

# 基于模拟退火算法的工件位置标定

殷树言，陈志翔，卢振洋

(北京工业大学 机电学院 北京 100022)

**摘要：**从实用的角度分析了焊接工件的定位问题，提出了在机器人焊接条件下，基于模拟退火算法的工件位置标定算法。标定时，不需要增加其它的辅助设备，利用机器人示教功能获得少数参考点(大于或等于 3 点)的坐标，然后用模拟退火算法求出从工件模型到实际工件的位置变换矩阵。算法是通用的且具有较高的精度，标定算法的计算误差小于 0.02 mm。示教误差对工件位置标定有一定的影响，但是，示教误差会在一定程度上互相抵消，使得工件位置标定误差较小，通常小于 0.5 mm，极端情况下，标定误差小于 0.9 mm，可以满足焊接工艺的要求。如果焊接工件的位置标定是在路径规划之前进行的，规划时用到的位姿数据是对应真实世界中的数据，则路径规划的结果可以直接用于下载到机器人控制柜运行。

**关键词：**工件位置标定；模拟退火算法；机器人焊接

中图分类号：TP24 文献标识码：A 文章编号：0253—360X(2003)02—01—04



殷树言

## 0 序 言

离线编程情况下，在使用 CAD 建立弧焊机器人工作单元模型时，所有的模型都是理想的。通常工件是无法按照模型中设定的位置精确安装的，所以，一个可行的方法是把工件按大致的位置安装，然后经过标定，使得模型中的工件位置与实际的工件位置之间的误差尽可能小。

一般工业机器人都提供了机器人、工具、变位机的标定方法或软件。使用厂家提供的方法和软件可以标定机器人的绝对原点、工具的中心点(TCP)与姿态、变位机的位姿。经过标定后，可以认为工作单元中的机器人、变位机和工具(焊枪)的实物与模型在允许误差范围内是对应的。文中主要解决工件安装位置的标定。

## 1 工件位置标定问题

如图 1 所示，在 CAD 模型世界中，工件模型的位姿可用与工件固联的坐标系表示，在世界坐标系中工件模型的位姿矩阵设为 ${}^0T_w$ ，这在模型建立后可以当作是已知的。在真实世界中，工件的实际装配后的位姿设为 ${}^0T_w'$ ，是确定的，但难以实际测定。工件的模型和实际的工件之间存在一个旋转和平移的

变换关系，即实际工件的位姿可以通过工件的模型经过旋转和平移得到，用运动算子表示为

$${}^0T_w' = {}^0T_w \cdot {}^wT_w' \quad (1)$$

式中： ${}^0T_w'$  为从工件模型的位姿到实际工件的位姿的运动算子。

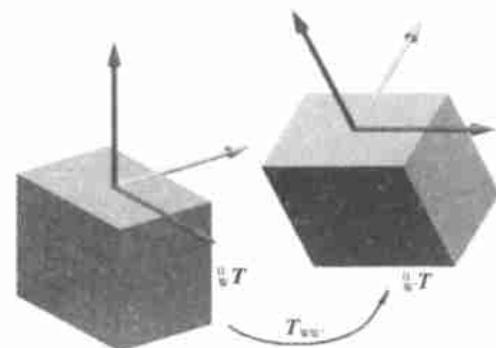


图 1 工件模型与实际工件位姿的关系

Fig. 1 Relationship between poses of model and real workpiece

那么，设工件模型上的任意一点的齐次坐标向量 $p_w$ ，实际工件上相应点的齐次坐标向量 $p_w'$ ，它们之间都存在以下关系，即

$${}^0T_w' p_w' = {}^0T_w p_w \quad (2)$$

因为 ${}^0T_w'$  中只有 6 个独立的变量，用六元数表示为 $(x_w, y_w, z_w, \alpha_w, \beta_w, \gamma_w)$ ，其中 $(x_w, y_w, z_w)$  表示平移矢量， $(\alpha_w, \beta_w, \gamma_w)$  是以 Z—Y—X 表示的旋转角。根据几何知识可知，空间不共线的三点可以确定一

个坐标系, 也可以确定一个位姿矩阵。从工件模型和实际工件上分别选取 3 个不共线的且相对应的参考点, 从模型中读取 3 个点的模型坐标值, 然后用示教法从机器人的控制柜上获取工件上 3 个点的实际坐标值。一般, 根据这 6 个点坐标值就可以直接用解析法求出  $(x_w, y_w, z_w, \alpha_w, \beta_w, \gamma_w)$ 。然而, 用示教法获取实际工件上点的坐标值时, 不可避免地带有误差, 只用解析法根据 6 个点坐标值求出的  $(x_w, y_w, z_w, \alpha_w, \beta_w, \gamma_w)$  将会有更大的误差。显然, 取更多的参考点时会在一定程度上补偿示教的误差。由于运动算子  $T_{ww'}$  是一个非线性变换, 采用解析法逆向求解, 需要求解非线性高阶方程组, 其本身就是一个不易求解的问题, 如果要更多的点来消除误差时, 还必须多次求解方程组, 然后取平均或用最小二乘法以补偿误差。

现代优化算法经常可以从问题的正向求解, 而且擅长求解非线性、不确定的问题。文中采用以下的模拟退火算法取得了很好的效果。

## 2 工件位置标定问题的模拟退火算法

### 2.1 问题的描述与评价函数

由上节的分析, 工件位置标定问题可归结为求运动算子  $T_{ww'}$ , 使得把工件模型上的点经过运动变换后所得到的点与实际工件上的对应点之间的距离最小, 即

$$\min \|{}^0\mathbf{p}_{w'i} - T_{ww'}{}^0\mathbf{p}_{wi}\|_2; \quad i=1, \dots, n; \quad n \geq 3. \quad (3)$$

这相当于有多个目标, 以下用极大极小的方法转化为单目标问题, 即

$$\min (\max_{i=1, \dots, n} \|{}^0\mathbf{p}_{w'i} - T_{ww'}{}^0\mathbf{p}_{wi}\|_2); \quad n \geq 3. \quad (4)$$

在优化计算时, 用  $n$  个点 ( $n \geq 3$ ) 中的最大的距离偏差作为目标函数  $f$ , 即

$$f = \max_{i=1, \dots, n} \|{}^0\mathbf{p}_{w'i} - T_{ww'}{}^0\mathbf{p}_{wi}\|_2; \quad n \geq 3. \quad (5)$$

由于  $T_{ww'}$  是一个  $4 \times 4$  的齐次变换矩阵, 也可以表示为  $(x_w, y_w, z_w, \alpha_w, \beta_w, \gamma_w)$ , 它们之间的相互转换可以利用  $Z-Y-X$  欧拉角的正解和逆解实现。用模拟退火算法求解时, 这六元数直接作为求解问题的 6 个变量。

### 2.2 模拟退火算法

模拟退火 (Simulated annealing, SA) 算法是局部搜索算法的扩展。它不同于局部搜索之处在于按照 Metropolis 准则接受新状态, 以一定的概率选择费用较大的状态, 以避免陷于局部最小值而不能自拔。简单的模拟退火算法<sup>[1]</sup> 为

第一步: 任选一个初始解  $x_0$ ;  $x_i := x_0$ ;  $k := 0$ ;

$$t_0 := t_{\max} \text{ (初始温度);}$$

第二步: 若在该温度达到内循环停止条件, 则到第三步; 否则, 从邻域  $N(x_i)$  中随机选一  $x_j$ , 计算  $\Delta f_{ij} = f(x_j) - f(x_i)$ ; 若  $\Delta f_{ij} \leq 0$ , 则  $x_i := x_j$ , 否则, 若  $\exp(-\Delta f_{ij}/t_k) > \text{rand}(0, 1)$ , 则  $x_i := x_j$ ; 重复第二步;

第三步:  $t_{k+1} := d(t_k)$ ;  $k := k + 1$ ; 若满足停止条件, 终止计算; 否则回到第二步。

模拟退火算法源于对固体退火过程的模拟。主要有两个操作: 一是称为冷却流程的热静力学操作, 用于设定温度下降幅度 (算法的一个参数); 二是用于在每个温度下搜索最优解的随机松弛过程。理论上来说, 它也是个全局最优算法<sup>[2,3]</sup>。

### 2.3 退火参数的确定

由于 6 个变量是连续变化的, 邻域形式采用在当前解的附近选择新解的方法, 定义为

$$[x_1 - q_1, x_1 + q_1] \times \cdots \times [x_i - q_i, x_i + q_i] \times \cdots \times [x_n - q_n, x_n + q_n], \quad (6)$$

式中: 步长  $q_i$  是可变的,  $q_i = KR_i/100$ ;  $R_i$  为第  $i$  个变量的取值范围;  $K$  为邻域变化系数; 初始值  $K_0 = 1.0$ 。

在温度较高时, SA 在当前解的较大的邻域中选择新解, 使 SA 不容易陷入局部最优点, 随着温度的下降, SA 越来越接近于全局最优解, 邻域逐渐缩小, SA 只在较小的邻域中寻找新解, 使 SA 在温度较低时具有较高的搜索效率。邻域的变化采用以下的线性方式

$$K_{k+1} = K_k - 0.02, \quad \text{当 } K_k > 0.03. \quad (7)$$

用基于 Metropolis 准则的初始接受概率  $p_0$  确定初始温度  $t_0$ 。首先随机抽样 120 次, 得到目标函数的平均值和最大值分别为  $\bar{f}$  与  $f_{\max}$ , 让

$$e^{(\bar{f} - f_{\max})/t_0} = p_0; \quad (8)$$

$$\text{则: } t_0 = \frac{\bar{f} - f_{\max}}{\ln p_0}. \quad (9)$$

采用比例温度下降方式,  $t_{k+1} = at_k$ , 经过计算试验, 用较大的初始接受概率  $p_0 = 0.95$  和稍快的温度下降系数  $a = 0.85$  得到很好的计算效果。

当温度很高时, 每一状态的接受概率基本相同, 同一温度下的迭代次数应尽量小。当温度渐渐变低时, 越来越多的状态被拒绝。如果在较低温度下的迭代次数太少, 则可能过早陷入局部最优状态。在每一温度下, 固定的 Markov 链长度虽然简单, 但是难以协调高温和低温时的链长要求。因此, 用一个直观且有效的方法, 随着温度的下降, 让 Markov 链的长度增加。设定每一温度下的最小迭代次数  $l_u$ , 最大迭代次数  $l_w$ , 如果接受次数大于预定的  $n_a$  时,

不再迭代而使温度下降。

经过一定次数的迭代之后, 如果解的质量没有改进, 相邻两个温度下的最佳目标函数值差  $f_{k+1}^* - f_k^* < \epsilon$  时, 可以认为算法已经收敛, 继续进行迭代计算的意义不大, 因而让算法停止。

### 3 计算结果

首先在工件模型上选取 4 个参考点, 读取坐标值, 然后用机器人示教实际工件的相应 4 个点, 它们的坐标值如表 1 所示。由于示教的精度将影响到工件位置标定的精度, 所以示教时必须认真仔细, 并尽量使焊枪处于精度较高的姿态, 如标定工具中心点 (TCP) 时所用的姿态。

表 1 工件模型与实际工件上参考点的坐标值

Table 1 Coordinate values of reference points on model and real workpiece

| No. | Points on model |        |         | Points on real workpiece |        |         |
|-----|-----------------|--------|---------|--------------------------|--------|---------|
|     | x/mm            | y/mm   | z/mm    | x/mm                     | y/mm   | z/mm    |
| 1   | 1 037.86        | -39.49 | -171.99 | 1 040.48                 | -61.76 | -167.58 |
| 2   | 984.42          | 15.77  | -149.83 | 985.23                   | -7.61  | -146.17 |
| 3   | 1 039.49        | 69.50  | -172.27 | 1 039.77                 | 47.25  | -168.30 |
| 4   | 1 093.40        | 14.35  | -150.82 | 1 094.23                 | -6.50  | -146.16 |

图 2 是用模拟退火算法进行工件位置标定时的目标函数  $f$  及其每一温度下的最佳值  $f^*$  的下降过程。在较高温度下, 算法容易接受较差解, 在每一温度内循环结束后的目标函数  $f$  以振荡的形式下降, 在较低温度下, 算法很少接受较差解, 目标函数  $f$  以较快的速度下降, 接近最优点, 且速度逐渐降低。最后的目标函数值为 0.221 581, 计算得到  $x_w =$

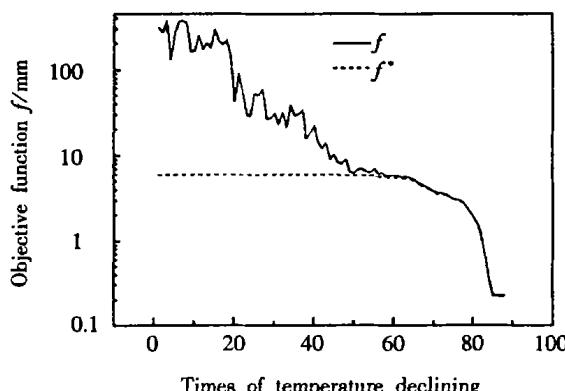


图 2 目标函数  $f$  的下降过程

Fig. 2 Declining of objective function  $f$

$-0.003\ 036\ 6$ ,  $y_w = -44.082$ ,  $z_w = -7.013\ 7$ ,  $\alpha_w = -0.003\ 922\ 2$ ,  $\beta_w = -0.010\ 791$ ,  $\gamma_w = 0.021\ 670$ 。实际计算时间为 21 s。

对由工件模型中提取的焊缝信息中每一点的位姿矩阵应用式(1)进行计算, 即可得到实际焊缝上各点的位姿矩阵。经标定、转换后的焊缝数据下载到机器人控制柜运行, 实焊得到成形良好的焊缝。

### 4 误差分析

首先用一个已知运动算子  $T_{ww}'$  把模型上参考点坐标变换到实际工件所在的空间中, 模拟工件的实际安装位置, 即

$$T^0 p_{w'i} = T_{ww}'^0 p_{wi} \quad (10)$$

然后用  $\Delta$  模拟最大示教误差, 模拟的示教坐标

$$T^0 p_{w''i} = T_{ww}^0 p_{wi} + \Delta, \text{ 其中 } \|\Delta\|_\infty = 0.5 \quad (11)$$

应用模拟退火算法对  $T^0 p_w$  和  $T^0 p_{w''}$  进行工件位置标定, 计算出变换矩阵  $T'_{ww}'$ 。再用于模型上参考点的变换

$$T^0 p_{w''i} = T'_{ww}'^0 p_{wi} \quad (12)$$

最后, 由

$$\max \|T^0 p_{w''i} - T^0 p_{w'i}\|_2; \quad i=1, 2, 3, 4 \quad (13)$$

计算出最终的误差  $e_i$ 。

不考虑示教误差 ( $\|\Delta\|_\infty = 0$ ) 时, 工件位置标定算法的计算误差小于 0.02 mm, 可以满足弧焊要求。

示教误差 (设  $\|\Delta\|_\infty \leq 0.5$ ) 对工件位置标定的误差有一定的影响, 但示教时误差的方向随机性也会使误差在一定程度上互补, 使得工件位置标定误差较小, 通常小于 0.5 mm, 在极限的情况下, 工件位置标定的误差为 0.9 mm。如果参考点的示教比较马虎, 误差大, 最终标定的误差也随之较大。

### 5 结论

上述的焊接工件位置标定算法非常实用, 对机器人焊接不需要增加其它的辅助设备, 且具有通用性, 除了焊接工件位置的标定外, 也可以用于其它模型和实物之间的位置标定, 如在其它数控设备上的工件位置标定。如果焊接工件的位置标定是在路径规划之前进行的, 规划时用到的位姿数据是对应真实世界中的数据, 则路径规划的结果可以直接用于下载到机器人控制柜运行。算法具有较高的计算精度, 标定的结果可以满足焊接工艺的要求。

[下转第 10 页]

体中溶质(杂质)原子引起的弹性畸变、位错和点阵缺陷等都会引起电子的散射而使导热系数下降。当固溶体合金出现有序结构时,由于点阵的周期性增强,使传导电子的平均自由程增大,因而其导热系数将比无序时明显增大。此外,由于气体是热的不良载体,倘若金属周围有气体包围或内部有弥散分布的孔洞时,材料的导热系数将受其影响而降低。

电极铜合金的SEM分析表明,未深冷处理电极基体中存在较多显微孔洞,这样的组织结构使定向移动的电子受到剧烈的散射作用,导致材料的导电性及导热性下降。深冷处理后,材料中的显微孔洞数量比未处理前大为减少,基体致密程度得到明显提高,因此改善了电极的导电、导热与抗变形能力;由于铬、锆这两种组元在铜基体中含量很少,电极材料属于低浓度固溶体,低浓度下固溶体的电阻服从马提森(Matthissen)定则<sup>[5]</sup>,电极铜合金中固溶的铬、锆经深冷处理从基体中析出降低了基体中溶质原子的浓度,提高铜基体的纯度,从而降低了溶质元素产生的附加电阻,改善了电极铜合金的导电、导热能力<sup>[6,7]</sup>。试验证明,金属材料的屈服强度与晶粒直径平方根的倒数呈线性关系,晶界越多,即晶粒越细小,则强化作用越强<sup>[8]</sup>。深冷处理后,铜合金的晶粒由159.7 nm减小为82.9 nm,比未处理前几乎减小了一倍,所以深冷处理可使电极的强度提高。深冷处理后Cr、Zr在铜基体上出现了大量弥散分布的Cr、Zr颗粒,从而提高合金的抗变形能力。

显然,深冷处理使镀锌钢板点焊电极内部微观结构发生了一系列变化,改善了电极的热物理性能、导电性能及力学性能,从而显著提高了镀锌钢板点焊电极的寿命。

[上接第3页]

## 参考文献:

- [1] 邢文训, 谢金星. 现代优化计算方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999. 53~191.
- [2] Nirwan Ansari, Edwin Hou. 用于最优化的计算智能[M]. 李军, 边肇祺译. 北京: 清华大学出版社, 1999.

## 5 结 论

深冷处理提高了电极基体致密性,改变了合金元素分布,提高了电极的导电、导热能力,使电极产热减少,导热能力加强,避免了铜合金电极与镀锌板的合金化倾向。深冷处理也细化了电极材料的晶粒,提高了电极抗压溃变形的能力,使得点焊镀锌钢板的深冷电极寿命显著提高。

## 参考文献:

- [1] 谭善银, 张垒, 龚志坚. 镀锌薄板在轿车上的应用[J]. 汽车技术, 1993, (12): 22~30.
- [2] 程轩挺, 王敏, 王宸煜. 镀层厚度对镀锌板点焊质量的影响[J]. 电焊机, 2001, (1): 28~30.
- [3] 谢坚, 聂淦生. 电阻点焊研究进展(上)[J]. 电焊机, 1994, (1): 3~5.
- [4] 陈鼎, 黄培云, 黎文献. 金属材料深冷处理发展概况[J]. 热加工工艺, 2001, (4): 57~59.
- [5] 徐京娟, 邓志煜, 张同俊. 金属物理性能分析[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1988. 98~102.
- [6] 邱光普. 提高金属制件耐磨损及其他特性的干式制冷新方法[A]. 低温冷冻工艺应用文集[C]. 上海: 上海交通大学出版社, 1993. 121~122.
- [7] 王毅, 丛吉远. CuCr真空触头材料电特性的改善[J]. 低压电器, 1999, (3): 6~8.
- [8] 崔忠圻. 金属学与热处理[M]. 北京: 机械工业出版社, 1989. 260~262.

**作者简介:** 吴志生,男,1963年10月出生,副教授,博士研究生。研究方向为焊接工艺自动化,发表论文10余篇。

**Email:** wuzs@eyou.com

- [3] 康立山, 谢云. 非数值并行算法(第一册)—模拟退火算法[M]. 北京: 科学出版社, 2000.

**作者简介:** 殷树言,男,1937年出生,教授,博导。主要研究领域为焊接电弧物理、焊接工艺与设备等。获省部级科技进步奖8项,获黑龙江省振兴经济一等奖2项。出版著作8部,发表学术论文近100篇。

**Email:** sys@solaris.bjpu.cn