机车电传动 2018 年第 4 期 (2018-07-10)
ELECTRIC DRIVE FOR LOCOMOTIVES №4, 2018(July 10, 2018)

文章编号：1000-128X(2018)04-0079-04

钢轨打磨控制系统设计

曾海林，余高翔，陈平松，谢　尚，吴　磊

（株洲时代电子技术有限公司，湖南 株洲　412007）

摘　要：以钢轨打磨控制技术为研究对象，分析了 PID 控制算法的基本原理，通过对比位置式和增量式 PID 2 种算法的异同，提出了基于增量式 PID 控制算法的钢轨打磨控制系统设计方案，详细介绍了该控制系统的硬件原理和软件流程。通过搭建试验平台，测试了新设计的控制系统的基本功能和性能。测试结果表明：基于增量式 PID 控制算法的钢轨打磨控制系统能够实现稳定可靠打磨，控制精度高、调节时间短、实时性高、打磨效果良好，具有很好的市场应用前景。

关键词：钢轨打磨；PID 控制；PWM；CAN 总线

中图分类号：U273；U216.65　　**文献标识码：**A

doi：10.13890/j.issn.1000-128x.2018.04.110

Design of Rail Grinding Control System

ZENG Hailin, YU Gaoxiang, CHEN Pingsong, XIE Shang, WU Lei

(Zhuzhou Times Electronic Technology Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412007,China)

Abstract: The rail grinding control technology was taken as the research object. The principle of PID control algorithm was analyzed, and by contrasting the similarities and differences between the position mode PID algorithm and the increment mode PID algorithm, the design of rail grind control system based on the increment mode PID algorithm was put forward, and the hardware principle and software flow of this control system was introduced in detail. With building the corresponding test platform, the system basic function and the corresponding performance were tested. The test result showed that the rail grinding control system based on the increment mode PID algorithm could grind rail steadily and reliably with high control precision, short adjustment time, high real time and perfect grinding effect, which would have good market apply prospect in the future.

Keywords: rail grinding; PID control ; PWM;CAN bus

0　引言

我国铁路共经历了 6 次大提速，列车运行速度已大幅提高，既有线最高速度已达 250 km/h，在京津城际铁路运行的列车速度甚至达到了 350 km/h，高速铁路、客运专线对轨道结构、钢轨表面的平顺性要求极高，轨道状态对列车运行安全性、平稳性具有重要影响。目前国际上公认钢轨打磨对保证线路质量、提高安全系数、降低运营成本起关键作用。高铁线路在开通前进行钢轨预打磨、开通后进行钢轨预防性打磨及保养性打磨是保证高铁安全运行的重要手段。钢轨打磨列车是一种结构复杂、控制先进，集机、电、液、气及计算机技术于一体的施工设备，主要用于消除钢轨波磨、擦伤和剥离等钢轨损害及新线钢轨的预防性打磨。该种设备的投入使用大幅度地提高了钢轨利用率，延长了钢轨使用寿命，改善了旅客列车舒适度。然而随着钢轨打磨列车使用年限的增加，越来越多的打磨列车已趋于老化，列车打磨出现的问题也越来越多，而由于打磨车是从国外引进的原因，不仅价格昂贵，而且后期维护维修费用高，打磨技术也一直被国外垄断，因此对钢轨打磨 PID 技术进行深入研究是非常有意义的。

收稿日期：2017-05-25；修回日期：2017-10-13

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

1 钢轨打磨 PID 控制原理

钢轨打磨控制原理：如图 1 所示打磨电机①为三相异步电机，固定转速 3 600 r/min，打磨电机连着可上下伸缩的活动导柱②，当导柱上下移动时，打磨电机会一起上下移动，活动导柱通过加压油缸来控制。油缸分高低压回路，低压回路连接油缸无杆腔，压力为固定值，高压回路连接油缸有杆腔，可通过控制系统调整加压油缸的比例阀开度来实现高压的调整。当高压 $+Mg$ 大于低压时，打磨电机将会下压打磨，反之，打磨电机会被提起停止打磨。打磨角度可通过偏转电机③和摇篮摇架④来调整，实现不同轨面打磨。

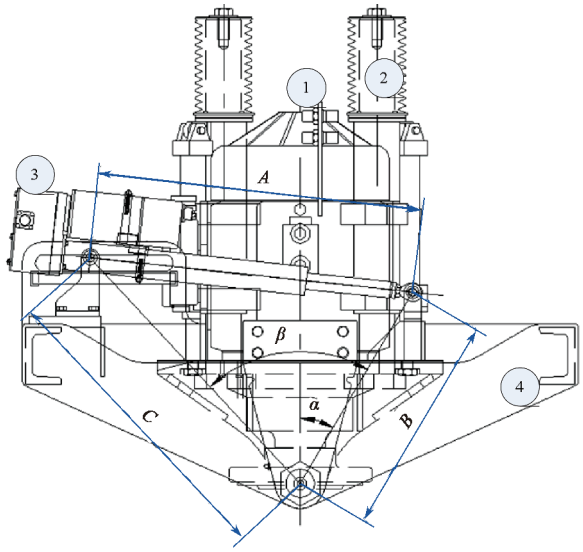


图 1 打磨单元结构图

钢轨打磨控制目标是控制打磨加压压力恒定即打磨功率恒定，目标功率由上位机设定，反馈功率通过 AI 模块采集打磨电机电流进行换算，控制系统在打磨过程通过实时对比目标值与反馈值，不断调整输出，进而不断调整下压油缸的压力，以确保打磨电机在打磨过程中加载到钢轨的压力恒定，动态实现恒功率打磨的目的。恒功率打磨控制原理框图如图 2。

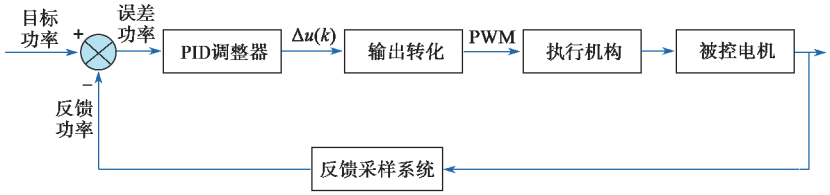


图 2 钢轨打磨控制原理框图

针对钢轨打磨作业工况，只需做到恒功率输出，控制精度要求一般，故可采用增量式 PID 控制算法。通用 PID 控制原理图如图 3 所示。

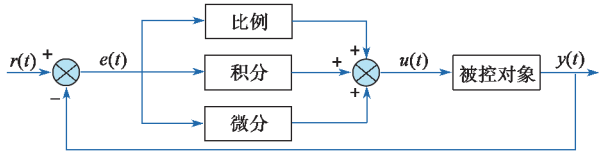


图 3 PID 控制原理框图

在连续控制系统中，控制量 $u(t)$ 和误差 $e(t)$ 成比例、积分、微分关系：

$$u(t)=K_p[e(t)+\frac{1}{T_i}\int_0^t e(t)\mathrm{d}t+T_d\frac{\mathrm{d}e(t)}{\mathrm{d}t}] \quad (1)$$

式中：K_p 为比例增益；T_i 为积分时间常数；T_d 为微分时间常数。

假定计算机的采样周期为 T，以一系列的采样时刻点 kT 代表连续时间 t，以累加求和近似代替积分，以一阶后向差分近似代替微分，做如下的近似变换：

$$\left.\begin{aligned} &t=kT\\ &\int_0^t e(t)\mathrm{d}t=T\sum_{j=0}^{k}e(jT)\\ &\frac{\mathrm{d}e(t)}{\mathrm{d}t}=\frac{e(kT)-e(kT-T)}{T}\end{aligned}\right\} \quad (2)$$

由式（1）、式（2）得

$$u(kT)=K_p[e(kT)+\frac{T}{T_i}\sum_{j=0}^{k}e(jT)+\frac{T_d}{T}(e(kT)-e(kT-T))] \quad (3)$$

式（3）可进一步简化为

$$u(k)=K_pe(k)+K_i\sum_{j=0}^{k}e(j)+K_d(e(k)-e(k-1)) \quad (4)$$

同理可得 $k-1$ 时刻的输出量

$$u(k-1)=K_pe(k-1)+K_i\sum_{j=0}^{k-1}e(j)+K_d(e(k-1)-e(k-2)) \quad (5)$$

由 $u(k)-u(k-1)$ 得

$$\Delta u(k)=K_p[e(k)-e(k-1)]+K_ie(k)+K_d[e(k)-2e(k-1)+e(k-2)] \quad (6)$$

由式（6）可知，增量式 PID 的控制量只与本次误差 $e(k)$、上次误差 $e(k-1)$、上上次误差 $e(k-2)$ 有关，并不需要累积所有的误差，大大简化了计算机的数据处理过程。钢轨打磨控制系统通过 $\Delta u(k)$ 计算对应输出 PWM，从而达到控制加压油缸压力的目的。

2 钢轨打磨 PID 控制系统设计

1）硬件系统设计

硬件系统如图 4 所示。DI 模块负责采集打磨电机的运行、过载、短路等状态信息；AI 模块负责采集打磨电机温度、电流等模拟量信号；DO 模块负责计算打磨电机下压力给定量。打磨电机所有状态通过 CAN 网络上传到上位机进行实时状态显示和监测，同时上位机操作指令、模块参数通过 CAN 网络下发到底层各个模块。模块与模块间也可通过 CAN 网络进行实时数据交互。同时模块的另一路 CAN 可以连接其他 CAN 设备（如发动机 ECU 之类的第三方设备），构成子 CAN 网络。

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

图 4　钢轨打磨控制系统硬件原理框图

整个硬件控制系统按照模块化、功能块思想设计，每 8 个电机作为一个打磨控制单元，每个控制单元分打磨电机反馈电流采集系统、温度采集系统、电机加压 PWM 输出驱动系统、电机状态监测系统等。

电机的功率反馈通过打磨电机反馈电流换算可得，目标功率由上位机系统给定，控制系统根据 PID 算法计算出相应的打磨压力驱动 PWM 占空比。

模块带 RS232 通信接口既可用于底层控制模块的软件程序下载，又可用于对电机的角度校准和调试。同时系统设计了稳定可靠的电源管理系统满足系统用电需要，LED 监测系统则实时监测底层控制模块的运行情况（供电情况、通信情况、程序运行下载等情况）。

为防止底层模块程序跑飞，系统还设计了看门狗系统，当程序跑飞时看门狗系统会自动复位，系统重新开始执行程序。

2）软件系统设计

软件系统主程序流程图如图 5 所示。在主程序流程图中，软件系统先对系统进行初始化，包括 CPU 主频设置，IO 初始化（特殊功能口或输入输出口），外围设备寄存器初始化 (AD 模块、CAN 模块、PWM 模块等）；在 for 循环系统中设置了看门狗函数，防止程序在运行过程中意外跑飞；同时设计了不同的周期中断函数，该中断函数有 CPU 定时器中断和周期定时器中断函数，满足不同程序的时序要求。当系统启动后，通过增加工作标志来控制系统算法扫描，所有电机加压驱动输出的 PWM 占空比在上电初始化时都为 0，防止电机突然意外掉落而损坏钢轨。

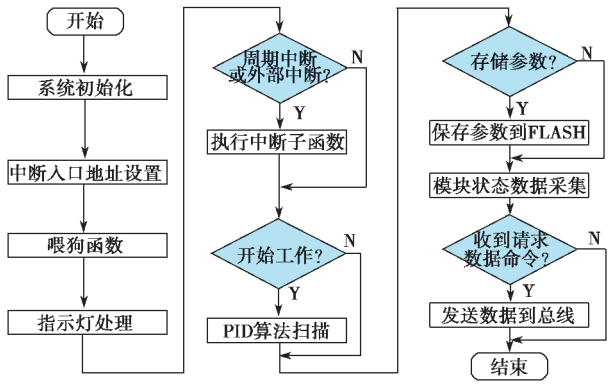


图 5　钢轨打磨控制系统软件主程序流程图

软件实时读取打磨电机状态信息，用于保护打磨电机和钢轨，防止过度打磨或意外情况损坏钢轨。在打磨效果不太理想时，可通过在线修改作业参数来达到预期期望。

在打磨操作前，需要通过上位机界面设置相应的打磨参数，如打磨电机 PID 参数、小车轮径等，同时，在走行界面需设置相应的走行控制参数，如车轮直径、速度编码器相应参数等。

其中的 PID 算法流程图如图 6。

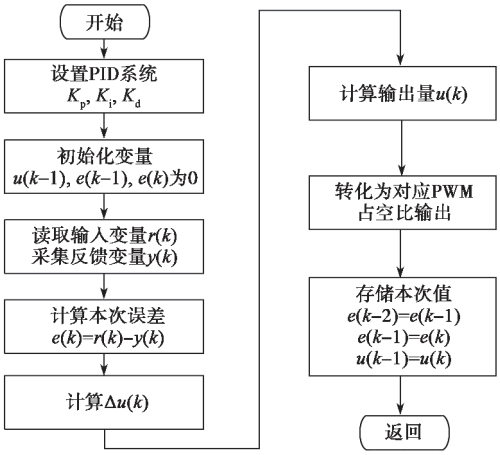


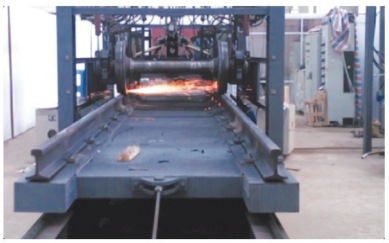
图 6　增量式 PID 控制算法流程图

其中计算 $\Delta u(k)$ 按照式（6）进行。以上所有计算都是采用 AD 值，故对于计算出来的控制量 $u(k)$ 也是 AD 值，需转换为对应的 PWM 输出占空比，同时，每次计算完占空比需存储本次的误差和控制量，以便进行下次的 PID 算法。

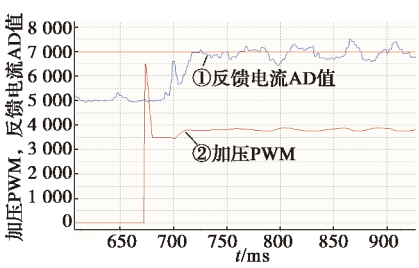
由于整个算法都是采用整型 AD 值，故算法的执行速度比采用浮点型的物理量参与计算要快得多，整个控制系统的执行速度、反应速度都将得到大幅提升。

3　试验结果

为了验证新设计的钢轨打磨控制系统是否可行，特搭建了相应的打磨试验平台，通过在试验平台进行相应的钢轨打磨试验，得到了相应的打磨效果图及打磨数据（如图 7）。



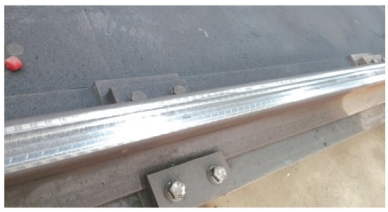
（a）钢轨打磨试验台打磨现场图



（b）电机加压 PWM 及反馈电流曲线

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

（c）打磨前的钢轨轮廓图



（d）打磨后的钢轨轮廓图

图 7　钢轨打磨试验台打磨效果及曲线图

从图 7（a）可以看到钢轨打磨时火花飞溅均匀，代表电机加压控制算法和控制策略非常稳定，没有振荡起伏。

图 7（b）曲线①为打磨电机反馈电流 AD 值，围绕目标值（直线）来回波动；曲线②为打磨加压压力对应的高压回路比例阀驱动 PWM。由曲线①可知打磨电机电流在下落触轨瞬间会有突变，随后系统调节下压力，很快打磨电机电流趋于稳定，接近目标值，这时候下压力 PWM 则保持一定值基本不再调节，说明新设计的钢轨打磨控制系统响应快、控制稳定、实时性好。

由图 7（c）、图 7（d）对比可知，钢轨被打磨后轮廓平滑、打磨厚度均匀，说明打磨效果良好。

为了便于更好地分析新设计的控制系统的性能，对打磨现场的测试数据通过相应工具导出并进行拟合，可得到如图 8 所示曲线。

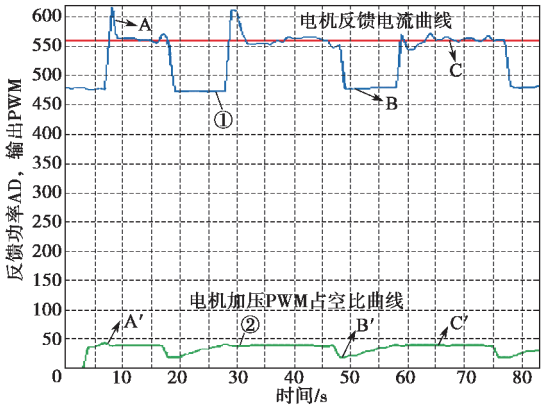


图 8　钢轨打磨试验台打磨曲线

图 8 曲线①为打磨电机目标功率 4.5 kW 的反馈功率曲线图，4.5 kW 对应 AD 值为 555（红色直线代表目标值，蓝色曲线代表反馈功率）；图 8 曲线②为控制打磨电机压力的 PWM 输出占空比曲线图；曲线②中的 A′、B′、C′点分别对应图 8 曲线①的 A、B、C，代表电机下放触轨、电机提起、电机正在进行钢轨打磨的 3 种状态。由图 8 可知，控制系统跟踪负载变化实时调整 PWM 输出，反馈功率在目标功率上下平稳波动，说明该 PID 控制系统能够实时跟踪负载变化。

4　结语

本文介绍了钢轨打磨车打磨单元的液压和机械结构原理，在深入分析了基于打磨单元结构的钢轨打磨 PID 控制原理基础上，设计开发了钢轨打磨 PID 控制系统，并通过搭建钢轨打磨试验平台进行了系列试验。试验结果表明：本文所设计的钢轨打磨 PID 控制系统能够实时跟踪负载变化，调节响应快、控制精度高，能够实现动态恒功率稳定打磨，有着良好的市场应用前景，潜在的社会效益和经济效益巨大。

参考文献：

［1］胡增荣 . 钢轨打磨列车在高铁上的应用［J］. 科技经济市场，1999，21(6)：56–59.

［2］高兵 . 浅谈 PGM48 型磨轨车的运用与改进［J］. 国防科技，2001，11(3)：8–10.

［3］常安全 . 钢轨打磨车分动箱国产化研制［J］. 关键零部件，2002，14(1)：1–4.

［4］权悦 . CAN 总线的分布式智能节点的设计［J］. 山西师范大学学报，2010，22(3)：46–49.

［5］张志文，曾海林，罗隆福 . 基于 DSP 的嵌入式 SVC 控制装置的研究［J］. 计算机测量与控制，2010，18(11)：2567–2572.

［6］刘良彬 . 钢轨打磨车精细作业研究［J］. 机车电传动，2017(3)：56–58.

［7］凌浩东，唐韬 . 钢轨打磨车远程故障诊断系统［J］. 机车电传动，2014(2)：95–98.

［8］Haalman T. Adjusting controllers for a dead-time process［J］. Control Engineering，2010，14(5)：71–73.

［9］Hu, W K, Hang C C, Cao L S. Tung of PID controllers based on gain and phase margin specification［J］. Automatic, 2012, 31(4)：497–502.

［10］胡寿松 . 自动控制原理［M］. 北京：科学出版社，2001：510–550.

［11］Wang F S，Jang W S，Chan C T. Optimal ruing of PID conttollem for single and cascade control loops［J］. Chemical Engineering Conunurdcations，1995，13(2)：15–20.

作者简介：曾海林（1982–）男，硕士，工程师，主要从事轨道工程机械电气控制技术研究。

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net