

计算机振动测量与分析系统

北京清华大学自动化系(100084) 陈文军 杜继宏
清华大学力学系 蔺书田

摘要: 介绍一种高效率、高精度的振动测量和分析方法。与传统方法不同,该方法是基于计算机及其运行环境的一种无接触测量方法,通过测量与分析软件实现对振动图象的数字化处理,从而获得传统方法无法达到的满意效果。

关键词: 振动 测量与分析 图象处理

太阳能电池帆板是人造卫星的主要能源。在卫星巡航时,太阳能电池帆板必须随时根据阳光照射的方向来调整自己的方位。这就相当于在不断给太阳能电池帆板施加激励,由于电池帆板具有薄而大的物理特性,所以这个激励很容易导致振颤。在一定条件下,还有可能演变成共振,这样就非常容易损坏太阳能电池帆板,以至于卫星无法正常工作。因此,对卫星的电池帆板的振动特性做一个详细而精确的测量与分析,并由此来决定帆板的控制结构与控制规律,对于保障卫星的安全运行具有重大的意义。这正是开发这个系统的初衷。同时,任何一个力学系统在工作时都有可能发生振动,而且这些振动往往会影响该系统的正常工作。而当前所使用的测量和分析方法主要是力学测量与分析方法,这种方法测量系统庞大,数据分析效率低下,甚至有时会损坏待测结构并且所获得的结果具有较大的随机性。所以,提出一种基于计算机的高效、高精度的测量与分析的方法具有广阔前景和深远意义。

1 系统整体组成框图

计算机振动测量分析系统主要由待测物体部分、光学成像部分、数据传输部分、计算分析部分和结果输出部分构成。其具体结构如图1所示。

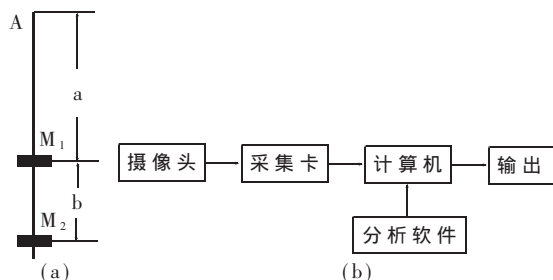


图1 测量与分析系统整体结构图

2 系统主要硬件介绍

2.1 CCD黑白摄像头

CCD摄像管是电荷耦合器件,在硅片上集成了以阵列分布的成像单元及相应的控制电路、输出电路。当有一束平行光照射到镜头上时,所有的成像单元处

于导通状态,输出的图象为全亮平面(图2a);当有一个U形物体挡在镜头前方时,由于部分光线被挡住,导致部分成像单元处于截止状态,所以输出图象就会形成一个U形的阴影(图2b)。当物体振动时,在任何时刻物体的形态都被以这种方式记录下来了。光电三极管分布越密,分辨率就越高。

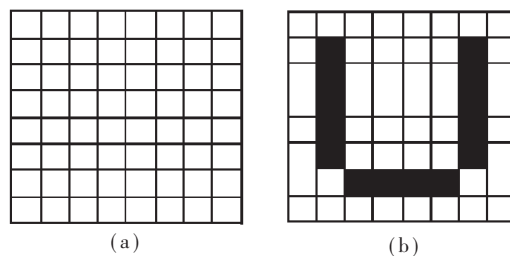


图2 CCD摄像头成像原理

2.2 图象采集卡

摄像头传送过来的电信号与计算机之间的接口是图象采集卡。本系统所使用的图象采集卡为DH-VRT-CG200图象卡,是一种基于PCI总线的高速彩色图象采集卡。该卡输入彩色视频信号经过数字解码器、模数转换器和色空变换等处理,通过PCI总线传送到计算机上的VGA卡实时显示,同时还能将数据送到内存实时存储,以便作进一步的数据处理。数据的传送是由采集卡自身控制的,无须CPU的参与。其传送速度可以达到40MB/s,每秒可传送24幅清晰的图像。

3 系统的软件构成

3.1 与图象采集卡有关的函数

由于图象数据是采集卡直接送到内存的,所以必须有配套的库函数来进行这方面的处理。主要的库函数包括图象卡的调用,图象参数的选择和内存的申请与释放。通过这些库函数的调用,我们可以很方便地选择一定的色空格式将图象数据送到指定的内存块去。

3.2 关于图像提取的算法

3.2.1 动态分块滤波算法

由于从摄像机传送过来的数据是物体及其周围

环境的真实反映,所以存在着各种外在的干扰。即使在实验中尽量改善测量环境,如让与待分析振动无关的物体(如支撑物等)不要进入图象,增加光线照射的强度,来减少物体自身投影的影响。但是有用信号中混有的干扰信号总是无法完全消除的。因此,在对原始图象进行识别处理之前,必须将上述的干扰因素排除,也就是要先对原始采样信号进行滤波。由于干扰信号的存在具有随机性,所以本系统设计了“动态分区滤波”的方法来进行处理。该方法的具体算法如下:第一步,将整个图象区用十字形划分为四块 B_1 、 B_2 、 B_3 和 B_4 ,如图 3 所示。

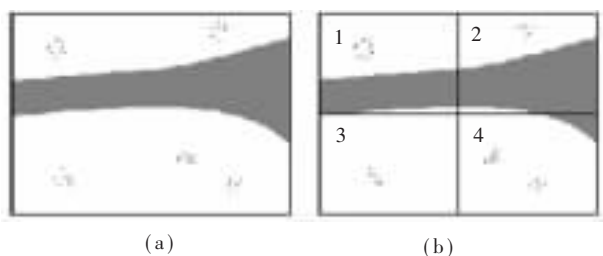


图 3 动态分区滤波第一步

然后通过下面的公式求出每块的平均灰度值 H_1 、 H_2 、 H_3 和 H_4 。其中 H 的上标(0)代表第零次分区,以下上标意义与此相同。

$$H_{avi}^{(0)}(k) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N H(i)^{(0,k)} \quad (1)$$

再将每一个分块按上述方法分成四等份 B_{11} 、 B_{12} 、 B_{13} 和 B_{14} ,这样就把噪音信号进行“分而滤之”的处理,如图 4 所示。

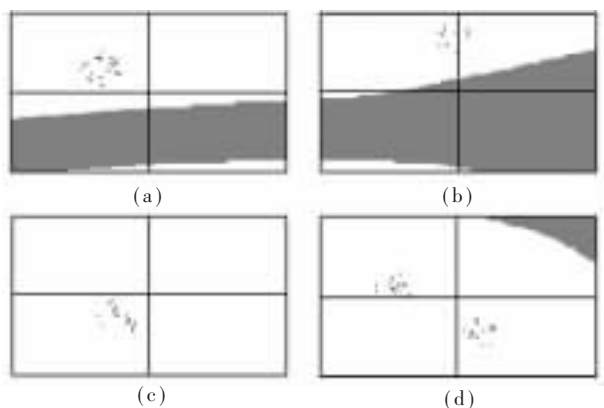


图 4 动态分区滤波第二步

利用类似的公式对每小块求出块平均灰度值 H_{11} 、 H_{12} 、 H_{13} 和 H_{14} 。

$$H_{avi}^{(0)}(k) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N H(i)^{(1,k)} \quad (2)$$

然后将这四个灰度值和母分区灰度值 H_1 作比较,定义如下控制量:

$$\delta_{1,0} = \text{abs}[\max(H_{avi}^{(1)}(k)) - H_{avi}^{(0)}(k')] \quad (3)$$

可以重复以上的步骤,直到控制量 δ 小于某一指定值,可以认为在此时的每一小块中所出现的灰度值奇异点为干扰信号。这样,就能用当前的块灰度平均值代替块中的各点灰度值,从而也就到达了滤去噪音信号的目的。

3.2.2 二值化算法

滤波以后,就可以对图象进行二值化处理了。二值化算法的核心在于如何获得一个好的灰度阈值,使得图象的二值化处理能达到最佳效果。如果该阈值选得过亮,那么图象就会在物体本身之外产生许多黑斑,达不到分辨的目的;如果该阈值选得过暗,又会使得待测物体的外形变小,导致数据失真。为了对图象进行更好的提取,必须选择一个较好的阈值自动选择算法。在计算机显示器上,每个像素的颜色有 R,G,B 三部分构成,当 $R=G=B=255$ 时,该点为白色,也就是对应为亮点;当 $R=G=B=0$ 时该点为黑色,也就是对应为暗点。由于图象是黑白的,所以对于同一点,其 R,G,B 的值大致相同,首先将屏幕上每个像素的 R 值读到一个二维矩阵 $R[i][j]$ 中,由于实验背景选定为白色,而且已经对图象进行了滤波处理,因此得到的图象点的 R 值的分布应该是在振动物体的位置上有个突起的峰(谷),而其他位置上变化应该很平滑。所以通过对这 $i \times j$ 个值求平均值得到 R_{avi} 作为原始阈值是具有分辨能力的。通过实验,在此阈值控制下,图象的二值化效果一般能够满足要求。为了进行弥补,系统另外设置了人工控制的模式。也就是在阈值附近通过手动控件进行调整,并随时监控图象处理的结果,直到满意为止。

3.2.3 图象线化处理算法

该算法的主要目的就是从中提取到可以进行后处理的数据。首先按列找到二值化处理后图象的阴影上、下边沿,按着两个边沿数据求一个平均值 $Y_{avi}[i]$ 。将这些值看成是一维振动结构的中心线,在忽略物体材料的微小不均匀性的情况下,该曲线的形态就能认为是物体的振动形态。如图 5 所示。

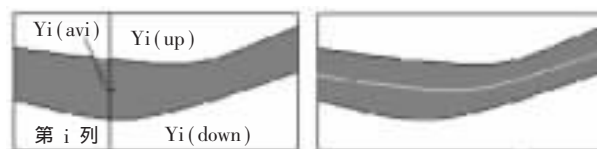


图 5 图像线化处理示例

将这些数据存储在文件中,准备进行参数求解和分析。由于显示器的最小单位是像素,所以在求取 $Yi(avi)$ 时必须用整型数据进行运算。这样在所得到的中心线上会出现一些不光滑的地方。对此系统将数据读到分析模块中时,采用了线性插值和二次曲

线插值的方法来进行平滑处理, 获得了良好的效果。

3.2.4 振动参数分析的算法

通过上述各步骤的图象处理工作, 可以获得结构(如横梁)上的任意点的 $X(k)$ 采样函数。参数分析的基本算法就是对 $X(k)$ 进行离散傅立叶变换, 并在频域内进行分析处理。通过对幅值/相位图的分析, 就能得到各阶振型的频率和其它所需要的各种参数。这个模块的功能通过调用 Matlab 库函数和编程来实现。

4 对系统的测试和结果

试件采用图 1(a)所示的一维振动结构, 其具体结构如图 6 所示。



图 6 待测结构说明图

用本系统对其振型作了鉴定性的测量和分析。所使用的待测物体的材料为有机玻璃, 总长为 110cm, 宽度为 5cm, 厚度为 0.4cm。摄像头垂直照射在厚度方向上。由于采用的采集卡的采集速度为 24 幅/秒, 所以在该试件上加上两个质量适当的砝码作为配重来减缓振动频率。根据振动理论, 如果改变配重 M_1 和 M_2 的质量, 或者改变长度 a 和 b 的值(见图 1)都会引起各阶振型所对应的频率发生移动。因此, 在改变这些参数的条件下进行了大量的数据采集与分析实验。选取了两张有代表性的频谱曲线进行比较。如图 7、图 8 所示。

在上述两张频谱图上, 可以清晰地看到一阶振型和二阶振型所对应的频率发生了移动。而且经过计算可以发现两张图上频率比值也发生了变化。这正是由于改变了配重 M_1 和 M_2 在待测物体上的位置, 根据振动理论, 必然会发生这种现象。由此也就间接地证明了本系统的可用性。还通过建立初步数学模型并结

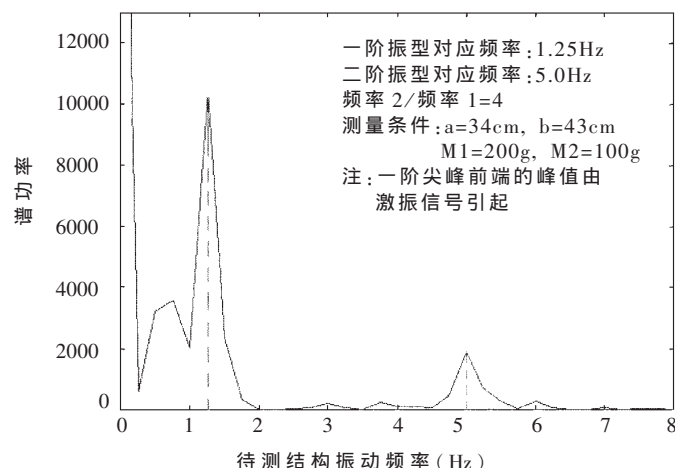


图 7 待测结构振动频谱分析曲线图

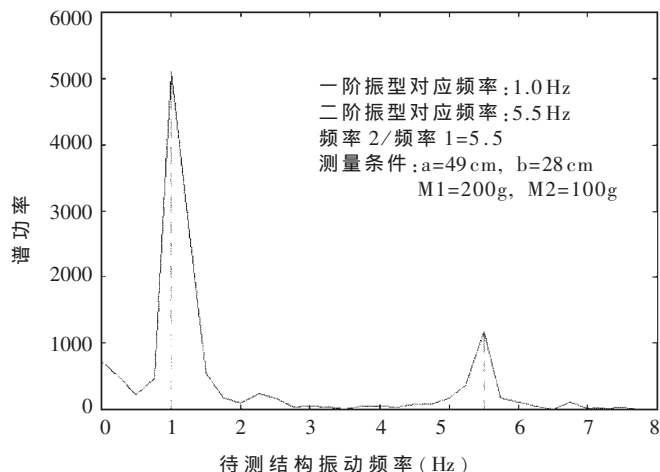


图 8 待测结构振动频谱分析曲线图

合振动理论的方法进行了一些估算, 其结果也与实验结果相吻合。

5 系统改进和进一步的工作

本系统达到了精确、高效的目的。有待改进的问题是: 首先, 由于所采用的摄像头的采样频率为电视频率, 所以在振动频率高于 2Hz 时会出现图象严重模糊, 这就对图象提取的算法提出了很高的甚至是不可达到的要求。为了使本系统能适用于高频分析, 必须采用采集速度更快的图像采集卡。其次, 通过上面两张频谱图看到高阶振型的频率的谱功率相当的微小, 以至几乎无法发现。为了解决这个问题, 一方面可以通过提高摄像头的分辨率的途径, 使得隐藏在噪音信号中的小幅值高阶振型能够较好地分辨出来; 同时还可以通过使用激振器进行激励以及改进图像处理的算法等方法来加以改善。在这些改进的基础上, 这种基于计算机图象处理的振动测量和分析方法将有很广阔的应用前景。

对于一维结构进行了大量的测量和分析实验, 已经取得了较好的结果。还要针对二维面结构进行测量分析。主要设想是利用现有分析一维结构的结果, 通过在面结构上画线条, 或者打光栅的方法, 实现将二维结构一维化来进行测量和分析。具体结果将在后续的文章中介绍。

参考文献

- 1 倪振华. 振动力学. 西安: 西安交通大学出版社, 1989
- 2 图像处理技术. 上海: 上海交通大学出版社, 1988

(收稿日期: 2000-06-15)