

车辆抗侧滚刚度对轴箱内置地铁车辆动力学性能影响分析

张晖,陈康,马岱,张岩

(西南交通大学 牵引动力国家重点实验室,四川 成都 610031)

摘要:为合理选择轴箱内置转向架车辆抗侧滚刚度,建立某地铁车辆动力学模型,分析一系、二系垂向刚度和抗侧滚扭杆刚度对车辆运行平稳性、扭曲线路通过和抗侧滚性能的影响。研究表明:一系垂向刚度和抗侧滚扭杆刚度对车体的平稳性指标影响较小,而二系垂向刚度对车体垂向振动的影响较为明显。一系、二系垂向刚度和抗侧滚扭杆刚度较大时,虽然车辆具有优秀的抗侧滚能力,但是不利于列车通过扭曲线路。因此车辆抗侧滚刚度取值既要满足轴箱内置转向架车辆抑制侧滚的需求,也要具备良好的适应线路扭曲的能力。

关键词:一系垂向刚度;二系垂向刚度;抗侧滚扭杆刚度;轴箱内置转向架;抗侧滚性能;地铁车辆

中图分类号:U270.1 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2023)06-0207-06

Influence of Anti-rolling Stiffness on Dynamic Performance of Metro Vehicles with Built-in Axle Box

ZHANG Hui, CHEN Kang, MA Dai, ZHANG Yan

(State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: In order to reasonably select the anti-rolling stiffness of the vehicle with built-in bogie in the axle box, a dynamic model of a metro vehicle is established, and the effects of the primary and secondary vertical stiffness and stiffness of anti rolling bar on the vehicle running stability, twisted line passing and anti-rolling performance are analyzed. The results show that the primary vertical stiffness and stiffness of anti-rolling bar have little influence on the stability index of the car body, while the secondary vertical stiffness has a more obvious influence over the vertical vibration of the car body. When the primary and secondary vertical stiffness and stiffness of anti-rolling bar are large, it is not conducive to the train passing through the twisted line despite the excellent anti-rolling ability of the vehicle. Therefore, the value of vehicle anti-rolling stiffness should be within a reasonable range, which not only meets the needs of vehicle with built-in bogie in axle box to suppress rolling, but also ensures good ability of adapting to line distortion.

Keywords: primary vertical stiffness; secondary vertical stiffness; stiffness of anti rolling bar; bogie built in axle box; anti rolling performance; metro vehicles

0 引言

随着轨道车辆技术的飞速发展,对列车运行速度和轮轨磨耗等提出了更高的要求。轴箱内置转向架因为具有曲线通过性能好、轮轨磨耗低、结构轻量化和易于通过扭曲线路等优点引起转向架设计师的注意^[1]。与传统轴箱外置转向架不同,轴箱内置转向架是将轴箱布置在轮座的内侧,缩短了一系悬挂装置到车轴中心线的距离,车辆的抗侧滚刚度有所下降,直接影响到车辆的运行性能,所以有必要为轴箱内置转向架选择合适的车辆抗侧滚刚度。车辆抗侧滚刚度太大会影响车辆行驶在曲线线路上轮重的分配,严重时可能造成车轮大幅减载,增加脱轨危险^[2];刚度太小容易导致车辆侧滚幅度加大,甚至出现倾覆的危险。当车辆发生侧滚运动时,一系、二系悬挂共同发挥阻碍车体倾斜的作用,其中一系悬挂的抗侧滚刚度主要取决于一系垂向刚度和一系横向跨距;二系悬挂的抗侧

滚刚度由二系弹簧和抗侧滚扭杆共同提供。本文通过改变一系垂向刚度、二系垂向刚度、抗侧滚扭杆提供的抗侧滚刚度研究车辆抗侧滚刚度对轴箱内置地铁车辆动力学性能影响。

1 车辆系统动力学建模

根据国内某地铁车辆,利用多体动力学软件 Simpack 建立动力学简化模型。该动力学模型主要包括轮对、构架、车体、轴箱体等部件,各部件之间通过铰接和力元相互连接^[3]。为了研究轴箱内置转向架,将一系悬挂横向跨距由 1.93 m 缩短至 1.10 m,保持原车一、二系悬挂相对位置不变;二系悬挂横向跨距也减小了 0.83 m,同时为了与原车对比,保持轮对、转向架摇头角刚度不变,将轴箱内置转向架一系悬挂纵向刚度增大 3.1 倍,二系悬挂纵向刚度增大 3.3 倍。根据式(1)和式(2)可知,轮对侧滚角刚度

和二系悬挂抗侧滚刚度大幅下降。该模型车轮采用 LM 踏面,钢轨型面为 CN60,磨损前两者匹配的等效锥度接近 0.12,磨损后等效锥度为 0.43。原车和轴箱内置转向架地铁模型转向架的部分悬挂及结构参数见表 1。下文的参数分析均是基于轴箱内置地铁车辆模型展开的。

轮对侧滚角刚度

$$K_1 = 2K_{pz} B_p^2 \quad (1)$$

二系悬挂抗侧滚刚度

$$K_2 = 2K_{sz} B_s^2 + K_1 \quad (2)$$

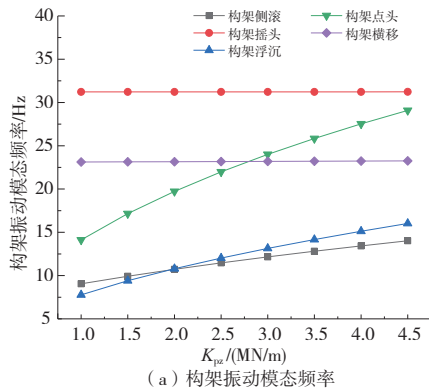
式中: K_{pz} 为一系垂向刚度; B_p 为一系弹簧横向跨距之半; K_{sz} 为二系垂向刚度; K_1 为抗侧滚扭杆刚度; B_s 为二系弹簧横向跨距之半。

表 1 两种转向架性能参数

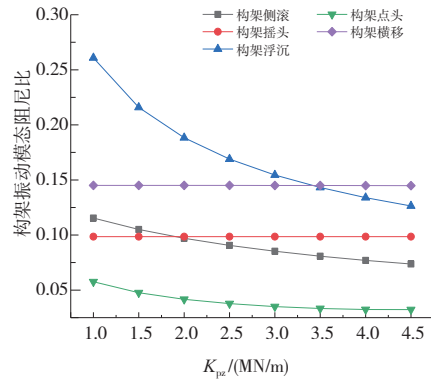
转向架参数	原车	轴箱内置转向架
轴箱布置方式	轴箱外置	轴箱内置
一系悬挂横向跨距/m	1.93	1.10
二系悬挂横向跨距/m	1.85	1.02
一系垂向刚度/(MN/m)	1.32	1.32
二系垂向刚度/(MN/m)	0.35	0.35
抗侧滚扭杆刚度/(MN·m/rad)	1.60	1.60

2 车辆抗侧滚刚度对系统悬挂模态的影响

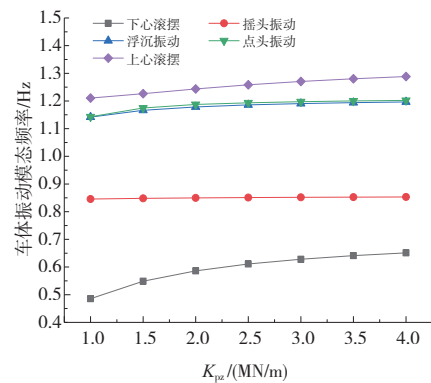
车辆系统的悬挂模态与其刚度、阻尼、质量等息息相关,模态振型主要表现为伸缩、横摆、浮沉、侧滚、摇头和点头。其中一系悬挂主要影响构架的振动模态,而二系悬挂更多的是影响车体的振动模态。图 1—图 3 为一、二系垂向刚度和抗侧滚扭杆刚度对车体、构架振动模态的影响结果。从图中可知,一系垂向刚度、抗侧滚扭杆刚度对车体振动模态的影响基本相同,即影响车体下心滚摆和上心滚摆模态对车体摇头、浮沉和点头振动模态基本无影响;随着一系垂向刚度增大,构架的点头、浮沉和侧滚振动模态频率增加,阻尼比下降,且在 1.5 MN/m~4.5 MN/m 区间内,构架的点头阻尼比低于 5% 的安全阈值,加剧构架垂向振动。由图 2 可知,二系垂向刚度改变,车体浮沉、点头振动模态变化基本一致。二系垂向刚度较大时,浮沉和点头振动模态频率增大,阻尼比迅速减小,此时车体垂向振动更加明显。车体垂向加速度增大、平稳性变差,通常采用具有小垂向刚度的空气弹簧来改善车体垂向平稳性。



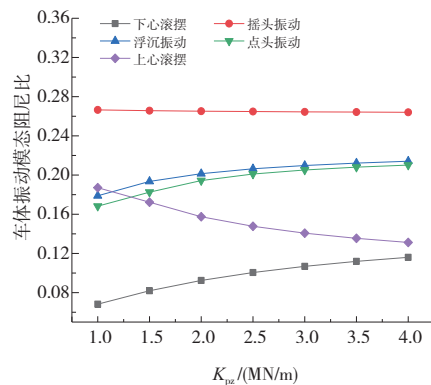
(a) 构架振动模态频率



(b) 构架振动模态阻尼比



(c) 车体振动模态频率



(d) 车体振动模态阻尼比

图 1 一系垂向刚度对车体振动模态的影响

3 车辆抗侧滚刚度对动力学性能的影响

3.1 运行平稳性

运行平稳性对于客车上乘客的舒适性和货车上货物的完整性意义重大,通过上文发现一、二系垂向刚度和抗侧滚扭杆刚度影响车体的悬挂模态,所以有必要进一步研究其对车体平稳性的影响。图 4 为原车不同速度等级下的车体横向、垂向平稳性指标计算结果。图 5—图 8 为轴箱内置地铁车辆不同速度等级下的车体横向、垂向平稳性

指标与一系垂向刚度、二系垂向刚度和抗侧滚扭杆刚度的变化关系。从图中可以发现,在保证一、二系抗摇头刚度相同的前提下,减小一系横向跨距对车体的平稳性指标变化影响较小。

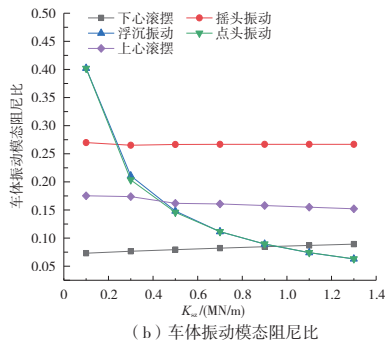
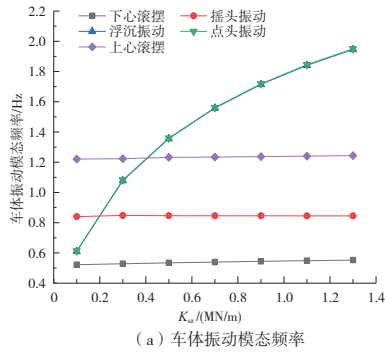


图2 二系垂向刚度对车体振动模式的影响

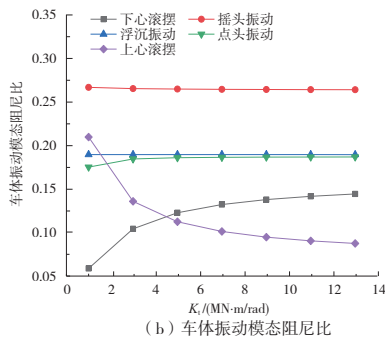
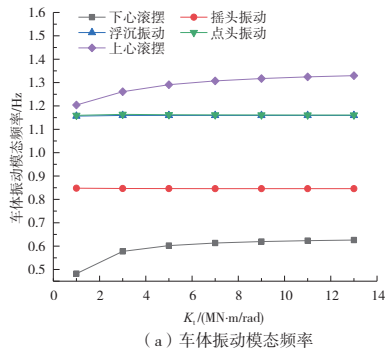


图3 抗侧滚扭杆刚度对车体振动模式的影响

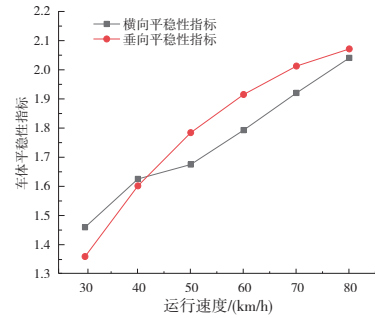


图4 原车的车体平稳性指标

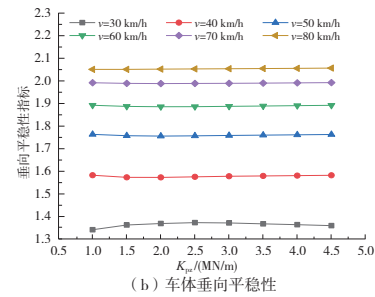
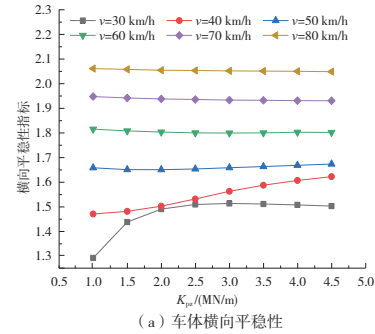


图5 一系垂向刚度对车体运行平稳性的影响

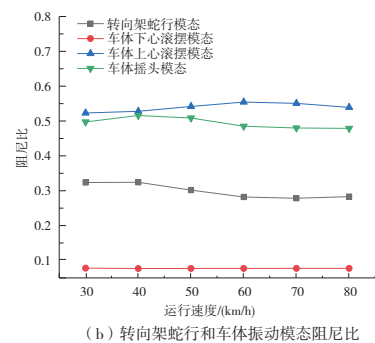
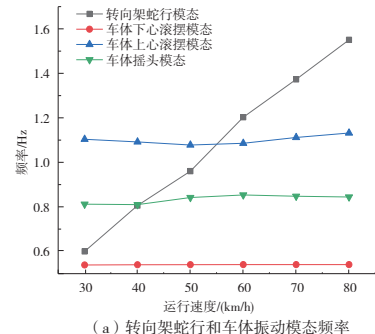


图6 车辆运行速度对转向架蛇行和车体振动模式的影响

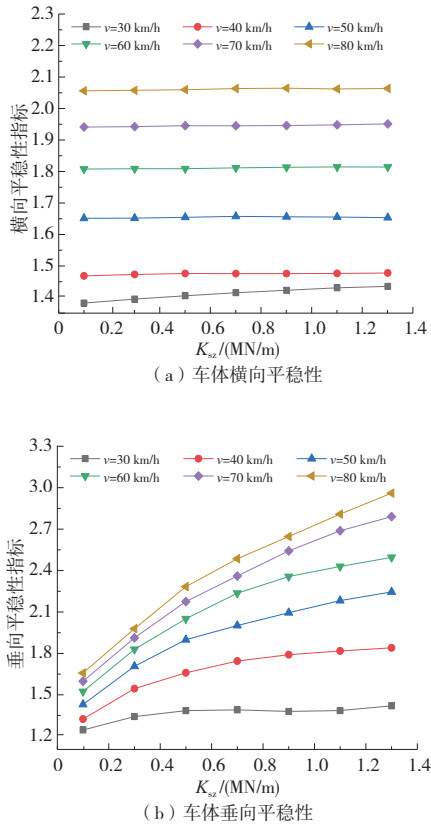


图7 二系垂向刚度对车体运行平稳性的影响

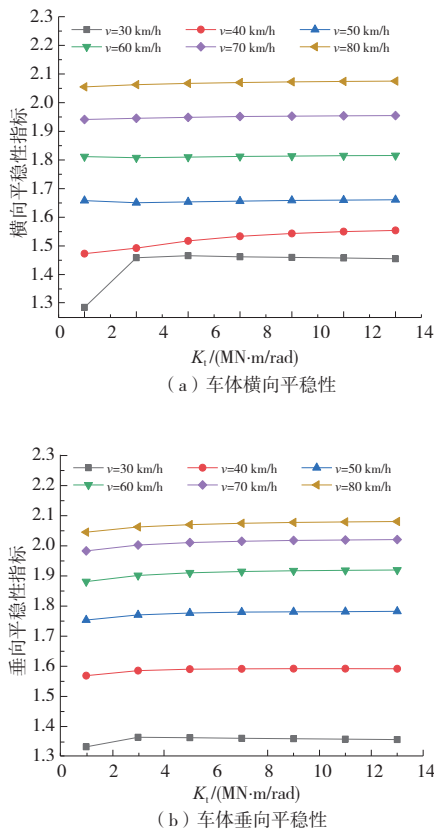


图8 抗侧滚扭杆刚度对车体运行平稳性的影响

由图5和图8可知,一系垂向刚度和抗侧滚扭杆刚度对车体平稳性的影响基本相同,因此本文只分析一系垂向刚度的变化对车体横向、垂向平稳性的影响。在30 km/h和40 km/h两个速度等级下,车体横向平稳性随着一系垂向刚度的增大而增大;当一系垂向刚度由1 MN/m增大到4.5 MN/m时,30 km/h速度等级下的车体横向平稳性指标增大0.2左右,40 km/h速度等级下的车体横向平稳性指标增大0.15左右。结合图6和图1可知,车辆运行速度在30 km/h~40 km/h区间,转向架蛇行频率和车体下心滚摆频率相近,且随着一系垂向刚度的增大,车体下心滚摆频率越来越接近转向架蛇行频率,同时车体下心滚摆振动模态阻尼比较小,所以基本可以认为转向架蛇行模态和车体下心滚摆模态相互耦合导致车体横向振动加剧,横向平稳性指标变大。车辆运行速度在50 km/h~80 km/h区间,转向架蛇行模态频率与车体下心滚摆模态频率相差较大,此时改变一系垂向刚度对车体横向平稳性指标基本无影响。此外,从图5(b)也可以看出一系垂向刚度对车体垂向平稳性指标基本无影响。

由图7可知,二系垂向刚度对车体的横向平稳性基本无影响,但对车体的垂向平稳性指标影响较大。从图中可以发现,随着二系垂向刚度增大,车体的垂向平稳性指标增大,且这种影响随着速度的增大越发明显。结合二系垂向刚度对车体浮沉、点头振动模态的影响分析,车辆运行速度增大,轨道激扰引起的振动传到二系悬挂的高频成分增加^[4],随着二系垂向刚度增大,车体浮沉、点头振动模态频率增大,阻尼比下降,更容易使二系悬挂装置上的垂向振动传递到车体,造成车体的垂向平稳性变差。

3.2 扭曲线路通过性能

轨道车辆以较低的速度通过扭曲线路时容易发生爬轨脱轨^[5],此时由于轨道线路扭曲造成某侧车轮垂向力骤减,轮重减载率变大,轮对出现正向冲角,巨大的横向蠕滑力让外轮爬上外轨,直至脱离轨道^[6]。按照EN14363标准,该扭曲线路工况设置为直线段长度50 m—缓和曲线段长度50 m—曲线段长度130 m—缓和曲线段长度50 m—直线段长度50 m,曲线半径为150 m,扭曲出现在线路曲线段,通过3‰的坡度将线路超高由45 mm过渡到-45 mm^[7]。轴箱内置地铁车辆以8 km/h的恒定速度通过扭曲线路,将一辆车四条轮对中最大的脱轨系数和轮重减载率作为评定值。

表2为原车通过扭曲线路的脱轨系数和轮重减载率。图9—图11为一系垂向刚度、二系垂向刚度和抗侧滚扭杆刚度对扭曲线路上轴箱内置地铁车辆脱轨系数和轮重减载率的影响结果图。结果显示一、二系垂向刚度和抗侧滚扭杆刚度对脱轨系数和轮重减载率的影响略有不同。其中,脱轨系数和轮重减载率随一系垂向刚度的增大而线性增大;二系垂向刚度增大,车辆的脱轨系数随之增大,轮重减载率基本不变;随着抗侧滚扭杆刚度逐渐变大,脱轨系数和轮重减载率的增大幅度逐渐变小。考虑到对车辆平稳性的影响,二系垂向刚度变化范围较小,其对于脱轨系数和轮重减载率的影响相比一系垂向刚度和抗侧滚扭杆刚度较小。当一、二系悬挂横向跨距缩短

时,一系悬挂和二系悬挂抗侧滚刚度大幅下降导致车辆整体的抗侧滚刚度降低,通过计算可知轴箱内置转向架车辆的脱轨系数和轮重减载率相比原车分别降低 23%、17%左右。这也是轴箱内置转向架车辆适应线路扭曲的主要原因。

表 2 原车的脱轨系数和轮重减载率

类型	脱轨系数	轮重减载率
新轮	0.950	0.277
磨损轮	0.878	0.299

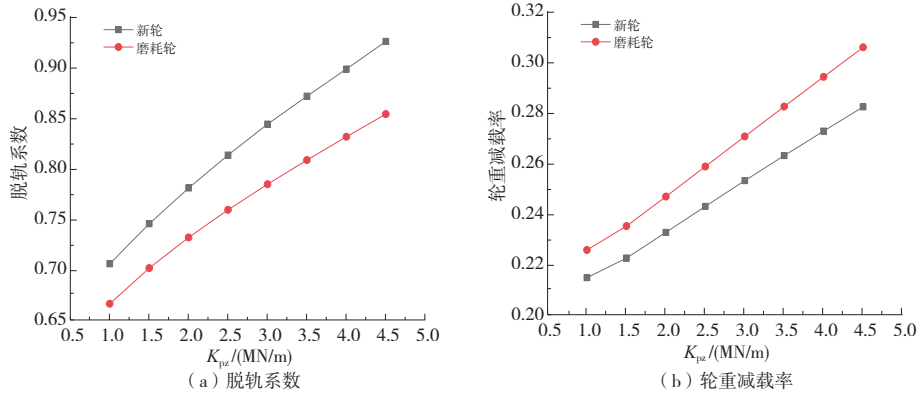


图 9 一系垂向刚度对脱轨系数和轮重减载率的影响

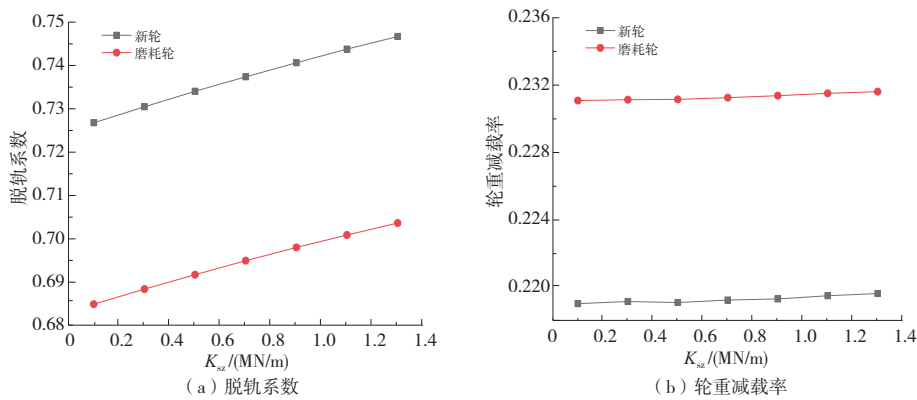


图 10 二系垂向刚度对脱轨系数和轮重减载率的影响

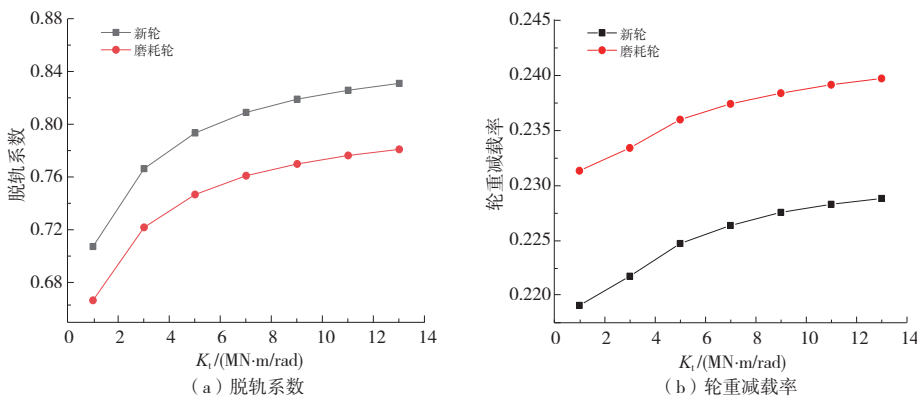


图 11 抗侧滚扭杆刚度对脱轨系数和轮重减载率的影响

3.3 车辆抗侧滚刚度对柔度系数的影响

柔度系数是衡量车辆抗侧滚性能的指标之一,其定义为车辆静止在含超高的轨道上时车体发生倾斜,与垂直于

轨面的直线形成夹角 β , 轨面相对水平面的夹角 α 与夹角 β 的比值即为柔度系数。

UIC505-5 列出了柔度系数的计算公式,考虑到抗侧滚扭杆提供的二系抗侧滚刚度,柔度系数公式^[8]为

$$S = \frac{\left(1 - \frac{h_3}{h_2}\right) \left(1 - \frac{2G_b h_1 + G_c h_2}{2C_1 b_1^2}\right) + \frac{C_2 b_2^2 + K_1}{C_1 b_1^2} \left(1 + \frac{2G_b h_1}{G_c h_2} + \frac{G_c}{h_2 C_y}\right)}{\frac{2C_2 b_2^2 + 2K_1}{G_c h_2} - \left[\frac{C_2 b_2^2 + K_1}{C_1 b_1^2} \left(1 + \frac{2G_b h_1}{G_c h_2}\right)\right] - \left[\left(1 - \frac{h_3}{h_2}\right) \left(1 - \frac{2G_b h_1 + G_c h_2}{2C_1 b_1^2}\right)\right]} \quad (3)$$

式中: G_b 为单个转向架的簧间质量; G_c 为车体的质量; h_1 、 h_2 、 h_3 分别是转向架、车体簧上部分质心、二系悬挂支承面距车轴中心线的高度; C_1 、 C_2 分别是车辆一侧一、二系悬挂垂向刚度; C_y 是车辆二系悬挂横向刚度; b_1 、 b_2 分别是一、二系悬挂横向跨距之半; K_1 是抗侧滚扭杆提供的抗侧滚刚度。

通过计算,原车仿真得到的柔度系数为 0.132,公式推导得到的柔度系数为 0.089。一、二系垂向刚度和抗侧滚扭杆刚度对轴箱内置地铁车辆柔度系数的影响结果如图 12—图 14 所示(一、二系垂向刚度变化未考虑对 h_1 、

h_2 、 h_3 的影响)。从图中可以看出,仿真计算和公式推导得到的参数变化对柔度系数的影响规律基本一致。整体上,增大一、二系垂向刚度和抗侧滚扭杆刚度,柔度系数减小,车辆抗侧滚性能提高。当通过增大抗侧滚扭杆刚度提高二系悬挂抗侧滚角刚时,其刚度超过某一限值后,再次增大刚度对车辆柔度系数基本无影响。就轴箱内置转向架而言,一、二系悬挂横向跨距相比于轴箱外置转向架缩短接近一半,导致车体抗侧滚刚度大大降低,仿真和公式计算得到的车辆柔度系数相比原车增大一倍左右,车体的侧滚运动幅度迅速增大,容易形成安全隐患。

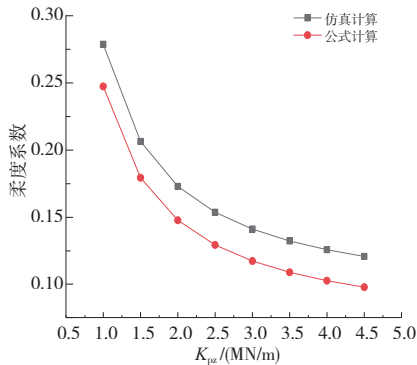


图 12 一系垂向刚度对柔度系数的影响

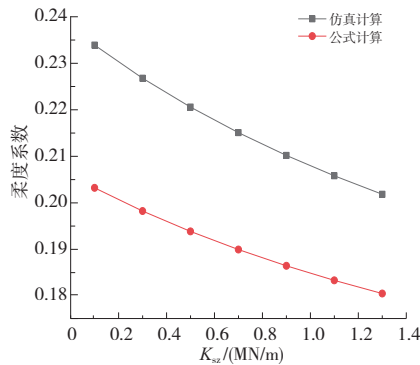


图 13 二系垂向刚度对柔度系数的影响

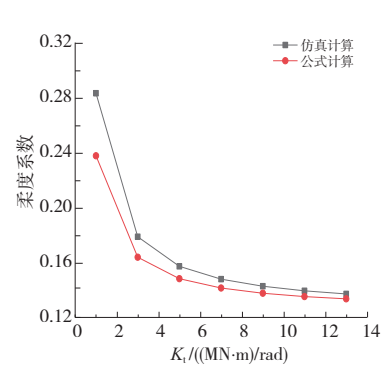


图 14 抗侧滚扭杆刚度对柔度系数的影响

4 结语

1) 一系垂向刚度和抗侧滚扭杆刚度对轴箱内置地铁车辆车体的垂向平稳性指标基本无影响,对某些速度等级下车体的横向平稳性有影响,同时一系垂向刚度对构架的点头、侧滚和浮沉模态影响较为明显;二系垂向刚度基本不影响轴箱内置地铁车辆车体的横向平稳性指标,但对车体的垂向平稳性指标影响较大。

2) 虽然降低一系垂向刚度、二系垂向刚度和抗侧滚扭杆刚度有利于列车通过扭曲线路,但是这也导致车辆抑制侧滚的能力变差,增大了车辆侧滚运动的幅度,直接影响车辆运行限界安全。

参考文献:

[1] 梁树林,傅茂海. 内侧悬挂转向架在城轨车辆中的应用研究[J]. 铁道车辆,2006,44(4):4-7,45.

- [2] 刘文松. CRH380A 抗侧滚扭杆系统研究[D]. 成都:西南交通大学,2013.
- [3] 庄哲,梁鑫,林建辉,等. 轴箱布置方式对地铁直线电机车辆动力学性能的影响[J]. 城市轨道交通研究,2017,20(9):30-36.
- [4] 池茂儒,张卫华,曾京,等. 高速客车转向架悬挂参数分析[J]. 大连交通大学学报,2007,28(3):13-19.
- [5] 罗仁,石怀龙. 铁道车辆系统动力学及应用[M]. 成都:西南交通大学出版社,2018:303-304.
- [6] 姚建伟. 机车车辆动力学[M]. 北京:科学出版社,2014:269-270.
- [7] 侯龙刚,梁树林,池茂儒,等. 扭曲线路下 A 型地铁车辆安全性分析[J]. 机械,2021,48(10):38-45.
- [8] 李学良,沈钢. 轨道车辆的柔性系数研究[J]. 铁道车辆,2011,49(8):4-6.

收稿日期:2022-06-10