

doi:10.3969/j.issn.1672-6073.2016.06.008

刚性接触网的研究综述及展望

关金发 吴积钦 方 岩

(西南交通大学电气工程学院 四川 成都 610031)

摘 要 刚性接触网以其接触线无张力、零部件少、净空要求低、维修量小等特点,被广泛应用于地铁隧道内。通过调研国内外刚性接触网的结构形式,发现国内使用的刚性接触网结构较为单一,刚性接触网的系统性和完备性的标准体系有待进一步建立。刚性接触网在使用过程中出现多为与时间相关的故障,其动力仿真和测试得到的弓网动力性能数据尚需进一步确认其有效性。从结构、故障、标准、仿真和测试5个方面归纳和总结刚性接触网的研究现状,对刚性接触网的未来发展给出一些建议。

关键词 城市轨道交通;刚性接触网;结构;维修;标准;仿真;测试

中图分类号 U225 **文献标志码** A
文章编号 1672-6073(2016)06-0037-07

刚性接触网在隧道内相对柔性接触网具有一定优势,其接触线无张力,不用设置下锚装置,不会发生断线事故,具有零部件少,载流量大,安全可靠,维修工作量小等特点,被广泛地应用于地铁隧道内^[1]。自2002年广州地铁2号线刚性接触网试挂成功后,刚性接触网逐步替代柔性接触网,成为城市轨道交通隧道内架空接触网的主要形式。上海地铁6、8、9、10、11号线,广州地铁2、3号线,南京地铁1号线,成都地铁1、2号线,北京地铁14号线等工程均采用刚性接触网^[2]。在干线铁路中,石怀线电气化扩能工程、新建兰武二线乌鞘岭隧道等刚性接触网均得到良好的应用^[3]。

目前,刚性接触网的最高试验速度是在奥地利的维也纳至林茨城际铁路,其隧道内使用Furrer + Frey公司生产的AC 15 kV 刚性接触网,2014年11月17日在

DB公司的ICE-S测试列车上进行弓网接触力测试,试验过程的最高速度为302 km/h^[4]。

随着城市轨道交通的发展,电气化列车的运行速度的提高,随之产生的问题是速度更快的受电弓是否适应当前的刚性接触网结构。国内使用刚性接触网的最高运行速度为120 km/h,还有较大的提速空间,为研制160 km/h及以上的受电弓与刚性接触网系统,有必要对刚性接触网的研究现状进行归纳与总结,做好前期准备。笔者从结构、故障、标准、仿真和测试5个方面归纳和总结刚性接触网的研究现状,在此基础上,对刚性接触网的未来发展给出一些建议。

1 结构类型

虽然刚性接触网零部件类型比柔性接触网少,但结构类型比柔性接触网丰富,主要包括刚性汇流排结构、悬挂结构、定位结构、锚段关节结构、刚柔过渡结构、道岔上方接触网结构、中心锚结结构等。锚段关节存在两种形式,刚柔过渡也存在两种形式。刚性接触网的纵向结构包括锚段、锚段关节、刚柔过渡,见图1。锚段关节、刚柔过渡均是刚性接触网不可缺少的结构,如何选择与优化这两种结构是刚性接触网研究的重点之一。

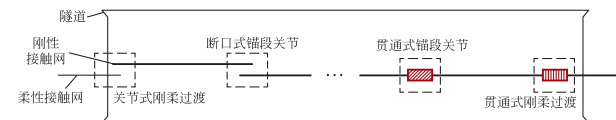


图1 刚性接触网纵向结构示意图

1.1 汇流排结构

国内均使用 π 型汇流排,汇流排长度一般为8~12 m,汇流排之间利用中间接头相接,若是断口式锚段关节有汇流排终端。

国外刚性接触网的结构形式较多,日本多使用T型汇流排,欧洲多使用 π 型汇流排,西班牙近年来使用Y型汇流排。

收稿日期:2016-06-24 修回日期:2016-08-17

作者简介:关金发,男,工学博士研究生,主要研究领域为铁路弓网动力行为,kwanjinfa@163.com

基金项目:中央高校科技创新项目(2682013CX018)

Mandai 等^[5]提出一种 T 型汇流排及其参数,见图 2。James^[6]提出一种利用侧面夹板与 T 型汇流排夹持接触线的刚性接触网结构,见图 3。

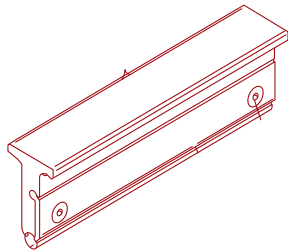
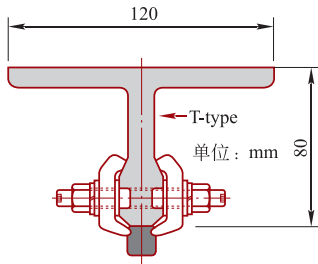


图2 日本夹片式 T 型汇流排 图3 单夹板式 T 型汇流排

高鸣^[7]的研究表明原有夹片式 T 型汇流排存在缺陷(见图 2),具体为:夹板与接触线、T 型汇流排之间存在间隙,随时间氧化腐蚀,接触电阻逐步增大,载流功能逐步降低,提出一种新型夹持式 T 型汇流排替代原有夹片式 T 型汇流排,见图 4。

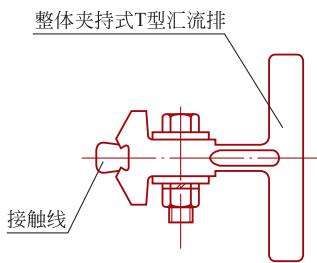


图4 单轨夹持式 T 型汇流排

Gunter^[8]、Furrer^[9]设计了 π 型汇流排结构,并给出了相关参数,见图 5、6。Oya 等^[10]为研究速度更高的刚性接触网,提出了一种 π 型汇流排替代原有 T 型汇流排,见图 7。TB/T3252^[11]是中国有关汇流排的标准,其中对 π 型汇流排及其参数有详细要求。

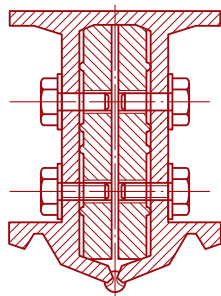
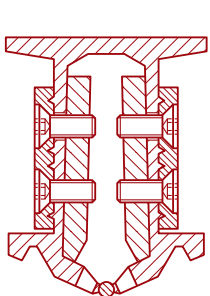


图5 西门子汇流排 图6 FF 公司汇流排

曼纽尔·梅莉斯·梅纳^[12],设计了一种运行速度超 110 km/h 的新型汇流排,Y 型截面,该汇流排的垂向截面惯性矩是 π 型汇流排的近两倍,其余参数与 π 型汇流排相当,其安装方式见图 8,该型号汇流排未来将在西班牙地铁中应用。

现有 π 型汇流排是否能适应更高的运行速度,T 型、Y 型汇流排与 π 型汇流排相比,是否有替代的可能

性值得进一步探讨。

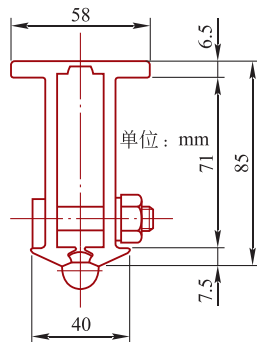


图7 日本 π 型汇流排

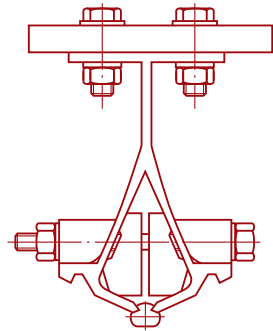


图8 Y 型汇流排

1.2 悬挂结构

汇流排的跨距一般为 6~10 m,每跨使用 2 个悬挂结构将汇流排垂向固定。城市轨道交通刚性接触网使用的悬挂结构多为门式结构,刚柔过渡区段也有使用腕臂式结构的,干线铁路则多为腕臂式结构。

Furrer + Frey^[13]设计的刚性接触网能适用于直流、交流供电,隧道内、外运行,且经电气、机械测试,实际的运行经验论证了刚性接触网在速度达 250 km/h 以下都能可靠运行,文献中介绍了刚性接触网的零部件组成及安装工艺,其刚性接触网悬挂结构,一般采用腕臂式,见图 9。卢光霖^[14]给出了中国使用较多的接触网悬挂结构,由定位线夹、绝缘子、悬吊槽钢、T 型头螺栓、悬吊安装底座等组成,外形类似于门形,见图 10。

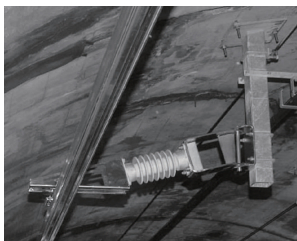


图9 FF 公司的腕臂式悬挂结构

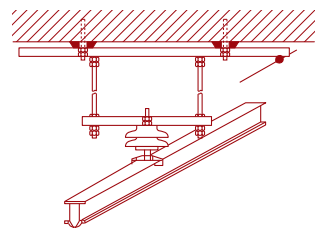


图10 门式悬挂结构

比较两种悬挂结构后得出,门式结构简单,安装便捷,净空要求可以较低,但其弹性不如腕臂式,对于设计更高速等级别的刚性接触网,需充分比较两种悬挂结构的强度与动力性能。

1.3 定位结构

定位结构是连接汇流排与悬挂结构的零部件,其结构形式有多种。

Fernandez^[15]给出了一种刚性接触网的腕臂式的定位线夹(见图 11),通过三块夹板将汇流排锁着,定

位线夹为汇流排提供垂向固定,汇流排仍具有顺线路伸缩的自由度。Siemens^[16]在刚性定位线夹内部增加弹簧片从而增加定位线夹弹性(见图12),但汇流排仅有垂直向上的弹性力,垂直向下被夹板挡住。Ohura^[17]提出了一种垂向上下拉压的弹簧式定位线夹(见图13)。陈吉刚^[18]在定位线夹处增加弹簧(见图14),定位结构中弹簧提供垂直向下的弹簧力,而垂直向上被绝缘子挡住。

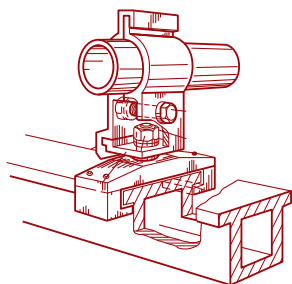


图11 刚性定位结构

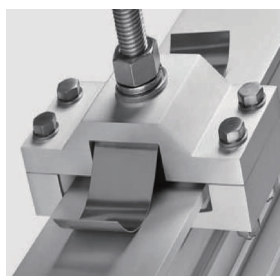


图12 弹簧片式定位结构

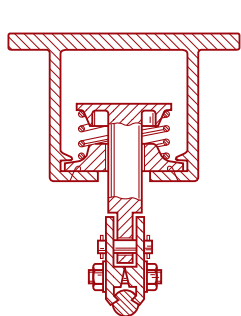


图13 垂向弹簧定位结构

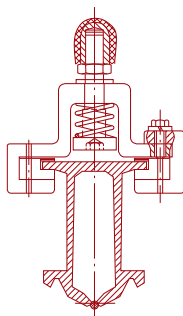


图14 单向弹簧定位结构

带弹簧的定位结构为刚性接触网提供一定的垂向缓冲余量,增加刚性接触网的柔性,对于设计更高等级速度的刚性接触网,定位结构的刚度值选取尤为重要。

1.4 锚段关节结构

锚段关节是两个锚段过渡的特殊区域,其结构对刚性接触网的动力性能影响较大。

Chover Alvarez - Monteserín^[19]对不同刚性接触网结构进行了动力响应仿真,其中包括锚段关节,刚柔过渡,锚段关节结构见图15。宋晔宏^[20]提出了一种接触线过渡的膨胀接头元件,见图16。

断口式锚段关节的两个锚段机械上是独立分开的,通过汇流排终端过渡。贯通式锚段关节的两个锚段在机械上是相连的,通过膨胀结构元件过渡。

黄德亮等^[21]详细介绍了中国架空刚性接触网的发展历程及在应用过程中的一些技术问题,文献中提

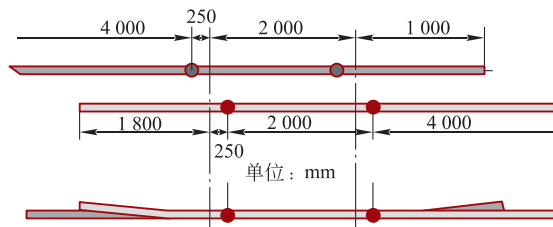


图15 断口式锚段关节结构

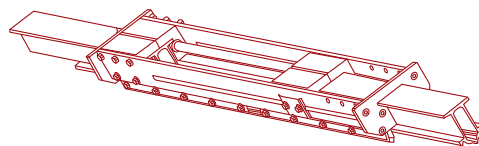


图16 贯通式锚段关节结构

及时速120 km的架空刚性接触网,讨论了贯通式和断口式锚段关节的技术特点。

1.5 刚柔过渡结构

刚柔过渡是连接柔性接触网和刚性接触网的特殊区域,一般通过刚柔过渡的运行速度均较低。

刚柔过渡结构存在两种方式。Furrer提出了一种贯通式刚柔过渡结构,柔性接触网的接触线直接通过切槽式汇流排嵌入到刚性接触网汇流排当中,见图17。白向峰^[22]研究了关节式刚柔过渡的施工技术,给出了如图18的工程实施图。其中,柔性接触网结构不变,刚性接触网利用切槽式汇流排与刚性接触网汇流排相连,两支接触悬挂通过锚段关节过渡。

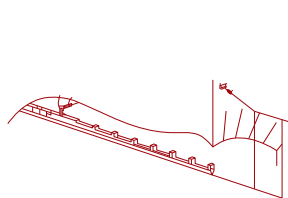


图17 贯通式刚柔过渡结构 图18 关节式刚柔过渡结构

T. Kobayashi^[23]通过研究原有锚段关节式刚柔过渡,发现存在两种结构形式,柔性接触网接触线在隧道内下锚、柔性接触网在隧道外下锚(见图19),两种方式均不能满足更高等级的弓网动力性能,需设计一种新型锚段关节式结构,在柔性接触网处增加刚性汇流排或采用贯通式刚柔过渡方案(见图20),通过跑车试验,论证了新结构的运行性能可达130 km/h。

为保证受电弓能顺利通过柔性接触网与刚性接触网而不降低运行速度,需设计满足更高等级速度的刚柔过渡结构,比较既有两种过渡方式,合理调整结构参数。

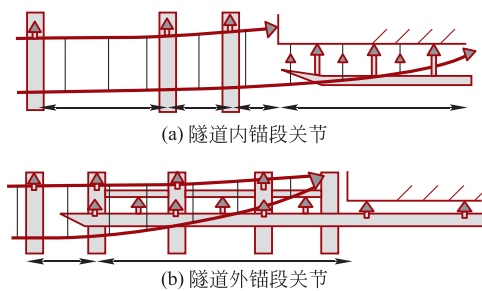


图19 锚段关节式刚柔过渡结构

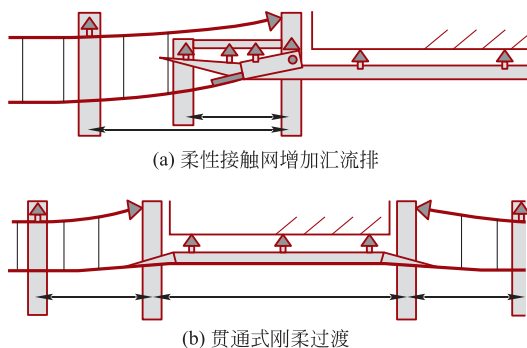


图20 改造后刚柔过渡结构

刚性接触网的结构种类较多,尚未见有关不同结构之间的系统性动力性能对比,对于如何确定刚性接触网的结构缺少有力的论证。

2 故障与维修

刚性悬挂在运营中出现了若干问题,包括:汇流排中间接头连接板螺纹滑牙、接触线脱槽、弓网燃弧、绝缘子松动、中间接头螺纹滑牙、接触线磨耗严重、T头螺栓偏转、受电弓集中磨耗^[24-26]等。

国内外学者研究减小接触线、滑板磨耗的文献较多。王浩^[27]通过调整平面布置,将一个正弦波的锚段布置变成半个正弦波,可减少弓网磨耗。杨啸勇^[28]针对刚性接触网部分区段弓网磨耗的严重问题,提出了利用弹性绝缘子改进弓网动力性能的措施,但论文并未就弹性刚度的取值作深入讨论。Mandai论证了刚性接触网接触线不均匀磨耗对弓网动力性能影响较大,且波浪形磨耗会加快磨耗速度,为减少接触线磨耗,提出一种接触线打磨装置,可以使得接触线的磨耗基本均匀,使弓网接触面平顺。庞波^[29]结合列车运行速度,提出在低速区减小最大拉出值,增大锚段正弦波布置周期,在高速区采用增大拉出值、减小锚段正弦波布置周期的方式解决了受电弓碳滑板磨耗不均匀的问题。

刚性接触网接触线磨耗是运维过程集中反映的问

题,其中在车间出站加速区域尤为明显,表现为如图21的波浪形状。

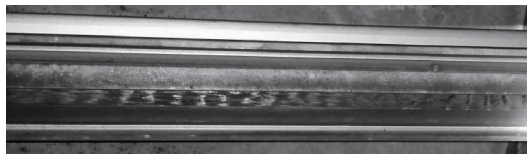


图21 刚性接触网接触线波浪形磨耗

刚性接触网的故障特点与柔性接触网有所区别,大多数故障表现为与时间相关,零部件的寿命下降,接触线的磨耗较严重,更换周期为3~5年。

3 标准规范

现有标准针对刚性接触网的条款较少,国内外标准中指标存在一定差别,以下对受电弓与刚性接触网及其相互作用的标准进行一些归纳与比较。

欧洲铁路技术规范中有关城轨弓网系统主要体现在DC1.5 kV的接触网规定中,如:EN50206-2^[30]是有关城轨受电弓的技术要求;EN50367^[31]和TSI2011/274/EU中对不同电压制式进行分类,并指出弓网系统动力性能指标应遵循的标准范围。但EN50119^[32]及其他相关欧标并未针对城市轨道交通架空接触网进行单独说明。UIC794^[33]、UIC799^[34]就直流弓网系统设计参数进行规定,前者的速度范围从0~250 km/h分4级,后者为160~250 km/h分3级。IEEE1629^[35]是有关城轨直流架空接触网的性能要求标准,比较全面地规定了受电弓、接触网的技术要求以及规定了受电弓的各项试验,包括:型式试验、常规试验、故障试验、现场试验、单项试验。

中国有关城市轨道交通刚性接触网标准主要依据GB/T 21561.2、GB 50157^[36]、GB/T 7928^[37]、GB/T 10411^[38]、GB 50490^[39],GB/T 21561.2与EN50206-2的内容一致。地铁车辆通用技术条件中对于弓网系统的要求仅有“受流器或受电弓应受流状态良好,受流时对受流器或供电设备均无损伤或异常磨耗,受电弓的接触压力为100~140 N”一条。地铁设计规范中指出“本规定是为了保证列车运行时,具有良好的弓网关系,以减少弓网的不均匀磨耗和烧蚀,避免接触导线断线”,说明弓网关系必须要引起重视。

比较以上标准发现:IEEE与欧标的动态接触力范围一致,当运行速度小于200 km/h时均为0~300 N,但UIC799为0~350 N。国内外有关静态接触力范围不一致,见表1。中国标准中的静态接触力并未给出标称

值,欧标中给出 90 N,但停车时变为 140 N,国际电工委员会针对不同的滑板宽度,静态接触力有所不同;中国城轨接触网的设计坡度比国外的接触网小,见表 2。

表 1 标准中要求的受电弓静态抬升力 N

标准	下限值	标称值	上限值	备注
EN50119	70	90	110	DC1.5 kV 弓网系统在停车时为 140 N
IEEE1629	62	93.4	125	滑板宽 60 mm
	62	80	125	滑板宽 45 mm
GB/T 7928	100	—	140	仅给出取值范围

表 2 标准中要求的接触网设计坡度

标准	最大运行速度/km $\cdot$ h $^{-1}$	坡度/‰
IEEE1629	48	20
EN50119	60	20
GB/T 10411	60	10

既有刚性接触网设计规范尚未统一,标准体系尚未成熟,仍需进一步加大刚性接触网的标准化研究。可参考欧洲高速铁路弓网标准体系,形成系统性和完备性的受电弓与刚性接触网技术系列标准规范,为刚性接触网的设计、施工和运维提供有力支撑。

4 动力学仿真

对受电弓与刚性接触网动力学性能的研究主要集中在弓网建模、对既有弓网结构的动力响应分析、最大运行速度分析等方面,针对弓网结构优化较少。

Mak^[40]从刚性接触网的可维修性、可靠性和可用性,以及投资成本等方面说明刚性接触网的优势。通过仿真论证了受电弓与刚性接触网的运行速度能达到 130 km/h。Takemura^[41]首先分析了 T 型刚性接触网的特性,包括刚性接触网的结构、导高、固有频率、不平顺,然后分析不同速度级别下受电弓通过不同跨距的刚性接触网弓网离线率,结果表明:选择跨距为 5 m、速度为 90 km/h 时弓网出现离线现象,建议使用 7 m 跨距,速度在 80 ~ 160 km/h 内无离线现象。江洪泽^[42]建立了刚性接触网不离线受流约束模型,但该模型应用的前提是弓网离线率低,运行速度在 80 km/h 以下。原华等^[43]分析了中间接头及锚段关节的弓网动力响应。王世轩^[44]利用模态叠加法建立了刚性接触网的动力模型,研究锚段关节、刚柔过渡对弓网动力性能影响,得出受电弓速度在 120 km/h 以下时,使用 2 质点系模型就能满足计算需求。梅桂明^[45]利用假设模态法建立刚性接触网梁等效模型,受电弓采用质点系模型,研究了弓网系统单因素变化的弓网动力响应,得出了刚柔过渡

结构需要进一步优化,设计速度应低于 160 km/h,坡度不宜超过 0.2%,不平顺波长不宜小于 3 m 等结论。较多学者建立了弓网有限元模型,研究悬挂结构质量、运行速度、跨距、汇流排坡度、弓网接触刚度、受电弓弓头质量等单因素变化的弓网动力响应。Vera 等^[46]建立了受电弓与刚性接触网动态仿真模型,受电弓利用 SIMPACK 建立刚体模型,刚性接触网利用有限元软件建立柔性体模型,通过改变仿真参数,优化弓网动力性能,设计出 Y 型截面刚性悬挂,并最终通过现场试验确认仿真模型,该新型悬挂的线路速度超过 140 km/h。关金发等^[47]建立了如图 22 的受电弓与刚性接触网动力学模型。

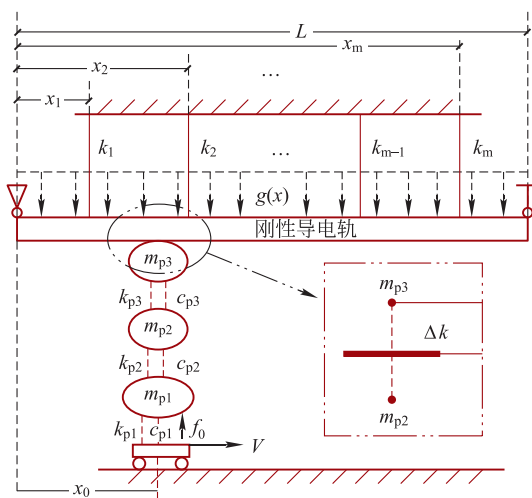


图 22 受电弓与刚性接触网耦合动力学模型

受电弓与刚性接触网的动力学仿真确认是仿真应用的前提条件,有必要进一步通过欧标 EN50318 的确认方法,确认仿真结果是可信的。

5 线路测试

现场线路测试是掌握刚性接触网状态的重要途径。孙睿^[48]针对广州地铁 3 号线速度为 120 km/h 的区间进行了受电弓与刚性接触网的动力性能测试,测试项目包括弓网接触力、弓头框架的振动、滑板的温升等情况,测试结果见图 23。钱世勇等^[49]针对成都地铁 1 号线速度为 90 km/h 的区间进行了受电弓与刚性接触网的动力性能测试,测试的项目有滑板的高度、弓网接触力、弓头加速度、弓网燃弧,得出:弓头剧烈振动导致弓网接触力动态范围变大,引起受电弓部件及支持绝缘子疲劳,加剧刚性接触网的波形磨耗,导致接触线寿命缩短。李梦和^[50]提出刚性接触网动态检测的参数及参数的测量原理,但并未给出测试结果。Huang^[51]提出一套测试受电弓与刚性接触网动力性能的装置,主要指标是弓网

离线率,可以适用于速度达 130 km/h 的弓网系统。

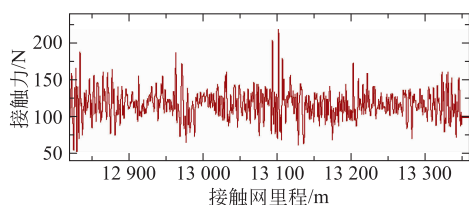


图 23 广州地铁 3 号线某区段接触力测试结果

刚性接触网动力性能试验结果同样也是需要经过确认的,应符合 EN50317 的规范要求。

6 结论

刚性接触网在结构应用、运维经验、标准建设、动力仿真和动力测试等方面已有一定的研究,但尚未形成系统的理论和体系,各方面都有待进一步完善,因此,未来刚性接触网研究重点解决以下问题。

1) 既有刚性接触网使用的结构较为单一,为满足不同线路条件和运行速度的要求,刚性接触网应具有不同的结构。针对速度等级更高的刚性接触网,宜充分论证既有结构的适用性,重点关注锚段关节和刚柔过渡区域,若不满足弓网动力性能要求,需调整既有结构或研制新型结构。

2) 结合弓网动力仿真和测量手段,调整刚性接触网的结构,解决刚性接触网的磨损严重等问题,提高零部件的使用寿命。建立故障预测与健康管理系统,将设计、施工、验收资料归档到维修系统当中,根据归档资料及日常维修过程,评估弓网设备状态,为弓网维修提供决策支持。

3) 刚性接触网标准化体系的建立。参照国铁、欧洲、国际电工委员会的相关标准,对于城轨接触网设计、施工、验收、维修全寿命周期各阶段提出相应的标准规范。重点研究受电弓与接触网的接口要求,从电气和机械两方面规范弓网接口,电气性能要求分为载流量与绝缘性能,机械性能要求分为静态几何和动态相互作用。

4) 完善受电弓与刚性接触网的动力仿真与测试系统,结合 EN50317 和 EN50318 进一步确认仿真结果与测试结果的可信性,为刚性接触网的设计与维修提供有力工具。

参考文献

[1] 于新泉. 接触网刚性悬挂施工工艺[J]. 铁路工程造价管理, 2008, 23(3): 27-31.

[2] 谭冬华. 架空刚性接触悬挂的特点及其维修[J]. 电气化铁道, 2003(3): 36-38.

[3] 傅俊武. 刚性与柔性接触网若干功能差异及标准的探讨[J]. 电气化铁道, 2007(6): 41-42.

[4] RAILWAY GAZETTE. Rigid catenary speed record [EB/OL]. [2014-11-29] (2016-06-20). <http://www.railwaygazette.com/news/infrastructure/single-view/view/rigid-catenary-speed-record.html>.

[5] MANDAI T, HARADA S, SHIMIZU M. Improvement of rigid conductor lines[J]. Quarterly report of RTRI, 2003, 44(2): 78-81.

[6] JAMES L. Rigid T-Rail conductor system; US, 2013072642 [P]. 2014-06-05.

[7] 高鸣. 单轨跨座整体夹持式 T 形汇流排的研究设计[J]. 电气化铁道, 2012, 23(1): 38-40.

[8] GUNTER H. Current bar; EP, 2255991B1 [P]. 2014-03-19.

[9] FURRER B. Process and apparatus for coupling elastic and rigid contact line systems; EURO: EP0828629A1 [P]. 1999-09-28 Google Patents, 1999.

[10] OYA A, SHIMIZU M, MANDAI T. Application of overhead rigid conductor line to mountain tunnel of conventional lines [C]. Industrial Technology, 2005. ICIT 2005. IEEE International Conference on, City University of Hong Kong, Hong Kong China, 2005: 170-174.

[11] 电气化铁路接触网汇流排; TB/T 3552 [S]. 北京: 中国铁道出版社, 2010.

[12] 曼纽尔. 梅莉斯. 梅纳. 用于刚性接触网的分段绝缘器: 200680042287.8 [P]. 2011-08-17.

[13] Overhead conductor rail system [EB/OL]. [2015-5-13] (2016-06-20). http://www.furrerfrey.ch/en/systems/conductor_rail.html.

[14] 卢光霖. 架空刚性悬挂接触网的悬吊装置: 2683442Y [P]. 2005-03-09.

[15] FERNANDEZ G. Clamp for suspending a section of a rigid catenary; EP, 2607148A2 [P]. 2013-06-26.

[16] Overhead conductor rail system sicut SR [EB/OL]. [2015-6-11] (2016-6-20). <http://w3.siemens.com/smart-grid/global/en/products-systems-solutions/rail-electrification/contact-lines/conductor-rails-overhead-conductor-rail/pages/overhead-conductor-rail.aspx>.

[17] OHURA Y. Means of stringing trolley wires; US, 4230209 [P]. 1980-10-28.

[18] 陈吉刚. 利用弹性线夹优化刚性接触网的动态性能[J]. 城市轨道交通研究, 2014, 17(8): 73-77.

[19] CHOVER J A, SUÁREZ ESTEBAN B, RODRÍGUEZ P.

- Simulation techniques for design of overhead conductor rail lines for speeds over 140 km/h[J]. Manchester metropolitan university, 2011.
- [20] 宋晔宏. 一种刚性接触网膨胀接头: 101746281A[P]. 2010-01-30.
- [21] 黄德亮, 赵勤, 李金华. 城市轨道交通架空刚性悬挂技术的应用与改进[J]. 电气化铁道, 2010(3): 28-30.
- [22] 白向峰. 接触网关节式刚柔过渡施工技术研究[J]. 中国新技术新产品, 2016(2): 89-90.
- [23] KOBAYASHI T. Transition structures between rigid conductor Line and catenary overhead contact line[C]//world congress on railway research, Seoul, Korea, Printed by UIC, 2008: 27-34.
- [24] 胡舜. 刚性接触网在运营中出现的问题及处理方法[J]. 都市轨道交通, 2013, 26(3): 127-129.
- [25] 骆志勇. 刚性接触网在运营中出现的问题及解决方案[J]. 都市轨道交通, 2006, 19(4): 84-86.
- [26] 江美. 浅析刚性接触网常见故障及防范措施[J]. 中国高新技术企业, 2013(3): 72-74.
- [27] 王浩. 地铁架空刚性接触网“半波”布置研究[J]. 科技创新与应用, 2013(1): 34-34.
- [28] 杨啸勇. 架空刚性悬挂弹性改进方案研究[J]. 电气化铁道, 2009(4): 34-35.
- [29] 庞波. 刚性接触网布置方式与受电弓磨耗分析[J]. 电气化铁道, 2009(3): 23-26.
- [30] Railway application-rolling stock-Pantograph: Characteristics and tests Part 2: pantographs for metros and light rail vehicles; EN 50206-2[S]. European Committee for Electrotechnical standardization. Cenelec Print, 2010: 5-23.
- [31] Railway applications-current collection systems-technical criteria for the interaction between pantograph and overhead line (to achieve free access); EN 50367-2006[S]. European Committee for Electrotechnical standardization. Cenelec Print, 2006: 5-32.
- [32] Railway applications-Fixed installations-Electric traction overhead contact lines; EN 50119[S]. European Committee for Electrotechnical standardization. Cenelec Print, 2009: 6-16.
- [33] Pantograph/ overhead line interaction for DC - electrified railway lines; UIC 794 - 10R[S]. Printed by the international union of railways, 2001: 1-12.
- [34] Characteristics of direct-current overhead contact systems for lines worked at speeds of over 160 km/h and up to 250 km/h; UIC 799 - 10R[S]. Printed by the international union of railways, 2000: 1-20.
- [35] IEEE Standard for performance of DC overhead current collectors for rail transit vehicles; IEEE 1629[S]. Printed by the institute of electrical and electronics engineers, 2013: 1-43.
- [36] 地铁设计规范: GB 50157—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014: 140-154.
- [37] 地铁车辆通用技术条件: GB/T 7928[S]. 北京: 中国标准出版社, 2003: 1-31.
- [38] 城市轨道交通直流牵引供电系统: GB/T 10411[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005: 1-9.
- [39] 城市轨道交通技术规范: GB 50490[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009: 1-26.
- [40] MAK M K. Adoption of overhead rigid conductor rail system in MTR Extensions[J]. Journal of international council on electrical engineering, 2012, 2(4): 463-466.
- [41] TAKEMURA T, FUJII Y, SHIMIZU M. Characteristics of overhead rigid conductor line having T - type cross section[C]. Developments in Mass Transit Systems, 1998. International Conference on (Conf. Publ. No. 453), Printed by IET. London, UK, 1998: 173-177.
- [42] 江洪泽. 城市轨道交通刚性接触网弓网受流理论探析[J]. 都市轨道交通, 2010, 23(4): 54-58.
- [43] 原华, 张庆贺, 毕继红. 刚性接触网特殊部位处受流质量的分析[J]. 低温建筑技术, 2008, 30(2): 58-60.
- [44] 王世轩. 城市轨道交通弓网建模方法适用性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2014.
- [45] 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, 2010.
- [46] VERA C, PAULIN J, SUÁREZ ESTEBAN B. Improved design of an overhead rail current conductor for application in underground lines[J]. Structures & Earthworks, London, U. K., 29-30 June, 2005.
- [47] 关金发, 吴积钦. 受电弓与刚性接触网动力耦合方程的数值解[J]. 铁道科学与工程学报, 2016, 13(2): 362-368.
- [48] 孙睿. 刚性接触网环境下的弓网性能试验[J]. 城市轨道交通研究, 2011, 14(4): 64-68.
- [49] 钱世勇, 陈珍宝, 陈明国. 地铁弓网动态试验研究及分析[J]. 科协论坛, 2012(5): 26-27.
- [50] 李梦和. 刚性接触网参数检测与评价系统研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2005.
- [51] HUANG H - H, CHEN T - H. Development of method for assessing the current collection performance of the overhead conductor rail systems used in electric railways[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2008, 222(2): 159-168.

(编辑: 郝京红)

(下转第 59 页)