

# 基于 CCD 传感器的球罐焊接机器人焊缝跟踪

王军波<sup>1</sup>, 孙振国<sup>1</sup>, 陈 强<sup>1</sup>, 纪 萌<sup>1</sup>, 蒋力培<sup>2</sup>, 焦向东<sup>2</sup>, 薛 龙<sup>2</sup>

(1. 清华大学 机械工程系, 北京 100084; 2. 北京石油化工学院 装备技术研究所, 北京 102600)

摘 要: 主要研究以轮式移动机器人为本体的球罐焊接机器人的焊缝跟踪问题。轮式移动机器人本体难以实现实时、准确的运动轨迹控制, 而球罐焊接工艺要求焊炬必须精确地沿焊缝以恒定的焊接速度焊接。为解决这一矛盾, 本文首先设计了一定运动约束条件下的轮式机器人本体与焊炬运动机构, 建立了基于双 CCD 传感器的焊缝路径检测系统。在对轮式移动机器人在球罐表面移动时的运动学分析基础上, 建立了机器人本体在一定误差范围内跟踪焊缝的控制模型, 并设计了相应的控制策略。根据机器人与焊炬之间的运动约束关系, 提出了焊炬位置实时精确的跟踪控制策略。现场工艺试验表明, 所研制的球罐焊接机器人焊炬跟踪精度可达  $\pm 0.5$  mm, 能够满足实际工程应用。

关键词: 球罐焊接; CCD 传感器; 轮式移动机器人; 焊缝跟踪

中图分类号: TP242.3 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2001)02-31-04



王军波

## 0 序 言

球罐焊接多在野外手工作业, 恶劣的工作环境不仅增大了工人的劳动强度, 而且影响到球罐的焊接质量。工程应用中亟待开发出能够取代工人手工操作的低成本自动化的焊接设备, 以减少生产过程中人为因素的影响, 提高焊缝质量<sup>[1, 2]</sup>。

新型智能球罐焊接机器人, 是在轮式移动机器人的基础上, 配以合适的传感器及控制系统, 从而能够实现球罐自动焊接的一种自动化装置。此类焊接机器人不需要传统的定位轨道, 而是通过自身的传感装置来自动识别并跟踪焊缝路径。因而, 建立合理可靠的焊缝路径检测系统是本文所需解决的关键问题之一。

构建球罐通常采用多层焊工艺焊接, 所用的钢板厚度为 10~40 mm 不等。这就要求球罐焊接机器人的焊炬必须沿焊缝路径以设定的焊接速度实时、准确、可重复地跟踪焊缝。采用轮式驱动的焊接机器人本体难以实现精确的运动轨迹控制, 因而不能采用焊炬与轮式机器人本体相固结的机器人运动机构。为此, 必须设计合理的机器人运动机构使得在机器人本体运动的基础上能够实现焊炬位置的精确控制, 同时建立相应的机器人本体运动与焊炬实时跟踪控制策略, 这正是本文所需解决的另一关键问题。

本文首先建立了基于 CCD 传感器的球罐焊接机器人焊缝路径检测系统; 设计了一定运动约束条件下的轮式机器人本体与焊炬运动机构; 提出轮式机器人本体在一定的误差范围内跟踪焊缝路径和焊炬位置实时准确地跟踪焊缝的跟踪方案; 对两轮驱动机器人进行运动学分析, 确定了机器人焊缝路径和焊炬位置实时跟踪控制策略。

## 1 总体方案

本文研制的球罐焊接机器人由磁吸附轮式机器人本体、焊炬位置调节机构、CCD 传感器及微机控制系统等组成, 系统整体结构如图 1 所示。

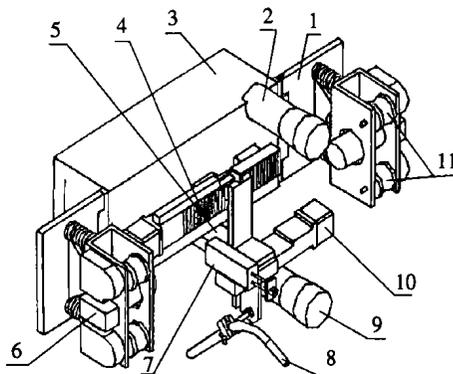


图 1 轮式球罐焊接机器人结构图

Fig. 1 Construction of wheel-robot for tank welding

1 Suspension; 2 CCD1; 3 Micro-processor; 4 Horizontal adjustment system for weld torch; 5 Vertical adjustment system for weld torch;

6 Worm gear reducer; 7 Height sensor; 8 Weld torch

9 CCD2; 10 Joint; 11 Magnetic wheels

收稿日期: 2000-09-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(59975050); 国家 863 计划项目(512-9913-02)

轮式机器人本体在球罐表面具有 3 个自由度, 其运动轨迹由驱动轮决定。而驱动轮与球面之间存在着运动不确定的因素, 比如轮在球罐表面的打滑等等, 因此仅通过控制驱动轮无法实现对移动机器人运动轨迹的实时、精确控制。如果将焊炬与轮式机器人本体相固结, 就不能保证焊炬准确沿焊缝焊接。

为此, 本文在焊炬与轮式机器人本体之间增加一横向调节机构, 使得焊炬在沿垂直于机器人前进方向上增加一自由度(如图 1 所示)。受机器人空间位置条件约束, 焊炬在该自由度方向上的调节范围有限。为此必须保证机器人运动轨迹和焊缝路径之间的偏差在焊炬横向调节范围之内, 才能精确控制焊炬位置, 使得焊炬实时、准确地跟踪焊缝。

而横向调节机构在机器人运动时增加了焊炬自由度的冗余, 使得跟踪控制变得复杂。为简化机器人多刚体运动学的复杂解耦问题, 提高系统的实时性, 本文采用两套 CCD 传感器, 分别检测机器人本体和焊炬用来表征焊缝路径的轨迹线中心的偏差量。其中, CCD 传感器 1 固定在机器人本体上, 用于检测机器人本体的运动偏差; CCD 传感器 2 通过连接板与焊炬固定在一起, 用于检测焊炬与焊缝中心之间的偏差(如图 1 所示)。根据两个 CCD 传感器检测出的偏差量, 控制系统分别对机器人本体和焊炬的运动进行控制。

综合以上分析, 系统跟踪方案可概括为: 轮式机器人本体在一定的误差范围内跟踪焊缝路径, 焊炬位置实时准确的跟踪焊缝。

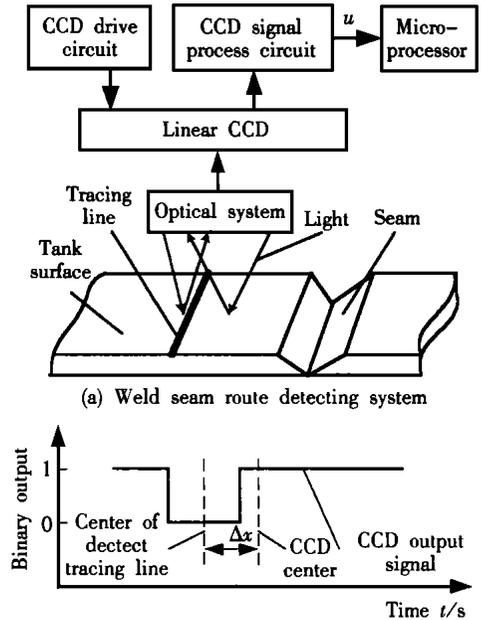
## 2 焊缝路径检测系统

高分辨率的线阵 CCD 通过硬件电路直接对其检测结果进行处理, 减少了对微处理器资源的占用, 具有实时处理速度快、精度高等优点, 能够满足焊缝路径检测的需要。本文采用线阵 CCD 作为球罐焊接机器人焊缝路径检测的传感器, 其检测原理如图 2 所示。

通常球罐表面涂有均匀一致的红色防锈漆, 可以用球罐表面与焊缝中心线平行的一条黑色轨迹线来表征实际焊缝路径。线阵 CCD 可以准确地从红色背景下提取出黑色轨迹线, 对黑色轨迹线的检测即实现了机器人焊缝路径的检测。本文研制的焊缝路径检测系统如图 2a 所示。

在普通光源照射下, 黑色轨迹线通过光学系统在线阵 CCD 芯片表面成像, 成像电荷与 CCD 芯片表面感光强度成正比。由于黑色轨迹线反射光强较

红色球罐表面弱, 所以轨迹线在 CCD 芯片表面成像处的像元信号电压较球罐表面弱。像元信号经过二值化处理后得到如图 2b 所示的 CCD 输出信号, 其中高电平代表球罐表面处, 低电平代表轨迹线处。低电平形成的负脉冲中心代表轨迹线中心, 整个一帧信号的中心代表 CCD 的中心位置。



(b) Principle diagram of weld seam route detection

图 2 焊缝路径检测原理图

Fig. 2 Principle diagram of weld seam route detecting system

二值化信号经 CCD 信号处理电路处理后转化为模拟电压信号  $u_s$ ,  $u_s$  与轨迹线中心偏离 CCD 中心的  $\Delta x$  满足如下关系式

$$u_s = 2.5 + k_s \Delta x, \quad (1)$$

式中:  $k_s$  为试验标定测得的比例系数, 轨迹线向左偏离 CCD 中心时,  $\Delta x$  为负值, 反之取正值;  $u_s$  则代表了表征焊缝路径的轨迹线中心偏离 CCD 中心的偏差量。检测  $u_s$  即可得到以 CCD 中心为基点的焊缝路径偏差。

试验中所用线阵 CCD 芯片有效象元数为 2 160, 实际检测范围为 028 mm, 相应的  $u_s$  取值范围为 05 V, 帧速为 500 幅/s, 检测精度可达 0.013 mm/像素。

## 3 机器人本体的焊缝路径跟踪

### 3.1 移动机器人运动学分析

两轮驱动移动机器人的运动可简化为刚体的平面运动, 如图 3 所示。

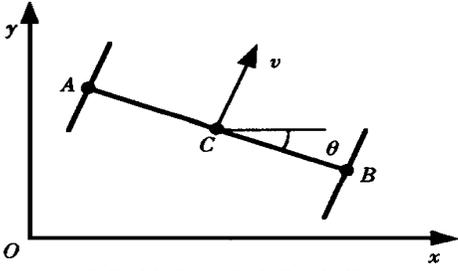


图 3 轮式移动机器人运动学分析简图

Fig. 3 Schematic diagram for dynamic analysis of wheel-mobility robot

A、B 为等效的左右两轮的中心, C 点为机器人本体的质心。设左侧轮速度为  $v_L$ , 右侧轮速度为  $v_R$ , 由刚体平面运动可知<sup>[3]</sup>, 移动机器人沿轮方向的运动速度为

$$v = \frac{v_L + v_R}{2} \quad (2)$$

机器人的转动角速度为

$$\omega = \frac{v_L - v_R}{2d} \quad (3)$$

式中:  $2d$  为两轮之间的距离。

机器人中心 C 点的运动学描述如下

$$\theta(t) = \theta_0 + \int_0^t \omega dt \quad (4)$$

$$x(t) = x_0 + \int_0^t v \sin \theta(t) dt \quad (5)$$

$$y(t) = y_0 + \int_0^t v \cos \theta(t) dt \quad (6)$$

由于机器人本体只在焊缝路径附近作微小摆动, 可以认为其沿焊缝方向运动过程中的转角  $\theta(t)$  很小, 且变化也很小, 故有

$$\sin \theta(t) \approx \theta(t) \quad (7)$$

$$\cos \theta(t) \approx 1 \quad (8)$$

则式(5)、(6)可化简为

$$x(t) = x_0 + v \theta(t) t \quad (9)$$

$$y(t) = y_0 + v t \quad (10)$$

所以, 机器人沿  $y$  方向的行走速度可近似认为  $v$ , 沿  $x$  方向的运动速度为  $v \theta(t)$ 。

### 3.2 跟踪控制策略

#### 3.2.1 控制模型

设机器人左右轮的半径为  $r$ , 沿自身轴转速分别为  $n_L$  和  $n_R$ , 则

$$\begin{cases} v_L = 2\pi r n_L \\ v_R = 2\pi r n_R \end{cases} \quad (11)$$

代入式(2)得

$$v = \pi r (n_L + n_R) \quad (12)$$

机器人左右两轮通过直流电机经减速器后直接驱动, 在试验所涉及的运动速度范围内, 电机驱动电

压和轮转速之间的关系满足

$$n_i = k_i u_i + n_{0i} \quad (13)$$

式中:  $n_i$  为轮的转速;  $u_i$  为电机电枢电压;  $k_i$  和  $n_{0i}$  为仅与电机电气参数和减速器机械参数有关的常数。

设左右电机的电气参数和减速器的机械参数相同, 则机器人的行走速度为

$$v = k\pi r (u_L + u_R) + 2\pi r n_0 \quad (14)$$

假设在  $\Delta t$  时间(时间足够小)内, 机器人左右轮的转速保持不变, 这也意味着机器人的转动角速度  $\omega$  和沿焊缝方向的行走速度  $v$  保持不变。则在  $\Delta t$  时间内机器人的转过的角度为

$$\Delta\theta = \omega \Delta t \quad (15)$$

由式(3)、(13)、(15)得

$$\Delta\theta = \frac{k\pi r (u_L - u_R)}{2d} \Delta t \quad (16)$$

同理, 由式(9)、(13)可知, 机器人在  $\Delta t$  时间内沿  $x$  方向移动的距离为

$$\Delta x = v \frac{k\pi r (u_L - u_R)}{2d} \Delta t \quad (17)$$

为简化控制, 设

$$\begin{cases} u_L = u + \Delta u \\ u_R = u - \Delta u \end{cases} \quad (18)$$

式中:  $u = \frac{u_L + u_R}{2}$ ;  $\Delta u = \frac{u_L - u_R}{2}$ 。

式(14)、(17)可化简为

$$v = c_1 u + c_4 \quad (19)$$

$$\Delta x = (c_2 u + c_3) \Delta u \Delta t \quad (20)$$

式中:  $c_1 = 2k\pi r$ ;  $c_2 = 2 \frac{(k\pi r)^2}{d}$ ;  $c_3 = \frac{k\pi r n_0}{d}$ ;  $c_4 = 2\pi r n_0$ ,  $c_1$ 、 $c_2$ 、 $c_3$  和  $c_4$  取决于机器人本体结构参数、电机电气参数及减速器机械参数。

式(19)、(20)表明机器人沿  $y$  方向的行走速度  $v$  只与控制变量  $u$  有关, 而机器人运动轨迹偏差  $\Delta x$  则取决于控制变量  $u$  和  $\Delta u$ 。控制  $u$  和  $\Delta u$  的大小, 即可实现机器人本体的焊缝路径跟踪。

#### 3.2.2 焊接速度控制策略

球罐焊接工艺要求保证一定的焊接速度, 由前述分析可知, 焊接速度主要取决于机器人本体沿  $y$  方向的行走速度  $v$ 。式(19)表明,  $v$  的大小主要取决于控制变量  $u$ , 所以调节控制变量  $u$  的大小即可调节机器人的焊接速度。

在本文所研制的焊接机器人中, 根据试验测得的数据可以得到控制变量  $u$  和机器人焊接速度的精确关系, 通过计算机给定来设定焊接速度, 同时通过速度闭环反馈保持机器人的焊接速度。

3.2.3 焊缝路径跟踪

CCD1 固定于机器人本体, CCD1 的中心位置可表征为机器人的中心。由 CCD 传感器检测出的  $\Delta x$ , 即为机器人运动路径和轨迹线中心的偏差量。根据偏差量  $\Delta x$  的正负确定控制变量  $\Delta u$  的正负, 同

时由式(20)确定控制变量  $\Delta u$  的大小, 并根据式(18)计算出左右轮驱动机电枢电压  $u_L$  和  $u_R$ , 然后通过微处理器运算输出相应的 PWM 脉冲, 由电机调速驱动电路控制电机的转速。

在每个控制周期时间内, 微处理器 PWM 输出的两个脉冲宽度之差保持不变, 故  $\Delta u$  值保持不变, 左右两轮保持一定的差速, 直到检测下一个偏差量  $\Delta x$  发生变化为止。机器人焊缝路径跟踪流程如图 4 所示。

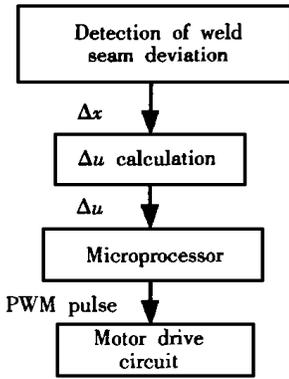


图 4 焊缝路径跟踪流程

Fig.4 Flow chart of weld seam route tracing

4 焊炬位置的实时跟踪

通过连接板与焊炬固定一起的 CCD 传感器 2 检测焊炬位置与表征焊缝路径中心线的轨迹线之间的偏差, 通过图 1 中所示横向调节机构实现焊炬位置的调节。

焊炬横向调节机构由步进电机驱动, 设步进电机驱动脉冲个数为  $p$ , 步进电机转速为  $n_s$ , 摆动距离为  $d_j$ , 则

$$n_s = k_s p, \tag{21}$$

$$d_j = k_j n_s + n_{s0}, \tag{22}$$

式中:  $k_s$ ,  $k_j$  和  $n_{s0}$  为和电机与机械传动有关的参数。式(21)、(22)化简为

$$d_j = k_s k_j p + n_{s0}. \tag{23}$$

由于 CCD 传感器 2 与焊炬固定在一起, 所以 CCD2 检测偏差量即为焊炬中心与轨迹线中心的偏差。由式(23)可建立  $\Delta x$  与步进电机驱动脉冲个数之间的关系, 实现焊炬的实时跟踪。

CCD 检测周期为 2ms, 步进电机响应时间为 0.1 s, 实测焊炬的跟踪精度可达  $\pm 0.5$  mm, 满足球罐焊接需要。

5 结 论

(1) 采用机器人本体在一定误差范围内跟踪焊缝, 焊炬实时、准确跟踪焊缝路径的方案能够同时保证机器人的焊接速度和焊炬的跟踪精度。

(2) 建立了基于 CCD 传感器的球罐焊接机器人焊缝路径跟踪的控制模型, 并根据两轮驱动移动机器人运动学模型确定其控制策略。

(3) 现场工艺试验表明, 所研制的球罐焊接机器人焊炬跟踪精度可达  $\pm 0.5$  mm, 较好地满足实际工程应用要求。

参考文献:

- [ 1 ] 张运川. 球形储罐自动化焊接技术的进展[ J ]. 压力容器, 1997, 14(4): 4956.
- [ 2 ] 张甲英. 球罐纵缝焊接自动跟踪系统及熔宽实时检测的研究[ D ]. 北京: 清华大学, 1997.
- [ 3 ] 谢传锋. 动力学(1)[ M ]. 北京: 高等教育出版社, 1999. 7090.

作者简介: 王军波, 男, 1973 年 6 月出生, 现在清华大学攻读博士学位。主要研究方向为机器人技术及其应用、电力电子技术。先后参加国家计委“九五”重点攻关、国家 863 计划及国家自然科学基金等科研项目。已发表论文 16 篇, 获专利 1 项。

(编辑: 王 亚)