS} \times u \end{pmatrix}_i = \begin{pmatrix} -\frac{du}{dx} & -\frac{du}{d\psi} \\ -r \times \frac{du}{dx} - \frac{dr}{dx} \times u & -r \times \frac{du}{d\psi} - \frac{dr}{d\psi} \times u \end{pmatrix}_i \quad (9)$$

为提高计算效率,本文计算重点关注六维刚度的主对角线元素,忽略耦合刚度的影响,故对主对角的子矩阵做进一步展开

$$-\frac{du}{dx} = \frac{1}{L_c} \begin{pmatrix} 1 - u_x^2 & -u_x u_y & -u_x u_z \\ -u_x u_y & 1 - u_y^2 & -u_y u_z \\ -u_x u_z & -u_y u_z & 1 - u_z^2 \end{pmatrix} \quad (10)$$

决于索的弹性模量  $E$ 、截面积  $A$  和长度  $L$ ,则

$$\begin{aligned} &\begin{pmatrix} \nabla T_1 & \nabla T_2 & \dots & \nabla T_n \\ r_1 \times \nabla T_1 & r_2 \times \nabla T_2 & \dots & r_n \times \nabla T_n \end{pmatrix}^T = \\ &\begin{pmatrix} -\frac{E_1 A_1}{L_1} u_1 & -\frac{E_2 A_2}{L_2} u_2 & \dots & -\frac{E_n A_n}{L_n} u_n \\ -\frac{E_1 A_1}{L_1} r_1 \times u_1 & -\frac{E_2 A_2}{L_2} r_2 \times u_2 & \dots & -\frac{E_n A_n}{L_n} r_n \times u_n \end{pmatrix}^T = \\ &= -\text{diag} \left( \frac{E_1 A_1}{L_1} \ \frac{E_2 A_2}{L_2} \ \dots \ \frac{E_n A_n}{L_n} \right) \cdot J^T \quad (14) \end{aligned}$$

因此,  $k_2$  可以根据已知量写成如下形式

$$\begin{aligned} k_2 &= -J \cdot \frac{dT}{dx} = \\ &= J \cdot \text{diag} \left( \frac{E_1 A_1}{L_1} \ \frac{E_2 A_2}{L_2} \ \dots \ \frac{E_n A_n}{L_n} \right) \cdot J^T \quad (15) \end{aligned}$$

## 3 数值算例

### 3.1 系统参数

本文研究的索并联机构采用冗余驱动的方式,运动平台分为上、中、下 3 组吊点,每个吊点由两根绳索连接至塔架的上、中、下吊点,并沿圆周方向均布 6 组这样的吊点。

索并联系统的几何参数如表 1 所示。

表 1 索并联系统几何参数

Table 1 Geometric parameters of cable-driven parallel system

| 几何参数                 | 数值       |
|----------------------|----------|
| 出绳点高度(上×中×下)/(m×m×m) | 114×75×5 |
| 运动平台尺寸(半径×高)/(m×m)   | 6×2.4    |

由于随动平台下部吊装的载荷在  $XY$  平面内运动,导致运动平台整体的质心与平台局部坐标系原点不重合。质心发生偏置会产生额外的力矩,这会对索并联系统的性能产生不利影响。本文研究质心位于两种位置时索并联系统的性能,即质心位于平台局部坐标系  $O_p-X_pY_pZ_p$  原点上和质心位于相较于平台局部坐标系  $(1,0,0)$  m 位置上,如图 4 所示。

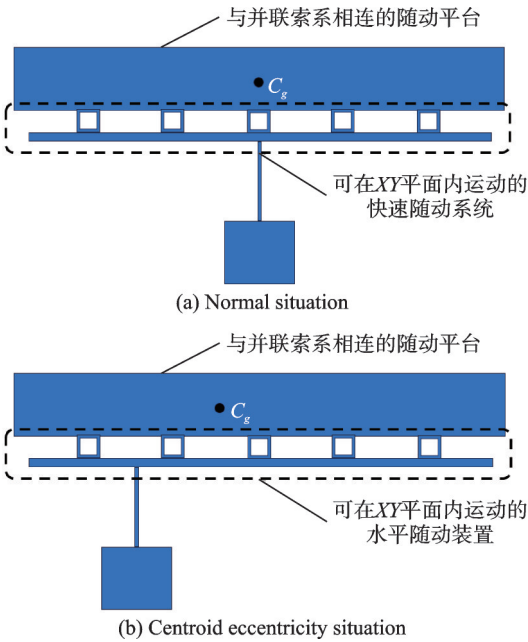


Fig.4 Schematic diagrams of the two kinds of the center of mass

本文对比研究两种绳索与运动平台铰接位置的空间布局对改善索并联系统性能的影响,两种绳索布局的简图如图 5 所示,前文提到沿圆周均布 6 组这样的吊点,图 5 中仅绘出 1 组吊点作为示意。

典型布局柔索由在运动平台上表面的吊点连接至塔架的上出绳点,如图 5(a)所示。在运动平台上圆周的吊点连接至塔架的中出绳点,在运动平台下圆周的吊点连接至塔架的下出绳点,如图 5(c)所示。运动平台上的每组出绳点相距 2 m。

在此基础上,本文设计了一种全新的交叉布局

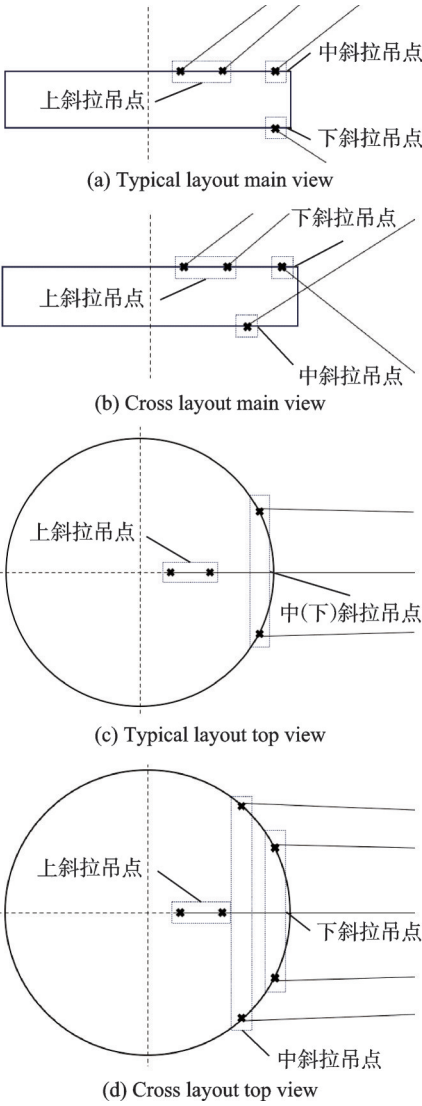


图 5 两种绳索布局示意图

Fig.5 Schematic diagrams of two kinds of cable layout

结构,该结构采用中下斜拉绳索交叉布置的方式,即运动平台上表面吊点的连接方式不变,上圆周的吊点连接至塔架的下出绳点,下圆周的吊点连接至塔架的中出绳点,如图 5(b)所示。故在其主视图上,中、下斜拉形成交叉布局,为避免干涉,下圆周的吊点间距略宽于上圆周的吊点间距,如图 5(d)所示。为引用方便,本文中依据出绳点在塔架上的 3 种高度将两种布局的绳索统一分为上斜拉、中斜拉、下斜拉 3 组。当运动平台存在初始扭转角时,采取一定的布局改进措施可以提升工作空间<sup>[23]</sup>。对本文来说,当运动平台连同其下面的载荷整体系统的质心偏离其对称面时会产生额外的力矩,保证结构具备更大的承载能力,改善索并联系统的动力学性能。后文将具体对两种结构 FCWS 域与静态刚度进行分析比较。

3.2 FCWS 计算

计算两种结构的 FCWS,预设工作空间以全局坐标系为基准,  $(\pm 10, \pm 10, 0)$ 、 $(\pm 10, \pm 10, 70)$  这 8 个点围成的长方体区域。网格点间距 2 m, 网格点总数为 3 751 个。圆盘质量 60 t, 张力优化范围  $[T_{\min} \ T_{\max}] = [1 \times 10^4 \ 8 \times 10^4] \text{N}$ , 不同情况下的 FCWS 计算如图 6 所示。

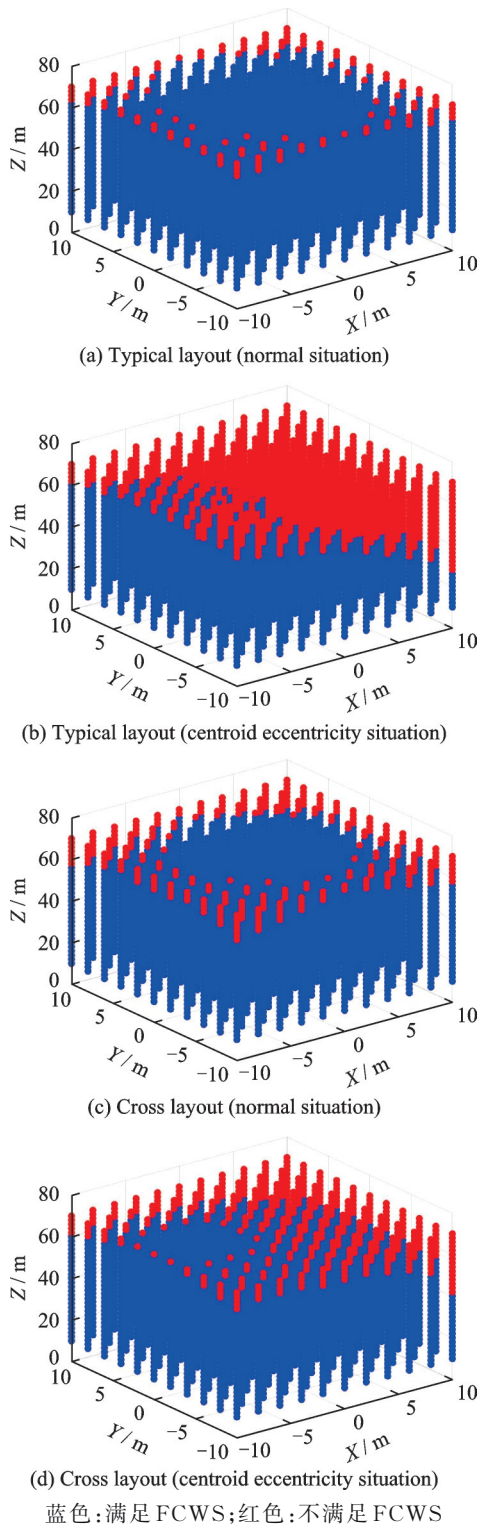


图 6 不同情况下的 FCWS

Fig.6 FCWS in different cases

统计各个情况下满足 FCWS 的点的数量如表 2 所示。

表 2 各工况满足 FCWS 的点数

Table 2 Number of FCWS satisfied in each case

| 布局形式 | 质心无偏置 | 质心偏置  |
|------|-------|-------|
| 典型布局 | 3 615 | 2 469 |
| 交叉布局 | 3 469 | 3 256 |

从表 2 中可以看出,对两种布局来说,质心偏置均会导致工作空间内满足 FCWS 的点减少,造成不利影响。当质心无偏置时,典型布局下的 FCWS 要略优于交叉布局,有效工作高度分别为 10~62 m 和 10~58 m,两者差距不大且危险点均出现在四周,这说明适当减小平面工作范围可以提升工作高度。而当质心偏置时,典型布局下满足 FCWS 的点减少约 31.7%,而交叉布局满足 FCWS 点的减少仅约 6.1%,有效工作高度范围分别为 10~28 m 和 10~40 m,这是由于质心偏置导致工作空间上的索力分布不对称引起的。在这种情况下,交叉布局的 FCWS 要远远大于典型布局且随着运动平台向质心偏移侧运动时,不满足 FCWS 的点大幅增加。此时,交叉布局下满足 FCWS 的点比典型布局提升约 31.9%。

观察到图 6 中危险点随质心偏移方向的规律分布,因此有必要对空间各点分析何组斜拉索力过大导致该点不满足 FCWS。为此,对数据做如下处理:对所有不满足 FCWS 的点,分别取上、中、下各组斜拉索力的最大值,将不满足 FCWS 的点的各组斜拉索力的最大值绘制点云图,如图 7 所示。

从图中可以看出,两种布局下,上斜拉索力随着高度的增加而增加,使顶层网格点无法满足 FCWS。四角区域的网格点由于中斜拉索力过大而不满足 FCWS。相比上斜拉,中斜拉索力在更低的高度上就开始不满足 FCWS,这是因为中斜拉索力与垂直方向的夹角随着高度的增加而增加得更快,需要更大的索力以提供垂直分量,维持系统平衡。由于质心偏置的存在,这一现象在靠近  $X = 10 \text{ m}$  处愈发明显。 $X > 0$  的网格点由于下斜拉索力过大而不满足 FCWS,且由于质心偏置的存在,越靠近  $X = 10 \text{ m}$  处,满足 FCWS 的高度上限越低。

相比典型布局,交叉布局的中、下斜拉索力可以提供更大的垂直分量,且由于力的作用线不通过

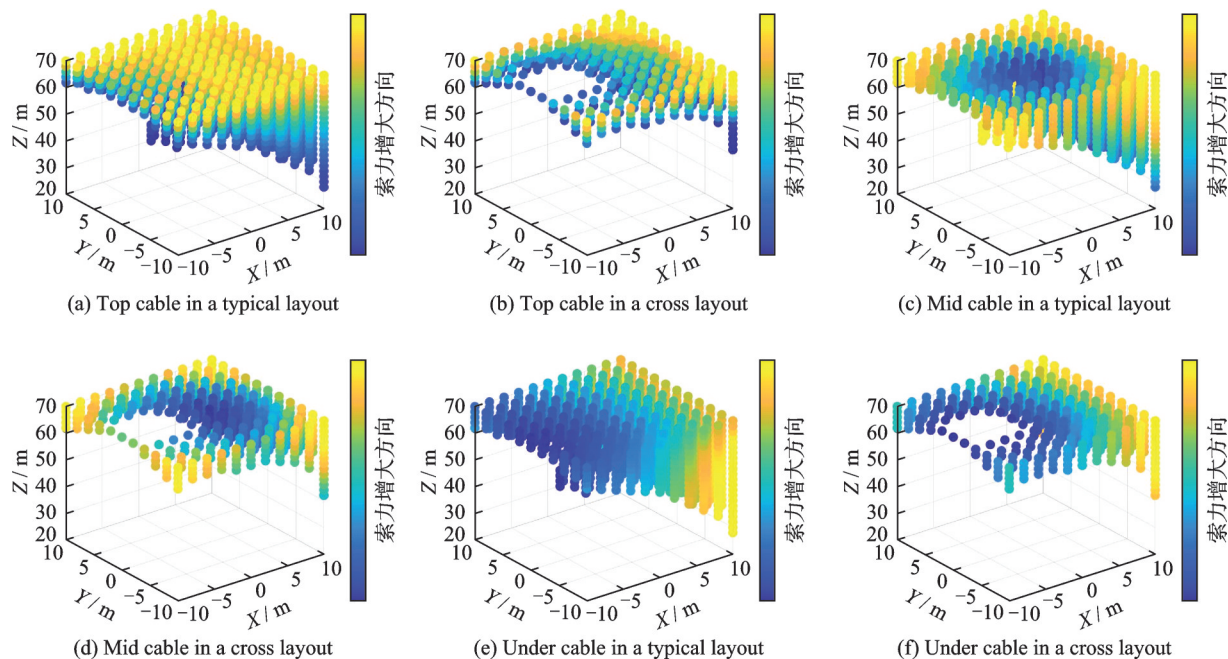


图7 质心偏置时不满足FCWS的点的各组斜拉索力的最大值  
Fig.7 Maximum cable forces for points of unsatisfying FCWS in centroid eccentricity situation

运动平台,可以更好地抵御外力矩。因此,上、中、下3组斜拉的危险点分布规律与典型布局类似,而其数量大幅减少。

### 3.3 索并联系统静刚度计算

进一步分析交叉布局相比典型布局抵抗外力矩的优越性,计算重心偏置时的索并联系统的六维刚度。由上述对FCWS的分析,在工作范围 $[10, 30]$  m高度内,计算各个高度上的最大、最小和平均刚度,如图8所示。

由图8(a,b)中可以看出,在X、Y方向的平动刚度上,两种布局的刚度随着高度的增加而减小,其中典型布局的刚度要整体大于交叉布局,这说明X、Y方向的平动刚度没有因布局而得到改善;由图8(c)可以看出,在Z方向的平动刚度上,两种布

局的刚度随着高度的增加而增加,交叉布局的刚度略大于典型布局。从整体来看,两种布局的3个平动方向刚度差距不大。

由图9(a,b)中可以看出,两种布局在沿X、Y轴向的扭转刚度随高度的增加而增加,且交叉布局的扭转刚度明显大于典型布局,这说明交叉布局相比典型布局在同样的张力优化条件下,可以更好地抵御绕X、Y轴方向的力矩,这与上述FCWS的计算结果相互印证。

由图9(c)表明,两种布局在绕Z轴的扭转刚度相差不大,且同一高度下最大、最小刚度相差较大,交叉布局的刚度略大于典型布局,本文中的交叉布局针对质心偏置情况设计,对Z轴的扭转刚度性能提升有限。

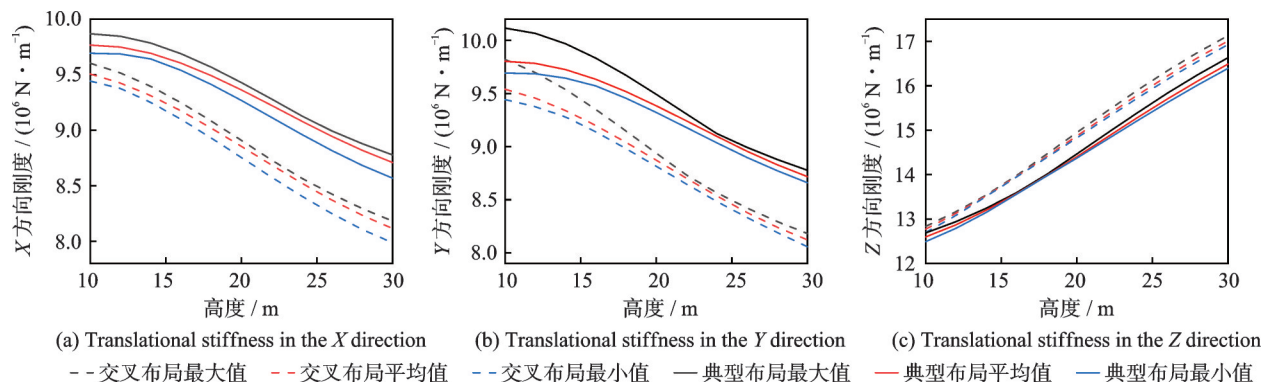


图8 平动刚度的最大、最小和平均值随高度变化曲线

Fig.8 Curves of maximum, minimum and average translational stiffness changing with height

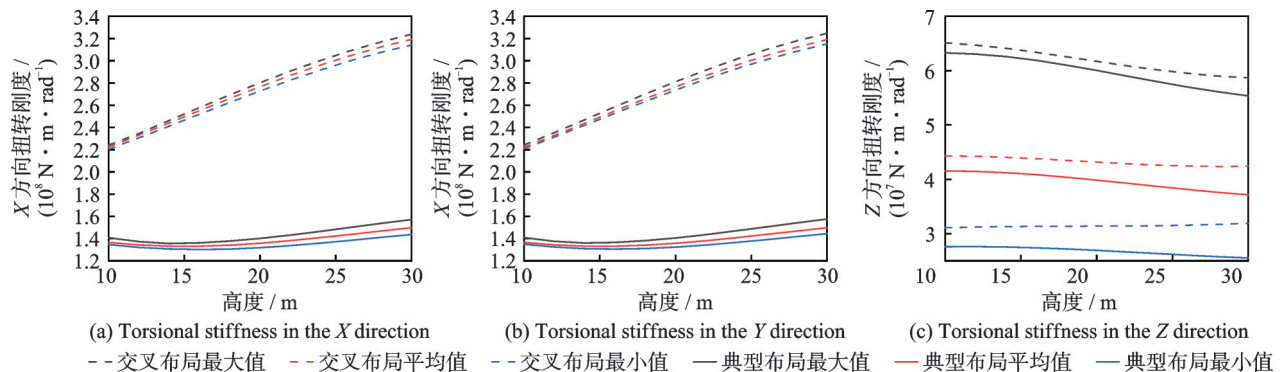


图9 扭转刚度的最大、最小和平均值随高度变化曲线

Fig.9 Curves of maximum, minimum and average torsional stiffness changing with height

## 4 结 论

为改善质心偏置对索并联系统的不利影响,本文提出了一种交叉绳索布局并对索并联系统性能进行了计算,结论如下:

(1)当质心无偏置时,典型布局下的FCWS要略优于交叉布局,两者差距不大,危险点均出现在四周。

(2)当质心发生偏置时,两种布局下索并联系统满足FCWS的点数均会降低。典型布局下满足FCWS的点减少约31.7%,交叉布局下满足FCWS的点减少仅约6.1%,此时,交叉布局下满足FCWS的点比典型布局提升约31.9%。

(3)在运动平台质心存在偏置时,索并联系统工作空间高度上限主要受上斜拉索影响,平面范围主要受中斜拉索影响,下斜拉索主要影响运动平台向其质心偏移侧的运动范围。

(4)当质心发生偏置时,两种布局的平动刚度相差不大,典型布局的X、Y方向的平动刚度略大于交叉布局;而交叉布局沿X、Y轴向的扭转刚度相比典型布局得到了明显的提升。两种布局在绕Z轴的扭转刚度相差不大。

综上所述,交叉布局在质心无偏置时的FCWS和质心偏置时的X、Y方向的平动刚度略差于典型布局,而在质心偏置时的FCWS和沿X、Y轴向的扭转刚度相较典型布局均有显著的提升。由此可见,质心偏置会影响索并联系统性能,而采取一定的优化布局结构措施可以有效减轻这一不利影响。

### 参考文献:

[1] CHEN C I, CHEN Y T, WU S C, et al. Experiment and simulation in design of the board-level drop testing tower apparatus[J]. *Experimental Techniques*, 2012, 36(2): 60-69.

[2] NICOLAU E, POVENTUD-ESTRADA C M, AR-

ROYO L, et al. Microgravity effects on the electrochemical oxidation of ammonia: A parabolic flight experiment[J]. *Electrochimica Acta*, 2012, 75: 88-93.

[3] GERNHARDT M, MACNEIL K. Underwater environment used to simulate moon's gravity in development of next generation spacesuit[R]. [S.l.]: Extravehicular Activity, 2008.

[4] SCHMITZ E. Modeling and control of a planar manipulator with an elastic forearm[C]//Proceedings of 1989 International Conference on Robotics and Automation. Scottsdale, AZ, USA: IEEE, 1989: 894-899.

[5] 刘振. 星球车单吊索重力补偿与实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.

LIU Zhen. Gravity compensation and experimental study of single sling of planetary vehicle[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.

[6] 高海波, 牛福亮, 刘振, 等. 悬吊式微低重力环境模拟技术研究现状与展望[J]. *航空学报*, 2021, 42(1): 523911.

GAO Haibo, NIU Fuliang, LIU Zhen, et al. Suspended micro-low gravity environment simulation technology: Status quo and prospect[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2021, 42(1): 523911.

[7] NORCROSS J R, CHAPPELL S, CLOWERS K G, et al. Characterization of partial gravity analog environments for extravehicular activity suit testing: NASA-TM2010-216139[R]. Washington, D C, USA: NASA, 2010.

[8] VALLE P S. Reduced gravity testing of robots (and humans) using the active response gravity offload system: JSC-CN-40487[R]. Washington, D C, USA: NASA, 2017.

[9] HUAN S, DENG H. Research on gravity compensation technology for extravehicular activity training facility[C]//Proceedings of the 15th International Conference on Man-Machine-Environment System Engineering. Berlin, Heidelberg: Springer, 2015: 355-363.

[10] 孙泽洲, 张焜, 贾阳, 等. 嫦娥三号探测器地面验证技术[J]. *中国科学: 技术科学*, 2014, 44(4): 369-

- 376.
- SUN Zezhou, ZHANG He, JIA Yang, et al. Ground validation technologies for Chang'E-3 lunar spacecraft[J]. *Scientia Sinica (Technologica)*, 2014, 44(4): 369-376.
- [11] 任德鹏, 李青, 张正峰, 等. 嫦娥五号探测器地面试验验证技术[J]. *中国科学: 技术科学*, 2021, 51(7): 778-787.
- REN Depeng, LI Qing, ZHANG Zhengfeng, et al. Ground-test validation technologies for Chang'e-5 lunar probe[J]. *Scientia Sinica (Technologica)*, 2021, 51(7): 778-787.
- [12] 饶伟, 孙泽洲, 董捷, 等. 天问一号火星进入、下降与着陆系统设计与实现[J]. *中国科学: 技术科学*, 2022, 52(8): 1162-1174.
- RAO Wei, SUN Zezhou, DONG Jie, et al. Design and implementation of the Mars entry, descent, and landing system for the Tianwen-1 mission[J]. *Scientia Sinica (Technologica)*, 2022, 52(8): 1162-1174.
- [13] 刘旺旺, 李茂登, 李涛, 等. 天问一号探测器火星着陆自主避障技术设计与验证[J]. *宇航学报*, 2022, 43(1): 46-55.
- LIU Wangwang, LI Maodeng, LI Tao, et al. Design and qualification of hazard detection and avoidance system for Tianwen-1 Mars landing mission[J]. *Journal of Astronautics*, 2022, 43(1): 46-55.
- [14] 董捷, 饶伟, 孙泽洲, 等. 火星着陆关键环节多学科交叉设计与验证[J]. *宇航学报*, 2022, 43(1): 21-29.
- DONG Jie, RAO Wei, SUN Zezhou, et al. Interdisciplinary design and validation for key phases of Martian landing missions[J]. *Journal of Astronautics*, 2022, 43(1): 21-29.
- [15] 陈强, 董强, 黄科, 等. 低重力模拟试验平台索并联驱动系统张力优化策略[J]. *航天返回与遥感*, 2020, 41(6): 66-76.
- CHEN Qiang, DONG Qiang, HUANG Ke, et al. Tension optimization strategy research of the wire-driven parallel system of low gravity simulation platform[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2020, 41(6): 66-76.
- [16] 于金山, 李潇, 王国星, 等. 面向在轨装配的冗余索并联机构变刚度控制[J]. *光学精密工程*, 2021, 29(12): 2832.
- YU Jinshan, LI Xiao, WANG Guoxing, et al. Variable stiffness control of redundant cable-driven parallel mechanism for on-orbit assembly[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2021, 29(12): 2832.
- [17] 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.
- [18] VERHOEVEN R, HILLER M, TADOKORO S. Workspace, stiffness, singularities and classification of tendon-driven Stewart platforms[M]//*Advances in Robot Kinematics: Analysis and Control*. Dordrecht: Springer, 1998: 105-114.
- [19] VERHOEVEN R. Analysis of the workspace of tendon-based Stewart platforms[D]. [S.l.]: University of Duisburg-Essen, 2004.
- [20] 黄宁宁, 尤晶晶, 王澍声, 等. 可重构3-RRR并联机器人的“点对点”路径规划[J]. *南京航空航天大学学报*, 2024, 56(3): 415-423.
- HUANG Ningning, YOU Jingjing, WANG Shusheng, et al. "Point-to-point" path planning for reconfigurable 3-RRR parallel robots[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2024, 56(3): 415-423.
- [21] 董强, 陈强, 黄科, 等. 航天器低重力模拟试验平台三维随动系统[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2023, 63(3): 449-460.
- DONG Qiang, CHEN Qiang, HUANG Ke, et al. A three-dimensional follow-up system for a spacecraft low-gravity simulation test platform[J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2023, 63(3): 449-460.
- [22] 李辉, 朱文白. 柔索牵引并联机构的静刚度分析[J]. *机械工程学报*, 2010, 46(3): 8-16.
- LI Hui, ZHU Wenbai. Static stiffness analysis of flexible-cable-driven parallel mechanism[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46(3): 8-16.
- [23] 张立勋, 宋达, 李来禄, 等. 柔索驱动并联机构工作空间算法与布局优化[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2018, 39(12): 2017-2024.
- ZHANG Lixun, SONG Da, LI Lailu, et al. Workspace algorithm and layout optimization of parallel mechanisms driven by flexible cables[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2018, 39(12): 2017-2024.