

# 车轮多边形对地铁轮轨动力响应及相互作用的影响

程云妍<sup>1</sup> 黄明华<sup>1</sup> 徐 鸿<sup>2</sup> 赵才友<sup>3</sup>

1.成都轨道交通集团有限公司 四川 成都 610093

2.中铁二院工程集团有限责任公司 四川 成都 610031

3.西南交通大学土木工程学院 四川 成都 610031

**【摘要】**：当地铁列车时速达到 80km/h 时，且车轮多边形阶次位于 11-12 阶时，车轮多边形产生的轮轨冲击频率较高会造成较大的轮对垂向振动加速度，且容易与轮对的弯曲模态频率相近而引发共振；为了避免地铁列车在正常运营中发生跳轨现象，确定了车速在 60km/h 下 8~20 阶车轮多边形幅值限值，当车轮多边形阶数为 16 阶时，幅值限值最低为 0.07mm；确定了车速在 80km/h 下 8~20 阶车轮多边形幅值限值，当车轮多边形阶数为 11 阶时，幅值限值最低为 0.07mm。

**【关键词】**：地铁；车轮多边形；柔性轮对；轮轨振动；轮轨力

DOI:10.12417/2705-0998.25.24.049

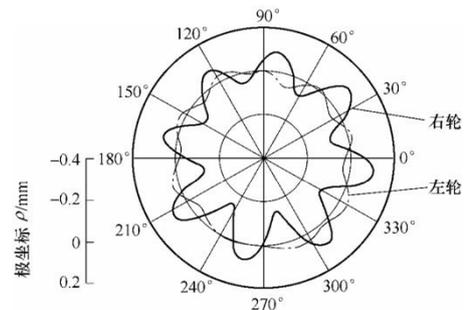
地铁车轮多边形磨损现象是当前我国地铁运营过程中面临的突出问题。地铁车辆的车轮在运营一段时间后，会由于滚动接触、牵引、制动、车辆振动等因素的影响而磨损，使车轮不再保持理想的形状，进而导致车轮多边形的产生<sup>[1]</sup>。车轮多边形的出现将会使垂向轮轨力急剧上升，导致车辆通过时轮轨系统产生剧烈振动，进而会缩短车辆和轨道部件的疲劳寿命，甚至危及行车安全；与此同时也会给周围的环境带来振动噪声等不良影响。至今为止，车轮多边形磨损问题尚未得到有效解决<sup>[2-3]</sup>。

对于车轮多边形这一问题，国内外学者对其进行了许多有价值的研究。Brommundt 和 Meinke 等<sup>[4-5]</sup>研究了高速列车轮对不平衡和转动惯量引起的车轮多边形化，建立了车辆-轨道动力学耦合模型，以模拟车轮多边形的发展状态，并对车轮磨损状况进行研究分析。Popp 等<sup>[6]</sup>介绍了由车轮多边形引起的轮对弹性共振和轮轨荷载等问题，并提出了考虑柔性轮对和柔性轨道的建模方法。刑远<sup>[7]</sup>等利用多体动力学软件 SIMPACK 计算了高速列车不同运行时速下车轮多边形的轮轨力荷载谱，他们认为，在相同的运行速度下波深对垂向轮轨力和横向力平均值的影响不大，但幅值随着波深的增加而有明显提升 Nielsen 等<sup>[8]</sup>发表了综述文章，对车轮多边形磨损的研究现状，产生机理以及防止措施进行了总结。

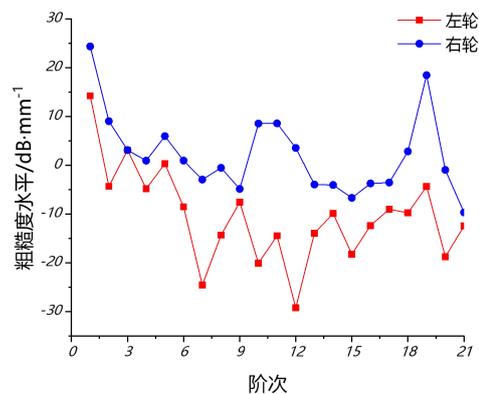
在地铁车辆车轮多边形的已有研究中，研究者们主要从车轮多边形磨损成因进行了研究分析，尚缺少车轮多边形化对地铁列车轮轨振动及轮轨力影响的研究。本文将轮对和轨道考虑为柔性体，通过改变轮对的外形来模拟车轮多边形，并进行仿真计算研究车轮多边形幅值，期望为后期车轮多边形的研究给出参考和建议。

## 1 车轮多边形实验数据分析

对成都地铁 10 号线车轮多边形磨损情况进行跟踪测试，图 1 为车辆车轮碾后运行约 30000km 后的车轮不均匀磨损状态。



(a) 极坐标表示



(b) 阶次表示

图 1 车轮多边形跟踪测试结果

第一作者：程云妍；通信作者：黄明华。

由图1测试结果可知,左轮磨损的情况较好,而右轮出现了明显的车轮多边形,从阶次表示来看,左轮没有明显的某阶次主导的多边形现象,而右轮则出现了以10、11、19阶为主导的车轮多边形。

## 2 刚柔耦合车辆-轨道-隧道系统动力学模型的建立

### 2.1 柔性轮对和外部隧道的建立

由于在多体动力学软件 UM 中建立车轮和隧道的实体几何模型非常复杂,所以用有限元软件 AYSYS 按照轮对和隧道实际尺寸建立模型,然后经过简化处理后完成整体结构实体建模,并保存为\*.fem 格式导入到 UM 软件转化为\*.fss 格式。材料杨氏模量 E 为 210GPa,泊松比为 0.3,有限元模型如图 2。隧道模型采用 Solid 45 三维固体单元,网格划分后包含 399064 个节点和 313800 个单元,柔性轮对模型采用 Solid185 三维实体单元,网格划分后包含 105765 个节点和 102048 个单元。

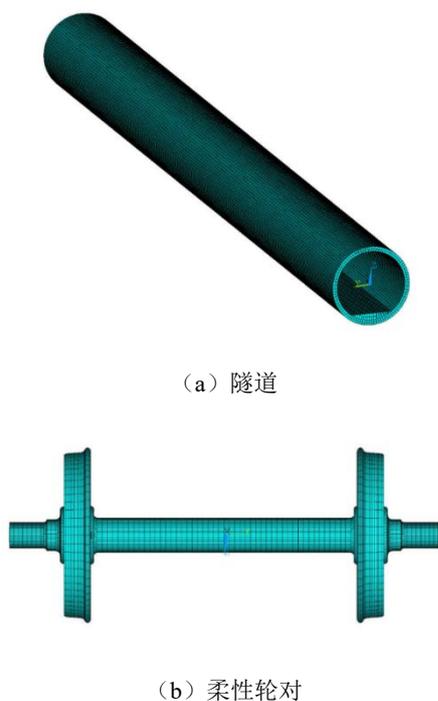


图2 隧道和柔性轮对模型

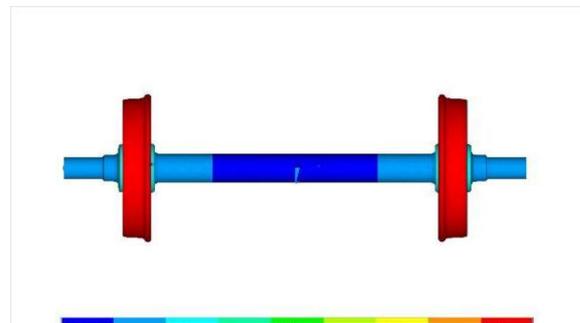
### 2.2 柔性轮对模态求解

在 ANSYS 中建立轮对的有限元模型之后,利用 Block Lanczos 法对柔性轮对模态进行分析,该方法可以有效提取具有 50000~100000 个自由度的中大型模型的振型,表 1 和图 3 分别给出了柔性轮对在自由状态下的部分模态频率和其固有振型结果。

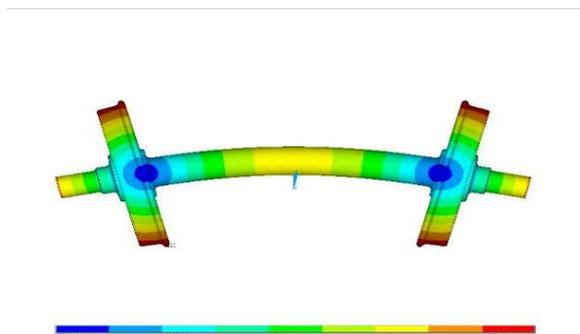
表 1 轮对自由模态

模态振型	柔性轮对频率
扭转模态	84.1Hz

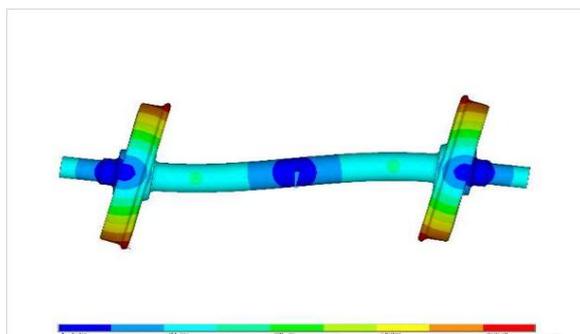
一阶弯曲模态	101.8Hz
二阶弯曲模态	193.8Hz
三阶弯曲模态	381.1Hz
伞型模态	371.5Hz



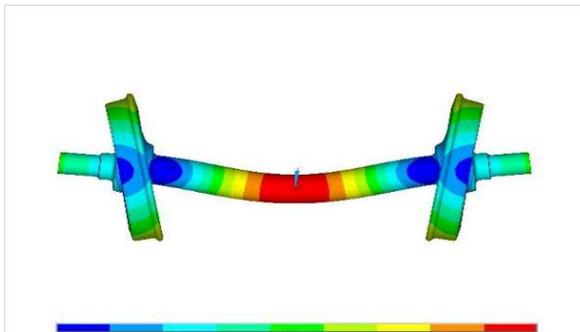
(a) 扭转模态



(b) 一阶弯曲模态



(c) 二阶弯曲模态



(d) 三阶弯曲模态

图3 柔性轮对模态自由云图

### 2.3 轨道接触模型与车辆系统动力学模型的建立

假定轮毂由于弹性变形而移动，但是踏面截面形状和轨头截面形状保持不变，在这里引入一个无质量的刚体作为踏面外形，在无质量刚体和钢轨之间生成轮轨接触关系，而此刚体通过车轮踏面上的一点与弹性轮对固定连接，通过连接点传递运动学关系、力和力矩。

### 2.4 车辆系统动力学模型的建立

在UM软件中建立完整的车辆系统模型，模型由1个车体、2个转向架、4个轮对和8个轴箱组成。其中，车体、转向架和轮对均设置横向、垂向、纵向、点头、摇头、侧滚6个自由度，轴箱设置1个转动自由度，整个车辆有50个自由度<sup>[16]</sup>，模型中各部件的质量、转动惯量参数，一、二系悬挂参数及其他结构参数均示于表2。然后把柔性轮对和外部隧道子系统导入到UM中，最终得到刚柔耦合车辆-轨道-隧道系统动力学模型，如图4所示。

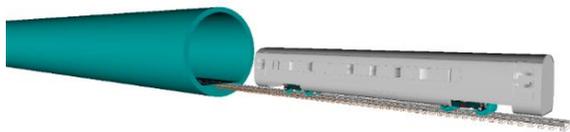


图4 刚柔耦合车辆-轨道-隧道系统

表2 A型车车辆参数

车辆参考单位	数值
车辆全长/m	22.5
车辆定距/m	15.6
固定轴距/m	2.5
车体质量/t	41.86
转向架质量/t	7.358
轮对质量/t	1.78
一系竖向阻尼系数/(N·S/m)	1300
一系横向阻尼系数/(N·S/m)	15
二系竖向阻尼系数/(N·S/m)	1300
一系横向阻尼系数/(N·S/m)	2300
一系竖向弹簧刚度/(kN/m)	1384
一系横向弹簧刚度/(kN/m)	5000
二系竖向弹簧刚度/(kN/m)	355

二系横向弹簧刚度/(kN/m)	158
轨距/m	1.435
车体侧滚质量转动惯量/(t·m <sup>2</sup> )	155
车体点头质量转动惯量/(t·m <sup>2</sup> )	1959
车体摇头质量转动惯量/(t·m <sup>2</sup> )	1875
转向架侧滚质量转动惯量/(t·m <sup>2</sup> )	5.07
转向架点头质量转动惯量/(t·m <sup>2</sup> )	1.47
转向架摇头质量转动惯量/(t·m <sup>2</sup> )	3.43
轮对侧滚质量转动惯量/(t·m <sup>2</sup> )	0.92

## 3 多体动力学耦合模型验证

### 3.1 垂向轮轨力

用UM多体动力学软件模拟列车在平直轨道上以60km/h的速度行驶，设置车轮多边形幅值为0.01mm，阶数为11阶，对比分析刚性轮对和柔性轮对在同一条件下的垂向轮轨力，如图5所示。

从图5的时程曲线可以看出，考虑柔性轮对时的垂向轮轨力变化幅度要比考虑刚性轮对时的大，同一时间下考虑柔性轮对时的垂向轮轨力绝对值要大于考虑刚性轮对时的垂向轮轨力，并且垂向轮轨力的最大值从考虑刚性轮对时的78.77kN增加为82.37kN，最小值从60.76kN减小到58.67kN。由此可见考虑柔性轮对的垂向轮轨力的计算结果与考虑刚性轮对有明显差异。

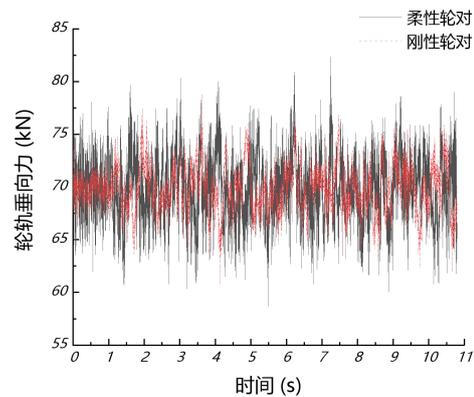


图5 垂向轮轨力时程曲线

### 3.2 频域分析

在车辆实际行驶过程中，由于轮对要承受构架、轴箱、车体等上部构件的重量，因此对于车辆轮对来说必然会有压缩变形和弯曲变形，使轮轴中心不再处于理想位置。图6为列车以成都地铁10号线实测线路谱为轨道不平顺，在60km/h的速度

下行时车轮垂向挠度的变化曲线。从图中可以看出，在列车的行驶过程中考虑柔性轮对时轮对的垂向挠度会在正负值之间变化，而考虑刚性轮对时就不存在挠度变化的情况，因此考虑柔性轮对能够更好地模拟列车的实际行驶。

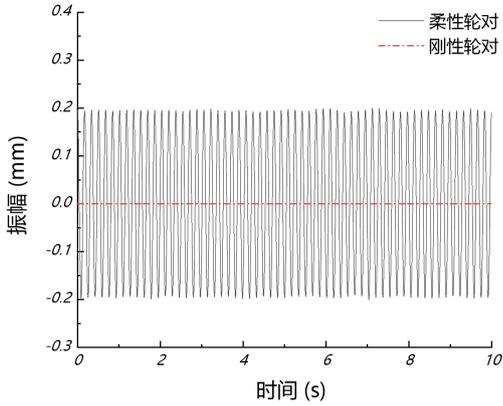


图6 轮对垂向挠度时间历程曲线

#### 4 仿真计算及分析

车轮多边形可以用车轮一周轮径变化的主谐波数来表示，即车轮多边形阶数。本节采用基于谐波函数的理论模型<sup>[17]</sup>描述车轮滚动周期性不圆变化，其表达式如下：

$$r(\alpha, \rho, N) = R + \rho \cdot \sin(N\alpha)$$

车轮多边形引起的激振频率可表示为：

$$f_N = \frac{Nv}{2\pi R}$$

以车轮圆心处为坐标基点，车轮半径  $r$  沿圆周方向呈周期性变化， $\alpha$  为角坐标变化，基准为车轮名义滚动圆半径  $R$ ，周期为车轮多边形阶数  $N$ ，幅值为  $\rho$ ， $v$  为车辆行驶速度。

本节基于上述理论，通过改变车轮多边形阶次、幅值以及列车行驶速度来探究车轮多边形对地铁列车车轨振动及轮轨力的影响。

##### 4.1 车轮多边形下不同车速的轮轨振动和轮轨力

将车轮多边形的幅值设为 0.01mm，多边形阶数设为 11 阶，分别设置速度为 40km/h、50 km/h、60 km/h、70 km/h 和 80 km/h 的 5 组工况，通过模拟列车在隧道中的行驶过程分析列车通过时柔性轮对的垂向加速度、柔性轨道的垂向加速度和垂向位移以及轮轨力的变化情况，结果如图 7~图 10 所示。

图 7 和图 8 分别为不同车速下地铁列车前转向架第一轮对的垂向加速度的时域图及频域图，由图 7 不同列车时速下的时域图可知，当车速到达 60km/h 以上时，轮对垂向振动加速度的幅值以及波动明显增大，在车速到达 80km/h 时，轮对垂向

加速度可达 60m/s<sup>2</sup>，由图 8 不同列车时速下的频域图可以看出车辆在行驶过程中由车轮多边形引起的中、高频成分较多。当车速到达 80km/h 时，优势频率集中在  $f_{p1}=95\text{Hz}$ 、 $f_{p2}=210\text{Hz}$ 、 $f_{p3}=360\text{Hz}$  左右，与柔性轮对一阶弯曲模态（101.8Hz）、二阶弯曲模态（193.8Hz）、三阶弯曲模态（381.1Hz）相对应。

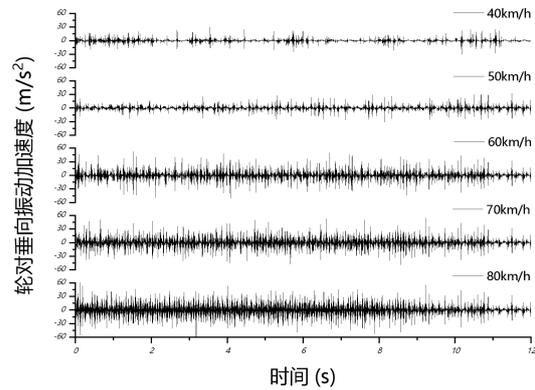


图7 轮对垂向振动加速度时域图

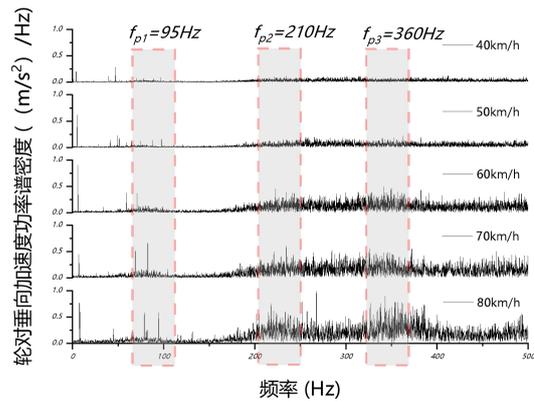


图8 轮对垂向振动加速度频域图

图 9 和图 10 为不同车速在同一测点下的柔性轨道垂向加速度的时域图及频域图，测点布置在位于隧道中部的轨道上。从图 9 不同车速下的时域图可以看出相对于柔性轮对，柔性轨道各速度梯度下的垂向振动加速度的幅值增加明显，在考虑车轮多边形时随着车速的增加，柔性轨道垂向振动加速度明显递增；分析图 10 不同车速下的频谱可知，相对于轮对，柔性轨道中、高频的垂向振动加速度峰值明显减小。

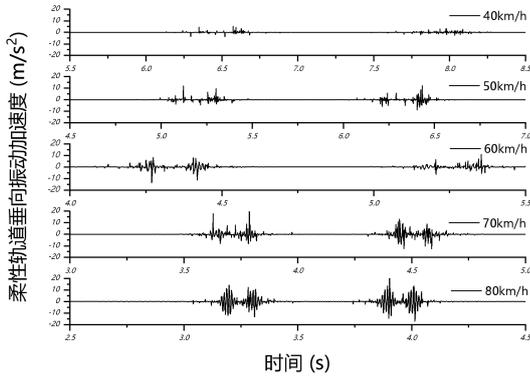


图 9 轨道垂向振动加速度时域图

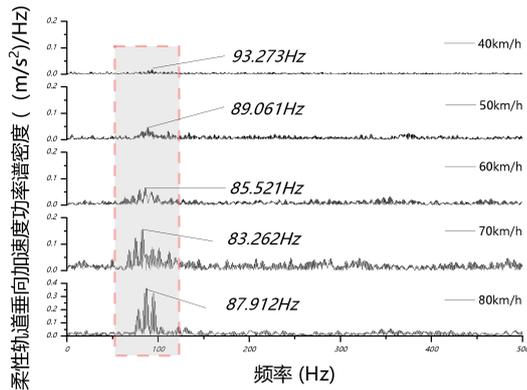


图 10 轨道垂向振动加速度频域图

图 11 为垂向轮轨力最大值与最小值随速度的变化曲线。由图 11 可知，对于地铁列车，垂向轮轨力波动随着列车的运行速度的提高而增大，当列车时速达到 70km/h 时，垂向力幅值明显增大，且当车速达到 80km/h 时垂向轮轨力最大值与最小值的差值达到 40kN 左右。这是因为在该速度等级下由 11 阶车轮多边形产生的轮轨冲击频率与轮对模态频率相近而引发的共振现象。

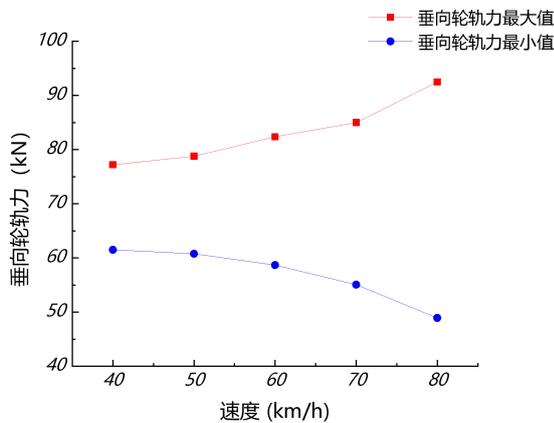
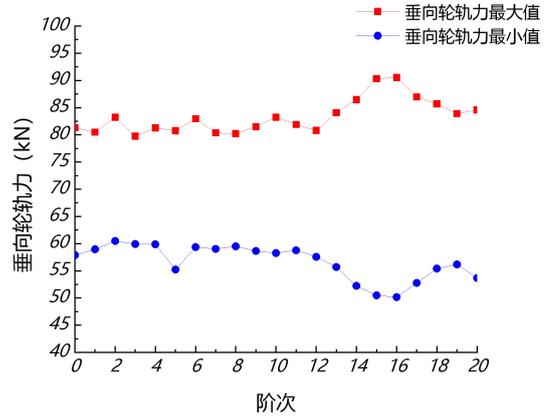


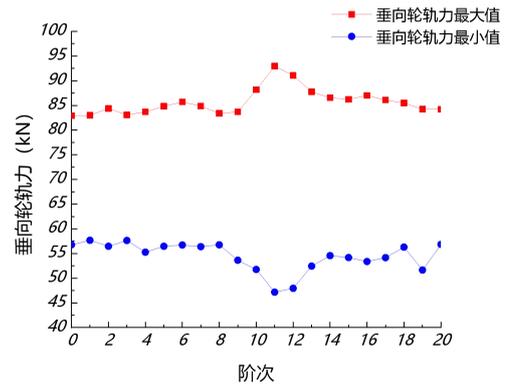
图 11 垂向轮轨力随速度变化曲线

#### 4.2 车轮多边形阶次对轮轨力的影响

运用多体动力学软件 UM 将列车车速设置为 60km/h 和 80km/h，设置车轮多边形的幅值为 0.01mm，分别计算出车轮多边形阶数为 0~20 阶时列车运行时的垂向轮轨力，将垂向轮轨力的最大值和最小值的变化情况示于下图 12。



(a) 60km/h 垂向轮轨力



(b) 80km/h 垂向轮轨力

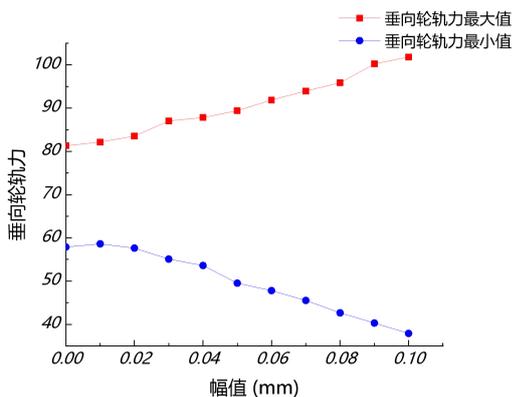
图 12 垂向轮轨力随阶次变化曲线

由图 12(a)可以看出，当列车时速为 60km/h 时，车轮多变形的阶次在 0~12 阶的范围内垂向轮轨力随多边形阶次的变化并无明显规律，垂向轮轨力最小值随车轮多边形阶次先减小后增加，并在当车轮多边形阶次为 16 阶时最大值与最小值之间的变化差值达到最大，垂向轮轨力最大值达 90.53kN，垂向轮轨力最小值达 50.15kN。而对于列车时速为 80km/h 的工况，如图 12 (b)，车轮多边形的阶次在 0~8 阶和 14~20 的范围内垂向轮轨力随多边形阶次的变化并无明显规律，但当车轮多边形阶次来到 8~14 范围内，就又会呈现如 60km/h 车速工况一样的规律，并在车轮多边形阶次为 11 阶时最大值与最小值之间的变化差值达到最大，垂向轮轨力最大值达到 92.96kN，垂向轮轨力最小值达 47.17kN。出现这种现象的原因是车轮多边形阶次主要影响激振频率的主频大小，当激振频率与车轮及轨道结构的模态频率相近时，就会引起共振，进而导致轮轨冲击加剧，

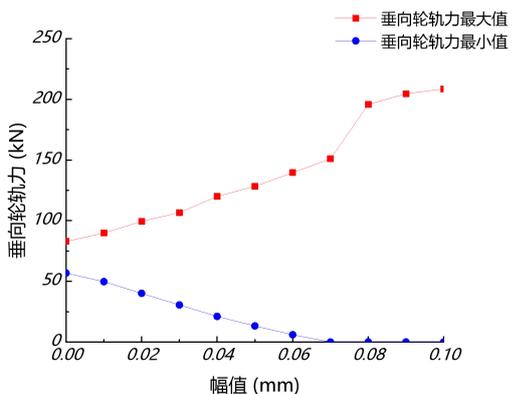
不仅会产生巨大的噪音，还会使得车轮和轨道的磨损加快，甚至会产生疲劳破坏。对于不同的车速来讲，需要到达这种共振所需的车轮多边形数有所不同，对于 60km/h 的行车速度，车轮多边形为 16 阶时便会激起共振，但对于 80km/h 的行车速度，车轮多边形阶数为 11 阶便可激起。

### 4.3 车轮多边形幅值对垂向轮轨力的影响

运用多体动力学软件 UM 将列车车速设置为 60km/h，分别设置车轮多边形的阶数为 11 阶、16 阶，再分别计算出车轮多边形幅值为 0.01mm 到 0.10mm 时列车运行时的垂向轮轨力，将垂向轮轨力的最大值和最小值的变化情况示于下图 13。



(a) 11 阶垂向轮轨力



(b) 16 阶垂向轮轨力

图 13 垂向轮轨力随幅值变化曲线

从图 13 可以看出，在设置车轮多边形为 11 阶时，垂向轮轨力最大值随着车轮多边形幅值的增大而增大，垂向轮轨力最小值则随之增大而减小，而且对比车轮多边形为 16 阶时，相同幅值增量下的垂向轮轨力增量较小。当车轮多边形阶数为 16 阶，幅值超过 0.07mm 时，垂向轮轨力最大值会激增到 200kN 以上，最小值为 0，这说明车轮已失去了轨道的支撑发生了跳轨现象，对行车安全威胁极大。

### 4.4 车轮多边形幅值限值

为了避免地铁列车在正常运营中发生跳轨现象，保证列车的安全行驶，根据垂向轮轨力最小值为 0，计算在车速 60km/h 和 80km/h 下 8~20 阶车轮多边形幅值的安全限值，结果如图 14 所示。由图可知，不同的车轮多边形阶数所对应的幅值限值是不同的；对于车速 60km/h，车轮多边形阶数为 16 阶时，幅值限值最低，为 0.07mm，说明在 60km/h 的车速下 16 阶车轮多边形引起的激振频率与车轮及轨道结构的模态频率最为相近；对于车速 80km/h，车轮多边形阶数为 11 阶时，幅值限值最低，为 0.07mm，说明在 80km/h 的车速下 11 阶车轮多边形引起的激振频率与车轮及轨道结构的模态频率最为相近，因此应该严格控制车轮多边形阶数及幅值，当车轮出现不圆时，应及时通过镟修来调整，避免对行车安全造成威胁。

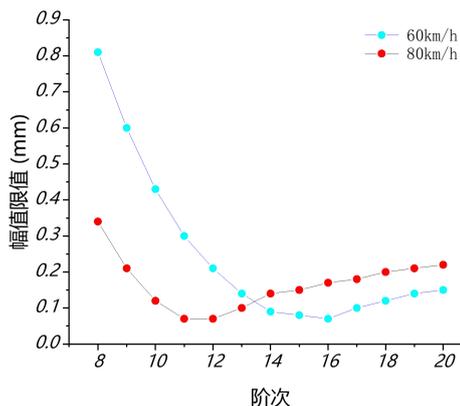


图 14 车轮多边形幅值安全限值

## 5 结论

利用多体动力学仿真软件 UM,以及有限元通用软件建立了隧道-车线-轨道耦合模型，分析了车轮多边形化对车轨振动及轮轨力的影响。

(1) 当地铁列车在 80km/h 速度等级下，且车轮多边形阶数位于 11-12 阶时，车轮多边形产生的轮轨冲击频率较高会造成较大的轮对垂向振动加速度，且容易与轮对的弯曲模态频率相近而引发共振。多边形幅值的增加加剧了轮轨力的波动。根据跟踪测试情况，10-12 阶车轮多边形比较容易产生，故建议列车避免长时期以 80km/h 的速度匀速运行，并及时镟修车轮。

(2) 在列车在 60km/h 速度等级下，车轮多边形引起的垂向轮轨力在阶数为 12~20 阶的范围内随多边形阶数的增大先增大后减小，随车轮多边形幅值增大而增大；在列车在 80km/h 速度等级下，车轮多边形引起的垂向轮轨力在阶数 8~14 阶的范围内随多边形阶数的增大先增大而减小。在地铁列车正常运营的速度范围内（60km/h~80km/h），8~20 阶车轮多边形对轮轨力变化影响较大。

(3) 为了避免地铁列车在正常运营中发生跳轨现象，确

定了车速在 60km/h 下 8~20 阶车轮多边形幅值限值,当车轮多边形阶数为 16 阶时,幅值限值最低为 0.07mm;确定了车速在 80km/h 下 8~20 阶车轮多边形幅值限值,当车轮多边形阶数为 11 阶时,幅值限值最低为 0.07mm,可为列车车轮镟修提供参考。

### 参考文献:

- [1]马卫华,罗世辉,宋荣荣.地铁车辆车轮多边形化形成原因分析[J].机械工程学报,2012,48(24):106-111.
- [2]宋志坤,岳仁法,胡晓依,等.车轮多边形对车辆振动及轮轨力的影响[J].北京交通大学学报,2017,41(6):88-93
- [3]邢远,阚前华,徐祥.CRH3 型动车组车轮多边形化对轮轨接触力的影响[J].重庆理工大学学报(自然科学),2020,34(3):74-79.
- [4]李霞,温泽峰,金学松.地铁车轮踏面异常磨损原因分析[J].机械工程学报,2010,46(16):60-66.
- [5]李伟,李言义,张雄飞,等.地铁车辆车轮多边形的机理分析[J].机械工程学报,2013,49(18):17-22.
- [6]杨晓璇,李伟,陶功权,等.A 型地铁车辆车轮多边形磨损成因初探[J].机械制造与自动化,2019,48(04):22-25.
- [7]谢昆佑. 基于 UM 和 ANSYS 联合仿真的中低速磁浮车辆-轨道梁系统耦合振动分析[D].西南交通大学,2019.
- [8]李国芳,岳鹏,丁旺才,等.轮对柔性对车辆动态曲线通过性能的影响研究[J].铁道标准设计,2019,63(09):173-179.