

城轨ATO系统子空间预测控制方法

颜争, 兰清群

安徽交通职业技术学院, 安徽 合肥 230051

摘要:为提高城市轨道交通列车自动驾驶(automatic train operation,ATO)系统跟踪给定运行曲线的精度,基于子空间辨识方法,利用列车运行的历史数据,建立与实际运行状态相吻合的非线性子空间预测控制模型,设计子空间预测控制器,实现模型辨识数据和参数在线更新。运用MATLAB软件对比分析传统动力学模型与子空间预测控制模型的跟踪能力。结果表明:子空间预测控制模型在速度、位移、加速度的跟踪精度上有明显优势,牵引/制动特性更加缓和。子空间预测控制模型可以保证列车运行安全、准时,并提高乘客乘坐舒适性。

关键词:城轨列车;ATO系统;子空间;预测控制;MATLAB

中图分类号:U231.6

文献标志码:A

文章编号:1672-0032(2022)01-0035-09

引用格式:颜争,兰清群.城轨ATO系统子空间预测控制方法[J].山东交通学院学报,2022,30(1):35-43.

YAN Zheng, LAN Qingqun. Subspace predictive control methods of urban rail transit for ATO system[J].

Journal of Shandong Jiaotong University,2022,30(1):35-43.

0 引言

随着城市化的快速发展,城市人口密度迅速增长,带来严重的交通拥堵问题,城市轨道交通列车(以下简称城轨列车)的运用和快速发展,有效缓解了这一难题。城轨列车具有运量大,安全系数和准时性高,舒适性好等优势,已成为城市发展的重要交通工具之一^[1]。目前,城轨列车自动控制(automatic train control,ATC)系统确保了列车安全、准时、舒适的运行,其子系统列车自动驾驶(automatic train operation,ATO)系统为列车提供了自动驾驶模式^[2],能有效避免列车运行过程中的人为因素造成的事故,保证城轨列车安全。目前城轨ATO是站与站之间的自动驾驶,即由司机手动关门后,启动ATO模式,列车将自动起动车门、牵引、惰性、制动、对标、停车、开门(可设置为手动开门),由于城轨列车需要对标停车,车门与屏蔽门对标误差在 ± 0.5 m(不同地铁公司要求不同)以内,否则车门将无法打开,造成列车误点、重新对标、列车运行图紊乱及旅客心理恐慌等事故的发生。

国内外学者对ATO控制算法展开了广泛研究。目前控制算法主要分为3类^[3-4]:第1类是基于动力学模型的经典比例-积分-微分(proportion integral differential,PID)控制算法,根据理论和实际运行经验,设定列车运行参数,确定列车运行速度曲线,需要对列车运行速度多次控制,控制稳定性不理想,停车精确度小;第2类为参数自适应控制算法,针对经典PID控制算法进行改进,加入反馈回路实现实时调整列车运行曲线,以满足复杂的运行环境和工况;第3类是智能控制算法,利用算法的自学习能力,仅设定初始参数,列车运行过程中控制算法可以自学习,实时更新参数,适应任意环境下的列车自动控制,达到高精度控制目标。智能控制算法的实时性和高精度性已成为目前ATO控制算法的发展趋势^[5]。郭洋洋^[6]分析高速列车的多质点模型,把模糊智能预测控制方法运用到列车运行控制中,提高行车控制速度精度和乘坐舒适度;黄江平等^[7]提出了轨道列车的粒子群节能控制算法,引用动态学习因子和惩罚函数改进

收稿日期:2021-03-12

基金项目:安徽高校自然科学研究重点项目(KJ2019A1069,KJ2019A1075)

第一作者简介:颜争(1987—),男,合肥人,讲师,工学硕士,主要研究方向为控制理论与控制工程,E-mail:120143455@qq.com。

粒子群算法,控制列车速度达到节能效果;刘建威等^[8]利用改进遗传算法在控制中实时寻找最优工况,控制城轨列车运行速度,实现节能运行;Sandidzadeh等^[9]在模糊预测控制中加入列车运行控制优化策略,分恒速和自动停车2阶段实现新型模糊预测控制,提高列车的控制精度,使列车节能运行;武研等^[10]采用神经网络离线训练和在线学习控制方法,实现地铁列车运行的精确控制,提高列车乘坐的舒适性。以上智能控制方法都是运用经验模型、优化策略等实现列车运行控制,缺乏数据基础,具有一定的局限性。子空间预测控制方法基于数据驱动理念,从历史运行数据中辨识得到控制模型参数,在控制过程中利用数据反馈在线更新模型参数,达到精确控制的目标。本文将子空间预测控制方法应用到城轨列车的运行控制中,利用列车运行的历史数据,建立列车运行子空间预测模型,设计子空间预测控制器,实现对列车运行的精准跟踪预测控制。

1 城轨列车动力学模型

城轨列车运行过程受到不同来源、不同方向的作用力,比如牵引电机的牵引力和制动力、轮轨摩擦阻力以及隧道活塞风和空气阻力等,根据动力学原理,可以把这些作用力关系转化为可计算、可控制的方程式,不可控制的阻力则用近似或者经验方程式代替^[11-12]。最终只考虑沿列车运行方向驱动列车运行的牵引力、与列车运行方向相反的制动力和运行阻力2个方向的作用力。

1.1 城轨列车运行作用力

1.1.1 列车运行牵引力

A型城轨列车运行牵引力 F_t 计算公式^[13]为:

$$\{F_t\}_{\text{kN}} = \begin{cases} 320 - 0.04779\{v_t\}_{\text{km/h}}, & 0 \leq \{v_t\}_{\text{km/h}} \leq 40 \\ 7400/\{v_t\}_{\text{km/h}}, & 40 < \{v_t\}_{\text{km/h}} \leq 90 \end{cases}, \quad (1)$$

式中 v_t 为 t 时刻列车速度。

1.1.2 列车运行制动力

A型城轨列车运行制动力 F_b 计算公式^[14]为:

$$\{F_b\}_{\text{kN}} = \left[0.372 \times \frac{17\{v_t\}_{\text{km/h}} + 100}{60\{v_t\}_{\text{km/h}} + 100} + 0.0012 \times (110 - \{v_0\}_{\text{km/h}}) \right] (600 + 40n_1 + 25n_2), \quad (2)$$

式中: v_0 为列车初速度, n_1 为列车编组动车数, n_2 为列车编组拖车数。

1.1.3 列车运行阻力

列车运行阻力 F_z 由基本运行阻力 F_{zj} 和附加运行阻力 F_{zf} 组成^[15]。 F_{zj} 主要是列车运行时受到的空气阻力,还包括列车车辆机械传动各部件之间的运行阻力、轮轨之间的摩擦阻力等,其经验计算公式为:

$$\{F_{zj}\}_{\text{kN}} = 2.7551 + 0.014\{v_t\}_{\text{km/h}} + 0.00075\{v_t\}_{\text{km/h}}^2 \quad (3)$$

F_{zf} 为不确定参数,主要受轨道线路情况和运行环境影响,线路情况主要包含坡道、曲线和隧道3个方面,运行环境涵盖雨雪天气、大风天气、轮对磨损等不可测因素。根据经验,城轨列车 F_{zf} 在动力学上只考虑线路坡道阻力 F_{pd} 、曲线阻力 F_{qx} 和隧道阻力 F_{sd} ,即:

$$\{F_{zf}\}_{\text{kN}} = \{F_{pd}\}_{\text{kN}} + \{F_{qx}\}_{\text{kN}} + \{F_{sd}\}_{\text{kN}} \approx \left(\{I\}_{\%} + \frac{E}{\{R\}_{\text{km}}} + 0.00013\{L_s\}_{\text{km}} \right), \quad (4)$$

式中: I 为轨道线路坡度,上坡为“+”,下坡为“-”; R 为轨道线路运行的曲线半径; L_s 为隧道长度; E 为常数,根据经验 $E \approx 450 \sim 800$,我国通常取600。

根据动力学关系,结合式(1)~(4),即可得出列车运行加速度 a_t 、 v_t 和位移 s_t 的表达式为:

$$\begin{cases} \{a_t\}_{\text{m/s}^2} = \frac{\{F_t\}_{\text{kN}} - \{F_b\}_{\text{kN}} - \{F_z\}_{\text{kN}}}{\{m_t\}_t} \\ \{v_t\}_{\text{km/h}} = \{v_{t-\Delta t}\}_{\text{km/h}} + 3.6\{a_t\}_{\text{m/s}^2}\{\Delta t\}_s \\ \{s_t\}_m = \{s_{t-\Delta t}\}_m + 0.5\{a_t\}_{\text{m/s}^2}\{\Delta t\}_s^2 \end{cases}, \quad (5)$$

式中: Δt 为取样间隔时间, m_t 为 t 时刻列车总质量。

城轨列车牵引工况时 $F_b=0$,制动工况时 $F_t=0$ 。通过式(1)~(5)可知,城轨列车的 a_t 、 v_t 和 s_t 的表达式都是与 t 有关的高次幂非线性方程, Δt 越小计算量越大,计算精确度越高,且非线性导致系统的不可控性比较明显。

1.2 城轨列车运行阶段

牵引电机是列车运行的动力源,其运行特性决定列车的运行状态。一般列车牵引过程包括启动阶段、中速阶段、高速阶段3个运行阶段^[16]。

启动阶段(恒转矩运行阶段)利用牵引逆变器保证运行过程中牵引电机的电压、频率不变,低频时适当提高电压以补偿电机内部定子绕组漏阻抗的损耗,输出恒定的牵引力,使列车在启动时保持加速度不变,满足舒适度的要求。

中速阶段(恒功率运行阶段)牵引电机电压达到最大值后,保持不变,继续提高频率,此时牵引力有所减小,但是能够充分利用牵引电机的运行功率,提高牵引电机的功率利用率,避免牵引电机过载运行。

高速阶段(自然特性阶段)牵引电机电压和转差频率不变,继续增加频率,列车牵引力与频率的平方成反比减小,高速运行时,列车不需要过大的牵引力,只需保持高速运行状态,满足列车牵引的“牛马特性”要求。

2 城轨列车子空间预测控制方法

2.1 子空间预测控制模型

动力学模型和牵引电机的牵引特性都存在不可控制、不可观测的因素。保证车辆安全、稳定、准时运行的主要因素为 v_t 、 a_t 和 s_t ,影响因素为 F_t 、 F_b 、 F_z 等,动力学模型需确定系统参数,属于白箱模型^[17],而列车运行过程是非线性状态,需考虑车辆结构振动、载质量变化、隧道活塞风以及雨雪天气等动态参数,是一种黑箱模型,此时动力学模型的应用会受到诸多条件的限制。状态空间预测模型能较好的解决该问题,其模型参数由系统历史数据辨识得出,不仅能描述列车运行时的输入/输出变化规律,也包含了运行过程中不可观测因素造成的输出偏差,更接近列车实际控制关系^[18]。

建立城轨列车状态空间预测模型

$$\begin{cases} \mathbf{x}_{t+\Delta t} = \mathbf{A}\mathbf{x}_t + \mathbf{B}\mathbf{u}_t + \mathbf{w}_{t1} \\ \mathbf{y}_t = \mathbf{C}\mathbf{x}_t + \mathbf{D}\mathbf{u}_t + \mathbf{w}_{t2} \end{cases}, \quad (6)$$

式中: \mathbf{x}_t 、 $\mathbf{x}_{t+\Delta t}$ 分别为 t 、 $t+\Delta t$ 时刻列车运行状态变量,与列车的运行状态、车辆结构以及轮轨关系等有关; \mathbf{u}_t 为列车的控制变量,由 F_t 、 F_b 、 F_z 组成; \mathbf{y}_t 为列车的输出变量,由 v_t 、 a_t 和 s_t 三维变量组成; \mathbf{A} 、 \mathbf{B} 、 \mathbf{C} 、 \mathbf{D} 为模型状态矩阵,由一阶泰勒公式展开获得,其中 $\mathbf{A} = \frac{\partial h(\mathbf{x}_t, \mathbf{u}_t)}{\partial \mathbf{x}_t^T} \Big|_{\mathbf{x}_t=\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_t=\mathbf{u}_0}$, $\mathbf{B} = \frac{\partial h(\mathbf{x}_t, \mathbf{u}_t)}{\partial \mathbf{u}_t} \Big|_{\mathbf{x}_t=\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_t=\mathbf{u}_0}$, $\mathbf{C} =$

$\frac{\partial g(\mathbf{x}_t, \mathbf{u}_t)}{\partial \mathbf{x}_t^T} \Big|_{\mathbf{x}_t=\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_t=\mathbf{u}_0}$, $\mathbf{D} = \frac{\partial g(\mathbf{x}_t, \mathbf{u}_t)}{\partial \mathbf{u}_t} \Big|_{\mathbf{x}_t=\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_t=\mathbf{u}_0}$, \mathbf{x}_0 为初始时刻列车运行状态量, \mathbf{u}_0 为初始时刻列车的控制变量; \mathbf{w}_{t1} 、 \mathbf{w}_{t2} 分别为过程不可观测变量和输出不可观测变量, $\mathbf{w}_{t1} = \mathbf{e}_{t1} + h(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) - \mathbf{A}\mathbf{x}_0 - \mathbf{B}\mathbf{u}_0$, $\mathbf{w}_{t2} = \mathbf{e}_{t2} + g(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) - \mathbf{C}\mathbf{x}_0 - \mathbf{D}\mathbf{u}_0$,其中 \mathbf{e}_{t1} 和 \mathbf{e}_{t2} 分别为列车运行中的随机干扰序列,包含列车运行中的不可观测因素。

为便于设计运行控制器,假设 (\mathbf{A}, \mathbf{B}) 能控, (\mathbf{A}, \mathbf{C}) 能观测, \mathbf{u}_t 是拟平稳变量,且由 F_t 、 F_b 、 F_z 唯一确定,与 \mathbf{w}_{t1} 、 \mathbf{w}_{t2} 不相关。

目前对模型(6)中矩阵 \mathbf{A} 、 \mathbf{B} 、 \mathbf{C} 、 \mathbf{D} 的取值以及 \mathbf{w}_{t1} 、 \mathbf{w}_{t2} 协方差的估算主要采用机理建模、智能建模和子空间辨识3种方法^[19]。子空间辨识方法具有数值稳定、运算速度快、无局部极小值等优点^[20-21],得到广泛应用。

利用历史数据构建历史输入变量 Hankel 矩阵 \mathbf{U}_p 和未来预测输入变量矩阵 \mathbf{U}_f :

$$\mathbf{U}_p = \begin{bmatrix} u_0 & u_1 & \cdots & u_{j-1} \\ u_1 & u_2 & \cdots & u_j \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ u_{i-1} & u_i & \cdots & u_{i+j-2} \end{bmatrix}, \quad (7)$$

$$\mathbf{U}_f = \begin{bmatrix} u_i & u_{i+1} & \cdots & u_{i+j-1} \\ u_{i+1} & u_{i+2} & \cdots & u_{i+j} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ u_{2i-1} & u_{2i} & \cdots & u_{2i+j-2} \end{bmatrix}, \quad (8)$$

矩阵 \mathbf{U}_p 、 \mathbf{U}_f 的阶数 i 、 j 根据历史数据确定。

为方便对模型(6)进行迭代运算,定义矩阵 Δ_i 、 \mathbf{X}_p 、 \mathbf{X}_f 为:

$$\Delta_i = [\mathbf{A}^{i-1}\mathbf{B} \quad \mathbf{A}^{i-2}\mathbf{B} \quad \cdots \quad \mathbf{A}\mathbf{B} \quad \mathbf{B}], \quad (9)$$

$$\mathbf{X}_p = [x_{-j} \quad x_{-j+1} \quad \cdots \quad x_{-1} \quad x_0], \quad (10)$$

$$\mathbf{X}_f = [x_0 \quad x_1 \quad \cdots \quad x_2 \quad x_{j-1}], \quad (11)$$

定义扩展观测矩阵 Γ_i 、确定性下三角 Toeplitz 矩阵 \mathbf{H}_i 为:

$$\Gamma_i = [\mathbf{C} \quad \mathbf{C}\mathbf{A} \quad \mathbf{C}\mathbf{A}^{i-2} \quad \cdots \quad \mathbf{C}\mathbf{A}^{i-1}]^T, \quad (12)$$

$$\mathbf{H}_i = \begin{bmatrix} \mathbf{D} & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \mathbf{C}\mathbf{B} & \mathbf{D} & 0 & \cdots & 0 \\ \mathbf{C}\mathbf{A}\mathbf{B} & \mathbf{C}\mathbf{B} & \mathbf{D} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ \mathbf{C}\mathbf{A}^{i-2}\mathbf{B} & \mathbf{C}\mathbf{A}^{i-3}\mathbf{B} & \mathbf{C}\mathbf{A}\mathbf{B} & \cdots & \mathbf{D} \end{bmatrix}. \quad (13)$$

结合定义矩阵(7)~(13),得到子空间预测模型:

$$\begin{cases} \mathbf{Y}_f = \Gamma_i \mathbf{X}_f + \mathbf{H}_i \mathbf{U}_f + \mathbf{Y}_f^s \\ \mathbf{Y}_p = \Gamma_i \mathbf{X}_p + \mathbf{H}_i \mathbf{U}_p + \mathbf{Y}_p^s, \\ \mathbf{X}_f = \mathbf{A}^i \mathbf{X}_p + \Delta_i \mathbf{U}_p \end{cases} \quad (14)$$

式中: \mathbf{Y}_f 为第 i 时刻到 $2i+j-2$ 时刻的控制输出矩阵, $\mathbf{Y}_f = \begin{bmatrix} y_i & y_{j+1} & \cdots & y_{i+j-1} \\ y_{i+1} & y_{i+2} & \cdots & y_{i+j} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ y_{2i-1} & y_{2i} & \cdots & y_{2i+j-2} \end{bmatrix}$; \mathbf{Y}_p 为第 0 时刻到 $i+$

$j-1$ 时刻的控制输出矩阵, $\mathbf{Y}_p = \begin{bmatrix} y_0 & y_1 & \cdots & y_{j-1} \\ y_1 & y_2 & \cdots & y_j \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ y_{i-1} & y_i & \cdots & y_{i+j-1} \end{bmatrix}$; \mathbf{Y}_f^s 、 \mathbf{Y}_p^s 为前一时刻的控制输出矩阵。

2.2 子空间预测控制器设计

由模型(14)可知,给定列车运行的理想曲线 $\mathbf{R}_f(v_i, a_i, s_i)$,预测控制问题转变为根据历史数据由 \mathbf{U}_p 和 \mathbf{Y}_p 预测 \mathbf{Y}_f ,再根据 \mathbf{Y}_f 和 \mathbf{R}_f 的差值不断调整控制变量,达到精确跟踪给定理想曲线。

模型(14)可运用子空间辨识方法中的斜投影算子方法^[22-24],最优预测控制输出 $\hat{\mathbf{Y}}_f$ 由 \mathbf{Y}_f 的行空间矩阵 $[\mathbf{W}_p^T \quad \mathbf{U}_f^T]^T$ ($\mathbf{W}_p = [\mathbf{Y}_p^T \quad \mathbf{U}_p^T]^T$) 组成的正交投影获得,即

$$\hat{\mathbf{Y}}_f = \mathbf{Y}_f \begin{bmatrix} \mathbf{W}_p \\ \mathbf{U}_f \end{bmatrix} = \mathbf{L}_\omega \mathbf{W}_p + \mathbf{L}_u \mathbf{U}_f, \quad (15)$$

式中: \mathbf{L}_ω 和 \mathbf{L}_u 为矩阵 \mathbf{W}_p 和 \mathbf{U}_f 在矩阵 \mathbf{Y}_f 上 2 个正交投影分量。

利用最小二乘法求解式(15),得:

$$\min_{L_\omega, L_u} \left\| Y_f - [L_\omega \quad L_u] \begin{bmatrix} W_p \\ U_f \end{bmatrix} \right\|_F^2, \quad (16)$$

通常采用 LQ 分解来改善式(16)的运算性能^[25],有

$$\begin{bmatrix} W_p \\ U_f \\ Y_f \end{bmatrix} \stackrel{LQ}{=} \begin{bmatrix} L_{11} & 0 & 0 \\ L_{21} & L_{22} & 0 \\ L_{31} & L_{32} & L_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_1^T \\ Q_2^T \\ Q_3^T \end{bmatrix}, \quad (17)$$

$$\text{令 } L = \begin{bmatrix} L_{11} & 0 & 0 \\ L_{21} & L_{22} & 0 \\ L_{31} & L_{32} & L_{33} \end{bmatrix} = [L_{31} \quad L_{32}] \begin{bmatrix} L_{11} & 0 \\ L_{21} & L_{22} \end{bmatrix}^\dagger, \text{ 其中 } \begin{bmatrix} L_{11} & 0 \\ L_{21} & L_{22} \end{bmatrix}^\dagger \text{ 表示 Moore-Penrose 伪逆运算。}$$

得到 L_ω 和 L_u 的计算式为:

$$\begin{cases} L_\omega = L(:, 1:4i) \\ L_u = L(:, 4i + 1:\text{end}) \end{cases} \circ \quad (18)$$

为了获得 \hat{Y}_f , 定义目标函数

$$J = (R_f - \hat{Y}_f)^T Q_y (R_f - \hat{Y}_f) + U_f^T Q_u U_f, \quad (19)$$

式中: Q_y 和 Q_u 分别为输出权矩阵和控制权矩阵,均为对角正定矩阵,可调节列车控制系统的超调量、稳态误差等性能。

将式(15)代入式(19)可得:

$$J = (R_f - (L_\omega W_p + L_u U_f))^T Q_y (R_f - (L_\omega W_p + L_u U_f)) + U_f^T Q_u U_f, \quad (20)$$

通过求偏导,令 $\frac{\partial J}{\partial U_f} = \mathbf{0}_{i \times 1}$, 得到 J 为极小值时的 U_f , 则

$$U_f = (L_u^T Q_y L_u + Q_u)^{-1} L_u^T Q_y (R_f - L_\omega W_p). \quad (21)$$

U_f 由历史和预测控制数据组成,在下一时刻,将第一分量的预测值施加于列车控制,则

$$u_f = U_f(:, 1). \quad (22)$$

2.3 子空间预测控制算法

子空间预测控制方法是根据预测值与给定理想曲线之间的误差,不断滚动优化,形成闭环系统实现列车运行预测控制。

第 1 步:采集列车运行历史输入与输出数据,设定 Q_y 和 Q_u 。

第 2 步:根据式(7)(8)构建 Hankel 矩阵 U_p 和 U_f 。

第 3 步:根据式(14)构建控制输出矩阵 Y_f 和 Y_p ,得到 W_p 。

第 4 步:根据式(17)(18)迭代得出 L_ω 、 L_u ,根据公式(21)得出跟踪理想曲线的最优 U_f 。

第 5 步:根据式(22)将控制变量第一分量施加于列车控制系统。

第 6 步:下一采样时刻,滚动优化历史输入、输出数据,转第 2 步。

3 仿真分析

以某城轨列车实际参数为例进行仿真分析,列车编组为 4M2T,选取典型运行区间 A,列车 AW2 工况主要参数如表 1 所示,如对其他城轨列车进行研究只需更改相应的参数。

表1 列车AW2工况主要参数

列车 总质量/t	运行 距离/m	线路 坡度/%	最大速度/ ($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$)	区间 A 内速度限制/($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$)			列车牵引特性			列车制动特性	
				0~ 100 m	100~ 400 m	400~ 1100 m	0~34 km/h	34~54 km/h	54~80 km/h	最大 制动力/kN	电/空制动转换 车速/($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$)
346.6	1100	1	80	50	75	70	恒转矩	恒功率	自然特性	371.9	5

城轨列车的牵引/制动特性曲线如图1所示。根据图1,结合城轨列车牵引时的恒转矩-恒功率-自然特性,制动时的自然特性-恒功率-恒转矩特性,得到城轨列车在区间A中的理想 v_t 曲线如图2所示。理想 s_t 和 a_t 曲线可由理想 v_t 曲线计算得出。

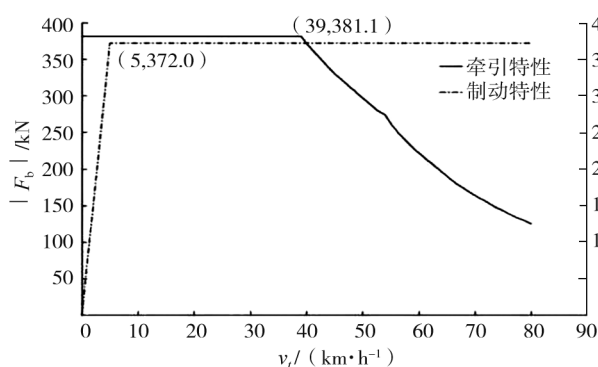
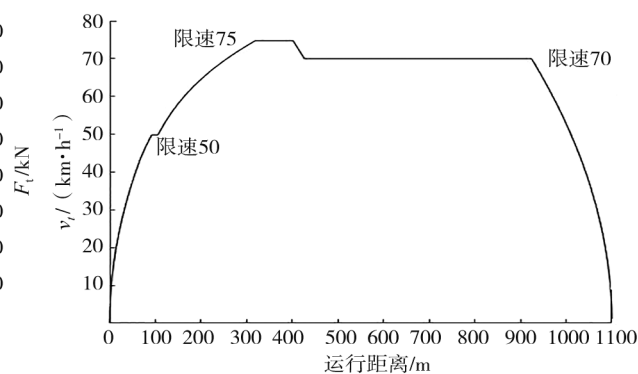
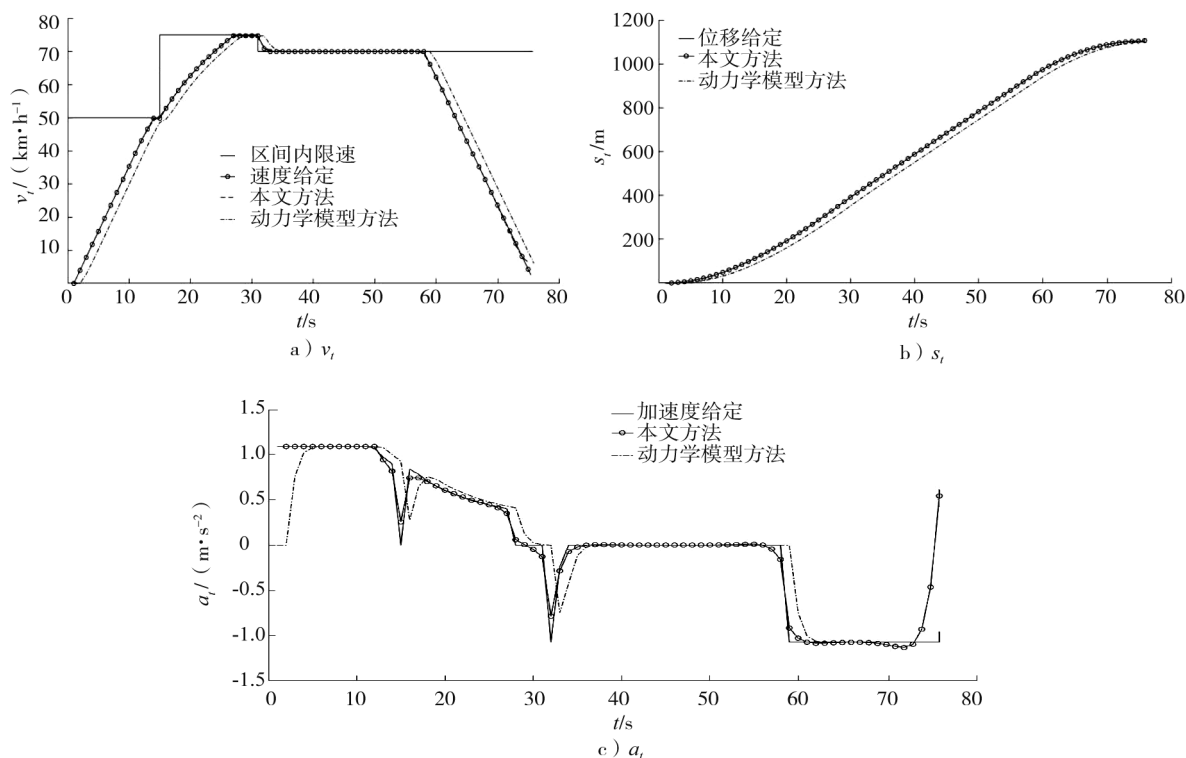


图1 城轨列车牵引/制动特性曲线

图2 城轨列车区间A理想 v_t 曲线

运用 MATLAB 仿真软件,利用 500 组城轨列车的输入与输出数据样本,分别采用子空间预测控制模型和动力学模型 2 种控制方法仿真得到城轨列车跟踪给定 v_t 、 s_t 和 a_t 的曲线如图3所示。

图3 城轨列车跟踪给定 v_t 、 s_t 和 a_t 的对比仿真结果

由图3可知:动力学模型得到的预测跟踪曲线在 v_i 、 s_i 和 a_i 上都滞后于给定曲线;子空间预测控制模型优于动力学模型,能得到较好的预测跟踪效果。

动力学模型与子空间预测控制模型的跟踪误差(最大误差、最小误差、平均误差和协方差)如表2所示。由表2可知:子空间预测控制模型得到的 v_i 跟踪误差、 s_i 跟踪误差和 a_i 跟踪误差均小于动力学模型控制方法,子空间预测控制模型的跟踪给定运行曲线的精度更高。

表2 动力学模型与子空间预测控制模型的跟踪误差

控制方法	v_i 跟踪误差/($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)				s_i 跟踪误差/m				a_i 跟踪误差/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)			
	最大	最小	平均	协方差	最大	最小	平均	协方差	最大	最小	平均	协方差
子空间 预测控制	2.089	0	0.118	0.078	0.450	0	0.040	0.008	1.090	0	0.051	0.022
动力学 模型	5.412	0	2.649	5.496	39.075	0	27.769	138.430	1.090	0	0.122	0.077

子空间预测控制模型与动力学模型控制方法的 F_t 、 F_b 仿真结果如图4所示。由图4可知:子空间预测控制模型在启动时能快速响应,进入恒转矩工况(a_i 保持不变);制动过程中 a_i 变化比较缓和,提高了乘客乘坐的舒适性;动力学模型的 F_t 、 F_b 明显滞后,这也是跟踪 v_i 、 s_i 和 a_i 滞后给定曲线的原因。

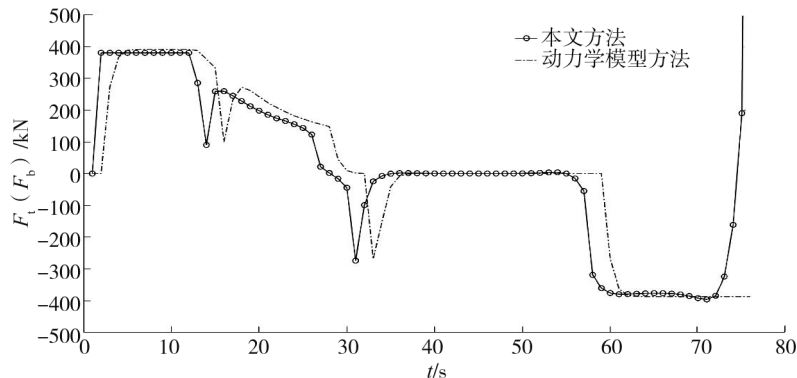


图4 F_t 、 F_b 仿真结果对比

4 结语

根据城轨列车的实际运行状态,结合列车的牵引/制动特性,给出运行区间的理想运行曲线,利用城轨列车的历史运行数据,基于子空间辨识方法搭建了城轨ATO系统子空间预测控制模型,设计了子空间预测控制器,运行数据可以不断滚动优化历史数据、在线更新模型参数。通过MATLAB软件验证了子空间预测控制模型比动力学模型在速度、位移和加速度的跟踪精度上有明显优势,牵引/制动特性也更加缓和,在保证城轨列车运行安全、准时的前提下,提高了乘客乘坐的舒适性。

参考文献:

- [1]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.
TANG Tao, HUANG Liangji. A survey of control algorithm for automatic train operation[J]. Journal of the China Railway Society, 2003, 25(2): 98-102.
- [2]龙广钱,尹逊政.城市轨道交通列车节能控制策略研究[J].铁路计算机应用,2018,27(7):90-94.
LONG Guangqian, YIN Xunzheng. Energy saving control strategy of urban rail transit train[J]. Railway Computer Application,

- 2018,27(7):90-94.
- [3] 路飞,宋沐民.用于地铁列车的智能行车控制方法[J].计算机工程与应用,2009,45(32):203-205.
LU Fei, SONG Mumin. Intelligent traffic control method for subway system[J]. Computer Engineering and Applications, 2009, 45(32):203-205.
- [4] 杨辉,付雅婷.列车运行建模与速度控制方法综述[J].华东交通大学学报,2018,35(5):1-8.
YANG Hui, FU Yating. A survey of modeling and speed control methods for operation of trains[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2018,35(5):1-8.
- [5] 张茜.城市轨道交通列车自动运行(ATO)多目标控制策略研究[D].北京:北京交通大学,2014.
ZHANG Xi. Study on multi-objective control strategies of automatic train operation in urban rail transit[D]. Beijing:Beijing Jiaotong University, 2014.
- [6] 郭洋洋.基于模糊预测控制的高速列车自动驾驶研究[D].兰州:兰州交通大学,2020.
GUO Yangyang. Research on automatic operation of high-speed trains based on fuzzy predictive control[D]. Lanzhou:Lanzhou Jiaotong University, 2020.
- [7] 黄江平,程绍榕.改进粒子群算法的轨道列车节能控制优化[J].华东交通大学学报,2020,37(2):56-63.
HUANG Jiangping, CHENG Shaorong. Study on energy-saving control of railway train based on improved PSO[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2020,37(2):56-63.
- [8] 刘建威,常柱刚,邓海波,等.基于改进遗传算法的城轨列车节能运行模型[J].铁道科学与工程学报,2019,16(11):2881-2888.
LIU Jianwei, CHANG Zhugang, DENG Haibo, et al. Energy-saving operation model for urban rail train based on improved genetic algorithm[J]. Journal of Railway Science and Engineerin, 2019,16(11):2881-2888.
- [9] SANDIDZADEH M A, SHAMSZADEH B. Improvement of automatic train operation using enhanced predictive fuzzy control method[J]. Reliability and Safety in Railway, 2012,49(3):121-140.
- [10] 武妍,施鸿宝.基于神经网络的地铁列车运行过程的集成型智能控制[J].铁道学报,2000,22(3):10-15.
WU Yan, SHI Hongbao. Automatic subway train operation control based on neural network and other intelligent control methods[J]. Journal of the China Railway Society, 2000,22(3):10-15.
- [11] 宋琦,顾青,刘峰,等.高速列车的自适应速度及位置控制[J].控制工程,2010,17(增刊1):35-37.
SONG Qi, GU Qing, LIU Feng, et al. Adaptive positioning and velocity control of high speed train systems[J]. Control Engineering of China, 2010,17(Suppl.1):35-37.
- [12] 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,2013,35(7):68-73.
LUO Hengyu, XU Hongze. Study on model reference adaptive control of ATO system[J]. Journal of the China Railway Society, 2013,35(7):68-73.
- [13] 饶忠.列车牵引计算[M].北京:中国铁道出版社,2006.
- [14] 王月明.城市轨道交通列车运行计算[M].北京:科学出版社,2016.
- [15] 芦建明,罗闻.城市轨道交通列车牵引与操纵[M].成都:西南交通大学出版社,2016.
- [16] 何晔,胡彩凤,吴能峰,等.地铁车辆牵引仿真计算[J].铁道机车车辆,2015,35(6):63-68.
HE Ye, HU Caifeng, WU Nengfeng, et al. Simulation calculations of metro tractions[J]. Railway Locomotive & Car, 2015, 35(6):63-68.
- [17] 张胜楠.线性和 Hammerstein 非线性子空间模型的抗扰辨识方法[D].大连:大连理工大学,2019.
ZHANG Shengnan. Anti-disturbance identification of linear and Hammerstein nonlinear subspace models[D]. Dalian:Dalian University of Technology, 2019.
- [18] 袁路生,颜争,龚锦红,等.时变遗忘因子的高速列车自适应子空间预测控制[J].铁道学报,2013,35(5):54-61.
ZHONG Lusheng, YAN Zheng, GONG Jinhong, et al. Adaptive subspace predictive control of high-speed train based on time-varying forgetting factors[J]. Journal of the China Railway Society, 2013,35(5):54-61.
- [19] WILLS A G, KNAGGE G, NINNESS B. Fast linear model predictive control via custom integrated circuit architecture[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2011,20(1):59-71.
- [20] HOU J, CHEN F W, LI P, et al. Fixed point iteration-based subspace identification of hammerstein state-space models[J]. IET Control Theory & Applications, 2019,13(8):1173-1181.

- [21] 衷路生, 宋执环. 局部加权组合状态空间系统正交梯度辨识[J]. 控制与决策, 2008, 23(8): 879-882.
ZHONG Lusheng, SONG Zhihuan. Identification of composite local linear weighted state-space systems by orthogonal gradient search[J]. Control and Decision, 2008, 23(8): 879-882.
- [22] 衷路生, 宋执环. 基于正交梯度搜索的动态系统递阶优化辨识[J]. 自动化学报, 2008, 34(6): 711-715.
ZHONG Lusheng, SONG Zhihuan. Hierarchical optimization identification of LTI state-space systems by projected gradient search[J]. Acta Automatica Sinica, 2008, 34(6): 711-715.
- [23] SANTOS P L, RAMOS J A, CARVALHO J. Subspace identification of linear parameter-varying systems with innovation-type noise models driven by general inputs and a measurable white noise time-varying parameter vector[J]. International Journal of Systems Science, 2008, 39(9): 897-911.
- [24] 侯杰, 刘涛. 基于新息估计和正交投影的闭环子空间模型辨识[J]. 自动化学报, 2016, 42(11): 1657-1663.
HOU Jie, LIU Tao. Closed-loop subspace model identification using innovation estimation and orthogonal projection[J]. Acta Automatica Sinica, 2016, 42(11): 1657-1663.
- [25] VOLKOV V G, DEM'YANOV D N. Application of matrix decompositions for matrix canonization[J]. Computational Mathematics & Mathematical Physics, 2019, 59(11): 1759-1770.

Subspace predictive control methods of urban rail transit for ATO system

YAN Zheng, LAN Qingqun

Anhui Communications Vocational & Technical College, Hefei 230051, China

Abstract: In order to enhance the accuracy of automatic train operation (ATO) system aligned with the given operational curve, based on the subspace identification method and using the historical data of train operation, the nonlinear subspace predictive control model which is consistent with the actual running status is established, and the subspace predictive controller is designed. The model identification data and parameters are updated online. The tracking ability of traditional dynamics model and subspace predictive control model are analyzed by MATLAB. The results show that the subspace predictive control model has obvious advantages in terms of tracking accuracy of velocity, displacement, acceleration; and the traction/braking characteristics performs smoothly. The subspace predictive control model can ensure the safety and punctuality of train operation, then improve the passenger comfort.

Keywords: urban railway train; ATO system; subspace; predictive control; MATLAB

(责任编辑:杨秀红)