

基于运动学分配性能的并联机构优化设计*

张立杰^{1,2} 郭菲^{1,2} 李永泉² 马亚磊^{1,2}

(1. 燕山大学河北省重型机械流体动力传输与控制实验室, 秦皇岛 066004;

2. 燕山大学先进锻压成形技术与科学教育部重点实验室, 秦皇岛 066004)

摘要: 根据给定的并联机构末端执行器的任务要求, 在其结构参数优化设计中, 为保证各分支运动学传递性能相对均较优, 利用离差的性质, 定义了局域和全域运动(速度)、力及功率分配性能指标, 以此反映各分支共同承担负载要求的能力。对于单驱动分支功率输出, 探讨了速度和力两个可变的物理量对功率的作用大小, 并定义了运动、力作用系数, 以此对机构的工作空间进行了分析。最后以用作姿态调整部件的3-RPS空间并联机构为例, 对上述指标进行了详细的求解, 在改进的设计空间中叠加性能图谱, 优化了机构的结构参数尺寸, 同时求出了相应的工作空间。

关键词: 并联机构 分配指标 性能图谱 优化设计

中图分类号: TH112.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)04-0365-07

Optimum Design of Parallel Mechanism Based on Kinematics Distribution Performance

Zhang Lijie^{1,2} Guo Fei^{1,2} Li Yongquan² Ma Yalei^{1,2}

(1. Hebei Provincial Key Laboratory of Heavy Machinery Fluid Power Transmission and Control, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China

2. Key Laboratory of Advanced Forging & Stamping Technology and Science, Ministry of Education, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: According to the requirement of a given parallel mechanism end actuator and to make sure that kinematics transmission performance of each branch is relatively better in optimum design of its structure parameters, local and global motion (speed), force and power distribution performance indicators were defined by using the character of dispersion, which reflected the ability of branch to share the load requirements. For a single drive branch power output, the effect of speed and force was discussed which were both variable physical quantities on power, and the movement and force coefficient were defined. The workspace of parallel mechanism was analyzed by using those parameters. Finally the 3-RPS parallel mechanism for attitude adjustment components was used as an example. And a detailed solution to the above indicators was developed. Performance atlas in the modified design space was overlaid, the structural parameters of the mechanism were optimized and the corresponding workspace was found out. The motion, force and power distribution performance indicators can be further applied to the performance analysis of other parallel mechanisms, as well as to guide optimization design of parameters. Each branch of the parallel mechanism obtained through this optimization method has good power, motion and force transmission performance. This sets the foundation for the kinematics and dynamics analysis of parallel mechanism.

Key words: Parallel mechanism Distribution index Performance atlas Optimum design

收稿日期: 2014-05-19 修回日期: 2014-07-01

* 国家自然科学基金资助项目(51275438)和河北省自然科学基金资助项目(E20111203214)

作者简介: 张立杰, 教授, 博士生导师, 主要从事并联机构及机器人技术研究, E-mail: Ljzhang@ysu.edu.cn

引言

并联机构的运动性能分析是其尺度优化的前提,多年来国内外众多学者专注于研究并联机构的运动学性能,并提出了许多相应的性能指标。众所周知,并联机构的主要作用就是在驱动器与末端执行器之间传递运动和力。

基于许多学者的观点^[1-7],能够反映并联机构运动和力学传递性能,同时对于转动和移动又是单位不变的物理量——功率,被许多学者应用到并联机构的运动性能分析中^[8-14]。

现有的并联机构运动学指标大多着眼于给定输入,映射到末端执行器,从而评价机构传递运动和力的能力。而对于多数实际应用的并联机构,其末端执行器的工作要求往往是给定的,如完成指定动作(抓取、移动等)、沿着指定轨迹运动或满足一定的承重要求等,然后以此来选择满足要求的驱动器,从而完成机构的设计。

本文根据末端执行器任务要求,利用离差概念,分析机构各分支功率输入情况,定义局域、全域分配性能指标,指导机构的优化设计。同时,对共同作用于功率的两个物理变量力(矩)和(角)速度进行探讨,定义运动、力作用系数,衡量它们的作用大小。最后基于上述性能指标对用作姿态调整部件的3-RPS空间并联机构进行尺寸参数优化,并得到优化后机构的工作空间。

1 并联机构运动、力及功率分配性能指标

在电力系统中,欲知某个负荷的供电成本时,需要了解这个负荷是由哪些电源供给功率的,利用功率分解潮流概念,对不同电源提供的功率进行分析计算以确定成本。本文将电学中功率分解概念引申到机构运动学中,定义功率分配的概念。

1.1 功率分配的概念

若并联机构有 n 个分支,每个分支有且仅有一个驱动副,且已知动平台或末端执行器输出广义速度为 $\mathbf{V} = (\mathbf{v}, \boldsymbol{\omega})^T$ 、广义力为 $\mathbf{F} = (\mathbf{f}, \mathbf{m})^T$,则机构输入运动 $\dot{\mathbf{q}} = (\dot{q}_1, \dot{q}_2, \dots, \dot{q}_n)^T = \mathbf{J}^{-1} \mathbf{V}$ 、输入力 $\boldsymbol{\tau} = (\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n)^T = \mathbf{J}^T \mathbf{F}$,其中, \mathbf{J} 为机构运动雅可比矩阵。

机构总输入、输出功率分别为

$$P_{\text{in}} = \sum_{i=1}^n p_i = \sum_{i=1}^n \tau_i \dot{q}_i = \boldsymbol{\tau}^T \dot{\mathbf{q}}$$

$$P_{\text{out}} = \mathbf{F}^T \mathbf{V}$$

根据机构输入、输出运动/力之间的映射关系,忽略摩擦、关节间隙等因素,得到输入功率与输出功

率之间关系

$$P_{\text{in}} = \boldsymbol{\tau}^T \dot{\mathbf{q}} = (\mathbf{J}^T \mathbf{F})^T (\mathbf{J}^{-1} \mathbf{V}) = \mathbf{F}^T \mathbf{J} \mathbf{J}^{-1} \mathbf{V} = \mathbf{F}^T \mathbf{V} = P_{\text{out}}$$

由此可以看出,机构输出功率为各分支输入功率之和,即 $P_{\text{out}} = \sum_{i=1}^n p_i$ 。

定义功率分配的概念,在给定机构特定任务要求下,分析一定功率输出时,各分支功率的分配输入情况。探讨各分支间功率分配的离散程度,判断机构分支共同承担要求负载的能力,并由此定义功率分配性能指标。

1.2 局域功率分配性能指标

已知动平台输出的总功率 P_{out} ,功率分配满足叠加的概念,则 n 个分支输入的平均功率 p_e ,即

$$p_e = P_{\text{out}}/n \quad (1)$$

采用离差的均值 $\sigma_n(p)$ 来表征各分支输入的实际功率 $p_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 与平均功率 p_e 的偏离程度,即

$$\sigma_n(p) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |p_i - p_e| \quad (2)$$

式中, $\sigma_n(p) \in [0, +\infty)$ 。

令 $\sigma_p = e^{-\sigma_n(p)}$ (3)

式中, $0 < \sigma_p \leq 1$ 。

容易看出, $\sigma_n(p)$ 值越接近于 0,即 σ_p 值越接近于 1 时,机构各分支输入的实际功率越集中于平均功率,也就是各分支驱动输入之间偏差越小,此时机构各分支共同承担要求负载的能力越好、功率传递性能较好,即可认为机构具有良好的功率分配性能。而当 σ_p 值越小时,各分支之间的偏差越大,说明需要各分支提供驱动能力的差别越大,有可能降低某些驱动器的使用寿命,不利于机构的长期使用。定义 σ_p 为局域功率分配性能指标。

1.3 局域运动、力分配性能指标

局域功率分配性能指标体现机构运动和力综合作用的结果,现分别考虑机构分支间输入运动和力的关系。根据 1.2 节中定义的机构局域功率分配指标,可分别得到局域运动分配指标 σ_m 、局域力分配指标 σ_f 为

$$\sigma_n(m) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\dot{q}_i - \dot{q}_e| \quad (4)$$

$$\sigma_m = e^{-\sigma_n(m)} \quad (5)$$

$$\sigma_n(f) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\tau_i - \tau_e| \quad (6)$$

$$\sigma_f = e^{-\sigma_n(f)} \quad (7)$$

其中

$$\dot{q}_e = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \dot{q}_i \quad \tau_e = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \tau_i$$

对于具有混合驱动(同时具有移动和转动驱动)的并联机构,分析其 σ_m 和 σ_f 时,首先应对具有不同量纲输入物理量进行无量纲化处理。设机构 n 个驱动中有 m 个为转动驱动 $\dot{\theta}_j(j=1,2,\dots,m)$,其余 $n-m$ 个为移动驱动 $\dot{l}_i(i=1,2,\dots,n-m)$,得无量纲速度输入

$$\begin{cases} \hat{l}_i = \dot{l}_i / \bar{l}_i \\ \hat{\theta}_j = \dot{\theta}_j / \bar{\theta}_j \end{cases}$$

式中 $\bar{l}_i, \bar{\theta}_j$ ——各驱动器的额定驱动能力

则 $\hat{q} = (\hat{l}, \hat{\theta})^T$

机构平均运动输入为

$$\hat{q}_e = \left(\sum_{i=1}^{n-m} \hat{l}_i + \sum_{j=1}^m \hat{\theta}_j \right) / n$$

参照式(4)和式(5),得到混合驱动并联机构局域运动分配指标

$$\hat{\sigma}_n(m) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n |\hat{q}_k - \hat{q}_e| \quad (8)$$

$$\sigma_m = e^{-\hat{\sigma}_n(m)} \quad (9)$$

同理将驱动力和力矩无量纲化,可以得到混合驱动输入的局域力分配指标

$$\hat{\sigma}_n(f) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n |\hat{\tau}_k - \hat{\tau}_e| \quad (10)$$

$$\sigma_f = e^{-\hat{\sigma}_n(f)} \quad (11)$$

利用局域功率分配性能指标、局域运动分配指标和局域力分配指标评价并联机构在工作空间各个位姿点的功率、运动和力分配性能。

1.4 全域功率、运动及力分配性能指标

局域分配性能指标随着并联机构形位的不同而变化,即在并联机构工作空间内不同的点,其值是不同的,不能全面评价不同尺寸参数的同一类机构,因此利用 Gosselin 等^[15]在工作空间基础上提出的全域条件指标(Global conditioning index)的概念,得到全域功率分配性能指标 η_p 、全域运动分配性能指标 η_m 以及全域力分配性能指标 η_f 为

$$\eta_p = \frac{\int_W \sigma_p dW}{\int_W dW} \quad (12)$$

$$\eta_m = \frac{\int_W \sigma_m dW}{\int_W dW} \quad (13)$$

$$\eta_f = \frac{\int_W \sigma_f dW}{\int_W dW} \quad (14)$$

式中 W ——并联机构的可达工作空间

$0 < \eta_p, \eta_m, \eta_f \leq 1$, 3 个指标值越大,并联机构的功率、运动和力的分配性能越好。在对并联机构的参数优化设计中,可以根据全域性能指标绘制图谱,叠加性能图谱,利用寻找性能相对最优区域的办法对机构进行结构参数优化设计。

2 运动、力作用系数

2.1 作用系数定义

对于给定或优化后机构,考虑第 $i(i=1,2,\dots,n)$ 个分支驱动器产生的功率为 p_i ,共同作用的运动 \dot{q}_i 和力 τ_i 可分为以下两种情况:

(1) \dot{q}_i 和 τ_i 处于合理范围内时,功率为

$$p_i = \lim_{\substack{\dot{q}_i \rightarrow a \\ \tau_i \rightarrow b}} (\tau_i \dot{q}_i)$$

其中, $a \in [\lambda_1, \lambda_2], b \in [\gamma_1, \gamma_2]$, 分别为运动、力的合理取值范围。

(2) \dot{q}_i 和 f_i 趋近于极限时,功率为

$$p_i = \lim_{\substack{\dot{q}_i \rightarrow +\infty \\ \tau_i \rightarrow 0}} (\tau_i \dot{q}_i)$$

$$p_i = \lim_{\substack{\dot{q}_i \rightarrow 0 \\ \tau_i \rightarrow +\infty}} (\tau_i \dot{q}_i)$$

当出现上述第 2 种情况时,所需的驱动能力超过了驱动器极限,使机构不能正常平稳的运行。因此在工作空间内应尽量避免发生第 2 种情况的工作位置,本文利用运动、力作用系数对工作空间进行判别,首先定义了运动、力作用系数。

对运动和力进行无量纲化处理同 1.3 节,得到功率无量纲表达式为

$$\hat{p}_i = \hat{\tau}_i \hat{q}_i = \frac{1}{\kappa_i} \hat{\tau}_i \kappa_i \hat{q}_i \quad (15)$$

式中 κ_i ——运动作用系数 $\frac{1}{\kappa_i}$ ——力作用系数

根据 $\hat{\tau}_i$ 和 \hat{q}_i 的相对变化,令

$$\kappa_i = \sqrt{\frac{\hat{q}_i}{\hat{\tau}_i}} \quad (16)$$

根据第 2 种情况,当 κ_i 趋近于极大或者极小值时,机构驱动性能变差,产生奇异;当 κ_i 较大时,机构高速小扭矩驱动; κ_i 较小时,机构低速大扭矩驱动。根据 κ_i 值的变化情况,对工作空间分类,以避免工作空间内驱动性能较差的位置点。

2.2 运动、力作用系数算例分析

对于如图 1 所示简单的平面 5R 对称并联机构,在负载及工作性能要求下,令机构 y 方向输出单位力及运动。根据运动学反解及式(16)分别计算出 2 个驱动分支运动、力作用系数,并得到相应的图

谱曲线,如图2所示。

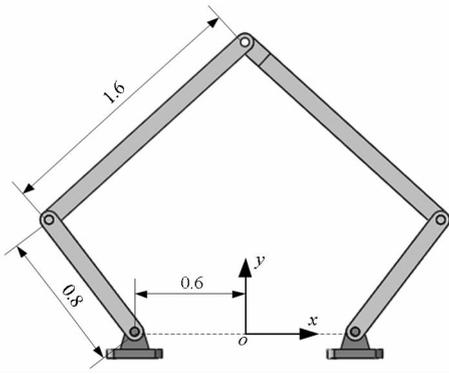


图1 平面5R并联机器人
Fig.1 Planar 5R parallel robot

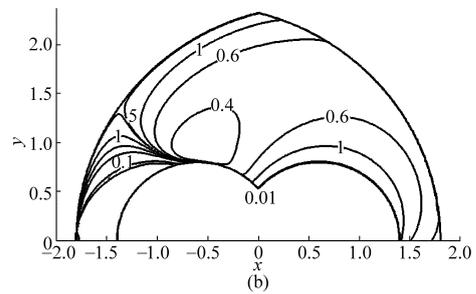
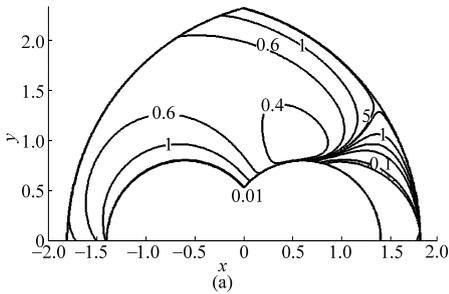


图2 平面5R并联机构运动作用系数

Fig.2 Planar 5R parallel mechanism motion effect coefficient
(a) 分支 A_1B_1P 运动作用系数 κ_1 (b) 分支 A_2B_2P 运动作用系数 κ_2

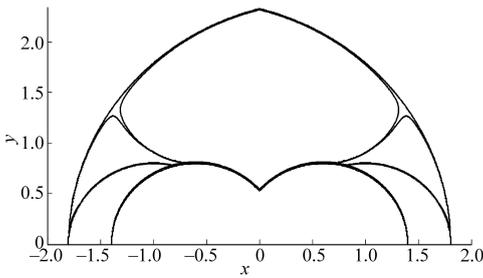


图3 平面5R并联机器人较差工作轨迹

Fig.3 Planar 5R parallel robot with poor working trajectory

由于力作用系数均为运动作用系数的倒数,其图形可直接画出,这里不再详细描述。由图2可以看出,对于此任务要求,机构两分支的运动作用系数关于工作空间 $x=0$ 相互对称,这同该机构对称性的结构特点相对应。再者,根据2个图谱中 κ_i 值的变化情况,找出 κ_i 值突变所对应的机构工作空间区域,在此区域中,机构的驱动性能较差,绘制相应的较差工作轨迹如图3所示。

图3所示的较差工作轨迹同文献[16]中该机构的奇异轨迹相同,证明了利用运动、力作用系数可以判别机构工作空间内的性能。此机构在工作时,需避开图示轨迹,以免影响机构的正常工作。

3 空间3-RPS并联机构参数优化设计

空间3-RPS并联机构执行部件既可以进行空间运动控制也可以用于末端部件的姿态调整,因此常用在大型曲面工件的垂直钻铆加工^[17]和汽车模拟器^[18]等方面。现利用运动、力及功率分配性能指标对空间3-RPS并联机构进行参数优化设计。

3.1 空间3-RPS并联机构及设计空间建立

空间3-RPS并联机构如图4所示,动平台通过3个相同的RPS分支连接到静平台,构建坐标系系统,定坐标系 $oxyz$ 原点位于静平台中心, x 轴指向转动副 A_1 , z 轴垂直于静平台平面。动坐标系 $px_1y_1z_1$ 的原点位于动平台中心, x_1 轴指向球副 B_1 , z_1 轴垂直于动平台平面。其中动、静平台分别是外接圆半径为 r 和 R 的等边三角形,第 i ($i=1,2,3$) 连杆的转动副表

示为 A_i ,球副表示为 B_i ,移动副杆长表示为 l_i 。

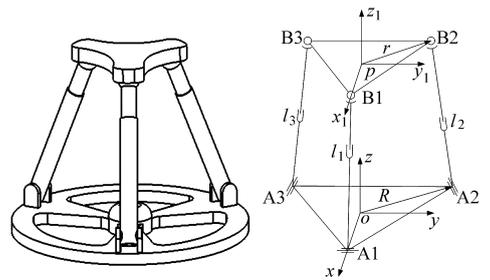


图4 空间3-RPS并联机构

Fig.4 3-RPS spatial parallel manipulator

基于设计空间理论^[19]建立3-RPS空间并联机构的设计空间,考虑该机构的尺寸参数特点对设计空间进行改进,可更加合理地表示机构的全部尺寸。

3-RPS机构的主要结构尺寸有:动平台半径 r ,静平台半径 R 及连杆长度 l 。但是由于 l 在机构运动过程中是一直变化的,难以确定其大小。而动平台高度 z_p 是由连杆长度确定的,所以采用 z_p 作为机构的参数,构建其设计空间。定义

$$M = \frac{r + R + z_p}{3}$$

有
$$r_1 = \frac{R}{M} \quad r_2 = \frac{r}{M} \quad r_3 = \frac{z_p}{M}$$

r_i 为无量纲参数,在实际机构参数选择时,只需要对 r_i 共同乘以放大系数 M ,便可以得到所需的尺

寸参数。可得

$$r_1 + r_2 + r_3 = 3$$

由于机构的动平台尺寸一般小于静平台尺寸，且为了使机构灵活运动，动平台半径与高度之和应大于静平台半径，因此 r_i 的约束关系为

$$\begin{cases} 0 < r_1, r_2, r_3 < 3 \\ r_2 < r_1 \\ r_2 + r_3 > r_1 \end{cases}$$

以 r_1, r_2, r_3 为坐标轴即可绘制出该机构的设计空间模型，如图 5a 所示，将其转换到二维 oxy 平面中，如图 5b 所示。其转换关系为

$$\begin{cases} x = \frac{2}{\sqrt{3}}r_1 + \frac{1}{\sqrt{3}}r_2 \\ y = r_2 \end{cases} \quad (17)$$

令 $D = r_2/r_1$ (18)

$D = 1$ ，即机构的动平台尺寸与静平台尺寸相等时，在设计空间中表示为直线段 CB 。由于 r_i 是无量纲参数，线段 CB 上的点表示机构动平台与静平台尺寸相等时，动平台运动的高度范围。改变式 (18) 中的 D 可以得到其余动静平台尺寸比例与运动高度范围关系，如图 6 所示。

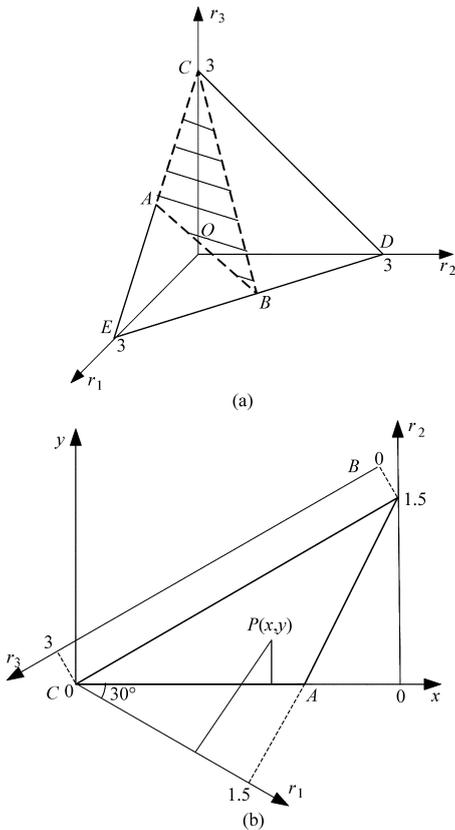


图5 设计空间

Fig.5 Design space

(a) 立体图 (b) 平面图

3.2 性能图谱

假设给定空间 3-RPS 并联机构工作任务要求为

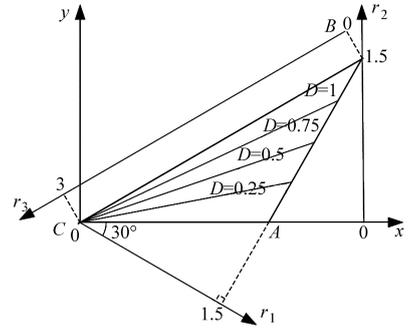


图6 改进的设计空间

Fig.6 Improved design space

输出单位运动和力，即 $V = [0 \ 0 \ 1; \ 1 \ 0 \ 0]^T$ 、 $F = [0 \ 0 \ 1; \ 1 \ 1 \ 0]^T$ ，参照文献 [20] 求出其一阶影响系数矩阵即运动雅可比矩阵 J ，从而求出 3 个分支输入运动 $\dot{q} = [\dot{l}_1 \ \dot{l}_2 \ \dot{l}_3]^T$ 和输入力 $\tau = [f_1 \ f_2 \ f_3]^T$ 。根据式 (2) ~ (7) 及式 (12) ~ (14)，求出 3-RPS 机构的全域功率分配性能指标、全域运动分配性能指标以及全域力分配性能指标，并在设计空间中绘制相应的性能图谱，如图 7 所示。

3.3 优化设计

传统的并联机构优化方法首先确定机构的主要尺寸，如动平台和静平台的尺寸、连杆长度等，然后根据连杆长度得到机构工作空间，再计算优化指标，并进行尺寸调整。由于机构的工作空间与机构连杆长度参数密切相关，这种方法在优化过程中会产生连杆长度和工作空间耦合变化的情况，很难得到同时具有较大的工作空间和良好的性能指标的尺寸参数。

根据 3-RPS 机构的运动性质及改进的设计空间，提出一种新的优化方法，即首先优化机构的动静平台参数及动平台运动高度范围，保证机构的工作空间和性能指标，再求解机构的连杆长度。其优化过程如下：

(1) 优化参数确定。

3-RPS 空间并联机构的主要结构参数有动平台半径 r ，静平台半径 R 及连杆长度 l ，对他们进行无量纲化处理表示为 r_1, r_2, r_3 。

(2) 基于设计空间的性能图谱叠加^[19]，找出满足要求的目标尺寸区域。

这里假设期望 $\eta_p > 0.5$ 、 $\eta_f > 0.68$ 、 $\eta_m > 0.58$ ，叠加 3 个性能图谱并表示在图 6 所示的改进设计空间中，找到满足要求的目标尺寸区域，如图 8 阴影区域所示。

(3) 确定机构平台尺寸及运动高度范围。

在目标尺寸区域中选择任意被该区域截取的关于参数 D 的线段为优化线段，由于动平台为运动部

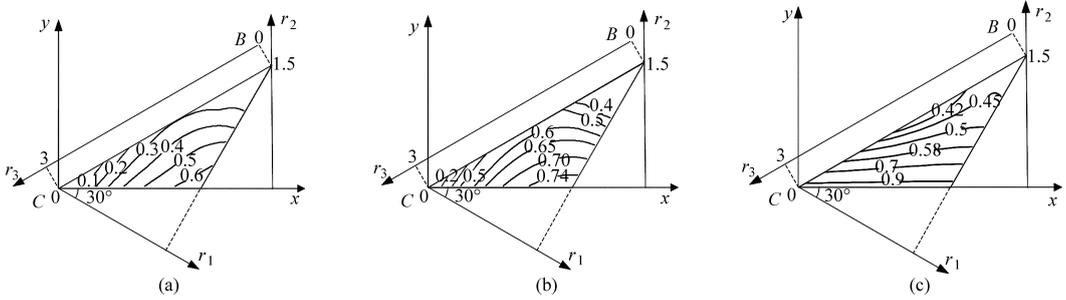


图7 空间3-RPS并联机构全域分配性能图谱

Fig. 7 Global distribution performance atlas for 3-RPS spatial parallel manipulator

(a) 全域功率分配性能指标图谱 (b) 全域力分配性能指标图谱 (c) 全域运动分配性能指标图谱

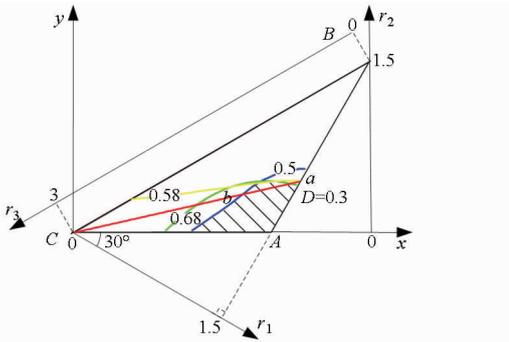


图8 目标尺寸区域(阴影部分)

Fig. 8 Size of a target region (shaded)

件不宜过小,因此在这里选取直线 $D = 0.25$ 被截取的线段 ab , 线段坐标为: $a(r_1 = 1.44, r_2 = 0.43, r_3 = 1.13)$, $b(r_1 = 1.12, r_2 = 0.34, r_3 = 1.54)$ 。此时机构的动静平台尺寸比为 $\frac{r_2}{r_1} = D = 0.3$, 动平台运动高度与静平台尺寸比在 $\frac{r_{3a}}{r_{1a}} = \frac{1.13}{1.44} = 0.78$ 到 $\frac{r_{3b}}{r_{1b}} = \frac{1.54}{1.12} = 1.38$ 之间时, 机构满足要求。

(4) 确定动静平台实际尺寸, 再根据工作需要确定动平台运动高度实际范围, 并由此求出机构连杆的长度。

假定机构静平台尺寸为 $R = 100$ mm, 根据 $D =$

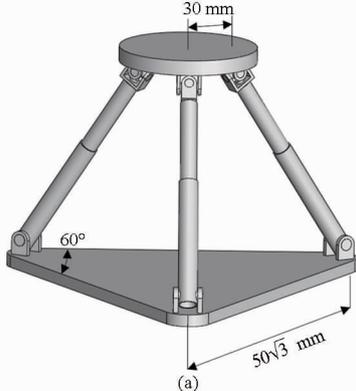


图9 优化后3-RPS并联机构模型及工作空间

Fig. 9 3-RPS parallel mechanism model and optimized working space

(a) 3-RPS 并联机构模型 (b) 工作空间及投影

0.3 得到动平台尺寸 $r = 30$ mm, 同时放大系数 $M_a = \frac{R}{r_{1a}} = \frac{100}{1.44} = 69.44$, $M_b = 89.29$, 此时可求出机构运动高度范围为 $(M_a r_{3a}, M_b r_{3b})$, 即 $z_p = 78.47 \sim 137.51$ mm。

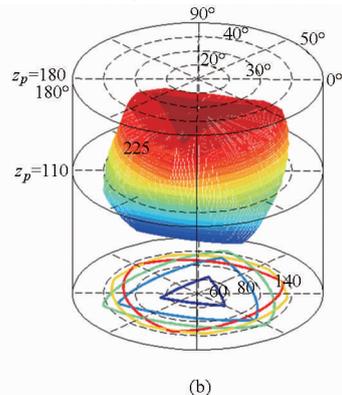
选取机构动平台在高度为 $z_p = 80 \sim 135$ mm 范围内运动。由运动学反解可以得到机构在此高度范围转动时, 动平台和静平台之间连杆的最小和最大杆长分别为: $l_{\max} = 167.27$ mm, $l_{\min} = 98.51$ mm, 取整得 $l_{\max} = 170$ mm, $l_{\min} = 90$ mm, 建立机构模型并得到机构的工作空间图形, 如图9所示。

最后, 验证所得机构尺寸是否满足要求, 若不满足要求, 可重新在目标尺寸区域中选取线段并进行计算, 直至完成3-RPS空间并联机构的尺寸参数优化设计。

从图9b投影可以看出动平台运动高度范围在80~135 mm以内时, 机构的转动范围可达25°~40°, 满足一些大型薄壁零件(如飞机机翼等)加工的姿态调整范围。

4 优化后3-RPS机构分析

在平台运动高度为80~135 mm, 机构的转动范围为40°以内, 利用运动、力作用系数 κ_i , 对此工作



(b)

空间进行分析判别。

由图10可以看出,由于机构关于 120° 对称,平台运动范围分别为80、100、120 mm时,分支运动、力作用系数分别为1.1~1.7、1.4~2.1、1.8~2.4,其

中并没有突变值,表示工作空间内无奇异。此外,随着运动高度的增加, κ 增大,这表明机构随着运动高度增加,要求的驱动速度增大、驱动力减小。

5 结论

(1) 基于并联机构工作任务需要,提出了功率分配概念,利用离差等数学概念定义了运动、力及功率分配指标,衡量机构各分支共同承担负载要求的能力。

(2) 对于作用于功率的2个可变物理量,定义了分支运动、力作用系数 κ ,并以此分析了简单平面机构的工作空间,找到了机构所需工作空间及奇异轨迹。

(3) 以用作姿态调整运动部件的空间3-RPS并联机构为例,利用全域功率分配性能指标、全域运动分配性能指标以及全域力分配性能指标对其进行优化。分析优化结果,该机构工作空间内无奇异且各分支具有良好运动、力传递性能。

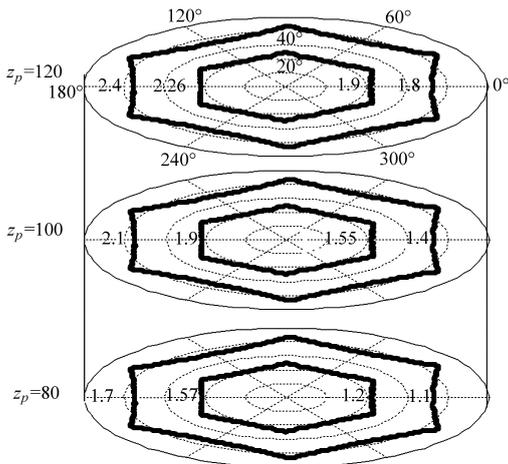


图10 工作空间运动、力作用系数图谱

Fig. 10 Workspace motion and force coefficient atlas

参 考 文 献

- 1 Yoshikawa T. Manipulability of robotic mechanisms [J]. The International Journal of Robotics Research, 1985, 4(2): 3-9.
- 2 Pasquale Chiacchio, Yann Bouffard-Vercelli, Francis Pierrot. Force polytope and force ellipsoid for redundant manipulators [J]. Journal of Robotic Systems, 1997, 14(8): 613-620.
- 3 Nokleby S B, Fisher R, Podhorodeski R P, et al. Force capabilities of redundantly-actuated parallel manipulators [J]. Mechanism and Machine Theory, 2005, 40(5): 578-599.
- 4 Gosselin C M, Angeles J. The optimum kinematic design of a spherical three-degree-of-freedom parallel manipulator [J]. ASME Journal of Mechanisms Transmissions and Automation in Design, 1989, 111(2): 202-207.
- 5 Merlet J P. Jacobian, manipulability, condition number, and accuracy of parallel robots [J]. ASME Journal of Mechanical Design, 2006, 128(1): 199-206.
- 6 孙涛. 少自由度并联机构性能评价指标体系研究 [D]. 天津: 天津大学, 2011.
Sun Tao. Performance evaluation index framework of lower mobility parallel manipulators [D]. Tianjin: Tientsin University, 2011. (in Chinese)
- 7 Lin Chenchou, Chang Wentung. The force transmissibility index of planar linkage mechanisms [J]. Mechanism and Machine Theory, 2002, 37(12): 1465-1485.
- 8 陈修龙, 孙先洋, 邓昱. 5自由度空间并联机构运动学优化设计 [J]. 农业机械学报, 2014, 45(6): 303-307.
Chen Xiulong, Sun Xianyang, Deng Yu. Kinematics optimum design of a 5-DOF spatial parallel mechanism [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(6): 303-307. (in Chinese)
- 9 高名旺, 张宪民. 4-RRR冗余并联机器人驱动力优化 [J]. 农业机械学报, 2014, 45(1): 301-305.
Gao Mingwang, Zhang Xianmin. Optimum of driving force for 4-RRR redundant parallel robot [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(1): 301-305. (in Chinese)
- 10 Imed Mansouri, Mohammed Ouali. The power manipulability—a new homogeneous performance index of robot manipulators [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2011, 27(2): 434-449.
- 11 Chen Chao, Jorge Angeles. Generalized transmission index and transmission quality for spatial linkages [J]. Mechanism and Machine Theory, 2007, 42(9): 1225-1237.
- 12 Wang Jinsong, Wu Chao, Liu Xinjun. Performance evaluation of parallel manipulators: transmissibility and its index [J]. Mechanism and Machine Theory, 2010, 45(10): 1462-1476.
- 13 刘辛军, 王立平, 吴泽启, 等. 基于力传递性能的平面并联机器人的优化设计 [J]. 清华大学学报, 2008, 48(11): 1927-1930.
Liu Xinjun, Wang Liping, Wu Zeqi, et al. Optimum design of a planar parallel robot based on force transmissibility [J]. Journal of Tsinghua University, 2008, 48(11): 1927-1930. (in Chinese)
- 14 Wu Chao, Liu Xinjun, Wang Liping, et al. Dimension optimization of an orientation fine-tuning manipulator for segment assembly robots in shield tunneling machines [J]. Automation in Construction, 2011, 20(4): 353-359.

- 14 杨通, 韩建友. 复合四位置刚体导引机构综合的研究[J]. 农业机械学报, 2011, 42(3): 203-207.
Yang Tong, Han Jianyou. Rigid-body guidance mechanism synthesis through four mixed positions[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(3): 203-207. (in Chinese)
 - 15 Mirth J A, Chase T R. Circuit rectification for four precision position synthesis of four-bar and Watt six-bar linkages[J]. ASME Journal of Mechanical Design, 1995, 117(4): 612-619.
 - 16 Mirth J A, Chase T R. Circuit rectification for four precision position synthesis of Stephenson six-bar linkages[J]. ASME Journal of Mechanical Design, 1995, 117(4): 644-646.
 - 17 Wang Jun, Kwun L T, Xue Changyu. Discriminant method for mobility identification of single degree-of-freedom double-loop linkages[J]. Mechanism and Machine Theory, 2010, 45(5): 740-755.
 - 18 Kwun L T, Xue Changyu, Wang Jun. Stretch rotation and complete mobility identification of Watt six-bar chains[J]. Mechanism and Machine Theory, 2009, 44(10): 1877-1886.
 - 19 Kwun L T, Wang Jun, Xue Changyu. Full rotatability and singularity of six-bar and geared five-bar linkages[J]. Journal of Mechanisms and Robotics, 2010, 2(1): 011011.
 - 20 Wang Jun, Kwun L T. Mobility identification of a group of single degree-of-freedom eight-bar linkages[C]// Proceedings of the ASME International Design Engineering Technical Conference & Computers and Information in Engineering Conference, 2010: 1739-1749.
-

(上接第 359 页)

- 23 Zhu Yuanpeng, Han Xuli. Curves and surfaces construction based on new basis with exponential functions[J]. Acta Applicandae Mathematicae, 2014, 129(1): 183-203.
 - 24 Wu Beibei, Xie Jiqiang, Li Chunjing. A new extension of quadratic Bézier curves with multiple shape parameters[J]. Journal of Information & Computational Science, 2014, 11(9): 3219-3227.
 - 25 Zhu Yuanpeng, Han Xuli, Liu Shengjun. Curve construction based on four $\alpha\beta$ -Bernstein-like basis functions[J]. Journal of Computational and Applied Mathematics, 2015, 273(1): 160-181.
 - 26 胡钢, 吉晓民, 郭磊. 四次带参广义 Bézier 曲面构造与光滑拼接技术[J]. 农业机械学报, 2014, 45(5): 315-321.
Hu Gang, Ji Xiaomin, Guo Lei. Quartic generalized Bézier surfaces with multiple shape parameters and its continuity conditions [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(5): 315-321. (in Chinese)
 - 27 胡钢, 秦新强, 韩西安, 等. 拟三次 Bézier 曲线曲面的拼接技术[J]. 西安交通大学学报, 2010, 44(11): 46-50, 60.
Hu Gang, Qin Xinqiang, Han Xi'an, et al. Continuity conditions for cubic quasi-Bézier curves and surfaces[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2010, 44(11): 46-50, 60. (in Chinese)
 - 28 施法中. 计算机辅助几何设计与非均匀有理 B 样条[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001: 195-208.
-

(上接第 371 页)

- 15 Gosselin C, Angeles J. A global performance index for the kinematic optimization of robotic manipulators [J]. Journal of Mechanical Design, 1991, 113(3): 220-226.
- 16 张立杰. 两自由度并联机器人的性能分析及尺寸优化[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2006.
Zhang Lijie. The optimum design an performance criteria of 2-DOF parallel manipulators[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2006. (in Chinese)
- 17 邹冀华, 周万勇, 韩先国, 飞机装配中基于 3-RPS 的并联机构法向调整算法[J]. 中国机械工程, 2011, 22(5): 557-560.
Zou Jihua, Zhou Wanyong, Han Xianguo. Normal adjusting algorithm of a 3-RPS parallel mechanism in airplane assembly[J]. China Mechanical Engineering, 2011, 22(5): 557-560. (in Chinese)
- 18 唐国明, 梅涛. 一种用于无人驾驶汽车运动模拟的 3 自由度并联机构动力学建模[J]. 机械工程学报, 2011, 47(23): 74-81.
Tang Guoming, Mei Tao. Dynamic modeling of a three degrees of freedom parallel manipulator for motion simulation of unmanned vehicle[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(23): 74-81. (in Chinese)
- 19 Liu Xinjun, Wang Jinsong. A new methodology for optimal kinematic design of parallel mechanisms[J]. Mechanism and Machine Theory, 2007, 42(9): 1210-1224.
- 20 黄真, 赵永生, 赵铁石. 高等空间机构学[M]. 1 版. 北京: 高等教育出版社, 2006.