

基于管道插接的相贯线焊缝提取算法及数值模拟

李湘文¹, 黄宏亮¹, 洪波¹, 李然², 马秀萍², 王英俊¹

(1. 湘潭大学, 焊接机器人及其应用湖南省重点实验室, 湘潭, 411105; 2. 中国航发南方工业有限公司, 株洲, 412000)

摘要: 针对工件上多个不同直径管道的筒体内壁焊缝位置信息难于提取的技术问题, 设计了一种能识别支管空间位置和尺寸信息的焊缝位置识别传感器, 通过该装置采集到的数据, 结合已知工件空间位置和尺寸信息, 建立管道插接焊缝的位置模型, 并推导出基于此模型的焊缝特征矩阵和焊枪姿态矩阵. 将采集的数据结合上述数学模型, 在 MATLAB 软件中进行仿真对比. 结果表明, 其精度误差最大为 0.25 mm, 满足实际焊接精度要求, 验证了该传感器与数学模型的准确性. 该传感器及其焊缝特征识别方法具有通用性, 对管道插接焊接任务的自动化、智能化具有重要意义.

创新点: (1) 设计了一种适用于管管相交相贯线焊缝空间位置识别传感器.

(2) 建立了基于焊缝识别传感器的相关数学模型.

关键词: 管管相贯线焊缝; 空间位置识别数学模型; 数值模拟; 焊接自动化

中图分类号: TG 409 文献标识码: A doi: 10.12073/j.hjxb.20210316002

0 序言

管道插接形成的相贯线焊缝在航天航空、石油化工、建筑、船舶等工程领域广泛存在, 是一种典型的焊缝形式^[1]. 但管管相贯结构所形成的焊缝为空间曲线焊缝, 坡口形状不规则且有不均匀的变化^[2]. 为实现其焊接自动化, 国内外学者进行了大量的研究工作. 早期的管管焊接设备的研究主要是针对大型的管道对接焊接, 通过使用周向运动的焊接小车, 环绕焊缝运动实现大型管道的相贯线焊接^[3]. 或者采用分段的方式将圆周焊道细分为小段, 再平滑过渡分段函数拟合为连续函数^[4], 以此来研究管道对接全位置焊接. 康少杰等人^[5]开发了一种可变式圆弧轨道的焊接机器人装置, 能进行相贯线焊缝全方位不同宽度焊缝的焊接. 随着管管焊接的需求趋于复杂化、差异化, 管管焊接设备的研究也朝着精细化智能化发展. 高利军等人^[6]设计了一种新型钢制暖气片相贯线焊缝专用焊机, 并建立了相贯线焊缝数学模型, 推导出了基于此模型的焊机

自步角算法. 刘永滨等人^[7]则采用 MSC.Marc 软件对天然气管道在役修补焊接过程进行数值模拟, 其管道残余变形峰值出现在焊缝的收弧区域, 最大收缩变形量为 1.79 mm. 上述关于管道插接的相贯线焊接的研究, 多是针对于单一管道或者同一类型的多个不同管道插接焊缝, 对于同时需要焊接两个及以上不同直径乃至不同插接形式的焊接任务, 相关研究并不多见.

针对筒体内壁的管道插接焊接任务, 设计了一种能提取支管空间位置和尺寸信息的传感器, 并在此基础上建立管道插接焊缝位置模型和焊缝特征与焊枪姿态矩阵, 最后利用 MATLAB 结合初值对该数学模型进行了数值模拟验证.

1 管道插接焊缝位置识别传感器

管道插接有管-板插接、管-管插接、管-锥插接和管-球插接等种类, 其中每个种类有各种插接形式, 例如管-管插接又包含有管管正交、管管斜交、管管正交偏置、管管斜交偏置 4 种形式, 所以管道插接焊缝不仅曲线复杂, 而且种类繁多. 然而, 在大部分管道插接焊缝的焊接任务中, 其主件(即主板、主管、锥体或球体)位置均为已知, 只需确定支管位

置及尺寸,便能得到焊缝位置.

如图1所示,焊缝位置识别传感器通过提取支管开口截面内圆的空间位置和尺寸(即图1a加粗的空间圆),来确定支管空间位置,提取方法为图1b所示通过传感器获取过支管开口截面内圆的同轴的两锥面A和B,联立两锥面得到的空间圆即为支管开口截面内圆.实际操作时,通过获取锥面A和锥面B上各4条相同方位的母线,取交点达到相同效果.此传感器对于不同支管直径,不同管道插接种类和管道插接形式具有通用性.焊缝位置识别传感器如图1c所示,由支架、曲柄、连杆、滑块、角度传感器和铰链底座组成,共含有4组曲柄滑块机构.

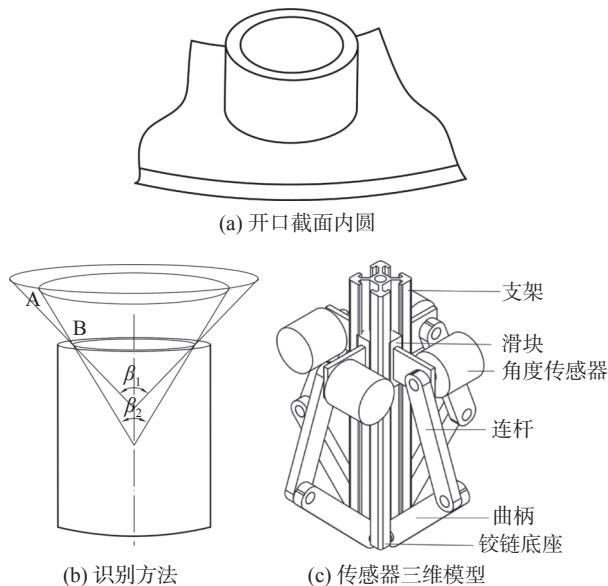


图1 传感器识别目标、方法和三维模型

Fig. 1 Sensor identification target, identification and 3D model. (a) open section inner circle; (b) identification method; (c) sensor 3D model

如图2所示,当进行采样识别工作时,传感器整体沿支架轴线下降伸入支管内部,由于受支管对曲柄的反作用力,4组曲柄滑块机构将分别运动到某一位置,此时进行第一次采样,由4个角度传感器获取此时曲柄对支架的夹角,由编码器反馈此时传感器高度,每组曲柄滑块的位置和角度信息可以得到一条空间直线;采集完毕后,传感器继续下降一定位置,进行第二次采样.将第二次采样得到的空间直线与第一次采样得到的空间直线联立,可以得到4个交点,所得的交点均在支管开口截面内圆上.空间上三点可确定空间圆的尺寸与位置,第4点用来防止干扰点与减小误差.

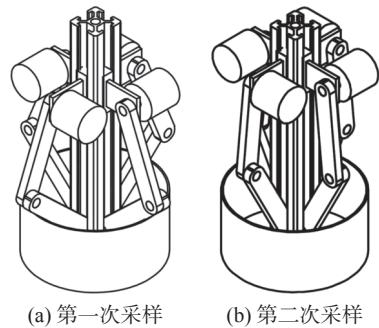


图2 传感器信号采集

Fig. 2 Sensor signal acquisition. (a) first sampling; (b) second sampling

2 管道插接焊缝的数学模型

以圆筒内壁的管道插接为研究对象,包含管管正交、管管斜交、管管正交偏置、管管斜交偏置等插接形式,建立基于焊缝位置识别传感器的焊缝数学模型,及焊缝焊枪特征矩阵.如图3所示,传感器增加小车支架、小车移动副、转盘转动副、电动缸移动副,并移动到图3所示的初始位置,以转盘转动副轴线与传感器支架轴线交点为原点 O_1 ,重力方向为 z_1 轴,圆筒轴线方向为 x_1 轴,建立 $O_1x_1y_1z_1$ 初始坐标系,其中小车移动副的移动方向与 x_1 轴方向重合,转盘轴线方向与 x_1 轴重合,在初始位置传感器轴线与 z_1 轴重合.

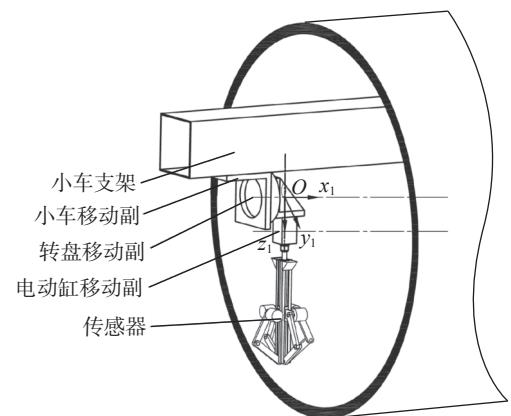


图3 传感器初始坐标系

Fig. 3 Initial coordinate system of sensor

2.1 管道插接焊缝位置模型

如图4所示,小车从初始位置沿 x_1 轴方向平移 l ,转盘以 x_1 轴为轴线顺时针旋转 α 角,得到 $O_2x_2y_2z_2$ 工作坐标系,则坐标系 $O_1x_1y_1z_1$ 到坐标系 $O_2x_2y_2z_2$ 的变换矩阵.

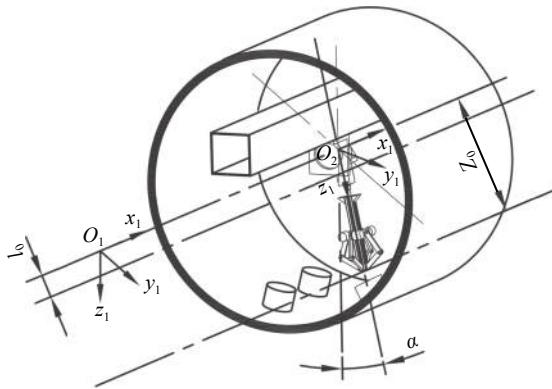


图4 传感器工具坐标系

Fig. 4 Sensor tool coordinate system

$${}^1_2 T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & l \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

圆筒内壁半径为 R , 轴线在 $x_1 O_1 z_1$ 面内, 与 x_1 轴平行且距离为 l_0 . 圆筒内壁在坐标系 $O_2 x_2 y_2 z_2$ 下的方程为

$$(y + l_0 \sin \alpha)^2 + (z - l_0 \cos \alpha)^2 = R^2 \quad (2)$$

在 $O_2 x_2 y_2 z_2$ 坐标系下, 已知传感器铰链底座的 4 个铰链轴线所在平面到 $x_2 O_2 y_2$ 面距离为 Z_0 , 4 组曲柄的方位角为

$$\phi_i = \begin{cases} 0, & i = 1 \\ \frac{1}{2}\pi, & i = 2 \\ \pi, & i = 3 \\ \frac{3}{2}\pi, & i = 4 \end{cases} \quad (3)$$

第一次采样得到的直线参数方程为

$$\begin{cases} p_i = (x_i, y_i, z_i) \\ x = (t + r_0) \cos \phi_i \\ y = (t + r_0) \sin \phi_i \\ z = -t \cot \beta_{1i} + Z_0 + Z_1 \end{cases}, \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (4)$$

第二次采样得到的直线参数方程为

$$\begin{cases} x = (t + r_0) \cos \phi_i \\ y = (t + r_0) \sin \phi_i \\ z = -t \cot \beta_{2i} + Z_0 + Z_1 + Z_2 \end{cases} \quad (5)$$

式中: r_0 为铰链轴线到支架轴线距离; β_{1i}, β_{2i} 分别为第一次采样和第二次采样得到的曲柄与传感器轴线夹角的角度数据; Z_1 为第一次采样时电动缸移动距离; Z_2 为第一次采样移动到第二次采样时电动缸移动距离, 联立 (4) 和 (5), 可得

$$t_i = \frac{Z_2}{\cot \beta_{2i} - \cot \beta_{1i}}, \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (6)$$

代入式 (4) 得到两组直线的 4 个交点, 此 4 点即为支管开口截面内圆上 4 点, 设 $P_i = (x_i, y_i, z_i)$, $i = 1, 2, 3, 4$, 则

$$\begin{cases} x_i = (t_i + r_0) \cos \phi_i \\ y_i = (t_i + r_0) \sin \phi_i \\ z_i = -t_i \cot \beta_{1i} + Z_0 + Z_1 \end{cases}, \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (7)$$

取支管开口截面内圆所在平面内的两个向量为

$$\begin{cases} \mathbf{n}_1 = P_1 - P_2 = (x_1 - x_2, y_1 - y_2, z_1 - z_2) \\ \mathbf{n}_2 = P_1 - P_3 = (x_1 - x_3, y_1 - y_3, z_1 - z_3) \end{cases} \quad (8)$$

则支管开口截面内圆所在平面的法向量为

$$\begin{cases} \mathbf{n} = \mathbf{n}_1 \times \mathbf{n}_2 = (x_n, y_n, z_n) \\ x_n = \begin{vmatrix} y_1 - y_2 & z_1 - z_2 \\ y_1 - y_3 & z_1 - z_3 \end{vmatrix} \\ y_n = \begin{vmatrix} z_1 - z_2 & x_1 - x_2 \\ z_1 - z_3 & x_1 - x_3 \end{vmatrix} \\ z_n = \begin{vmatrix} x_1 - x_2 & y_1 - y_2 \\ x_1 - x_3 & y_1 - y_3 \end{vmatrix} \end{cases} \quad (9)$$

直线 $l_{P_1 P_2}$ 、直线 $l_{P_1 P_3}$ 的中点坐标为

$$\begin{cases} P_{12} = \frac{P_1 + P_2}{2} = (x_{P_{12}}, y_{P_{12}}, z_{P_{12}}) = \left(\frac{x_1 + x_2}{2}, \frac{y_1 + y_2}{2}, \frac{z_1 + z_2}{2} \right) \\ P_{13} = \frac{P_1 + P_3}{2} = (x_{P_{13}}, y_{P_{13}}, z_{P_{13}}) = \left(\frac{x_1 + x_3}{2}, \frac{y_1 + y_3}{2}, \frac{z_1 + z_3}{2} \right) \end{cases} \quad (10)$$

直线 $l_{P_1 P_2}$ 、直线 $l_{P_1 P_3}$ 的中垂线方向向量为

$$\begin{cases} \mathbf{n}_{12} = \mathbf{n} \times \mathbf{n}_1 = (x_{12}, y_{12}, z_{12}) \\ \mathbf{n}_{13} = \mathbf{n} \times \mathbf{n}_2 = (x_{13}, y_{13}, z_{13}) \end{cases} \quad (11)$$

由于直线 l_{12} 与直线 l_{13} 的中垂线都经过空间圆的圆心 c , 有 $P_c = (x_c, y_c, z_c)$, 即

$$P_{12} + \lambda_1 \mathbf{n}_{12} = P_{13} + \lambda_2 \mathbf{n}_{13} \quad (12)$$

$$\begin{cases} x_{P_{12}} + \lambda_1 x_{12} = x_{P_{13}} + \lambda_2 x_{13} \\ y_{P_{12}} + \lambda_1 y_{12} = y_{P_{13}} + \lambda_2 y_{13} \end{cases} \quad (13)$$

$$\lambda_2 = \frac{(y_{P_{12}} - y_{P_{13}}) x_{12} - (x_{P_{12}} - x_{P_{13}}) y_{12}}{y_{P_{13}} x_{P_{12}} - y_{P_{12}} x_{P_{13}}} \quad (14)$$

$$(x_c, y_c, z_c) = P_{13} + \lambda_2 \mathbf{n}_{13} \quad (15)$$

由距离公式得半径 r 为

$$r = |P_1 - P_c| = \sqrt{(x_1 - x_c)^2 + (y_1 - y_c)^2 + (z_1 - z_c)^2} \quad (16)$$

设 x_2 轴单位矢量为 $\mathbf{i} = (1, 0, 0)$, 支管开口截面与 $y_2 O_2 z_2$ 面的交线的单位矢量为 \mathbf{a} , 则

$$\begin{cases} \mathbf{a} = \frac{\mathbf{n} \times (-\mathbf{i})}{|\mathbf{n} \times (-\mathbf{i})|} = (x_a, y_a, z_a) \\ \mathbf{b} = \frac{\mathbf{n} \times \mathbf{a}}{|\mathbf{n} \times \mathbf{a}|} = (x_b, y_b, z_b) \end{cases} \quad (17)$$

由圆心 c 、圆上正交单位矢量 a 和 b 、半径 r 可得空间圆参数方程.

$$\begin{cases} x = x_c + rx_a \cos \theta + rx_b \sin \theta \\ y = y_c + ry_a \cos \theta + ry_b \sin \theta \\ z = z_c + rz_a \cos \theta + rz_b \sin \theta \end{cases} \quad (18)$$

式(18)为支管开口截面内圆所在空间位置方程,参数 θ 取值范围为 $[0, 2\pi]$, 此时参数 θ 的物理意义为圆上一点到圆心 c 连成的直线与 a 的夹角.

支管内壁曲面参数方程为

$$\begin{cases} x' = x - \lambda x_n \\ y' = y - \lambda y_n \\ z' = z - \lambda z_n \end{cases} \quad (19)$$

$$\begin{cases} x' = x_c + rx_a \cos \theta + rx_b \sin \theta - \lambda x_n \\ y' = y_c + ry_a \cos \theta + ry_b \sin \theta - \lambda y_n \\ z' = z_c + rz_a \cos \theta + rz_b \sin \theta - \lambda z_n \end{cases} \quad (20)$$

式中: x, y, z 为圆参数方程联立支管内壁曲面参数方程与主管方程.

$$y'^2 + z'^2 = R^2 \quad (21)$$

$$\lambda_\theta = \frac{\sqrt{R^2 y_n^2 + R^2 z_n^2 - z^2 y_n^2 - y^2 z_n^2 + 2yz y_n z_n - yy_n + zz_n}}{y_n^2 + z_n^2} \quad (22)$$

带入(20)得到焊缝方程,即

$$\begin{cases} x = x_c + rx_a \cos \theta + rx_b \sin \theta - \lambda_\theta x_n \\ y = y_c + ry_a \cos \theta + ry_b \sin \theta - \lambda_\theta y_n \\ z = z_c + rz_a \cos \theta + rz_b \sin \theta - \lambda_\theta z_n \end{cases} \quad (23)$$

2.2 管道插接焊缝特征模型

焊缝坐标系及焊缝辅助坐标系的定义参照文献[4],如图5所示,焊缝方程为关于 θ 的参数方程,取 $\theta = \theta_w$,有焊缝上一点 $P_w(x_0, y_0, z_0)$,空间圆上一点 $P_w^1(x'_w, y'_w, z'_w)$,设 P_w 点为当前焊点,则圆筒内壁在该焊点处的切平面 A 的法向量,即

$$\mathbf{S}_1 = (X_1, Y_1, Z_1) = (0, y_w + l_0 \sin \alpha, z_w - l_0 \cos \alpha) \quad (24)$$

支管在焊点处的切平面 B 的法向量为

$$\mathbf{S}_2 = (X_2, Y_2, Z_2) = (x'_w - x_c, y'_w - y_c, z'_w - z_c) \quad (25)$$

平面 A 和平面 B 的夹角为二面角 φ ,即

$$\cos(\mathbf{S}_1 \cdot \mathbf{S}_2) = \frac{\mathbf{S}_1 \cdot \mathbf{S}_2}{|\mathbf{S}_1| \cdot |\mathbf{S}_2|} \quad (26)$$

$$\varphi = \pi - \arccos\left(\frac{\mathbf{S}_1 \cdot \mathbf{S}_2}{|\mathbf{S}_1| \cdot |\mathbf{S}_2|}\right) \quad (27)$$

$$\mathbf{T}^w = \begin{bmatrix} \cos \gamma \cos \beta + \sin \gamma \sin \beta \sin \alpha & -\sin \gamma \cos \beta + \cos \gamma \sin \beta \sin \alpha & \sin \beta \cos \alpha & p_{twx} \\ \sin \gamma \cos \alpha & \cos \gamma \cos \alpha & -\sin \alpha & p_{twy} \\ -\cos \gamma \sin \beta + \cos \beta \sin \alpha \sin \gamma & \sin \gamma \sin \beta + \cos \beta \sin \alpha \cos \gamma & \cos \beta \cos \alpha & p_{twz} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (34)$$

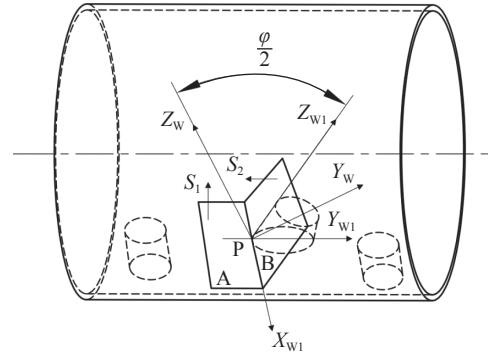


图5 管道插接坐标系示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the pipe socket coordinate system

由于相贯线上任意点的切线,始终与过该点的两个圆柱切平面的交线重合,因此 $X_w(X_w)$ 坐标轴向量为

$$\mathbf{S}_3 = \mathbf{S}_2 \times \mathbf{S}_1 = (X_3, Y_3, Z_3) \quad (28)$$

Z_w 坐标轴向量为

$$\mathbf{S}_4 = \mathbf{S}_2 \times \mathbf{S}_3 = (X_4, Y_4, Z_4) \quad (29)$$

Y_w 坐标轴的向量为

$$\mathbf{S}_5 = \mathbf{S}_4 \times \mathbf{S}_3 = (X_5, Y_5, Z_5) \quad (30)$$

坐标系 $O_w x_w y_w z_w$ 到坐标系 $O_w^1 x_w^1 y_w^1 z_w^1$ 变换矩阵为

$$\mathbf{T}^w = \begin{bmatrix} X_3 & X_4 & X_5 & x_0 \\ Y_3 & Y_4 & Y_5 & y_0 \\ Z_3 & Z_4 & Z_5 & z_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (31)$$

坐标系 $O_w x_w y_w z_w$ 绕 x_w 轴顺时针旋转 $\varphi/2$, 得焊缝坐标系 $O_w x_w y_w z_w$, 即

$$\mathbf{T}^w = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \frac{\varphi}{2} & -\sin \frac{\varphi}{2} & 0 \\ 0 & \sin \frac{\varphi}{2} & \cos \frac{\varphi}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (32)$$

焊缝坐标系相对于初始坐标系的特征矩阵为

$$\mathbf{T}^w = \frac{1}{2} \mathbf{T}^w \mathbf{T}^w \mathbf{T}^w = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \frac{\varphi}{2} & -\sin \frac{\varphi}{2} & 0 \\ 0 & \sin \frac{\varphi}{2} & \cos \frac{\varphi}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (33)$$

2.3 焊枪姿态模型

焊缝坐标系到焊枪坐标系为

通过焊枪坐标系相对焊缝坐标系的位姿矩阵,可以用数学算法计算出焊枪的 3 个角。

$$\text{设 } {}^w_T = \begin{bmatrix} C_{00} & C_{01} & C_{02} & p_{twx} \\ C_{10} & C_{11} & C_{12} & p_{twy} \\ C_{20} & C_{21} & C_{22} & p_{twz} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (35)$$

由式(34)和式(35)可得

$$\begin{cases} \alpha = -\arcsin C_{12} \\ \beta = \arctan 2(C_{02}, C_{22}) \\ \gamma = \arctan 2(C_{10}, C_{11}) \end{cases} \quad (36)$$

3 仿真试验

在 Creo 平台上搭建筒体内壁管管插接焊缝自动焊接机器人的三维模型,并模拟工作环境,采集传感器角度信息,将数据带入上述模型与算法当中,获得管管插接焊缝空间位置数学模型。利用 MATLAB 软件对数学模型进行仿真验证,并与设定的工件焊缝曲线进行对比分析。设定同一空间坐标点为起始点,以相同的比例将工件焊缝曲线和传感器得到的数据曲线划分为 64 等份,得到各点的坐标值,部分数据如表 1 所示。

表 1 实际坐标点与采样坐标点 (mm)

Table 1 Actual coordinate point and the sampling coordinate point

实际坐标点			采样坐标点		
X	Y	Z	X	Y	Z
10.000	0	6.633	10.000	0	6.633
9.950	0.998	6.707	10.033	1.065	6.666
9.800	1.986	6.924	9.800	2.035	7.097
9.553	2.955	7.261	9.536	2.914	7.440
9.210	3.894	7.691	9.227	3.911	7.884
8.775	4.794	8.184	8.789	4.912	8.267
8.253	5.646	8.711	8.217	5.760	8.750
7.648	6.442	9.246	7.631	6.420	9.289
6.967	7.173	9.770	6.994	7.295	9.671
6.216	7.833	10.264	6.237	7.956	10.237

对全部 64 个坐标数据进行分析比较,可得标定坐标点与采样坐标点在 x 轴和 y 轴方向的误差较小,其最大值为 0.12 mm,而 z 轴方向的偏差较大,所以主要分析 z 轴方向的误差。图 6 为 z 轴方向的焊缝偏差图,最大的焊缝偏差为 0.25 mm,其精度满足实际焊接精度要求。

图 7 为传感器识别曲线与工件焊缝曲线整体对比图。从图 7 可以看到,虽然二者存在一定偏差,但是整体偏差不大,传感器数据曲线基本接近工件

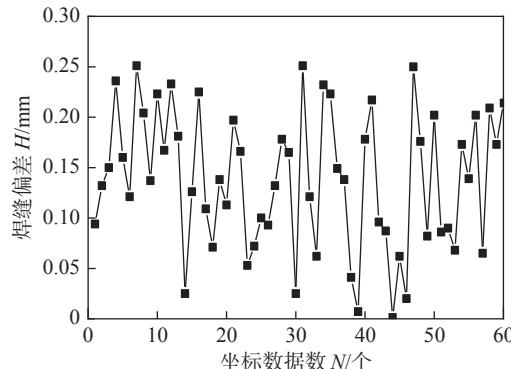


图 6 z 轴焊缝偏差图

Fig. 6 z-axis weld deviation chart

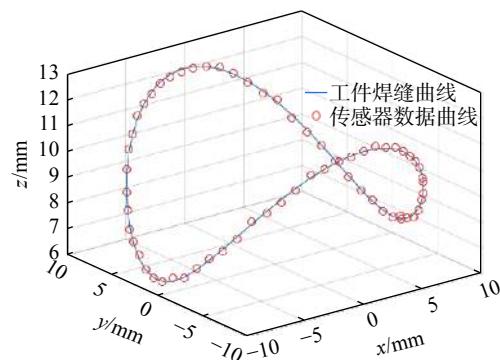


图 7 传感器识别曲线与工件焊缝曲线图

Fig. 7 Sensor identification curve and workpiece weld curve

焊缝曲线,证明了传感器模型和焊缝轨迹算法的准确性。

基于 ABB 公司开发的机器人仿真软件 RobotStudio 为平台,建立 ABB 机器人仿真系统。通过通讯的方式将传感器所采集的焊缝位置,作为机器人运动轨迹传输给仿真平台,结合焊缝姿态模型与焊枪姿态模型,由运动学逆解求出机械臂关节量,再把求得的变量带入运动学求正解,进行轨迹与姿态仿真。仿真结果如图 8 所示,焊枪的运动轨迹与焊缝

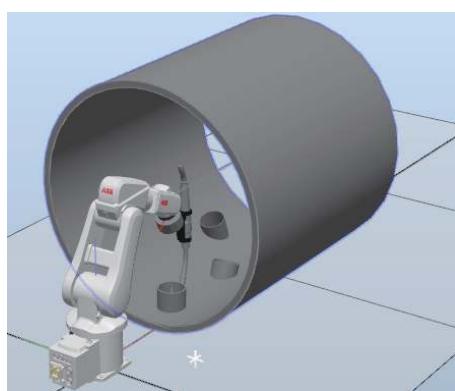


图 8 ABB 机器人仿真系统

Fig. 8 ABB robot simulation system

的特征完全重合,焊枪运动姿态也始终位于焊点两切面的夹角平分线上,验证了传感器所建立的数学模型正确性。

4 结论

(1) 设计了适用于筒体内壁的管-管、管-板、管-球和管-锥等管道插接焊缝任务的焊缝位置识别传感器,该传感器能识别管道插接焊缝的空间位置,具有很强的实用性,为管道插接焊接任务的智能化提供支持。

(2) 提出了基于此传感器的针对筒体内壁管-管插接焊接任务的焊缝位置计算方法,并给出了焊缝特征矩阵与焊枪姿态矩阵,利用 MATLAB 软件对该方法获得的管管插接焊缝空间位置数学模型进行仿真验证,标定坐标点与采样坐标点在 x 轴和 y 轴方向的误差最大值仅为 0.12 mm,在 z 轴方向上最大的焊缝偏差为 0.25 mm,其精度满足实际焊接精度要求,表明了该方法的有效性和准确性。

参考文献

- [1] 霍孟友,王新刚,尹萍,等.自动焊接相贯线接缝的实时插补控制算法与仿真[J].*焊接学报*,2006,27(11): 37–40.
Huo Mengyou, Wang Xingang, Yin Ping, et al. Real-time interpolation algorithm and simulation of seam of intersection line for automatic welding[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2006, 27(11): 37–40.
- [2] 张阳.管管相贯焊缝机器人焊接轨迹和工艺参数的联合规划研究[D].天津:天津大学,2018.
Zhang Yang. Research on united planning of welding trajectory and parameters of welding robot for intersecting pipes[D]. Tianjin: Tianjin University, 2018.
- [3] 任福深.基于 PC + DSP 模式的管道插接专用焊接机器人系统研究[D].北京:北京工业大学,2009.
Ren Fushen. Research on special welding robot system for pipeline insertion based on PC + DSP mode [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2009.
- [4] 姚海燕.管道全位置自动焊接控制系统研制[D].兰州:兰州理工大学,2009.
Yao Haiyan. Development of pipeline all-position automatic welding control system[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2009.
- [5] 康少杰,李晨,王俊伟,等.圆形轨道焊接机器人在国家会展中心的应用[J].*焊接技术*,2019,48(S2): 5–8.
Kang Shaojie, Li Chen, Wang Junwei, et al. Application of circular track welding robot in national convention and exhibition center[J]. *Welding Technology*, 2019, 48(S2): 5–8.
- [6] 高利军,解海滨,于锁清,等.钢制暖气片自动焊缝机焊缝数学模型研究[J].*热加工工艺*,2012,41(13): 143–144.
Gao Lijun, Xie Haibin, Yu Suoqing, et al. Research on weld mathematical model of steel radiator automatic weld machine[J]. *Hot Working Technology*, 2012, 41(13): 143–144.
- [7] 刘永滨,冯立德,张季娜,等.天然气管道在役修补焊接过程的数值模拟[J].*焊接学报*,2019,40(10): 111–115.
Liu Yongbin, Feng Lide, Zhang Jina, et al. Numerical simulation of in-service repair welding process for natural gas pipelines[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2019, 40(10): 111–115.

第一作者:李湘文,博士,副教授;主要研究方向为焊接机器人自动化、焊接工艺及设备;Email: lee_xw@foxmail.com.

(编辑: 张芷晴)