

一种焊缝缺陷自动超声检测系统

刘志远, 裴 润, 王 玲, 刘志林

(哈尔滨工业大学 控制科学与工程系, 哈尔滨 150001)

摘 要: 给出了一种四通道焊缝缺陷自动超声检测系统 HAUT-1 的设计、实现方法。HAUT-1 由磁吸附爬行者、扫查臂、耦合剂自动输入系统、电机控制器、超声波发射、接收电路、高速数据采集电路、焊缝自动跟踪系统及控制计算机组成, 可应用于厚度为 10 ~ 100 mm 的平板、压力管道和压力容器筒体纵、环焊缝缺陷的自动检测。对 HAUT-1 的功能进行了介绍, 给出了其主要技术指标, 并对系统的构成, 焊缝缺陷的自动检测方法以及焊缝自动跟踪算法进行了分析与讨论。在 $\phi 1\ 600$ mm, 厚 45 mm 的具有预埋缺陷的试件上和 $\phi 1\ 800$ mm, 厚 100 mm 的锅炉汽包窄间隙环焊缝上的检验结果表明, HAUT-1 的检测方法与手工检测结果相同, 并具有一定的检验精度、重复性及缺陷图像处理功能。

关键词: 焊缝; 缺陷; 超声检测

中图分类号: TP31 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2002)03-71-04



刘志远

0 序 言

产品制造过程中遗留在焊缝中的缺陷以及产品运行时焊接结构中引发的裂纹会不同程度的对产品的失效行为产生影响, 甚至产生破裂与爆炸^[1]。通常采用无损检测技术对焊接结构进行检测, 其中, 超声检测所占的比重最高, 也是最有开发前途的^[1]。目前, 由于超大型石化、冶金、电站设备以及长距离输油(气)管道的发展, 传统的手工检测方法难以满足这种需求, 因此, 各国相继把目标转向自动超声检测领域。日本东京煤气公司研制的蜘蛛形超声检测机器人, 采用真空吸盘吸附, 能在运行状态下对球罐焊缝进行检测^[2]。日本 NKK 公司研制了一种测量输油管道腐蚀情况的机器人。该机器人在管道内借助液体流动的推力前进, 利用测量超声脉冲反射时间计算腐蚀深度, 误差小于 1 mm。由于没有电缆, 因此可检测各区段油管的内外壁腐蚀情况^[3]。丹麦 Force 研究所开发出了电站锅炉与石油化工设备超声检测投影扫描系统(P-Scan)。该系统通过模块组装方式可构成十几种机型, 适合于容器内外表面的纵缝、环缝和螺旋管焊缝的检查^[4]。近年来, 我国在自动超声焊缝检测技术领域也进行了研究, 但缺乏能应用于工程的自动超声焊缝检测装置。通过结合 HAUT-1 自动超声焊缝检测系统的研制, 给出一种自动超声焊缝检测系统的构成、实现方法

检验结果。

1 系统构成及性能

及 HAUT-1 自动超声焊缝检测系统由爬行者、电机控制器、超声波发射、接收电路、高速数据采集电路、焊缝跟踪系统及控制计算机组成。爬行者包括: 磁吸附爬行者本体(以下简称爬行者)、扫查臂、探头支架、耦合剂自动输入系统、超声换能器、与计算机系统的信号接口、焊缝自动跟踪的信号检测、爬行驱动电机及减速装置、扫查驱动电机及减速装置。爬行者通过钕铁硼磁性材料制成的滚动轮吸附在导磁材料上, 采用四轮运动方式, 其中前轮为驱动轮。爬行者通过电缆与电机控制器、超声波发射、接收电路及计算机连接; 电机控制器实现对爬行器的运动控制, 如直线运动或曲线运动; 超声波发射、接收电路实现超声波的发射与接收, 发射重复频率 20 ~ 100 Hz 可调, 发射电压 400 V, 发射脉冲宽度 100 ns, 超声信号的接收由多级高增益、大带宽放大电路构成, 该电路的模拟信号带宽为 15 MHz, 最大增益为 80 dB, 且具有 60 dB 的动态调节范围; 高速数据采集电路将超声波接收电路输出的模拟信号转换为数字信号, 转换频率为 60 MHz, 该电路具有 16 kB 的高速缓冲区, 通过 DMA 方式将信号送入计算机; 焊缝跟踪系统通过跟踪预置的磁条实现对焊缝的跟踪, 使检测过程中爬行者不偏离焊缝, 这既可避免焊缝弯曲对检测的影响, 又可进行诸如封头接管角焊

缝的检测。自动焊缝检测系统 HAUT—1 的结构如图 1 所示, 除上述的技术指标外, 其余指标如下:

- (1) 具有四通道超声波发射、接收功能;
- (2) 具有 DAC 曲线制作功能;
- (3) 具有自动焊缝跟踪功能, 跟踪误差为每爬行 600 mm 不大于 2 mm;
- (4) 检测焊缝厚度 10~100 mm;
- (5) 爬行器能在大于 Φ400 mm 的管道上爬行;
- (6) 爬行器能在垂直的钢板上爬行;
- (7) 爬行器的总重量不大于 15 kg。

为表明 HAUT—1 的性能, 表 1 列出了 HAUT—1 及部分国外同类产品的性能^[4 5]。

表 1 HAUT—1 及部分国外自动超声检测设备的性能
Table1 Performance of HAUT—1 and some similar equipment abroad

		HAUT—1	AMDATA 2090 5090	AWS—5
Weight w/ kg		14. 5	7	5
Number of channels		4— channel	4— channel	8— channel
Transmitter	Sending voltage U/V	400	50~400	30~300
	Pulse width/ns	100	50~500	20~1 000
Receiver	Type	Linear	Linear	Linear & logarithm
	Frequency range/MHz	0. 1~15	0. 5~30	0. 1~30
	Dynamic range/dB	60	80	100
Sampling circuit	A/ D rate	8— bit60 MHz	8— bit 100 MHz	10— bit 120 MHz
	Data buffer	8 kb	8 kb	8 kb
Motor	Type	DC— servo motor	Step motor(2090) servo motor(5090)	DC— servo motor
	Axes	3	2	3
	Feedback	Coder	Coder	Coder
Welding tracing		Magnet adsorbent track	Fixed track	Magnet adsorbent track
Operating system		Windows 98	UNIX	Windows 98
Software function		Projective show	Projective show, TOFD, SAFT	Projective show, TOFD
Software	Save file	Hard disk	Hard disk	Floppy disk
	Operation method	Convenience	Easy	Easy

表 1 中 HAUT—1 的带宽不随增益的增加而下降, AMDATA 2090, 5090 及 AWS—5 的带宽随增益的增加而下降, 增益为最大时, 其带宽约为 15 MHz。

2 焊缝缺陷的自动检测

自动超声焊缝检测系统根据用户输入的参数进行焊缝缺陷的自动检测, 检测完后给出检测结果。检测过程中超声发射, 通道切换, 爬行器运动, 焊缝跟踪及回波信号的数据处理等均通过计算机的控制完成。缺陷检测时, 爬行器的运动轨迹如图 2 所示, 其中 Y 方向的运动为跨步运动, X 方向的运动为扫

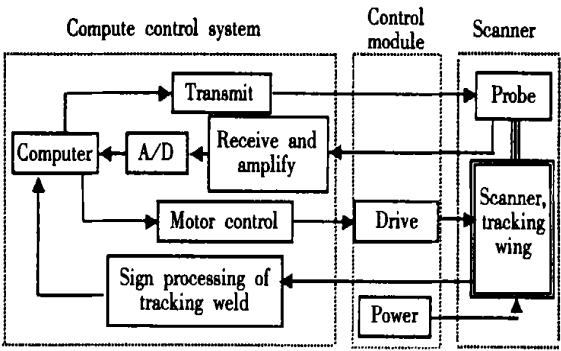


图 1 自动超声焊缝检测系统 HAUT—1 的结构图
Fig. 1 Diagram of automatic ultrasonic inspection system HAUT—1

查运动。检测时, 跨步运动与扫查运动交错进行, 跨步运动时不进行缺陷检测, 系统根据焊缝跟踪系统的反馈信号进行运动控制, 使爬行器与预置的柔性

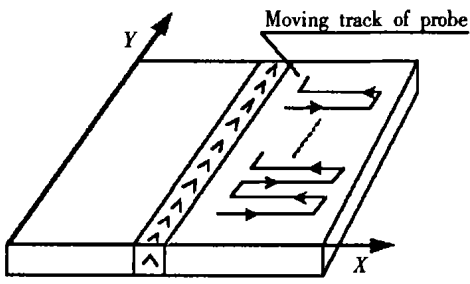


图 2 爬行器的运动轨迹
Fig. 2 Moving track of scanner

磁条平行, 同时, 系统对检测的数据进行处理。扫查时, 系统在计算机的控制下以一定的时序进行通道的切换及超声波的发射、接收, 同时控制探头按给定的速度运动。扫查完后, 若未发现缺陷, 则保持较大的跨步距离, 若发现缺陷, 则使爬行器后退一步, 系统转入精扫查状态。这种粗、精扫查结合的方式, 是保证检测精度及提高检测效率的一种有效方法。

为解决焊缝弯曲的影响及爬行器左右轮运动不一致对爬行器运动状态的影响, 需对焊缝进行跟踪, 否则长距离检测后, 可能导致爬行器偏离焊缝。HAUT-1 采用两个位移传感器检测爬行器与预置柔性磁条的相对位置, 实现爬行器的焊缝跟踪。显然, 若预置磁条为直线, 则爬行器的运动为设定距离的跨步运动, 爬行器左右轮的运动距离相等; 若预置磁条为斜线, 则应根据检测传感器的检测信号, 计算爬行器左右轮的运动距离。设检测时位移传感器的状态如图 3 所示, 其中 x_1 为前端传感器检测出的位移信号, x_2 为后端传感器检测出的位移信号, d 为前端传感器与后端传感器的距离, 坐标系 (O_s, X_s, Y_s, Z_s) 位于检测传感器的中心位置。焊缝跟踪的要求是: 根据传感器检测出的位移信号 x_1, x_2 控制爬行器运动, 使坐标系 (O_s, X_s, Y_s, Z_s) 的 Y_s 轴与磁条重合。设焊缝跟踪时爬行器的运动状态如图 4 所示, 其中 (O, X_0, Y_0, Z_0) 为爬行器旋转运动时旋转中心的坐标系, (O_1, X_1, Y_1, Z_1) 为爬行器旋转运动前后轮中心点的坐标系, (O'_1, X'_1, Y'_1, Z'_1) 为爬行器旋转运动后后轮中心点的坐标系, (O'_s, X'_s, Y'_s, Z'_s) 为爬行器旋转运动后检测传感器的中心坐标系, w_1, w_2 及 w'_1, w'_2 分别表示爬行器旋转运动前和旋转运动后的后轮。由于 (O_1, X_1, Y_1, Z_1) 及 (O_s, X_s, Y_s, Z_s) 固连于爬行器上, 故该坐标系间没有相对运动。根据齐次坐标变换理论, (O_s, X_s, Y_s, Z_s) 相对

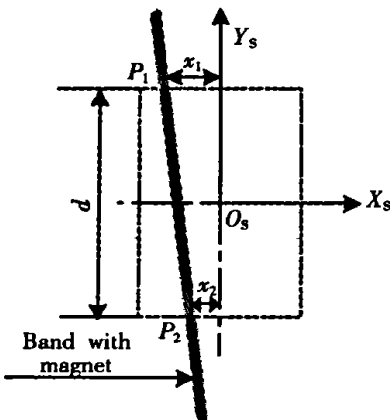


图 3 位移传感器的状态
Fig. 3 State of displacement sense

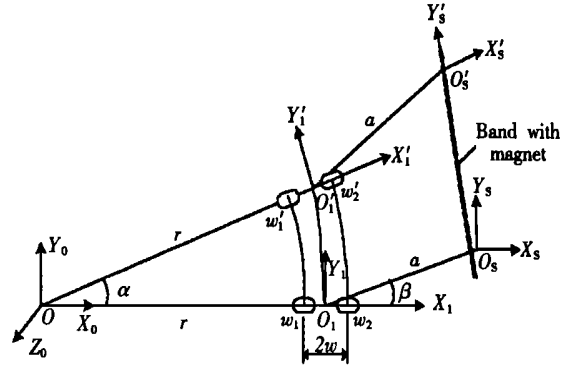


图 4 焊缝跟踪时爬行器的运动状态
Fig. 4 Moving state of scanner

(O, X_0, Y_0, Z_0) 的齐次变换矩阵为

$$T_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & r + \alpha \cos \beta \\ 0 & 1 & 0 & \alpha \sin \beta \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

由图 3 得, 要使 Y_s 轴与磁条平行, 坐标系 (O_s, X_s, Y_s, Z_s) 的旋转角度 α 为

$$\alpha = \arctan \left(\frac{-x_1 + x_2}{d} \right) \quad (2)$$

(O_1, X_1, Y_1, Z_1) 绕 (O, X_0, Y_0, Z_0) 的 Z_0 轴旋转 α 角后, (O'_s, X'_s, Y'_s, Z'_s) 相对 (O, X_0, Y_0, Z_0) 的齐次变换矩阵为

$$T_2 = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 & r \cos \alpha + a \cos(\alpha + \beta) \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 & r \sin \alpha + a \sin(\alpha + \beta) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

若磁条的直线方程(相对于 O, X_0, Y_0, Z_0 坐标系)

$$y = px + q, \quad (4)$$

式中: $p = \frac{q' \cos \alpha + \sin \alpha}{\cos \alpha - q' \sin \alpha}$,

$$q = \frac{r + a \cos \beta}{\cos \alpha - p \sin \alpha} (\sin \alpha + q' \cos \alpha) + r + a \cos \beta + q' \cos \alpha,$$

$$p' = \frac{d}{x_2 - x_1}, \quad q' = \frac{d}{2} + \frac{x_1 d}{x_2 - x_1}, \quad (5)$$

则爬行器旋转运动后 Y_s 轴与直线 $y = px + q$ 重合的条件为

$$r \sin \alpha + a \sin(\alpha + \beta) = p [r (\cos \alpha - \sin \alpha) + a \cos(\alpha + \beta)] + q, \quad (6)$$

即

$$r = \frac{p a \cos(\alpha + \beta) - a \sin(\alpha + \beta) + q}{\sin \alpha (1 + p) + \cos \alpha (1 - p)}. \quad (7)$$

由图 4, 可得爬行器运动轮 w_1, w_2 的运动轨迹长度分别为 $s_1 = \alpha(r - w)$, $s_2 = \alpha(r + w)$ 。

爬行器跨步运动时, 控制 w_1, w_2 的运动轨迹长度分别为 s_1, s_2 可使爬行器不偏离预置的导向磁条。

3 检验结果

首先在直径为 $\phi 1\ 600\ \text{mm}$ ，厚为 $45\ \text{mm}$ 的具有预埋缺陷的试件上，对 HAUT-1 进行了焊缝缺陷检测的试验。检测时，先用手工方法检测试件上的缺陷，以作为评定 HAUT-1 的基准。随后，将 HAUT-1 放置在不同的初始位置进行缺陷检测。结果表明，不同初始位置下，HAUT-1 检出的缺陷大小、形状和位置不变，重复性好，与手工检测结果一致。为了满足长焊缝检测的需要，HAUT-1 采用分段显示方式显示缺陷。图5为HAUT-1在试件上测完

检后生成的缺陷俯视图、主视图及波幅图，其中 d_1 为波幅； d_2 为焊缝深度； d_3 为焊缝宽度。图 5a 为通道 1 检出的缺陷，图 5b 为通道 2 检出的缺陷，图 5c 为通道 1 和通道 2 合成后的缺陷。图中显示的缺陷位置及缺陷大小与手工检验结果相同。在具有预埋缺陷的试件上的检测试验完成后，又在直径为 $\phi 1\ 800\ \text{mm}$ ，厚为 $100\ \text{mm}$ 的锅炉汽包窄间隙环焊缝上进行了生产应用考核，结果表明，HAUT-1 运行稳定，重复性好，能满足工厂生产过程的检验要求。

4 结 论

HAUT-1 评定标准与手工一致，检验结果与手工相同，且有运行稳定，重复性好的特点，能进行平板、压力管道和压力容器筒体纵、环焊缝缺陷的自动检测。在功能和主要技术指标方面接近于国外同类产品。

参考文献:

[1] 李生田, 刘志远. 焊接结构现代无损检测术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.

[2] 孙福治. 检查大型煤气罐用的蜘蛛型机器人[J]. 机器人技术及应用. 1996 (11): 7.

[3] 陈慧琴. 用超声波检测管道的机器人[J]. 机器人技术及应用. 1995, (5): 28.

[4] Force, Institute. Technical specification on P—scan system and AWS—5 weld automatic scanner[R]. Danmark. 1998.

[5] ABB Group. Technical description on AMDATA scanning system[R]. Model—2090(5090) and INTRAS PECT UX—4, USA, 1998.

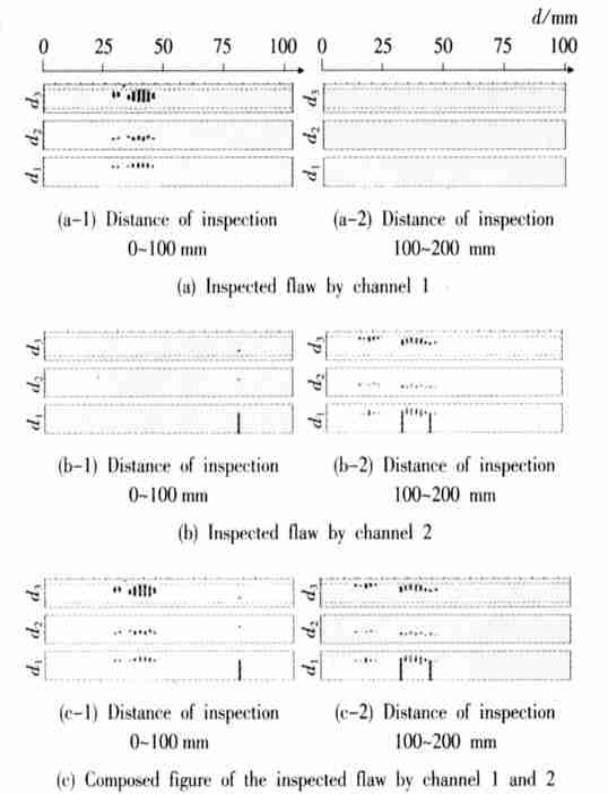


图 5 缺陷俯视图、主视图及波幅图

Fig. 5 Vertical view, the front view and the amplitude of inspected flaw

作者简介：刘志远，男，1957 年出生，现为哈尔滨工业大学控制科学与工程系教授。主要研究领域为机器人控制、预测控制、高精度伺服控制及焊缝缺陷自动检测系统等，已发表论文 30 余篇。Email: zhiyuan@public.hr.hl.cn