

文章编号 1004-924X(2004)04-0420-06

基于冗余关节机器人的插接管道焊缝扫查系统设计

鄢波, 颜国正

(上海交通大学 电子信息学院, 上海 200030)

摘要: 针对相贯线焊缝难以检测的问题, 提出了一种新型的管道插接相贯线焊缝扫查机器人系统, 通过管道夹紧装置使得机器人可附着于支管上作 360° 圆周运动, 特别是通过冗余关节的设计实现了机器人末端探测器要求的空间相贯线扫查轨迹。该系统可实现两种管道扫查方式: 一种是沿不同的扫查半径做 360° 周向扫查; 另一种方式是沿径向呈“Z”字形进行扫查。可实现支管直径为 100~400 mm, 被扫管道直径为 600~1000 mm 范围内的相贯线焊缝扫查。系统设计分析和控制运行结果表明: 扫查的周向步进精度 ≤ 0.2 mm/m, 径向步进精度 ≤ 0.5 mm/m, 轴向步进精度 ≤ 1 mm/mm。

关键词: 相贯线焊缝; 焊缝检测; 机器人系统

中图分类号: TP24 文献标识码: A

Design of weld inspection system for intersected pipe based on redundant manipulator

YAN Bo, YAN Guozheng

(School of Electronics & Information Technology, Shanghai Jiaotong Univ., Shanghai 200030, China)

Abstract: A robotic system was designed for the pipe intersected weld inspection. The manipulator can be hung on a branch pipe and rotates 360° according to a split pipe clamp device. The required inspection trajectory of the inspection probe on the manipulator's end detector is finalized by using the redundancy joints. The robotic system has two inspection modes. One is the 360° circumferential inspection with different scanning radii. The other is the 'Z' shape inspection along the radial direction. The robotic system can perform intersected weld inspection when the radius range of the branch pipe and the inspected pipe are 100~400 mm and 600~1000 mm, respectively. The results of the analysis of the designed system architecture and the operation under control algorithm show that the inspection accuracy of the robotic system can be: circumferential stepping accuracy ≤ 0.2 mm/m, radial stepping accuracy ≤ 0.5 mm/m, and axial stepping accuracy ≤ 1 mm/mm.

Key words: intersection weld; weld inspection; robotic system

1 引言

管道焊缝的无损检测是工业生产过程中必不可

少的一个环节^[1], 一般的管道焊缝通常发生在两个管道相接的部位。对于两管道对接处的焊缝进行检测是相对容易的, 然而有相当数量的焊接工作发生在两管道的插接部位, 这时的焊缝则形

收稿日期: 2004-03-15; 修订日期: 2004-06-17.

基金项目: 国防科工委“十五计划”基础计划项目(T012001A001)

成了复杂的相贯线空间曲线。对于这种相贯线的扫查研究目前较少, 文献^[2-3]介绍了管道相交相贯线的扫查方法以及切割相贯线管道的装置, 但都没有专门应用于插接管道焊缝自动扫查、检测的报道。设计了一种管道相贯线的连续轨迹扫查机器人, 该机器人的末端执行器可装载超声传感器用于插接管道相贯线连续轨迹焊缝扫查作业。

2 机器人机械本体设计

为了有效地扫查相贯线, 机器人的机座应有

效地固撑在管道上, 并提供可靠旋转运动。根据焊缝检测探头(立方形)的扫查特点, 其末端扫查的姿态必须满足一定的要求。图 1 所示为超声探头在管道相贯面上进行扫查时应进行的两种轨迹。一种是沿不同的扫查半径做 360°周向扫查; 另一种方式则是沿径向呈“Z”字形的径向扫查。探头扫查过程中要求探头的底面与相贯面保持 2 ~ 5 kg 的压力并相切, 探头的前端面应始终对准支管中心线。

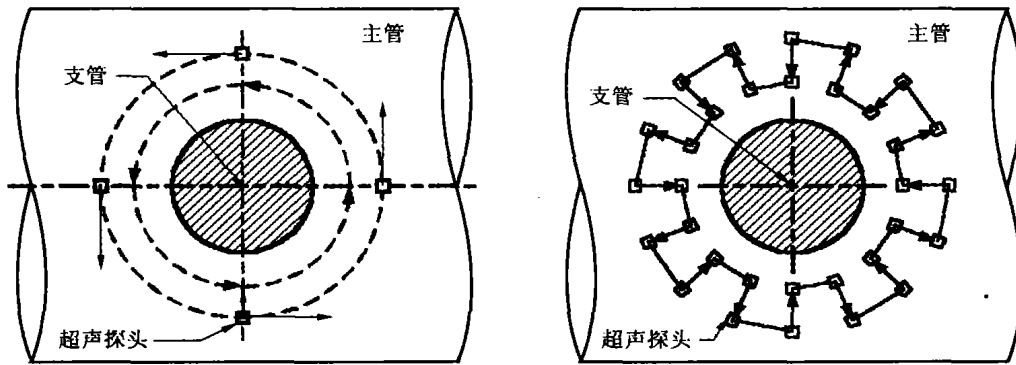


图 1 超声探头的两种扫查轨迹
Fig. 1 Two scanning tracks of ultrasonic detector

为实现所需的扫查轨迹, 机器人的底座设计为沿管子旋转 360°的大夹盘, 该夹盘夹撑于支管上, 由两部分组成: 一部分为夹具体, 可以在管道上进行剖分式稳定夹紧; 另一部分为旋转体, 通过行星轮运动实现整圈旋转。机械关节臂即附着在旋转体一端头, 另一端头为旋转电机, 用来驱动转盘旋转。考虑到相贯面的扫查有周扫和“Z”形径扫两种方式, 在扫查路径中不仅扫查半径需要改变而且探测高度也会有所改变, 机器人的位置控制关节仅提供两个关节是不够的, 因此引入一个冗余关节以使得整个位置关节在可达空间范围内形成一种经典的“曲柄滑块”结构, 该结构在机械学上具备可靠的灵活性和更好的力学性能。由于探头底面处于相贯面的切面并压紧, 探测顶面要一直对准被夹支管中心线, 所以姿态关节应是三维旋转关节。该旋转关节 3 轴汇交于一点, 汇交点即是末端探头的中心点, 任何时候探头都是以该中心点为旋转中心处于所需的不同姿态。最后实际安装于末端执行器上的超声探头还考虑了姿

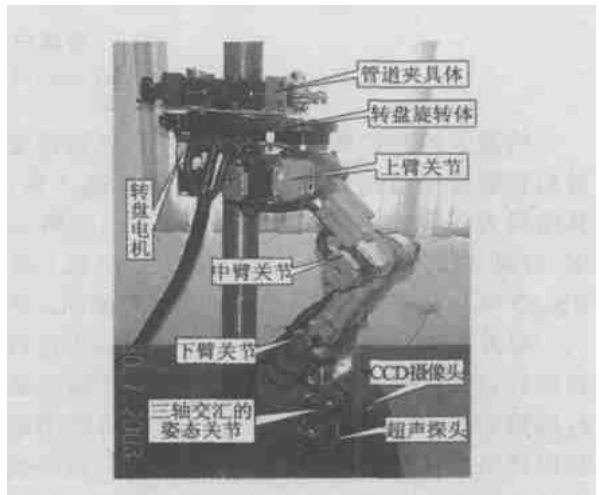


图 2 机器人机械本体照片
Fig. 2 Photograph of the mechanical entity of robot manipulator

态的自适应调整, 设有弹簧调整机构。图 2 为机械本体的实物照片。该机器人可实现支管直径为 100~ 400 mm, 被扫管道直径为 600~ 1 000 mm

范围内的相贯线焊缝扫查。

3 机器人的控制方案

设计的机器人关节全部为旋转关节, 关节驱动全部通过步进电机实现。步进电机的特点是通过脉冲与频率来控制关节旋转角度与角速度, 整个过程易于通过计算机来控制, 从而避免因采用直流电机产生模拟量而引入较复杂的 PID 现场控制。机器人的关节臂由于较长, 在设计过程中应该考虑到惯量匹配问题, 通常整个手臂折算到该关节上的名义转动惯量应小于电机输出转动惯量的 3 倍。

设计过程中为满足惯量匹配, 位置关节步进电机输出轴应通过 60~100 的减速比才能输出到关节臂上, 为此系统转盘关节与位置关节均采用了谐波减速器, 特点是传动比大、精度高(传动误差 < 6 min)。姿态关节受到尺寸的限制需要应用内齿啮合的紧凑型齿轮减速器。整个系统采用了上、下位机的分布式控制方案, 上位机与下位机之间采用远距离通讯(间隔距离为 50~100 m), 可进行远程监测与诊断。下位机的工作方式是提供步进电机的脉冲环流分配与驱动, 下位机控制器采用 MCS-51 系列单片机编程, 可以产生控制脉冲序列。整个系统的控制网络拓扑如图 3。

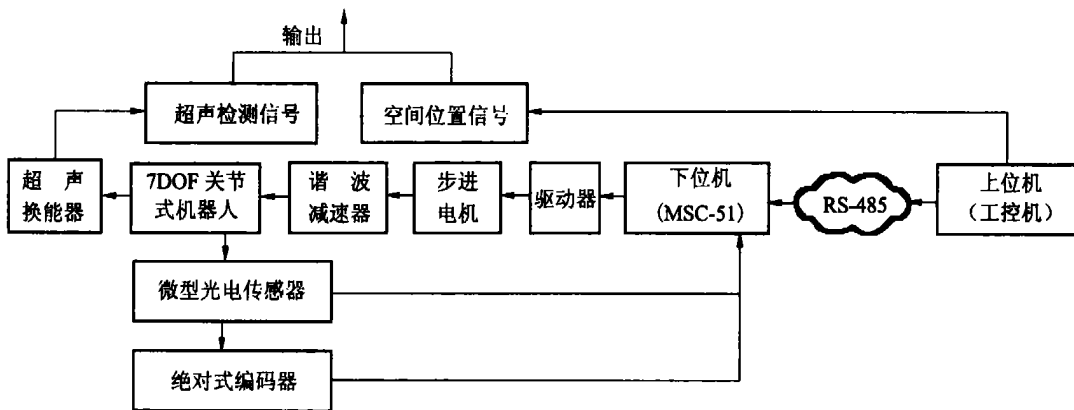


图 3 管道扫查机器人控制网络拓扑图

Fig. 3 The topology of control network for piper scanning inspection robot

机器人的连续轨迹控制由上位机根据预定的被扫管道直径与扫查半径进行相应轨迹计算, 计算结果为各关节在若干设定时间下的转动角度、时间和转动方向。上位机(工控机)通过 RS485 串口通信协议将数据发给下位机(单片机), 单片机根据指令对关节各离散控制点进行圆弧插补, 同时采集光电传感器与绝对式编码器进行极限分析, 如果机器人各关节的运动范围超过极限将给以报警并停止机器人的运行。位于机器人的末端执行器边上设有高精型 CCD 传感器, 采集的 PAL 制模拟视频信号通过同轴电缆传给远端的上位机, 由装入上位工控机内的高速图像采集/MPEG I 压缩卡转换为连续的数字压缩视频格式文件, 可供远端上位机进行实时监控和基于图像识别技术的机器人伺服系统控制^[4]。最后机器人控制系统应与超声波检测系统相匹配, 能实时提供末端探头在相贯面上探测点的空间三

维坐标。

4 机器人的通信与软件工作模式

上位机需要完成如下功能模块: (1) 可靠的各种扫查路径的关节控制解算模块。(2) 扫查机器人的动态三维仿真模块。(3) 拥有自动运行、手动运行和复位等工作模式的机器人控制模块。(4) 机器人运动过程的动力学数据分析模块。(5) 上位机与下位机的串口通讯及与超声检测数据处理系统(另一个工控机)进行空间坐标交换的以太网数据通讯模块。

下位机(单片机)的核心功能是提供扫查过程中离散点的插补功能, 从而给出合理的脉冲控制序列, 能够使得步进电机工作可以避免启动频率过高或过低所带来的驱动失效与低频振荡。功能上分别实现与上位机配合所形成的自动、手动与

复位控制功能。自动控制即表示机器人按照预定的扫查轨迹进行连续扫查, 手动控制是通过 CCD 摄像仪的监视在远端上位机上分别控制机器人的各关节, 可以手动调整位姿, 人为获取若干工作姿态控制点, 进而实现机器人的示教功能。复位功能使得机器人按照一定的程序运动恢复到初始复位状态, 保证机器人可以处于安全的工作准备状态。

图 4 为上、下位机的工作通讯握手方式图。由于工作方式有三种, 机器人的运动关节也有 7 个, 在通讯过程中需要对上、下位机各种工作方式握手信号编码, 以及对机器人各关节进行编号。同时下位机(单片机)内置软件看门狗, 当程序握手失败或其他原因导致程序跑飞时, 上位机可以通过软件的方式使得系统复位。

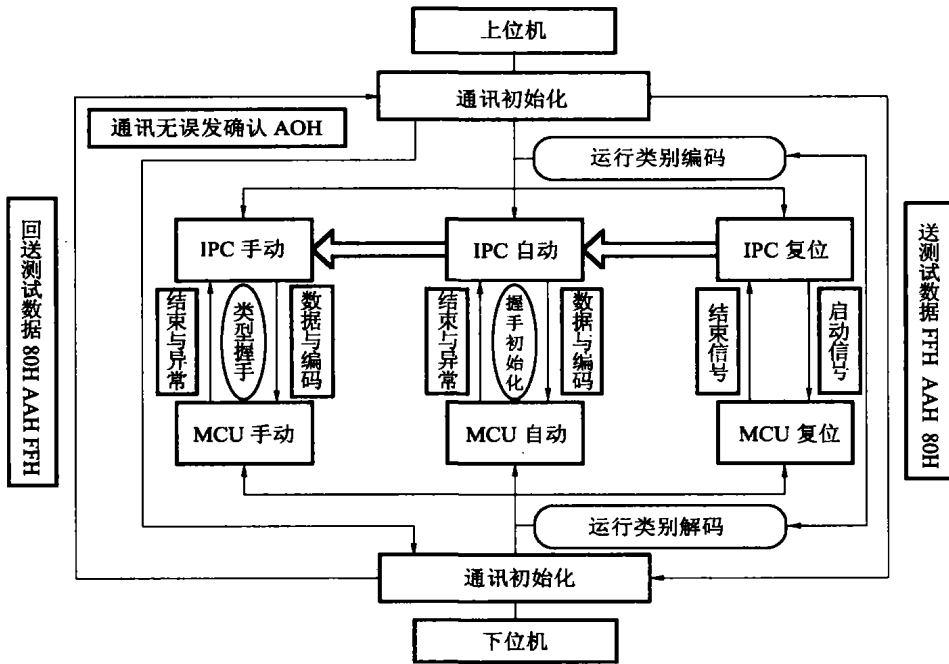


图 4 上、下位机的工作方式与通讯握手协议
Fig. 4 The operation mode and communication and handing protocol between IPC and MCU

5 机器人轨迹规划运行结果

基于系统的机械本体与硬件控制平台, 设计了上位机的笛卡儿空间轨迹控制算法, 该算法的关键是建立机器人关节空间到笛卡儿空间的映射关系(即机器人的逆运动学)^[5-8], 采用几何法来进行逆运动学分析^[9-11]。实际运行过程中还需要在轨迹曲线上划分若干插值节点^[12-15], 节点的划分应当能满足实际要求的扫查精度。

图 5 为机器人结构分析图。由图 5 可见, 运动学上该机器人可分为两大部分, 第 1 部分是由连杆 \overline{KD} 、 \overline{DM} 、 \overline{MP} 和 \overline{PC} 组成, 决定末端换能器的空间位置, 其中 D 点为上臂关节、 M 点为中臂关节、 P 点为下臂关节及 C 点为姿态关节交点。第

2 部分是由互相垂直交汇于 C 点的关节组成, 可确定换能器的姿态。由于机器人的扫查精度直接与换能器的空间位置关系相关, 这里仅计算位置关节的逆运动学解。图 5 中所有的坐标值均以机座坐标系 $X_0 Y_0 Z_0$ 为参考坐标。

由图 5, 关节常量 $A_1 = e > 0$, $D_1 = h > 0$, 则 P 点横坐标 $r_p = \sqrt{x_p^2 + y_p^2} > 0$ 。为实现预定轨迹, 杆 l_1 、 l_2 和 l 必须构成一个三角形, 即应满足 $l = \sqrt{(r_p - e)^2 + (z_p - h)^2} < (l_1 + l_2)$ 。由余弦定律可首先计算出中臂关节变量的值为:

$$\theta_3 = \text{sng}(M) \left[\pi - \arccos \left(\frac{l^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1 l_2} \right) \right], \tag{1}$$

式(1)中的 $\text{sng}(M)$ 是与 M 点位置有关的符号函数, 如下(其中 f 代表直线函数):

$$\text{sng}(M) = \begin{cases} 1, & M \in \{M/f_{DP}(x_M) < y_M, r_p > e\} \cup \{M/f_{DP}(x_M) > y_M, 0 < r_p < e\} \\ -1, & M \in \{M/f_{DP}(x_M) > y_M, r_p > e\} \cup \{M/f_{DP}(x_M) < y_M, 0 < r_p < e\}, \end{cases} \quad (2)$$

由几何关系并注意到 l_1 杆的位置可以得到上臂关节变量为:

$$\theta_2 = A \tan 2((h - z_p), (r_p - e)) - \text{sng}(M) \arccos \left(\frac{l^2 + l_1^2 - l_2^2}{2l_1 l_2} \right), \quad (3)$$

引入冗余降解参数 γ 来表征下臂关节相对于竖直方向的夹角, 并利用 γ 值的不同来代表机器人的冗余性。于是下臂关节的关节变量可由几何关系 $\frac{\pi}{2} + \gamma = \theta_2 + \theta_3 + \theta_4$ 得到:

$$\theta_4 = \frac{\pi}{2} + \gamma - \theta_2 - \theta_3, \quad (4)$$

式(4)中的 γ 取值范围为 $-\pi/2 < \gamma < \pi/2$ 。

实际上, 式(1) - (4) 的计算依赖于 P 点的坐标, 而 P 点坐标可以由 C 点坐标来计算, 如下:

$$r_p = l_3 \sin \gamma + r_c, \quad z_p = l_3 \cos \gamma + z_c, \quad (5)$$

这里知道 C 点是末端换能器的中心, 实际接触被探管道表面的点是换能器底面的中心 A 点, 它们之间相差半个换能器高度, 为 δ 。在规划机器人扫描路径时, 实际是对 A 点的轨迹进行规划。一般底管相贯线上的扫描点可由扫描半径 R 、被扫管(底管)半径 R_b 和扫描分度角 θ_f 决定, 于是 C 点与 A 点的坐标可表示为:

$$y_C = R \sin \theta_f \quad y_A = R \sin \theta_f$$

$$x_C = (R_b + \delta) \cos \alpha = \frac{R_b + \delta}{R_b} R \cos \theta_f$$

$$x_A = R_b \cos \alpha = R \cos \theta_f$$

$$z_C = (R_b + \delta) \sin \alpha = \frac{R_b + \delta}{R_b} \sqrt{R_b^2 - R^2 \cos^2 \theta_f}$$

$$z_A = R_b \sin \alpha = \sqrt{R_b^2 - R^2 \cos^2 \theta_f}, \quad (6)$$

由式(6)可计算 $r_C = \sqrt{x_C^2 + y_C^2}$ 。注意到换能器中心 C 点与底面 A 点存在高度差, 转盘关节变量与扫描分度角 θ_f 并不重合, 其计算式为:

$$\theta_1 = \arctan \left(\frac{y_C}{x_C} \right) = \arctan \left(\frac{R_b}{R_b + \delta} \tan(\theta_f) \right), \quad (7)$$

这样, 位置关节变量式(1)、(3)、(4)和(7)就可完全由相贯线的轨迹点与换能器尺寸确定, 从而为轨迹规划打下了基础。

图 6 为该机器人的运动轨迹图, 在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 范围内对相贯线运动轨迹划分了 50 个控制节点,

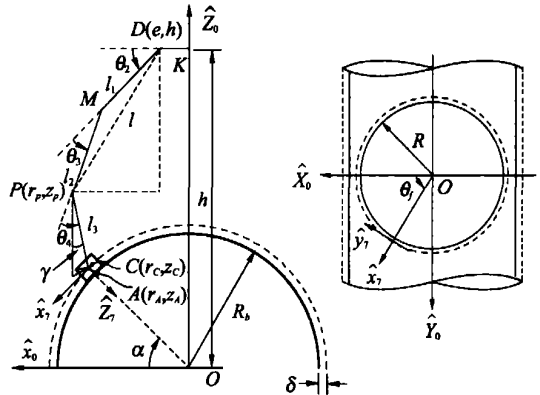


图 5 机器人的逆运动学计算模型

Fig. 5 Inverse kinematic illustration of manipulator

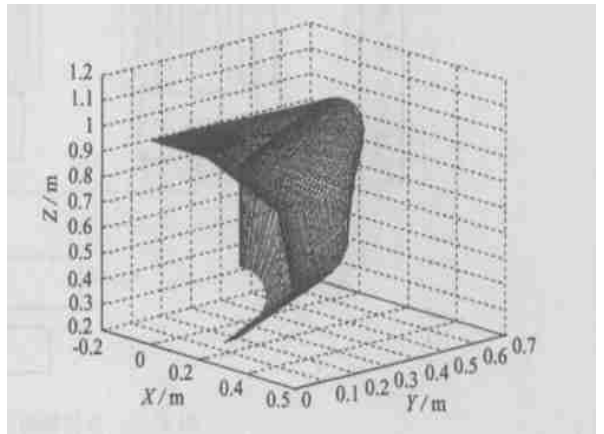


图 6 机器人插值节点分布与运动轨迹

Fig. 6 Interpolation knot points distribution and motion trajectory of manipulator

机器人的末端换能器需要严格通过这些控制节点, 两控制节点之间的关节变量通过样条插值函数来确定, 然后再采用正运动学确定末端轨迹。机器人实际的轨迹运行结果表明: 该系统实际探测的周向步进精度 $\leq 0.2 \text{ mm/m}$, 径向步进精度 $\leq 0.5 \text{ mm/m}$, 轴向步进精度 $\leq 1 \text{ mm/mm}$ 。

6 结 语

介绍了一种新型的管道插接相贯线焊缝扫查机器人系统, 通过管道夹紧装置使得机器人可附着于支管上作 360° 圆周运动, 通过冗余关节的设计实现了机器人末端探测器要求的空间相贯线扫

查轨迹。该系统可实现两种管道扫查方式:一种是沿不同的扫查半径做 360° 周向扫查;另一种方式是沿径向呈“Z”字形进行扫查。该机器人可实现支管直径为100~400 mm,被扫管道直径为600~1000 mm范围内的相贯线焊缝扫查。采用

几何法对机器人的位置关节进行了逆运动学分析,在关节空间内选择50个插值控制节点,系统控制运行结果表明:扫查的周向步进精度 ≤ 0.2 mm/m,径向步进精度 ≤ 0.5 mm/m,轴向步进精度 ≤ 1 mm/mm。

参考文献:

- [1] 程维明,李国栋.用于细小工业管道的视频探测器[J].光学精密工程,2001,9(6):519-522.
CHENG W M, LI G D. Ir pipe video detector for small pipes[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2001, 9(6): 519-522. (in Chinese)
- [2] 边广韬,叶长龙,王涛,等.机器人作两圆柱相贯线运动的一种轨迹规划方法[J].组合机床与自动化加工技术,2002,6(9):24-26.
BIAN G T, YE CH L, WANG T, et al. An trajectory planning method of manipulator[J]. *Modular Machine and Automatic Processing Technology*, 2002, 6(9): 24-26. (in Chinese)
- [3] 赵洪兵,吴贵阳,殷继安.两管状圆柱体斜交相贯线自动切割机研制[J].西安工业学院学报,1997,17(4):314-316.
ZHAO H B, WU G Y, YIN J A. Study of automatic machine conducting two big circular tube oblique penetration line cutting[J]. *Journal of Xi'an Institute of Technology*, 1997, 17(4): 314-316. (in Chinese)
- [4] 郑时雄,刘桂雄,阎华,等.机器人视觉在自动装配线中的应用[J].光学精密工程,1998,6(1):90-94.
ZHENG S X, LIU G X, YAN H, et al. Applications of robotics vision system in automatic assembly[J]. *Optics and Precision Engineering*, 1998, 6(1): 90-94. (in Chinese)
- [5] GRUDIC G Z. Iterative inverse kinematics with manipulator configuration control[J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1993, 9(4): 476-483.
- [6] SCHINSTOCK D E, CUTTINO J F. Real time kinematic solutions of a non contacting, three dimensional metrology frame[J]. *Precision Engineering*, 2000, 24(1): 70-76.
- [7] AHUACTZIN J M, GUPITA K. A motion planning based approach for inverse kinematics of redundant robots: the kinematic roadmap[J]. *Expert Systems with Applications*, 1998, 14(2): 159-167.
- [8] ROBERT M. A solution to the singular inverse kinematic problem for a manipulation robot mounted on a track[J]. *Control Engineering Practice*, 2002, 10(1): 35-43.
- [9] CHAPELLE F, BIAUD B. Closed form solutions for inverse kinematics approximation of general 6R manipulators[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2004, 39(3): 323-338.
- [10] SEN D, MRUTHYUNJAYA T S. A computational geometry approach for determination of boundary of workspaces of planar manipulators with arbitrary topology[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 1999, 34(1): 149-169.
- [11] CARON M, MODI V J, MISRA A K. Dynamics of a multimodule variable geometry manipulator[J]. *Acta Astronautica*, 2002, 50(10): 587-595.
- [12] LUH J Y S, LIN C S. Approximate joint trajectories for control of industrial robots along cartesian paths[J]. *IEEE Trans. Systems, Man, Cybern*, 1984, SMC-14(3): 1094-1102.
- [13] TAYLOR R H. Planning and execution of straight line manipulator trajectories[J]. *IBM Journal of Research and Development*, 1979, 23(4): 424-436.
- [14] CHANG Y H, LEE T T, LIU C H. Our Line approximate cartesian path trajectory planning for robotic manipulator[J]. *IEEE Trans. Systems, Man, Cybern*, 1992, 22(3): 542-547.
- [15] ASPRAGATHOS N A. Cartesian trajectory generation under bounded position deviation[J]. *Mech. Mach. Theory*, 1998, 33(6): 697-709.

作者简介:鄢波(1974-),男,四川綦江人,博士研究生,主要研究方向为机器人智能控制与系统仿真。Email: yb_sjd@sjtu.edu.cn