

文章编号:1000-6893(2005)06-0774-05

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

郑亚青¹, 林 麒², 刘雄伟³

(1. 华侨大学 机电及自动化学院, 福建 泉州 362021)

(2. 厦门大学 机电工程系, 福建 厦门 360005)

(3. School of Aerospace, Automotive and Design Engineering, University of Hertfordshire, U K)

Design Methodology of Wire-Driven Parallel Support Systems in the Low Speed Wind Tunnels and Attitude Control Scheme of the Scale Model

ZHENG Ya-qing¹, LIN Qi², LIU Xiong-wei³

(1. College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China)

(2. Department of Mechatronics, Xiamen University, Xiamen 360005, China)

(3. School of Aerospace, Automotive and Design Engineering, University of Hertfordshire, U K)

摘 要: 首先介绍作为风洞试验中新型“软式”支撑系统的绳牵引并联支撑系统;其次,在给定的设计要求下,依据缩比模型所需运动,探讨绳牵引并联支撑系统的设计原理,并提出详细的设计步骤,得到了一个 8 根绳牵引的 RRPM:WDPSS-8,使缩比为 1/40 的 F-15E 模型可实现的俯仰角达 -79°~71°;滚转角达 -90°~90°;偏航角达 -38°~39°;最后,在建立系统的动力学模型的基础上,采用基于绳长关节空间的驱动力矩控制器的位置控制方案来进行缩比模型的姿态控制,并用 Lyapunov 函数证明缩比模型在该控制规则下的运动稳定性。
关键词: 机械原理与机构学;绳牵引并联支撑系统;几何法;风洞;姿态控制

中图分类号:V260;TH112 文献标识码:A

Abstract: Firstly, the wire-driven parallel support system is presented. Secondly, the designing principle of the support systems in a low speed wind tunnel is investigated according to the experimental requirement of a vehicle model. Under the principle, the detail of the design about a new kind of redundantly restrained positioning mechanisms with 8 wires, WDPSS-8, is presented to suspend the 1/40 scale model of F-15E. By this design, the ranges of pitch, roll and yaw angles of the model at the home pose respectively are -79°~71°, -90°~90°, -38°~39°. Finally, based on the systematic dynamics model, a position control scheme in wire length coordinates applying an actuator torque controller is proposed to implement the attitude control of the model. Moreover, the motion stability is proven by a Lyapunov function.

Key words: theory of machines and mechanisms; wire-driven parallel support system; geometrical method; wind tunnel; attitude control

1 风洞试验的“软式”支撑系统

风洞试验一般采用硬式支架,且以尾撑做主支撑系统居多^[1]。支架会对风洞中模型附近的气流流场产生干扰,测量误差虽然可以采用试验的方法来修正,但事实上很难做到完全修正^[2]。支架也使得模型实现各种飞行姿态有着不同程度的困难,以致于无法测量到所关心的气动力参数。

因此,探索一种新的模型支撑系统:“软式”支撑系统,以便提高风洞试验数据的质量是一个

十分重要的课题。绳牵引并联支撑系统是一种近年才出现的新型的“软式”支撑系统。研究表明,“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,不仅气流干扰量小,且攻角和侧滑角范围大,很适用于导弹动力学、飞行控制和航空器的风洞试验^[3]。

将绳牵引并联机构应用于风洞模型的支撑是近年来随着并联机构学与力控制技术的发展而提出的一种新概念^[4]。绳牵引并联支撑系统采用 $m(m-7)$ 根并联的绳以点状铰链的形式来牵引模型(将其抽象为动平台)。如图 1 所示,每根绳的另一端分别由安装在固定机架上的各个绞盘以点状铰链的形式引导。通过控制绳的长度可改变模型相对于气流的方位,实现模型 6

收稿日期:2004-09-02; 修订日期:2005-03-24

基金项目:国家自然科学基金(50475099)资助项目

自由度的位姿变化;通过测量各根绳的拉力可计算空气动力作用在模型上的外力和外力矩,从而进行力控制。

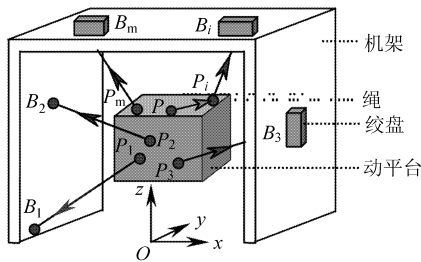


图1 6自由度绳牵引并联机构

Fig. 1 6-DOF (degree of freedom) wire-driven parallel manipulator

法国国家航空研究局支持的绳牵引并联机构—SACSO项目已取得初步成功,该机构长3 m,适用于直径4 m的风洞。该系统目前正处于调整与测试阶段^[4]。

如何精确地进行姿态控制和载荷测量是绳牵引并联支撑系统实际中要解决的两大关键问题。本文将研究低速风洞绳牵引并联支撑系统的机构和模型姿态控制方案设计。

2 绳牵引并联支撑系统的机构设计

(1) 设计要求

本方法是以具有一般性指导意义的一特例来说明风洞绳牵引并联支撑系统的设计方法,与文献[5]提出的设计方法有本质的差别:前者是依据缩比模型所需运动而逐步增加绳的过程,而文献[5]的设计方法则侧重讨论如何选择使缩比模型的姿态角变化范围增大的绳的布置方法。

选择F-15E的缩比模型作为支撑控制对象。F-15E的机动性很大,其姿态角变化范围很大,如此之大的姿态变化,用硬式支撑是无法实现的。

假设风洞试验段横截面直径为 $\varnothing=2$ m。F-15E的实际翼展为13.5 m,机身长度为19.45 m,机身高度为5.64 m。根据风洞的条件,选择模型的缩小比例为1/40,图2为其示意图。图中参考点P为模型的重心。绳采用直径d为1 mm的超高强度聚乙烯纤维,单位刚度 $k=94247$ N/m。

(2) 设计原理及设计步骤

设计原理

由于要求缩比模型能在风洞里的3维空间模

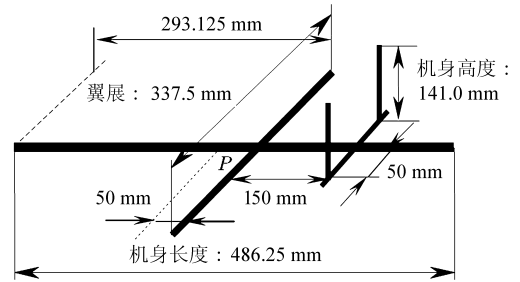


图2 F-15E缩比模型

Fig. 2 Scale model of F-15E strike eagle

拟自由飞行,实现3种姿态的变化,因此所设计的系统必须对模型实现6自由度的完全控制,即牵引绳必须7根或7根以上,且绳与模型的连接点的数目至少为3点。为了使模型姿态控制更为简单,要求机构的运动学正解越简单越好,所以应尽量使用绳与模型连接点有重合的构型。此外,由于模型关于自身纵轴是对称的,所设计的绳与模型连接点最好也关于该轴对称。基于此,可假设绳与模型连接点的数目为4,即机头、机尾和两侧翼梢每处各1点,如图3所示。

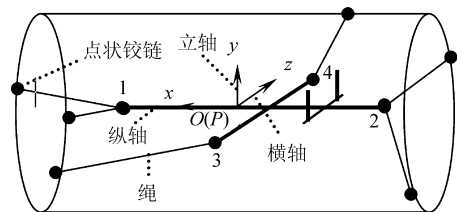


图3 设计原理草图

Fig. 3 Draft of design principle

设计步骤

下面根据缩比模型的3个姿态角变化范围探讨绳与模型连接点,以及绳与机架的连接点的布置方案。

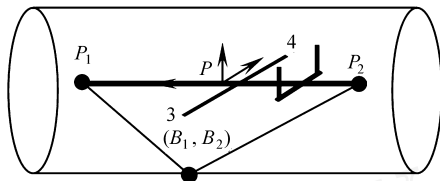
应先使俯仰角的变化范围尽可能大,再尽量增大滚转角和偏航角连续变化的范围,因而确定机构沿风洞主气流方向的长度为1.5 m。

设计时,将缩比模型放置于机架的中央,如图3所示。假设它由若干根绳牵引,每根绳的另一端以点状铰链的形式与固定在机架上的绞盘相连(在图中省略)。如果固定坐标系 $Oxyz$ 建立在机构的中央,并使模型参考点P与坐标系 $Oxyz$ 的原点O重合, Ox 轴与模型机身的纵轴重合, Oy 轴与模型立轴重合, Oz 轴与模型的横轴重合,3轴相互垂直。具体的设计步骤如下:

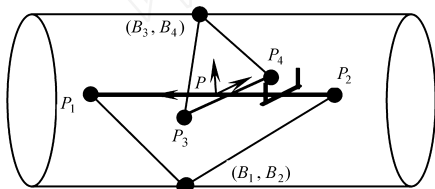
第1步:为实现模型绕横轴(Oz 轴)的俯仰运

动,可在“1”处和“2”处(见图3)各布置一个绳的连接点,为防止绳与模型的垂直尾翼碰撞,两根绳的另外一端重合且布置在机架底部,见图4(a)。

第2步:为实现模型绕纵轴(O_x 轴)的滚转运动,可在“3”处和“4”处(见图3)各布置一个绳的连接点,而这两根绳的另外一端重合且布置在机架的顶部,如图4(b)所示。



(a) 步骤1



(b) 步骤2

图4 设计步骤1和2

Fig. 4 Step 1 and 2 in design

第3步:为实现模型绕立轴(O_y 轴)的偏航运动,可在“1”处和“2”处(见图3)再各布置几根绳,绳的另一端分别布置在机架的前、后圆端面上。但必须解决两个问题,即确定绳的数目以及绳在圆端面的分布位置。绳数目确定的主要依据:一是确定机构的类型(是完全约束定位机构 CRPM 还是冗余约束定位机构 RRPM);二是看绳与模型连接点是否需要完全控制,若需要,则一个连接点至少要布置3根绳。

绳在端面的布置必须遵循如下原则:若分布在两个端面的绳的数目是一样的,则它们的分布位置不能一样,否则所产生的绕立轴的力矩会互相抵消,致使无法实现偏航运动。

为了使缩比模型上的 P_1 和 P_2 能得到完全控制,以便运动时减少奇异点,可在“1”处和“2”处各加上两根绳。

如图5,不妨选择“1”处的两根绳(绳5与绳6,称为前端绳)在前端面的布置关于立轴对称;并将“2”处的两根绳(绳7与绳8,称为后端绳)对称分布在后端面上,分别与立轴的正向和横轴的正向成 45° 和 135° 。

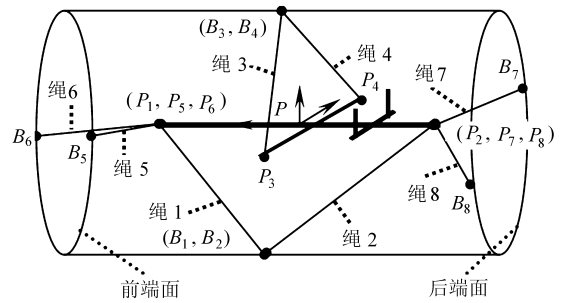


图5 设计步骤3

Fig. 5 Step 3 in design

按照以上步骤设计出的机构为八根绳牵引的 RRPM,将其命名为 WSPSS-8。

从图中可以直观地得到以下结论:缩比模型在机架的中部做滚转运动时,除了绳3和绳4运动外,其余各绳的长度是不变的。因此,模型的滚转运动相对于俯仰运动和偏航运动是独立的,故滚转角能在 $\pm 90^\circ$ 之间连续变化。

前端绳与后端绳的分布还可根据设计经验或实际要求进行布置,然后再通过计算其转动工作空间验证是否达到设计要求。

3 工作空间分析

(1) 静力学模型

如图5所示,设 $L_i = \overrightarrow{PB_i}$, $l_i = |L_i|$, $u_i = L_i / l_i$, 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 $r_i = \overrightarrow{PP_i}$ 。如果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。

缩比模型的位置用 P 相对于坐标系 $Oxyz$ 的坐标 $(x_P \ y_P \ z_P)^T$ 表示,当 P 与原点 O 重合时(见图3),称该位置为模型的主位置 X_{mp} 。缩比模型的3个姿态角分别为:滚转角 α 、俯仰角 β 和偏航角 γ ,它们分别相对于 Ox 轴、 Oz 轴和 Oy 轴的正方向而言,且均以右手螺旋为正。

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

$$F = J^T T \quad (1)$$

式中: T 是8个分量组成的向量 $(t_1 \dots t_8)^T$; 力螺旋

$$F = \begin{bmatrix} (m_P g)_{3 \times 1} \\ \mathbf{0}_{3 \times 1} \end{bmatrix};$$

是具有6个分量的重力向量,且 J^T 满足

$$J^T = \begin{bmatrix} u_1 & \dots & u_8 \\ r_1 \times u_1 & \dots & r_8 \times u_8 \end{bmatrix}_{6 \times 8} \quad (2)$$

(2) 转动工作空间分析

风洞试验时,模型基本上不移位,只在原地改变姿态。因此有必要研究在给定的绳拉力范围内,缩比模型在三维空间中某一指定位置(一般指的是主位置,即风洞的中央)转动工作空间的大小,即缩比模型可达到的 3 个姿态角的范围。确定转动工作空间大小的算法见参考文献[6]。

这里取绳的最小预紧力 $t_{min} = 10\text{ N}$,最大许可拉力 $t_{max} = 200\text{ N}$, $T_{des} = (t_{des} \dots t_{des})^T$, $t_{des} = 100\text{ N}$,缩比模型的质量 $m_p = 5\text{ kg}$ 。设缩比模型的主位姿 $X = \begin{pmatrix} X_{hp} \\ X_{ang} \end{pmatrix}$ 位于机构的中央,主位置 $X_{hp} = (x = 0 \quad y = 0 \quad z = 0)^T$,主姿态 $X_{ang} = (R = 0^\circ \quad P = 0^\circ \quad Y = 0^\circ)^T$ 。若图 5 所示机构的缩比模型在 X_{hp} 处,假设每次仅绕一个坐标轴运动,且仅考虑 $\pm 90^\circ$ 内的转动,经计算, P 可达 $-79^\circ \sim 71^\circ$, Y 可达 $-38^\circ \sim 39^\circ$, R 可达 $\pm 90^\circ$ 。

4 姿态控制方案研究

研究动力学模型是在不考虑驱动器与绳等引起的非线性弹性及绳的质量等理想条件下进行的。

(1) 驱动器的动力学模型

$$M\ddot{l} + B\dot{l} = -T \quad (3)$$

式中: $l = (l_1 \dots l_8)^T$ R^8 是绳长向量; $M = \text{diag}(m_1 \dots m_8)$ $R^{8 \times 8}$ 是驱动器的惯性矩阵; $B = \text{diag}(b_1 \dots b_8)$ $R^{8 \times 8}$ 是驱动器粘性摩擦系数矩阵; $F = (f_1 \dots f_8)^T$ R^8 是驱动器力矩向量; $T = (t_1 \dots t_8)^T$ R^8 是绳拉力向量。

(2) 缩比模型的动力学模型

$$\frac{d}{dt}(M_0 \cdot X) = F - F_g \quad (4)$$

式中: $M_0 = \begin{bmatrix} (m_p I)_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & A_G(3 \times 3) \end{bmatrix}$ 是缩比模型的惯性矩阵; m_p 是缩比模型的质量; I 为 3×3 的单位阵; A_G 是缩比模型关于重心的惯性矩; X 是缩比模型的位姿; F 是由绳拉力所引起的作用在缩比模型的外力螺旋,满足 $F = J^T T$,其中, J 是机构的 Jacobi 矩阵,满足 $\dot{l} = J\dot{X}$; $F_g = (0 \quad 0 \quad m_p g \quad 0 \quad 0 \quad 0)^T$ 是缩比模型的重力向量; g 为重力加速度。

(3) 绳牵引并联支撑系统的整体动力学模型

由式(3)和式(4)可导得系统的整体动力学模型

$$(M_0 + J^T M J) \ddot{X} + \left(M_0 + J^T M J + J^T B J \right) \dot{X} = J^T F - F_g \quad (5)$$

绳牵引并联支撑系统的动力学模型是高度耦合的非线性系统,冗余驱动引入了过约束。在设计控制方案时,必须对动力学模型进行线性化和解耦处理:对重力这样的稳定干扰可采用补偿来消除;采用特定的绳拉力计算算法来解决由于冗余驱动带来的绳拉力的不确定性^[4]。

在对动力学模型进行上述处理的基础上,可采用简单的 PD 反馈控制规则的控制方案。

缩比模型的姿态控制属于位置控制,可通过控制绳的长度或直接控制位姿得以实现。由于缩比模型的位姿不容易通过外部传感器检测与反馈,这里用绳长坐标表示的驱动力矩控制器来设计姿态控制方案,如图 6 所示。

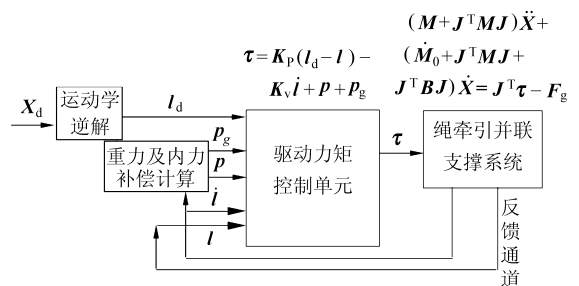


图 6 姿态控制方案

Fig. 6 Attitude control scheme

在给定一个期望姿态 X_d 下,可容易地通过运动学位置逆解求出对应的各根绳的长度向量 l_d 。PD 反馈控制规则用绳长向量表示的驱动器的力矩 $\tau = K_p(l_d - l) - K_v \dot{l} + p + p_g$ 。这里 K_p 和 K_v 是反馈增益矩阵,而 p 是绳的内力向量,满足 $J^T p = 0$; p_g 用来补偿重力的稳定干扰,满足 $p_g = (J^T)^+ F_g$ 。结合式(5)与该控制规则可得到如下的闭环系统

$$(M_0 + J^T M J) \ddot{X} + \left(M_0 + J^T M J + J^T B J - J^T K_v J \right) \dot{X} - J^T K_p (l_d - l) = 0 \quad (6)$$

下面证明该 PD 控制规则的稳定性。首先以系统的总能量构造正定的 Lyapunov 函数^[7]

$$V = \frac{1}{2} \dot{l}^T M \dot{l} + \frac{1}{2} (l_d - l)^T K_p (l_d - l) + \frac{1}{2} \dot{X}^T M_0 \dot{X}$$

函数 V 全局正定且递减,用式(6)所表示的轨迹计算 \dot{V} ,即对函数 V 关于时间 t 求导,并结合方程(3)和(4),整理后可得

$$\dot{V} = -\dot{l}^T (B + K_v) \dot{l}$$

虽然 $(B + K_v)$ 可能为正定阵,但当 $\dot{l} = 0$ 且 $l = l_d$ 时, $\dot{V} = 0$,所以 V 是负半定的,即 $\dot{V} \leq 0$ 。根据

Lyapunov 基本定理,可得到平衡点 $l = l_d$ 是稳定的。

另一方面,为了证明该 PD 控制规则的渐近稳定性,可运用 Lyapunov 原理。 $\dot{V} = 0$ 的集合 $S = \{ (l, \dot{l}) \mid \dot{l} = 0 \}$,为获得 S 中的最大不变集合,将 $\dot{l} = 0$ 代入式(6),得 $J^T K_p (l_d - l) = 0$ 。由于矩阵 J^T 不是方阵,则 $K_p (l_d - l)$ 可能为 0 ,也可能不为 0 。在 $K_p (l_d - l)$ 不为 0 的情况下,缩比模型运动停止在不对应于期望绳长 l_d 的位姿,而这是不可能的,所以推断: S 中的最大不变集合就是当时间 t 趋向于无穷大时单点 $l = l_d$,即平衡点 $l = l_d$ 是渐近稳定性的,这时 $\dot{V} = p + p_g$ 。

5 结 论

(1) 绳牵引并联支撑系统作为一种新型“软式”支撑系统,是风洞支撑系统的发展方向。

(2) 依据缩比模型所需的运动,探讨了绳牵引并联支撑系统的设计原理,并提出详细的设计步骤,得到了一个较好的构型:WDPSS-8。

(3) 在给定绳拉力和缩比模型的质量时,WDPSS-8 的缩比模型在主位置处的俯仰角可达 $-79^\circ \sim 71^\circ$,滚转角达 $-90^\circ \sim 90^\circ$,偏航角达 $-38^\circ \sim 39^\circ$,且可以满足风洞实验中连续调整模型姿态的要求。

(4) 理论证明用绳长坐标表示的驱动力矩控制器的运动控制方案可实现缩比模型的姿态控制,可以证明该控制规则是稳定的。

参 考 文 献

- [1] 顾蕴松, 明晓. 大攻角非对称流动的非定常弱扰动控制[J]. 航空学报, 2003, 24(2): 102 - 106.
Gu Y S, Ming X. Forebody vortices control using a fastswirling micro tip-strake at high angles of attack[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2003, 24(2): 102 - 106. (in Chinese)
- [2] 卞於中, 李祥瑞, 李立, 等. 低速闭口风洞模型张线支撑及内天平测量系统的研制[J]. 流体力学实验与测量, 1999, 13(3): 85 - 90.
Bian Y Z, Li X R, Li L, et al. Development of model cable mount and strain gauge balance measuring system in low speed closed wind tunnel[J]. Experiments and Measurements in Fluid Mechanics, 1999, 13(3): 85 - 90. (in Chinese)
- [3] 吴成. 风洞张线支撑系统[J]. 国际航空, 2004(5): 62.
Wu C. Wire suspension system for wind tunnel dynamic testing[J]. International Aviation, 2004(5): 62. (in Chinese)
- [4] 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.
Liu X W, Zheng Y Q, Lin Q. Overview of wire-driven parallel manipulators for aircraft wind tunnels[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2004, 25(4): 393 - 400. (in Chinese)
- [5] Lafourcade P, Llibre M, Reboulet C. Design of a parallel-wire-driven manipulator for wind tunnels[A]. Proceedings of the Workshop on Fundamental Issues and Future Directions for Parallel Mechanisms and Manipulators [C]. Quebec City, Quebec, 2002. 187 - 194.
- [6] 郑亚青, 刘雄伟. 6 自由度绳牵引并联机构的运动轨迹规划[J]. 机械工程学报, 2005, 41(2): 77 - 81.
Zheng Y Q, Liu X W. Trajectory planning of a 6-DOF wire-driven parallel manipulator [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(2): 77 - 81. (in Chinese)
- [7] Kino H, Cheah C C, Yabe S, et al. A motion control scheme in task oriented coordinates and its robustness for parallel wire driven systems[A]. Proceedings of International Conference on Advanced Robotics[C]. Tokyo, 1999. 545 - 550.

作者简介:

郑亚青(1974 -) 女,福建永春人,福建泉州华侨大学机电及自动化学院机电工程系讲师,工学博士。研究领域为绳牵引并联机构。电话:0595-22692536。E-mail: yq_zheng@hqu.edu.cn

林麒(1954 -) 女,广东揭阳人,工学博士,厦门大学机电工程系教授。主要研究领域为气体动力学和航空工程。电话:0592-2182483。E-mail: qilin@xmu.edu.cn

刘雄伟(1965 -) 男,湖南湘潭人,工学博士,Senior Lecturer, School of Aerospace, Automotive and Design Engineering, University of Hertfordshire, UK。主要研究领域为 CAD/CAM、CNC 系统与机床、绳牵引并联机构、高速加工动力学与加工过程控制、模具设计与制造。E-mail: xiongweiliu@263.net

(责任编辑:蔡斐)