

DOI: 10.13382/j.jemi.B2205472

高速列车分布式速度协同跟踪控制方法研究*

赵凯辉 邱鹏旗 张昌凡 何静

(湖南工业大学电气与信息工程学院 株洲 412007)

摘要:针对高速列车运行过程中受外界干扰而导致的各车厢速度不同步问题,提出了一种基于改进扰动观测器的高速列车分布式速度协同跟踪控制一致性算法。首先,建立高速列车分布式模型,其次,将高速列车与多智能体系统相结合,设计分布式速度协同跟踪控制算法;同时利用改进的扰动观测器估计系统的复合未知扰动,并将其观测值反馈补偿给控制器,以消除复合未知扰动对高速列车运行的影响;通过 Lyapunov 稳定性理论分别证明了控制器和观测器的稳定性。最后,通过仿真对所提方法进行验证,所提方法的速度跟踪精确度达到了 99.9%。

关键词: 高速列车;分布式速度协同跟踪控制;多智能体系统;改进扰动观测器

中图分类号: U266.2;TN98 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4099

Research on distributed speed coordinated tracking control for high-speed train

Zhao Kaihui Qiu Pengqi Zhang Changfan He Jing

(Technology College of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou 412007, China)

Abstract: Aiming at the problem of carriage speed asynchronization caused by external disturbance during the operation of high-speed trains (HST), a distributed speed coordinated tracking control (DSCTC) method for HST based on an improved disturbance observer (IDO) is proposed. Firstly, a distributed HST model is established, secondly, combining HST with multi-agent system, and a DSCTC algorithm is designed; and an IDO is used to estimate the unknown disturbance of the system, and the observed value is fed back to the controller as compensation, and the Lyapunov stability analysis proves the stability of the controller and observer. Finally, the proposed method is verified by simulation, the speed tracking accuracy of the proposed method reaches 99.9%.

Keywords: high-speed trains; distributed speed coordinated tracking control; multi-agent system; improved disturbance observer

0 引言

高速列车以其安全、环保、大输送量等诸多优点已成为我国交通运输的主要载体之一,其车厢间的转速同步控制技术作为保证高速列车运行安全关键技术而受到重点关注。列车在实际工况下运行时,受温度、运行时长和外界干扰等因素影响,车厢间的速度出现不同步现象,引发列车纵向冲动等问题,进而使得列车运行不稳定,甚至会导致安全事故的发生^[1-2]。因此,研究高速列车在实际工况下的动态建模和同步控制算法,对保证高速列车的

安全运行具有重要的理论和现实意义。

目前,针对高速列车运行控制技术,许多先进控制方法被广泛使用。王青元等^[3]基于高速列车牵引动力学模型设计自适应终端滑模速度控制器,实现了列车的精准制动控制,但控制器仍一定程度存在对系统的参数依赖,无法较好解决因参数摄动导致的系统失稳问题。何之煜等^[4]在高速列车制动系统模型中引入自适应模糊滑模算法设计速度控制器,列车的跟踪控制精度得到有效提高,但控制器的设计对系统模型依赖度高。Li等^[5]将动车组模型和多智能体系统结合,提出速度预测控制器,提高了列车速度的控制精度,但未考虑线路变坡点外部阻力

收稿日期: 2022-05-10 Received Date: 2022-05-10

* 基金项目: 国家自然科学基金(52172403)、湖南省自然科学基金(2020JJ6083, 2020JJ6067, 2021JJ50052)、湖南省教育厅(18A267, 20A162, 21A0354, 21C0446)项目资助

对系统的影响。Yang 等^[6]建立基于自适应模糊推理的高速列车模型,将模型预测控制应用到速度同步控制中,但通信时延无法保证速度同步的实时性。Ji 等^[7]针对有未知速度延迟的高速列车系统,采取自适应学习控制,较好地消除了列车速度延迟的问题,提高了列车运行的实时性,但各车厢间速度的收敛时间较长,快速性受到影响。罗恒钰等^[8]分别搭建了理想和存在干扰两种情况下的高速列车制动过程动态模型,并设计基于增广误差的模型参考自适应速度控制器,提高了列车自动驾驶的控制精度,但控制器设计过于复杂。Yao 等^[9]针对列车自动操作系统,设计了一种鲁棒自适应非奇异快速终端滑模控制器来实现列车速度同步,提高了列车速度的收敛时间,但未考虑列车坡道阻力增大的影响。Liu 等^[10]对于高速列车系统的速度未知问题,采取了鲁棒速度预测控制方法,但速度存在预测稳态误差,无法实现转速的精准跟踪。上述研究方法主要为单一的集中式控制,对于动力分散的高速列车来说,无法分配各个车厢的动力,而分布式的控制策略能更好地协调各车厢的动力,保证高速列车的平稳运行。

多智能体分布式协同控制理论被应用到高速列车的速度同步控制,解决了各车厢速度不同步问题。分布式协同控制算法采用局部信息交流和简单的控制结构,实现了系统内的状态渐进一致^[11-13]。高速列车的速度一致性问题,本质是带未知扰动的二阶多智能体系统的一致性问题。目前对于二阶多智能体系统的研究已经取得许多研究成果。Zhang 等^[14]针对智能体系统的最优输出问题,采用基于降阶观测器的状态反馈控制方法,实现了系统的最优输出,但观测器的设计较为复杂。Cao 等^[15]在系统的速度信息和加速度信息都未知的情况下,分别提出了一阶和二阶系统的分布式变结构控制方法,但没有实现有限时间内完成收敛。Chen 等^[16]针对多智能体系统的最优输出问题,提出了一种分布式控制协议,分析了不同情况下系统的输出。Zhang 等^[17]针对二阶多智能体系统,设计了一致性控制算法,但提高了系统拓扑结构的复杂度。Lu 等^[18]提出一种分布式状态反馈协议来解决在切换拓扑结构下的多智能体系统输出状态协同问题,但没有讨论固定拓扑结构的情况。上述研究都没有结合具体对象,仅停留在理论研究层面。

将多智能体系统与实际对象相结合的研究成为一个新的热点。Wang 等^[19]将一致性算法引入到多车辆的协同控制中,实现多车辆的排队控制,但没考虑车辆之间的距离。Zhang 等^[20]将领航者和跟随者一致控制算法应用到印刷机系统中,实现了印刷机多轴同步。He 等^[21]将一致性控制理论应用到高速列车制动控制中,实现了列车的精准停车,但制动过程中速度存在较大的波动。Bai 等^[22]基于状态相关的信息交流拓扑图,分别讨论了单辆

高速列车和多辆高速列车的巡航控制,实现了列车的速度同步,但列车之间通信比较复杂。Li 等^[23]对于多个高速列车之间的位移问题,采取了一种分布式最优控制方法,列车之间始终保持安全距离,但没有讨论单个列车的情况。Rezaei 等^[24]为多高速列车系统设计了一种分布式输出反馈控制算法,在未知环境中多个列车之间的距离始终保持在安全范围内。Bai 等^[25]在高速列车多源干扰的情况下,提出了分布式故障检测方法,但没有完全考虑列车实际运行环境中的扰动。Zhao 等^[26]基于高速列车独立拓扑结构,采取协同一致控制策略,实现了列车的巡航控制,但列车速度达到一致前有较大的波动。上述研究都是使用分布式一致性算法实现高速列车的精准控制,但没有考虑到高速列车在实际运行过程的非线性复合未知扰动。由于高速列车运行环境的复杂多变,对于不确定性因素的处理应当进一步研究。

因此,针对高速列车在运行过程中受复合未知扰动而引起的车厢速度不一致问题,本文提出一种基于改进扰动观测器的高速列车分布式速度协同跟踪控制算法。先建立高速列车分布式动车组模型,将各车厢看成独立的智能体,利用多智能体系统中各独立智能体之间的信息交流,设计分布式速度协同跟踪控制器,确保高速列车系统实现速度同步。同时,设计改进的扰动观测器来估计高速列车运行过程中复合未知干扰,并将观测值反馈给控制器,以提高系统的鲁棒性。最后,通过仿真验证了该方法的正确性和有效性。

1 系统描述

1.1 预备知识

针对高速列车系统,把每节车厢看成是一个具有独立运动能力的智能体,那么,多节车厢构成的高速列车系统则可以被看作一个多智能体系统。对于由 $n + 1$ 节车厢组成的高速列车多智能体系统,假设车厢 0 为虚拟领航者,车厢 1, 2, \dots , n 为跟随者,每节车厢代表图中的一个节点,两个节点之间的连边则表示两节车厢之间相互作用情况,由这样的节点和邻边构成的图为邻接图。

定义 1^[27]: 邻接图 $G_n = \{V_n, E_n\}$ 是一个无向图,其中顶点集 $V_n = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 表示 n 节跟随者车厢,图的非向边集 $E_n = \{(v_i, v_j) | v_i, v_j \in V_n, i, j = 1, 2, \dots, n\}$ 表示各个跟随者车厢的相互作用关系。

该无向图的邻接矩阵可以表示为 $A_n = [a_{ij}] \in R^{n \times n}$, 且 $a_{ji} = a_{ij}$, 其中 $a_{ij} = 1$ 表示车厢 i 和车厢 j 之间有信息传递, 否则 $a_{ij} = 0$ 。拉普拉斯矩阵 $L_n = D_n - A_n$, 其中 $D_n = [d_{ij}] \in R^{n \times n}$ 为入度矩阵, $d_{ii} = \sum_{j=1}^n a_{ij}, i = 1, 2, \dots, n; d_{ij} = 0, i \neq j$ 。由于邻接图 G_n 是一个无向图, A_n 为实对称矩

阵。如果任意两个节点间有一条路径连接这两个节点,那么该无向图是连通的,其对应的拉普拉斯矩阵 L_n 是对称正半定的,其特征值满足 $0 = \lambda_1(L_n) \leq \lambda_2(L_n) \leq \dots \leq \lambda_n(L_n)$,若定义矩阵 $M = L_n + \text{diag}(a_{10}, a_{20}, \dots, a_{n0})$,则矩阵 M 是对称正定的。

1.2 高速列车分布式模型

将高速列车的每节车厢视作为一个质点,建立高速列车多质点模型^[21]:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = v_1 \\ m_1 \dot{v}_1 = u_1 - f_1 - D_{f1} \\ \vdots \\ \dot{x}_i = v_i \\ m_i \dot{v}_i = u_i + f_{i-1} - f_i - D_{fi}, \quad i = 2, 3, \dots, n-1 \\ \vdots \\ \dot{x}_n = v_n \\ m_n \dot{v}_n = u_n + f_{n-1} - f_n - D_{fn} \end{cases} \quad (1)$$

其中, m_i, x_i, v_i 分别为第 i 节车厢的质量、位移、速度; k_i, h_i 分别为第 i 节车厢的弹性系数和阻尼系数; D_{fi} 代表列车在实际运行过程中遇到的阻力; f_i 为第 i 节车厢的非线性耦合作用力。

D_{fi} 可以表示为:

$$D_{fi} = a_{1i} + a_{2i}v_i + a_{3i}v_i^2 + \phi_i \quad (2)$$

其中, a_{1i}, a_{2i}, a_{3i} 分别为运行阻力公式中的常数项, ϕ_i 为附加阻力,包括坡道、弯道、隧道的附加阻力。

f_i 可以表示为:

$$f_i = k_{0i}(1 + \varepsilon \Delta x_i^2) \Delta x_i^2 \quad (3)$$

其中, k_{0i} 是常数项, ε 是非线性项。

1.3 高速列车多智能体数学模型

对于高速列车多智能体系统,将目标速度特性曲线作为虚拟领航者的输入,其输出作为跟随者系统的输入信号。虚拟领航者的数学模型可表示为:

$$\begin{cases} \dot{x}_0 = v_0 \\ \dot{v}_0 = u_0 \end{cases} \quad (4)$$

其中, x_0, v_0 表示虚拟领航者的位移和速度信号, u_0 表示控制输入。

根据高速列车分布式模型(1),跟随者系统的动态数学模型可以描述为:

$$\begin{cases} \dot{x}_i = v_i \\ m_i \dot{v}_i = u_i + \sum_{j=1}^n (-1)^i a_{ij} f_j - D_{fi} \end{cases} \quad (5)$$

将式(5)进一步化简为:

$$\begin{cases} \dot{x}_i = v_i \\ \dot{v}_i = b_i(u_i + d_i) \end{cases} \quad (6)$$

其中, $d_i = \left(\sum_{j=1}^n (-1)^i a_{ij} f_j - D_{fi} \right), b_i = 1/m_i$ 。

2 传统分布式协同一致跟踪控制器

高速列车分布式速度协同跟踪控制策略如图 1 所示,相邻跟随者车厢存在信息交流,通过分布式速度协同跟踪控制器可使各跟随者车厢跟踪虚拟领航者车厢,从而达到速度一致。

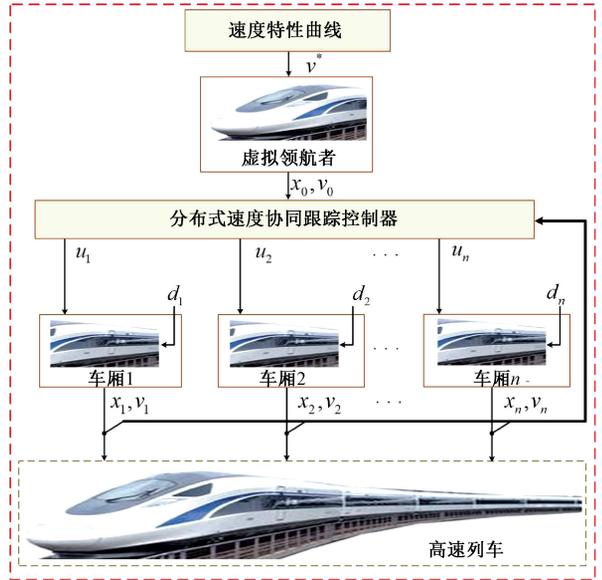


图 1 高速列车分布式速度协同跟踪控制框图

Fig. 1 Block diagram of HST DSCTC

首先设计如下的 PID 控制器保证虚拟领航者车厢速度与目标速度特性曲线 v^* 一致:

$$u_0 = k_p(v^* - v_0) + k_i \int (v^* - v_0) dt + k_d \frac{d(v^* - v_0)}{dt} \quad (7)$$

其中, k_p, k_i, k_d 为比例、积分、微分增益。通过选取合适的增益 k_p, k_i, k_d , 可使虚拟领航者车厢的输出速度跟踪目标速度特性曲线:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|v_0 - v^*\| = 0 \quad (8)$$

然后设计控制输入 u_i 使跟随者车厢 $i (i = 1, 2, \dots, n)$ 输出速度满足:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|v_i - v_0\| = 0 \quad (9)$$

这样,跟随者车厢的速度就可跟踪虚拟领航者车厢的速度。

对于高速列车多智能体数学模型(5),第 i 节车厢的传统的分布式协同一致跟踪控制算法可设计为:

$$u_i = -m_i \sum_{j=0}^n a_{ij} (\eta_i(x_i - x_j) + \rho_i(v_i - v_j)) - m_i \beta_i \text{sgn} \left(\sum_{j=0}^n a_{ij} (\eta_i(x_i - x_j) + \rho_i(v_i - v_j)) \right) - d_i \quad (10)$$

由于一致性跟踪算法式(10)存在复合未知干扰项

d_i , 导致无法直接利用式(10)构造控制器。此外,若去掉复合未知干扰 d_i , 通过选取足够大的切换增益来抵消复合未知干扰的影响,一方面由于实际条件的限制,控制器可以承受的控制输入有限;另一方面,控制输入的不连续会给系统造成高频抖振,不利于系统的稳定。所以需要复合未知干扰的大小通过扰动观测器估计出来反馈给控制器,主动减小复合未知干扰给系统带来的影响,提高系统的鲁棒性。因此,对复合未知干扰 d_i 的精确重构是实现速度协同一致跟踪的关键。

3 基于改进扰动观测器的高速列车分布式速度协同一致性控制策略

本节提出带改进扰动观测器的分布式协同一致控制策略,然后分别设计各车厢的协同一致控制器及扰动观测器,并证明了系统的稳定性。

3.1 改进的分布式协同一致控制策略

分布式图2为基于扰动观测器的协同一致控制框图,通过在分布式协同速度跟踪控制中引入扰动观测器,来对系统复合未知扰动进行实时估计,将估计值 \hat{d}_i 反馈给分布式协同速度跟踪控制器;从而生成各车厢实时输入 u_i , 来协同各车厢速度,并主动削弱复合未知干扰对系统跟踪性能的影响,增强系统的鲁棒性。

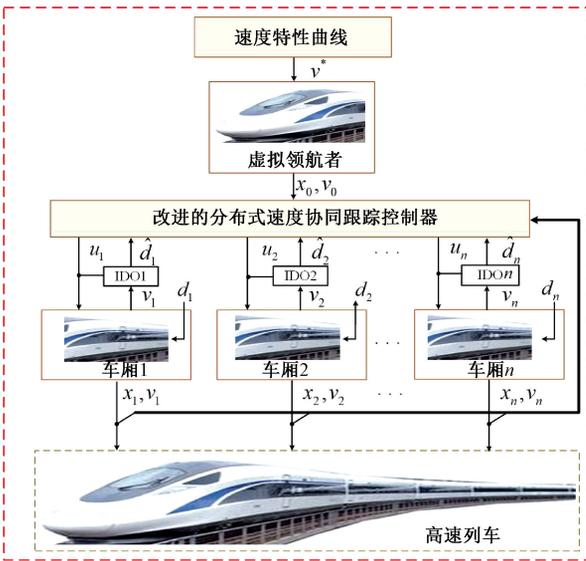


图2 带改进扰动观测器的高速列车分布式速度协同跟踪控制框图

Fig.2 Block diagram of HST DSCTC with IDO

3.2 基于扰动观测器的复合未知扰动估计

1) 扰动观测器模型

当被控对象受到未知扰动影响时,其状态方程可以表示为:

$$\dot{x} = Ax + B_0u + B_1d \quad (11)$$

式中: u 、 x 和 d 分别为系统输入、状态变量、扰动信号; A 、 B_0 和 B_1 为相应的系数矩阵。当扰动项变化缓慢时,可以认为满足:

$$\dot{d} = 0 \quad (12)$$

传统的扰动观测器可设计为:

$$\dot{\hat{d}} = -F(B_1\hat{d} - B_1d) \quad (13)$$

式中: F 为扰动观测器增益。为增强系统的鲁棒性,引入误差补偿项 $\text{sgn}(\hat{d} - d)$, 扰动观测器可设计为:

$$\dot{\hat{d}} = -F(B_1\hat{d} - B_1d) - F\text{sgn}(\hat{d} - d) \quad (14)$$

将式(11)代入式(14),可得扰动观测器的表达式为:

$$\dot{\hat{d}} = -FB_1\hat{d} - F(Ax + B_0u - \dot{x}) - F\text{sgn}(\hat{d} - d) \quad (15)$$

定义观测器的误差为:

$$e_d = \hat{d} - d \quad (16)$$

由式(12)和(14),误差动态方程可以表示为:

$$\dot{e}_d + FB_1e_d + F\text{sgn}(\hat{d} - d) = 0 \quad (17)$$

由于式(15)中状态变量的导数无法直接测量,求导会放大状态变量的噪声,影响观测器的效果。

为此,提出一种借助中间变量特殊设计的扰动观测器^[28]:

$$\dot{\hat{d}} - F\hat{x} = -FB_1\hat{d} - F(Ax + B_0u) - F\text{sgn}(e_d) \quad (18)$$

取中间变量 $z = \hat{d} - Fx$, 求导可得:

$$\dot{z} = \dot{\hat{d}} - F\dot{x} \quad (19)$$

可得改进扰动观测器的表达式为:

$$\begin{cases} \dot{z} = -FB_1(z + Fx) - F(Ax + B_0u) - F\text{sgn}(e_d) \\ \hat{d} = z + Fx \end{cases} \quad (20)$$

借助中间变量 z , 扰动观测器不需要计算状态变量微分,在观测过程中不会造成噪声放大,易于工程实现。

2) 基于扰动观测器的高速列车的未知扰动估计

利用扰动观测器(20)来观测高速列车中的未知扰动部分,扰动观测器设计为:

$$\begin{cases} \dot{\hat{d}}_i = z_i + F_i v_i \\ \dot{z}_i = -F_i m_i (z_i + F_i v_i) - F_i m_i u_i - F_i \text{sgn}(e_{d_i}) \\ i = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (21)$$

其中, \hat{d}_i 为扰动估计值, z_i 为观测器中间变量, F_i 为观测器增益, $\text{sgn}(e_{d_i})$ 为观测误差补偿项。

定理 1: 对于设计的扰动观测器 (21), 当观测器增益 $F_i > 0$, 观测误差 e_{d_i} 将渐进收敛到 0。

证明:

选取如下李雅普诺夫函数:

$$V = \frac{1}{2} e_{d_i}^2 \quad (22)$$

对式(22)求导可得:

$$\dot{V} = e_{d_i} \dot{e}_{d_i} = e_{d_i} (-F_i e_{d_i} - F_i \text{sgn}(e_{d_i})) = -F_i e_{d_i}^2 - F_i |e_{d_i}| \quad (23)$$

由式(23)可知, 当观测器增益 $F_i > 0$ 时, $\dot{V} < 0$, 所设计的观测器(21)稳定。

证毕。

3.3 改进分布式协同一致跟踪控制算法及稳定性分析

把观测的未知复合干扰的观测值 \hat{d}_i 反馈给分布式协同速度跟踪控制器 (10), 得到改进的分布式协同一致性跟踪控制算法:

$$u_i = -m_i \sum_{j=0}^n a_{ij} (\eta_i (x_i - x_j) + \rho_i (v_i - v_j)) - m_i \beta_i \text{sgn} \left(\sum_{j=0}^n a_{ij} (\eta_i (x_i - x_j) + \rho_i (v_i - v_j)) \right) - \hat{d}_i \quad (24)$$

假设所有跟随者车厢都能得到虚拟领航者车厢的输出信号, 且各跟随者车厢间的通信拓扑图为无向图, 所以拉普拉斯矩阵 L_n 是对称正半定矩阵。

引理 1: 设对称矩阵 P 和 Q :

$$P = \begin{bmatrix} \eta\rho M^2 & \frac{1}{2}\eta M \\ \frac{1}{2}\eta M & \frac{1}{2}\rho M \end{bmatrix}, Q = \begin{bmatrix} \eta^2 M^2 & 0 \\ 0 & \rho^2 M^2 - \eta M \end{bmatrix}$$

其中, $M = L_n + \text{diag}(a_{10}, a_{20}, \dots, a_{n0})$, $\eta = \text{diag}(\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_n)$, $\rho = \text{diag}(\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n)$ 都为对称正定对角矩阵。如果待设计参数 η 和 γ 满足:

$$\left\{ \frac{\eta_i}{\eta_i^2 + \rho_i^2}, \frac{\eta_i}{2\gamma_i^2} \right\} < \lambda_{\min}$$

那么矩阵 P 和 Q 是对称正定的。

证明: 由于拉普拉斯矩阵 L_n 是对称正半定矩阵, 故 $M = L_n + \text{diag}(a_{10}, a_{20}, \dots, a_{n0})$ 是一个对称正定矩阵, 则其特征值 λ_i 为正实数。因为实对称矩阵正交相似于对角矩阵可知, 存在一个非奇异矩阵 G , 满足 $M = G^{-1} \lambda G$,

则矩阵 P 可以表示为 $P = E^{-1} R E$, 其中 $E = \begin{bmatrix} G & 0_{n \times n} \\ 0_{n \times n} & G \end{bmatrix}$,

$$R = \begin{bmatrix} \eta\rho\lambda^2 & 1/2\eta\lambda \\ 1/2\eta\lambda & 1/2\rho\lambda \end{bmatrix}。$$

由矩阵相似性定理可得, 矩阵 P 相似于矩阵 R , 故

两矩阵有相同的特征值, 令矩阵 R 的特征多项式为 0 可得关于其特征值的等式:

$$\mu_i^2 - (\rho_i \lambda_i / 2 + \eta_i \rho_i \lambda_i^2) \mu_i + \frac{\eta_i \rho_i \lambda_i^3}{2} - \frac{1}{4} \beta_i^2 \lambda_i^2 = 0$$

由一元二次不等式的性质, 当满足下面不等式时:

$$\begin{cases} \rho_i \lambda_i / 2 + \eta_i \rho_i \lambda_i^2 > 0 \\ \eta_i \rho_i^2 \lambda_i^3 / 2 - \eta_i^2 \lambda_i^2 / 4 > 0 \end{cases}$$

矩阵 R 特征值 $\mu_i > 0$, 取两不等式的交集可得 $\lambda_i > \eta_i / 2\rho_i^2$ 。如果 $\max \left\{ \frac{\eta_i}{2\rho_i^2} \right\} < \lambda_{\min}$, 则 P 为对称正定矩阵。

同理, Q 为对称正定矩阵时, 当且仅当不等式 $\max \{ \beta_i / (\beta_i^2 + \gamma_i^2) \} < \lambda_{\min}$ 成立。

综合可得, 矩阵 P 和矩阵 Q 同时为对称正定的条件为 $\max \{ \eta_i / (\eta_i^2 + \rho_i^2), \eta_i / 2\rho_i^2 \} < \lambda_{\min}$ 。

证毕。

定理 2: 设高速列车的每节车厢的控制输入为式 (24), 如果不等式 $c_{\min} > | \varepsilon_i |_{\max}$ 满足, 并且 η 和 ρ 满足

$\left\{ \frac{\eta_i}{\eta_i^2 + \rho_i^2}, \frac{\eta_i}{2\gamma_i^2} \right\} < \lambda_{\min}$, 当 $t \rightarrow \infty$ 时, $v_i \rightarrow v_0, \forall i = 1, 2, \dots, n$, 跟随者车厢速度和虚拟领航者车厢速度达到一致。

证明: 令 $x_i - x_0 = \tilde{x}_i, v_i - v_0 = \tilde{v}_i, \tilde{d}_i = d_i - \hat{d}_i$ 将算法 (24) 代入高速列车模型 (6) 中可得:

$$\begin{cases} \dot{\tilde{x}}_i = \tilde{v}_i \\ \dot{\tilde{v}}_i = - \sum_{j=0}^n a_{ij} (\eta_i (\tilde{x}_i - \tilde{x}_j) + \rho_i (\tilde{v}_i - \tilde{v}_j)) - \beta_i \text{sgn} \left(\sum_{j=0}^n a_{ij} (\eta_i (\tilde{x}_i - \tilde{x}_j) + \rho_i (\tilde{v}_i - \tilde{v}_j)) \right) + \frac{\tilde{d}_i}{m_i} - \dot{v}_0 \end{cases} \quad (25)$$

将式(25)改写成矩阵形式可得:

$$\begin{cases} \dot{\tilde{x}} = \tilde{v} \\ \dot{\tilde{v}} = \varepsilon - \eta M \tilde{x} - \rho M \tilde{v} - C \text{sgn}(\eta M \tilde{x} + \rho M \tilde{v}) \end{cases} \quad (26)$$

其中, $\tilde{x} = [\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \dots, \tilde{x}_n]^T, \tilde{v} = [\tilde{v}_1, \tilde{v}_2, \dots, \tilde{v}_n]^T, \varepsilon = [\tilde{d}_1/m_1 - \dot{v}_0, \tilde{d}_2/m_2 - \dot{v}_0, \dots, \tilde{d}_n/m_n - \dot{v}_0]^T, C = \text{diag}(c_1, c_2, \dots, c_n)$ 是对角矩阵。

定义误差向量 $H = [\tilde{x}^T, \tilde{v}^T]^T$, 选取如下李雅普诺夫函数:

$$V = H^T P H \quad (27)$$

对 V 进行求导可得:

$$\begin{aligned}
 \dot{V} &= \tilde{v}^T \eta M \tilde{v} + 2\tilde{x}^T \eta \rho M^2 \tilde{v} + \tilde{x}^T \eta M \dot{\tilde{v}} + \tilde{v}^T \rho M \dot{\tilde{x}} = \\
 &\tilde{v}^T \eta M \tilde{v} + 2\tilde{x}^T (\eta \rho M^2) \tilde{v} + \\
 &\tilde{v}^T \rho M (\varepsilon - \eta M \tilde{x} - \rho M \tilde{v} - C \text{sgn}(\eta M \tilde{x} + \rho M \tilde{v})) + \\
 &\tilde{x}^T \eta M (\varepsilon - \eta M \tilde{x} - \rho M \tilde{v} - C \text{sgn}(\eta M \tilde{x} + \rho M \tilde{v})) = \\
 &\tilde{v}^T (\eta M - \rho^2 M^2) \tilde{v} - \tilde{x}^T \eta^2 M^2 \tilde{x} + \\
 &(\tilde{v}^T \rho + \tilde{x}^T \eta) M (\varepsilon - C \text{sgn}(\eta M \tilde{x} + \rho M \tilde{v})) \leq \\
 &-H^T Q H - c_{\min} \|(\tilde{v}^T \rho + \tilde{x}^T \eta) M\| + \\
 &|\varepsilon_i|_{\max} \|(\tilde{v}^T \rho + \tilde{x}^T \eta) M\| = \\
 &-H^T Q H + (|\varepsilon_i|_{\max} - c_{\min}) \|(\tilde{v}^T \rho + \tilde{x}^T \eta) M\| \quad (28)
 \end{aligned}$$

当 $c_{\min} > |\varepsilon_i|_{\max}$, 可得:

$$V \leq -H^T Q H \leq -\xi_{\min}(Q) \|H\|^2$$

其中, $\xi_{\min}(Q)$ 表示矩阵 Q 的最小特征值。

由于矩阵 Q 对称正定, 所以 $\xi_{\min}(Q) > 0$, 故 $\dot{V} < 0$,

系统全局性稳定。当且仅当 $H = [\tilde{x} \quad \tilde{v}]^T = 0$, 跟随者车厢速度误差可以收敛 $\lim_{t \rightarrow \infty} \|v_i - v_0\| = 0$ 。

证毕。

4 仿真验证及结果分析

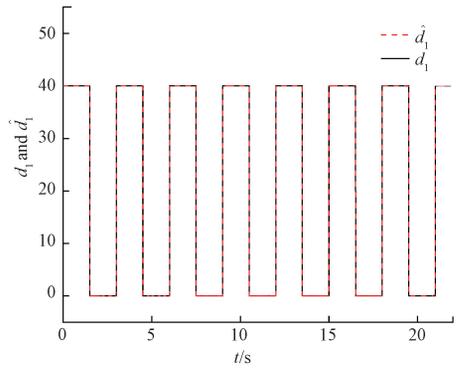
针对不带扰动观测器的传统分布式协同跟踪控制器, 和带改进的扰动观测器改进的分布式协同跟踪控制器分别进行仿真, 比较两种算法的控制性能, 验证所提算法的控制性能。

分布式动车组的模型参数为: $m_i = 80\,000 \text{ kg}$, ($i = 0, 1, 2, 3, 4$), 未知外部扰动的数学模型: $D_{fi} = a_{1i} + a_{2i}v + a_{3i}v_i^2 + \phi_i$, 运行阻力常数是: $a_{1i} = 0.000\,16 \text{ N s}^2/\text{m}^2\text{kg}$, $a_{2i} = 0.000\,776\,16 \text{ N s/mkg}$, $a_{3i} = 0.011\,76 \text{ N/kg}$, 上述为 CRH 型列车的参数^[21]。此外选择均匀、突变、缓变、高频信号作为运行过程中的复合未知扰动, 分别施加到各个车厢上, 模拟运行环境的复杂性。

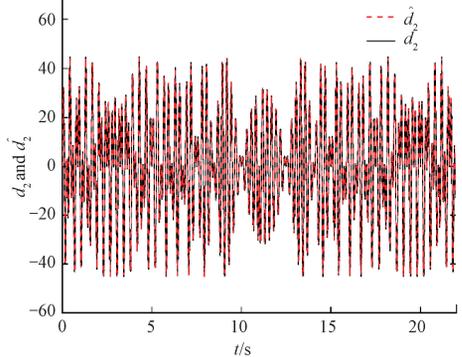
4.1 扰动观测器的性能评估

为测试扰动观测器的精度, 分别采用均匀扰动、缓变扰动、高频扰动、突变扰动 4 种不同的信号, 作为 4 节跟随者车厢的干扰来模拟高速列车运行环境的不确定性, 得到 4 种干扰信号及其对应观测值的对比曲线。

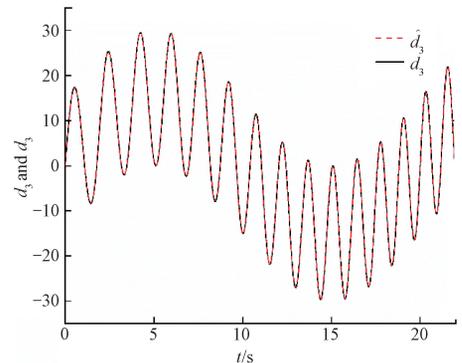
由图 3 可以看出, 针对上述 4 种不同类型的干扰信号, 扰动观测器的最大跟踪时间分别为 0.003 s、0.065 s、0.004 s、0.074 s; 各观测值的稳态误差分别为 0.324%、0.678%、0.546%、0.768%, 满足观测器性能要求。



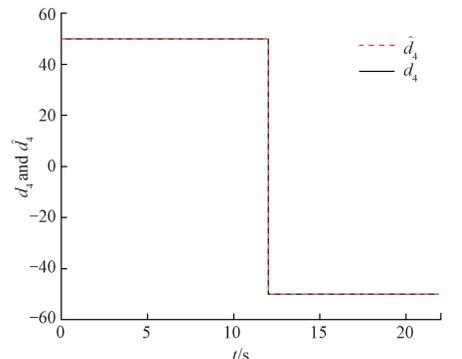
(a) 车厢1的均匀扰动观测效果
(a) Observation effect of uniform disturbance in carriage 1



(b) 车厢2的高频扰动观测效果
(b) Observation effect of high frequency disturbance in carriage 2



(c) 车厢3的缓变扰动观测效果
(c) Observation effect of slowly varying disturbance in carriage 3



(d) 车厢4的突变扰动观测效果
(d) Observation effect of mutation perturbation in carriage 4

图 3 4 种不同类型扰动观测效果

Fig. 3 Four different types of disturbances observation effect

4.2 带扰动观测器的高速列车分布式协同速度跟踪控制

为更好地模拟高速列车的实际运行情况,设置加速、匀速、制动3个不同的阶段。设定的参考速度信号为:

$$v^* = \begin{cases} 10t, & 0 < t < 8 \\ 80, & 8 \leq t < 14 \\ 220 - 10t, & 14 \leq t \leq 22 \end{cases} \quad (29)$$

为研究在给定参考速度信号和不确定性干扰的影响下的各个车厢之间的速度同步情况,图4给出了各车厢之间的速度跟踪的动态变化过程。

图4中 v_0 表示虚拟领航者车厢的输出速度,即各跟随者车厢的输入信号,其余为跟随者车厢的速度,可以看出各跟随者车厢的速度可以很好地跟踪虚拟领航者车厢。

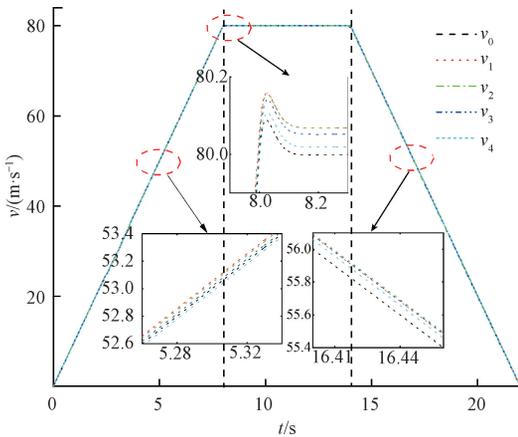


图4 带改进扰动观测器的速度跟踪图
Fig. 4 Effect of velocity tracking with IDO

从图5可以看出,从0开始加速运行阶段,跟随者车厢1、2、3、4与虚拟领航者车厢0的速度跟踪误差分别为0.0034%、0.0028%、0.0026%、0.0024%;在匀速运行阶段,跟随者车厢1、2、3、4与虚拟领航者车厢0的速度跟踪误差分别为0.0029%、0.0031%、0.005%、0.0036%;在制动运行阶段,跟随者车厢1、2、3、4与虚拟领航者车厢0的速度跟踪误差分别为0.006%、0.0042%、0.0035%、0.005%。本文利用各跟随者车厢之间的信息交流对车厢速度进行协同,其协同过程主要体现在各个过渡点,即在第8s和第14s时的过渡阶段,车厢速度出现轻微变化,满足高速列车实际运行的速度要求。

4.3 不带扰动观测器的高速列车分布式协同速度跟踪控制

不带扰动观测器的高速列车分布式协同速度跟踪控制,除不带扰动观测器外,其余仿真条件和5.2节一样。由图6和7可以看出,在不引入扰动观测器反馈补偿的

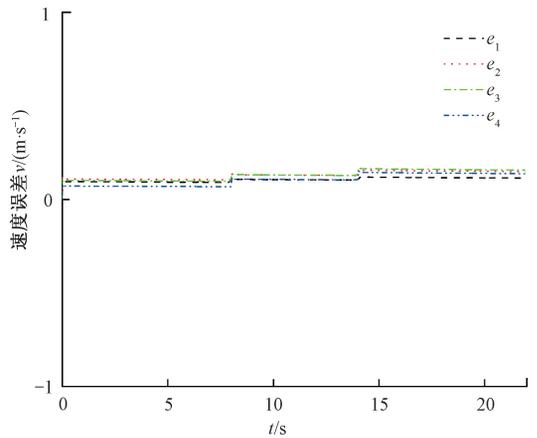


图5 带改进扰动观测器时速度误差图
Fig. 5 Velocity tracking error with IDO

情况下,各跟随者车厢在加速阶段、匀速阶段、制动阶段与虚拟领航者车厢均存在较大的跟踪误差。而在相同仿真条件下,带扰动观测器的速度跟踪控制达到了理想的同步控制精度,从而验证了本文所提出改进型带扰动观测器的分布式协同一致算法的正确性和有效性。

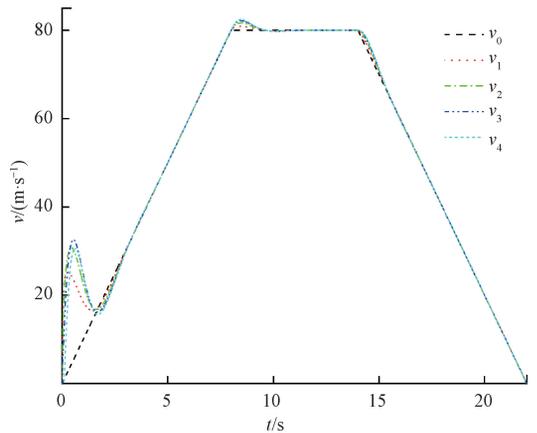


图6 不带改进扰动观测器时速度跟踪图
Fig. 6 Effect of velocity tracking without IDO

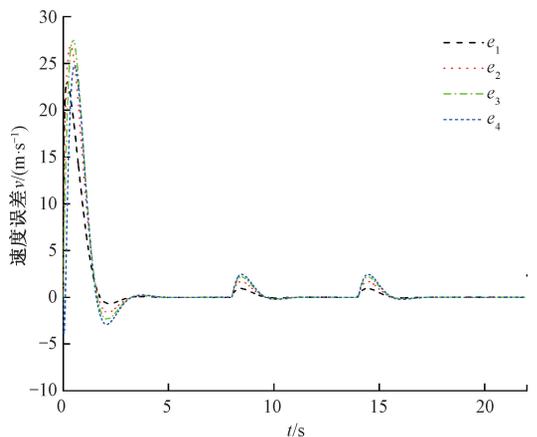


图7 不带改进扰动观测器时速度误差图
Fig. 7 Velocity tracking error without IDO

5 结 论

针对高速列车系统因复合未知扰动引起的列车车厢的速度不同步问题,本文提出一种基于扰动观测器的高速列车分布式速度协同跟踪控制算法,通过和传统分布式速度协同跟踪控制算法对比,得出如下结论:

1) 将高速列车系统和多智能体系统相结合,每节车厢视作一个智能体,利用车厢之间的信息交流设计分布式速度协同跟踪控制器,控制器的设计得到简化。

2) 利用扰动观测器对高速列车中的复合未知扰动实时准确估计,有效消除复合未知扰动对高速列车的影响,提高了系统的鲁棒性和动态响应速度。

3) 与传统的分布式速度协同跟踪控制器相比,改进的分布式速度协同跟踪控制器有更好的鲁棒性和速度跟踪精度,提高了列车运行的稳定性。

参考文献

- [1] 张昌凡,殷晓飞,刘建华,等. 高速列车制动力分配优化控制算法研究 [J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(3): 80-87.
ZHANG CH F, YIN X F, LIU J H, et al. Research on optimal control algorithm for braking force distribution of high-speed train [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2018, 32(3): 80-87.
- [2] 董昱,魏万鹏. 基于 RBF 神经网络 PID 控制的列车 ATO 系统优化 [J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(1): 103-109.
DONG Y, WEI W P. Optimization of train ATO system based on BF neural network PID control [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(1): 103-109.
- [3] 王青元,吴鹏,冯晓云,等. 基于自适应终端滑模控制的城轨列车精确停车算法 [J]. 铁道学报, 2016, 38(2): 56-63.
WANG Q Y, WU P, FENG X Y, et al. Precise automatic train stop control algorithm based on adaptive terminal sliding mode control [J]. Journal of the China Railway Society, 2016, 38(2): 56-63.
- [4] 何之煜,杨志杰,吕旌阳. 基于自适应模糊滑模的列车精确停车制动控制算法 [J]. 中国铁道科学, 2019, 40(2): 122-129.
HE ZH Y, YANG ZH J, LYU J Y. Braking control algorithm for accurate train stopping based on adaptive fuzzy sliding mode [J]. China Railway Science, 2019, 40(2): 122-129.
- [5] LI Z Q, YANG H, ZHANG K P, et al. Distributed model predictive control based on multi-agent model for

electric multiple units [J]. Acta Automatica Sinica, 2014, 40(11): 150-156.

- [6] YANG H, FU Y, WANG D H. Multi-ANFIS model based synchronous tracking control of high-speed electric multiple unit [J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2017, 26(3): 1472-1484.
- [7] JI H H, HOU Z S, ZHANG R K. Adaptive iterative learning control for high-speed trains with unknown speed delays and input saturations [J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2016, 13(1): 260-273.
- [8] 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 H Y, XU H Z. Study on model reference adaptive control of ATO systems [J]. Journal of the China Railway Society, 2013, 35(7): 68-73.
- [9] YAO X, PARK J H, DONG H, et al. Robust adaptive nonsingular terminal sliding mode control for automatic train operation [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2019, 49(12): 2406-2415.
- [10] LIU H G, YANG H, WANG D H. Robust speed prediction of high-speed trains based on improved echo state networks [J]. Neural Computing and Applications, 2021, 33(7): 2351-2367.
- [11] SU H S, WANG X F, LIN Z L. Flocking of multi-agents with a virtual leader [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2009, 54(2): 293-307.
- [12] CAO Y C, YU W W, REN W, et al. An overview of recent progress in the study of distributed multi-agent coordination [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2012, 9(1): 427-438.
- [13] LI Z T, GAO L X, CHEN W H, et al. Distributed adaptive cooperative tracking of uncertain nonlinear fractional-order multi-agent systems [J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2019, 7(1): 292-300.
- [14] ZHANG L P, ZHANG G S. Optimal output regulation for heterogeneous descriptor multi-agent systems [J]. Journal of the Franklin Institute, 2021, 358(2): 1475-1498.
- [15] CAO Y C, REN W. Distributed coordinated tracking with reduced interaction via a variable structure approach [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2012, 57(1): 33-48.
- [16] CHEN L J, SUN J T. Distributed optimal analysis for the multi-agent system with hybrid protocols [J]. Journal of the Franklin Institute, 2017, 354(2): 1160-1168.
- [17] ZHANG W T, ZUO Z Q, WANG Y J, et al. Double-

integrator dynamics for multiagent systems with antagonistic reciprocity [J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2019, 50(9): 4110-4120.

- [18] LU M B, LIU L. Distributed feedforward approach to cooperative output regulation subject to communication delays and switching networks [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2016, 62(4): 1999-2005.
- [19] WANG J H, HU X M. Distributed consensus in multi-vehicle cooperative control: Theory and applications [J]. IEEE Control Systems Magazine, 2010, 30(3): 85-86.
- [20] ZHANG C F, WU H, HE J, et al. Consensus tracking for multi-motor system via observer based variable structure approach [J]. Journal of the Franklin Institute, 2015, 352(8): 3366-3377.
- [21] HE J, YANG B C, ZHANG C F, et al. Robust consensus braking algorithm for distributed EMUs with uncertainties [J]. IET Control Theory & Applications, 2019, 13(17): 2766-2774.
- [22] BAI W Q, LIN Z L, DONG H R, et al. Distributed cooperative cruise control of multiple high-speed trains under a state-dependent information transmission topology [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2019, 20(7): 2750-2763.
- [23] LI S K, YANG L X, GAO Z Y. Distributed optimal control for multiple high-speed train movement: An alternating direction method of multipliers [J]. Automatica, 2020, 112: 108-115.
- [24] REZAEI V, STEFANOVIC M. Distributed output feedback stationary consensus of multi-vehicle systems in unknown environments [J]. Control Theory and Technology, 2018, 16(2): 17-28.
- [25] BAI W Q, DONG H R, YAO X M, et al. Robust fault detection for the dynamics of high-speed train with multi-source finite frequency interference [J]. ISA Transactions, 2018, 18(8): 76-87.
- [26] ZHAO Y, WANG T Z, KARIMI H R. Distributed cruise control of high-speed trains [J]. Journal of the Franklin Institute, 2017, 354(14): 6044-6061.
- [27] KRISHNA M B, NARAYANA S J. Disturbance observer based distributed consensus control strategy of multi-agent system with external disturbance in a standalone DC microgrid [J]. Asian Journal of Control, 2021, 23(2): 920-936.
- [28] RASHAD R, ABOUDONI A, EIBADAWY A. A novel disturbance observer-based backstepping controller with command filtered compensation for a MIMO system [J]. Journal of the Franklin Institute, 2016, 353(16): 4039-4061.

作者简介



赵凯辉, 1997 年于中南大学获得学士学位, 2005 年于东南大学获得硕士学位, 2015 年于中南大学获得博士学位, 现为湖南工业大学教授, 主要研究方向为永磁同步电机智能控制及其故障诊断。

E-mail: zhaokaihui@hut.edu.cn

Zhao Kaihui received B. Sc. degree from Central South University in 1997, M. Sc. degree from Southeast University in 2005, and Ph. D. degree from Central South University in 2015, respectively. Now he is a professor in Hunan University of Technology. His main research interests include intelligent control and fault diagnosis of permanent magnet synchronous motor.



邱鹏旗, 2020 年于郑州轻工业大学获得学士学位。现为湖南工业大学研究生, 主要研究方向为电力传动技术及其故障诊断。

E-mail: m20080800019@stu.hut.edu.cn

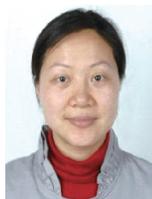
Qiu Pengqi received B. Sc. degree from Zhengzhou University of Light Industry in 2020. Now he is a M. Sc. candidate at Hunan University of Technology. His main research interests include electric drive and technology and its fault diagnosis.



张昌凡, 1982 于湖南工业大学获得学士学位, 1989 年于西南交通大学获得硕士学位, 2001 年于湖南大学获得博士学位, 现为湖南工业大学教授、博士生导师, 主要研究方向为非线性控制及应用等。

E-mail: zhangchangfan@263.net

Zhang Changfan received his B. Sc. degree in 1982 from Hunan University of Technology, received his M. Sc. degree in 1989 from Southwest Jiaotong University, received his Ph. D. degree in 2001 from Hunan University in 2001. Now he is a professor, doctoral supervisor in Hunan University of Technology. His main research interests include nonlinear control and applications.



何静 (通信作者), 2002 年于中南林业科技大学获得硕士学位, 2009 年于国防科技大学获得博士学位, 现为湖南工业大学教授, 主要研究方向为机电系统故障诊断等。

E-mail: hejing@263.net

He Jing (Corresponding author) received her M. Sc. degree in 2002 from Central South University of Forestry, received her Ph. D. in 2009 from National University of Defense Technology. Now she is a professor in Hunan University of Technology. Her main research interest includes electro-mechanical system fault diagnosis.