基于自适应观测器的列车牵引系统执行器故障诊断

李文凯，冒泽慧，姜　斌，戴文雯
（南京航空航天大学 自动化学院，江苏 南京 211106）

摘　要：针对高速列车牵引系统执行器故障，提出了一种基于自适应观测器的故障诊断方法。针对高速列车纵向运动模型参数不易获得的特点，建立了参数未知的列车动态数学模型。考虑到高速列车牵引系统具有多个执行器，其故障发生时间及位置未知，针对不同故障位置，设计了基于自适应技术的故障诊断观测器，观测器相关参数由自适应律更新，通过观测器与列车系统匹配实现故障诊断，基于李雅普诺夫稳定性定理，证明了匹配观测器的收敛性和不匹配观测器无法收敛，从而诊断出故障位置及时刻。最后通过一个高速列车仿真例子验证了所提故障诊断方法的有效性。

关键词：故障诊断；执行器故障；高速列车

中图分类号：TP277　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1672-3767(2017)05-0060-05

DOI：10.16452/j.cnki.sdkjzk.2017.05.009

Adaptive Observer Based Fault Diagnosis for High-speed Train Traction System with Actuator Faults

LI Wenkai[1], MAO Zehui[1], JIANG Bing[1], DAI Wenwen[1]
(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 211106, China)

Abstract: In this paper, an adaptive observer based fault diagnosis scheme is proposed for high-speed train traction system with actuator faults. Since it is difficult to obtain the accurate value of the train parameters, the longitudinal dynamics model with unknown parameters is introduced to study the fault diagnosis problem. Considered the multiple actuators in the high-speed train traction system with the unknown failure time and failure patterns, an adaptive technique based fault diagnosis observer is designed for different failure patterns, in which the observer parameters are updated by adaptive laws. Through the match of observer and train system, the fault position can be diagnosed. Based on Lyapunov functions, it is proved that the observer errors can be convergent under the matched or cannot be convergent when unmatched. Simulation results on a high-speed train model are presented to illustrate the performance of the developed adaptive observer based fault diagnosis scheme.

Key words: fault diagnosis; actuator fault; high-speed train

高速列车具有速度快、承载多以及高效率的特性，其任何设备发生故障都可能影响列车的正常运行。近些年，出现了不少有关高速列车故障诊断的研究成果[1-3]。但这些研究大都采用基于模型的方法，用已知常量或时变有界函数描述列车纵向动力学模型参数。然而，列车在实际运行过程中，这些参数都是时变的且和轨道状态有关，很难获取其准确值或变化范围，且这些常参数或有界变参数无法完整体现系统的动态特征。

收稿日期：2017-03-19
基金项目：国家自然科学基金项目(61490703，61573180，61374130)
作者简介：李文凯(1992—)，男，江苏泰兴人，硕士研究生，主要从事故障诊断与容错控制研究.
冒泽慧(1981—)，女，江苏如皋人，副教授，主要从事故障诊断与容错控制研究，本文通信作者.
E-mail：zehuimao@nuaa.edu.cn

因此，本文提出一种新的含未知参数的模型来描述列车的纵向运动。

当列车牵引系统执行机构发生故障时，故障类型、振幅和时间是不确定的，需及时进行故障诊断。对于具有多执行器的系统，故障发生后，对故障执行器进行定位，可为后续容错控制提供必要的故障信息。故障诊断技术经过近 50 年的发展，有不少执行器故障诊断结果，如文献[4-8]，但在这些结果中，系统的参数往往是已知的，针对未知参数的故障诊断结果少有研究。且对多执行器的故障定位隔离问题，亦未见充分研究。

针对高速列车牵引系统执行器故障，采用未知参数模型描述列车运动，考虑多执行器故障隔离定位问题，基于自适应观测器构建执行机构故障诊断方案。主要贡献：①在高速列车单工况运行下，引入未知常数模型描述列车纵向运动；②当系统参数未知时，考虑执行器故障，设计自适应观测器和自适应律；③通过观测器与故障模型匹配实现故障诊断，基于李雅普诺夫稳定性定理，证明了匹配观测器的收敛性和不匹配观测器的无法收敛，从而诊断出故障位置及时刻。

1 模型建立

以下为高速列车纵向运动方程，以及列车牵引、制动过程中执行机构的故障模型，并给出故障识别的目标、设计问题和解决方法。

根据文献[9]，引入高速列车的纵向运动模型：

$$M\ddot{x}(t) = F(t) - F_r(t) - F_g(t) - F_c(t)\ , \tag{1}$$

其中，x 是列车的运行速度，m/s；M 是列车的质量，t；$F(t)$ 是列车的牵引力，N；$F_r(t)$ 是常见阻力，N；$F_g(t)$ 是由斜面轨道产生的阻力，N；$F_c(t)$ 是由曲线轨道产生的阻力，N。

由文献[10]，列车的纵向运动可以描述为：

$$M\dot{x}(t) = F(t) - (a_r + b_r\dot{x}(t) + c_r\dot{x}^2(t)) - Mg\sin\theta - 0.004DM\ , \tag{2}$$

其中，a_r 是指与列车运行速无关的阻力组成部分，N/t；b_r 是指与运行速度相关的线性阻力，Ns/mt；c_r 是指与运行速度相关的非线性阻力，$\mathrm{Ns^2/m^2t}$；θ 是倾斜轨道倾斜角；D 是曲线轨道的曲率度；t 是列车的运行时间，s。列车运行中的干扰可通过模型参数的变化来表示，虽然模型(1)针对单工况情况，整个列车运行可视为多个单工况的组成，不同工况的切换时间若可获得，本文提出的方法可推广到多工况的列车全运行模型。

牵引系统用于列车运行时产生牵引 $F(t)$（单位为 N），一般由逆变器、整流器、脉冲宽度调剂（pulse width modulation，PWM）、4 个牵引电机、机械传动机构等部分组成。这些部分发生故障时会导致列车牵引力发生异常，例如牵引电机发生匝间短路故障。以列车一个动力单元为例，其输出的力 $F(t)$ 可以看作是 4 个电机各自产生力 $F_j(t)$，$j = 1,2,3,4$ 的总和，牵引电机故障可以建模为：

$$F_j(t) = \bar{F}_j(t) = \bar{F}_{j0} + \sum_{i=1}^{s_j}\bar{F}_{ji}f_{ji}(t) = \boldsymbol{\xi}_j^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\omega}_j(t), t \geqslant t_j\ , \tag{3}$$

其中，$\bar{F}_{j0}$ 和 $\bar{F}_{ji}$ 为电机故障时输出力的常值组成部分，发生故障时刻 t_j，以及故障类型是未知的，基础信号 f_{ji} 是已知的，s_j 是第 j 个执行机构基础信号的个数，$\boldsymbol{\xi}_j = [\bar{F}_{j0}, \bar{F}_{j1}, \cdots, \bar{F}_{js_j}]^{\mathrm{T}} \in R^{s_j+1}$，$\boldsymbol{\omega}_j = [1, f_{j1}(t), \cdots, f_{js_j}]^{\mathrm{T}} \in R^{s_j+1}$。

根据公式(2)，系统输入可以写为：

$$F(t) = \sum_{j=1}^{4}(\sigma_j\nu_j(t) + (1-\sigma_j)\bar{F}_j(t))\ , \tag{4}$$

其中 $\nu_j(t)$ 是需要设计的控制信号，σ_j 是执行器故障类型参数，

$$\sigma_j = \sigma_j(t) = \begin{cases} 0 & F_j(t) = \bar{F}_j(t) \\ 1 & \end{cases}\ , \tag{5}$$

$\sigma_j = 0$ 时，执行机构发生故障；$\sigma_j = 1$ 时，执行机构处于健康状态。

令 $m = \dfrac{1}{M}$，$a = \dfrac{a_r}{M}$，$b = \dfrac{b_r}{M}$，$c = \dfrac{c_r}{M}$ 和 $\vartheta = \sin\theta$，$x_1 = x$，$x_2 = \dot{x}$，$\boldsymbol{\zeta}_j = m\boldsymbol{\xi}_j^{\mathrm{T}} \in R^{1\times(s_j+1)}$，牵引系统故障模型可写为：

$$\dot{x}_1(t)=x_2(t), \tag{6}$$

$$\dot{x}_2(t)=\sum_{j=1}^{4}m\sigma_j\nu_j(t)+\sum_{j=1}^{4}\boldsymbol{\zeta}_j\boldsymbol{\omega}_j(t)(1-\sigma_j)-a-bx_2(t)$$
$$-cx_2^2(t)-g\vartheta-0.004D。 \tag{7}$$

至此，针对高速列车纵向运动(2)在执行器故障(3)下的故障诊断问题，转化为针对故障系统(6)～(7)的故障识别问题。

2 自适应故障识别

高速列车牵引系统具有多个执行器，识别和隔离发生故障的执行器对后续容错控制设计具有重要意义。进一步考虑到系统的未知参数，设计基于自适应技术的观测器可解决未知参数估计问题，但无法识别发生故障的执行器。若需要定位发生故障的执行器，则需要针对不同故障形式，设计不同的观测器，通过辨识实际故障系统与之相匹配的故障诊断观测器，根据匹配的观测器指示发生故障的执行机构。

2.1 观测器设计

设 $\hat{x}_1(t)$ 和 $\hat{x}_2(t)$ 分别为状态量 $x_1(t)$ 和 $x_2(t)$ 估计值，定义列车位移和速度估计误差为：

$$\tilde{x}_1(t)=x_1(t)-\hat{x}_1(t),\ \tilde{x}_2(t)=x_2(t)-\hat{x}_2(t)。 \tag{8}$$

类似地，可定义其他参数的估计误差 $\tilde{m}(t)=m(t)-\hat{m}(t)$，$\tilde{\boldsymbol{\zeta}}_j(t)=\boldsymbol{\zeta}_j(t)-\hat{\boldsymbol{\zeta}}_j(t)$，$\tilde{a}(t)=a(t)-\hat{a}(t)$，$\tilde{b}(t)=b(t)-\hat{b}(t)$，$\tilde{c}(t)=c(t)-\hat{c}(t)$，$\tilde{\vartheta}(t)=\vartheta-\hat{\vartheta}(t)$，$\tilde{D}(t)=D-\hat{D}(t)$。

令 $\sigma_{(p)}$，$p=1,2,\cdots,N_s$，N_s 是指所有可能发生的故障类型，p 是指 N_s 个故障类型中第 p 种故障类型。在每一种故障类型 $\sigma=\sigma_{(p)}$ 下，考虑系统动态运动(6)～(7)，设计 $\sigma_{(p)}$ 相对应的观测器为：

$$\dot{\hat{x}}_{1(p)}(t)=\hat{x}_{2(p)}(t), \tag{9}$$

$$\dot{\hat{x}}_{2(p)}(t)=\lambda_1\tilde{x}_{1(p)}(t)+\lambda_2\tilde{x}_{2(p)}(t)+\sum_{j=1}^{4}\hat{m}_{(p)}(t)\sigma_{j(p)}\nu_j(t)+\sum_{j=1}^{4}\hat{\boldsymbol{\zeta}}_{j(p)}(t)\boldsymbol{\omega}_j(t)(1-\sigma_{j(p)})$$
$$-\hat{a}_{(p)}(t)-\hat{b}_{(p)}(t)x_{2(p)}(t)-\hat{c}_{(p)}(t)x_{2(p)}^2(t)-g\hat{\vartheta}_{(p)}(t)-0.004\hat{D}_{(p)}(t), \tag{10}$$

其中，$p=1,2,\cdots,N_s$，λ_1，λ_2 是需要选择的正值常数。

为了实时更新观测器(10)中未知参数的估计值，令 $\tilde{\boldsymbol{x}}(t)=\begin{bmatrix}\tilde{x}_1(t)\\ \tilde{x}_2(t)\end{bmatrix}$ 和 $\boldsymbol{B}=\begin{bmatrix}0\\1\end{bmatrix}$，设计如下的自适应律：

$$\dot{\hat{m}}_{(p)}(t)=\gamma_m\tilde{\boldsymbol{x}}^{\mathrm{T}}(t)\boldsymbol{P}_e\boldsymbol{B}\sigma_{j(p)}\nu_j(t), \tag{11}$$

$$\dot{\hat{\zeta}}_{(p)}(t)=\gamma_\zeta\tilde{\boldsymbol{x}}^{\mathrm{T}}(t)\boldsymbol{P}_e\boldsymbol{B}\boldsymbol{\omega}_j(t)(1-\sigma_{j(p)}), \tag{12}$$

$$\dot{\hat{a}}_{(p)}(t)=-\gamma_a\tilde{\boldsymbol{x}}^{\mathrm{T}}(t)\boldsymbol{P}_e\boldsymbol{B}, \tag{13}$$

$$\dot{\hat{b}}_{(p)}(t)=-\gamma_b\tilde{\boldsymbol{x}}^{\mathrm{T}}(t)\boldsymbol{P}_e\boldsymbol{B}x_2(t), \tag{14}$$

$$\dot{\hat{c}}_{(p)}(t)=-\gamma_c\tilde{\boldsymbol{x}}^{\mathrm{T}}(t)\boldsymbol{P}_e\boldsymbol{B}x_2^2(t), \tag{15}$$

$$\dot{\hat{\vartheta}}_{(p)}(t)=-\gamma_\vartheta g\tilde{\boldsymbol{x}}^{\mathrm{T}}(t)\boldsymbol{P}_e\boldsymbol{B}, \tag{16}$$

$$\dot{\hat{D}}_{(p)}(t)=-\gamma_D 0.004\tilde{\boldsymbol{x}}^{\mathrm{T}}(t)\boldsymbol{P}_e\boldsymbol{B}。 \tag{17}$$

其中，$\gamma_m,\gamma_\zeta,\gamma_a,\gamma_b$，$\gamma_c$，$\gamma_\vartheta$ 和 γ_D 为正的常数，$\boldsymbol{P}_e=\boldsymbol{P}_e^{\mathrm{T}}>0$ 且满足 $\boldsymbol{A}_e^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}_e+\boldsymbol{P}_e\boldsymbol{A}_e=-\boldsymbol{Q}_e$，且对于某些 $\boldsymbol{Q}_e=\boldsymbol{Q}_e^{\mathrm{T}}>0$，$\boldsymbol{A}_e=\begin{bmatrix}0 & -1\\ -\lambda_1 & -\lambda_2\end{bmatrix}$。

2.2 稳定性分析

方程(9)～(10)中所有的估计值可被分为两种类型，其中一种是与实际系统 $\sigma=\sigma_{(p)}$ 相匹配的估计值，另一种是与实际系统不匹配的估计值。根据方程(6)～(7)和(9)～(10)，与第 p 种故障类型匹配的估计值的估计误差的表达式可以写为：

$$\dot{\tilde{x}}_{1(p)}(t)=-\tilde{x}_{2(p)}(t)\ ,\tag{18}$$

$$\begin{aligned}\dot{\tilde{x}}_{2(p)}(t)=&-\lambda_1\tilde{x}_{1(p)}(t)-\lambda_2\tilde{x}_{2(p)}(t)+\sum_{j=1}^{4}\tilde{m}_{(p)}(t)\sigma_{j(p)}\nu_j(t)\\&+\sum_{j=1}^{4}\tilde{\boldsymbol{\zeta}}_{j(p)}(t)\boldsymbol{\omega}_j(t)(1-\sigma_{j(p)})-\tilde{a}_{(p)}(t)-\tilde{b}_{(p)}(t)x_{2(p)}(t)\\&-\tilde{c}_{(p)}(t)x_{2(p)}^2(t)-\mathrm{g}\tilde{\vartheta}_{(p)}(t)-0.004\tilde{D}_{(p)}(t)\ 。\end{aligned}\tag{19}$$

与第 p 种故障类型不匹配的估计值的估计误差的表达式可写为：

$$\dot{\tilde{x}}_{1(q)}(t)=-\tilde{x}_{2(q)}(t)\ ,\tag{20}$$

$$\begin{aligned}\dot{\tilde{x}}_{2(q)}(t)=&-\lambda_1\tilde{x}_{1(q)}(t)-\lambda_2\tilde{x}_{2(q)}(t)+\sum_{j=1}^{4}\tilde{m}_{(q)}(t)\sigma_{j(q)}\nu_j(t)\\&+\sum_{j=1}^{4}\tilde{\boldsymbol{\zeta}}_{j(q)}(t)\boldsymbol{\omega}_j(t)(1-\sigma_{j(q)})+\sum_{j=1}^{4}m_{(q)}(\sigma_{j(p)}-\sigma_{j(q)})\nu_j(t)\\&+\sum_{j=1}^{4}\boldsymbol{\zeta}_{j(q)}\boldsymbol{\omega}_j(t)(\sigma_{j(q)}-\sigma_{j(p)})-\tilde{a}_{(q)}(t)-\tilde{b}_{(q)}(t)x_{2(q)}(t)\\&-\tilde{c}_{(q)}(t)x_{2(q)}^2(t)-\mathrm{g}\tilde{\vartheta}_{(q)}(t)-0.004\tilde{D}_{(q)}(t)\ 。\end{aligned}\tag{21}$$

其中 $q=1,2,\cdots,N_s$ ，$q\neq p$ ，与第 p 种故障类型相匹配的估计值误差相比较，方程(21)多出了 $\sum_{j=1}^{4}m_{(q)}(\sigma_{j(p)}-\sigma_{j(q)})\nu_j(t)+\sum_{j=1}^{4}\boldsymbol{\zeta}_{j(q)}\boldsymbol{\omega}_j(t)(\sigma_{j(q)}-\sigma_{j(p)})$ 这两项。

根据公式(9)和(10)，系统在故障类型 $\sigma=\sigma_{(p)}$ 条件下运行时，多个自适应估计器的性能分析分为两种：匹配和不匹配。

选择正定方程

$$\begin{aligned}V_0=&\tilde{\boldsymbol{x}}^{\mathrm{T}}(t)\boldsymbol{P}_e\tilde{\boldsymbol{x}}(t)+\gamma_m^{-1}\tilde{m}^2(t)+\gamma_\zeta^{-1}\tilde{\boldsymbol{\zeta}}^{\mathrm{T}}(t)\tilde{\boldsymbol{\zeta}}(t)+\gamma_a^{-1}\tilde{a}^2(t)\\&+\gamma_b^{-1}\tilde{b}^2(t)+\gamma_c^{-1}\tilde{c}^2(t)+\gamma_\vartheta^{-1}\tilde{\vartheta}^2(t)+\gamma_D^{-1}0.004\tilde{D}^2(t)\ 。\end{aligned}\tag{22}$$

匹配情况：根据第 p 种故障类型的估计器，代入相匹配的估计误差方程(19)以及自适应律(11)～(17)，得到 $V_{0(p)}$ 的一阶导数：

$$\dot{V}_{0(p)}=-\tilde{\boldsymbol{x}}_p^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Q}_e\tilde{\boldsymbol{x}}_p\ 。\tag{23}$$

由上式可知，$\dot{V}_{0(p)}=-\tilde{\boldsymbol{x}}_p^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Q}_e\tilde{\boldsymbol{x}}_p\leqslant 0$，所以 $\tilde{\boldsymbol{x}}_{2(p)}$ 是收敛的。

不匹配情况：根据第 q ($q\neq p$) 种不匹配的故障类型的估计器，代入不匹配的估计误差方程(21)和自适应律(11)～(17)，可以得到 $V_{0(q)}$ 的一阶导数：

$$\begin{aligned}\dot{V}_{0(q)}=&-\tilde{\boldsymbol{x}}_q^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Q}_e\tilde{\boldsymbol{x}}_q+\tilde{\boldsymbol{x}}_q^{\mathrm{T}}(\sum_{j=1}^{4}m_{(q)}(\sigma_{j(p)}-\sigma_{j(q)})\nu_j(t)\\&+\sum_{j=1}^{4}\boldsymbol{\zeta}_{j(q)}\boldsymbol{\omega}_j(t)(\sigma_{j(q)}-\sigma_{j(p)}))\ 。\end{aligned}\tag{24}$$

由上式可知，对于第 q 种不匹配的观测器，$\tilde{x}_{2(q)}$ 是不收敛的。

3 仿真

下面对健康系统和执行机构发生故障的系统进行仿真研究。考虑到所有可能发生的故障类型，选择第一个执行机构发生故障为例，进行故障建模仿真。

仿真系统参数来自于广泛投入使用的 8 节车厢 CRH-2 型高速列车，空车质量 $M=408$ t，执行机构的数量 16 个。考虑到列车在运行过程中会经过隧道、斜坡和弯道，导致列车的阻力系数发生变化，故选择一种运动模态对列车进行建模仿真(公式(2)中参数的具体数值为 $a_r=8.63$ N/t，$b_r=0.072\ 9$ Ns/mt，$c_r=0.001\ 12$ Ns^2/m^{2}t，$\theta=\pi/36$ 和 $D=0.34$)。

考虑到列车运行时可能会发生的故障模态，选择如下的故障类型：

1)200 s 时，执行器 1 发生部分故障。例如，当 $200 \leqslant t < 400$ s 时，$F_1(t) = 2\ 000$ N 。

2)400 s 时，执行器 1 完全损坏。例如，当 $400 \leqslant t < 600$ s 时，$F_1(t) = 0$ N 。

仿真系统的初始条件为 $x_1(0) = x_2(0) = \hat{x}_1(0) = \hat{x}_2(0) = 0$ ，且初始参数估计值是其理想值的 95%。自适应律(8)～(14)的增益为 2。

如图 1 所示，当观测器与发生的故障类型相匹配时，位移估计误差曲线和速度估计误差曲线在 200 s 和 400 s 时均有幅值震荡，且曲线随着时间推移是收敛的，与稳定性分析部分相吻合。

4 结论

本文针对高速列车的纵向运动和牵引系统的执行器故障，在故障发生时间、幅值和类型未知情况下，提出基于自适应观测器的故障诊断方法。主要结论如下：

1)对于高速列车单工况下的纵向运动可采用未知常数模型描述；

2)设计了自适应观测器和自适应律，通过观测器与列车系统匹配实现故障诊断；

3)通过 MATLAB 建模仿真，分析仿真结果，验证了提出的故障诊断方法的有效性。

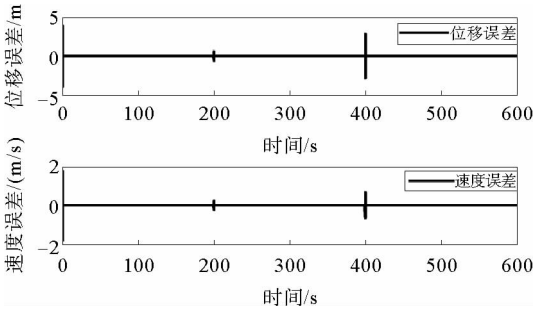

图 1 位移、速度估计误差

Fig. 1 Estimation errors of position and speed

参考文献：

[1]SHEN Q, JIANG B, SHI P, et al. Novel neural networks-based fault tolerant control scheme with fault alarm[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2014, 44(11): 2190-2201.

[2]SONG Y D, SONG Q, CAI W C. Fault-tolerant adaptive control of high-speed trains under traction/braking failures: A virtual parameter-based approach[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2014, 15(2): 737-748.

[3]WANG Y, SONG Y D, GAO H, et al. Distributed fault-tolerant control of virtually and physically interconnected systems with application to high-speed trains under traction/braking failures[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2016, 17(2): 535-545.

[4]SU X, SHI P, WU L, et al. Fault detection filtering for nonlinear switched stochastic systems [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2016, 61(5): 1310-1315.

[5]CAI J, WEN C, SU H, et al. Robust adaptive failure compensation of hysteretic actuators for a class of uncertain nonlinear systems [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2013, 58(9): 2388-2394.

[6]SONG Q, SONG Y D. Data-based fault-tolerant control of high-speed trains with traction/breaking notch nonlinearities and actuator failures[J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 2011, 22(12): 2250-2261.

[7]TAO G, JOSHI S M, MA X. Adaptive state feedback and tracking control of systems with actuator failures[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2001, 46(1): 78-95.

[8]TAO G, CHEN S, JOSHI S M. An adaptive actuator failure compensation controller using output feedback[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2002, 47(3): 506-511.

[9]MAO Z, JIANG B, SHI P. Protocol and fault detection design for nonlinear networked control systems[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2009, 56(3): 255-259.

[10]MAO Z, TAO G, JIANG B, et al. Adaptive compensation of traction system actuator failures for high-speed trains[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2017, PP(99): 1-14.

（责任编辑：高丽华）