

自动化技术、计算机技术

一种新型大过载飞行模拟器运动仿真分析

刘亚辉^{1,2} 王晓光^{2*}

(中国飞行试验研究院飞行仿真航空科技重点实验室¹, 西安 710089; 厦门大学航空航天学院², 厦门 361005)

摘要 提出一种新型的基于绳牵引并联机器人技术的飞行模拟器,针对其大过载机动特性进行仿真分析。首先根据绳牵引并联机器人理论,设计了 9 根绳牵引具有 6 自由度的运动平台;通过建立平台动力学模型,设计了对干扰项进行补偿的前馈 PD 控制率;其中前馈项主要确保动态过程中绳索处于张紧状态。进一步给出了系统控制稳定性分析;并以大过载机动和单自由度俯仰振荡运动为例进行了数值仿真。分析结果表明,在大过载机动情况,瞬时正加速度超过 4 g,平台位置能够迅速衰减并稳定;基于绳拉力前馈,可以避免绳索松弛,能够满足飞行员过载训练;俯仰运动也具有较好的跟踪特性。研究成果可为进一步分析工作空间、动态特性及控制稳定性等奠定基础,为绳牵引并联支撑的飞行模拟器设计提供指导与依据。

关键词 飞行模拟器 绳牵引并联机器人 大过载 动力学 稳定性

中图分类号 TP242.2; 文献标志码 A

飞行模拟器作为一种飞行训练的重要手段,自 20 世纪 60 年代以来,得到快速发展^[1,2]。目前典型的飞行模拟器大多是液压驱动、基于六自由度的 Stewart 平台^[3]。这类模拟器实质上是一种刚性并联机器人,其不足之处在于运动空间较小,不能实现较大过载机动训练,因而无法满足战斗机飞行员的模拟训练要求。

与刚性并联机器人相比,绳牵引并联机器人是一种新型机构;通过传动机构调整绳索的长度,很容易实现较大的工作空间;同时具有结构简单、成本低、惯性小、运动灵活等特点,该项技术已在射电望远镜^[4]、风洞试验^[5]、运动摄像^[6]等多个方面应用。如果将其作为飞行器模拟器的支撑方式,无疑具有很大的优势。目前国内外学者在该方面的研究较少,仅有文献[7]提出了一种基于绳牵引并联支撑的飞行模拟器方法;并对运动空间以及系统动力学建模和控制进行了仿真与分析。文献[8]针对一种四绳牵引的飞行模拟器,进行了运动学分析与控制。

由此可见,采用这种新型、结构简单的绳牵引并联支撑系统是有效可行的。

本文重点关注的问题是能否采用绳牵引并联支撑方式,实现飞行模拟器大过载机动运动,满足战斗机飞行员训练要求。文献[9]与文献[10]分别针对六绳牵引的并联机器人 DeltaBot,七绳牵引的 FALCON 进行了高速大过载的运动分析与验证,但它们的末端操纵器或支撑平台质量很小。因此,本文拟在已有的研究基础上,设计基于绳牵引并联支撑的飞行模拟器,针对这种大质量、大尺度的运动平台,分析其大过载机动特性。

本文首先阐述建立的新型飞行模拟器,进行系统运动学建模;基于欧拉方法,构建系统动力学方程;采用绳拉力前馈与基于位姿反馈的全闭环控制方法,进行控制率设计,并证明其稳定性;最后,以阶跃函数输入为例,分析系统速度、过载等特性;同时也仿真一种单自由度角度运动,为该类新型飞行模拟器的设计提供理论指导。

1 基于绳并联驱动的飞行模拟器

由文献[11]可知,由于绳索单向受力的特点,绳牵引并联机构通常采取冗余驱动,即 n 自由度绳牵引并联机构至少需由 $n+1$ 根绳牵引;如果少于等于 n 根绳,就需要外力(或重力)来保持稳定性。基于此理论,本文将采用九根绳牵引的六自由度并联机构作为飞行模拟器的支撑系统 WDPR(wire-driven parallel robot),其属于冗余约束系统,由飞行模拟器平台(以下简称平台)、牵引绳、驱动系统和运动控制系统等组成,系统结构原理如图 1 所示。其中飞

2016 年 8 月 1 日收到 航空科学基金(20141368007)和福建省自然科学基金计划(2016J05134)资助

第一作者简介:刘亚辉(1984—),硕士。研究方向:飞行仿真技术。E-mail: liuhuizhou1984@163.com。

* 通信作者简介:王晓光,博士,讲师。研究方向:绳牵引并联机器人技术。E-mail: xgwang@xmu.edu.cn。

引用格式:刘亚辉,王晓光.一种新型大过载飞行模拟器运动仿真分析[J].科学与技术工程,2017,17(4):82—86

Liu Yahui, Wang Xiaoguang. Motion simulation of a new high overload flight simulator [J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(4): 82—86

行模拟器其他组成包括座舱、操纵系统等可设置在平台上; 平台上表面由六根绳牵引, 下表面由三根绳牵引; 绳通过固定的滑轮由电机驱动, 实现绳长的调整, 进而来控制平台的位置与姿态, 满足一定的动态特性要求。结构参数需根据系统的稳定性和刚度特性进行确定, 具体参见仿真计算条件。

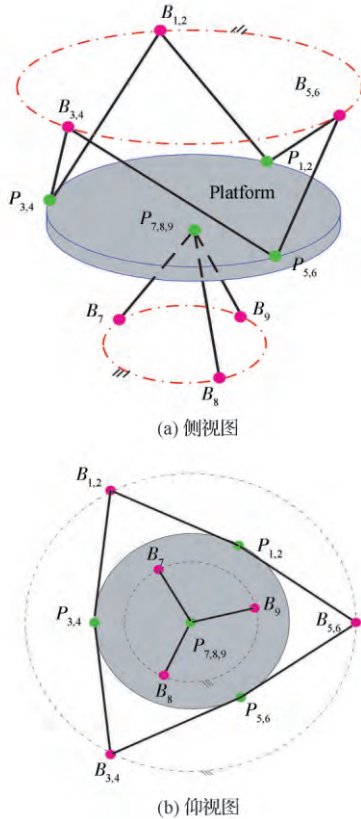


图 1 W DPR 结构原理图

Fig. 1 The sketch of W DPR structure principle

系统运动几何如图 2 所示。其中, 静坐标系 $OXYZ$ 与地面固连; 动坐标系 $Pxyz$ 建立在飞行模拟器平台上, 原点 P 位于平台质心。初始状态下, 两坐标系三轴相互平行。

记 $P_i = \overrightarrow{OP_i}$ 和 $B_i = \overrightarrow{OB_i}$ 。则绳与平台的连接点 $P_i (X_{P_i}, Y_{P_i}, Z_{P_i})^T$ 在静坐标系 $OXYZ$ 中的坐标满足:

$$P_i = X_p + R x_{P_i} \quad (1)$$

式(1)中, X_p 是动坐标系 $Pxyz$ 的原点 P 在静坐标系 $OXYZ$ 中表示, 坐标为 $(X_p, Y_p, Z_p)^T$; x_{P_i} 是 P_i 点在动坐标系 $Pxyz$ 中的表示, 坐标为 $(x_{P_i}, y_{P_i}, z_{P_i})^T, i = 1, 2, \dots, 9; R$ 为旋转变换矩阵。

这里不考虑绳的垂度, 若记第 i 根绳的长度为 L_i , 其表达式为:

$$L_i = \sqrt{(X_p + R x_{P_i} - B_i)^T (X_p + R x_{P_i} - B_i)} \quad (2)$$

式(2)中, $B_i (X_{B_i}, Y_{B_i}, Z_{B_i})^T$ 为各铰链点 B_i 在静坐

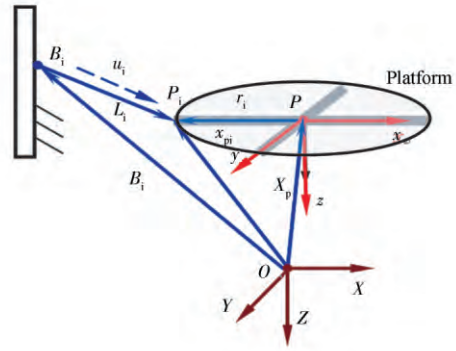


图 2 W DPR 运动学示意图

Fig. 2 The sketch of systematic motion

标系中的坐标。

运动学模型如下。

设 P 点为平台质心; $X = (X_p, Y_p, Z_p, \varphi, \theta, \psi)^T$

为平台位姿, $\dot{X}_\omega = (\dot{X}_p, \dot{Y}_p, \dot{Z}_p, \omega_x, \omega_y, \omega_z)^T$ 为平台的运动速度矢量, φ, θ 和 ψ 分别是平台的滚转角、俯仰角和偏航角, $v = (\dot{X}_p, \dot{Y}_p, \dot{Z}_p)^T$ 为 P 点的运动速度, $\omega = (\omega_x, \omega_y, \omega_z)^T$ 为角速度矢量, $L = (l_1, l_2, l_3, l_4, l_5, l_6, l_7, l_8, l_9)^T$ 为绳系矢量, 记 $\dot{Q} = (\dot{\varphi}, \dot{\theta}, \dot{\psi})^T$ 。根据刚体绕定点转动原理, 可得:

$$\omega = \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta\cos\psi & -\sin\psi & 0 \\ \cos\theta\sin\psi & \cos\psi & 0 \\ -\sin\theta & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{\varphi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = H \dot{Q} \quad (3)$$

平台的运动速度矢量 \dot{X}_ω 与飞行器模型的位姿 X 存在如下关系:

$$\dot{X}_\omega = \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & H \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \dot{Q} \end{bmatrix} = G \dot{X} \quad (4)$$

根据并联机构微分运动学, 建立绳向量与平台位姿之间的关系:

$$\dot{L} = J \dot{X}_\omega = J G \dot{X} \quad (5)$$

2 平台动力学建模

暂不考虑绳及动力学特性。采用 Newton-Eular 法建立平台的动力学模型:

$$\begin{cases} m \ddot{P} = f_e + \sum_{i=1}^8 (-u_i t_i) + mg \\ A_G \dot{\omega} = \tau_e + \sum_{i=1}^8 r_i \times (-u_i t_i) - \omega \times (A_G \omega) \end{cases} \quad (6)$$

式(6)中, $\ddot{\mathbf{P}} = (\ddot{X}_p, \ddot{Y}_p, \ddot{Z}_p)^T$ 为平台的线性加速度向量, f_e, τ_e 分别为作用在平台上的外力和外力矩, u_i 为第 i 根绳的方向向量, t_i 为第 i 根绳的拉力, $r_i = \overrightarrow{PP_i} = R x_{P_i}$ 为 P_i 点在动坐标系中的位置向量, A_{GC} 为平台关于重心的惯性矩矩阵, $A_G = R \cdot A_{GC} \cdot R^T$ 。

将上式整理为矩阵形式可得:

$$M(X)\ddot{X} + N(X, \dot{X}) - w_g - w_e = -J^T T \quad (7)$$

式(7)中, $M(X)$ 为平台的惯性矩阵, 表示为

$$M(X) = \begin{bmatrix} (mI)_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & A_{G3 \times 3} H \end{bmatrix}; N(X, \dot{X})$$

为哥氏离心力矩阵, 表示为

$$N(X, \dot{X}) = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 1} \\ A_G \dot{H} \dot{Q} + (H \dot{Q}) \times (A_G H \dot{Q}) \end{bmatrix}_{6 \times 1};$$

w_g 为平台的重力向量, 表示为 $w_g = (0 \ 0 \ mg \ 0 \ 0 \ 0)^T$; w_e 为平台所受外载荷, 表示为 $w_e = [f_e \ \tau_e]^T$; J 为系统的雅克比矩阵, 表示如下

$$J^T = \begin{bmatrix} u_1 & u_2 & \dots & u_7 & u_8 \\ r_1 \times u_1 & r_2 \times u_2 & \dots & r_7 \times u_7 & r_8 \times u_8 \end{bmatrix}_{6 \times 8}。$$

此外值得注意的是, 绳拉力的变化可通过式(7)求解:

$$T = -(J^T)^+ W_R + (I - (J^T)^+ J^T) w \quad (8)$$

式(8)中 W_R 为作用在平台上的广义外力矢量, $(J^T)^+$ 为 J^T 的 Moore-Penrose 逆矩阵。等式右侧第一项为补偿外力的平衡项; 第二项是零空间项, 通过系数 w 调节绳的内力。

3 控制器设计

为实现飞行模拟器的闭环运动控制, 满足飞行训练的要求, 可采用陀螺仪、加速度计等惯性测量单元监测平台的运动状态, 并用于反馈控制。基于系统动力学模型, 采用算法简单、可靠性好的 PD 控制方法, 系统闭环控制原理框图如图 3 所示。

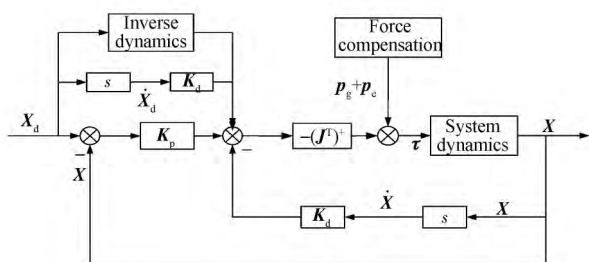


图 3 W DPR 仿真框图

Fig. 3 The system simulation sketch

针对绳拉力, 进行控制率设计, 可表示为

$$T = -(J^T)^+ [K_p(X_d - X) + K_d(\dot{X}_d - \dot{X}) + M\ddot{X}_d + N(X_d, \dot{X}_d)] + p_g + p_e \quad (9)$$

式(9)中, K_p 是系统的比例控制增益, K_d 是系统的微分控制增益; 其余均可视为干扰补偿项, $p_g = (J^T)^+ w_g$ 是平台的重力补偿向量, $p_e = (J^T)^+ w_e$ 是平台所受的外力补偿向量; $M\ddot{X}_d + N(X_d, \dot{X}_d)$ 可通过逆动力学求解。

令 $e = X_d - X$, $\dot{e} = \dot{X}_d - \dot{X}$; 并将式(9)代入式(7)可得:

$$M\ddot{e} + K_d\dot{e} + K_p e = 0 \quad (10)$$

简要证明该控制方法的稳定性^[12], 选择 Lyapunov 函数:

$$V = \frac{1}{2} \dot{e}^T M \dot{e} + \frac{1}{2} e^T K_p e \quad (11)$$

显然 V 是正定矩阵, 进一步对时间求导:

$$\dot{V} = \dot{e}^T M \dot{e} + \frac{1}{2} \dot{e}^T \dot{M} \dot{e} + e^T K_p \dot{e} = -\dot{e}^T K_v \dot{e}。$$

由于 K_v 为正定矩阵, 故 $\dot{V} \leq 0$; 当且仅当 $\dot{X}_d = X$ 时, $\dot{V} = 0$ 。因此, 对任何初始位姿 X_0 而言, 采用式(9)的控制方法总能够渐进稳定到期望位姿 X_d 。

4 仿真计算与分析

为了验证所建立的系统模型和所选取的控制方法的有效性, 利用 Matlab 编程对系统进行控制仿真研究。

飞行模拟器平台上的铰链点和固定的滑轮位置如表 1 所示, 其表示在静坐标系下。假设飞行模拟器平台质量为 1 500 kg, 平台半径为 80 cm, 厚度 10 cm; 在动坐标系下的惯性张量为 $A_{GC} = \text{diag}(241.25 \ 241.25 \ 480) \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 。飞行器模型质心 $P = (0 \ 0 \ -5)^T \text{ cm}$ 。根据绳索强度要求, 绳索直径选为 5 mm。仿真计算时采用变步长的四阶-五阶 Runge-Kutta 算法, 采样时间为 0.01 s。

表 1 铰接点与滑轮的位置

Table 1 The system natural frequency

符号	坐标/cm	符号	坐标/cm
B_1	$(0 \ 80 \ 0)^T$	P_1	$(86.6 \ 50 \ -80)^T$
B_2	$(0 \ 80 \ 0)^T$	P_2	$(-86.6 \ 50 \ -80)^T$
B_3	$(69.3 \ -40 \ 0)^T$	P_3	$(86.6 \ 50 \ -80)^T$
B_4	$(69.3 \ -40 \ 0)^T$	P_4	$(0 \ -100 \ -80)^T$
B_5	$(-69.3 \ -40 \ 0)^T$	P_5	$(0 \ -100 \ -80)^T$
B_6	$(-69.3 \ -40 \ 0)^T$	P_6	$(-86.6 \ 50 \ -80)^T$
B_7	$(0 \ 0 \ 10)^T$	P_7	$(25.9 \ 15 \ 50)^T$
B_8	$(0 \ 0 \ 10)^T$	P_8	$(0 \ -30 \ 50)^T$
B_9	$(0 \ 0 \ 10)^T$	P_9	$(-25.9 \ 15 \ 50)^T$

分别针对单自由度的大过载机动以及典型的俯仰振荡为例,给出仿真结果与分析。

4.1 大过载运动

假设动平台的期望轨迹为阶跃函数: $z = -0.4 \text{ m}$ ($t < 2 \text{ s}$); $z = 0.2 \text{ m}$ ($t \geq 2 \text{ s}$),如图4所示;期望速度为有限冲击函数。根据系统的超调量和稳定性等指标,经调试,PD控制参数选取为 $K_p = 20\ 000$ 、 $K_d = 10\ 000$ 。

控制仿真结果如图4~图7所示,其中由位移变化图4可知,虚线表示平台 z 方向实际运动轨迹,在控制率作用下,虽有一定的超调量,但能够快速稳定到期望值。图5为平台速度变化曲线,最大瞬时速度可达 2.8 m/s 。图6为平台加速度变化曲线,最大瞬时加速度可达 $4g$ (正过载),最小加速度接近 $-2g$ (负过载)。这意味着在一次阶跃运动过程中,飞行员能够同时经历正、负过载,而正过载量可以通过调节控制参数,如瞬时速度幅值、持续时间等,进一步实现更大过载机动训练,而目前常用的 Stewart 飞行模拟器平台还无法实现较大过载机动。

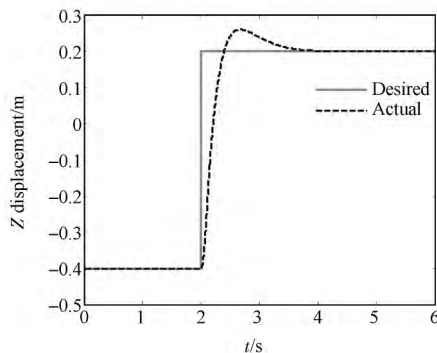


图4 位置跟踪误差

Fig. 4 The position tracking error

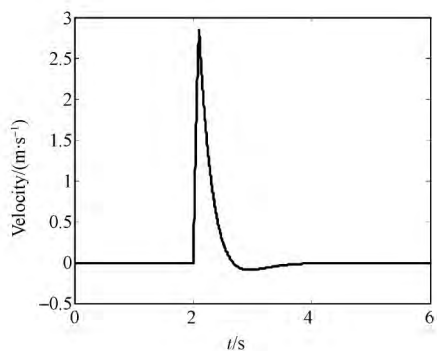


图5 速度变化曲线

Fig. 5 The velocity change curve

图7显示绳长变化过程,其中上曲线表示绳1~绳6的长度;下曲线表示绳7~绳9的长度。

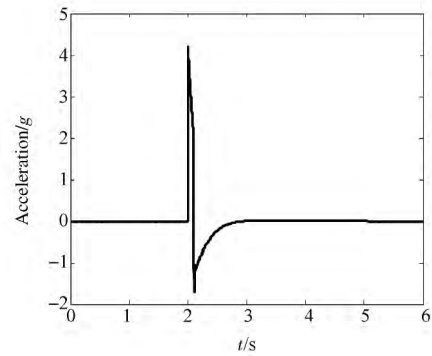


图6 加速度变化曲线

Fig. 6 The acceleration change curve

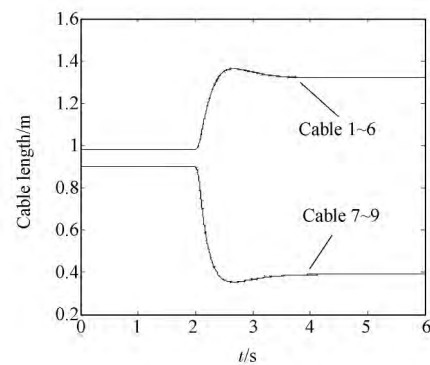


图7 绳长变化图

Fig. 7 The wire length variation

由于绳牵引的连接点位置对称分布,因此每组绳长变化具有一致性。

为了避免飞行模拟器平台运动过程中,牵引绳松弛,应设置充分的预紧力,根据式(8),取合适的调整因子 w ,实际控制时通过电机的转矩进行设置。图8显示绳拉力变化结果,其中图8(a)表示绳1拉力变化,图8(b)表示绳7变化。在大过载运动过程中,平台位置沿正 z 轴方向做瞬时变化,因此上拉的1~6号绳为从动绳,拉力瞬时变小再增大;与之相反,下拉的7~9号绳为驱动绳,拉力瞬间变大再减小。尽管绳的最大拉力接近 $20\ 000 \text{ N}$,但根据钢丝绳的特性^[13],仍然是满足强度要求。

4.2 单自由度俯仰振荡运动

由于这种新型的大过载飞行模拟器为六自由度运动平台,因此,为突显其特点,以单自由度俯仰振荡为例,验证其角度运动,期望轨迹定义为正弦运动 $\theta = \pi/18 \sin(1.5t)$ 。

根据式(9),同样采用PD控制率,调试控制增益,取 $K_p = 10\ 000$ 、 $K_d = 5\ 000$,由仿真结果图9可知,实际运动误差很小,能够实现精确地俯仰振荡训练。

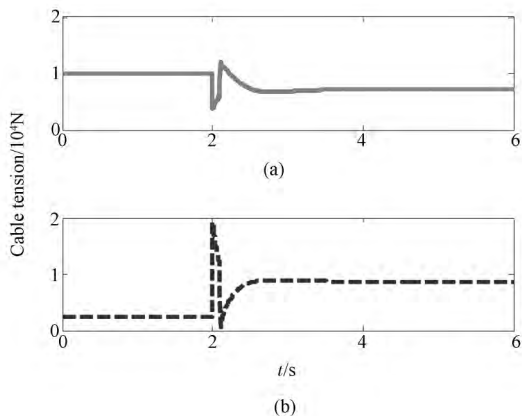


图8 绳拉力变化图

Fig. 8 The wire tension variation

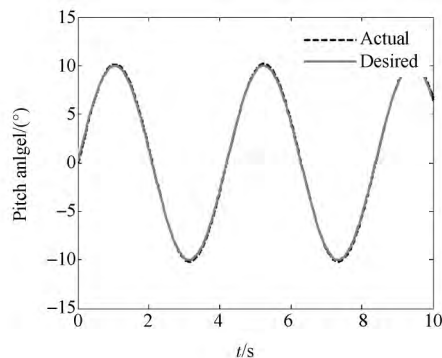


图9 实际俯仰振荡轨迹

Fig. 9 The actual pitch oscillation curve

5 结论

(1) 本文提出了一种新型的由9根绳牵引的6自由度并联支撑的大过载飞行模拟器。

(2) 基于平台的位姿反馈,设计了对干扰项进行补偿的前馈PD控制率,其中前馈项主要确保动态过程中,绳索处于张紧状态。

(3) 以大过载机动和俯仰振荡运动为例进行了数值仿真,结果表明在大过载机动情况,瞬时正加速度超过 $4g$,平台位置能够迅速衰减并稳定,基于绳拉力前馈,可以避免绳索松弛,能够满足过载训练;俯仰运动结果同样显示可以进行振荡训练。

上述研究成果可为进一步分析工作空间、动态特性及控制稳定性等奠定基础,为绳牵引并联支撑的飞行模拟器设计提供指导与依据。

参考文献

- Bell H H, Waag W L. Evaluating the effectiveness of flight simulators for training combat skills: a review. *The International Journal of Aviation Psychology*, 1998; 8(3): 223—242
- 宋小东. 飞行模拟器的技术特点对比研究. 第二届中国航空科学技术大会. 北京: 中国航空学会, 2015: 16
Song X D. Comparative study on the technical characteristics of flight simulator. *China's Aviation Society in the 2nd China Aerospace Science and Technology Conference*, Beijing: China Aviation Society, 2015: 16
- 吴东芬, 顾宏斌. 基于模糊干扰观测器的电动 Stewart 平台自适应模糊控制. *机械科学与技术*, 2008; (6): 757—763
Wu D S, Gu H B. Adaptive fuzzy control for an electrical driven stewart platform based on fuzzy disturbance observer. *Mechanical Science and Technological for Aerospace Engineering*, 2008; (6): 757—763
- Tang X Q, Zhu W B, Sun C H. Similarity model of feed support system for FAST. *Experimental Astronomy*, 2011; 29(3): 177—187
- Xiao Y W, Lin Q, Zheng Y Q, et al. Model aerodynamic tests with a wire-driven parallel suspension system in low-speed wind tunnel. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2010; 4(23): 393—400
- 韦慧玲, 仇原鹰, 盛英. 高速绳牵引摄像机器人的运动稳定控制. *西安电子科技大学学报*, 2016; 43(5): 70—77
Wei H L, Qiu Y Y, Sheng Y. Motion stable control for cable-driven parallel camera robots with high speeds. *Journal of Xidian University*, 2016; 43(5): 70—77
- Kljuno E, Williams R. Vehicle simulation system: controls and virtual-reality-based dynamics simulation. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 2008; 52(1): 79—99
- Usher K, Winstanley G, Carnie R. Air vehicle simulator: an application for a cable array robot. *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. New York: IEEE, 2005: 2241—2246
- Dekker R, Khajepour A, Behzadipour S. Design and testing of an ultra-high-speed cable robot. *International Journal of Robotics & Automation*, 2006; 21(1): 25—34
- Kawamura S, Kino H, Won C. High-speed manipulation by using parallel wire-driven robots. *Robotica*, 2000; 18(1): 13—21
- Ming A, Higuchi T. Study on multiple degree of freedom positioning mechanisms using wires (part 1): concept, design and control. *International Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, 1994; 28(2): 131—138
- 苏玉鑫, 郑春红, Muller P. 非线性机械系统 PID 控制渐近稳定性分析. *自动化学报*, 2008; 34(12): 1544—1548
Su Y X, Zheng C H, Muller P. Asymptotic stability of pid controller for nonlinear mechanical systems. *Acta Automation Sinica*. 2008; 34(12): 1544—1548
- 倪松远. 钢丝绳机械性质的研究. 哈尔滨: 东北林业大学, 2004
Ni S Y. The Study of the steel wire rope mechanical character. Harbin: Northeast Forestry University, 2004

(下转第 104 页)

Modeling and Simulation of Time Domain for Car Ride Comfort Based on a Space Model

ZHAO Qi , WANG Wei* , LUO Lan , ZHENG Ling-ling , LI Jie

(State Key Laboratory of Automotive Simulation and Control , Jilin University , Changchun 130025 , P. R. China)

[Abstract] Based on filter white noise , road isotropous hypothesis and the first order Pade method , a filter white noise model of four wheels is built. According to certain assumptions , a mechanical model of seven degrees of freedom space is established for car ride comfort. Differential equation description of the model is derived by the system vibration energy and Lagrange equation. The corresponding simulation algorithm is proposed and time domain simulation of a car ride comfor is carried out on common grade B road and speed of 60 km/h , time history of the vibration response variables are obtained. The results show that it is feasible and effective to model and simulate car ride comfort based on space model.

[Key words] car ride comfort time domain space model filtered white noise

(上接第 86 页)

Motion Simulation of a New High Overload Flight Simulator

LIU Ya-hui^{1 2} , WANG Xiao-guang^{2*}

(Key Laboratory of Aviation and Technology of Flight Simulation , Chinese Flight Test Establishment¹ , Xi'an 710089 , P. R. China;

School of Aerospace Engineering , Xiamen University² , Xiamen 361005 , P. R. China)

[Abstract] A new kind of flight simulator based on the cable-driven parallel robot was proposed , and the overload maneuver properties were emphatically analyzed. According to the fundamental theories of cable-driven parallel robot , the motion platform suspended by nine cables with a six-DOF is designed. The dynamic equations of the platform is established , and a PD control law incorporating feedforward term and disturbance compensation term is given. The stability analysis of control law is also made. Finally , numerical simulations of overload maneuver and pitch oscillation are taken as examples , and results show that the platform can achieve a high overload with more than 4 g , meanwhile the position attenuates and tends to be stable in a short time. The cable tension is also guaranteed to be positive and secure during the motion process. Moreover , the case of pitch oscillation shows a good tracking property. Researches studied above could lay on foundation for the workspace analysis , dynamics and control stability , and furthermore , provide guidance and evidence for the practical design of flight simulator.

[Key words] flight simulator wire-driven parallel robot high overload dynamics stability