

复合材料臂杆刚度性能研究

檀傑錚 曾惠忠 尚愛華 殷新喆

(北京空間飛行器總體設計部,北京 100094)

文 摘 為獲得大型複合材料臂杆剛度特性用於結構動力學仿真,採用有限元建模和試驗測試兩種方法,分別得到試驗件一階模態頻率與彎曲及扭轉剛度。分析結果與試驗結果並不吻合,對產品剛度降低原因進行了分析,不良成型工藝和纖維打斷對複合材料產品的剛度特性有著較大的影響。

關鍵詞 複合材料,臂杆,剛度

中圖分類號:V214.33

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2018.02.014

Study on Stiffness Test of Large Composites Beam

TAN Limeng ZENG Huizhong SHANG Aihua YIN Xinzhe

(Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094)

Abstract The stiffness of the large composite beam is studied for the manipulator dynamic simulation. The 1st modal frequency and bending stiffness and turning stiffness are got by analysis and test. The test result does not coincide with analysis result. Reasons are put forwarded about the reduce of stiffness. Undesirable molding process and broken carbon fiber are the major factors to the stiffness reduce of composite beam.

Key words Composites, Beam, Stiffness

0 引言

碳/環氧複合材料在航空航天領域已經獲得了廣泛應用,如衛星結構的主承力筒、太陽翼基板、天線展開臂等產品。複合材料臂杆是空間大型機構的重要組成部分,起到連接、支撐關節的作用,另外臂杆還提供了航天员扶手接口、電纜接口等。機構在軌執行任務時,臂杆受到彎曲、扭轉等力學載荷,需要採用分析和試驗的方法,獲取臂杆力學特性,用於產品性能評價以及衛星的在軌動力學特性分析。文獻[1]中對小尺寸複合材料杆進行了拉伸與壓縮試驗,本文針對

大型複合材料臂杆,進行了軸向拉伸、彎曲及扭轉試驗,研究臂杆的力學性能。

1 複合材料臂杆介紹

複合材料臂杆長 3 500 mm,由改性氰酸脂結構主體和兩端的鈦合金法蘭組成,結構主體由光殼、環向加強筋組成,光殼外徑 $\Phi 290$ mm(局部有環向加強筋)。最里和最外層均採用氰酸脂編織布,並採用氰酸脂無緯布纏繞。光殼長度方向為 0° 方向,氰酸脂無緯布鋪層方向為 $\pm 45^\circ$ 和 0° 。根據文獻[2], $\pm 45^\circ$ 鋪層方向使得臂杆具有最優的力學性能。

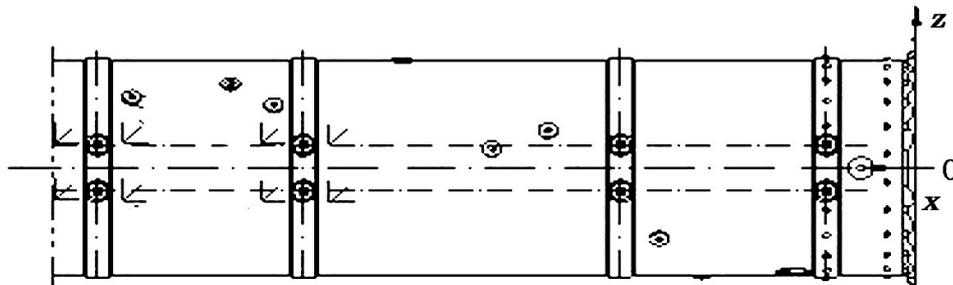


圖 1 臂杆結構示意圖

Fig. 1 Sketch of large composites beam

收稿日期:2017-04-10

第一作者簡介:檀傑錚,1986年出生,工程師,主要從事複合材料結構性能測試研究工作。E-mail:tanlimeng@163.com

在臂杆的 y 方向上设置有 24 个 M5 螺纹孔,用来连接扶手。螺纹孔在环向加强筋位置,且沿 x 向均匀布置。在臂杆两端,沿 z 向开有两个电缆走线孔,由于螺纹孔及走线孔的布置,使得部分碳纤维沿 x 向被打断。

2 试验

试验包括臂杆一端固支下一阶模态频率、轴向拉伸刚度、弯曲刚度测试和扭转刚度测试四部分。

2.1 一阶模态频率测试

采用敲击法测试臂杆一阶模态频率。将臂杆一端法兰与固定模拟墙相连,将模拟墙固定在地轨上,采用橡皮锤在臂杆上端部沿 y, z 两个方向敲击,用 Polytec OFV 505 型激光测振仪和 LMS SCM05 数采以及 Test Lab 11B 软件测试臂杆振动频率。由于臂杆阻尼较小,采用半功率带宽法计算模态阻尼比,如图 2 所示。

激光测振仪测得的响应信号经过 FFT 变换后得到其自谱曲线,取第一个峰值(频率 ω)的 0.707 倍做一条水平线(这里我们主要关心第一阶振型相关参数),该线与峰值曲线相交于两点,此两点对应的频率即为半功率点(ω_1, ω_2)。其中 $\omega = 2\pi f$,将其代入阻尼比计算公式:

$$\varepsilon = \frac{\omega_2 - \omega_1}{2\omega} \quad (1)$$

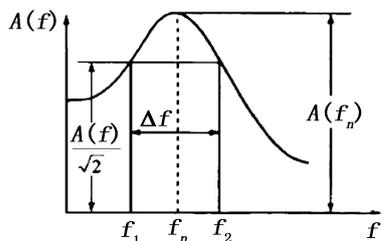


图 2 半功率带宽法

Fig. 2 Half-power bandwidth method

将臂杆简化为一均匀悬臂梁,如图 3 所示。

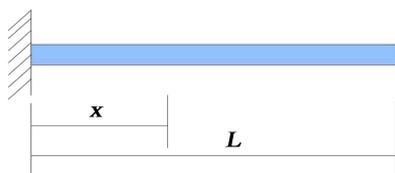


图 3 均匀悬臂梁

Fig. 3 Uniform cantilever

弯曲运动模态微分方程的通解为:

$$V(x) = C_1 \sinh \lambda x + C_2 \cosh \lambda x + C_3 \sin \lambda x + C_4 \cos \lambda x \quad (2)$$

边界条件为:

$$V(0) = 0 \quad (3)$$

$$\frac{dV}{dx} \Big|_{x=0} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{d^2V}{dx^2} \Big|_{x=L} = 0 \quad (5)$$

$$\frac{d^3V}{dx^3} \Big|_{x=L} = 0 \quad (6)$$

根据式(2)~式(6),得到特征方程

$$\cos(\lambda L) \cos(h\lambda L) + 1 = 0 \quad (7)$$

它的根是特征值 λ_r 乘以长度 L ,与每个特征值相关的固有频率为

$$\omega_r = \frac{(\lambda_r L)^2}{L^2} \left(\frac{EI}{\rho A} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

根据文献[7] $\lambda_r L$ 的数值解为:

$$\lambda_1 L = 1.8751$$

$$\lambda_2 L = 4.6941$$

由此计算得到臂杆的刚度 $\frac{EI}{\rho A}$ 。

2.2 拉伸刚度测试

臂杆进行拉伸刚度测试参照 GB/T 2568—1995 开展,搭建试验系统如图 4 所示,臂杆下端通过模拟墙固定在地轨上,在臂杆上部加载,设计了一套随动加载装置,该装置在水平两个方向上具有一定的自由度,保证对臂杆施加的拉力始终沿臂杆轴向,防止引入弯曲载荷影响测试数据。在臂杆上下靠近法兰的薄壁位置,沿周向均布 4 个应变花,监测应力变化情况,并在臂杆上下法兰对称位置布置 4 个位移测点($w_1 \sim w_4$),采用电涡流传感器测量加载过程中臂杆上下端面发生的位移变化。

载荷加载采用自行研制的螺旋加载工装,力传感器型号为 BLR-1,电涡流传感器型号为 CWY-DO-501,应变片型号为 BX120-3CA,载荷、位移以及应变数据的采集使用 DEWE 2601 型数采。

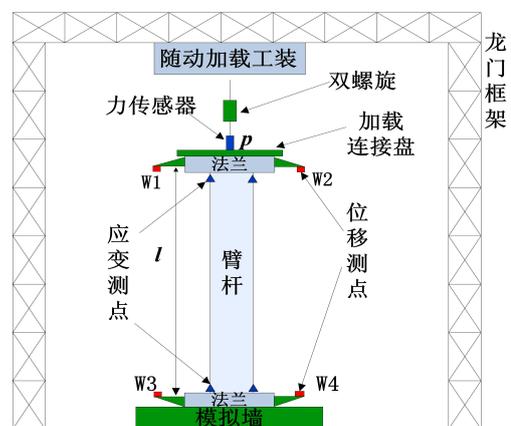


图 4 拉伸刚度测试示意图

Fig. 4 Sketch of tension stiffness test

如图4所示,在臂杆受到向上的拉力 p 后,臂杆上下端之间沿载荷作用线的相对位移为 Δ ,据此绘制力 p 和位移 Δ 之间的变化曲线,并由此曲线进一步得到等效弹簧的刚度系数:

$$K_{拉} = p/\Delta \quad (9)$$

上端面沿载荷作用线的位移变化 $\Delta_{上}$ 的计算方式如下, s_1 、 s_2 分别为测点位置到臂杆轴心的距离:

$$\Delta_{上} = \frac{s_2}{s_2 + s_1} W_1 + \frac{s_1}{s_2 + s_1} W_2 \quad (10)$$

2.3 弯曲及扭转刚度测试

臂杆进行弯曲刚度测试如图5所示,模拟臂杆在轨受弯曲载荷状态。在臂杆上部安装加载横梁,采用定滑轮和螺旋加载装置在加载横梁两端分别施加对称拉力载荷,在臂杆端部形成一弯矩 M 。位移测点布置与拉伸刚度相同。扭转刚度测试与弯曲刚度测试类似,不同的是,弯曲刚度测试中横梁两端的加载力为竖直方向,扭转刚度测试中加载力为水平方向。采用位移传感器测量臂杆上下法兰端面的相对转角,测试过程中同样监测臂杆两端的应力情况。所用测试设备与2.2节相同。

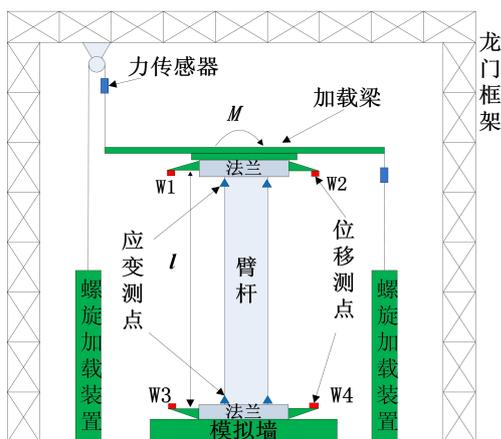


图5 弯曲刚度测试示意图

Fig.5 Sketch of bending stiffness test

如图5所示,在臂杆受到弯曲或扭转载荷后,臂杆上下端之间沿载荷作用线的相对转角为 $\Delta\theta$,据此绘制力矩 M 和转角 $\Delta\theta$ 之间的变化曲线,并由此曲线进一步得到等效弹簧的刚度系数:

$$K_{扭} = M/\Delta\theta \quad (12)$$

上端面沿载荷作用线的转角变化 $\Delta\theta_{上}$ 的计算方式如下, s_1 、 s_2 分别为测点位置到臂杆轴心的距离:

$$\Delta_{上} = \arcsin\left(\frac{s_2}{s_2 + s_1} W_1 + \frac{s_1}{s_2 + s_1} W_2\right) \quad (13)$$

3 结果与讨论

3.1 分析计算结果

宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2018年 第2期

根据臂杆铺层方式,采用软件 Nastran 建立臂杆有限元模型,臂杆边界条件为一端固支,分别开展模态分析和静力分析,得到臂杆性能参数如表1所示,臂杆模态分析图见图6。

表1 臂杆分析计算结果

Tab.1 Analysis result

一阶模态频率 /Hz	拉伸刚度 /MN·m ⁻¹	弯曲刚度 /(MN·m)·rad ⁻¹	扭转刚度 /(MN·m)·rad ⁻¹
28.81	102	1.13	0.397

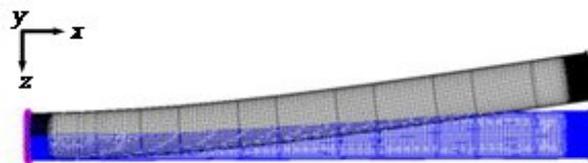


图6 臂杆模态分析

Fig.6 Modal analysis of large composites beam

3.2 试验结果

根据第二章内容开展试验,对1#~4#四根臂杆开展刚度测试,每工况测试5次,取其平均值作为最终数据。臂杆一阶模态频率测试结果见表2,均高于分析结果,但是y向与z向模态频率没有明显的分布规律,可见臂杆上的开孔并未对一阶模态频率造成影响。

表2 臂杆第一阶模态频率测试结果对比

Tab.2 First nature frequency comparison of the different large composites beams

臂杆	y向		z向	
	频率/Hz	阻尼比/%	频率/Hz	阻尼比/%
1#	30.42	0.09	29.56	0.08
2#	28.62	0.08	29.50	0.08
3#	30.09	0.08	28.90	0.07
4#	29.33	0.09	30.51	0.07

臂杆静刚度测试结果见表3,约为分析结果的70%~80%,原因为:(1)成型工艺导致高模量碳纤维折损,降低产品刚度;(2)臂杆表面有扶手安装孔与电缆走线孔,造成碳纤维断裂,影响臂杆力学性能。

静刚度测试过程中,应变测试采用酚醛基底应变片,开展绕y轴的弯曲刚度测试中应变数据如表4所示。臂杆y向两侧的轴向应变接近0,z向两侧的应变数值相接近,表明在进行刚度测试过程中,载荷加载没有发生偏载。臂杆上下两端应变分布及数值与分析结果基本一致。

表3 臂杆刚度测试结果对比

Tab.3 Stiffness comparison of the different large composites beams

臂杆	拉伸刚度 /MN·m ⁻¹	绕 y 轴弯曲刚度 /(MN·m)·rad ⁻¹	绕 z 轴弯曲刚度 /(MN·m)·rad ⁻¹	扭转刚度 /(MN·m)·rad ⁻¹
1 [#]	78.1	0.734	0.795	0.296
2 [#]	79.4	0.779	0.793	0.289
3 [#]	74.4	0.792	0.724	0.284
4 [#]	69.2	0.772	0.717	0.290

表4 臂杆 y 轴弯曲刚度测试应变数据¹⁾

Tab.4 Strain data in y-axis bending stiffness test

力矩 /N·m	上端部+y 向		上端部-y 向		上端部+z 向		上端部-z 向		下端部+y 向		下端部-y 向		下端部+z 向		下端部-z 向									
	轴	径 45°																						
600	0	0	10	-1	0	-6	72	-19	13	-71	25	0	0	0	1	0	0	-1	39	-23	15	-43	25	-11
900	-1	-2	12	-1	1	-12	98	-29	15	-104	34	-6	1	0	2	-1	0	-2	57	-34	20	-64	37	-17
1200	-1	-7	14	-2	1	-18	125	-37	18	-139	45	-10	2	-2	2	-3	1	-2	74	-45	26	-86	48	-24
1500	0	-3	21	2	6	-20	156	-43	28	-171	60	-9	7	-3	6	-5	4	-6	92	-54	33	-107	60	-29
1200	0	0	19	2	6	-13	131	-33	27	-137	49	-6	3	-1	3	-1	1	-3	75	-44	27	-86	49	-23
900	0	0	15	2	4	-8	104	-24	23	-104	38	-1	2	0	3	0	1	-1	58	-33	22	-64	38	-16
600	0	0	12	2	3	-3	74	-18	19	-69	27	0	1	0	2	0	0	-1	41	-22	16	-42	26	-10

注:1)轴、径、45°代表应变花中沿臂杆轴向、圆周切线方向以及45°方向的应变。

4 结论

(1)针对大型复合材料臂杆开展刚度测试,结合有限元方法对试验结果进行了分析,试验结果较好的反映了臂杆的力学特性。

(2)一阶模态频率测试数据与分析结果相接近,拉伸及弯曲刚度测试数据比分析结果低20%~29%,分析原因有两种,在臂杆结构体上开有多个孔洞,造成臂杆刚度下降,另外一个因素为因加工工艺原因导致臂杆表面褶皱较大,导致性能降低。

参考文献

[1]林松,王俊锋,张建宝,等.大载荷缠绕杆件的拉伸和压缩性能[J].宇航材料工艺,2012,42(3):33-38.

[2]蔡浩鹏,王俊鹏,赵锡鑫等.复合材料缠绕管弯曲载荷下的力学性能[J].玻璃钢/复合材料,2013,8:31-34.

[3]江辉.国外航天结构新材料发展简述[J].宇航材料工艺,1998,28(4):1-8.

[4]杨宇宙,钱林方.复合材料厚壁圆筒的损伤问题[J].材料科学与工程学报,2012,30(2):256-261.

[5]彭超义,鞠苏,杜刚,等.缠绕角度对碳/环氧厚壁管件轴压性能影响的有限元分析[J].宇航材料工艺,2005,35(6).

[6]张平,桂良进,范子杰.三向编织玻璃/环氧复合材料刚度性能[J].复合材料学报,2008,35(2):31-34.

[7]GINSBERY J H.白化同,李俊宝译.机械与结构振动理论与应用[M].北京:中国宇航出版社,2005.