

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2005448

磁悬浮列车简捷鲁棒控制与仿真研究*

李卫东 王玮崧 王新屏

(大连交通大学 电气信息工程学院 大连 116028)

摘要: 磁悬浮轨道列车作为一种现代化的交通工具,其悬浮系统具有非线性、不稳定的性质。针对该系统的特性,对其稳定性问题进行研究与讨论。根据悬浮轨道的力学结构,建立了悬浮系统具有非线性性质的物理模型。为了便于理解和研究,将非线性系统利用逆系统的反馈线性化方法线性化,就会得到轨道列车悬浮系统经过补偿后的伪线性系统方程。分析伪线性系统的特性,设计闭环简捷鲁棒控制器。利用 MATLAB 软件中的 Simulink 工具箱对控制系统进行仿真。仿真结果表明,控制器作用下的列车悬浮系统鲁棒性较强,悬浮稳定性较好。对于外部干扰具有较强抗扰性,能更好地达到稳定的悬浮控制要求。

关键词: 磁悬浮列车;逆系统;线性化;简捷鲁棒控制;MATLAB 仿真

中图分类号: U237 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 120.30

Research on simple and robust control and simulation of maglev train

Li Weidong Wang Weisong Wang Xinping

(College of Electrical Information Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China)

Abstract: As a modern means of transportation, the maglev train has a non-linear and unstable levitation system. According to the characteristics of the system, the stability problem is researched and discussed. According to the mechanical structure of the suspension track, a physical model of the suspension system with nonlinear properties is established. In order to facilitate understanding and research, the nonlinear system is linearized by the feedback linearization method of the inverse system, and the pseudo-linear system equation of the rail train suspension system after compensation will be obtained. Analyze the characteristics of the pseudo-linear system and design a closed-loop simple and robust controller. Use the Simulink toolbox in MATLAB software to simulate the control system. The simulation results show that the train suspension system under the action of the controller has strong robustness and good suspension stability. It has strong immunity to external interference and can better meet the requirements of stable suspension control.

Keywords: maglev train; inverse system; linearization; simple and robust control; MATLAB simulation

0 引言

作为目前的一种现代轨道交通的高科技设备,磁悬浮轨道列车可以通过电磁力的作用,来做到无接触的列车与轨道之间的悬浮以及导向,列车的牵引运行是通过轨道上的直线电机的电磁力来完成的。常导磁吸式(electromagnetic suspension, EMS)列车,为了减少运行轨道与列车车体之间的摩擦力,其利用电磁铁和磁场的相互作用将轨道上的列车用电磁力悬浮起来。在使用中,必须对安装在转向架上的电磁铁中的电流大小进行精准地控制,才能确保在电磁力作用下,EMS列车的悬浮系统的稳定性和运行期间轨道列车的平稳性及舒适性。为了使磁场拥有稳

定的强度和产生稳定的电磁悬浮力,需要保持直线电机有较高且稳定的功率,才能使列车主体与导轨之间的间隙保持在稳定的范围内^[1]。

近些年,针对悬浮控制系统的特点,其非线性以及开环不稳定的特性^[2],国内外学者研究并探索出多种非线性控制的方法。刘恒坤等^[3]为了达到预期的稳定效果,分析了磁浮轨道列车的搭接结构,并采用微分方法解耦线性化。其对解耦线性化之后的系统,用极点配置的方法进行线性系统的控制。龙鑫林等^[4]提出了一种控制方法,该基于非线性反馈控制的方法的提出,是为了解决这种电磁铁和永磁铁相混合的轨道悬浮系统,在非线性特性方面的问题。黎松奇等^[5]通过

收稿日期:2020-11-28

* 基金项目:国家自然科学基金项目(61471080)、辽宁省教育厅科学研究项目(JDL2019019)资助

对非线性的悬浮系统采用伪线性化的方法,以及系统综合的方式,设计出一种组合式控制器。该控制器采用了基于逆系统方法的反馈线性化与鲁棒伺服控制相结合的形式,但这种方法控制精准性差,系统稳定性不高。王成杰等^[6]提出了一种滑模变结构的控制算法,以提高系统鲁棒性和改善系统稳定裕度不足的问题。Tran 等^[7]为了控制存在未知动态特性不稳定的 EMS 型磁悬浮系统,提出了一种任意有限时间跟踪控制法。Wang 等^[8]设计了一种状态反馈控制器,这种控制器的设计是基于卡尔曼滤波器的状态估计功能,在很大程度上降低了列车轨道梁刚度对于非线性悬浮控制系统的过度影响。但由于系统采用的是近似的方法,其得到的线性化模型来控制被控对象,因此会导致系统的控制性能会在系统远离平衡点位置的时候降低。Su 等^[9]提出了模糊控制的控制方法,用于控制非线性电磁悬浮轨道列车悬浮系统的 T-S (Takagi-Sugeno)模糊模型,仿真结果证明了该方法可以有效地去除有界干扰,但使用这种方法很大程度上提升了设计控制器时的复杂度,因此工程应用难度较大。

对于磁悬浮列车的轨道悬浮系统的非线性不稳定问题,本文主要针对其控制系统的稳定性方面进行研究。基于这一方向,首先,建立了磁悬浮轨道列车悬浮系统的非线性物理模型。然后,为了便于控制器的设计,磁悬浮列车的非线性轨道悬浮系统,将通过逆系统的反馈线性化方法进行线性化,得到其线性化模型。最后,运用简捷鲁棒控制的方法设计针对该伪线性系统的控制器,以达到设计过程简单、鲁棒性能好的目的。

1 磁悬浮列车系统模型的建立

单电磁铁悬浮系统是磁浮列车悬浮系统的基本单元^[10],并且对于设计单电磁铁悬浮控制的稳定悬浮控制系统十分关键^[11]。图1所示的单电磁铁的物理模型,为单电磁铁轨道悬浮系统在轨道列车系统中的物理模型。

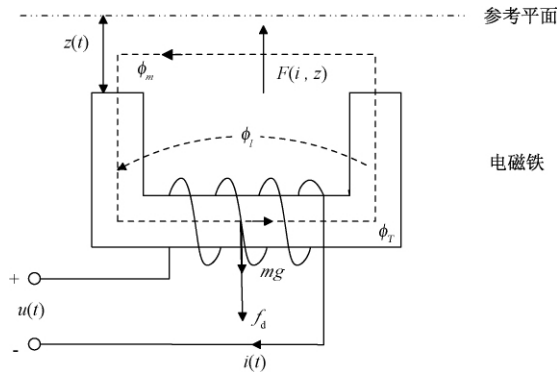


图1 单磁铁悬浮的物理模型

图1中, $z(t)$ 为磁极表面到参考平面的距离; Φ_r , Φ_m , Φ_l 分别为主极、气隙和绕组漏磁通; $F(i, z)$ 为电磁铁到参考平面的电磁吸力; m 为悬浮单电磁铁的等效质量; f_d 为外界扰动; $u(t)$ 为磁铁线圈电压大小; $i(t)$ 为线圈电

流大小。

由图1分析可以得到悬浮系统的电磁铁在垂直方向上的力学方程是:

$$m \frac{d^2 z(t)}{dt^2} = mg + f_d(t) - F(i, z) \quad (1)$$

其中, t 时刻电磁铁到参考平面的电磁吸力为:

$$F(i, z) = \frac{B^2 A}{\mu_0} = \frac{\mu_0 N^2 A}{4} \left[\frac{i(t)}{z(t)} \right]^2 \quad (2)$$

式中: B 为电磁场中磁感应强度; N 为电磁铁绕组匝数; A 为电磁铁磁极表面的面积; μ_0 为空气磁导率。

t 时刻, 电磁铁绕组回路中电压的方程为:

$$u(t) = Ri(t) + \frac{\mu_0 N^2 A}{2z(t)} \frac{di(t)}{dt} - \frac{\mu_0 N^2 Ai(t)}{2[z(t)]^2} \frac{dz(t)}{dt} \quad (3)$$

式中: R 电磁铁绕组电阻。

因此, 将上述表达式联立可得到磁悬浮轨道列车的动力学系统模型, 该模型可以用如下方程组来表示:

$$\begin{cases} m \frac{d^2 z(t)}{dt^2} = mg + f_d(t) - F(i, z) \\ u(t) = Ri(t) + \frac{\mu_0 N^2 A}{2z(t)} \frac{di(t)}{dt} - \frac{\mu_0 N^2 Ai(t)}{2[z(t)]^2} \frac{dz(t)}{dt} \\ F(i, z) = \frac{\mu_0 N^2 A}{4} \left[\frac{i(t)}{z(t)} \right]^2 \end{cases} \quad (4)$$

针对式(4)所表示的轨道系统模型, 取状态变量为 $x_1(t) = z(t)$, $x_2(t) = \dot{z}(t)$, $x_3(t) = i(t)$, 代入式(4), 由此得到转化后的磁悬浮非线性系统的动力学微分方程如式(5)、(6)所示:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = g + \frac{f_d}{m} - \frac{\mu_0 N^2 A}{4m} \left(\frac{x_3}{x_1} \right)^2 \\ \dot{x}_3 = \frac{2}{\mu_0 N^2 A} u x_1 - \frac{2}{\mu_0 N^2 A} x_1 x_3 R + \frac{x_2 x_3}{x_1} \end{cases} \quad (5)$$

$$y = x_1 \quad (6)$$

2 基于逆系统方法的线性化

逆系统的反馈线性化方法, 是一种人们比较易于观察并且易于理解的反馈线性化方法^[12]。利用这种方法, 可以通过逆系统方法求解出的逆系统方程式作为补偿, 补偿给非线性的被控对象^[13]。最后, 为了达到解耦的目的, 可以利用其他的线性系统理论来与该伪线性系统进行综合^[14]。

逆系统基本概念:

设 Σ 为任意的一个系统, 其输入为 $u(\cdot)$, 输出为 $Y(\cdot)$ 。一般输入输出关系可用一个算子表示为 $\theta: u \rightarrow Y$ 或表示为 $Y(\cdot) = \theta[X_0, u(\cdot)]$, 或简化为 $Y = \theta.u$ 。

定义 再设 Π 为又一个系统, 表示其传递关系的算子为 $\theta_a: \Phi \rightarrow u$ 。若取 $\Phi = Y_d^{[a]}$ 时, 使得下式成立, 则系统 Π 为系统 Σ 的 α -阶积分逆系统^[15]。

$$\hat{\theta}_a \Phi = \hat{\theta}_a D^{[a]} Y_d = \theta u = Y_d \quad (D = d/dt) \quad (7)$$

根据该方法求解系统(5)的逆系统:

对式(6)中 y 求导,得:

$$y^{(3)} = \frac{R x_3^2}{m x_1} - \frac{x_3}{m x_1} u \quad (8)$$

令 $y^{(3)} = \delta$, 代入式(8)得:

$$u = R x_3 - \frac{m x_1}{x_3} \delta \quad (9)$$

在逆系统这种线性化方法的作用下,将逆系统方程补偿到非线性的磁悬浮系统中,会得到系统线性化后的状态空间表达式:

$$\begin{cases} X' = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} X + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \delta \\ Y = [1 \quad 0 \quad 0] X \end{cases} \quad (10)$$

$$\text{式中: } Y = y; X = \begin{bmatrix} y \\ y^{(1)} \\ y^{(2)} \end{bmatrix}.$$

很容易看出式(10)是一个可控系统。

由轨道列车悬浮非线性系统线性化后所形成的系统,称之为伪线性系统,针对该伪线性系统进行控制的系统结构如图 2 所示。其中,虚线框所显示出的区域为采用逆系统方法线性化后的伪线性系统结构。

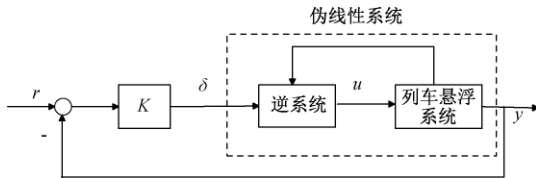


图 2 伪线性系统结构

3 控制器设计

简捷 H_∞ 鲁棒控制算法^[15]利用 H_∞ 控制^[16]中的结果,通过混合灵敏度的控制算法求得的控制算法。在本算法中,可以使用具有工程意义的 4 个参数:带宽频率(交接频率)、最大奇异值、关门斜率(高频渐近线斜率)和闭环频谱峰值,来构造补灵敏度函数 T 。其中, T 和 S 具有相关性,从而可以间接地通过 T 来构造出函数 S (灵敏度函数),然后利用 S 推导出控制器 K ^[17]。通常被控对象 G 事先已知,所以基于该被控对象的控制器 K 将间接地可以通过这个控制器的 T 函数来求得,也就是说,主要可以根据系统的闭环传递函数矩阵来设计相应的简捷鲁棒控制器。

为了保证控制器作用下的被控制系统可以得到稳定的输入信号,并可以无静差的跟踪参考的信号,我们可以选择最大奇异值为 1,而且无峰值的闭环频谱。系统的闭环控制性能由系统的带宽频率的大小所决定,而在一定范围内选择频谱的关门斜率,则可以控制系统的抗干扰敏感程度的大

小。一般来说,关门斜率取 -20 、 -40 和 -60 dB/dec^[18]。

取用上述 3 种程度的关门斜率,为了保证系统可以持续稳定地输出,用惯性系统的最大奇异值为 1 的频谱曲线,近似地来表示补灵敏度函数 T 的奇异值曲线。在当前控制器的设置下,关门斜率为 -20 dB/dec 时,控制器的表达式如下:

$$\frac{1}{T_1 s + 1} = \frac{GK}{1 + GK}, K = \frac{1}{GT_1 s} \quad (11)$$

关门斜率为 -40 dB/dec 时,控制器的表达式如下:

$$\frac{1}{(T_1 s + 1)^2} = \frac{GK}{1 + GK}, K = \frac{1}{GT_1 s (T_1 s + 2)} \quad (12)$$

关门斜率为 -60 dB/dec 时控制器的表达式如下:

$$\frac{1}{(T_1 s + 1)^3} = \frac{GK}{1 + GK}, K = \frac{1}{GT_1 s (T_1^2 s^2 + 3T_1 s + 3)} \quad (13)$$

其中, G 为被控对象,根据上一节将逆系统方法线性化后的伪线性系统,通过其状态空间表达式可以得到, G 是一个不稳定的开环线性系统,其中 $G = 1/s^3$ 。

根据上述关于简捷鲁棒控制器的设计方法,设计如图 3 所示的具有标准反馈结构的系统闭环简捷鲁棒控制算法的控制器。由上文可以看出,该开环伪线性的悬浮控制系统存在 3 个位于临界稳定状态的极点,为了提高设计出的控制系统的鲁棒性,采用 Bode 图近似的方法,将其中的两个极点向左半平面进行稍微移动,使移动过后的 Bode 图与原传递函数的 Bode 图相似,即可得到式(14)所示的传递函数。基于式(14)的传递函数,设计简捷鲁棒控制器,并用此传递函数设计出的控制器。该控制器在标准的反馈结构中,闭环控制图 2 中的伪线性系统传递函数 $G = 1/s^3$ 。

$$G(s) = \frac{1}{s^3 + 3s^2 + 2s} \quad (14)$$

对于式(14)所示的三阶系统,采用二阶的简捷鲁棒控制器,因此选取关门斜率为 -40 dB/dec, $T_1 = 0.001$ 。将 T_1 和 G 代入式(12),设计得到的二阶简捷鲁棒控制器的表达式为:

$$K = \frac{s^2 + 3s + 2}{T_1 (T_1 s + 2)} = \frac{1000s^2 + 3000s + 2000}{0.001s + 2} \quad (15)$$

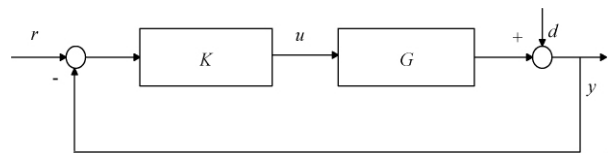


图 3 标准反馈结构

4 系统仿真

根据轨道悬浮系统的非线性特征,使用 Simulink 工具进行仿真与分析。Simulink 是一种可以方便人们理解与使用的框图设计工具,可被广泛地应用于非线性系统的仿真

中。这种框图设计工具可将复杂的模型清晰且直观的展示出来,并且不需要大量的编程语言来构造系统,简化了仿真过程。

表1所示的轨道列车悬浮系统参数为本文所采用的磁悬浮轨道列车的相关参数。

表1 列车悬浮系统参数

磁浮列车参数	参数值
悬浮电磁铁质量 m/kg	500
电磁铁绕组匝数 N	320
电磁铁绕组电阻 R/Ω	30
电磁铁磁极面积 A/m^2	0.84×0.025
空气磁导率 $\mu_0/(\text{H} \cdot \text{m}^{-1})$	$4\pi \times 10^{-7}$

将表1中参数代入式(5)及(6),并根据图2绘制出三阶悬浮系统伪线性系统模型,根据图3绘制加入控制器后的磁悬浮反馈系统,设置目标稳定时的间隙为10 mm。首先,在忽略外部干扰的情况下,使用MATLAB/Simulink工具的工作环境进行仿真分析,建立磁悬浮轨道列车的控制系统仿真图。如图4所示,为进行仿真后的非线性轨道列车系统悬浮间隙的位置响应曲线。

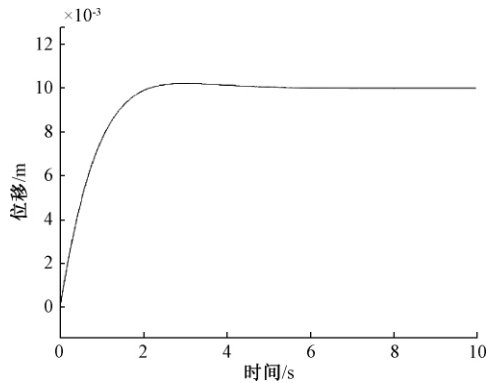


图4 无外部干扰的简捷鲁棒控制仿真

从图4可以看出,三阶非线性磁悬浮轨道列车系统在逆系统和简捷鲁棒控制器的相结合作用下,逐渐稳定在10 mm处,且控制器调节时间约为5.5 s,超调量约为0.03,几乎没有震动现象。因此,在没有外部干扰的情况下,该磁悬浮非线性系统具有良好的鲁棒性和稳定性。

对系统加入一定条件下的静态外部干扰和动态外部干扰,来验证本文设计出的简捷鲁棒控制器是否具有好的控制效果。当系统加入外部动态干扰 $f_d = 5000\sin(10\pi)$ N后,磁悬浮轨道列车悬浮系统的悬浮间隙实时响应曲线,如图5所示。

将图5和4进行对比可以看出,三阶非线性磁悬浮轨道列车系统,在运行时加入动态干扰后,磁浮列车的悬浮系统基本保持原来的状态。该系统在控制器K的作用下,逐渐稳定在10 mm处,超调量约为0.03,控制器趋于稳定状

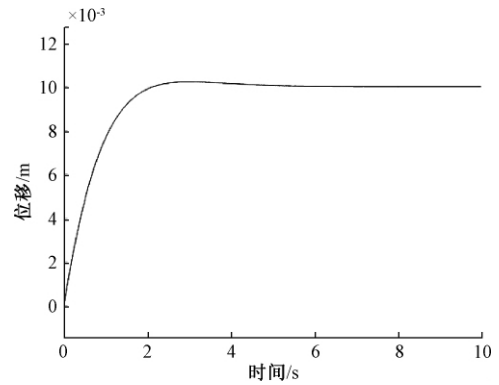


图5 加动态干扰后的悬浮间隙

态的调节时间不变,几乎没有震动现象。因此可以看出,在加入动态干扰后,设计的逆系统和简捷鲁棒控制相结合的控制器作用下的非线性磁悬浮轨道列车系统的鲁棒性较强,可以很好的减弱外部因素给列车悬浮系统带来的动态干扰。

当系统在5 s时加入静态干扰 $f_d = 1500$ N后,磁悬浮轨道列车悬浮系统的悬浮间隙实时响应曲线,如图6所示。

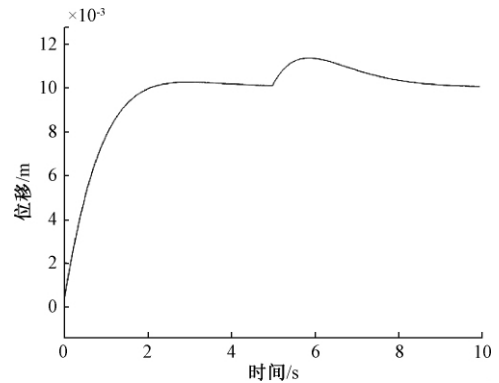


图6 加入静态干扰后的悬浮间隙

将图6和4进行对比可以看出,在轨道列车系统运行第5 s时加入静态干扰,磁悬浮列车的悬浮系统能在受到干扰后,响应曲线很快恢复至原来的状态,恢复时间约为4 s。该系统在控制器K的作用下,悬浮间隙稳定在10 mm处。通过对系统加入静态干扰可以看出,设计的逆系统和简捷鲁棒控制相结合的控制器作用下的非线性磁悬浮轨道列车系统具有很强的抗干扰能力。由上面的仿真曲线可以看出,该列车悬浮系统的鲁棒性较强,并且悬浮稳定性较好。

5 结 论

本文首先将轨道列车的非线性系统与逆系统的线性化方法结合,形成一个线性化的系统,然后再应用简捷鲁棒控制的方法设计出针对轨道列车的非线性系统的悬浮控制器,以此来实现对磁悬浮列车轨道的悬浮间隙进行稳

定控制的目的。仿真结果表明,逆系统这种反馈线性化的方法,是一种比较易于理解的反馈线性化方法中易于观察的方法。为了提高悬浮伪线性系统的鲁棒性能,本文使用简捷鲁棒控制的方法,同时也简化了计算过程。简捷鲁棒的控制方法具有极小的误差,同时也提升了控制后闭环系统的鲁棒性,使系统具有较强的鲁棒稳定性,拥有广阔的应用前景。该结论可为磁悬浮列车控制系统的设计提供参考。

参考文献

- [1] 王成杰,伍星,张静,等. 中低速磁浮列车悬浮控制策略研究综述[J]. 电气自动化,2019,41(5):1-3.
- [2] 付兴建,郭红梅,李迎春,等. 基于鲁棒滤波的磁悬浮装置稳定控制[J]. 电子测量技术,2018,41(9):46-49.
- [3] 刘恒坤,郝阿明,常文森. 磁浮列车的非线性解耦控制[J]. 铁道学报,2009,31(1):46-50.
- [4] 龙鑫林,余龙华,常文森. 电磁永磁混合型 EMS 磁悬浮非线性控制算法研究[J]. 铁道学报,2011,33(9):36-39.
- [5] 黎松奇,张昆仑,刘国清,等. 基于逆系统方法的磁浮列车非线性控制[J]. 控制工程,2017,24(8):1542-1546.
- [6] 王成杰,张静,许平洋,等. 基于滑模变结构控制的磁浮列车悬浮控制研究[J]. 电气自动化,2019,41(2):86-90.
- [7] TRAN X T, KANG H J. Arbitrary finite-time tracking control for magnetic levitation systems [J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2014,11: 157.
- [8] WANG H, ZHONG X B, SHEN G. Analysis and experimental study on the maglev vehicle-guideway interaction based on the full-state feedback theory[J]. Journal of Vibration and Control,2015,12(2):408-416.
- [9] SU X, YANG X, SHI P, et al. Fuzzy control of nonlinear electromagnetic suspension systems [J]. Mechatronics,2014,24(4):328-335.
- [10] 徐俊起. 基于力平衡的磁悬浮控制方法[J]. 电机与控制应用,2010,37(11):20-23.
- [11] 陈强,李晓龙,刘少克. 磁悬浮列车悬浮系统的非线性 PID 控制[J]. 机车电传动,2014,1:52-55.
- [12] 靖永志,何飞,肖建. 基于组合模型的悬浮间隙传感器齿槽效应补偿[J]. 仪器仪表学报,2015,36(5):1005-1013.
- [13] 王瑜瑜,刘少军,王曙霞. 逆系统解耦附加变结构控制策略的仿真研究[J]. 国外电子测量技术,2017,36(7):38-42.
- [14] 赵树忠,朱红娜. 基于逆系统方法的压铸机快压射速度控制[J]. 机床与液压,2019,47(14):144-146.
- [15] 张显库. 船舶运动简捷鲁棒控制[M]. 北京:科学出版社,2012.
- [16] 邓玮瑾,周江林. 孤岛微网 DC/AC 逆变器电压 H_{∞} 鲁棒控制[J]. 电子测量与仪器学报,2020,34(3):195-200.
- [17] 张显库,张国庆. 船舶港内掉头操纵的简捷鲁棒控制[J]. 中国航海,2014,37(2):31-34.
- [18] 王新屏. 舵鳍联合系统的简捷非线性鲁棒控制[D]. 大连:大连海事大学,2009.

作者简介

李卫东,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为铁路信息与通信智能化技术、智能传感与测控技术、复杂系统分析与控制、智能控制等。

E-mail: li@djtu.edu.cn

王玮崧,硕士研究生,主要研究方向为铁路信息与智能化技术。

E-mail: 975341041@qq.com

王新屏,博士,讲师,主要研究方向为非线性控制,鲁棒控制。

E-mail: wxp@djtu.edu