

文章编号: 1672-9897(2008)03-0075-05

低速风洞绳牵引并联机器人支撑系统的模型姿态与振荡控制研究

林 麒¹, 梁 斌¹, 郑亚青²

(1. 厦门大学航空系, 福建 厦门 361005; 2. 华侨大学机电及自动化学院, 福建 泉州 362021)

摘要: 介绍了基于机器人技术的绳牵引并联机构的特点; 设计并建造了适用于低速风洞试验的八绳六自由度绳牵引并联支撑机构样机(WDPSS-8), 给出其具体的结构参数, 分析了该机构的特点及可行性; 建立了该系统的运动学位姿逆解模型和静力学模型, 完成了运动学逆解的推导, 得到已知缩比模型位姿求绳长变化的公式; 搭建了相应的绳牵引并联机构的控制实验平台, 在此基础上进行了静力学工作空间的分析, 通过 Matlab 编程仿真得到了缩比模型在主位姿处 3 个姿态角的工作空间; 并在此实验平台上进行了缩比模型的三转动自由度姿态变化运动控制, 实现了缩比模型运动到指定角度的控制; 在此基础上按指定振幅和频率进行了三转动单自由度振荡的运动控制; 对运动控制试验结果进行了初步的误差分析。

关键词: 姿态控制; 单自由度振荡; 绳牵引机构; 并联机器人; 风洞试验

中图分类号: TH112 文献标识码: A

Control on model attitude and oscillation by wire-driven parallel manipulator support system for low-speed wind tunnel

LIN Qi¹, LIANG Bin¹, ZHENG Ya-qing²

(1. Department of Aeronautics, Xiamen University, Xiamen Fujian 361005, China; 2. College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, Quanzhou Fujian 362021, China)

Abstract: A 6-DOF WDPSS-8 (WDPSS: Wire-Driven Parallel Suspension System) suitable to low-speed wind tunnel was designed. The structural parameter of the system was given. The feasibility of the WDPSS-8 has been analyzed. The inverse kinematics position model and statics model have been set up. The solutions to the inverse kinematics problem and the formula of the wire length variation have been deducted. The prototype of the WDPSS-8 was manufactured. The workspace of the scale model attitude in main position has been simulated with a Matlab programming. The attitude control has been accomplished and the appointed attitude angle of the model can be achieved on the demand. Based on the work mentioned above, oscillation control experiment in three freedoms has been carried out respectively according to required amplitude and frequency. At last the error analysis of the system has been made.

Key words: attitude control; oscillation in single freedom; wire-driven manipulator; parallel robot; wind tunnel test

0 引 言

绳牵引并联机构是一种新型并联机构, 具有结构简单、工作空间大、负载能力高、易拆装、可重组、模块化程度高、价格低廉和运动速度快等优点^[1,2]。

将绳牵引并联机构应用于风洞模型的支撑是近年来随着机器人并联机构学与力控制技术的发展而

提出的一种新概念^[2]。大飞机的缩比模型通常较大, 这种情况下, 目前常用的“硬式”支撑系统存在以下缺点: (1) 需要加粗或加固支撑, 势必增大支撑系统对实验的干扰; (2) 支撑刚度较差, 在吹风试验时容易引起模型一天平一支撑系统的振动, 从而增加测量误差; (3) 做动态试验时大的支架干扰量无法通过通常的修正方法而得到较准确的试验结果。而绳牵引并联支

收稿日期: 2007-09-06; 修订日期: 2008-02-26

基金项目: 国家自然科学基金(50475099)资助、福建省青年人才创新基金(2006F3083)资助

作者简介: 林 麒(1954), 女, 广东揭阳人, 博士, 教授, 研究方向: 气动力学、航空工程, E-mail: qilin@xmu.edu.cn

撑系统作为一种新型的“软式”支撑系统,能较好地解决模型支撑刚度与气动干扰之间的矛盾,这很适用于大型飞机的风洞试验^[3-4],特别是大飞机的动态试验和飞行控制试验。

法国国家航空研究院支持的低速风洞绳牵引并联支撑系统“SACSO项目”的研究工作已开展了6年有余,系统处于调整与测试阶段^[5]。文献[3,4,6]在低速风洞绳牵引并联支撑系统的机构设计、模型姿态控制研究、运动学参数标定等方面取得了阶段性的研究成果。

本文对低速风洞绳牵引并联机器人支撑系统进行了机构的理论分析和实验研究,实现了模型姿态与单自由度振荡的实例控制试验,为进一步的风洞模型动导数试验奠定了基础。

1 八绳六自由度绳牵引并联机构

由于风洞试验要求飞机的缩比模型能在三维空间里进行各种姿态的变化,因此本文参照某实际回流式开口低速风洞,设计了一个3个转动自由度相互解耦的,8根绳牵引的六自由度并联机构——WDPSS-8 (WDPSS: Wire Driven Parallel Suspension System) 作为支撑系统(如图1所示)。

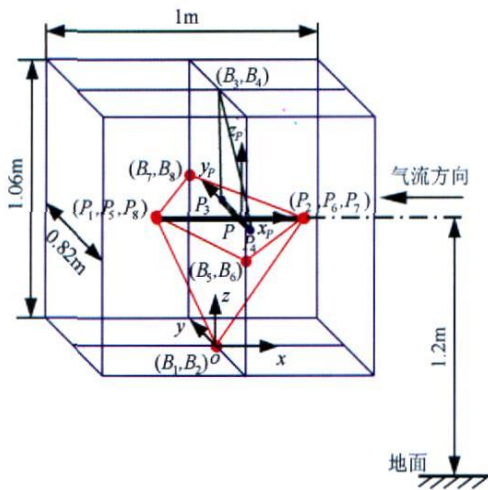


图1 WDPSS-8的结构
Fig.1 Structure of WDPSS-8

该系统具有如下特点:

(1) 理论上模型在主位姿处(即风洞的中央)时,俯仰角 φ 可达 $\pm 90^\circ$, 偏航角 φ_Y 可达 $\pm 90^\circ$, 滚转角 φ_R 可达 $\pm 90^\circ$ 。

(2) 运动学位置正解为封闭形式。

通过粗略的吹风实验(风速为 28.8m/s),发现该机构的刚度比传统的支架支撑要大很多,即模型振动

要小得多。因此本设计方案是可行的。事实上,从理论上分析也可发现,由于8根绳的牵引是空间的,而空间分布的绳系互相牵制,模型发生抖动的可能比较小。

图2是根据图1建造的一台WDPSS-8的样机。图中,缩比模型十字架为飞机的抽象模型。通过8根绳牵引,可进行缩比模型的六自由度运动控制研究。



图2 WDPSS-8原理样机
Fig.2 Sample of WDPSS-8

笔者以 $X = \begin{pmatrix} X_p \\ X_{ang} \end{pmatrix}$ 表示缩比模型的参考点 P 相对于坐标系 $Oxyz$ 的位姿。其中 X_p 为 P 的位置坐标 (X_p, Y_p, Z_p) , X_{ang} 为坐标系 $PxpyzP$ 相对于坐标系 $Oxyz$ 的姿态坐标 $(\varphi_Y, \varphi, \varphi_R)$ 。缩比模型的3个姿态角分别为:滚转角 φ_R (相对于 Ox 轴正方向的旋转)、俯仰角 φ_p (相对于 Oy 轴正方向的旋转)和偏航角 φ_Y (相对于 Oz 轴正方向的旋转)。样机的结构参数如图1所示,绳与机架的各个连接点 $B_i (i = 1, \dots, 8)$ 在固定坐标系 $Oxyz$ 下的坐标(以下尺寸均为 mm)为 $B_1 (B_2): (0, 0, 0), B_3 (B_4): (0, 0, 1060), B_5 (B_6): (0, -400, 530), B_7 (B_8): (0, 400, 530)$ 。绳与缩比模型各个连接点 $P_i (i = 1, \dots, 8)$ 在局部坐标系 $PxpyzP$ 下的坐标为 $P_1 (P_5, P_8): (-120, 0, 0), P_2 (P_6, P_7): (80, 0, 0), P_3: (0, 50, 0), P_4: (0, -50, 0)$ 。

2 运动学与静力学的建模

2.1 运动学位置逆解模型

风洞试验通常需要事先给定模型在试验段中的位置和姿态, 在本文的支撑系统中, 是通过控制各绳长来使模型定位的。因此必须求该机构的运动学位置逆解, 即在已知缩比模型的参考点 P 的位姿 X 的情况下, 求各根绳的长度 $l_i (i = 1, \dots, 8)$ 。

若已知缩比模型的位姿 X , 则八根绳与模型上的连接点 $P_i (X_{P_i}, Y_{P_i}, Z_{P_i}) (i = 1, \dots, 8)$ 在固定坐标系 $Oxyz$ 中的坐标满足:

$$\begin{bmatrix} X_{P_i} \\ Y_{P_i} \\ Z_{P_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_P \\ Y_P \\ Z_P \end{bmatrix} + T \begin{bmatrix} x_{Pi} \\ y_{Pi} \\ z_{Pi} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中

$$\begin{aligned} T &= T_X(\varphi_R) T_Y(\varphi_P) T_Z(\varphi_Y) \\ &= \begin{bmatrix} C_R & -S_R & 0 \\ S_R & C_R & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_P & 0 & S_P \\ 0 & 1 & 0 \\ -S_P & 0 & C_P \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & C_Y & -S_Y \\ 0 & S_Y & C_Y \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} C_P C_R & C_R S_P S_Y - S_R C_Y & S_Y S_R + C_Y S_P C_R \\ C_P S_R & C_R C_Y + S_R S_P S_Y & S_P S_R C_Y - C_R S_Y \\ -S_P & S_Y C_P & C_P C_Y \end{bmatrix} \quad (2) \end{aligned}$$

其中 $C_R = \cos \varphi_R, C_P = \cos \varphi_P, C_Y = \cos \varphi_Y, S_R = \sin \varphi_R, S_P = \sin \varphi_P, S_Y = \sin \varphi_Y$ 。

而 $p_i(x_{Pi}, y_{Pi}, z_{Pi})$ 为 $P_i (i = 1, \dots, 8)$ 在局部坐标系 $Px_Py_Pz_P$ 中的坐标。于是对应一个已知的模型位姿 X , 各根绳的长度 $l_i = \|B_i - P_i\|, (i = 1, \dots, 8)$ 可求出。

2.2 静力学模型

该支撑系统在实施过程中不仅需控制各绳长, 还必须通过其拉力来控制模型, 即需要建立静力学模型。如图3所示, 设 $L_i = B_i P_i, l_i = \|L_i\|, u_i = L_i / l_i, t_i$ 为第 i 根绳的拉力, 该拉力产生一个作用于缩比模型的拉力 $T_i = t_i u_i$ 。记 $r_i = P P_i$ 。如果要在缩比模型上作用力螺旋(如重力、空气动力等), 则最低要求是所有绳的拉力都应大于零。

假设缩比模型承受八根绳的牵引力和重力, 但处于静力学平衡状态, 则其静力学平衡方程可表示为:

$$W = -J^T T \quad (3)$$

式中 T 是8个分量组成的向量 $(t_1 \dots t_8)$, 力螺旋 $W = \begin{bmatrix} (f_p)_{3 \times 1} \\ (\tau_p)_{3 \times 1} \end{bmatrix}$, 是具有6个分量的外力向量, J^T 是机构的结构矩阵。

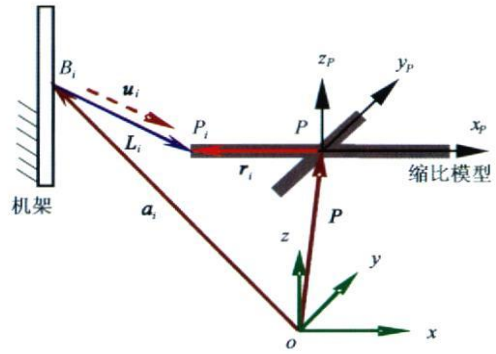


图3 绳牵引并联运动机构的运动学符号
Fig.3 Kinematics symbol of wire driven parallel manipulator

3 姿态静力学工作空间分析

绳牵引并联机构的可控工作空间 (Controllable workspace) 可定义为满足动平台所受力平衡和力矩平衡, 且各根绳具有正拉力值的所有动平台位姿的集合。

在一个六维空间里, 任一组向量 V 是封闭的。当且仅当 V 至少有7个向量 (w_1, w_2, \dots, w_7) 满足两个条件:

(1) 该7个向量中的任一组6个向量都是线性无关的;

(2) $\sum_1^7 t_i w_i = 0$ (对于任意 i 都满足 $t_i > 0$)。

在六自由度绳牵引并联机构中, 记 t_i 和 w_i 分别为绳拉力的标量值和绳牵引方向矢量, 则

$$w_i = \begin{bmatrix} u_i \\ r_i \times u_i \end{bmatrix}, u_i = [u_{ix} \quad u_{iy} \quad u_{iz}]^T$$

$$(u_{ix}^2 + u_{iy}^2 + u_{iz}^2 = 1)$$

式中 r_i 为动平台参考点 P 到第 i 根绳与动平台的固定点的位移矢量(见图3), $r_i = [r_{ix} \quad r_{iy} \quad r_{iz}]$ 。若作用在动平台上的外力和外力矩 $W = \begin{bmatrix} (f_p)_{3 \times 1} \\ (\tau_p)_{3 \times 1} \end{bmatrix}$ 为零, 且当机构不奇异时, 8个绳牵引方向

矢量中的任一组6个矢量都是线性无关的, 所以满足矢量封闭原理。基于此, Kawamura 和 Verhoeven 根据 $T = (I_{8 \times 8} - (J^T)^+ J^T) k$ 的各个分量 t_i 必须大于零, 导出了动平台位姿落在可控空间内的充要条件, 即 $N(J^T) > 0$ 。

按照以上提出的方法, 在 Matlab 环境下, 采用 Monte Carlo 技术编程仿真, 可确定此六自由度绳牵引并联机构的缩比模型在主位置 $(0, 0, 0)$ 的转动工作空间, 仿真结果如表1。

表1 缩比模型位于主位置时可达转动工作空间

Table 1 Rotation workspace in main position		
	姿态角	工作空间
偏航	$\varphi_Y (\varphi_R = 0, \varphi_P = 0)$	- 51.8° ~ 51.8°
滚转	$\varphi_R (\varphi_Y = 0, \varphi_P = 0)$	- 90° ~ 90°
俯仰	$\varphi_P (\varphi_Y = 0, \varphi_R = 0)$	- 90° ~ 90°

4 模型姿态控制研究

4.1 实验平台控制部件

该文的实验平台硬件包括样机、运动控制卡、电机及用于控制的上位机。根据实验研究的要求,运动控制卡选用两个固高科技(深圳)有限公司出品的GT-400-SG-PCFG四轴通用型运动控制卡,用于试验中的八轴控制;电机则采用深圳白山机电一体化技术有限公司出品的BS57HB76-03步进电动机及其匹配的Q2HB44MC电机驱动器;电机控制柜为定制,其内部电源、电机驱动器以及运动控制卡接口板等电子器件的线路搭接,见图4。



图4 电机控制柜内电子器件的线路搭接
Fig.4 Circuit connecting in the control cupboard

4.2 转动自由度的运动控制

在进行风洞试验时,将飞行器模型用支撑系统置于风洞试验段的均匀流中,飞行器为执行预定的任务需要变化不同的飞行姿态。在设计阶段,只有通过风洞试验才能验证其在各种飞行姿态下的飞行性能和气动特性与载荷。因此在实验中,主要应完成对缩比模型在主位置处的各种姿态的控制,即3个转动自由度(俯仰、滚转、偏航)的运动控制。

在实例控制中,采用Visual C++编制驱动程序,进行缩比模型的转动运动控制实验,实现了改变其3个姿态角的运动控制,并达到了表1中的各姿态角变化范围。图5是模型达到最后姿态时的实验结果。

在实例控制试验中还对若干姿态角进行了初步测量。例如,分别设置俯仰角和滚转角为10°、45°、80°,偏航角为10°、45°,测量结果表明相对误差在1%附近。作为原理样机,存在试验误差是难免的,但也

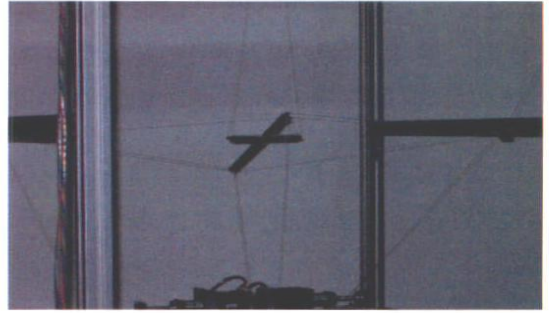


图5 姿态角运动控制实验
Fig.5 Control experiment of attitude angle moving

不是无法克服的。因此在后续的研究工作中还需不断地完善样机,逐步消除误差。通过初步的分析,引起实验误差的主要原因有以下几个方面:具体的传动机构设计得不够合理,导致控制绳长不够精确;点铰链的设计也需改进;绳长的变形尚未加以考虑。另外样机本身也存在系统误差。这些都是下一步的工作重点。

4.3 转动自由度振荡控制

动态参数的剧烈变化是造成飞行器头部偏摆、机翼抖振、偏航反效、滚转异常及螺旋失控等事故的主要原因,因此,对其研究具有重要意义。动稳定性导数(简称动导数)作为主要的动态参数,表示的是当模型转动或平移时,气动力和力矩对模型姿态参数时间变化率的导数。不同飞行器在不同状态下飞行起主要作用的动导数是不同的,风洞实验的目的即是测出对飞行器性能影响较大的那些动导数,这些动导数是飞行器动态品质分析不可缺少的原始气动参数。

为今后进行动导数试验,本文在样机上进行了缩比模型的俯仰、滚转、偏航3个转动单自由度振荡试验的初步尝试。图6是3个转动单自由度振荡试验的控制界面。通过该界面,可以根据需要对不同的转动自由度分别选择振幅、频率,以及连续振荡次数等。

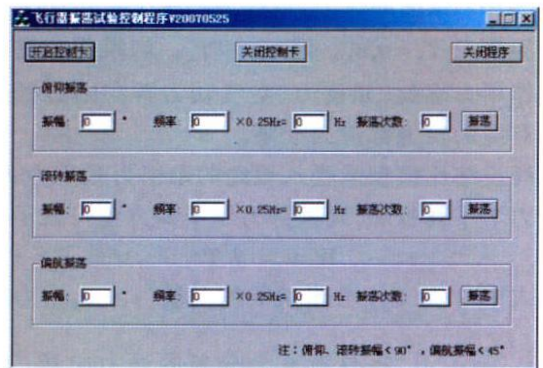


图6 姿态角运动控制实验
Fig.6 Program interface of oscillation control

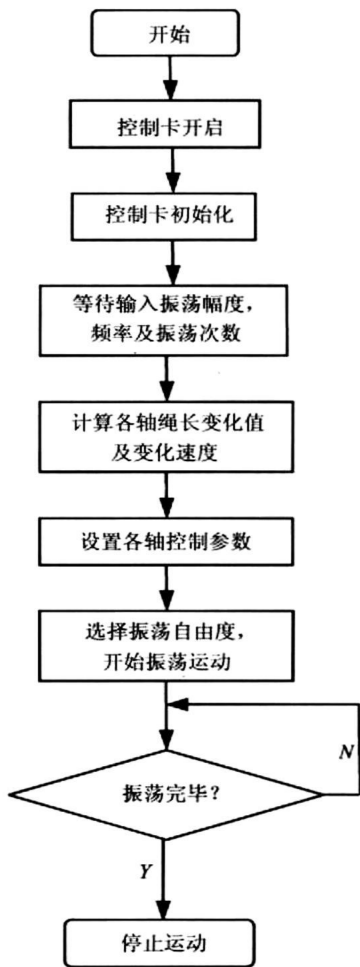


图7 振荡控制程序流程图

Fig.7 Flow chart of oscillation control program

表2 振荡试验振幅及其最大频率

Table 2 Amplitude and frequency of oscillation experiment

姿态角	振幅(°)	频率(Hz)
俯仰角	5	1.5
	10	0.625
滚转角	5	2
	10	1.25
偏航角	5	0.625
	10	0.5

目前,在该文样机的条件下可实现模型在各转动自由度下振幅 $0^\circ \sim 10^\circ$ 、频率 $0 \sim 2\text{Hz}$ 的振荡试验。图7为实现单自由度振荡试验的控制程序流程图。根据动导数试验的一般要求,该文对各转动自由度选择了若干振幅配合相应的频率进行控制试验(见表2),初步

实现了3个单转动自由度的振荡。具体的各转动自由度振荡试验结果可从该文的博客网站上调阅^[7]。这些工作为今后利用绳牵引并联机构测量动导数奠定了实验基础。

5 结束语

笔者分析了风洞试验的新型“软式”支撑系统绳牵引并联机构较传统“硬式”支撑的优势,提出了八绳牵引的六自由度 WDPSS-8 系统,搭建了六自由度绳牵引并联机构样机,对机构的运动学、静力学进行了分析,得出用于位姿控制的绳长变化与位姿坐标关系表达式,同时探讨了缩比模型处于主位置时的姿态工作空间。在理论分析的基础上,通过八绳六自由度绳牵引并联机构的实验平台,进行了俯仰、滚转、偏航运动的控制研究,实现根据所需姿态角的度数运动到指定角度的控制,对控制实验中产生的误差进行了初步的分析,同时对单自由度的振荡运动控制做了初步的研究,实现了按指定振幅和频率的振荡控制,为今后更为复杂的运动控制的研究奠定了良好的基础。

参考文献:

- [1] 刘雄伟, 郑亚青, 林麒. 应用于飞行器风洞试验的绳牵引并联机构技术综述[J]. 航空学报, 2004, 25(4): 393-400.
- [2] BOSSCHER P, EBERF UPHOFF I. Wrench based analysis of cable driven robots[C] // IEEE International Conference on Robotics and Automation, New Orleans, LA, USA, 2004: 4950-4955.
- [3] LIN Q, ZHENG Y Q, LIU X W. Modeling and control of a wire driven parallel support system with large attack angles in low speed wind tunnels[C] // Proceedings of 25th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences, Hamburg, Germany, 3~ 8 September 2006.
- [4] 郑亚青, 林麒, 刘雄伟. 低速风洞绳牵引并联支撑系统的机构与模型姿态控制方案设计[J]. 航空学报, 2005, 26(6): 774-778.
- [5] <http://www.onera.fr/dcsd/saco/index.php>
- [6] 郑亚青, 林麒, 刘雄伟. 低速风洞绳牵引并联支撑系统的运动学参数标定[J]. 中国机械工程, 2006, 17(6): 551-554.
- [7] <http://blog.sina.com.cn/AircraftEngineering>.