

基于模糊自适应PID控制的重载列车操纵优化研究

赵巧妮

(湖南铁道职业技术学院, 湖南 株洲 412001)

摘要: 以2台HXD1+100辆C80车辆为编组模式进行动力学建模,利用过渡模式下光滑卸载过程的不连续性,建立车钩力查表模型求取精确车钩力值,并结合模糊自适应PID控制器,控制车钩力偏差和车钩力偏差变化率。仿真结果表明,受控对象实际值与目标值趋近一致,在精确建立动力学模型的基础上,控制器能够有效地控制车钩力的加载、卸载过程的不连续性,确保列车安全运行。

关键词: 重载列车;动力学;车钩力;模糊自适应PID;操纵优化

中图分类号: U268.4⁺3; U292.92⁺.1

文献标识码: A

doi: 10.13890/j.issn.1000-128x.2017.03.016

Study on Control Optimization for Heavy Haul Train Based on Fuzzy Adaptive PID Control

ZHAO Qiaoni

(Hunan Railway Professional Technology College, Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: Dynamic model was built with 2 HXD1+100 C80 vehicles for the marshaling mode. The table mode of coupler force was established with the in-continuity of smooth unloading over the excessive pattern, and the fuzzy adaptive PID controller was used to control the force deviation and the change rate of the coupler force deviation. The simulation results showed that the actual value of controlled object was consistent with target value. The controller can effectively control the discontinuity of the coupler force loading and unloading process and ensure the safety of train operation based on the accurate dynamic model.

Keywords: heavy haul train; dynamics; coupler force; fuzzy adaptive PID; control optimization

0 引言

重载列车运行可能会产生许多安全运行问题,比如列车断钩、脱钩、车上设备磨损、走行部件磨损加剧等,这些问题严重制约了重载列车运输的健康发展^[1]。这些安全问题与重载列车运行过程中的动态特性、牵引制动操控特性相关,因而,在时间与线路限定的条件下,应用线路起伏顺势自适应地平稳运行,减少制动,

降低车钩作用力,对于确保重载列车运输系统安全运行有着重要的意义。

钩缓装置在重载列车动态运行过程中对列车纵向冲动有重要的影响^[2]。大秦线是我国第一条双线双向开行重载列车的电气化铁路运煤专线,在开行2万t重载组合列车运输过程中,曾先后发生过3次中部机车脱轨事故,研究表明主要是由较大的车钩压力以及过大的车钩偏转所引起的^[3]。研究车钩力在列车运行中的最大值、最小值分布,优化操纵技术,分析危及列车运行安全的各种工况,有利于确保重载列车的安全、

平稳开行。由于钩缓系统的特性曲线具有非线性、时变性,在列车运行过程中如何设计一个合理的最优操纵控制系统成为轨道交通自动化领域的难点问题^[4]。传统的 PID 控制、模糊控制^[5-6]响应慢,控制参数的整定依赖于经验值,项目实施周期和难度会很大。滑模控制^[7]能实现系统的快速响应,同时控制参数在变化和扰动过程中不灵敏,在此基础上,文献[8]提出了基于曲线跟踪的滑模 PID 组合控制器,能够实现对车钩力与速度的理想运行曲线进行平滑跟踪并实现精准停车,同时对列车模型参数的时变有较好的适应性。针对非线性、多目标的钩缓系统,本文制定模糊控制规则,设计模糊自适应 PID 控制器,并通过对 PID 参数的在线修改,实现对列车车钩力与速度曲线的跟踪,并通过仿真研究验证其控制的有效性。

1 重载列车运行模型建立

1.1 列车纵向动力学模型

重载列车由一系列机车和车辆组成,车钩与缓冲器连接着机车与车辆或车辆与车辆。如果将每节车当成一个质点,那么列车运行过程中纵向作用力可以如图1表示。取任意一节车辆作为分离体,整列车的自由度等于机车加上车辆的总数^[9]。

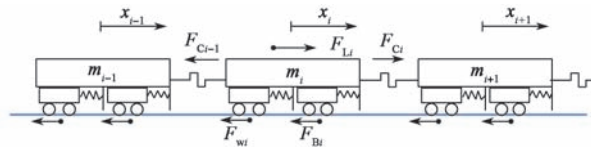


图1 列车纵向动力学模型

本文以 HXD1 型电力机车结合 C80 货车为研究对象,任意一节车辆的运动方程可描述如下:

$$m_i \ddot{x}_i = F_{Ci-1} - F_{Ci} - F_{wi} + F_{Li} - F_{Bi} \quad (1)$$

式中: $m_i \ddot{x}_i$ 为列车第 i 节车辆受力总和; F_{Ci-1} 为第 i 节车受到第 $i-1$ 节车的阻力; F_{Ci} 为第 i 节车受到第 $i+1$ 节车的拉力; F_{wi} 为第 i 节车的前行的总运行阻力; F_{Li} 为作用于车辆的牵引力或电制动力; F_{Bi} 为第 i 节车辆受到的空气制动力。

式(1)的边界条件如式(2)所示,当 i 为第 1 节车辆时,此时机车为首节车辆,此时 $F_{Ci}=0$; 当 i 为 n , 即为最后一节车厢时,此时为末节车辆,故此时 F_{Ci+1} 也等于 0。

$$\left. \begin{aligned} F_{Ci} &= 0 & i=1 \\ F_{Ci+1} &= 0 & i=n \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: n 表示机车和车辆数总和。

1.2 各力取值参考

在列车纵向动力学模型中, F_L 表示作用于车辆的牵引力或电制动力,其取值主要依据牵引力或电制动力特性曲线,若第 i 节不具备动力源,那么 $F_L=0$, 列车牵引力公式为

$$\left. \begin{aligned} F_L &= 760 & 0 \sim 5 \text{ km/h} \\ F_L &= 760 - 3.8(v-5) & 5 \sim 65 \text{ km/h} \\ F_L &= 9\,600 \times 3.6/v & 65 \sim 120 \text{ km/h} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

列车电制动公式为

$$\left. \begin{aligned} F_L &= 461 \times v/5 & 0 \sim 5 \text{ km/h} \\ F_L &= 461 & 5 \sim 75 \text{ km/h} \\ F_L &= 9\,600 \times 3.6/v & 75 \sim 120 \text{ km/h} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

F_w 为第 i 节车位的总运行阻力,包括附加阻力 W_i 、等效运行阻力 W_0 等。其中等效运行阻力根据“列车牵引计算规程”来进行取值计算^[10],其值等于基本运行阻力乘以自重。同一速度下,车辆和机车分别具有不同的基本运行阻力。

机车基本运行阻力为

$$\omega_0'' = 1.4 + 0.0038v + 0.0003v^2 \quad (5)$$

车辆运行基本阻力为

$$\omega_0'' = 0.92 + 0.0048v + 0.000125v^2 \quad (6)$$

根据经验算法,在列车启动至加速到 5 km/h 的过程中,机车和车辆基本运行阻力的取值可以设置为常数,通常启动过程中机车基本运行阻力大小取值为 5 N/kN,车辆基本运行阻力大小取值为 3.5 N/kN。

通常在电制动力不足以达到制动要求的情况下施加空气制动,空气制动是通过空气制动机将闸瓦压紧制动轮盘,并通过相互之间的摩擦来产生制动力。空气制动力 F_B 的计算公式如下:

$$F_{Bi} = \frac{\pi}{4} \frac{d_z^2 p_z \eta_z \gamma_z n_z}{n_k \times 10^6} \varphi_h \quad (7)$$

式中: d_z 表示制动气缸的直径参数; η_z 为基础制动装置计算传动效率; n_k 为闸瓦数; φ_h 表示闸瓦摩擦系数(换算); p_z 代表制动缸的空气压力参数; γ_z 代表制动倍率参数; n_z 代表制动缸数。

车钩力取值决定于钩缓模型建立的准确性,同时,也直接影响着重载列车纵向动力学模型的建立。在建立模糊自适应 PID 控制器时,如果能够建立精准列车纵向动力学模型,那么控制系统超调量明显减小,其快速性也明显提高,大大缩短调节时间。

2 钩缓模型建立

在建立钩缓数学模型时,定义加载、卸载的 2 个函数为 $f_u(x)$ 和 $f_l(x)$,该函数曲线可通过落锤试验得到,以其耦合点的相对行程定义为加载与卸载函数的自变量 x 。车钩力与缓冲器相对行程关系图如图 2 所示。其中 $f_u(x)$ 是加载特性曲线, $f_l(x)$ 是卸载特性曲线,缓冲器的工作状态是通过耦合点相对行程 x 和相对速度 Δv 的乘积进行判断,即当 $x \cdot \Delta v > 0$ 时,可判定缓冲器处于加载状态,车钩力沿曲线 $f_u(x)$ 变化; 当 $x \cdot \Delta v < 0$ 时,可判定缓冲器处于减载状态,车钩力沿曲线 $f_l(x)$ 变化。

通过相对行程 x 经插值可以求出车钩力的值。然而,在不同的冲击速度下,迟滞线的形状和车钩力的峰值会发生变化,这意味应用上述计算方法求取车钩力会影响车钩力的精度,增加车钩力的求解误差^[11]。应用过渡模式下光滑卸载过程的不连续性,可建立力和行程的查找表格,并以最大速度进行选型^[12]。如图3所示,当速度小于5 km/h以下时,可以选取第一组的曲线并建立表格进行车钩力求取,计算公式如下:

$$F(x_i, v_i) = \begin{cases} f_1(x_i, v_i) & |x_i| \geq |x_{i-\Delta t}| \\ f_u(x_i, v_i) & |x_i| < |x_{i-\Delta t}| \end{cases} \quad (8)$$

$$F(x_i, v_i) = F(x_{i-\Delta t}, v_{i-\Delta t}) + k(x_i - x_{i-\Delta t}) \quad (9)$$

$$|f_u(x_i, v_i)| \leq |F(x_i, v_i)| \leq |f_1(x_i, v_i)| \quad (10)$$

式中: x_i , $x_{i-\Delta t}$ 是当前时间步长和上一时间步长的相对缓冲器行程; v_i , $v_{i-\Delta t}$ 是当前时间步长和上一时间步长的车辆速度值; F 表示车钩力; k 表示调节系数值。根据上述公式,可以建立列车运行时间与车钩力的关系式。同时,应用该方法建立的钩缓模型求解车钩力可以提高列车纵向动力学运行的稳定值,其各节列车运行速度保持收敛一致性,大大地提高求解精度,并为设计PID控制器提供精确的数学模型。

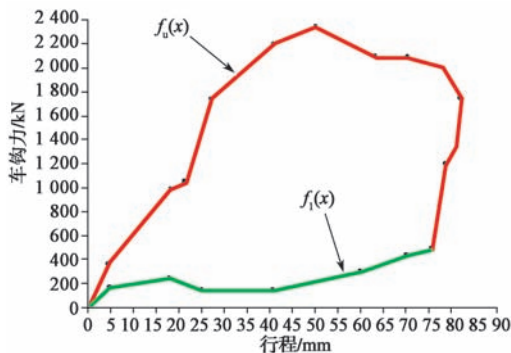


图2 车钩力与缓冲器相对行程关系图

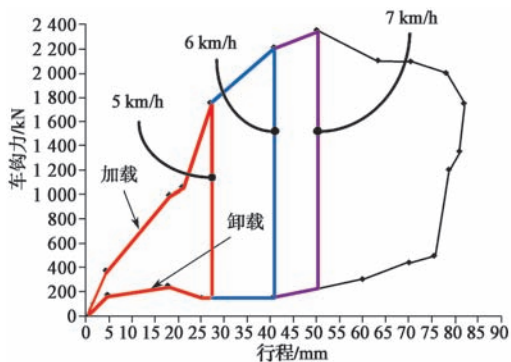


图3 车钩力查表模型的仿真结果

3 模糊自适应PID控制器的设计

3.1 设计思路

列车在运行过程中钩缓装置的车钩力受列车车辆数和其他干扰因素影响,若要得到对钩缓装置的车钩力有较好的控制效果,就必须要对模糊控制器的比例、积分、微分参数即PID的参数不断地进行在线修正,

故采用模糊自适应PID控制器来适量调节列车车辆间钩缓力的大小。如式(11)所示, $e(t)$ 为 t 时刻钩缓的车钩力, $u(t)$ 为反馈整定后的车钩力,适时调整和改变比例系数 K_p 、 K_i 、 K_d 就可充分发挥PID控制器的优良控制作用,可使得整个系统达到最佳控制效果。

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (11)$$

3.2 模糊自适应PID控制器方案设计

1) 确定模糊控制器的输入和输出

该模糊控制器对应的是二入三出的二维模糊控制器,本系统输入变量有2个,分别是 e_c 与 e 。 e_c 为车钩力误差变化率, e 为车钩力误差。输出量为PID控制的3个参数 K_p 、 K_i 、 K_d ,由 K_p 、 K_i 、 K_d 来适应不同时刻下车钩力误差 e 和车钩力误差变化率 e_c 的模糊关系。

输入变量车钩力误差 e 和车钩力误差变化率 e_c 的函数语言变量模糊集用{负大,负中,负小,零,正小,正中,正大}来量化为7个等级,记为{NB,NM,NS,ZO,PS,PM,PB},实际取值范围为 $[-100\text{kN}, +100\text{kN}]$ 。

输出量 K_p 、 K_i 、 K_d 的函数语言变量模糊集用{负大,负中,负小,零,正小,正中,正大}来量化为7个等级,记为{NB,NM,NS,ZO,PS,PM,PB},取值范围为 $[-6, +6]$ 。

2) 隶属函数的选取

考虑到列车钩缓装置控制系统的稳定性、鲁棒性和灵敏性,本系统用三角形隶属函数来代表输入变量,选用高斯型函数来代表输出变量,分别如图4和图5所示。

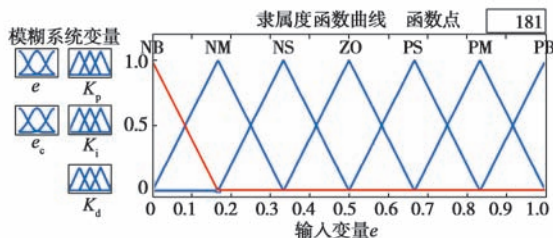


图4 输入量 e 与 e_c 的隶属函数

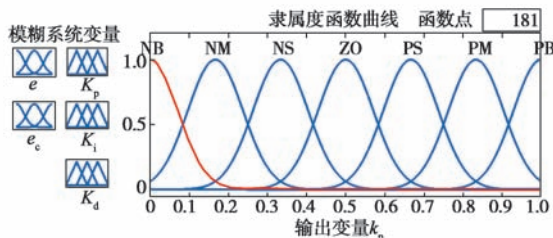


图5 输出量 K_p 、 K_i 、 K_d 的隶属函数

3) 模糊规则的建立

对列车钩缓装置中车钩力的动态研究和数据处理,可以得到 e 、 e_c 、 K_p 、 K_i 和 K_d 之间有以下推理关系。

当车钩力偏差变化率 e_c 有较大的绝对值时,可逐渐增大系数 K_p 的值来加快系统的响应速度,同时可减

小系统的时间常数与阻尼系数。在系统启动时为了避免系统发生超范围的控制作用，将 K_i 值取小， $K_d=0$ 。

当车钩力偏差变化率 e_c 的绝对值为中等时，为保证系统的相应速度，此时 K_d 的取值比较关键， K_d 值得适中即可；为使系统响应的超调略小一些，则比例增益 K_p 值需要调整为较小， K_d 值略大即可。

当车钩力偏差变化率 e_c 的绝对值较小时， K_p 与 K_i 的值可取得偏大一些，而 K_d 的取值稍大即可，取适中。这样可使得系统有好的稳定性，也可避免平衡点处发生振荡现象。

结合实际操作经验及结合上述输入变量和输出变量的规则关系，得到表 1~表 3 的模糊控制规则表。

表 1 调节 ΔK_d 的模糊控制规则

e	e_c						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NS	NM	ZO	ZO	NM	NS	ZO
NM	NM	NM	NS	ZO	NS	ZO	PS
NS	NL	NL	NS	NS	ZO	PS	PM
ZO	NL	NL	NS	ZO	PS	PL	PL
PS	NM	NS	ZO	PS	PS	PL	PL
PM	NS	ZO	PS	ZO	PS	PM	PM
PB	ZO	PS	PM	ZO	ZO	PM	PS

表 2 调节 ΔK_p 的模糊控制规则

e	e_c						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NM	NS	NM	NM	NM	NL	ZO
NM	NL	NM	NL	NL	NL	ZO	PL
NS	NL	NM	NL	NL	ZO	PL	PM
ZO	NL	NM	NL	ZO	PL	PM	PL
PS	NM	NL	ZO	PL	PL	PM	PL
PM	NL	ZO	PL	PL	PL	PM	PL
PB	ZO	PL	PM	PM	PM	PS	PM

表 3 调节 ΔK_i 的模糊控制规则

e	e_c						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	ZO	NS	NM	NL	NS	NL	ZO
NM	ZO	NS	NL	NL	NL	ZO	PL
NS	ZO	ZO	NL	NL	ZO	PL	PS
ZO	ZO	ZO	NL	ZO	PL	ZO	ZO
PS	NS	NL	ZO	PL	PL	ZO	ZO
PM	NL	ZO	PL	PL	PL	PS	ZO
PB	ZO	PL	PS	PL	PM	PS	ZO

在表 1~表 3 中的 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 分别为钩缓装置系统 PID 控制器原来的设计参数 K_p 、 K_i 、 K_d 的修正值，系统的实时参数取值分别为 $K_p+\Delta K_p$ 、 $K_i+\Delta K_i$ 、 $K_d+\Delta K_d$ 。

依据上述规则，设计了如图 6 所示的模糊控制器，图中 PID 模糊控制器车钩力的偏差 e 和偏差变化率 e_c 同时输入到模糊控制器中，分别由 3 个参数 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 进行调节，再将修正后的 ΔK 送入 PID 调节器，进行实时在线修正即可。

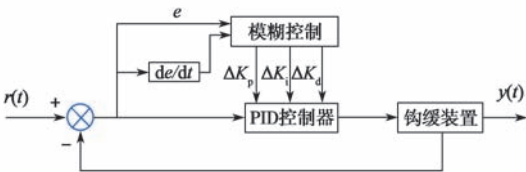


图 6 模糊自适应 PID 控制结构图

该控制器的输入变量定义为

$$e(i)=r(i)-y(i) \tag{12}$$

$$e_c(i)=e(i)-e(i-1) \tag{13}$$

式中： $e(i)$ 为第 i 次采样偏差； $r(i)$ 为第 i 时刻车钩岗位上的车钩力值； $y(i)$ 为第 i 时刻采集到的车钩力反馈值。

取 x 的基本论域为 $[-6, +6]$ ，实际输入域值为 $[a, b]$ ，可以得出车钩力 y 与 x 之间的关系式^[13]：

$$y=\frac{12}{b-a}\times\left[x-\frac{a+b}{2}\right] \tag{14}$$

通过试验数据调试表明，当实际车钩力与目标车钩力之间相差 100 kN 时控制效果会比较好，所以 e 和 e_c 的基本论域为 $[-100\text{ kN}, +100\text{ kN}]$ 。

4) 模糊清晰化

将模糊集合映射到一个具体的数值的转换称为模糊集合的“清晰化”。模糊控制系统中的模糊变量变换为清晰量的过程，是模糊控制系统中最为关键的一步。这里采用面积平分法来将模糊变量进行反模糊化。如式 (15) 所示。设论域 i 上 F 集合 A 的隶属函数为 $u(i)$ ，假设隶属函数曲线和横坐标包围区域的面积平分线对应的横坐标为 u_{bia} ，设 $i \in [a, b]$ ，则 u_{bia} 的取值由下式算出：

$$u_{bia}=\int_a^b u(i)di \tag{15}$$

4 仿真结果及分析

按照重载列车纵向动力学计算公式和数据，建立车钩与时间的关系，由于列车纵向动力学是较为复杂的非线性求解问题，目前在工程应用方面主要是采用显示和隐式积分的方法来进行求解，文本所采用的是基于 Newmark- β 的高精度平衡迭代法^[9]，在计算万吨重载组合列车的纵向力分布取值上和试验结果从基本上说是一致的。利用 Matlab 模糊工具箱对其进行仿真，确定 PID 参数初始值 $K_p=0.8$ ， $K_i=0.003$ ， $K_d=4.0$ ，采样时间设定为 2 ms， ΔK_p 的基本论域为 $[-1, +1]$ ， ΔK_i 的基本论域为 $[-0.006, 0.006]$ ， ΔK_d 的基本论域为 $[-6, +6]$ ，采用模糊自适应 PID 进行跃阶响应仿真，响应速度快，超调量小，系统的动、静态性能均有提高^[14-15]。

通过模糊自适应 PID 整定后的钩缓系统采集来的数据与车钩力和速度的理想运行曲线进行比较，该理想运行曲线选用工况为 2 台 HXD1 型电力机车，编组牵引 10 000 t，按“2+0”模式运行。即 2HXD1+100 辆 C80+ 可控列尾（机车轴重 25 t）。列车的钩缓装置配

备 MT-2 缓冲器, 选用 16 号 17 号连锁车钩与牵引杆并用, 选取山西太原铁路局大同县至阳原段线路 6‰坡道为运行线路。以启动工况和循环制动工况为计算工况, 启动工况仿真结果如图 7 所示, 由于列车在启动过程中, 车钩力值的最大值一般分布在 1~4 节车钩位, 选取列车 1~4 节车钩位为研究对象。循环制动工况仿真结果如图 8 所示, 选取列车 1、4 节车钩位为研究对象进行比对。仿真图中目标值是在零机破、零故障的前提下设计的理想数据, 目标值曲线是通过中国铁道科学研究院的试验数据进行拟合而得到的。仿真结果表明: 在建立精确动力学模型的基础上用模糊自适应 PID 控制对受控对象的时滞、时变、非线性具有较好的适应能力, 同时能提高稳态误差的修复性能。

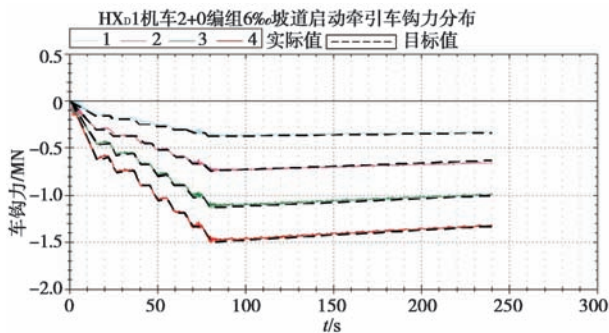


图 7 模糊自适应 PID 控制对车钩力的仿真 (启动工况)

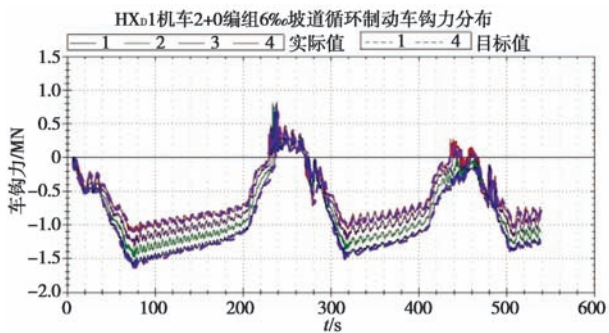


图 8 模糊自适应 PID 控制对车钩力的仿真 (循环制动工况)

5 结语

本文利用模糊 PID 控制的精确和灵活的特点, 设计了针对重载列车安全运行车钩力跟踪控制的模糊自适应 PID 控制器, 同时对车钩力数学模型进行改进, 采用了建立车钩力查表模型求取精确车钩力值, 克服

车钩力在加载、卸载过程中的不连续性, 提高了车钩力求取的精度。仿真结果表明: 基于精准动力学模型的控制系统的快速响应能力, 使列车能够在很小误差范围内安全地跟踪车钩力与速度的理想运行曲线, 在保证车钩力具有稳定性的同时保证了列车的安全运行。

参考文献:

- [1] 杨绍清. 中国铁路重载运输货车技术发展 [J]. 铁道车辆, 2009, 47(12): 1-5.
- [2] 杨俊杰, 刘建新, 罗世辉, 等. 重载组合列车机车车钩稳定控制实验 [J]. 西南交通大学学报, 2009, 44(6): 882-886.
- [3] 许自强, 吴庆, 马卫华, 等. 重载机车车钩缓装置建模及承压行为 [J]. 西南交通大学学报, 2014, 49(1): 21-26.
- [4] 刘爽, 魏伟. 重载列车安全运行非稳态冲击模型研究 [J]. 机械工程学报, 2014, 50(10): 128-140.
- [5] 唐涛, 黄良冀. 列车自动驾驶系统控制算法综述 [J]. 铁道学报, 2003, 25(2): 98-102.
- [6] Wong K K, Ho T K. Dynamic cost control of train movement with genetic algorithm [J]. International Journal of Systems Science (S0020-7171), 2004, 35(13): 835-846.
- [7] 王丰尧. 滑模变结构控制 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1995.
- [8] 杨艳飞, 崔科, 吕新军. 列车自动驾驶系统的滑模 PID 组合控制 [J]. 铁道学报, 2014, 36(6): 61-66.
- [9] 常崇义, 王成国, 马大伟, 等. 2 万 t 组合列车纵向力计算研究 [J]. 铁道学报, 2006, 28(2): 90-95.
- [10] 中华人民共和国铁道部. 列车牵引计算规程: TB/T 1407—1998 [S]. 北京: 中国铁道出版社, 1999.
- [11] Wu Q, Cole C, Luo S, et al. A review of dynamics modeling of friction draft gear [J]. Vehicle System Dynamics, 2014, 52(6): 733-758.
- [12] Wu Q, Maksym Spiryagin, Cole C. Advanced dynamic modelling for friction draft gears [J]. Vehicle System Dynamics, 2015, 53(4): 475-492.
- [13] 刘剑锋. 基于模糊模型预测控制的重载组合列车机车制动控制策略研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2008.
- [14] 刘峰. 结合 PI 自调整与模糊逻辑补偿的控制方法 [J]. 华中科技大学学报 (自然科学版), 2016(3): 127-132.
- [15] 索春风. 折线 Mamdai 模糊系统及其权值参数的萤火虫优化算法 [J]. 浙江大学学报 (理学版), 2016(3): 149-155.

作者简介: 赵巧妮 (1982-), 女, 硕士, 讲师, 研究方向为电子技术、智能控制和电气控制技术等。