

文章编号:1006-2106(2012)03-0079-06

铁路接触网最优主动控制研究^{*}

杨 岗 李 芾^{**}

(西南交通大学, 成都 610031)

摘要:研究目的:本文为研究主动控制对接触网性能的影响,建立了接触网有限元模型,应用 Ansys 软件计算模型的整体质量及刚度矩阵数据,并利用 KMEExtract 程序分离出整体质量、整体刚度矩阵,据此建立接触网系统动力学方程。为便于系统仿真及控制器设计,使用模态降阶法对系统降阶并将其转化为状态方程形式,而后为系统设计 LQR 控制器,使用 simulink 对实施主动控制前后的接触网系统进行动态仿真分析。

研究结论:研究表明:(1)对接触网实施主动控制能有效改善其振动特性,接触网振动的最大值、最小值有较大降低,幅度达 90% 以上,均方差也有较大下降,幅度达 70% 以上,系统性能得到了极大提升。(2)在通过改变弓网自身参数的方法改善弓网性能遇到瓶颈时,接触网的主动控制或半主动控制将成为改善弓网性能的重要手段。

关键词:接触网;模态降阶;最优控制;主动控制;仿真分析

中图分类号:U264.3 文献标识码:A

Research on Optimal Active Control of Railway Caternary

YANG Gang, LI Fu

(Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract: Research purposes: In order to research the influence of the active control on the property of the railway catenary, the finite element model for the catenary is established, the whole quality of the model and the stiffness matrix data are calculated with Ansys software, the whole quality and whole stiffness matrix are resolved with KMEExtract program. With these, the dynamics equation is established for the catenary. In order to simulate the system and design the controller easily, the modal reduction order method is used to reduce the system order and transform it into the equation of state for designing the LQR controller for the system, and the simulation analysis of the states of the catenary before and after taking the active control is made with siimulink.

Research conclusions: The research shows: (1) Taking the active control of the catenary can improve its vibration property. The maximum and minimum vibration values of the catenary can be cut by above 90%, and the mean square deviation can be cut by 70%. Therefore, the system property is much improved. (2) The active or semi-active control of the catenary becomes the important way to improve the catenary property when it is difficult to improve the catenary property by changing the catenary parameters.

Key words: catenary; modal order reduction; optimal control; active control; simulation analysis

高速动车通过受电弓从接触网上获取电能,使受电弓和接触线间的接触力保持在理想值附近,且波动

较小是保证弓网受流质量的关键。随着机车速度提高,弓网振动随之加剧,弓网间的接触力波动加大,甚至出

^{*} 收稿日期:2011-12-16

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金资助(SWJTU11BR019);国家科技支撑计划项目(2007BAG05B00)

^{**} 作者简介:杨岗,1973 年出生,男,讲师;李芾,1956 年出生,男,教授,博士生导师。

现离线现象,受流质量急剧下降,给高速运行的列车带来极大安全隐患。研究弓网系统原理,改善弓网振动特性,提高弓网受流质量是保证高速列车安全运行的关键课题之一,引起了世界各国学者的广泛关注。

影响弓网系统受流质量的因素很多,主要涉及受电弓和接触网两个方面,如接触网悬挂的刚度、接触线坡度、接触网悬挂类型、接触线材质、受电弓抬升力、接触线抬升量、接触线预弛度、滑板材质、受电弓归算质量、机车运行速度等,因此改善弓网性能的研究主要集中在接触网和受电弓两个方面,弓网系统动力学特性十分复杂且实物研究代价巨大,所以弓网系统的研究主要是基于各种简化的数学模型,通过计算机仿真手段来进行^[1-4]。邢海军、程维等研究了弓头及框架归算质量、刚度、阻尼等受电弓参数对弓网接触力的影响并计算出相关最优参数^[5]; T. X. Wu、A. Balestrino、Alessandro PISANO、吴学杰、张卫华、郭京波、罗仁等研究了不同控制策略下的主动控制技术对弓网系统性能的影响,表明主动控制受电弓对于改善弓网性能具有良好效果^[6-10];汪吉健等研究了承力索张力对弓网受流质量的影响^[11];毕继红等利用有限元手段建立了刚性悬挂接触网非线性振动模型,分析了跨距、列车速度对弓网受流质量的影响^[12]; Tong - Jin Park 等利用有限元技术建立了弓网模型,研究了接触线刚度、挠度、静抬升力对弓网受流质量的影响^[13]; Yong HyeonCho 等研究了接触线预弛度对弓网振动特性的影响^[14]。

接触线的刚度变化是导致弓网振动的主要原因,考虑到接触线的波动性,在高速环境下甚至应当采用动态刚度研究弓网振动特性,动态刚度与接触线张力、密度和机车速度相关,当机车速度接近接触线波动速度 400 km/h 时,动态刚度将发生剧烈波动^[6],导致弓网系统剧烈振动,进而引起弓网失效。因此当动车达到较高速度时,采用优化接触网静态参数的方法改善弓网特性,则收效甚微。前人多在接触网参数方面研究改善弓网性能的途径,本文将在此基础上,把主动控制技术应用接触网系统,以期改善高速弓网系统振动特性,在原理及研究过程上作有益探讨。

1 接触网模型

弓网系统是一个非线性振动系统,其动力学特性十分复杂,研究时,通常将受电弓简化为由质量块、弹簧、阻尼组成的多体动力学结构,而将接触网视为由多个索或梁构成的组合体,如图 1、图 2 所示。

接触网系统是具有无限自由度的复杂系统,求其准确动力学响应较为困难,一般研究中将其离散化为有限自由度系统,离散化的方法主要有集中质量法、广

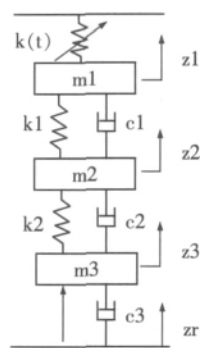


图1 三元受电弓模型

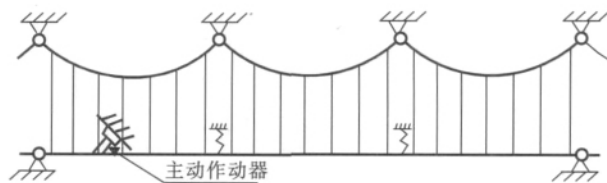


图2 接触网简化结构图

义坐标法和有限元方法^[15]。其中有限元方法综合了集中质量法和广义坐标法,已成为解决复杂动力学问题最有效的方法,本文将采用 Ansys 软件建立接触网有限元模型并分析其系统动力学响应,并结合 KMEExtract 程序求解系统整体质量、刚度矩阵,建立系统动力学方程,并对模型实施模态降阶且转化为状态空间方程,然后为系统设计最优控制器并进行动态仿真分析,研究流程如图 3 所示。

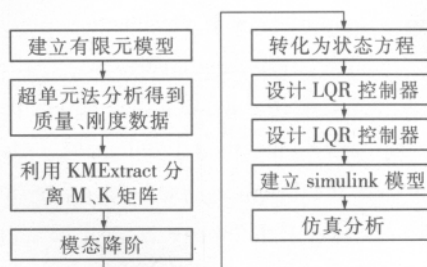


图3 接触网主动控制研究流程图

1.1 接触网有限元模型

建立合理的模型是研究接触网动力学行为的基础,在 Ansys 软件中建立接触网有限元模型时,根据接触网的结构特点,可将原结构简化为由梁单元 (Beam3)、质量单元 (Mass21) 和弹簧单元 (Combin14) 构成的接触网简化模型。在模型中,把承力索、接触线和辅助承力索考虑为具有轴向拉力、自重和一定抗弯刚度的梁单元,用 Ansys 中的 Beam3 单元模拟;吊弦是连接承力索和接触线的组件,建模时将吊弦的质量平分到吊弦两端的线夹,从而将其简化为简单的弹簧质量系统,用 Ansys 中的弹簧单元 Combin14 和质量单元

Mass21 模拟; 定位器和支撑杆可简化为一端为固定铰链支座, 中间为弹簧的弹簧质量系统, 分别采用集中质量单元和弹簧单元模拟。

图 4 即为根据以上原则建立的 3 跨 195 m 接触网有限元模型, 在此模型中, 承力索采用 Beam3 梁单元, 每 0.5 m 为一单元, 共有单元 390 个; 接触线采用 Beam3 梁单元, 每 0.5 m 为一单元, 共有单元 390 个;

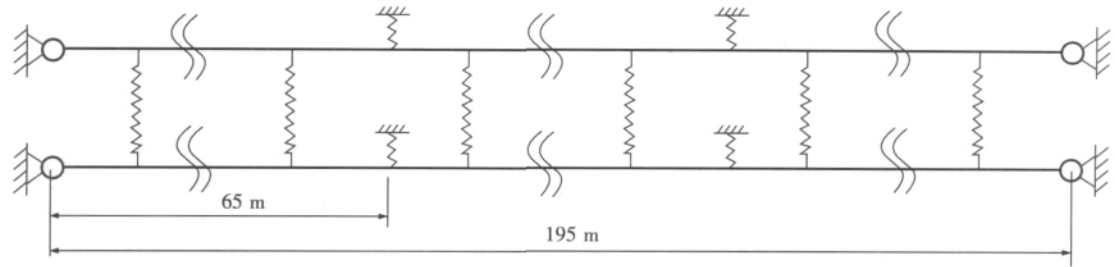


图 4 3 跨接触网有限元模型

表 1 接触网有限元模型主要参数

| | 线密度 | 截面积 | 弹性模量 | 张力 |
|-------|------------|-----------------------|------------|-------|
| 承力索 | 3934 kg/m | 150e-6 m ² | 1.27e11 Pa | 15 kN |
| 接触线 | 8 916 kg/m | 120e-6 m ² | 1.96e11 | 10 kN |
| 定位器质量 | 0.634 kg | | | |
| 定位器刚度 | 1.8e3 N·m | | | |
| 支撑杆质量 | 9 kg | | | |
| 支撑杆刚度 | 2.5e7 N/m | | | |
| 吊弦刚度 | 2.1e6 N/m | | | |
| 跨距 | 65 m | | | |
| 结构高度 | 1.5 m | | | |

每跨 7 根吊弦采用 7 个弹簧单元和 14 个质量单元模拟, 共 21 个弹簧单元和 42 个质量单元; 2 个支撑杆分别位于第 1、2 跨之间、第 2、3 跨之间, 分别采用 2 个弹簧单元和 2 个质量单元; 2 个定位器分别位于第 1、2 跨之间、第 2、3 跨之间, 分别采用 2 个弹簧单元和 2 个质量单元。模型参数^[2]由表 1 给出。

1.2 接触网模型固有频率

固有频率和各阶振型是接触网设计的重要指标参数, 列车在运行中由于轨道不平顺、风及其他外力、车体自身振动等原因, 会对接触网施加动载荷, 若动载荷的频率与接触网固有频率接近或相等, 则会发生共振现象, 对弓网受流质量产生极为不利的影响, 因此分析其固有频率, 避免共振现象发生, 是弓网设计的重要内容, 另外, 固有频率和振型也是系统降阶研究的基础。针对前面建立的接触网模型, 利用 Ansys 的模态分析功能, 可计算接触网模型各阶固有频率, 表 2 列出了前 20 阶频率。

表 2 接触网前 20 阶固有频率

| 模态阶次 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|------|---------|---------|----------|---------|---------|---------|---------|
| 模态频率 | 0.274 6 | 0.349 1 | 0.501 33 | 1.098 4 | 1.214 5 | 1.408 6 | 2.471 5 |
| 模态阶次 | 8 | 9 | 10 | 12 | 14 | 16 | 20 |
| 模态频率 | 2.482 1 | 2.495 7 | 3.605 3 | 4.393 8 | 5.975 1 | 6.864 2 | 9.877 6 |

由表 2 可以看出, 接触网的低频段比较集中且低阶固有频率数值较小, 机车在高速运行时, 产生的作用于接触网的动载荷频率与接触网低阶固有频率易于重叠或接近, 引起弓网剧烈振动。优化弓网自身参数是减少弓网振动的有效措施, 而当上述措施遇到瓶颈时, 对弓网进行主动控制就成为抑制弓网振动的有效方法之一。

1.3 接触网动力学方程

利用有限元方法将接触网模型离散化, 从而将无限自由度系统转化为多自由度系统, 此时系统可以用下列二次微分方程组表示。

$$M \ddot{q} + C \dot{q} + Kq = F(t) \tag{1}$$

式中 q ——节点坐标的位移向量;

\dot{q} ——节点坐标的速度向量;
 \ddot{q} ——节点坐标的加速度向量;
 M 、 C 、 K ——分别为系统的整体质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵。

为简化研究, 接触网受到的来自于受电弓的外力 $F(t)$ 用分时段作用于不同节点的偏移正弦波表示, 即:

$$F(t) = H(t) \times 60 \times (1 + 0.8 \sin wt) \tag{2}$$

式中 $F(t)$ ——接触网承受的外力载荷向量;
 $H(t)$ ——含时间参数的列向量, 以模拟在某时间段外力只作用于某一个节点;
 w ——外力频率。

利用 Ansys 超单元技术,分析前面建立的接触网有限元模型,为简化研究过程,忽略节点轴方向和绕轴旋转自由度,可得到系统整体质量刚度矩阵输出文件,然后编写 KMEextrat 程序,分离出 M 和 K 矩阵。

$$M = \begin{bmatrix} 0.668 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.668 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.668 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.236 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.236 \end{bmatrix}_{778 \times 778} \quad (3)$$

$$K = \begin{bmatrix} 1.32 & -0.65 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0.65 & 1.32 & -0.65 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0.65 & 1.32 & -0.65 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & -0.34 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -0.34 & 0.61 \end{bmatrix}_{778 \times 778} \times 10^8 \quad (4)$$

$$C = \alpha M + \beta K \quad (5)$$

系统阻尼采用瑞利阻尼^[15],如式(5)所示,此处取 $\alpha = 0.001$ $\beta = 0.001$ 。

1.4 降阶模型

在上述模型的有限元分析中,为了得到相对准确的结果,划分的单元数量较多,因而得到的动力学方程含有大量的自由度,这就导致主动控制器的设计和使用具有较高复杂度和成本。由于系统所受外力的频率往往集中于系统的低频段,因而可以采用模态降阶方法降低系统的自由度,降阶后得到的新系统具有较少自由度,便于主动控制器的设计和使用,且其频率特性与原系统的低阶频率十分吻合,这样就即保证了降阶后系统的适用性又方便了主动控制器的设计和使用。

选取 m 阶模态控制矩阵,将原动力学系统方程转化到模态坐标中,节点坐标矩阵和模态坐标转化规则如下。

$$q = \phi z \quad (6)$$

式中 z —— n 维模态坐标向量;

q —— n 维节点坐标向量;

ϕ —— n 阶控制模态矩阵。

将式(6)代入式(1),并将质量矩阵归一化,则可得降阶后的系统动力学方程。

$$\ddot{z} + \tilde{C} \dot{z} + \tilde{K} z = \tilde{F}(t) \quad (7)$$

式中 $\tilde{C} = \phi^T C \phi$ $\tilde{K} = \phi^T K \phi$ $\tilde{F} = \phi^T F \phi$

对前面建立的模型,在 Ansys 中进行模态分析,取前 20 阶模态的振型,组成 77820 阶模态矩阵,计算出

降阶模型的阻尼和质量矩阵。

$$\tilde{C} = \begin{bmatrix} 1.23 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2.08 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2.8 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 6.7 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 35 \end{bmatrix}_{20 \times 20} \quad (8)$$

$$\tilde{K} = \begin{bmatrix} 2.47 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 4.3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 6.1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 105 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 117 \end{bmatrix}_{20 \times 20} \times 10^4 \quad (9)$$

为了便于系统的主动控制设计,将微分动力学方程组转化为状态空间形式,取状态向量 $x = [z \quad \dot{z}]^T$,得到模态坐标下的状态方程组。

$$\dot{x} = Ax + Bu + \tilde{F} \quad (10)$$

$$y = Cx \quad (11)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ \tilde{K} & \tilde{C} \end{bmatrix}_{40 \times 40}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ -I \end{bmatrix}_{40 \times 20}$$

$$C = I_{40 \times 40}$$

式中 x ——40 维列向量。

式(10)、(11)即为降阶后接触网系统的动力学状态空间方程,我们将针对此模型进行接触网系统的主动控制研究。

2 接触网最优主动控制

2.1 最优控制理论

最优控制理论作为现代控制理论的重要分支,主要研究使受控系统的性能指标达到最优化的基本条件和综合方法,对于下列状态方程表示的系统,控制的目标是使系统误差和所需控制能量最小化。

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (12)$$

$$\dot{y} = Cx + Du \quad (13)$$

如果系统的状态方程是线性的,同时取性能指标函数为状态变量和控制变量的二次型,则此类最优控制设计问题即是线性二次型最优调节器设计(LQR)问题^[16]。对于这类控制,就是确定一个状态反馈规律。

$$u(t) = -Kx(t) \quad (14)$$

使得下列性能指标最小化:

$$J = \frac{1}{2} \int_0^t [x^T(t) Q x(t) + u^T(t) R u(t)] dt + \frac{1}{2} x^T(t_f) M_x(t_f) \quad (15)$$

式中 Q 、 M ——半正定矩阵;

R ——正定矩阵;

Q 、 R ——分别为状态向量和输入向量的加权矩阵。

此时, 反馈增益矩阵可表示为:

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

其中 P 应当满足下列黎卡提(Riccati)代数方程:

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

2.2 基于LQR的最优控制器设计

在二次型性能指标函数中, 被积函数中的第一项 $x^T(t) Q x(t)$ 主要反映系统响应过程中状态偏差的性质, 被积函数中的第二项 $u^T(t) R u(t)$ 主要反映对控制向量的约束, 因而二次型性能指标函数可以理解为状态变化量与控制过程所消耗的能量之间的一种折衷。加权矩阵 Q 和 R 分别为对状态向量和输入控制向量的惩罚。两个加权矩阵的惩罚作用具有相对性, 增大矩阵 Q 中元素的值, 就相当于减小矩阵 R 中元素的值, 反之亦然, 因而在设计中通常将 R 中相应元素置1, 然后调整 Q 。

接触网的控制中, 系统的位移变化是最受关注的, 由于以后将采用半主动控制策略, 控制能量的关注程度处于次要位置, 因此针对前面建立的接触网模型, 在LQR控制器设计时设加权矩阵为:

$$Q = \begin{bmatrix} 800 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 800 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 800 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 800 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 800 \end{bmatrix}_{40 \times 40}$$

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}_{20 \times 20}$$

根据第2.1节理论, 利用Matlab软件的LQR设计器, 可以求得:

$$K = \begin{bmatrix} -16.3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -10.5 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -70.1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -97 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -114 \end{bmatrix}_{20 \times 20} \quad (18)$$

2.3 接触网系统最优控制仿真与分析

2.3.1 接触网最优控制仿真

利用simulink对前面建立的接触网控制模型进行仿真, 仿真时接触网所受外力用式(19)模拟, 且分时段分别作用于不同节点。

$$F = 60 [1 + \sin(2.5t)] \quad (19)$$

鉴于篇幅限制, 只列出部分仿真结果, 图5、图6、图7、图8分别为接触网第6、8、12、16节点处, 实施主动控制和未实施主动控制的位移波动比较图。从上述仿真结果可以看出, 实施主动控制后, 接触网的波动明显减弱, 有效提高了弓网受流质量。

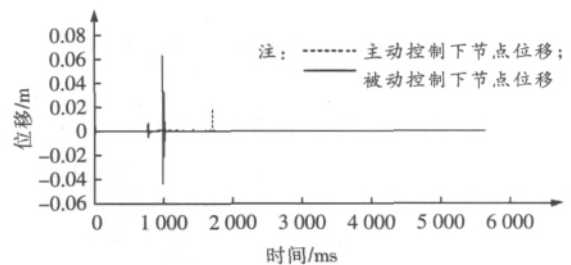


图5 第6节点受控前后位移波动比较图

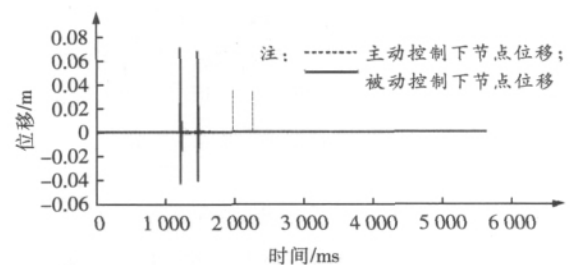


图6 第8节点受控前后位移波动比较图

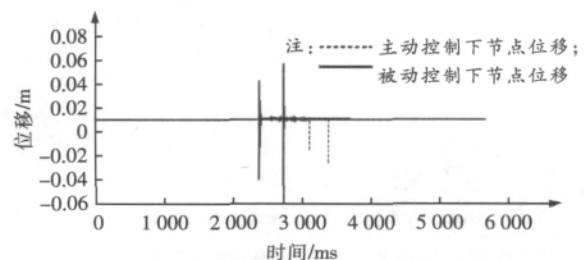


图7 第12节点受控前后位移波动比较图

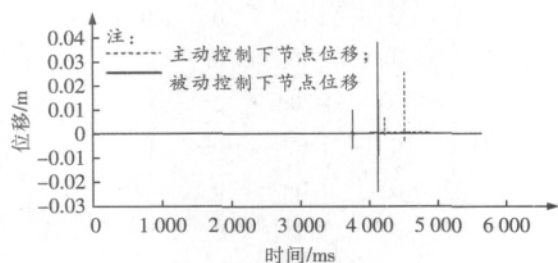


图 8 第 16 节点受控前后位移波动比较图

表 3 主动控制前后节点位移指标对比

| | 控制类型 | 节点振动评价指标 | | | | | | | | | |
|----------------|------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | | x_2 | x_4 | x_6 | x_8 | x_{10} | x_{12} | x_{14} | x_{16} | x_{18} | x_{20} |
| 最大值 X_{\max} | 被动 | 0.097 6 | 0.096 3 | 0.062 9 | 0.069 7 | 0.026 9 | 0.040 7 | 0.024 1 | 0.037 8 | 0.042 7 | 0.015 3 |
| | 主动 | 0.002 7 | 0.001 2 | 0.015 5 | 0.031 6 | 0.016 2 | 0.000 2 | 0.002 3 | 0.023 0 | 0.033 0 | 0.011 2 |
| 最小值 X_{\min} | 被动 | -0.090 2 | -0.085 0 | -0.043 8 | -0.042 6 | -0.016 4 | -0.059 9 | -0.046 6 | -0.024 2 | -0.018 1 | -0.009 5 |
| | 主动 | -0.006 0 | -0.013 9 | -0.000 6 | -0.000 4 | -0.004 5 | -0.028 1 | -0.029 4 | -0.001 8 | -0.005 1 | -0.001 8 |
| 均方差 d | 被动 | 0.011 0 | 0.004 5 | 0.001 8 | 0.002 2 | 0.000 7 | 0.001 8 | 0.001 1 | 0.000 9 | 0.001 1 | 0.000 4 |
| | 主动 | 0.000 6 | 0.000 5 | 0.000 3 | 0.000 5 | 0.000 2 | 0.000 4 | 0.000 3 | 0.000 2 | 0.000 4 | 0.000 1 |

从表 3 的数据分析可以看出,在实施最优主动控制后,接触网在各节点处位移的最大值、最小值得到较大减低,幅度达 90% 以上,均方差也得到较大下降,幅度达 70% 以上,接触网的振动性能得到了极大提升,因此接触网的主动控制必将有效提高弓网受流质量。

3 结论

本文研究了接触网的主动控制原理及方法,为使用离散化的方法进行研究,首先在 Ansys 软件中建立了接触网的有限元模型并分析了其频率特性,利用超单元法得到了模型的整体质量刚度矩阵数据文件,并编写 KMEExtract 程序分离出整体质量、整体刚度矩阵,然后建立了其动力学方程;为便于控制器的设计及仿真分析,使用模态降阶法对系统降阶并将系统转为状态方程形式,进而设计了 LQR 控制器,并使用 simulink 对控制系统进行仿真分析。通过仿真分析可得出:弓网受流性能随着车速的提高而下降,而接触网的主动控制能有效遏制接触网的振动情况,节点振动位移最大值、最小值及振动位移均方差等各项指标都得到了较好的改善,幅度达 70% 以上,在通过改变弓网自身参数的方法改善弓网性能遇到瓶颈时,主动控制或半主动控制是改善弓网性能最为有效的方法之一。

参考文献:

- [1] 于万聚. 高速接触网 - 受电弓系统动态受流特性研究[J]. 铁道学报, 1993(2): 16 - 26.
Yu Wanju. A Study on the Dynamic Current - carrying Characteristics of the Highspeed Railway Pantograph - catenary System [J]. Journal of the China Railway

2.3.2 最优主动控制对接触网振动影响分析

在对上面仿真数据进行接触网振动定量分析时,选取各节点位移最大值 X_{\max} 、最小值 X_{\min} 、位移标准差

$d = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}}$ 作为振动性能评价指标,通过分析,可得出结果,如表 3 所示。

Society, 1993(2): 16 - 26.

- [2] 程维. 电气化铁道受电弓 - 接触网系统受流特性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2007.
Cheng Wei. Research on the Current - collecting Traits of Electrified Railway's Pantograph - catenary System [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2007.
- [3] Angelines Alberto, etc. A high Performance Tool for The Simulation of the Dynamic Pantograph - catenary Interaction [J]. Mathematics and Computers in Simulation, 2008(3): 652 - 667.
- [4] 张卫华, 黄标, 梅桂明. 基于虚拟样机技术的高速弓网系统研究[J]. 铁道学报, 2005(4): 30 - 35.
Zhang Weihua, Huang Biao, Mei Guiming. Study on Pantograph - catenary System Based on Virtual Prototyping[J]. Journal of the China Railway Society, 2005(4): 30 - 35.
- [5] 邢海军, 麻士琦, 杨绍普. 受电弓动态参数研究[J]. 振动、测试与诊断, 2002(3): 206 - 211.
Xing Haijun, Ma Shiqi, Yang Shaopu. Studies on Dynamic Parameters of Pantograph [J]. Journal of Vibration Measurement & Diagnosis, 2002(3): 206 - 211.
- [6] T. X. Wu, etc. Active Vibration Control of a Railway Pantograph [J]. Journal of Rail and Rapid Transit, 1997(2): 117 - 130.
- [7] A. Balestrino, O. Bruno & A. Landi. Active Control for The Pantograph - catenary System [J]. Transactions on the Built Environment, 1994(6): 277 - 284.

(下转第 90 页)

安全、可靠的车地间宽带无线通信,又是今后车地宽带无线发展的方向,同时还符合目前国际铁路联盟确定的 GSM-R 向 LTE-R 的基本演进策略和步骤。

参考文献:

- [1] 陈晨,李长乐. 高速铁路通信系统方案研究综述[J]. 计算机工程与应用 2010(34):24-26.
Chen Chen, Li Changle. High Speed Rail Communication System: A survey [J]. Computer Engineering and Applications, 2010(34):24-26.
 - [2] 苏华鸿. 移动通信多普勒频移与高铁覆盖技术[J]. 邮电设计技术 2009(12):1-4.
Su Huahong. Mobile Communication Doppler Frequency Shift and High-speed Railway Coverage Technology [J]. Designing Techniques of Posts and Telecommunications 2009(12):1-4.
 - [3] 黄吉莹,马君,钟章队. 客运专线中 GSM-R 越区切换的研究[J]. 铁道通信信号 2006(5):51-53.
Huang Jiying, Ma Jun, Zhong Zhangdui. Research on the Handover of GSM-R system in Passenger Special Line [J]. Railway Signalling & Communication, 2006(5):51-53.
 - [4] 王映民,孙韶辉. TD-LTE 技术原理与系统设计[M]. 北京:人民邮电出版 2010.
Wang Yingmin, Sun Shaohui. TD-LTE Principles and System Design [M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2010.
 - [5] 吴昊,谷勇浩,钟章队. 一种应用于高速铁路的 GSM-R 快速切换算法研究[J]. 铁道工程学报 2009(1):92-96.
Wu Hao, Gu Yonghao, Zhong Zhangdui. Research on the Fast Algorithm for GSM-R Switching for High-speed Railway [J]. Journal of Railway Engineering Society 2009(1):92-96.
- *****
- (上接第 84 页)
- [8] Alessandro Pisano, Elio Usai. Contact Force Estimation and Regulation in Active Pantographs: an Algebraic Observability Approach [J]. Asian Journal of Control, 2008(5):1-9.
 - [9] 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(2):9-15.
Guo Jingbo, Yang Shaopu, Gao Guosheng. Research on Active Control of the Pantograph-catenary System with Varying Stiffness [J]. Journal of Vibration and Shock, 2005(2):9-15.
 - [10] 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(11):34-40.
Yang Gang, Li Fu. Semi-active Control for High-speed Pantograph Based on the LQR Optimal Regulator [J]. Journal of the China Railway Society, 2011(11):34-40.
 - [11] 汪吉健,田志军,李会杰,等. 承力索张力对弓网受流质量影响研究[J]. 铁道学报 2005(1):114-118.
Wang Jijian, Tian Zhijun, Li Huijie, etc. Study of the Influence of Current-receiving Quality Between Pantograph and OCS from Tensile Force Acting on Catenary Wire [J]. Journal of the China Railway Society 2005(1):114-118.
 - [12] 毕继红,张峰,刘峰涛. 刚性悬挂接触网/受电弓系统动力分析[J]. 沈阳理工大学学报 2007(4):91-94.
Bi Jihong, Zhang Feng, Liu Fengtao. The Analysis to Dynamic Response of Rigid Suspension Catenary/Pantograph System [J]. Transactions of Shenyang Ligong University, 2007(4):91-94.
 - [13] Tong-Jin Park, Byung-Jin Kim et al. A Catenary System Analysis for Studying the Dynamic Characteristics of a High Speed Rail Pantograph [J]. KSME International Journal 2002(4):436-447.
 - [14] Cho YH, etc. Influence of Contact Wire Pre-sag on the Dynamics of Pantograph-railway Catenary [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2010(11):1471-1490.
 - [15] 克拉夫. 结构动力学[M]. 北京:高等教育出版社 2006.
Ray Clough. Dynamics of Structures [M]. Beijing: Higher Education Press 2006.
 - [16] Richard C. Dorf. 现代控制系统[M]. 北京:清华大学出版社 2008.
Richard C. Dorf. Modern Control System [M]. Beijing: Tsinghua University Press 2008.