

储罐底板自动漏磁检测小车的路径规划与运动控制

宋小春¹ 陈雨¹ 许正望¹ 吴英²

1. 湖北工业大学, 武汉, 430068 2. 重庆科技学院, 重庆, 401331

摘要:针对储罐底板现有检测装备自动化程度不高、检测劳动强度大、检测效率低等问题,设计了储罐底板自动化漏磁检测系统。介绍了系统的结构组成,分析了基于双目激光测距的小车自动定位原理。根据储罐底板的结构特征和漏磁检测的特点,规划了检测小车的运动路径,研究了小车运动速度增量式 PID 控制算法和小车运动方向差动式控制算法,并进行了实验研究。结果表明,小车能够根据设定的 PID 控制参数沿规划路径扫查,小车在直线寻迹时 30° 方向偏差纠偏时间约为 1.7 s,轨迹跟踪性能良好。

关键词:储罐底板;漏磁;双目激光定位;运动控制

中图分类号:TE97

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2014.12.014

Path Planning and Motion Control of an Automatic MFL Inspector for Tank Floors

Song Xiaochun¹ Chen Yu¹ Xu Zhengwang¹ Wu Ying²

1. Hubei University of Technology, Wuhan, 430068

2. Chongqing University of Science and Technology, Chongqing, 401331

Abstract: In order to overcome such disadvantages as the low-level automation, high labor intensity and low efficiency for the current tank floor testing system, an automatic MFL inspector for tank floors was developed. And the inspector composition and function modules were introduced, the automatic positioning principle of testing trolley was analyzed based on binocular laser ranging. According to the structural characteristics of tank floors and the technical features of MFL inspection, the planned motion path for floor inspection were presented, and the differential direction control algorithm and the velocity control algorithm based on incremental PID controller were studied. Experimental results indicate that the automatic MFL inspector has good performance of trajectory tracking, and can scan the floor well with setting control parameters along the planned path, and the maximum time of deviation angle rectification is about 1.7 s.

Key words: tank floor; magnetic flux leakage(MFL); binocular laser positioning; motion control

0 引言

大型储罐是油库、港口和石油化工企业储存液体原料及中间产品的重要设备。罐底板位于储罐的底层,上表面接触含水的存储介质,下表面和罐基础接触,是储罐被腐蚀的主要集中区^[1],因此,对罐底板腐蚀状态实施检测是储罐定期检修的重要内容之一。漏磁检测技术因具有检测灵敏度高、检测速度快、不受检测对象表面油污限制等优点,因此在储罐底板等铁磁性构件无损检测方面表现出显著的优势,相应的漏磁检测器已在储罐底板缺陷检测中取得了较好的应用效果^[2-3]。然而,由于现有检测器一般是通过人力或人工辅助电力驱动对整个储罐底板进行扫查的^[4],劳动强度大,且储罐的密封环境不允许工作人员工作时间过长,因此,在我国储罐数量和容量不断增加

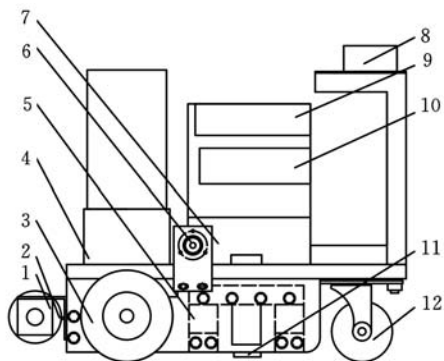
的情况下,有必要研制自动化漏磁检测系统,以达到降低人工劳动强度、提高储罐底板检测效率的目的。

1 检测系统结构

储罐底板自动化漏磁检测系统主要由检测小车、励磁装置、集成 Hall 元件、数据处理单元、打标装置和控制系统等组成(图 1)。其中,检测小车用于搭载励磁装置和集成 Hall 元件在储罐内沿规划路径行走,并对储罐底板进行扫查。小车由两直流电机驱动,通过差动方式调节左右驱动轮的转速以实现小车沿直线、弧线行走以及运动转向。为了保证小车能够灵活转向,小车上安装了一个双轮结构的万向轮,起辅助支撑的作用。小车前后分别安装两个接近开关,用来判断小车是否到达储罐底板端部。打标装置安装在检测小车尾部,由喷漆罐和推拉式电磁铁构成,当发现缺陷时,控制系统使推拉式电磁铁通电,电磁铁铜头撞击喷漆罐的开关,在缺陷所在位置喷漆打标。

收稿日期:2013-12-10

基金项目:国家重大科学仪器设备开发专项资助项目(2013YQ140505);重庆市科技攻关计划项目(2011AC3116)



1. 推拉式电磁铁 2. 喷漆罐 3. 驱动轮 4. 直流电机
5. 励磁装置 6. 编码器 7. 电源 8. 激光测距传感器
9. 控制系统 10. 电机驱动模块
11. 集成 Hall 元件 12. 万向轮

图 1 储罐底板自动化漏磁检测系统

控制系统主要包括主控制器、电源模块、速度检测模块、方向检测模块等。其中,主控制器用于控制小车的运动轨迹并处理传感器采集的数据;电源模块将电池的直流 24V 电压转换成不同的直流电压输出,给各功能模块供电,同时在电池电压过低时发出报警信号;速度检测模块通过两个旋转编码器实时检测驱动轮的速度;方向检测模块根据两个激光测距传感器的输出结果,计算并判断小车是否偏离规划路径,配合旋转编码器采集的信息,它还可实时获取小车在储罐底板上的二维位姿。

数据处理单元主要完成对漏磁信号的采集和处理。由于主控制器内部只有 16 路 AD 转换电路,因此采用 5 个 CD4053 模拟开关,以分时获取 28 个通道的漏磁检测信号。在编码器脉冲信号触发下,主控制器控制模拟多路开关的开断,实现多通道等间隔数据采样。控制器对采集到的漏磁信号进行实时预处理,提取特征信号,识别缺陷,并控制打标装置在缺陷处打标,同时还将采集到的漏磁信号存储到大容量硬盘。在小车对储罐底板完成扫查后,可通过上位机软件读取硬盘中储存的漏磁信号,并进行分析和处理,以实现漏磁检测信号的定量评价。

2 小车定位原理

储罐底板一般由若干块中幅板和极边板按一定的排列形式焊接而成^[2]。由于受到漏磁检测小车的尺寸限制,对一个储罐的底板进行检测时,往往需要漏磁探头沿一定的路径进行多次扫查,因此检测小车沿着规划路径准确行走是保证检测结果可靠的关键。为此,在小车开始扫查前,在储罐底板上沿小车的行进方向垂直放置一块反射板,

由于在检测小车的顶部安装有两个夹角可调的激光测距传感器,因此很容易测得小车到反射板的距离,据此调节小车的运动方向,便能够保证小车始终沿与反射板平行的方向直线行驶,从而完成对储罐底板的直线扫查。

如图 2 所示,定义 OXY 为储罐底板的全局坐标系,原点 O 为反射板的端点, Y 轴方向与小车扫查方向一致。同时,定义 $O_cX_cY_c$ 为检测小车局部坐标系,原点 O_c 为检测小车两驱动轮轴线的中点, X_c 轴方向与两驱动轮轴线重合。以 O_c 作为检测小车在储罐底板上的位置参考点,据此定义任意时刻小车在储罐底板全局坐标系中的位姿为 $(x, y, \theta)^T$,其中 x, y 为 O_c 在 OXY 全局坐标系下的坐标, θ 为检测小车的姿态角,即 Y_c 轴与 Y 轴的夹角。

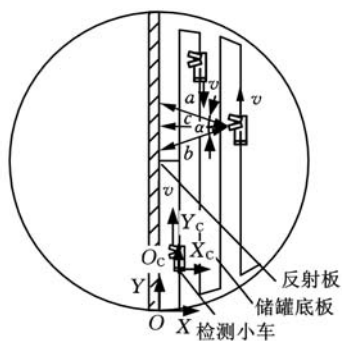


图 2 小车定位原理

当检测小车沿与反射板平行的方向直线行走时,如果检测小车上两个夹角为 α 的激光测距传感器的输出值分别为 a 和 b ,利用三角形面积公式,即可求出检测小车与反射板间的距离:

$$c = \frac{absina}{\sqrt{a^2 + b^2 - 2ab\cos\alpha}} \quad (1)$$

当检测小车偏离规划路径方向时,可以求出偏差角:

$$\beta = \arccos \frac{c}{a} - \frac{\alpha}{2} \quad (2)$$

当偏差角 $\beta > 0$ 时,检测小车右偏;当偏差角 $\beta < 0$ 时,检测小车左偏。

通过 1000 线旋转编码器采集的脉冲增量,可以分别计算得到左右驱动轮在采样时间 Δt 内的行驶距离 ΔS_L 和 ΔS_R ,据此,即可得到在采样时间 Δt 内,车体的行驶距离 ΔS 和转向角度 $\Delta \theta$:

$$\begin{bmatrix} \Delta S \\ \Delta \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/2 & 1/2 \\ 1/L & -1/L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta S_L \\ \Delta S_R \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中, L 为左右驱动轮间的距离。

在全局坐标系下,设 t_{i-1} 时刻检测小车的位姿为 $(x_{i-1}, y_{i-1}, \theta_{i-1})^T$, t_i 时刻检测小车的位姿为 $(x_i, y_i, \theta_i)^T$,则检测小车的运动方程^[5] 为

$$\left. \begin{aligned} x_i &= x_{i-1} + \Delta S \cos(\theta_{i-1} + \Delta\theta) \\ y_i &= y_{i-1} + \Delta S \sin(\theta_{i-1} + \Delta\theta) \\ \theta_i &= \theta_{i-1} + \Delta\theta \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

根据编码器采集的数据,计算出采样时间 Δt 内检测小车的行驶距离 ΔS 和转向角度 $\Delta\theta$,通过不断地累加,即可实时计算小车的位姿,实现检测小车的自定位功能。根据工程经验,采样时间 Δt 一般取 5 ~ 20 ms,由于采样时间较长时,量化精度较高,所以本系统的采样时间 Δt 取 20 ms。对检测小车方向的控制是整个控制系统的关键,当检测小车沿与反射板平行的方向行驶时,利用式(2)计算小车的偏差角来消除编码器累计误差对检测小车角度的影响。

3 运动路径规划与控制方法

3.1 运动路径规划

小车的运动路径规划就是根据传感器对储罐环境的感知,针对检测需要,自行规划出一条运动路线^[6]。如图 3 所示,由于布置了反射板,因此小车主要沿两条运动路径分别对反射板左右两边的

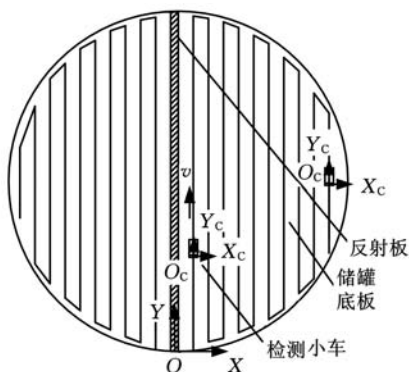


图 3 最优检测路径规划

储罐底板进行扫查。小车从全局坐标系的原点开始,沿与反射板平行的方向进行直线扫查,并根据式(1)实时计算小车到反射板的距离为 c_i ;当小车行驶到离储罐底板端部距离较小时,接近开关触发单片机控制小车进入换轨阶段,此时对小车的方向控制从闭环控制切换到开环控制,小车差速转向一定的角度,行驶大约一个车宽的距离后,回到和反射板平行的方向,然后从开环控制切换到闭环控制,进入下一个待检区;按照同样的控制算法,小车扫查完成反射板右边的所有待检区域。同理,小车也可完成对反射板左边储罐底板的漏磁检测。由于检测小车单次扫查的宽度为 240 mm,为了减少漏检区,则规定相邻两次直线扫查之间的距离为 220 mm,即有 20 mm 宽度的重叠区域。这种路径规划方法便于检测小车实现自定位,提高检测效率,减少漏检区,降低劳动

强度。

3.2 运动控制方法

对检测小车的运动控制就是控制检测小车使其按照期望的速度沿规划路径平稳行驶。由式(3)对时间 t 求导,可得检测小车的线速度 v 和角速度 ω :

$$\begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/2 & 1/2 \\ 1/L & -1/L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_L \\ v_R \end{bmatrix} \quad (5)$$

式(5)表明,通过控制检测小车左右驱动轮的线速度 v_L 和 v_R ,可以实现检测小车在储罐底板内任意位姿的运动。所以,检测小车的控制对象为两个直流电机的转速和转向,它们决定了小车的速度和方向。根据检测小车的路径规划可知,对检测小车的控制可以分为速度控制和方向控制。

3.2.1 速度控制

当检测小车两驱动轮转速相等、转向相同时,可实现直线运动;当两驱动轮转速相等、转向相反时,可实现原地回转运动;当两驱动轮转向相同、转速成比例时,可实现固定半径的弧线运动。速度控制中需首先根据规划路径来设定小车两驱动轮的速度,然后根据设定速度与反馈速度的偏差值 $e(k)$ 来调节两驱动轮实际速度,完成对速度反馈的闭环控制。单片机采用增量式 PID 控制算法控制电机驱动器的脉冲宽度调制(PWM)信号,电机驱动器将 PWM 信号转换成电机驱动电压信号。增量式 PID 控制器^[7]的控制规律为

$$\Delta u = K_P(e(k) - e(k-1)) + K_I e(k) + K_D(e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)) \quad (6)$$

式中, K_P 为比例系数; K_I 为积分系数; K_D 为微分系数。

速度控制方法如图 4 所示。

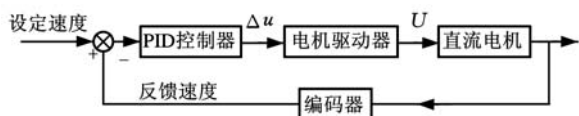


图 4 速度控制方法

3.2.2 方向控制

激光测距传感器对小车的方向进行闭环调节,由式(2)可计算得到 i 时刻检测小车的偏差角 β_i ,通过比例控制算法输出方向信号,分别与小车速度控制信号进行加和减,形成左右轮差动控制电压,使得左右轮运行角速度不一致,进而控制小车的方向,保证检测小车始终按规划路径行驶。方向差动控制方法如图 5 所示。

在方向控制中,当检测小车沿与反射板平行的方向行驶时,采用闭环控制;当检测小车沿与反射板垂直的方向行驶时,采用开环控制。从闭环

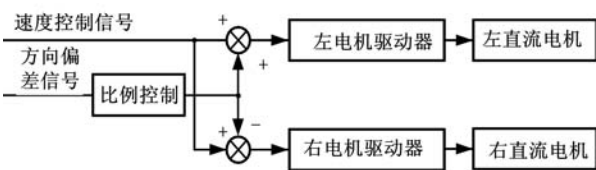
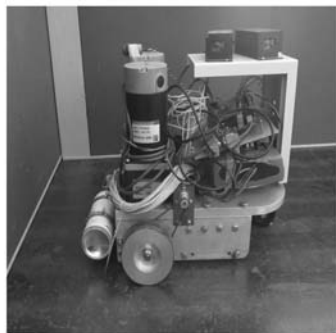


图5 方向差动控制方法

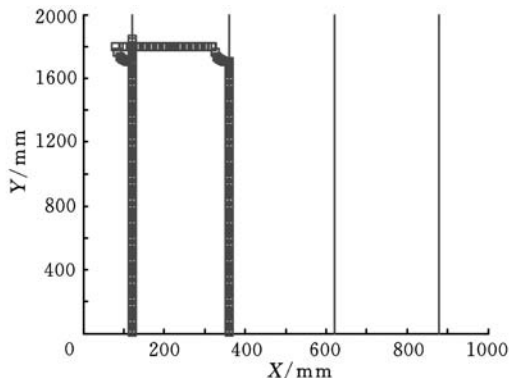
控制切换到开环控制,检测小车与规划路径的角度偏差不会超过 15° ,整个控制过程可平稳地进行。

4 实验研究

选择一块 $2000\text{ mm} \times 1000\text{ mm} \times 8\text{ mm}$ 的Q235钢板作为检测对象,对检测小车的规划路径和控制系统进行实验研究。检测小车实物见图6a,由规划路径可知,检测小车的运动轨迹由直线运动组成,所以需对检测小车的运动路径进行实验研究。通过对比实际运动轨迹和规划路径,分析检测小车的运动效果。实验中,检测小车两轮轴距为 300 mm ,驱动轮直径为 96 mm ,两轮的速度都为 0.1 m/s 。由控制方法可知,要实现直线运动,需在控制周期内保证小车两驱动轮的速度相等。通过采集控制周期内两驱动轮的位移,得到检测小车的位姿坐标,如图6b所示。



(a)检测小车



(b)运动路径跟踪轨迹

图6 检测小车及其路径跟踪轨迹

从图6b可以看出,小车能够根据设定控制方法沿规划路径扫描,小车跟踪效果较好。检测小车沿直线行走时,X轴的最大距离偏差约为

2 mm ,角度偏差约为 1.5° ,表明检测小车沿直线运动时直线度很高。检测小车的运动控制系统和算法设计满足检测小车的应用要求,控制算法的设计使得其具有良好的轨迹跟踪特性。

在实验中测试了采用不同PID参数时小车的跟踪效果,如表1所示。实验结果表明,PID参数对轨迹跟踪效果和系统的性能有很大的影响。由于系统的时间参数较大,所以积分系数较大。以下4组数据中,第一组参数的跟踪效果较好,所以采用第一组参数对小车进行路径跟踪。

表1 不同PID参数时的小车跟踪效果

K_P	K_I	K_D	跟踪效果
2	0.3	0	好
3	0.3	0	较好,车体振荡两个周期
2	0.3	0.1	较好,系统反应超前
2	0.5	0	系统超调量增大

实验中,还测试了在初始位置不理想情况下小车的纠偏能力。首先在实验板上用红色油性笔画出规划路径,然后通过检测小车中心固定的一个黄色油性笔在实验板上画出小车的实际路径,最后通过对比可以测得小车的角度和距离偏差。以小车从偏离位置回到规划路径上的距离和时间作为测试标准,测试结果如表2和表3所示。实验结果表明:当小车相对规划路径的偏差角在 15° 以内时,能够快速稳定地纠偏,使车体回到无偏状态;当偏差角超过 15° 时,小车需要一段弧形路线调整才能稳定地回到规划路径上;当小车相对规划路径的距离偏差在 10 mm 以内时,能够快速稳定地纠正距离偏差。由于在实际情况中一般角度偏差不会达到 30° ,距离偏差不会达到 10 mm ,所以系统能够快速稳定地回到规划的路径上。

表2 小车角度纠偏测试结果

相对规划路径的偏差角($^\circ$)	沿规划路径调整距离的统计平均值(mm)	调整时间的统计平均值(s)	最大调整距离的统计平均值(mm)
15	60	0.8	8
30	115	1.7	22
45	163	2.3	43
60	197	2.8	56

表3 小车距离纠偏测试结果

小车中心到反射板的距离(mm)	相对规划路径的距离偏差(mm)	调整时间的统计平均值(s)
220	2	0.2
440	2.5	0.3
660	4	0.5
880	5	0.7

5 结语

针对储罐底板检测的实际需要,本文设计了

一种基于激光定位的储罐底板自动漏磁检测小车,主要介绍了检测小车的结构组成、自动定位原理,研究了运动系统的路径规划及其控制方法,对检测小车沿规划路径行驶进行了跟踪实验。实验结果表明,该小车能够沿所规划的路径行驶,并对储罐底板进行自动化扫查。

参考文献:

- [1] Song Xiaochun, Huang Songling, Zhao Wei. Optimization of the Magnetic Circuit in the MFL Inspection System for Storage Tank Floors[J]. Russian Journal of Nondestructive Testing, 2007, 43(5): 326-331.
- [2] 宋小春, 黄松龄, 赵伟, 等. 高清晰度储罐底板漏磁检测器的研制[J]. 化工自动化及仪表, 2007, 34(1): 77-80.
Song Xiaochun, Huang Songling, Zhao Wei. Development of a High Resolution MFL Inspection System for Tank Floors[J]. Control and Instruments in Chemical Industry, 2007, 34(1): 77-80.
- [3] 宋小春, 杨林, 许正望. 管道周向磁化漏磁检测有限元分析[J]. 中国机械工程, 2011, 22(22): 2651-2654.
Song Xiaochun, Yang Lin, Xu Zhengwang. FEM Simulation for Pipe MFL Inspection under Circumferential Magnetization[J]. China Mechanical Engineering, 2011, 22(22): 2651-2654.
- [4] Charlton P C, Drury J C. High Speed Inspection of Bulk Liquid Storage Tank Floors Using the Magnetic Flux Leakage Method[J]. British Journal of Non-Destructive Testing, 1993, 35(4): 119-172.
- [5] Liang Yuming, Xu Lihong. Adaptive Fuzzy Control for Trajectory Tracking of Mobile Robot[C]//IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems. Taipei, 2010: 4755-4760.
- [6] 朱大奇, 颜明重. 移动机器人路径规划技术综述[J]. 控制与决策, 2010, 25(7): 961-967.
Zhu Daqi, Yan Mingzhong. Survey on Technology of Mobile Robot Path Planning[J]. Control and Decision, 2010, 25(7): 961-967.
- [7] 陶永华. 新型 PID 控制及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.

(编辑 袁兴玲)

作者简介: 宋小春, 男, 1972 年生. 湖北工业大学机械工程学院教授. 主要研究方向为无损检测技术. 陈雨, 女, 1988 年生. 湖北工业大学机械工程学院硕士研究生. 许正望, 男, 1972 年生. 湖北工业大学电气与电子工程学院教授. 吴英, 女, 1972 年生. 重庆科技学院电子信息工程学院教授、博士.

(上接第 1633 页)

- [7] Skowron A, Rausser C. The Discernibility Matrices and Functions in Information System. Intelligent Decision Support: Handbook of Applications and Advances of Rough Sets Theory[M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publisher, 1992.
- [8] Pawlak Z. Rough Sets[J]. International Journal of Parallel Programming, 1982, 11(5): 341-356.
- [9] Pawlak Z. Rough Set: theoretical Aspects of Reasoning about Data[M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1991.
- [10] 王洪凯, 姚炳学, 胡海清. 基于粗集理论的权重确定方法[J]. 计算机工程与应用, 2003, 39(36): 20-21.
Wang Hongkai, Yao Bingxue, Hu Haiqing. The Method of Ascertaining Weight Based on Rough Sets Theory[J]. Computer Engineering and Applications, 2003, 39(36): 20-21.
- [11] 潘杰义, 刘西林. 科研项目评价指标体系及模糊优选决策模型研究[J]. 科学学与科学技术管理, 2004(1): 9-11.
Pan Jieyi, Liu Xilin. Evaluation Index System and Fuzzy Optimization Model[J]. Science of Science and Technology Management, 2004(1): 9-11.
- [12] 沈国民. 桥式起重机预拱曲线的节能设计研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2012.
- [13] 屈福政, 费焯, 王欣. 复杂机械方案多属性灰色模糊优选模型及应用[J]. 大连理工大学学报, 2005, 45(2): 201-205.
Qu Fuzheng, Fei Ye, Wang Xin. Multi-attribute Grey Fuzzy Optimal Selection Model of Complex Mechanism Design Scheme and Its Application[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2005, 45(2): 201-205.
- [14] 童一飞, 李东波, 于敏建, 等. 基于信息公理与粗集理论的多属性模糊优选研究[J]. 中国机械工程, 2007, 18(17): 2029-2033.
Tong Yifei, Li Dongbo, Yu Minjian, et al. Research on Multi-attribute Fuzzy Optimal Selection Based on Information Axiom and Rough Set[J]. China Mechanical Engineering, 2007, 18(17): 2029-2033.

(编辑 陈勇)

作者简介: 叶伟, 男, 1988 年生. 南京理工大学机械工程学院硕士研究生. 主要研究方向为机械制造及其自动化. 发表论文 2 篇. 童一飞, 男, 1981 年生. 南京理工大学机械工程学院副研究员. 李向东, 男, 1963 年生. 江苏省特种设备安全监督检验研究院副院长.