



中华人民共和国国家标准

GB/T 34892—2017

无损检测 机械手超声检测方法

Non-destructive testing—Test method for robotic ultrasonic testing

2017-11-01 发布

2018-05-01 实施

中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局
中国国家标准化管理委员会 发布

前 言

本标准按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

本标准由全国无损检测标准化技术委员会(SAC/TC 56)提出并归口。

本标准起草单位:北京理工大学、福州大学、航天材料及工艺研究所、北京北方车辆集团有限公司、内蒙古第一机械集团有限公司、中国工程物理研究院化工材料研究所、中国兵器科学研究院、中广核工程有限公司、西安航空发动机(集团)有限公司、福建省特种设备检验研究所、中国航空工业集团公司北京长城计量测试技术研究所。

本标准主要起草人:徐春广、肖定国、郝娟、肖振、张翰明、卢宗兴、周世园、何双起、李泽、李全文、杜劭峰、杨占锋、姬广振、毕泗元、朱从斌、赵健华、王婵、居玉辉、徐尧、张纬静、李宏伟、孟凡武、潘勤学、杨天雪、王洪博、张岚、邹志刚、张仕骐、郭灿志、吴玄、李飞、刘劭纯、赵健、彭根跃。

无损检测 机械手超声检测方法

1 范围

本标准规定了使用机械手对结构件进行自动化超声检测的方法。

本标准适用于采用单机械手和双(多)机械手的自动超声检测,适合不易于人工操作的复杂形廓结构件的自动超声检测,尤其适合危险、有害和不适宜于人工操作的作业环境。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件,仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

- GB/T 9445 无损检测 人员资格鉴定与认证
- GB/T 11259 无损检测 超声检测用钢参考试块的制作和控制方法
- GB/T 11343 无损检测 接触式超声斜射检测方法
- GB/T 11344 无损检测 接触式超声脉冲回波法测厚方法
- GB/T 12604.1 无损检测 术语 超声检测
- GB/T 12642 工业机器人 性能规范及其试验方法
- GB/T 12643 机器人及机器人装备 词汇
- GB/T 18694 无损检测 超声检验 探头及其声场的表征
- GB/T 19397 工业机器人电磁兼容性试验方法和性能评估准则指南
- GB/T 20737 无损检测 通用术语和定义
- GB/T 23905 无损检测 超声检测用试块
- GB/T 23908 无损检测 接触式超声脉冲回波直射检测方法
- GB/T 23912 无损检测 液浸式超声纵波脉冲反射检测方法
- GB/T 27664.1 无损检测 超声检测设备的性能与检验 第1部分:仪器
- GB/T 27664.2 无损检测 超声检测设备的性能与检验 第2部分:探头

3 术语和定义

GB/T 12604.1、GB/T 12643、GB/T 20737 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

D-H 参数 denavit-hartenberg parameters, **D-H parameters**

描述关节式机械手机构运动关系的四个连杆参数(连杆偏距 d_i 、关节角 θ_i 、连杆长度 a_i 和转角 α_i),如图 1 所示。其中连杆转角 α_i 和连杆长度 a_i 两个参数用来描述连杆本身,关节角 θ_i 和连杆偏距 d_i 两个参数用于描述连杆之间的连接关系。连杆长度 a_i 表示连接连杆 i 两端关节轴的公垂线长度;连杆转角 α_i 用来定义两关节轴相对位置;连杆偏距 d_i 描述沿两个相邻连杆公共轴线方向的距离;关节角 θ_i 描述两相邻连杆绕公共轴线旋转的夹角。

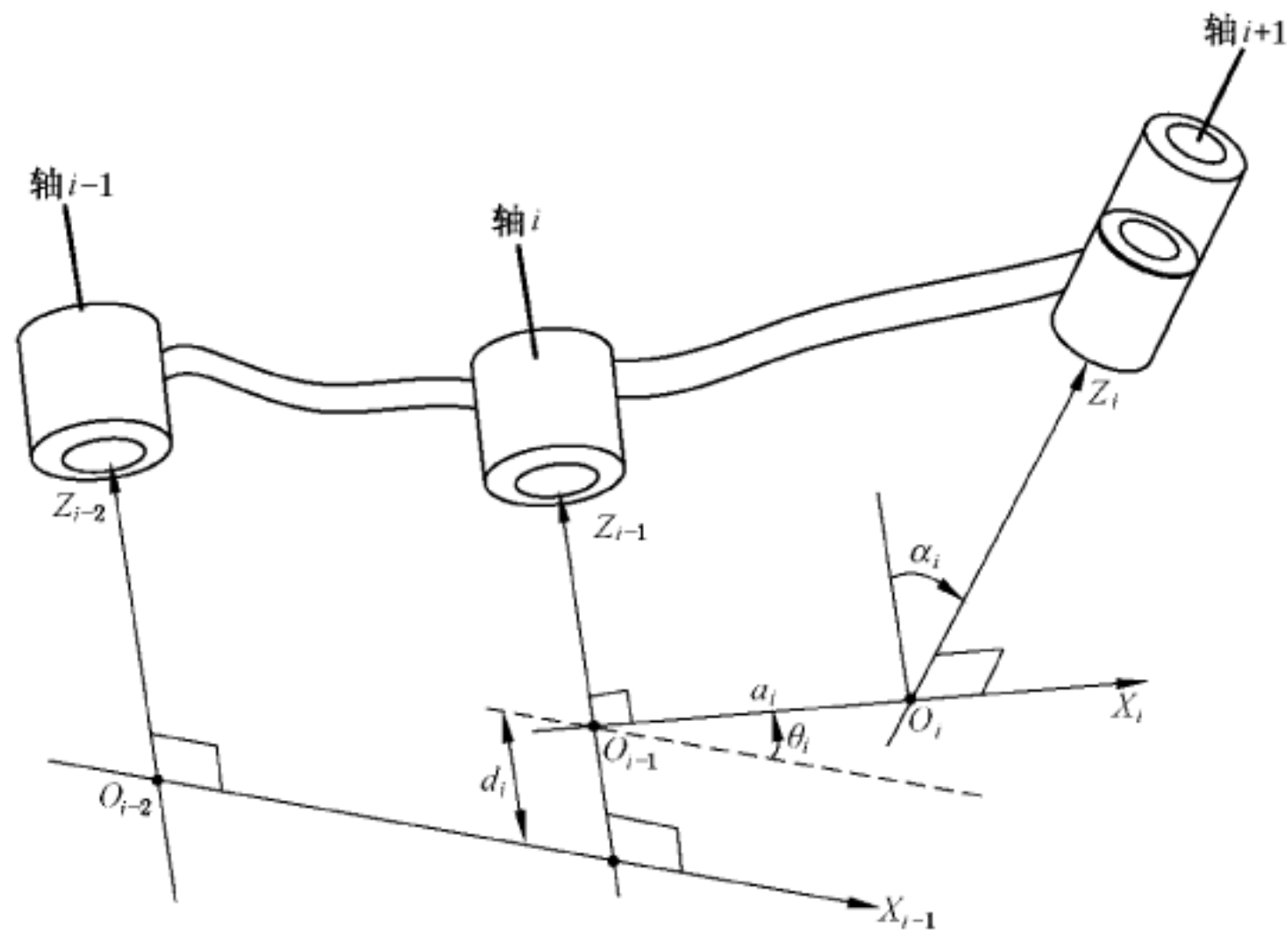


图 1 关节式机械手 D-H 参数示意图

3.2

轨迹规划 trajectory planning

确定超声换能器与受检件相对运动,在其表面形成扫查轨迹的方案。通过计算扫查轨迹上离散采样点的坐标和法向角,并根据扫查方式和超声换能器声束轴线与采样点法线方向间关系(直射或斜射)以及声程长度等约束条件将扫查轨迹上离散采样点的坐标和法向角变换为机械手运动时末端执行器位置和姿态(以下简称“位姿”)坐标,形成机械手扫查轨迹。

3.3

坐标系找正 alignment of the coordinate system

找正 alignment

利用机械手检测系统的软硬件,确定出受检件坐标系相对于机械手基准坐标系或工具坐标系位置和姿态关系的过程。

4 通用要求

4.1 人员要求

- 4.1.1 检测人员应按 GB/T 9445 或合同各方同意的体系进行资格鉴定与认证,并取得相应等级的资格证书,且由雇主或其代理对其进行岗位培训和操作授权。
- 4.1.2 检测人员应经过关于机械手知识与操作的培训。
- 4.1.3 进行轨迹规划的检测人员应经过具体型号的机械手编程培训。
- 4.1.4 检测人员应熟悉所使用的机械手超声检测系统,检测过程中需按照检测系统操作使用规范实施检测。

4.2 检测系统

- 4.2.1 检测系统应包括机械手及其控制器、超声换能器、超声检测仪和用于集成机械手控制和超声检测的测控计算机软硬件。
- 4.2.2 为消除外界的电磁干扰,应合理布局机械手控制器、超声检测仪和测控计算机等设施,并对检测系统采取有效的接地、隔离、屏蔽等电磁兼容措施。

4.3 参考试块

根据受检件的检测要求,设计制作参考试块。参考试块的制作应符合 GB/T 11259 和 GB/T 23905 的相关要求。在参考试块上预制规定的参考缺陷,通过对参考缺陷的检测结果确认机械手检测系统的检测能力和有效性。

4.4 检测环境

4.4.1 检测系统工作的电磁环境应确保机械手超声检测系统能正常工作。

4.4.2 检测环境应无影响机械手检测系统正常工作的振动和冲击。

4.4.3 环境温度宜在 $+5\text{ }^{\circ}\text{C}\sim+45\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间,相对湿度宜在 $20\%\sim95\%$ 之间且无结露。

4.5 检测工艺

4.5.1 采用合适的工装夹具保证工件坐标系与机械手坐标系之间具有确定的空间关系,以利于检测系统坐标系之间的找正、变换和轨迹规划。

4.5.2 基于关节式机械手 $D-H$ 参数及机械手检测系统中坐标系分布(参见附录 A),根据受检件的形廓特点进行轨迹规划,确定机械手的扫查路径,包括扫查点间距、扫查速度、扫查方向及扫查路径的行距,建议扫查行距和间距应小于待检出最小缺陷的尺寸(推荐为 $1/4\sim 1/2$ 缺陷当量直径)。

4.5.3 根据受检件材料及待检出缺陷的类型、尺寸、方向和位置等可能的缺陷特征,确定超声检测方法、检测频率、入射角、焦距等检测参数。

5 方法概要

本标准所述的机械手超声检测指的是利用机械手夹持超声换能器或受检件,通过机械手运动实现超声换能器与受检件表面作相对运动,实现超声反射或穿透方法的自动检测。

机械手检测方式通常有:机械手夹持换能器运动的超声反射法(方式1);机械手夹持换能器运动的超声穿透法(方式2);机械手夹持受检件运动的超声反射法(方式3);机械手夹持受检件运动的超声穿透法(方式4)。

6 检测方式

6.1 方式1

机械手夹持超声换能器运动的超声反射法。受检件放置于位置固定的工装夹具上(或依据检测需要增加自由度,例如,使受检件在检测过程中旋转、平移等协同运动以提高检测效率),机械手夹持超声换能器运动,完成覆盖式扫查检测。该方式适合形廓尺寸和重量较大、超出机械手负载能力的复杂形廓构件。如图2所示。

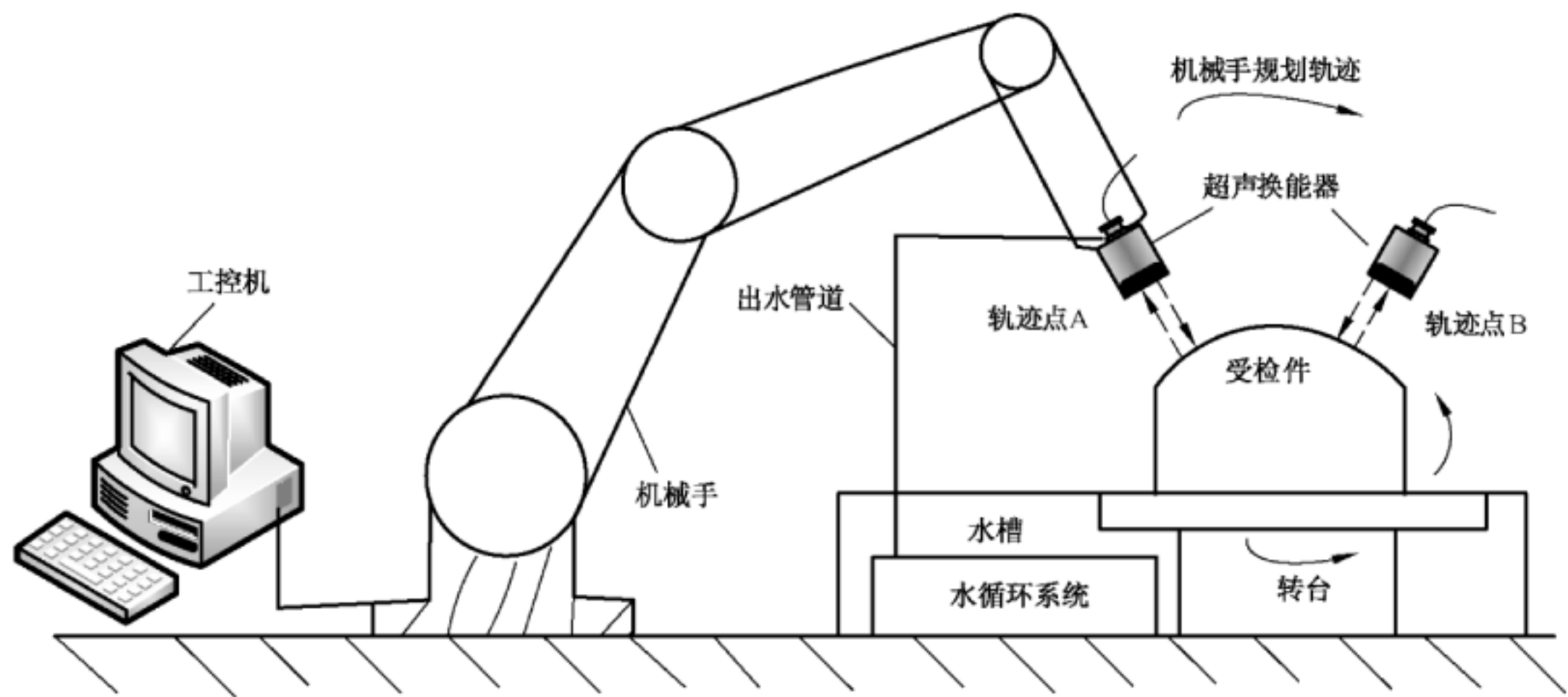


图 2 机械手夹持换能器超声反射法检测示意图(检测方式 1)

6.2 方式 2

机械手夹持换能器运动的超声穿透法。受检件放置于位置固定的工装夹具上(或依据检测需要增加自由度,例如,使受检件在检测过程中旋转、平移等协同运动以提高检测效率),双机械手各夹持一个换能器在受检件两侧同步运动,保证两个换能器声束轴线重合,完成覆盖式扫查检测。如图 3 所示。

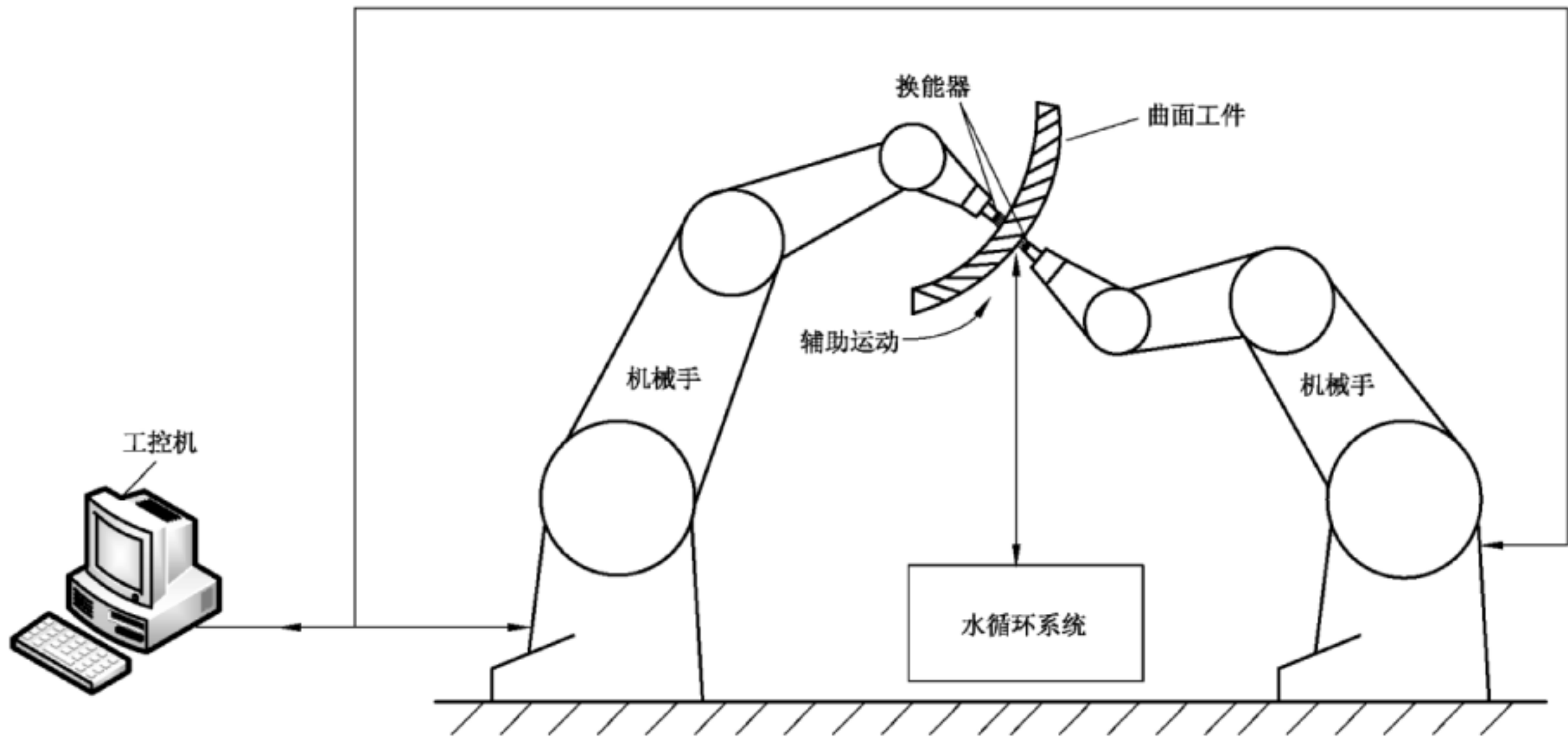


图 3 机械手夹持超声换能器纵波穿透法示意图(检测方式 2)

6.3 方式 3

机械手夹持受检件运动的超声反射法。超声换能器装在位置固定的夹具上(或依据检测需要增加自由度,例如,使换能器在检测过程中旋转、平移等协同运动以提高检测效率)。机械手夹持受检件运动,完成覆盖式扫查检测。该方式适合检测尺寸和重量较小的复杂形廓构件。如图 4 所示。

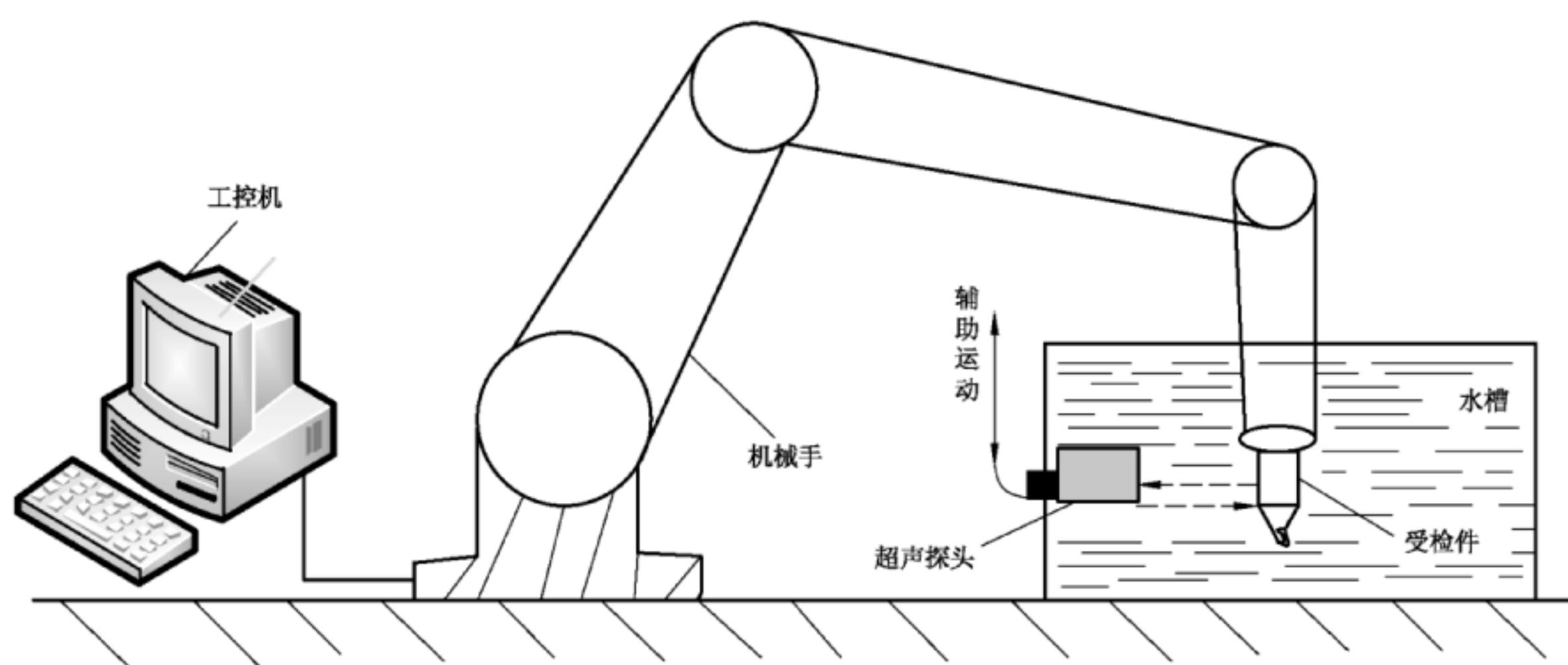


图4 机械手夹持受检件超声反射法检测示意图(检测方式3)

6.4 方式4

机械手夹持受检件的超声穿透检测方式。两个超声换能器分别装在两个位置固定的夹具上(或依据检测需要增加自由度,例如,使换能器在检测过程中旋转、平移等协同运动以提高检测效率),两个超声换能器声束轴线保持重合,机械手夹持受检件运动,完成覆盖式扫查检测。如图5所示。

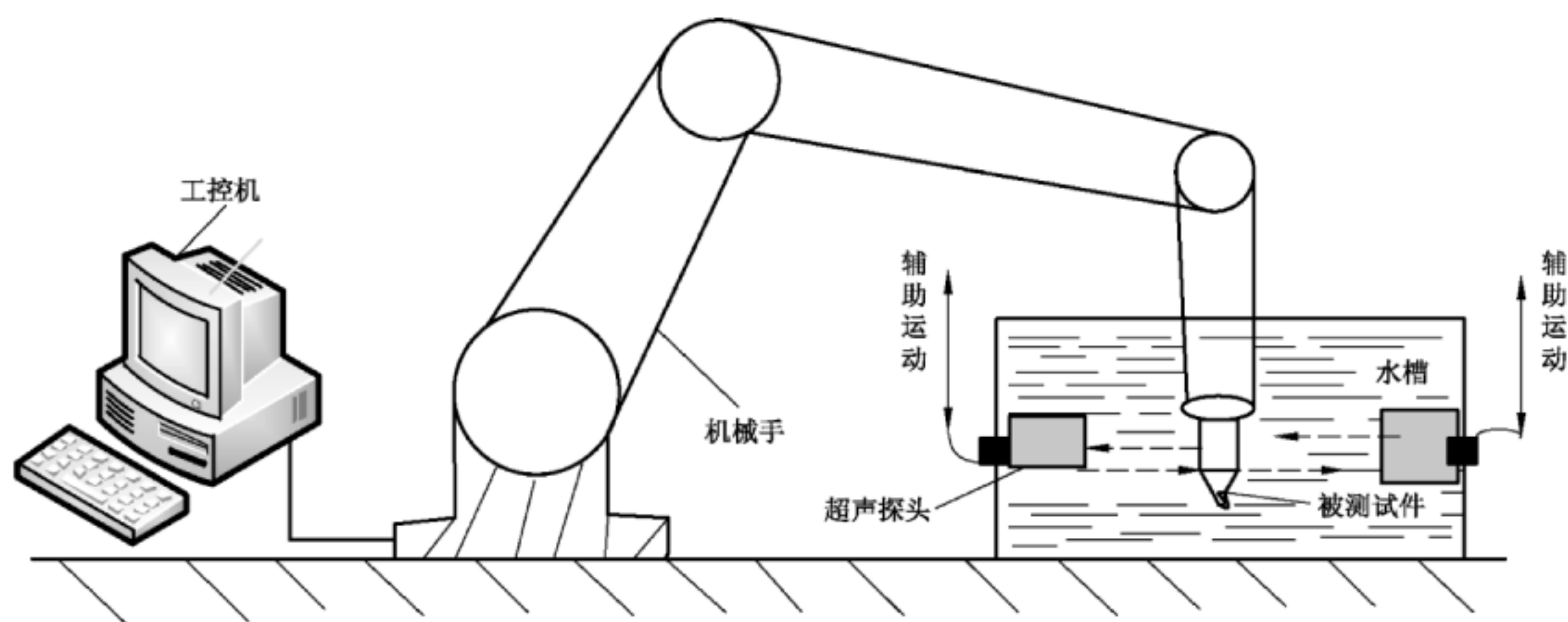


图5 机械手夹持受检件超声穿透法检测示意图(检测方式4)

7 检测系统

7.1 机械手

7.1.1 应采用可执行预编程序实现对曲面进行自动化扫查的机械手,一般采用六轴及以上自由度关节机械手,其性能规范及试验方法应符合 GB/T 12642 和 GB/T 12643,机械手手臂、手腕的防护等级应符合 GB/T 12642 的要求,机械手电磁兼容性应符合 GB/T 19397 的要求。

7.1.2 机械手末端执行器重复定位精度应优于 $\pm 0.1\text{ mm}$,方向角分辨率应优于 0.2° 。

7.1.3 机械手末端额定速度时最大负载能力不小于 2 kg 。

7.1.4 机械手应具备超运动范围、超速和防碰撞的安全防护措施。

7.2 换能器与检测仪器

7.2.1 超声换能器性能应符合 GB/T 18694 和 GB/T 27664.2。

7.2.2 超声检测仪器性能应符合 GB/T 27664.1。

7.3 工装夹具

7.3.1 工件夹持工装应能可靠地夹持受检件,应能避免机械手在检测过程中与受检件出现干涉或碰撞等。

7.3.2 超声换能器的夹持工装应能可靠地夹持换能器,同时确保声束轴线方向上无遮挡,且具有与受检件表面或形廓特征相适配的结构,以利于进行受检件的坐标系对正。对采用液浸检测方式的换能器夹持工装应防水防锈。

7.4 耦合介质

机械手检测系统通常采用液体或气体耦合介质实现非接触的超声自动扫查。

7.5 数据采集装置

7.5.1 机械手检测系统数据采集装置的采样频率应不低于 100 MHz,幅度分辨力应不低于 8 位(二进制)。

7.5.2 机械手检测系统应能实现超声信号与扫查位置数据的同步采集,可采用位置触发方式实现数据的同步采集,也可采用时间触发的方式实现数据同步采集。位置触发方式基于扫查轨迹位移增量触发数据采集,当扫查轨迹增量达到设定值时同步采集扫查点位姿数据和超声回波信号数据,位移增量应根据检测要求确定。时间触发方式基于时间增量触发数据采集,当时间增量达到设定值时同步采集扫查点位姿数据和超声回波信号数据,时间增量应根据机械手的运动速度和检测要求确定。

7.5.3 机械手检测系统计算机应具有扫查位置信号和超声检测信号同步采集的软硬件接口。

7.5.4 机械手检测系统应具有在机械手基准坐标系或工具坐标系中采集受检件位姿数据、识别受检件坐标系位姿的软件和硬件功能。

8 检测工艺与流程

8.1 检测准备

8.1.1 确定受检件的待测区域。

8.1.2 建立受检件的三维数学模型,以利于获得扫查轨迹。

8.2 检测参数确定

8.2.1 根据受检件可检出最小缺陷特征,依据 GB/T 11343、GB/T 11344 和 GB/T 27664.1 的要求,确定超声换能器的频率、声束焦距、焦点尺寸、声程长度等检测参数。

8.2.2 根据检测要求和选用的超声换能器,依据 GB/T 23908、GB/T 23912、GB/T 27664.1 和 GB/T 27664.2 的要求,确定超声检测仪的激励电压、接收带宽、接收增益等检测参数。

8.2.3 根据换能器声束直径确定扫查点间距和扫查轨迹行距,扫查点间距和扫查轨迹行距宜选为 $(1/4 \sim 1/2)$ 声束直径。

8.3 轨迹规划

8.3.1 对于已知计算机辅助设计(CAD)模型的受检件,可借助计算机辅助制造(CAM)软件进行轨迹

规划,得到扫查轨迹上采样点的离散坐标和法向角等信息,再根据相应扫查方式的约束条件和关节式机械手 $D-H$ 参数等通过坐标变换计算得到机械手工具坐标系位置和姿态的坐标数据,用于生成机械手检测系统的扫查运动轨迹。参见附录 A。

8.3.2 对于几何模型未知的受检件,可通过测绘获取受检件的几何模型,然后再借助计算机辅助制造 (CAM) 软件进行轨迹规划。

8.3.3 利用 CAM 软件进行轨迹规划的方法,参见附录 A。

8.4 坐标系找正

利用超声换能器或在机械手末端执行器上安装长度测量传感器的方法,测量受检件表面 6 个以上特征点在机械手坐标系的坐标值,或测量受检件表面若干规划点在机械手坐标系的坐标值,根据受检件表面的模型和坐标变换原理,计算出工件坐标系与机械手坐标系的位置和姿态关系参数,若两者的位姿关系与扫查轨迹规划时的设定不同,应按实测的位姿关系重新进行扫查轨迹规划或通过调整工件的装夹位置和姿态使其与轨迹规划时的设定关系一致。

8.5 检测灵敏度验证

在对受检件进行检测前,应利用参考试块对机械手检测系统的综合检测灵敏度进行校验。

8.6 检测数据处理与显示

检测过程中,机械手检测系统应同步采集扫查点位置对应的超声检测信号数据,设置时间闸门并提取闸门内检测信号的特征(缺陷回波信号幅度、峰值频率、峰值位置等),以超声 B 扫描或 C 扫描图像的形式显示检测结果,宜同时显示 A 扫描信号波形。

8.7 检测流程

机械手超声检测的流程一般为:

- a) 装夹受检件/换能器,并进行工件坐标系相对于机械手坐标系位置和姿态的找正;
- b) 进行扫查轨迹规划;
- c) 设定超声检测系统参数(包括:超声检测仪工作模式、激励电压、接收增益和滤波频率、时间闸门位置等)和扫查运动参数(包括:扫查范围、扫查间距、扫查轨迹行距和扫查运动速度等);
- d) 运行扫查控制和超声检测成像软件,记录检测数据,并生成检测报告。

9 检测报告

检测报告的内容应包括但不限于:检测机构名称、检测设备名称、受检件描述、检测人员信息、检测日期、检测环境参数、检测结果数据与图像等信息。

附录 A
(资料性附录)

基于 CAM 软件的轨迹规划方法和实例

A.1 概述

检测前可利用计算机辅助制造(CAM)数控仿真软件规划机械手检测系统的扫查路径,获取覆盖受检件表面、各点间距满足检测要求的离散点以及在机械手基准坐标系中的位置和姿态,为实现利用机械手对受检件的自动化连续扫查检测提供路径数据。

A.2 机械手运动路径的轨迹规划流程

基于受检件计算机辅助设计(CAD)数学模型,利用 CAM 软件获取受检件扫查轨迹点在笛卡尔坐标系下的位姿坐标和法向矢量(超声入射角方向)。

根据检测方式(机械手夹持超声换能器或受检件运动)的不同,以及超声换能器/受检件装夹位置、超声波入射方向(直射或斜射)等要求,依据相应的坐标变换算法,将扫查轨迹点的位置坐标和入射方向角转换为机械手末端工具坐标系的轨迹点位姿信息。

轨迹规划时,提取出 CAM 后处理文件中离散点坐标数据用于构建机械手末端工具坐标系的位姿矩阵,通过对该位姿矩阵坐标变换的计算获取机械手的运动参数,该参数被传递给机械手控制器,从而驱动电机带动机械手各关节的运动。

机械手的轨迹规划流程如图 A.1 所示。

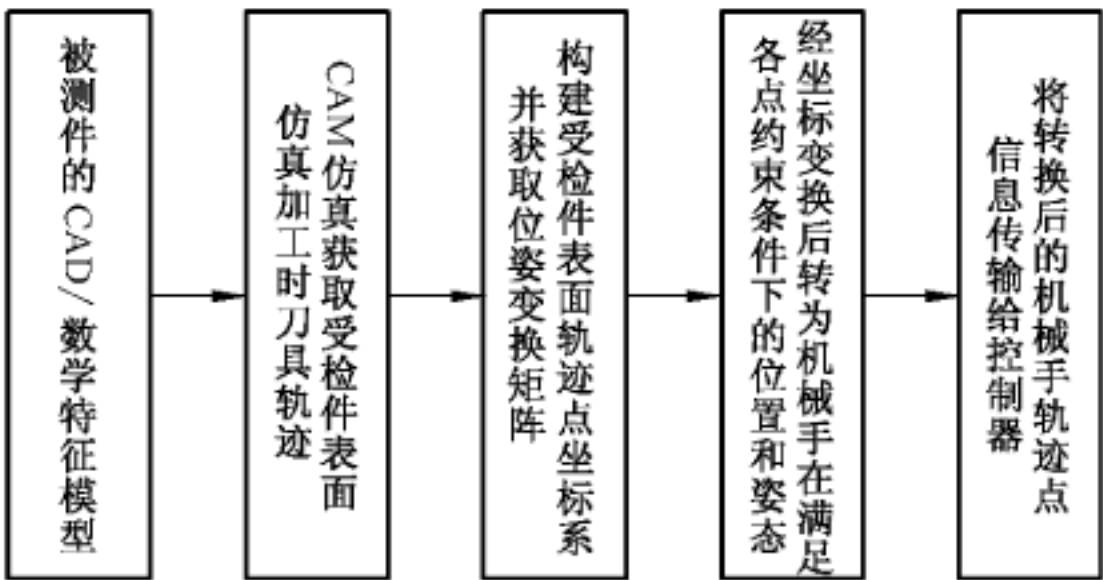


图 A.1 机械手轨迹规划流程示意图

以航空发动机叶片为例,其被测表面 CAM 加工仿真如图 A.2 所示。

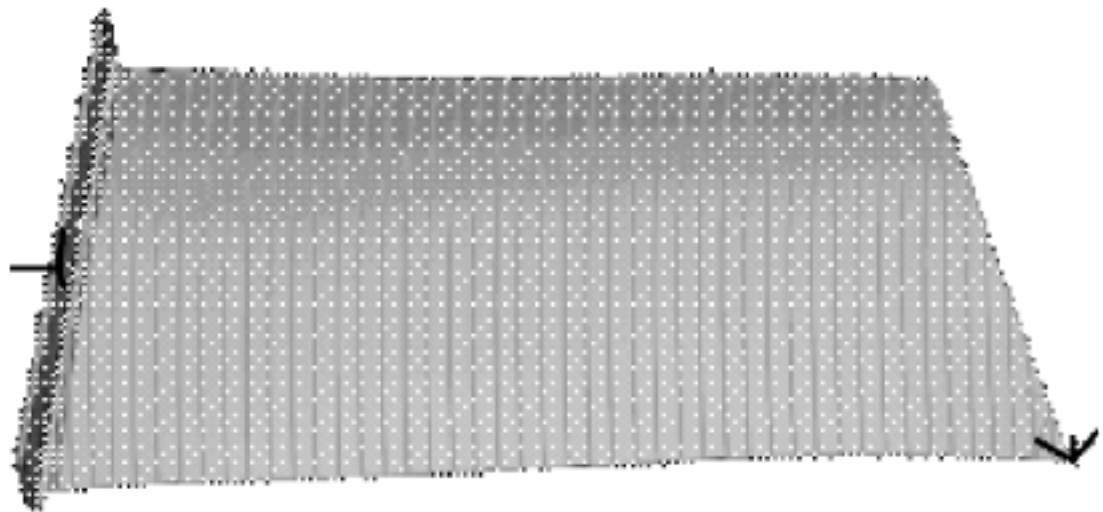


图 A.2 受检件的表面轨迹加工仿真

提取的离散点数据如图 A.3 所示:

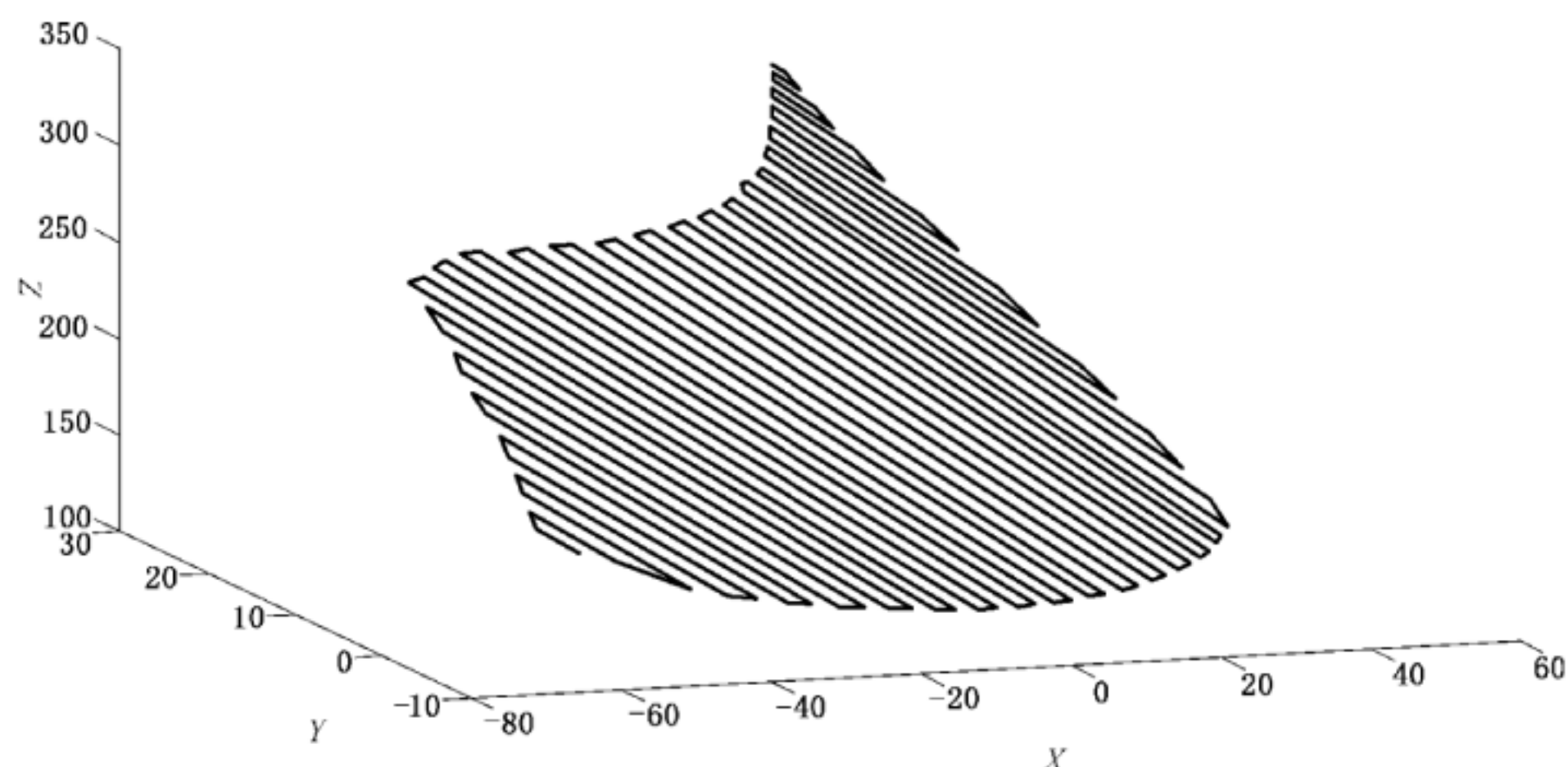


图 A.3 受检件的表面轨迹离散点提取

A.3 机械手夹持换能器运动检测方式的扫查点坐标变换方法

参考图 A.4, 机械手基准坐标系以 $\{W\}$ 表示, 将机械手的末端工具坐标系 $\{M\}$ 沿装配位置参数 (包括装夹长度和偏移量) 平移, 使其与超声换能器坐标系相重合, 以 $\{C\}$ 表示。受检件的工件坐标系以 $\{A\}$ 来表示, 在扫查轨迹点处建一个辅助坐标系 $\{B\}$ 。辅助坐标系 $\{B\}$ 在坐标系 $\{A\}$ 中的位姿, 通过规定 $\{B\}$ 坐标系的原点和各轴的方向与扫查轨迹点对应关系确定, 一般规定 $\{B\}$ 坐标系的原点在扫查点位置 $[x, y, z]$, 其 Z 轴沿扫查点法向, X 轴沿扫查轨迹切线方向 (可通过相邻两扫查点的矢量差近似逼近轨迹切线方向), Y 轴方向可通过求解 X 轴和 Z 轴的矢量积得出。

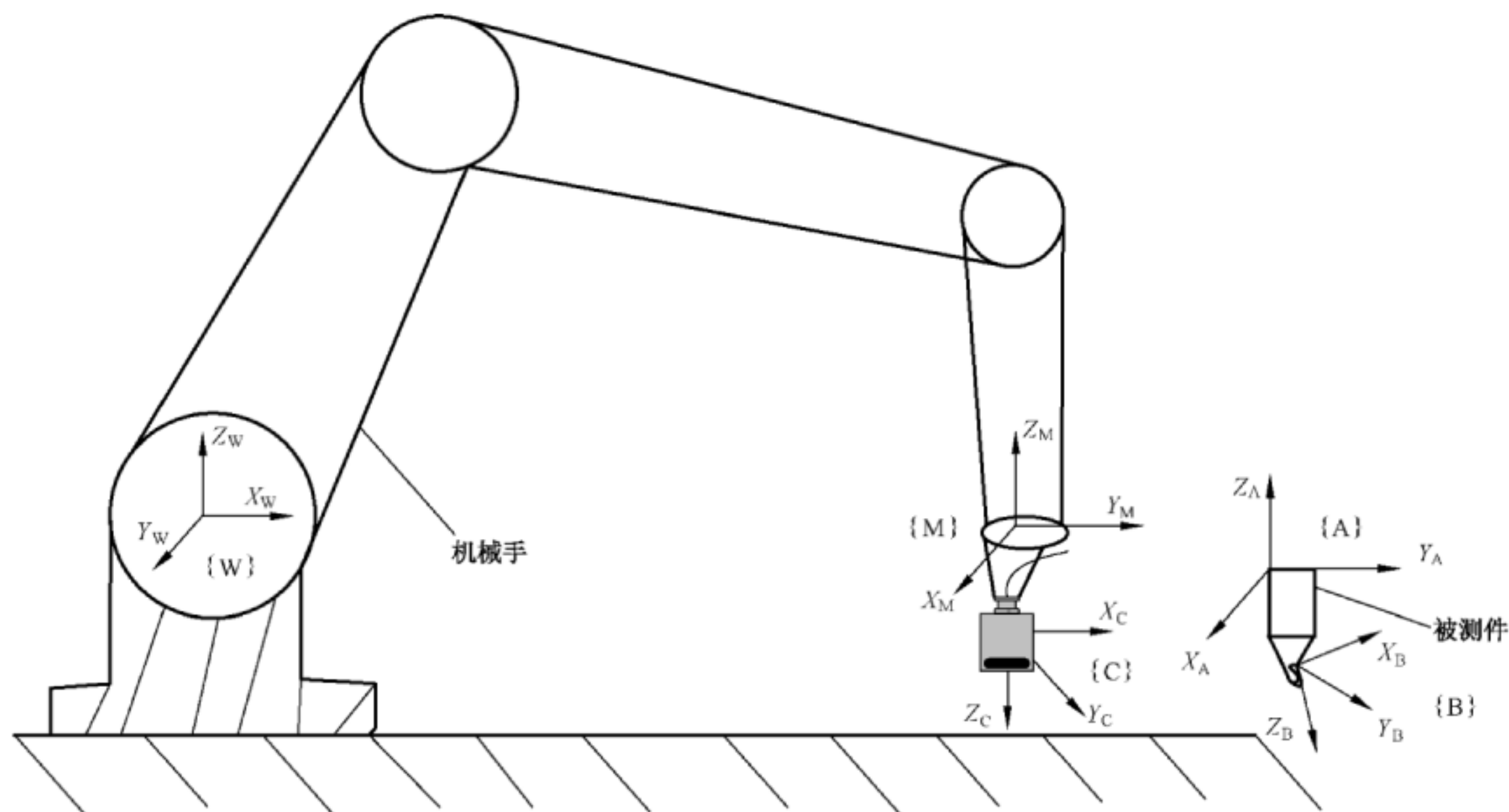


图 A.4 机械手夹持超声换能器时坐标系分布示意图

对于某空间矢量 P , 设其在坐标系 $\{A\}$, $\{B\}$, $\{C\}$ 中的位姿表示分别为 AP , BP , CP , 根据坐标变换原理, 其位姿表达从 $\{C\}$ 坐标系变换到 $\{B\}$ 坐标系的变换见式 (A.1):

$${}^B P = {}^B T {}^C P = {}^B T {}^A T {}^C P \quad \dots\dots\dots (A.1)$$

{B}坐标系与{C}坐标系之间的变换矩阵 ${}^B T$ 可分解为求解旋转矩阵 ${}^B R$ 和位置平移矢量 ${}^C P_{\text{BORG}}$,见式(A.2)。

$${}^B T = \begin{bmatrix} {}^B R & {}^C P_{\text{BORG}} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{c|c} {}^B R & {}^C P_{\text{BORG}} \\ \hline 0 & 1 \end{array} \right] \quad \dots\dots\dots (A.2)$$

式中:

$${}^B R = {}^A P {}^B P^{-1} = \begin{bmatrix} \xi_X & \varphi_X & \psi_X \\ \xi_Y & \varphi_Y & \psi_Y \\ \xi_Z & \varphi_Z & \psi_Z \end{bmatrix}$$

$\xi = [\xi_X, \xi_Y, \xi_Z]^T$ ——坐标系{B}的X轴在坐标系{A}中的方向矢量;

$\varphi = [\varphi_X, \varphi_Y, \varphi_Z]^T$ ——坐标系{B}的Y轴在{A}坐标系下的方向矢量;

$\psi = [\psi_X, \psi_Y, \psi_Z]^T$ ——坐标系{B}的Z轴在{A}坐标系下的方向矢量。

依据坐标变换原理,此时,同一矢量在坐标系{A}和{C}中的表述见式(A.3)。

$${}^A R = {}^A P {}^C P^{-1} \quad \dots\dots\dots (A.3)$$

假定受检件坐标系{A}与换能器坐标系{C}在检测前已确定位姿,当{A}坐标系与{C}坐标系重合时,为一单位矩阵。 ${}^A R$ 成为式(A.4)的正交矩阵:

$${}^A R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (A.4)$$

此时 ${}^B T$ 化简为式(A.5):

$${}^B T = \left[\begin{array}{c|c} {}^B R & {}^C P_{\text{BORG}} \\ \hline 0 & 1 \end{array} \right] \quad \dots\dots\dots (A.5)$$

以STAUBLI TX90XL六自由度机械手为例,各关节运动规律符合X-Y-Z欧拉角的旋转顺序,根据机器人运动学的相关原理可知其满足式(A.6):

$$\begin{aligned} R_{X-Y-Z} &= R_X(\alpha) R_Y(\beta) R_Z(\gamma) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & -\sin\alpha \\ 0 & \sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\beta & 0 & \sin\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\beta & 0 & \cos\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\gamma & -\sin\gamma & 0 \\ \sin\gamma & \cos\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} c\beta c\gamma & -c\beta s\gamma & s\beta \\ s\alpha s\beta c\gamma + c\alpha s\gamma & -s\alpha s\beta s\gamma + c\alpha c\gamma & -s\alpha c\beta \\ -c\alpha s\beta c\gamma + s\alpha s\gamma & c\alpha s\beta s\gamma + s\alpha c\gamma & c\alpha c\beta \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (A.6) \end{aligned}$$

式中, $\cos\alpha$ 和 $\sin\alpha$ 分别简写成 $c\alpha$ 和 $s\alpha$,以便于观察。

求解矩阵 ${}^B R$,得到使{B}坐标系与{C}坐标系满足约束条件时的机械手的工具坐标系需要转过的欧拉角为:

$$\beta = \arctan2(-\xi_Z, \sqrt{\xi_X^2 + \xi_Y^2})$$

$$\alpha = \arctan2(-\xi_Y/\cos\beta, \xi_X/\cos\beta)$$

$$\gamma = \arctan2(-\varphi_Z/\cos\beta, \psi_Z/\cos\beta)$$

计算出机械手控制器所需要的运动学参数 $[X, Y, Z, \alpha, \beta, \gamma]$ 。

A.4 机械手夹持受检件运动检测方式下扫描点坐标变换方法

参考图A.4,机械手基准坐标系以{W}表示,将机械手的末端工具坐标系沿装配位置参数(包括装夹长度和偏移量)平移,使其与工件坐标系相重合,以坐标系{A}来表示,超声换能器坐标系以{C}表示,在扫描轨迹点处建一个辅助坐标系{B}。辅助坐标系{B}在坐标系{A}中的位姿,通过规定{B}坐标系

的原点和各轴的方向与扫描轨迹点的位置和方向间的关系确定,一般规定{B}坐标系的原点在扫描点位置 $[X, Y, Z]$,其 Z 轴沿扫描点法向, X 轴沿扫描轨迹切线方向(可通过相邻两扫描点的矢量差近似逼近轨迹切线方向), Y 轴方向可通过求解 X 轴和 Z 轴的矢量积得出。

对于某空间矢量 P ,设其在坐标系{A}、{B}、{C}中的位姿表示分别为 ${}^A P$ 、 ${}^B P$ 、 ${}^C P$,根据坐标变换原理,其位姿表达从{C}坐标系变换到{A}坐标系的变换见式(A.7):

$${}^A P = {}^A T_B {}^B P = {}^A T_C {}^C P \quad \dots\dots\dots (A.7)$$

{A}坐标系与{C}坐标系之间的变换矩阵 ${}^A T_C$ 可分解为求解旋转矩阵 ${}^A R_C$ 和位置平移矢量 ${}^C P_{AORG}$,见式(A.8)。

$$\begin{aligned} {}^A T_C &= \begin{bmatrix} {}^A R_C & {}^C P_{AORG} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^A R_C^T {}^B R^T {}^C R^T & {}^A R_C^T {}^B R^T {}^C R^T {}^C P_{AORG} + {}^C P_{BORG} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} {}^A R_C^T {}^B R^T {}^C R^T & -{}^A R_C^T {}^B R^T {}^C R^T {}^C P_{BORG} + {}^C P_{BORG} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (A.8) \end{aligned}$$

式中:

$${}^A R_C = {}^A P^B P^{-1} = \begin{bmatrix} \xi_X & \varphi_X & \Psi_X \\ \xi_Y & \varphi_Y & \Psi_Y \\ \xi_Z & \varphi_Z & \Psi_Z \end{bmatrix}$$

$\xi = [\xi_X, \xi_Y, \xi_Z]^T$ ——坐标系{B}的 X 轴在坐标系{A}中的方向矢量;

$\varphi = [\varphi_X, \varphi_Y, \varphi_Z]^T$ ——坐标系{B}的 Y 轴在{A}坐标系下的方向矢量;

$\Psi = [\Psi_X, \Psi_Y, \Psi_Z]^T$ ——坐标系{B}的 Z 轴在{A}坐标系下的方向矢量。

依据坐标变换原理,此时,同一矢量在坐标系{A}和{C}中的表述见式(A.9)。

$${}^B R_C = {}^B P^C P^{-1} \quad \dots\dots\dots (A.9)$$

假定{B}坐标系与{C}坐标系重合时, ${}^B R_C$ 为一单位矩阵。当{B}坐标系的 Z 轴与{C}坐标系的 Z 轴反向共线时(满足超声换能器声束轴线与叶片扫描点法向共线的约束条件), ${}^B R_C$ 成为式(A.10)的正交矩阵:

$${}^B R_C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (A.10)$$

此时 ${}^A T_C$ 化简为式(A.11):

$${}^A T_C = \begin{bmatrix} {}^A R_C^T & -{}^A R_C^T {}^C P_{BORG} + {}^C P_{BORG} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (A.11)$$

以 STAUBLI TX90XL 六自由度机械手为例,各关节运动规律符合 X - Y - Z 欧拉角的旋转顺序,根据机器人运动学的相关原理,可知其满足式(A.12):

$$\begin{aligned} R_{X-Y-Z} &= R_X(\alpha) R_Y(\beta) R_Z(\gamma) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & -\sin\alpha \\ 0 & \sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\beta & 0 & \sin\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\beta & 0 & \cos\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\gamma & -\sin\gamma & 0 \\ \sin\gamma & \cos\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} c\beta c\gamma & -c\beta s\gamma & s\beta \\ s\alpha s\beta c\gamma + c\alpha s\gamma & -s\alpha s\beta s\gamma + c\alpha c\gamma & -s\alpha c\beta \\ -c\alpha s\beta c\gamma + s\alpha s\gamma & c\alpha s\beta s\gamma + s\alpha c\gamma & c\alpha c\beta \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (A.12) \end{aligned}$$

式中, $\cos\alpha$ 和 $\sin\alpha$ 分别简写成 $c\alpha$ 和 $s\alpha$,以便于观察。

求解矩阵 ${}^A R_C^T$,得到使{B}坐标系与{C}坐标系满足约束条件时的机械手的工具坐标系{A}需要转过的欧拉角为:

$$\beta = a \tan 2(-\Psi_X, \sqrt{\xi_X^2 + \varphi_X^2})$$

$$\alpha = a \tan 2(-\varphi_X / \cos \beta, \xi_X / \cos \beta)$$
$$\gamma = a \tan 2(-\Psi_Y / \cos \beta, \Psi_Z / \cos \beta)$$

机械手从工具坐标系{A}所在的初始位置运动到使{B}坐标系和{C}坐标系满足约束条件时的位置所需要平移的矢量 ${}^C P_A$ 见式(A.13):

$${}^C P_A = -{}^B_A R {}^B P_{AORG} + {}^C P_{BORG} \quad \cdots \cdots \cdots (A.13)$$

机械手所需要的运动学参数(${}^C P_{AX}, {}^C P_{AY}, {}^C P_{AZ}, \alpha, \beta, \gamma$)即可求解出。

A.5 机械手检测系统实例

图 A.5 是单机械手夹持受检件运动的反射法(方式 3)机械手检测系统的一个例子,由机械手及其控制器、超声换能器、超声脉冲收发装置、数据采集卡、工控机、检测软件、水循环系统、辅助硬件、机械结构和被检测试件等组成。机械手的末端执行器安装有法兰盘,以方便安装和固定喷水装置和超声换能器/被测工件等。工控机与机械手控制器通过网络等通讯接口连接,可以在工控机与机械手控制器之间传输控制文件、运动参数和状态等。超声换能器、脉冲收发装置与工控机通过射频信号线缆连接,工控机内装有超声波形信号采集卡和机器人末端执行器位姿数据采集卡,通过两卡间的同步触发接口实现超声检测信号和扫描位置数据的同步采集,测控计算机根据采集的扫描点位置数据及对应的超声信号特征数据形成受检件的超声 C 扫描图像。

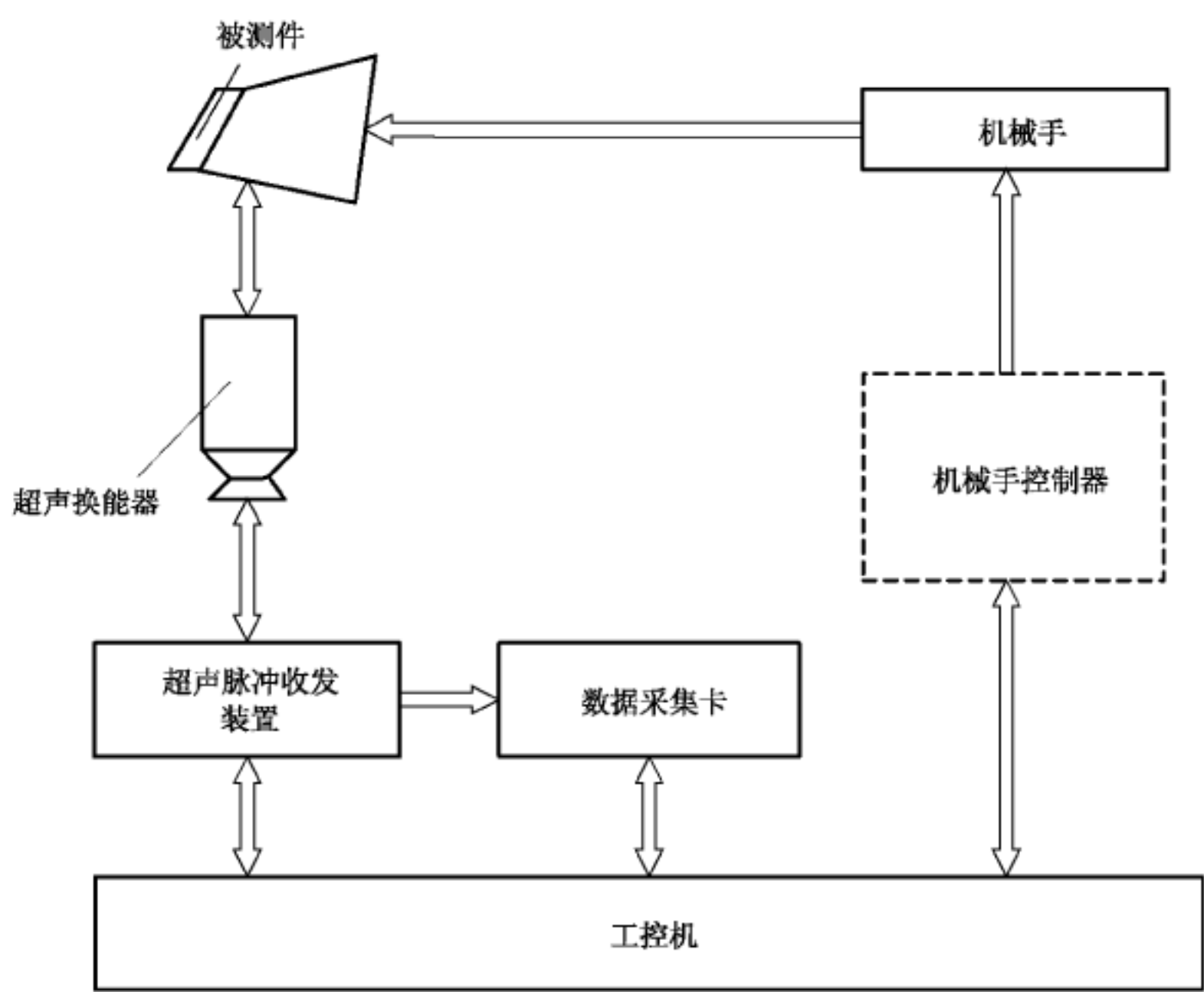


图 A.5 单机械手超声反射法检测系统

图 A.6 是双机械手穿透法机械手检测系统的一个例子,两个机械手各自夹持超声发射换能器和超声接收换能器。检测过程中,两个机械手实时将末端执行器的空间位置和姿态传输给工控机,主机械手夹持超声激励换能器发射超声信号,从机械手夹持超声接收换能器接收穿透受检件的超声波信号。超声采集卡采集受检件扫描离散点处对应的接收换能器采集的超声回波时域信号,测控计算机根据采集的扫描点位置数据及对应的超声信号特征数据形成受检件的超声 C 扫描图像。

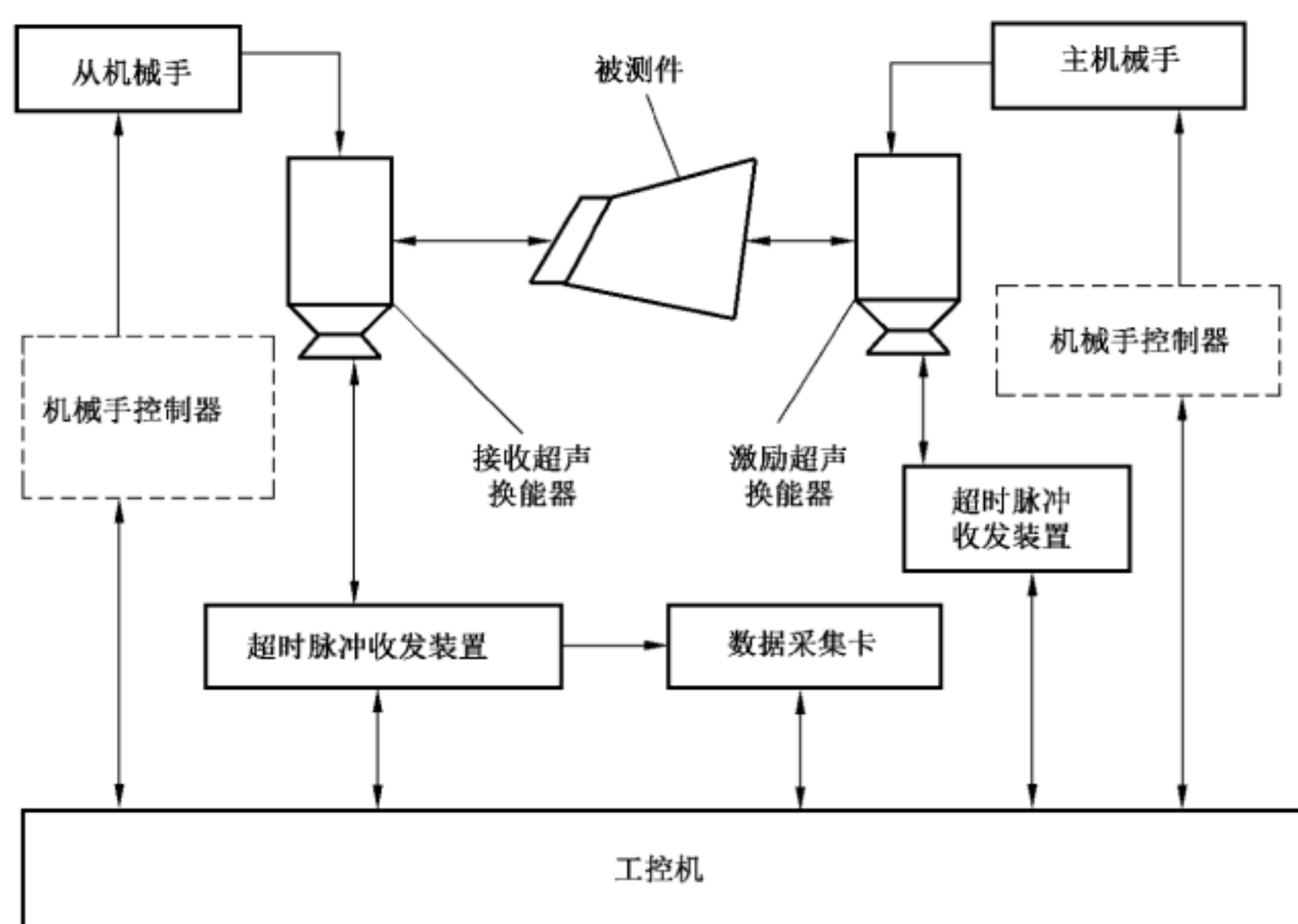


图 A.6 双机械手超声穿透法无损检测系统

中 华 人 民 共 和 国
国 家 标 准
无损检测 机械手超声检测方法
GB/T 34892—2017

*

中国标准出版社出版发行
北京市朝阳区和平里西街甲2号(100029)
北京市西城区三里河北街16号(100045)

网址: www.spc.org.cn

服务热线: 400-168-0010

2017年11月第一版

*

书号: 155066 • 1-58235

版权专有 侵权必究



GB/T 34892—2017