

钢轨轮廓测量中稳定装置研究

张牧琢 周 严

(南京理工大学机械工程学院 南京 210094)

摘要:介绍了基于机器视觉技术的在线钢轨轮廓检测技术受车体振动的影响,提出了通过添加稳定装置的方式消除车体振动对检测的影响。设计了基于陀螺的单轴稳定装置,并对稳定控制回路进行了建模分析,设计了一种基于RBF神经网络在线辨别的单神经元自适应PID控制算法。通过Simulink仿真表明,该算法相比较传统PID控制,能有效地解决实际被控对象模型不准确的问题,具有响应速度快、稳定性高等特点,为设计高精度稳定装置系统提供了理论依据。

关键词:稳定装置;PID;神经网络

中图分类号: TP273 TN91 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8020

Research of stabilized device in railway track profile inspection

Zhang Muzhuo Zhou Yan

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: The paper introduces that railway track on-line profile inspection based on machine vision is influenced by vehicle vibration. It presents a project that eliminates the influence of vehicle vibration by stabilized device. This article designs based on single-axis gyro stabilized device, and modeling analysis was carried out on stability control circuit. What's more, single neuron PID adaptive control based on RBF neural network on-line identification has come up. Simulation manifests that compared with traditional PID this algorithm can solve the problem of inaccurate object model effectively, and it has the characteristic of rapid response speed and high stability. This provides theory basis for high-precision stabilized device.

Keywords: stabilized device; PID; neural network

1 引言

铁路交通是国家运输的命脉,其中钢轨是铁路交通中不可或缺的一部分。列车行驶在钢轨上时,轮对与钢轨表面,尤其钢轨内表面相互作用,产生摩擦、滚动接触、弹塑性形变,钢轨经过长时间作用,会造成钢轨缺陷,其表现形式为轨面擦伤、波磨、裂纹、侧磨和压溃等现象。钢轨表面上的缺陷将直接影响到铁路交通的安全。所以,钢轨维护工作必不可少,其中钢轨缺陷检测是钢轨维护中的重要工作之一。

近年来,钢轨缺陷检测已有传统人工和接触式测量转变成非接触动态测量方式,其中基于激光摄像技术得到快速发展。一般采用车载的方式,将激光器和摄像机安装在车体下,车体在行进中对钢轨进行轮廓数据测量。然而,在动态实时检测过程中,受路线不平顺、转弯等多方面的

影响,车体会发生随机振动,钢轨轮廓数据会随着车体的振动而发生变化,影响了测量精度。所以,车体振动对钢轨轮廓测量的影响不容忽视,应当采取有效办法降低车体振动带来的检测影响。文献[1]采用车体振动补偿的方式,即实时计算动态测量过程中左右激光式传感器随车体一起振动的变化量,对振动带来的误差实时进行补偿。文献[2]采用激光扫描式振动补偿系统,能够直接测量检测车运行过程中的振动位移量,但系统实时性相对较差。

本文提出采用稳定装置的方式消除车体振动带来的测量误差的影响,论述了车体振动对钢轨轮廓检测的影响,介绍了稳定装置总体设计和基本原理,建立了装置中各个环节的模型,设计一种基于RBF神经网络在线辨别的单神经元自适应PID控制算法,通过仿真的手段验证了算法具有精度高、实时性好的优点,满足钢轨轮廓检测中的图像稳定要求。

2 车体振动对检测的影响

钢轨轮廓检测工具主要由面阵式 CCD 摄像机和线性激光器组成。线性激光器沿着垂直于列车行驶方向投射扇形激光面,从而在钢轨表面上产生一段激光轮廓线。摄像机与激光切面呈一定夹角安装,实时采集激光轮廓线图像,最后根据三角测距原理以及图像处理工作,对采集的钢轨轮廓数据进行计算和轮廓重构。

在实际测量中,车体是在行进过程中,动态采集钢轨轮廓数据。在线路上运行时,车体会产生复杂的振动现象,此时车体可以看做一个具有多个自由度的振动系统。根据振动理论的研究和实践表明,车体复杂的振动现象可以拆分为若干个基本振动形式,其中包含前后伸缩、上下浮沉、左右横摆、点头、摇头、侧滚,总共 6 个自由度,如图 1 所示。本文只考虑列车行驶在直线线路上的情况,前后伸缩、上下浮沉、点头和摇头振动可以忽略不计,主要的振动形式是侧滚和横摆。受振动的影响,检测车参考坐标系与轨道参考坐标系的相对位置时刻发生着变化,从而使得测量前标定计算的摄像机外部参数发生了变化,影响了最终坐标转化后的钢轨轮廓几何参数,降低了检测精度。

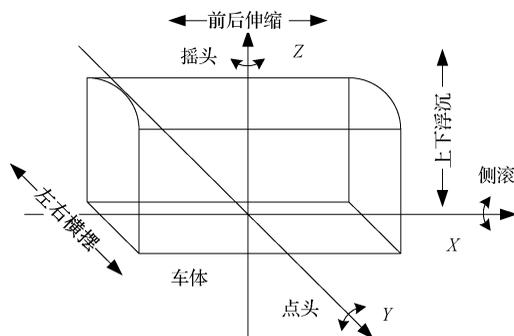


图 1 车体在空间中的振动方式

3 稳定装置总体原理和设计

根据以上车体振动分析,鉴于稳定装置自身的特点,只考虑车体侧滚方向的振动,即平行于钢轨断面方向的振动。本文设计了一种单轴稳定装置来抵消侧滚振动对检测的影响。

稳定系统总体结构如图 2 所示,检测梁两端挂有提供安装检测设备的框架,框架内部各自安装线性激光器和摄像机。陀螺仪安装在检测梁上,陀螺仪的敏感轴与检测梁平行。检测梁中间安装稳定装置,装置一端安装力矩电机,用以驱动检测梁的旋转,另一端安装旋转变压器,用以测量旋转角度。稳定装置的顶部安装在火车底部中心位置,使得左右两端检测设备对准两侧的钢轨。

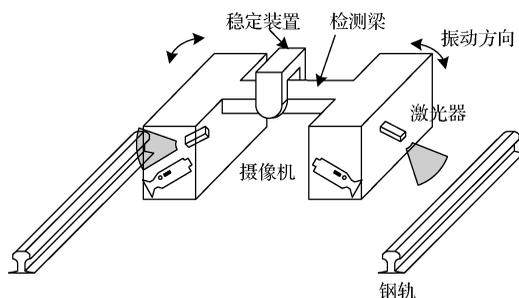


图 2 稳定装置总体结构示意图

3.1 单轴稳定装置工作原理

稳定装置是由力矩电机、速率陀螺、旋转变压器、功率放大器、轴承和装置负载组成。当车体发生侧滚振动时,装置上的测量元件陀螺仪和旋转变压器分别敏感到装置在侧滚面上转动的角速率和角度,其输出值反馈到控制系统的输入端,经过控制器和功率放大器后,驱动装置的力矩电机,电机产生相应相反的力矩,驱动装置及其负载往车体振动相反的方向转动,直到装置恢复到平衡位置,从而实现稳定的功能。

稳定装置控制系统由外而内采用位置环、速度环、电流环三环控制结构,如图 3 所示。其中电流环的作用是稳定电流,减少电流的波动,提高控制力矩的线性度。速度环主要由速度控制器、电流环、装置负载和速率陀螺等组成,根据敏感元件速率陀螺反馈的速度信号,对装置进行速度调节。位置环作为整个装置系统的最外环,根据位置反馈元件的输出值,用来实现装置的位置控制。

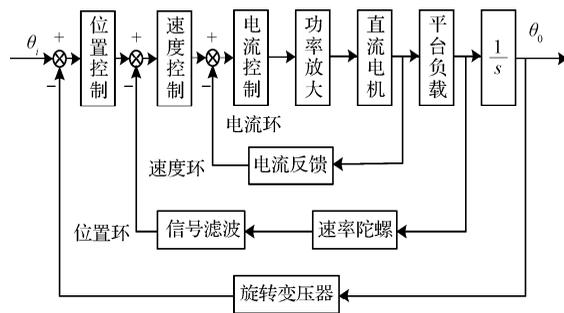


图 3 稳定装置单轴控制原理

3.2 系统各个环节模型

3.2.1 直流力矩电机及装置负载模型

直流力矩电机数学模型如图 4 所示。

直流力矩电机电枢电路平衡方程组拉氏变换为:

$$\begin{cases} M(s) = C_m \frac{U(s) - E(s)}{L(s) + R_a} \\ E(s) = C_e \frac{M(s) - M_d(s)}{J_s} \end{cases} \quad (1)$$

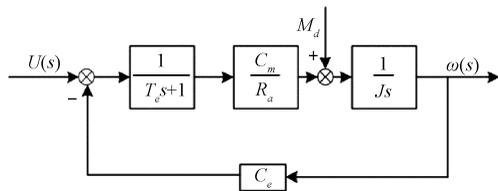


图4 直流力矩电机数学模型

式中： C_m 为电机力矩系数， C_e 为电机反电动势比例系数， R_a 为电枢回路总电阻， J 为电机转子与负载的转动惯量之和， M_d 为电机的输出转矩， U 为控制电压， E 为电枢反电动势， M_d 为干扰力矩， L 为电枢回路总电感， ω 为电机转子的角速度， $T_e = L/R$ 。

3.2.2 速率陀螺模型

速率陀螺是系统的速度感应元件，根据惯性导航原理，一般都把陀螺等效为一个二阶传递函数，其传递函数表示为：

$$\frac{u_g(s)}{\omega(s)} = \frac{k_g}{T_n^2 s^2 + 2\zeta T_n s + 1} \quad (2)$$

式中： k_g 为陀螺的传递系数， T_n 为陀螺的时间常数， ζ 为阻尼比。

3.2.3 其他环节

控制系统中还有功率放大器、AD转换电路和旋转变压器等，其中功率放大器采用PWM驱动电路。AD转换电路、PWM驱动电路和旋转变压器均可等效为比例环节。

4 稳定回路控制算法设计

由于稳定装置是工作在野外的，很容易受到外部环境的影响，例如温度和风阻等，包括自身摩擦力矩和机械谐振等影响，被控对象的模式是变化的，无法得到精确的模型。所以传统的固定校正环节的PID控制算法是无法保持控制系统处于最优的性能状态。神经网络算法具有很强的自适应性和鲁棒性，能够有效解决系统中存在的不确定性和非线性等问题^[7]。因此，本控制系统算法采用神经网络算法，以达到更优的性能指标要求。

单神经元自适应PID既具有传统PID的特点，如控制结构简单易行和稳定性高等，又克服了常规PID抗干扰性差、非线性差和随动性差等缺点。但是一般神经元学习时间较长，无法满足系统快速响应的要求，所以需要在原有的基础上，提高系统的学习速度。RBF网络结构简单，训练方法快速，容易收敛。因此利用RBF网络对系统进行在线辨识控制，输出Jacobian信息，帮助单神经元进行快速学习，从而提高了神经网络的学习速度，同时也能精确控制单神经元的自适应能力，如图5所示。

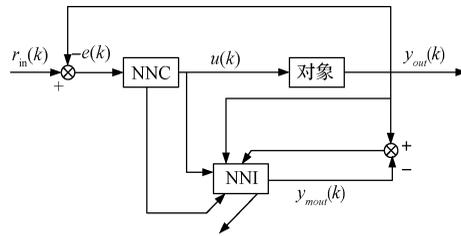


图5 基于RBF神经网络在线辨识的单神经元自适应PID控制系统原理

如图6所示为控制单元NNC为神经网络自适应PID控制器，辨识单元NNI为RBF神经网络，实现被控对象的Jacobian信息辨识。 r_m 为控制系统的输入， y_{out} 为控制系统实际输出， y_{mout} 为RBF辨识网络的输出。

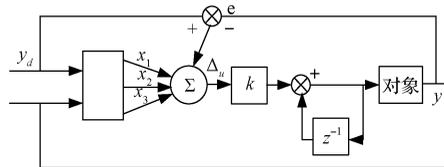


图6 单神经元自适应控制器结构框图

x_i 为输入量， w_i 为相应的权值， K 为比例系数，神经元的输入为：

$$\begin{cases} x_1(k) = e(k) = y_d - y \\ x_2(k) = e(k) - e(k-1) \\ x_3(k) = e(k) - 2e(k-1) + e(k-2) \end{cases} \quad (3)$$

式中： $e(k)$ 为输入与输出的差值， y_d 为输入， y 为输出。神经元输出量为：

$$u(k) = K \left\{ \frac{\sum_{i=1}^3 w_i(k) x_i(k)}{\sum_{i=1}^3 \|w_i(k)\|} \right\} \quad (4)$$

通过权系数的调整，单神经元自适应控制器实现自适应功能，权系数调整规则采用有监督Hebb学习规则，其学习规则如下：

$$\Delta w_{ij}(k) = \eta (d_j(k) - o_j(k)) o_j(k) o_i(k) \quad (5)$$

式中： Δw_{ij} 为神经元*i*和神经元*j*关联权值变化量， η 为学习速率， o_j 为神经元*j*的实际激活值， o_i 为神经元*i*的实际激活值， d_j 为神经元*j*希望输出激活值。将二次性能指标加入到权系数调整中，设性能指标为 $J_c = \frac{1}{2} [r(k+1) - y(k+1)]^2$

权值的修正沿 J_c 对 $w_i(k)$ 的负梯度方向搜索，使得性能指标最小，故有：

$$w_i(k+1) = w_i(k) - \eta \frac{\partial J_c}{\partial w_i(k)} \quad (6)$$

$$\frac{\partial J_c}{\partial w_i(k)} = -e(k+1) x_i(k) \frac{\partial y(k+1)}{\partial u(k)}, i = 1, 2, 3 \quad (7)$$

式中： $\frac{\partial y(k+1)}{\partial u(k)}$ 为被控对象的 Jacobian 信息，通过 RBF 网络辨识而得。

RBF 神经网络是一种具有单隐层的 3 层前馈网络，其中输入映射到隐层是非线性的，而隐层映射到输出是线性的，因此在大大降低学习时间的同时收敛性能得到提高。RBF 神经网络的隐层激活函数采用径向基函数。RBF 神经网络往往采用具有线性输出的单隐层网络，网络各层神经元的输入-输出关系为：

$$y_i = \sum_{j=1}^H \omega_{ij}^2 \sigma \left(\sum_{k=1}^N \omega_{jk}^2 x_k + \theta_j^2 \right) + \theta_i^2, i = 1, 2, \dots, M \quad (8)$$

式中： y_i 为输出层的输出值， x_k 为输出层第 k 个节点的激活值； ω_{ij} 为隐层第 j 个节点到输出层第 i 个节点的连接权值。 θ_i 为输出层第 i 个节点的阈值； H 为隐层节点个数， M 为输出层节点个数， N 为输入层节点个数。RBF 神经网络结构如图 7 所示。

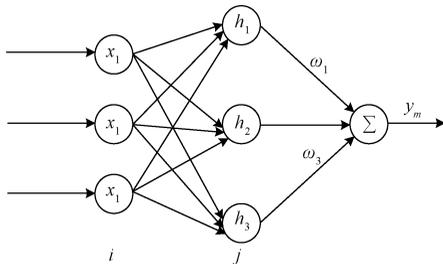


图 7 RBF 神经网络结构

在 RBF 神经网络中，神经网络的输入向量为 $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ ，径向基向量为 $\mathbf{h} = [h_1, h_2, \dots, h_n]^T$ ，其中 h_j 为高斯基函数。

$$h_j = \exp\left(-\frac{\|x - c_j\|^2}{2b_j^2}\right), j = 1, 2, \dots, m \quad (9)$$

式中：网络的第 j 个节点的中心矢量为 $\mathbf{C}_j = [c_{j1}, c_{j2}, \dots, c_{jn}, \dots, c_{jm}]^T, i = 1, 2, \dots, n$ 。设网络的基宽向量为 $\mathbf{B} = [b_1, b_2, \dots, b_m]^T$ 。 b_j 为节点 j 的基宽度参数，并且为非负数。网络的权向量为 $\mathbf{W} = [\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m]^T$ ，辨识网络的输出为 $y_m(k) = \omega_1 h_1 + \omega_2 h_2 + \dots + \omega_m h_m$ 。辨识网络的性能指标函数为 $J = \frac{1}{2}(y(k) - y_m(k))^2$ 。

根据梯度下降法，辨识网络输出权系数，隐层节点基宽参数及隐层节点中心矢量的迭代算法如下：

$$\begin{aligned} \Delta \omega_j(k) &= \eta(y(k) - y_m(k))h_j \\ \omega_j(k) &= \omega_j(k-1) + \Delta \omega_j(k) + \alpha(\omega_j(k-1) - \omega_j(k-2)) \\ \Delta b_j(k) &= \eta(y(k) - y_m(k))\omega_j h_j \frac{\|X - C_j\|^2}{b_j^3} \\ b_j(k) &= b_j(k-1) + \Delta b_j + \alpha(b_j(k-1) - b_j(k-2)) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta c_{ji}(k) &= \eta(y(k) - y_m(k))\omega_j \frac{x_j - c_{ji}}{b_j^2} \\ c_{ji}(k) &= c_{ji}(k-1) + \Delta c_{ji}(k) + \alpha(c_{ji}(k-1) - c_{ji}(k-2)) \end{aligned} \quad (10)$$

η 为学习速率， α 为动量因子。Jacobian 阵算法为：

$$\frac{\partial y(k)}{\partial \Delta u(k)} \approx \frac{\partial y_m(k)}{\partial \Delta u(k)} = \sum_{j=1}^m \omega_j h_j \frac{c_{ji} - x_j}{b_j^2} \quad (11)$$

式中： $x_1 = \Delta u$ 。

控制算法流程如下：

- 1) 设置单神经元的初始权值、学习效率 and RBF 网络的参数。
- 2) 采样得到 $r_m(k)$ 和 $y_{out}(k)$ ，计算出 k 时刻误差 $e(k) = r_m(k) - y_{out}(k)$ 。
- 3) 计算单神经元自适应 PID 控制器的输出 $u(k)$ ，并将 $u(k)$ 送入被控对象和 RBF 辨识网络，产生控制对象的下一步输出 $y_{out}(k+1)$ 。
- 4) 根据公式计算 RBF 网络各层神经元的输入、输出，得到 RBF 网络的输出 $y_{mout}(k+1)$ 。
- 5) 根据 RBF 网络的输出 $y_{mout}(k+1)$ 与系统实际输出 $y_{out}(k+1)$ 的偏差，修正 RBF 网络的权值、阈值、中心矢量和基宽参数。
- 6) 单神经元 PID 控制器进行神经网络学习，在线修正单神经元的权值。
- 7) 令 $k = k + 1$ ，返回 2)。

5 仿真结果

本文仅对由速率陀螺作为测量元件组成的单轴速度环进行仿真实验，在 Simulink 中，通过 S 函数编写控制算法。如图 8 所示为传统 PID 和基于 RBF 网络辨识的单神经元自适应 PID 控制算法的阶跃响应曲线和其误差曲线。

以上对比可以看出，对于传统 PID 控制算法的超调量 $\sigma = 18\%$ ，而基于 RBF 在线辨别的控制算法几乎没有超调，调整时间也由 200 ms 下降到 59 ms。

如图 9 所示为传统 PID 和本文设计的控制算法的正弦信号(振幅 0.1 rad, 频率 2 Hz)响应曲线，从图中可以看出，传统 PID 的稳态误差为 34 mrad，而基于 RBF 网络辨识的单神经元自适应 PID 的稳态误差只有 15 mrad，并且其响应速度也比传统 PID 要快。

6 结论

本文以基于机器视觉技术的钢轨轮廓检测为背景，分析了检测车在实时测量中车体振动对检测结果的影响，提出采用稳定装置的方式消除振动带来的影响。设计了一种基于 RBF 网络在线辨识的神经元 PID 控制算法，通过 MATLAB 仿真表明，该控制算法具有响应快和精度高等特点，满足实际需求，为后续的装置设计做好了理论准备。

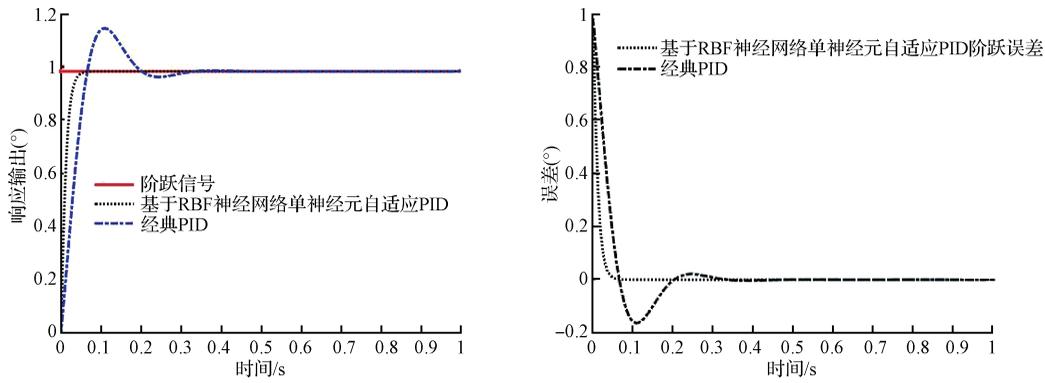


图8 单位阶跃响应及其误差曲线

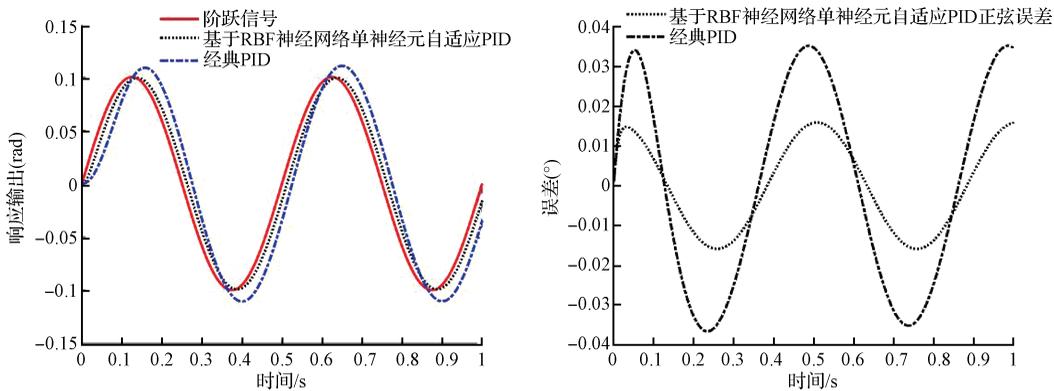


图9 正弦信号响应及其误差曲线

但本文只考虑一个轴方向的振动,其他方向的振动情况是未来研究的方向。

参 考 文 献

[1] 占栋,于龙,邱存勇,等. 钢轨轮廓测量中的车体振动补偿问题研究[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(7): 1625-1633.
 [2] 刘涛. 接触网几何参数振动补偿系统研究[D]. 成都:西南交通大学, 2008:18-19.
 [3] 原晓刚,吴旭光,宁腾飞. 稳定平台系统设计与控制[J]. 国外电子测量技术, 2012, 31(9):40-43.
 [4] 张宇鹏,王伟兴. 机载通用高精度稳定平台视轴稳定分析[J]. 国外电子测量技术, 2015,34(11):40-43.
 [5] 雷杨,李军,李绍军,等. 高精度稳定平台伺服控制

系统仿真实现[J]. 电光与控制, 2015(5):72-76.
 [6] 沈晓洋,陈洪亮,刘昇. 机载陀螺稳定平台控制算法[J]. 电光与控制, 2011, 18(4):46-50.
 [7] 刘金琨. 先进PID控制 MATLAB 仿真[M]. 第3版. 北京:电子工业出版社, 2011.
 [8] 刘永,张立毅. BP和RBF神经网络的实现及其性能比较[J]. 电子测量技术, 2007, 30(4):77-80.
 [9] 陈超波,杨楠. RBF神经网络算法在动态称重中的应用[J]. 电子测量技术, 2016, 39(5):187-190.

作 者 简 介

张牧琢,1990年出生,在读硕士研究生,主要研究方向为惯性平台和控制仿真。
 E-mail:njwldc1@163.com