DOI: 10.3901/JME.2019.16.104

面向轮缘磨耗的动车组车轮型面多目标优化设计*

崔大宾¹ 赵锐¹ 李俊¹ 余家豪¹ 李立¹ 温泽峰²

(1. 西南交通大学机械工程学院 成都 610031;

2. 西南交通大学牵引动力国家重点实验室 成都 610031)

摘要: CRH1 型动车组最初采用的 LMA 型车轮踏面不能很好地匹配列车的悬挂参数,影响了列车在直线和大半径曲线上运行时的稳定性,后被新设计的 LMD 型踏面取代。LMD 型踏面为列车运行提供更好的稳定性,却出现了严重的轮缘磨损和钢轨侧磨现象。此次优化过程首先对 LMA 和 LMD 型踏面的综合性能进行理论分析,并依据当前两种型面使用中出现的問題,以保证车辆直线运行稳定性与减小通过小半径曲线时的轮缘磨耗为目标,建立数值优化模型,并采用改进的粒子群优化算法对模型进行了求解。结果表明,该方法具有较快的计算速度与收敛性;获得的新型车轮踏面可以保证 CRH1 型动车组较好的直线运行稳定性,小半径曲线通过时较小的轮轨横向力和轮对冲角。研究内容为车轮型面的多目标优化提供了可行方案,为改善 CRH1 型动车组综合服役性能提供理论参考。

关键词: 多目标优化; 轮缘磨耗; 车轮型面设计; 车辆动力学

中图分类号: U211

Multi-objective Optimization of EMU Wheel Profile Oriented to Flange Wear Control

CUI Dabin¹ ZHAO Rui¹ LI Jun¹ SHE Jiahao¹ LI Li¹ WEN Zefeng²

(1. School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031;

2. State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031)

Abstract: The previous LMA profile used on the CRH1 train but it does not match well with the train suspension parameters and also causes the instability of the train on tangent track and large curved track. Therefore the LMD profile was designed as the replacement of the LMA profile for the CRH1 train. However, the use of the LMD profile results in the serious wheel flange and rail gauge corner wear but it can provide better stability compared to the LMA profile. This process of optimization firstly presents the evaluation of using LMA and LMD profiles, and then a development of the wheel profile is objected in terms of both currently used profiles, which is not only to minimize the flange wear in sharp curve track and also take the vehicle dynamic behavior in tangent track into consideration. Therefore, improved particle swarm optimization method was proposed for the optimization of the wheel flange and rail gauge corner wear and the stability of wheelsets. The requirements of the wheel profile geometry are investigated through proposed optimization method which has both fast calculation speed and convergence. Furthermore, the lateral force and the angle of attack of wheel/rail of the CRH1 train will be decreased through the optimized wheel profile. The findings show that the developed profile after the optimization procedure is fairly acceptable for the requirements of the wheel-rail interface and dynamic behavior of CRH1 train.

Key words: multi-objective optimization; flange wear; wheel profile design; vehicle dynamics

0 前言

近十年来,我国大量高速动车组投入使用,显著提高了铁路运行服务品质。与此同时,轮轨的磨

耗问题越来越突出。中国每年因轮轨磨耗产生的维护费用高达数十亿人民币^[1]。根据当前中国高速铁路发展趋势推测,每年新增车轮需求量超过 20 000^[2],如果车轮型面与钢轨匹配不佳,会导致额外的轮轨磨损,严重增加铁路运营成本,严重时将影响列车的正常运行。

车轮型面优化设计是铁路行业长期的研究内容。在 19 世纪,人们就对车轮外形及其自导向原理

* 国家自然科学基金(51605394, U1434210)、四川省教育厅(16ZB0011)和乐山市重点研究(16ZDYJ0147)资助项目。20181106 收到初稿,20190628 收到修改稿

有了初步的认识^[3]。经过多年的运行经验和研究^[4-7], 车轮型面从锥形踏面改为磨耗型踏面, 并由此将轮轨磨损降低到可接受的等级。当前使用的绝大多数车轮都按照磨耗型踏面设计而来。目前, 随着数值优化算法的快速发展, 涌现出了许多车轮型面优化设计的新理念和方法。HAQUE等^[8]提出一种车轮型面设计方法用以平衡车辆的直线运行稳定性和曲线通过能力。YAMADA等^[9]依据实测的轨道型面设计了一种CS车轮型面。WU等^[10]基于车辆特性及运行条件与轮轨型面配合度为目标, 提出了钢轨型面扩展法并成功设计了车轮型面。张剑等^[11]利用局部钢轨型面扩展方法设计与CN60轨道相匹配的车轮型面。沈钢等^[12-14]提出了车轮型面反求设计方法, 并分别采用滚动圆半径差和轮轨接触角差完成了车轮型面设计。SHEVTSOV等^[15,16]利用轮对滚动圆半径差设计了车轮踏面外形。JAHED等^[17]也提出了类似的方法, 并完成了车轮踏面设计。POLACH^[18]提出了综合考虑目标锥度和踏面磨损规律的车轮踏面设计方法。IGNESTI等^[19]推出了以提高运行稳定性和减少踏面磨耗为目标的型面设计方法。CHOI等^[20]为解决轮缘磨耗及表面疲劳问题开发了一种多目标优化算法。IGNESTI等^[21]以磨耗与运行稳定性为目标对车轮型面进行了优化。崔大宾等^[22-23]提出了一种同时考虑车辆悬挂参数和磨耗特性的动车组踏面设计方法。崔檬^[24]基于NURBS理论, 建立了以权因子和控制点坐标为设计变量的踏面优化方法, 并对地铁车轮进行了优化设计。成棣等^[25]以轮轨磨耗指数, 临界速度和横向乘坐舒适性为目标完成了某动车组的车轮型面设计工作。

这些研究概括了在车轮型面设计领域的经验和基础研究方法, 介绍了车轮型面设计问题地研究进展, 并解释了改变车轮型面是满足不同运行工况要求的最好选择的原因。但目前绝大多数型面优化研究工作只针对车辆的直线运行性能, 仅有的几篇关于轮缘磨耗的车轮型面设计文章也并没有确切给出兼顾直线运行与轮缘磨耗的优化设计目标。

近年来, 动车组快速发展及出现的新问题对车轮型面设计带来全新的挑战。CRH1型动车组是我国主要的城际通勤列车之一, 通常在既有铁路线路和提速线路上运行。最初在CRH1型动车组上使用的LMA型踏面由于存在与车辆悬挂参数匹配不佳的问题, 已不能满足列车的高速运行需求。新设计的LMD型踏面提高了车辆的高速运行稳定性, 但出现了较严重的轮缘磨损和钢轨侧磨问题。这种磨损严重增加了列车及钢轨的维护成本。

车辆运行平稳性以及轮轨磨耗问题并非车轮型

面单独决定。要彻底解决这些问题, 应从车轮悬挂参数匹配及车辆结构入手。但对于已经服役的列车, 通过改变车轮型面保证车辆平稳运行基础上减缓轮缘磨耗, 无疑是一项简单经济的方法。

为了设计出能够兼顾CRH1动车组直线运行稳定性同时减小轮缘侧磨的车轮型面, 本文对比分析了LMA型面及LMD型面的轮轨接触几何特性、轮轨接触力学特性以及车轮对车辆动力学性能的影响。并提出一种以减小轮轨磨耗和提高轮对稳定性为目标的优化方法, 并对优化结果进行了分析。

1 LMA与LMD性能对比

LMA与LMD这两种车轮型面是CRH1型动车组曾使用和现在正在使用的车轮型面, 为获得更好车轮型面改进方案, 对这两种型面进行了多方面的性能对比分析。

在计算过程中, 仅使用一节拖车进行计算, 其结构如图1, 暂未考虑列车编组对计算结果的影响。

图1 CRH1型动车组拖车转向架结构图

1.1 轮轨接触几何关系

图2给出了LMA与LMD型面的几何外形图, 这两种型面具有相同轮缘形状和轮辋宽度, 在名义

图2 车轮型面对比图

滚动圆附近主踏面区和轮缘根部存在较大差异。在名义滚动圆两侧约 10 mm 范围内, LMD 型面斜率较 LMA 型面大。在轮缘根部区域, LMD 型面斜率小于 LMA 型面。名义滚动圆外侧超过 10 mm 后, LMD 型面出现下凹趋势, 而 LMA 始终保持原有凹凸性。

等效锥度是车轮型面一项重要的性能指标, 其对列车动力学性能有很大影响。车轮踏面锥度可以划分为 3 块区域。第一部分为轮对横移量在 3 mm 以内的区域, 这部分踏面的锥度主要影响列车在直线上的运行稳定性。第二部分为轮对横移量为 3~6 mm 的区域, 这部分主要影响列车通过大半径曲线的能力。第三部分为轮对横移量大于 6 mm 的区域, 这部分决定了列车通过小半径曲线的能力。

图 3 为两种踏面等效锥度对比图, 从图中可以看出, LMD 踏面等效锥度在轮对横移量 7 mm 以内大于 LMA 型面的等效锥度。从 CRH1 型动车组服役性能来看, 适当增大轮对横移 6 mm 内的踏面等效锥度, 可以增加列车的直线和大半径曲线运行稳定性。但现有的 LMD 踏面在轮缘根部(轮对横移量约 7~10 mm 处)等效锥度过低, 将导致列车通过小半径曲线时的轮轨导向力不足, 而发生严重轮缘与钢轨贴靠现象。

图3 等效锥度

图 4 给出了两种踏面的轮轨接触点对分布图, 可以看出 LMD 型面与 LMA 型面与钢轨的接触点分

图4 LMD 与 LMA 接触点对比图

布状态有明显差别。与 LMA 型面相比, LMD 型面与钢轨接触点主要集中在车轮踏面名义滚动圆附近, 其分布范围较窄。LMD 踏面与钢轨接触点对在轮缘根部存在明显跳跃现象, 当列车通过小半径曲线时, 轮轨蠕滑力无法提供足够的转向力矩时, 容易发生轮缘与钢轨贴靠, 造成轮缘磨耗现象。

1.2 车辆动力学特性

利用多体动力学仿真软件 SIMPACK 对 LMA 与 LMD 两种型面在 CRH1 型动车组上的服役性能进行了仿真计算, 其计算结果如图 5~9 所示。使用 LMA 型面时车辆的临界速度为 374 km/h, LMD 型面为 373 km/h, 均满足列车 200 km/h 正常运行要求。图 5 给出了车辆在直线上运行时的轮对横向加速度和车体横向加速度。计算过程中轨道不平顺采用中国高速铁路实测数据, 车辆运行速度 200 km/h。可以看出, 当使用 LMD 型面时, 轮对及车体横向加速度明显小于使用 LMA 型面的车辆, 即使用 LMD 型面的 CRH1 型动车组的直线运行稳定性有明显提升。采用 Sperling 平稳性指数^[22]对使用两种不同型面时车辆的平稳性进行了对比, 如图 6 所示。采用两种型面的车辆的横向平稳性指数均随着车辆运行速度的提高而增大, 但使用 LMD 型面的车辆平稳

(a) 轮对横向加速度

(b) 车体横向加速度

图5 车辆在直线上运行时的特征曲线

性指数增长速率低于使用 LMA 型面的车辆。当列车运行速度高于 140 km/h 时, LMA 型面的车辆平稳性指数开始高于 LMD 型面。图 5 和图 6 都表明 LMD 型面可以明显提高 CRH1 型动车组的直线运行平稳性。

图 6 横向运行平稳性指数

(a) 通过大半径曲线时的轮对横移量

(b) 通过大半径曲线时的轮轨横向力

图 7 车辆通过大半径曲线时的特征曲线

绝大多数高速或既有提速线路都是由直线以及半径大于 6 km 的曲线线路组成。本研究中仿真所用大半径曲线线路参数设置为: 前直线 320 m, 缓和曲线 200 m, 圆曲线长度 1 km, 曲线半径 7 km, 后直线 280 m, 外轨超高 100 mm, 车辆运行速度 200 km/h。

图 7 给出了车辆通过大半径曲线时的轮对横移

量及轮轨横向力情况。可以看出, 使用 LMA 型面的车辆的轮对横移量在通过缓和曲线时出现失稳现象。使用 LMD 型面后, 这种失稳现象明显得到改善。由于 LMD 型面在较小轮对横移量时的踏面锥度较大而能提供更大的导向力, 故曲线通过时轮对横移量小于 LMA 型面, 而轮轨横向力大于 LMA 型面。

(a) 通过小半径曲线时的轮对横移量

(b) 通过小半径曲线时的轮轨横向力

图 8 车辆通过小半径曲线时的动力学特征

仿真分析了车辆通过小半径曲线时的动力学特性如图 8 所示。该曲线参数参照钢轨侧磨严重区段线路实际参数设置: 前直线 30 m, 缓和曲线 40 m, 圆曲线长 100 m, 曲线半径 300 m, 后直线 50 m, 无外轨超高, 列车通过速度 9 km/h。

由图 8a 可知, 使用两种型面的车辆在通过该曲线时轮对横移量均在 9.5 mm 左右, 这必将导致轮缘与钢轨贴靠。在图 8b 中可以看到 LMD 型面的轮轨横向力大于 LMA 型面, 意味着使用 LMD 型面的车轮将产生更大的轮缘磨耗。

实际上, 当列车通过该曲线时较大的轮对横移量以及冲角将导致轮轨发生两点接触而导致严重的轮缘与钢轨侧磨。如图 9 给出了该曲线段钢轨磨耗外形及测量结果。严重钢轨侧磨导致换轨频次增加, 与其对应的严重轮缘磨耗也大大缩短了车轮的使用

寿命。轮缘与钢轨侧磨已经成为 CRH1 型动车组在部分区段运营的首要问题。本文的主要研究工作就是探索新型的车轮踏面设计方法,使车轮型面可以不降低或严重降低直线运行性能前提下,减小通过小半径曲线时的轮缘磨耗。

(a) 小半径曲线钢轨侧磨形态

(b) 小半径曲线磨损钢轨廓形

图 9 小半径曲线段钢轨磨耗外形及测量结果

2 优化数学模型

在车轮型面优化研究领域,通常使用两种方法描述车轮型面。一类是通过数学解析式推导接触关系将车轮曲线表达出来;另一类是将车轮型面在坐标系中离散成若干点,再利用插值或拟合方法获得车轮外形曲线。

本文选择如图 10 所示的 15 个点样条插值函数表示车轮型面。在优化过程中, A 和 B 两个点设为固定点,其余为可动点。A 点位于名义滚动圆处,坐标值为(0,0)。B 点位于轮缘上,距 A 点横向距离 40 mm。C 点位于名义滚动圆外侧 30 mm 位置, BC 段为优化区间。优化过程中,每个优化点的横坐标都是不变的,通过改变可动点的垂向坐标值 z 来获得不同外形的车轮外形。处于优化区域的型面通过对固定点和可动点的三次样条插值函数生成,最后

将优化部分与原轮缘部分及踏面外侧的未优化区域进行对接来生产完整车轮型面。

图 10 车轮型面的离散表达

车轮型面可用表示为垂向坐标 z 的函数 $f(z)$, 其中 $z = [z_1, \dots, z_8, z_{10}, \dots, z_{14}]$ 为设计变量。为保证优化区域平滑的对接到非优化区域,给定样条插值的边界条件

$$\begin{aligned} l_B &= \tan 70^\circ \quad \text{起始点} \\ l_C &= 1/40 \quad \text{终点} \end{aligned} \quad (1)$$

从踏面的性能分析及实际 CRH1 型车运行情况来看, LMA 和 LMD 两种型面都存在其优缺点。本文的研究工作旨在寻找一种同时兼顾此 LMA 较轻的轮缘磨耗及 LMD 较平稳的直线运行性能的新型车轮型面。为了简化计算过程,选取车体横向加速度作为列车在直线以及大半径曲线上的运行平稳性考核指标,利用轮轨横向力及轮对冲角来衡量轮缘磨耗和钢轨侧磨,其目标函数可确定为以下形式

$$\begin{aligned} \min : \begin{cases} f_1(z) = \max(|\varphi_i|) \\ f_2(z) = \max(|Q_{i,j}|) \\ f_3(z) = Rms(A) \end{cases} \quad (2) \\ i = 1, 2, 3, 4; j = l, r \end{aligned}$$

式中, f_1 是列车 4 个轮对中轮轨冲角的最大值, φ_i 是第 i 条轮对的轮轨冲角; f_2 是指第 i 条轮对的 j (左或右)侧轮轨横向力的最大值; f_3 是车体横向振动加速度 A 的均方根值。车体横向加速度测量点位于空气弹簧上方的车体地板上。

为统一三个目标函数的数量级,对数值较小的函数进行了放大处理,并根据三个函数的重要程度对其进行了加权处理,获得优化目标函数

$$f(z) = 10000w_1f_1 + w_2f_2 + 100w_3f_3 \quad (3)$$

为保证车轮型面曲线单调性的要求,给定如下

约束条件

$$G_k = \frac{z_k - z_{k-1}}{y_k - y_{k-1}} > 0 \quad k=1,2,\dots,14 \quad (4)$$

优化车轮型面应满足列车安全性要求，即

$$g_1 = \max \left(\left| \frac{Q_{i,j}}{P_{i,j}} \right| \right) < 1 \quad (5)$$

$$g_2 = \max \left(\left| \frac{P_{i,l} - P_{i,r}}{P_0} \right| \right) < 0.6 \quad (6)$$

在式(5)~(6)中， P 是轮轨垂向力， Q 是轮轨横向力， P_0 为轴重的一半。

3 优化算法

由式(1)~(6)，优化数学模型可描述为

$$\begin{cases} \min: f(z_1, \dots, z_8, z_{10}, \dots, z_{14}) = f(z) & v \in R^N \\ \text{st}: G_k > 0 & g_1 < 1 & g_2 < 0.6 \end{cases} \quad (7)$$

数学模型中的所有函数都没有解析表达式，而是通过 Simpack 软件计算得到，这就导致了优化过程无法获得梯度矩阵，使得常规的优化方法难以求解。

本文采用粒子群(PSO)优化算法^[26,27]来对数学模型进行求解。为了提高计算速度并确保算法的收敛性，给出随时间变化的加速因子

$$c_{1t} = \alpha \frac{M-t}{M} + c_1 \quad c_{2t} = \alpha \frac{t}{M} + c_2 \quad (8)$$

式中， c_1 ， c_2 ， α 为常数， M 为最大允许迭代次数， t 为当前迭代次数， c_{1t} ， c_{2t} 为当前加速因子。

迭代公式为

$$\begin{cases} v_{nd}(t+1) = \chi[v_{nd}(t) + c_{1t}r_1(p_{nd}(t) - x_{nd}(t)) + \\ \quad c_{2t}r_2(p_{gd}(t) - x_{nd}(t))] \\ z_{nd}(t+1) = z_{nd}(t) + v_{nd}(t+1) \end{cases} \quad (9)$$

在式(9)中， $n=1,2,\dots,N$ 是指 N 个车轮型面，在算法中称为种群维数。 $d=1,2,\dots,D$ 为变量维度，此次计算中， $D=13$ 。 v_{nd} 是指每个粒子的飞行速度，与粒子本身的飞行经验以及搜索空间内其他的粒子的飞行经验有关。 z_{nd} 为每个粒子的位置，每个粒子的位置就是一个可能的解。 p_{nd} 为每个粒子的最佳位置， p_{gd} 为当前粒子群的最佳位置。 r_1 和 r_2 为相互独立的伪随机数，服从[0,1]上的均布分布。 χ 为压缩因子，由式(10)确定

$$\chi = \frac{2}{2 - C - \sqrt{C^2 - 4C}} \quad C = c_{1t} + c_{2t} \quad C > 4 \quad (10)$$

典型的用于车轮型面优化的 PSO 算法结构如图 11 所示。优化工作的第一步是设置粒子群优化算法的参数 c_1, c_2, N, M 。然后随机生成 N 组离散的坐标点，并利用插值函数生成 N 个车轮型面。将生成的车轮型面输入 Simpack 软件中生成动力学模型并进行仿真计算，若计算结果满足式(5)、(6)，则更新参数 p_{nd} 和 p_{gd} 并判断迭代终止条件式(11)。若满足终止条件，则终止程序并获得满足 $f(z)$ 最小值对应的点集 z ，而对应的优化型面可通过对这些点进行三次样条插值得到。若仿真计算结果不满足式(5)、(6)，或终止条件(11)，则按照式(9)得到 $v_n(t+1)$ 和 $z_n(t+1)$ 并生成下一组 N 个车轮型面。整个优化过程在闭环中进行直至获得最优化的型面。

图 11 优化流程图

此次计算的参数选取为 $c_1 = 2.5$ ， $c_2 = 2$ ， $\alpha = 1.5$ ， $M = 150$ ， $N = 5$ 。种群维数 N 和最大允许迭代次数 M 决定计算所需时间和精度。利用并行程序

可以同时 Simpack 中对 N 个车轮型面进行动力学分析，Simpack 的求解包含 3 种工况，即直线、大半径曲线、小半径曲线。每一种线路的参数设置都如前文中所示参数一样。目标函数中的 f_1 和 f_2 仅与小半径曲线线路有关， f_3 由直线及大半径曲线

路决定。因此, 根据经验将权重系数设为 $w_1 = w_2 = 0.3$, $w_3 = 0.4$ 。优化过程的终止条件设为:

$$\min(f_n^{t+1}) - \min(f_n^t) < \varepsilon$$

$$\text{or} : t = M \quad (11)$$

式中, ε 为允许误差。

4 结果及分析

4.1 轮轨接触几何关系

采用 MATLAB 对图 11 所示的流程进行了编程处理, 完成了闭环的优化程序。计算获得的优化型面 OPT 与 LMA、LMD 型面对比如图 12 所示。OPT 型面与 LMD 型面在名义滚动圆附近具有相似的轮廓, 但在轮缘根部, OPT 型面与其它两种型面差异性较大。说明 OPT 型面很好的继承了 LMD 型面的直线运稳定性, 而为提高小半径曲线通过性能对轮缘根部区域进行了重构。

图 12 LMA、LMD 及 OPT 型面

图 13 为三种型面的等效锥度对比图, 可以看出 OPT 与 LMD 型面在轮对在 7 mm 横移量以内具有相近的等效锥度, 这能确保 OPT 型面拥有优良的直线运行稳定性。同样可以看到, OPT 型面的等效锥度在 7~9 mm 的轮对横移量时逐渐变大, 与 LMD 和 LMA 型面相比具有更好的曲线通过能力。

图 13 等效锥度对比

图 14 给出了 OPT 型面与钢轨接触点随轮对横移量的分布状态。当轮对横移量超过 7 mm 时, 接触点的位置将从轮缘根部逐渐过渡到轮缘, 而不是同 LMD 型面一样直接从踏面接触跳到轮缘接触。这种接触特性有助于提高车轮通过曲线的能力并减少轮缘磨耗。

图 14 OPT 型面与 CN60 轨接触点分布图

4.2 车辆动力学性能

图 15 为当列车使用不同型面以 300 km/h 的速度通过一段施加了横向正弦激励的直线时的轮对横移响应。可以看出, 使用 LMA 型面的车辆通过激励后出现失稳现象, 而 OPT 和 LMD 型面可以确保车辆的运行平稳性。从仿真计算结果得知, 使用 OPT 型面的车的临界速度为 396 km/h, 高于 LMD 型面的临界速度。

图 15 轮对横移量

图 16 对比了分别装有三种型面的车辆在施加实测不平顺轨道上运行时的横向平稳性指数。当列车以低于 220 km/h 的速度运行时, OPT 型面的横向运行平稳性指数大于 LMD 型面。而列车运行速度超过 220 km/h 之后, OPT 型面的横向运行平稳性指数小于 LMD 型面。

图 17 为 OPT 型面与 LMA、LMD 型面通过大半径曲线能力的对比。由于 OPT 型面的等效锥度是三者中最大的, 所以其轮对横移量是最小的, 轮轨横向力是最大的。三种型面通过小半径曲线的能力

如图 18 所示, OPT 型面的轮对横移量明显低于其它两型面, 其轮轨横向力和冲角也是三者中最低的。根据轮轨接触几何关系判断, 在该横移量及冲角下三种型面均出现轮缘与钢轨贴靠现象, 较小的轮轨横向力及冲角可以降低轮缘与钢轨磨耗。

图 16 横向运行平稳性指数

(a) 通过大半径曲线时的轮对横移量

(b) 通过大半径曲线时的轮轨横向力

图 17 OPT 型面与 LMA、LMD 型面通过大半径曲线能力的对比

图 19 全面对比了三种型面的曲线通过性能, 计算过程中线路未施加了轨道不平顺, 不同曲线半径下列车速度根据 CRH1 型车的实际运行参数设定, 见图 20。结合三种型面的轮轨接触几何关系可知, 由于 LMA 型面在踏面部分具有三者中最低的等效

(a) 通过小半径曲线时的轮对横移量

(b) 通过小半径曲线时的轮轨横向力

(c) 通过小半径曲线时的轮轨冲角

图 18 三种型面通过小半径曲线的能力

锥度, 故在中大半径曲线上横移量最大, 对应的轮轨横向力最小。随着曲线半径逐渐减小, 三种型面的轮对横移量以及轮轨横向力都将增大。当曲线半径小于 3 000 m 之后, 轮轨接触点将从踏面位置跳跃至轮缘或轮缘根部, 导致轮对横移量和横向力都急剧增大。LMD 型面在轮缘根部的接触点跳跃最为明显, 且该部位的等效锥度最低, 导致轮对横移量和轮轨横向力变得最大。由于 OPT 型面轮缘根部接触点从踏面逐渐过渡到轮缘上, 且该部位的等效锥度最大, 故其小半径曲线通过时的轮对横移量及轮轨横向力最小, 这有利于对降低轮缘及钢轨侧磨。

(a) 不同曲线半径下的轮对横移量

(b) 不同曲线半径下的轮轨横向力

图 19 不同曲线半径下的轮对横移量和轮轨横向力

图 20 不同半径曲线的列车运行速度

5 结论

(1) LMA 踏面部分等效锥度太低, 与 CRH1 型车参数不匹配, 导致车辆在直线及大半径曲线上的运行平稳性不佳。LMD 踏面可以保证 CRH1 型车的运行平稳性, 但轮缘根部等效锥度过低, 引起轮轨接触点在该区域的大幅度跳跃, 导致较大的轮轨横向力及冲角, 造成严重轮缘磨耗现象。

(2) 以车轮运行平稳性、轮轨横向力及冲角为目标函数, 建立了车轮踏面优化问题的数学模型。对 PSO 方法进行了改进, 以提高其计算速度与收敛

性, 并编写了 Matlab 程序对车轮型面优化模型进行了求解, 证明该方法具有较好的鲁棒性, 可以获得理想的车轮型面。

(3) 获得的车轮型面在主踏面区域具有与 LMD 型面相近的外形及性能, 轮缘根部等效锥度被增大以提高去小半径曲线通过性能。动力学仿真结果表明, 新获得的车轮型面可以保证 CRH1 型车直线及大半径曲线运行平稳性, 并降低了通过小半径曲线时的轮对冲角及轮轨横向力。

参 考 文 献

- [1] 金学松, 沈志云. 轮轨滚动接触力学的发展[J]. 力学进展, 2001, 31(1): 33-46.
JIN Xuesong, SHEN Zhiyun. Development of rolling contact mechanics of wheel/rail systems[J]. Advances in Mechanics, 2001, 31(1): 33-46.
- [2] 张曙光, 顾建国. 中国高速车轮自主创新思路及设想[J]. 铁道车辆, 2009, 47(3): 1-5.
ZHANG Shuguang, GU Jianguo. Thinking and assumption of independent innovation of wheelset for high-speed cars in China[J]. Rolling stock, 2009, 47(3): 1-5.
- [3] WICKENS A H. Dynamics of railway vehicles-from Stephenson to Carter[J]. Proc Inst Mech Eng Part F J Rail Rapid Transit, 1998, 212(3): 209-217.
- [4] 杨国桢. 车轮踏面形状的初步研究(上)[J]. 铁道车辆, 1978(11): 1-6.
YANG Guozhen. A preliminary study of wheel tread shape (Upper section)[J]. Rolling Stock, 1978(11): 1-6.
- [5] 杨国桢. 车轮踏面形状的初步研究(下)[J]. 铁道车辆, 1978(12): 1-17.
YANG Guozhen. A preliminary study of wheel tread shape (Lower section)[J]. Rolling Stock, 1978(12): 1-17.
- [6] 刘新明. 机车车辆弧形踏面外形研制[J]. 铁道车辆, 2000, 38(2): 24-28.
LIU Xinming. Development of arc-shaped tread contour for locomotives and rolling stock[J]. Rolling stock, 2000, 38(2): 24-28.
- [7] EOSAKU S. The scientific design of wheel tread shape[J]. Foreign Diesel Locomotive, 2000(3): 39-43.
- [8] HAQUE I, LATIMER D A, LAW E H. Computer-aided wheel profile design for railway vehicles [J]. ASME Journal of Engineering for Industry, 1989, 111: 288-291.
- [9] SATO Y. History study on designing Japanese rail profiles[J]. Wear, 2005, 258(7-8): 1064-1070.
- [10] WU H M. Investigations of wheel/rail interaction on wheel flange climb derailment and wheel/rail profile compatibility[D]. Chicago: The Graduate College of the

- Illinois Institute of Technology, 2000.
- [11] 张剑, 温泽峰, 孙丽萍, 等. 基于钢轨型面扩展法的车轮型面设计[J]. 机械工程学报, 2008, 44(3): 44-49.
ZHANG Jian, WEN Zefeng, SUN Liping, JIN Xuesong. Wheel profile design based on rail profile expansion method[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(3): 44-49.
- [12] 沈钢, CHOLLET H, 叶志森. 轮轨外形及接触问题的进一步研究[J]. 铁道学报, 2005, 27(4): 25-29.
SHEN Gang, CHOLLET H, YE Zhisen. Study on wheel profile and contact analysis[J]. Journal of the China railway society, 2005, 27(4): 25-29.
- [13] 沈钢, 钟晓波. 铁路车轮踏面外形的逆向设计方法[J]. 机械工程学报, 2010, 44(16): 41-47.
SHEN Gang, ZHONG Xiaobo. Inverse method for design of wheel profiles for railway vehicles[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010(16): 41-47.
- [14] SHEN Gang, AYASSE J B, CHOLLET H, et. al. A unique design method for wheel profiles by considering the contact angle function[J]. Proceeding of the I MECH E, Part F J. Rail Rapid Transit, 2003, 217: 25-30.
- [15] SHEVTSOV I Y, MARKINE V L, ESVELD C. Optimal design of wheel profile for railway vehicles[J]. Wear, 2005, 258: 1002-1030.
- [16] MARKINE V L, SHEVTSOV I Y, ESVELD C. An inverse shape design method for railway wheel profiles[J]. Struct Multidisc Optim, 2007, 33: 243-253.
- [17] HAMID J, BEHROOZ F, MOHAMMAD A. A numerical optimisation technique for design of wheel profiles[J]. Wear, 2008, 264: 1-10.
- [18] POLACH O. Wheel profile design for target conicity and wide tread wear spreading[J]. Wear, 2011, 271: 195-201.
- [19] IGNESTI M, INNOCENTI A, MARINI L. Wheel profile optimisation on railway vehicles from the wear viewpoint[J]. International Journal of Non-Linear Mechanics, 2013, 53: 41-54.
- [20] CHOI H Y, LEE D H, LEE J. Optimization of a railway wheel profile to minimize flange wear and surface fatigue[J]. Wear, 2013, 300: 225-233.
- [21] IGNESTI M, INNOCENTI A, MARINI L, et al. Wheel profile optimization on railway vehicles from the wear view point[J]. International Journal of Non-Linear Mechanics. 2013, 53: 41-54.
- [22] CUI Dabin, WANG H Y, LI L, et al. Optimal design of wheel profile for high-speed train[J]. Proc. IMechE. Part F: J. Rail and Rapid Transit, 2015, 229(3): 248-261.
- [23] CUI Dabin, ZHANG Weihua, TIAN Guangdong, et. al. Designing the key parameters of EMU bogie to reduce side wear of rail[J]. Wear, 2016, 366-367: 49-59.
- [24] 崔檬. 车轮踏面外形的多目标动态优化[D]. 北京: 北京交通大学, 2016.
CUI Meng. Multi-objective dynamic optimization of wheel tread curve[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016.
- [25] 成棣, 侯茂锐, 陈波, 等. CRH_2-300 型动车组车轮型面的多目标优化研究[J]. 中国铁道科学, 2014, 35(5): 78-85.
CHENG Di, HOU Maorui, CHEN Bo, et al. Multiobjective optimization for CRH2-300 EMU wheel profile[J]. China Railway Science, 2014, 35(5): 78-85.
- [26] CLERC M, KENNEDY J. The particle swarm-explosion, stability, and convergence in a multidimensional complex space[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(1): 58-73.
- [27] RATNAWEERA A, HALGAMUGE S. Self-organizing hierarchical particle swarm optimizer with time-varying acceleration coefficients[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2004, 8(3): 240-255.

作者简介: 崔大宾(通信作者), 男, 1982 年出生, 博士, 副教授, 硕士研究生导师。主要研究方向为铁道车辆动力学及轮轨关系、系统优化设计。

E-mail: cdb1645@163.com

赵锐, 男, 1994 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为轮轨关系及磨耗预测。

E-mail: rzhaol994@163.com