doi:10.11887/j.cn.201401006 http://journal.nudt.edu.cn

太阳能电池阵跟踪驱动过程扰振特性分析 *

朱仕尧,谢 燕,雷勇军
(国防科技大学 航天科学与工程学院,湖南 长沙 410073)

摘 要:太阳能电池阵对日跟踪驱动过程所产生的扰动是限制高精度航天器技术指标提高的主要因素之一。为获取驱动扰动的规律性特征,本文将太阳能电池阵及其驱动装置考虑为相互耦合的整体系统,从主要驱动环节出发建立其机电一体化扰振分析模型和Simulink动力学仿真模块,通过试验算例验证模型正确性,并分析了电池阵刚柔耦合和质心偏置等因素对扰振特性的影响。结果表明:转速波动将激起电池阵低阶扭振模态,扰动频谱具有步进电动机驱动和柔性结构振动的频率特性,但扭振扰动对刚体运动规律影响很小;质心偏置会引起电池阵平动与转动耦合的空间振动,激扰面外弯曲振型,改变扰振频率分布和放大扰振分量幅值。

关键词:太阳能电池阵;跟踪驱动;扰振特性;刚柔耦合;质心偏置
中图分类号:V414.1 **文献标志码**:A **文章编号**:1001-2486(2014)01-0027-07

Characteristic analysis of disturbance aroused by solar array tracking drive

ZHU Shiyao, XIE Yan, LEI Yongjun
(College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The disturbance, aroused by sun-tracking drive of solar array, has become one of the major barriers for improving the performance of high-precision spacecraft. With the aim to obtain the regular characteristics of this disturbance, the solar array and the drive assembly were considered as a couping system and an electromechanical integration model and a dynamic simulation program are presented based on the major aspects of main driving steps and the Simulink software platform.. The correctness was verified by comparing the experiment results, and the effects of solar array rigid-flexible coupling and the centroid bias to disturbance characteristics were analyzed. The results indicate that the rotation speed fluctuation can activate low order torsion modes of solar array, and disturbance spectrums include both frequency characteristics of motor driving and structure vibration, but torsion vibration has little effect on rotation angle. The centroid bias of solar array can motivate translational-rotational coupling vibration, activate out-of-plane bending modes, change the distribution of disturbance spectrum, and increase the amplitude of disturbance.

Key words: solar array; tracking drive; disturbance characteristic; rigid-flexible coupling; centroid bias

随着对航天器性能要求的不断提高,航天器微振动已成为现阶段制约高精度航天器指向精度、成像质量和服役年限等关键技术指标提升的重要因素。然而为保证电池阵在全轨道周期内获得最大受晒面积,太阳能电池阵驱动装置(Solar Array Drive Assembly,SADA;电路系统中又称为轴承和功率传输装置,Bearing And Power Transfer Assembly,BAPTA)需持续驱动电池阵使其阵面垂直于太阳光直射方向。此工作过程中电池阵柔性振动扰动和电机驱动反作用力同时作用在航天器本体结构,并且具有低频密频结构特性的电池阵容易与有效载荷和航天器整体发生动力耦合,从而影响高精度航天器部件及整体的动力学环境。

曾有多颗卫星因此出现在轨故障:(1)1991年7月发射的美国"高层大气研究卫星"(UARS)微波临边测试仪与SADA之间存在动力耦合:当SADA意外停转后,微波临边测试仪测试结果也会随之减小[1-2];(2)2006年1月发射的日本"先进陆地观测卫星"(ALOS),当SADA驱动指令悬挂后,卫星姿态、姿态角速度、姿态稳定度以及电池阵面内和面外振动加速度幅值都至少降低了一个量级[3];(3)我国某在轨卫星曾发生过微波成像仪的扫描机构转动与电池阵模态耦合:电池阵转动到特定位置时,微波成像仪扰动引发卫星姿态角剧烈抖动。

由于这种扰动具有微小性(振幅一般为微米

* **收稿日期**:2013-05-24
基金项目:国家自然科学基金资助项目(11272348);国家自然科学基金青年科学基金资助项目(11202233)
作者简介:朱仕尧(1987—),男,辽宁葫芦岛人,博士研究生,E-mail:zhushiyao@nudt.edu.cn;
雷勇军(通信作者),男,教授,博士,博士生导师,E-mail:leiyj108@nudt.edu.cn

量级)、固有性、难控性和敏感性等特点,使得其力学环境问题变得极为复杂和特殊,建模、分析与抑制难度都很大。国内外许多航天机电驱动装置研究机构都对电池阵驱动扰振问题开展研究,如美国 MOOG 公司[4]、法国 SEP 和 CNES 公司[5]、日本 JXAX[3]、印度 ISRO[6]、巴西 INPE[7]以及中国的航天科技集团[8-9]。这些研究多从机构动力学出发,采用若干转动自由度描述系统动力学特性,重点考虑步进电动机磁场分布或轴承摩擦等非线性因素,较少关注电池阵多维度柔性振动和电机驱动控制的影响,特别是驱动过程中柔性负载刚体运动与柔性振动之间的相互耦合、质心偏置导致的平动方向与扭转方向的振动耦合等因素对电池阵驱动过程的扰振特性的影响等问题。本文以含驱动装置的部件级太阳能电池阵为研究对象(如图 1 所示),重点研究其建模方法,并针对以上问题分析,揭示其对电池阵驱动过程扰振特性的影响规律。

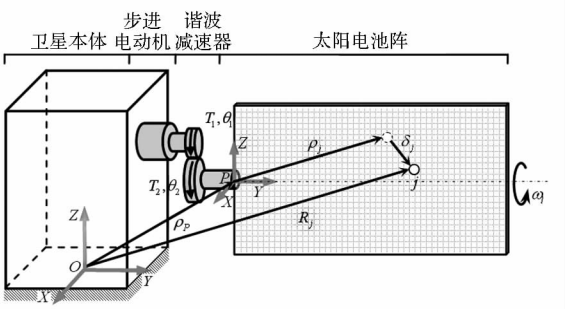


图 1　电池阵结构示意图

Fig. 1　Schematic diagram of solar array

1　电池阵及驱动装置建模

1.1　坐标系与建模假设

如图 1 所示在星箭分离界面中心建立惯性坐标系 $O_eX_eY_eZ_e$,在电池阵与 SADA 安装界面中心建立随电池阵转动的运动坐标系 $O_bX_bY_bZ_b$。为简化次要因素,以研究部件级电池阵跟踪驱动过程的扰振特性,引入以下假设:

(1)卫星本体为刚体,并约束其刚体位移;

(2)不考虑驱动控制器 PWM 工作环节;

(3)不考虑步进电动机绕组磁滞、磁饱、互感效应以及高次谐波力矩等因素;

(4)忽略谐波齿轮传动损失。

1.2　电池阵柔性体动力学建模

太阳能电池阵有限元离散后,第 j 个节点的矢径和速度可以表示为

$$\underset{\sim}{R}_j = \underset{\sim}{\rho}_P + \underset{\sim}{\rho}_j + \underset{\sim}{\delta}_j = \underset{\sim}{\rho}_P + \underset{\sim}{\rho}_j + \underset{\sim}{\Phi}_j \underset{\sim}{\eta}_j$$

$$\underset{\sim}{v}_j = \tilde{\underset{\sim}{\rho}}_j \underset{\sim}{\omega}_l - \tilde{\underset{\sim}{\omega}}_l \underset{\sim}{\delta}_j + \dot{\underset{\sim}{\delta}}_j = \tilde{\underset{\sim}{\rho}}_j \underset{\sim}{\omega}_l - \tilde{\underset{\sim}{\omega}}_l \underset{\sim}{\Phi}_j \underset{\sim}{\eta}_j + \underset{\sim}{\Phi}_j \dot{\underset{\sim}{\eta}}_j \quad (1)$$

式中:用 $\underset{\sim}{X}$ 和 $\tilde{\underset{\sim}{X}}$ 分别表示变量 X 的矩阵形式及其斜方阵;$\underset{\sim}{R}_j$ 和 $\underset{\sim}{v}_j$ 为节点 j 相对惯性系的矢径和速度,$\underset{\sim}{\rho}_P$ 为随体系原点到惯性系原点的矢径,$\underset{\sim}{\rho}_j$ 和 $\underset{\sim}{\delta}_j$ 为随体系内节点 j 变形前相对原点的矢径和因电池阵柔性变形而产生的矢径;$\underset{\sim}{\omega}_l$ 和 $\underset{\sim}{\eta}$ 为电池阵转速和模态坐标,且柔性变形矢径 $\underset{\sim}{\delta}_j = \underset{\sim}{\Phi}_j \underset{\sim}{\eta}_j$;$\underset{\sim}{\Phi} = [\underset{\sim}{\varphi}_1 \quad \underset{\sim}{\varphi}_2 \quad \cdots \quad \underset{\sim}{\varphi}_s]$ 为太阳能电池阵的模态振型矩阵;s 为模态截取阶数,具体选择固支边界条件下电池阵的前 8 阶模态。

将式(1)代入电池阵动能表达式并整理得到

$$\begin{aligned} T &= \frac{1}{2}\sum_{j=1}^{N} \underset{\sim}{v}_j^{\mathrm{T}} \underset{\sim}{v}_j m_j = \frac{1}{2}(\underset{\sim}{\omega}_l^{\mathrm{T}} \underset{\sim}{J} \underset{\sim}{\omega}_l - \underset{\sim}{\eta}^{\mathrm{T}} \underset{\sim}{F}_{\omega\omega} \underset{\sim}{\eta} + \dot{\underset{\sim}{\eta}}^{\mathrm{T}} \dot{\underset{\sim}{\eta}}) \\ &+ \frac{1}{2}(\underset{\sim}{\eta}^{\mathrm{T}} \underset{\sim}{H}_{\omega}^{\mathrm{T}} \underset{\sim}{\omega}_l + \underset{\sim}{\omega}_l^{\mathrm{T}} \underset{\sim}{H}_{\omega} \underset{\sim}{\eta} + \dot{\underset{\sim}{\eta}} \underset{\sim}{H}^{\mathrm{T}} \underset{\sim}{\omega}_l + \underset{\sim}{\omega}_l^{\mathrm{T}} \underset{\sim}{H} \dot{\underset{\sim}{\eta}} \\ &+ \dot{\underset{\sim}{\eta}}^{\mathrm{T}} \underset{\sim}{F}_{\omega} \underset{\sim}{\eta} + \underset{\sim}{\eta}^{\mathrm{T}} \underset{\sim}{F}_{\omega} \dot{\underset{\sim}{\eta}}) \end{aligned} \quad (2)$$

式中:$\underset{\sim}{J} = \sum_{j=1}^{N} \tilde{\underset{\sim}{\rho}}_j^{\mathrm{T}} \tilde{\underset{\sim}{\rho}}_j m_j$ 为变型前电池阵的惯性矩;$\underset{\sim}{H} = \sum_{j=1}^{N} \tilde{\underset{\sim}{\rho}}_j \underset{\sim}{\Phi}_j m_j$ 为电池阵的模态角动量;其他参数分别为 $\underset{\sim}{H}_{\omega} = \sum_{j=1}^{N} \tilde{\underset{\sim}{\rho}}_j \tilde{\underset{\sim}{\omega}}_l \underset{\sim}{\Phi}_j m_j$, $\underset{\sim}{F}_{\omega} = \sum_{j=1}^{N} \underset{\sim}{\Phi}_j^{\mathrm{T}} \tilde{\underset{\sim}{\omega}}_l \underset{\sim}{\Phi}_j m_j$, $\underset{\sim}{F}_{\omega\omega} = \sum_{j=1}^{N} \underset{\sim}{\Phi}_j^{\mathrm{T}} \tilde{\underset{\sim}{\omega}} \tilde{\underset{\sim}{\omega}}_l \underset{\sim}{\Phi}_j m_j$。

电池阵弹性势能 V 和损耗能量 C 为

$$\begin{cases} V = \dfrac{1}{2} \underset{\sim}{\eta}^{\mathrm{T}} \underset{\sim}{\Lambda} \underset{\sim}{\eta} \\ C = \dfrac{1}{2} \dot{\underset{\sim}{\eta}}^{\mathrm{T}} \underset{\sim}{D} \dot{\underset{\sim}{\eta}} \end{cases} \quad (3)$$

式中:$\underset{\sim}{\Lambda} = \mathrm{diag}(\Omega_1^2, \cdots, \Omega_i^2, \cdots, \Omega_n^2)$, $\underset{\sim}{D} = \mathrm{diag}(2\xi_1\Omega_1, \cdots, 2\xi_i\Omega_i, \cdots, 2\xi_n\Omega_n)$, Ω_i 和 ξ_i 为电池阵第 i 阶固有频率和模态阻尼。

由式(2)和式(3)构建 Lagrange 函数 $L = T - V$,并代入 Lagrange 方程整理得到电池阵动力学方程

$$\begin{aligned} &\begin{bmatrix} \underset{\sim}{J} & \underset{\sim}{H} \\ \underset{\sim}{H}^{\mathrm{T}} & \underset{\sim}{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\underset{\sim}{\omega}}_l \\ \ddot{\underset{\sim}{\eta}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \underset{\sim}{D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underset{\sim}{\omega}_l \\ \dot{\underset{\sim}{\eta}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \underset{\sim}{\Lambda} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underset{\sim}{\theta}_l \\ \underset{\sim}{\eta} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \underset{\sim}{T}_L \\ \underset{\sim}{0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{\underset{\sim}{H}}_{\omega} \underset{\sim}{\eta} + 2\underset{\sim}{H}_{\omega} \dot{\underset{\sim}{\eta}} + \underset{\sim}{J}_{\omega} \underset{\sim}{\omega} + \underset{\sim}{H}_{\omega\omega} \underset{\sim}{\eta} \\ \dot{\underset{\sim}{F}}_{\omega} \underset{\sim}{\eta} + 2\underset{\sim}{F}_{\omega} \dot{\underset{\sim}{\eta}} - \underset{\sim}{H}_{\omega}^{\mathrm{T}} \underset{\sim}{\omega} + \underset{\sim}{F}_{\omega\omega} \underset{\sim}{\eta} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4)$$

式中:$\underset{\sim}{T}_L = [0 \quad T_l \quad 0]^{\mathrm{T}}$,$T_l$ 为电池阵驱动力矩,$\underset{\sim}{\theta}_l$ 为电池阵转角,$\underset{\sim}{J}_{\omega} = \sum_{j=1}^{N} \tilde{\underset{\sim}{\rho}}_j^{\mathrm{T}} \tilde{\underset{\sim}{\omega}}_l \tilde{\underset{\sim}{\rho}}_j m_j$, $\dot{\underset{\sim}{H}}_{\omega} = \sum_{j=1}^{N} \tilde{\underset{\sim}{\rho}}_j \dot{\tilde{\underset{\sim}{\omega}}}_l \underset{\sim}{\Phi}_j m_j$, $\underset{\sim}{H}_{\omega\omega} = \sum_{j=1}^{N} \tilde{\underset{\sim}{\rho}}_j \tilde{\underset{\sim}{\omega}}_l \tilde{\underset{\sim}{\omega}}_l \underset{\sim}{\Phi}_j m_j$, $\dot{\underset{\sim}{F}}_{\omega} = \sum_{j=1}^{N} \underset{\sim}{\Phi}_j^{\mathrm{T}} \dot{\tilde{\underset{\sim}{\omega}}}_l \underset{\sim}{\Phi}_j m_j$。

式(4)左侧三项的参数矩阵分别代表整体广义质量矩阵、广义阻尼矩阵和广义刚度矩阵,右侧

两项分别为广义主动力向量和结构耦合项。由于电池阵跟踪驱动过程中转速、弹性变形均为小量,因此式(4)中结构耦合项为二阶小量,可忽略。至此建立驱动力矩与电池阵刚体转动规律和模态坐标之间的关系。

1.3　驱动装置机械系统建模

SADA 具有典型的机电一体化系统特点,其包括四个主要驱动环节:驱动控制器、步进电动机、谐波减速器和电动机负载(如图 2 所示)。驱动控制器的功能是将时钟脉冲信号转换为标准绕组电流,并通过绕组电流反馈控制得到步进电动机驱动电压。步进电动机在驱动电压作用下,利用电磁效应产生电机驱动力矩。谐波减速装置对步进电动机输出驱动力矩进行转换得到设计幅值的驱动力矩和转速。电动机负载包含电池阵转动驱动和装置摩擦两部分。

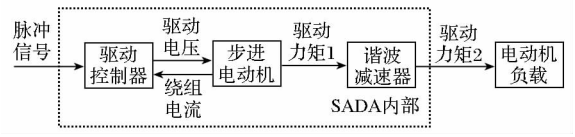


图 2　SADA 驱动环节

Fig. 2　Main driving steps of SADA

1.3.1　驱动控制器

对于采用双四拍正余弦细分驱动策略的两相混合式步进电动机,其驱动控制器需要将时钟脉冲信号转换为具有正余弦变化特征的两相绕组基准电流。但由于电流细分数限制,实际基准电流值以脉冲形式逼近理论基准电流值。正向驱动时,实际基准电流为

$$\begin{cases} \bar{i}_A = I_m \cos[2\pi \cdot \mathrm{round}(N_m\theta_m/\Delta\theta)/N_s)] \\ \bar{i}_B = I_m \sin[2\pi \cdot \mathrm{round}(N_m\theta_m/\Delta\theta)/N_s)] \end{cases} \tag{5}$$

式中:$\bar{i}_A$ 和 $\bar{i}_B$ 分别为 A 相和 B 相绕组中的实际基准电流值,I_m 为电机绕组额定电流,N_m 为电机齿数,θ_m 为电动机转角,$\Delta\theta$ 为转角细分步距,round(·) 为取整函数,N_s 为电流细分数。

同时驱动控制器还具有绕组电流 PID 控制环节,可以根据两相绕组中实际输入电流 i_A 和 i_B 与基准电流 $\bar{i}_A$ 和 $\bar{i}_B$ 的差值控制两相绕组的输入电压 u_A 和 u_A。电流 PID 控制方程为

$$\begin{cases} u_A = K_p(\bar{i}_A - i_A) + K_I\int(\bar{i}_A - i_A)\mathrm{d}t + K_D\dfrac{\mathrm{d}(\bar{i}_A - i_A)}{\mathrm{d}t} \\ u_B = K_p(\bar{i}_B - i_B) + K_I\int(\bar{i}_B - i_B)\mathrm{d}t + K_D\dfrac{\mathrm{d}(\bar{i}_B - i_B)}{\mathrm{d}t} \end{cases} \tag{6}$$

式中:K_P、K_I 和 K_D 为电流环 P(比例)、I(积分)和 D(微分)环节的调节增益。

1.3.2　步进电动机

步进电动机电压平衡方程描述驱动电压与绕组电流之间的关系,其中考虑电机绕组电阻、自感效应以及齿槽分布的影响,可表示为

$$\begin{cases} i_A = \dfrac{1}{R}\left[L\dfrac{\mathrm{d}i_A}{\mathrm{d}t} - u_A + K_m\omega_m\sin(N_m\theta_m)\right] \\ i_B = \dfrac{1}{R}\left[L\dfrac{\mathrm{d}i_B}{\mathrm{d}t} - u_B + K_m\omega_m\cos(N_m\theta_m)\right] \end{cases} \tag{7}$$

式中:R 为绕组电阻;L 为绕组自感系数;ω_m 为电机输出轴转速;K_m 为电机电磁力矩系数。

混合式步进电动机电磁力矩可表示为

$$T_e = -K_m i_A\sin(N_m\theta_m) + K_m i_B\cos(N_m\theta_m) - T_k\sin(4N_m\theta_m) \tag{8}$$

式中:T_e 为电机力矩;T_k 为齿槽力矩幅值。等式右端前两项分别为 A 相和 B 相绕组电流与转子永磁体产生的谐波电磁力矩,第 3 项为齿槽定位力矩。

1.3.3　谐波减速器

对于装配谐波减速器的间接驱动型 SADA,当谐波减速器采用“波发生器驱动—柔轮固定—刚轮转动”的工作模式时的传动比为

$$N_h = \frac{Z_g}{Z_g - Z_f} = \frac{\theta_m}{\theta_l} = \frac{T_f + T_l}{T_e - J_m\ddot{\theta}_m} \tag{9}$$

式中:N_h 为谐波减速器传动比(当传动比参数取为 1 时适用于直接驱动型 SADA),Z_g 和 Z_f 分别为刚轮和柔轮齿数,J_m 为电机转子转动惯量;T_f 为装置摩擦力矩。整理得到电池阵驱动力矩

$$T_l = N_h T_e - N_h J_m\ddot{\theta}_m - T_f \tag{10}$$

1.3.4　电动机负载

电动机输出的驱动力矩一部分作为驱动太阳能电池阵定向转动的负载力矩 T_l(已在 1.1 节中讨论),另一部分作为克服机械系统摩擦影响的摩擦力矩 T_f。SADA 内部诸多环节中存在的摩擦关系(如信号导电滑环、功率导电滑环和轴承滑动等)需要在模型中加以考虑。由于 SADA 在低转速条件下运转,除了库仑摩擦和粘性摩擦外,还要考虑低速 Stribeck 摩擦效应。本文采用较适合模拟低转速机械摩擦影响的静态 Stribeck 模型

$$T_f = [T_c + (T_s - T_c)\mathrm{e}^{-(\omega_l/\omega_s)}]\mathrm{sgn}(\omega_l) + \sigma_0\omega_l \tag{11}$$

式中:T_c 为库伦摩擦力矩;T_s 为最大静摩擦力矩;ω_s 为临界 Stribeck 速度;σ_0 为粘性摩擦阻尼系数;sgn(·) 为符号函数。

联立式(4)~(11)得到含驱动装置的部件级太阳能电池阵扰振分析模型。

1.4 仿真实现与算例验证

基于 Simulink 软件分别构建四个主要驱动环节子模块,并组集为整体仿真模块,如图 3 所示。利用所建仿真模块复现文献[8]中的试验工况。试验中采用刚性梁替换电池阵,通过激光测振仪测量梁上某一点的速度,并对转速做数值拟合,从而通过转矩平衡方程间接求得电池阵负载驱动力矩。

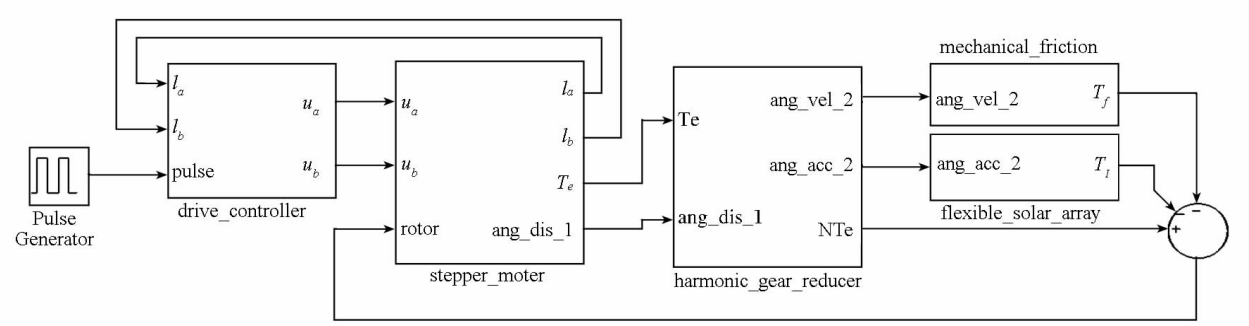


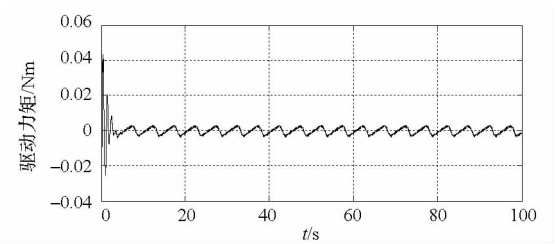
图 3 Simulink 动力学仿真模块

Fig. 3 Dynamic simulation program based on Simulink

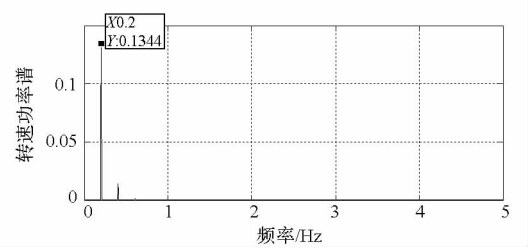
表 1 试验和仿真结果

Tab. 1 Experiment and simulation results

电池阵转速(°/s)	驱动主频率(Hz)			驱动力矩幅值(Nm)		
	文献测试	模型计算	误差	文献测试	模型计算	误差
0.04	0.134	0.137	2.24%	1.772	1.671	-5.72%
0.05	0.165	0.168	1.82%	2.325	2.629	13.06%
0.06	0.201	0.200	-0.70%	3.426	3.966	15.76%



(a)驱动力矩



(b)转速功率谱

图 4 试验工况下的仿真结果

Fig. 4 Simulation results on experiment case

由表 1 数据对比可知:在 0.04°/s ~0.06°/s 转速工况下,试验测量结果和本文所建模型计算结果在驱动力矩峰值和驱动频率方面基本吻合,相对误差小于 20%。图 4 为 0.06°/s 转速工况下的负载驱动力矩时间历程和转速频率分布,其显示出的驱动特征与文献测试结果相符:起动阶段负载驱动力矩幅值相对较大,并随时间增加而逐渐衰减至稳定幅值;转速主要频率成分,分布在 0.2Hz 附近。以上分析说明本文所建模型能够较为准确地模拟电池阵常速转动工况下的驱动特征。

2 驱动过程扰振特性分析

以某高精度卫星为例,研究电池阵刚柔耦合和质心偏置等因素对指向驱动过程扰振特性的影响规律。以下分析均基于惯性坐标 $O_eX_eY_eZ_e$。

2.1 电池阵刚柔耦合影响分析

SADA 驱动电池阵相对航天器发生大角度刚体旋转运动时,运转速率波动还会引起电池阵自身柔性振动,同时电池阵柔性振动扰动又影响其刚体转动规律。这一刚体运动与柔性振动的动力耦合会在一定程度上影响驱动过程扰振幅值和频率分布。

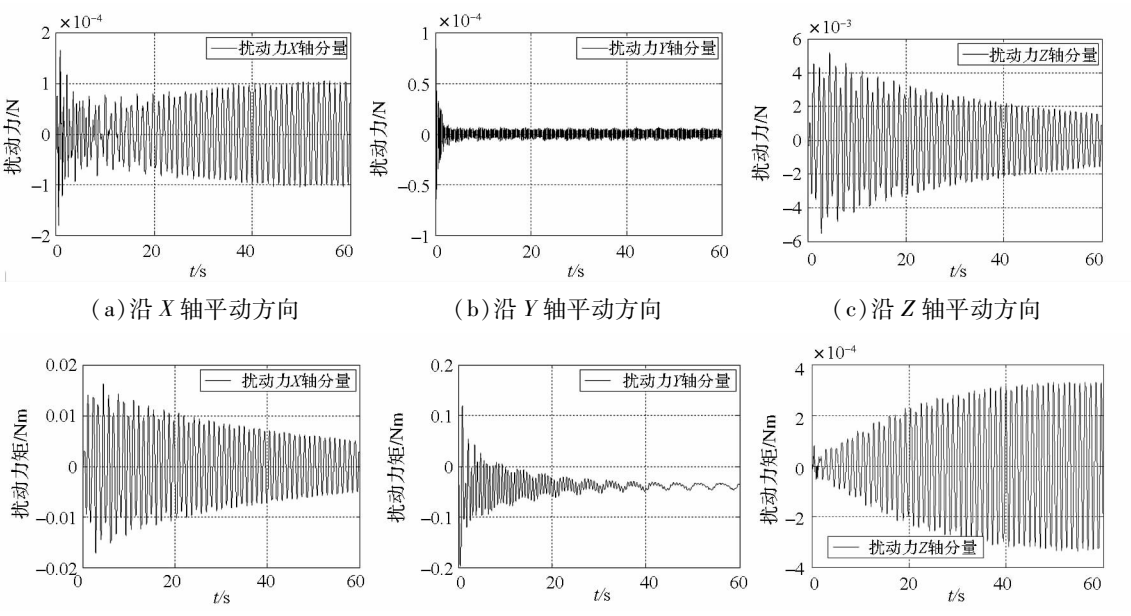
首先了解电池阵刚体驱动特性和柔性结构振动特性,详见表 2。在正常跟踪补偿工况(平均转速为 0.063°/s)下,步进电动机主要特征频率[10]包括转速波动频率和驱动电机频率,分别为 0.22Hz 和 0.82Hz。

表 2　电池阵结构动力学特性参数

Tab. 2　Structure dynamic parameters of solar array

阶数	固有频率/Hz	振型描述
1	0.39	面外一阶弯曲
2	0.92	面内一阶弯曲
3	1.67	绕 Y 轴一阶扭转
4	2.22	面外二阶弯曲

扰动力/力矩六个分量的时间历程曲线如图 5 所示。由图中数据可知:扰动力/力矩主要分布在绕 Y 轴转动方向(即驱动方向)上,其他维度上的分量幅值低 1 到 3 个数量级,并呈现往复震荡变化。然而驱动方向上扰动力矩分量并非在幅值为零位置上下波动。这是因为 SADA 瞬时转速是围绕平均转速上下波动变化,因此,由式(11)可知摩擦力矩中包含由平均转速引起的常值分量,并且其频谱中具有零频成分(如图 6 所示)。这部分扰动分量只会引起卫星姿态运动,不会激起卫星结构振动。



(a)沿 X 轴平动方向　(b)沿 Y 轴平动方向　(c)沿 Z 轴平动方向

(d)绕 X 轴转动方向　(e)绕 Y 轴转动方向　(f)绕 Z 轴转动方向

图 5　扰动力/力矩时间历程曲线

Fig. 5　Time history curves of disturbance on rigid-flexible coupling condition

进一步由扰动力矩的频率特性曲线分析发现:除所列举的零频和驱动频率特性外,在电池阵一阶扭转振动频率(1.67Hz,见表 2)附近同样具有一个明显峰值。说明驱动运动能够激起同维度上的低阶振动模态,而该维度高阶振动和其他维度振动对 SADA 扰振频率分布影响很小。

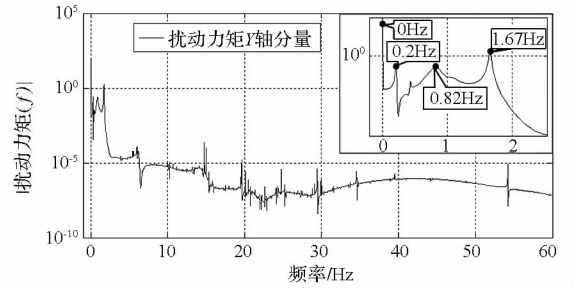


图 6　扰动力矩频谱曲线

Fig. 6　Disturbance spectrum on rigid-flexible coupling condition

由图 7 中刚性和柔性负载工况的角位移曲线对比发现:弹性振动对电池阵驱动运动规律的影响很小。一方面是由于弹性振动幅值很小不足以明显改变运动规律;另一方面,步进电动机每次步进驱动的位移误差不累积,所以导致刚性和柔性负载条件下的电池阵角位移变化规律基本相同。

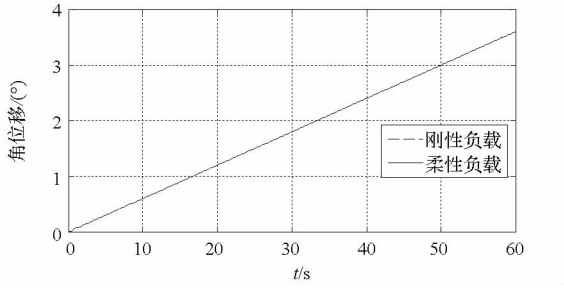


图 7　刚性和柔性负载工况下角位移时间历程

Fig. 7　rotation angle on rigid and flexible load condition

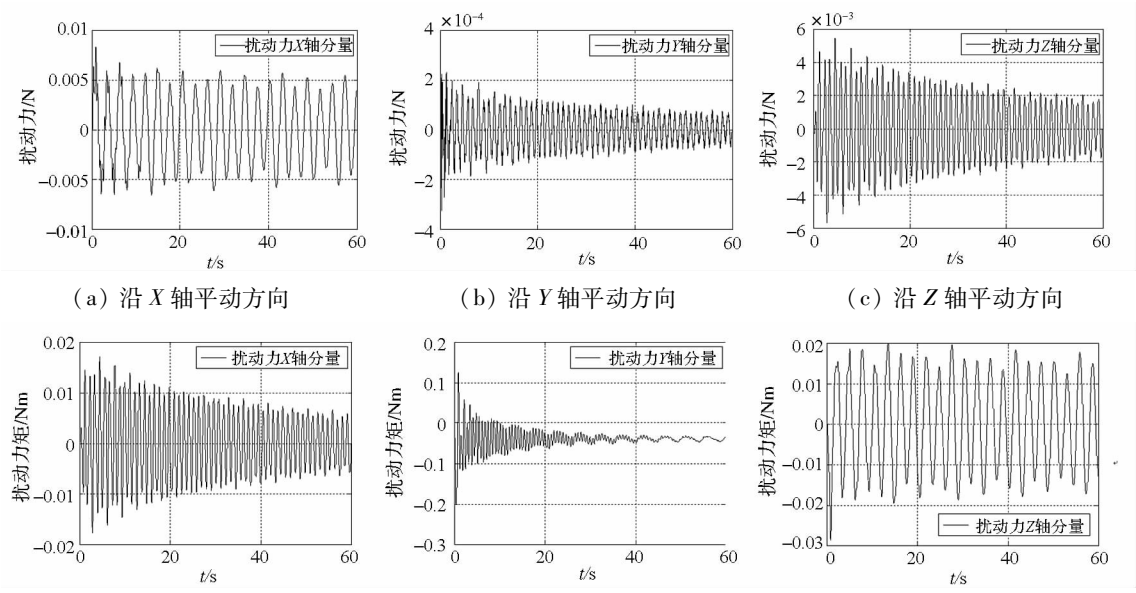
2.2　电池阵质心偏置影响分析

设计状态下的电池阵结构并非完全对称,但其质心位置基本位于转动轴线上。而实际制造和安装过程中会由于毛坯缺陷、加工误差、装配误差和布线方式等原因使电池阵质量分布与设计状态

产生差异,改变了电池阵的质心位置和转动惯量特性。

通过对比最大质心偏置工况(如图 8 所示)与无质心偏置工况(如图 5 所示)的扰动力/力矩分量时间历程曲线发现:质心偏置后,沿 X 轴平动和绕 Z 轴转动方向扰动幅值明显增大了 2 个数量级,其他四个维度上的扰动力/力矩幅值略有增大或减小。进一步对以上两个维度的扰动力/力矩分量频谱曲线(如图 9 所示)分析,发现其主要扰动频率都分布在 0.37Hz 附近,非常接近太阳能电池阵一阶面外弯曲振动固有频率(见表 2)。

驱动力矩激励方向与面外弯曲振动方向并不在同一维度上,是由于质心偏离转动轴线,使得作用在质心上的惯性力相对转动轴线产生附加力矩。附加力矩在电池阵面外振动方向具有分量,能够激起低阶面外振动模态,即形成了转动驱动与平动振动的耦合效应。从而使扰动力/力矩在沿 X 轴平动和绕 Z 轴转动方向上的振动扰动放大,并且低阶面外振动模态固有频率变为该维度上扰动力/力矩的主要频率成分。

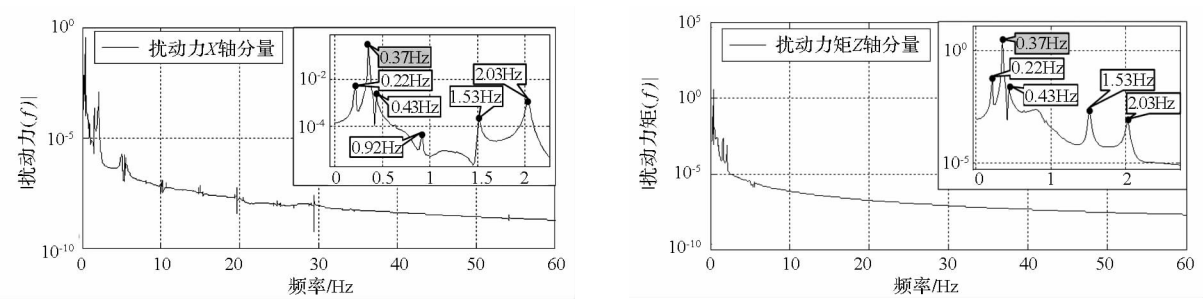


(a) 沿 X 轴平动方向 (b) 沿 Y 轴平动方向 (c) 沿 Z 轴平动方向

(d) 绕 X 轴转动方向 (e) 绕 Y 轴转动方向 (f) 绕 Z 轴转动方向

图 8 含质心偏置工况扰动力/力矩时间历程

Fig. 8 Time history curves of disturbance on centroid bias condition



(a) 沿 X 轴平动方向 (b) 绕 Z 轴转动方向

图 9 含质心偏置工况扰动力/力矩频谱曲线

Fig. 9 Disturbance spectrum on centroid bias condition

3 结论

(1)本文分别从驱动控制器、步进电动机、谐波减速器以及电动机负载等四个驱动环节出发建立了含驱动装置的部件级电池阵机电一体化扰振分析模型和 Simulink 动力学仿真模块,并通过试验算例验证模型正确性。

(2)扰动力/力矩主要分布在驱动运动方向,刚体运动会激起太阳能电池阵低阶扭振模态,并且频谱特性中具有步进电动机驱动和柔性结构振动频率特性;但是振动幅值和步进电动机结构特点决定了弹性振动对刚体运动的影响很小。

(3)太阳能电池阵质心偏离转动轴线后,作用在质心上的惯性力将对转动轴线产生附加力矩,导致不可忽略的平动与转动耦合的空间振动;部分维度上扰动力/力矩幅值会随质心偏置量增大而增大,并使主要激扰频率成分分布在面外弯曲模态固有频率位置。

参考文献(References)

[1] Woodard S E , Gell D A, Lay R R. Measured spacecraft dynamic effects on atmospheric science instruments [J]. Geoscience and Remote Sensing, 1998, 36(2):359 - 367.

[2] Woodard S E. Upper atmosphere research satellite in-flight dynamics study: lessons learned [J]. Journal of Spacecraft And Rockets, 2000, 37(6): 794 - 800.

[3] Iwata T, Maeda K, Hoshino H. Modeling and flight data analysis of spacecraft dynamic with a large solar array paddle [C]//Proceedings of the 20th International Symposium on Space Flight Dynamics, Annapolis, Maryland, USA, 2007.

[4] Rodger F,Son N. Development of the Solar Srray Deployment and Drive System for the XTE Spacecraft[R]. N95227284, NASA,1995.

[5] Etzler C C. Dynamic analysis of a BAPTA solar generator system[R]. N84 - 8454,NASA, 1984.

[6] Rajagopal K R, Krishnaswamy M, Singh B, et al. An improved high-resolution hybrid stepper motor for solar-array drive of indian remote-sensing satellite[J]. IEEE Transaction on Industry Applications, 1997, 33(4): 906 - 913.

[7] Ricci M C, Varotto S E C. Development of a BAPTA mechanism for small satellites[C]//Proceedings of the 15th Brazilian Confierence of Mechanical Engineering. Sao Paulo, 1999.

[8] 斯祝华, 刘一武,黎康. 太阳帆板驱动装置建模及其驱动控制研究[J]. 空间控制技术与应用, 2010, 36(2): 13 - 19.
SI Zhuhua, LIU Yiwu, LI Kang. Research on modeling and driver design of solar array drive assembly [J]. Aerospace Control and Application, 2010, 36(2): 13 - 19. (in Chinese)

[9] 赵真, 肖余之, 杜三虎, 等. 太阳电池阵大范围运动反作用力矩求解方法研究[J]. 振动与冲击, 2010, 29(7): 116 - 120,240.
ZHAO Zhen, XIAO Yuzhi, DU Sanhu, et al. Reaction moment of a flexible solar cell array in large overall motions [J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(7): 116 - 120, 240. (in Chinese)

[10] 刘宝廷,程树康. 步进电动机及其驱动控制系统[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1997.
LIU Baoting, CHENG Shukang. Stepper Motor and Drive Control System[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 1997. (in Chinese)