

蒸汽发生器检测机器人运动分析与控制实现

王力^{1,2}, 谈恩民¹, 吴新宇², 傅睿卿², 孙健铨², 刘青松³

(1. 桂林电子科技大学 电子工程与自动化学院, 广西 桂林 541004;

2. 中国科学院深圳先进技术研究院 广东省机器人与智能系统重点实验室, 广东 深圳 518055;

3. 中科华核电技术研究院, 广东 深圳 518026)

摘要: 在核电站蒸汽发生器复杂环境下, 为准确控制机器人完成管板检测任务, 提出了一种基于 STM8 处理器的爬壁机器人运动控制方法; 针对机器人两个不同轴线驱动轮的结构特点, 运用运动学理论建立了机器人运动方程, 分析了机器人的运动特性; 设计了爬壁机器人硬件控制电路, 为提高机器人的控制精度, 采用了位置环, 速度环和电流环三环 PID 软件控制策略; 最后, 对此控制方法进行了相关实验验证; 实验结果表明, 爬壁机器人控制电路设计合理可靠, 三环 PID 算法实现了较好的运动效果, 满足设计要求。

关键词: 爬壁机器人; 运动分析; 电路设计; STM8

Motion Analysis and Control realization of Inspection Robot to Steam Generator

Wang Li^{1,2}, Tan Enmin¹, Wu Xinyu², Fu Ruiqing², Sun Jianquan², Liu Qingsong³

(1. School of Electronic Engineering and Automation, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China;

2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Robotics and Intelligent System,

Shenzhen Institutes of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518055, China;

3. China Nuclear Power Technology Research Institute (CNPRI), Shenzhen 518026, China)

Abstract: In order to control robot to finish the inspection of tubes in the complicated surroundings of steam generator, the article proposes a motion control method for wall-climbing inspection robot which is based on STM8 mcu. As the robot is driven by two different axes drive wheel, kinematics equation is built by kinematic theory, and motion characteristics of robot are analyzed. The control circuit of wall-climbing robot is designed. Method of PID software control which is based on position loop, speed loop and electric current loop is adopted to improve the accurate control of robot. Experiments are conducted to prove the control method. The results demonstrate that the design of inspection robot control circuit is reliable, and well motion performance of PID with three-loop is achieved, which meet the design requirements.

Keywords: wall-climbing robot; motion analysis; circuit design; STM8

0 引言

核能作为一种新兴优质能源, 世界各国都已开始大量投入核电站的建设。确保核电站安全运行十分重要, 然而蒸汽发生器传热管断裂多易引发核事故, 人工检测又存在诸多不便。机器人技术作为当今高科技, 融合计算机技术和自动化技术于一体, 具有高度的精确性和智能性, 已经越来越多的投入到工业生产应用中。

爬壁机器人在核电站检测已有广泛^[1]的应用。在蒸汽发生器检修中, 代表性的有美国的 PEGASYS 及 ROSA 机器人^[2]、法国研制的机器人 ROGER^[3], 德国的 TELBOT 机器人^[4]。

近年来, 国内也开展了爬壁机器人的研究^[5-6], 在核电站蒸汽发生器的应用中, 目前国内已有较多蒸汽发生器一次侧检修机器人, 但针对蒸汽发生器小间距传热管以及传热管轴向方向进行检测的机器人, 尚不多见。

本文研究的爬壁机器人是针对核电站蒸汽发生器管板二次侧清洁度检查的机器人^[7-8]。在进行作业任务时, 需要实时控制机器人以目标速度和期望轨迹移动, 由于蒸汽发生器内空间有限, 且带有辐射干扰, 对机器人运动控制提出了较高要求。因此, 为实现机器人运动的合理规划 and 精确控制, 本文对爬壁机器人进行了运动规律分析及其控制方法的研究。

1 机器人运动模型

爬壁机器人由车体, 云台两部分构成, 如图 1 所示。由于蒸汽发生器结构限制以及保证机器人在壁面的平衡, 要求机器人小巧灵活。为此, 车体两驱动轮设计时按照一定偏移量错开位置放置, 很大程度上减小了机器人尺寸。车体前部和尾部装有永磁铁制成的钢珠, 起到导向作用的同时还增大了车体与壁面的吸附力。云台检测头包含偏转和俯仰两个运动自由度, 能从各个角度检查外围管道。

收稿日期: 2014-09-04; 修回日期: 2014-09-30。

基金项目: 深圳市科技创新计划资助项目(Y3A1011001)。

作者简介: 王力(1989-), 男, 河南沈丘人, 硕士研究生, 主要从事机器人控制技术方向的研究。

谈恩民(1966-), 男, 河南光山人, 教授, 主要从事计算机辅助测试及电路可测试性设计方向的研究。

吴新宇(1977-), 男, 湖北黄冈人, 研究员, 主要从事服务机器人及智能视频监控系统的研究。

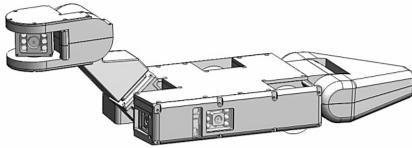


图 1 爬壁机器人机械结构

爬壁机器人移动平台采用双轮差分驱动方式。建立移动机构模型前, 假设该平台为刚性, 轮子不存在变形情况。两个轮子尺寸相同, 并且两轮轴线平行。平台运动表面为二维平面。机器人吸附壁面爬行时, 垂直方向受力为零。图 2 为机器人车体在坐标系下的运动分析示意图。

由刚体运动规律可知, 对于驱动轮轴线相互平行的移动机构, 在转向时必然会发生与轴线方向平行的滑动, 两轮的滑动量受机器人移动速度、结构、轮子材质, 接触面情况等影响, 分析较为复杂, 可以设定两轮滑动量比例系数为 k 。

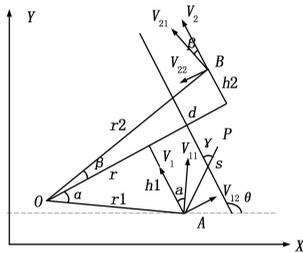


图 2 运动分析示意图

由运动示意图所示, 机器人左右两轮受电机驱动在壁面上移动时, O 点为车体转弯中心, V_1, V_2 分别为两轮绕轴运动速度, V_{11}, V_{21} 分别为两轮在垂直于转弯半径方向上的移动速度, V_{12}, V_{22} 分别为两轮在轴向上的滑动速度。可以得到下面公式:

$$\begin{cases} \omega_1 = \frac{v_{11}}{r_1} = \frac{v_1}{r_1 \cos \alpha} = \frac{v_1}{r} \\ \omega_2 = \frac{v_{21}}{r_2} = \frac{v_2}{r_2 \cos \beta} = \frac{v_2}{r+d} \end{cases} \quad (1)$$

对于刚体, 满足 $\omega_1 = \omega_2$, 上式可解得:

$$\begin{cases} r = \frac{dv_1}{v_2 - v_1} \\ \omega = \omega_1 = \omega_2 = \frac{v_2 - v_1}{d} \end{cases} \quad (2)$$

根据机器人移动平台几何关系和运动分析, 存在下面关系式:

$$\begin{cases} \tan \alpha = \frac{h_1}{r} = \frac{v_{12}}{v_1} \\ \tan \beta = \frac{h_2}{r+d} = \frac{v_{22}}{v_2} \\ h_1 + h_2 = h \\ v_{12} = kv_{22} \end{cases} \quad (3)$$

结合式 (2) 和 (3) 可得:

$$\begin{cases} v_{12} = \frac{kh(v_2 - v_1)}{d(k+1)} \\ v_{22} = \frac{h(v_2 - v_1)}{d(k+1)} \\ h_1 = \frac{kh}{k+1} \\ h_2 = \frac{h}{k+1} \end{cases} \quad (4)$$

取移动平台任一点 P 为参考点, 同 A 点距离为 s , 直线 PA 与车体中轴线之间的夹角为 γ , 则可得下列关系式:

$$\begin{cases} X_P = X_A + s \cos(\theta - \gamma) \\ Y_P = Y_A + s \sin(\theta - \gamma) \end{cases} \quad (5)$$

方程两边分别对时间求导得:

$$\begin{cases} \dot{X}_P = \dot{X}_A - s\dot{\theta} \sin(\theta - \gamma) \\ \dot{Y}_P = \dot{Y}_A + s\dot{\theta} \cos(\theta - \gamma) \end{cases} \quad (6)$$

对于点 A 存在下列关系式:

$$\begin{cases} \dot{X}_A = v_1 \cos \theta + v_{12} \sin \theta \\ \dot{Y}_A = v_1 \sin \theta - v_{12} \cos \theta \\ \dot{\theta} = \omega = \frac{v_2 - v_1}{d} \end{cases} \quad (7)$$

轮子角速度和线速度满足:

$$\begin{cases} v_1 = R\omega_L \\ v_2 = R\omega_R \end{cases} \quad (8)$$

由式 (6), (7), (8) 可以求得:

$$\begin{bmatrix} \dot{X}_P \\ \dot{Y}_P \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{kRh \sin \theta}{d(k+1)} + \frac{sR \sin(\theta - \gamma)}{d} + R \cos \theta & \frac{kRh \sin \theta}{d(k+1)} - \frac{sR \sin(\theta - \gamma)}{d} \\ \frac{kRh \cos \theta}{d(k+1)} - \frac{sR \cos(\theta - \gamma)}{d} + R \sin \theta & -\frac{kRh \cos \theta}{d(k+1)} + \frac{sR \cos(\theta - \gamma)}{d} \\ -\frac{R}{d} & \frac{R}{d} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_L \\ \omega_R \end{bmatrix} \quad (9)$$

式 (9) 即为以 P 为参考点时爬壁机器人移动平台的运动学方程, 从中可以看出, 通过电机控制两轮左右转速, 即可控制移动平台的运动状态。

由式 (2) 和 (4) 式可以看出, 当两轮转速大小相等, 方向相同时, $\omega = 0, r = \infty$, 机器人沿着速度方向做直线运动。当两轮转速大小相等, 方向相反时, $\omega = \frac{2v}{d}, r = \frac{-d}{2}$, 机器人的转弯中心在车体中轴线上, 距左轮轴线距离 $h_1 = \frac{kh}{(k+1)}$, 距右轮轴线距离 $h_2 = \frac{h}{(k+1)}$, 当两轮滑动系数相同时, 即 $k = 1$, 有 $h_1 = h_2 = \frac{h}{2}$, 机器人绕 AB 连线中点旋转。

2 机器人控制硬件设计

电路控制芯片选用内核具有 3 级流水线哈佛结构的汽车级

单片机 STM8AF5289TC, 最高工作频率 24 MHz, 片上集成 128 kB 的可编程 Flash 存储器, 16 个 10 位的 us 级的 A/D 转换通道, 最高工作温度达 145 °C, 定时器具有 PWM 输出和编码器接口功能。

车体硬件电路主要完成车本体运动控制和信号采集。处理器经 3 个电机驱动模块, 编码器及角度传感器对车体左轮电机和右轮电机及抬头电机的转

动进行闭环控制, 采用 3 个温度传感器对 3 个电机的温度进行实时监控, 2 个距离传感器进行车体位置实时采集。云台硬件电路处理器, 配合 2 台电机的驱动电路及编码器对云台的姿态及摄像头的朝向进行调整。LED 灯亮度模块配合摄像头反馈蒸汽发生器内的视频信号, 通过带屏蔽的同轴线传给上位机。上下位机采用 485 接口通讯, 并行连接到总线上。硬件控制电路总体构架如图 3 所示。

电源模块: 电源采用两路供电, 一路 P24 V 动力电源对电机供电, 一路 L24 V 逻辑电源对控制电路供电。如此避免了电机干扰其他电路, 在紧急情况下切断动力电, 逻辑电可以保证车体控制系统正常运作。根据各控制模块需求, 采用电源稳压模块 LMZ14202 匹配相应的采样电阻得到 5 V。

STM8A 核心处理器模块: 为保证处理器在恶劣条件下稳定运行, 电源处加入去耦电容过滤。电路下载接口采用接线少, 下载可靠的 SWD 模式。为确保系统在复杂环境稳定通信, 设计采用 MAX485 串口通信, 485 接口具有良好的抗噪声干扰性, 可以完成长距离和高速率传输。

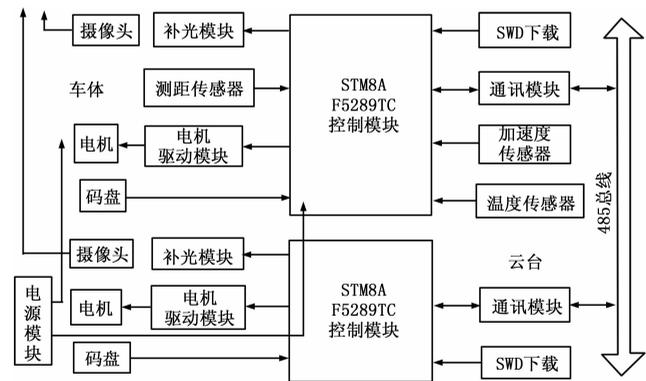


图 3 硬件控制电路框图

传感器采集模块: 机器人在运动中要避免接触蒸汽发生器底面, 以及尽量处于较为稳定的水平姿态, 电路选用测距传感器和陀螺仪测量机器人位姿。测距传感器采用高精度红外传感器 GP2Y0A02, 测量距离可达 150 cm。陀螺仪采用高精度的加速度计 MPU6050, 测量精度 0.01 度。为防止电机过热损坏, 选用温度传感器 LM35 检测电机表面温度, 测量范围为 0 ~ 100 度。

电机驱动模块: 由于车体负载较大, 机械空间有限, 在选用电机驱动芯片时, 要选用能承受较大电流, 体积较小的电机驱动芯片, 经选型采用 L9958 电机驱动芯片设计电机的驱动电路, 最高输出电流可达 8.6 A。L9958 采用 PWM 波进行调速, 可以通过核心处理器产生 PWM 波来控制电机的转速, 通过管脚控制驱动电路来控制电机正反转。在设计中采用 STM8 的编码器模式对电机码盘的值进行读取, 采用闭环 PID 调速对电机的转速进行修正, 修正效率高且稳定。

3 机器人控制软件设计

机器人在蒸汽发生器内进行作业任务时, 首先接收操作员指令移动到指定位置, 到达后控制车体抬头电机和云台电机使摄像头朝向待检测区域, 反馈现场视频信号在操控台界面显示, 进而完成管板清洁度检测。可见, 电机控制是机器人作业的基础和关键, 软件设计的核心就是保证电机的稳定控制。

蒸汽发生器管林分布较为密集, 机器人进行检测时, 需要保证机器人厘米级的移动精度, 这对电机控制提出了很高的要求。为保证电机运行的精确性, 以及减少核电磁辐射干扰的影响, 对直流电机采用位置环, 速度环和电流环 PID 控制策略。

外层为位置环, 中间为速度环, 内层为电流环。给定位移作为初始输入, 微控制器通过处理角度传感器和编码器信号得到电机行走路程和当前速度, 以及采集采样电阻电压计算电机电流, 进行电机 PID 控制。采用 STM8 芯片进行 PID 调节控制时, 计算公式如下。

$$\begin{cases} e(k)_s = S(k)_t - S(k)_c \\ u(k)_s = Kp_s e(k)_s + Ki_s \sum_{i=0}^k e(i)_s + \\ Kd_s [e(k)_s - e(k-1)_s] \\ V(k)_t = u(k)_s \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} e(k)_v = V(k)_t - V(k)_c \\ u(k)_v = Kp_v e(k)_v + Ki_v \sum_{i=0}^k e(i)_v + \\ Kd_v [e(k)_v - e(k-1)_v] \\ I(k)_t = I(k-1)_t + u(k)_v \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} e(k)_i = I(k)_t - I(k)_c \\ u(k)_i = Kp_i e(k)_i + Ki_i \sum_{i=0}^k e(i)_i + \\ Kd_i [e(k)_i - e(k-1)_i] \\ P(k) = P(k-1) + u(k) \end{cases} \quad (12)$$

式 (10) 为位置运算式, 式 (11) 为速度运算式, 式 (12) 为电流运算式。e(k)_s, e(k)_v, e(k)_i 分别为位置, 速度, 电流在 k 次采样时目标值与当前值的误差, S(k)_t, V(k)_t, I(k)_t 为其 k 次采样的目标值, S(k)_c, V(k)_c, I(k)_c 为其 k 次采样的当前值。u(k)_s, u(k)_v, u(k)_i 分别为位置环, 速度环, 电流环 PID 控制输出量。

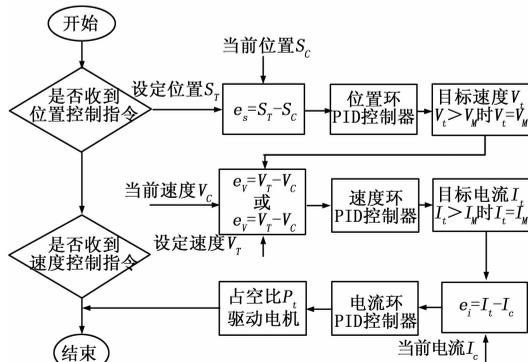


图 4 软件控制流程图

位置控制时, 目标位置与当前位置的差值经过 PID 运算, 输出 u(k)_s 作为速度环的目标值, 速度环调节输出量 u(k)_v。

块和射频模块的设计方法，软件部分重点阐述了射频标签的生成和读取部分。最后与传统的监控系统进行了对比实验，实验结果表明本文设计的监控系统能够有效提高远距离公共场所中人员行为监控时的准确率，为城市的安全稳定提供了重要的技术支持。

参考文献:

[1] 陈景阳. 基于后勤仓库的物联网监控结构设计 [J]. 数字技术与应用, 2013 (9): 151-152.
 [2] 陈坤定, 李隘优. 基于二维码的物联网监控系统设计 [J]. 中原工学院学报, 2013, 24 (4): 65-68.
 [3] 张巍, 冯涛, 朱锐. 智慧环保物联网监控应用与系统集成研究 [J]. 北方环境, 2012 (5): 194-197.
 [4] 张德民, 李莲. 基于 CANBus 的电梯物联网监控系统设计 [J].

(上接第 1544 页)

作为电流环目标电流的改变量，电流环调节输出量 $u(k)_i$ 调节当前微处理器输出 PWM 脉冲信号，改变电机驱动电压，进而控制电机转动。对于速度控制，采用速度环和电流环两环 PID 运算实现。软件控制流程图如图 4。

4 实验结果

本文对爬壁机器人电机 PID 运动控制策略进行了实验分析。图 5 所示的电流波形图，为电机电流环调节时的响应曲线，初始电流为 0 mA，在第 6 s 时改变电流的目标电流为 40 mA，随后电流迅速上升，经过 1 s 时间，等效电流达到目标值，并稳定保持在 40 mA 范围内。

速度环调节波形响应曲线如图 6 所示，初始速度为 0 r/s，目标速度为 60 r/s，由图分析可得，电机响应速度快，上升时间小于 2 s，最终速度与目标速度一致，且电机恒速运行时，误差小于 5%，速度较为平稳。

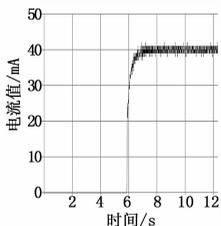


图 5 电流波形图

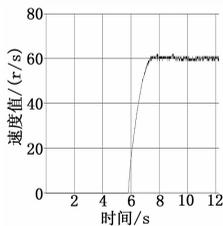


图 6 速度波形图

图 7 为位置环调节波形曲线。在位置环调节中，设定的目标位移为 100 cm，如图所示，电机在 9 s 时到达目标位置，并停止运动。对曲线分析可知，电机在 0~4 s 为加速运动，4~6 s 为匀速运动，6~9 s 为减速运动。电机减速比为 50:1，机器人车轮半径为 2 cm，机器人运动中的最大速度为 15 cm/s，平均速度为 10 cm/s，符合设计要求。

5 结论

本文对核电站蒸汽发生器管板检测机器人进行了运动分析，提出了机器人控制方法。根据机器人运动结构特点，建立了机器人运动学模型，为机器人的运动规划和定位奠定了基础。硬件控制方面主要介绍了核心处理器、传感器采集、电机

自动化与仪表, 2012, 27 (8): 38-42.

[5] 刘丽, 谷照燕. 基于物联网的船舶监控系统的设计方案 [J]. 长春教育学院学报, 2013 (4): 135-136.
 [6] 张红, 谭万禹, 片兆宇, 等. 物联网在配电设备巡查及状态监测中的应用 [J]. 长春工程学院学报: 自然科学版, 2013 (4): 43-45.
 [7] 刘珊. 物联网技术的应用实践 [J]. 中国公共安全, 2013 (9): 137-142.
 [8] 古映键, 许海波. 物联网时代的智能交通 [J]. 中国公共安全, 2013 (22): 274-278.
 [9] 李红升. 基于粒子群算法改进电力信息系统的安全研究 [J]. 科技通报, 2013, 4 (29): 158-160.
 [10] 柯扬, 周霖, 陈华, 等. 浅谈物联网技术的交通信息采集系统设计 [J]. 中国电子商务, 2009, 20 (24): 32-34.

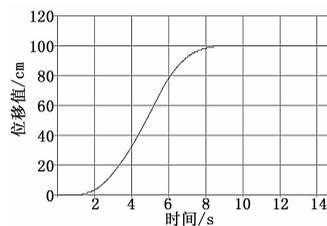


图 7 位置波形图

驱动等电路模块。软件控制方面具体介绍了三环 PID 算法。通过实验验证，机器人驱动电机响应速度快，精确度高，表明电路设计合理，PID 策略效果较好，该控制方法设计有效，可以进一步投入现场应用。

参考文献:

[1] 徐文福, 毛志刚. 核电站机器人研究现状与发展趋势 [J]. 机器人, 2011, 33 (6): 758-764.
 [2] Bogue R. Robots in the nuclear industry: A review of technologies and applications [J]. Industrial Robot, 2011, 38 (2): 113-118.
 [3] Obrutsky L, Renaud J, Lakhani R. Overview of steam generator tube inspection technology [A]. The NDT in Canada 2009 Conference [C]. London Ontario, Canada: 2009: 1-9.
 [4] waelischmiller W, Lee H Y, Bains N, et al. Application of the Telbot robot in hazardous environment [J]. Nuclear Plant Journal, 1996, 14 (5): 30-42.
 [5] 吴俊君, 胡国生. 攀爬机器人末端位姿的视觉检测与控制 [J]. 计算机测量与控制, 2013, 21 (7): 1740-1742.
 [6] 王立权, 吴健荣, 刘于琰. 核电站蒸汽发生器检修机器人设计及运动学分析 [J]. 机器人, 2009, 31 (1): 61-66.
 [7] Liu Q S, Wang G H. A Novel Nuclear Station Inspection Robot [A]. Proceeding of the 2014 IEEE. International Conference on Information Science and Technology [C]. Shenzhen, 2014 (4): 677-680.
 [8] Liu X Yg, Sun J Q. A Kind of Telescopic Manipulator Used in Steam Generator for Video Acquisition [A]. Proceeding of the 2014 IEEE. International Conference on Information and Automation [C]. Hailar, 2014 (7): 1201-1205.