DOI: 10.3901/JME.2020.20.185

准高速条件下三轨受流器靴轨动态接触分析

向梟笛 罗湘萍 官政 田师峤

(同济大学铁道与城市轨道交通研究院 上海 200092)

摘要: 基于 Ls-Dyna 有限元仿真平台建立准高速(160 km/h)运行条件下受流器通过第三轨端部弯头及轨缝错牙区域的有限元模型, 分析不同运行速度、不同结构参数对受流器靴轨冲击振动响应的影响规律。研究表明, 增大受流器系统阻尼是改善碰撞冲击响应的最佳手段。为进一步探究系统阻尼对准高速运行条件下常态振动工况的影响规律, 基于 MATLAB/Simulink 平台建立受流器多体动力学模型, 计算结果表明, 合理增加受流器系统阻尼, 可有效提高准高速运行条件下受流器滑靴与第三轨的匹配性能。根据上述研究结果提出一种第三轨受流器的适应改进方案, 使其能够满足 160 km/h 高速运行要求。

关键词: 受流器; 第三轨弯头; 轨缝; 冲击碰撞; 常态振动; 垂向振动特性; 高速改进方案

中图分类号: U270

Dynamic Contact Analysis of Current Collector Shoe and Third Rail under Quasi High Speed Condition

XIANG Xiaodi LUO Xiangping GONG Zheng TIAN Shiqiao

(Institute of Rail Transit, Tongji University, Shanghai 200092)

Abstract: Based on LS-DYNA software, the finite element model of third rail current collector passing through third rail ends and rail joint gap under the quasi high speed (160 km/h) is completed, the influences of different speed and structural parameters on the impact vibration response of the collector shoe and third rail are analyzed. The result shows that increasing the damping of the current collector system is the best way to improve the impact response. In order to further explore how the current collector damping influence the normal vibration condition under quasi high speed, a multi-body dynamic model of current collector is established based on MATLAB/Simulink platform. The calculation results shows: by increasing the damping of the current collector system reasonably, the matching performance between collector and third rail can be effectively improved. According to the above research results, an adaptive improvement scheme of the third rail current collector is proposed to meet the requirements of high-speed condition.

Key words: current collector; third rail ends; rail joint gap; collision impact; normal vibration; vertical vibration characteristics; high speed structural improvements

0 前言

目前三轨受流系统主要用于 80 km/h 及以下速度等级的城轨交通中, 随着人们对其运行速度要求的提高, 现有速度等级的三轨受流系统愈发难以满足快节奏都市生活的需要, 而受流器系统动态受流质量作为制约城轨车辆提速的瓶颈之一, 主要由受流靴和第三轨之间的靴轨接触状态决定, 当列车运

行速度不高时, 靴轨接触问题尚处在可控范围内。随着列车运行速度的提高, 两者间的碰撞冲击力、碰撞次数和振动幅度明显增大, 这会带来受流器与第三轨脱离、集电靴磨损、集电靴电弧损伤等一系列严重问题, 增大列车运行维护成本, 甚至危及行车安全。这也是现使用受流器的列车运行速度多不超过 80 km/h 的主要原因。

现有的三轨受流系统中运用最广泛的是供电轨受流轨面朝下的下接触式受流器, 该型式的受流器滑靴从下方压向第三轨轨面从而拾取电流, 且防护罩从上部通过橡胶垫直接固定在接触轨周围, 能够

全面保护第三轨,保障人员安全,同时能够抵挡雨雪等天气的影响。因此本文的研究对象选取为下接触式受流器。

采用合理有效手段研究、解决第三轨—受流器系统在高速条件下的靴轨接触问题对突破三轨受流列车提速瓶颈具有重要意义。

国内外专家学者在第三轨受流技术方面有有不少研究。VERA 等^[1]基于 ANSYS 和 SIMPACK 平台,对三轨受流系统进行动力学分析,设计了一种动力学性能较好的导电轨形状,并进行了测试试验。STEWART 等^[2]采用试验的方法测得了英国某地铁在不超过 120 km/h 运行时,在转向架振动激励下的第三轨—受流器接触力变化情况,其中运行线路条件既包含水平第三轨区段,又包含第三轨弯头斜面区段。WESTON 等^[3]基于环形接触轨试验台对靴轨接触力、扭簧扭矩等数据进行了分析,研究了受电靴振动的主要影响因素。王文娇^[4]基于 Simulink 平台搭建受流器与第三轨弯头的碰撞仿真模型,分析了影响受流器与弯头碰撞特性的主要因素。郎鹏^[5]基于 ADAMS 平台计算了不同工况、不同参数条件下受流器对第三轨弯头的冲击动力学响应并对第三轨弯头的几何形状进行了优化设计。滕腾等^[6-7]基于 ANSYS 平台和 ADAMS 平台,搭建了第三轨—受流器的耦合动力学模型,探究了不同参数对车辆受流质量的影响,并优选合理参数以改善受流质量。黄洪斌^[8]采用有限元及边界元手段分析了受流器在第三轨水平区段运行时的振动特性。杨晓艳^[9]基于 M-B 分形接触理论,建立了第三轨—受流器接合面法向接触刚度分形解析模型,设置不同表面粗糙度进行仿真计算,分析振动响应随之变化规律。董霖等^[10]模拟第三轨—受流器系统的实际工况,对法向载荷对第三轨与受电靴之间载流摩擦磨损特性的影响进行试验验证,试验发现存在最佳法向压力,且该最佳法向压力的变化与速度的增加成正相关。

上述研究虽然对城轨车辆三轨受流器动力学特征及受流靴与第三轨接触产生的问题都有了一定深度的研究与讨论,但也存在明显的不足之处:首先,运行工况速度普遍较低,所有研究的运行工况速度均不超过 120 km/h,主要集中在 80 km/h 及以下,已有成果无法满足轨道交通行业发展的趋势;其次,目前对受流器动态接触特性的研究多集中于通过第三轨弯头或常态振动某一单一工况,鲜有将受流器系统在常态振动工况和冲击工况下的响应结合考量,因此得出的优化结论并不全面;再次,现有研究的分析手段主要以刚体动力学仿真为主,这些方

法在分析碰撞问题时,精确度和可信度有限而现场试验受产品条件和运行速度条件等限制未能够对高速工况进行研究。

本文基于现有研究,汲取宝贵经验,以下接触式受流系统为例,进一步研究第三轨—受流器系统在准高速条件下的冲击及常态振动工况的工作特性。通过分析不同结构参数对上述两种工况下受流器靴轨接触状态的影响规律,结合实际工程运用寻找合适优化方向,最后提出一种准高速条件下第三轨受流器的适应改进方案,使其能够满足 160 km/h 高速运行要求。

1 第三轨受流器瞬态动力学分析模型

为使研究过程具有普适性,根据实际情况选取冲击、常态振动两种典型工况对第三轨受流器的动态接触特性进行分析。首先基于瞬态动力学理论,采用 Ls-Dyna 软件建立受流器通过第三轨弯头及第三轨轨缝区域时的有限元模型,分析冲击工况下的瞬态响应。

1.1 受流器有限元模型的建立

本文研究的下接触式受流器在高速通过第三轨弯头及轨缝时,同时还受到来自第三轨的垂向激励和来自转向架构架的垂向及横向激励。考虑到受流器滑靴在与第三轨弯头及轨缝发生碰撞时,第三轨轨面不平顺和转向架构架垂向、横向位移引起滑靴产生的接触力波动相较于巨大的碰撞冲击力很小,故在模型建立过程中,忽略第三轨轨道不平顺和转向架构架横向、垂向位移。另一方面,由于受流器底座固结于转向架构架,底座连同构架的总质量远大于摆臂和滑靴,故在分析摆臂和滑靴动力学行为时可将其视为质量无穷大的驱动体^[11]。并将受流器芯座处的扭转弹簧和橡胶扭轴等弹性元件视为无质量的阻尼和刚度元件,由此将第三轨—受流器系统简化为二自由度的数学模型,如图 1 所示。

图 1 受流器简化模型

1. 转向架构架 2. 安装座 3. 扭力弹簧、橡胶轴承
4. 摆臂 5. 第三轨 6. 滑靴

受流器的主要结构参数见表 1。

表 1 受流器主要结构参数

结构参数	参数值
扭转弹簧刚度 $k_1/(\text{N} \cdot \text{m}/\text{rad})$	18.96
扭转阻尼 $c_1/(\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}/\text{rad})$	0.59
摆臂质量 m_1/kg	7.243
受流器绕方轴转动惯量 $J/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	0.182 6
摆臂重心距方轴轴线距离 d/m	0.083
滑靴质量 m_2/kg	1.407
滑靴中心距方轴轴线距离 l/m	0.292
滑靴弹性模量 E/GPa	92
靴轨接触刚度 $k_c/(\text{N}/\text{m})$	1.3×10^6
靴轨接触力初始值 F_0/N	120

注: 表中*引用文献[12]中数据

基于上述受流器简化模型及主要结构参数, 在保证转臂质量、转动惯量、重心与实际相同的前提下, 将芯座、摆杆等转动组件简化为一个可绕固定轴旋转的摆臂。同时为便于建模, 在模型中添加一个质量极小、刚度极大的扭杆装置, 扭杆同受流器摆臂固结在一起, 共同绕固定轴旋转。受流器摆臂相对固定轴只有一个旋转自由度, 旋转时扭杆装置通过力臂将线性弹簧和线性阻尼等效为同等大小的扭转弹簧和扭转阻尼。线性弹簧、线性阻尼安装台的所有节点均约束除垂向位移外的其余五个自由度。

滑靴作为直接与第三轨轨面碰撞的部件, 采用六面体单元进行网格划分建模, 提高网格质量, 以保证模型在计算过程中的收敛性, 受流器其余部件均采用四面体建模。

建立受流器有限元模型如图 2 所示。

图 2 受流器有限元模型

1. 直线弹簧、阻尼 2. 扭杆 3. 固定轴 4. 摆臂 5. 滑靴

1.2 第三轨端部弯头及轨缝有限元模型建立

根据《CJ414T—2012 城市轨道交通钢铝复合导电轨技术要求》^[13]中的规定, 选取高速弯头建立第三轨弯头有限元模型如图 3a 所示。每间隔 5 m 设置一组由弹簧阻尼构成的第三轨悬挂装置, 刚度设置为 12 000 kN/m, 阻尼设置为 24 kN·s/m。弹簧阻尼单元一端与第三轨上表面节点相连, 另一端约束节点全部自由度。轨缝处选取标准中所允许的最恶劣情况: 接缝间隙 2 mm, 接触面高度差

0.2 mm, 创建第三轨轨缝错牙的有限元模型如图 3b 所示, 并根据实际车辆运行方向分为前低后高和前高后低两种情况, 图 3b 所示运行方向即为前高后低工况。

图 3 第三轨有限元模型

1.3 受流器碰撞响应评价指标

为能更直观地描述受流器经过第三轨弯头及轨缝区域的碰撞特性, 提出以下几个评价指标, 示意图如图 4 所示。

(1) 最大碰撞力 F_m : 受流器滑靴与第三轨轨面若干次碰撞中产生的最大接触力。

(2) 靴轨碰撞次数 N_c : 受流器滑靴与第三轨轨面碰撞的次数。

(3) 离线时间(受流器振动收敛时间) T_0 : 从受流器滑靴与第三轨发生第一次碰撞(出现非零接触力)开始, 至滑靴不再与第三轨脱离(接触力不再为零)为止, 由于在此过程中受流器滑靴与第三轨轨面持续不断发生碰撞, 无法稳定受流, 故将此时受流器视为离线状态, 此过程持续时间为离线时间(受流器振动收敛时间), 在此离线时间内行驶距离称为离线距离 S_0 。

图 4 受流器碰撞响应评价指标统计示意图

1.4 第三轨受流器在不同速度下的瞬态动力学仿真结果

通过计算得到车辆以 40 km/h、80 km/h、120 km/h、160 km/h 的速度通过断电区第三轨弯头及轨缝时, 受流器垂向位移随距离变化曲线如图 5、图 7、图 9 所示。靴轨垂向碰撞力随距离变化曲线如图 6、图 8、图 10 所示(80 km/h)。

图5 不同速度通过第三轨弯头时滑靴垂向振动位移

图6 通过第三轨弯头时靴轨垂向接触力(80 km/h)

图7 不同速度通过前低后高轨缝时滑靴垂向振动位移

图8 通过前低后高轨缝时靴轨垂向接触力(80 km/h)

由图5和图6可知,受流器滑靴与第三轨弯头发生碰撞的过程如下:滑靴首先与弯头“斜坡”区域发生第一次碰撞并被向下弹开,随后在扭转弹簧的作用下向第三轨轨面回弹,在经过不断弹开-回弹的反复过程后与第三轨弯头“斜坡”区域贴合,直

至到达弯头转折处,在这个位置滑靴与第三轨弯头再次脱离,并且同样在扭转弹簧的作用下向第三轨轨面回弹发生第二阶段的碰撞,过程仍为反复的弹开-回弹,经多次碰撞后最终与第三轨轨面贴合,滑靴回到正常工作高度,受流器开始正常取流工作。考虑到该工况下受流器的振动收敛过程分为碰撞-振动收敛-再碰撞-振动再收敛两个阶段,将这两个阶段结合在一起考量,将两阶段靴轨碰撞次数相加、两阶段离线时间也相加。

从图7和图8可知,受流器在通过前低后高轨缝时,受流器滑靴并未与第三轨发生纵向碰撞,仅仅是与轨面发生短暂脱离,随后在扭转弹簧的作用下向轨面回弹,经过多次弹开-回弹的反复过程后最终与第三轨轨面贴合。与过三轨弯头相比,该工况只存在一个碰撞收敛的阶段,碰撞响应较为平和。

从图9和图10可知,受流器在通过前高后低轨缝时,轨缝错牙在垂向高度上发生突变,导致滑靴与第三轨在纵向上发生剧烈的碰撞,产生巨大的冲击力,相比于在垂向高度上变化缓慢的弯头“斜坡”和未发生纵向碰撞的前低后高轨缝,该工况下摆臂向下弹开的摆动角度更大,回弹时与轨面的冲击力也更大,由此导致受流器滑靴实现最终与第三轨轨面贴合所需的碰撞次数、离线时间都随之增大。故前高后低轨缝的碰撞情况相较于前低后高轨缝和第三轨弯头更加恶劣。

图9 不同速度通过前高后低轨缝时滑靴垂向振动位移

图10 通过前高后低轨缝时靴轨垂向接触力(80 km/h)

将计算结果按照评价指标汇总入表 2。

表 2 受流器不同速度通过各冲击工况计算结果

运行速度 (km/h)	第三轨弯头			前低后高轨缝			前高后低轨缝		
	最大碰撞力/N	靴轨碰撞次数/次	离线时间/ms	最大碰撞力/N	靴轨碰撞次数/次	离线时间/ms	最大碰撞力/N	靴轨碰撞次数/次	离线时间/ms
40	583	4	25	873	3	13	2 706	5	36
80	1 393	5	38	929	3	12	4 187	6	51
120	2 189	6	44	970	4	13	5 433	8	58
160	2 564	7	56	995	4	13	6 441	9	60

从表 2 中可得以下分析结果。

(1) 随着运行速度的提高，受流器进入第三轨弯头过程中，滑靴与第三轨轨面产生的最大碰撞力从 583 N 提高到 2 564 N，滑靴与轨面的碰撞次数从 4 次增加到 7 次，离线时间从 0.025 s 增大到 0.056 s。

(2) 受流器通过第三轨前低后高轨缝时，最大碰撞力从 873 N 提高到 995 N，碰撞次数从 3 次增加为 4 次，离线时间 0.013 s 基本保持不变。

(2) 受流器通过第三轨前高后低轨缝时，最大碰撞力从 2 706 N 提高到 6 441 N，碰撞次数从 5 次增加为 9 次，离线时间从 0.036 s 增大到 0.060 s。

(4) 随着运行速度的提高，冲击工况下靴轨间最大碰撞力、靴轨碰撞次数、离线时间都呈明显上升趋势。

2 第三轨受流器模型在通过第三轨弯头及轨缝过程的关键参数优化

通过上述仿真计算可以看出，冲击工况本质都为受流器滑靴受到碰撞冲击后的振动收敛过程。为降低碰撞冲击力，缩短离线时间，需对受流系统进行参数优化。本章节选取受流器滑靴碰撞振动最剧烈、离线时间最长的前高后低轨缝工况进行计算分析。

目前，改变受流器滑靴质量和弹性模量在工程上不易实现，缺乏研究的必要性，故本文选取受流器扭转弹簧刚度、受流器系统阻尼作为变量，研究上述参数改变对 160 km/h 运行速度下受流器碰撞响应的影响规律，参数选取及变化范围见表 3。

表 3 关键参数变化范围表

关键参数	变化范围			
扭转弹簧刚度 $k/(\text{N} \cdot \text{m}/\text{rad})$	9.48	18.96 [*]	37.92	75.85
扭转阻尼系数 $c/(\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}/\text{rad})$	0.59 [*]	10.59	20.59	40.59

注：表中*为系统原始数据

2.1 受流器扭转弹簧刚度改变

通过仿真计算得到不同扭转弹簧刚度下受流器通过第三轨前高后低轨缝区域时靴轨受流系统的关键性能指标，见表 4。

表 4 扭转刚度改变关键性能指标变化表

扭转弹簧刚度 ($\text{N} \cdot \text{m}/\text{rad}$)	最大碰撞力/N	靴轨碰撞次数/ 次	离线时间/ms
9.48	6 442	9	0.061
18.96	6 441	9	0.060
37.92	6 441	9	0.059
75.85	6 439	9	0.058

从表 4 中可以看出，随着受流器扭转弹簧刚度的增加，靴轨间最大碰撞力及靴轨碰撞次数几乎无变化；离线时间减少的幅度也十分微小。原因如下：扭转弹簧刚度仅对系统的固有频率有影响，无法起到吸收碰撞振动能量的作用。因此，改变扭转弹簧的刚度，不会影响碰撞过程。

2.2 受流器系统阻尼改变

由于受流器扭转阻尼对碰撞能量的吸收、振动速度的衰减起到重要作用，故增大受流器扭转阻尼，可改善碰撞过程中各性能指标。通过仿真计算得到不同阻尼下受流器通过第三轨前高后低轨缝区域时靴轨受流系统的关键性能指标，如图 11 所示。仿真工况均为 160 km/h。

图 11 不同阻尼下靴轨受流系统通过前高后低轨缝性能

从图 11 中可以看出,随着受流器系统阻尼的增加,靴轨间最大碰撞力无明显变化,而靴轨碰撞次数从 9 次降低到 2 次,离线时间从 0.060 s 降低到 0.027 s,均有大幅度减少,尤其是靴轨间的碰撞次数,在扭转阻尼系数设置为 $40.59 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{s/rad}$ 时已降低到 2 次。这是由于阻尼的增大,对受流器垂向振动的动能起到了很好的吸收效果,从而降低了振动幅度并加速了振动衰减。故在其他参数不变的条件下,增大受流器系统阻尼是改善受流器受到碰撞冲击后振动响应的有效途径。

2.3 小结

本节以受流器通过第三轨前高后低轨缝这一工况作为研究对象,研究不同关键参数的改变对 160 km/h 运行速度下受流器碰撞响应的影响规律。通过仿真可知,增加受流器扭转弹簧刚度,对于改善受流器碰撞冲击响应无明显作用;而增大受流器系统阻尼,可大幅减低靴轨碰撞次数及离线时间。

影响受流器滑靴使用寿命的主要因素为受流器滑靴脱离第三轨轨面并与之发生碰撞的次数^[14]。对某一特定滑靴而言,其能承受的拉弧或冲击次数是有限的。因此可以通过增加受流器系统阻尼的方式,减少受流器在高速(160 km/h)运行状态下与第三轨碰撞后的脱离次数,延长滑靴使用寿命。

较大的阻尼在冲击工况下对受流器系统有利,但此参数在常态振动工况下对系统的影响规律尚不明确。为确定受流系统阻尼参数的优化方向及约束边界,下探究系统阻尼对受流器常态振动工况下的响应影响规律。

3 系统阻尼对受流器常态振动工况的响应影响规律

3.1 受流器动力学模型

由第 1.1 节所述原则建立受流器的简化动力学模型如图 12 所示。在初始条件下,靴轨间垂向接触力设置为标准值 120 N。根据动力学模型,建立受流器系统动力学方程。

图 12 三轨受流器动力学模型

受流器的几何约束方程为

$$\frac{z - q_1}{l} = \tan \theta \approx \theta \quad (1)$$

式中, z 为受流器滑靴垂向位移, q_1 为转向架构架端垂向位移, l 为受流器滑靴与方轴轴线的距离, θ 为受流器摆臂转动角度。

受流器转动微分方程为

$$J\ddot{\theta} = F_c l - T \quad (2)$$

式中, J 为受流器相对于方轴轴线的转动惯量, F_c 为受流器滑靴与第三轨之间的垂向接触力, T 为芯座处弹性元件产生的扭矩。

受流器滑靴与第三轨之间的垂向接触力与接触刚度相关,对比实际靴轨垂向接触力只存在压力,不存在拉力的情况,建立关于垂向接触力的非线性模型,当受流靴与第三轨脱离时,靴轨接触力为 0。

上述 F_c 、 T 的计算式分别为

$$F_c = \begin{cases} k_c(z - q_2) + F_0 & k_c(z - q_2) + F_0 > 0 \\ 0 & k_c(z - q_2) + F_0 \leq 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$T = k_t \theta + c_t \dot{\theta} \quad (4)$$

式中, k_c 为受流器与第三轨之间的接触刚度, q_2 为第三轨垂向位移, F_0 为靴轨初始压力。

基于 MATLAB\Simulink 平台建立常态振动 Simulink 模型,非线性接触力模型如图 13 所示,各参数取值见表 1。

图 13 三轨受流器随机振动非线性接触力模型

3.2 模型输入激励

由于受流器与第三轨之间的动态接触主要发生在垂向,故忽略转向架构架对受流器的横向激励,只考虑转向架构架对于受流器的垂向激励以及第三轨对于受流器滑靴的垂向激励。其中转向架构架对于受流器安装座的垂向激励由 Simpack 仿真计算得到。采用美国五级谱作为轨道谱激励,得到受流器安装座处垂向振动位移曲线如图 14 所示。

而第三轨轨道不平顺对于受流器滑靴的激励,根据《CJ/T 414—2012 城市轨道交通钢铝复合导电轨技术要求》^[13]中的规定:接触轨受流面中轴线必须垂直于走行轨平面,垂直高度 $200 \pm 5 \text{ mm}$;接触轨距线路中心线水平距离 $1\,510 \pm 5 \text{ mm}$ 。以此安装要求及走行轨垂向不平顺为基础,在走行轨垂向高低不平顺的基础上,叠加均值为 0,幅值 $\pm 5 \text{ mm}$ 呈

正态分布的散点, 生成第三轨轨面不平顺激励的位移曲线如图 15 所示。

图 14 转向架构架垂向位移曲线

图 15 第三轨轨面不平顺

3.3 受流器常态振动评价指标

为能更直观地描述受流器常态振动特性, 提出以下几个评价指标。

(1) 靴轨接触力标准差 σ_F : 用于描述某个区段内靴轨接触力的波动特性。

(2) 离线率 L_t : 某个区段内离线时间与总运行时间的比值, 用于刻画该区段整体的离线情况。国际标准 EN50367 中对于弓网系统离线率的规定如下: 当列车运行速度为 160 km/h 时, 最大线速度下的电弧百分比不宜超过 5%。

(3) 一次最大离线时间 T_m : 某个区段内数次离线时间中持续时间最长的一次离线时间, 用于描述单次离线程度。参照弓网系统中对一次离线持续时间的等级划分, 对第三轨供电系统中的一次最大离线时间进行等级划分如表 5^[15]所示。

表 5 离线等级划分

一次离线持续时间/ms	分类	造成原因
<10	小离线	滑板微振动和接触轨磨损
10~100	中离线	接触轨面高度变化致使受流器滑板不能与之完全接触或受硬点冲击
>100	大离线	接触轨面高度变化致使受流器滑板不能与之完全接触或受硬点冲击

3.4 改变系统阻尼对受流器振动响应的影响

通过仿真计算得到原始受流器系统在 80 km/h 和 160 km/h 运行速度下运行 500 m 的滑靴与第三轨之间垂向接触力如图 16、17 所示。

图 16 80 km/h 运行速度下滑靴与第三轨间垂向接触力

图 17 160 km/h 运行速度下滑靴与第三轨间垂向接触力

从图 16、图 17 可知, 原始受流器系统在 80 km/h 运行速度下无离线现象, 靴轨接触状态尚处于较优状态; 而当运行速度提升至 160 km/h, 靴轨接触状态极其恶劣, 离线率高达 38.53%, 原始系统既有阻尼无法适应常态振动下的准高速运行要求, 需对系统阻尼进行优化设计。

在对 Simulink 仿真模型进行参数设置时, 设置了不同的扭转阻尼系数分别进行仿真, 阻尼系数变化范围为 $0.59 \sim 50.59 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}/\text{rad}$ 。仿真工况均为 160 km/h。通过仿真计算得到不同阻尼系数下靴轨受流系统的关键性能指标, 如图 18 所示。

从图 18 中可得以下分析结果。

(1) 随着受流器扭转阻尼的增加, 靴轨垂向接触力标准差先迅速从 249.47 N 减小至 68.16 N, 随后缓慢增大至 123.20 N。当扭转阻尼系数取 $10.59 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}/\text{rad}$ 时, 靴轨垂向接触力标准差最小, 为 68.16 N, 此时接触力波动剧烈程度最小。

(2) 随着受流器扭转阻尼的增加, 离线率先迅速从 38.53% 减小至 4.78%, 随后缓慢上升至 15.38%。当扭转阻尼系数取 $10.59 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}/\text{rad}$ 时, 离线率最小为 4.78%, 满足 160 km/h 离线率低于 5% 的规定。

(3) 随着受流器扭转阻尼的增加,一次最大离线时间从 0.011 s 减小至 0.009 s, 随后增大至 0.033 s。当扭转阻尼系数取 $10.59 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}/\text{rad}$ 时,一次最大离线时间最小,为 0.009 s,属于小离线等级。

图 18 不同受流器扭转阻尼时滑靴与第三轨间垂向接触力统计数据

上述仿真结果表明,随着受流器扭转阻尼的增加,靴轨垂向接触力标准差、离线率及一次最大离线时间均呈现先减小后增加的变化趋势,除一次最大离线时间外均少于原始扭转阻尼的情况。当扭转阻尼系数设置为 $10.59 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}/\text{rad}$ 时,靴轨垂向接触力标准差、离线率及一次最大离线时间为所有仿真结果中最小,且单次离线持续时间皆属于小离线的范畴,离线率也满足 160 km/h 运行速度下低于 5% 的规定,该扭转阻尼下的靴轨垂向接触力如图 19 所示。即此时受流器在常态振动下的动态特性最佳,此时的扭转阻尼系数为最优阻尼系数。

图 19 最优阻尼下靴轨垂向接触力(160 km/h)

3.5 适用于准高速受流系统的结构方案

在第 2.2 节的仿真计算中,增大受流器系统阻尼采取了在受流器摆杆和转向架构架间连接直线阻尼器的方式,而对于实际受流器,垂向的可利用空间十分有限,安装直线阻尼器会增加受流器垂向高度,从而与其上方的电气箱发生空间干涉,因此这种增加系统阻尼的方式不适用于前文所研究的受流器。需要寻求合理的改进方案以应用前述仿真计算所得到的改进思路。

由于受流器在纵向与外部结构间的空间裕量较大,考虑引入旋转阻尼装置,使受流器摆臂运动带动旋转阻尼器转动轴旋转,从而输出扭矩达到增加受流器系统阻尼的目的。根据前文仿真计算结果,该下接触式受流器的最优扭转阻尼系数为 $10.59 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}/\text{rad}$,据此参数结合实际受流器的安装空间情况选取合适的旋转阻尼器。

由于现有受流器方轴一端安装手动脱靴机构,将方轴另一端适当延长并通过簧片式联轴器与旋转阻尼器转动轴连接,以消除两轴轴线不重合带来的影响,保证旋转阻尼器正常工作和受流器摆动组件正常转动。由于上述各个零部件的引入,使原受流器宽度不足,故结合新加入的零件尺寸,将绝缘底座在纵向上延长以满足新的安装需求。改造部分结构如图 20 所示,改造后的新受流器整体结构图如图 21 所示。

图 20 受流器改造部分

1. 受流器原方轴延长端 2. 挠性联轴器 3. 绝缘底座
4. 旋转阻尼器转动轴 5. 旋转阻尼器 6. 旋转阻尼器安装座

图 21 改造后新受流器

4 结论

本文通过探究受流器关键参数对其在准高速运行条件下不同工况的振动影响规律, 分析得出以下结论, 在实际条件允许的情况下, 适当、合理的增大受流器系统阻尼, 可有效改善高速(160 km/h)运行条件下受流器滑靴与第三轨的碰撞冲击振动响应以及常态振动响应。故结合受流器实际结构, 提出一套适用于准高速受流系统的结构改进方案: 在传统扭簧式受流器结构中增加旋转阻尼组件, 使其能够满足系统阻尼增加的要求, 从而实现在高速运行条件下减少冲击工况碰撞脱靴、抑制常态振动工况离线的目的, 增加滑靴的使用寿命。与现有技术相比, 本方案突破了采用三轨受流轨道车辆提速的主要技术瓶颈, 为准高速条件下受流器系统的设计提供了关键的依据。

参 考 文 献

- [1] VERA C, SUAREZ B, PAULIN J, et al. Simulation model for the study of overhead rail current collector systems dynamics, focused on the design of a new conductor rail [J]. *Vehicle System Dynamics*, 2006, 44(8): 595-614.
- [2] STEWART E, WESTON P, HILLMANSEN S, et al. Using bogie-mounted sensors to understand the dynamics of third rail current collection systems[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part F Journal of Rail & Rapid Transit*, 2010, 1 (F2): 1-9.
- [3] WESTON P, STEWART E, ROBERTS C, et al. Measuring the dynamic interaction between electric vehicle shoe/gear and the third rail[C]// *IET Seminar Digest*(2008). 2008(1): 14-17.
- [4] 王文娇. 受流器与接触轨端部弯头接触特性分析[J]. *华东交通大学学报*, 2014, 31(1): 34-38.
- WANG Wenjiao. Analysis on contact characteristics between collector and third rail end [J]. *Journal of East China Jiaotong University*, 2014, 31(1): 34-38.
- [5] 郎鹏. 受流器/三轨弯头碰撞动力学研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2016.
- LANG Peng. Research on impact dynamics of collector/third rail ends[D]. Beijing: *Journal of Beijing Jiaotong University*, 2016.
- [6] 滕腾. 随机振动下受电靴与第三轨接触振动规律研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2012.
- TENG Teng. Research on contact vibration law between collector shoe and third rail under random vibration [D]. Beijing: *Journal of Beijing Jiaotong University*, 2012.
- [7] 李国富. 第三轨受流系统刚柔耦合动力学研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2015.
- LI Guofu. Study on rigid-flexible coupling dynamics of third rail current collection system [D]. Beijing: *Journal of Beijing Jiaotong University*, 2015.
- [8] 黄洪斌. 随机振动下受流器/第三轨接触振动及噪声研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2014.
- HUANG Hongbin. Research on contact vibration and noise between collector and third rail under random vibration [D]. Beijing: *Journal of Beijing Jiaotong University*, 2014.
- [9] 杨晓艳. 基于分形理论的受流器/第三轨动态接触特性研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2015.
- YANG Xiaoyan. Research on dynamic contact characteristics of current collector/third rail based on fractal theory[D]. Beijing: *Journal of Beijing Jiaotong University*, 2015.
- [10] 董霖, 陈光雄, 朱旻昊, 等. 地铁钢铝复合式第三轨/受电靴载流摩擦磨损特性研究[J]. *摩擦学学报*, 2007(3): 274-278.
- DONG Lin, CHEN Guangxiong, ZHU Minhao, et al. Effects of loading system stiffness on tribological properties of third rail under electric current[J]. *Tribology*, 2007(3): 274-278.
- [11] 唐人寰. 受流器/第三轨摩擦振动特性研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2017.
- TANG Renhuan. Study on the friction vibration characteristics of the interface between the collection shoe and the third rail[D]. Beijing: *Journal of Beijing Jiaotong University*, 2017.
- [12] 肖雄. 气压调节式受流器动力学模型研究[D]. 北京: 北

- 京交通大学, 2019.
- XIAO Xiong. Study on dynamic model of pressure-regulated collector[D]. Beijing : Journal of Beijing Jiaotong University, 2019.
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. CJ/T 414-2012 城市轨道交通钢铝复合导电轨技术要求[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013
- Ministry of Housing and Urban Rural Development of the People's Republic of China. CJ/T 414-2012 Technical requirements of aluminum-steel conductor rail for urban rail transit[S]. Beijing: Standards Press of China, 2013.
- [14] 陈羽, 刘志明. 北京地铁受流器疲劳可靠性评估及改进研究[J]. 城市轨道交通研究, 2013, 1607: 60-62, 66.
- CHEN Yu, LIU Zhiming. Fatigue reliability evaluation and improvement of current collector used in Beijing Metro[J]. Urban Mass Transit, 2013, 1607: 60-62, 66.
- [15] 宁晓芳. 受流器/第三轨系统受流质量评价指标研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
- NING Xiaofang. Study on the evaluation index of the current collecting quality of the third-rail power supply systemr[D]. Beijing : Journal of Beijing Jiaotong University, 2019.

作者简介: 向梟笛, 女, 1997 年出生。主要研究方向为轨道车辆动力学及强度分析。

E-mail: xiangxiaodi@tongji.edu.cn

罗湘萍(通信作者), 男, 1965 年出生, 副教授。主要研究方向为轨道车辆转向架结构设计, 动力学及强度分析。

E-mail: tongjilxp@sina.com