第20卷 第1期 空 间 科 学 学 报 Vol.20, No.1
2000 年 1月 CHINESE JOURNAL OF SPACE SCIENCE Jan., 2000

卫星太阳电池阵在板展开阶段的撞击特性研究 *

刘锦阳 洪嘉振
(上海交通大学工程力学系 200030)

摘 要

研究了卫星太阳电池阵在板展开阶段的撞击特性，导出了撞击阶段柔性多体系统的动力学方程，介绍了撞击力的计算方法．计算了太阳电池阵在撞击阶段的撞击力和一些特殊节点的加速度的变化规律．计算结果表明，各点的撞击力在不同的时刻达到峰值，说明柔性板在撞击时发生了扭转，此外还发现靠近撞击处的节点的加速度在撞击瞬时比其它节点大，通过冲击波的传播引起外侧板的边界上节点的加速度不断上下振动，可以解释外侧帆板在撞击后上下、左右摆动的现象．

关键词 卫星太阳电池阵－撞击力－扭转

1 引 言

太阳电池阵在板展开到位时，在板与板之间发生撞击锁定．为了解连接各板的材料可否承受撞击力的作用，有必要计算出各接触处撞击力的大小．

很多学者对柔性体的碰撞问题进行过研究． Khulief 和 Shabana[1] 用动量守恒定律研究了柔性体的碰撞,得出撞击以后系统的动力学响应.由于它描述的是物体运动状态的非连续性变化，无法计算出在撞击过程中撞击力随时间的变化规律． Lankarani 和 Nikravesh[2] 用 Hurtz 撞击法则计算撞击力．但这种方法只考虑了撞击引起的局部变形，未考虑到冲击波的传播． Wu 和 Haug[3] 将物体分为若干个子结构，用固定界面主模态和模态坐标，约束模态和模态坐标描述节点的变形．认为在撞击发生的瞬时只有撞击点所在的子结构受到冲击的影响，随后通过冲击波的传播也影响到其它子结构，计算了刚性小球和柔性杆的纵向撞击力．我们用子结构方法计算了空间伸展机构的撞击力 [4]，还对多点撞击的问题进行了研究 [5]．由于上述计算均采用绝对坐标建模的方法，对于由多个柔性体组成的卫星太阳电池阵，用增广法解代数-微分混合方程具有自由度太多的困难．

本文研究了太阳电池阵在板展开阶段的撞击特性，用单向递推组集的方法导出了以铰坐标表示的撞击阶段柔性多体系统的动力学方程，介绍了铰约束反力和撞击力的计算方法．计算了太阳电池阵在撞击阶段的撞击力和一些特殊节点的加速度的变化规律．计算结果表明， 4 个撞击点的撞击力在不同的时刻达到峰值，而位于板的对角线上的各撞击点的撞击力的峰值比较接近，出现的时间大致相同，说明柔性板在撞击时发生了扭转．通

* 国家自然科学基金重点项目资助
1999-02-08 收到原稿， 1999-11-29 收到修定稿

过计算还发现靠近撞击处的节点的加速度在撞击瞬时比其它节点大，通过冲击波的传播引起外侧板的边界上节点的加速度变大且不断上下振动，可以解释外侧帆板在撞击后上下、左右摆动的现象.

2 第一次板展开到位的撞击锁定

卫星太阳电池阵由卫星、连接块、摇臂架和 5 块帆板组成. 在帆板展开前，帆板在驱动力矩的作用下已相对摇臂架转过 55°，卫星也在惯性基 x_0 方向转过 13.14°，如图 1 所示. 各帆板之间在板的两端以铰链和扭簧相连接，还用爆炸螺栓连接，使其为一整体. 扭簧在安装时被预压紧.

当连接左板和主板的爆炸螺栓爆炸时，通过扭簧中的预紧力使左 1 板、左 2 板展开. 这时，动力学模型中有 6 个物体：卫星 B_1 、连接块 B_2 、摇臂架 B_3 、主板、右 1 板和右 2 板组成的 B_4 、左 1 板 B_5 、左 2 板 B_6. B_2 和 B_1 用固定铰 J_1 连接， B_3 和 B_2 用固定铰 J_2 连接， B_4 和 B_3 用固定铰 J_3 连接. B_4 与左 1 板之间用铰 J_4 和 J_5 连接，左 1 板与左 2 板之间用铰 J_6 和 J_7 连接，这些铰均为旋转铰，其中， J_5 、 J_7 为切割铰. 设卫星、连接块和摇臂架为刚体，各帆板为柔性体. 对 B_i $(i=1,6)$ 建立浮动坐标系 $x_i-y_i-z_i$，如图 1 所示.

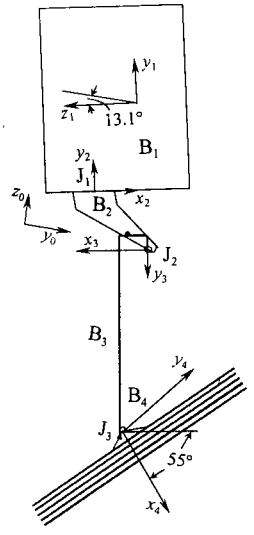


图 1 帆板展开前的整体示意图
Fig.1 The solar battery before the deployment of the plates

在左板展开到位 (如图 2 所示) 时，主板和左 1 板、左 1 和左 2 板之间的相对角速度为 0.579 rad/s，主板和左 1 板及左 1 板和左 2 板之间发生碰撞锁定，撞击点分别为 P_i, Q_i $(i=1,2,3,4)$.

若 B_i 是柔性体，取 N 个节点，并分为若干个子结构，则节点 k $(k=1,2,\cdots,N)$ 相对浮动坐标系的平移位移在浮动坐标系下的坐标式是 [4]

$$\boldsymbol{u}_i'^k = \boldsymbol{\Phi}_{it}'^k \boldsymbol{a}_i, \qquad i=1,2,\cdots,N. \tag{1}$$

其中， $\boldsymbol{\Phi}_{it}'^k$ 为平移模态阵， $\boldsymbol{a}_i$ 为模态坐标阵. 若 B_i 是刚体， $\boldsymbol{u}_i'^k=0$.

对任意物体 B_i，节点 k 的绝对位移在惯性坐标系下的坐标式是

$$\boldsymbol{r}_i^k = \boldsymbol{r}_i + \boldsymbol{A}_i\boldsymbol{\rho}_i'^k = \boldsymbol{r}_i + \boldsymbol{A}_i(\boldsymbol{\rho}_{i0}'^k + \boldsymbol{u}_i'^k) =$$

$$\boldsymbol{r}_i + \boldsymbol{A}_i(\boldsymbol{\rho}_{i0}'^k + \boldsymbol{\Phi}_{it}'^k \boldsymbol{a}).$$

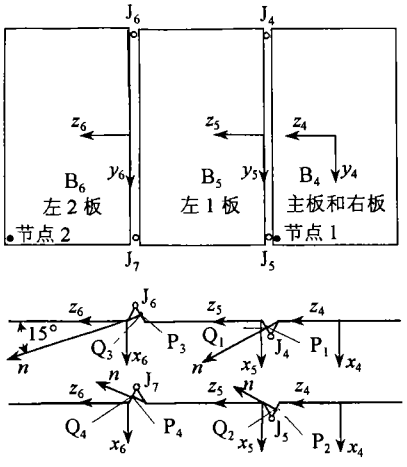


图 2　左板展开到位时的撞击锁定

Fig.2　Impact of the left plates at the end of the deployment

其中，$\boldsymbol{r}_i$ 是浮动坐标系原点在惯性坐标系下的坐标式，$\boldsymbol{A}_i$ 是浮动坐标系 $x_i - y_i - z_i$ 相对惯性基 $x_0 - y_0 - z_0$ 的方向余弦阵，$\boldsymbol{\rho}_{i0}'^k$, $\boldsymbol{\rho}_i'^k$ 分别是变形前和变形后节点 k 相对浮动坐标系的矢径的坐标式，则节点 k 的加速度在惯性坐标系下的坐标式是

$$\dot{\boldsymbol{r}}^k = \dot{\boldsymbol{r}} - \tilde{\boldsymbol{\rho}}^k\boldsymbol{\omega} + \boldsymbol{\Phi}^k\dot{\boldsymbol{a}},$$
$$\ddot{\boldsymbol{r}}^k = \ddot{\boldsymbol{r}} - \tilde{\boldsymbol{\rho}}^k\dot{\boldsymbol{\omega}} + \boldsymbol{\Phi}^k\ddot{\boldsymbol{a}} + 2\tilde{\boldsymbol{\omega}}\boldsymbol{\Phi}^k\dot{\boldsymbol{a}} + \tilde{\boldsymbol{\omega}}\tilde{\boldsymbol{\omega}}\boldsymbol{\rho}^k.$$

根据 Jourdain 速度变分原理，物体 B_i 的变分形式的动力学方程为

$$\delta\boldsymbol{v}_i^{\mathrm{T}}(-\boldsymbol{M}_i\dot{\boldsymbol{v}}_i + \boldsymbol{f}_i) = 0, \tag{2}$$

式中，$\boldsymbol{M}_i$, $\boldsymbol{f}_i$ 分别为单柔体绝对坐标形式的质量阵和力阵.

对于由 NB 个柔性体组成的树形柔性多体系统，其速度变分形式的动力学方程为

$$\sum_{i=1}^{NB}\delta\boldsymbol{v}_i^{\mathrm{T}}(-\boldsymbol{M}_i\dot{\boldsymbol{v}}_i + \boldsymbol{f}_i) + \delta W = 0, \tag{3}$$

其中 $\boldsymbol{M}_i$ 和 $\boldsymbol{f}_i$ 分别称为单柔性体绝对坐标形式的广义质量阵和力阵，δW 为多体系统内各物体之间相互作用的力元与非理想约束力的虚功率．$\boldsymbol{v}_i = [\dot{\boldsymbol{r}}_i^{\mathrm{T}}\ \boldsymbol{\omega}_i^{\mathrm{T}}\ \dot{\boldsymbol{a}}_i^{\mathrm{T}}]^{\mathrm{T}}$ 称为柔性体 B_i 的绝对速度坐标阵.

设系统的相对坐标形式的广义坐标阵 $\boldsymbol{y}$ 为 $\boldsymbol{y} = [\boldsymbol{y}_1^{\mathrm{T}}\ \cdots\ \boldsymbol{y}_N^{\mathrm{T}}]^{\mathrm{T}}$，其中 $\boldsymbol{y}_i = [\boldsymbol{q}_i^{\mathrm{T}}, \boldsymbol{a}_i^{\mathrm{T}}]^{\mathrm{T}}$，$\boldsymbol{q}_i$ 为联结铰相对坐标阵，根据相邻物体之间的运动学递推关系，由基物体到树形系统的末端物体进行单向递推，可得到 B_i 绝对速度和绝对加速度同相对坐标的一、二阶导数之间的关系为 *

$$\boldsymbol{v}_i = \boldsymbol{G}_{i0}\boldsymbol{v}_0 + \sum_{k:\mathrm{B}_k\leqslant\mathrm{B}_i}\boldsymbol{G}_{ik}\dot{\boldsymbol{y}}_k, \quad \dot{\boldsymbol{v}}_i = \boldsymbol{G}_{i0}\dot{\boldsymbol{v}}_0 + \sum_{k:\mathrm{B}_k\leqslant\mathrm{B}_i}\boldsymbol{G}_{ik}\ddot{\boldsymbol{y}}_k + \sum_{k:\mathrm{B}_k\leqslant\mathrm{B}_i}\boldsymbol{g}_{ik}. \tag{4}$$

* 于清. 柔性多体系统单向递推组集建模方法与通用仿真软件的实现. 上海交通大学博士学位论文, 1998. 16—40

其中，$\boldsymbol{G}_{ik}$ 和 $\boldsymbol{g}_{ik}$ 为递推关系矩阵，可根据递推关系得到. 以铰坐标表示的动力学方程为

$$\boldsymbol{Z}\ddot{\boldsymbol{y}} = \boldsymbol{z}.$$

设撞击点为 P_s 和 Q_s $(s = 1,2,3,4)$, 它们分别在 B_α 和 B_β 上. 在撞击阶段撞击点 P_s 和 Q_s 有相同的位移和速度，约束方程为

$$\boldsymbol{\Theta}^s(\mathrm{P}_s,\mathrm{Q}_s) = \boldsymbol{r}_\alpha^{\mathrm{P}_s} - \boldsymbol{r}_\beta^{\mathrm{Q}_s} = 0, \tag{5}$$

$$\dot{\boldsymbol{\Theta}}^s(\mathrm{P}_s,\mathrm{Q}_s) = \dot{\boldsymbol{r}}_\alpha^{\mathrm{P}_s} - \dot{\boldsymbol{r}}_\beta^{\mathrm{Q}_s} = \boldsymbol{Y}_\alpha^s\boldsymbol{v}_\alpha + \boldsymbol{Y}_\beta^s\boldsymbol{v}_\beta = 0. \tag{6}$$

其中

$$\boldsymbol{Y}_\alpha^s = (\boldsymbol{I}_3 \ -\tilde{\boldsymbol{\rho}}_\alpha^{\mathrm{P}} \ \boldsymbol{\Phi}_{\alpha t}^{\mathrm{P}}),\ \boldsymbol{Y}_\beta^s = (-\boldsymbol{I}_3 \ \tilde{\boldsymbol{\rho}}_\beta^{\mathrm{Q}} \ -\boldsymbol{\Phi}_{\beta t}^{\mathrm{Q}}).$$

对 (6) 式两边求导得

$$\boldsymbol{Y}_\alpha^s\dot{\boldsymbol{v}}_\alpha + \boldsymbol{Y}_\beta^s\dot{\boldsymbol{v}}_\beta = \boldsymbol{Y}_w^s \tag{7}$$

右项 $\boldsymbol{Y}_w$ 是两物体位形和速度的函数

$$\boldsymbol{Y}_w^s = -2\tilde{\boldsymbol{\omega}}_\alpha\boldsymbol{\Phi}_{\alpha t}^{\mathrm{P}}\dot{\boldsymbol{a}}_\alpha - \tilde{\boldsymbol{\omega}}_\alpha\tilde{\boldsymbol{\omega}}_\alpha\boldsymbol{\rho}_\alpha^{\mathrm{P}} + 2\tilde{\boldsymbol{\omega}}_\beta\boldsymbol{\Phi}_{\beta t}^{\mathrm{Q}}\dot{\boldsymbol{a}}_\beta + \tilde{\boldsymbol{\omega}}_\beta\tilde{\boldsymbol{\omega}}_\beta\boldsymbol{\rho}_\beta^{\mathrm{Q}}$$

利用递推关系 (4), 约束方程 (7) 可写为

$$\boldsymbol{\Theta}_y^s\ddot{\boldsymbol{y}} = \zeta^s, \quad s = 1,2,3,4. \tag{8}$$

其中，$\boldsymbol{\Theta}_y^s$ 为相对坐标表示的约束方程 (5) 的 Jacobi 阵. 设在 J_5, J_7 处切割铰 (旋转铰) 的约束方程为

$$\boldsymbol{\Theta}_y^r\ddot{\boldsymbol{y}} = \boldsymbol{\zeta}^r. \tag{9}$$

将 (8) 和 (9) 式合写成

$$\boldsymbol{\Theta}_y\ddot{\boldsymbol{y}} = \boldsymbol{\zeta}, \tag{10}$$

其中

$$\boldsymbol{\Theta}_y = [\boldsymbol{\Theta}_y^{1^{\mathrm{T}}} \ \cdots \ \boldsymbol{\Theta}_y^{4^{\mathrm{T}}} \ \boldsymbol{\Theta}_y^{r^{\mathrm{T}}}]^{\mathrm{T}}, \quad \boldsymbol{\zeta} = [\boldsymbol{\zeta}^{1^{\mathrm{T}}} \ \cdots \ \boldsymbol{\zeta}^{4^{\mathrm{T}}} \ \boldsymbol{\zeta}^{r^{\mathrm{T}}}]^{\mathrm{T}}.$$

引入 Lagrange 乘子阵 $\boldsymbol{\mu}$, 闭环系统速度变分形式的动力学方程为

$$\boldsymbol{Z}\ddot{\boldsymbol{y}} + \boldsymbol{\Theta}_y^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\mu} = \boldsymbol{z}. \tag{11}$$

由于乘子 $\boldsymbol{\mu}$ 也是未知的，上式须与约束方程 (10) 式联立才可求解.

设 λ 是绝对坐标建模方法得到的 Lagrange 乘子，根据 λ 和由相对坐标建模方法得到的 Lagrange 乘子 $\boldsymbol{\mu}$ 相同的关系 *, 可得到

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{F}_s \\ \boldsymbol{M}_s \end{bmatrix} = (\boldsymbol{Y}_\alpha^s\boldsymbol{C}_\alpha^{\mathrm{Q}_s})^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\lambda}^s, \quad \boldsymbol{C}_\alpha^{\mathrm{Q}_s} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{I}_3 & \tilde{\boldsymbol{\rho}}_\alpha^{\mathrm{Q}_s} \\ 0 & \boldsymbol{I}_3 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}. \tag{12}$$

* 于清. 柔性多体系统单向递推组集建模方法与通用仿真软件的实现. 上海交通大学博士学位论文,1998. 16—40

其中 $\boldsymbol{F}_s$, $\boldsymbol{M}_s$ 为作用于 Q_s 处约束力和力矩. Q_s 处法向撞击力为

$$F_{sn} = \boldsymbol{F}_s \cdot \boldsymbol{n} \tag{13}$$

当 $F_{sn} \leqslant 0$ 时，P_s 和 Q_s 脱离，在 (10) 式中去除 $\boldsymbol{\Theta}_y^s \ddot{\boldsymbol{y}} = \boldsymbol{\zeta}^s$; 当 $\|\boldsymbol{r}_{P_s} - \boldsymbol{r}_{Q_s}\| \leqslant \varepsilon$($\varepsilon$ 是很小的正数), 并且满足 $[\boldsymbol{r}_{P_s}(t) - \boldsymbol{r}_{Q_s}(t)] \cdot [\boldsymbol{r}_{P_s}(t+\Delta t) - \boldsymbol{r}_{Q_s}(t+\Delta t)] < 0$ 时，P_s 和 Q_s 重新接触，在 (10) 式中加入 $\boldsymbol{\Theta}_y^s \ddot{\boldsymbol{y}} = \boldsymbol{\zeta}^s$. 各物体的质量如表 1 所示.

表 1　各物体的质量

构件	B_1	B_2	B_3	B_4	B_5	B_6
质量 (kg)	2559	1.3994	8.4197	46.8253	15.6038	15.6038

如图 2 所示，P_s 和 Q_s ($s = 1,2,3,4$) 的撞击处的法向 n 和 z_4 的夹角为 15°. 设撞击发生的时刻为零时刻, 在撞击处 P_s 和 Q_s ($s = 1,2,3,4$) 的法向撞击力用 F_{ns} ($s = 1,2,3,4$) 表示，其峰值和出现的时间由表 2 给出.

表 2　撞击力的峰值和出现的时间

	F_{n1}	F_{n2}	F_{n3}	F_{n4}
出现的时间 (ms)	4.8	1.1	1.9	4.8
峰值 (N)	1886.5	862.09	740.98	1080.5

可以看出，4 个接触处的撞击力分别在不同时刻达到峰值，其中 F_{n1} 的峰值与 F_{n4} 的峰值比较大，出现的时间相同，F_{n2} 的峰值与 F_{n3} 的峰值比较小，出现的时间也比较接近，而撞击点 (P_1, Q_1) 和 (P_4, Q_4), (P_2, Q_2) 和 (P_3, Q_3) 分别位于左 1 板的两条对角线上 (由图 2 可以看出), 说明各板在撞击时在 x_4 方向上发生了扭转.

取坐标系如图 2 所示，点 1 的加速度由图 3 给出，点 2 的加速度由图 4 给出. 可以看出，在撞击发生的瞬时，点 1 在 z_4 方向的加速度出现较大的峰值. 点 2 是左 2 板边界点，撞击引起它的加速度上下波动.

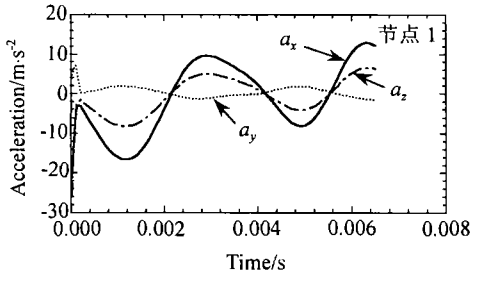


图 3　节点 1 加速度的变化规律
Fig.3　Acceleration of node 1

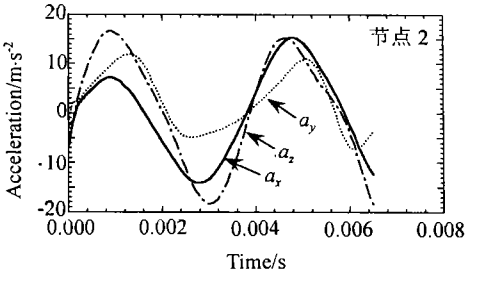


图 4　节点 2 加速度的变化规律
Fig.4　Acceleration of node 2

3　第二次板展开到位的撞击锁定

在右边板展开到位时，主板和右 1 板及右 1 板和右 2 板之间发生碰撞锁定，如图 5 所示. 撞击前，主板和右 1 板、右 1 和右 2 板之间的相对角速度为 0.531 rad/s. 这时，动

力学模型中有 8 个物体：卫星 B_1 、连接块 B_2 、摇臂架 B_3 、主板 B_4 、左 1 板 B_5 、左 2 板 B_6 、右 1 板 B_7 和右 2 板 B_8. 右 1 板与主板用铰 J_8 和 J_9 连接，右板之间用铰 J_{10} 和 J_{11} 连接，这些铰均为旋转铰，其中， J_9 、 J_{11} 为切割铰.

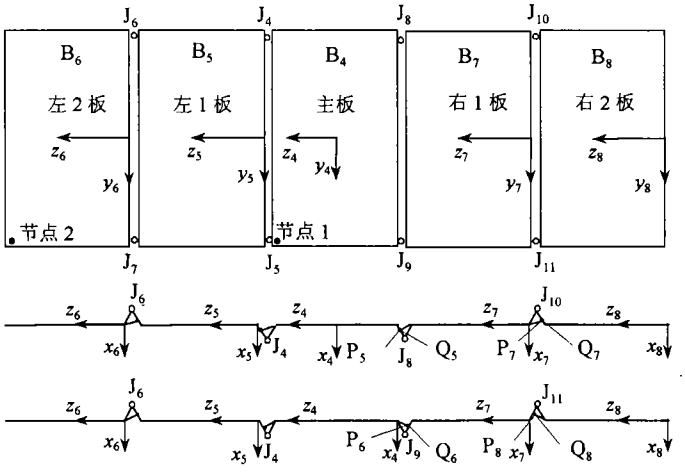


图 5 右板展开到位时的撞击锁定

Fig.5 Impact of the right plates at the end of the deployment

表 3 给出了各物体的质量.

表 3 各物体的质量

构件	B_1	B_2	B_3	B_4	B_5	B_6	B_7	B_8
质量 (kg)	2559	1.3994	8.4197	15.6038	15.6038	15.6038	15.6038	15.6038

将 $\boldsymbol{\Theta}^s(\mathrm{P}_s,\mathrm{Q}_s)=\boldsymbol{r}_\alpha^{\mathrm{P}_s}-\boldsymbol{r}_\beta^{\mathrm{Q}_s}=0$ $(s=5,6,7,8)$ 和 J_9 、 J_{11} 处切割铰的约束方程加入到总的约束方程去，通过 Lagrange 乘子 $\boldsymbol{\mu}$ 可算出撞击力.

表 4 撞击力的峰值和出现的时间

	F_{n5}	F_{n6}	F_{n7}	F_{n8}
出现的时间 (ms)	7.6	8.1	4.4	7.6
峰值 (N)	1599.1	663.58	734.78	1938.7

设在 P_s 和 Q_s $(s=5,6,7,8)$ 的撞击处的法向撞击力分别用 F_{ns} $(s=5,6,7,8)$ 表示，撞击发生的时刻为零时刻，法向撞击力的峰值和出现的时间由表 4 给出. 与左边板的撞击锁定类似， F_{n5} 的峰值与 F_{n8} 的峰值比较大，出现的时间相同， F_{n6} 的峰值与 F_{n7} 的峰值比较小.

取坐标系如图 5 所示，图 6 、 7 给出节点 1 和节点 2 的加速度. 可以看出，节点 1 的加速度的峰值比上一次碰撞的峰值小. 点 2 的加速度也比上一次碰撞的小，这是由于碰撞发生在右板之间.

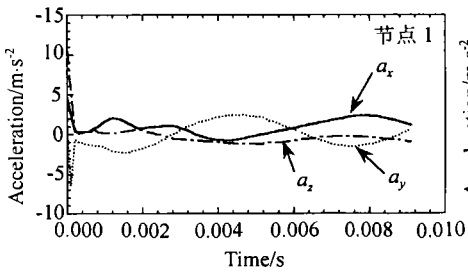


图 6　节点 1 加速度的变化规律
Fig.6　Acceleration of node 1

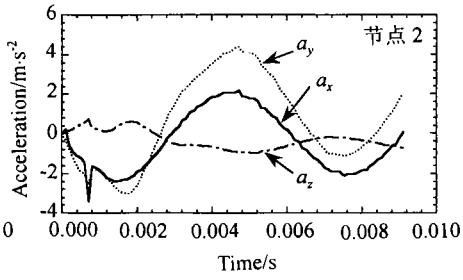


图 7　节点 2 加速度的变化规律
Fig.7　Acceleration of node 2

4　结　　论

1. 4 个接触处的撞击力分别在不同时刻达到峰值，位于板的对角线上的各撞击点的撞击力的峰值比较接近，出现的时间大致相同，说明各板在撞击时在 x_4 方向上发生了扭转.

2. 靠近撞击处的节点的加速度在撞击瞬时比其它节点大.

3. 在撞击发生后，外侧板的边界上节点的加速度逐渐变大且不断地上下波动，引起外侧帆板在撞击后上下、左右摆动. 这说明冲击波在很短时间内已经传播到外侧板的边界上节点.

4. 节点 1 和节点 2 的加速度在右板展开锁定时较左板展开锁定时小，说明离撞击处近的节点受到冲击的影响较离撞击处远的节点大.

参　考　文　献

[1] Khulief Y A, Shabana A A. Dynamic analysis of constrained system of rigid and flexible bodies with intermittent motion. *J. Mech. Trans. Auto. Des.*, 1986, **108**:38—45

[2] Lankarani H M, Nikravesh P E. A contact force model with hysteresis damping for impact analysis of multibody systems. *J. Mech. Des.*, 1990, **112**:369—376

[3] Wu S C, Haug E J. A substructure technique for dynamics of flexible mechanical systems with contact-impact. *J. Mech. Des.*, 1990, **112**:390—397

[4] 刘锦阳，洪嘉振. 空间伸展机构接触碰撞的动力学分析. 宇航学报， 1997, **18**(3):14—19

[5] 刘锦阳，洪嘉振. 多点接触碰撞的数值计算. 上海交通大学学报， 1997, **31**(7):45—48

CONTACT-IMPACT OF SOLAR BATTERY DURING THE DEPLOYMENT OF THE PLATES

LIU Jinyang HONG Jiazhen

(*Engineering Mechanics, Shanghai Jiaotong University,* 200030)

Abstract

In this paper, the contact-impact problem of solar battery during the deployment of plates is studied. The equation of motion of flexible multibody system during impact is derived. The time histories of impact forces and the acceleration of some nodes of the plates are presented. It shows that the impact forces of the contact points reach the peak at different time on account of the distortion of the flexible plates. It also shows that when impact occurs, the acceleration of the nodes near the impact points are greater than that of the other nodes, and it takes few time for the impact wave to spread through the flexible plates. When the impact wave reaches the nodes at the boundary of the outer plate, the acceleration of the nodes becomes greater and vibrant which leads to the swinging of the plates.

Key words Solar battery, Impact force, Distortion