

CED400型高速受电弓精细动力学 模型影响因素研究¹⁾

叶梓佑^{*,†} 刘龙飞^{*} 吴荣平^{**} 吴孟臻[†] 许向红^{†,2)}

^{*}(湖南科技大学材料科学与工程学院, 湖南湘潭 411100)

[†](中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室, 北京 100190)

^{**}(北京中车赛德铁道电气科技有限公司, 北京 100176)

摘要 受电弓精细动力学建模及固有振动特性分析对于进行结构优化设计, 提高装备性能具有重要意义。对于结构可靠和性能优良的高速受电弓, 不仅取决于整体动力学特性, 局部振动特性也成为其中的关键环节。本文对受电弓精细动力学建模方法进行了研究, 讨论了不同影响因素对受电弓固有振动特性的影响。研究表明, 受电弓主要部件适当的质量分布和连接设置特性是获得符合实际结构固有振动特性的重要保证。

关键词 高速受电弓, 动力学模型, 固有振动特性, 质量补偿, 弓头悬挂

中图分类号: O327 文献标识码: A doi: 10.6052/1000-0879-19-087

STUDY ON INFLUENCING FACTORS OF FINE DYNAMIC MODEL OF CED400 HIGH SPEED PANTOGRAPH¹⁾

YE Ziyou^{*,†} LIU Longfei^{*} WU Rongping^{**} WU Mengzhen[†] XU Xianghong^{†,2)}

^{*}(College of Materials Science and Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411100, Hunan, China)

[†](State Key Laboratory of Nonlinear Mechanics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

^{**}(Beijing CRRC Corporation Limited CED Railway Electric Tech Company Limited, Beijing 100176, China)

Abstract Fine dynamic modeling and vibration characteristics analysis of pantographs have great significance in structural optimization design and equipment performance improvement. For high speed pantograph with reliable structure and excellent performance, not only the overall dynamic characteristics, but also the local vibration characteristics become the key link. The fine dynamics modeling method of pantograph was studied and it was found that the proper mass distribution of the main components in pantograph and their connection setting characteristics are the important guarantee to obtain the natural vibration characteristics of the actual structure.

Key words high-speed pantograph, dynamic modeling, vibration characteristic, mass compensation, pantograph head suspension

2019-03-05 收到第 1 稿, 2019-04-11 收到修改稿。

1) 国家自然科学基金(11672297), 中国科学院战略性先导科技专项(B类)(X DB22020000)资助项目。

2) 许向红, 副研究员, 主要从事受电弓力学特性与结构优化、仿生微结构设计及 3D 打印的研究。E-mail: xxh@lnm.imech.ac.cn

引用格式: 叶梓佑, 刘龙飞, 吴荣平等. CED400 型高速受电弓精细动力学模型影响因素研究. 力学与实践, 2019, 41(3): 265-269
Ye Ziyou, Liu Longfei, Wu Rongping, et al. Study on influencing factors of fine dynamic model of CED400 high speed pantograph. *Mechanics in Engineering*, 2019, 41(3): 265-269

高速列车行驶过程中,通常伴随复杂的弓网耦合振动。受电弓的动力学特性直接影响列车的受流质量,其与接触网振幅过大可能引发弓网故障^[1]。受电弓与接触网的动态接触过程中,结构共振是引起受电弓与接触网振幅增大的一个主要原因,不仅会引起弓网离线,降低受流质量,甚至会损坏受电弓和接触网。因此,建立准确的高速受电弓精细动力学模型,优化其结构和动力学特性,避免发生弓网共振,对于未来电气化铁路的发展具有重要意义^[2]。

近年来,学者们在受电弓建模方面展开了大量的研究,提出了归算质量块模型、多刚体模型、刚柔混合模型和全柔性模型等众多方法。归算质量块模型将受电弓等效成几个集中质量块,质量块之间通过刚度和阻尼连接^[3-6]。二质量块和三质量块模型将弓头等效成一个质量块,关注受电弓的垂向振动^[7-8]。弓头侧滚运动模型则将弓头等效成多个质量块^[9]或有转动自由度^[10-11]的质量块,可以表现弓头的翻转和滚动。多刚体模型将框架视作仅具有一个自由度的杆系结构,弓头简化为包含两个质量块的弹簧阻尼机构,可以反映弓头的平动和转动^[12]。刚柔混合模型将弓头与上臂等效为柔性体,下框架等效为刚体^[9,13]。全柔性体模型则将受电弓等效为一种全柔性结构,基于有限单元法,通过实体单元对结构进行离散,并通过连接设置描述各个部件之间的运动关系^[9]。

实际受电弓是一个复杂的机构,有几百甚至上千个零部件,目前商用软件已经能够实现精确的高速受电弓三维实体建模。然而,对弓网动力学仿真而言,旨在进行准确的耦合接触力计算,需要从计算效率和仿真精度的角度对受电弓模型进行合理简化。全柔性模型考虑了整个结构的柔性,涵盖了归算质量块模型、多刚体模型和刚柔混合模型的频响特性,对于受电弓局部构件和整体多自由度模态分析方面具有毋庸置疑的优势。本文对高速受电弓精细动力学建模方法进行了研究,讨论了不同影响因素对受电弓固有振动特性的影响。

1 受电弓结构组成及精细动力学模型

CED400型高速受电弓的整体结构对称,由弓头、上臂、平衡杆、下臂、拉杆、底座和传动机构等组成(图1)。其中,弓头包含碳滑板、滑板托架、弓头支架和弓头弹簧,上臂为单臂杆,平衡杆位于

受电弓上臂套筒的内部,下臂为双臂杆,传动机构包括升弓装置和阻尼器等。

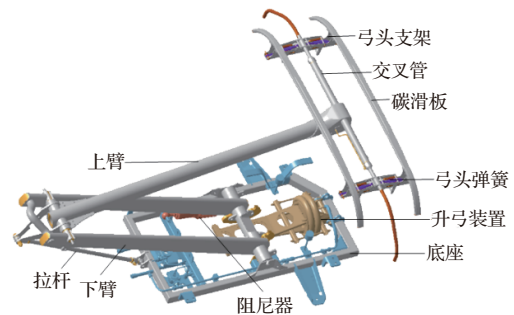


图1 CED400高速受电弓结构组成

基于CED400高速受电弓的设计图纸,利用CATIA软件进行精确的三维实体建模,在有限元模型中进行如下简化:(1)忽略螺栓、螺母、垫片、轴承和套筒等连接件,以及弓头弹簧、弓头弯角等复杂结构的实体特征;(2)考虑到阻尼器、底座配件对受电弓运行状态的影响可以忽略^[11],且可通过在下臂施加转矩模拟升弓气囊实现升弓的作用^[12],删去阻尼器、底座配件和升弓装置。CED400受电弓原始几何模型共包含部件448个,通过模型简化后剩余部件87个,弓头、上臂、平衡杆、下臂、转轴、拉杆和底座分别包含54,6,8,2,2,7和8个部件。之后,将焊接和螺丝固连的部件合并,最终简化为11个部件,简化后的几何模型见图2。

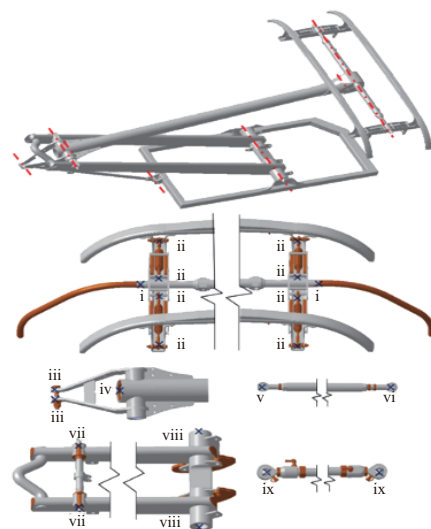


图2 CED400高速受电弓的简化模型
(点划线表示铰接轴,×表示质量补偿处)

高速列车出发前需升弓受流,停车后降弓断电。上/下框架主要部件组成的两个四连杆结构可实现

升/降弓运动。由下臂-底座、底座-拉杆、拉杆-上臂、上臂-下臂 4 处铰接组成受电弓框架运动的主四连杆结构。由上臂-下臂、下臂-平衡杆、平衡杆-平衡臂、平衡臂-上臂 4 处铰接组成受电弓框架运动的辅四连杆结构(图 2)。在这 7 个部件连接处(如图 2 中点划线所示),设置铰链约束,释放两部件绕其连接轴的相对转动自由度,两部件间可以相对转动,进而完成升降弓过程,称该简化模型为铰接模型。此时,设定底座下表面完全固定,即将底座下表面全部节点的 6 个自由度完全约束;同时忽略弓头弹簧对弓头高度的小范围调节作用,在弓头弹簧连接处设置为固定连接,即约束弓头和上框架之间的所有自由度。

质量分布是高速受电弓结构固有振动特性分析的重要影响因素之一。表 1 给出了 CED400 型高速受电弓各部件的删除质量、总质量以及二者之比。弓头部分删除质量最高,达 22%;下框架次之,不到 10%;上框架较小,小于 2%。为了研究建模时的螺栓等零部件删减对受电弓固有振动特性的影响,基于铰接模型,在删减部位添加质量点,分别对受电弓各部件和整弓进行质量补偿(图 2)。具体为:(1)对弓头删除质量进行补偿,在 i 处的两个质量点各加 0.375 kg,在 ii 处的 8 个质量点各加 0.29 kg,共计 3.07 kg,简称为弓头质量补偿模型;(2)对上臂删除质量进行补偿,在 iii 处的两个质量点各加 0.50 kg,在 iv 处的一个质量点加 0.11 kg,共计 0.21 kg,称为上臂质量补偿模型;(3)对平衡杆进行质量补偿,分别在 v 和 vi 处的质量点加 0.001 9 kg 和 0.003 7 kg,共计 0.005 7 kg,称为平衡杆质量补偿模型;(4)对下臂删除质量进行补偿,在 vii 处的两个质量点各加 0.34 kg,在 viii 处的两个质量点各加 1.66 kg,共计 4.00 kg,称为下臂质量补偿模型;(5)对拉杆进行质量补偿,在 ix 处的两个质量点加 0.155 kg,共计 0.21 kg,称为拉杆质量补偿模型;(6)如上对所有删除部件进行质量补偿,称为质量补偿模型。

表 1 CED400 受电弓各部件删除质量、总质量及删除质量百分比

部件名称	材料密度/ (t·m ⁻³)	删除质量/ kg	总质量/ kg	删除质量 百分比/%
弓头	8.00	3.07	14.08	22.00
上臂	2.66	0.21	12.46	1.70
平衡杆	2.66	5.7×10 ⁻³	0.68	0.84
下臂	8.00	4.00	42.44	9.40
拉杆	8.00	0.21	2.81	7.50

进一步地,基于质量补偿模型,在弓头弹簧连接处,设置与实际弹簧刚度相同的弹簧单元,取弹簧两端为参考点,使用弹簧单元连接这两个参考点,考察弓头悬挂对受电弓自振特性的影响。

2 受电弓自振特性的质量补偿影响分析

在 ABAQUS 有限元软件中,设置受电弓模型各部件的材料,采用四面体网格划分方式和二次四面体单元 C3D10,单元总数为 362 694。选用“Weld”和“Hinge”单元分别设置固定连接和铰接。选取线性摄动步-频率设置,设置模态计算阶数,计算受电弓的模态频率和振型。

图 3 为铰接模型、各部件质量补偿模型和整弓质量补偿模型的前 16 阶固有频率的计算结果。可以看出,质量补偿会减小模型的各阶固有频率。由于上臂、平衡杆、下臂、拉杆处的删除质量小于相应部件质量的 10%,质量补偿后各阶固有频率略有降低,降低百分比小于 1.2%。而弓头部分的删除质量较大,占部件总质量 22%,质量补偿对各阶固有频率有较大影响,降低百分比最高可达 14.7%(图 3)。同时,质量补偿对受电弓的低阶振型几乎没有影响。因此,在对受电弓进行模态分析仿真建模时,应对弓头的删除质量进行适当地补偿。

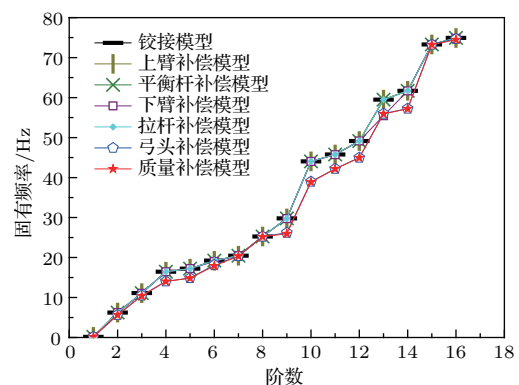


图 3 不同质量补偿方式下 CED400 高速受电弓模型的固有频率

3 弓头弹簧简化对受电弓自振特性的影响分析

表 2 给出了质量补偿模型和质量补偿-弹簧模型的低阶振型的描述和对比。在小于 40 Hz 的频率范围内,质量补偿模型有 9 阶振型包含框架振动,主要表现为第 1 阶的整弓垂向刚体振动(图 4(a))、第 2 阶的上臂横向弯曲振动(图 4(b))、第 3 阶的整弓垂振和上臂垂向弯振(图 4(c))、第 5 阶和第 7 阶的平衡杆垂向弯振(图 4(d)和图 4(e))、第 6 阶和第 9 阶的

表2 CED400 受电弓模型固有频率和振型描述

质量补偿模型			质量补偿-弹簧模型		
阶数	频率/Hz	振型描述	阶数	频率/Hz	振型描述
1	0.16	整弓垂振	1	0.16	整弓垂振
2	5.64	上臂横向弯振	2	2.73	弓头侧滚
3	10.41	整弓垂振、上臂垂向弯振	3	2.79	弓头框架反向垂振
4	14.03	弓头侧滚	4	7.38	上臂横向弯振
5	14.84	平衡杆垂向弯振、弓头绕交叉管转动	5	9.93	框架垂振、弓头纵向振动
6	17.91	框架横向弯振	6	12.12	框架横向振动
7	20.34	平衡杆垂向弯振	7	15.13	弓头纵向振动框架垂振、上框架垂弯振
8	25.22	平衡杆横向弯振	8	19.66	框架横向弯振、交叉管侧滚
9	25.95	框架横向弯振	9	20.20	平衡杆垂向弯振
10	38.87	拉杆垂向弯振、交叉管纵向弯振	10	23.32	框架横向振动、交叉管侧滚
			11	25.27	平衡杆横向弯振
			12	31.69	前后滑板交叉垂振
			13	38.48	前后滑板交叉垂振



图4 受电弓典型振型

框架横向弯振(图4(f))、第8阶的平衡杆横向弯振(图4(g))、第10阶的拉杆垂向弯振、交叉管纵向弯振(图4(h));弓头振型主要表现为第4阶的表现为弓头侧滚(图4(i))、第5阶的弓头绕交叉管转动(图4(d))。

质量补偿-弹簧模型考虑了弓头弹簧的作用,前13阶振型中有9阶振型包含框架振动,新增加了第8阶的交叉管侧滚(图4(j));有6阶振型包含弓头振动,新增加了第3阶的弓头框架反向垂振(图4(k))、第5阶和第7阶的弓头纵向振动(图4(l))、第12阶和第13阶的前后滑板交叉垂振(图4(m))。由此可见,弓头弹簧会不仅丰富了弓头的振型,同时会对上框架振型产生影响。

4 结论

本文开展了影响 CED400 型高速受电弓动力学特性的精细动力学模型影响因素进行了研究,提出了结构合理质量分布建模和弓头悬挂等效的一般方法。从分析结果来看,质量补偿对受电弓的低阶振型几乎没有影响,但对各阶固有频率有较大影响,相对差别最高可达 14.7%。弓头悬挂的等效则会会影响弓头和上框架的固有频率和振型。受电弓主要部件适当的质量分布特性和弓头悬挂等效是获得符合实际结构固有振动特性的重要保证,本文工作为进行弓网动力学分析与优化设计奠定了良好的基础。

参 考 文 献

- 1 BS EN 50317. Railway applications-current collection systems-requirements for and validation of measurements of the dynamic interaction between pantograph and overhead contact line. European Standard, 2002
- 2 高文斌, 马果垒, 马思群等. DSA380 型高速列车受电弓模态分析. 大连交通大学学报, 2015, 36(6): 24-28
Gao Wenbin, Ma Guolei, Ma Siqun, et al. Study on the pantograph modal test of type DSA380 for high-speed train. *Journal of Dalian Jiaotong University*, 2015, 36(6): 24-28 (in Chinese)
- 3 Lu X, Liu Z, Song Y, et al. Estimator-based multiobjective robust control strategy for an active pantograph in high-speed railways. *Journal of Rail and Rapid Transit*, 2018, 232(4): 1064-1077
- 4 Zhou N, Zhang W. Investigation on dynamic performance and parameter optimization design of pantograph and catenary system. *Finite Elements in Analysis and Design*, 2011, 47(3): 288-295
- 5 Eppinger SD, O'Connor DN, Seering WP, et al. Modeling and experimental evaluation of asymmetric pantograph dynamics. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 1988, 110(2): 168-174
- 6 Vo Van O, Massat JP, Balmes E. Waves, modes and properties with a major impact on dynamic pantograph-catenary interaction. *Journal of Sound and Vibration*, 2017, 402: 51-69
- 7 Sanchez-Rebollo C, Jimenez-Octavio JR, Carnicero A. Active control strategy on a catenary-pantograph validated model. *Vehicle System Dynamics*, 2013, 51(4): 554-569
- 8 Pisano A, Usai E. Output-feedback regulation of the contact-force in high-speed train pantographs. *Journal of Dynamic Systems Measurement and Control*, 2004, 126(1): 82-87
- 9 Zhao C, Zhou N, Zou H, et al. Comparison of dynamic characteristics of different pantograph models. 2016 35th Chinese Control Conference (CCC), Chengdu, China, 2016
- 10 Collina A, Bruni S. Numerical simulation of pantograph-overhead equipment interaction. *Vehicle System Dynamics*, 2002, 38(4): 261-291
- 11 Benet J, Cuartero N, Cuartero F, et al. An advanced 3D-model for the study and simulation of the pantograph catenary system. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2013, 36: 138-156
- 12 Zhou N, Zou H, Li R, et al. Dynamic behavior of different pantograph models in simulation of pantograph and catenary interaction. 2016 35th Chinese Control Conference (CCC), Chengdu, China, 2016
- 13 Zhou N, Zhang W, Li R. Dynamic performance of a pantograph-catenary system with the consideration of the appearance characteristics of contact surfaces. *Journal of Zhejiang University-Science A: Applied Physics & Engineering*, 2011, 12(12): 913-920

(责任编辑: 胡漫)