

浮球式惯导平台悬浮稳定问题的动力学建模与控制*

李安梁[†] 蔡洪 张士峰 白锡斌

(国防科学技术大学, 航天科学与工程学院, 长沙 410073)

(2013年3月19日收到; 2013年5月16日收到修改稿)

以浮球式惯导平台的悬浮稳定为研究对象, 全面分析了平台的干扰特性, 建立了液浮支撑模型, 推导了在受扰条件下稳定部件的六自由度运动方程. 针对外部环境、流场阻力、模型参数不确定、未建模动态和测量噪声等干扰问题, 设计了基于高增益扩张观测器的滑模控制器. 数值仿真表明, 液浮稳定结构可以有效隔离外界干扰的影响, 提高平台的抗干扰能力; 所提出的控制方法可以有效抑制系统的抖振, 实现平台的高精度快速稳定控制. 与前期的研究相比, 控制器的动态响应和稳定性能提升了 50%.

关键词: 浮球式惯导平台, 悬浮稳定, 高增益扩张观测器, 滑模控制

PACS: 02.30Yy, 05.45.-a, 4520.da

DOI: 10.7498/aps.62.150203

1 引言

浮球式惯导平台(简称浮球平台, 又称高级惯性参考球)是德雷伯实验室提出的一种液浮稳定的无框架高精度惯导平台系统. 与框架平台不同, 浮球平台利用球体代替了多框架系统, 使结构简化, 惯性测量组合完全悬浮在温度均匀而稳定的球体内, 具有良好的减振性能. 由于这种特殊的液压支撑结构, 浮球平台消除了框架平台动态条件下轴承摩擦和框架变形等固有问题的影响, 有利于提高惯性测量组合的测量精度和对恶劣动态环境的适应能力. 目前, 广泛应用于“和平卫士”、侏儒和潜艇等战略武器系统^[1].

球体是平台的稳定部件, 为系统提供惯性参考基准, 其基本问题是保持惯性空间稳定. 然而, 外界干扰、流场阻力、球体质量不平衡、滑动摩擦和测量噪声等干扰的影响, 使平台的悬浮稳具有挑战性. Gully^[2] 针对浮球平台稳定回路偏差进行了一系列试验, 详细讨论了单轴试验分系统中用于隔离和估计干扰的试验方法, 并且设计了闭环干扰观测器估计系统的干扰. 在分析浮球平台稳定回路特性的基础上, 利用 LQR 理论设计了平台的稳定回路

控制系统. Zhang 等^[3] 利用 $k-\varepsilon$ 湍流模型, 分析了浮球平台的流场特性, 并计算了浮球平台单轴系统的流体反作用控制力矩. Sifter 和 Henderson 等^[4] 利用卡尔曼滤波技术研究了浮球平台的连续标定与自对准技术. 芮嘉白等^[5] 对浮球平台的结构特性进行了分析. 总的来说, 对于浮球平台的研究, 国外由于技术保密的原因公开文献较少, 国内的相关技术研究缓慢且未能取得突破性进展. 浮球平台作为现役战略武器精度最高的惯导平台, 深入研究浮球平台对我国高精度惯导平台和战略武器的发展具有重要的实践意义.

平台的悬浮稳定控制是研究浮球平台的关键, 然而在实际的物理过程中, 系统往往无法获得全部的状态量信息, 基于状态反馈的先进控制方法无法应用, 况且系统不可避免的会受到模型参数不确定、未建模动态和噪声等因素干扰. 为解决上述问题, 一条有效的途径就是利用观测器理论设计系统的鲁棒控制器, 消除上述干扰的影响, 满足平台快速响应和高精度等控制要求. 近年来, 滑模控制以其算法简单、鲁棒性强等优点, 成为物理学、非线性系统和控制等领域的研究热点^[6-10]. 余洋等^[11] 利用滑模控制器研究了双馈风力发电机的混沌同步控制问题. 吕翎等^[12] 将滑模控制法推广到

* 航天科技创新基金(批准号: 201105)资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: anliangli@126.com

由多个混沌系统构成的复杂网络的同步控制研究. 曾广湘等^[13]将准滑模控制引入宏观交通流模型, 解决了行人通道的交通瓶颈问题. 在观测器应用方面, 李秀春等^[14]在系统参数和输出受扰的情形下, 基于积分观测器, 实现了一类不确定混沌系统的同步控制. 王兴元等^[15]利用状态观测器和极点配置方法, 研究了混沌系统的反同步控制问题. 赵建利等^[16,17]研究了 Lorenz 混沌系统的有限时间稳定控制问题, 利用观测器理论解决了受控系统的不确定未知问题, 并结合奇异理论对闭环系统进行了稳定分析. Nazruolla 和 Hassan^[18]利用高增益扩张观测器 (EHGO), 研究了一类非最小相位的非线性系统控制问题.

本文以浮球平台的悬浮稳定为研究对象, 通过建立球体的六自由度运动方程, 分析球体在干扰和不确定性条件下的稳定性能. 利用全程积分滑模面

和指数趋近律, 设计高增益扩展观测器和滑模控制器, 改善控制系统的动态响应和稳定性能, 以提高控制系统的鲁棒性能. 最后, 通过数值分析验证平台液浮稳定结构的性能和方法的有效性, 并将得到的结果与文献 [2] 中相关工作进行比较.

2 悬浮稳定问题的动力学系统描述

在浮球平台中, 球体悬浮在液体中, 平台的悬浮稳定问题本质上就是球体保持惯性空间稳定, 为平台提供惯性参考基准. 如图 1(a) 所示, 浮球平台主要由壳体、力矩器、悬浮垫和球体组成. 壳体与载体固联, 惯性测量元件陀螺正交安装在球体内, 用来测量球体的转动角度信息. 八个悬浮垫对称安装在球体表面, 悬浮垫与垫内液体构成球体的液压支撑系统. 液体由泵驱动. 浮球平台与框架平台的结构如图 1 所示.

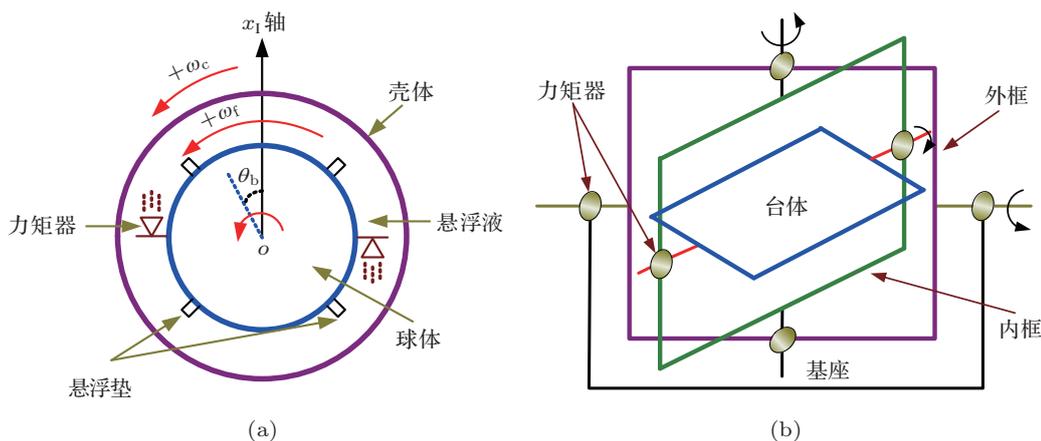


图 1 惯导平台剖面示意图 (a) 浮球平台; (b) 框架平台

与框架平台相比, 球体利用液压支撑系统悬浮在球形壳体内以隔离外界的运动, 壳体运动是平台干扰的主要来源. 壳体运动时, 悬浮液的流场特性发生改变, 球体受干扰力和干扰力矩的影响, 产生位移和角运动. 液压支撑系统提供的支撑力控制球体的位移, 以保持球心和壳体中心位置重合; 角运动由力矩器产生的流体反作用力矩控制. 在控制系统共同作用下, 球体从而保持惯性空间稳定. 平台的悬浮稳定控制系统如图 2 所示.

2.1 质心运动方程

为了描述的方便, 首先定义坐标系. 1) 惯性坐

标系 (I): 采用当地北天东坐标系, 为平台的惯性参考基准坐标系. 原点为壳体中心 (O_C), 基本面为原点的大地水准面, X_I 轴指向正北, Z_I 轴指向正东, Y_I 轴指向与地球表面垂直向上的方向, 并与 X_I, Z_I 轴构成右手坐标系. 在不存在安装误差的情况下, X_I, Y_I, Z_I 分别与三个正交安装的陀螺仪敏感轴平行. 2) 壳体坐标系 (C): 原点为 O_C , 初始时刻壳体坐标系 X_C, Y_C, Z_C 与惯性坐标系轴向重合. 壳体运动时, 壳体坐标系随壳体转动而转动, 是一个非惯性坐标系. 3) 球体坐标系 (S): 原点与球心 (O_S) 固联, 初始时刻球体坐标系轴向与惯性坐标系平行. 坐标系随球体转动而转动, 也是一个非惯性坐标系. 坐标系之间的关系如图 3 所示.

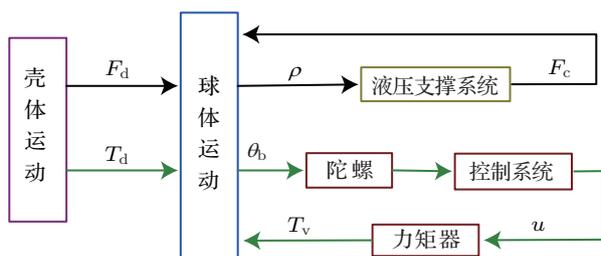


图2 平台悬浮稳定控制系统

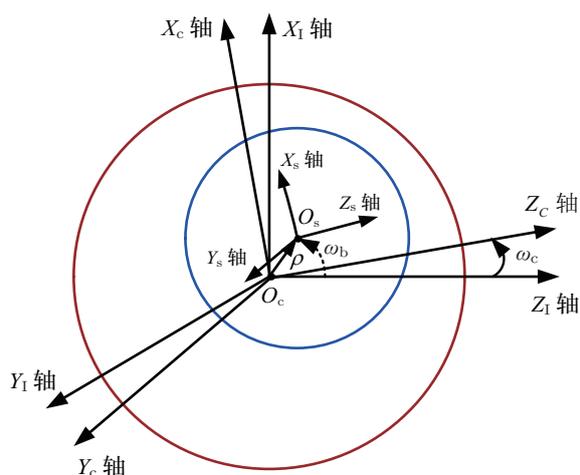


图3 坐标系之间的关系

初始时刻, 惯性参考坐标系、壳体坐标系与球体坐标系重合. 图3中物理量的含义将在2.1和2.2节中讨论.

壳体运动时, 球体在干扰力的作用下, 受力方程为

$$m\ddot{\rho} = M^{I/S}(\mathbf{F}_c + \mathbf{F}_{fr} + \mathbf{F}_{out}) + \mathbf{F}_g + \mathbf{F}_fl + \mathbf{w}_a, \quad (1)$$

其中, m 为球体的质量, $\rho = [x_e \ y_e \ z_e]^T$ 为球心在 I 系下位置, $M^{I/S}$ 为球体坐标系到惯性坐标系的转换矩阵. \mathbf{F}_g 为球体的重力, \mathbf{F}_{fr} 为球体受到的流体摩擦力, \mathbf{F}_fl 为球体受到的浮力, \mathbf{F}_c 为液压支撑力, \mathbf{F}_{out} 为球体受到的未知干扰, \mathbf{w}_a 为随机干扰力.

由于初始时刻 I 系与 S 系重合, 不考虑球体的转动, 则 $M^{I/S} = \mathbf{I}$. 令 $\mathbf{F}_d = \mathbf{F}_g + \mathbf{F}_{fr} + \mathbf{F}_fl + \mathbf{F}_{out} + \mathbf{w}_a$, 从而将 (1) 式简化为

$$m\ddot{\rho} = \mathbf{F}_c + \mathbf{F}_d. \quad (2)$$

在球体坐标系下, 平台的液压支撑力分布和归一化方向向量如图4所示, 则球体所受的液压支撑力为

$$\mathbf{F}_c = \sum_{i=1}^8 \mathbf{F}_i, \quad (3)$$

其中, \mathbf{F}_i 与 ρ 的关系见附录 A1 和 A2.

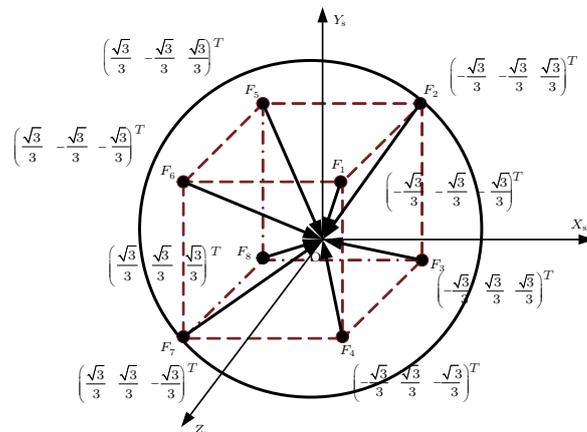


图4 悬浮垫液压支撑力在球体坐标系中的分布与方向

将 (3) 式代入 (2) 式, 可得球体的质心运动方程为

$$m\ddot{\rho} = \sum_{i=1}^8 \mathbf{F}_i + \mathbf{F}_d. \quad (4)$$

2.2 绕质心运动方程

由角动量守恒定理可知, 球体的绕质心运动方程为

$$\mathbf{T} = \dot{\mathbf{H}}_S + \boldsymbol{\omega}^{S/I} \times \mathbf{H}, \quad (5)$$

其中, $\boldsymbol{\omega}^{S/I}$ 为球体坐标系相对于惯性参考坐标系的转动角速率, $\mathbf{H} = \mathbf{I} \cdot \boldsymbol{\omega}^{S/I}$ 为球体的角动量, \mathbf{I} 为球体的惯量矩阵. \mathbf{T} 是作用在球体上的力矩.

壳体运动时, 作用在球体的力矩有:

1) 力矩器产生的流体反作用控制力矩 (\mathbf{T}_v), 在要求的频域内克服干扰, 控制球体的角运动. $\mathbf{T}_v = \mathbf{K}_v \mathbf{u}$, \mathbf{K}_v 为力矩器系数, \mathbf{u} 为系统的控制量.

2) 流体与球体之间的摩擦力矩 (\mathbf{T}_{fr}), 大小与相对速度成正比, 方向与相对速度相反. $\mathbf{T}_{fr} = \mathbf{C}_1(\boldsymbol{\omega}_f - \boldsymbol{\omega}_b)$, \mathbf{C}_1 为球体与悬浮液之间的流体摩擦阻尼系数, $\boldsymbol{\omega}_f$ 为悬浮液的角速率.

3) 电刷与壳体之间的滑动摩擦力矩 (\mathbf{T}_{br}), 电刷通过接触壳体传输平台的电源和信号. 其摩擦特性一般用 Stribeck 模型描述, 如图5所示.

$$\mathbf{F}_f = s(v) = \mathbf{F}_c + (\mathbf{F}_s - \mathbf{F}_c) \exp\left(-\left|\frac{v}{V_s}\right|^{\delta}\right), \quad (6)$$

其中, \mathbf{F}_c 为库仑摩擦力, \mathbf{F}_s 为静摩擦力, V_s 为 Stribeck 速度, v 为电刷与球体的相对速度, δ 为品质参数, 一般设为 1. 则 $\mathbf{T}_{br} = \mathbf{F}_f R \text{sign}(\boldsymbol{\omega}_c - \boldsymbol{\omega}_b)$, R

为壳体的半径, $\text{sign}(\cdot)$ 为符号函数, 为了计算方便, 令 $F_s = F_c$.

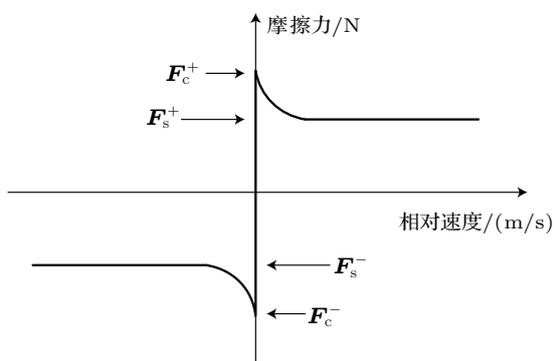


图5 Stribeck 模型

4) 未建模的干扰力矩 (T_u) 和随机干扰力矩 (w_b).

综上所述, 作用在球体的力矩为

$$T_b = T_v + T_{fr} + T_{br} + T_u + w_b. \quad (7)$$

忽略浮球平台三轴之间的铰链, 惯量矩阵 I 简化为 $\text{diag}[I_{xx} \ I_{yy} \ I_{zz}]$, 且 $I_{xx} = I_{yy} = I_{zz} = I_b$. 将 (7) 式代入 (5) 式, 得

$$I_b \ddot{\theta} = T_b = T_v + C_1(\omega_f - \omega_b) + T_d, \quad (8)$$

其中, $T_d = T_{br} + T_u + w_b$.

同理, 悬浮液的力矩方程为

$$I_f \dot{\omega}_f = -T_v + C_2(\omega_c - \omega_f) - C_1(\omega_f - \omega_b), \quad (9)$$

其中, I_f 为悬浮液的主惯量矩阵, C_2 为壳体与悬浮液之间的流体摩擦阻尼系数.

结合 (8) 式和 (9) 式, 可得球体的绕质心运动方程为

$$I_b \ddot{\theta} = T_v + C_1(\omega_f - \omega_b) + T_d, \quad (10)$$

$$I_f \dot{\omega}_f = -T_v + C_2(\omega_c - \omega_f) - C_1(\omega_f - \omega_b). \quad (11)$$

利用傅里叶变换, 球体的绕质心运动的状态方程为

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} I_b S + C_1 & -C_1 \\ -C_1 & I_f S + C_1 + C_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_b \\ \omega_f \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} T_v + T_d \\ -T_v + C_2 \omega_c \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (12)$$

不失一般性, 考虑平台的单轴系统. 假设平台绕 X 轴旋转, 球体的转动角速率的传递函数为

$$\omega_b = \frac{(I_f S + C_2)T_v + (I_f S + C_1 + C_2)T_d + C_1 C_2 \omega_c}{I_b I_f S^2 + [I_f C_1 + I_b(C_1 + C_2)]S + C_1 C_2}. \quad (13)$$

浮球平台单轴系统干扰特性如图 6 所示.

3 基于高增益扩展观测器的滑模控制

高增益扩张观测器采用的高增益的误差反馈, 使观测器的动态远远高于系统的动态, 保证了观测误差的快速收敛和足够高的估计精度, 进而提供可用的角速率和干扰信息用于反馈.

3.1 高增益扩张观测器设计

将 (10) 式改写为

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + B(bu + f(t)), \\ y &= Cx + w_c, \end{aligned} \quad (14)$$

其中

$$\begin{aligned} x &= \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta \\ \dot{\theta} \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \\ B &= \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad C = [1 \ 0], \end{aligned}$$

$$f(t) = T_d + C_1(\omega_f - \omega_b),$$

w_c 为系统的测量噪声.

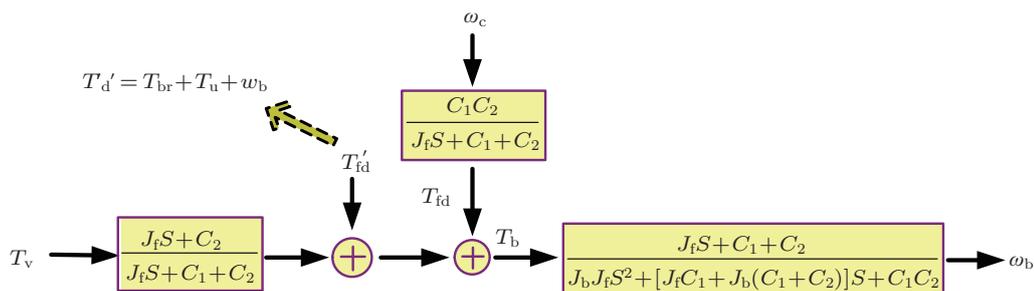


图6 平台的干扰特性

假设 $f(\cdot)$ 是不确定的有界函数, 即 $|f(\cdot)| \leq L$. 则针对系统 (14), 高增益扩张观测器为

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}} &= \bar{A}\hat{x} + \bar{B}bu - S_\theta^{-1}C^T(\hat{y} - y), \\ \hat{y} &= C\hat{x} + w_c, \end{aligned} \quad (15)$$

其中

$$\hat{x} = \begin{bmatrix} \hat{x}_1 \\ \hat{x}_2 \\ \hat{x}_3 \end{bmatrix}, \quad \bar{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \bar{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix},$$

$\hat{y} - y$ 为系统输出的观测误差, 矩阵 $S_\theta^{-1}C^T$ 为观测器系数. 正定对称阵 S_θ 满足如下 Lyapunov 方程:

$$\theta S_\theta + \bar{A}^T S_\theta + S_\theta \bar{A} = C^T C, \quad (16)$$

其中, θ 为可调参数. 令 $\theta = \frac{1}{\varepsilon}$, 当

$$S_\theta^{-1}C^T = [\alpha_1 \varepsilon^{-1} \quad \alpha_2 \varepsilon^{-2} \quad \alpha_3 \varepsilon^{-3}]^T,$$

$\alpha_1 > 0$ 时, S_θ 满足 (16) 式. 观测方程 (15) 当 $t \rightarrow \infty$, $\hat{x}_1(t) \rightarrow x_1(t)$, $\hat{x}_2(t) \rightarrow x_2(t)$, $\hat{x}_3(t) \rightarrow f(t)$, 其中 $\varepsilon > 0$, α_1 , α_2 和 α_3 为正实数, 多项式 $s^3 + \alpha_1 s^2 + \alpha_2 s + \alpha_3$ 满足 Hurwitz 条件.

观测器的误差定义为

$$\eta = [\eta_1 \quad \eta_2 \quad \eta_3]^T, \quad (17)$$

其中

$$\eta_1 = \frac{x_1 - \hat{x}_1}{\varepsilon^2}, \quad \eta_2 = \frac{x_2 - \hat{x}_2}{\varepsilon}, \quad \eta_3 = f - \hat{\sigma}.$$

则观测器误差方程为

$$\varepsilon \dot{\eta} = \bar{A}\eta + \varepsilon \bar{B}\dot{f}, \quad (18)$$

其中

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} -\alpha_1 & 1 & 0 \\ -\alpha_2 & 0 & 1 \\ -\alpha_3 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \bar{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}.$$

矩阵 \bar{A} 的特征多项式为

$$\lambda^3 + \alpha_1 \lambda^2 + \alpha_2 \lambda + \alpha_3 = 0. \quad (19)$$

通过选择合适的 $\alpha_i (i=1, 2, 3)$ 使 \bar{A} 为 Hurwitz. 则对于任意给定的正定对称阵 Q , 存在正定对称阵 P 满足如下 Lyapunov 方程:

$$\bar{A}^T P + P \bar{A} + Q = 0. \quad (20)$$

定义观测器的 Lyapunov 函数 $V_0 = \varepsilon \eta^T P \eta$, 则

$$\dot{V}_0 = \varepsilon \dot{\eta}^T P \eta + \varepsilon \eta^T P \dot{\eta}$$

$$\begin{aligned} &= (\bar{A}\eta + \varepsilon \bar{B}\dot{f})^T P \eta + \eta^T P (\bar{A}\eta + \varepsilon \bar{B}\dot{f}) \\ &= \eta^T (\bar{A}^T P + P \bar{A}) \eta + 2\varepsilon \eta^T P \bar{B} \dot{f} \\ &\leq -\eta^T Q \eta + 2\varepsilon \|P \bar{B}\| \cdot \|\eta\| \cdot |\dot{f}|. \end{aligned}$$

从而可得

$$\dot{V}_0 \leq -\lambda_{\min}(Q) \|\eta\|^2 + 2\varepsilon L \|P \bar{B}\| \cdot \|\eta\|, \quad (21)$$

其中, $\lambda_{\min}(Q)$ 为矩阵 Q 的最小特征值.

由 $\dot{V}_0 \leq 0$ 可得观测器的收敛条件为

$$\|\eta\| \leq \frac{2\varepsilon L \|P \bar{B}\|}{\lambda_{\min}(Q)}. \quad (22)$$

由 (22) 式可知, 观测误差 η 收敛速度与参数 ε 有关. 实际上参数 ε 很小时, 根据奇异摄动系统理论, 误差方程式 (18) 为系统的快变子系统, 而且 ε 越小, η 的收敛速度越快, $\|\eta\|$ 随 ε 的减小, 观测误差逐渐趋向零.

3.2 滑模控制

滑模控制是一类特殊的变结构控制, 由于无需精确的系统模型, 系统一旦进入滑动模态面, 对满足匹配条件的不确定性及干扰具有强鲁棒性, 在工程界得到了广泛的应用^[19]. 考虑系统 (14), 为了减少稳定误差, 滑模面引进跟踪误差全程积分项 $\int_0^t e dt$, 滑模面设计为

$$s = ce + \dot{e} + k_i \int_0^t e dt + k_p e(0), \quad (23)$$

其中, $c > 0$, $e = x_1 - y_c$, x_1 为系统输出, y_c 为系统的期望输出.

基于 EHGO 的状态和干扰估计, 设计的滑模控制律由等效控制 $u_{\text{eq}} = b^{-1}(-\hat{f} + \ddot{y}_c - c\hat{e} - k_i \hat{e})$ 和指数趋近律 $-b^{-1}[k \text{sign}(\hat{s}) + r\hat{s}]$ 组成

$$u = b^{-1}[-\hat{f} + \ddot{y}_c - c\hat{e} - k_i \hat{e} - k \text{sign}(\hat{s}) - r\hat{s}], \quad (24)$$

其中

$$\hat{e} = \hat{x}_1 - x_{1d},$$

$$\hat{s} = c\hat{e} + \dot{\hat{e}} + k_i \int_0^t \hat{e} dt + k_p \hat{e}(0), \quad k > 0, \quad r > 0.$$

则滑模面 \hat{s} 可以在有限时间内到达边界层.

证明 选取 Lyapunov 函数 $V = \frac{1}{2} s^T s$, 则

$$\dot{V} = s\dot{s} = s(c\dot{e} + \ddot{e} + k_i \dot{e} + k_p \dot{e}(0))$$

$$= s(c\dot{e} + \ddot{e} + k_i \dot{e} + k_p \dot{e}(0) - \hat{f} + \ddot{y}_c)$$

$$- c\hat{e} - k_i \hat{e} - k \text{sign}(\hat{s}) - r\hat{s}$$

$$\begin{aligned} &= -k\text{sign}(\hat{s}) - r\hat{s} + s(\tilde{v} + \tilde{f} + \tilde{e}) \\ &= -k|\hat{s}| - r\hat{s}^2 + s(\tilde{f} + \tilde{v} + \tilde{e} + r\tilde{s} - k\tilde{s}\text{sign}(\hat{s})), \end{aligned}$$

其中

$$\begin{aligned} \tilde{f} &= f - \hat{f}, \quad \tilde{v} = c(\hat{x}_1 - \hat{x}_2), \\ \tilde{e} &= k_i(x_1 - \hat{x}_1), \quad \tilde{s} = s - \hat{s} = c\tilde{x}_1 + \tilde{x}_2. \end{aligned}$$

由于 \tilde{f} 是干扰的估计残差, \tilde{v} , \tilde{e} 和 \tilde{s} 都是状态观测误差的线性函数, 取足够大 r , 可保证 $\dot{V} \leq 0$.

为了减少系统的抖振现象, 采用饱和函数和边界层来平滑控制量, 即

$$u = b^{-1}[-\hat{f} + \ddot{y}_c - c\hat{e} - k_i\hat{e} - k\text{sat}(\hat{s}) - r\hat{s}], \quad (25)$$

其中, ϕ 为边界层厚度. 饱和函数 $\text{sat}(\cdot)$ 定义为

$$\text{sat}(s) = \begin{cases} s/\phi, & |s| \leq \phi, \\ \text{sign}(s), & |s| > \phi. \end{cases} \quad (26)$$

4 数值仿真与分析

利用球体的六自由度运动方程, 考虑在高动态环境下, 分别对球体的质心运动和绕质心运动进行分析, 验证静压液浮稳定结构的稳定性能以及控制系统的有效性.

4.1 质心运动分析

在高动态环境下, 利用外界干扰 F_{out} 分别模拟平台在高过载和强烈震荡的环境下, 仿真球体的位移. 仿真参数见表 1.

令 $F_{\text{fr}} = 1 \text{ N}$, w_a 为白噪声, 均值为 0.1 N , 利用附录 A1, A2, 对 (4) 式进行仿真, 仿真结果如图 7 和图 8 所示.

由图 7 和图 8 可知, 在高过载和强烈震荡的环境下, 球心的位移稳定而平滑. 球体在液压支撑系统的作用下, 可以迅速隔离了外界干扰对球体的影响, 具有较强的抗干扰能力.

4.2 绕质心运动分析

令系统的初始状态 $x_0 = [10'' \quad 0 \quad 0]^T$, 观测器的参数 $\varepsilon = 0.01$, $\alpha_1 = 5$, $\alpha_2 = 44$, $\alpha_3 = 40$, $\hat{x}_0 = [0 \quad 0 \quad 0]^T$, 取滑模面参数 $c = 20$, $k_i = 10$, $k_p = 0.3$, $\phi = 0.05$, $k = 1$, $r = 180$, 其余仿真参数见表 2 所示.

进行仿真分析时, 考虑力矩器的质量, 阻尼性质和弹性抑制扭矩, 力矩器产生的控制力矩与控制

指令的传递函数取为

$$T_v = \frac{K_v}{\left(\frac{s^2}{\omega_v^2} + \frac{2\xi_v}{\omega_v}s + 1\right)}u. \quad (27)$$

为了对比分析高增益扩张观测器的性能, 参考文献 [2] 的一类未知干扰估计的 Luenberger 观测器 (LO), 即

$$\begin{aligned} \dot{\hat{z}} &= E_1\hat{z} + E_2y + E_3u, \quad \hat{z} \in \mathfrak{R}^p, \\ \hat{x} &= F_1z + F_2y. \end{aligned} \quad (28)$$

观测器的参数见文献 [2].

考虑测量噪声的影响, 利用观测器估计系统的状态和干扰, 仿真结果如图 9 所示.

表 1 浮球平台的结构参数

R/mm	135.6	$\rho_{\text{球}}/(\text{kg}/\text{m}^3)$	1.85×10^3
r/mm	131	$\rho_{\text{液}}/(\text{kg}/\text{m}^3)$	1.78×10^3
r_1/mm	15.2	P_0/MPa	1.2
r_2/mm	19	$m_1/(\text{m}^3/\text{s})$	4.7×10^{-5}

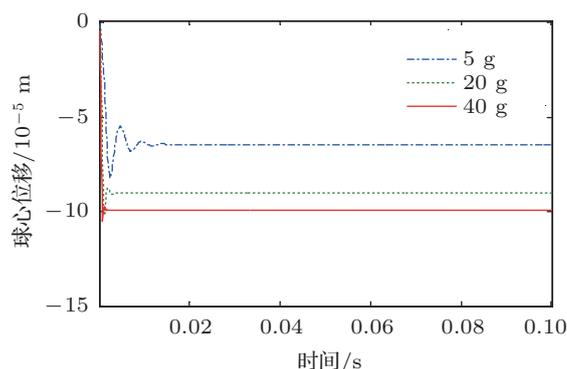


图 7 F_{out} 为过载干扰时, 球心的位移

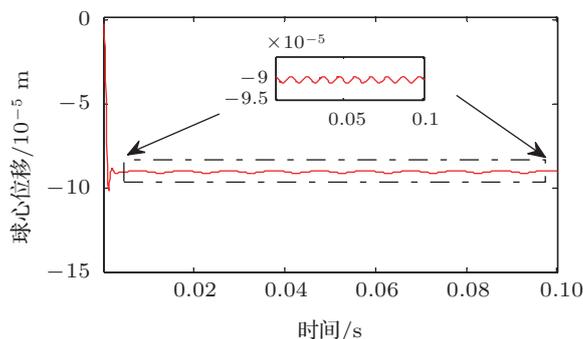


图 8 $F_{\text{out}} = 20\text{g} + 1\text{g} \sin(2\pi \cdot 100 \cdot t)$ 时, 球心的位移

表 2 仿真参数

C_1	2	C_2	1
a	1/1300	b	9000
K_v	12.51	ξ_v	0.48
$\omega_v/(\text{rad}/\text{s})$	1360	$\omega_c/(\text{rad}/\text{s})$	3
$T_u/\text{kg} \cdot \text{m}^2$	0.036	$T_c/\text{kg} \cdot \text{m}^2$	0.036
$w_b/\text{kg} \cdot \text{m}^2$	0.0036	$w_c/\text{kg} \cdot \text{m}^2$	5

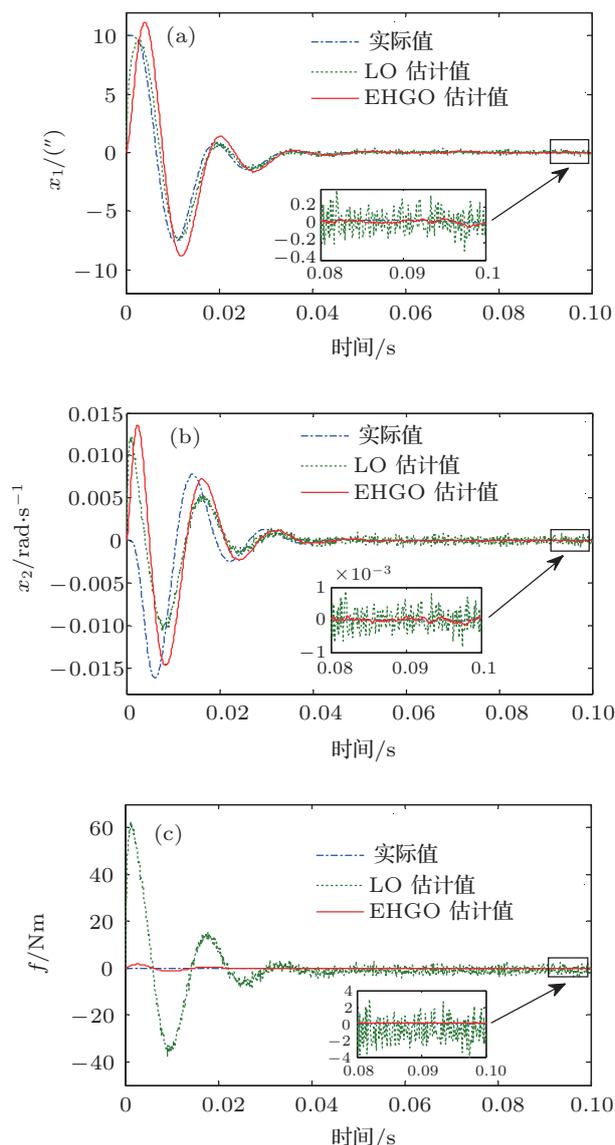


图9 考虑测量噪声条件下,观测的器估计值 (a)和 (b) 状态量 x_1, x_2 的估计值; (c) 干扰估计值

由图可知,在测量噪声的影响下,LO和EHGO均能有效估计系统的状态和干扰.然而在估计精度上,LO的估计值出现强烈震荡,EHGO的估计值平滑,EHGO具有较强的抗噪能力,可以有效估计系统的状态和干扰.

利用(27)式,考虑流体摩擦、未建模动态、质量不平衡和系统噪声等干扰因素的影响,仿真结果如图10和图11所示.

在有效估计状态和干扰的基础上,平台的控制结果如图10和图11所示.文献[2]的控制器调整时间约为0.08s,稳态误差0.02";而基于EHGO的滑模控制器的调整时间小于0.04s,稳态误差小于0.01".与前期的研究相比,无论是调整时间还是

控制精度,本文提出的控制器实现了平台高精度快速稳定控制且性能提升了50%.在滑模面中引入积分项和指数趋近律,可以有效改善控制系统的动态响应和稳态性能,降低控制系统的峰值效应.同时,本文提出的滑模控制律有效抑制了系统的抖振,如图11所示.

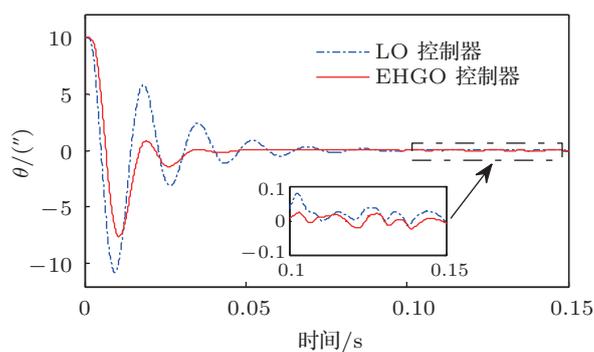


图10 不同控制器下,球体转动角

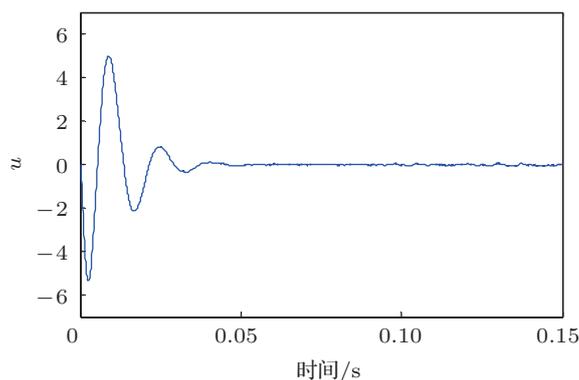


图11 控制输入量

利用本文所提出的控制器,考虑系统参数的不确定性,仿真结果如图12所示.

由图12可知,当系统参数存在较大不确定时,系统仍能保持快速响应和高精度的鲁棒性能.

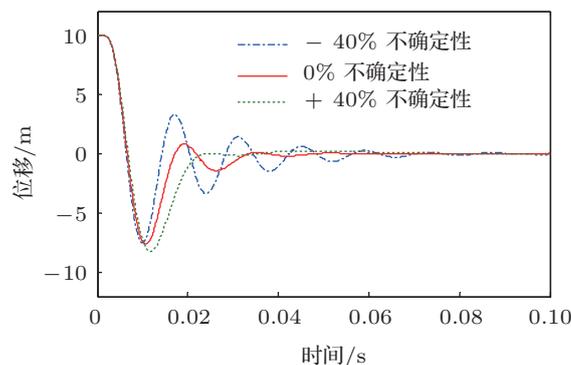


图12 考虑参数不确定条件下,球体的转动角

5 结论

本文从动力学方程的角度全面的分析了浮球平台的悬浮稳定问题, 仿真结果表明, 在外界干扰的条件下, 平台在液浮稳定结构和控制系统的共同作用下, 实现了球体惯性空间稳定, 可以为平台提供有效的惯性参考基准. 同时所提出的基于高增益扩张观测器的滑模控制器有效消除了模型参数不确定、流体阻力、未建模动态和测量噪声的影响, 实现了平台的高精度快速稳定控制. 与前期的研究相比, 基于高增益扩张观测器的滑模控制器的性能指标提升了 50%.

附录 A1

液压支撑结构如图 A1 所示, 在变载荷作用下, 载荷 W , 液压支撑力 F 和球体的惯性力 $m\ddot{h}$ 的关系为

$$W + m\ddot{h} - F = 0, \quad (\text{A1})$$

式中, h 为悬浮垫中心与壳体的垂直距离.

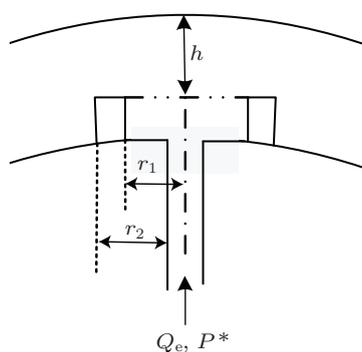


图 A1 液压支撑结构示意图

假设: 1) 在悬浮系统中, 液体呈层流, 忽略液体的惯性力; 2) 液体压力不高, 可以忽略黏压效应的影响; 3) 悬浮垫是不变性的刚体.

在此假设的条件下, 圆形悬浮垫与液膜压力分布的关系为

$$\frac{dP}{dr} = -\frac{6\mu m}{\pi r h^2}, \quad (\text{A2})$$

其中, r 为悬浮垫表面任意点半径, P 为相应点的压力, μ 为液体动力粘度, m 为通过悬浮垫的动态流量, 即

$$m = m_1 + m', \quad (\text{A3})$$

式中, m_1 为流入悬浮垫的流量, $m' = \pi r^2 \dot{h}$ 为挤压效应流量.

综上所述, 悬浮垫的动态液膜压力为

$$P = P^* + P', \quad (\text{A4})$$

式中,

$$P^* = \frac{6\mu m_1}{\pi h^2} \ln \frac{r_2}{r_1}$$

为静压效应压力, r_2 为悬浮垫的外径, r_1 为悬浮垫的内径,

$$P' = \gamma \dot{h}, \quad \gamma = \frac{3\mu}{h^3} (r_2^2 - r_1^2)$$

为悬浮垫间隙阻尼系数.

则悬浮垫产生的液压支撑力为

$$F = P^* A_b + P' A_d, \quad (\text{A5})$$

其中, A_b 为悬浮垫有效承载面积, A_d 为悬浮垫有效挤压面积.

附录 A2

如图 A2 所示, 八个悬浮垫对称安装在球体表面, 即球体正交正方体的顶点位置, 分别同 $S_1 \dots S_8$ 表示, 惯性坐标系 X_1, Y_1, Z_1 轴垂直指向正方体表面中心位置.

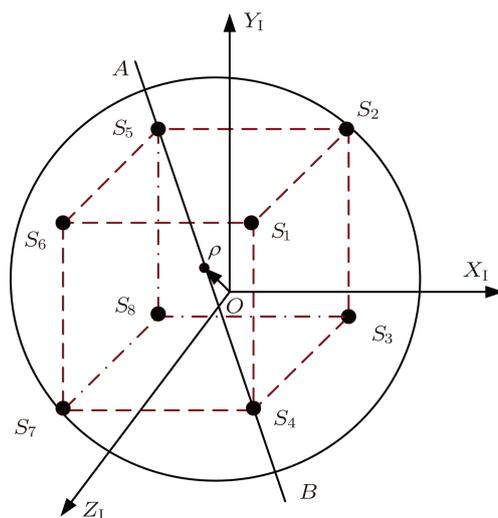


图 A2 球心偏心距 ρ 与距离 h 的关系示意图

假设在惯性坐标系下, 考虑五象限的悬浮垫 S_4 和三象限下的悬浮垫 S_5 , 球心与坐标系原点重合, 则直线 AB 的方程为

$$\frac{x}{-1} = \frac{y}{1} = \frac{z}{-1}. \quad (\text{A6})$$

当球体存在位移 $\rho = [x_e \ y_e \ z_e]^T$ 时, 忽略球体的转动, 由于直线方程的斜率没有改变, 因此直线方程 AB 可以表示为

$$\frac{x - x_e}{-1} = \frac{y - y_e}{1} = \frac{z - z_e}{-1}. \quad (\text{A7})$$

在惯性坐标系下, 壳体方程为

$$X^2 + Y^2 + Z^2 = R^2, \quad (\text{A8})$$

其中 R 为壳体的半径.

假设直线与壳体相交于点 A, B 点, A, B 两点的坐标即方程 (A7) 和 (A8), 解, 令

$$A = [x_1 \quad y_1 \quad z_1]^T, \quad B = [x_2 \quad y_2 \quad z_2]^T,$$

则悬浮垫 S_5 与壳体的距离为

$$h_5 = \sqrt{(x_1 - x_e)^2 + (y_1 - y_e)^2 + (z_1 - z_e)^2} - r, \quad (\text{A9})$$

其中 r 为球体的半径.

悬浮垫 S_4 与壳体的距离为

$$h_4 = \sqrt{(x_2 - x_e)^2 + (y_2 - y_e)^2 + (z_2 - z_e)^2} - r. \quad (\text{A10})$$

同理可得其他悬浮垫与壳体之间的距离.

- [1] Hanching G W, Thomas C W 2008 *IEEE Control Systems* **2** 65
- [2] Gully S W 1975 *Seventh Biennial Guidance Test Symposium* New Mexico, October 10–12, 1975 p128
- [3] Zhang G H, Tang G F 1994 *Journal of Hydrodynamics. Ser. B* **1** 86
- [4] Sifter D J, Henderson V D 1990 *Eighth Biennial Guidance Test Symposium* New Mexico, May 21–26, 1990 p109
- [5] Rui J B, Jing G C, Xu B Y 1993 *Strength and Environment* **90** 45 (in Chinese) [芮嘉白, 金观昌, 徐秉业 1993 强度与环境 **90** 45]
- [6] Qi D L, Yang J, Zhang J L 2010 *Chin. Phys. B* **19** 100506
- [7] Kong C C, Chen S H 2009 *Chin. Phys. B* **18** 91
- [8] Liu F C, Song J Q 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 4729 (in Chinese) [刘福才, 宋佳秋 2011 物理学报 **57** 4729]
- [9] Liu S, Lu L, Li G 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 160507 (in Chinese) [柳爽, 吕翎, 李刚 2012 物理学报 **61** 160507]
- [10] Li M, Liu C X 2010 *Chin. Phys. B* **19** 100504
- [11] Yu Y, Mi Z Q, Lin X J 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 070509 (in Chinese) [余洋, 米增强, 刘兴杰 2011 物理学报 **60** 070509]
- [12] Lu L, Li Y S, Wei L L, Yu M, Zhang M 2012 *Acta Phys. Sin* **61** 120504 (in Chinese) [吕翎, 李雨珊, 韦琳玲, 于淼, 张檬 2012 物理学报 **61** 120504]
- [13] Zeng G X, X Y 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 014502 (in Chinese) [曾广湘, 薛郁 2011 物理学报 **60** 014502]
- [14] Liu X C, Xu W, Xiao Y Z 2008 *Acta Phys. Sin* **57** 1465 (in Chinese) [李秀春, 徐伟, 肖玉柱 2008 物理学报 **57** 1465]
- [15] Wang X Y, Wu X J 2007 *Acta Phys. Sin* **56** 1988 (in Chinese) [王兴元, 武相军 2007 物理学报 **56** 1988]
- [16] Zhao J L, Wang J, Wei W 2011 *Acta Phys. Sin.* **56** 1988 (in Chinese) [赵建利, 王京, 魏伟 2011 物理学报 **60** 100203]
- [17] Zhao J L, Wang J, Wei W 2012 *Acta Phys. Sin.* **56** 1988 (in Chinese) [赵建利, 王京, 魏伟 2012 物理学报 **61** 100209]
- [18] Shahid N, Hassan K K 2011 *IEEE Transactions on Automatic Control* **56** 802
- [19] Itkis U 1976 *Control Systems of Variable Structure* (New York: Wiley) pp4–16

Control and modeling of suspending stabilization problem for floated inertial platform*

Li An-Liang[†] Cai Hong Zhang She-Feng Bai Xi-Bin

(College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defence Technology, Changsha 410073, China)

(Received 19 March 2013; revised manuscript received 16 May 2013)

Abstract

Focusing on the suspending stabilization problem for the floated inertial platform, the 6-DOF (degree-of-freedom) equation of motion for the stabilized platform is derived based on the disturbance analysis of the platform and the mode of the suspending support system. To solve the disturbance of the external environments, mode parameter uncertainty, unmodeled dynamics and measurement noise, the sliding mode controller based on the extended high-gain observer are proposed. Simulations indicate that the stabilization structure could isolate the external disturbance and improve the anti-interference ability of the platform; the high precision and quick stabilization control are realized by the proposed controller. Compared with the previous research, the dynamic and stabilization performance of the proposed controller is increased by 50%.

Keywords: floated inertial platform, suspending stabilization, extended high-Gain observer, sliding mode control

PACS: 02.30Yy, 05.45.-a, 4520.da

DOI: 10.7498/aps.62.150203

* Project supported by the Aerospace Scientific and Technical Innovation Foundation, China (Grant No. 201105).

[†] Corresponding author. E-mail: anliangli@126.com