

## 高速动车组多模型切换主动容错预测控制

杨 辉<sup>1,2</sup>, 张坤鹏<sup>1,2</sup>, 王 昕<sup>1,2,3</sup>

(1. 华东交通大学 电气与电子工程学院, 江西 南昌 330013;

2. 江西省先进控制与优化重点实验室, 江西 南昌 330013; 3. 上海交通大学 电工与电子技术中心, 上海 200240)

**摘要:** 高速动车组持续高速运行, 对控制系统的可靠性和抗干扰能力提出了更高要求. 结合高速动车组非线性动力学特点和系统运行数据, 应用减法聚类和模式分类算法建立高速动车组多模型集; 为适应对象和扰动特性的变化建立高速动车组自适应模型; 采用基于累计误差最小的切换策略在线选择最优控制模型, 据此设计主动容错预测控制算法来实现高速动车组安全高效运行. 最后, 仿真实例验证了该方法的有效性.

**关键词:** 高速动车组; 非线性; 多模型切换; 主动容错预测控制

**中图分类号:** TP273, U266.2 **文献标识码:** A

## Multi-model switching predictive control with active fault tolerance for high-speed train

YANG Hui<sup>1,2</sup>, ZHANG Kun-peng<sup>1,2</sup>, WANG Xin<sup>1,2,3</sup>

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang Jiangxi 330013, China;

2. Key Laboratory of Advanced Control & Optimization of Jiangxi Province, Nanchang Jiangxi 330013, China;

3. Center of Electrical & Electronic Technology, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** In the continuous high-speed operation, severe demands on reliability and disturbance-rejection are needed by the high speed trains. According to its nonlinear dynamic characteristics and operation data, we build a set of multiple models for the high-speed train by using subtractive clustering and pattern classification algorithm. To adapt to the change of object and disturbance characteristics, we use a model switching scheme to select online, from this set of models, the optimal model with smallest model accumulative error. On the basis of this optimal model, we design the active fault tolerant predictive controller to realize the secure and efficient operations of the high-speed train. Simulation example is given to show the effectiveness of this method.

**Key words:** high-speed train; nonlinear; multi-model switching; active fault tolerant predictive control

### 1 引言(Introduction)

高速动车组持续高速运行时, 其牵引/制动单元长期频繁地执行控制动作, 出现局部未知故障或干扰难以避免, 研究牵引/制动单元故障或干扰状态下的容错控制具有重要现实意义.

在不考虑非线性空气阻力的情况下, 文献[1-2]针对中低速重载货运列车的速度控制提出了开环启发式优化策略、基于启发式算法的闭环LQR控制方法. 高速动车组空运行过程复杂、空气阻力复杂多变, 传统的基于牵引计算和运行阻力经验模型的列车描述方法无法完整刻画这一动态行为<sup>[3]</sup>. 文献[4]针对高速动车组非线性动力学模型提出了模糊自适应容错控制方法, 但模糊规则基于熟练操作人员经验, 难以获得或系统实施. 多模型方法是对复杂系统建模与控制的一种有效手段<sup>[5-6]</sup>, 文献[7]采用多模型来描述高速动车组复杂非线性动态特性, 但模型结构和参数是事先基于运行数据离线确定,

当未知故障或干扰发生时, 系统运行性能无法得到保证.

本文针对高速动车组复杂非线性特性, 采用减法聚类和模式分类算法建立多模型集, 在不降低系统控制精度的情况下, 降低了模型的数目和系统计算量; 在多模型的基础上, 为适应对象和扰动特性的变化建立高速动车组自适应模型, 基于累计误差最小的模型切换策略在线选择最优控制模型, 并采用主动容错预测控制方法, 确保高速动车组在动态未知故障或干扰下安全稳定运行、实现高精度速度跟踪控制.

### 2 高速动车组动力学模型辨识(Dynamics model identification of high-speed train)

#### 2.1 高速动车组运行过程描述(High speed train operation description)

当考虑高速动车组空气动力学影响时, 空气阻力

远大于车辆间内力, 车辆间的相对位移近似为零, 各辆车速度近似相等<sup>[8]</sup>; 再加上坡道阻力不消耗能量, 其影响可忽略<sup>[9]</sup>. 则由 $N$ 节车辆组成的高速动车组可描述为

$$\begin{cases} m_1 \dot{v} = u_1 - (m_1 c_{12} v^2 + m_1 c_{11} v + m_1 c_{10}), \\ m_2 \dot{v} = u_2 - (m_2 c_{22} v^2 + m_2 c_{21} v + m_2 c_{20}), \\ m_N \dot{v} = \\ u_N - (m_N c_{N2} v^2 + m_N c_{N1} v + m_N c_{N0}). \end{cases} \quad (1)$$

将式(1)中各项依次相加可得

$$M \dot{v} = U - (C_2 v^2 + C_1 v + C_0), \quad (2)$$

式中:

$$\begin{aligned} M &= \sum_{i=1}^N m_i, \quad C_2 = \sum_{i=1}^N m_i c_{i2}, \\ C_1 &= \sum_{i=1}^N m_i c_{i1}, \quad C_0 = \sum_{i=1}^N m_i c_{i0}, \end{aligned}$$

系统输入 $U$ 为作用于高速动车组上的控制力(牵引力/制动力), 速度 $v$ 为系统输出,  $M$ 为高速动车组等价总质量,  $C_2, C_1, C_0$ 为阻力系数;  $C_2 v^2$ 代表空气阻力是速度 $v$ 的非线性函数, 随着列车运行速度的增加,  $C_2 v^2$ 所占的比例越来越大.

## 2.2 高速动车组多模型集(Multiple models set of high-speed train)

基于高速动车组运行数据, 采用减法聚类获得多模型个数 $P^*$ , 详见文献[7].

在已得到的 $P^*$ 个模型个数的基础上, 取如下的类别隶属度函数:

$$\mu_{ic} = \frac{1}{\sum_{q=1}^{P^*} \left( \frac{\|x_i - x_c\|}{\|x_i - x_q\|} \right)^2}, \quad (3)$$

式中:  $x_i$ 为第 $i$ 个数据样本,  $x_c$ 为第 $c$  ( $1 \leq c \leq P^*$ ) 个类中心,  $\mu_{ic}$ 为 $i$ 个数据样本在第 $c$ 个类的隶属度. 分类效果的标准指标是模式识别率, 可以定义如下:

$$L_i = \arg \max \{ \mu_{ic} \}. \quad (4)$$

当分类算法得到第 $c$ 个类的 $\mu_{ic}$ 值最大, 则该数据样本最有可能属于该类, 即模式识别率最高. 采用该方法对数据样本进行分类, 得到 $P^*$ 个运行模式数据集, 对第 $c$  ( $1 \leq c \leq P^*$ ) 个集合, 采用最小二乘法进行辨识. 为了预测控制器设计的需要, 结合式(2), 可得到第 $c$  ( $1 \leq c \leq P^*$ ) 个线性模型形式为

$$\begin{aligned} A_c(z^{-1})y(k) &= \\ B_c(z^{-1})u(k-1) + \xi(k)/(1-z^{-1}), \end{aligned} \quad (5)$$

式中:  $\{y(k), u(k)\}$ 为第 $c$ 个子模型的输出和输入序列,  $\{\xi(k)\}$ 为白噪声序列(系统未知故障),  $A_c(z^{-1})$ 和 $B_c(z^{-1})$ 为如下多项式:

$$\begin{cases} A_c(z^{-1}) = 1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_{n_a} z^{-n_a}, \\ B_c(z^{-1}) = b_0 + b_1 z^{-1} + \dots + b_{n_b} z^{-n_b}, \end{cases} \quad (6)$$

式中 $n_a$ 和 $n_b$ 分别为模型输入和输出的阶次.

## 2.3 高速动车组自适应模型(High speed train adaptive models)

针对牵引/制动单元未知故障或干扰引起系统动态特性变化, 运行指标变差的现象, 建立了常规和可重新赋值两个自适应模型来改善系统性能.

### 2.3.1 常规自适应模型(Free-running adaptive model)

常规自适应模型用于保证系统的稳定性, 其参数如下式进行更新:

$$\begin{cases} \hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) + K(k)[y(k) - \varphi^T(k)\hat{\theta}(k-1)], \\ K(k) = \frac{P(k-1)\varphi(k)}{\lambda + \varphi^T(k)P(k-1)\varphi(k)}, \\ P(k) = \frac{1}{\lambda}[I - K(k)\varphi^T(k)]P(k-1). \end{cases} \quad (7)$$

### 2.3.2 可重新赋值自适应模型(Reinitialized adaptive model)

可重新赋值自适应模型用以获得更快的收敛速度, 根据模型切换策略, 其参数初值为多模型集中最优模型的参数, 若被选为当前最优模型, 参数按式(7)更新; 否则其初值重新赋值为累计误差最小的模型参数, 再按式(7)更新.

## 2.4 模型切换策略(Model switching scheme)

模型切换策略是通过一种性能指标在线确定多个模型中哪个模型与系统未知故障或干扰状态下的特性最匹配. 设在 $k$ 时刻,  $e_i(k) = y(k) - \hat{y}_i(k)$ 表示实际输出与第 $i$  ( $1 \leq i \leq P^* + 2$ ) 个模型的输出误差; 切换指标定义如下:

$$J_i(k) = a e_i^2(k) + b \sum_{j=1}^l \rho^j e_i^2(k-j). \quad (8)$$

令 $s(k) = \arg \min \{ J_i(k) \}$ , 将最优控制模型 $s$ 投入闭环系统进行控制.

## 3 高速动车组主动容错预测控制(Predictive control with active fault-tolerance for high speed train)

### 3.1 控制系统的结构框图(The frame of control system)

图1描述了高速动车组主动容错预测控制系统的结构. 多模型集和自适应模型并行辨识高速动车组运行过程的动态特性, 既可以减少多模型集未建模部分和未知故障或干扰的影响, 又可以降低自适应模型中因偶然误差带来故障或干扰误报的影响, 提高系统的容错能力. 在每个采样时刻, 系统根据模型

切换策略在线选择最优控制模型, 并通过滚动优化策略投入闭环系统进行主动容错预测控制。

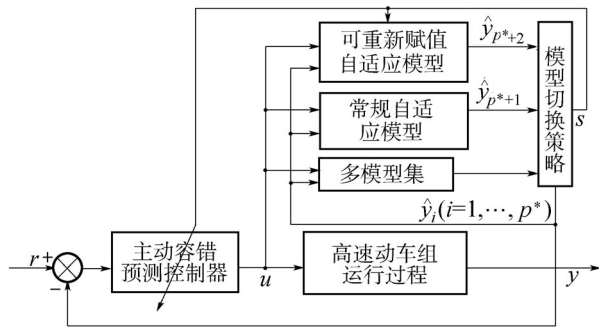


图1 控制系统结构框图  
Fig. 1 The frame of control system

### 3.2 主动容错预测控制算法(Predictive control algorithm with active fault-tolerance)

在系统故障或干扰状态下, 主动容错控制能够根据在线选择的最优控制模型, 更新控制律, 使得闭环系统能够安全稳定运行. 模型预测控制的最大优势就体现在滚动优化阶段, 这为控制律的在线更新、实时改善系统性能提供了一种非常可靠有效的方法<sup>[7]</sup>.

### 4 仿真实例(Simulation example)

以新一代CRH2-300C型高速动车组为对象进行仿真验证研究, 选取10000组样本数据进行减法聚类, 得到了多模型个数为6, 其工作点分别为(8, 1.2);(51, 17); (136, 84); (207, 182); (272, 302); (321, 413)<sup>[7]</sup>.

结合分类模式, 采用最小二乘法建立模型1-6如下:

模型 1:

$$y(k) - 0.1y(k - 1) = 4.494u(k - 1) + \xi(k).$$

模型 2:

$$y(k) - 0.1858y(k - 1) = 0.724u(k - 1) + \xi(k).$$

模型 3:

$$y(k) - 0.3y(k - 1) = 1.145u(k - 1) + \xi(k).$$

模型 4:

$$y(k) - 0.3041y(k - 1) = 0.827u(k - 1) + \xi(k).$$

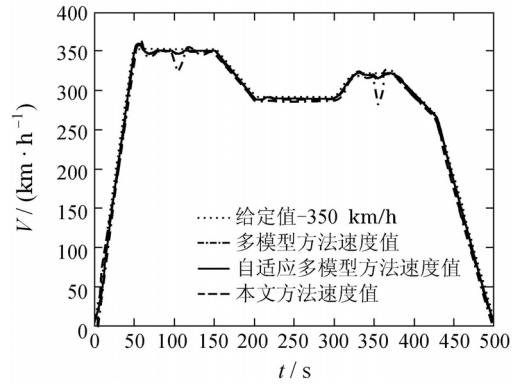
模型 5:

$$y(k) - 0.3175y(k - 1) = 0.623u(k - 1) + \xi(k).$$

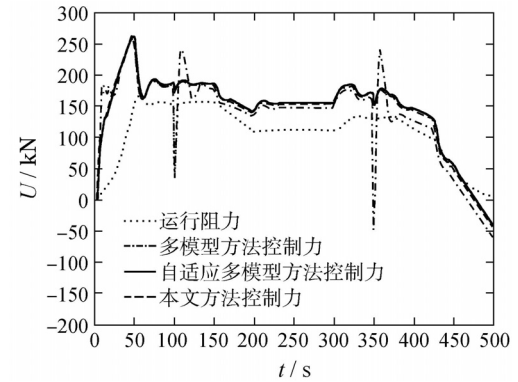
模型 6:

$$y(k) - 0.3308y(k - 1) = 0.525u(k - 1) + \xi(k).$$

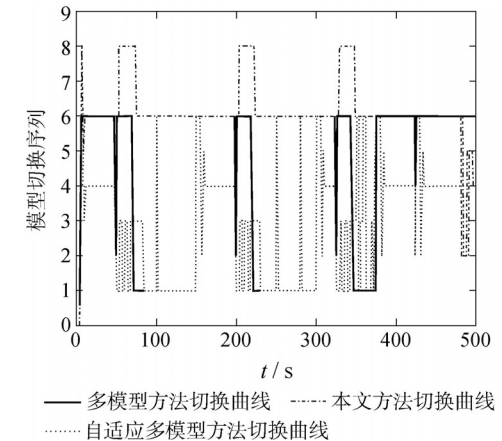
图2分别给出了多模型、自适应多模型和本文提出的方法得到的速度跟踪、控制力变化和模型切换曲线。



(a) 3种方法得到的速度跟踪曲线



(b) 3种方法得到的控制力曲线

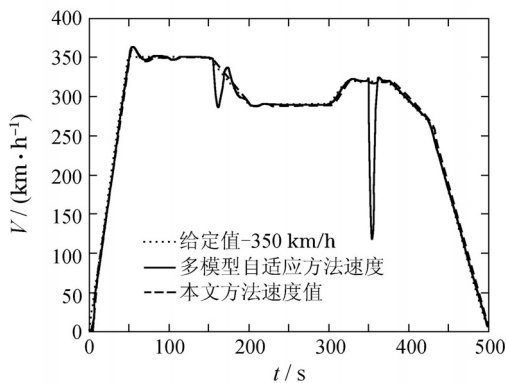


(c) 3种方法得到的模型切换曲线

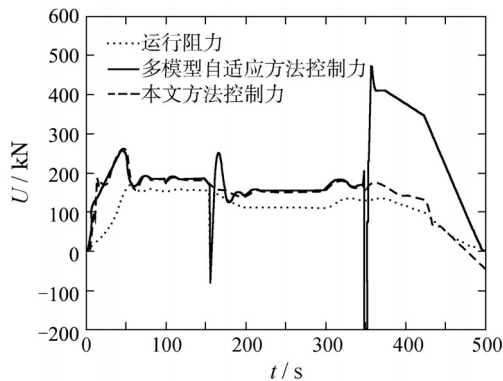
图2 3种方法得到的仿真曲线  
Fig. 2 Simulation curves of the three methods

从以上各图可以看出, 当  $t = 100$  和  $t = 350$  附近发生牵引/制动单元局部动力故障或干扰时, 多模型方法得到的速度曲线不能精确跟踪目标曲线, 容错能力差; 克服运行阻力时, 控制力出现急剧变化现象, 乘客舒适性指标没有得到很好的改善. 自适应多模型方法可以消除稳态误差, 控制力平缓变化, 但大部分时刻模型频繁切换, 能量消耗大. 本文方法既能改善速度跟踪曲线的暂态响应和乘客舒适性指标, 还能在每个采样时刻实现多模型间平缓切换, 克服了多模型自适应方法的弊端。

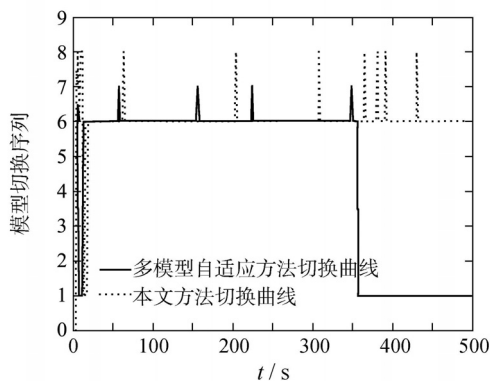
为了更好地模拟高速动车组运行过程中未知故障,在随机噪声下分别进行多模型自适应方法(多模型和常规自适应模型)和本文方法实验.选择噪声为幅值50 km/h,方差2500的白噪声序列,约占最大输出值的14.3%,仿真曲线如图3所示.



(a) 两种方法得到的速度跟踪曲线



(b) 两种方法得到的控制力曲线



(c) 两种方法得到的模型切换曲线

图3 两种方法得到的仿真曲线

Fig. 3 Simulation curves of the two methods

从图3可以看出,在150~200 s和350~500 s附近,多模型自适应方法不能很好地跟踪目标速度曲线,克服运行阻力和未知故障或干扰时,控制力出现较大跳变现象,模型间不能有效切换,能量消耗较大;本文方法在高速动车组整个运行过程中都能跟踪目标速度曲线,控制力保持平滑过渡,模型间有序切

换,节能效果较好,对未知故障或干扰响应速度快,系统容错能力得到一定程度的提高.

## 5 结论(Conclusion)

论文给出了由多模型和自适应模型集成描述高速动车组运行过程的主动容错预测控制方法.通过对比仿真试验,表明本文所提方法具有较好的容错能力和跟踪精度.

## 参考文献(References):

- [1] ZHUAN X, XIA X. Cruise control scheduling of heavy haul trains [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2006, 14(4): 757 – 766.
- [2] ZHUAN X, XIA X. Optimal scheduling and control of heavy haul trains equipped with electronically controlled pneumatic braking systems [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2007, 15(6): 1159 – 1166.
- [3] RAGHUNATHAN R S, KIM H D, SETOGUCHI T. Aerodynamics of high-speed railway train [J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 2002, 38(6/7): 469 – 514.
- [4] WANG M R, SONG Y D, SONG Q, et al. Fuzzy-adaptive fault-tolerant control of high speed train considering traction/braking faults and nonlinear resistive forces [C] // *Proceedings of Lecture Notes in Computer Science*. Berlin: Springer, 2011: 563 – 573.
- [5] 王昕, 王中杰, 杨辉, 等. 采用逐维定位的多模型自适应解耦控制器. 控制理论与应用 [J]. 2006, 23(5): 711 – 716, 723. (WANG Xin, WANG Zhongjie, YANG Hui, et al. Multiple-model adaptive decoupling controller employing dimension-by-dimension approach [J]. *Control Theory & Applications*, 2006, 23(5): 711 – 716, 723.)
- [6] 王昕, 王中杰, 杨辉, 等. 多模型自适应控制的分层递阶构造与覆盖性质分析. 控制理论与应用 [J]. 2006, 23(3): 367 – 372, 377. (WANG Xin, WANG Zhongjie, YANG Hui, et al. Multiple models adaptive controller hierarchical structure and covering analysis [J]. *Control Theory & Applications*, 2006, 23(3): 367 – 372, 377.)
- [7] 杨辉, 张坤鹏, 王昕, 等. 高速列车多模型广义预测控制方法. 铁道学报 [J]. 2011, 33(8): 80 – 87. (YANG Hui, ZHANG Kunpeng, WANG Xin, et al. Generalized multiple-model predictive control method of high-speed train [J]. *Journal of the China Railway Society*, 2011, 33(8): 80 – 87.)
- [8] ZHUAN X, XIA X. Speed regulation with measured output feedback in the control of heavy haul trains [J]. *Automatica*, 2008, 44(1): 242 – 247.
- [9] 曾宇清, 于卫东, 扈海军, 等. 高速铁路牵引计算层次约束方法. 中国铁道科学 [J]. 2009, 30(6): 97 – 103. (ZENG Yuqing, YU Weidong, HU Haijun, et al. Hierarchical restriction method for the traction calculation of high speed railway [J]. *China Railway Science*, 2009, 30(6): 97 – 103.)

## 作者简介:

杨辉 (1965–), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为智能交通系统控制理论、复杂系统建模、控制与优化等, E-mail: yhshuo@263.net;

张坤鹏 (1986–), 男, 助教, 主要研究方向为高速动车组非线性控制等, E-mail: ecjtu.zhangkunpeng@163.com, 本文通信作者;

王昕 (1972–), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为多模型自适应控制、多变量智能解耦、复杂工业过程建模、控制与优化等, E-mail: wangxin26@sjtu.edu.cn.