

振动试验力限制控制力参数测量技术

沈凤霞

(北京卫星环境工程研究所, 北京 100094)

摘要: 振动环境试验力限制控制技术在航天器动力学环境试验中越来越多地被研究和应用, 在力限制控制技术中如何保证力参数测量的实施和精度是比较关键的技术。文章主要介绍了力传感器的类型、使用安装技术、合力值计算、多分量力参数测量技术, 并结合卫星承力筒的振动试验进行力限制控制试验力参数测量的实施。文章对力参数测量技术进行了比较全面的研究分析, 为进一步力限制控制的研究提供了有益的帮助。

关键词: 力参数测量; 力限制控制; 力传感器; 力测量单元

中图分类号: V416.2

文献标识码: A

文章编号: 1673-1379(2006)05-0282-06

1 前言

振动环境试验是航天器力学环境试验中最主要的试验项目之一, 目前振动环境试验的条件主要是以加速度包络线来确定的。为避免试件过试验, 主要采取在试件结构共振频率处使输入条件主动下凹或响应控制的方法。如果主动下凹或响应控制量级制定的不合理, 也会造成试件的过试验或欠试验。为避免这种情况的发生, 力限制方法越来越多地被研究和应用, 国外已有很多这方面的文章发表。目前国内也开始进入预先研究和应用阶段。

力限制控制方法考虑了试件连接面处加速度和受力两种情况, 是输入加速度量级和测量力值的双重控制方法。力限制控制试验条件即力值谱的确定通过以下3种方法^[1]:

(1) 通过计算、分析和测量两自由度或其它两个耦合系统得到;

(2) 基于系统试验数据的半经验公式;

(3) 基于耦合系统分析或简单的加速度曲线的用类似静态设计标准的计算。

在振动力限制试验中, 主要以加速度量级进行全程试验条件控制, 当试件共振时输入给试件的力值超过给定力谱值时, 实际测量的力值作为响应限制条件参与控制, 使加速度试验量级的控制必须满足力值的限制条件, 从而实现自动下凹

控制的目的, 可以有效解决试验中过试验问题。

在力限制控制试验中, 力参数的测量和精度是保证试验力限制控制质量的关键。本文针对振动试验力参数的测量技术从力传感器类型、安装要求、合力计算等方面进行介绍和探讨。

2 力传感器介绍

2.1 力传感器原理及类型

2.1.1 力传感器测量原理

各种力传感器内都包含弹性元件, 弹性元件在力的作用下发生变形, 通过弹簧的变形可以确定作用力的大小。为了获得较高的测量分辨率, 要求弹性元件应该有足够大的弹性。但是较大的弹性却限制了传感器的频率范围。同时由于力的作用, 弹性元件的几何形状以及力臂关系均会发生变化。为了克服这一限制, 用压电测量原理测量动态力是一种非常好的技术手段。

压电材料如石英, 在力的作用下产生与所受外力成比例的电荷, 作用力越大电荷越多。在压电式传感器中, 石英片既是弹性元件, 同时也是测量换能器。由于石英的刚性很高, 力作用下的位移非常小, 一般在几 μm 内。这种几乎无位移的测量, 对于缓慢的准静态过程来说误差很小; 对于快速过程的测量, 由于石英的高刚度和与之关联的高固有频率, 其优越性也是其它传感器无法

收稿日期: 2006-08-08; 修回日期: 2006-08-14

作者简介: 沈凤霞(1964-), 女, 高级工程师, 主要从事航天器动力学环境试验的测量和数据分析工作。联系电话: (010) 68747420。

比拟的。

2.1.2 力传感器的类型

力参数的测量包括力值和力矩。力传感器单从使用的频率范围可以分为测量动态和静态力两种。

从制作力传感器的敏感元件分, 通常有利用应变测量原理的应变型力传感器, 利用压电原理制作的电荷型力传感器, 还有利用材料的自身变形测量力的机械测力环等。

一般应变型力传感器体积较大, 测量速率低, 灵敏度偏低, 输出信号小(最大电压在 20~30 mV 范围), 使用环境温度范围窄, 主要用于静态力测量。

电荷型力传感器体积小、动态性能好、灵敏度高、使用的环境温度范围可以很宽, 适于测量动态或准静态力。石英晶片电荷型力传感器包括有单向和三向力传感器、以及扭矩传感器等几种。

振动环境试验力参数测量应用的范围主要是动态力测量, 必须使用符合试验频率范围要求的力传感器, 因此主要选择使用电荷型力传感器。

2.2 力传感器比较

压电晶体式和应变计式是两种目前主要使用的测量力传感器, 由于它们测量原理不同, 适用范围也不同。压电晶体式力传感器适宜测量动态力范围, 而应变计式力传感器更适宜测量静态力范围。但是, 压电晶体式力传感器也可以测量“接近”零频的准静态力值, 应变计式力传感器也可以测量在一定上限频率范围内的动态力。

2.2.1 应变计式力传感器

应变计式力传感器利用应变值与受力之间的响应关系输出力值, 使用贴于传感器偏转结构上的应变片的应变值变化, 来作为力值转换的电敏感元件。因应变测量时桥路的不平衡输出与激励电源有关, 输出电压信号既与使用的桥路电源电压成比例, 也与所加的力成比例, 使得传感器的灵敏度从原理上就依赖于偏转结构的强度。这种结构要求必须在所能承受的最大标称力范围内使用, 否则会造成传感器的损坏。

应变计式力传感器的输出灵敏度比较低, 通

常在 20~30 mV 范围内, 而且需要提供指标非常高的直流或交流电源供测量桥路使用。

设计用于载荷传递方式的传感器敏感元件的偏转结构会导致下列主要缺陷:

- (1) 敏感元件结构会产生结构疲劳;
- (2) 敏感元件的刚度限制了频率响应;
- (3) 敏感材料和应变片粘贴胶会随着使用时间产生灵敏度漂移, 必须要求周期性的标定;
- (4) 温度变化影响应变片、粘贴胶、电阻元件的机械和电子特性, 引起输出信号产生与所测量力值无关的变化;
- (5) 应变片粘贴胶限制了传感器的使用温度范围。

2.2.2 压电晶体式力传感器

压电晶体式力传感器是利用自然压电现象产生的电荷量输出直接响应于所受的力, 电荷输出的灵敏度表示为皮库每牛顿(pC/N), 得自于晶体的材料特性, 不会随使用时间变化, 温度变化的影响也非常小(0.01%每度)。压电晶体式力传感器系列可以提供大范围力值的测量, 而不会产生灵敏度的衰减, 并且没有可动部分, 不会产生疲劳失效。压电晶体式力传感器的刚度非常高, 具有非常好的动态特性。

压电晶体式力传感器的另一个优点是“量程可调”, 电荷放大器将压电晶体式力传感器的电荷输出, 转换为与所受力成比例的电压输出, 利用“零”复位和量程调整功能, 一个压电晶体式力传感器可以测量低于其量程范围内的任何量级的力值, 这实际上相当于提供了一个“zoom-in”功能, 即在一个非常大的背景力的情况下, 对小量级力的变化, 也提供了高精度、高分辨率的测量能力。

2.3 压电式力传感器安装要求

压电式力传感器安装简便, 一般情况下力传感器的安装过程需要加预紧力。预紧后的力传感器可以测量压力和拉力(相当于减少传感器的预紧)。横向力通过摩擦传递。此外预紧可以去除微间隙, 从而确保测量系统的高刚度和宽频率范围。预紧后由于预紧螺栓构成力的分流, 传感器只能测量全部力的 90%左右。对于精确的测量, 传感

器必须在安装和预紧后进行二次标定。

2.3.1 直接和间接测量力

压电式力传感器可以直接或间接测量力。

直接测量力时,传感器安装在力的通道中,测量全部的力,因此测量非常准确,实际上与力的作用点无关。

当传感器不能安装在力的直接通道时,可采用间接测量方法。部分力通过旁路传递。由于只有部分力被测量,间接测力的系统必须在安装后进行标定。系统的灵敏度与力的作用点有关。此外安装过程也会影响测量的线性和迟滞。

2.3.2 压电式测量链

压电式力传感器,具有同一灵敏度的几个传感器可以并联使用。这种情况下输出信号等于所有单个力的总和。多个力传感器通过高绝缘特殊电缆与电荷放大器相连,电荷放大器将传感器的电荷信号成比例地转换成电压信号。电荷放大器上可以设置传感器的灵敏度和测量范围。这种标定过的测量链输出的信号可以进行直接采集和处理。

2.3.3 振动试验力通道连接平面

振动试验使用振动台系统,按试验要求给定的条件对试件进行激励。

在振动台与试件之间测量由振动台加速度激励传递给试件的力值,力传感器需要安装在力的传递通道中,测量连接面传递给试件的全部力。振动台与试件之间的连接是平面连接,在连接面之间需要安装3个以上的力传感器,通常使用4~8个或更多数量的力传感器进行并行连接。

多点连接其平面度必须满足一定要求,才能保证多个力传感器载荷分布均匀,使每个力传感器受力均匀,并在所使用的量程范围内。必须避免单个力传感器受力集中,造成超过其使用量程的情况发生,使测量值不准。

为测量振动试验过程中振动台与试件之间的作用力,需要设计加工专用的测力安装机械接口。力参数测量机械接口的设计应该考虑以下几点^[2]:

- (1) 在试件安装面与振动台面之间使用螺栓连接,保证力与力矩比较好地传递;
- (2) 保证力传感器并行连接的平面度要求,

使两个接口之间载荷分布均匀;

(3) 保证高的连接刚度使试件刚性地连接在接口上,保证对试件的约束作用,避免试件在试验过程出现撞击信号;

(4) 对于振动台、接口连接平台、振动夹具,不同材料之间的温度弹性变形要满足使用要求;

(5) 保证足够的连接平台高度,避免接口与试件表面安装物相互干涉,影响安装。

3 多分量力测量技术

3.1 多分量力传感器

利用压电式测量原理是设计三向力传感器的理想选择。三向力传感器的组成由一对具有纵向效应的石英晶体片测量纵向分力 F_z , 另外两对不同剪切效应的石英晶体片测量两个横向分力 (F_x 和 F_y)。由于剪切力只能通过摩擦传递,三向力传感器必须在足够预紧的情况下安装。

3.2 带预紧的力传感器测量单元

因力传感器安装的平面度要求很高,为使两个测量物体之间的多个(如8个以上)力传感器安装处于同一平面,保证测量精度,Kistler公司将力传感器做成带上下安装面及预紧力的力测量单元FMD (Force Measurement Device),同时解决了力传感器安装后需要重新标定的问题。

力测量单元保证了使多个力传感器安装平面度达到一定的要求,也解决了力传感器安装及预紧力问题。其优点是:

(1) 检定灵敏度已经是排除了传感器安装螺栓预紧力影响后的灵敏度,这样不必每次使用前因安装不同而重新标检;

(2) 连接刚度强、一致、稳定;

(3) 保证比较小的横向灵敏度的影响;

(4) 便于不同试验时传感器的安装与绝缘;

(5) 便于多点安装的调整,保证多点安装的平面度要求。

图1所示为Kistler公司生产的9377型号力测量单元^[3]。

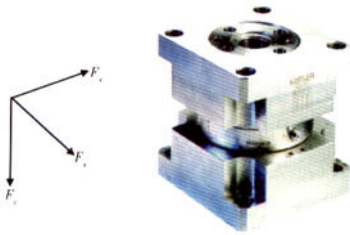


图 1 Kistler 公司 9377 型号力测量单元
Fig.1 The type 9377 force sensor of Kistler Instrument AG

3.3 力参数分量和测力平台

力参数分量为所测量坐标系各轴向的力值和力矩, 单向力传感器只输出传感器轴向的力值, 力矩值根据作用点的距离计算。

三向力传感器的输出有 6 个分量, 分别为 X、Y、Z 三个坐标方向的分力, 力矩值的输出同样需要给出作用点的距离。

多分量力测量一般不是由单个力传感器组成, 而是由 3 个或 4 个力传感器一起组装成测力计或测力平台, 利用压电传感器特性, 可以并联具有同一灵敏度的多个传感器, 获得的输出信号等于单个力的代数和。因此一个测力计同单个的多分量传感器一样, 分别测量与力的作用点无关的 3 个力。

作用于测力计的力矩虽然对传感器有载荷作用, 但由于信号并联而不能测量。当传感器不并联时, 力矩可由传感器获得的单个输出信号确定。这种系统测量合力的 3 个分力和合力矩的 3 个分量。力矩以传感器排列的坐标系为基准。大部分由三向测力单元组成的测力计和测力平台既适用于 3 分量力的测量, 也适用于 6 分量力-力矩的测量, 如图 2 所示。

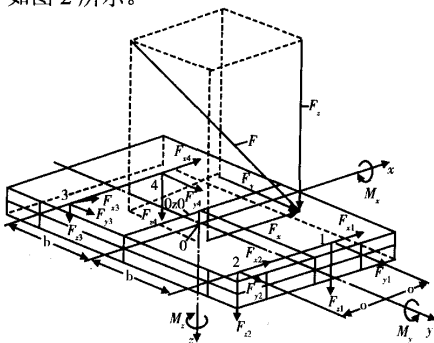


图 2 6 分量力-力矩的测量示意图
Fig.2 The measurement of 6-component force and moment

图中:

$$F_x = F_{x1} + F_{x2} + F_{x3} + F_{x4} \quad (1)$$

$$F_y = F_{y1} + F_{y2} + F_{y3} + F_{y4} \quad (2)$$

$$F_z = F_{z1} + F_{z2} + F_{z3} + F_{z4} \quad (3)$$

$$M_x = b(F_{z1} + F_{z2} - F_{z3} - F_{z4}) \quad (4)$$

$$M_y = a(-F_{z1} + F_{z2} + F_{z3} - F_{z4}) \quad (5)$$

$$M_z = b(-F_{x1} - F_{x2} + F_{x3} + F_{x4}) + a(F_{y1} + F_{y2} - F_{y3} - F_{y4}) \quad (6)$$

由力测量单元组成的测力计和测力平台具有以下优点:

- (1) 具有非常小的横向灵敏度干扰;
- (2) 具有良好的地绝缘, 减少地回路干扰问题;
- (3) 力传感器连接平面平整、刚性、洁净;
- (4) 4 个力测量单元连接的平面可以保护力矩对每个传感器的影响;
- (5) 不用进行连接后的再校准, 连接后直接进行测量;
- (6) 连接刚度高, 频响范围宽;
- (7) 多个力测量单元灵敏度相同时, 进行并行连接, 输入给电荷放大器, 直接得到合力值;
- (8) 用多通道电荷放大器可进行三个方向力、力矩测量。

组装测力平台需要注意的问题^[4]:

- (1) 多个力测量单元连接必须保证机械平面度要求, 平台表面提供多种连接螺孔;
- (2) 螺钉连接刚度保证在测量最大力值时, 不能产生缝隙现象;
- (3) 平台上平面尽可能使压力处于平面中心;
- (4) 每个方向的测量力矩不能超出最大使用范围, 如果超出会影响此方向力值的测量范围。

4 振动试验过程力参数测量实施

4.1 振动试验力参数测量装置

2006 年 3 月在 2×20 kN 振动台系统进行了卫星承力筒垂直向的力限制控制正弦扫描振动试验的实际调试。

因本次试验在振动台的垂直方向进行, 使用的是 4 个单向垫圈式力传感器进行力参数测量, 在力限试验准备阶段为安装 4 个力传感器专门设计加工了连接安装环, 通过安装环将 4 个力传感器安装在试验夹具与试件之间。安装环上通过 4

个连接螺栓，穿过4个力传感器的中心安装孔，施加预紧力后，与振动试验夹具连接，上表面再安装试件。试验安装方式，以及力传感器的连接方式均如图3所示。

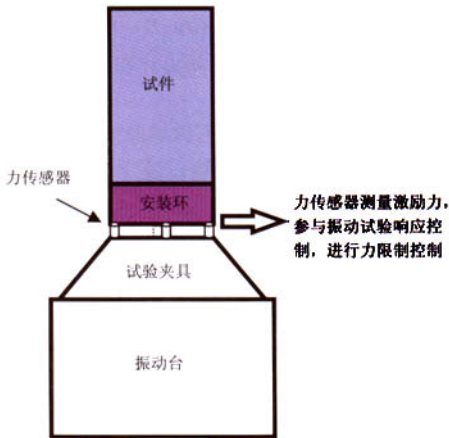


图3 试验安装接口
Fig.3 Interface of the test installing

4.2 力值计算

4个单向力传感器在一个平面内测量力，灵敏度相同，将4个力传感器的连接线四合一直接并联输入电荷放大器的一个通道，输出即是4个力传感器的合力值。

实际修正后的力传感器灵敏度直接使用即可计算合力。将力传感器连接的电荷放大器的输出直接接到振动台控制系统的一个通道作为力谱限制控制的响应控制条件参与响应控制。

4.3 力参数测量精度分析

目前压电晶体式加速度传感器的测量误差在使用的满量程范围比较大的情况下可以达到小于±5%，力传感器的安装和量程等满足使用要求其测量误差同样可以达到小于±5%的范围。

2×20 kN 振动台测量力的数量级比较高，一般都在几十 kN 力以上，力传感器的灵敏度反应阈值为 0.01 N，这样使用的传感器的满度输出范围比较高，测量线性比较好，因此力值测量的精度可以达到比较高的范围。

4.4 数据结果

用力限制控制试验方法进行振动试验量级的

响应控制和下凹，更接近于航天器实际发射情况下的受力。

图4是用主动加速度下凹和力限制控制试验两种方法所做的同量级试验试件结构同一点响应曲线的比较，从图中可以看出力限制控制试验方法（红色曲线）在共振处的结构响应比加速度下凹控制（黑色曲线）小的多，同时从控制曲线也可以看出力限制控制比加速度下凹控制超差小。

因为力值响应控制信号，在共振时力值比较大，测量通道使用的测量范围占测量仪器的满量程比例比较高，信噪比非常好，比加速度测量的信噪比高很多，所以控制效果更好。

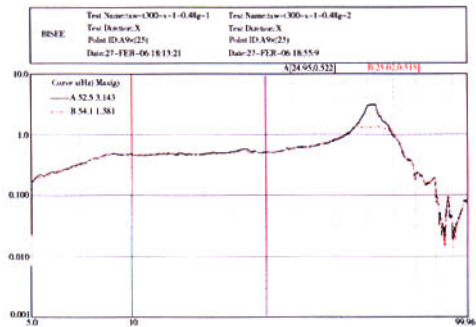


图4 同量级试验加速度下凹和力限制控制两种方法试件结构响应的比较
Fig.4 Comparison of structure response of the same test level for acceleration notching control and force limit control

在产品共振频率处，力限制控制试验的结构响应量级明显低于加速度控制试验的响应量级，可以有效减轻试件过试验问题。

5 讨论

振动试验力限制方法在我国航天器振动环境试验中的研究和应用已经开始，要想将力限制振动试验方法全面应用到我国的航天器振动环境试验中去，除了对如何确定力谱的合理性进行研究外，对力参数测量技术的研究也是必须首先进行的，包括对力传感器测量原理的理解和掌握、力传感器的安装技术、试验夹具的设计、力参数测量精度等方面。

此外振动台横向试验时三方向力和力矩的测量和处理技术，力限制振动试验夹具与加速度试验夹具所带来的安装界面差异，造成对试件在试

验过程中共振频率的偏移, 随机振动试验中力限制谱的确定等都需要进行进一步的探讨和实际调试。

参考文献 (References)

- [1] 张俊刚, 庞贺伟. 振动试验中力限制控制技术[J]. 航天器环境工程, 2005, 22(5): 253~256 [Zhang Jungang, Peng Hewei. The force limited control technique in vibration test[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2005, 22(5): 253~256]
- [2] Brunner Otto, Braeken Richard. Force measurement device for ARIANE 5 payloads[A]. Proceedings of the

5th international symposium on environmental testing for space Programmes[C]. Noordwijk, Netherlands, 2004-8: 233~240

- [3] Force sensor instruction manual[M]. Kistler Instrumente AG
- [4] Employment of a measurement device during the rosetta STM sine vibration tests[A]. Proceedings of the european conference on spacecraft structures, material and mechanical testing[C]. Noordwijk, Netherlands, 2001-3

The Measurement of Force Parameters in Vibration Test with Force Limited Method

SHEN Fengxia

(Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering, Beijing 100094, China)

Abstract: The measurement of force parameters is the basis of force limited vibration tests. The techniques of measuring of force parameters in force limited vibration tests are introduced, including the types of force sensor, the importance of the preload for quartz force sensor fixing, force signal acquisition and analysis, the measurement of 6-component force and moment parameters using the FMD, and a real force limited vibration test.

Key words: measurement of force; force limited in vibration test; force sensor; FMD

欢迎订阅 2007 年《装备环境工程》杂志

《装备环境工程》受国防科学技术工业委员会直接支持, 由中国兵器工业第九研究所和国防科技工业自然环境试验研究中心共同主办, 面向国内外公开发刊, 是我国国防科技工业的重点期刊。

《装备环境工程》是中国科技论文统计源期刊、中国学术期刊综合评价数据库来源期刊、中国核心期刊(遴选)数据库收录期刊、中国期刊网全文数据库收录期刊、万方数据库-数字化期刊群全文上网期刊、中国学术期刊(光盘版)入编期刊、中文科技期刊数据库收录期刊。其国外收录机构有: 美国《化学文摘》(CA)、美国《剑桥科学文摘》(CSA)等。

《装备环境工程》报道的主要内容有: 国内外装备与产品环境工程专业发展动态, 以及经验信息交流等; 自然环境和诱发环境中, 由气候环境条件因素、机械环境条件因素、生物因素、辐射因素和人为因素对产品和材料造成的腐蚀、老化、失效和损伤等方面的相关专业研究和防护技术研究; 自然和诱发环境试验、环境监测与分析研究等专业范围。

《装备环境工程》为双月刊, 大 16 开本, 每期订价 15 元, 全年 90 元。国内统一刊号 CN50-1170/X, 国际标准刊号 ISSN 1672-9242, 邮发代号 78-7。全国各地邮局均可订阅, 逾期可随时向编辑部补订。

欢迎订阅、投稿、刊登广告

编辑部地址: 重庆市九龙坡区石桥铺渝州路 33 号

邮编: 400039

开户行: 重庆市中国银行石桥铺分理处

户名: 重庆市西南科技贸易开发部

帐号: 839900254008091001

电话: 023-68792835

传真: 023-68793154

电子信箱: hjgc@vip.163.com