

文章编号:1672-9331(2017)03-0084-06

位置式 PID 控制算法在城轨 ATO 系统中的应用

鲍旭红

(北京中车轨道交通智控科技有限公司, 湖南 株洲 412000)

摘要: 为了使城市轨道交通 CBTC(基于通信的列车运行控制系统)中的自动驾驶系统(ATO)实现更加精确的控制,通过对传统的 PID 控制理论进行分析,探索了位置式 PID 控制算法的详细控制过程,并使用现代计算机技术实现了该算法。将位置式 PID 控制算法与状态方程结合起来,并将改进后的算法应用于自动驾驶系统中;通过调节 PID 算法公式中的 K_p , K_i , K_d 三个参数值,可以得出最适合应用于自动驾驶系统的系数,以决定牵引和制动命令的执行时间点。研究结果表明,在自动驾驶系统中,应用位置式 PID 算法可以实现列车更加理想的精确控制,减少列车牵引和制动时间以实现节能,保证列车提速平稳以提高列车的舒适度和稳定性。

关键词: 自动驾驶系统; PID 控制算法; 位置式 PID 控制算法; 精确控制; 状态方程; 最优参数

中图分类号: U284

文献标识码: A

On the application of positional PID control algorithm in the ATO system of urban railway transportation

BAO Xu-hong

(Beijing CRRC Railway Transit Intelligence Control Technology Co. Ltd., Zhuzhou 412000, China)

Abstract: In order to achieve more precise control of the urban railway transportation Automatic Train Operation (ATO) system, by analyzing traditional PID control theory, this paper explores the detailed process of positional PID control algorithm and realizes the process using modern computer science. This paper also studies how to combine positional PID control algorithm and state equation and the possibility and methods to apply the improved version to the above-mentioned ATO system; by changing three parameters in the equation of the algorithm, the most suitable coefficient will be obtained for the ATO system to decide the precise timing for traction and braking. The results show that application of positional PID control algorithm can control the train with greater accuracy achieve energy conservation by decreasing the time of traction and braking and improve the comfort and stability by stable speed increase.

Key words: automatic train operation (ATO) system; PID control algorithm; positional PID control algorithm; precise control; state equation; optimal parameter

城轨 ATO 系统(列车自动驾驶系统)是列车 控制系统复杂的子系统之一,为了实现列车运行

收稿日期:2017-06-08

作者简介:鲍旭红(1987-),男,甘肃静宁人,北京中车轨道交通智控科技有限公司工程师,主要从事城市轨道交通 CBTC 系统的研发。

的多目标控制,ATO 系统必须考虑运行环境并能自动适应运行环境中各个因素的变化^[1]。近年来,ATO 研究的进展得益于对列车控制系统的更深入研究和广泛应用。以基于通信的列车控制系统(Communication Based Train Control,简称 CBTC)为例,它采用了连续式车地通信方式,可以将列车位置信息、目标速度、目标距离及其他各参数实时传送至 ATO 系统,使列车的自动驾驶成为了可能^[2]。国外对 ATO 的研究及应用已经渐入佳境,CBTC 系统中的 ATO 子系统在精确停车、自动控制等方面已经取得了重大的成果。行业先锋如法国泰雷兹公司的 SelTrac © CBTC 系统中的 ATO 已经在北京四号线上成功应用,德国西门子公司的 CBTC 系统也已经应用于西安地铁二号线。但是,相比国外,我国很晚才开始对 ATO 相关技术的研究,在信号系统的车载子系统应用方面,西南交通大学、铁道科学研究院近几年进行了比较深入的研究,但主要内容仍然局限于记录列车运行数据、探究超速保护、研究红灯冒进等,距离掌握列车自动驾驶的核心技术尚有很大的距离^[2]。铁科院研发的 MTC-I 型 CBTC 系统、通号院研发的 FZL300 型 CBTC 系统等都还没有完全实现列车的精确停车和自动控制。

位置式的 PID 控制是一种智能控制算法,是对传统 PID 控制算法的变形和改进^[3],目前对其控制理论的研究大多不太深入,寥寥几篇论文也主要是探究位置式 PID 算法在工业技术领域的应用,如:恒温箱控制(2010 年)、橡胶生产线控制(2010 年)、无人机控制(2013 年)等。因此,作者首次探索在轨道交通 ATO 系统中应用位置式 PID 算法的可能性及过程。

1 ATO 系统概述

ATO 系统是一个由数据驱动的系统^[4]。图 1 描述了 ATO 系统模块关系,可以得知,ATO 数据主要来源于 ATP 通信数据和 ATO 系统参数配置数据^[5]。配置数据属于静态数据,这部分数据由配置数据模块在程序启动时加载,在配置数据文件不变的情况下,这一部分数据是保持不变的;ATP 通信数据属于动态数据,这部分数据由 ATP 根据线路情况、目标距离、列车性能和运行模式等

情况综合计算生成。ATO 根据 ATP 通信数据结合控制算法为列车提供牵引制动命令以及牵引制动动力的大小,精确控制列车运行^[6]。

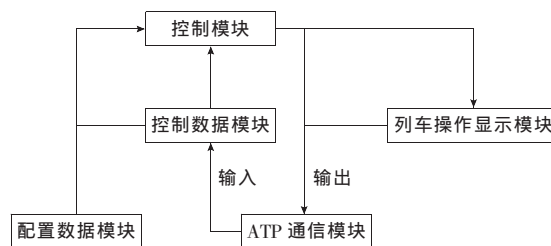


图 1 ATO 系统模块关系

Fig. 1 Modules of ATO system

2 位置式 PID 控制算法

2.1 传统 PID 控制理论

PID 控制由比例单元(P)、积分单元(I)和微分单元(D)组成。PID 控制器属于线性控制器,它计算给定值与实际值的差值从而得出控制偏差: $e(t) = V_{\text{推荐}} - V_{\text{真实}}$,随后将控制偏差 $e(t)$ 应用于 P, I, D 三个环节,并经过线性组合后生成并输出控制量,进而控制指定对象,这一过程即为 PID 控制^[7,8]。

PID 控制器的结构框图如图 2 所示,其中, $r(t)$ 为给定值; $e(t)$ 为控制偏差; $u(t)$ 为控制输出^[4]。

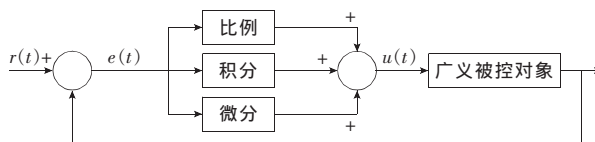


图 2 PID 控制器结构框图

Fig. 2 Structure diagram of PID controller

其控制规律为:

$$u(t) = K_p \left[e(t) + 1/T_1 \int_0^t e(t) dt + 1/T_d \times de(t)/dt \right]$$

式中: T_1 为积分时间常数; T_d 为微分时间常数; K_p 为比例系数^[7]。

2.2 位置式 PID 控制算法

位置式 PID 控制算法是 PID 控制算法的一个分支,多应用于工业生产领域,它因控制器输出的值 $u(k)$ 和执行机构的位置一一对应而得名。

$u(k)$ 与过去的每个状态有关,它可以直接控制执行机构。在这种控制系统中,下一次控制输出量可以通过给定控制位置 and 实际测量位置的差值 $e(k)$ 计算得出^[8]。位置式 PID 控制系统的系统框图如图 3 所示^[8],其中, $r(k)$ 为给定的控制位置; $c(k)$ 为实际控制过程中测量的位置。

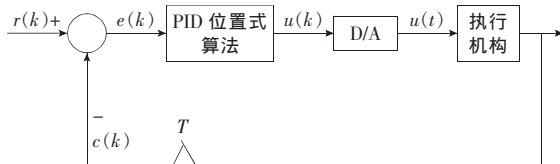


图 3 位置式 PID 控制器系统框图

Fig. 3 Structure diagram of positional PID controller

在位置式 PID 控制算法中,控制量的增量 $\Delta u(k)$ 由 PID 控制器输出,控制输出量需要由增量加上上次控制的输出值得出^[9]。由此得出位置式 PID 控制算法的公式为:

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

可以使用如下计算机程序来实现位置式 PID 控制算法^[10]。

1) 软件实现流程如图 4 所示。

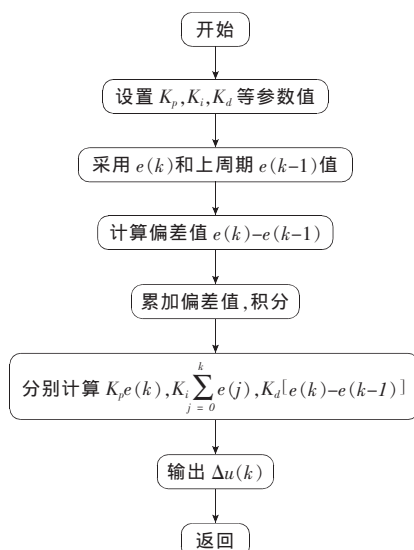


图 4 位置式 PID 控制算法软件流程图

Fig. 4 Flow chart of positional PID control algorithm

2) 基于 C 的算法模块。

```
#include<stdio.h>
#include<stdlib.h>
```

```
#define Kp 0.32
#define Ki 0.64
#define Kd 0.04

struct pid_data
{
    float SetPoint;
    float FeedBack;
    float err;
    float err_last;
    float integral;
    float u_sum;
};

typedef struct pid_data pid_t;
//pid struct data init
struct pid_data * pid_init(float SetPoint,
float FeedBack,
float err, float err_last, float u_sum)
{
    struct pid_data * tset = malloc(sizeof(struct pid_data));
    tset->SetPoint = SetPoint;
    tset->FeedBack = FeedBack;
    tset->err = err;[4]
    tset->err_last = err_last;
    tset->u_sum = u_sum;
    return tset;
}

float pid_calc(pid_t * pid)
{
    pid->err = pid->SetPoint - pid->FeedBack;
    pid->integral += pid->err;
    pid->u_sum = Kp * pid->err +
    Ki * pid->integral + Kd * (pid->err - pid->err_last);
    pid->err_last = pid->err;
    pid->FeedBack = pid->u_sum *
    1.0;

    return pid->FeedBack;
}

int main()
```

```

{
    printf(" System test begin \n");
    pid_t* tset;
    int count = 0;
    float real = 0;
    tset = pid_init(89,0,0,0,0);
    while(count<100)
    {
        real = pid_calc(tset);
        printf(" %f\n",speed);
        count++;
    }
    free(tset);
    return 0;
}

```

上述计算机程序最终返回 $\text{pid} \rightarrow \text{FeedBack}$ 值。它既是本周期的输出值,又作为下一周期的输入值循环上述程序,直至实际速度值与当前速度值的误差在一定范围内,控制过程即停止。

3 改进的位置式 PID 控制算法在自动驾驶系统(ATO)中的应用

为了更好地消除 ATO 系统中推荐速度的跳变,保证向 PID 控制器输入的推荐速度值的稳定性,本研究在位置式 PID 控制算法基础上引入状态方程,对偏差值 $e(k)$ 进行过滤,并将改进后的位置式 PID 控制算法应用在 ATO 系统中。

3.1 在 ATO 系统中实现精确控制的过程

为保证运行的安全并方便乘客上下车,城市轨道交通列车必须在指定的地点或站点停车,所以对于 ATO 系统而言,最重要的功能就是实现对列车的精确控制^[11]。通过在 ATO 系统中应用状态方程和位置式 PID 控制算法可以实现对列车的更精确控制。

首先 ATO 系统通过列车上装载的速度传感器得到列车当前的实际速度,接着 ATO 系统计算出一个推荐速度,推荐速度是在保证列车不超速的情况下 ATO 系统算出的理想速度。由于推荐速度与实际速度之间有误差 e_1 ,当前误差 e_1 有时会出现抖动的现象,即 e_1 有一个周期突然比上个周期变化很大,但 PID 控制算法中不需要这个变

化很大的误差值,所以自动驾驶系统(ATO)就需要对误差 e_1 进行微分滤波,去除当前变化大的误差值。应用系统的状态方程为:

$$Y = CX + DU. \quad (2)$$

$$X(k+1) = Ax(k) + Bu(k). \quad (3)$$

具体微分滤波实现过程如图 5 所示。

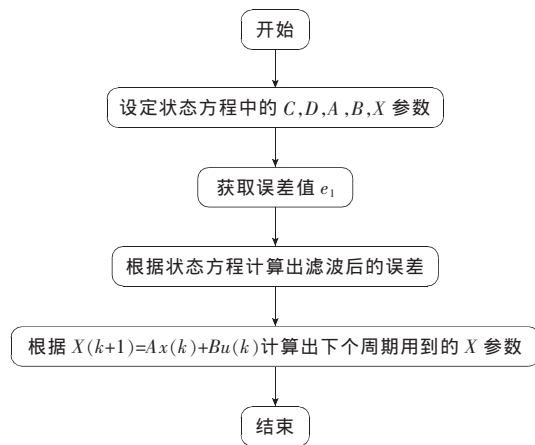


图 5 微分滤波算法流程图

Fig. 5 Flowchart of derivative filter algorithm

即 $Y = C_0 \times X_0 + C_1 \times X_1 + D \times e_1$, 可以得出式(1)中的 K_d 的系数; K_p 的系数是列车的推荐速度与真实速度之间的误差 e_1 ; K_i 的系数是积分过程保存的状态量, 通过式(1)就可以计算出 $\Delta u(k)$ 。 K_p 能迅速反映误差、减小误差, 但比例环节不能消除稳态误差, 增大 K_p 还会引起系统的不稳定; K_i 参数在该过程中的作用是: 只要保证充分长的时间, 积分作用能使误差完全消失, 但其缺点积分控制是偏差累积控制, 控制缓慢, 而且如果积分作用太强会使系统的超调量加大, 甚至出现振荡; 如果出现上述情况, K_d 参数可以发挥其预测误差变化趋势、减小超调量、消除振荡的作用, 使系统的稳定性得到增强, 动态响应加快, 调整时间缩短。应用滤波方程式(3)能有效克服因偶然因素所引起的大的误差干扰; 通过调节参数 K_p, K_i, K_d 三个值, 到应用式(1)计算出的 $\Delta u(k)$ 非常平稳地增加或者减少时, 就可以把调节的 K_p, K_i, K_d 参数记录下来。最后通过计算出的 $\Delta u(k)$ 值来判定需要牵引还是制动, 如果 $\Delta u(k)$ 为正值则需要输出牵引, 反之需要输出制动。图 6 展示了位置式 PID 与状态方程共同作用实现列车精确控制的流程。

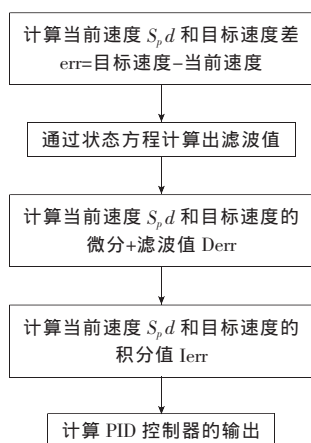


图6 位置式PID与状态方程共同作用实现
列车精确控制的流程图

Fig. 6 Realization of precise control achieved by
positional PID control algorithm and state equation

因此,上述过程可以根据需要实时控制列车按事先配置好的加减速速度值加速或减速,从而使列车在指定的时间停靠在指定的位置。对应用了改进后位置式PID控制算法的ATO在停车时间精度和停车位置精度进行仿真,结果如图7所示。

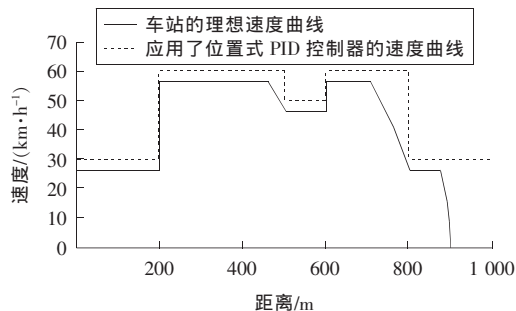


图7 速度距离曲线图

Fig. 7 Curve of speed-distance

从图7可以看出,2条曲线已经非常相似,在停车精度方面,应用了PID控制器的速度曲线能够精确地停在900 m处。

3.2 在ATO中应用位置式PID算法的附加优势

除了实现对列车更精确地控制外,将位置式PID算法应用在ATO中还可以保证列车平稳地运行:在改进后的位置式PID控制中应用的状态方程可以将极端(过大或过小)的推荐速度与实际速度偏差值 $e(k)$ 过滤出去,即消除不合理的推荐速度,下一周期的加速或减速仍然按上一周期的 $\Delta u(k)$ 的值执行,这样就保证了下一周期的列车

速度在一个相对稳定的范围内变动。

为了证实位置式PID算法在保证列车平稳性方面的优势,可以将其实际应用在自动驾驶系统中进行测试,输出各个周期内列车运行推荐速度,结果如图8所示。

```

Speed=37.603 809
Speed=38.372 719
Speed=39.150 761
Speed=39.906 067
Speed=40.660 961
Speed=41.400 150
Speed=42.134 449
Speed=42.856 552
Speed=43.571 724
Speed=44.276 501
Speed=44.973 473
Speed=45.661 041
Speed=46.340 488
Speed=47.011 116
Speed=47.673 588
Speed=48.327 618
Speed=48.973 587
Speed=49.611 401
Speed=50.241 299
Speed=50.863 285
Speed=51.477 520
Speed=52.084 061
Speed=52.683 033
Speed=53.274 506
Speed=53.858 593
Speed=54.435 371
Speed=55.004 948
Speed=55.567 402
Speed=56.122 826
Speed=56.671 303
  
```

图8 测试输出速度的结果图

Fig. 8 Results of speed output in the test

从图8可以看出,应用了位置式PID控制算法的自动驾驶系统输出的速度增加很平缓,并且本周期速度与上周期速度之间的差值没有出现跳变的现象,因此列车能够平稳地运行,提高了旅客的舒适度。

在ATO系统中,应用位置式PID算法还可以在城市轨道交通系统中实现节能环保的目标。根据3.1部分的分析,应用位置式PID算法后, $\Delta u(k)$ 值可以判定需要牵引还是制动,从而帮助列车选择最合适的执行牵引或制动的时间点,避免不必要的牵引或制动。这样在保证运行效率的情况下,列车可以在运行时尽量保持低速、稳速,从而尽可能地减少了列车的耗电量(主要由牵引运行耗电量、停靠站耗电量、自用耗电量三部分组成),从而实现节能的目的。

4 结论

1) 实现对列车精确控制,具体方法为:改变位置式的PID控制算法式中的 K_p, K_i, K_d 的值得出不同的输出值^[12],通过反复测试、对比结果,选取最理想的输出值作为自动驾驶系统中应用的系数,最后得出的 $\Delta u(k)$ 值可以确定对列车执行牵

引或制动命令的最佳时间点,实现精准控制列车的停靠。

2) 改进后的位置式 PID 控制算法能够消除 $e(k)$ 的震荡,过滤掉不合理的推荐速度,从而保证了列车运行平稳,提高了列车的舒适度。

3) 通过 $\Delta u(k)$ 值确定对列车执行牵引或制动命令的最佳时间点后,可以避免不必要的加速或减速,减少了耗电量,从而实现了节能的目的。

PID 控制算法在列车自动驾驶系统中的应用使得列车实现了精确控制,并在到站的准时性、舒适度方面有了进一步的提高。如果在城市轨道交通的自动驾驶系统中广泛应用该算法,将减少列车牵引和制动的的时间、增加列车巡航和惰行时间,从而保证列车准时、精确地在两站间运行。而且牵引和制动时间的减少也实现了节能的目的,真正做到了城市轨道交通系统的绿色运行、可持续运行。

〔参考文献〕

- [1] 罗恒钰,徐洪泽.基于参考模型的 ATO 自适应控制算法研究[J].铁道学报,2013(7):68-73.
LUO Heng-yu, XU Hong-ze. Study of ATO self-adapting control algorithm based on reference model [J]. Journal of the China Railway Society, 2013(7): 68-73.
- [2] 宿帅,唐涛.城市轨道交通 ATO 的节能优化研究[J].铁道学报,2014(12):50-55.
SU Shuai, TANG Tao. Study on the ATO energy conservation optimization of urban railway transportation[J]. Journal of the China Railway Society, 2014(22): 50-55.
- [3] 何英杰.基于自适应模糊 PID 控制器的 BLSRM 的悬浮控制策略[D].沈阳:沈阳工业大学,2016.
HE Ying-jie. Study on suspension control methods of BLSRM based on self-adapting fuzzy PID controller [D]. Shenyang: Shenyang Technology University, 2016.
- [4] 任晓丽.城轨列车 ATO 性能指标确权算法研究[D].成都:西南交通大学,2012.
REN Xiao-li. Study on the authentic right algorithm of urban railway trains ATO performance indicators [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012.
- [5] 吴鹏.城轨列车精确停车算法研究[D].成都:西南交通大学,2015.
WU Peng. Study on the algorithm of urban railway trains' precise stop [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015.
- [6] 王义惠,罗仁士,于振宇,等.考虑 ATP 限速的 ATO 控制算法研究[J].铁道学报,2012(5):59-64.
WANG Yi-hui, LUO Ren-shi, YU Zhen-yu, et al. Study of ATP control algorithm based on ATP speed limit [J]. Journal of the China Railway Society, 2012(5): 59-64.
- [7] 张嗣瀛,高立群.现代控制理论[M].北京:清华大学出版社,2015.
ZHANG Si-yin, Gao Li-qun. Modern control theories [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2015.
- [8] 李尹.PID 控制算法及其在风速控制中的应用[D].武汉:华中科技大学,2007.
LI Ying. PID control algorithm and its application in wind speed control [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007.
- [9] 张镭,李浩.四旋翼飞行器模糊 PID 姿态控制[J].计算机仿真,2014(8):73-77.
ZHANG Lei, LI Hao. Control of four-rotor aircraft fuzzy PID attitude [J]. Computer Simulation, 2014(8): 73-77.
- [10] 李敬兆,王卫平,宋欣欣.计算机控制技术[M].西安:西安电子科技大学出版社,2010.
LI Jing-zhao, WANG Wei-ping, SONG Xin-xin. Computer control techniques [M]. Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and Technology Press, 2010.
- [11] 刘翔.城市轨道交通列车自动运行(ATO)最优控制策略的研究[D].北京:北京交通大学,2011.
LIU Xiang. Study on the optimal control strategies of urban railway transportation [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2011.
- [12] E B Priyanka, C Maheswari, B Meenakshipriya. 汽油运输过程中使用基于 PLC 的 PID 控制器进行参数监控和控制[J].应用研究与技术杂志,2016(3):35-37.
E B Priyanka, C Maheswari, B Meenakshipriya. Parameter monitoring and control during petrol transportation using PLC based PID controller [J]. Journal of Applied Research and Technology, 2016(3): 35-37.