

文章编号:1671-1637(2014)02-0049-13

受电弓主动控制综述

鲁小兵, 刘志刚, 宋 洋, 韩志伟

(西南交通大学 电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘要:为了抑制弓网耦合振动,提高高速列车集流能力,综述了受电弓主动控制研究过程中弓网系统建模、控制目标与测量系统、控制算法、操动机构及其安装、试验验证等5个关键环节的研究进展,分析了弓网模型对接触力仿真结果精度和计算时间的影响、不同控制算法的优缺点和操动机构的选择方法,展望了受电弓主动控制在模型优化、算法设计和信号修正等方面的未来研究重点。分析结果表明:在受电弓主动控制研究中,弓网模型的建立要同时考虑对系统关键因素的特征与计算效率,控制目标的选取以能反映受流质量为准,量测系统需尽量减少机车扰动对量测结果可靠性的影响,控制结构不能影响原有升弓机构的工作,这些与控制算法的实时性与执行机构的高效性一起共同决定了受电弓主动控制的实用效能。

关键词: 高速列车; 受电弓; 主动控制; 集流性能; 控制目标; 控制算法; 操动机构

中图分类号: U264.34

文献标志码: A

Review of pantograph active control

LU Xiao-bing, LIU Zhi-gang, SONG Yang, HAN Zhi-wei

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China)

Abstract: In order to control pantograph-catenary coupling vibration and improve the current collection quality of high-speed train, the modeling of pantograph-catenary system, the control objectives and the measurement system, the control algorithms, the actuator and its installation, and the experimental verification were reviewed in the active control of pantograph. The impact of pantograph-catenary model on the computation precision and time in contact force simulation, the advantages and disadvantages of different control algorithms and the choice methods of operating mechanism were commented. The future research directions of active control were prospected from model optimization, algorithm design, signal modification and some other aspects. Analysis result shows that in the active control of pantograph, the key factors of pantograph-catenary system and the calculation efficiency must be considered in pantograph-catenary modeling, the control target should reflect current collection quality, measurement system should decrease the influence of locomotive disturbance on the reliability of measurement result, and control mechanism can not impact the work of hoisting mechanism. The critical factors that decide pantograph-catenary system to be successfully applied in actual engineering are real-time control algorithms and high-efficiency actuators. 10 figs, 54 refs.

Key words: high-speed train; pantograph; active control; current collection quality; control objective; control algorithm; actuator

收稿日期:2014-01-21

基金项目:国家自然科学基金项目(U1134205,51377136)

作者简介:鲁小兵(1988-),男,甘肃平凉人,西南交通大学工学博士研究生,从事受电弓主动控制研究。

导师简介:刘志刚(1975-),男,河南巩义人,西南交通大学教授,工学博士。

Author resumes: LU Xiao-bing(1988-), male, doctoral student, +86-28-87603229, hello.lxb@163.com; LIU Zhi-gang(1975-), male, professor, PhD, +86-28-87603229, liuzg@swjtu.edu.cn.

0 引 言

弓网关系、流固耦合关系和轮轨关系是影响高速铁路安全运行的 3 个主要方面。高速列车普遍采用电力牵引方式,经受电弓从接触网取流,因此,集流性能的优劣成为列车能量获取的关键因素。随着速度的进一步提高,弓网之间复杂的耦合振动将更加剧烈,受流质量急速变差。根据中国铁路总公司资料显示,牵引供电系统故障造成的铁路事故在 2008、2009、2010 年分别占到当年事故总数的 28.8%、40.4%、29.6%。脆弱的弓网系统已成为列车提速与提高运营可靠性的严重障碍。在对弓网耦合质量的评价中,接触力是其重要指标。对于接触力的波动问题,目前,主要通过 2 种方法解决,一是提高接触网刚度或增加接触线张力^[1],二是增大弓网之间的接触力^[2]。这 2 种方法虽然从一定程度上缓解了因振动带来的接触力波动,但是其代价也显而易见,前者如果针对既有线路,则涉及大规模的接触网改造,需投入巨额的人力物力,后者会加剧弓网磨损,经济损失的同时造成很大的安全隐患。

为解决上述问题,欧洲与日本学者进行了大量的早期研究,提出通过对受电弓的主动控制来减轻接触力的波动。2003 年 7 月,德国就已经在实际线路上进行了速度可达 $230 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的主动控制受电弓试验^[3],而中国对此类课题的研究起步较晚^[4-7],发展缓慢,且停留于实验室研究阶段。一般情况下,为便于研究将受电弓简化为若干元件组成的线性系统,在工作时不消耗外界能源,称为被动控制,本质是受电弓工作时外界对它“不作为”^[8]。与此对应,主动控制则是运用现代控制理论,使用相关自动化技术,对受电弓施加外力,降低弓网接触力的波动^[9]。后期又有学者提出了半主动控制,张晓东指出半主动控制是主动执行器与被动悬挂系统并联动作,主要升弓功能由被动悬挂系统实现,主动执行器用来提高弓网接触动态特性^[10]。半主动控制结合了主动控制和被动控制的优点,根据系统的振动反应或动载荷信息来实时改变系统参数(如阻尼、刚度等)以减少系统振动,其显著特点是所需能量较主动控制要小^[9]。

受电弓主动控制研究过程复杂,环环相扣,为了说明其关键环节,可建立图 1 的研究流程。如图 1

所示:首先需按照接触网和受电弓的具体类型选择合适的弓网模型。然后确定控制目标,根据控制目标设计相关的测量系统,整个控制系统的控制效果、精度和是否易于实现与其密切相关。接着设计充分考虑实时性、鲁棒性等的控制算法,控制算法是整个主动控制的核心。操动机构是主动控制的实现环节,选择合适的操动机构应考虑其时滞对控制效果带来的影响,还应考虑计算机仿真中的建模问题。再次以实际受电弓的相关参数和控制目标设计控制结构,控制结构作为整个控制系统的主体,应该统筹把握实际情况和理想目标,在充分利用现有条件的基础上有所取舍。最后为了验证理论设计的可靠性,需进行严格的试验验证作为实际应用的保障。

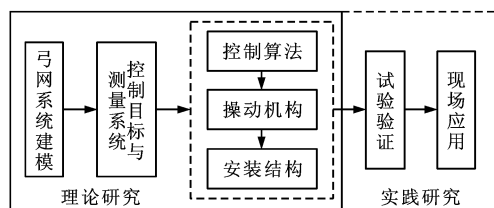


图 1 受电弓主动控制研究流程

Fig. 1 Study flow chart of active control of pantograph

本文从弓网建模、控制算法、控制结构等 5 个方面对主动控制研究中的基本理论、研究现状和存在问题进行了综述,并对其从理论探索到实际应用的过程进行了总结,以期受电弓主动控制的研究提出一些可行思路。

1 弓网系统建模

受电弓主动控制研究首先需建立适当的弓网系统模型,弓网模型的选择要考虑仿真过程的高效性和对实际系统关键因素的有效反映,要在准确表达机车高速运行时受电弓和接触网的动态性能与简化仿真步骤和算法复杂度之间做出折中。既不能为了仿真的高效性忽略真实的系统结构,也不能为了完全反映实际系统,造成仿真中不能克服的困难。受电弓和接触网模型及其耦合方式经过多年研究,已经有了比较深入的发展^[11-12]。

1.1 受电弓建模

受电弓模型主要有 4 类:归算质量模型、多刚体模型、刚柔混合模型和全柔性模型。在受电弓主动控制研究中,经常使用归算质量模型,将受电弓归算

为质量块、阻尼和弹簧链接组成的结构形式,根据质量块数量可分为一元、二元、三元等模型,其中一元模型不能反映系统高频下的振动特性,故最常使用的是二元和三元模型,见图2。

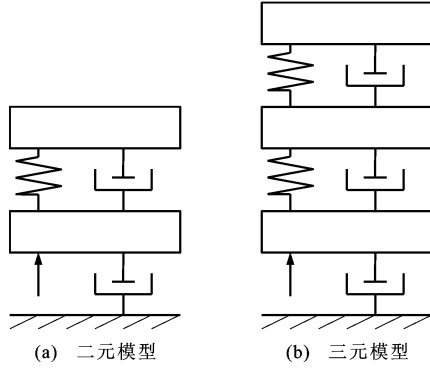


图2 质量块模型

Fig. 2 Lumped mass models

受电弓第2类模型是非线性多体模型^[13],见图3,梅桂明对其进行了详细的动力学研究^[14]。多刚体模型既考虑了列车垂向、纵向振动及气动载荷的影响,又考虑了接触线与碳滑板间接触点横移的影响,突破了仅考虑垂向自由度和线性化的质量块模型。

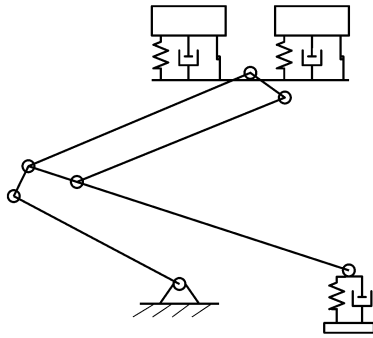


图3 多体模型

Fig. 3 Multibody model

受电弓刚柔混合模型是将其等效为一种刚体和柔体的混合结构,其中弓头滑板被等效为柔性体,其余部分被等效为刚体^[15]。在柔性体建模后,自由度数急增,动力学平衡方程为

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{y}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{y}} + \mathbf{K}\mathbf{y} = \mathbf{F} \quad (1)$$

式中: \mathbf{M} 、 \mathbf{C} 、 \mathbf{K} 分别为受电弓质量、阻尼和刚度矩阵; \mathbf{y} 为节点位移; \mathbf{F} 为节点载荷矩阵。

受电弓的全柔性模型是基于有限元方法,通过实体和壳单元对结构进行离散,并通过运动铰描述各个部件之间的运动关系,整个结构被等效为弹性体。

1.2 接触网建模

弓网系统耦合振动的关键原因是接触网的刚度

变化和波动传播^[16],在支柱和吊弦处刚度较大,跨中刚度较小。当受电弓划过接触网时刚度不均匀的点就会成为激振源,造成接触力的波动,列车速度越高,振动频率越高,因此,在研究如何抑制或降低弓网振动强度的过程中,对于接触网模型的建立,尤其能精确反映其刚度变化就显得极为重要。在受电弓主动控制的研究中,相对减弱了对简链、弹链或复链3种接触网类型的区分,基本上以简单链型悬挂为主要建模对象,见图4。

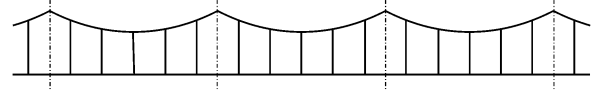


图4 接触网结构

Fig. 4 Catenary structure

接触网建模的难点在于其由多种原件构成且结构复杂,一般包括接触线、承力索、吊弦、定位器和腕臂等部分,因此,需要根据研究问题的实际情况做出取舍,目前,主要有3种方式。

(1)在接触网的集中质量模型中,接触网被看作可变刚度的弹簧^[17],其刚度 $k(t)$ 为

$$k(t) = k_0[1 + \alpha \cos(2\pi Vt/L)] \quad (2)$$

$$k_0 = 0.5(k_{\max} + k_{\min}) \quad (3)$$

$$\alpha = (k_{\max} - k_{\min}) / (k_{\max} + k_{\min}) \quad (4)$$

式中: k_0 为跨距内的平均刚度系数; α 为刚度变化系数,其取值范围为0.3~0.6; V 为机车运行速度; t 为时间; L 为接触网跨距; k_{\max} 、 k_{\min} 分别为接触网一个跨距内的最大刚度系数和最小刚度系数。

$k(t)$ 虽可离线得到,但误差很大,不能完全反映接触网上波的传播和系统振动状态。

(2)为克服集中质量模型的缺点,Antunes等用有限元法建立了接触网模型^[18-19],把接触线视为欧拉-伯努利梁或铁木辛克梁(欧拉梁考虑了弯曲刚度,而铁木辛克梁考虑剪切形变和转动惯量),以2节点欧拉-伯努利梁为例,其动力学方程为

$$\rho \frac{\partial^2 z(x,t)}{\partial t^2} + c \frac{\partial z(x,t)}{\partial t} + EI \frac{\partial^4 z(x,t)}{\partial x^4} - T \frac{\partial^2 z(x,t)}{\partial x^2} = q(x,t) \quad (5)$$

式中: ρ 为梁的线密度; $z(x,t)$ 为 t 时刻与横向位置 x 处梁微分段的纵向位移; c 为阻尼; E 为杨氏模量; I 为惯性矩; T 为张力; $q(x,t)$ 为 t 时刻梁微分段的分布力。

有限元法充分考虑了机车在高速运行状态下接触网各元素的非线性,计算结果精确,但需要耗费很大的计算时间。

(3)模态分析法也是分析弓网动态性能的有效手段,Kia 等用模态分析法建立了接触网模型^[20],其本质是将接触线和承力索看作简单的受张力的梁,而将其位移分解为一系列正弦函数和的形式,用正弦函数来表示波的传播

$$w_c(x,t) = \sum_{i=1}^n q_{ci}(t) \sin(i\pi x/L_{rep}) \quad (6)$$

$$w_m(x,t) = \sum_{i=1}^n q_{mi}(t) \sin(i\pi x/L_{rep}) \quad (7)$$

式中: $w_c(x,t)$ 、 $w_m(x,t)$ 分别为接触线和承力索的位移; $q_{ci}(t)$ 、 $q_{mi}(t)$ 分别为接触线和承力索的第*i*阶模态的振幅; L_{rep} 为锚段长度。

模态分析首先需要考虑跨数的选取,计算时间和结果的精确度均受此影响,这是因为在第1跨和最后1跨上波动传播对接触力的影响不同;另一个重要环节是模态数的选择,足够多的模态获得较大的频率宽度,但同时加大了计算量,以满足欧标 EN50318 为例,达到 45 Hz 最少需计算 250 阶模态。

另外,周宁等还通过负弛度法求得了接触网在初始平衡位置的几何参数和应力分布^[21]。接触网建模中还需要考虑吊弦、定位器、腕臂等结构^[22],拉出值和预弛度也值得考虑^[23]。弓网耦合是弓网建模的最后一步,目前,比较常用的有刚性约束法^[17]和罚函数法。

1.3 弓网模型选择

弓网系统模型作为受电弓主动控制的理论研究平台,其作用十分重要。当前,受电弓主要采用归算质量块模型,原因有三:一是在欧标 EN50318 中,受电弓采用二质量块模型,仿真结果可以与标准进行比较;二是以质量块模型作为控制对象,与多刚体模型和柔性体模型相比,其动态方程简单,且计算速度较快;三是当前受电弓主动控制研究都是以控制算法作为主要研究内容,弱化了受电弓模型特性对控制效果的影响。对于接触网模型的处理更简单,虽然其集中质量模型误差很大,但很多文献仍将选用此模型,也有部分采用模态分析法,这是因为在主动控制研究中,若采用更为精确的梁模型,所需时间花费极大,试验结果表明,以5跨的接触网欧拉梁模型为对象,在个人计算机上采用龙格库塔法求解大约需2h的计算时间,若采用精细积分法甚至需要18h,这些时间仍不包括控制器的时间花费,在需要多次调整控制算法的各个参数以获得最优解时就显得极为繁杂,因此,采用什么样的接触网模型是受电

弓主动控制研究的一个关键点。

2 控制目标与测量系统

2.1 控制目标的选取

受电弓主动控制的最终目的在于提高受流质量,对受流质量的评价是整个弓网系统性能评价的重要组成部分。各国根据自己的实际情况侧重点有所不同:日本新干线采用多受电弓与大弹性、小波动传播速度的接触网匹配,导致弓网振动剧烈,弓网离线率居高不下,接触线磨损显著,弓网噪声较高,研究重点在减振、减噪等方面,因此,主要对离线率、抬升量和接触导线应力进行评估;法国发现机车高速运行时受电弓空气动力增长较大,因此,研究重点在抬升力优化方法、接触网张力与悬挂方式优化策略,故评价重点在电弧、接触力偏差和定位点抬升量等;德国在弓网系统基础研究方面较为全面,无论在弓网检测技术还是测试评估方面都有着优势,认为受流性能应该从接触网的静态弹性、弹性不均匀度和离线率考虑。

以上分析表明,提高受流质量可从动态参数和静态参数2方面进行考察。然而在受电弓主动控制中,几乎所有文献都将接触力作为唯一的控制目标。接触力作为机械概念在弓网系统中反映了机车的集流质量这一电气概念。接触力过大,弓网磨损严重;接触力过小,会引起离线,产生离线电弧。在一般情况下,主动控制以获得较小的接触力波动为主要目标,其参考量主要有接触力最大值、接触力最小值、不均匀系数等。然而,仅仅关注接触力是不够的,Bruno 等提出了评价集流质量的3个参数^[24]:一是弓网离线引起的电弧,二是弓网之间的接触力,三是接触线的动态抬升;同时指出接触力和框架位移等均可作为衡量控制性能的指标。除此之外,Allotta 等应用了一种新的中低频动态性能指数^[25],把受电弓视为质量 $M_a(\omega)$ 作为主动控制的控制目标,认为在频率为 ω 时, $M_a(\omega)$ 越小受电弓的跟随性能越好,但该指标对框架的低频响应有部分负面影响。

2.2 测量系统的确定

主动控制受电弓需要利用弓网系统的某些动态参数来调整操纵机构的控制信号,从而产生与实际情况相对应的控制力来补偿因弓网振动产生的接触力不稳定。早期的主动控制研究,没有考虑接触力的量测等问题,均假设接触力可以准确测量或测量值有足够的精度^[17]。Collina 等用压力传感器直接进行接触力的测量,通过加速度计对误差进行补

偿^[26-27],研究了基于扩展卡尔曼滤波器的估计方法来避免对接触力的直接测量,但是估计结果的实际精度取决于模型精度和数据特点与实际操作的匹配程度^[28];Diana 等建立了基于扩展卡尔曼滤波的状态观测器,并将其应用于主动控制策略的研究^[29];Pisano 等研究了基于代数可观测的接触力估计算法,由实时滑模微分器得到上下框架的速度和加速度,同时指出框架加速度可以通过加速度计直接测量得到^[30];Balestrino 等阐述了用光电传感器和红外摄像机对弓网系统进行检测,然后通过小波变换或 Hough 变换进行处理,提取所需信息^[31]。

实际上,目前,对接触力的量测是弓网系统检测中一个难以克服的问题,尤其在高速运行状态下,振动、电磁干扰等不可控因素增多,而且即使克服这些困难,也不能证明所测数据与实际情况的相符程度,为控制算法的研究带来困难。控制目标的确定和测量系统的选取对整个系统设计极为关键,一方面控制目标的确立为整个系统的设计提供了方向,直接影响到系统的控制结构,并与控制算法紧密相关;另一方面,测量系统是控制器状态输入的基础,又为控制效果检验提供方便,此过程中需要考虑实际情况下获取这些参数的难易程度和方法。

3 控制算法

控制算法在受电弓主动控制中起核心作用,由于机车运行的具体情况所限,好的控制算法除要求所需控制信息少,计算速度快之外,还要求输出简单与易于执行,复杂的控制器可以考虑接触网刚度的变化,采用随速度变化的参数适应法来跟随其变化,或者采用鲁棒控制方法来实现控制。国内外对控制器进行了大量研究,主要分为如下 3 大类。

3.1 变结构控制

变结构控制适用于线性与非线性系统,包括控制系统的调节、跟踪、自适应与不确定等,具有很多优良特性,尤其是对加给系统的摄动和干扰有良好的自适应性。其主要缺点是控制优先级高,需要在不确定和不连续控制之间做出权衡,并可能会引起振颤现象,改进控制率不连续以及同时运用观测器/滑模控制方案都可以用来消除振颤现象。

某一控制系统为

$$\dot{\Phi} = A\Phi + Bu \quad (8)$$

式中: Φ 为系统状态矩阵; A 、 B 为系数矩阵; u 为主动控制力。

切换函数为 $s(\varphi)$ (φ 为状态变量),控制力函数为

$$u = u_0 \operatorname{sgn}[s(\varphi)] \quad (9)$$

式中: $\operatorname{sgn}(\cdot)$ 为符号函数; u_0 为控制力初始值。

对于线性系统,切换函数可取为

$$s(\varphi) = \sum_{j=1}^m d_j \varphi_j = D^T \Phi \quad (10)$$

式中: d_j ($j=1,2,\dots,m$) 为第 j 个切换状态权重; D 为切换权重矩阵; φ_j 为 φ 值。

可采用 Ackermann 公式设计式(10)中的 D 值

$$D^T = e^T N \quad (11)$$

$$e^T = [0 \ 0 \ \cdots \ 1][B \ AB \ \cdots \ A^{m-1}B]^{-1} \quad (12)$$

$$N = (A - \lambda_1)(A - \lambda_2) \cdots (A - \lambda_m) \quad (13)$$

式中: λ_j 为目标特征向量。

Levant 等在对弓网接触力实测基础上,采用高阶滑模的输出反馈控制,将控制力施加在主动控制受电弓的下臂杆,依靠滑模控制的鲁棒性抑制接触力的扰动^[17];Pisano 等将不确定的接触网等效刚度作为鲁棒控制的补偿要素,提出了基于高阶滑模与高增益观测器的反馈控制,通过控制位移对接触力进行间接控制^[30],其观测方式是基于代数可观测理论的实时滑模积分器,采用“次优”的二阶滑模控制说明了闭环控制算法的有效性,用串联积分器实现系统的不间断控制^[32];Allotta 等提出采用适当的 2-VSC 来对操动机构进行预补偿,因此,所有的预处理器和操动机构均可看作理想二阶滑模控制器的一个奇异摄动^[33]。

3.2 线性二次型控制

线性二次型控制适用于时变系统,能有效处理扰动信号和测量噪声问题,系统最优控制是以系统性能指标作为评价函数,最优控制的结果是系统控制性能指标最小,因此,首先需要确定系统控制的性能指标。

受电弓在机车顶部取流,引起其振动的力可视作为一个整体的白噪声。从系统实现的角度看,最优控制是控制发生作用时所需要的能量最少,因此,性能指数为

$$J(u) = E \left[\int_0^{+\infty} (Ru^2 + \Phi^T Q \Phi) dt \right] \quad (14)$$

式中: $E(\cdot)$ 为求取表达式的数学期望; R 为控制力的权重系数; Q 为状态权重矩阵。

假设系统所有状态均可观测,则最优控制力为

$$u = -H\Phi \quad (15)$$

$$H = R^{-1} B^T P^T \quad (16)$$

中间变量 P 可由式(17)获得

$$A^T P + PA - PBR^{-1} B^T P + Q = 0 \quad (17)$$

式中: \mathbf{H} 为最优控制力的系数矩阵。

郭京波等尝试定义受电弓主动控制器的性能指标,确定控制最优时其所需的控制能量最少,并根据卡尔曼滤波理论,得到了最优估计器的动态方程,比较了对简单链型悬挂和弹性链型悬挂的控制结果^[6];刘红娇等利用最优控制理论对主动控制式受电弓进行了理论上的研究,采用全状态反馈设计了受电弓主动控制器^[8];杨岗等提出了受电弓最优半主动控制,把弓头位移作为主要目标,而对控制能量的关注程度处于次要位置,直观上看最优半主动控制在高速情况下控制效果略差于主动控制,但其具有所需外界能量少与过程无条件稳定等特点^[9];Tieri 研究了实际系统的最优主动控制策略,并通过仿真比较了其传统的反馈控制和开环控制的执行效果^[23];Lin 等设计了基于 LQR 的最优控制器控制接触力的变化,系统优化利用了受电弓主动悬挂参数的 Pareto 解集和可变权重,采用多目标进化梯度算法优化了控制参数^[34];Wang 等提出了基于框架驱动的最优控制策略,由非线性最小二乘法拟合了 3 种接触网刚度曲线后,对所提出的控制策略进行了仿真,并研究了观测器部分失效时控制系统的状态^[35]。

3.3 模糊控制

由于受电弓具有非线性和运行条件下的参数时变性,为使弓网系统振动主动控制系统发挥有效的减振作用,要求该系统具有响应速度快,无超调量,静态误差小等特点,因此,也有学者提出了受电弓的模糊控制器。

(1)输入/输出量。模糊控制的输入量是接触力的偏差 e_f 和偏差的变化量 Δe_f ,输出量为伺服驱动器的控制信号 u_f ;与之对应的模糊量分别为 E_f 、 ΔE_f 、 U_f 。

(2)论域与相关参数。对偏差 e_f 、偏差变化量 Δe_f 和输出 u_f 进行量化,制定模糊集和论域。

(3)模糊化和反模糊化方法。确定模糊控制变量的隶属度函数,根据模糊集、论域和隶属度函数对模糊变量赋值。

(4)制定控制规则。控制规则的形式为:如果偏差与偏差变化量为“负大”,那么输出为“负大”。

吴燕采用模糊 Bang-Bang 控制调节接触力,要求控制变量在允许控制域的边界上做跳跃式取值,通过制定的 21 条模糊控制规则对导流板角度以 10° 为一个档位进行调节,从而快速改变弓网接触压力^[4];吴学杰等以实测接触力和标准接触力的偏差

以及偏差变化量作为输入信号,把输入量映射到模糊子集(根据接触力偏差和偏差变化量大小,定义 7 个模糊子集)对应的论域内,建立模糊推理规则表,通过比例因子(增强控制系统的自适应能力)调节输出,试验结果显示控制效果明显^[5];Walters 等尝试把线性矩阵不等式应用于 4 阶恒速弓网系统的控制,提出了基于 LMI 的状态观测器,运用 PID 控制器和模糊 PID 控制器于 6 阶变速弓网系统,比较了二者对接触力的控制结果^[22],同时以弓网状态空间模型为基础,在 MATLAB/Simulink 上建立了模糊控制系统的模糊推理机,实现了系统动态仿真,效果良好^[36];Tieri 提出一种理想的 PID 控制,没有通过任何操动机构,把接触力当作控制对象,因此,控制效果没有时滞且就接触力波动程度来说是最优的,可作为其他控制器的参考^[23];Namerikawa 等基于 μ 综合方法把弓网系统看作由于忽略非线性因素而形成的不确定参数系统,使用 D-K 交互算法经过 5 次迭代设计了鲁棒性能较优的控制器^[37];Corriga 等提出了一种与频率相关的优化控制方案,通过增益调度方法来控制高速受电弓,其反馈规则是最优的且基于与频率相关的评价函数,同时,频域整形控制还可以应对更大带宽范围的扰动^[38];Yamashita 等提出了受电弓的 PID 控制和阻抗控制,PID 控制以接触力为反馈对象,阻抗控制以框架位移为反馈对象,通过调整参考位置间接实现对力的控制,受电弓阻抗控制中机械阻抗通过弓头位移和接触力之间的传递函数来定义,并由对麦克斯韦阻尼器中虚拟刚度和虚拟阻尼的调节来实现^[39];Zhang 等提出了基于直接参考模型的自适应主动控制算法,在线检测受电弓及其控制系统的实时数据,因此,可以随着系统参数的改变进行自动调节,从而获得较好的控制效果^[40]。控制算法应该在控制目标和测量系统的基础上进行设计,同时,必须考虑后端操动机构是否可以实现及其时滞性。

3.4 控制算法比较

由上述相关文献中的仿真或试验结果可以看出,各控制器都可以使得接触力的最大值减小,最小值增大,平均值维持,从而使接触力方差减小,降低波动幅度,提高了受流质量。但各算法所采用的状态量、控制参数设定及出力时程等不同,下面结合控制要求和效果对各个控制算法的特点进行简单分析与比较。

(1)就输入量,即需要确定的系统状态来说,变结构控制同 LQR 控制一样,都需要对弓头、上框架

和下框架的位移和加速度进行测量,这样就增加了系统的误差和量测难度。而作为一种依靠专家经验的控制方式,模糊控制不需要对框架状态进行测量,除非这种检测是处于对接触力的估计考虑,但此时需要确定随速度变化的接触力偏差和偏差变化率。

(2)就控制算法的参数设定而言,变结构控制需要设计切换函数,需要分析系统并预先确定理想系统的特征值。LQR 控制设计的第 1 步是确定系统的最优性能指标,这就需要在控制能耗和控制效果之间做出选择。一般而言,控制器设计中参数的整定是必经之路,但由于受电弓主动控制中控制对象的多样性,为其增加了难以估量的困难;模糊控制虽然不存在参数设定的问题,但在控制规则的设计中,基于经验的控制规则合理与否直接影响控制效果,规则表是控制器设计的重中之重。

(3)就一些控制参数的获得途径而言,变结构控制可以离线获得其切换函数的系数,这种离线方式的优点是节省了计算时间,但缺点也很明显,若系统对象改变,则需重新确定系数,从这一点上看,LQR 控制中的 Q 和 R 参数也存在同样的参数自适应问题。

(4)在控制速度方面,由变结构控制的相关文献可以看出,其对接触力的控制跟踪较快,基本与原接触力重合(未考虑操动机构延迟);而 LQR 控制和模糊控制在未考虑操动机构延迟时控制过程已经有了一定的延迟,这在机车高速运行状态下对控制效果的影响非常大。

(5)在操动机构输出力与调节难度方面,由式(9)可以看出,变结构控制只需要 2 种力即可,这为操动机构的选择提供了方便,但如果不能设计出较好的切换函数,使得正负 2 种出力改变过快,可能会导致操动机构难以控制;模糊控制也同样面对类似问题,输出力调节过快,波动较大,使得操动机构工作困难,增加了磨损;而 LQR 的输出力平稳且单调性较好。由于控制器对操动机构的要求直接面向对象,因此,尤为关键。

4 操动机构与安装

受电弓主动控制研究的最终目的是根据控制目标,利用相关控制算法,通过某种操动机构动态改变受电弓参数,使机车获得良好的集流性能,为行车安全提供保障,因此,选择合适的,能满足现场条件的操动机构非常重要,也是当前受电弓主动控制应用的瓶颈。当前文献报道的操动机构主要有气缸(依

靠本身的升弓气囊)、电机(电磁执行机构)、液压缸和导流板(依靠空气动力)等几种形式。

吴燕依靠调节受电弓原有气缸内压缩空气的压力来实时调节弓网接触力,利用脉宽调节控制器来驱动气动电磁阀的开通和关闭,当脉宽调节控制工作时,电磁阀的频率至少达到 20 Hz,并且在控制中增加了超前补偿环节来校正电磁阀开启和关闭过程中的时间延迟^[4];吴学杰等采用 IST 公司的 PL100N 型液压伺服操动机构,其控制周期为 1.0 ms(通过修改工控机时钟定时器来实现)^[5];Tieri 说明了选择操动机构的注意事项,指出了使用液压操动机构的优点,建立了液压缸的数学模型,最后进行了试验验证^[23];Resta 等提出了永磁直流电机和变速箱结合的操动机构方案^[41];Collina 等设计了步进电机和导流板结合的操动机构结构^[42],见图 5,驱动步进电机按控制器计算的方向转动一个固定的角度来间接调节导流板方向,空气施加在导流板上的力也会相应改变,从而控制接触力大小,对这一结构进行了风洞试验,效果良好;Facchinetti 等建立了一种电磁操动机构的实物结构^[43],见图 6,其安装于受电弓滑板下方,直接控制弓头位移,改善接触力;Balestrino 等应用了一种线性操动机构,见图 7,该线性操动机构由伺服电机和线性结构组成,伺服电机安装于机车顶部,当且仅当线索拉紧时伺服电机才对接触力起控制作用,控制器控制伺服电机的动作,动态响应极快^[2,31];Pisano 等把天棚阻尼和跟随弹簧的概念结合起来应用于受电弓的振动抑制^[32,44]。

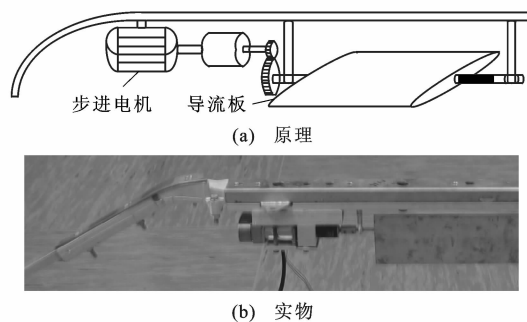


图 5 操动机构

Fig. 5 Actuator

目前,电机、气缸/气囊、液压缸等几种操动机构在机械结构的振动控制与补偿领域使用广泛。研究人员将其应用于受电弓主动控制,具有一定效果,特点也很明显:伺服电机虽然输出力较快,但易受电磁干扰与温度等客观环境因素影响,尤其若将电机安装在弓头,受体积所限其功率较小,然而弓网接触点周围电磁噪声相当严重,对于控制信号的传输和电



图 6 电磁操动机构

Fig. 6 Electromagnetic actuator

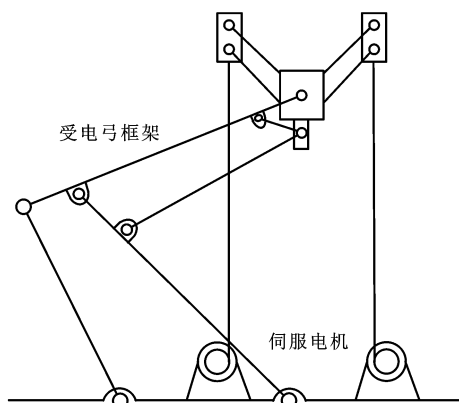


图 7 线性操动机构

Fig. 7 Wire actuator

机本身的工作影响极大;气缸或液压缸因有较大体积通常安装于底部(下文分析),气阀或者液压阀控制流体进入,腔内压强的改变经连杆将控制力施加到弓头,因此,作用时间延迟很大,对控制效果带来很多负面影响,其优点就是可以利用原有升弓机构,且容易实现。

受电弓主动控制研究的最终落脚点是通过执行机构动态改变受电弓状态,以提高机车的集流性能。一方面操动机构不能影响原有系统的正常工作,不管其本身处于什么工况,都要保证受电弓至少处于没有进行主动控制之前的性能状态下;另一方面操动机构位置的选择也影响控制的执行效果,在时滞性、控制频带范围等方面都有区别。

如图 8 所示,目前主要有 4 种安装结构,Tieri 等对这几种形式进行了简单阐述^[23,44]。方案 A 中操动机构位于框架和弓头之间,直接对弓头进行调节可以获得比较大的带宽,但是由于位置限制,操动机构受体积和质量的限制较大。方案 B 中操动机构位于上下框架之间,作用于上框架,郭京波等提出了这种配置下的主动控制方案,可以看出其调节带宽中等,但安装不便,而且如果安装不当,极有可能影响原有系统的工作^[7]。方案 C 中操动机构位于框

架底部,其优点是对操动机构的形状、体积、质量和类型等限制较少,可以用于实验室和实际线路 2 种情况,缺点是其控制的有效频率范围较窄(最高至 2 Hz),然而在高速运行状态下,接触力波动受吊弦影响,频率可达 20 Hz,在此情况下效果较差。Allotta 等验证了方案 D 的结构形式^[27]。Collina 等还提出可结合图 8 中方案 A 和方案 C 两种结构^[42],同时对弓头滑板和下框架进行调节,以期获得更大的控制带宽,但是这种情况下需要至少 2 种控制算法和操动机构,因此,较为复杂,目前还未见相关文献报道其具体执行过程。

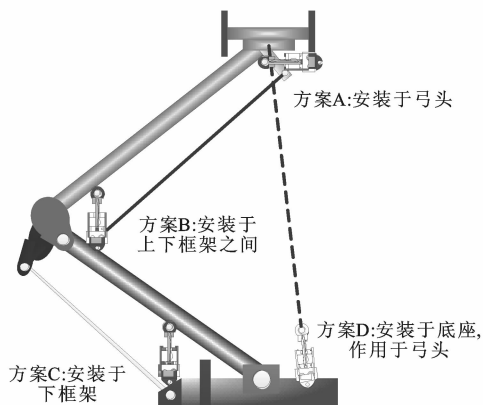


图 8 安装结构

Fig. 8 Installation structures

控制结构统筹组织整个测量系统、控制器和操动机构,起承上启下的作用,其设计的好坏决定系统硬件的同时,对控制效果也有很大影响。操动机构安装的 4 种形式,均在实际工况下切实可行,但应根据系统量测和控制算法权衡利弊,包括对体积、质量、可控制频带等方面的要求。

5 试验与验证

受电弓主动控制是应用于工程实际的应用型研究,需要把理论研究和具体实际结合起来考虑,但在实际线路上实现这些过程周期长,成本高,且很难对受电弓进行部件优化试验。为此 Zhang 等提出了一种半实物半虚拟试验方法^[45],见图 9。试验系统由 3 部分组成:虚拟接触网、实际受电弓和受电弓底部(机车顶部)运动虚拟部分。由计算机和电磁伺服激振系统组成虚拟的接触网动态模拟系统,控制计算机通过接触网动态仿真软件对受电弓/接触网接触位置的运动状态进行实时仿真,通过现场总线传送到伺服控制器中,并通过液压伺服激振器作用到实际弓头上。实际受电弓的运动又通过受电弓弓头接触力的变化,由数据采集系统进行实时采集,经

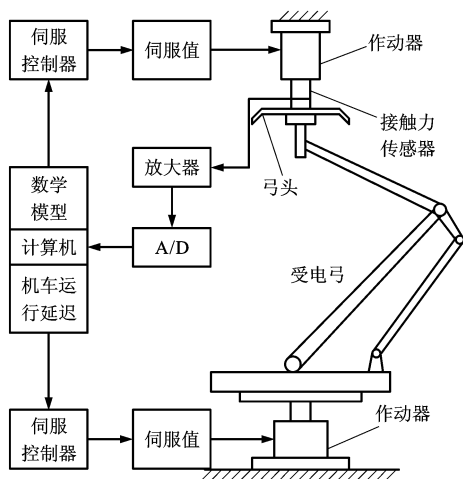


图9 仿真原理

Fig. 9 Simulation principle

CAN 总线反馈到接触网动态仿真计算中,反过来影响接触网的运动,形成一个能模拟受电弓/接触网运动状态的完整试验系统。这一试验系统的优点除了装备简单外,还使得一些不太可能的实物模拟试验成为可能,其实物见图 10。Wu 等介绍了半实物半虚拟方法的基本原理和试验流程,并首次以国内简单链型悬挂和德国 DSA380 高速受电弓为研究对象,分析了接触网各参数对弓网接触力的影响^[46];Allotta 等指出混合仿真不仅可以用于主动控制中控制器的研究,还可用于状态观测器中控制参数的获取和验证^[47];Facchinetti 等建立了弓网模型并确



图10 仿真结构

Fig. 10 Simulation structure

定了控制器,然后充分利用这种半实物半虚拟系统对其进行了试验,有力地证明了整个控制策略的有效性,同时指出该系统的缺点是不能考虑空气动力等因素^[43,48-49]。

由于弓网系统的特殊性,建立完整的试验装置非常困难,弓网电弧试验台和受电弓测试试验台有所发展,一般情况是将接触网置于由电机带动旋转的某种环装结构上,电机运行带动接触网相对受电弓纵向滑动,同时给受电弓加上横向和垂向激振,从而形成对弓网相对运动的模拟。然而此种方式不适合受电弓主动控制研究,其对接触网振动及波动传播的表现太粗糙。半实物半虚拟的仿真试验系统以计算机模拟接触网,可以对接触网的各类状态在其模型的基础上进行表达,而作为控制主体的受电弓则采用实物。除在实际线路进行测试外,受电弓主动控制的试验均采用这种混合模拟方式。尽管在既有线路测试较困难,但作为未来发展的目标,主动控制受电弓最终还是要到现场进行大量实际测试,这样才能获得进一步的发展推广。

6 展 望

受电弓主动控制作为较实际的工程项目亦有许多理论问题仍未解决,例如:弓网模型不能真正反映机车高速运行时的振动状态或者模型过于复杂而造成实时性较差;控制目标设定不当,为测量系统带来困难,且测量系统不能有效量测弓网当前工况以及控制之后的执行效果;控制算法过于复杂,所需状态变量过多,过于理想化,影响实际执行过程,且没有考虑操动机构时滞带来的严重后果;操动机构实时性不好,没考虑操动机构所需能量等。控制目标、控制算法和执行机构等之间的研究是一个统一整体,本文为解释方便和结构清晰分割开来阐述,但在实际研究中要统筹考虑。结合存在问题,受电弓主动控制的研究发展方向展望如下。

6.1 弓网系统建模

在弓网模型的建立中,首先应分析不同受电弓的操作敏捷性,获得不同型号受电弓操作时滞数据,建立多刚体框架模型^[50],考虑操作时滞对控制效果的影响;主动控制研究中要总结不同高铁线路设计参数(如悬挂类型、结构高度、张力水平、跨距等)、线路条件(如弯道半径、轨面高差、接触线布置等)、采用的主要零部件型号(如吊弦、定位器、接触线、承力索等)等基础数据,尽量避免使用单一的接触网结构进行仿真分析,应充分考虑波动传播和其他外围因

素对振动的影响。总体而言,未来主动控制研究弓网建模的重点在于充分考虑机车高速运行过程中的非线性因素,充分把握造成弓网耦合振动的最根本原因,注意模型复杂性和控制器之间的衔接关系以及模型仿真的时间花费。

6.2 控制目标的确立

大量研究中将主动控制的目标仅仅设定为接触力(即控制过程中只对接触力进行观测),这是不充分的。接触力是弓网良好耦合受流的关键因素之一,计算机仿真中其可以方便且准确得到,但在实际工况下,测量十分困难,且未知结果精度是否满足要求,因此,将来工作中,无论从接触力量测的现实意义,还是从弓网良好受流的最终目的,或是从弓网结构的维护等角度出发,都应该尽量避免将接触力作为唯一因素,可考虑诸如接触线抬升量、定位点抬升量、受电弓框架和弓头位移等其他方面,或者建立复合控制目标,确定不同权重下的目标因子。

6.3 量测系统的选择

量测系统决定了控制器的输入量,并且是考核控制效果的途径,应认真研究所选择的量测系统实现的难易程度,应将理论研究切实靠近实际操作。未来研究的重点在于如何将各种如压力传感器、加速度传感器、红外成像仪、线阵/面阵相机等观测传感设备扬长避短,联合使用,充分发挥数字信号处理的优势,将所测原始数据通过诸如卡尔曼滤波器、小波变换、Hilbert-Huang 变换^[51]、Hough 变换^[52]等手段加以分析,得到控制器所需的参数信息。

6.4 控制算法的实时性与鲁棒性

机车高速(例如 $350 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$)运行时,受电弓将以 $97.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的速度滑过接触网,若控制器计算时间花费很大,将严重影响控制效果,因此,算法的实时性极为重要,而且控制器工作时所受外部噪声影响极大。另外,考虑到系统状态的量测问题,只要能满足控制算法要求,所需状态量越少越好。不能局限于上文提到的基本控制算法,要在理论上有所创新,例如 Stela 将混沌控制用于接触力调节^[53],取得了较好效果,也可借鉴诸如机车悬挂系统的振动控制方法^[54]等。

6.5 操作时滞的克服

受电弓和操动机构均为机械结构,很明显会有不同程度的操作时滞,为降低受电弓操作时滞对控制的影响,需要根据当前弓网运行状态和位置,利用当前时刻前的弓网耦合压力数据序列,提前预测未来弓网耦合状态的变化规律,最终获得受电弓主动

控制参数序列。根据时间序列预测理论,不同的预测理论对于数据适应性不同,其预测的准确性也差别较大,因此,必须首先针对弓网信号的特性,通过对弓网压力数据序列的信号进行分析(包括统计性、平稳性、时序性等),在确定信号演化规律的基础上,选择符合信号变化规律的预测算法,确定预测算法中的关键参数。前期研究表明,对于弓网耦合压力序列这种波动性较大的数据,一般选择自适应性较强与全局性更优的模型,能够实现数据的最佳逼近,因此,研究重点集中于非线性预测与组合预测方法当中。

6.6 控制信号的修正

控制算法的进一步发展,要获取线路弓网的先验信息,修正受电弓控制计算参数,保证控制的有效性和可靠性。通过分析接触网设计参数、弓网运行的周期性变化规律、不同条件的弓网耦合特性,利用现代谱估计和平稳性分析方法,构建相应参数的谱估计模型,对弓网数据进行先验性分析。获得不同悬挂参数、不同线路位置、不同运行条件下的弓网耦合谱演变特性以及接触网的平顺性特征,掌握不同线路条件下弓网耦合压力数据的周期性变化规律、特殊位置弓网耦合的奇异性突变点以及奇异性突变产生的结构性机理,最终获得对预测模型参数的修正方法。

6.7 操动机构的选择与优化

操动机构应首先充分利用现有结构,要考虑高压、高温或极寒等极端条件下的可靠性;同时应特别注意:若主动控制系统出现故障,不能影响原有系统的正常工作。未来的研究不应局限于前文所述的几种设备,应该充分关注新型智能机械,例如磁流变阻尼器、电流变阻尼器等已经成功应用于其他振动冲击场合的装置。其中磁流变阻尼器在高档轿车减振中的应用已经十分成熟,本文对其在受电弓主动控制中的可行性进行了研究,取得了较好的效果;另一方面,灵敏的操动机构也可作为克服时滞的硬件方法。

6.8 试验与测试条件的改进

试验与测试是受电弓主动控制研究的瓶颈,试验系统仅有图 10 的形式,考虑计算时间问题,对接触网的描述较为简单。研究的重点在于不大幅提高费用的情况下增强与现场工况的相符程度,尽量建立相对完善的模拟条件,例如可建立若干跨由支架支撑的接触网结构,用滑轨拖动受电弓沿接触线滑动,并提供横向和纵向噪声。整个研究最终还是应该回归到实际车辆的测试,国内未有相关工作,与国

外同行差距较大,应该在理论研究和模拟测试进行到足以支撑现场工况的时候,利用实际线路进行充分的改进是受电弓主动控制迈出实用化步伐的关键。

7 结 语

高速铁路是中国铁路发展的方向,弓网系统作用关键但较为脆弱,如何建立较为“坚强”的弓网系统是当务之急。受电弓主动控制是保证弓网间接触压力平稳与获得良好耦合受流的有效手段,从提出之日起就倍受广大铁路工作者和研究者的关注。但由于其涉及因素多,牵扯面广,还交叉电气、机械、控制和材料等多学科知识,因此,其研究进展也较为缓慢。“前景诱人,困难重重”是它的最大特点。从研究结果可以看出受电弓主动控制未来发展的重点是以实际数据为基础,建立充分表征弓网特性的系统模型;以获得良好受流并减少系统磨损为准则,确定控制目标函数;以考虑实时性、鲁棒性,并在一定程度上减轻操作时滞为导向,设计最佳控制策略;结合量测系统和控制算法,建立控制信号修正体系;从现有条件、可靠性和实际应用的角度,选择合适的操动机构。坚持理论与试验相结合,从不同的方面各个突破,使受电弓主动控制进一步实用化发展,真正为中国铁路安全运营提供根本保证。

参考文献:

References:

- [1] MASSAT J P, LAINE J P, BOBILLOT A. Pantograph-catenary dynamics simulation[J]. Vehicle System Dynamics, 2006, 44(Sup1): 551-559.
- [2] BALESTRINO A, BRUNO O, LANDI A, et al. Innovative solutions for overhead catenary-pantograph system: wire actuated control and observed contact force[J]. Vehicle System Dynamics, 2000, 33(2): 69-89.
- [3] 冒一平. 德国铁路主动控制受电弓试验成功[J]. 中国铁路, 2004(5): 31.
MAO Yi-ping. The active control pantograph is tested successfully in German railway[J]. China Railway, 2004(5): 31. (in Chinese)
- [4] 吴 燕. 高速受电弓-接触网动态性能及主动控制策略的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2011.
WU Yan. Research on dynamic performance and active control strategy of high-speed pantograph-catenary system[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2011. (in Chinese)
- [5] 吴学杰, 张卫华, 梅桂明, 等. 接触网-受电弓振动主动控制问题的研究[J]. 振动工程学报, 2002, 15(1): 36-40.
WU Xue-jie, ZHANG Wei-hua, MEI Gui-ming, et al. Research of active vibration control for the pantograph-catenary system[J]. Journal of Vibration Engineering, 2002, 15(1): 36-40. (in Chinese)
- [6] 郭京波, 杨绍普, 高国生. 高速机车主动控制受电弓研究[J]. 铁道学报, 2004, 26(4): 41-45.
GUO Jing-bo, YANG Shao-pu, GAO Guo-sheng. Study on active control of high-speed-train pantographs[J]. Journal of the China Railway Society, 2004, 26(4): 41-45. (in Chinese)
- [7] 郭京波, 杨绍普, 高国生. 变刚度弓网系统主动控制研究[J]. 振动与冲击, 2005, 24(2): 9-11, 15.
GUO Jing-bo, YANG Shao-pu, GAO Guo-sheng. Research on active control of the pantograph-catenary system with varying stiffness[J]. Journal of Vibration and Shock, 2005, 24(2): 9-11, 15. (in Chinese)
- [8] 刘红娇, 张卫华, 梅桂明. 基于状态空间法的受电弓主动控制的研究[J]. 中国铁道科学, 2006, 27(3): 79-83.
LIU Hong-jiao, ZHANG Wei-hua, MEI Gui-ming. Study on pantograph active control based on state space method[J]. China Railway Science, 2006, 27(3): 79-83. (in Chinese)
- [9] 杨 岗, 李 芾. 基于 LQR 的高速受电弓最优半主动控制研究[J]. 铁道学报, 2011, 33(11): 34-40.
YANG Gang, LI Fu. Semi-active control for high-speed pantograph based on optimal LQR regulator[J]. Journal of the China Railway Society, 2011, 33(11): 34-40. (in Chinese)
- [10] 张晓东. 高速列车受电弓自适应主动控制[D]. 北京: 北京交通大学, 2011.
ZHANG Xiao-dong. Self-adaptive control of high-speed pantograph[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2011. (in Chinese)
- [11] KIA S H, BARTOLINI F, MPANDA-MABWE A, et al. Pantograph-catenary interaction model comparison[C] // IEEE. IECON 2010-36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society. Glendale: IEEE, 2010: 1584-1589.
- [12] POMBO J, AMBROSIO J. Environmental and track perturbations on multiple pantograph interaction with catenaries in high-speed trains[J]. Computers and Structures, 2013, 124: 88-101.
- [13] AMBRÓSIO J, POMBO J, PEREIRA M. Optimization of high-speed railway pantographs for improving pantograph-catenary contact[J]. Theoretical and Applied Mechanics Letters, 2013, 3(1): 1-7.
- [14] 梅桂明. 受电弓-接触网系统动力学研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2001.
MEI Gui-ming. The dynamics study of pantograph/catenary system[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2001. (in Chinese)
- [15] 周 宁, 张卫华. 基于受电弓弹性体模型的弓网动力学分析[J]. 铁道学报, 2009, 31(6): 26-32.
ZHOU Ning, ZHANG Wei-hua. Analysis of dynamic pantograph-catenary interaction based on elastic pantograph model[J]. Journal of the China Railway Society, 2009, 31(6): 26-32. (in Chinese)
- [16] FARHANGDOUST S, FARAHBAKHS M, SHAHRAVI M. Modeling of pantograph-catenary dynamic stability[J]. Technical

- Journal of Engineering and Applied Sciences, 2013, 3(14): 1486-1491.
- [17] LEVANT A, PISANO A, USAI E. Output-feedback control of the contact-force in high-speed-train pantographs[C]//IEEE. Proceedings of the 40th IEEE Conference on Decision and Control. Orlando: IEEE, 2001: 1831-1836.
- [18] ANTUNES P C. Development of multibody pantograph and finite element catenary models for application to high-speed railway operations [D]. Lisboa: Technical University of Lisboa, 2012.
- [19] HARELL P, DRUGGE L, REIJM M. Study of critical sections in catenary systems during multiple pantograph operation[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2005, 219(4): 203-211.
- [20] KIA S H, BARTOLINI F, MPANDA-MABWE A, et al. Real-time simulation of pantograph-catenary interaction[C]//IEEE. IECON 2011-37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society. Melbourne: IEEE, 2011: 258-264.
- [21] 周 宁,李瑞平,张卫华.基于负弛度法的接触网建模与仿真[J]. 交通运输工程学报, 2009, 9(4): 28-32.
ZHOU Ning, LI Rui-ping, ZHANG Wei-hua. Modeling and simulation of catenary based on negative sag method[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2009, 9(4): 28-32. (in Chinese)
- [22] WALTERS S, RACHID A, MPANDA A. On modeling and control of pantograph catenary systems[C]//IEEE. 2011 International Conference on Pantograph Catenary Interaction Framework for Intelligent Control. Amiens: IEEE, 2011: 1-10.
- [23] TIERI R. Innovative active control strategies for pantograph catenary interaction [D]. Stockholm: Royal Institute of Technology, 2012.
- [24] BRUNO O, LANDI A, PAPI M, et al. Phototube sensor for monitoring the quality of current collection on overhead electrified railways[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2001, 215(3): 231-241.
- [25] ALLOTTA B, PUGI L, BARTOLINI F. An active suspension system for railway pantographs: the T2006 prototype [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2009, 223(1): 15-29.
- [26] COLLINA A, FACCHINETTI A, FOSSATI F, et al. An application of active control to the collector of an high-speed pantograph: simulation and laboratory tests[C]//IEEE. Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control. Seville: IEEE, 2005: 4602-4609.
- [27] ALLOTTA B, PAPI M, PUGI L, et al. Experimental campaign on a servo-actuated pantograph[C]//IEEE. 2001 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. Como: IEEE, 2001: 237-242.
- [28] COLLINA A, FOSSATI F, PAPI M, et al. Impact of overhead line irregularity on current collection and diagnostics based on the measurement of pantograph dynamics[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2007, 221(4): 547-559.
- [29] DIANA G, FOSSATI F, RESTA F. High speed railway: collecting pantographs active control and overhead lines diagnostic solutions[J]. Vehicle System Dynamics, 1998, 30(1): 69-84.
- [30] PISANO A, USAI E. Contact force estimation and regulation in active pantographs: an algebraic observability approach[C]//IEEE. Proceedings of the 46th IEEE Conference on Decision and Control. New Orleans: IEEE, 2007: 4341-4346.
- [31] BALESTRINO A, BRUNO O, LANDI A, et al. Active controls and non-invasive monitoring for high speed trains [C] // ZITEK P. Proceedings of 16th IFAC World Congress. Prague: IFAC, 2005: 4-8.
- [32] PISANO A, USAI E. Contact force regulation in wire-actuated pantographs via variable structure control[C]//IEEE. Proceedings of the 46th IEEE Conference on Decision and Control. New Orleans: IEEE, 2007: 1986-1992.
- [33] ALLOTTA B, PISANO A, PUGI L, et al. VSC of a servo-actuated ATR90-type pantograph[C]//IEEE. Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control. Seville: IEEE, 2005: 590-595.
- [34] LIN Y C, LIN C L, YANG C C. Robust active vibration control for rail vehicle pantograph[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2007, 56(4): 1994-2004.
- [35] WANG Shu-dong, GUO Jing-bo, GAO Guo-sheng. Research of the active control for high-speed train pantograph[C]//IEEE. 2008 IEEE Conference on Cybernetics and Intelligent Systems. Chengdu: IEEE, 2008: 749-753.
- [36] WALTERS S. Simulation of fuzzy control applied to a railway pantograph-catenary system[C]//SETCHI R, JORDANOV I, HOWLETTT R S, et al. KES 10 Proceedings of the 14th International Conference on Knowledge-Based and Intelligent Information and Engineering Systems. Cardiff: Springer, 2010: 322-330.
- [37] NAMERIKAWA T, GOTO S Y, MATSUMURA F. Robust force control of a pantograph system by considering model parameter perturbation[C]//IEEE. IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics'97. Tokyo: IEEE, 1997: 45.
- [38] CORRIGA G, GIUA A, MATTA W, et al. Frequency-shaping design of a gain-scheduling controller for pantographs[C]//IEEE. Proceedings of the 33rd IEEE Conference on Decision and Control. Lake Buena Vista: IEEE, 1994: 393-398.
- [39] YAMASHITA Y, IKEDA M. Advanced active control of contact force between pantograph and catenary for high-speed trains[J]. Quarterly Report of RTRI, 2012, 53(1): 28-33.
- [40] ZHANG Xiao-dong, FAN Yu. Active self-adaptive control of high-speed train pantograph[C]//IEEE. 2011 IEEE Power Engineering and Automation Conference (PEAM). Wuhan:

- IEEE, 2011: 152-156.
- [41] RESTA F, COLLINA A, FOSSATI F. Actively controlled pantograph: an application[C]// IEEE. 2001 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. Como: IEEE, 2001: 243-248.
- [42] COLLINA A, FACCHINETTI A, RESTA F. A feasibility study of an aerodynamic control for a high speed pantograph[C]// IEEE. 2007 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. Zurich: IEEE, 2007: 1-6.
- [43] FACCHINETTI A, MAURI M. Hardware in the loop test-rig for pantograph active control evaluation[C]// IEEE. 2008 IEEE International Symposium on Industrial Electronics. Cambridge: IEEE, 2008: 2171-2176.
- [44] PISANO A, USAI E. Contact force regulation in wire-actuated pantographs via variable structure control and frequency-domain techniques [J]. International Journal of Control, 2008, 81(11): 1747-1762.
- [45] ZHANG W, MEI G, WU X, et al. Hybrid simulation of dynamics for the pantograph-catenary system[J]. Vehicle System Dynamics, 2002, 38(6): 393-414.
- [46] WU Y, ZHENG J H, ZHENG T Q. Optimizing active control scheme of high-speed pantograph [C] // IEEE. IEEE 6th International Power Electronics and Motion Control Conference. Wuhan: IEEE, 2009: 2622-2626.
- [47] ALLOTTA B, PUGI L, BARTOLINI F. Design and experimental results of an active suspension system for a high-speed pantograph[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2008, 13(5): 548-557.
- [48] COLLINA A, FACCHINETTI A, FOSSATI F, et al. Hardware in the loop test-rig for identification and control application on high speed pantographs[J]. Shock and Vibration, 2004, 11(3/4): 445-456.
- [49] FACCHINETTI A, MAURI M. Hardware-in-the-loop overhead line emulator for active pantograph testing [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(10): 4071-4078.
- [50] AMBRÓSIO J, POMBO J, PEREIRA M, et al. A computational procedure for the dynamic analysis of the catenary-pantograph interaction in high-speed trains [J]. Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2012, 50(3): 681-699.
- [51] 王 慧. HHT 方法及其若干应用研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2009.
- WANG Hui. Research on the HHT method and its applications[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2009. (in Chinese)
- [52] LANDI A, MENCONI L, SANI L. Hough transform and thermo-vision for monitoring pantograph-catenary system[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2005, 220(4): 435-448.
- [53] STELA R A, CRISTINA M, MARCEL T. Chaos theory based control of contact force in electric railway transportation system[C]// IEEE. 2012 11th International Conference on Environment and Electrical Engineering. Venice: IEEE, 2012: 995-999.
- [54] SUN Wei-chao, GAO Hui-jun, KAYNAK O. Adaptive backstepping control for active suspension systems with hard constraints[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2013, 18(3): 1071-1079.

《交通运输工程学报》2014 年征订通知

《交通运输工程学报》是由国家教育部主管、长安大学主办、国务院学位委员会交通运输工程学科评议组、东南大学与西南交通大学共同协办的交通运输领域的学术理论刊物,两院院士沈志云教授任名誉主任委员;主要刊载道路与铁道工程、载运工具运用工程、交通运输规划与管理、交通信息工程与控制等领域高水平的学术论文和重大工程实践项目产生的论文;主要读者对象为国内外交通运输领域的科研人员、工程技术人员及大专院校相关专业的师生。

《交通运输工程学报》为双月刊,大 16 开本,128 个页码,每期定价 30.00 元,全年共 180.00 元。可到当地邮局订阅,邮发代号为 52-195,也可直接汇款至《交通运输工程学报》编辑部订阅。

开户银行:中国银行西安翠华路支行

账 号:102407337258

账 户:长安大学杂志社

邮政编码:710064

联 系 人:胡广平

电 话:029-82334382

地 址:陕西省西安市南二环路中段长安大学杂志社

E-mail:jygc@chd.edu.cn