基于分布式模型的动车组预测控制方法

杨辉1,2 张芳1,2 张坤鹏1,2 李中奇1,2 付雅婷1,2

摘 要 针对动车组由若干动车/拖车组成的动力单元固定编组耦合构成,难以用集中式模型进行有效描述的问题,提出一种动车组运行过程的分布式描述与建模方法.基于动车组牵引/制动特性曲线和实际运行数据,采用子空间模型辨识方法建立了动车组各动力单元的分布式状态空间模型;提出基于分布式模型的动车组预测控制方法,给出了各动力单元牵引/制动力和运行速度同步跟踪控制算法.基于 CRH380AL 型动车组运行过程数据的对比仿真结果验证了本文方法的有效性.

关键词 动车组, 子空间模型辨识, 分布式状态空间模型, 预测控制

引用格式 杨辉,张芳,张坤鹏,李中奇,付雅婷. 基于分布式模型的动车组预测控制方法. 自动化学报, 2014, **40**(9): 1912-1921

DOI 10.3724/SP.J.1004.2014.01912

Predictive Control Using a Distributed Model for Electric Multiple Unit

YANG Hui^{1, 2} ZHANG Fang^{1, 2} ZHANG Kun-Peng^{1, 2} LI Zhong-Qi^{1, 2} FU Ya-Ting^{1, 2}

Abstract A distributed power electric multiple unit (EMU) include coupled integral power units characterized by several motor vehicles and trailers, whose dynamic behaviors are difficult to describe with the typical single-point-mass modeling method. To handle these problems, this paper presents a distributed description and the corresponding modeling approach for the EMU operation process. Based on the traction/brake characteristic curve and the actual operation data, employ the subspace identification method to establish the distributed state-space model for each power unit. According to the principle of model predictive controller, then propose a synchronous tracking control algorithm for traction/braking forces and running speed of each power unit. With the actual data of the CRH EMU type-380AL, comparative simulation results prove the effectiveness of the proposed method.

Key words Electric multiple unit (EMU), subspace model identification, distributed state space model, predictive control

Citation Yang Hui, Zhang Fang, Zhang Kun-Peng, Li Zhong-Qi, Fu Ya-Ting. Predictive control using a distributed model for electric multiple unit. Acta Automatica Sinica, 2014, **40**(9): 1912–1921

动车组由带动力的动车与不带动力的拖车固定 编组而成.动车组技术源于地铁,是一种动力分散技 术,具有加速度快、轴重轻、易于操控和安全性高等 优点,已逐渐成为现代轨道交通工具的主流和未来 的发展方向^[1].随着动车组运行速度的提高,非线性 和各动力单元间的耦合特性等明显增强.目前基于

1. 华东交通大学电气与电子工程学院 南昌 330013 2. 江西省先进 控制与优化重点实验室 南昌 330013 V-S 曲线的人工操纵模式难以满足动车组安全、舒适、平稳以及节能的需求.如何准确描述动车组各动力单元的动态特性并设计控制器具有重要意义.

针对动车组的建模方法,通常把动车组当作单 质点,采用集中式建模方法.文献 [2] 采用固定多模 型系统来描述高速动车组复杂非线性特性;文献 [3] 采用 T-S 模型来描述高速动车组的非线性和不确定 特性;文献 [4] 采用子空间辨识方法建立高速列车 的动态模型.集中式建模没有考虑动车组各动力单 元牵引/制动特性及其关联耦合,难以准确描述动车 组运行过程,分布式建模成为一种有效的选择.文献 [5] 建立了高速列车分布式动力学模型,但其仅考虑 了首车的非线性空气阻力特性;文献 [6] 采用多质点 单位移机理模型来描述高速动车组的非线性和相邻 车辆间的耦合影响.上述方法是根据高速动车组动 力学特性建立的分布式模型,较少考虑动车组动态 运行及环境变化的影响.

收稿日期 2013-07-05 录用日期 2014-01-10

Manuscript received July 5, 2013; accepted January 10, 2014 国家自然科学基金 (61164013, 51174091, 61364013), 铁道部科学技 术研究重点资助项目 (2011Z002-D) 资助

Supported by National Natural Science Foundation of China (61164013, 51174091, 61364013), the Key Program of China Ministry of Railway (2011Z002-D)

本文责任编委 刘德荣

Recommended by Associate Editor LIU De-Rong

^{1.} School of Electrical and Electronic Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013 2. Key Laboratory of Advanced Control and Optimization of Jiangxi Province, Nanchang 330013

针对列车运行控制, 文献 [7] 对早期采用的控制 方法及效果进行了综述. 文献 [8] 针对列车运行多模 式特点提出采用模糊控制,有效地提高了列车运行 的效率和安全性,同时也很好地克服了列车运行的 延时性,但模糊控制基于专家经验设计,难以在线调 整. 文献 [9] 针对高速列车系统参数和外界阻力的不 确定性,基于机理模型提出了鲁棒自适应控制算法, 实现高精度跟踪控制. 文献 [10] 针对高速动车组非 线性特性,把动车组看做是一个刚性质点,通过辨识 对其运行过程建立了列车多模型描述,设计了多模 型切换预测控制器.基于滚动优化和反馈校正机制, 模型预测控制算法可以在线求解控制策略,已广泛 用于复杂系统控制^[11-13].

子空间辨识对模型结构先验知识需求较少,在 过程辨识和控制领域得到了广泛的应用^[14-15].根据 动力分散式动车组的结构特点,基于其牵引特性曲 线和运行数据,采用子空间辨识方法建立动车组分 布式状态空间模型,基于分布式模型设计动车组预 测控制器,优化各动力单元控制力(牵引力/制动力) 分配,从而实现各单元运行速度高精度跟踪期望的 运行轨迹.

1 动车组分布式建模

1.1 动车组运行过程描述

图 1 描述了由 r 个动力单元串联组成的动车组, 每个动力单元受相邻动力单元耦合影响.

$$\begin{cases} A 动力单元动力学模型如下:
 $m_1 \ddot{s}_1 = u_1 - \bar{k}(s_1 - s_2) - b(\dot{s}_1 - \dot{s}_2) - \left(\underbrace{c_0 + c_v \dot{s}_1}_{R_1^b} + \underbrace{c_a \dot{s}_1^2}_{R_1^a} \right) m_1$
 \vdots
 $m_{\bar{t}} \ddot{s}_{\bar{t}} = u_{\bar{t}} - \bar{k}(s_{\bar{t}} - s_{\bar{t}-1}) - \bar{k}(s_{\bar{t}} - s_{\bar{t}+1}) - b(\dot{s}_{\bar{t}} - \dot{s}_{\bar{t}-1}) - b(\dot{s}_{\bar{t}} - \dot{s}_{\bar{t}+1}) - \left(\underbrace{c_0 + c_v \dot{s}_{\bar{t}}}_{R_{\bar{t}}^b} + \underbrace{c_a \dot{s}_{\bar{t}}^2}_{R_{\bar{t}}^a} \right) m_{\bar{t}}$
 \vdots
 $m_r \ddot{s}_r = u_r - \bar{k}(s_r - s_{r-1}) - b(\dot{s}_r - \dot{s}_{r-1}) - \left(\underbrace{c_0 + c_v \dot{s}_r}_{R_r^b} + \underbrace{c_a \dot{s}_r^2}_{R_r^a} \right) m_r$
(1)$$

其中, $\bar{t} = 2, \dots, r-1,$ 并令 $t = 1, \dots, r, r$ 为动车 组动力单元数, R_t^a 和 R_t^b 分别为第 t 个动力单元受 到的空气阻力和机械阻力, u_t 代表第 t 个动力单元 的牵引力 / 制动力, 且 $u_t = u + \Delta u_t, s_t, \dot{s}_t$ 和 \ddot{s}_t 分 别代表第 t 个动力单元的位移、速度和加速度, m_t 为第 t 个动力单元的质量, \bar{k} 代表动力单元之间的弹 簧系数, b 表示相邻动力单元间阻尼器的阻尼系数, $\bar{k}(s_t - s_{t-1}) + \bar{k}(s_t - s_{t+1})$ 和 $b(\dot{s}_t - \dot{s}_{t-1}) + b(\dot{s}_t - \dot{s}_{t+1})$ 为第 t 个动力单元受到相邻动力单元耦合作用的影 响. c_0, c_v, c_a 是阻力系数, 具有高度不确定性. $c_a \dot{s}_t^2$ 代表空气阻力, 是速度 \dot{s}_t 的非线性函数, 并且随着 动车组运行速度的增加 \dot{s}_t^2 所占的比例越来越大, 其 非线性特性越来越明显^[16].





状态空间模型是一种由观测方程和状态方程组成的独特模型结构,不仅能方便地描述非线性系统和外界输入的作用关系,还能揭示非线性系统的内在动力学特性^[17].式(1)动车组动力学模型可由如下的非线性状态空间模型描述:

$$\begin{cases} x_t(k+1) = \varphi \{ x_t(k), u_{t'}(k) \} + q_t(k) \\ y_t(k) = \vartheta \{ x_t(k), u_{t'}(k) \} + d_t(k) \end{cases}$$
(2)

其中,输出标量 $y_t(k) \in \mathbf{R}$,表示第 t 个动力单元的 输出速度;状态向量 $x_t(k) \in \mathbf{R}^n$,与动车组、轮轨的 结构和材料等参数有关; $\varphi(\cdot) \in \mathbf{R}^n$ 和 $\vartheta(\cdot) \in \mathbf{R}$ 是 非线性向量函数; $q_t(k) \in \mathbf{R}^n$ 和 $d_t(k) \in \mathbf{R}$ 分别是 不可观测的噪声序列; 输入向量 $u_{t'}(k) \in \mathbf{R}^l$,表示 第 t 个动力单元受到自身的牵引/制动力和相邻动 力单元牵引/制动力的耦合影响,其具体表达式如下:

$$u_{t}(k) = \begin{cases} \left[u_{1}(k), u_{2}(k)\right]^{\mathrm{T}}, & t = 1, \quad l = 2\\ \left[u_{t-1}(k), u_{t}(k), u_{t+1}(k)\right]^{\mathrm{T}}, \\ & t = 2, \cdots, r-1, \ l = 3\\ \left[u_{r-1}(k), u_{r}(k)\right]^{\mathrm{T}}, & t = r, \quad l = 2 \end{cases}$$

尽管式 (2) 能较好地描述动车组运行过程, 但 其含有非线性向量函数, 难以用传统辨识方法进行 在线更新. 依据局部建模思想^[18], 将式 (2) 在其平 衡工作点 (*x_e*, *u_e*) 附近进行线性化并离散化, 可等效成式 (3) 描述的线性离散状态空间子模型:

$$\begin{cases} x_t(k+1) \approx A_t x_t(k) + B_t u_{t'}(k) + w_t(k) \\ y_t(k) \approx C_t x_t(k) + D_t u_{t'}(k) + v_t(k) \end{cases}$$
(3)

其中, $A_t \in \mathbf{R}^{n \times n}$, $B_t \in \mathbf{R}^{n \times l}$, $C_t \in \mathbf{R}^{1 \times n}$, $D_t \in \mathbf{R}^{1 \times l}$ 分别为第 t 个动力单元的系统矩阵, $w_t(k) \in \mathbf{R}^{n \times l}$ 和 $v_t(k) \in \mathbf{R}^{1 \times 1}$ 分别为第 t 个动力 单元的过程噪声和输出噪声.

1.2 动车组子空间模型辨识

基于第 t 个动力单元的输入输出数据,由式 (3) 迭代得到适用于子空间辨识的广义输入输出矩阵方 程:

$$Y_p = \Gamma_i X_p + H_i^b U_p + H_i^e R_p + V_p \tag{4}$$

$$Y_f = \Gamma_i X_f + H_i^b U_f + H_i^e R_f + V_f \tag{5}$$

其中, 下标 p 和 f 分别表示过去和未来时刻; U_p , U_f 分别为过去和未来的输入 Hankel 矩阵:

$$U_{p} = \begin{bmatrix} u_{0} & u_{1} & \cdots & u_{j-1} \\ u_{1} & u_{2} & \cdots & u_{j} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ u_{i-1} & u_{i} & \cdots & u_{i+j-2} \end{bmatrix}$$
$$U_{f} = \begin{bmatrix} u_{i} & u_{i+1} & \cdots & u_{i+j-1} \\ u_{i+1} & u_{i+2} & \cdots & u_{i+j} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ u_{2i-1} & u_{2i} & \cdots & u_{2i+j-2} \end{bmatrix}$$

其中, $u_i = \begin{bmatrix} u_{i1} & u_{i2} & \cdots & u_{il} \end{bmatrix}^T$, 同理定义过去和 未来的输出 Hankel 矩阵 Y_p , Y_f , 状态矩阵 X_p 和 X_f 也类似定义如下:

$$X_p = \begin{bmatrix} x_0 & x_1 & \cdots & x_{j-1} \end{bmatrix}$$
$$X_f = \begin{bmatrix} x_j & x_{j+1} & \cdots & x_{j+i} \end{bmatrix}$$

广义能观性矩阵 Γ_i 和低维分块三角 Toeplitz

矩阵 H_i^b 分别定义为:

$$\Gamma_{i} = \begin{bmatrix} C & CA & CA^{2} & \cdots & CA^{i} \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \\ H_{i}^{b} = \begin{bmatrix} D & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ CB & D & 0 & \cdots & 0 \\ CAB & CB & D & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ CA^{i-2}B & CA^{i-3}B & CA^{i-4}B & \cdots & D \end{bmatrix}$$

同理,可定义低维分块三角 Toeplitz 矩阵 H_i^e 以及噪声矩阵 R_p , R_f , V_p , V_f .

根据式 (4) 和 (5), 通过使用斜向投影消除噪声 的影响, 可得子空间预测输出 \hat{Y}_{f} .

$$\hat{Y}_f = L_w W_p + L_u U_f \tag{6}$$

根据 Y_p 和 Y_f 的定义, 预测值 \hat{Y}_f 可以由下述 最小二乘问题求解:

$$\min_{L_w, L_u} \left\| Y_f - \left[L_w, L_u \right] \begin{bmatrix} W_p \\ U_f \end{bmatrix} \right\|_{\mathrm{F}}^2 \tag{7}$$

其中, $W_p = \begin{bmatrix} Y_p & U_p \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$, 符号 $\|\cdot\|_{\mathrm{F}}$ 表示 Frobenius 范数.

式 (7) 可通过 QR 分解得到:

$$\begin{bmatrix} W_p \\ U_f \\ Y_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{11} & 0 & 0 \\ L_{21} & L_{22} & 0 \\ L_{31} & L_{32} & L_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_1^{\mathrm{T}} \\ Q_2^{\mathrm{T}} \\ Q_3^{\mathrm{T}} \end{bmatrix}$$
(8)

记

$$L = \begin{bmatrix} L_{31} & L_{32} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_{11} & 0 \\ L_{21} & L_{22} \end{bmatrix}^{\dagger}$$

其中, (·)[†] 表示 Moore-Penrose 伪逆运算, 可用 SVD 分解的方法求解; $L = \begin{bmatrix} L_w & L_u \end{bmatrix}$. 将求得 L_w , L_u 代入式 (6), 可得 \hat{Y}_f ; 同理, 基于每个动力单元的输 入输出数据, 可以辨识出各动力单元子空间模型, 集 成各动力单元模型得到动车组分布式状态空间模型 如下:

$$\begin{cases} x(k+1) \approx Ax(k) + Bu(k) + w(k) \\ y(k) \approx Cx(k) + Du(k) + v(k) \end{cases}$$
(9)

其中,模型(9)的状态矩阵如下:

$$A = \operatorname{diag} \begin{bmatrix} A_1 & A_2 & \cdots & A_7 \end{bmatrix}$$
$$B = \begin{bmatrix} B_1 & B_2 & \cdots & B_7 \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$$
$$C = \operatorname{diag} \begin{bmatrix} C_1 & C_2 & \cdots & C_7 \end{bmatrix}$$
$$D = \begin{bmatrix} D_1 & D_2 & \cdots & D_7 \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$$

2 基于分布式模型的预测控制器

2.1 控制系统的结构框图

图 2 阐述了基于分布式模型的动车组预测控制 系统结构.采用子空间模型架构,r 个动力单元分别 根据自身输入,相邻单元的输入以及自身输出数据 (u_{t-1},u_t,u_{t+1},y_t)辨识出各动力单元模型.在每个 采样时刻,基于分布式状态空间模型设计预测控制 器,优化调整各动力单元牵引/制动力,从而实现各 动力单元高精度跟踪同一目标速度曲线 y_r,实现动 车组安全、舒适、正点运行.



Fig. 2 The predictive control block diagram of state space model for EMU

2.2 动车组模型预测控制器设计

基于分布式模型的动车组预测控制问题可描述为:给定高速动车组各动力单元期望的运行轨迹 $y_r = \begin{bmatrix} \tilde{y}(k+1) & \tilde{y}(k+2) & \cdots & \tilde{y}(k+P) \end{bmatrix}^T \in \mathbf{R}^P$,根据动车组辨识模型 (9),计算出动车组精确跟踪 y_r 所需的控制量 u_f ,并保证动力单元间的速度偏差在期望的范围内.

为实现动车组舒适、正点运行,采用如下二次型

性能指标:

$$J = \mathbb{E} \left\{ \sum_{j=N_0}^{P} \left[\hat{y}(k+j) - \tilde{y}(k+j) \right]^2 + \sum_{j=1}^{N} \left[r_j u_f(k+j) \right]^2 \right\}$$
(10)

其中, $\hat{y}(k + j)$ 为模型超前 j 步的最优预测值; $\tilde{y}(k + j)$ 为未来 (k + j) 时刻的期望输出; $u_f(k + j)$ 为控制量序列; N_0 、P、N 分别是最小输出长度、预 测长度和控制长度, 一般情况下取 $N_0 = 1$; r_j 为控 制加权系数, 约束控制量, 避免其剧烈变化.

将式 (10) 用矩阵形式表示为:

$$J = (\hat{y}_f - y_r)^{\mathrm{T}} Q (\hat{y}_f - y_r) + u_f^{\mathrm{T}} R u_f$$
(11)

其中, $\hat{y}_f = [\hat{y}(k+1) \quad \hat{y}(k+2) \cdots \hat{y}(k+P)],$ $u_f = [u_f(k+1) \quad u_f(k+2) \cdots u_f(k+N)], Q$ 为 输出误差加权矩阵, R 为控制加权矩阵, Q、R 均为 正定对称矩阵, 即 $Q = Q^T > 0, R = R^T > 0.$

根据动车组辨识模型 (9) 实现对系统的未来输 出预测:

$$\hat{y}_f = l_w w_p + l_u u_f \tag{12}$$

其中, $w_p = \begin{bmatrix} y_p, u_p \end{bmatrix}^T (y_p = \begin{bmatrix} y_k^T \cdots y_{k-P+1}^T \end{bmatrix},$ $u_p = \begin{bmatrix} u_k^T \cdots u_{k-P+1}^T \end{bmatrix}; l_w = L_w(1:lP,:); l_u = L_u(1:lP,1:n_u)(n_u 为 u_f 的行数, 与控制时域 N 相关).$

将式 (12) 代入式 (11) 得到:

$$J = ((l_w w_p + l_u u_f) - y_r)^{\mathrm{T}} Q ((l_w w_p + l_u u_f) - y_r) + u_f^{\mathrm{T}} R u_f$$
(13)

由式 (13) 可知, 求目标函数的最小化问题等价 于求解关于向量 u_f 的极小值问题. 令 $dJ/du_f = 0$, 可得到最优控制律 u_f 的表达式:

$$u_f = \left(l_u^{\mathrm{T}}Ql_u + R\right)^{-1} l_u^{\mathrm{T}}Q\left(y_r - l_w w_p\right) \qquad (14)$$

取 *u_f* 的第 1,2,...,*r* 行分量即可得当前时刻各个 动力单元所需控制量.

在动车组运行过程中,基于滚动优化和反馈校 正机制,预测控制器可以实现动态优化性能指标,使 动车组各动力单元高精度跟踪期望的运行轨迹.

3 仿真实验

为验证本文方法的有效性,以运行于京沪高铁 (线路如图 3)的 CRH380AL 型动车组为研究对象 开展仿真试验 (括号中的数据是代表该站的里程), 其主要参数特性见表 1^[19].



```
Table 1 The main parameters of CRH380AL EMU
```

参数名称	参数特性
列车质量 (t)	890
最高运行速度 / (km/h)	380
持续运营速度 / (km/h)	350
单位基本阻力 /(N/t)	$w = 5.2 + 0.038v + 0.00112v^2$



图 3 CRH380AL 型动车组运行示意图 Fig. 3 Running diagram of CRH380AL

CRH380AL 型动车组十四动两拖 (第一节车厢 和第十六节车厢为拖车,其余车厢均为动车) 组成, 并划分为七个动力单元^[19],其中第一个和第七个动 力单元是由两节动车和一节拖车组成,其余动力单 元均是由两节动车组成的,据此可将其等效成七个 分布式控制单元,分布图如图 4 所示 (o 为拖车, • 为动车).

采集 CRH380AL 型动车组在京沪高铁线路徐 州东 ⇒ 济南区段 (初始里程为 693.31 km, 中间停 车的里程为 591.91 km, 终点里程为 393.38 km)的 运行数据 1600 组, 结合其牵引/制动特性曲线, 采 用本文方法建模, 可得 7 个模型的状态矩阵及初始 状态如表 2, 然后将这七个子模型集成即可得到动车 组分布式状态空间模型.



图 4 CRH380AL 型动车组七个分布式控制单元 Fig. 4 Seven distributed control units of CRH380AL

分别采用本文方法和文献 [4] 方法对运行于京 沪高铁线路徐州东 \Rightarrow 济南西区段的 CRH380AL 型 动车组运行速度进行对比跟踪控制. 图 6 描述了两 种方法对给定速度的跟踪过程, 其速度跟踪误差曲 线如图 5 所示, 表 3 为速度跟踪误差范围 ($y_1 \sim y_7$ 和 $u_1 \sim u_7$ 分别表示采用本文方法得到的控制单元 一 ~ 控制单元七的速度输出曲线和控制力曲线, y_r 表示给定速度曲线).



图 5、图 6 和表 3 表明文献 [4] 方法得到的速度 跟踪的均方根误差为 2.0528 km/h,满足动车组跟踪 控制运行要求,但是跟踪速度曲线在启动和制动阶 段跟踪性能较差,最大正误差为 5.9756 km/h,最大 负误差为 -7.5095 km/h,给动车组的安全运行和高 精度跟踪带来一定程度的影响.而本文方法得到的 各控制单元的输出在各个运行工况下均有良好的跟 踪能力,速度跟踪误差均在 ±0.1 km/h 以内,能以 较高精度满足运行控制要求,保证了动车组的停靠 准确性和安全性.

进一步,图 7 描述了相邻控制单元间的速度偏差,表4 为相邻控制单元速度偏差变化范围.图 8 为 两种控制方法的牵引/制动力曲线,图 9 为本文方法 得到的相邻控制单元的牵引/制动力偏差,表5 为相 表 2 各动力单元模型参数

Table 2Model parameters of each power unit						
模型	$A(10^{-1})$	$B(10^{-4})$	C	D	$K(10^{-4})$	$x(0)(10^{-9})$
模型一	9.9886	[2.2373, -2.2215]	9103.2	[0, 0]	1.0733	1093.5
模型二	9.9887	[-3.3977, 4.3085, -0.8948]	9098.4	[0, 0, 0]	1.1079	472.7
模型三	9.9885	[-1.9328, 4.2912, -2.3428]	9133.3	[0, 0, 0]	1.0592	-5.4878
模型四	9.9886	[-1.1735, 3.8499, -2.6607]	9132.0	[0, 0, 0]	1.0793	-5.4172
模型五	9.9885	[-2.1484, 3.6741, -1.5097]	9132.6	[0, 0, 0]	1.0523	-864.4
模型六	9.9888	[-1.9947, 3.9354, -1.9248]	9132.2	[0, 0, 0]	1.0796	-451.52
模型七	9.9883	[-2.6346, 2.6505]	9132.6	[0, 0]	1.0622	913.48
	0.1		0.1	Г		





表 3 速度跟踪误差范围 Table 3 Velocity tracking error ranges 古社 按加商二日 <u>ч</u>п 44 /1 .

万法	控制甲兀号	误差 /(km/h)
	单元一	(-0.0893, 0.0839)
	单元二	(-0.0670, 0.0551)
本文	单元三	(-0.0312, 0.0257)
方法	单元四	(-0.0625, 0.0514)
	单元五	(-0.0775, 0.0639)
	单元六	(-0.0588, 0.0484)
	单元七	(-0.0431, 0.0354)
文献 [4] 方法		(-7.5095, 5.9765)



表 4 相邻单元间速度偏差变化范围 Table 4 Velocity error ranges between the adjacent units

控制单元号	误差 /(km/h)
单元一与二	(-0.0325, 0.0396)
单元二与三	(-0.0331, 0.0402)
单元三与四	(-0.0352, 0.0289)
单元四与五	(-0.0169, 0.0138)
单元五与六	(-0.0172, 0.0210)
单元六与七	(-0.0146, 0.0177)

 $y_3 - y_2$

600 550 500 450 400 Rail mileage /km $y_5 - y_4$ 600 550 500 450 400 Rail mileage /km $y_7 - y_6$ Error /(km/h) -0.05 -0.05 650 600 550 500 450 400 650 600 550 500 450 400 Rail mileage /km Rail mileage /km



邻控制单元牵引/制动力偏差变化范围.

由图 7 和表 4 可以看出, 基于分布式模型的控 制方法在动车组牵引、惰行、恒速和制动等工况下, 相邻单元的速度误差均在 ±0.05 km/h 以内, 相邻 单元的最大相对位移为 40.2 mm, 满足动车组物理 性能要求^[20],即缓冲器行程为76mm,联挂间隙为 33.5 ~ 41.5 mm, 有效地降低了车辆间的耦合效应, 减少了相邻单元间的纵向冲击,提高了动车组运行 的平稳性.

由图 8 可知, 文献 [4] 方法得到的控制力远大

表 5 相邻单元牵 Table 5 Traction/bi	引/制动力偏差变化范围 raking force deviation ranges
控制单元号	误差 /kN
单元一	(-2.5165, 3.0720)
单元二	(-2.7649, 3.6352)
单元三	(-2.7011, 3.7473)
单元四	(-4.1969, 3.3273)
单元五	(-2.5552, 1.9975)
单元六	(-2.2766, 1.8666)





图 9 相邻单元牵引/制动力偏差 Fig. 9 Traction/braking force deviation of the adjacent unit

于分布式模型平均分配后各控制单元的控制力,且 控制力幅值波动较大, 给乘客舒适性和运行平稳性 带来较大影响,其总功率为 2.3628 × 10⁴ kW; 由图 8、图 9 和表 5 可知,本文方法得到的各个控制单元 的控制力在整个运行过程缓和变化,过渡比较平滑, 且启动阶段满足恒牵引力、恒功率运行;相邻单元 间的控制力误差范围在 $\pm 5 \text{ kN}$ 以内, 乘客舒适性指标得到一定程度地提高, 七个控制单元的总功率为 2.0649 × 10⁴ kW, 小于文献 [4] 方法得到的总功率, 降低了动车组运行能耗.

4 结论

本文针对动车组编组结构特点、各动力单元牵 引/制动特性曲线和实际运行数据,建立了描述动车 组各单元运行特性与关联耦合的分布式模型,提出 了基于分布式模型的动车组预测控制方法.通过京 沪高铁徐州东 ⇒ 济南西区间段 CRH380AL 型动车 组运行跟踪仿真实验表明,该方法可满足动车组各 单元间相对位移约束,实现各动力单元控制力优化 和运行速度高精度跟踪给定轨迹,与集中式建模控 制方法相比显示出其优越性,为动车组运行控制提 供了一种可行的解决方案.

References

- Song Q, Song Y D. Data-based fault-tolerant control of highspeed train with traction/braking notch nonlinearities and actuator failures. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 2011, **22**(12): 2250-2261
- Yang Hui, Zhang Kun-Peng, Wang Xin, Zhong Lu-Sheng. Multiple models generalized predictive control method of high-speed train. Journal of the China Railway Society, 2011, 33(8): 80-87 (杨辉, 张坤鹏, 王昕, 衷路生. 高速列车多模型广义预测控制方法. 铁道学报, 2011, 33(8): 80-87)
- 3 Yang H, Fu Y T, Zhang K P. Generalized predictive control based on neurofuzzy model for electric multiple unit. In: Proceedings of the Third International Conference on Digital Manufacturing and Automation. Guilin, China: IEEE, 2012. 442-445
- 4 Zhong Lu-Sheng, Yan Zheng, Yang Hui, Qi Ye-Peng, Zhang Kun-Peng, Fan Xiao-Ping. Predictive control of high-speed train based on data driven subspace approach. *Journal of the China Railway Society*, 2013, **35**(4): 77-83 (衷路生, 颜争, 杨辉, 齐叶鹏, 张坤鹏, 樊晓平. 数据驱动的高速列 车子空间预测控制. 铁道学报, 2013, **35**(4): 77-83)
- 5 Yang C D, Sun Y P. Mixed H_2/H_1 cruise controller design for high speed train. International Journal of Control, 2001, **74**(9): 905-920
- 6 Song Q, Song Y D, Tang T, Ning B. Computationly inexpensive tracking control of high-speed train with traction/braking saturation. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation System*, 2011, **12**(4): 1–10
- 7 Tang Tao, Huang Liang-Ji. A survey of control algorithm for automatic train operation. *Railway Journal*, 2003, 25(2): 98–102

(唐涛,黄良骥. 列车自动驾驶系统控制算法综述. 铁道学报, 2003, 25(2): 98-102)

- 8 Dong H R, Li L, Ning B, Hou Z S. Fuzzy tuning of ATO system in train speed control with multiple working conditions.
 In: Proceedings of the 29th Chinese Control Conference.
 Beijing, China: IEEE, 2010. 1697–1700
- 9 Song Q, Song Y D. Robust and adaptive control of high speed train systems. In: Proceedings of the Chinese Control and Decision Conference. Xuzhou, China: IEEE, 2010. 2469–2474
- Yang Hui, Zhang Kun-Peng, Wang Xin. Multi-model switching predictive control with active fault tolerance for highspeed train. *Control Theory and Applications*, 2012, **29**(9): 1211-1214 (杨辉, 张坤鹏, 王昕. 高速动车组多模型切换主动容错预测控制. 控 制理论与应用, 2012, **29**(9): 1211-1214)
- Xi Yu-Geng, Li De-Wei. Fundamental philosophy and status of qualitative synthesis of model predictive control. Acta Automatica Sinica, 2008, **34**(10): 1225-1234 (席裕庚, 李德伟. 预测控制定性综合理论的基本思路和研究现状. 自动化学报, 2008, **34**(10): 1225-1234)
- 12 Qin S J, Badgwell T A, Ning B. A survey of industrial model predictive control technology. *Control Engineering Practice*, 2003, **11**(7): 733–764
- Sun Guang, Huo Wei. Direct-adaptive fuzzy predictive control of satellite attitude. Acta Automatica Sinica, 2010, 36(8): 1151-1159 (孙光, 霍伟. 卫星姿态直接自适应模糊预测控制. 自动化学报, 2010, 36(8): 1151-1159)
- Ma Jian-Jun, Zheng Zhi-Qiang, Hu De-Wen. Subspace predictive dynamic control allocation for overactuated system with actuator dynamics. Acta Automatica Sinica, 2010, 36(1): 130-138
 (马建军,郑志强,胡德文.包含执行器动力学的子空间预测动态控制分配方法.自动化学报, 2010, 36(1): 130-138)
- 15 Katayama T, Kawauchi H, Picci G. Subspace identification of closed-loop systems by the orthogonal decomposition method. Automatica, 2005, 41(5): 863–872
- 16 Tian Hong-Qi. Study on the characteristics of train air resistance under wind environment. China Railway Science, 2008, 29(5): 108-112 (田红旗.风环境下的列车空气阻力特性研究.中国铁道科学, 2008, 29(5): 108-112)
- 17 Chen X, Fang H T. Recursive identification for Hammerstein systems with state-space model. Acta Automatica Sinica, 2010, 36(10): 1460-1467
- 18 Cheng C, Chiu M S. A new data-based methodology for nonlinear process modeling. *Chemical Engineering Science*, 2004, **59**(13): 2801–2810
- 19 Jiang Jing. Traction system parameter matching design and research of new-generation high-speed EMUs. *Electric Drive* for Locomotives, 2011, **33**(3): 9-12 (江靖. 新一代高速动车组牵引系统参数匹配设计与研究. 机车电传 动, 2011, **33**(3): 9-12)

20 Li Rui-Chun. Research on high-speed train and raising speed train vehicle hook buffer mechanism. *Railway Locomotive* and Car, 2004, **24**(6): 15-21 (李瑞淳. 高速列车及提速列车车钩缓冲装置研究. 铁道机车车辆,

2004, **24**(6): 15–21)



杨 辉 华东交通大学电气与电子工程学院教授.2005 年获得东北大学控制科学与工程专业博士学位.主要研究方向为复杂系统建模、控制与优化,轨道交通自动化与运行优化.本文通信作者. E-mail: yhshuo@263.com

(YANG Hui Professor at the School of Electrical and Electronic Engineering, East China Jiaotong University. He received his Ph. D. degree in control science and engineering from Northeastern University in 2005. His research interest covers the modeling, control and optimization for complex system, rail transit automation and optimization. Corresponding author of this paper.)



张 芳 华东交通大学电气与电子工程学院硕士研究生.主要研究方向为轨道交通自动化与运行优化.

E-mail: zfshousuo@163.com

(**ZHANG Fang** Master student at the School of Electrical and Electronic Engineering, East China Jiaotong University.

Her research interest covers rail transit automation and optimization.)



张坤鹏 华东交通大学电气与电子工程学 院助教. 主要研究方向为轨道交通自动化 与运行优化.

E-mail: ecjtu.zhangkunpeng@163.com

(**ZHANG Kun-Peng** Assistant at the School of Electrical and Electronic Engineering, East China Jiaotong Uni-

versity. His research interests covers rail transit automation and optimization.)



李中奇 华东交通大学电气与电子工程学 院副教授.主要研究方向为轨道交通自动 化与运行优化.

E-mail: Lzq0828@163.com

(**LI Zhong-Qi** Associate professor at the School of Electrical and Electronic Engineering, East China Jiaotong Univer-

sity. His research interest covers rail transit automation and optimization.)



付雅婷 华东交通大学电气与电子工程 学院硕士研究生.主要研究方向为轨道交 通自动化与运行优化.

E-mail: fuyating0103@163.com

(FU Ya-Ting Master student at the School of Electrical and Electronic Engineering, East China Jiaotong Univer-

sity. Her research interest covers rail transit automation and optimization.)