

空间站展开机构的失谐动态响应分析^①

于霖冲^②

(厦门理工学院机械与汽车工程学院 厦门 361024)

摘 要 考虑了动力失谐、质量失谐和摩擦失谐三种常见失谐现象,研究了空间站展开机构的失谐动态响应。利用多柔体系统动力学方法,在机械系统动力学自动分析(ADAMS)仿真平台下建立了空间站柔性展开机构的失谐模型,并用重要度抽样方法随机抽取失谐量,然后进行机构动力学仿真,得到机构的失谐动态响应并进行统计。仿真研究证明,该方法可用较少的计算时间得到柔性展开机构的失谐动态响应随机分布特性。

关键词 谐调机构,失谐机构,动态响应,重要度抽样方法

0 引言

空间站展开机构是由若干细长的子机构构成的柔性周期机构(periodic mechanism),其动态响应呈高度非线性。在失谐情况下,空间站展开机构的动态响应与谐调模型的理想动态响应相比是不同的,利用蒙特卡洛方法进行随机动态响应分析的时间成本较大,因而需研究失谐下的动态响应方法。本研究采用重要度抽样方法进行了失谐动态响应分析,该方法减少了计算成本,得到了失谐动态响应的随机分布特性。

1 相关研究

通常情况下,对拓扑结构具有一定规律性和重复性的周期机构进行动力学、运动学分析时,只需要计算有代表性的一个子机构,并将该子机构的分析结果扩展到整个周期机构。这种方法既降低了问题的复杂性,又减少了计算成本。在这方面已有研究,例如于霖冲等分析了对称空间站展开机构其中一侧子机构的变形动态响应并进行了动态可靠性分

析^[1];高阳等针对轴对称机构的一个子机构的动态响应进行了动态可靠性分析^[2]。然而,由于制造装配误差以及机构运行使用过程中的随机因素,子机构完全相同的谐调机构是不存在的。不同子机构之间在拓扑、尺寸、质量以及使用条件(摩擦、受力)等方面存在差异的机构叫做失谐机构(mistuned mechanism)。由于机构的拓扑结构随时间改变,尤其是柔性机构,其动力学方程为微分代数方程,分析难度大、计算工作量大,计算时间成本高^[3,4]。虽然机构的运动学、动力学参数在失谐情况下同设计理论值相比会有差异,但是在传统设计中这种差异被忽视。

自从 Anderson 在 1958 年首次发现金属结晶过程中存在失谐现象以来^[5],在机械结构等领域也相继发现了失谐现象,例如:Xie 探讨了大型平面桁架结构的失谐问题,提出了失谐结构分析的基本方法^[6];Angelo 研究了失谐连续结构的振动局部化问题^[7];Yoo 等讨论了周期结构的失谐动态响应^[8];Raeisil 等利用神经网络和基因算法计算了叶盘结构的失谐问题^[9];Bai 等分析了叶盘结构的失谐问题^[10]。近 30 年以来,失谐结构的研究取得了很多新进展,很多理论、方法和实验结果可以应用于机构的失谐响应分析。随着计算技术的不断改进以及计

① 863 计划(2006AA04Z405)和国家自然科学基金(51375412)资助项目。

② 男,1968 年生,副教授;研究方向:系统可靠性,CAD 及自动化,系统仿真;联系人,E-mail: ylc1968@163.com; lcyu@xmut.edu.cn (收稿日期:2015-09-17)

算方法效率的不断提高,进行失谐机构的研究是失谐结构分析的发展趋势。本文首先利用多柔体系统动力学方法建立了谐调柔性机构模型,根据重要度抽样方法随机抽取失谐量,然后进行机构动力学仿真,得到了机构的失谐动态响应并进行了统计。结果表明:利用本方法可以用较低的时间成本得到柔性机构的失谐动态响应随机分布特性,为进一步研究失谐机构奠定了基础。

2 谐调机构与失谐机构系统模型

2.1 谐调机构与失谐机构

机构系统是由多个构件和运动副组成的多体系统,如果机构系统是包含子机构的谐调周期机构,那么在不同的子机构的构件和运动副是谐调的。具有相同设计(形状、尺寸、约束以及作用)但隶属于不同子机构的构件,互称为谐联构件,而不隶属于子机构的其他构件称为独立构件。通常情况下,谐联构件在计算机辅助工程(CAE)分析时按照相同的网格划分原则进行,如果机构是完全相同的谐调机构,谐联构件的网格划分结果是完全相同的。反之,如果子机构是由于构件几何形状、几何尺寸等拓扑失谐引起的,那么构件在离散化网格划分上的结果也是有差异的。构件在离散化时,将结构划分为有限个单元,单元之间的连接简化为弹簧和阻尼,如图1所示。

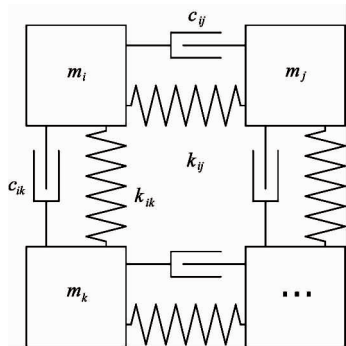


图1 构件离散化模型

假设周期机构的任意两个谐联构件 a_i 和 b_i , 如果它们为谐调构件,对于任意参数 $p(i)$ 存在

$$p_a(i) = p_b(i) \quad (1)$$

即构件 a_i 和 b_i 任意参数均一致。

如果(1)式不成立,即构件 a_i 和 b_i 某一参数或者某些参数不一致,则出现失谐。机构失谐的程度用失谐量 σ_m 描述,见下式:

$$\sigma_m = p_a(i) - p_b(i) \quad (2)$$

失谐量是指由制造误差、装配误差以及使用过程中的不确定因素引起的参数不一致。即 $\sigma_m \neq 0$ 时,机构存在失谐。

为了便于说明和计算,定义单位失谐量 σ 为

$$\sigma = 0.01 \times p(i) \quad (3)$$

即单位失谐量是参数理想值的1%,例如若谐联构件 a_i 失谐量为 -2σ , 而谐联构件 b_i 失谐量为 3σ , 则

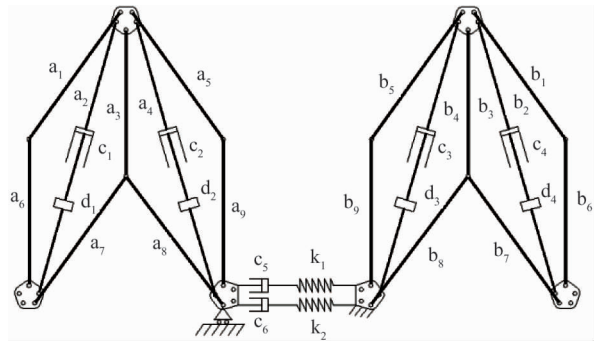
$$\sigma_m = -2\sigma - 3\sigma = -5\sigma \quad (4)$$

在式(4)中, σ_m 所表达的物理意义等同于式(2),不同的只是将失谐量 σ_m 转化为单位失谐量 σ 的倍数来表示。

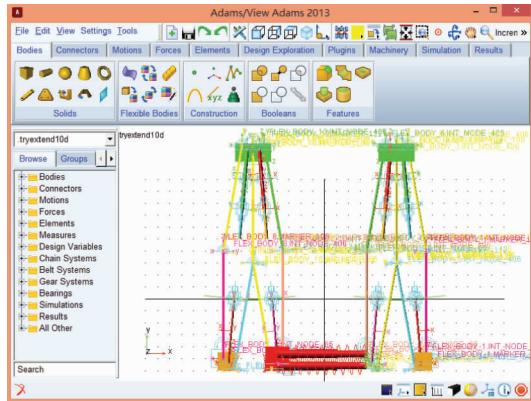
2.2 失谐空间站柔性展开机构模型

空间站展开机构由左右对称的两组子机构组成,子机构通过铰链副连接到空间站主体结构,机构初始位置为收拢状态,如图2(a)所示。其中,左侧子机构的构件 $a_1 \sim a_9$ 以及右侧子机构的构件 $b_1 \sim b_9$ 为细长杆,作为柔性构件,其他构件作为刚体。机构由 $d_1 \sim d_4$ 四台电机提供驱动动力,驱动规划是前10s为匀速驱动,10s之后机构借助惯性展开,并在 $d_1 \sim d_4$ 阻尼作用下在规定时间内(25s)和规定位置停止,即机构处于完全展开状态时停止,如图2(b)所示。

柔性机构的运动方程为微分代数方程,在给定初值后可迭代求解,计算时间成本较高。因此,周期机构利用拓扑结构的规律性,一般选择一个子机构进行分析,主要目的就是降低计算的复杂性,减少计算时间。这样做的前提是周期机构是一个谐调机构,各个子机构的动态响应是完全相同的。在文献[1]中,柔性机构模型与空间站主体结构固定连接,假设空间站主体结构为静止的刚体,并对右侧子机构进行动态响应的可靠性分析。



(a) 展开机构模型



(b) ADAMS 平台下失谐展开机构模型

图 2 失谐的空间站展开机构模型

若机构为失谐机构,即左右两侧子机构之间存在失谐,右侧子机构的动态响应同左侧的动态响应不一定完全相同。那么,用一侧的分析结果代替另一侧显然存在计算误差。因此,为了更加准确地分析机构的失谐动态响应,以图 2(a)中弹簧阻尼结构代替文献[1]的刚体本体,以滑动铰链支撑代替文献[1]的固定连接支撑。这样使模型更加接近于工程实际,并且考虑失谐响应在子机构之间传递的影响。失谐展开机构模型在机械系统动力学自动分析(ADAMS)仿真平台下建立,给定各个构件的几何、物理、拓扑和约束信息,失谐量的数据采用人工修改方法输入,展开机构模型如图 2(b)所示。

根据柔性多体系统动力学原理^[4],用 Lagrange 乘法子法建立的柔性机构动力学方程为

$$M(t)\ddot{q} + K(t)q + C(t)\lambda = F(t) \quad (5)$$

式中: $M(t)$ 为柔性机构时变质量矩阵; $K(t)$ 为柔性机构时变刚度矩阵; $C(t)$ 为柔性机构时变约束矩阵; $F(t)$ 为柔性机构时变广义力矩阵; λ 为 Lagrange 乘子列阵; q 为广义坐标列阵。

将初始条件设为初始时刻静止无初始变形,即 $q=0, \dot{q}=0$ 。如式(5)所示的动力学方程为微分代数方程,求解方法为四阶龙格库塔方法。

2.3 重要度抽样方法

若随机事件 A 发生的概率为 $P(A)$, 在 N 次独立实验中,事件 A 发生的频数为 n ,频率为 $W(A) = n/N$, 则对于任意 $\varepsilon > 0$, 有

$$\lim_{N \rightarrow \infty} P\left(\left|\frac{n}{N} - P(A)\right| < \varepsilon\right) = 1 \quad (6)$$

即当 N 足够大时,频率 $W(A)$ 以概率为 1 收敛于 $P(A)$ 。根据式(6),为了取得较高的精度,必须有足够大的抽样次数 N 才能够达到足够的精度。对于非线性程度高的柔性机构,单次失谐仿真计算的时间成本较高,通过很大的仿真次数来提高分析精度的做法显然是不科学的。重要度抽样方法是对上述方法的重要改进,其基本原理是:在随机变量的离散数据抽样时,通过修正随机变量的概率密度函数和抽样中心,使随机变量离散数据的抽样频次具有不同的权值,这样用较少的抽样数据即可得到较多的信息,从而提高计算效率,降低计算成本。重要度抽样方法包括自适应重要度抽样、方向重要度抽样和分层抽样等,其中自适应重要度抽样是较常用且计算效率较高的方法。重要度抽样方法的具体计算过程参考文献[11]。

3 空间站柔性展开机构失谐动态响应

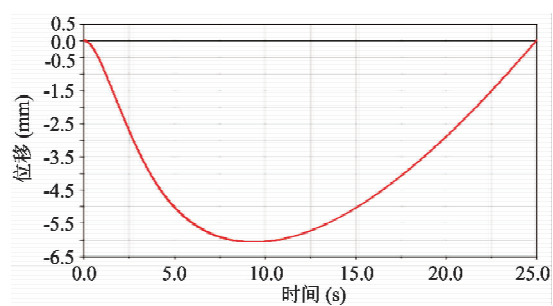
谐联构件 a_6 和 b_6 在展开运动中做平移运动,是机构是否展开到位、是否完成展开运动的标志,因此考虑失谐的影响,以谐联构件 a_6 和 b_6 为研究对象进行失谐动态响应分析。分别考虑单因素失谐和多因素失谐,计算失谐量从 σ 到 5σ 变化引起的动态响应变化。

3.1 单因素失谐动态响应仿真

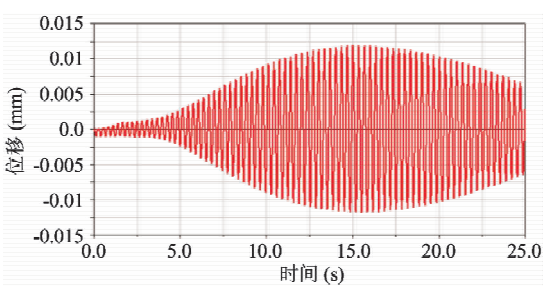
分别考虑动力失谐、质量失谐和摩擦失谐三种常见的失谐现象,为了便于计算和说明,假定左侧子机构各个参数均为理论值,右侧子机构的动力、各个构件质量、运动副的摩擦存在失谐,失谐量为确定值。按照式(5)进行仿真并比较左右子机构的动态

响应,动力失谐的动态响应比质量失谐和摩擦失谐剧烈,动力失谐量为 2.5σ 的位移失谐动态响应如

图 3 所示,横坐标为时间,单位为 s,纵坐标为位移,单位为 mm。



(a) x 方向位移动态响应



(b) y 方向位移动态响应

图 3 位移失谐动态响应

在图 3 中可以看出,当发生动力失谐时,左右两侧子机构的位移动态响应是不一致的, x 方向位移响应的最大差值为 6mm,出现时刻为 10s。同时,柔性构件的快变运动即在 y 方向的振动也出现了不同步现象。

当失谐量从 σ 变化到 5σ 时,比较谐联构件 a_6 和 b_6 的速度动态响应,速度失谐动态响应如图 4 所示,横坐标为时间,单位为 s,纵坐标为速度,单位为 mm/s。

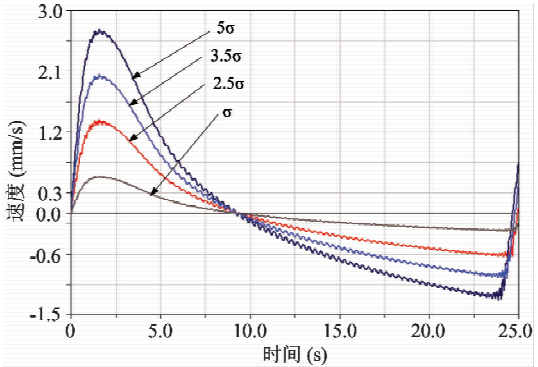
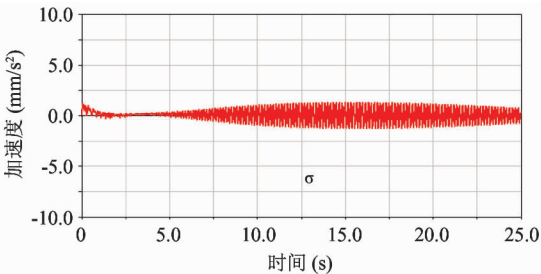


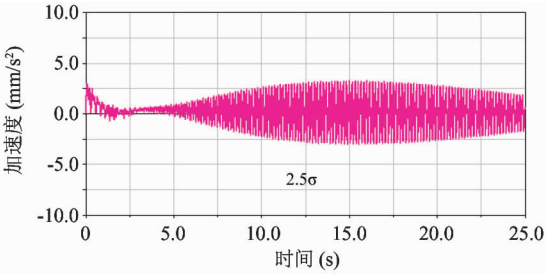
图 4 速度失谐动态响应

在图 4 中速度失谐动态响应的最大差值随着失谐量的增大而增大,在到达展开位置前的残余速度差值也随着失谐量的增大而增大。当失谐量从 σ

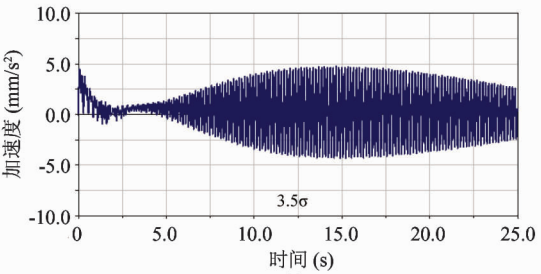
变化到 5σ 时,谐联构件 a_6 和 b_6 的加速度动态响应如图 5 所示。



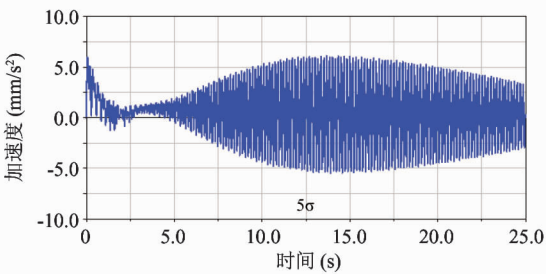
(a)



(b)



(c)



(d)

图 5 加速度失谐动态响应

图 5 中横坐标为时间,单位为 s ,纵坐标为加速度,单位为 mm/s^2 。从图 5 中可以看出,加速度失谐动态响应的最大差值随着失谐量的增大而增大,最大差值出现在 15s 时刻。在 25s 展开运动结束时,存在残余加速度差值。残余加速度差值越大,柔性机构的残余振动就大。

3.2 多因素的随机失谐动态响应

由于柔性机构的失谐仿真计算成本较高,将动力、质量和摩擦失谐按照重要度抽样方法进行抽样并进行多因素失谐动态响应仿真是一种减少计算时间的方法。具体方法如图 6 所示。首先按照蒙特卡罗方法进行失谐量的随机抽样,按照均值 μ 、 $\pm \sigma$ 、 $\pm 2\sigma$ 、 $\pm 3\sigma$ 、 $\pm 4\sigma$ 和 $\pm 5\sigma$ 将抽样数据划分到图 6 中对应的范围,以上述特定点的仿真数据代替所有划分到该范围的抽样数据的仿真值。例如在单因素仿真时,用 11 次仿真即可计算出动态响应的随机分布,通过这种方法,用特定点的较少次数的仿真就可以模拟多次仿真。

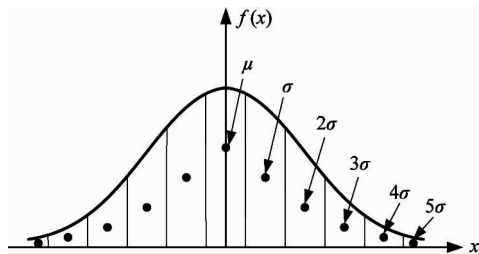


图 6 重要度抽样方法

通过蒙特卡罗方法抽样 3000 组数据,按照重要度方法划分范围,得到动力失谐的随机动态响应的加速度极值分布,如图 7 所示。横坐标是动态响应分布,其中 σ 为单位失谐量,纵坐标为次数。

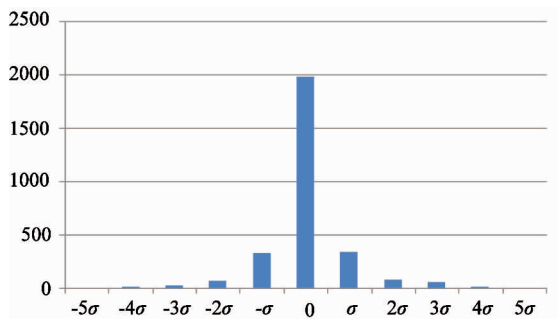


图 7 失谐动态响应分布

在图 7 中,90.8% 以上的失谐出现在 $\pm \sigma$ 之间,绝对值超过 3σ 的失谐响应占比不到 5%。而且,失谐量与失谐动态响应之间并非单调非线性关系,不同失谐量引起的失谐动态响应是不同的。

4 结论

机构中广泛存在失谐动态响应,尤其是柔性机构,在其使用过程中会产生失谐动态响应,应该引起足够的重视。随着失谐量的增大,残余速度和加速度差值增大,不利于机构定位和控制。

采用重要度抽样方法简单可行,柔性机构仿真时间成本较低。但是计算精度较低,需使用提高计算精度的算法进行改进。

除重点研究各种因素导致机构产生失谐动态响应之外,由失谐引起的可靠性分析、疲劳分析以及振动局部化问题,将会是失谐机构研究的热点。

参考文献

- [1] 于霖冲,白广忱,焦俊婷等. 柔性机构变形态动态响应可靠性分析方法. 宇航学报, 2006, 27(5):1039-1043
- [2] 高阳,白广忱,于霖冲. 矢量喷管柔性机构运动及可靠性仿真. 系统仿真学报, 2006, 18(2):175-178
- [3] 于霖冲,白广忱. 柔性机构动态可靠性分析. 北京:机械工业出版社,2012
- [4] Shabana A A. Flexible multibody dynamics: review of past and recent developments. *Multibody System Dynamics*, 1997, 1: 189-222
- [5] Anderson P W. Absence of diffusion in certain random lattices. *Physics Review*, 1958, 109: 1162- 1660
- [6] Xie W C. Vibration mode localization in disordered large planar lattice trusses. *Chaos, solitons & fractal*, 1997, 8 (3): 433-454
- [7] Angelo L. Mode localization in dynamics and buckling of linear imperfect continuous structures. *Nonlinear Dynamics*, 2001, 25: 133-156
- [8] Yoo H H, Kim J Y, Inman D J. Vibration localization of simplified mistuned cyclic structures undertaking external harmonic force. *Journal of Sound and Vibration*, 2003, 261: 859-870

- [9] Raeisi E, Ziaei R S. The worst response of mistuned bladed disk system using neural network and genetic algorithm. *Meccanica*, 2013, (48):367-379
- [10] Bai B, Bai G C, Li C. Application of improved hybrid interface substructural component modal synthesis method in vibration characteristics of mistuned blisk. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2014, 27(6): 1219-1231
- [11] 陈向前,董聪,闫阳. 自适应重要抽样方法的改进算法. *工程力学*,2012,29(11):123-128

Analysis on mistuned dynamic responses of space station expanding mechanism

Yu Linchong

(School of Mechanical and Automotive Engineering, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024)

Abstract

Mistuned dynamic responses in a flexible expanding mechanism for space stations were studied with the three common mistuning phenomena of dynamic mistuning, mass mistuning and friction mistuning being considered. Firstly, a mistuned model of a flexible expanding mechanism for space stations was established under the platform of automatic dynamic analysis of mechanical systems (ADAMS) by using the method of flexible multibody dynamics, and the mistuned quantity was randomly sampled by using the importance sampling method. Then, the dynamic simulation of the flexible mechanism was conducted, and the mechanism's mistuned dynamic responses were obtained and processed. The result of the simulation study verifies that the importance sampling method can use the less computation time to obtain the distribution characteristics of a flexible spanding mechanism's mistuned dynamic responses.

Key words: tuned mechanism, mistuned mechanism, dynamic response, importance sampling method