

基于主成分分析赋权的变轨距列车 悬挂参数优化

刘玉梅¹, 胡婷¹, 庄娇娇², 盛佳香¹, 周殿买³

(1. 吉林大学 交通学院, 长春 130022; 2. 临沂大学 机械与车辆工程学院, 山东 临沂 276000; 3. 中车长春轨道客车股份有限公司, 长春 130062)

摘要:为改善变轨距列车不同轨距线路上的运行性能,采用基于 PCA 赋权的信噪比方法对悬挂参数进行优化设计。基于 SIMPACK 建立 1 435/1 520 mm 变轨距列车的动力学仿真模型,采用参数试验法结合 Pareto 图筛选出关键悬挂参数,基于最优拉丁超立方采样方法选取 200 组关键悬挂参数进行仿真试验,对输出的动力学指标进行加权信噪比分析,通过主成分分析对子目标权重进行赋值,得到变轨距列车综合两种轨距下的关键悬挂参数的优化值。对优化结果进行试验验证表明:优化后的车辆在两种轨距线路上的动力学性能均满足标准要求,且具有更好的动力学性能。

关键词:铁路运输;变轨距列车;参数优化;动力学指标;最优拉丁超立方;主成分分析

中图分类号:U297.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5497(2024)11-3158-10

DOI:10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20230065

Optimization of suspension parameters for variable-gauge trains based on the PCA assignment

LIU Yu-mei¹, HU Ting¹, ZHUANG Jiao-jiao², SHENG Jia-xiang¹, ZHOU Dian-mai³

(1. College of Transportation, Jilin University, Changchun 130022, China; 2. School of Mechanical and Vehicle Engineer, Linyi University, Linyi 276000, China; 3. CRRC Changchun Railway, Vehicles Co., Ltd., Changchun 130062, China)

Abstract: In order to improve the running performance of variable-gauge trains when working on different gauge lines, a PCA assigned signal-to-noise ratio-based method is used to optimize the suspension parameters. It established the dynamic simulation model of 1 435/1 520 mm high-speed variable-gauge train based on SIMPACK. The key suspension parameters were selected by parameter test method Pareto diagram. Based on the optimal Latin hypercube design method, 200 groups of key suspension parameters were selected for simulation test. The signal-to-noise ratio is used to analyze the dynamic performance. Assigning the weights of various dynamic indicators through principal component analysis, and obtain the optimized values of key suspension parameters for variable-gauge trains under two different gauge combinations. The results of parameter optimization are tested and verified, which show that the dynamic performance of the optimized suspension parameters on the two gauges meets the standard requirements,

收稿日期: 2023-01-21.

基金项目: 吉林省科技厅重点研发项目(20200401108GX); 吉林省科技厅重大研发专项项目(20210301006GX).

作者简介: 刘玉梅(1966-), 女, 教授, 博士. 研究方向: 车辆智能化检测与轨道车辆装备. E-mail: lymls@163.com

and the vehicle has better dynamic performance.

Key words: railway transportation; variable-gauge trains; optimize parameter; dynamic index; the optimal Latin hypercube; principal component analysis

0 引言

近年来,随着我国“一带一路”“制造强国”和“交通强国”等战略的提出和推进,铁路运输业得到迅猛发展^[1]。但我国与邻国轨道的轨距差异^[2],制约了不同轨距区域间铁路运输的便利性,而实行轨距统一在经济成本和政治因素等方面都受到较大阻力,因此,开发变轨距列车具有重要现实意义。但变轨距列车变轨前后轮轨匹配关系、轮对内侧距等均发生变化,导致动力学性能产生差异,使得某种轨距下的动力学性能下降^[3,4]。因此,对变轨距列车的悬挂参数进行调整和优化,使车辆在不同轨距下各项动力学性能均得到改善是非常必要的。

悬挂参数优化是提高车辆运行性能的重要技术手段^[5-10],国内外已有较多研究。Qiu等^[7]建立高速列车垂向动态模型,对悬挂参数布局和减振器参数进行优化,减轻了车辆垂向振动。Chen等^[11,12]采用目标级联或协同多目标优化策略对轨道车辆悬挂参数进行优化,使得轨道车辆的运行稳定性得到提高。针对车辆横向稳定性问题,姚远等^[13]提出基于健壮稳定性方法,采用遗传算法和参数筛选方法挖掘转向架关键悬挂参数匹配关系;文献^[14,15]对轨道车辆悬挂系统采用基于正交试验的稳健性优化设计,提高了车辆运行品质;文献^[16,17]基于稳健性优化方法,以降低车辆脱轨系数和轮重减载率等动力学性能为优化目标,获得悬挂参数多目标优化结果;文献^[18~20]通过对减振器参数或二系悬挂系统部分参数进行优化,提高了车辆运行稳定性和平稳性。通过分析发现,上述关于高速列车悬挂参数多目标优化方法,多目标求解因子未能全面考虑高速列车运行过程中各项动力学指标,而某一项或几项动力学性能达到最优时,可能会导致其他性能欠佳。基于传统方法的研究试验样本数较少,目标函数权重选取依赖于主观赋权,存在较大的局限性。

故本文考虑轨距为 1 435/1 520 mm 的高速变轨距列车,建立该变轨距列车的动力学模型,对

其在两种轨距下运行时的运行稳定性、运行品质和运行平稳性进行多目标优化,采用最优拉丁超立方方法对关键悬挂参数进行采样设计,并对不同悬挂参数下所得各项动力学指标进行信噪比分析,优化结果使得变轨距列车在不同轨距线路运行时的各项动力学性能均得到改善,研究工作能够为高速变轨距转向架的设计提供理论参考。

1 变轨距车辆动力学仿真模型

1.1 变轨距转向架主要动力学计算参数

依据高速变轨距车辆的拓扑结构,搭建变轨距车辆动力学模型^[21,22],拓扑结构如图 1 所示。

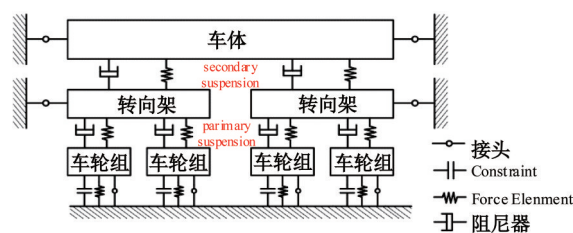


图 1 轨道车辆系统拓扑结构

Fig. 1 Topological relation diagram of rail vehicle system

根据高速变轨距车辆动力学理论^[23]和拓扑结构,基于 SIMPACK 建立包含 1 个车体、2 个构架和 4 个轮对的 7 刚体单车模型,其中变轨距车辆的一系悬挂装置主要包括轴箱弹簧、垂向减振器以及定位转臂;二系悬挂装置主要包括空气弹簧、横向减振器、抗蛇行减振器、横向缓冲装置、抗侧滚扭杆和牵引装置,给定变轨距列车主要动力学参数如表 1 所示。

1.2 轮轨接触关系及线路模型

本文所研究的变轨距列车能适应 1 435 mm/1 520 mm 的轨距变换,车辆在完成轨距变换后行驶在新的轨距轨面上,不同钢轨轨面与轮对踏面接触产生不同的轮轨接触关系。为模拟变轨前后的轮轨关系,本文参考文献^[23]优选变轨距列车的车轮踏面类型为 LMA 踏面,在 1 435 mm 轨距下,轮轨关系采用 LMA 型踏面与我国 CN60 钢轨配合,轨底坡 1:40;在 1 520 mm 轨距下,轮轨关系采用 LMA 型踏面与俄罗斯 P65 钢轨配合,轨

表1 变轨距车辆主要悬挂参数
Table 1 Main suspension parameters of variable-gauge vehicle

部件名称	悬挂参数	刚度/ (kN·mm ⁻¹)		阻尼/ (kN·s·m ⁻¹)	
		数值	符号	数值	符号
一系悬挂	纵向	10 000	K_{Px}	30	C_{Px}
	横向	6 000	K_{Py}	30	C_{Py}
	垂向	1 000	K_{Pz}	30	C_{Pz}
二系悬挂	纵向	200	K_{Sx}	20	C_{Sx}
	横向	200	K_{Sy}	20	C_{Sy}
	垂向	335	K_{Sz}	40	C_{Sz}
	抗蛇行减振器阻尼	—	—	300	C_{yd}
	抗侧滚扭杆等效刚度	4 150	K_{at}	—	—

底坡 1:20。

本文的线路模型设定直线和曲线两种道路线型。根据高速铁路线路设计标准^[24],分别设置直线线路长 10 000 m;曲线线路的直线段(STR)长 400 m,缓和曲线(BLO)长 550 m,圆曲线(CIR)长 300 m,曲线半径 7 000 m,内轨超高 150 mm;轨距设置为 1 435 mm 和 1 520 mm;采用德国低激励轨道谱对轨道模型施加激励。根据以上参数建立的变轨距车辆动力学仿真模型如图 2 所示。

通过对本文所建车辆模型进行预载荷分析和线性分析,结果显示最大残余加速度小于 0.001 m/s²,所有特征根的实部为负,表明模型达到平衡且车辆系统稳定,证明本文所建模型正确。



图2 变轨距车辆动力学仿真模型
Fig. 2 Dynamic simulation model of variable-gauge train

2 悬挂参数多目标优化设计

2.1 筛选关键悬挂参数

通过参数试验法分析悬挂参数变化对变轨距车辆动力学性能的影响,本文按照《机车车辆动力学性能评定及试验鉴定规范》(GB/T 5599—2019)^[25]对高速变轨距列车的动力学性能进行分析与评定。悬挂装置的主要参数有 K_{Px} 、 K_{Py} 、 K_{Pz} 、 C_{Px} 、 C_{Py} 、 C_{Pz} 、 K_{Sx} 、 K_{Sy} 、 K_{Sz} 、 C_{Sx} 、 C_{Sy} 、 C_{Sz} 、 C_{yd} 、 K_{at} ,采用变化系数法,设各参数取值边界为原参数值

的±20%,步长为0.25,以车辆最高试验速度 385 km/h(标准规定为运营速度 350 km/h的 1.1倍)进行仿真试验。通过计算悬挂参数变化时的车辆动力学性能的各项评价指标,去掉导致动力学性能变差的悬挂参数,如 C_{Px} 、 C_{Py} 和 C_{Sx} ,采用 Pareto 图分析其余悬挂参数对动力学评价指标改善的贡献度。各悬挂参数对动力学指标的 Pareto 图如图 3(a)~(g)所示,横坐标按影响程度的大小各影响因素从左至右降序排列,纵坐标正百分比表示随悬挂参数增大,动力学评价指标增大;负百分比表示随悬挂参数的增大,动力学评价指标减小。

统计图 3(a)~(g)中各项动力学评价指标贡献度大于 4% 的悬挂参数,最终选取 K_{Px} 、 K_{Py} 、 C_{Pz} 、 K_{Sy} 、 C_{Sy} 、 C_{yd} 作为影响变轨距车辆动力学性能的关键悬挂参数,其余参数保持表 1 的设计值。

2.2 悬挂参数初步设计

针对影响变轨距车辆动力学性能的关键悬挂参数,采用试验设计法对关键悬挂参数进行优化设计。试验设计法中的最优拉丁超立方设计(opt LHD)方法在空间填充能力和样本点分布的均匀性方面均优于常用的拉丁超立方(LHD)设计方法、正交数组法、参数试验法、全因子试验和部分因子试验设计,图 4 为 LHD 方法和 opt LHD 方法的设计示意图。

由图 4 可知,最优拉丁超立方采样方法具有较好的空间均匀分布性,本文采用 opt LHD 方法对上述关键悬挂参数进行采样,由于本文有 6 个设计变量,每个变量有 200 个设计区间,利用该方法首先生成规范化样本参数值,折算成相应的悬挂参数性能值,最终生成 6×200 个设计变量的性能参数值。以获得的 200 组关键悬挂参数随机组合矩阵作为输入,以车辆在不同线路上运行的动力学性能指标作为输出,将轨距变化和轮轨接触关系变化视为不可控因素,仿真速度为 385 km/h,最终获得变轨距列车在综合两种轨距下的脱轨系数、轮重减载率、轮轴横向力、构架横向加速度、车体横向加速度、车体垂向加速度和舒适度指标等 7 项动力学性能指标分别如图 5 所示。

由图 5 可知,试验范围内未出现失稳工况,变轨距列车的各项动力学指标均满足标准限值要求,因此,下文对此 200 组参数进行进一步优选。

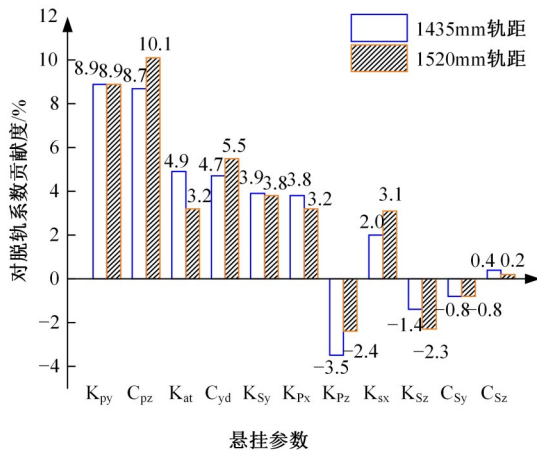
2.3 悬挂参数多目标优化

文采用信噪比(Signal-noise ratio, S/N)进行参数优化,信噪比值越大,说明试验参数的稳健性越强^[26]。目标函数为变轨距车辆在两种轨距下的脱轨系数 y_1 、轮重减载率 y_2 、轮轴横向力 y_3 、构架横向加速度 y_4 、车体横向加速度 y_5 、车体垂向加速度 y_6 和乘坐舒适度 y_7 ,优化目标为综合以上目

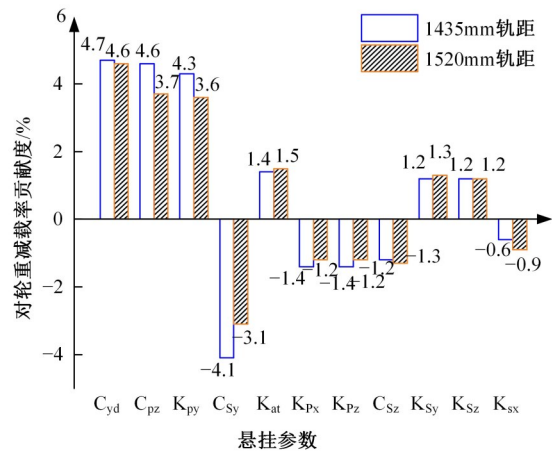
标函数的最小值。本文选取望小特性来评价设计参数的优劣,期望试验的各项动力学指标 f_i 越小越好,望小特性的信噪比计算公式如式(1)所示:

$$y_i = -10 \cdot \lg \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_i^2 \right] \quad (1)$$

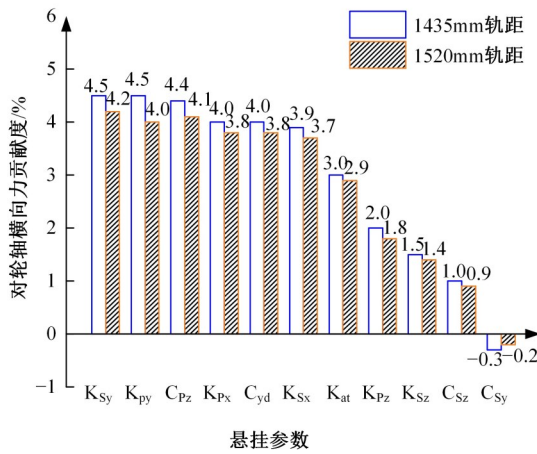
为确定多目标优化结果,对上述7个目标函数的信噪比进行加权平均,综合信噪比 η 的计算



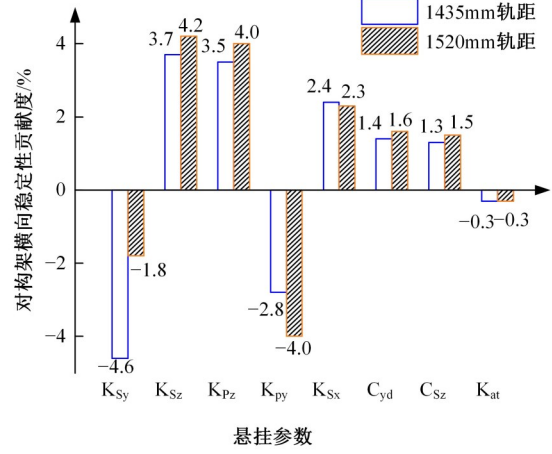
(a)



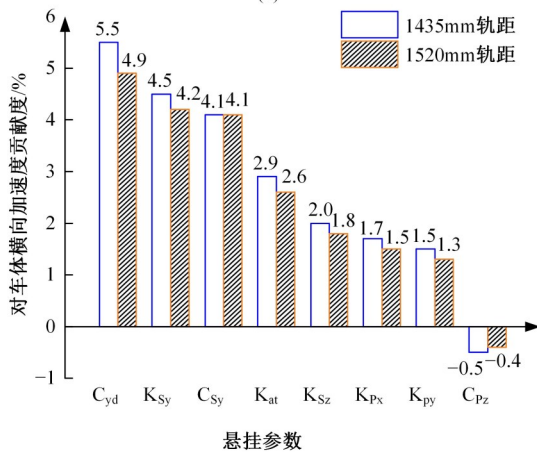
(b)



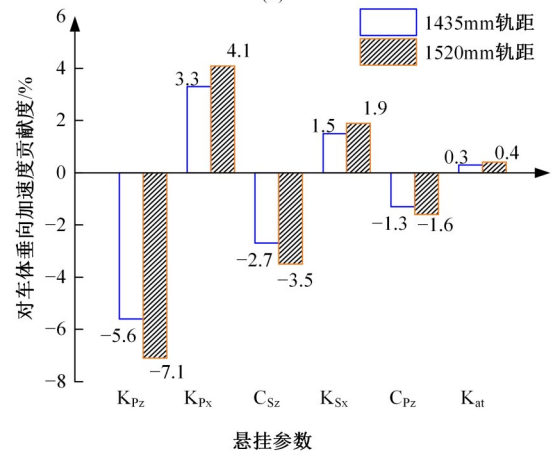
(c)



(d)



(e)



(f)

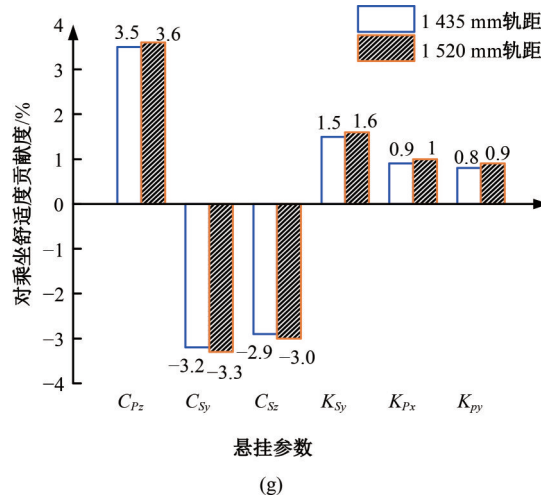


图 3 悬挂参数对动力学指标影响的 Pareto 图

Fig. 3 Pareto diagram of the influence of suspension parameters on dynamic indexes

式如下所示:

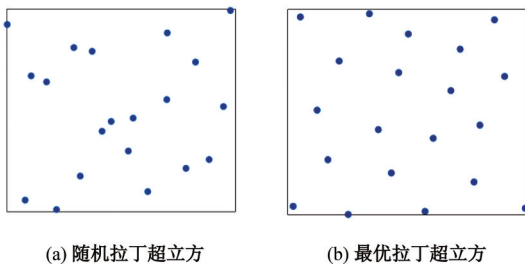


图 4 两种拉丁超立方试验设计示意图

Fig. 4 Experiment design diagram of two LHD methods

$$\eta = \omega_1 y_1 + \omega_2 y_2 + \omega_3 y_3 + \omega_4 y_4 + \omega_5 y_5 + \omega_6 y_6 + \omega_7 y_7 \quad (2)$$

为保证评价的客观性,本文采用主成分分析(PCA)赋权法对 7 项动力学指标进行权重赋值^[27]。假设有 n 个样本,每个样本有 p 个观测指标,将 p 个指标看作 p 个随机变量,记为 $X = (x_1, x_2, \dots, x_p)'$ 。

$$\text{即 } X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{p1} & x_{p2} & \dots & x_{pn} \end{bmatrix}, \text{对 } X \text{ 进行线性变}$$

换,生成新的综合指标即主成分,记为 Y_1, Y_2, \dots, Y_p ,则主成分的数学模型为:

$$LX = \begin{cases} Y_1 = l_{11}x_1 + l_{12}x_2 + \dots + l_{1p}x_p \\ Y_2 = l_{21}x_1 + l_{22}x_2 + \dots + l_{2p}x_p \\ \vdots \\ Y_p = l_{p1}x_1 + l_{p2}x_2 + \dots + l_{pp}x_p \end{cases} \quad (3)$$

$L - p \cdot p$ 阶主成分系数矩阵,表示为: $L =$

$$\begin{pmatrix} l_{11} & l_{12} & \dots & l_{1p} \\ l_{21} & l_{22} & \dots & l_{2p} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ l_{p1} & l_{p2} & \dots & l_{pp} \end{pmatrix} \circ$$

当模型满足以下条件: Y_1, \dots, Y_p 互不相关; $S^2(Y_1) > S^2(Y_2) > S^2(Y_p)$ 时,定义 Y_1 为第一主成分, Y_2 为第二主成分,以此类推。因此, Y 的协方差矩阵是一个对角矩阵,即 $\text{Var}(Y) =$

$$\text{Var}(AX) = \begin{bmatrix} \lambda_1 & & & \\ & \lambda_2 & & \\ & & \dots & \\ & & & \lambda_p \end{bmatrix}, \lambda_k = (1, 2, \dots, p) \text{ 是协方}$$

差矩阵的特征值,则第 k 个主成分贡献率为 $\lambda_k / \sum_{i=1}^p \lambda_i$,前 m 个主成分的累计贡献率为

$$\sum_{k=1}^m \lambda_k / \sum_{i=1}^p \lambda_i, \text{经主成分分析后,得到 7 个动力学指}$$

标的特征值及贡献率如表 2 所示。

通常累计贡献率达到 8%~90%^[27],基本能够保证数据信息量,因此,本文根据累计贡献率确定主成分个数为 4,由表 2 可知,前 4 项累计方差贡献率为 97.79%,能够代表原有全部 7 项指标的信息,所以取前 4 个作为主成分计算权值。各目标函数的主成分系数如表 3 所示。

前 4 项主成分修正后的方差贡献率分别为 68.43%、21.50%、6.16%、3.91%。目标函数权值等于对该目标指标在前 4 项主成分线性组合中的系数(见表 3)分别乘以该主成分的修正方差贡献率结果之和,权值计算按照下式:

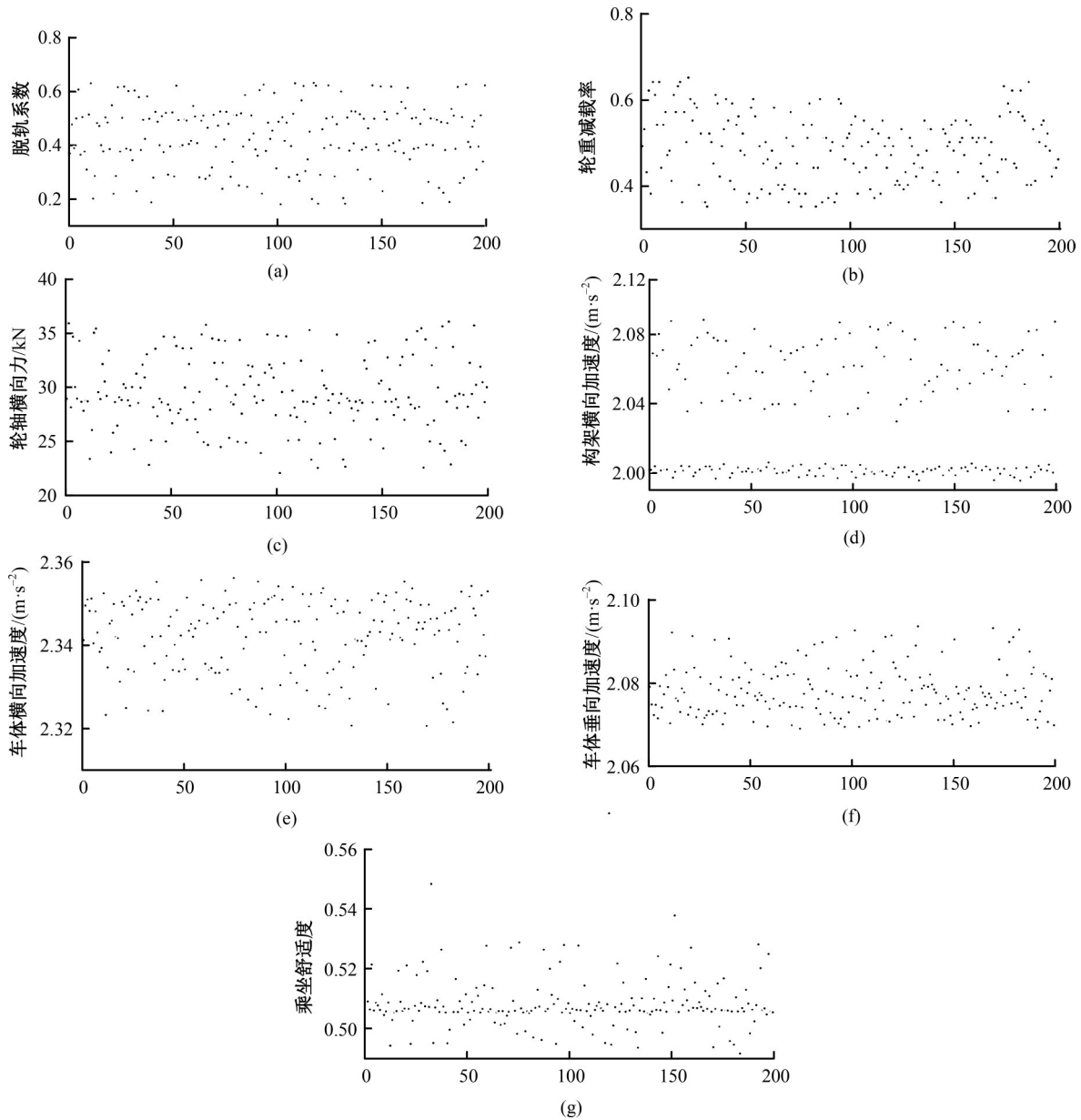


图 5 各项动力学指标结果

Fig. 5 Results of each dynamic indexes

表 2 主成分矩阵的特征分析表

Table 2 Characteristic analysis of principal component matrix

主成分	特征值	方差贡献率%	累计方差贡献率%
PC1	4.684 077	66.915 379 070	66.915 379 07
PC2	1.471 764	21.025 194 180	87.940 573 25
PC3	0.421 576	6.022 509 130	93.963 082 38
PC4	0.267 800	3.825 713 382	97.788 795 77
PC5	0.128 945	1.842 077 895	99.630 873 66
PC6	0.022 652	0.323 603 401	99.954 477 06
PC7	0.003 187	0.045 522 938	1.000 000 00

$$\omega_i = \sum_{k=1}^m \left(a_{ik} \cdot \lambda_k / \sum_{k=1}^m \lambda_k \right) \quad (4)$$

经计算得到 7 项指标在各主成分线性组合中的权重为 0.267、0.322、0.327、0.338、0.164、0.201、0.235,归一化处理得到各指标权重系数为 0.144、0.174、0.176、0.182、0.089、0.108、0.127。最终得到综合信噪比 η ：

$$\eta = 0.144y_1 + 0.174y_2 + 0.176y_3 + 0.182y_4 + 0.089y_5 + 0.108y_6 + 0.127y_7 \quad (5)$$

根据式(5)求解仿真试验所得到的动力学指标的加权平均信噪比,结果如图 6 所示。

表 3 7 个目标函数的主成分系数
Table 3 Principal component coefficients of 7 objective functions

目标函数	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7
y_1	0.441 003	-0.057 860	-0.362 410	0.132 034	0.295 432	0.751 698	0.032 657
y_2	0.444 594	0.060 217	0.077 810	-0.091 110	0.676 266	-0.453 320	-0.348 590
y_3	0.383 783	0.065 399	0.818 817	-0.230 360	-0.196 510	0.293 152	-0.018 700
y_4	0.349 090	0.445 059	0.047 718	0.702 023	-0.158 470	-0.222 980	0.331 832
y_5	0.385 442	-0.420 560	-0.148 340	-0.338 300	-0.076 160	-0.270 110	0.677 751
y_6	0.410 927	-0.304 010	-0.244 770	0.089 281	-0.585 300	-0.144 050	-0.554 540
y_7	0.145 849	0.722 061	-0.328 560	-0.553 120	-0.208 040	-0.009 040	-0.009 870

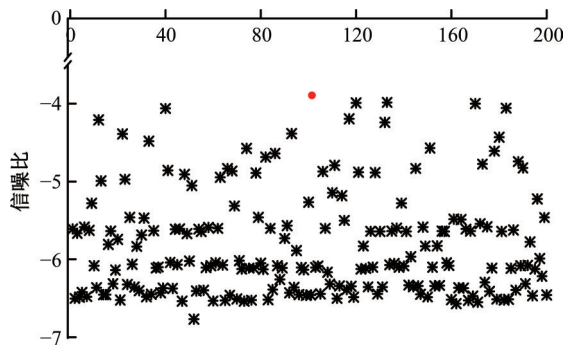
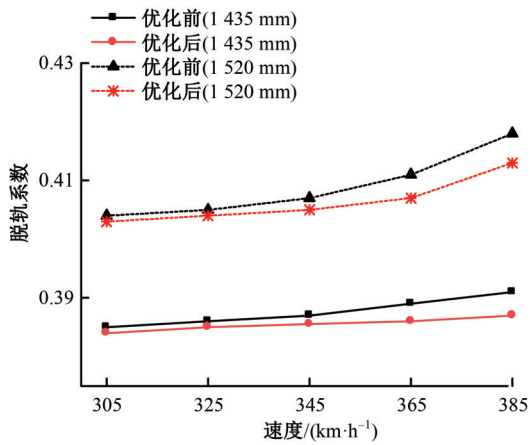


图 6 动力学指标的加权信噪比
Fig. 6 Weighted SNR of dynamic indexes

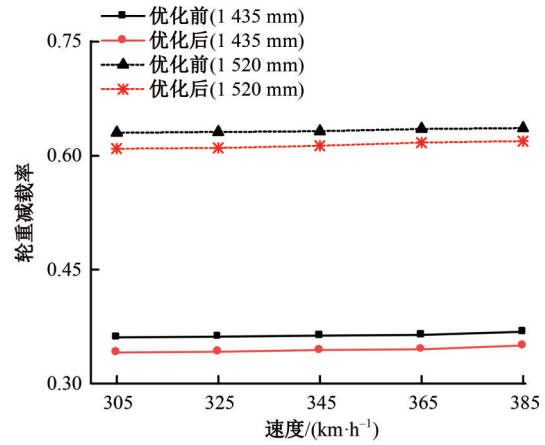
由图 6 可知,最大的加权信噪比为第 102 组试验时得到,因而得到综合两种轨距下动力学性能最佳的关键悬挂参数优化值为:一系纵向刚度(K_{Px})为 8 078 kN/m、一系横向刚度(K_{Py})为 4 847 kN/m、一系垂向阻尼(C_{Pz})为 24 kN·s/m、二系横向刚度(K_{Sy})为 162 kN/m、二系横向阻尼(C_{Sy})为 16 kN·s/m、抗蛇行减振器阻尼(C_{yd})为 242 kN·s/m。

3 动力学性能验证

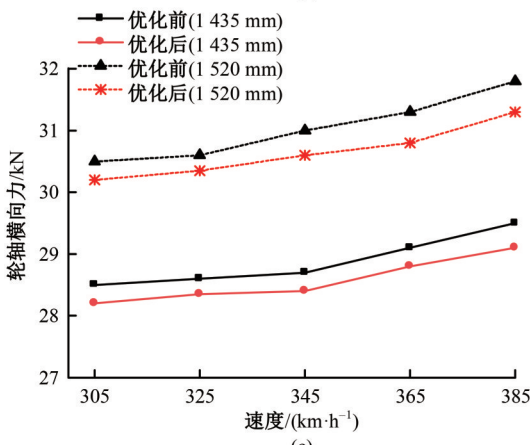
对优化前后的关键悬挂参数进行变轨距车辆



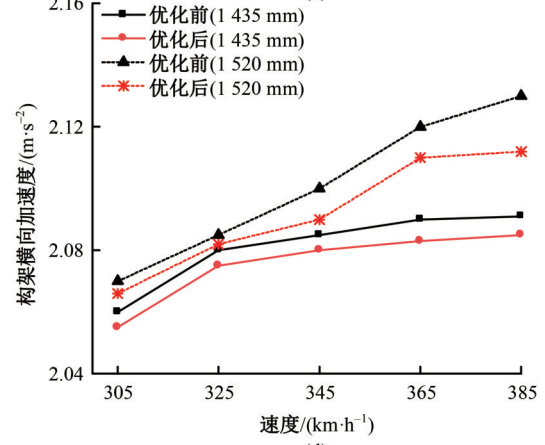
(a)



(b)



(c)



(d)

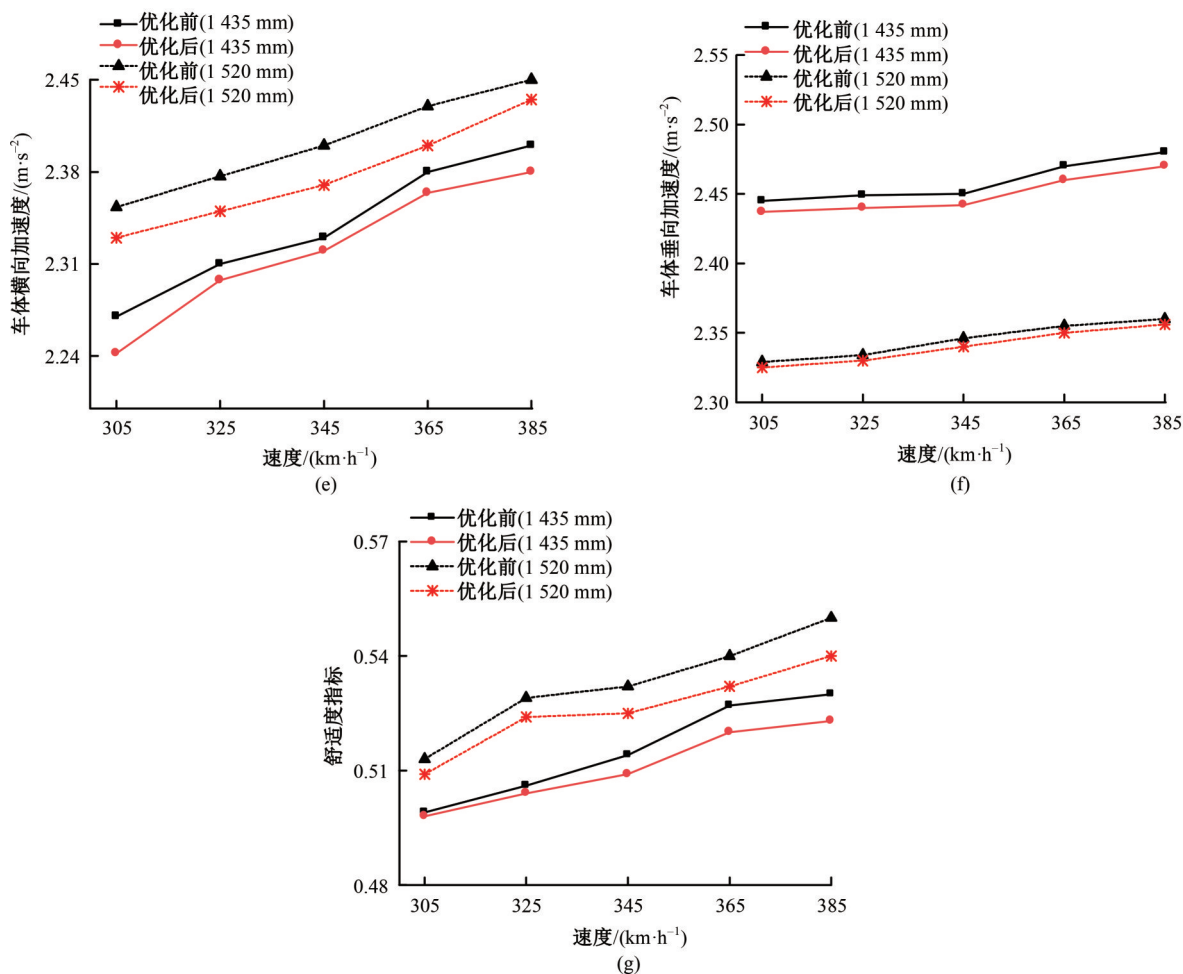


图 7 优化前后动力学指标对比

Fig. 7 Comparison of dynamic indexes before and after optimization

动力学性能对比,对比结果如图 7 所示。

由图 7 可知,除车体垂向加速度外,列车在 1 435 mm 轨距上的运行性能优于 1 520 mm 轨距;应用优化后的悬挂参数,各项动力学性能指标的仿真曲线均有所下降,其中轮重减载率优化率最大。但总体来看,本文优化计算结果可以兼顾车辆的运行稳定性、平稳性和运行品质,应用优化后的悬挂参数使得变轨距车辆在不同轨距线路上的运行性能均得到了改善。

4 结束语

基于 SIMPACK 建立 1 435/1 520 mm 高速变轨距列车仿真模型,用参数试验法筛选对动力学性能影响较大的关键悬挂参数,通过 Pareto 图分析得到一系纵向刚度、一系横向刚度、一系垂向阻尼、二系横向刚度、二系横向阻尼、抗蛇行减振器阻尼作为影响变轨距车辆动力学性能的关键悬挂参数;基于最优拉丁超立方试验选取 200 组关

键悬挂参数组合进行仿真试验,利用信噪比分析对关键悬挂参数进行多目标优化,各子目标权重的选择采用基于 PCA 的权重赋值方法,最终确定了兼顾两种轨距下动力学性能的最优悬挂参数组合;对比关键悬挂参数优化前后不同轨距下变轨距列车的动力学性能,结果证明经过参数优化后车辆的动力学性能得到提升,证明了本文所用参数优化方法的有效性,研究工作能为高速变轨距列车的悬挂系统设计提供理论参考。

参考文献:

- [1] 谭皓尹, 黄运华, 李芾, 等. 丝绸之路经济带背景下变轨距转向架的发展研究[J]. 机械工程与自动化, 2017(2): 217-219.
Tan Hao-yin, Huang Yun-hua, Li Fu, et al. Gauge-changeable bogie study under background of silk road economic belt[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2017(2): 217-219.
- [2] 李典易, 陈勇. 亚欧大陆跨境铁路的轨距问题[J].

- 社会科学文摘, 2020(2): 39-41.
- Li Dian-yi, Chen Yong. The break-of-gauge problem of cross-border railways on the Eurasian continent [J]. The Journal of International Studies, 2020(2): 39-41.
- [3] 周殿买, 徐彬, 黄志辉, 等. 400 km/h 高速动车组变轨距走行系统关键技术研究[J]. 机车电传动, 2020, 2020(2): 23-25.
- Zhou Dian-mai, Xu Bin, Huang Zhi-hui, et al. Key technology design of variable gauge running system for 400 km/h high-speed EMU[J]. Electric Drive for Locomotives, 2020(2): 23-25.
- [4] Usamah R, Kang D, Ha Y D, et al. Structural evaluation of variable gauge railway[J]. Infrastructures, 2020, 5(10): 5100080.
- [5] Jiang J Z, Matamoros S, Alejandra Z, et al. Passive suspensions incorporating inerters for railway vehicles [J]. Vehicle System Dynamics, 2012, 50(1): 263-276.
- [6] Yao Y, Li G, Sardahi Y, et al. Stability enhancement of a high-speed train bogie using active mass inertial actuators[J]. Vehicle System Dynamics, 2019, 57(3): 389-407.
- [7] Qiu Z C, Han S C, Na J, et al. Vertical suspension optimization for a high-speed train with PSO intelligent method[J]. Computational Intelligence and Neuroscience, 2021 (2021): 1526792.
- [8] Chen M L, He X S, Cao J W, et al. Modeling of vertical vibration system of high speed train and optimization of suspension parameters[C]// 3rd International Conference on Control and Robots, Tokyo, Japan, 2020: 26-29.
- [9] Zou H, Wu Q F, Zou X L. Research on optimization design of suspension parameters of railway vehicle bogies based on surrogate model[J]. Multimedia Tools and Applications, 2022 (2022): s11042022140224.
- [10] Sun Y, Zhou J S, Gong D, et al. A new vibration absorber design for under-chassis device of a high-speed train[J]. Shock and Vibration, 2017 (2017): 1-8.
- [11] Chen J, Wu Y J, Zhang L M, et al. Dynamic optimization design of the suspension parameters of car body-mounted equipment via analytical target cascading[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2020, 34(5): 1957-1969.
- [12] Liu W L, Yang Y, Wang P P, et al. Metamodel-based robust collaborative optimization for the suspension parameters of rail vehicles[J]. Journal of the Chinese Institute of Engineers, 2019, 42(8): 643-652.
- [13] 姚远, 李广, 梁树林, 等. 基于健壮稳定性的高速列车悬挂参数优化匹配方法[J]. 铁道学报, 2021, 43(8): 35-44.
- Yao Yuan, Li Guang, Liang Shu-lin, et al. Optimal matching method for suspension parameters of high-speed train bogie based on robust hunting stability[J]. Journal of the China Railway Society, 2021, 43(8): 35-44.
- [14] 王红兵, 李国芳, 李炳劭, 等. 基于稳健试验设计的高速客车悬挂参数多目标优化[J]. 铁道机车车辆, 2020, 40(2): 25-29.
- Wang Hong-bing, Li Guo-fang, Li Bing-shao, et al. Comprehensive optimization of suspension parameters of high-speed passenger trains based on taguchi method[J]. Railway Locomotive and Car, 2020, 40(2): 25-29.
- [15] 赵树恩, 聂小芮, 陈文斌. 基于田口稳健设计的跨座式单轨车辆悬挂系统多参数优化[J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2021, 40(12): 136-142.
- Zhao Shu-en, Nie Xiao-rui, Chen Wen-bin. Multi-parameter optimization of suspension system of straddle monorail vehicle based on taguchi robust design[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2021, 40(12): 136-142.
- [16] 王攀攀, 杨岳, 易兵, 等. 面向运行稳定性的高速轨道车辆悬挂参数多目标稳健优化[J]. 铁道科学与工程学报, 2018, 15(12): 3021-3028.
- Wang Pan-pan, Yang Yue, Yi Bing, et al. Multi-objective robust optimization of suspension parameters for high-speed rail vehicle[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2018, 15(12): 3021-3028.
- [17] 王婷. 高速客车轴箱悬挂参数稳健优化设计[D]. 长沙: 中南大学交通运输工程学院, 2014.
- Wang Ting. Robust optimization design on axlebox suspension parameters of high-speed passenger train [D]. Changsha: School of Traffic & Transportation Engineering, Central South University, 2014.
- [18] 崔利通, 李国栋, 宋春元, 等. 高速动车组悬挂参数优化研究[J]. 铁道学报, 2021, 43(4): 42-50.
- Cui Li-tong, Li Guo-dong, Song Chun-yuan, et al. Study on optimization of suspension parameters of high-speed EMU trains[J]. Journal of the China Railway Society, 2021, 43(4): 42-50.
- [19] 金天贺, 刘志明, 任尊松, 等. 高速列车减振器组合阻尼特性效应研究[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2018, 46(9): 116-124.
- Jin Tian-he, Liu Zhi-ming, Ren Zun-song, et al.

- Study of combination damping characteristics effect of high-speed train damper[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2018, 46(9): 116-124.
- [20] 金光, 徐腾养, 徐传波, 等. 高速列车二系横向刚度和横向阻尼参数优化分析[J]. 中国工程机械学报, 2021, 19(5): 384-389.
- Jin Guang, Xu Teng-yang, Xu Chuan-bo, et al. Parameters optimization analysis of secondary lateral stiffness and secondary lateral damping of high speed train[J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2021, 19(5): 384-389.
- [21] 缪炳荣, 方向华, 傅秀通. SIMPACK 动力学分析基础教程[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2008.
- [22] 石怀龙, 郭金莹, 王勇. 变轨距高速列车的动力学[J]. 机械工程学报, 2020, 56(20): 98-105.
- Shi Huai-long, Guo Jin-ying, Wang-yong, et al. Dynamic performance of high-speed gauge-changeable railway vehicle[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(20): 98-105.
- [23] 庄娇娇. 高速变轨距列车动力学性能优化及半主动控制策略研究[D]. 长春: 吉林大学交通学院, 2019.
- Zhuang Jiao-jiao. Research on dynamic performance optimization and semi-active control strategy of high-speed variable-gauge train[D]. Changchun: College of Transportation, Jilin University, 2019.
- [24] 中铁第一勘察设计院集团有限公司. 铁路线路设计规范[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2018.
- [25] GB/T 5599—2019. 机车车辆动力学性能评定及试验鉴定规范[S].
- [26] 盛佳香. 高速变轨距列车可变悬挂系统研究[D]. 长春: 吉林大学交通学院, 2022.
- Sheng Jia-xiang. Research on variable suspension system of high-speed variable-gauge train[D]. Changchun: College of Transportation, Jilin University, 2022.
- [27] 张剑. 基于代理模型技术的高速列车性能参数设计及优化[D]. 成都: 西南交通大学机械工程学院, 2015.
- Zhang Jian. The high-speed train performance parameter design and optimization based on surrogate model technology[D]. Chengdu: School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, 2015.