

锅炉焊接机器人离线编程系统

刘 永, 徐越兰, 王克鸿, 余 进, 杨静宇

(南京理工大学, 南京 210094)

摘 要: 主要研究开发了适于锅炉焊接的机器人离线编程系统。针对锅炉件的特点, 建立了该空间焊缝的特征坐标系, 并设计特征提取算法, 进而规划出焊枪的运动路径与理想姿态, 建立了典型的锅炉工件、日本安川 SK6 机器人等运动仿真环境。根据日本安川机器人程序的语言格式, 采用该软件自动生成了机器人程序, 对锅炉焊接过程进行了离线仿真试验, 验证该系统是切实可行的。

关键词: 锅炉; 弧焊机器人; 离线编程

中图分类号: TG 444+.73 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2004)03-52-05



刘 永

0 序 言

锅炉的典型结构是由一根直径不同的主管和许多根直径不同的支管相贯组成的, 每根支管和主管的接头是由焊接完成的, 这样的焊接接头每个锅炉有数十个到上百个。而且, 每根支管(圆柱)和主管(圆柱)形成的焊缝恰恰是最为复杂的空间曲线——马鞍形焊缝。人工焊接的劳动强度是相当大的, 因此, 从提高生产效率和焊接质量的角度看, 采用高自动化和柔性化的弧焊机器人焊接是非常必要的。但是, 由于弧焊机器人焊接的复杂性, 即它不仅要求焊枪准确到达焊接位置, 而且要求焊枪以一定的姿势指向焊缝。另外在大型复杂工件的情况下, 这使得弧焊机器人示教编程几乎是不可能的^[1]。一位较熟练的示教人员示教好一条马鞍形焊缝往往花半个工作日, 而主管和支管直径的种类繁多, 这样一来, 示教的马鞍形焊缝一般达上百个, 这显然不满足工厂的生产需要。因此, 对于锅炉焊接机器人工作站, 开发适应于锅炉焊接的机器人离线编程系统是非常迫切的。

基于此, 自主研究开发了锅炉焊接机器人的离线编程系统, 经过针对锅炉弧焊机器人离线编程与机器人焊接仿真试验, 验证了该系统是切实可行的。

1 锅炉接头的结构及焊接方法

锅炉接头的典型外观结构图如图 1 所示, 由一根主管和若干支管组成。材料为 16MnR, 考虑到自动化高速焊接, 以及支管与支管之间狭窄部位焊接的需要, 选择 MAG 焊接方法完成焊接。系统采用日本安川 SK6 弧焊机器人系统和 S-350 MAG 焊接系统。由于该接头是空间曲线焊缝, 焊接工艺参数由焊接材料、板厚、焊接位置、焊枪姿态经模糊推理专家系统二次优化获得^[2]。

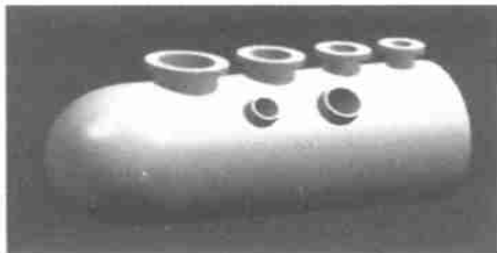


图 1 典型锅炉接头外观结构图

Fig. 1 Structure graph of typical boiler

2 锅炉典型焊缝特征信息的表示

2.1 概 述

对于锅炉焊接接头, 典型的复杂的空间曲线焊缝是由圆管(柱)与圆管(柱)相贯而形成的马鞍形焊缝。

一般来说, 焊缝特征用焊接位置来表征, 实际焊缝焊接位置相当复杂, 目前对各种接头焊缝的焊接位置采用焊缝倾角和焊缝转角来描述^[3], 这对于复杂空间曲线焊缝是不合适的, 而且给弧焊机器人焊

接参数和焊枪姿态的规划带来不便。文献[4]分析提出了“焊缝特征坐标系”的概念,即将焊缝的切线定义为 X' 轴,将焊缝的中心线定义为 Z' 轴, Y' 轴由右手定则决定。该坐标系的定义唯一确定了空间焊缝各焊点的全部特征,而带来的显著优点是可以引用齐次变换技术很容易的求得焊缝的倾角和转角,进而可以将复杂的空间焊缝分解为“立坡焊”和“横坡焊”,用这二种焊接位置的组合来描述任何空间复杂焊缝的焊接位置。

2.2 马鞍形焊缝位置的定义及分解

针对焊缝特征坐标系的定义,选取任意空间曲线焊缝,建立如图2所示的焊缝特征坐标系示意图。图2中的 X' 轴为焊缝的切线方向。焊缝的中心线是经过该焊点的形成该点焊缝的两工件的表面的法向量的角平分线。图2中的 Z' 轴即为焊缝的中心线。 Y' 轴由右手定则确定。

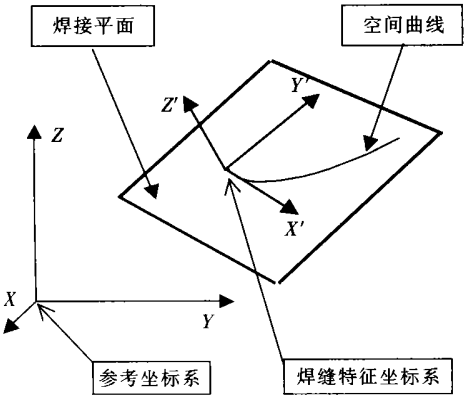


图2 空间曲线“焊缝特征坐标系”示意图
Fig.2 Sketch of character reference frame of space weld

以 Z' 轴为法线的过该焊点的平面为焊接平面。则图2中 $X'Y'Z'$ 即为该焊点的焊缝特征坐标系。很明显,随着空间焊缝焊点变化,则焊缝特征坐标系相应移动并发生转动。

因此,空间曲线焊缝特征信息的提取就转化为计算焊缝的特征坐标系问题。

3 锅炉典型焊缝路径规划

3.1 概述

针对锅炉典型焊接接头为马鞍形焊缝的特点,锅炉焊接机器人离线编程系统框架示意图如图3所示。一般工厂已实现机械图纸CAD化,该系统位置信息提取模块从CAD图纸中提取主管的中心线位置、半径和壁厚信息,以及各个支管的中心线位置、支管转角、半径和壁厚信息(在这里,定义CAD图纸

右视图中,支管中心线与垂直轴的夹角称为支管转角 γ)。这些信息送入系统的路径和轨迹规划模块,该模块完成典型马鞍形焊缝的焊接位置与姿态(焊缝特征信息)规划,以及相应的机器人各关节的运动轨迹规划。各管的壁厚信息以及焊接工艺人员输入的焊接工艺信息(包含焊接材料、焊接规范号、焊接接头次序号等)送入焊接参数规划模块,该模块实现空间焊缝基于知识推理的焊接参数联合优化,给出最佳的焊接参数^[4]。

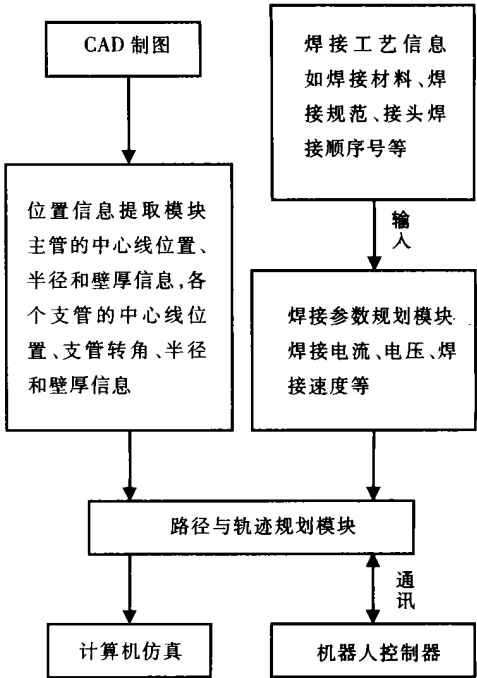


图3 锅炉焊接机器人离线编程系统框架示意图
Fig.3 Frame sketch of off-line programming system used in boiler

3.2 从CAD图形提取锅炉信息

图4为典型锅炉的主管、支管布局,图4a为锅炉正视图的示意,图4b为锅炉侧视图的示意。假设坐标系的建立如图5所示,从正视图可以提取支管的中心线位置,从侧视图可以提取主管和支管的半径、各支管转角和主管的壁厚等信息。

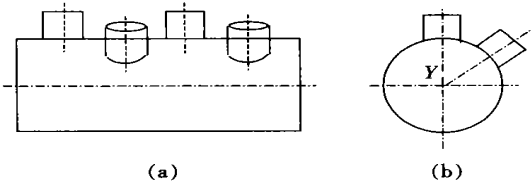


图4 典型锅炉结构布局图
Fig.4 Structure view of typical boiler

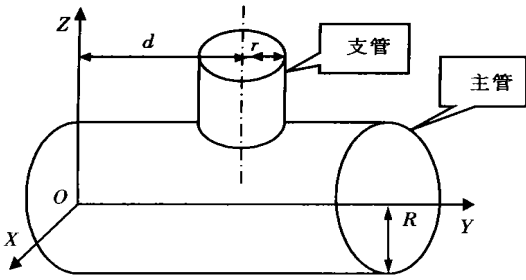


图 5 工件模型示意图
Fig. 5 Sketch of workpiece model

3.3 锅炉马鞍形焊缝曲线位置点的选取

由于课题研究的主要对象是两圆柱正交, 其焊缝为典型的马鞍形曲线, 与示教时类似, 首先要将两正交圆柱的交线分为大量离散点, 每两个点之间以直线插补, 为保证拟合的焊缝曲线与实际焊缝相吻合, 采取计算两点之间连线到焊缝高度的最大值, 使其不大于设定值的办法来进行曲线的划分, 进而计算出编程点的位置及其它特征信息。

3.4 锅炉马鞍形焊缝特征信息计算

不失一般性, 选择两圆柱正交, 建立工件模型示意图如图 5 所示, 其中 $OXYZ$ 为参考坐标系, 相贯线上任一点的特征坐标系 $X'Y'Z'$ 建立如图 2 所示。设支管中心线距参考面 XOZ 的距离为 d , 支管半径为 r , 主管半径 R 。则

垂直方向圆柱的方程为: $(Y-d)^2 + X^2 = r^2, \quad (Z > 0)$

水平方向圆柱的方程为: $Z^2 + X^2 = R^2$ 。

两圆柱交线为:
$$\begin{cases} (Y-d)^2 + X^2 = r^2, \\ Z^2 + X^2 = R^2. \end{cases}$$

可以证明^[3] 如下结果。

(1) X' 轴在 $OXYZ$ 坐标系下的投影为

$$\begin{aligned} r(1, 1) &= -Z_0(Y_0 - d), \quad r(1, 2) = X_0Z_0, \\ r(1, 3) &= X_0(Y_0 - d), \end{aligned}$$

式中: X_0, Y_0, Z_0 是马鞍形焊缝曲线任意一点在参考坐标系 $OXYZ$ 下的坐标。

(2) Z' 轴在 $OXYZ$ 基准坐标系上的投影矢量为

$$\begin{aligned} r(3, 1) &= \begin{vmatrix} BB1 & CC1 \\ BB2 & CC2 \end{vmatrix}, \quad r(3, 1) = \begin{vmatrix} CC1 & AA1 \\ CC2 & AA2 \end{vmatrix}, \\ r(3, 1) &= \begin{vmatrix} AA1 & BB1 \\ AA2 & BB2 \end{vmatrix}, \end{aligned}$$

式中: $AA1 = X_0(Y_0 - d)^2 - Z_0^2X_0, AA2 = -Z_0(Y_0 - d)$
 $BB1 = -Z_0^2(Y_0 - d) - X_0^2(Y_0 - d), BB2 = X_0Z_0,$
 $CC2 = X_0(Y_0 - d), CC1 = Z_0X_0^2 + Z_0(Y_0 - d)^2 + Z_0X_0^2$ 。

(3) 由 $X'Y'Z'$ 的关系, 则 Y' 轴在 $OXYZ$ 基准坐标系上的投影为

$$\begin{aligned} r(2, 1) &= \begin{vmatrix} r(3, 2) & r(3, 3) \\ r(1, 2) & r(1, 3) \end{vmatrix}, \\ r(2, 2) &= -\begin{vmatrix} r(3, 3) & r(3, 1) \\ r(1, 3) & r(1, 1) \end{vmatrix}, \\ r(2, 3) &= -\begin{vmatrix} r(3, 1) & r(3, 2) \\ r(1, 1) & r(1, 2) \end{vmatrix}. \end{aligned}$$

所以马鞍形焊缝曲线任意一点的特征坐标系 $O'X'Y'Z'$ 相对于 $OXYZ$ 坐标系的投影矩阵为

$${}^oR_o = \begin{vmatrix} r(1, 1) & r(2, 1) & r(3, 1) \\ r(1, 2) & r(2, 2) & r(3, 2) \\ r(1, 3) & r(2, 3) & r(3, 3) \end{vmatrix}.$$

综上可得, 空间马鞍形焊缝任一点 (X_0, Y_0, Z_0) 的焊缝特征坐标系与基准坐标系之间的齐次变换矩阵为

$$R = \begin{vmatrix} r(1, 1) & r(2, 1) & r(3, 1) & X_0 \\ r(1, 2) & r(2, 2) & r(3, 2) & Y_0 \\ r(1, 3) & r(2, 3) & r(3, 3) & Z_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}.$$

实际上, 齐次变换矩阵就表示了该焊点在机器人参考坐标系下的位姿。

4 锅炉 离线仿真

由上述算法, 根据从 CAD 绘制的工件提取的特征信息, 即可规划出典型锅炉的所有焊接接头的理想焊枪位置、姿态和焊接参数。但是, 规划的结果必须生成该类机器人能够识别的机器人语言程序, 下载到机器人控制器, 才能被机器人识别并直接执行。因此, 能否生成符合该机器人语言格式的程序对离线编程系统是至关重要的。

4.1 机器人程序的解析与自动生成

通过对日本安川 SK6 机器人程序的分析, 掌握了该类机器人的程序语言 (INFORMII) 格式, 从而解决了自动生成机器人程序的问题。对于基于位姿表示各机器人焊枪末端点的机器人程序, 解读分析如下。

```
/JOB
//NAME at1 // 文件名
///TOOL 0 // 工具文件号
///POSTYPE BASE // 基准坐标系
///RECTAN // 位姿表示
P000= 620, 50, -223, 0, 45.000, -90 // 第一点位姿
```

```
P002= 600, 200, -3, 0, 45.000, -90    //第二点
位姿
P003= 606. 249, 200. 098, - 3. 065, - 1. 687,
45.006, -89.403
P004= 613. 965, 200. 488, - 3. 325, - 3. 767,
45.031, -88.663
... ..
P094= 600, 600, -3, 0, 45.000, 90
P095= 600, 10, -223, 0, 45.000, 90
//INST
///DATE 2002/01/28 14:21
NOP    //机器人程序开始
MOVJ P000 VJ=100    //关节插补到第一点,
MOVJ P001 VJ=100    速度为 100 cm/min
ARCON AC=350 AV=32    //开始焊接作业
MOVC P002 V=30
MOVC P003 V=30
MOVC P004 V=30
... ..
MOVC P093 V=30
MOVC P094 V=30
ARCOF AEF #(1)    //停止焊接作业
MOVJ P095 VJ=100
END    //程序结束
```

可以看出,程序总体上有两部分组成,一个是位置点的数据信息,一个是机器人的可执行部分。在机器人示教盒显示屏上只可以看到程序的后一部分。对程序的解释直接注释在程序的后面。其中,位姿描述的前三个表示空间位置XYZ,后三个表示焊枪姿态,即焊枪坐标系机器人固定坐标系的X轴、Y轴、Z轴依次旋转的角度。经试验验证,在文献[5]将规划后的数据按照上述格式生成机器人程序,下载到机器人控制器,可以被机器人直接执行,获得了满意的焊接接头。达到了离线仿真、在线同时焊接的目的。

4.2 系统仿真试验

不失一般性,采用一根主管和一排支管的仿真实例,主管直径600 mm,支管直径分别为400 mm、300 mm、200 mm、100 mm,各支管间距为100 mm。离线编程系统自动提取几何参数,自动规划焊缝路径和焊接工艺参数,根据该类机器人程序的语言格式,自动生成的机器人焊接程序文件名为at1.jbi,部分程序如图6所示,将该程序传给机器人控制器即可实现机器人的再现锅炉焊接。机器人正在焊接直径为400mm的支管时的离线仿真动画的一帧如图7所示,机器人正在焊接直径为300mm的支管时的离

线仿真动画的一帧如图8所示。对于图1中多排支管的情形,考虑焊接质量的要求,需要旋转变位机将支管转到垂直状态,再进行焊接。

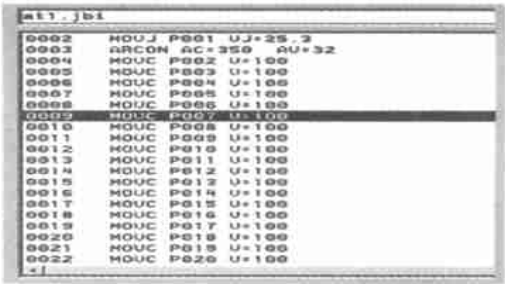


图6 正在被仿真的机器人语言程序
Fig.6 Robot program built by system

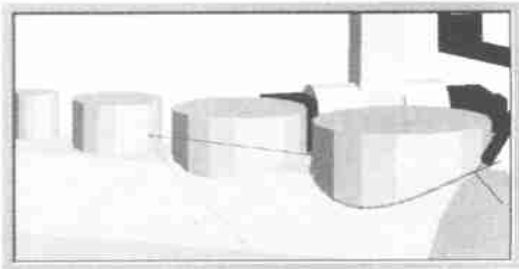


图7 机器人焊接直径为400 mm的支管时的图形仿真的一帧

Fig.7 One frame of graphic simulation of robot welding 400 mm diameter pipe



图8 机器人焊接直径为300 mm的支管时动态仿真的一帧
Fig.8 One frame of graphic simulation of robot welding 300 mm diameter pipe

5 结 论

- (1) 开发了适合锅炉机器人焊接特点的离线编程系统。
- (2) 分析了日本安川机器人程序的语言格式,采用该离线编程软件自动生成的机器人语言程序,

对锅炉焊接过程进行了离线仿真试验,验证该系统是正确、可行的。

参考文献:

[1] 孔 宇. 基于几何模型的弧焊机器人无碰路径规划 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学. 1998.

[2] 刘 永. 机器人离线编程系统研究[D]. 南京: 南京理工大学. 2000.

[3] 中国机械工程学会焊接分会. 焊接词典[M]. 北京: 机械工业

出版社, 1998. 4~ 5.

[4] 王克鸿, 刘 永, 徐越兰, 等. 基于知识的弧焊机器人焊接参数二次优化[J]. 焊接学报, 2001, 22(5): 45 ~ 48.

[5] 王克鸿, 刘 永, 徐越兰, 等. 弧焊机器人离线编程系统[J]. 焊接学报, 2001, 22(4): 84~ 86.

作者简介: 刘 永, 男, 1973 年出生, 博士生, 讲师。研究领域: 机器人离线编程, 过程自动控制技术。已发表论文 10 余篇。

Email: liuy1602@sina.com