

基于遗传算法的轨道车辆参数优化设计

宗聪聪^{1,2}, 陈迪来², 周云飞³, 沈 钢²

- (1. 吉林省(水利厅)河务局, 吉林 长春 130022;
2. 同济大学 铁道与城市轨道交通研究院, 上海 201804;
3 吉林省发改委, 吉林 长春 130051)

摘 要: 在某一速度下, 轨道车辆转向架的蛇行运动频率将和车体相关振动的固有频率接近而发生耦合共振, 影响车辆的横向平稳性。为降低这种耦合共振的程度, 选取变换后的欧几里得贴近度作为车体模态相似性评价指标, 选取车体蛇行运动稳定性作为模型的控制条件, 采用遗传算法对二系悬挂进行最优化设计。结果显示, 在其他参数不变的情况下, 采用遗传算法可以寻得耦合度最小的二系悬挂参数值。耦合度越小, 模态频率曲线线性程度越强, 模态间的频率俘获现象越不明显, 模态间的相互影响越小; 耦合度越小, 模态的阻尼比变化越平缓, 车体摇头或车体上下心滚摆振动模态的阻尼比越大。

关键词: 蛇行运动; 参数优化; 欧几里得贴近度; 遗传算法; 模态

中图分类号: U270.2

文献标识码: A

doi: 10.13890/j.issn.1000-128x.2018.04.008

Parameter Optimal Design of Railway Vehicle Based on Genetic Algorithm

ZONG Congcong^{1,2}, CHEN Dilai², ZHOU Yunfei³, SHEN Gang²

- (1. River Affairs Bureau (Water Resources Department) of Jilin Province, Changchun, Jilin 130022, China;
2. Institute of Rail Transit, Tongji University, Shanghai 201804, China;
3. Development and Reform Commission of Jilin Province, Changchun, Jilin 130051, China)

Abstract: The natural frequency of railway vehicle's car body and hunting frequency of bogie will be close to each other at a certain speed, and this can bring the coupling resonance between car body and bogie, which have a bad effect on stability of vehicle. In order to reduce the degree of resonance, a transformed Euclid nearness was selected as the index of modal similarity, and the hunting stability of vehicle was chosen as the control conditions of the model. Finally, genetic algorithm was used to optimize the second suspension parameter. The results showed that, the optimal second suspension parameter could be found by genetic algorithm when the other parameters were constant, and the results were satisfactory. The smaller the coupling degree was, the stronger the linear of the modal frequency curve was, and the more inconspicuous the frequency trapping among modes was, there was a faint influence between the modes in this case; The smaller the coupling degree was, the more gently the damping ratio changed, and the bigger the damping ratio of body-yawing or upper-sway was.

Keywords: hunting movement; parameter optimization; Euclid nearness; genetic algorithm; modality

0 引言

车辆在较低速度下运行时, 车体会产生低频振动, 这种车体蛇行运动就是一次蛇行运动。它以车体较大幅度横移和摇头振动为特征, 一般在某速度范围内出

现。地铁车辆及高速铁路车辆在运行过程中容易出现车体的低频晃动, 此时速度远未达到失稳速度, 严重影响了乘客乘坐的安全性和舒适性。由于转向架蛇行运动频率随着速度的增加而增加, 而车体的固有频率不随速度变化, 这样, 在某一速度下, 转向架的蛇行运动频率将和车体相关振动的固有频率接近而发生耦

合共振,影响车辆的横向平稳性^[1]。以往的研究表明,车辆悬挂参数是影响横向平稳性指标的重要参数^[2]。在不影响车辆稳定性的前提下,选择最优的车辆悬挂参数,对降低车辆的一次蛇行,提高乘客的舒适度,具有重要意义。

1 算法描述

为保证模型的顺利计算,做出如下假定:

①不考虑轨道不平顺和曲线段对车辆横向振动的影响。

②只考虑转向架蛇行模态对车体横向振动的影响,其他不做讨论。

1.1 贴近度函数

选择欧几里得贴近度作为相似性评价指标。以转向架蛇行同向振动和车体上心滚摆振动为例,分析转向架蛇行同向振动对车体上心滚摆振动的影响机制。由简谐激励作用下的强迫振动理论分析可知,当频率比为1,阻尼比较小时,此时转向架蛇行同向振动产生的力对该振动系统的放大因子很大,即转向架蛇行同向振动模态对车体上心滚摆振动模态贡献率很大。该放大因子越大,两者振动模态的相似性越大,即车体上心滚摆振动模态与转向架蛇行同向振动模态的相似性越大。其他模态之间的相互影响分析与车体上心滚摆振动对转向架蛇行同向振动的影响机制同理。耦合度分析中,对模态做归一化处理,模态A、B的欧几里得贴近度 $\sigma(A, B)$ 具体描述^[3-4]如下:

$$\sigma(A, B) = 1 - \frac{1}{\sqrt{n}} \left[\sum_{k=1}^n (A(x_k) - B(x_k))^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

式中: n 为模态A、B包含的维数。

由式(1)可知,贴近度 $\sigma(A, B)$ 为大于零小于1的数,无量纲。

总的耦合度 σ_{all} 为

$$\sigma_{\text{all}} = \sum w_{ij} \times \sigma(i, j) \quad (2)$$

式中: w_{ij} 为贴近度 $\sigma(i, j)$ 所对应的权重。

1.2 遗传算法简介

遗传算法^[6]是一种基于自然群体遗传进化机制的自适应全局优化概率搜索算法。它摒弃了传统的搜索方式,模拟自然界生物进化过程,采用人工的方式对目标空间进行随机化搜索。

遗传算法模拟自然选择和自然遗传过程中发生的繁殖、交叉和基因突变现象,在每次迭代中都保留一组候选解,并按某种指标从解群中选取较优的个体,利用遗传算子(选择、交叉和变异)对这些个体进行组合,产生新一代的候选解群,重复此过程,直到满足

某种收敛指标为止。

选择:根据各个个体的适应值,按照一定的规则或方法,从第 t 代群体 $P(t)$ 中选择出一些优良的个体遗传到下一代群体 $P(t+1)$ 中。

交叉:将群体 $P(t)$ 内的各个个体随机搭配成对,对每一个个体,以某个概率 P_c (称为交叉概率)交换它们之间的部分染色体。

变异:对群体 $P(t)$ 中的每一个个体,以某一概率 P_m (称为变异概率)改变某一个或一些基因座上基因值为其他的等位基因。

遗传算法主要采用的进化规则是“适者生存”,保证了较好的解被保留,较差的解被淘汰。

主要特点有:

①自组织、自适应和自学习性:在编码方案、适应度函数及遗传算子确定后,算法将利用进化过程中获得的信息自行组织搜索。

②本质并行性:内在并行性与内含并行性。

③不求导:只需目标函数和适应度函数。

④概率转换规则:强调概率转换规则,而不是确定的转换规则。

遗传算法的基本运算过程见图1。

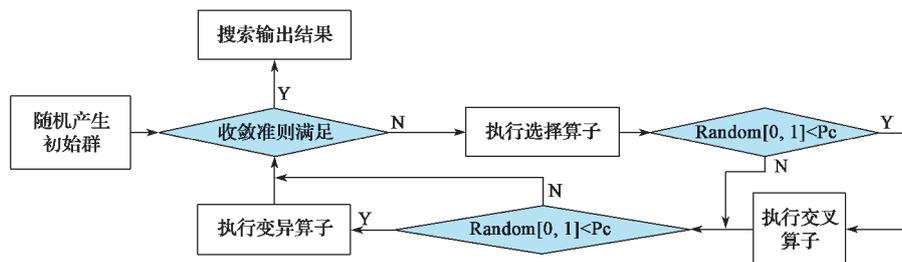


图1 遗传算法流程图

1.3 约束说明

整个优化过程,在二系横向阻尼变化过程中,应保证轨道车辆行驶过程中不失稳。由于本文采用线性频域计算方法,通过计算车辆系统各体在车辆不同运行速度下的固有振动频率和阻尼判断耦合程度,故选取阻尼比作为失稳的判断参数^[5]。当阻尼比小于0时,说明系统已经失稳,此速度即为车辆的蛇行失稳临界速度。因考虑留有一定的安全裕量,计算中将阻尼比为0.05作为车辆系统的蛇行失稳控制条件。即对于所有的振动模态,应满足阻尼比 $\xi \geq 0.05$ 。

以某地铁车辆参数为例,具体优化流程如图2所示。

2 具体算例

以某地铁车辆的车辆参数为例,优化轨道车辆的二系横向阻尼和二系横向刚度值。

遗传算法的参数设置为:编码方式采用二进制编码,种群规模为20,最大进化代数为100,染色体长度为10,交叉概率为0.25,变异概率为0.01,随机初始种群,交叉操作采用单点交叉。

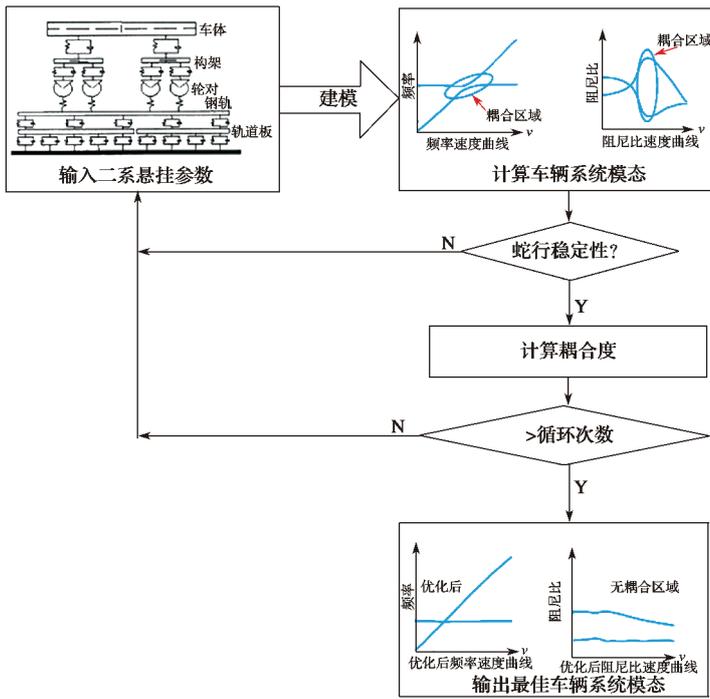


图2 优化流程图

本实例目标函数在定义域内均大于0, 且是求函数最小值, 故将第*i*个目标函数 $f(x_i)$ 作适当变形作为适应函数 $f(s_i)$, 如式(3)所示, 通过加负号实现了对函数求最大的转换, 通过平方实现对数据的放大。

$$f(s_i) = (\max(f(x_1), f(x_2), \dots, f(x_n)) - f(x_i) + 1)^2 \quad (3)$$

通过运算, 最终确定最佳二系横向阻尼值为43 000 N·s/m, 最佳二系横向刚度为10 000 N/m, 最佳耦合度为28.94。此时, 获得的模式随速度变化时的频率和阻尼比如图3、图4所示。

由图3可知, 在转向架蛇行同向振动模式与车体上心滚摆振动模式的频率相交处, 频率仍然保持各自原来的状态, 并无明显的频率俘获^[7]现象。转向架蛇行反向振动模式与车体摇头振动模式的频率相交处, 频率仍然保持各自原来的状态, 无明显的频率俘获现象, 即此时大致消除了模式间耦合共振的影响。

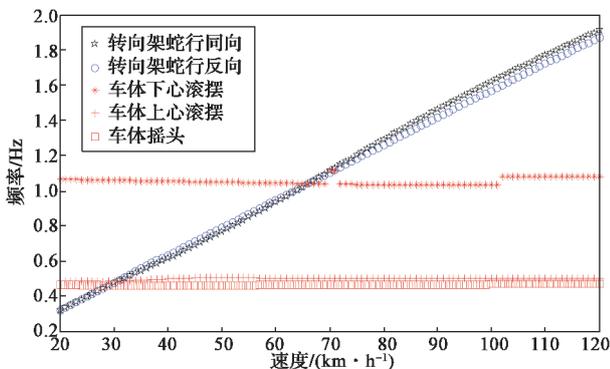


图3 最佳耦合度下模式有阻尼频率图

由图4可知, 此时, 转向架蛇行同向振动模式与车体上心滚摆振动模式的频率相近处, 转向架蛇行同向振动模式与车体上心滚摆振动模式的阻尼比的起伏变化不大, 并无明显的阻尼比交叉等现象。转向架蛇

行反向振动模式与车体摇头振动模式的有阻尼频率相近处, 转向架蛇行反向振动模式与车体摇头振动模式的阻尼比的起伏很小, 无明显的阻尼比交叉等现象。由此可见, 此时模式间耦合共振的影响很微小。

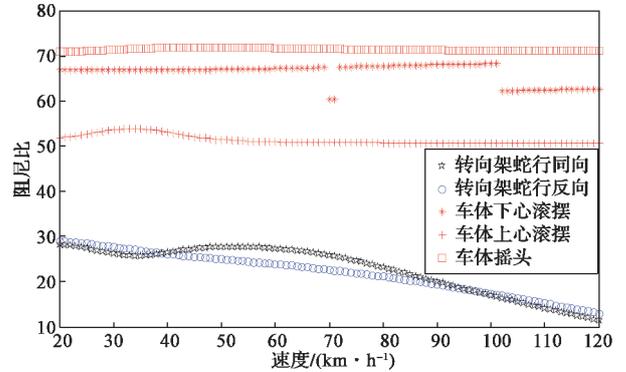


图4 最佳耦合度下模式阻尼图

3 结果比较

为了说明结果的正确性, 将已知存在明显车辆一次蛇行晃动的地铁车辆的模式参数与优化后的模式参数进行对比, 优化前地铁车辆的二系横向阻尼为40 000 N·s/m, 二系横向刚度为150 000 N/m, 耦合度为33.05; 优化后最佳二系横向阻尼值为43 000 N·s/m, 最佳二系横向刚度为10 000 N/m, 最佳耦合度为28.94。优化前后模式参数对比如图5~图8所示。

由图5可知, 对于转向架蛇行同向与车体上心滚摆振动模式的相互耦合程度而言, 优化前后两模式的频率曲线差异明显, 优化后模式频率曲线线性程度更强, 频率俘获的程度更小, 转向架蛇行同向与车体上心滚摆振动模式之间的相互影响程度更小。

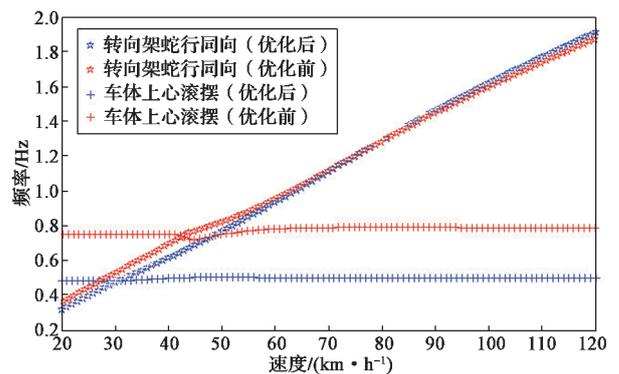


图5 转向架蛇行同向与车体上心滚摆振动模式有阻尼频率对比图

由图6可知, 优化前后的两模式阻尼比曲线差异很大, 说明车辆悬挂参数对转向架蛇行同向模式与车体上心滚摆振动模式耦合程度影响很大。相比较而言, 优化后车体摇头模式阻尼比更大, 转向架蛇行同向模式与车体上心滚摆振动模式曲线变化更平缓, 转向架蛇行同向模式与车体上心滚摆振动模式间的相互影响更小。

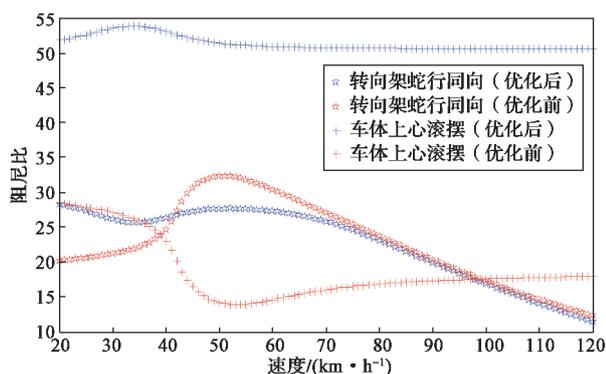


图 6 转向架蛇行同向与车体上心滚摆振动模式阻尼比对比图

由图 7 可知,对于转向架蛇行反向模式与车体摇头振动模式的相互耦合程度而言,优化前后两模态频率曲线差异明显,优化前频率曲线在频率接近的地方,频率的俘获性更明显,相互影响程度更大。优化后模态频率曲线线性程度更强,频率俘获的程度更小,转向架蛇行反向模式与车体摇头振动模式之间的相互影响程度更小。

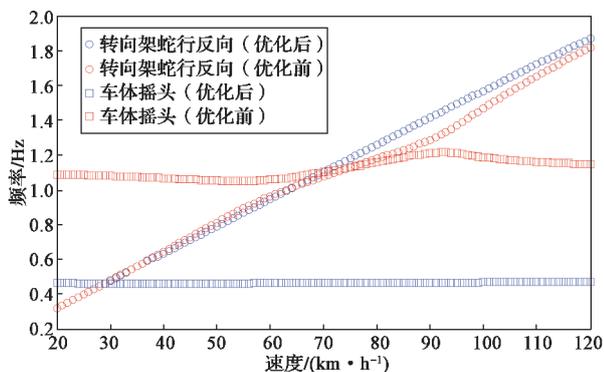


图 7 转向架蛇行反向与车体摇头振动模式有阻尼频率对比图

由图 8 可知,优化前后转向架蛇行反向与车体摇头振动模式阻尼比曲线差异较大,说明车辆悬挂参数对转向架蛇行反向模式与车体摇头振动模式耦合程度

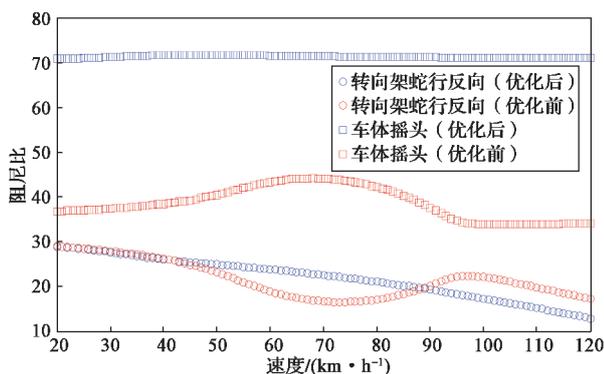


图 8 转向架蛇行反向与车体摇头振动模式阻尼比对比图

的影响较大。优化后整体耦合度变小,转向架蛇行反向与车体摇头振动模式阻尼比变化越平缓,车体摇头振动模式阻尼比变大,转向架蛇行反向与车体摇头振动模式间的相互影响变小。

4 结语

通过上面的分析,可得出以下结论:

①采用遗传算法寻找最小耦合度下的车辆悬挂参数最优值,在其他参数不变的情况下,可以寻得耦合度最小的点,并且所计算的结果令人满意。

②耦合度越小,模态频率曲线线性程度更强,模态间的频率俘获现象越不明显,模态间的相互影响越小;耦合度越小,模态的阻尼比变化越平缓,车体摇头或车体上下心滚摆振动模式的阻尼比越大。

③二系横向阻尼和二系横向刚度对转向架蛇行同反振动模式与车体摇头振动模式的耦合程度及转向架蛇行同向振动模式与车体上心滚摆振动模式耦合程度的影响显著,可以通过调整车辆的二系横向阻尼和二系横向刚度来减弱转向架蛇行模式对车体晃动的影响。

参考文献:

- [1] 池茂儒,张卫华,曾京,等.蛇行运动对铁道车辆平稳性的影响[J].振动工程学报,2008,21(6):639-643.
- [2] 李艳.高速列车动力学参数影响度的研究与应用[D].成都:西南交通大学,2013.
- [3] 陈举华,赵建国,郭毅之.电力系统可靠性研究的灰关联和模糊贴度分析方法[J].中国电机工程学报,2002,22(1):59-63.
- [4] 谢开贵,胡博,欧阳稳,等.基于灰色关联的应力盘驱力耦合度分析[J].重庆大学学报,2010,33(6):20-24.
- [5] 刘宏友,高常君,王云鹏,等.160 km/h 快捷货车转向架蛇行失稳临界速度的确定方法[C]//中国铁道学会车辆委员会快捷货车转向架技术交流会论文集.大连:中国铁道学会,2015:165-173.
- [6] 李益芳,黄仙.几种现代优化算法的比较研究[C]//华北电力大学研究生学术交流会论文集.保定:华北电力大学,2007:1-6.
- [7] 方静赛.铁道车辆转向架与车体振动同步研究[D].成都:西南交通大学,2015.
- [8] 陈迪来,沈钢,宗聪聪.基于耦合度的铁道车辆平稳性分析[J].同济大学学报(自然科学版),2018,46(1):118-124.

作者简介:宗聪聪(1992-),女,硕士,研究方向为轨道车辆动力学。