超声测力仪

张兆铭

（中国船舶科学研究中心）

在一些重要场合，需要实地监测螺栓中的轴向力，利用超声波监测螺栓轴向力的方法，国内外陆续有人研究，但一般认为尚未进入实用化阶段。本文介绍的“超声测力仪”是研究实用型数字直读式超声波螺栓轴力监测仪器的初步尝试。本仪器采用的是一种反射—振荡器型超声频谱仪(ROUS)，它由特殊形式的收—发一体化换能器和选通放大器构成基本振荡环节，其振荡频率随被测螺栓内的轴力而变。试验结果表明：针对被紧固工件的公称尺寸将仪器调节好之后，螺栓内的轴向力与频率变化量之间呈较好的线性关系，仪器可将螺栓轴向力直接以公斤值指示出来。

一、引　　言

五十年代初Hughs和Kelly 导出了超声波传播速度与物体内部压力之间的关系式。六十年代末Crecraft和Mahadevan 分别用实验证实了这种关系。此后陆续有人从事这方面的研究，试图用超声波进行应力测量，将其作为一门新技术而引入实验力学领域，并编造了“声测弹性”(acousto—elasticity)和“声弹性力学”(sono—elasticity) 这两个术语来称呼这种技术，以后又采用了“声学双折射”(acoustical birefringence)的名称。

在一些重要的场合，需要实地监测螺栓中的张力或应力。不少人在这个实际测量技术难题上集中了很大的注意力。目前最常用的方法是用扭力板手测量螺栓的拧紧力再用公式换算出轴向张力。由于拧螺钉(或螺母)时产生的摩擦力是变化的，所以算出来的张力很不精确。七十年代以来，不少人把声弹性技术应用于监测螺栓中的张力，他们作了一些实验研究，并取得了一些结果，但一般认为尚未进入实用化阶段[1]。实验也都是由通过仪器仪表临时搭成的方案进行的。实验的实质是进行声速测量，因此，在实验研究中各种各样声速测量方法都有人试过，结果大同小异。1976年，Langley研究中心的研究人员提出了一种“反射——振荡器型超声频谱仪(ROUS)系统的方法[2]，[3]。这种方法比较简洁。本文所述的工作就是以此方法为基础研制一台“超声测力仪”，这是研制实用型数字直读式超声波螺栓轴力监测仪器的初步尝试。

二、工作原理

ROUS系统是选通放大器和粘贴在螺钉头部平面上收发一体化换能器连接成的闭环系统。换能器在这里是个二端口反馈网络。适当调节放大器的参数很容易使这个系统起振，成为连续波正弦振荡器。

假如把螺钉简化成一个圆柱体，而且其长度在上述振荡频率下为波长的整数倍。则收、发两个端口信号间的相位差为：

$$\theta = 2\pi \cdot n = \frac{2\pi f \cdot 2l}{c}$$

$$\therefore \quad c = \frac{2l}{n} f \qquad (1)$$

式中c为声速，l 为螺钉长度，f 为频率， n 为整数。

另一方面，根据声弹性理论分析，得到

考虑了应力与应变之间存在非线性关系之后材料中声速的表达式为：

$$c = c_0(1 + A\sigma) \qquad (2)$$

式中c_0为应力$\sigma = 0$时的声速。A 是个常数，由材料常数决定。

比较(1)、(2)两式即可得螺钉中张力的表达式：

$$F = S\sigma = \frac{S}{f_0 A}(f - f_0) \qquad (1)$$

式中S为螺钉的横截面积。

根据式(3)拟定出超声测力仪的原理框图如图(1)所示

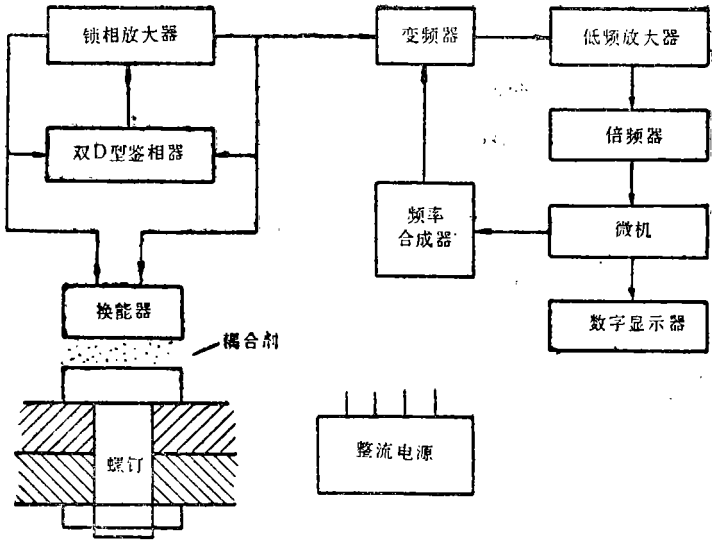


图1、超声测力仪原理框图

仪器中所谓的收发一体化换能器，主要特点是压电晶片为多圈同心环结构，外圆环用于发射，内圆片用于接收，中间为绝缘沟。根据情况也可以将压晶片划分为偶数个扇面区，相间连接起来，一组作发射，另一组作接收。

当闭环系统起振后，放大器输出端的电信号即通过换能器的发射部分向螺钉中发射超声波，经过往返路程后回到换能器接收部份并被转换为电信号加到放大器输入端。如此循环维持振荡。这里利用鉴相器和锁相放大器，目的是使换能器接收端信号和发射端信号保持同相位，使之与式(2)相符合。

简易频率合成器把来自微机的晶振信号变换成接近于f_0频率稳定的信号送给变频器。倍频是为了提高仪器的测力灵敏度。

三、仪器的使用

实际上超声波在螺钉中的传播情况非常复杂，除了端面反射外还有各处螺纹上的散射。综合结果使得张力与频率之间不能很好地遵循式(3)的关系。为此，仪器中配备微机以资补救。而且，使用仪器时必须针对被测螺钉的具体使用场合，事先进行详细标定。

在使用中还应对温度的影响给予特别的注意，因为温度对声速的影响与声弹性效应属于同一个数量级。目前对此尚未作充分研究，只能尽量做到在相同的温度下进行标定和监测。

在这种情况下仪器的测量误差大约在5%左右。 （下转第48页）

路的输出信号小，但稍进行放大，作为可控硅的触发信号是绰绰有余的。

晶体管功率振荡是近年来出现的比较先进的电路。此电路对晶体管的优缺点巧妙地进行了扬长避短，使电路非常简单，大大提高了设备的性能价格比。并且有电效率高，机型小等优点。上超厂近几年来开发生产的超声清洗机都是采用这种晶体管电路的。型号有CQ50、CQ250、CQ500、CQ1K、CQ2K；功率分别为50W、250W、500W、1KW、2KW；频率有20KHz和33KHz两种。

匹配在电子线路中是非常重要的一环。它直接影响机器工作状态的好坏，工作效率的高低。

在清洗机中，对电子线路的末级而言，换能器是负载。进而，包括缸体，溶液，甚至被清洗物体也可认为是末级输出的负载。压电陶瓷换能器本身是一容性高阻，由于工艺的原因，晶片之间参数相当离散。清洗槽内洗液的不同种类和使用的多少，最后，被洗物体的千差万别，使得清洗机输出电路的负载变化非常大，这就给匹配带来很大的困难。

上超厂生产的电子管系列清洗机都是采用输出变压器使负载与功放电路进行匹配的。由于电子管的工作电压比较高，加之电子管对波形畸变等影响的“忍受”能力比较强，所以用输出变压器可以比较方便地进行负载匹配。同时在换能器两端并联电感，使换能器在共振频率(即清洗机的工作频率)下呈纯阻性。这里使用的是硅钢片的输出变压器，由于超声波频率比较高，输出功率又相当大，所以这种输出变压器的体积是相当庞大的，既笨重，又耗材价高。

随着技术的提高，频率较高的输出变压器采用了铁氧体磁性材料。采用这种磁芯的输出变压器体积要比硅钢片铁芯的输出变压器体积小许多。上超厂生产的CSF—3A可控硅清洗机的发生器就采用了这种输出变压器与换能器进行匹配，其最大的优点是体积小。

至于晶体管功率振荡电路的匹配方法就又更进了一步，它是把换能器直接串入振荡电路，作为振荡器的容性元件。关于这一点，将在下文介绍电路的时候，具体叙述。

(上接第23页)

致　谢

哈船院的杨士莪、何祚镛两位教授对本课题提出过一些宝贵的意见和有益的建议，戴京东承担了微机部份的工作。肖今新、史鸣观、候国富和崔军等同志在研制过程中也参与过部份工作。在此一并致谢。

参考文献

〔1〕吴克成、伍行健、林水深：“声弹性应力测量方法研究”，清华大学校庆学术报告论文集，1988。

〔2〕Langley Research Center, Hampton, Virginia, “ROUS System:Reflection-Oscillator Ultrasonic Spectrometer System” NASA Tech Briefs,P.228 Summer 1976

〔3〕Langley Research Center, Hampton,Virginia,“ROUS Bolt—Tensioning Monitor:The reflection—oscillator ultrasonic Spectrometer is used to accurately measure bolt tension” NASA Tech Briefs, P.229 Summer 1976