

# Flow Induced Vibration Research about the Application of Cable-Driven Parallel Manipulator in Wind Tunnel

Zhenghong Hu, Miaojiao Peng, Yangfeng Ji, Qi Lin, Xiaoguang Wang

School of Aerospace Engineering, Xiamen University, Xiamen Fujian  
Email: xgwang@xmu.edu.cn

Received: Feb. 19<sup>th</sup>, 2017; accepted: Mar. 6<sup>th</sup>, 2017; published: Mar. 9<sup>th</sup>, 2017

---

## Abstract

According to the application of cable-driven parallel manipulator (CDPM) in a low-speed wind tunnel, fluid-structure interaction analysis of cable induced vibration caused by the incoming flow is presented in this paper. The vibration characteristic of a cable with the airspeed of 17 m/s is analyzed using the fluid-structure interaction module of ANSYS workbench. The optimal pre-tension of cable is determined through the unilateral fluid-structure interaction analysis. Then the vibration characteristics of a cable under different conditions are simulated with bidirectional fluid-structure interaction module, and the maximum vibration displacement point with corresponding change history under different vibration conditions is given. The simulation results show that the maximum vibration displacement point locates at the middle of the cable and the vibration displacement is small. The maximum vibration direction is the same as the direction of the wind. Different operating conditions have influence on the vibration of cable, but the influence is relatively small.

## Keywords

CDPM; Low-Speed Wind Tunnel Test, Driving Cable, Fluid-Structure Interaction, Flow Induced Vibration

---

# 风洞试验绳牵引并联支撑系统流致振动研究

胡正红, 彭苗娇, 冀洋锋, 林 麒, 王晓光

厦门大学航空航天学院, 福建 厦门  
Email: xgwang@xmu.edu.cn

收稿日期: 2017年2月19日; 录用日期: 2017年3月6日; 发布日期: 2017年3月9日

---

## 摘 要

本文针对绳系并联支撑系统在低速风洞中的应用, 对流场引起的牵引绳振动情况进行了流固耦合分析。基

于ANSYS workbench的流固耦合模块, 对来流速度为17 m/s时绳的振动特性进行分析。首先通过单向流固耦合分析, 选择牵引绳最佳预紧力。其次, 利用双向流固耦合模块, 分析了不同工况下绳的振动特性, 给出了对应情况下绳的最大振动位移点及其历程变化。结果表明, 最大振动位移点基本都在绳中间位置, 且振动位移较小; 绳最大振动方向主要表现为顺流向, 不同工况对绳的振动行为会有一定影响, 但影响较小。

## 关键词

绳系并联支撑, 低速风洞试验, 牵引绳, 流固耦合, 流致振动

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

风洞试验[1]作为目前飞行器研制的最重要手段, 风洞试验结果的可靠度直接影响飞行器的设计以及其气动性能。目前飞行器进行风洞试验时采用的支撑方式主要是传统的硬式支撑: 尾部支撑、侧壁支撑、背部支撑和腹部支撑。近年来随着并联支撑系统的发展, 绳牵引并联机构作为一种软式支撑在风洞试验中优势越发显著, 绳索对模型周围流场干扰小且容易实现高速及复杂运动规律的运动, 使其发展研究及应用备受关注。

目前已知的研究进展主要有国外法国国家航空研究局支持的“SACSO项目”, 研究工作已经开展了多年, 成功将绳牵引并联机构应用于立式风洞试验中[2] [3]。国内方面研究, 文献[4]对绳牵引并联支撑系统国内研究情况进行了介绍。文献[5]利用张线支撑研究硬式支撑干扰问题。文献[6]构建了一整套风洞试验绳牵引六自由度并联支撑系统, 采用拉力传感器在牵引绳上测得绳拉力, 用于解算相关气动参数。针对绳索的流致振动可能对支撑系统运动精度的影响需要做进一步研究。

文献[7]分别从改进离散格式, 构建流固耦合边界数据传递新方法等研究了柔性结构的流固耦合风效应问题。文献[8]研究了斜拉索的气动特性。文献[9] [10]基于流固耦合分析了长单索结构风致振动响应的特点。文献[11]研究了海洋悬跨管道、深海采矿系统中的输送软管、水中悬浮隧道等细长柔性结构在水中的流固耦合振动特性。文献[12]引入流体运动控制方程和大涡模拟湍流模式, 提出风与结构的流固耦合方程的迭代求解过程, 研究大跨度柔性空间结构的表面风压和流固耦合效应。文献[13] [14]分析长斜拉索风致振动情况, 并针对索结构的振动控制做了相关研究。本文中的绳牵引并联支撑系统主要应用于飞行器模型的风洞试验, 由于风洞试验中对飞行器位姿的精准度要求比较高, 因此对于支撑系统中柔性绳索在低速来流情况下绳流固耦合振动的相关研究显得尤为重要。

绳牵引系统应用于风洞试验时, 其绳在来流状态下和流场会有一定程度上的耦合情况, 由于支撑系统的牵引绳直径很小, 因此流固耦合[15]基本表现为流场对绳的影响, 来流状态下致使绳变形的情况可能会影响飞行器位姿。因此本文主要对绳牵引系统中牵引绳的流固耦合情况做了相关研究。

## 2. 流固耦合控制方程及其理论基础

流固耦合控制方程主要由两部分组成, 流体控制方程和固体控制方程。

### 2.1. 流体控制方程

流体流动遵循基本的守恒定律, 本文主要涉及为低速不可压流动, 选用的是无量纲化的 N-S 方程组:

$$\begin{cases} \frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{\text{Re}} \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} \\ u_{i,i} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中的四项依次为瞬态项、对流项、源项和扩散项。

## 2.2. 固体控制方程

$$\rho_s \ddot{d}_s = \nabla \cdot \sigma_s + f_s \quad (2)$$

$\rho_s$  表示固体密度,  $\ddot{d}_s$  表示固体域当地加速度矢量,  $\sigma_s$  柯西应力张量,  $f_s$  体积力矢量。

## 2.3. 流固耦合基本理论

流固耦合针对其控制方程的解法不同可分为强耦合和弱耦合[16]。强耦合法主要是构造流体域和固体域统一方程并在同一时间步内对流体变量及固体变量进行求解, 并将求解结果用于下一时间步计算。此方法计算精度高, 由于其对计算资源要求高, 因此不适合用于计算解决复杂工程问题, 比较适用于耦合场的理论分析。弱耦合法在同一时间步内对流体域和固体域分别单独进行计算, 然后通过流固耦合界面相互传递流体域和固体域解算结果, 从而实现耦合求解。

从对流固耦合界面信息传递的处理方法不同又可分为单向流固耦合和双向流固耦合。单向耦合是指流固耦合分析中耦合界面数据传递是单向的, 主要是把 CFD 分析计算流场结果传递给固体结构分析, 固体结构分析数据不会传递给流场。双向流固耦合分析方法既考虑了流场对固体结构产生的风压作用, 又考虑了结构受荷载响应后对流场分布的影响。

## 3. 绳牵引并联支撑系统

绳牵引并联机构做为风洞试验飞行器模型的支撑系统, 可实现飞行器模型的六自由度运动, 其原理样机结构如图 1 所示。考虑到系统的刚度与稳定性, 飞行器模型由八根绳支撑起来, 悬挂在空中。八根牵引绳分前后两组, 每组四根。通过改变支撑牵引绳的长度可实现锥体模型的六自由度运动, 以满足风洞试验对模型不同姿态的控制。锥体模型上分别有八个牵引点  $P_1 \sim P_8$ , 牵引绳系分别与之连接, 然后通过各自对应的万向滑轮 ( $B_1 \sim B_8$ ) 变向, 之后分别与各自对应的滚轴丝杠上的滑块相连。工控机通过分别控制八个伺服电机来带动电机上滑块运动, 实现支撑绳的伸长缩短以控制模型姿态变化。

## 4. 不同预紧力对绳振动情况影响

绳牵引并联机构应用于风洞试验中, 由于绳是柔性体, 因此将其做为飞行器模型的支撑方式需要对绳施加预紧力。预紧力选取太小将无法满试验需要, 影响试验结果, 预紧力选取过大又会影响牵引绳的使用寿命。针对预紧力选取问题, 本文分别就单绳受不同预紧力时来流致使其变形情况分析, 以选取最优预紧力大小。

### 4.1. 计算域和绳的位姿

本文主要分析单根绳在流场中情况, 算例模型如图 2 所示,  $\alpha$  表示绳倾角,  $\beta$  表示风向角, 箭头所指表示来流方向。绳的选取长度为 600 mm, 直径为 1 mm, 弹性模量为 43.9 GPa, 泊松比为 0.3, 密度为 1440 kg/m<sup>3</sup>。绳的属性选取主要参考我们实验所用凯夫拉 5 号线的材料属性所得。计算流场的大小选取: 长 × 宽 × 高为 1 m × 1 m × 1 m。

### 4.2. 流场网格划分和边界条件设置

本文来流流速选取为 17 m/s, 根据来流情况以绳直径为特征长度, 对应的雷诺数为 1100, 此时流场

为不可压层流流动。流场整体网格如图 3 所示，网格总量为 34 万左右。绳周围进行了网格加密，第一层网格高度为 0.2 mm，边界层为 10 层。

流场边界条件设置，流场为层流流动，因此，湍流模型的选取为层流。来流进口采用速度进口；出口为压力出口，参考压力值为零；壁面条件设置均采用自由滑移壁面；绳表面采用无滑移壁面条件。

### 4.3. 不同预紧力仿真分析及结果

预紧力的选取，本文采用的是 ANSYS workbench 里的单向流固耦合模块(弱耦合)，分别利用 fluent 进行 CFD 计算，ANSYS 进行固体分析，然后将流场计算所得绳周围压力分布情况通过流固耦合交界面传递给绳，用于牵引绳的固体分析。

此处采用的绳流场布置情况为  $\alpha = 45^\circ, \beta = 90^\circ$ 。绳的约束采用两端铰接，并施加大小分别为 2 N, 50 N, 70 N 的预紧力，分析计算结果。

流体计算的结果绳周围压力场分布如图 4 所示。绳的前缘迎风面压力较大，绳的左右两侧及绳尾流处出现低压区。之后将流场信息通过流固耦合面以压力的形式传递给绳，得到绳的振动情况。绳在不同预紧力状况下的最大振动位移点基本在接近绳中点位置处。

施加预紧力大小分别为 2 N, 50 N, 70 N 等三种情况时绳的振动位移情况如表 1 所示。

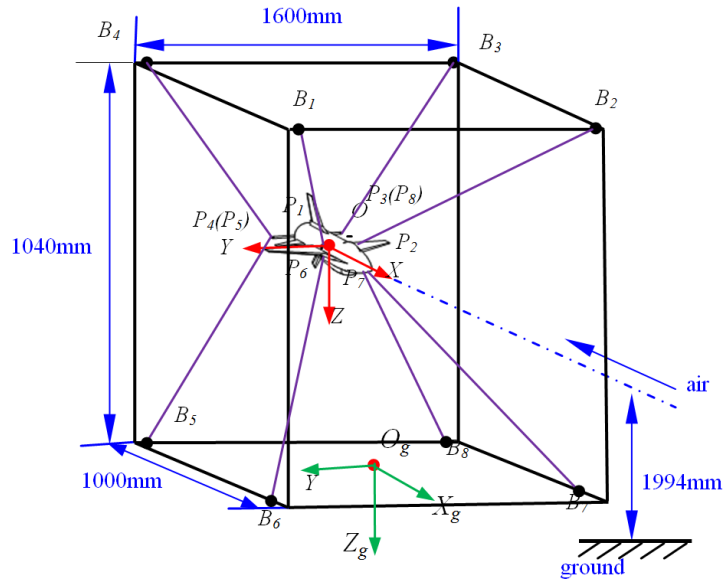


Figure 1. The principle of the prototype  
图 1. 原理样机

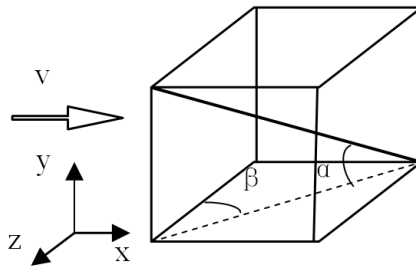


Figure 2. Cable's position in the fluid field  
图 2. 绳在流场中位置

由上述情况可知，在绳预紧力较小时，流场对绳振动影响相对较大。当绳预紧力大到足以使绳绷紧时，流场对绳的影响变得很小。继续增大绳预紧力，能继续改善流场对绳振动的影响，不过变化量已经小到可以忽略。所以，综合考虑在既能满足试验需求的情况下，又提高绳的使用寿命，选择预紧力为 50 N 即可。

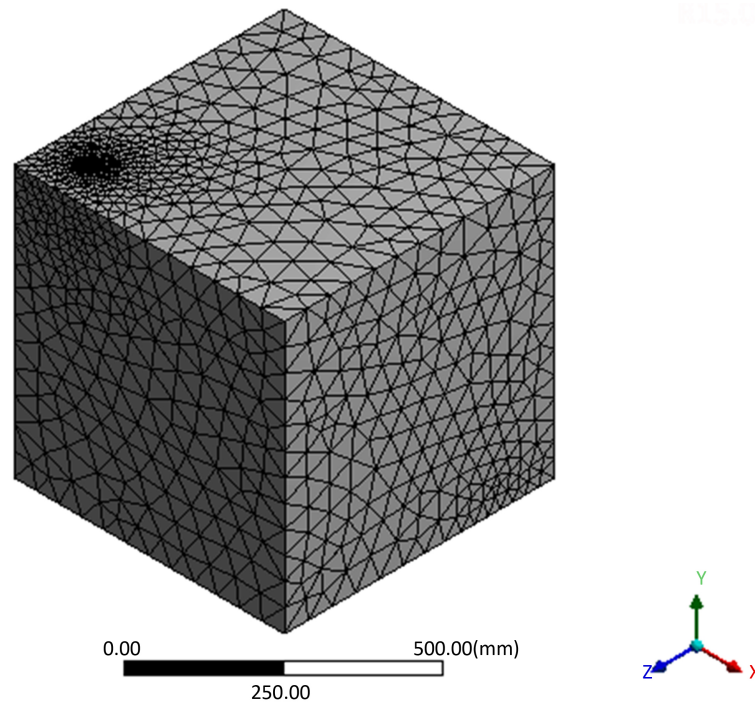


Figure 3. Mesh generation of fluid field

图 3. 流场网格划分

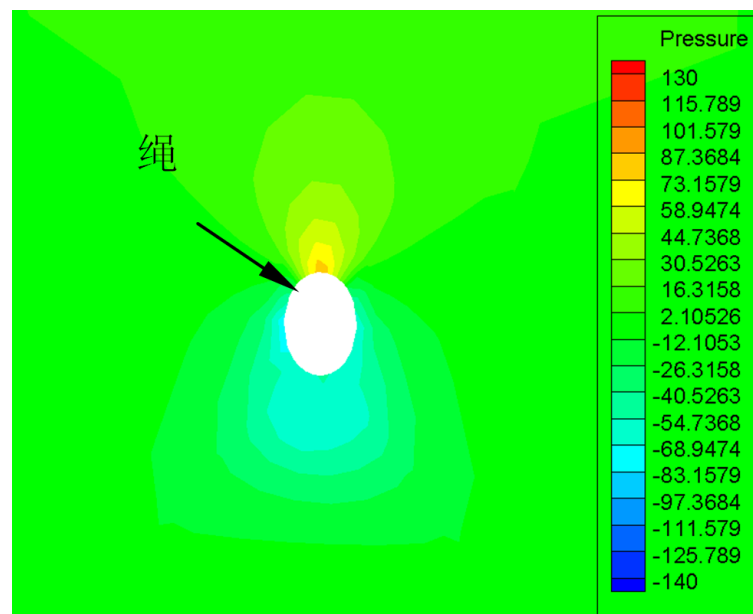


Figure 4. Pressure distribution around the cable

图 4. 绳周围流场压力图

### 5. 不同工况下单绳流固耦合分析

本文主要借助已有商用软件 ANSYS workbench 下的流体力学计算软件 CFX 和结构分析软件 ANSYS 结合对不同工况下牵引绳进行双向流固耦合计算(弱耦合), 如图 5 所示。

绳的相关设置: 两端采用铰接约束, 在绳端添加 50N 预紧力, 模拟绳拉紧状态。分别仿真计算了几种不同工况下绳的振动情况。

工况一:  $\alpha = 45^\circ, \beta = 30^\circ$

如图 6 所示, 沿绳向振动位移情况, 最大位移基本在绳中点位置处, 最大位移值为 0.102 mm。如图 7 所示选取的是绳最大位移点处的位移随时间的变化。绳主要表现为 x 方向上的振动, 其次表现为 y 方向, z 方向绳振动最小。当然这和来流风向角也有一定关系, 来流风向角不同, 绳的各个方向振动情况有一定差别。绳的振动周期为 0.0085 s, 振动随时间的变化表现为衰减的特性, 但此计算模型中并未添加任何阻尼, 这种情况主要由于空气的气弹性阻尼效应所引起, 由此表现为绳周围空气对绳振动起一个反向抑制的作用, 使得绳振动随时间衰减。

工况二:  $\alpha = 45^\circ, \beta = 45^\circ$

如图 8 所示, 绳各节点处位移情况。由于绳的两端为铰接约束, 因此两端处位移几乎为零, 随着远离两端点位置, 绳的振动位移逐渐变大, 最大位移基本在绳中间位置, 最大位移值为 0.113 mm。如图 9, 绳振动主要表现为 x 方向上, y 方向和 z 方向绳振动大小基本一样。绳振动受空气的气弹性阻尼效应影响, 因此在未添加任何阻尼的情况下, 绳振动表现为振幅衰减。振动周期为 0.0085 s, 由此可见绳振动周期不会受位姿的影响。

Table 1. Displacement of the maximum vibration displacement point with different pre-tension of cable

表 1. 不同预紧力时绳最大位移节点处位移

位移(mm)	2	预紧力(N)50	70
总位移	6.49	0.13	0.12
X 向位移	4.56	0.09	0.08
Y 向位移	4.61	0.09	0.08
Z 向位移	0.13	0.002	0.002

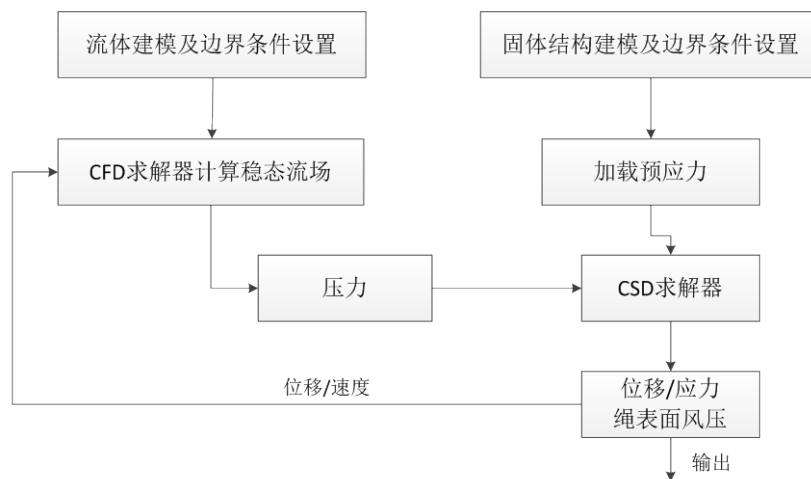


Figure 5. Flow chart of the bidirectional fluid-structure interaction analysis procedure

图 5. 双向流固耦合计算流程图

由上述不同情况可以知：流场中绳最大振动位移基本在绳中点位置处；绳在流场中的不同角度布置，对绳振动最大值会有一定影响，但影响较小；流场致使绳变形，变形量相对较小，基本可以忽略其对绳的影响。

## 6. 结论

本文分别就绳牵引并联机构牵引绳在低速流场中预紧力的选取，以及绳的不同位姿下流固耦合情况做了相关研究，得出以下结论：

(1) 在来流速度为 17 m/s 状态下，绳的预紧力选取为 50 N，基本可以满足工作状态。

(2) 低速来流时引起的绳振动变形较小，绳的气弹阻尼效应为正，对牵引绳的动力响应起抑制作用，使绳的振动表现出随时间衰减的特性。

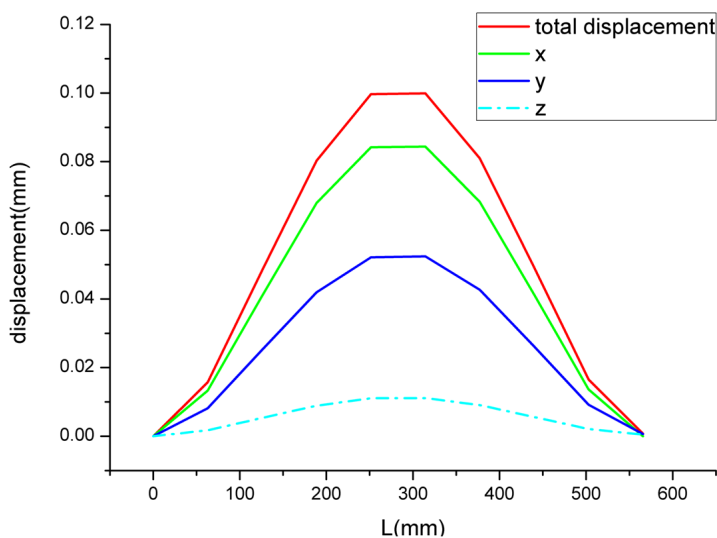


Figure 6. The vibration displacement of every point of the cable

图 6. 绳各节点处的位移

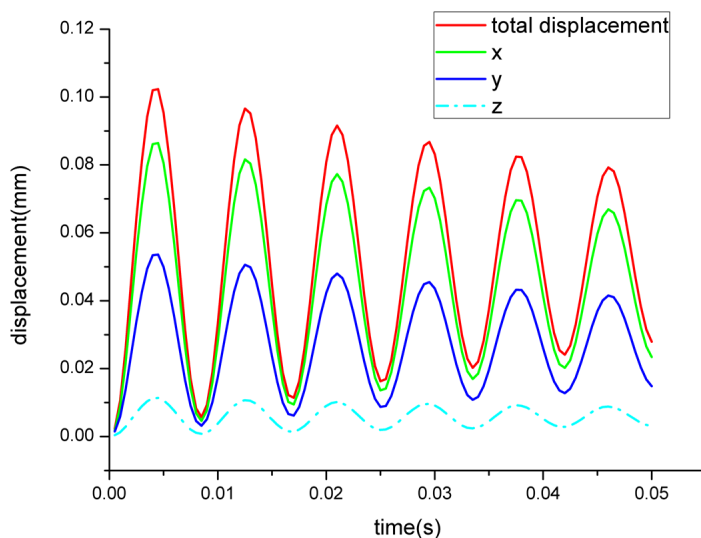


Figure 7. Time-history curves of the maximum vibration displacement point

图 7. 最大振动位移节点处的位移随时间变化

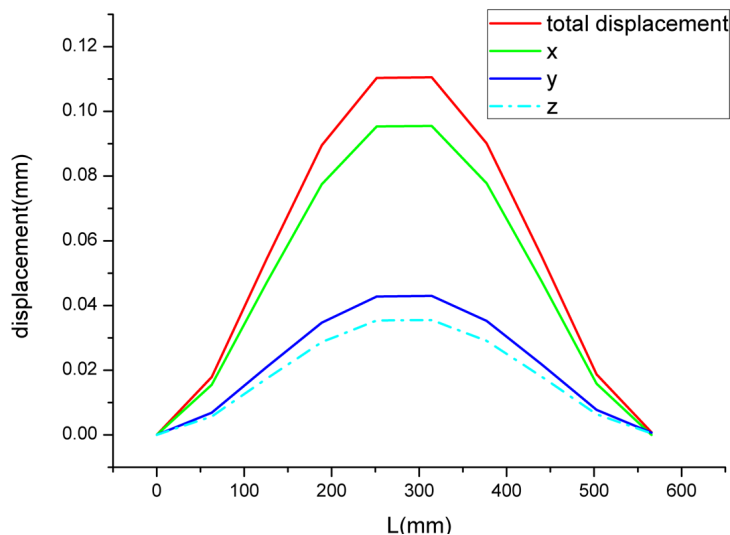


Figure 8. The vibration displacement of every point of the cable  
图 8. 绳各节点处的位移

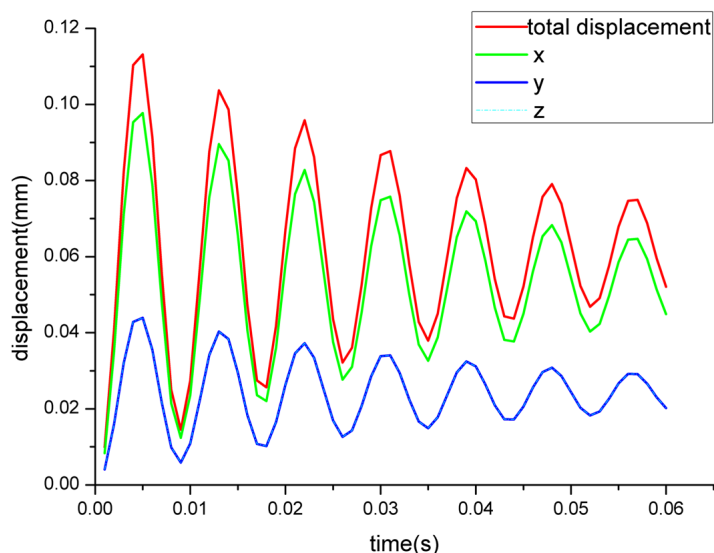


Figure 9. Time-history curves of the maximum vibration displacement point  
图 9. 最大振动位移节点处的位移随时间变化

(3) 来流致使绳振动的最大位移基本点基本在绳的中点位置处, 绳在流场中的位姿不同, 会对绳振动最大值有一定影响, 但影响较小。进一步说明了绳牵引并联机构应用于低速风洞试验的可行性。

### 基金项目

国家自然科学基金资助项目(11472234)。

### 参考文献 (References)

- [1] 李周复. 特种风洞试验技术[M]. 北京: 航空工业出版社, 2010.
- [2] Lafourcade, P., Llibre, M. and Reboulet, C. (2002) Design of a Parallel Wire-Driven Manipulator for Wind Tunnels. *Proceedings of the Workshop on Fundamental Issues and Future Directions for Parallel Mechanisms and Manipulators*, Québec City, 3-4 October 2002, 187-194.



- [3] Farcy, D., Llibre, M., Carton, P., *et al.* (2007) SACSO: Wire-Driven Parallel Set-Up for Dynamic Tests in Wind Tunnel-Review of Principles and Advantages for Identification of Aerodynamic Models for Flight Mechanics.
- [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.
- [5] 王勋年, 祝明红, 孙传宝. 低速大迎角尾撑支架干扰试验研究[J]. 实验流体力学, 2007, 21(2): 8-12.
- [6] Xiao, Y.W., Lin, Q., Zheng, Y.Q. and Liang, B. (2010) Model Aerodynamic Tests with a Wire-Driven Parallel Suspension System in Low-Speed Wind Tunnel. *Chinese Journal of Aeronautics*, 4, 393-400.
- [7] 马骏. 大跨空间结构的风场和流固耦合风效应研究与精细识别[D]: [博士学位论文]. 上海: 上海交通大学, 2008.
- [8] 王妍. 基于 CFD 的斜拉索气动特性研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2011.
- [9] 王春江, 陈锋, 周岱. 风场中长单索结构流固耦合效应的动力学分析[J]. 力学季刊, 2010, 31(2): 213-219.
- [10] 陈锋. 索结构流固耦合风振响应分析 D]: [硕士学位论文]. 上海: 上海交通大学, 2010.
- [11] 雷凡. 水下柔性结构流固耦合动力效应研究[D]: [博士学位论文]. 武汉: 武汉理工大学, 2011.
- [12] 马骏, 周岱, 李华锋, 朱忠义, 董石麟. 大跨度空间结构抗风分析的数值风洞方法[J]. 工程力学, 2007, 24(7): 77-85.
- [13] 李龙安, 苗润池, 屈爱平. 超长斜拉索风致振动控制研究[J]. 地震工程与工程振动, 2014, 1(3): 206-211.
- [14] 刘庆宽, 等. 斜拉桥斜拉索的风荷载, 风致振动与控制[C]//中国力学学会结构工程专业委员会. 第 23 届全国结构工程学术会议. 北京: 清华大学出版社, 2004: 63-74.
- [15] ANSYS Inc. ANSYS Coupled-Field Analysis Guide.
- [16] 钱若军, 董石麟, 袁行飞. 流固耦合理论研究进展[J]. 空间结构, 2008, 14(1): 3-15.

#### 期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [ijfd@hanspub.org](mailto:ijfd@hanspub.org)