

基于预测控制的列车精确停车算法

吴 鹏*, 王青元, 梁志成, 吴 杰

(西南交通大学 电气工程学院, 成都 610031)

(*通信作者电子邮箱 wu.peng.star@foxmail.com)

摘 要:精确停车是评价列车自动驾驶性能的关键指标之一。在分析列车停车阶段运行情况的基础上,考虑制动模型的延迟特性和列车运行特性的约束条件,运用广义预测控制理论,将列车运行的参考速度和参考距离作为控制目标,结合控制量所需满足的约束条件,设计了一种带约束的多目标预测控制器,以提高停车精度和列车运行的舒适性。通过仿真实例表明,该控制器不仅可以使列车精确跟踪停车目标曲线,达到高精度的停车要求,而且使列车运行具有更高的舒适性。

关键词:列车自动驾驶;精确停车;预测控制;制动系统;舒适性

中图分类号: TP391.9 **文献标志码:** A

Precise train stopping method based on predictive control

WU Peng*, WANG Qingyuan, LIANG Zhicheng, WU Jie

(College of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan 610031, China)

Abstract: Precise train stopping is a key technology of automatic train operation. On the basis of analyzing the train stopping phase, the delay characteristics of brake model and constraint conditions of train characteristics were considered, using generalized predictive control theory, a multi-objective predictive controller with constraints was designed taking account of train speed and distance as control targets and combining the control constraint conditions. The simulation results show that the proposed controller can accurately track the train stopping curve to achieve high precision stopping requirements and higher comfort.

Key words: automatic train operation; precise stopping; predictive control; brake system; comfort

0 引言

城市轨道交通系统的高效率和高密度需要更高性能的列车自动驾驶系统(Automatic Train Operation, ATO)以应对城市交通发展所带来的各种挑战。相比人工驾驶操纵,ATO在运行效率方面有着很大的优势,并具有更高的可靠性。国内外开展了大量针对列车自动驾驶的研究,运用比例积分微分(Proportional Integral Derivative, PID)控制^[1-2]、模糊控制^[3]和神经网络^[4]等。随着我国城市轨道交通的快速发展,对ATO系统的停车精度要求也越来越高,然而列车自动精确停车仍然是一个难题。因此,研究有效的列车精确停车控制算法具有重要的现实意义。

目前,针对列车精确停车控制,现有研究主要围绕理想的牵引计算模型展开。文献[5]运用模糊控制实现了列车停车控制,但是司机经验形成的规则库,无法在线调整以应对列车运行所需求的各种情况。文献[6-7]提出运用迭代学习控制列车精确停车,但迭代学习的过程会影响系统的实时性。上述控制算法的设计并未考虑列车制动模型的滞后特性,这将导致实际作用于列车的控制效果有较大偏差,使得列车无法精确停车。文献[8]虽然针对列车制动模型引入了线性二次型调节器,但线路坡度等因素会导致该控制器停车效果变差。

本文重点研究城轨列车精确停车的控制问题。在文献

[9]提出的制动模型的基础上,考虑实际线路,将列车停车阶段的距离和速度作为控制目标,基于广义预测控制,设计了带约束的多目标预测控制器。仿真结果证明了方法的有效性。

1 ATO 系统

1.1 ATO 系统原理

ATO的主要功能是实现列车运行速度的自动调整,保证列车的正点率,并实现列车高效和节能的运行。ATO需要与列车自动监控系统(Automatic Train Supervision, ATS)和列车自动防护系统(Automatic Train Protection, ATP)交互信息,共同实现列车的自动驾驶。

ATP收集的行车许可、线路参数、临时限速等信息,是由地面设备通过无线通信系统传输到ATP;ATP收集列车速度和位置信息,其来自于列车测速测距单元;ATO通过分析和计算ATP所传递的信息后,向列车牵引和制动系统发送控制命令,实现自动驾驶。

1.2 停车阶段分析

列车进入停车阶段后,防护曲线的限速值逐步下降,控制列车的速度在限速值以下以保证安全性。同时,在此阶段应控制列车的停车精度,提高旅客的舒适度。

列车停车阶段主要通过控制制动力停车^[10],此阶段牵引计算模型描述如下:

$$\frac{dv}{ds} = \frac{-u_b F_b(v) - W_0(v) - W(s)}{M(1 + \gamma)v} \quad (1)$$

收稿日期:2013-06-14;修回日期:2013-08-11。 基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2682013ZT19)。

作者简介:吴鹏(1989-),男,四川成都人,硕士研究生,主要研究方向:列车运行自动控制;王青元(1984-),男,江苏盐城人,博士研究生,主要研究方向:列车运行自动控制、智能控制;梁志成(1990-),男,广东开平人,硕士研究生,主要研究方向:列车运行自动控制;吴杰(1990-),男,湖北黄冈人,硕士研究生,主要研究方向:列车运行自动控制。

$$\frac{dv}{ds} = \frac{1}{v} \quad (2)$$

其中: v 表示列车速度; s 表示列车运行距离; $F_b(v)$ 表示制动力; $W_0(v)$ 表示基本阻力; $W(s)$ 表示线路附加阻力; u_b 表示制动控制系数,与制动手柄级位相对应; M 为列车质量; γ 为列车回转质量系数。

城轨列车到达制动起始点后为匀减速制动模式,且制动系统为无级系统^[11]。为简化描述,令

$$d = \frac{-W_0(v) - W(s)}{M(1 + \gamma)} \quad (3)$$

$$\bar{a} = \frac{-u_b F_b(v)}{M(1 + \gamma)} \quad (4)$$

其中: \bar{a} 为作用加速度,是经过制动系统后产生的加速度; d 为列车所受阻力产生的附加加速度。

2 列车制动模型

列车制动系统是列车安全运行的基础,由于其受电气和机械装置的传输延时,可以被近似为工业过程中典型的一阶纯滞后环节,文献[9]推导出了制动系统表述方式,由式(5)描述。

$$G(s) = \frac{\bar{A}(s)}{A_1(s)} = \frac{\exp(-T_d s)}{1 + \tau s} \quad (5)$$

其中: a_1 为目标加速度, A_1 是 a_1 的拉氏变换; τ 为系统响应时间常数; T_d 为传输延时; \bar{a} 的拉氏变换为 \bar{A} 。

列车运行在线路的实际加速度由作用加速度 \bar{a} 和列车所受阻力产生的附加加速度 d 构成,根据式(1)~(4)有

$$\dot{v} = \bar{a} + d \quad (6)$$

目标加速度通过 ATO 作用的控制指令 $u_c(t)$ 产生,其满足一定静态函数关系,如式(7)所示:

$$a_1 = F(u_c) \quad (7)$$

则列车制动模型框图如图1所示。

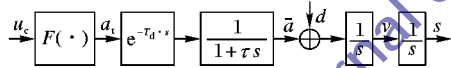


图1 制动模型

3 控制器设计

ATO 通过实时调整列车速度以达到安全、准点、节能和精确停车的行车要求。本文研究的问题是对列车制动停车阶段进行实时控制,以实现精确停车。

列车速度的实时调整主要通过广义预测控制器 (Generalized Predictive Control, GPC) 和下层控制器共同协调完成,如图2所示。GPC 控制器通过计算给出最优控制量 u^* , 对应最优的手柄级位,下层控制器确保制动系统的指令跟踪。

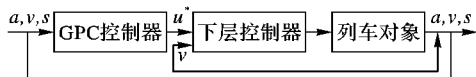


图2 运用 GPC 控制器的闭环控制系统

3.1 广义预测模型

采用一阶 Pade 近似方法,式(5)可变换为

$$\bar{A}(s) = \frac{(\lambda - s)}{(1 + \tau s)(\lambda + s)} A_1(s) \quad (8)$$

时域关系

$$\bar{a}(t) = -\frac{\tau}{\lambda} \ddot{a}(t) - \frac{\lambda\tau + 1}{\lambda} \dot{a}(t) - \frac{1}{\lambda} a_1(t) + a_1 \quad (9)$$

将式(9)代入式(6)有

$$\frac{\tau}{\lambda} \ddot{v}(t) + \frac{\lambda\tau + 1}{\lambda} \dot{v}(t) + v(t) = -\frac{1}{\lambda} \dot{a}_1(t) + a_1 + \frac{\tau}{\lambda} \ddot{d}(t) + \frac{\lambda\tau + 1}{\lambda} \dot{d}(t) + d(t) \quad (10)$$

将式(10)以采样周期 T_c 离散化可得

$$v(k)A(q^{-1}) = a_1(k-1)B(q^{-1}) + d(k)C(q^{-1})/\delta \quad (11)$$

其中: $A(q^{-1}) = 1 + \sum_{i=1}^{n_a} a_i q^{-i}$, $B(q^{-1}) = \sum_{i=0}^{n_b} b_i q^{-i}$, $C(q^{-1}) = 1 + \sum_{i=1}^{n_c} c_i q^{-i}$, $\delta = 1 - q^{-1}$ 。

引入 Diophantine 方程^[12]:

$$C(q^{-1}) = E_j(q^{-1})A\delta + q^{-j}F_j(q^{-1}) \quad (12)$$

$$E_j(q^{-1})B(q^{-1}) = G_j(q^{-1})C(q^{-1}) + q^{-j}H_j(q^{-1}) \quad (13)$$

其中:

$$E_j(q^{-1}) = e_{j,0} + e_{j,1}q^{-1} + \dots + e_{j,j-1}q^{-(j-1)}, \deg(E_j) = j-1$$

$$F_j(q^{-1}) = f_{j,0} + f_{j,1}q^{-1} + \dots + f_{j,n_a}q^{-n_a}, \deg(F_j) = n_a$$

$$G_j(q^{-1}) = g_0 + g_1q^{-1} + \dots + g_{j-1}q^{-(j-1)}, \deg(G_j) = j-1$$

$$H_j(q^{-1}) = h_{j,0} + h_{j,1}q^{-1} + \dots + h_{j,n_b-1}q^{-(n_b-1)}, \deg(H_j) = n_b - 1$$

由式(11)、(12)和(13)可推导出

$$v(k+j) = G_j \Delta a_1(k+j-1) + F_j \frac{v(k)}{C} + E_j d(k+j) + H_j \frac{\Delta a_1(k-1)}{C} \quad (14)$$

建立速度预测模型如下:

$$v(k+j) = G_j \Delta a_1(k+j-1) + F_j v^f(k) + E_j d(k+j) + H_j \Delta a_1^f(k-1) \quad (15)$$

建立距离预测模型如下:

$$s(k+j) = T_c \sum_{n=1}^j (G_n \Delta a_1(k+n-1) + F_n v^f(k) + E_n d(k+n) + H_n \Delta a_1^f(k-1)) \quad (16)$$

其中: $v^f(k) = v(k)/C$, $\Delta a_1^f(k) = a_1(k)/C$, $\Delta a_1^f(k)$ 为 $a_1^f(k)$ 的增量。预测模型中阻力 d 仅考虑坡道附加阻力,其可由仿真数据表中的线路坡道获取。

3.2 控制目标

在列车停车阶段,滚动优化目标是对参考曲线的精确跟踪,列车实现停车精确停车,且制动手柄级位切换少。

目标 J_1 完成速度的精确跟踪,按照设定 ATO 模式曲线运行,达到准点的目的,而且可减少速度波动,更利于节能;目标 J_2 完成目标位置的精确跟踪,可以使得列车精确停车;多目标 J 的选取,可使得列车准点节能运行,精确停车。

设定滚动优化目标函数如下

$$J_1(k) = E \left\{ \sum_{j=N_0}^{N_1} [v(k+j) - v_r(k+j)]^2 + \sum_{j=1}^{N_u} \lambda(j) [\Delta a_1(k+j-1)]^2 \right\} \quad (17)$$

$$J_2(k) = E \left\{ \sum_{j=N_0}^{N_1} [s(k+j) - s_r(k+j)]^2 + \sum_{j=1}^{N_u} \lambda(j) [\Delta a_1(k+j-1)]^2 \right\} \quad (18)$$

$$\min J = \{J_1, J_2\} \quad (19)$$

其中: N_0 为开始预测步长, N_1 为最终预测步长, N_u 为控制步长, $v_r(k)$ 为目标速度, $s_r(k)$ 为目标距离; $\lambda(j)$ 为控制加权

常数,用于限制控制增量 $\Delta a_i(k)$ 的剧烈变化,以减少对被控对象的过大冲击。

采用函数加权法表示多目标控制要求^[13],取如下加权目标函数:

$$J(k) = \beta_1 J_1(k) + \beta_2 J_2(k) \quad (20)$$

其中 $\beta_1 > 0$ 和 $\beta_2 > 0$ 为加权系数。

根据式(14)变换

$$v(k+j) = G_j \Delta a_i(k+j-1) + f(k+j) \quad (21)$$

其中:

$$f(k+j) = F_j v^f(k) + E_j d(k+j) + H_j \Delta a_i^f(k-1)$$

由式(16)和(21)可得到

$$s(k+j) = T_c \sum_{n=1}^j (G_n \Delta a_i(k+n-1) + f(k+n)) \quad (22)$$

令

$$\mathbf{u} = [\Delta a_i(k), \Delta a_i(k+1), \dots, \Delta a_i(k+N_u-1)]^T$$

$$\mathbf{v}_r = [v_r(k+N_0), v_r(k+N_0+1), \dots, v_r(k+N_1)]^T$$

$$\mathbf{f} = [f(k+N_0), f(k+N_0+1), \dots, f(k+N_1)]^T$$

$$\mathbf{s}_r = [s_r(k+N_0), s_r(k+N_0+1), \dots, s_r(k+N_1)]^T$$

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} g_{N_0} & g_{N_0-1} & 0 & \cdots & 0 \\ g_{N_0+1} & g_{N_0} & g_{N_0-1} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ g_{N_u+N_0-2} & g_{N_u+N_0-3} & g_{N_u+N_0-4} & \cdots & g_{N_0-1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ g_{N_1} & g_{N_1-1} & g_{N_1-2} & \cdots & g_{N_1-N_u+1} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} T_c & 0 & \cdots & 0 \\ T_c & T_c & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ T_c & T_c & \cdots & T_c \end{bmatrix}_{(N_1-N_0+1) \times (N_1-N_0+1)}$$

将式(21)和式(22)代入式(20),并写成向量形式,则有

$$J = \beta_1 \cdot [\mathbf{v}_r - \mathbf{G}\mathbf{u} - \mathbf{f}]^T [\mathbf{v}_r - \mathbf{G}\mathbf{u} - \mathbf{f}] + \beta_2 \cdot [\mathbf{s}_r - \mathbf{T}\mathbf{G}\mathbf{u} - \mathbf{T}\mathbf{f}]^T [\mathbf{s}_r - \mathbf{T}\mathbf{G}\mathbf{u} - \mathbf{T}\mathbf{f}] + 2\lambda \mathbf{u}^T \mathbf{u} \quad (23)$$

忽略与控制量 \mathbf{u} 无关的项,则可将目标函数重新整理得到

$$J = \mathbf{u}^T (\beta_1 \mathbf{Q}_1 + \beta_2 \mathbf{Q}_2) \mathbf{u} + (\beta_1 \mathbf{R}_1 + \beta_2 \mathbf{R}_2) \mathbf{u} \quad (24)$$

其中: $\mathbf{Q}_1 = \mathbf{G}^T \mathbf{G} + \lambda \mathbf{I}$, $\mathbf{R}_1 = 2\mathbf{G}^T (\mathbf{f} - \mathbf{v}_r)$, $\mathbf{Q}_2 = \mathbf{G}^T \mathbf{T}^T (\mathbf{G}\mathbf{T}) + \lambda \mathbf{I}$, $\mathbf{R}_2 = 2\mathbf{G}^T \mathbf{T}^T (\mathbf{T}\mathbf{f} - \mathbf{s}_r)$, \mathbf{I} 为单位矩阵。

3.3 控制约束

由于制动系统约束限制和列车运行舒适性要求,需考虑受限条件,主要包括输入幅值 a_i 受限和输入增量 Δa_i 受限。 a_i 受限于制动系统, Δa_i 表示加速度变化率,需要满足运行的舒适性指标,由列车性能决定。

3.3.1 控制幅值 a_i 受限

设 a_{\max} 和 a_{\min} 是控制幅值的上下限,则有

$$a_{\min} - a_i(k-1) \leq \sum_{i=1}^j \Delta a_i(k+i-1) \leq a_{\max} - a_i(k-1) \quad (25)$$

可转换为

$$\begin{cases} \mathbf{L}\mathbf{u} \leq \mathbf{u}_1 \\ -\mathbf{L}\mathbf{u} \leq \mathbf{u}_2 \end{cases} \quad (26)$$

其中: $\mathbf{u}_1 = [a_{\min} - a_i(k-1), \dots, a_{\min} - a_i(k-1)]^T$, $\mathbf{u}_2 = [a_{\max} - a_i(k-1), \dots, a_{\max} - a_i(k-1)]^T$, \mathbf{L} 为 N_u 维单位下三

角矩阵。

3.3.2 控制增量 Δa_i 受限

设 $\Delta a_{i\max}$ 和 $\Delta a_{i\min}$ 是控制增量的上下限,则有

$$\Delta a_{i\min} \leq \Delta a_i(k+j-1) \leq \Delta a_{i\max} \quad (27)$$

可转换为

$$\begin{cases} \mathbf{I}\mathbf{u} \leq \mathbf{u}_{\max} \\ -\mathbf{I}\mathbf{u} \leq -\mathbf{u}_{\min} \end{cases} \quad (28)$$

其中: $\mathbf{u}_{\max} = [\Delta a_{i\max}, \dots, \Delta a_{i\max}]^T$, $\mathbf{u}_{\min} = [\Delta a_{i\min}, \dots, \Delta a_{i\min}]^T$ 。

3.4 控制器设计

现考虑性能指标(24)、受限方程(26)和(28),则可转化具有约束条件的优化问题为

$$\min J = \mathbf{u}^T (\beta_1 \mathbf{Q}_1 + \beta_2 \mathbf{Q}_2) \mathbf{u} + (\beta_1 \mathbf{R}_1 + \beta_2 \mathbf{R}_2) \mathbf{u}$$

$$\mathbf{P} \cdot \mathbf{u} \leq \mathbf{Z}$$

其中: $\mathbf{P} = [\mathbf{I} \quad -\mathbf{I} \quad \mathbf{L} \quad -\mathbf{L}]^T$, $\mathbf{Z} = [\mathbf{u}_{\max}^T \quad -\mathbf{u}_{\min}^T \quad \mathbf{u}_1^T \quad -\mathbf{u}_2^T]^T$ 。

该问题转化为带约束的在线二次优化问题。可验证目标函数为凸优化,最优解存在且唯一,可利用二次规划直接求解^[14]。

4 仿真分析

为验证本文所提出的算法的正确性,选取某地铁车辆参数,考虑实际线路进行仿真,并将结果对比参数合适的 PID 控制器。仿真参数见表1。

仿真结果显示,列车通过制动点后,由于制动系统具有延迟性,无法立即跟随上参考速度曲线,但是经过控制器调节后逐渐跟随上参考速度曲线。图3为控制效果,对比可看出预测控制器经过较快时间的调整后能精确地跟踪上参考曲线,且最终达到高精度的停车效果,停车误差为17 cm,满足误差30 cm的停车要求。而PID控制器只能保证跟踪在参考速度的附近,具有一定波动性,并最终停车精度也不够高,停车误差超过200 cm,无法满足高精度的停车目标。

表1 仿真参数

参数	数值
列车质量	288 t
最大制动力	295 kN
控制周期 T_c	0.1 s
制动模型延迟 T_d	1 s
制动模型响应时间 τ	0.4 s
控制加速度变化率 $\Delta a_{i\max}$	0.075 m/s ²
控制加速度变化率 $\Delta a_{i\min}$	-0.075 m/s ²
理想制动减速度	-0.6 m/s ²
制动起始点(速度和距离)	19.8 m/s, 1200.0 m
目标停车点	1526.7 m
预测步长	25
控制步长	5
加权系数 β_1 和 β_2	均为0.5
基本阻力公式	$w(v) = (2.09 + 0.039v + 0.000675v^2) (N/kN)$
线路坡度	1.2 ~ 1.41 km, 2‰ 1.41 ~ 1.55 km, -9‰

列车自动驾驶系统需要平稳的操纵序列,以达到较高的舒适度。如图4所示,PID控制器的目标加速度具有震荡现象,经过较长时间才达到收敛,而预测控制仅因为刚开始制动时,制动系统延迟,开始加大制动力,然后经过一次震荡调节便收敛达到平衡,整个控制序列十分平稳,列车运行的舒适性

较高。

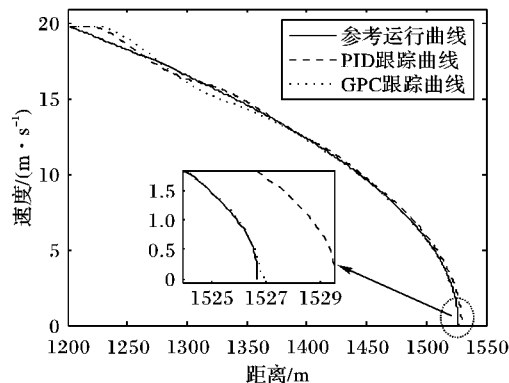


图3 仿真结果对比

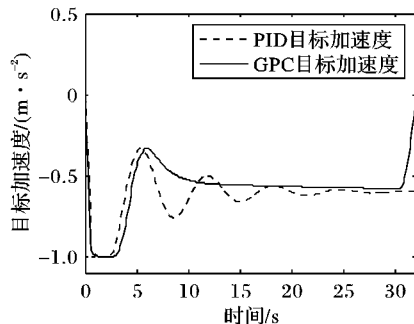


图4 目标加速度的对比

5 结语

本文研究列车精确停车的控制问题,通过对列车停车阶段进行分析,设计了一种带约束的多目标预测控制器。该控制器考虑了实际制动模型的延迟特性,并结合了列车制动系统的控制约束条件,引入参考速度和参考距离为控制目标。通过在实际运行线路的仿真环境下与PID控制进行对比分析,验证了基于广义预测控制的停车算法的有效性,不仅可以使列车具有较高的停车精度,同时可以保证停车阶段的舒适性。

(上接第3599页)

指标将航迹规划问题转换成为一个函数优化问题。

利用混沌算法初始化蜜源的改进ABC算法,增加蜜源多样性,加快了收敛速度。仿真过程中,跟随蜂按概率选择引领蜂有助于算法资源合理分配,随着算法迭代次数的增加不断优化航迹,缩小区间,并最终收敛到全局最佳航迹,侦查蜂帮助算法跳出局部最优,其邻域搜索策略有助于蜂群逐步集中到最优值所在区间,利用这些优势,最终找到函数的最优解。本文主要解决多UCAV协同航迹的预规划,进一步工作是在此基础上通过分段局部规划和减少算法运行时间,研究多UCAV协同航迹实时重规划算法。

参考文献:

- [1] WANG Y Y, WEI T T, QU X J. Study of multi-objective fuzzy optimization for path planning [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2012, 25(1): 51-56.
- [2] 安柏义. 多无人机系统协同航迹规划研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2008.
- [3] 刘三阳, 姜飞, 张建科. 混合人工蜂群算法[J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(5): 1167-1170.
- [4] KARABOGE D, BASTURK B. On the performance of Artificial Bee Colony (ABC) algorithm [J]. Applied Soft Computing, 2008, 8(1): 687-697.
- [5] LEMMENS N, de JONG S, TUYLS K, et al. A bee algorithm for

参考文献:

- [1] 陈荣武, 刘莉, 诸昌铃. 基于CBTC的列车自动驾驶控制算法[J]. 计算机应用, 2007, 27(11): 2649-2651.
- [2] 唐涛, 黄良骥. 列车自动驾驶系统控制算法综述[J]. 铁道学报, 2003, 25(2): 98-102.
- [3] ALEXANDER F. A fuzzy knowledge-based system for railway traffic control [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2000, 13(6): 719-729.
- [4] SEKINE S, IMASAKI N, ENDO T. Application of fuzzy neural network control to automatic train operation and tuning of its control rules [C]// Proceedings of the 4th IEEE International Conference on Fuzzy Systems and the Second International Fuzzy Engineering Symposium. Piscataway: IEEE, 1995, 4: 1741-1746.
- [5] YASUNOBU S, MIYAMOTO S, IHARA H. A fuzzy control for train automatic stop control [J]. Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers, 2002, 19(11): 873-880.
- [6] WANG Y, HOU Z S, LI X Y. A novel automatic train operation algorithm based on iterative learning control theory [C]// IEEE/SOLI 2008: IEEE International Conference on Service Operations, Logistics and Informatics. Piscataway: IEEE, 2008, 2: 1766-1770.
- [7] 周曦, 陈德旺. 机器学习在列车精确停车问题的应用[J]. 计算机工程与应用, 2010, 46(25): 226-230.
- [8] 贺广宇. 基于LQR的列车精确停车控制算法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2009.
- [9] 于振宇, 陈德旺. 城轨列车制动模型及参数辨识[J]. 铁道学报, 2011, 33(10): 37-40.
- [10] 朱金陵, 李会超, 王青元. 列车节能控制的优化分析[J]. 中国铁道科学, 2008, 29(2): 104-108.
- [11] 王长林, 林颖. 列车运行控制技术[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2008: 70-80.
- [12] 高钦和, 王孙安. 基于IGPC的时变大时滞系统自适应控制[J]. 计算机应用, 2007, 27(6): 1508-1509.
- [13] BEMPOAD A, PENA D M. Multiobjective model predictive control [J]. Automatica, 2009, 45(12): 2823-2830.
- [14] BOYD S, VANDENBERGHE L. Convex optimization [M]. New York: Cambridge University Press, 2004: 150-155.
- [15] multi-Agent systems: Recruitment and navigation combined [C]// Proceedings of ALAG 2007: an AAMAS 2007 Workshop. Hawaii: [s. n.], 2007: 66-70.
- [16] LU X Y, ZHOU Y Q. A novel global convergence algorithm: Bee collecting pollen algorithm [C]// ICIC 2008: Proceedings of the 4th International Conference on Intelligent Computing, LNCS 5227. Berlin: Springer-Verlag, 2008: 518-525.
- [17] 暴励, 曾建潮. 自适应搜索空间的混沌蜂群算法[J]. 计算机应用研究, 2010, 27(4): 1330-1334.
- [18] 叶媛媛. 多UCAV协同任务规划方法研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2005.
- [19] 刘敏, 邹杰, 冯星, 等. 人工蜂群算法的无人机航迹规划与平滑[J]. 智能系统学报, 2011, 6(4): 344-349.
- [10] 苏菲, 彭辉, 沈林成. 基于协进化多子群蚁群算法的多无人作战飞机协同航迹规划研究[J]. 兵工学报, 2009, 30(11): 1562-1568.
- [11] 胡中华, 赵敏. 基于人工蜂群算法的TSP仿真[J]. 北京理工大学学报, 2009, 29(11): 978-982.
- [12] 唐上钦, 黄长强, 胡杰, 等. 基于威胁等效和改进PSO算法的UCAV实时航迹规划方法[J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(8): 1706-1710.
- [13] 江焰炎, 袁东风. 人工鱼群算法及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 149-150.
- [14] 袁亚杰. 一种改进的人工蜂群算法[J]. 中国科技信息, 2011(24): 102-103.