

一种欠约束丝牵引并联机构工作空间的分析方法

桑 建, 陈志平*, 张巨勇, 刘 睿
(杭州电子科技大学 机械工程学院, 浙江 杭州 310018)

摘要: 针对光学悬丝吊架试验台系统应用的六丝牵引的并联机构, 提出了运用维数缩减法求解欠约束六自由度并联机构工作空间的方法, 并利用提出的衡量工作空间质量的评价指标 k_s , 通过 Matlab 仿真分析了机构结构参数及预紧力系数等对其工作空间的影响趋势, 最后经过多次计算对比, 得出机构各参数的最优组合, 获得最大工作空间, 从而为下一步的实际测试试验奠定基础。

关键词: 六自由度; 欠约束并联机构; 工作空间; 影响因素

中图分类号: TH112; TH122; TH123

文献标识码: A

文章编号: 1001-4551(2010)08-0052-04

Analytic method of the workspace of an incompletely restrained wire-driven parallel mechanism

SANG Jian, CHEN Zhi-ping, ZHANG Ju-yong, LIU Rui

(College of Mechanical Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: According to the structure of a 6 DOFs incompletely restrained parallel mechanism (IRPM) driven by six wires and designed in the system of optical wire-driven hanging bench, a proper way applying theory of dimension reduction to get the workspace of this mechanism was presented. Then a parameter k_s used to evaluate the quality of the workspace was proposed, some factors which affect the mechanism's workspace containing structure parameter of mechanism and preload index were also analyzed by Matlab simulation. Finally, the optimum parameters and the largest workspace are gotten by many times calculation. The conclusion will be based for the further testing experiment.

Key words: 6 DOFs; incompletely restrained parallel mechanism (IRPM); workspace; factors

0 引 言

丝牵引并联机构作为一种新型的并联机构, 与杆支撑并联机构相比具有结构简单、惯性小、工作空间大、运动速度快、负载能力高等优点, 在虚拟现实的力反馈装置、风洞、大型射电望远镜和超高速机器人等方面均有广泛的应用前景^[1-2]。从 20 世纪 90 年代初开始, 美国、日本等诸多国家的研究人员纷纷开展这方面的研究, 并取得了一系列重要的研究成果。而对丝牵引并联机构工作空间的分析一直是这方面的研究重点之一^[3-4]。

由机构的工作空间可以确定动平台模型的活动范

围(包括平动和转动), 并且通过对影响工作空间的参数进行分析优化可以获得模型活动的最大空间, 提高机构的工作性能。因此对丝牵引并联机构的工作空间进行分析研究具有相当的必要性。

本研究依托于光学悬丝吊架试验台项目提出一种六根丝牵引的并联机构^[5-6], 对其工作空间主要是转动工作空间的求解以及影响工作空间的诸多因素进行了较为全面的分析研究。

1 试验台机构介绍

1.1 建立数学模型

机构主体分为上、下转盘和动平台模型 3 部分, 各

部分通过悬吊点用钢丝连接,通过钢丝的伸缩实现对模型姿态的控制调整,其实体结构如图1所示。由于项目要求设计机构需实现动平台模型的航向角、俯仰角、翻滚角的变化及对质心位置的精确控制,因而为简化结构及降低控制难度,采用维数缩减法将航向角的变化改由上、下转盘的同步转动来实现。因此得到以上、下转盘为固定参照物建立试验台结构的数学模型,如图2所示。由于设计模型上的悬点位置为上面三点、下面三点且分别成正三角形分布,故将模型简化为一个正三棱柱。



图1 试验台实体结构

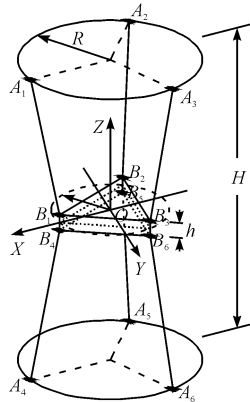


图2 简化模型

涉及到的机构参数分别为:转盘高度 H 、转盘半径 R 、模型厚度 h 、模型半径 r 。上下转盘上各3个悬吊点成正三角形分布,正三角形外接圆的半径即为转盘半径 R ,上下两外接圆在水平面上且同轴,两圆之间的高度就是转盘高度 H ,两圆上各3个悬吊点上下对应分布在同一垂直轴上。模型上悬吊点构成的两正三角形所在外接圆半径定为模型半径 r ,此上下两圆的距离即为模型厚度 h 。

1.2 试验台结构类型的分析

由于丝只能承受拉力,不能承受压力, n 自由度的丝牵引并联机构至少由 $n+1$ 根丝来控制才能达到完全约束,少于 $n+1$ 则为欠约束并联机构,多于 $n+1$ 为冗余约束并联机构^[7]。

本研究中涉及机构为六丝牵引的六自由度并联机构,属于欠约束丝牵引并联机构。通过对机构进行力学分析可知,无法通过改变6根丝的丝长来实现对模型绕垂直轴转动自由度上的控制,因此模型在该自由度上不可控。因而本研究将模型转动工作空间的分析重点集中在转动工作空间的俯仰和横滚2个自由度上。

2 工作空间的求解

2.1 力平衡分析

首先本研究对动平台模型进行静力学分析,得:

$$\begin{cases} \sum_{\mu=1}^6 f_{\mu} + f_p = 0 \\ \sum_{\mu=1}^6 p_{\mu} \times f_{\mu} + \tau_p = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中 $f_{\mu} = f_{\mu} \frac{l_{\mu}}{l_{\mu}} = f_{\mu} u_{\mu}$ (u_{μ} —沿着第 μ 根丝的单位向量); f_p —模型所受的合外力; p_{μ} —模型质心即坐标原点到模型上悬点的矢量; τ_p —模型所受合外力矩。

然而由于模型在绕垂直轴转动的自由度上不可控,当直接对式(1)进行求解时,实际上是将该自由度的转动角固定在零值上,得到的工作空间与实际的工作空间是不相符的,因此为消除该自由度对工作空间求解的影响,运用维数缩减法(只分析除绕垂直轴转动以外的其他5个自由度)降低维数,然后再进行静力学分析求解。则式(1)可写成如下矩阵形式:

$$J^T F + F_w = 0 \quad (2)$$

式中 J^T —与机构的结构参数及模型姿态有关的 5×6 的矩阵; F —各根丝拉力所构成的6维向量; F_w —动平台模型所受的外力和外力矩的5维向量。

由式(2)可解得:

$$F = -J^{+T} F_w + kP \quad (3)$$

式中 J^{+T} —矩阵 J^T 的 Moore-Penrose 伪逆; P —矩阵 J^T 的张成零空间,当其为与 F 同维的向量矩阵时有效; k —任意常数,由于 k 值直接影响各丝拉力的大小,亦称之为预紧力系数。

2.2 工作空间的求解步骤

参照文献[8]中工作空间的求解方法,采用蒙特卡洛技术设计出工作空间的求解步骤。首先设一个给定的位姿空间,然后逐个输入位姿数据,由式(3)即可求得对应位姿下各丝所受的拉力,若拉力值在要求范围内(可行工作空间要求 $F > 0$,可控工作空间要求 $F_{\min} < F < F_{\max}$),则 J^T 所对应的位姿在工作空间内,否则就不在,据此对给定空间内数据进行检验,从而得到模型的工作空间。根据此思路运用 Matlab 语言进行编程,得到该并联机构工作空间的求解程序。

2.3 工作空间的评价指标 k_s

由于上述工作空间的求解方法只能对各个离散点进行验证性求解,而无法给出一个连续的范围,笔者提出了一个评价工作空间质量的参数指标 k_s 。

假设给定的位姿空间内均匀分布的点数为 M ,通过工作空间求解落在可控工作空间内的点数为 N ,则工作空间的质量评价指标 $k_s = N/M \times 100\%$ 。显然, k_s 的值越大,说明模型的工作空间越大。

3 影响工作空间的因素分析

从工作空间的求解过程以及进行的部分实验中可以看出,影响模型工作空间的因素主要有两个方面:试验台的结构参数和预紧力系数。其中试验台的结构参数主要有转盘高度 H 、转盘半径 R 、模型厚度 h 、模型半径 r 等。下面将对各因素逐个进行分析。

首先设定待检测位姿空间的范围为: $-30^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$, $-30^\circ \leq \beta \leq 30^\circ$ (其中分别为绕 X 、 Y 轴的角度)。

然后给出一组标准参数: $r = 200 \text{ mm}$, $h = 100 \text{ mm}$, $R = 600 \text{ mm}$, $H = 2\,913 \text{ mm}$, $k = 1\,450$, 得到 $k_s = 75.8\%$ 。此时机构工作空间如图 3 所示。

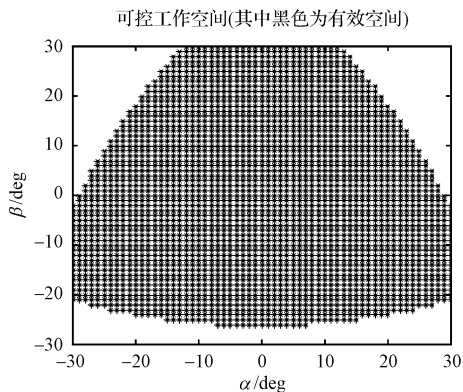


图 3 优化前工作空间

最后在确保其他参数不变的情况下,使其中一个参数在一定范围内变化,得到 k_s 随该参数的变化曲线,从而对影响工作空间的各个因素进行定性的分析。

3.1 模型大小(半径)的影响

保持其他参量不变,给出 r 值的变化范围 $100 \text{ mm} \leq r \leq 300 \text{ mm}$, 得到 k_s 随模型半径 r 的变化曲线如图 4 所示。

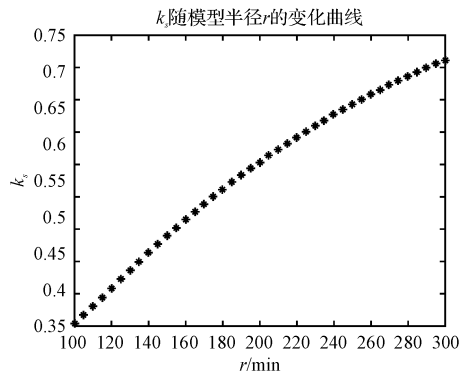


图 4 k_s 随模型半径 r 的变化曲线

由此可以看出:模型的半径越大,可控工作空间越大。

3.2 模型厚度的影响

保持其他参量不变,给出 h 值的变化范围为 $50 \text{ mm} \leq h \leq 150 \text{ mm}$, 得到 k_s 随模型厚度 h 的变化曲线如图 5 所示。

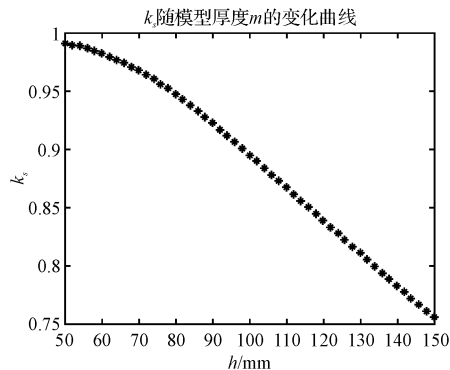


图 5 k_s 随模型厚度 h 的变化曲线

由此可以看出:模型的厚度越大,可控工作空间越小。

3.3 转盘半径 R 的影响

保持其他参量不变,给出 R 值的变化范围 $400 \text{ mm} \leq R \leq 800 \text{ mm}$, 得到 k_s 随转盘半径 R 的变化曲线如图 6 所示。

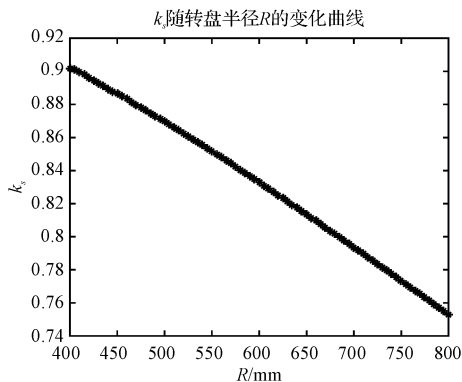


图 6 k_s 随转盘半径 R 的变化曲线

由此可以看出:转盘的半径越大,可控工作空间越小。

3.4 机架高度 H 的影响

保持其他参量不变,给出 H 值的变化范围 $2\,500 \text{ mm} \leq H \leq 3\,500 \text{ mm}$, 得到 k_s 随转盘高度 H 的变化曲线如图 7 所示。

由此可以看出:机架的高度越大,可控工作空间越大。

3.5 预紧力系数的影响

保持其他参量不变,给出 k 值的变化范围 $1\,000 \leq k \leq 2\,000$, 得到 k_s 随预紧力系数 k 的变化曲线如图 8 所示。

由此可以看出:预紧力的大小对工作空间的影响较大且存在最优值,大致为 $k = 1\ 580$ 。

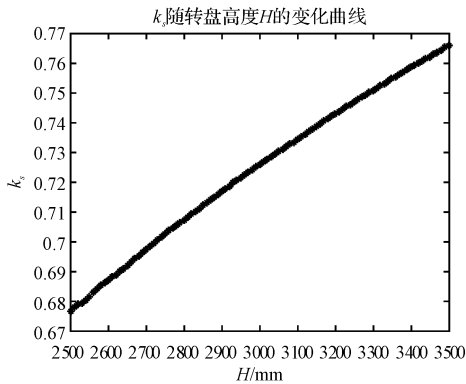


图7 k_s 随转盘高度 H 的变化曲线

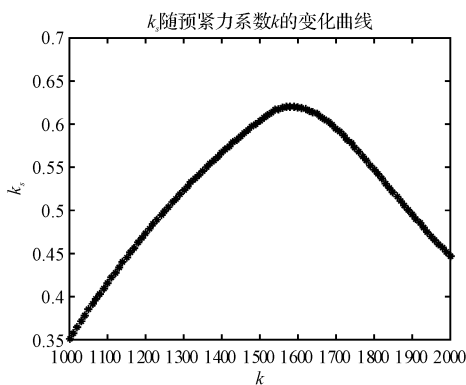


图8 k_s 随预紧力系数 k 的变化曲线

3.6 结合实际的参数优化

由于在实际的试验台结构(如图1所示)中,转盘的高度和半径是固定的,模型半径可调范围为 $150\text{ mm} \leq r \leq 300\text{ mm}$,模型厚度可调范围为 $100\text{ mm} \leq h \leq 150\text{ mm}$ 。因此综合上述各因素,笔者设计了最优的模型参数,以使其在设定工作空间范围内完全可控。

经过多次仿真计算,得到针对实际试验的一组优化参数为 $r = 300\text{ mm}$, $h = 60\text{ mm}$, $R = 600\text{ mm}$, $H = 2\ 913\text{ mm}$, $k = 1\ 580$,此时计算得到的可控工作空间范围如图9所示。

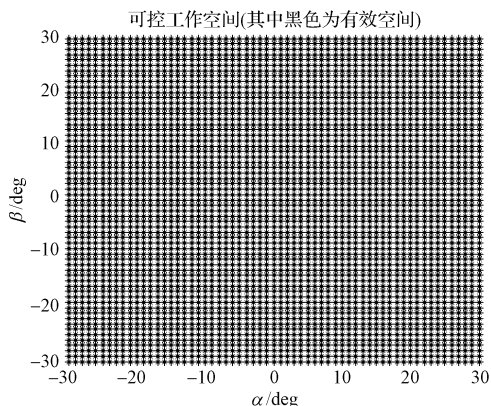


图9 参数优化后工作空间

此时 $k_s = 100\%$,模型在给定的位姿空间内的运动范围最大。

4 结束语

根据前述的分析本研究得到了影响丝牵引并联机构工作空间的诸多因素,分析了各参数变化对工作空间所产生的具体影响,并根据影响趋势对各个参数进行了优化,获得了模型工作的最大工作空间。

下一步的工作将是进行实际的试验测试并继续对其他有关的影响因素(如转盘或模型上下半径不相等、悬点位置不规则、模型质心形心不重合等)进行分析,以获得模型在各种情况下时达到满工作空间的多种方法。

参考文献(References):

- [1] KOZAK K, ZHOU Qian, WANG Jin-song. Static analysis of cable-driven manipulators with non-negligible cable mass [J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2006, 22(3): 425 - 433.
- [2] BOSSCHER P, EBERT-UPHOFF I. Wrench-based Analysis of Cable-driven Robots[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. New Orleans: [s. n.], 2004: 4950 - 4955.
- [3] AREF M M, TAGHIRAD H D. Geometrical Workspace Analysis of a Cable-Driven Redundant Parallel Manipulator: KNTU CDRPM[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Nice: [s. n.], 2008: 1958 - 1963.
- [4] YANG Gui-lin, PHAM C B, YEO S H. Workspace Performance Optimization of Fully Restrained Cable-Driven Parallel Manipulators[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Beijing: [s. n.], 2006: 85 - 90.
- [5] 沙晶晶,陈志平,施浒立,等.基于悬丝机构的目标飞行物位姿结算分析与实验[J]. *机械科学与技术*, 2007, 26(6): 754 - 757.
- [6] 王三优,陈志平,施浒立.基于PMAC的绳牵引目标控制系统设计[J]. *机电工程*, 2006, 23(10): 28 - 30.
- [7] VERHOEVEN R. Analysis of the Workspace of Tendon-based Stewart Platforms[D]. Duisburg: Gerhard Mercator University, 2004: 28 - 34.
- [8] 郑亚青,刘雄伟.六自由度绳牵引并联机构的可达工作空间分析[J]. *华侨大学学报:自然科学版*, 2002, 23(4): 393 - 398.