

## 驱动控制对太阳帆板驱动系统动力学特性的影响\*

朱仕尧, 郭欣, 雷勇军

(国防科技大学空天科学学院, 湖南长沙 410073)

**摘要:**准确预示太阳帆板驱动系统动力学特性是开展扰振机理和振动控制研究的基础。本文推导了考虑驱动控制因素的太阳帆板驱动装置等效力学特性参数表达式, 构建了太阳帆板驱动系统动力学特性等效分析模型, 并在仿真和试验验证基础上, 讨论了驱动速度和控制增益对驱动装置力学特性参数和驱动系统动力学特性的影响规律。结果表明: 所构建的等效分析模型能够在不同驱动速度和控制增益情况下准确预示驱动系统动力学特性, 分析结果与试验误差小于 10%; 驱动装置等效阻尼与驱动速度和控制增益无关, 但等效刚度随控制增益减小和驱动速度增大而减弱。随着驱动速度提高, 驱动控制逐渐成为影响驱动系统动力学特性的重要因素。

**关键词:**动力学特性; 驱动控制; 太阳帆板驱动装置; 等效模型

**中图分类号:** V414.3+3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-2486(2020)06-011-08

## Influence of drive control on dynamic characteristics of solar array drive system

ZHU Shiyao, GUO Xin, LEI Yongjun

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

**Abstract:** Accurate prediction of dynamic characteristics is an indispensable research foundation for the disturbance mechanism and vibration control of SADS (solar array drive system). The equivalent mechanical parameters of the drive mechanism were deduced with the consideration of drive control, the equivalent dynamics-characteristics analysis model of SADS was built and verified via simulation and experiment, the influence of the drive speed and control gains on the equivalent mechanical parameters of drive mechanism and dynamic characteristics of SADS was discussed. The results show that the equivalent analysis model can accurately predict the dynamic characteristics of SADS with different drive speeds and control gains, and the error between the analysis results and the test data is less than 10%. The equivalent damping of the drive mechanism cannot be affected by the drive speed and control gain, but the equivalent stiffness decreases with the decrease of the control gain and the increase of the drive speed. The drive control gradually becomes an important factor affecting the dynamic characteristics of SADS with the increase of the drive speed.

**Keywords:** dynamic characteristics; drive control; solar array drive assembly; equivalent model

太阳帆板驱动系统 (Solar Array Drive System, SADS) 一般由太阳帆板及其驱动装置 (Solar Array Drive Assembly, SADA) 组成。SADA 内部激励因素会产生附加的扰动力矩, 造成太阳帆板运动不平稳, 引起结构振动扰动; 而太阳帆板结构振动又会反过来影响太阳帆板运行平稳性和扰动力矩幅值, 降低高精度航天器指向精度、成像质量或通信频率等性能指标<sup>[1]</sup>。开展驱动系统扰振特性分析和有效抑制扰动力矩都需要首先准确分析驱动系统动力学特性。

太阳帆板驱动系统包括太阳帆板转动引入的刚柔耦合效应、SADA 闭环伺服驱动控制以及

SADA 和太阳帆板之间的动力耦合等多种耦合因素<sup>[2]</sup>, 这些因素会对其系统动力学特性产生影响, 增加系统动力学特性的分析难度。在早期研究中, SADA 往往被考虑为刚性体, 不考虑 SADA 与太阳帆板的动力耦合, 驱动系统动力学特性仅表现为太阳帆板结构模态特征, 可以采用集中参数模型<sup>[3]</sup>、模态坐标模型<sup>[4]</sup>、悬臂欧拉梁模型<sup>[5]</sup>、固支-自由-自由-自由边界的基尔霍夫板模型<sup>[6]</sup>以及有限元模型<sup>[7-8]</sup>等表征。随着 SADA 研究不断深入, 研究人员开始关注 SADA 自身的刚度和阻尼特征。这些研究往往采用刚性附件代替柔性太阳帆板。Low<sup>[9]</sup>、Yang<sup>[10]</sup> 和 Middleton<sup>[11]</sup>

\* 收稿日期: 2019-08-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (11272348)

作者简介: 朱仕尧 (1987—), 男, 辽宁葫芦岛人, 讲师, 博士, E-mail: zhushiyao@nudt.edu.cn

等主要研究了由步进电机内部机电耦合引起的电磁刚度和阻尼特性。Cabilic<sup>[12]</sup>和 Wood<sup>[13]</sup>等证明了 SADA 内部滑环结构的摩擦会引入额外的阻尼。Lu 等<sup>[14]</sup>研究了驱动系统减速装置齿轮咬合间隙对扰动特性的影响。近些年,研究人员开始探索在系统动力学分析中综合考虑 SADA 和太阳帆板的结构特性。Sattar<sup>[15]</sup>、Chen<sup>[16]</sup>和 Li<sup>[17]</sup>等研究了带有柔性负载的驱动系统扰动特性问题,其中采用集中参数模型模拟柔性负载,对步进电机进行线性化处理,获得其等效电磁刚度。Zhu 等<sup>[2, 18]</sup>在理想控制假设和稳态运动假设下,推导了 SADA 的等效刚度和等效阻尼,并提出了一种驱动系统动特性分析方法。以上研究往往将驱动系统限定在低转速模式,对驱动控制进行理想化假设,以简化问题难度。Zhou 等<sup>[19]</sup>利用输入成形器对驱动控制指令进行预处理,以减少快速驱动后的残余振动扰动,但未对快速捕获或转角归零等高速模式下的驱动系统动力学特性进行讨论。

针对上述问题,本文摒弃驱动控制理想化假设,重点推导考虑驱动控制因素的 SADA 等效力学特性参数,构建 SADS 动力学特性等效分析模型,通过仿真和试验验证模型正确性,并研究不同转速条件下驱动控制增益对 SADS 动力学特性的影响规律,对工程型号改进设计、抗振特性分析及振动控制研究具有重要参考价值。

### 1 驱动系统动力学特性等效分析模型

#### 1.1 驱动系统动力学模型

SADS 坐标系定义如图 1 所示,其中 OXYZ 为惯性坐标系, *oxyz* 为太阳帆板随体坐标系。航天器本体的质量和频率特性均明显大于 SADS,可将其简化为固定约束的刚性体。根据 SADS 工作流程(如图 2 所示)可知,系统动力学模型可由驱动控制、驱动装置和太阳帆板等子模型组成。

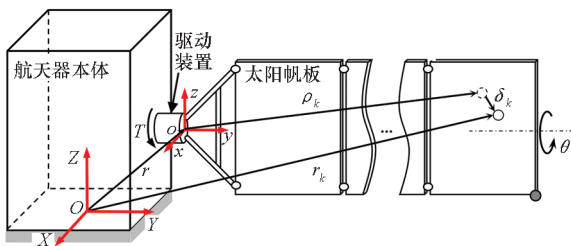


图 1 太阳帆板驱动系统组成

Fig. 1 System composition of SADS

##### 1.1.1 驱动控制

SADA 一般采用步进电机作为驱动执行部



图 2 驱动系统工作流程

Fig. 2 Typical workflow of SADS

件。由于其每个输入脉冲所对应的转角是定值,因此脉冲信号的频率与驱动速度成正比,可以通过开环控制实现驱动速度控制。为避免步进驱动引起较大幅度的力矩波动,电流细分器对步进电机参考电流进行微步阶跃形式的三角函数细分。如图 3 所示,随着电流细分数的增加,参考电流细分阶跃幅度逐渐减小。

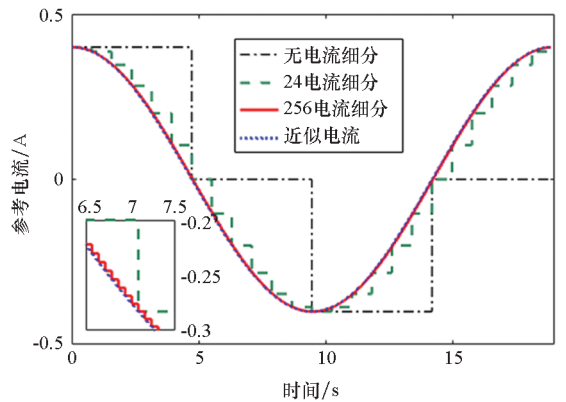


图 3 电流细分对参考电流的影响

Fig. 3 Relationship between current fraction and reference current

当细分数较大时,电机 *j* 相绕组参考电流  $\bar{i}_j$  可近似表示为余弦函数形式:

$$\bar{i}_j \approx I_m \cos(\bar{\omega}_c t - \phi_j) \quad j = 1, 2, \dots, N_p \quad (1)$$

式中:  $I_m$  为电流幅值;  $\phi_j$  为 *j* 相参考电流延迟相位;  $N_p$  为电机极对数;  $\bar{\omega}_c = N_m N_g \bar{\omega}$  为绕组电流的波动频率。对于确定的驱动装置,电机齿数  $N_m$  和减速比  $N_g$  为常数,则  $\bar{\omega}_c$  随平均驱动速度  $\bar{\omega}$  正比例变化。

在参考电流细分基础上,电流控制器通过步进电机绕组电流与参考电流之间的偏差反馈调整驱动电压(以下简称为电流环),使绕组电流跟随参考电流变化,从而保证驱动速度与实际转速趋于一致。根据电机的电压平衡方程可以得到实际电流  $i_j$  的表达式:

$$i_j = \frac{1}{R} \left[ u_j - L \frac{di_j}{dt} - K_m \omega_m \sin(N_m \theta_m - \phi_j) \right] \quad j = 1, 2, \dots, N_p \quad (2)$$

式中:  $R$  和  $L$  分别为绕组阻抗和电感系数;  $K_m$  为电磁力矩系数;  $\omega_m$  和  $\theta_m$  分别为电机转子转速和转角。设定电流控制器采用 PI 控制律调整驱动

电压  $u_j$ :

$$u_j = K_p(\bar{i}_j - i_j) + K_I \int (\bar{i}_j - i_j) dt \quad j = 1, 2, \dots, N_p \quad (3)$$

式中:  $K_p$  和  $K_I$  分别为比例和积分控制增益。

### 1.1.2 驱动装置

含有减速装置的 SADA 力矩平衡方程<sup>[20]</sup>为:

$$T_1 = (T_e - J_m \ddot{\theta}_m) N_g \rho_g - T_f \quad (4)$$

式中:  $T_1$  为驱动力矩;  $J_m$  为转子转动惯量;  $\rho_g$  为减速装置传递效率; 电磁力矩  $T_e$  和摩擦力矩  $T_f$  分别表示为

$$T_e = -K_m \sum_j^{N_p} i_j \sin(N_m \theta_m - \phi_j) \quad (5)$$

$$T_f = \sigma_0 \omega_1 - [T_c + (T_s - T_c) e^{-(\omega_1/\omega_s)}] \text{sgn}(\omega_1) \quad (6)$$

其中:  $\sigma_0$  为黏性摩擦系数;  $T_c$  和  $T_s$  分别为库伦摩擦力矩和最大静摩擦力矩;  $\omega_s$  为临界 Strebeck 转速。

含有减速装置的 SADA 运动方程为:

$$\begin{cases} \omega_1 = \dot{\theta}_1 \\ \omega_m = \dot{\theta}_m \\ \omega_1 N_g = \omega_m \\ \theta_1 N_g = \theta_m \end{cases} \quad (7)$$

其中:  $\omega_1$  和  $\theta_1$  分别为太阳帆板转速和转角。

### 1.1.3 太阳帆板

根据虚功原理, 当不考虑高阶小量时, 可以建立考虑太阳帆板刚体转动、柔性振动以及两者耦合的柔性太阳帆板结构动力学模型<sup>[2]</sup>:

$$\begin{bmatrix} J_1 & H_1 \\ H_1^T & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\omega}_1 \\ \ddot{\eta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \dot{\eta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \eta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中:  $H_1$  为模态角动量矩阵  $H$  第一行向量;  $J_1$  为转动惯性矩阵  $J$  第一个对角元;  $\eta$  为太阳帆板模态坐标;  $D$  和  $A$  分别为模态阻尼矩阵和特征值矩阵。将式(4)代入式(8), 并结合式(1)~(3)得 SADS 动力学模型。

## 1.2 步进电机绕组电流表达式

稳态太阳帆板驱动系统运动具有如下特点:

$$\begin{cases} \omega_1 \rightarrow \bar{\omega} \gg \omega_s > 0 \\ \dot{\theta}_1 \rightarrow 0 \end{cases} \quad (9)$$

此时电机实际转速和平均驱动速度之间的误差很小, 即电机转动的运动规律满足如下关系:

$$\begin{cases} N_g \bar{\omega} \rightarrow \omega_m \\ N_g \bar{\omega} t \rightarrow \theta_m \end{cases} \quad (10)$$

将式(10)代入式(2), 可近似得到:

$$u_j = R i_j + L \frac{di_j}{dt} + K_m N_g \bar{\omega} \sin(\bar{\omega}_c t - \phi_j) \quad (11)$$

再将式(11)代入式(3), 可整理得到:

$$\begin{aligned} (K_p + R) i_j + K_I \int i_j dt + L \frac{di_j}{dt} \\ = K_p \bar{i}_j + K_I \int \bar{i}_j dt - K_m N_g \bar{\omega} \sin(\bar{\omega}_c t - \phi_j) \end{aligned} \quad (12)$$

如图4所示, 充分细分后的稳态绕组电流可以近似为与参考电流同频振荡, 但幅值和相位不同的三角函数, 因此第  $j$  相绕组电流为:

$$\begin{aligned} i_j &= I_m \gamma_c \cos(\bar{\omega}_c t - \phi_j - \phi_c) \\ &= P I_m \cos(\bar{\omega}_c t - \phi_j) + Q I_m \sin(\bar{\omega}_c t - \phi_j) \end{aligned} \quad (13)$$

式中,  $\gamma_c$  和  $\phi_c$  分别为绕组电流相对参考电流的幅值比和延迟相位, 其与参数  $P$  和  $Q$  的关系式为:

$$\begin{cases} \gamma_c = \sqrt{Q^2 + P^2} \\ \phi_c = \arctan \frac{Q}{P} \end{cases} \quad (14)$$

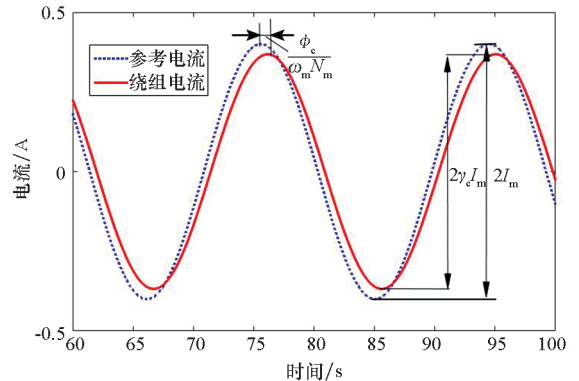


图4 绕组电流和参考电流时间历程曲线

Fig. 4 Time history curves of winding and reference current

参数  $P$  和  $Q$  是绕组电流表达式中的未知量, 因此求解绕组电流等同于将表达式(13)代入方程(12)中, 并求解参数  $P$  和  $Q$ 。为阐述简洁, 设  $C = K_m N_g \bar{\omega} / I_m$ , 并利用式(1)将式(12)改写为:

$$\begin{aligned} \left[ -\bar{\omega}_c L P + (K_p + R) Q + \frac{K_I}{\bar{\omega}_c} P - \frac{K_I}{\bar{\omega}_c} + C \right] \sin(\bar{\omega}_c t - \phi_j) + \\ \left[ \bar{\omega}_c L Q + (K_p + R) P - \frac{K_I}{\bar{\omega}_c} Q - K_p \right] \cos(\bar{\omega}_c t - \phi_j) = 0 \end{aligned} \quad (15)$$

式(15)只有在正弦项和余弦项系数同时为0的情况下才能成立, 可以列写代数方程组并求解得到:

$$\begin{cases} P = \frac{\bar{\omega}_c^2 K_p (K_p + R) - (K_1 - \bar{\omega}_c C) (\bar{\omega}_c^2 L - K_1)}{(\bar{\omega}_c^2 L - K_1)^2 + \bar{\omega}_c^2 (K_p + R)^2} \\ Q = \frac{\bar{\omega}_c K_p (\bar{\omega}_c^2 L - K_1) + \bar{\omega}_c (K_p + R) (K_1 - \bar{\omega}_c C)}{(\bar{\omega}_c^2 L - K_1)^2 + \bar{\omega}_c^2 (K_p + R)^2} \end{cases} \quad (16)$$

进一步将式(16)代入式(14),可以得到驱动控制增益、绕组特性以及转速等参数与绕组电流幅值和相位的关系。

### 1.3 驱动装置等效力学特性

以两相混合式步进电机为例,将式(13)代入式(5)可得电磁力矩为:

$$\begin{aligned} T_e &= -K_m \sum_j i_j \sin(N_m \theta_m - \phi_j) \\ &= K_m I_m \gamma_c \sin(\bar{\omega}_c t - N_m \theta_m - \phi_c) \end{aligned} \quad (17)$$

因此式(4)中的驱动力矩可整理为:

$$\begin{aligned} T_1 &= K_m I_m \gamma_c N_g \rho_g \sin(\bar{\omega}_c t - N_m \theta_m - \phi_c) - N_g^2 J_m \ddot{\theta}_1 - \\ &\quad \sigma_0 \omega_1 - [T_c + (T_s - T_c) e^{-(\omega_1/\omega_s)}] \text{sgn}(\omega_1) \end{aligned} \quad (18)$$

根据式(9)可知,含有  $e^{-(\omega_1/\omega_s)}$  和  $\ddot{\theta}_1$  的项可以近似为0,  $\text{sgn}(\omega_1)$  为正,  $\bar{\omega}_c t - N_m \theta_m$  或  $N_m(N_g \bar{\omega}_c t - \theta_m)$  是小量,所以式(18)可简化:

$$\begin{aligned} T_1 &\approx K'_d (\bar{\omega}_c t - \theta_1) - \sigma_0 \omega_1 - K_m I_m \gamma_c \sin \phi_c - T_c \\ &= -\sigma_0 \omega_1 - K'_d \theta_1 + (K'_d \bar{\omega}_c t - K_m I_m \gamma_c \sin \phi_c - T_c) \end{aligned} \quad (19)$$

式中:转速  $\omega_1$  系数的绝对值  $\sigma_0$  为考虑驱动控制后的 SADA 等效阻尼;转角  $\theta_1$  系数的绝对值  $K'_d$  为 SADA 等效刚度,具体表达式为

$$K'_d = K_m I_m N_m N_g^2 \rho_g \gamma_c \cos(\theta_c) = \mu_d K_d \quad (20)$$

式中:  $K_d = K_m I_m N_m N_g^2 \rho_g K_1 / \arcsin(K_1)$ , 为文献[2]给出的理想驱动控制假设条件下的等效刚度,其中  $K_1 = (\sigma_0 \bar{\omega}_c + T_c) / (K_m I_m N_g \rho_g)$ ;  $\mu_d = \gamma_c \cos(\phi_c) \cdot \arcsin(K_1) / K_1$ , 为考虑驱动控制后的 SADA 等效刚度与理想驱动控制假设下的 SADA 等效刚度的比值。

由于  $0 < K_1 \ll 1$ , 因此  $\arcsin(K_1) / K_1$  接近于1; 并且  $\gamma_c$  和  $\cos(\phi_c)$  只有在理想假设情况下才等于1, 其他实际工况中两者均小于1, 所以  $\mu_d$  始终小于1, 由此说明  $K'_d$  弱于  $K_d$ 。此外,  $\sigma_0$  为驱动装置的等效阻尼系数, 与是否考虑驱动控制无关。综上, 驱动控制会减弱 SADA 等效刚度, 但不会影响其等效阻尼。

### 1.4 动力学特性等效分析模型

将式(19)代入式(8), 可得 SADS 动力学特性等效分析模型:

$$\begin{aligned} &\begin{bmatrix} J_1 & \mathbf{H}_1 \\ \mathbf{H}_1^T & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\omega}_1 \\ \ddot{\boldsymbol{\eta}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sigma_0 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \dot{\boldsymbol{\eta}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K'_d & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \Lambda \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \boldsymbol{\eta} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} K'_d \bar{\omega}_c t - K_m I_m \gamma_c \sin(\theta_c) - T_c \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (21)$$

根据式(21)可知, 驱动装置可以转化为如图5所示的一类弹性边界条件。将式(21)改写为关于  $\mathbf{q} = [\theta_1 \quad \boldsymbol{\eta}_1^T \quad \omega_1 \quad \dot{\boldsymbol{\eta}}_1^T]^T$  的状态方程<sup>[21]</sup>, 并求解系数矩阵特征值得到共轭特征值  $\lambda_{si}$  和  $\lambda_{si}^*$ , 可以求得系统第  $i$  阶模态固有频率  $f_{si}$  和模态阻尼比  $\xi_{si}$ <sup>[2]</sup>。

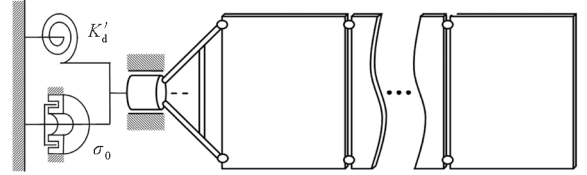


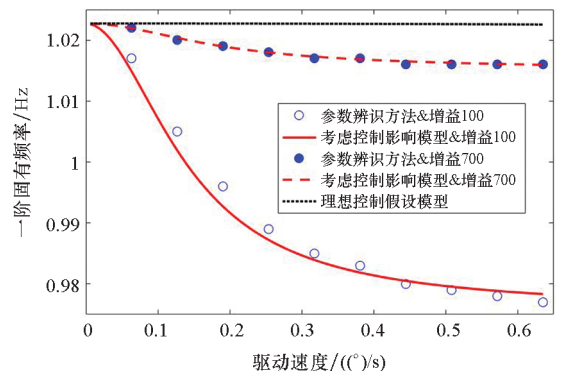
图5 驱动系统动力学特性等效模型

Fig.5 Dynamic-characteristics equivalent model of SADS

## 2 动力学特性分析模型正确性验证

### 2.1 仿真验证

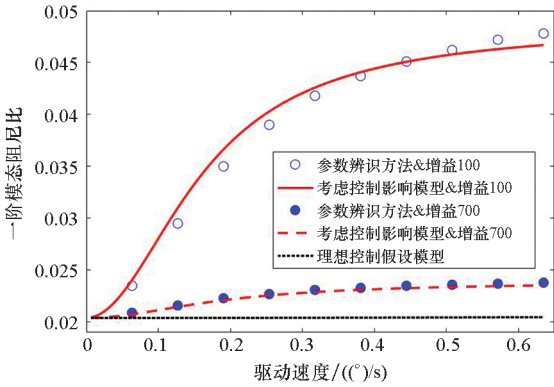
图6给出了分别采用参数辨识方法、考虑驱动控制的等效模型和基于理想驱动控制假设的等效模型得到的驱动系统一阶扭转模态固有频率和模态阻尼比随驱动速度的变化曲线。由图可知: ①在驱动速度趋近  $0.0635$  ( $^\circ$ )/s 且控制增益为700时, 三者计算得到的驱动系统动力学特性参数吻合较好。②随着驱动速度逐渐增大, 参数辨识结果与考虑驱动控制的等效模型所得动特性变化规律一致, 固有频率均随驱动速度增大而逐渐减小, 模态阻尼比随驱动速度增大而逐渐增大; 且控制增益越小, 模态参数变化幅度越大。然而, 基于理想驱动控制假设的等效模型所得系统模态参数均不随转速和控制增益变化, 其与参数辨识的



(a) 一阶固有频率

(a) 1st natural frequency





(b) 一阶模态阻尼比

(b) 1st model damping ratio

图 6 系统动力学特性参数与转速关系曲线

Fig. 6 Relationship curve between dynamic characteristic of SADS and rotational speed

相对误差随驱动速度增大和控制增益减小而增大。③在驱动速度趋近  $0.635 (^{\circ})/s$  时,参数辨识和考虑驱动控制的等效模型所得固有频率的相对误差为  $-2.32%$ ,阻尼比相对误差为  $-1.88%$ ;而基于理想驱动控制假设的等效模型所得固有频率和阻尼比与参数辨识方法的相对误差分别可达  $4.71%$  和  $-57.11%$ 。以上分析说明:基于理想驱动控制假设的等效模型在驱动速度增大后出现应用局限性,而考虑驱动控制的等效模型可以适应驱动速度和控制增益的变化。

### 2.2 试验验证

试验件为驱动装置和太阳帆板模拟件构成的驱动系统(如图 7 所示)。驱动装置为低轨直接型 SADA;太阳帆板由两块铝合金薄板组成,用于模拟太阳帆板在驱动方向的质量和刚度特征,满足转动惯量等效和结构基频等效原则。为抵消模拟件对驱动装置轴承的压力,在驱动系统的转动轴线方向配备龙门吊和吊装组件以卸载重力。

测试系统由 Kistler 六自由度测力平台、Polytec 激光测振仪、信号放大器、数据采集器、计算机和 SADA 外置驱动器以及动力学试验分析软件等组成,如图 7 所示。测力平台通过螺栓与 SADA 转接工装固定连接,用于测量驱动系统的扰动力矩分量。激光测振仪测量驱动装置转速,激光测点布置在太阳帆板刚性转接工装上。测量结果分别经过信号放大器和测振仪后置端进行处理,并通过数据采集器传递给计算机。SADA 外置驱动器用于产生脉冲信号控制太阳帆板转动。

在驱动系统匀速驱动后增加停止指令,记录驱动系统在停止段的残余振动响应,并对该段自由振动数据(如图 8 所示)进行傅里叶变换得到

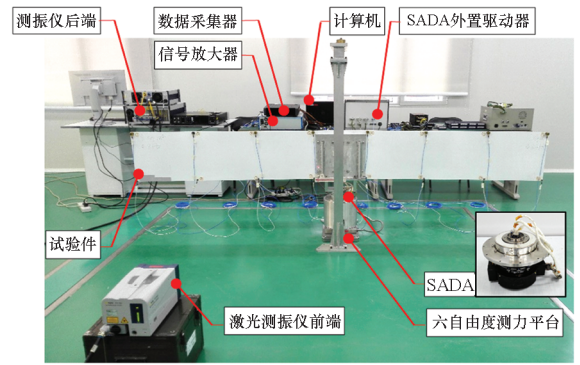
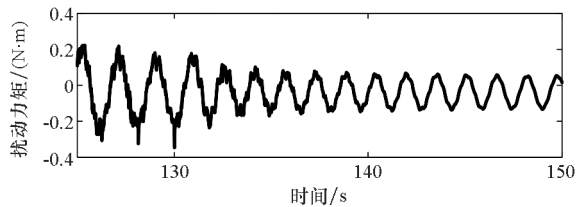


图 7 驱动系统扰动特性测试系统

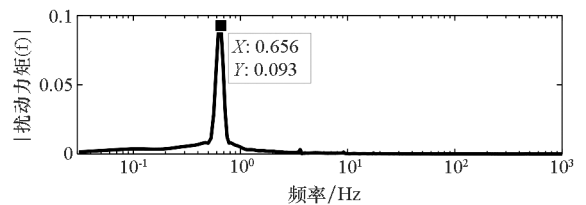
Fig. 7 Disturbance-characteristics test system of SADS

频谱分布特征。扰动力矩衰减曲线表现为单频震荡特点,幅度随时间增加而逐渐减小;在频谱曲线低频段存在明显峰值,所对应频率  $0.656 \text{ Hz}$  即为驱动系统基频。参考试验状态建立太阳帆板模拟件与驱动装置等效刚度和阻尼模型。根据文献[2]参数确定驱动装置等效刚度为  $680 \text{ N} \cdot \text{m}/\text{rad}$ ,等效阻尼为  $60 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}/\text{rad}$ 。通过模态分析得到其在固定支撑边界条件下的动力学特性,其中一阶模态振型同为围绕驱动方向的一阶扭转振动,对应基频为  $0.610 \text{ Hz}$ ,与试验结果相对误差为  $-7.01%$ 。



(a) 时间历程

(a) Time history



(b) 频谱分布

(b) Frequency spectrum

图 8 驱动系统停止段扰动力矩

Fig. 8 Disturbance torque in the stop phase of SADS

## 3 驱动控制对系统动力学特性的影响分析

### 3.1 驱动速度和比例增益对系统动力学特性影响

图 9 给出了不同驱动速度下 SADS 各阶扭转模态固有频率随比例增益的变化曲线。由图可知:①驱动速度大于 4 倍  $0.0635 (^{\circ})/s$  时,前两

阶固有频率先随比例增益显著增大而后逐渐趋于稳定,最小的固有频率取值位于最小的比例增益位置并随驱动速度减小而增大,且固有频率趋于平稳时的临界比例增益取值随模态阶数增大而增大;第三阶固有频率在所见区域内始终与比例增益成正相关关系,未出现稳定阶段。②驱动速度小于 4 倍  $0.0635 (\text{°})/\text{s}$  时,固有频率均随比例增益先小幅减小而后趋于稳定。以上分析说明:驱动系统固有频率仅在驱动速度较大且比例增益较小时才会变化;当比例增益增大后,固有频率不随驱动速度和比例增益而改变。

图 10 给出了不同驱动速度下 SADS 各阶扭转模态阻尼比随比例增益的变化曲线。由图可知:①驱动速度大于 4 倍  $0.0635 (\text{°})/\text{s}$  时,前两阶模态阻尼比随比例增益增大而显著减小,随后保持稳定;在驱动速度小于 4 倍  $0.0635 (\text{°})/\text{s}$  时,模态阻尼比先小幅增大而后趋于平稳,且稳定值按模态阶次顺序逐渐增大。②第三阶模态阻尼比的变化趋势与前两阶相反,其在驱动速度大于 4 倍  $0.0635 (\text{°})/\text{s}$  时,随比例增益增大而增大;在驱动速度小于 4 倍  $0.0635 (\text{°})/\text{s}$  时,第三阶模态阻尼比先小幅减小然后趋于稳定;模态阻尼比最小值对应比例增益的最小值,并随驱动速度增

大而减小。以上分析说明:各阶模态阻尼比的变化趋势并不相同,但是都会在比例增益较小且驱动速度较大时发生变化,在比例增益大于特定值后趋于稳定。

### 3.2 驱动速度和积分增益对系统动力学特性影响

图 11 为不同驱动速度下 SADS 各阶扭转模态固有频率随积分增益的变化曲线。由图可知:①当驱动速度较小时,固有频率逐渐增大并最终达到稳定取值;②随着驱动速度的增大,固有频率增大速度在逐渐减小,特别是当驱动速度大于 5.5 倍  $0.0635 (\text{°})/\text{s}$  后,固有频率在所研究范围内始终随积分增益增大,而未趋于稳定。

图 12 为不同驱动速度下 SADS 各阶扭转模态阻尼比随积分增益的变化曲线。由图可知:①前两阶模态阻尼比均随积分增益增大而减小,且减小速率随驱动速度增大而逐渐减小;同阶模态阻尼比最大值均对应积分增益最小值;驱动速度增大会使模态阻尼比最小值不断增大。②第三阶模态阻尼比随着积分增益的增大而增大;在最小驱动速度工况下,其首先随积分增益显著增大,然后趋于稳定;随驱动速度增大,模态阻尼比增大速率不断减小;在最大驱动速度工况下,模态阻尼比随积分增益增大而平稳增加。

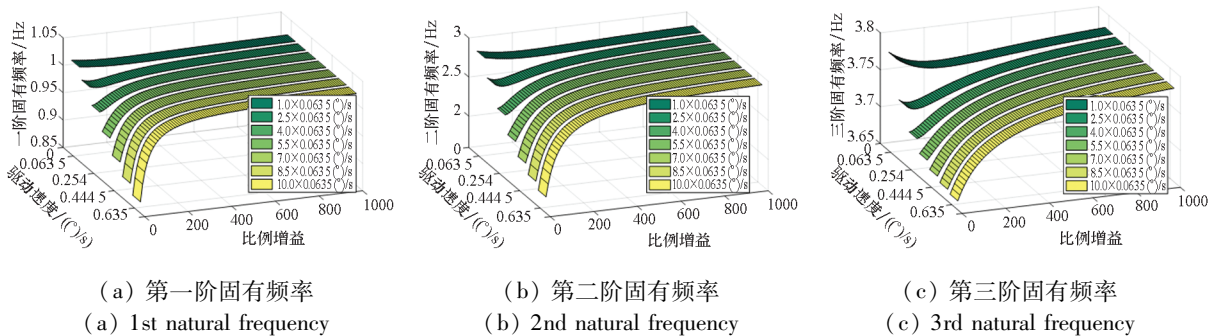


图 9 比例控制增益对系统固有频率的影响

Fig. 9 Relationship between the proportional gain and the natural frequency of SADS

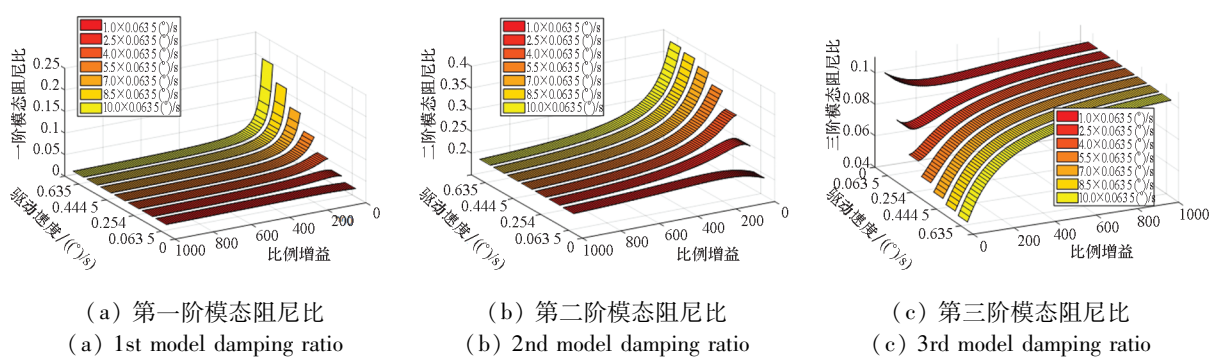


图 10 比例控制增益对系统模态阻尼的影响

Fig. 10 Relationship between the proportional gain and the model damping ratio of SADS

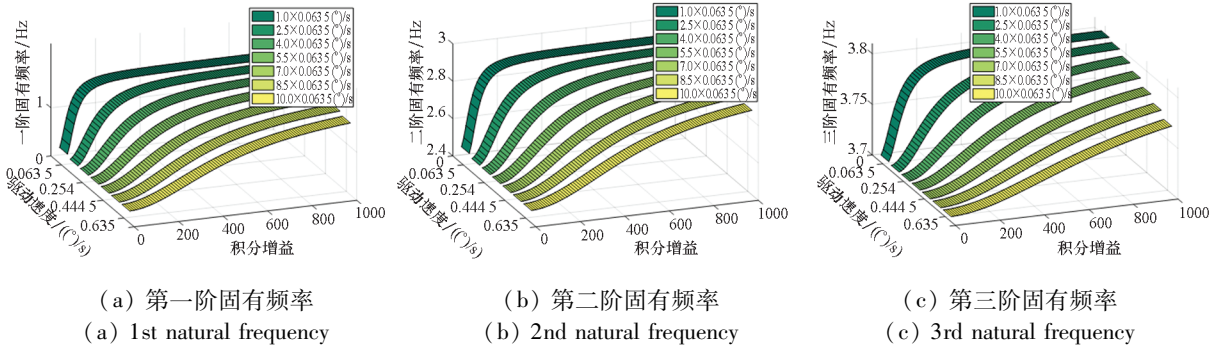


图 11 积分控制增益对系统固有频率的影响

Fig. 11 Relationship between the integral gain and the natural frequency of SADS

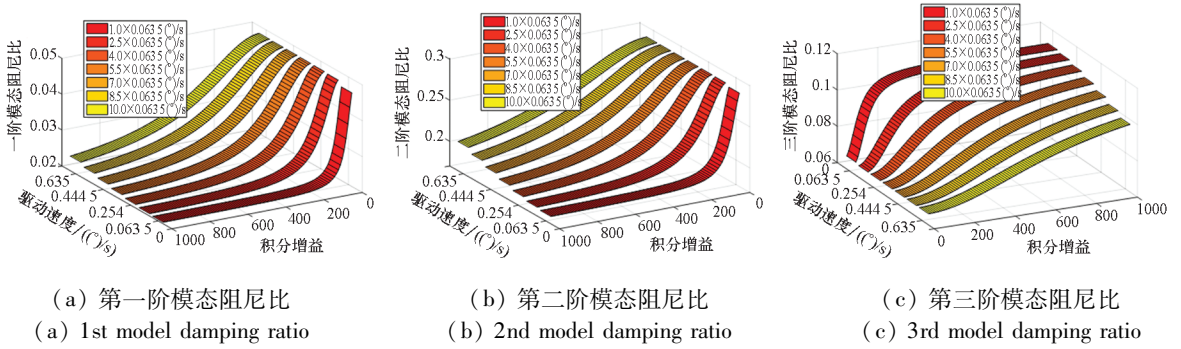


图 12 积分控制增益对系统模态阻尼的影响

Fig. 12 Relationship between the integral gain and the model damping ratio of SADS

### 4 结论

针对驱动控制对太阳帆板驱动系统动力学特性影响问题,构建了动力学特性等效分析模型,开展了模型正确性验证,分析了控制增益和驱动速度对驱动系统动力学特性的影响规律。主要结论如下:

1) 驱动控制不会改变驱动装置的等效阻尼,但会使驱动装置等效刚度减弱,且减弱程度与驱动速度成正比,与控制增益成反比。

2) 所构建的等效分析模型能够在不同驱动速度和控制增益情况下准确预示驱动系统动力学特性,分析结果与试验数据误差小于 10%。

3) 驱动系统固有频率与控制增益成正相关关系,与驱动速度成负相关关系。

本研究扩展了驱动系统动力学特性分析理论的工程适用范围,可以为具体工程型号的扰振特性分析以及振动控制方案设计提供理论支撑和技术参考。

### 参考文献 (References)

[1] Woodard S E. Upper atmosphere research satellite in-flight dynamics study: lessons learned[J]. Journal of Spacecraft

and Rockets, 2000, 37(6): 794-800.

[2] Zhu S Y, Lei Y J, Wu X F, et al. Effect of drive mechanisms on dynamic characteristics of spacecraft tracking-drive flexible systems[J]. Journal of Sound and Vibration, 2015, 343: 194-215.

[3] Gossain D M. Dynamics of stepping of the Hermes flexible solar array[J]. Canadian Aeronautics and Space Journal, 1979, 25(1): 50-60.

[4] Kumar R R, Cooper P A, Lim T W. Sensitivity of space station alpha joint robust controller to structural modal parameter variations[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 1992, 15(6): 1427-1433.

[5] Endoa T, Matsuno F, Kawasakia H. Force control and exponential stabilisation of one-link flexible arm[J]. International Journal of Control, 2014, 89(9): 1794-1807.

[6] Matsuno F, Hatayama M, Senda H, et al. Modeling and control of a flexible solar array paddle as a clamped-free-free rectangular plate[J]. Automatica, 1996, 32(1): 49-58.

[7] Na S, Tang G A, Chen L F. Vibration reduction of flexible solar array during orbital maneuver[J]. Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 2014, 86(2): 155-164.

[8] 朱仕尧, 谢燕, 雷勇军. 太阳能电池阵跟踪驱动过程扰振特性分析[J]. 国防科技大学学报, 2014, 36(1): 27-33.

ZHU Shiyao, XIE Yan, LEI Yongjun. Characteristic analysis of disturbance aroused by solar array tracking drive[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2014, 36(1): 27-33. (in Chinese)

[9] Low T S, Ding Y P, Lock K S. Analysis and control of torque



- ripples in inverter-fed permanent-magnet synchronous motors using the electromechanical spring-stiffness coefficient  $\partial T_e / \partial \theta$  [C] // IEE Proceedings of Electric Power Applications, 1994: 169 – 176.
- [10] Yang Y L, Cheng W, Wu S J, et al. Experiment and simulation of electromagnetic stiffness for stepper motor [J]. Applied Mechanics and Materials, 2010, 29/30/31/32: 1567 – 1573.
- [11] Middleton R H, Cantoni A. Electromagnetic damping for stepper motors with chopper drives [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1986, 33(3): 241 – 246.
- [12] Cabilic J, Fouriner J P. Design consideration on the solar array drive mechanism developed for SPOT [C] // Proceedings of the 2nd Space Tribology Workshop. ESTL, Risley, UK, 1980: 116 – 120.
- [13] Wood B, Sutter G, Hamzè N. The development of a low power solar array drive mechanism [C] // Proceedings of the 10th European Space Mechanisms and Tribology Symposium. Constance: European Space Agency, 2003: 1 – 5.
- [14] Lu W, Li H G, Li C. Bifurcations and chaos in a gear assembly with clearances for solar array drive assembly [J]. Journal of Vibroengineering, 2017, 19(4): 3030 – 3039.
- [15] Sattar M, Wei C. Analysis of coupled torsional disturbance behavior of micro-stepped solar array drives [J]. Journal of Sound and Vibration, 2019, 442: 572 – 597.
- [16] Chen J P, Cheng W, Li M. Modeling, measurement and simulation of the disturbance torque generated via solar array drive assembly [J]. Science China-Technological Sciences, 2018, 61(4): 587 – 603.
- [17] Li X, Cheng W, Han W. Disturbance modeling, simulation and testing of solar array drive assembly [J]. International Journal of Hybrid Information Technology, 2014, 7(2): 123 – 137.
- [18] 朱仕尧, 雷勇军, 武新峰, 等. 太阳能电池阵驱动系统动力学特征参数影响分析 [J]. 振动工程学报, 2015, 28(2): 183 – 189.  
ZHU Shiyao, LEI Yongjun, WU Xinfeng, et al. Influence analysis on dynamic characteristic parameters of solar array drive system [J]. Journal of Vibration Engineering, 2015, 28(2): 183 – 189. (in Chinese)
- [19] Zhou T, Guo H, Xu J Q, et al. Adaptive robust control with input shaping technology for solar array drive system [J]. Acta Astronautica, 2017, 140: 264 – 272.
- [20] Kenjo T, Sugawara A. Stepping motors and their microprocessor controls [M]. 2nd ed. Oxford: Oxford University Press, 2003.
- [21] 邹经湘, 于开平. 结构动力学 [M]. 3 版. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2015.  
ZOU Jingxiang, YU Kaiping. Structural dynamics [M]. 3rd ed. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2015. (in Chinese)