

文章编号: 2095-2163(2020)03-0128-05

中图分类号: TN710.9

文献标志码: A

轨道车辆弓网系统主动控制研究

蒋苏杰, 杨 俭, 杨 沥, 孔令强, 周 群, 冯婷立

(上海工程技术大学 城市轨道交通学院, 上海 201620)

摘要: 列车受电弓与接触网间的接触力稳定直接影响列车的安全运行。对列车弓网系统进行主动控制是保证列车运行时弓网接触力稳定的有效方法。建立受电弓-接触网系统动力学模型,分别采用PID算法及模糊滑模控制对弓网系统进行控制。在此基础上提出一种模糊滑模自适应PID控制器。分析对比3种控制的效果,从而为研究高效智能的弓网主动控制系统提供科学理论依据。

关键词: 受电弓; 主动控制; 控制算法; 仿真

Research on active control of rail vehicle bow network system

JIANG Sujie, YANG Jian, YANG Li, KONG Lingqiang, ZHOU Qun, FENG Tingli

(School of Urban Rail Transportation, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

[Abstract] The stable contact force between the train pantograph and the contact network is one of the main factors affecting the safe operation of the train. Active control of the train bow network system is an effective method to ensure the stability of the bow network contact force when the train is running. The dynamic model of the pantograph-contact network system is established, and the PID system and fuzzy synovial membrane control are used to control the bow network system. Based on this, a fuzzy synaptic adaptive PID controller is proposed. the effects of the three controls are analyzed and compared, so as to provide a scientific theoretical basis for the study of efficient and intelligent bow network active control system.

[Key words] pantograph; active control; control algorithm; simulation

0 引言

弓网关系直接影响列车运行。在对弓网关系评价中,弓网间的接触力是重要依据。弓网间接触力过大或过小都会直接影响着列车的运行。对受电弓进行主动控制是保持弓网接触力稳定的有效方法。

本文提出对弓网系统进行PID控制、模糊滑模控制的研究方法。在此基础上又提出一种模糊滑模自适应PID控制器,对受电弓进行主动控制。

1 弓网系统建模

1.1 弓网系统建模机理研究

由参考文献^[1]可得弓网耦合非线性方程:

$$\begin{cases} M_1\ddot{y}_1 + C_1(\dot{y}_1 - \dot{y}_2) + K_1(y_1 - y_2) = -K_s(y_1 - y_s); \\ M_2\ddot{y}_2 + C_2\dot{y}_2 + C_1(\dot{y}_2 - \dot{y}_1) + K_1(y_2 - y_1) + K_2y_2 = F_0. \end{cases} \quad (1)$$

其中, M_1, M_2 表示受电弓的弓头、框架的等效质量; $y(t)$ 表示弓网耦合接触力; y_1, y_2 分别表示受电弓的弓头、框架的位移; F_0 表示受电弓所受的抬

升力; K_1, C_1 分别表示弓头与框架间的刚度与阻尼; K_2, C_2 分别表示框架与基座间的刚度与阻尼。这里,由式(1)可知弓网接触力为:

$$F_s = K_s[y_1 - y_s(x, t)], \quad (2)$$

其中, K_s 表示接触网变化刚度。

由参考文献得,采用最小二乘原理,对其刚度曲线进行拟合分析,其拟合的结果可表示为^[1]:

$$k_s(t) = k_0(1 + \alpha_1 f_1 + \alpha_2 f_2 + \alpha_3 f_1^2 + \alpha_4 f_3^2 + \alpha_5 f_4^2), \quad (3)$$

其中,

$$\begin{aligned} f_1 &= \cos\frac{\varphi}{L} \frac{\partial \pi v}{\partial t} \ddot{\varphi}; & f_2 &= \cos\frac{\varphi}{L_1} \frac{\partial \pi v}{\partial t} \ddot{\varphi}; \\ f_3 &= \cos\frac{\varphi}{L} \frac{\partial v}{\partial t} \ddot{\varphi}; & f_4 &= \cos\frac{\varphi}{L_1} \frac{\partial v}{\partial t} \ddot{\varphi}. \end{aligned} \quad (4)$$

此处, v 表示列车运行速度(m/s); L 表示接触网跨距(m); L_1 表示相邻吊弦间的距离 L_1 (m); k_0 表示平均刚度(N/m); $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5$ 表示刚度差异系数。

基金项目: 国家自然科学基金(面上项目)(51575334); 上海市自然科学基金(19ZR1421700)。

作者简介: 蒋苏杰(1995-),男,硕士研究生,主要研究方向:列车弓网系统主动控制; 杨 俭(1962-),男,教授,硕士生导师,主要研究方向:制动能量、振动能量回收、弓网关系等。

通讯作者: 杨 俭 Email:953447506@qq.com

收稿日期: 2019-11-16

对于国内简单链型接触网,则有:

$$k_0 = 3\ 684.5; \alpha_1 = 0.466\ 5; \alpha_2 = 0.083\ 2; \alpha_3 = 0.260\ 3; \alpha_4 = -0.280\ 1; \alpha_5 = -0.336\ 4$$

研究可得弓网系统的状态方程为:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu; \\ y = Cx. \end{cases} \quad (5)$$

其中, x 为 $n \times 1$ 状态向量; u 为 $m \times 1$ 输入向量; $A = [0\ 1\ 0\ 0; -(10\ 000+3\ 694.5)/8\ -151\ 250\ 15; 0\ 0\ 0\ 1; 10\ 000/12\ 15\ -10\ 000/12\ -12.5]$; $B = [0\ 0\ 0\ 1/12]^T$; $C = [1\ 0\ 0\ 0; 0\ 0\ 1\ 0]$ 。

1.2 弓网系统动态接触力评价参数

(1)平均值。其数学公式可表示为:

$$F_{mean} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i, \quad (6)$$

其中, P_i 表示采样点处的接触压力, n 表示采样点数。

DC1.5KV 弓网系统接触力目标值为:

$$F_m = 228 \times 10^{-5} \times v^2 + 90, \quad (7)$$

其中, v 为列车运行速度(km/h)。

(2)接触压力不均匀系数。列车运行期间弓网间的动态接触压力状态的描述为接触压力不均匀系数。对应数学计算公式可写为:

$$\delta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{P_{imax} - P_{imin}}{P_{imax} + P_{imin}}, \quad (8)$$

其中, i 以压力的一个变化周期为选择点,将上拐点作为 P_{imax} 和下拐点值作为 P_{imin} 。

(3)接触压力的均方根值。其公式可表示为:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - P)^2}. \quad (9)$$

其中, P_i 表示采样点处的接触压力; P 表示接触力均值; n 表示采样点数。

2 控制器设计

2.1 PID 控制器设计

PID 控制器由偏差的比例、积分、微分进行线性组合控制。原理设计框图如图 1 所示。

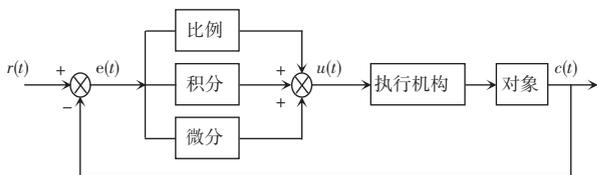


图 1 PID 控制系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of PID control system

在 PID 中, 给定值 $r(t)$ 与实际输出值 $c(t)$ 构成偏差 $e(t)$, 即:

$$e(t) = r(t) - c(t), \quad (10)$$

通过线性组合, 控制规律如下:

$$u(t) = K_p \hat{e}(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(t) dt + \frac{T_D de(t)}{dt} \hat{u} \quad (11)$$

其中, K_p 表示比例系数; T_I 表示积分时间系数; T_D 表示微分系数。

2.2 滑模变结构控制器的设计

变结构控制系统算法简单, 响应速度快, 对外界噪声干扰和参数摄动具有鲁棒性。在此同时, 模变结构控制也有一定的不足。当状态轨迹到达滑模面时, 会在滑模面两边往还穿梭振动, 很难正确地顺着滑面朝平衡点滑动。

切换函数和趋近律设计两部分构成滑模变结构控制器。设定合适切换表达式 $s(x)$, 确保设置的滑动模态趋于稳定, 具有不错的动态特性。这里, 则给出如下数学公式:

$$s = C_e x, \quad (12)$$

其中, C_e 为切换系数矩阵, $C_e = e^T P(A)$ 。

利用 Ackermann 公式^[4] 确定滑模变结构控制率中的 C_e 值, Ackermann 公式可表示为:

$$e^T = [0, \dots, 0, 1] [b, Ab, \dots, A^{n-1}b]^{-1}, \quad (13)$$

$$P(\lambda) = (\lambda - \lambda_1) (\lambda - \lambda_2) \dots (\lambda - \lambda_{n-1}) (\lambda - \lambda_n), \quad (14)$$

接着, 求出趋近率 \dot{s} , 从而渐近运动的动态特性将被提高, 文中应用了趋近律的方法。相应地, 指数趋近率的运算公式可写为:

$$\dot{s} = -ks - \varepsilon \text{sgn}(s), \quad (15)$$

渐近速度慢慢从大值变小为零, 一方面, 减少了渐近时间; 另一方面, 确保到达切换面时, 速度并不大。为了能在有效时间抵达切换平面, 添入同速渐近函数 $\dot{s} = -\varepsilon \text{sgn}(s)$, 可保证 s 慢慢变为零时, 速度趋近 ε 。其中, k 和 ε 均为正数。

k 值的确定根据渐近滑模面的动态品质; ε 值可用于削弱系统的摩擦力、近似线性化导致的误差和参数摄到等, 系统因此呈现较好的鲁棒特性。确保渐近速度又要抑制拌振量, 需要使 k 值变大, 并使 ε 值减小。

取 Lyapunov 函数 $V(x) = \frac{1}{2}s^2$, $\dot{V}(x) = s\dot{s} = s(-ks - \varepsilon \text{sgn}(s)) = -ks^2 - \varepsilon \text{sgn}(s)s < 0$, 从而完成滑动模态存在、到达的条件设定。

将式(14)替换进式(5)中, 所得变换后滑模变结构控制律见下式:

$$u = -(C_e B)^{-1}(C_e A X + k_s + \varepsilon \text{sgn}(s)). \quad (16)$$

2.3 模糊滑模变结构控制器设计

模糊滑模控制设计方法可表述为:利用二维模糊控制器,滑模控制量根据模糊控制规律直接设计得出。假设模糊控制器的输入为 s 和 \dot{s} , 对应的模糊变量分别为 E 和 EC , 控制量变化 Δu 的模糊化变量就是模糊控制器的输出 ΔU 。采用模糊控制规则来调整滑模控制, 决定变量 u 的大小, 确保条件 $s\dot{s} < 0$ 成立。控制结构如图 2 所示。

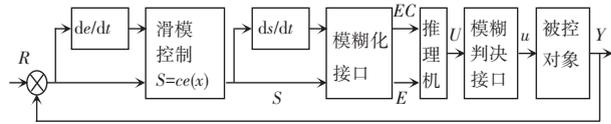


图 2 模糊滑模变结构控制结构

Fig. 2 Fuzzy sliding mode variable structure control structure

由切换函数(12)和指数趋近律(16), 于是有:

$$\begin{aligned} \dot{s}(t) &= C_e \dot{x}(t); \\ \ddot{s}(t) &= C_e (Ax(t) + Bu(t)); \\ \ddot{s}(t) - k_s(t) - \varepsilon \text{sgn}(s(t)) &= C_e Ax(t) + C_e Bu(t); \\ \dot{s}(t) &= -\frac{1}{k} (C_e Ax(t) + C_e Bu(t) + \varepsilon \text{sgn}(s(t))); \end{aligned} \quad (17)$$

$$\dot{s} \approx (s((i+1)\Delta t) - s(i\Delta t)) / \Delta t, \quad (18)$$

根据 Lyapunov 稳定性定理, 取 Lyapunov 函数 $V(x) = \frac{1}{2}s^2$, $V(x)$ 为正定, 其导数为: $\dot{V}(x) = s\dot{s} \leq 0$, 而 $V(x)$ 为负且是半确定的。由 Lyapunov 稳定性定理, 须满足 $s\dot{s} < 0$ 的条件, 使系统实现稳定控制。研究中将涉及二维模糊控制器。对此可做阐释解析如下。

(1) 输入输出量的模糊化。选定滑模函数 S 及其变化率为模糊控制器的输入, 模糊控制器的输出 ΔU 是控制变化量 Δu 的模糊化变量。设置输入变量和输出变量的模糊子集为 $\{NB, ZO, PB\}$ 。输入变量 c 和输出变量的量化域分别为 $[-75, 75]$ 、 $[-50, 50]$, 选择三角函数作为系统的隶属函数。Mamdani 控制器用作模糊控制器, Max-Min 用作模糊控制决策, 去模糊化基于重心方法。

(2) 建立模糊控制规则。根据式(17)和(18), 模糊控制规则详见表 1。

表 1 模糊控制规则表
Tab. 1 Fuzzy control rule table

	NB	ZO	PB
NB	NB	NB	ZO
ZO	NB	ZO	ZO
PB	ZO	ZO	PB

2.4 模糊滑模自适应 PID 控制器的设计

复杂系统通常具有非线性、时变、耦合及参数和结构不确定等多种复杂因素。PID 控制对复杂的非线性系统没有良好的控制效果, 而且一旦当参数的变化超出设定范围时, 系统的效果性能会有明显的下降。因此, 将模糊滑模和 PID 控制结合, 提出一种模糊滑模自适应 PID 控制。控制过程的简略设计如图 3 所示。

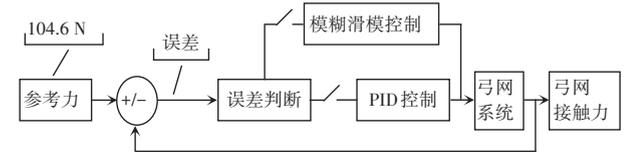


图 3 模糊滑模自适应 PID 控制

Fig. 3 Fuzzy sliding mode adaptive PID control

模糊滑模控制适用于控制参数范围比较大波动, 而小范围内的波动控制则适合用 PID 来控制。确定了弓网耦合接触力的理想值, 将弓网接触力的实际值与其做比较, 通过误差判断模块判断误差范围, 即通过判断模块的上下限定值来决定启用哪一种控制策略能达到最有效果。

在仿真过程中, 当误差值超过了误差判断模块中的最值限定, 系统自动启动模糊滑模控制; 当误差值小于误差判断模块的最值限定时, 系统则启动 PID 控制。将 2 种控制结合构成模糊滑模 PID 控制器, 控制效果就会比较优秀。不仅可以用于高阶的、时变的被控对象, 还能适用于非线性的被控对象, 弓网系统的受流质量也会得到显著改善。

3 仿真分析

3.1 实验仿真运行结果

对弓网系统进行动力学仿真, 得到弓网系统未加主动控制前的运行结果。在此基础上, 对弓网系统施加主动控制, 进行仿真, 对比分析。

本文中受电弓参数为: 静态接触力 $F = 90 \text{ N}$, $c_1 = 120 \text{ N} \cdot \text{s/m}$, $c_2 = 30 \text{ N} \cdot \text{s/m}$, $k_1 = 10000 \text{ N/m}$, $k_2 = 0$ (没有考虑车体振动) 以及质量块 $m_1 = 8 \text{ kg}$, 质量块 $m_2 = 12 \text{ kg}$; 列车运行速度为 80 km/h 。

接触线参数为: 线密度 $q = 20 \text{ kg/m}$, 张力 $T = 20 \text{ kN}$, 跨距 $L = 63 \text{ m}$, 横截面积 $A = 150 \text{ mm}^2$, 弹性模量 $E = 1.0 \times 10^5 \text{ MPa}$ 。速度为 80 km/h 。

通过试凑法调节不同环节的系数值, 得到 PID 控制下的最佳系数值 K_p, K_i, K_d 。最佳系数值为 $K_p = 6, K_i = 0.7, K_d = 0.1$ 。

模糊滑模控制中的切换系数矩阵设计为 $C_e = [5.01 \ 8.16 \ 0.87 \ 3.34]$, 取式(15)中的 $k = 10, \varepsilon = 0.5$ 。

由此可得 PID 控制、模糊滑模控制与模糊滑模自适应 PID 控制仿真结果如图 4~图 8 所示。

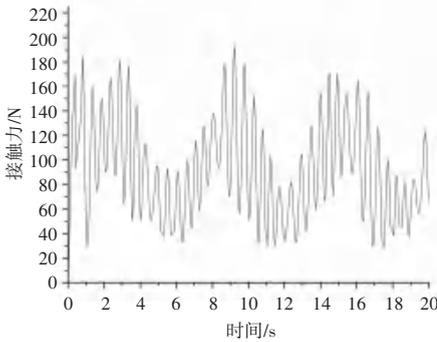


图 4 系统接触力拟合曲线

Fig. 4 System contact force fitting curve

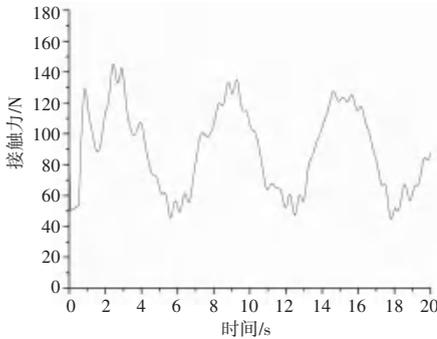


图 5 接触力 (PID) 拟合曲线

Fig. 5 Contact force (PID) fitting curve

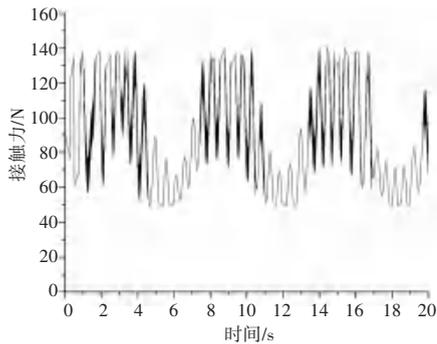


图 6 接触力拟合曲线 (模糊滑模)

Fig. 6 Contact force fitting curve (blurred sliding mode)

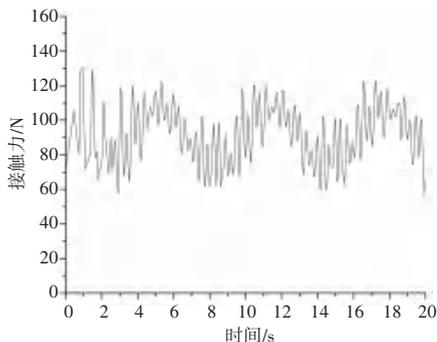


图 7 接触力拟合曲线 (模糊滑模 PID)

Fig. 7 Contact force fitting curve (fuzzy sliding mode PID)

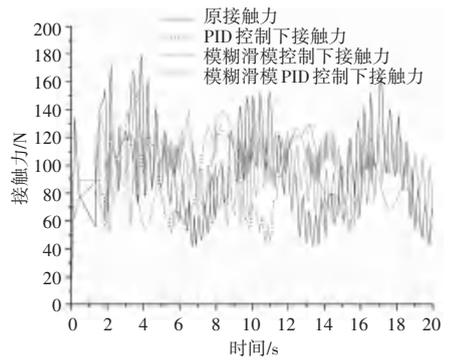


图 8 4 种接触力曲线

Fig. 8 four contact force curves

3.2 仿真结果分析与总结

当列车运行速度为 80 km/h 时,可得仿真数据分析结果见表 2。

表 2 接触力评价指标分析结果

Tab. 2 Analysis of contact force evaluation indicators

	接触力				
	平均值	最小值	最大值	均方根	不均匀系数%
原系统	83.5	41.9	179.0	33.5	20.9
PID	85.1	44.2	147.3	26.2	13.3
模糊滑模控制	88.8	49.2	139.7	25.9	11.9
模糊滑模 PID	93.3	56.9	127.7	18.7	12.3

由表 2 可得,弓网模型在经过 PID、模糊滑模控制、模糊滑模自适应 PID 下,接触力评价参数均得到有效提升,接触力更加稳定。研究可得剖析论述如下。

(1)对系统进行主动控制后,弓和网之间动态接触力状况得到明显改观。从仿真结果来看,接触力平均值情况得到改善,原系统的接触力均值为 83.5 N,经过 PID、模糊滑模控制、模糊滑模自适应 PID 三种主动控制增大为 85.1 N,88.8 N,93.3 N,更加接近于该速度下的经验值 104.6 N;最小值得到有效提高,从控制前的 41.9 N 增加到 44.2 N、49.2 N、56.9 N;最大值得到有效降低,从 179.0 N 下降到 147.3 N、139.7 N、127.7N。接触力均方根和接触力不均匀系数也得到了有效降低。均方根从 33.5 下降到 26.2、25.9、18.7,下降率分别为 34.5%、33.3%、38.3%;不均匀系数从 20.9 下降到 13.3、11.9、12.3,下降率分别为 49.8%、65.5%、66.8%。

(2)在 3 种主动控制下,从各种评价指标上来看,模糊滑模的控制效果要优于 PID 控制,模糊滑模 PID 比模糊滑模控制具有更好的控制效果。3 种主动控制方法都有效地改善了弓网间接触力的波动。

(下转第 137 页)