DOI：10.13890/j.issn.1000-128X.2022.05.002

铁道机车车辆

悬挂式单轨车辆悬吊系统横向刚度优化设计与验证

黄晓翠[1,2]，贾小平[2]，傅茂海[3]，杨亮亮[1]

（1.南京工程学院 汽车与轨道交通学院，江苏 南京 211167；
2.中车南京浦镇车辆有限公司 技术中心，江苏 南京 210031；
3.西南交通大学 机械工程学院，四川 成都 610031）

摘 要：针对某悬挂式单轨车辆转向架二系弹簧设计空间受限导致的横向柔度不足问题，基于小摆角线性理论推导了四连杆悬吊机构等效回复刚度公式，并以此对悬吊机构几何参数进行优化设计，使整个悬吊系统横向刚度达到与地铁车辆二系空气弹簧相当的水平。结合实际悬挂式单轨车辆设计案例，采用多刚体动力学方法对四连杆悬吊机构开展运动学和动力学分析，总结了四连杆悬吊机构等效回复刚度公式的适用范围和局限性，并建立整车三维耦合动力学模型分析和检验了悬吊系统优化设计方案的有效性。结果表明，通过合理匹配四连杆悬吊机构几何参数的设计方案能够显著提高悬挂式单轨车辆的横向运行品质，但在车辆通过小半径曲线时会引起更多的车体动态偏移。

关键词：悬挂式单轨车辆；四连杆；回复刚度；优化；城市轨道交通；仿真

中图分类号：U232　　**文献标识码：**A

文章编号：1000-128X(2022)05-0009-08

Optimal design and verification of lateral stiffness of suspension system for suspended monorail train

HUANG Xiaocui[1,2], JIA Xiaoping[2], FU Maohai[3], YANG Liangliang[1]

(1. School of Automotive and Rail Communication, Nanjing Institute of Technology, Nanjing, Jiangsu 211167, China;
2. Technology Center, CRRC Nanjing Puzhen Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu 210031, China;
3. School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract: Against the problem of insufficient lateral flexibility due to the design space limitation of secondary springs of the bogie for a suspended monorail train, an equivalent restoring stiffness formula was deduced from the linear theory of small swing angles for the four-linkage suspension mechanism. Based on the formula, the geometric parameters optimization of suspension system was completed, and the lateral stiffness of the suspension system was improved to the level equivalent to the secondary air spring used on metro trains. Combined with the actual design cases of suspended monorail trains, the four-link suspension mechanism was analyzed from the view of kinematics and dynamics using the multi-rigid-body dynamics approach. The applicability scope and limitation of the equivalent restoring stiffness formula were summarized, and a 3D coupling dynamics model for the whole train was established to analyze and verify the effectiveness of the optimized design solution of the suspension system. The results show that the design solution by reasonably matching the geometric parameters of the four-linkage mechanism can significantly improve the lateral riding quality of the train, but when the train passes through a small radius curve, it will cause more dynamic deviation of the train body.

Keywords: suspended monorail vehicle; four-linkage; restoring stiffness; optimization; urban rail transit; simulation

收稿日期：2021-12-24；修回日期：2022-08-20
基金项目：国家自然科学基金项目（61703200）；南京工程学院校基金项目（QKJ201905）
通信作者：黄晓翠（1988—），女，硕士，工程师，研究方向为机车车辆设计及理论； E-mail: xiaocuihuang@163.com

0 引言

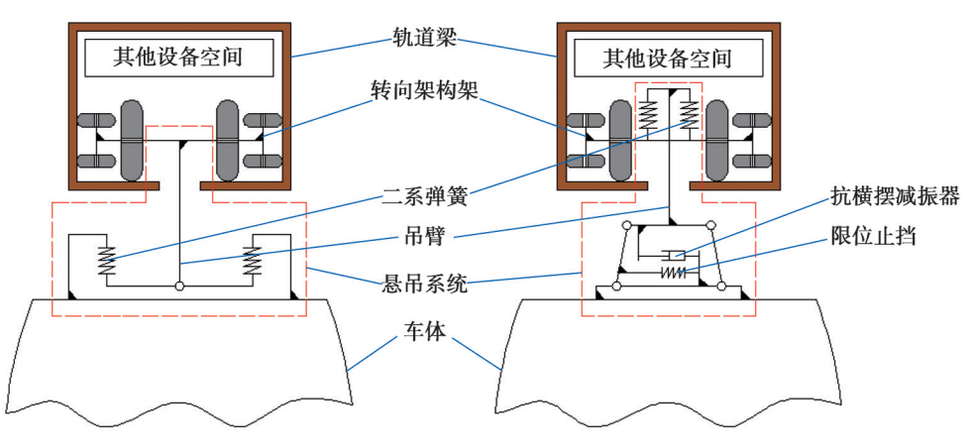
悬挂式单轨列车是一种悬挂在轨道梁下方的新型城市轨道交通工具，具备噪声小、占地少、造价低等优点，并在德国多特蒙德和日本千叶的城市轨道交通系统中具有长期良好的运用经验[1-4]。近年来，我国也开展了一些悬挂式单轨系统的研制工作，多款样车已经顺利下线[5-6]。在借鉴国外已有设计经验的基础上，为了进一步提高悬挂式单轨车辆运行性能，仍有大量的优化工作需要逐步研究。目前，针对既有悬挂式单轨系统已开展了大量专项研究，文献[7-8]基于UM软件建立多刚体动力学模型开展了二系弹簧刚度优化研究，并对比分析了传统线性刚度理论和准零刚度理论下的车辆垂向动态响应；文献[9]研究了空气弹簧刚度对车辆直线运行平稳性指标和曲线通过侧滚角的影响；文献[10]通过试验和仿真手段对车辆垂向异常振动进行研究，并提出了优化二系弹簧和阻尼的改善措施；文献[11]分别采用线性和非线性方法对车体和构架的滚摆运动进行研究，并以此针对抗横摆减振器阻尼进行优选；文献[12]采用非线性方法探讨了空气弹簧刚度、横向减振器阻尼、垂向减振器阻尼和抗横摆减振器阻尼等参数对车体侧滚角的影响。由上述研究可知，车辆悬吊系统中涉及的弹性元件、液压减振器等部件对悬挂式单轨车辆运行性能起着至关重要的作用，但鲜有学者针对悬吊机构方面开展相关研究。本文针对悬挂式单轨车辆的四连杆悬吊系统横向刚度进行优化研究，通过合理匹配四连杆几何参数使整个车辆系统具有更大的横向柔度，以期进一步改善车辆的运行性能。

1 四连杆式悬吊系统

与传统的轨道车辆系统不同，悬挂式单轨系统的轨道梁为中空的箱型结构，转向架在轨道梁的半封闭空间内行驶，车体通过悬吊系统吊挂在转向架下方。所谓悬吊系统是指转向架构架与车体之间的所有连接装置，等同于传统地铁车辆的中央悬挂系统，其主要由二系弹簧、二系减振器、悬吊机构、限位止挡、安全钢索等组成。由于轨道梁内空间狭小，传统地铁车辆常用的空气弹簧很难安装于转向架上[13-14]，为了保证车辆具有良好的乘坐舒适性，需要对悬吊系统进行合理设计。一种可行的悬吊方案是将构架与摇枕之间的二系弹簧下移至轨道梁下方的吊臂与车体之间，如图1(a)所示的悬吊系统I，该方案不受轨道梁尺寸的限制，弹簧选型时可选择具有较大柔度的空气弹簧，且其较大的横向跨距也可提供适当的抗侧滚刚度，但也牺牲了轨道梁对弹簧部件的隔离保护作用，使得弹簧部件的维修和更换作业更加繁琐。另一种方案是采用适应于轨道梁空间的小尺寸螺旋圆钢簧或叠层橡胶弹簧，但其横向特性方面很难满足较大柔度的要求，为此可考虑采用四连杆式悬吊装置代替传统的单摆式悬吊装置，如图1(b)所示的悬吊系统II，充分利用四连杆几何参数的匹配多样性，在不改变车辆基本位置参数的条件下，设计合适的悬吊系统综合刚度，实现提高车辆运行性能的目标。

本文研究对象为国内某型悬挂式单轨车辆，该车辆主要由车体、构架、橡胶走行轮、橡胶导向轮、摇枕、吊臂、吊梁、叠层橡胶弹簧、横向减振器、垂向减振器、抗滚摆减振器、驱动装置以及制动装置等组成，采用如图1(b)所示的悬吊系统II方案，其中吊臂、左右吊梁和车体顶部连接装置分别构成了该悬吊系统四连杆机构的上连杆、侧连杆和下连杆。

当车辆运行在直线或大半径曲线时，由于轨道不平顺、弱离心力、微侧风等激扰作用，车体将产生小幅的滚摆和摇头运动，此时四连杆悬吊装置也可认为始终处于微幅摆动状态。如图2所示，在侧向外力F作用下，四连杆机构发生滚摆将引起下铰点承受附加垂向载荷ΔP，其中一侧增载，另一侧减载，由力矩平衡



(a) 悬吊系统I (b) 悬吊系统II

图1 悬挂式单轨车辆悬吊系统方案

Fig. 1 Suspension system scheme of suspended monorail vehicle

条件可得

$$\Delta P=\frac{Fh}{b} \tag{1}$$

图2中，a、b和l分别为上连杆、下连杆和侧连杆的长度；α为侧连杆倾角；H为上、下连杆之间的垂向距离；h为车体侧向外力作用点到下连杆的垂向距离；θ_1、θ_2分别为左、右侧连杆的摆角；y_1、y_2分别为左、右下铰点的横向位移；F_1、F_2分别为左、右下铰点水平分力；T_1、T_2分别为左、右下铰点沿侧连杆方向分力。

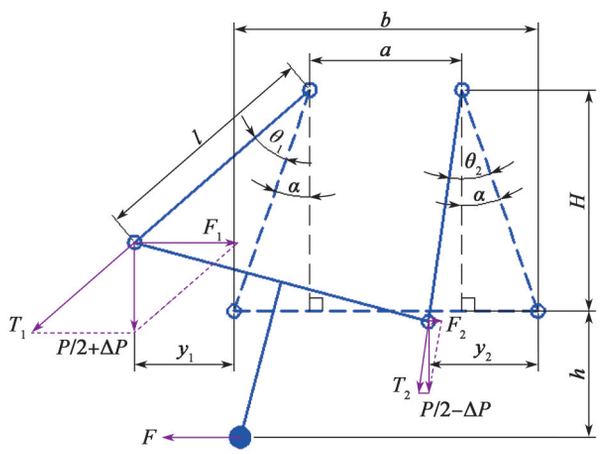


图2　四连杆机构受力简图

Fig. 2　Force diagram of four-link mechanism

图2中，蓝色虚线表示在没有侧向外力时的四连杆位置，此时作用于左右下铰点处的垂向载荷均为P；蓝色实线表示在有侧向外力时的四连杆位置，此时作用于左右铰接点处的垂向载荷分别为$P/2+\Delta P$和$P/2-\Delta P$，若假设$\theta_1\approx\theta_2=\theta$，则四连杆悬吊装置的横向复原力$F_y$可表示为$F_1$与$F_2$的合力，即

$$F_y=\left(\frac{P}{2}+\Delta P\right)\tan(\theta+\alpha)+\left(\frac{P}{2}-\Delta P\right)\tan(\theta-\alpha) \tag{2}$$

此外，下连杆横向位移y可表示为y_1与y_2的平均位移，即

$$y=\frac{l}{2}\left[\sin(\theta+\alpha)-\sin\alpha\right]+\frac{l}{2}\left[\sin(\theta-\alpha)+\sin\alpha\right] \tag{3}$$

经整理、合并、略去高阶项后，可得四连杆悬吊装置回复刚度为

$$k_y=\frac{P}{l\cos\alpha\left(1-\dfrac{2h}{b}\tan\alpha\right)} \tag{4}$$

如图1(b)所示，若不考虑连杆各铰接点的连接刚度以及连杆自身的结构变形，由于吊臂上下两端分别连接着转向架二系摇枕与四连杆机构上连杆，仅从横向载荷传递角度来看，转向架二系弹簧与四连杆机构等效回复弹簧可视为串联系统，理论上可通过优化四连杆机构回复刚度实现降低悬吊系统综合刚度的效果，考虑到小尺寸和螺旋圆钢簧或叠层橡胶弹簧的刚度通常比空气弹簧大很多，为了使悬吊系统的横向刚度接近于空气弹簧水平，需要对四连杆几何参数进行合理匹配。

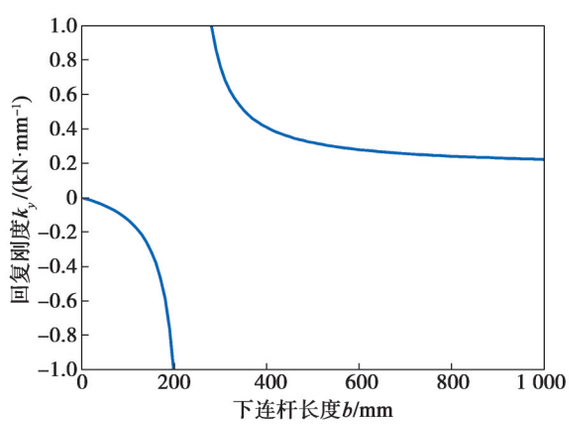
已知四连杆机构的初始设计参数为：a=300 mm，b=400 mm，α=6.633°，l=433 mm，H=430 mm，h=1 000 mm，AW0状态下P=3 t，AW3状态下P=7.5 t，根据式(4)可计算出AW0和AW3两种状态下的四连杆回复刚度k_y分别为0.163 kN/mm和0.409 kN/mm，而设计悬挂式单轨车辆初选的转向架二系弹簧横向刚度为5.6 kN/mm，可知整个四连杆悬吊系统在AW0和AW3两种状态下等效的综合横向刚度约为0.157 kN/mm和0.381 kN/mm，前者与传统地铁车辆空气弹簧刚度水平相当，后者则明显过大，见表1。

表1　地铁车辆空气弹簧横向刚度选型参考值[15]

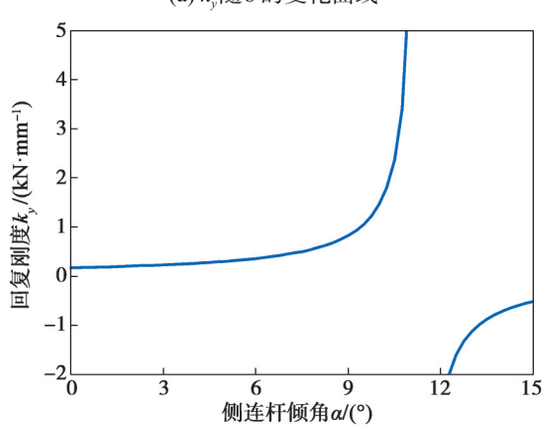
Table 1　Reference values for type selection of lateral stiffness of air spring for metro vehicle　　kN/mm

车型	空气弹簧横向刚度		空气弹簧垂向刚度	
	AW0	AW3	AW0	AW3
80 km/h等级A型地铁	0.205	0.260	0.370	0.750
100 km/h等级A型地铁	0.141	0.181	0.254	0.503
80 km/h等级B型地铁	0.199	0.258	0.424	0.662
120 km/h等级B型地铁	0.155	0.199	0.252	0.409

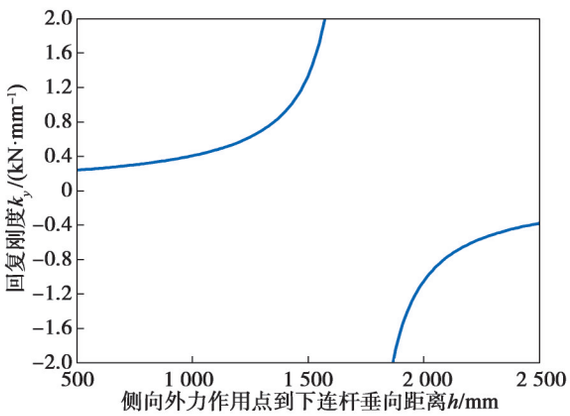
为了保证乘客的乘坐舒适性要求，以AW3状态为运用条件，对四连杆机构的初始几何参数进行单参数变量分析，其变化情况如图3所示。



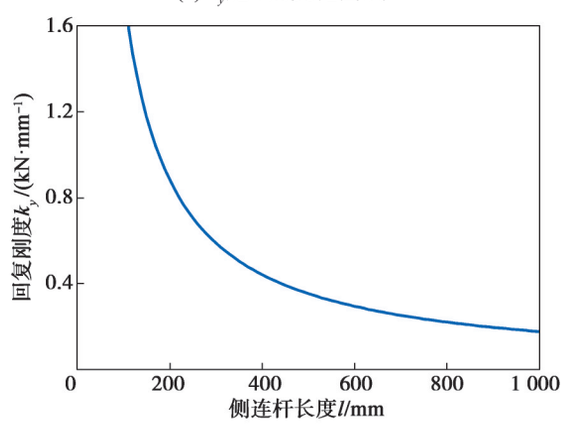
(a) k_y随b的变化曲线



(b) k_y随α的变化曲线



(c) k_y随h的变化曲线



(d) k_y随l的变化曲线

图3 四连杆几何参数影响

Fig. 3 Influence of geometrical parameters for four-link mechanism

由以上分析可知，在正回复刚度范围内，增大下连杆长度b、减小侧连杆倾角α、减小车体侧向外力作用点到下连杆垂向距离h、增大侧连杆长度l都有利于降低四连杆机构回复刚度，各变化曲线均呈现为非线性单调性，并不存在理想的最优值。借鉴传统地铁车辆性能参数设计经验，可根据空气弹簧选型参考值进行等效设计，考虑到悬挂式单轨车辆的特殊性，既要尽可能地使其具有等效于空气弹簧的横向特性，又要避免回复刚度过小不利于车体过弯时的正常回位。综上可知，四连杆回复刚度的理论目标值设定为0.2 MN/m左右即可。

此外，四连杆机构除受四边形几何形位约束外，由于设计车辆及其设备与外部环境在空间上具有一定的协调性要求，要确保车辆的基本位置参数不发生改变，同时也要避免出现负回复刚度等极端情况。因此，对四连杆机构进行回复刚度优化设计应满足如下要求：

$$\left.\begin{aligned}&\min \quad f=\left|k_y-0.2\right|\\&\text{s.t.} \quad g_1=a-b\in(-\infty,\ 0)\\&\qquad g_2=h+l\cdot\cos\alpha\in[1400,\ 1450]\\&\qquad g_3=\frac{2h}{b}\tan\alpha\in(-\infty,\ 1)\end{aligned}\right\}\tag{5}$$

经优化可知，符合上述条件的四连杆几何参数分别为：a=350 mm，b=400 mm，α=2.981°，l=481 mm，H=480 mm，h=950 mm，此时AW0和AW3两种状态下的四连杆悬吊机构回复刚度k_y分别为0.082 kN/mm和0.204 kN/mm，考虑二系弹簧刚度的串联效应后，得到优化后的悬吊系统综合横向刚度分别为0.081 kN/mm和0.196 kN/mm。

2 仿真与验证

上述针对四连杆悬吊装置回复刚度的理论推导和优化分析是基于四连杆机构始终处于微幅摆动状态的假设条件展开的，此条件基本符合车辆运行在直线或大半径曲线的情况，但对于车辆通过小半径曲线时受到强离心力、大侧风等情况，四连杆机构将处于大幅摆动状态，而式(4)也不再适用。为此，采用多体动力学方法进一步对四连杆悬吊机构回复刚度进行仿真研究。

以国内某型悬挂式单轨车辆为研究对象，在SIMPACK软件中建立由吊臂、左右吊梁、车体及其顶部连接装置组成的四连杆悬吊机构动力学模型。为了不失一般性，以步长为5°对左吊梁摆角进行等角度离散设置，通过运动学仿真可得到右吊梁、车体重心的运动轨迹和相应摆角，如图4和表2所示。

由此可知，式(4)中对四连杆悬吊机构回复刚度的等效是具有局限性的。首先，随着四连杆悬吊机构摆动幅度的逐渐增大，对左右吊梁摆角θ_1和θ_2的等量化处理已不再适用；其次，车体倾斜将引起车体重心位置发生变化，且这种变化随着摆角增大越来越显著，此时四连杆各铰点的载荷需要随之重新进行分配；再次，随着摆角的增大，四连杆悬吊机构回复刚度不再

表2 吊梁和车体重心摆角变化

Table 2 Swing angle change of suspension beam and car body center of gravity

吊梁摆角			车体摆角	吊梁摆角			车体摆角
θ_1/（°）	θ_2/（°）	$\lvert\theta_1-\theta_2\rvert/\theta_1$	θ_c/（°）	θ_1/（°）	θ_2/（°）	$\lvert\theta_1-\theta_2\rvert/\theta_1$	θ_c/（°）
5	4.963	0.74%	1.247	35	32.832	6.19%	9.292
10	9.845	1.55%	2.497	40	37.440	6.40%	10.742
15	14.660	2.27%	3.762	45	41.546	7.68%	12.424
20	19.392	3.04%	5.054	50	45.506	8.99%	14.239
25	24.043	3.83%	6.385	55	49.310	10.34%	16.201
30	28.497	5.01%	7.796	60	52.949	11.75%	18.325

是近似的定量，而是与摆动行程有关的变量。为此，通过动力学仿真计算得到四连杆悬吊机构在不同初始摆角条件下的动态回复刚度，如图5所示。

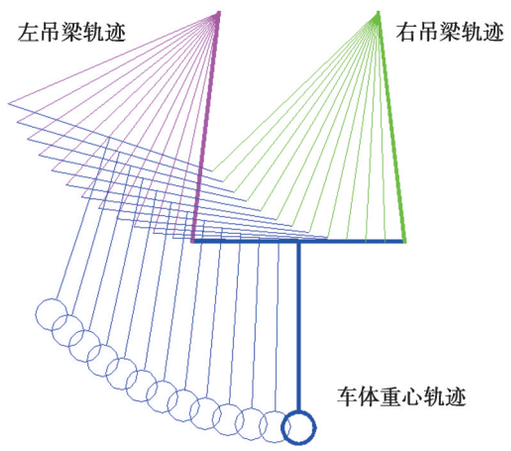


图4　四连杆悬吊机构轨迹简图

Fig. 4　Trajectory diagram of four-link suspension mechanism

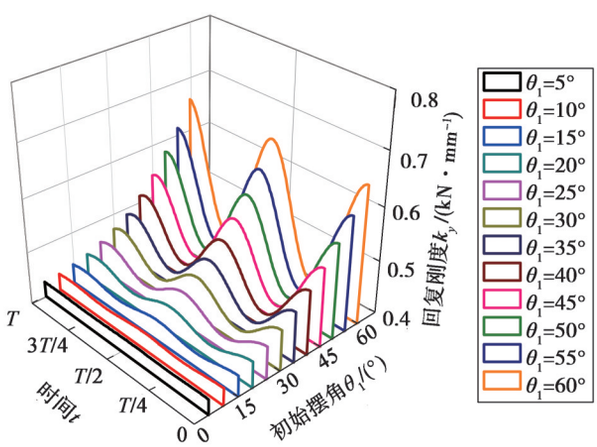


图5　四连杆悬吊机构动态回复刚度

Fig. 5　Dynamic recovery stiffness of four-link suspension mechanism

有图5可知，不同初始摆角条件下的四连杆悬吊机构回复刚度具有显著的差异，随着吊梁摆角θ_1从5°变化到60°，回复刚度从近似稳定状态逐渐演变为波动状态，初始摆角越大，回复刚度的波动性越显著。回复刚度的波动周期是基本相同的，波峰均出现在最大复原力位置，波谷均出现在平衡位置，回复刚度的谷值基本一致，但峰值差异较大。当初始吊梁摆角θ_1为5°时，回复刚度曲线可近似为恒定的静刚度，其一个周期内的平均值为0.430 kN/mm，略大于由式(4)计算得出的等效理论值，相对误差约为5%。当初始吊梁摆角θ_1为20°时，回复刚度的动态变化率约为10%，但当初始吊梁摆角θ_1为60°时，回复刚度的动态变化率将增至50%左右。从仿真结果来看，吊梁摆角θ_1在0°~20°范围内，即车体摆角θ_c在0°~5°范围内，将四连杆的动态回复刚度等效为近似的静刚度是符合一般工程设计要求的。因此，对悬挂式单轨车辆悬吊系统进行横向刚度优化时，采用式(4)进行初步参考设计是基本可行的，但其局限性也是显而易见的。

为了进一步验证上述回复刚度设计及优化结论的有效性，采用多体动力学软件SIMPACK建立整车动力学模型进行仿真研究，如图6所示。建模中，将车体、构架、摇枕、吊臂和吊梁等视为多自由度刚体；将叠层橡胶弹簧、横向止挡、抗横摆减振器、导向轮轮胎等视为非线性弹性或阻尼元件；车辆走行轮轮胎采用Pacejka理论模型[16]，不仅考虑轮胎的径向刚度和阻尼，而且考虑其侧偏及纵向滑动特性。整车模型共包括27个刚体和52个自由度，其相互运动关系如表3所示，其中“○”表示独立自由度。此外，走行轮和导向轮运行过程中受到的位移激扰均采用基于公路路面不平度A级标准的线路不平顺进行模拟，并根据实际线路情况对其作适当的增益。

表3　刚体自由度及其相互运动关系

Table 3　Degrees of freedom of rigid bodies and relations of relative movements

刚体	参考基准	刚体自由度					
		伸缩	横移	浮沉	侧滚	点头	摇头
		x	y	z	α	β	γ
车体（1个）	轨道	○	○	○	○	○	○
构架（2个）	轨道	○	○	○	○	○	○
摇枕（2个）	轨道	○	○	○	○	○	○
吊臂（2个）	摇枕						○
吊梁（4个）	吊臂				○		
走行轮（8个）	构架					○	
导向轮（8个）	构架						○

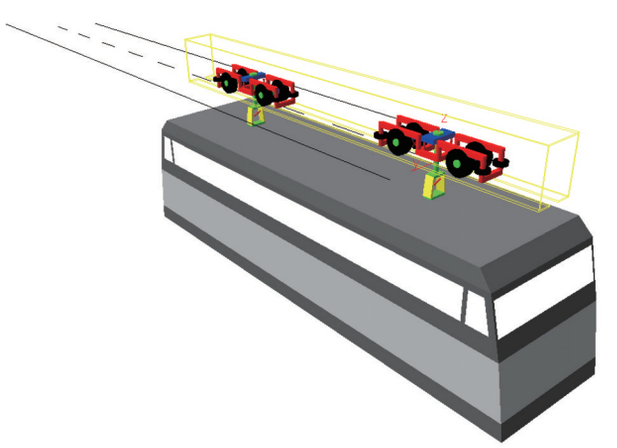
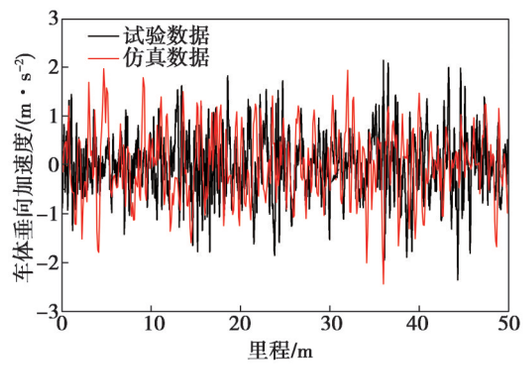


图6　悬挂式单轨整车动力学模型

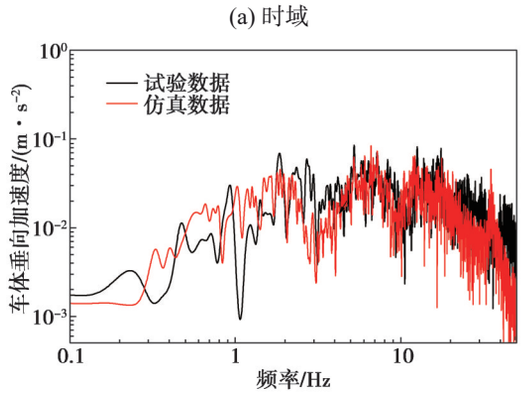
Fig. 6　Dynamics model of suspended monorail train

为了检验模型正确性，车辆以40 km/h速度在直线上匀速运行，计算得到的车体加速度仿真结果和部分线路试验数据[17]分别如图7和图8所示。由图7和图8可知，加速度在仿真和试验下的时域最大值比较接近，且两者在30 Hz频域范围内的幅值分布也具有较好的吻合性，说明车辆建模和线路激扰的增益设置是基本正确的。

为了量化说明四连杆几何参数优化设计的改善效果，采用以仿真为主并结合少量试验数据的方式对悬挂式单轨车辆进行横向运行性能评价分析。在直线工况下，车辆以 10~80 km/h 速度运行时，车体横向加速度 RMS 值和横向平稳性指标随速度的变化规律如图 9 和图 10 所示。



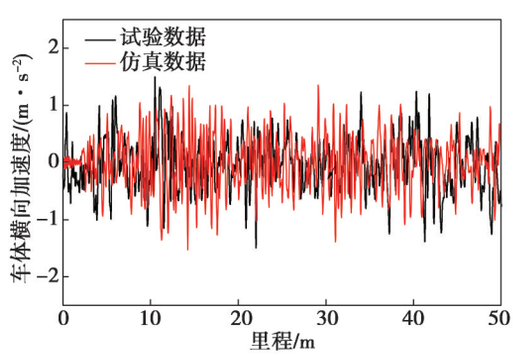
(a) 时域



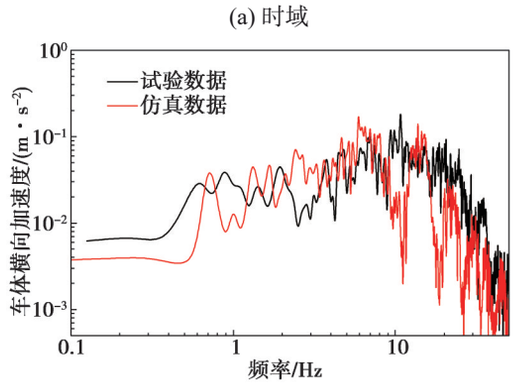
(b) 频域

图 7　车体垂向加速度对比

Fig. 7　Comparison of car body vertical acceleration



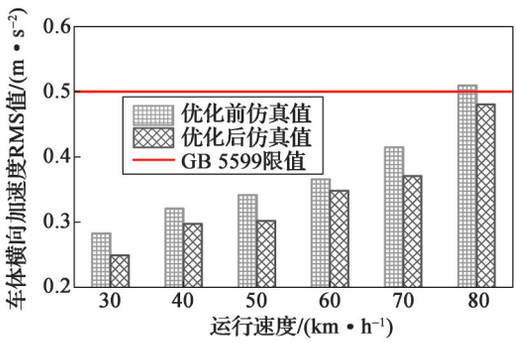
(a) 时域



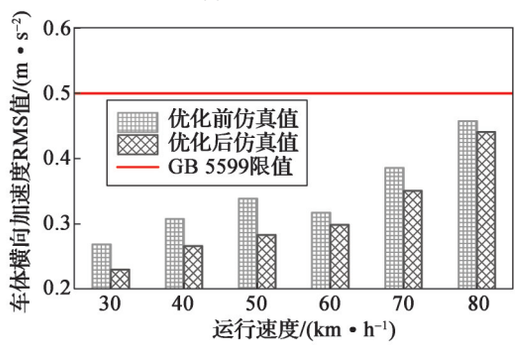
(b) 频域

图 8　车体横向加速度对比

Fig. 8　Comparison of car body lateral acceleration



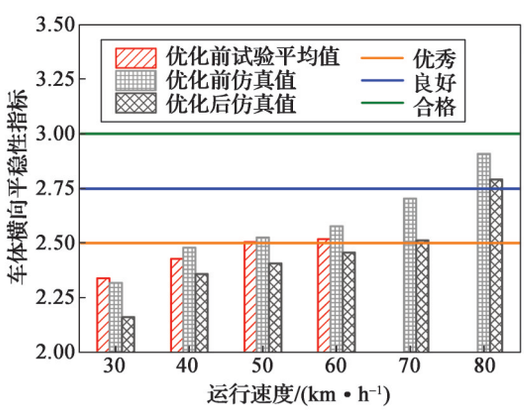
(a) AW0 状态



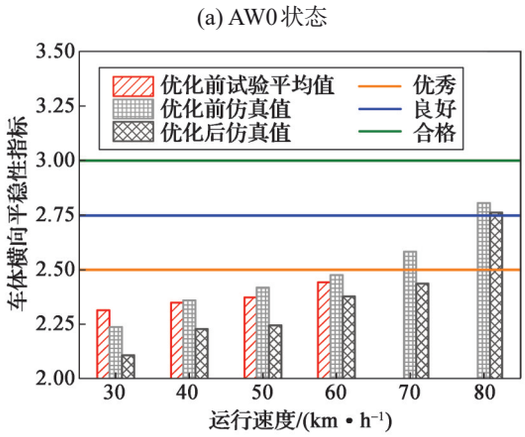
(b) AW3 状态

图 9　车体横向加速度 RMS 值对比

Fig. 9　Comparison of RMS values of car body lateral acceleration



(a) AW0 状态



(b) AW3 状态

图 10　车体横向平稳性指数对比

Fig. 10　Comparison of car body lateral sperling index

经比较可知，通过优化四连杆几何参数可提高整个悬吊系统的综合横向柔度，车体横向振动得到了显著的降低，各速度等级下的最大降幅达到13%。优化后，在空载或超载状态下，车辆在低于70 km/h速度范围内，车体横向加速度RMS值均小于0.5 m/s^2，在低于60 km/h速度范围内，车体横向平稳性指标均可达到优秀标准，较优化前的性能等级有了显著的提高。因此，由式(4)等效的四连杆悬吊机构回复刚度设计及优化在车辆直线运行工况下具有较好的适用性。

在曲线工况中，按照实际的单轨试验线条件进行模拟设置，即线路主要由半径为170 m和30 m的两段圆曲线段及相应的缓和曲线段和夹直线段组成，其分布情况见图11所示。

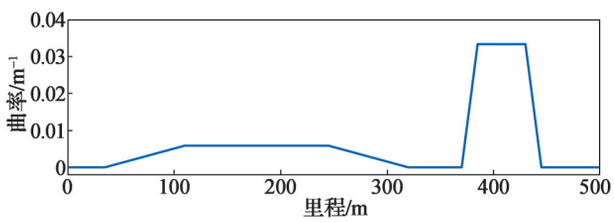


图11　线路曲线分布图

Fig. 11　Distribution of track curves

由于单轨试验线曲线段具有严格的限速要求，试验中车辆过弯速度比较低，此时主要关注车体低频滚摆运动。当车辆在AW3状态下以20 km/h速度连续通过两段小半径曲线时，仿真得到吊梁、摇枕和车体的相对位置变化情况，如图12和图13所示。

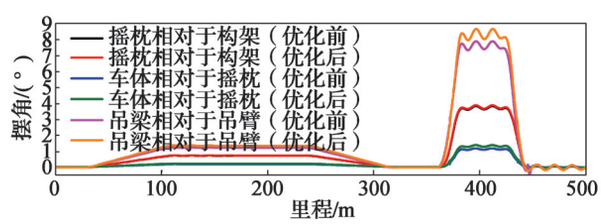


图12　摇枕、吊梁和车体的相对摆角变化

Fig. 12　Changes of the relative swing angles of bolster, suspension beam and carbody

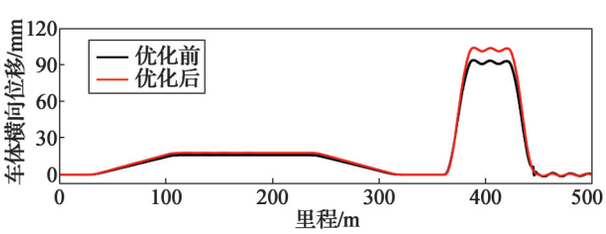


图13　车体横向位移变化

Fig. 13　Lateral displacement change of carbady

由仿真结果可知，车辆通过小半径曲线时，四连杆悬吊机构、摇枕连同吊臂都产生了不同程度的侧滚摆动。由于优化后四连杆悬吊机构的回复刚度较小，未平衡离心力作用下引起吊梁相对于吊臂、车体相对于摇枕的摆角比优化前略大一些，但摇枕相对于构架的摆角并未发生明显变化，这是因为在吊臂与构架之间设置了横向止挡，以限制车体发生过大横向位移。从车辆限界的角度而言，四连杆悬吊机构回复刚度降低将导致更大的车体动态包络轮廓，需要保证建筑物和车辆之间设置更大的安全距离。从车辆通过*R*30 m曲线仿真结果可知，由于四连杆悬吊机构回复刚度降低引起的车体横向位移增量并不与其刚度变化量成比例关系，优化后的回复刚度比优化前降低约50%，但车体横向位移仅增加约10%，因此，只要通过合理设置横向止挡间隙对吊臂的侧滚摆动限制得当，四连杆悬吊机构回复刚度降低引起的车体动态偏移问题是可以控制的。

3　结论与建议

针对悬挂式单轨车辆转向架二系橡胶弹簧柔度不足问题，本文对悬吊机构几何参数进行优化设计分析及验证，得出如下结论和建议：

①采用基于小摆角假设条件下的四连杆悬吊系统回复刚度等效公式对悬吊机构几何参数进行优化设计，理论上可以实现整个悬吊系统的综合横向刚度达到与空气弹簧相当的水平。

②结合实际悬挂式单轨车辆设计案例，通过多刚体动力学方法总结了四连杆悬吊机构回复刚度等效公式的适用范围和局限性，并利用整车动力学分析检验了悬吊系统优化设计方案的有效性。结果表明，通过优化四连杆几何参数降低悬吊系统回复刚度可显著提高悬挂式单轨车辆在直线工况下的车体横向运行品质，但在小半径曲线工况下会一定程度地增加车体动态偏移。

③本文对四连杆悬吊系统回复刚度的等效和优化方法为悬挂式单轨车辆设计提供了一些理论参考，但仅考虑四连杆悬吊机构的回复刚度特性往往是不全面的，其他如摆动固有频率特性、车辆动态偏移控制等问题还需进一步开展研究。

参考文献：

[1]　GIESEN U, MUELLER S. Die Fahrzeuge des H-Bahn-systems universitaet dortmund[J]. Verkehr und Technik, 1983, 36(10): 371-372.

[2]　MEISINGER R. Dynamic analysis of the Dortmund University campus sky train [J]. Schriftenreihe Georg-Simon-Ohm-Fachhochschule Nürnberg, 2006: 3-8.

[3]　齊藤勝 . 湘南モノレール江の島線の概要[J]. 新都市, 1970, 24(4): 55-59.

[4]　康兴东, 徐崇, 张国栋, 等 . 日本悬挂式单轨系统的应用与发展[J]. 国外铁道车辆, 2019, 56(5): 1-7.
KANG Xingdong, XU Chong, ZHANG Guodong, et al. Application and development of suspended monorail system in

Japan[J]. Foreign Rolling Stock, 2019, 56(5): 1-7.

[5] 冯遵委, 楚永萍, 何斌斌. 悬挂式单轨列车关键悬挂参数研究[J]. 城市轨道交通研究, 2017, 20(8): 41-44.
FENG Zunwei, CHU Yongping, HE Binbin. Study on the key suspension parameters of sky train[J]. Urban Mass Transit, 2017, 20(8): 41-44.

[6] 彭长福, 何国福. 新能源悬挂式单轨列车的设计[J]. 铁道机车与动车, 2017(11): 5-8.
PENG Changfu, HE Guofu. Design of new energy suspended-type monorail train[J]. Railway Locomotive and Motor Car, 2017(11): 5-8.

[7] 陈志辉, 翟婉明, 吕凯凯, 等. 悬挂式单轨车辆悬挂参数对运行平稳性的影响研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2018, 15(10): 2647-2653.
CHEN Zhihui, ZHAI Wanming, LYU Kaikai, et al. Investigation on influences of the suspension parameters on running stability for suspended monorail vehicle[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2018, 15(10): 2647-2653.

[8] 陈志辉, 翟婉明, 朱胜阳, 等. 基于准零刚度理论的悬挂式单轨车辆二系悬挂系统研究[J]. 振动与冲击, 2019, 38(2): 13-17.
CHEN Zhihui, ZHAI Wanming, ZHU Shengyang, et al. Performance study on the secondary suspension system of a suspended monorail vehicle based on the quasi-zero-stiffness theory[J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38 (2): 13-17.

[9] 李天一, 王伯铭, 张德乾, 等. 空气弹簧对悬挂式单轨车动力学性能影响分析[J]. 机械工程与自动化, 2015(6): 51-53.
LI Tianyi, WANG Boming, ZHANG Deqian, et al. Influence of air spring on dynamic performance of suspended monorail vehicle[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2015(6): 51-53.

[10] LYU Kaikai, WANG Kaiyun, CHEN Zhihui, et al. Influence of wheel eccentricity on vertical vibration of suspended monorail vehicle: experiment and simulation[J]. Shock and Vibration, 2017, 2017: 1367683.

[11] 李忠继, 林红松, 颜华, 等. 空轨列车系统横向运动稳定性研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2016, 13(3): 564-569.
LI Zhongji, LIN Hongsong, YAN Hua, et al. Study on the lateral motion stability of sky train system[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2016, 13(3): 564-569.

[12] 谢毅, 寇峻瑜, 余浩伟, 等. 悬挂参数对悬挂式单轨车横向稳定性影响分析[J]. 铁道工程学报, 2019, 36(12): 35-40.
XIE Yi, KOU Junyu, YU Haowei, et al. Analysis of the influence of suspension parameters on lateral stability of suspended monorail train[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2019, 36(12): 35-40.

[13] 青岛四方车辆研究所有限公司. 轨道车辆用空气弹簧产品目录[Z]. 青岛: 青岛四方车辆研究所有限公司, 2009.
Qingdao Sifang Rolling Stock Research Institute Co., Ltd. Product catalog of air springs for rail vehicles [Z]. Qingdao: Qingdao Sifang Rolling Stock Research Institute Co., Ltd., 2009.

[14] 株洲时代新材料科技股份有限公司. 轨道交通用空气弹簧产品目录[Z]. 株洲: 株洲时代新材料科技股份有限公司, 2011.
Zhuzhou Times New Material Technology Co., Ltd. Product catalog of air springs for rail transit[Z]. Zhuzhou: Zhuzhou Times New Material Technology Co., Ltd., 2011.

[15] 中车南京浦镇车辆有限公司. 地铁车辆转向架产品平台介绍[Z]. 南京: 中车南京浦镇车辆有限公司, 2014.
CRRC Nanjing Puzhen Co., Ltd. Introduction of bogie product platform for metro vehicles[Z]. Nanjing: CRRC Nanjing Puzhen Co., Ltd., 2014.

[16] PACEJKA H B. Tyre and vehicle dynamics[M]. 2nd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2006.

[17] 西南交通大学. 悬挂式空轨列车运行平稳性测试报告[Z]. 成都: 西南交通大学, 2017.
Southwest Jiaotong University. The test report of running stability for suspended air-rail train[Z]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017.