

一种训练模拟座椅设计及尺度优化

谢腾飞

(北京安达维尔航空设备有限公司 北京 101300)

摘要: 训练模拟座椅是一种可供飞行员飞行前模拟的设备。使用训练模拟座椅训练飞行人员不仅能降低成本更能提高安全性。本文研究了一种基于并联机构的训练模拟座椅设计方法,从运动学角度分析其运动/力传递性能与工作空间大小,并基于运动/力传递指标与工作空间体积,使用图谱法找到训练模拟座椅机构的优化设计区域,优选出机构尺寸,并与优化前的机构性能及工作空间体积进行了对比。

关键词: 训练模拟座椅; 并联机构; 传递性能; 工作空间; 尺度优化

0 引言

并联机构因控制简单、运动性能好、刚度大而具有较高应用价值^[1-3]。其在医疗设备、机床、高精度等领域有着较为广泛的应用。因此,并联机械手引起了广大研究者兴趣,有着广泛的应用前景。

传递性能指标被广泛应用于评估并联机构性能。Chen等^[4]基于螺旋理论定义了少自由度并联机构的约束性能指标。Chong等^[5]研究了同时考虑传递及约束性能指标来评估并联机器人的性能。Wang等^[6]基于数个传递性能指标建立较为完整的体系系统的评估并联机构的传递性能。李秦川等^[7,8]基于传递性能指标对多个并联机构进行了尺寸优化。Xie等^[9,10]研究定义了评估冗余驱动并联机构传递性能的指标。Xie等^[11]基于传递性能指标对多种并联机构性能及尺寸进行了优化。

本文展示了一种基于并联机构的训练模拟座椅设计及其尺度优化。首先,从运动学角度分析了其传递性能以及工作空间。其次,结合机构使用工况,基于传递性能和工作空间体积使用图谱法对机构的尺寸进行优化,得到设计优化区域。最后,在优化图谱结果基础上对机构尺寸进行优选,并对优化前后的机构性能和工作空间体积大小进行了对比分析。

1 机构运动学分析

1.1 机构描述及运动学反解

3-RPS机构具备两转一移自由度^[12],机构简图如图1,座椅平台与动平台 p 固定在一起,座椅平台 s 点

(座椅乘坐点)位于动平台重心下方。机构的定、动平台分别记为 B 、 p ,均为等腰三角形,定平台内等腰三角形底边长为 $2L_1$,高为 H_1 ,动平台内等腰三角形底边长为 $2l_1$,高为 h_1 。建立如图1所示坐标系,均位于三角形重心处,基座坐标系为 $O-XYZ$,动平台坐标系为 $o-xyz$,动平台相对于定平台坐标为 $[x_0 \ y_0 \ z_0]^T$,座椅平台与3-RPS机构动平台固定连接,因此在研究训练模拟座椅机构运动时主要分析3-RPS机构即可。

与定平台 B 连接的 R_i ($i=1, 2, 3$)副为转动副,连接动平台 p 的 P_i ($i=1, 2, 3$)副为移动副,与动平台直接相连的 S_i ($i=1, 2, 3$)副为球副,球副自身含有三个转动自由度。各分支均满足

$$R_i \perp A_i a_i (i=1,2,3) \tag{1}$$

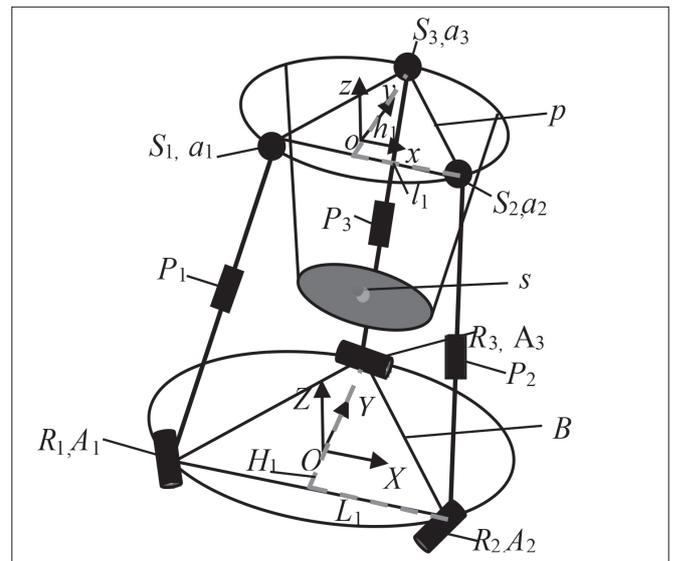


图1 训练模拟座椅机构简图

可得 A_i ($i=1, 2, 3$) 在坐标系 O -XYZ 中坐标为:

$$A_1 = \begin{bmatrix} -L_1 \\ -\left(\frac{1}{3}\right)H_1 \\ 0 \end{bmatrix}, A_2 = \begin{bmatrix} L_1 \\ -\left(\frac{1}{3}\right)H_1 \\ 0 \end{bmatrix}, A_3 = \begin{bmatrix} 0 \\ \left(\frac{2}{3}\right)H_1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

a_i ($i=1, 2, 3$) 在坐标系 O -XYZ 中坐标为:

$${}^p a_1 = \begin{bmatrix} -l_1 \\ -\left(\frac{1}{3}\right)h_1 \\ 0 \end{bmatrix}, {}^p a_2 = \begin{bmatrix} l_1 \\ -\left(\frac{1}{3}\right)h_1 \\ 0 \end{bmatrix}, {}^p a_3 = \begin{bmatrix} 0 \\ \left(\frac{2}{3}\right)h_1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: L_1 (l_1) - O (o) 到 A_i (a_i) ($i=1, 2$) 的距离;
 H_1 (h_1) - O (o) 到 A_2 (a_2) 的距离。

动平台相对于定平台的旋转变换矩阵表达式为:

$${}^B_p R = \begin{bmatrix} x_l & y_l & z_l \\ x_m & y_m & z_m \\ x_n & y_n & z_n \end{bmatrix} \quad (4)$$

那么, a_i ($i=1, 2, 3$) 点在坐标系 $\{O\}$ 中的坐标表达式为:

$$a_i = {}^B_p R {}^p a_i + o \quad (5)$$

其中, 动平台中心点 o 在坐标系 $\{O\}$ 中的坐标为 (x_o, y_o, z_o) 。

$a_i A_i$ ($i=1, 2, 3$) 的向量表达式为:

$$a_i A_i = A_i - a_i (i=1, 2, 3) \quad (6)$$

由式 (1) 约束关系可得约束方程化简形式:

$$\begin{aligned} x_m &= y_1 \\ x_0 &= -e_1 y_1 \end{aligned} \quad (7)$$

$$y_0 = (-E e x_i + E e_1 y_1 - E_1 e x_m + E^2) / E_1$$

式中, x_m 表示姿态矩阵参数, 杆长公式为:

$$p_i = |A_i - a_i| \quad (8)$$

将坐标代入式 (8), 给定参数可得到机构反解。

1.2 3-RPS 机构工作空间分析

将动平台重心点能达到空间的集合视为机构的工作空间, 其体积称之为机构的工作空间体积

(WV), 对于训练模拟座椅机构的主体结构 3-RPS 机构, 给定机构尺寸 $L_1=0.6m$, $H_1=1.2m$, $l_1=0.5m$, $h_1=1.0m$ 。计算动平台重心点坐标所能达到空间的集合, 并使用 MATLAB 绘制其工作空间边界图形如图 2 所示。

基于数值极限理论求得其工作空间边界并计算其体积为 $0.015m^3$ 。

2 机构传递性能分析

2.1 螺旋理论基础

对任一刚体位力螺旋作用在单位运动螺旋上示意图如图 3 所示。

其瞬时功率可以用 S_1 和 S_2 之间的互易积来表示, 即:

$$\begin{aligned} S_1 \circ S_2 &= f \cdot v + \omega \cdot t \\ &= (h_1 + h_2)(f^T \cdot \omega) + (r_2 - r_1)^T \cdot (f \times \omega) \\ &= (h_1 + h_2) \cos \theta - d \sin \theta \end{aligned} \quad (9)$$

同时文献 [13] 利用比例算法定义了力与运动螺

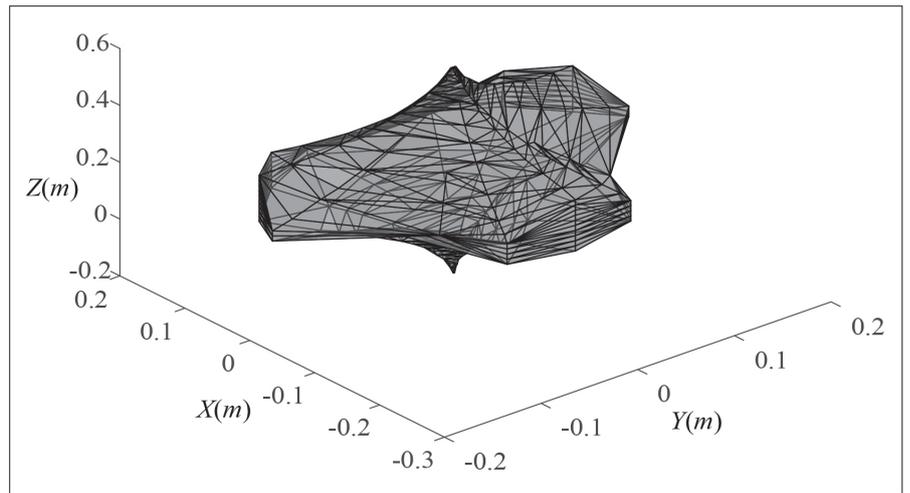


图 2 机构工作空间边界

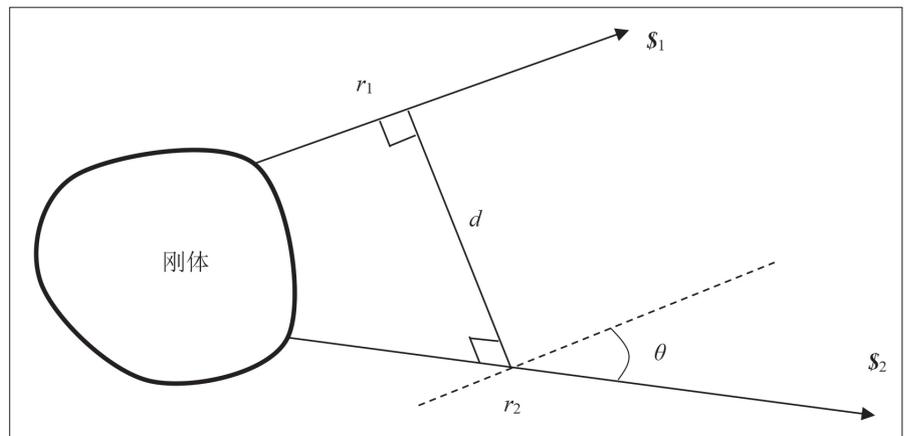


图 3 刚体上的运动螺旋与力螺旋

旋的能效系数，以此来评估两者之间的能量传递效率，如下所示：

$$\eta = \frac{|\mathcal{S}_1 \circ \mathcal{S}_2|}{|\mathcal{S}_1 \circ \mathcal{S}_2|_{\max}} = \frac{|(h_1 + h_2) \cos \theta - d \sin \theta|}{\max_{h_1, h_2, d} \sqrt{(h_1 + h_2)^2 + d^2}} \quad (10)$$

式中： \mathcal{S}_2 - 力螺钉；

\mathcal{S}_1 - 运动螺旋；

p - 两螺旋轴线间的公法线长度；

θ - 两螺旋轴线夹角。

2.2 3-RPS 运动 / 力传递性能分析

输入传递性能 (Input Transmission Index) 取所有分支的 λ_{Ti} 值的最小值：

$$ITI = \min(\lambda_{Ti}) = \min \left(\frac{|\mathcal{S}_{Ti} \circ \mathcal{S}_{Ti}|}{|\mathcal{S}_{Ti} \circ \mathcal{S}_{Ti}|_{\max}} \right) = 1, (i=1, 2, 3, n) \quad (11)$$

输出传递性能 (Output Transmission Index) 取所有分支的 λ_{Oi} 值的最小值：

$$OTI = \min(\lambda_{Oi}) = \min \left(\frac{|\mathcal{S}_{Oi} \circ \mathcal{S}_{Ti}|}{|\mathcal{S}_{Oi} \circ \mathcal{S}_{Ti}|_{\max}} \right), (i=1, 2, 3) \quad (12)$$

分析性能应同时考虑输入及输出传递性能，故取 ITI 与 OTI 中的最小值作为机构的局部传递指标 (Local Transmission Index)，即：

$$LTI = \min(ITI, OTI) \quad (13)$$

LTI 值来评价机构性能非常片面和局限，将 $LTI \geq 0.9$ 时的空间来作为优质传递空间 GTW， $LTI \geq 0.9$ 的均值即为全局传递指标值 GTI^[14]。

$$GTI = \frac{\int (LTI) dW}{\int dW} \quad (14)$$

式中： W - 优质传递空间。

已知机构尺寸为： $L_1=0.6m$ ， $H_1=1.2m$ ， $l_1=0.5m$ ， $h_1=1.0m$ 。由于篇幅限制无法逐一控制机构工作高度再考虑机构转动自由度绘制性能图谱，因此绘制了机构高度 z_0 在 $2.3L_1=1.38m$ 时的三维性能图以及二维性能等值线图 (图 4)，边界 (1) 表示机构驱动长度限制的移动边界，以 $LTI \leq 0.2$ 作为传递性能奇异的标准，图 4 (a) 表

示的传递性能的三维性能图，图 4 (b) 表示的是传递性能的二维性能等值线图，所有 $LTI \geq 0.2$ 显然姿态空间无奇异和运动卡死点。传递性能图形呈对称状，传递性能值越远离中心值越小，表示机构工作空间中心区域性能最优，越靠近移动边界性能越差。

计算全局下优质传递空间 GTW 内 $LTI \geq 0.9$ 的均值为 0.966。

3 机构尺度优化设计

3.1 参数优化设计

由于机构平台为等腰三角形，且满足 $L_1/H_1 = l_1/h_1$ ，有三个参数待优化，引入空间模型法，令 $D = (L_1 + l_1 + H_1) / 3$ ，将参数写为 $r_1 = L_1/D$ ， $r_2 = l_1/D$ ， $r_3 = H_1/D$ ，机构约束为： $0 < r_1, r_2, r_3 < 3$ ， $r_2 \leq r_1$ 。参数设计空间如图 5 所示。

设计空间中的每点均表示机构一组尺寸，可建立参数设计空间与优化指标之间关系为：

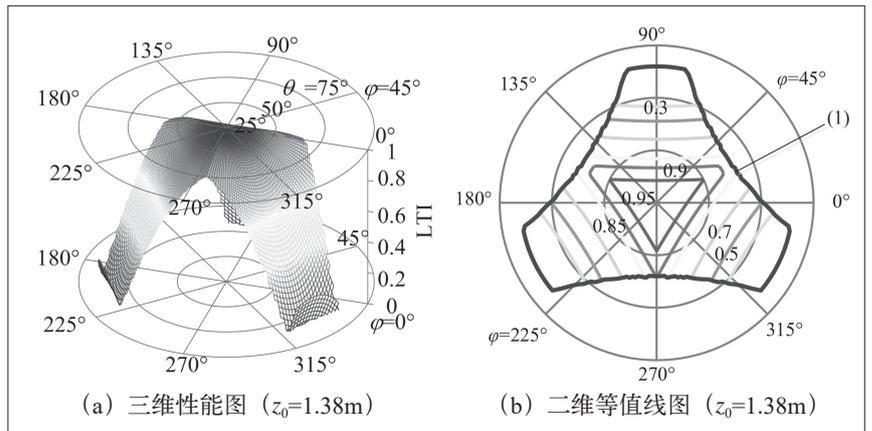


图 4 3-RPS 的 LTI 图

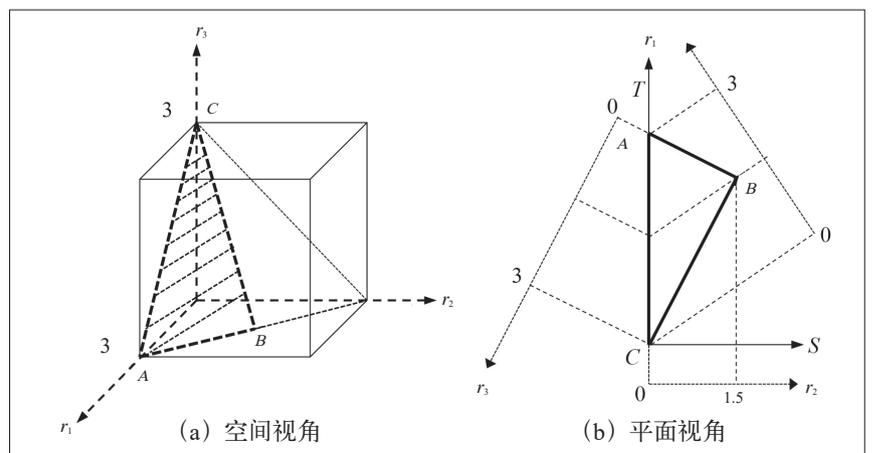


图 5 3-RPS 机构参数空间

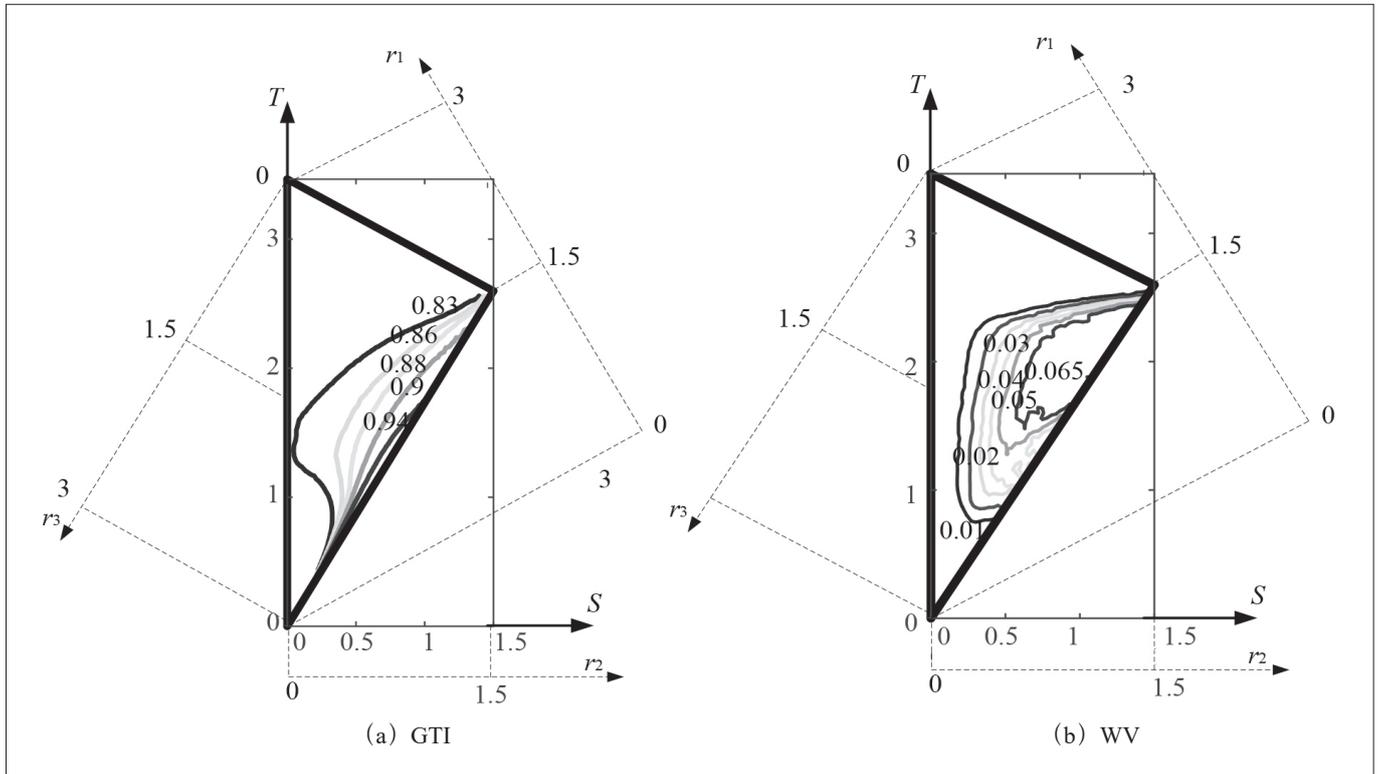


图6 3-RPS 机构设计图谱

$$\begin{cases} r_2 = S \\ r_1 = \frac{\sqrt{3}T - S}{2} \\ r_3 = 3 - r_1 - r_2 \end{cases} \quad (15)$$

基于指标 GTI 和 WV 对机构的尺寸进行优化, 如图 6 所示。

优化后必须要使得机构的传递指标值同时较大, 因此选取 $GTI \geq 0.9$, $WV \geq 0.057m^3$ 的共同交叉部分作为优化设计区域, 如图 7 所示。

3.2 机构尺寸优选

根据图 7 图所示谱选取优化尺寸, 综合考虑选取 $S=0.8$, $T=1.8$, 参数 D 可根据需求定义, 选取 $D=0.8$ 计算可得 $L_1=0.927m$, $H_1=0.832m$, $l_1=0.64m$, $h_1=0.573m$ 。

3.3 优选前后性能对比分析

根据优选尺寸计算并联机构动平台重心点所能达到空间的集合, 使用 MATLAB 软件绘制其工作空间边界图形 (图 8)。

同理, 基于数值极限理论并计算其体积为计算其体积为 $0.059m^3$ 。

同时, 再绘制高度 z_0 在 $2.3L_1=2.13m$ 时优化尺寸

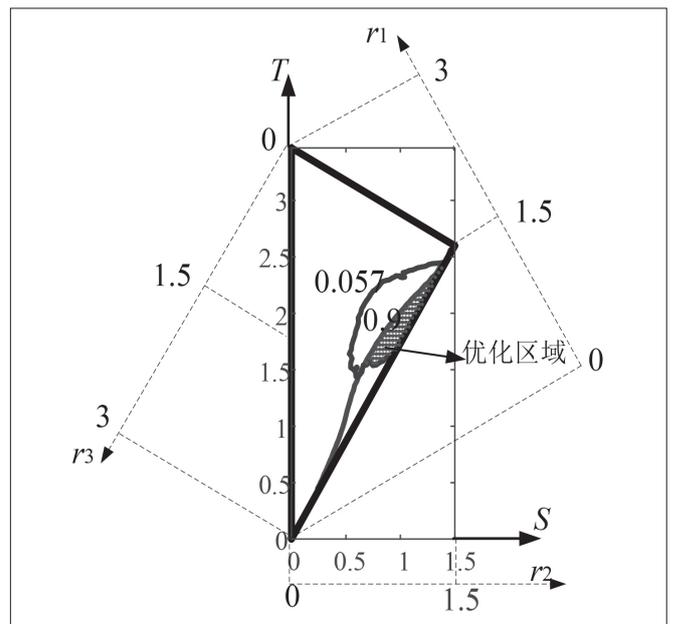


图7 3-RPS 优化区域

下的传递图谱 (图 9)。

计算其全局下优化后传递指标值 GTI、工作空间体积 WV 的值如表 1 所示。

二维图谱中 (1) 表示的是驱动长度限制的移动边界, 基于优化尺寸绘制在相同比例高度下的 LTI 图谱, 虽然优化后 $LTI \geq 0.95$ 区域面积和全局传递

[7]Wang F,Chen Q,Li Q.Optimal design of a 2-UPR-RPU parallel manipulator[J].Journal of Mechanical Design,2015,137(5):10-15.

[8]叶伟,杨臻,李秦川.一种远中心并联机构运动学与性能分析[J].机械工程学报,2019,055(5):65-73.

[9]Hu B,Shi D S,Xie T,et al.Kinematically identical manipulators derivation for the 2-RPU+UPR parallel manipulator and their constraint performance comparison[J].Journal of Mechanisms & Robotics,2020:1-13.

[10]Xie F,Liu X J,Wang J.Performance Evaluation of Redundant Parallel Manipulators Assimilating Motion/Force Transmissibility[J].International Journal of Advanced Robotic Systems,2011,8(5):113-124.

[11]Xie F,Liu X J,Xiang C,et al.Optimum Kinematic

Design of a 3-DOF Parallel Kinematic Manipulator with Actuation Redundancy[M].Springer Berlin Heidelberg,2011.

[12]Nurahmi L,Schadlbauer J,Husty M,et al.Kinematic Analysis of the 3-RPS Cube Parallel Manipulator[C].Asme Idetc,2018:1-2.

[13]Chen C,Angeles J.Generalized transmission index and transmission quality for spatial linkages[J].Mechanism & Machine Theory,2007,42(9):1225-1237.

[14]Xie F,Liu X J,Wang J.Performance Evaluation of Redundant Parallel Manipulators Assimilating Motion/Force Transmissibility[J].International Journal of Advanced Robotic Systems,2011,8(5):113-124.

作者简介: 谢腾飞(1994.11-),男,汉族,河南鹿邑人,硕士研究生,工程师,研究方向:航空座椅设计。

