

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.05.053

CMG 多维随机加正弦扰动力复现控制研究

魏江南, 陈怀海

(南京航空航天大学 振动工程研究所, 江苏 南京 210016)

摘 要:针对航天结构在轨运行时受到控制力矩陀螺(CMG)的扰动力在地面试验难以复现的问题,提出一种基于控制随机功率谱密度及正弦幅值的方法。根据需要复现扰动力,给定随机参考谱和正弦参考幅值并生成随机加正弦混合驱动信号激励 CMG 模拟工装,将实测的响应信号分离,分别与参考量作比较并通过控制算法修正驱动信号,直至响应信号与参考量一致。试验结果表明:模拟工装的响应信号即 CMG 对航天结构的多维扰动力得以复现。还提出一种新的幅值修正算法,通过指数函数实现了正弦响应信号幅值的快速修正。

关键词:多维;随机加正弦;振动控制;幅值修正

中图分类号:TP391.9 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2025)05-0273-06

Research on Multi-dimensional Sine on Random Disturbing Force Reproduction Control of CMG

WEI Jiangnan, CHEN Huaihai

(Institute of Vibration Engineering Research, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: A method based on random power spectral density and sine amplitude control is proposed to cope with the difficulty in reproducing the disturbing force caused by control moment gyroscopes during the operation of the aerospace structure in orbit in ground tests. According to the disturbing force that needs to be reproduced, a sine on random mixed driving signal is generated by the given random reference power spectral density and sine reference amplitudes to excite the control moment gyroscope simulation structure. The measured response signal is separated, compared with the reference separately, and the driving signal is corrected by the control algorithm until the response signal is consistent with the reference. The test result shows that the response signal of the CMG simulation structure, namely the multi-dimensional disturbing force by CMG on the aerospace structure, can be reproduced successfully. This article also proposes a new sine amplitude correction algorithm that achieves rapid correction of the amplitude of the sine response signal through an exponential function.

Keywords: multi-dimensional; sine on random; vibration control; amplitude correction

0 引言

航天器在轨运行时,虽然整体处于受力平衡状态,但是航天器内部的活动部件,如卫星姿态调整机构(动量轮、控制力矩陀螺等)、太阳帆板展开驱动机构、制冷机构等都会引起舱体振动,从而造成空间望远镜的成像精度下降^[1-2]。其中动量轮和控制力矩陀螺(CMG)是航天器中最大的扰动力源,其干扰主要分为:平稳随机和谐波干扰^[3-5]。航天结构在轨试验规模较大,且实现难度高,通常采用地面力学环境试验的方法验证航天结构的特性^[6-8]。在航天结构的地面试验中,需要复现航天器在轨运行时的真实力学环境,以验证这些扰动对结构的影响。

为了实现力学环境的复现,国内外许多学者

进行了相关研究。CUI 等^[9]提出了矩阵幂次算法来模拟随机振动环境,并取得了一定的成果。CUI 等^[10]提出了一种基于时域随机信号的随机环境试验方法,并验证了该方法对响应的易控性。ZHENG 等^[11-12]研究了非高斯随机信号的控制峭度问题,并提出了一种新的控制算法。邹学利等^[13]研究了多轴振动与冲击的复合环境试验技术。ENGELHARDT 等^[14]提出了一种从随机加正弦混合信号中分离随机信号和正弦分量的方法。张毅^[15]使用悬臂梁系统验证了混合振动控制算法,但是对随机信号和正弦信号采取的是先后控制的策略。MA、ZHANG 等^[16-20]提出了一种更精确分离随机信号和正弦信号的算法。

本文提出了一种针对多维混合信号中的随机分量和正弦分量同时进行迭代控制的算法。本方

第一作者简介:魏江南(1998—),男,江苏宿迁人,硕士研究生,研究方向为振动控制,jiangnanwei@nuaa.edu.cn。

法通过对比实测响应信号与参考之间的误差,在一个循环内分别利用控制算法修正随机驱动信号和正弦驱动信号,直至响应信号满足控制目标,复现控制力矩陀螺运作时对航天结构造成的随机加正弦扰动力。本文还提出了一种新的正弦幅值修正算法,通过试验验证了此方法的适用性。

1 控制策略

为复现航天结构受到的多维随机加正弦扰动力,需要控制 CMG 实际输出的多维力/力矩随机信号功率谱密度与正弦信号幅值处于参考信号的一定容差之内。给定的随机参考谱与正弦参考幅值是需要复现的力学环境,依据参考谱生成混合驱动信号激励结构,将随机信号和正弦信号从混合响应信号中分离出来,分别同时进行控制。控制目标为 CMG 实际输出的多维力/力矩随机信号功率谱密度即随机响应谱与随机参考谱处于 ± 3 dB容差带内,CMG 实际输出的多维力/力矩正弦信号幅值与参考幅值误差不超过 5%。

2 混合驱动信号的生成

2.1 随机信号的生成

多维随机振动控制的目标是使随机响应功率谱密度(简称响应谱)与参考功率谱密度(简称参考谱)处于一定容差之内。试验前需设置合理的参考谱,并由此生成第一次随机驱动信号。

第一次生成驱动信号时,由线性振动理论可知:

$$S_{yy} = G S_{xx} G^H = S_{rr} \quad (1)$$

式中: S_{yy} 为响应谱密度矩阵; G 为系统频响函数矩阵; S_{xx} 为驱动谱密度矩阵; S_{rr} 为参考谱密度矩阵;上标 H 为共轭转置。对 S_{xx} 、 S_{rr} 分别做 Cholesky 分解,得到 D 和 L_r 满足:

$$S_{xx} = D D^H \quad (2)$$

$$S_{rr} = L_r L_r^H \quad (3)$$

联立式(1)、式(2)和式(3),根据 Cholesky 分解的唯一性,则驱动信号频谱矩阵 D 可表示为

$$D = Z L_r \quad (4)$$

式中 Z 为系统频响函数矩阵的逆阵,即阻抗矩阵。

通过式(4)计算得到的驱动信号频谱矩阵需要补充相位,这里定义随机相位矩阵 θ 为

$$\theta = \begin{bmatrix} e^{i\theta_1} & & & \\ & e^{i\theta_2} & & \\ & & \dots & \\ & & & e^{i\theta_6} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中 $\theta_i (i=1,2,\dots,6)$ 是在 $[-\pi, \pi]$ 区间均匀分布的随机数。

将式(5)代入式(4),则驱动频谱更新为

$$D = Z L_r \theta \quad (6)$$

驱动频谱 D 经过逆快速傅里叶变换转换成时域伪随机驱动信号 d :

$$d = \text{IFFT}(D) \quad (7)$$

伪随机驱动信号是一段长度有限的随机信号。伪随机驱动信号需要再经过时域随机化过程生成无限长度的真随机驱动信号。

2.2 正弦信号的生成

利用给定的正弦参考幅值相位,经过快速傅里叶变换形成正弦参考频谱矩阵 A ,与系统阻抗矩阵相乘,得到正弦驱动信号频谱矩阵 $D_{\sin}$,记为

$$D_{\sin} = Z A \quad (8)$$

正弦驱动信号频谱矩阵 $D_{\sin}$ 再经过逆快速傅里叶变换转换成时域的正弦驱动信号。此正弦信号与随机信号叠加生成随机加正弦驱动信号后共同施加到结构上。

3 随机与正弦信号的分离

生成的随机加正弦驱动信号施加到结构上,在控制点测量到的响应信号是随机与正弦响应的混合信号。本文使用相关积分法将随机与正弦分量从混合信号中分离。

一个随机加正弦混合信号可以表示为

$$y(t) = x_r(t) + \sum_{k=1}^m A_k \sin(\omega_k t + \varphi_k) \quad (9)$$

式中: $x_r(t)$ 为随机信号分量; A_k 、 ω_k 和 φ_k 分别为第 k 个正弦分量的幅值、频率和相位; m 是正弦分量的个数。

构造两个函数,分别表示为:

$$q_{1,k}(t) = \sin(\omega_k t) \quad (10)$$

$$q_{2,k}(t) = \cos(\omega_k t) \quad (11)$$

在混合信号中随机部分与正弦部分是互相独立的,对于任一频率的正弦信号与随机信号乘积的均值均为 0,由此性质及和差化积公式化简为下述公式:

$$f_k^R = \int_0^{sT_k} y(t) q_{1,k}(t) dt = \frac{sT_k A_k}{2} \cos(\omega_k t) \quad (12)$$

式中: T_k 为第 k 个正弦分量的周期; s 为正整数。同理可得:

$$f_k^I = \int_0^{sT_k} y(t) q_{2,k}(t) dt = \frac{sT_k A_k}{2} \sin(\omega_k t) \quad (13)$$

因此,由式(12)、式(13)可以计算得到第 k 个正弦分量的幅值和相位为:

$$A_k = \frac{2\sqrt{(f_k^R)^2 + (f_k^I)^2}}{sT_k} \quad (14)$$

$$\varphi_k = \tan^{-1}(f_k^I/f_k^R) \quad (15)$$

重复以上步骤求出所有正弦分量的幅值和相位,将其从混合信号中减去,可得随机信号分量为

$$x_r(t) = y(t) - \sum_{k=1}^m A_k \sin(\omega_k t + \varphi_k) \quad (16)$$

至此,混合信号中的随机与正弦分量相互分离,分别进行控制。

4 控制算法

4.1 随机分量控制算法

当随机信号从混合响应信号分离后,计算其功率谱密度矩阵 S_{yy} ,通常与参考谱 S_{rr} 之间存在一定误差,定义误差修正矩阵 Δ 。

$$\Delta S_{yy} \Delta^H = S_{rr} \quad (17)$$

对 S_{yy} 做 Cholesky 分解:

$$S_{yy} = L_y L_y^H \quad (18)$$

将式(3)、式(18)代入式(17)得

$$\Delta L_y L_y^H \Delta^H = L_r L_r^H \quad (19)$$

根据 Cholesky 分解的唯一性,比较式(19)的两端可得:

$$\Delta = L_r L_y^{-1} \quad (20)$$

然后,利用计算得到的误差修正矩阵 Δ 修正 L_r ,代入式(4),可达到修正驱动频谱矩阵 D 的目的。为了控制修正的收敛速度及提高控制精度,定义收敛幂指数 ε 。

$$L_r^{(k+1)} = \Delta^\varepsilon L_r^k, \quad \varepsilon > 0 \quad (21)$$

当 ε 取值较小时,收敛速度较慢,但是控制精度较高;当 ε 取值较大时,收敛速度较快,但是控制精度较低,具体取值可根据实际需要调整。

4.2 正弦幅值修正算法

在结构的随机驱动信号中叠加几个固定频率的正弦信号,采集混合响应信号,通过相关积分法分离出正弦信号的幅值,与参考正弦幅值对比,反馈修正正弦响应幅值,经过频响函数矩阵逆阵,达到修正正弦驱动信号的目的。

一般正弦信号幅值修正算法为

$$A_i = \begin{cases} A_{i-1} \frac{K+(1/E)}{K+E} & E \leq 1 \\ A_{i-1} \frac{K+1}{K+E} & E > 1 \end{cases} \quad (22)$$

式中: A_i 为当前正弦响应信号的幅值; A_{i-1} 为前一次正弦响应信号的幅值; E 为前一次响应幅值与参考幅值之比; K 为压缩比,其值越大,可使旧值有较大加权而减缓幅值修正。

上述幅值修正算法需要对比前一次响应幅值与参考幅值的大小,计算公式较为繁琐,本文提出一种新的幅值修正算法:

$$A_i = A_{i-1} E^{-K} \quad (23)$$

式中 $0 < K \leq 1$, 其值越大,收敛速度越快。此修正算法利用指数函数的性质,无需比较 E 与 1 的大小,可实现自适应修正。

由式(23)可得:

$$\frac{A_i}{A_{i-1}} = E^{-K} \quad (24)$$

即当压缩比 K 取 1 时,幅值可一次实现完全修正。如图 1 所示,当 K 取 0~1 之间的数时,修正速度与 K 的取值成正比;当 K 取大于 1 的数时,幅值会修正过度,因此实际试验时 K 的取值不宜大于 1。

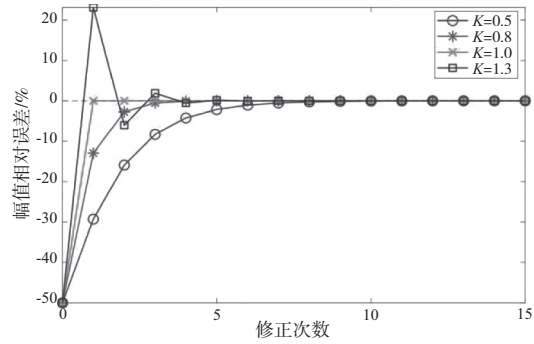


图 1 取不同压缩比的控制轨迹

5 试验验证

以 1 套控制力矩陀螺 (CMG) 模拟工装为研究对象,使用 6 个惯性激振器作为扰源激励,测力台采集六维力/力矩响应信号,搭建 6 输入/6 输出随机加正弦振动控制试验系统,验证控制算法。试验现场布置如图 2、图 3 所示。

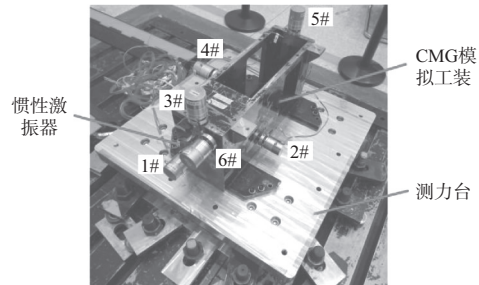


图 2 激振器布置

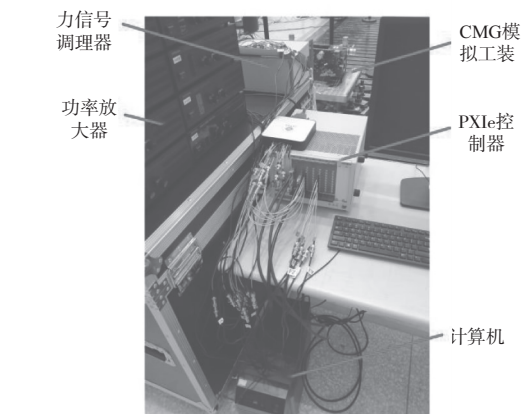


图3 试验布置

试验所需的仪器包括力信号调理器、PXIe 控制器、计算机及 6 台功率放大器。力信号调理器用于采集位于测力台四角的三维力传感器的信号,并将其汇总为 6 维力/力矩信号;PXIe 控制器用于信号的 AD/DA 转换;计算机用于运行控制器驱动、分析数据和绘图;6 个功率放大器用于驱动对应编号的惯性激振器。

试验前测试输入电压信号与测力台响应信号间的频率响应函数,这是扰动力复现控制的基础,如图 4 所示。试验设置的参考谱分为两部分。随机部分以功率谱密度表示,控制频段为 5 ~ 500 Hz,设置±3 dB报警限和±6 dB 停车限,控制点处力响应信号的总方均根值为 0.964 N,力矩响应总方均根值为 0.680 Nm;正弦部分以幅值表示,相位不作控制,如表 1 和表 2 所示,每个自由度上叠加 4 个频率分别为 116. 25 Hz、233. 75 Hz、350.00 Hz、466.25 Hz 的正弦信号。

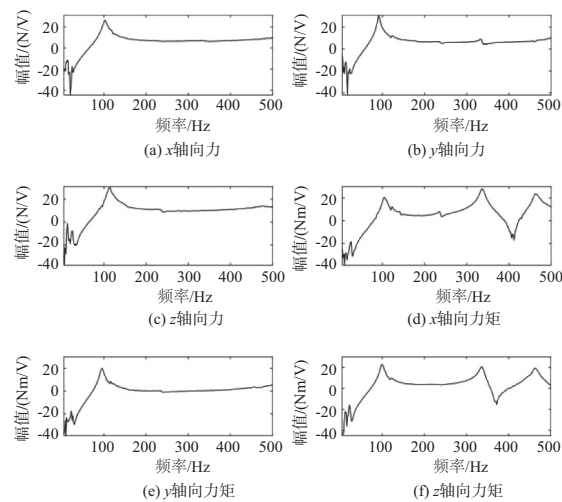


图4 原点频响函数

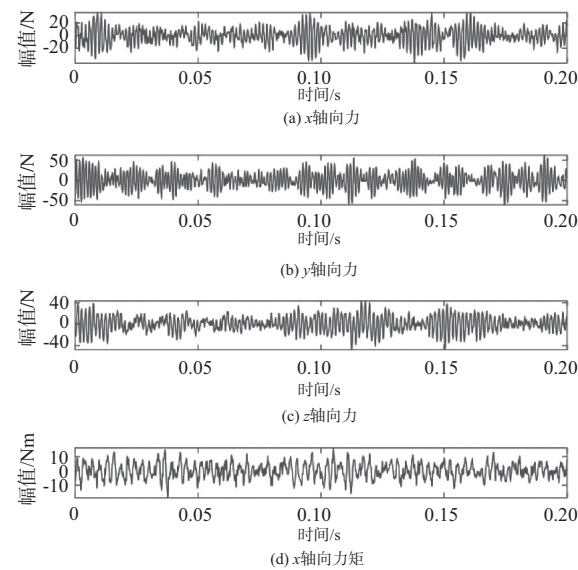
表 1 3 直线自由度正弦分量控制结果

自由度	频率/ Hz	参考幅值/ N	响应幅值/ N	相对误差/ %
x 轴向力	116.25	1.6	1.593	0.44
	233.75	1.6	1.673	4.56
	350.00	1.6	1.660	3.75
	466.25	1.6	1.624	1.50
y 轴向力	116.25	0.8	0.817	2.12
	233.75	0.8	0.812	1.50
	350.00	0.8	0.815	1.87
	466.25	0.8	0.820	2.50
z 轴向力	116.25	0.8	0.829	3.62
	233.75	0.8	0.820	2.50
	350.00	0.8	0.821	2.62
	466.25	0.8	0.836	4.50

表 2 3 旋转自由度正弦分量控制结果

自由度	频率/ Hz	参考幅值/ Nm	响应幅值/ Nm	相对误差/ %
x 轴向力矩	116.25	0.8	0.816	2.00
	233.75	0.8	0.790	1.25
	350.00	0.8	0.796	0.50
	466.25	0.8	0.793	0.88
y 轴向力矩	116.25	0.8	0.810	1.25
	233.75	0.8	0.793	0.88
	350.00	0.8	0.795	0.63
	466.25	0.8	0.785	1.88
z 轴向力矩	116.25	0.8	0.824	3.00
	233.75	0.8	0.781	2.38
	350.00	0.8	0.792	1.00
	466.25	0.8	0.778	2.75

开始试验后,测力台采集控制点的 3 个轴向力及力矩混合响应信号,如图 5 所示。



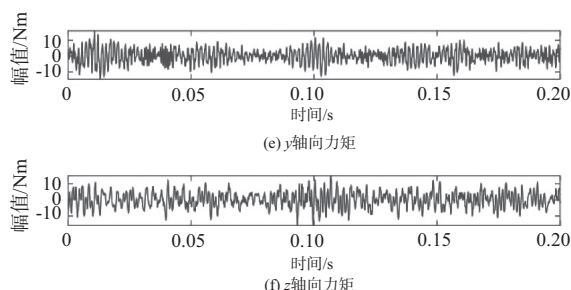


图5 测力台采集的信号片段

由图6所示,6维力/力矩随机响应谱经过矩阵幂次算法20次循环控制后,基本贴合参考谱,已完全处于 ± 3 dB报警限内。图中4条超差的谱线表示4个频率的正弦分量。

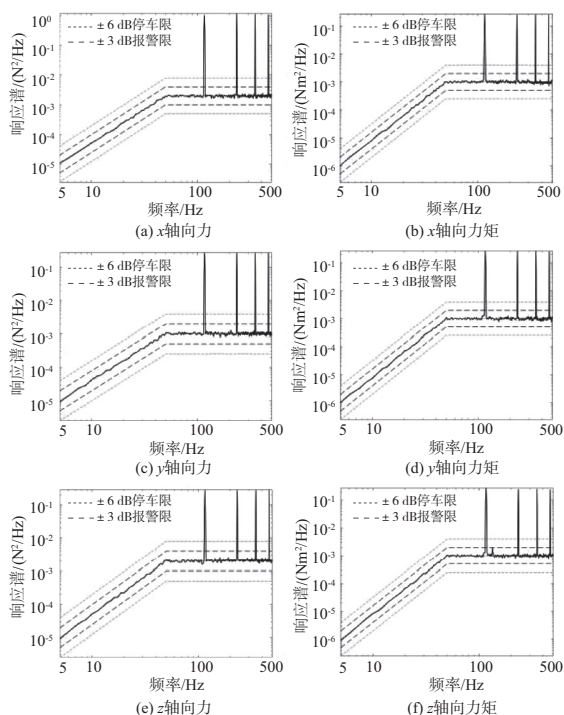


图6 控制结果混合谱

对控制点的随机响应谱进行总方均根值计算,其与参考谱的相对误差如表3所示,均小于5%,试验结果表明CMG模拟工装的多维扰动力中的随机分量成功复现。

表3 6自由度随机分量控制结果

自由度	参考谱 RMS 值	响应谱 RMS 值	相对误差/%
F_x	0.964	0.950	-1.45
F_y	0.964	0.972	0.83
F_z	0.964	0.980	1.66
M_x	0.680	0.664	-2.35
M_y	0.680	0.671	-1.32
M_z	0.680	0.688	1.18

首次生成正弦驱动信号时,为了防止量级过大,在理想驱动信号的幅值上乘缩小系数,本试验取0.6。把正弦信号从混合信号分离出来后,运用提出的幅值修正算法迭代修正正弦驱动信号。取y轴向力的控制结果为例,如图7所示。试验结果表明经过多次修正后每个自由度上控制幅值与参考幅值的误差都不超过5%。因此,所提出的正弦幅值修正算法具备修正正弦信号的能力,多维扰动力中的正弦分量成功复现。

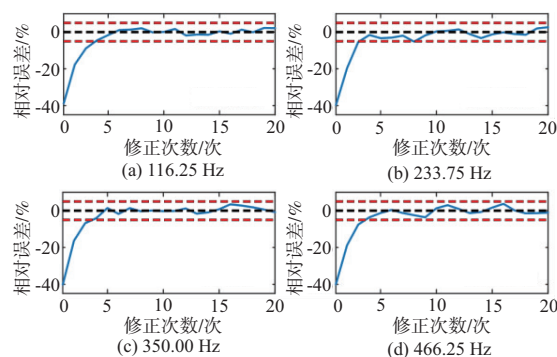


图7 y轴向力叠加的正弦信号幅值控制轨迹

6 结语

本文提出了一种用于复现多维随机加正弦扰动力的控制方法。本方法利用相关积分法分离控制力矩陀螺模拟工装中混合响应信号的随机分量和正弦分量,分别采用矩阵幂次控制算法和幅值修正算法同时进行迭代控制,以实现航天结构受到的实际扰动力的复现。试验结果表明:随机控制算法能够控制响应谱在参考谱的 ± 3 dB容差范围内,且总方均根值误差小于5%。本文提出的正弦幅值修正算法更加简洁,并且具备控制幅值在一定误差范围内的能力。至此,由控制力矩陀螺引起的航天结构多维扰动力得以复现。

参考文献:

- [1] 林诺,王忠素,贺帅,等. 六维扰动力模拟器结构设计及仿真实验研究[J]. 机械强度, 2020, 42(1): 140-145.
- [2] CAO D Q, NIE Y F, CHI W C, et al. Ground test platform design for micro-vibration control of payloads in spatial microgravity [C]//The 4th International Conference on Dynamics, Vibration and Control. Shanghai: ICDVC, 2014: 17-20.
- [3] 夏明一. 空间微振动多维扰动力测试技术研究[D]. 长春:中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2019.

- 收稿日期:2023-11-20

究[D]. 广汉:中国民用航空飞行学院,2021.

- 收稿日期:2023-10-13