

北京大兴国际机场线 160 km/h 刚性接触网系统 弓网耦合受流质量分析

杜智恒^{1,2}

(1. 北京市轨道交通建设管理有限公司, 100068, 北京;

2. 城市轨道交通全自动运行系统与安全监控北京市重点实验室, 100068, 北京//工程师)

摘要 刚性接触网弓网受流质量是保证列车稳定运行的基础,接触网参数和受电弓参数是影响弓网受流质量的重要因素。为探究接触网参数和受电弓参数对弓网受流质量的影响,以北京大兴国际机场线现场实际数据为工程案例,建立仿真模型,分别分析接触网参数和受电弓参数对弓网受流质量的影响规律与程度,并针对该机场线提出优化措施,以提高弓网受流质量。

关键词 北京大兴国际机场线; 刚性接触网; 弓网耦合; 受流质量

中图分类号 U264.34; U225

DOI:10.16037/j.1007-869x.2019.12.038

Current Collection Quality of Pantograph-catenary Coupling for 160 km/h Rigid Catenary System on Beijing Daxing International Airport Express

DU Zhiheng

Abstract The current collection quality of pantograph-catenary on rigid catenary is the basis to ensure the stable train operation, while the parameters of pantograph and catenary are important factors that directly affect the current collection quality of the pantograph-catenary. In order to explore the influence of pantograph and catenary parameters on the current collection quality of pantograph-catenary, a simulation model is established based on the actual field data of Beijing Daxing International Airport Express, the influential law and degree of pantograph and catenary parameters on the current collection quality are analyzed respectively, improvement measures are put forward accordingly.

Key words Beijing Daxing International Airport Express; rigid catenary; pantograph-catenary coupling; current collection quality

Author's address Beijing MTR Construction Administration Corporation, 100068, Beijing, China

目前,刚性接触网的适应速度已从最初的 60 km/h,发展到了目前北京大兴国际机场线(以下简称为“大兴机场线”)的 160 km/h。运行速度的大幅提升带来了弓网受流关系的改变,致使弓网受流质量成为城市轨道交通供电系统的研究热点。影响弓网受流质量的因素有很多,包括受流的直接部件刚性接触网和受电弓的参数,以及设备材质、施工质量、设计参数、列车运行参数等^[3]。这些因素不仅关系到弓网受流质量,同时也制约着刚性接触网弓网性能的提升。诸多影响因素的存在,使得弓网受流质量一直成为学术研究的重点以及实际运行的难点。目前,计算机模拟法已成为研究刚性接触网系统的常用方法^[5]。

本文结合大兴机场线现场实际数据、场景与工况,在建立刚性接触网有限元模型与弓网耦合模型的基础上,着重分析了刚性接触网参数中的接触网坡度、悬挂结构等效刚度、悬挂结构等效质量,以及受电弓参数中的弓头质量、阻尼、刚度对弓网受流质量的影响,并针对大兴机场线提出了优化措施。

1 弓网受流质量评价体系

1.1 弓网受流质量评价标准

弓网接触压力能够准确地体现弓网间的接触情况,以及直接地反映弓网受流质量^[6]。目前可参考 IEC 62486—2017 来设定弓网间接触力的最大值、最小值、平均值及标准差,并以此作为弓网受流质量的评价标准。

1.1.1 平均接触力

接触力平均值 F_m 反映列车运行时弓网间接触力的整体状况,其值按下式计算:

$$F_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n F_i \quad (1)$$

式中:

F_i ——受电弓和接触网间 i 处的接触力;

n ——总共采集的点数。

1.1.2 接触力标准偏差

接触力标准差 σ 表示弓网间接触力的整体波动情况及弓网间接触力的离散程度,是评价弓网受流质量的主要指标^[7],其值按下式计算:

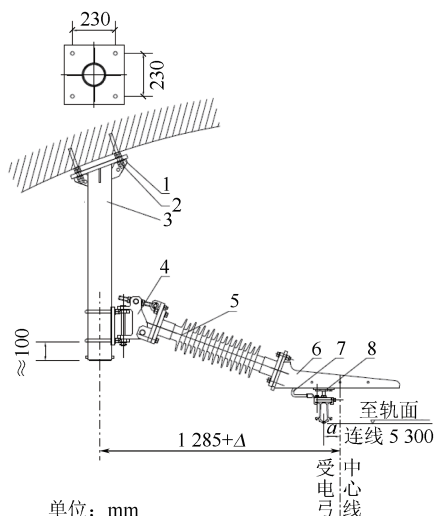
$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (F_i - F_m)^2} \quad (2)$$

1.1.3 接触力的最大值与最小值

接触力过大会使受电弓滑板和接触线磨损增大,因此接触线和受电弓滑板需要经常更换,以缩短其使用寿命。弓网间接触力过小会使弓网间的接触电阻变大、弓网能耗增加,以及接触线和滑板发热严重。当接触力小到一定程度时,会出现弓网离线现象,造成拉弧、灼伤接触线与受电弓滑板,且损坏处后期会进一步加剧,导致弓网受流质量进一步恶化。

1.2 弓网受流质量案例选取

为使试验结果更加真实地反映实际运行环境,以及为使试验结果可靠性更高,本文选取大兴机场线作为仿真案例。设定地下线和 U 型槽线路总长为 21.981 km,列车运行时速为 160 km/h;接触网悬挂方案为架空刚性接触网,跨度为 8 m,接触线类型为 CTAH120(高强度铜银合金),标称电压 AC 25 kV。单侧腕臂安装如图 1 所示。



注: 1 表示吊柱底座; 2 表示基础锚栓; 3 表示吊柱; 4 表示旋转底座; 5 表示棒式复合绝缘子; 6 表示腕臂; 7 表示电连接线; 8 表示定位线夹; Δ 表示轨道超高引起的偏移量; a 表示接触线距腕臂中心线的距离

图 1 单侧腕臂安装示意图

1.3 弓网耦合动力学模型

列车行进时,受电弓沿着接触线移动,接触线与受电弓的相对位置、接触状态和整个弓网系统的刚度随之变化,所以弓网耦合系统属于时变系统,需用非线性理论和动力有限元方法进行分析。

非线性理论一般体现在 3 个方面,分别为材料非线性(塑性、超弹性、蠕变等)、几何非线性(大应变、大挠度、应力刚化等)和状态改变非线性(接触、单元死活)。随着列车的行进,受电弓的位置不停地变化,导致弓网系统动力方程中的刚度矩阵亦不停地发生改变。所以本次研究可以定义为状态改变非线性接触。

在建立单元体的力学关系式时,除静力作用外,还需考虑动荷载以及惯性力和阻尼力的作用。通过引入这些影响因素,建立单元体和整个体系的动力基本方程,并采用动力有限元法进行求解。其基本步骤为:①将有限元模型的连续区域进行离散化;②构造插值函数;③建立结构体系的运动方程;④求解运动方程;⑤计算结构的应力、应变和位移。

本文研究的动力学模型建立在受电弓与接触网的耦合状态下,在有限元软件中通过建立“接触对”来实现,即一个目标单元和一个接触单元构成一个“接触对”,程序通过一个共享的实常数来识别接触对。“接触对”相当于在两个物体间设置了一个弹簧,接触力等于接触刚度与穿透的乘积。但“接触对”又不等同于弹簧,当两物体分开时,接触刚度不起作用。研究弓网耦合关系,首先需建立弓网间的刚度关系,弓网接触刚度表征了弓头为抵抗接触线垂直移动而产生弹性变形的能力。

对于刚性悬挂而言,接触线在受电弓顶升作用下产生一定的变形,受电弓弓头本身相对接触线而言变形很小,故可设置接触线为柔性、弓头为刚性。由有限元软件中凸、凹面接触时目标面和接触面的指定规则,指定接触线为目标面、弓头为接触面。

2 刚性接触网参数对弓网受流质量的影响

2.1 刚性接触网坡度对弓网受流质量的影响

城市轨道交通中的列车运行环境较为复杂,由于受到当地条件、施工条件及后期维护条件的影响,接触线并不能保证能够始终处于水平位置。同时,城市轨道交通线路运行环境的改变,势必造成接触网坡度发生变化,坡度变化的幅度 δ 可表示为:

$$\delta = (H_a - H_b)/L \quad (3)$$

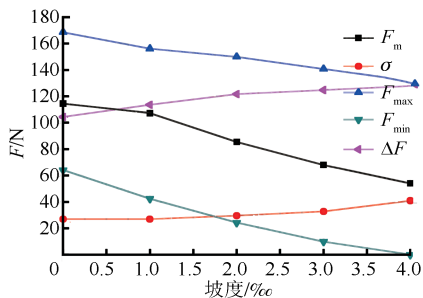
式中:

H_a ——锚段始端垂直高度;

H_b ——锚段末端垂直高度;

L ——锚段长度。

在仿真试验中,为更好地探究坡度变化对弓网受流质量的影响,设定坡度变化范围为0~5‰,增长幅度为1‰。仿真结果如图2所示。



注: F 表示弓网间接触力; F_{\max} 表示接触力最大值;
 F_{\min} 表示接触力最小值; $\Delta F = F_{\max} - F_{\min}$

图2 接触网坡度对弓网接触力影响情况

从图2可见, F 随坡度的增加呈递减趋势, F_m 随坡度增加呈下降趋势, 下降速率与坡度的增加速率并无明显关系; F_{\max} 和 F_{\min} 随坡度增加降低程度不断增加, 其中 F_{\min} 的变化较为明显, 甚至出现 $F_{\min} = 0$ 的情形; σ 随着坡度增加不断扩大, 表明接触网坡度会影响弓网间受流质量。坡度和弓网的受流质量呈反比, 当坡度为2‰~3‰时 F_{\min} 为9.945 N, 小于行业标准中的30 N。在考虑设计预留的情况下, 需将机场线坡度控制在1‰以下, 以保证列车运行过程中稳定可靠地受流。

2.2 悬挂结构等效刚度对弓网受流质量的影响

腕臂底座安装高度及调节螺栓能够在一定范围内对接触网的垂直距离进行调节, 以此来降低接触线和轨道的坡度。但调整的幅度受角度不断变化的影响, 调整幅度的不同使得刚性接触网悬挂结构的等效刚度(复杂结构进行有效归算)亦发生相应变化, 从而影响弓网受流质量。为探究等效刚度的影响结果, 改变悬挂结构的等效刚度, 分析弓网间动态接触力指标的变化, 结果如图3所示。

从图3可以看出, 悬挂结构的等效刚度对 F 的影响很小; 反之, 当悬挂结构等效刚度不断减小时, F 参数得到一定改善, 表明弓网受流质量得到改善提升。因此, 北京新机场线在设计施工过程中, 调节螺栓可在0.01~1.00倍等效刚度间适度调

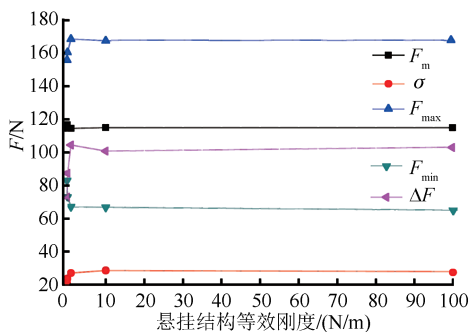


图3 悬挂结构等效刚度对弓网间接触力的影响曲线

整, 以提高弓网受流质量。

2.3 悬挂结构等效质量对弓网受流质量的影响

不同类型悬挂结构的材质、质量影响着悬挂结构的等效质量。为探究等效质量的影响结果, 悬挂结构等效刚度不变, 在原有悬挂结构等效质量的基础上, 分别进行10%和20%的上下浮动, 分析 F 的变化, 结果如图4所示。

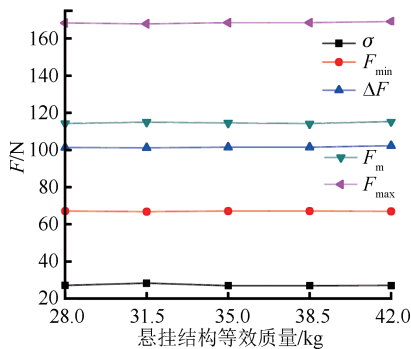


图4 悬挂结构等效质量对弓网间接触力的影响曲线

从图4可以看出, 无论等效质量增加还是减小, 当其处于20%的变化幅度范围之内时, F_m 、 F_{\max} 、 F_{\min} 、 ΔF 和 σ 均未发生明显改变, 说明等效质量在一定范围内的变化并未对弓网受流质量产生影响。

3 受电弓参数对弓网受流质量的影响

弓网受流过程中, 受电弓弓头滑板与接触线之间的接触处于动态变化中, 在一定程度上影响着弓网受流质量。因此, 应着重探究受电弓弓头的参数对弓网受流质量的影响程度。

3.1 受电弓弓头质量对弓网受流质量的影响

为增加仿真结果的通用性, 以及为更全面地分析受电弓弓头集总质量对弓网间动态接触力的影响。以原质量为16.12 kg的Stemmann DSA380D型受电弓为设定标准, 分别对受电弓弓头集总质量设定为原质量的0.8、1.0、1.2、1.5、2.0、4.0倍, 分析 F

的变化,结果如图5所示。

从图5可以看出,弓头集总质量的增加,对于 F_m 影响较小,但是对 F_{\max} 和 F_{\min} 的影响却较为明显,这导致 F 的变化幅度变大,弓网受流质量受到影响。当弓头集总质量适当减小时, F 的变化幅值与 σ 的降低幅度较为明显。因此,大兴机场线在进行受电弓选型过程中,尽可能选取弓头集总质量为14.98 kg左右的Panto420型新型受电弓,以提升弓网受流质量。

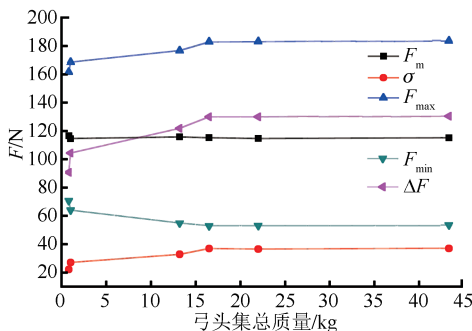


图5 弓头集总质量对弓网间接触力的影响曲线

3.2 受电弓弓头阻尼对弓网受流质量的影响

实际运行中,受电弓滑板与接触线的振动是不可避免的,但是可以通过调节受电弓的弓头阻尼降低振动。在仿真分析中,其他参数设定不变,设置受电弓弓头阻尼分别为0 Ns/m、30 Ns/m、60 Ns/m、90 Ns/m、120 Ns/m和150 Ns/m,来分析弓网动态接触力的变化,结果如图6所示。

从图6可以看出,受电弓弓头阻尼为90 Ns/m是 F 指标参数的分水岭。当弓头阻尼为0~90 Ns/m,且当其不断增大时, F_{\max} 和 F_{\min} 数据得到优化,说明弓网受流质量得到提升改善;当弓头阻尼为90~150 Ns/m,且当其不断增大时, F 的变化趋势与前述相反,说明弓网受流质量降低。因此,将弓头等效阻尼设定为90 Ns/m左右,可以较好地保证弓网受流质量。

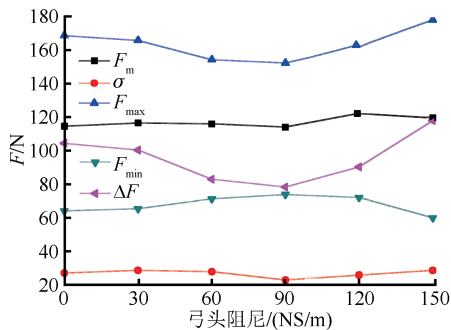


图6 弓头阻尼对弓网间接触力的影响曲线

3.3 受电弓弓头刚度对弓网受流质量的影响

弓网系统中,悬挂结构等效刚度是影响弓网受流质量的因素之一。为更全面地分析受电弓弓头刚度对 F 的影响,分别将受电弓弓头刚度设定为原弓头刚度的0.6、0.8、1.0、1.2、1.4倍,其他参数设定不变,分析 F 的变化,结果如图7所示。

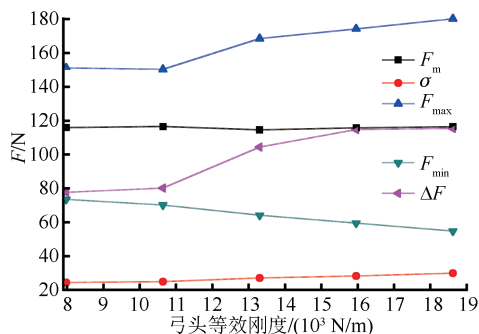


图7 弓头等效刚度对弓网间接触力的影响曲线

从图7可以看出, F 与受电弓弓头刚度间的变化关系较为明显,随着受电弓弓头刚度增加, F_m 并未发生明显变化,但是对 F_{\max} 和 F_{\min} 影响很大,增加了弓网之间的波动幅度,造成 F 的变化幅值增加;通过变化趋势可以看出,受电弓弓头刚度的增加,降低了弓网受流质量。

4 结语

通过设定弓网受流质量标准,选取大兴机场线作为工程案例,研究刚性接触网参数及受电弓参数对弓网受流质量的影响,并以此为基础为大兴机场线的设计与施工提出合理化优化建议,从而在一定程度上提升了弓网受流质量,为保障该路线稳定、可靠运行提供重要的理论参考。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 张卫华,沈志云.接触网动态研究[J].铁道学报,1991(4):26.
- [3] WU T. Study of current collection from catenary-pantograph at high speed by simulation[J]. Journal of the China Railway Society, 1996(14):21.
- [4] MANABE K, MORIKAWA T, HIKITA M. On dynamics of overhead equipment and multi-pantograph system[J]. Railway Technical Research Institute Quarterly Reports, 1986, 27: 79.
- [5] VUCHIC V R. Urban Transit Systems and Technology[M]. Hoboken, U.S.: Wiley, 2007.
- [6] 徐建忠.弓网电弧的物理场化真分析[D].北京:北京交通大学,2012.

(收稿日期:2019-06-18)