

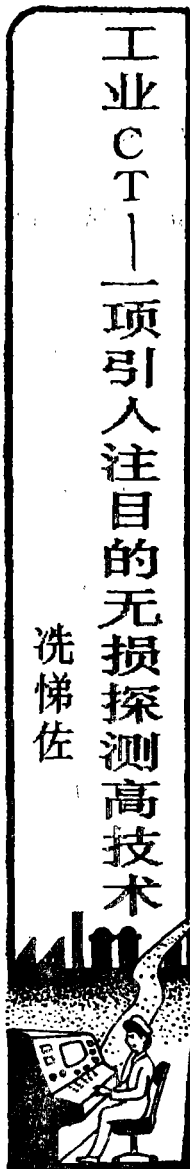
大约两年前,在美国佛罗里达州的国家航空航天局肯尼迪空间中心里,技术人员正在对一架航天飞机进行检查。他们在主引擎燃料管道的避震器上发现了一个小小的毛病。这个避震器是一根“L”形的波纹管,由2.3毫米厚的不锈钢制成,长约6英尺,重约2000磅。但是就在它的肘节处,出现了约一枚硬币的凹痕。凹痕虽不太深,但凹陷处损伤程度影响航天飞机下次升空的安全。在1986年初,挑战者号因密封圈受冷变形而发生爆炸,使美国的航天计划严重受挫之后,美国人再也不会小看任何不起眼的质量问题的了。但是,对这一凹痕的检查不是轻而易举的事情,如将这根波纹管拆开检查,就意味着这根价值10万美元的部件将报废;若用超声波探伤、中子照相、涡流或磁通量测定等无损探测的常规手段,则又无法获得该肘节处尺寸的可靠数据。最后大显神威使问题迎刃而解的还是一台型号为CITA201的工业CT,它对凹痕及其周围的部位作了621次剖面扫描,在给出的变形区域的任何一个剖面图象中,均未发现裂纹,而且那里的壁厚也还在加工公差之内。这台工业CT还曾对航天飞机的其他部件作过检查。犹如孙悟空的火眼金睛,哪怕小到几十微米的裂纹,或是轻质密封油脂中的气泡,都在工业CT所具有的杰出空间分辨本领和质量分辨的本领下原形毕露。这些事例展示了工业CT这一新生的无损检测手段的强大生命力。

CT技术,是计算机断层扫描的简称。第一台X射线CT诞生于1972年,用于检查人体大脑中的病变。此后,在医学上应用的X射线CT技术发展很快,现在不少医院已能用X射线CT对病人全身的各个器官作检查诊断。早期的工业CT,是把医用X射线CT稍加改进,以检测一些平均质量密度略高于人体的物体。后来,人们大大提高了X射线发生器的工作电压,或采用穿透能力更强的 $\gamma$ 射线同位素源,同时还在探测器、电子学部件和图象重建的快速算法等许多方面,进行了大量的研究和改进,终于在80年代中期制成了像CITA201那样的高性能工业CT。

X射线或 $\gamma$ 射线CT的物理原理是物质对射线的吸收特性。当一束强度为 $I_0$ 的射线穿透密度为 $\rho$ 、厚度为D的均匀物体后,其强度将减弱为

$$I = I_0 e^{-\mu \rho \cdot D}$$

即射线强度在该物质中将经历一个指数衰减,其中 $\mu \rho$ 为该物质的质量吸收系数。倘若物体由若干物质组成,则上述指数项是这些组成物质的衰减贡献之和。使被测物体与射线源一探测器组合作360°相对旋转,并在每一角度上对物体的某个断面(射线被准直器准直后对准的部位)测定透射射线的强度,即可知道 $|\ln(I/I_0)|$ 值,或曰该角度上的密度投影值。把所有角度上密度投影在计算机中进行处理,就可以把这一断面的密度分布显示于终端显示器上,我们称之为CT剖面图象。请注意,这一图象重建过程即使对计算机说来,也并非易事,一个典型的CT图象涉及十亿次的运算!而要检测物体中哪怕是一个小小的区域,也非得有好多个剖面不可,如前述



避震器上的一个硬币大小的凹痕,就分成69个剖面(由于形状特殊,还进行了9个不同方位的检查,共计621次测定)。所以CT的计算机硬件和软件都有革命性措施,如采用各种阵列处理器技术计算密度投影,并建立快速傅立叶变换方法等等,以使CT系统能在数秒甚至更短的时间内,完成一个剖面图象。

近年来工业CT技术的发展方向,是向生产过程的在线实时测试和自动控制领域进军。以往的工业CT的工作特点,一如医用X射线CT,是“待客上门”式的,设备的利用率受到限制。在现代大工业生产中,有许多部门需在作业流水线上对产品的质量进行实时检验,甚至还希望把质量检验结果反馈到流水线的某些环节,以便大大提高成品率和产品质量,使工业CT创造更多的经济效益。用于石油采集的热轧无缝钢管的质量控制,即是一个生动的实例。试想,钢管的同心度不够格,数千米的油井会偏离原定井位;钢管的椭圆度达不到一定指标,油井管间的螺纹联接处不会密封很好;钢管的管壁薄于指标,或管壁中有气孔、夹渣、裂缝,油井怎能承受地下的高压?热轧无缝钢管时还管温度近1000°C,此时钢的塑性很好,热轧中任何一道工序的某个环节的轧制参数稍有变动,很可能造成钢管的质量问题。热轧线的生产速度一般为每秒数米乃至更高,采用离线质量检查,即抽样将钢管截断,检查截面的各个尺寸参数,其后果必然是相当可观的废品量。美国一CT公司研制成一种称为“钢管全长检测系统”的工业CT,能在钢管热轧的同时,给出产品的每一厘米的长度上剖面图象,从而获得钢管全长度上的截面尺寸和各种缺陷部位的信息。计算机还能把测定结果反馈到热轧线主控设备上,对不合要求的热轧参数作相应调整,不但大大提高了成品率和产量,还由于每根钢管都经过严格检验,产品的级别也大为提高。据估算,一个月产量为2万吨的热轧无缝钢管厂,每年可增收数百万美元。这一工业CT系统,经改装后已用于发电厂高温高压蒸汽管道的在役检测。这类管道内的蒸气温度

有500°C甚至更高,压力在每平方米厘米100公斤以上,一旦破裂,其后果不堪设想!目前,发电厂对其使用寿命都有严格规定,如10万小时,20万小时等,一旦到期,需更换或降级使用。为保证安全,还规定对这些管道,尤其是一些焊接部位,作停产检查。检查前,须拆除管道外的隔热保护层,作相应的清洁处理,再用超声波或辐射照相等方法作检查,耗时费工,还蒙受停产的巨大损失。用上工业CT后,它的检测头( $\gamma$ 射线源一探测器组)沿着管道迅速前行,管道内照样输送着高温高压蒸气,管道外的绝热包装依然如故,但是管道管壁的壁厚和壁内的尚属锥形的缺陷都被一段一段地逐一探明。计算机还根据一定的理论模式对管道寿命作推算,误差为 $\pm 1\%$ 。这样的检测手段当然受到发电业的大大赞赏!这一工业CT装置安装在一辆改制的货运汽车内,四出巡迴于许多电厂之间,在它们不断向城市和乡村输送电力的同时,为它们服务检查。