

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2015.09.006

基于 Braghin 模型的机车车轮磨耗研究*

曹文战, 李 芾*, 丁军君

(西南交通大学 机械工程学院, 四川 成都 610031)

摘要:针对 D19E 型内燃机车车轮磨耗问题, 分析了越南铁路基本技术及 D19E 型内燃机车结构, 采用 SIMPACK 软件建立了 D19E 型内燃机车动力学模型, 并根据越南干线实际情况建立了线路模型。提出了基于机车动力学模型、FASTSIM 算法与 Braghin 踏面磨耗模型为一体的车轮磨耗计算模型, 并发展了相应的数值方法。利用该模型对 D19E 型内燃机车车轮磨耗进行了仿真分析, 采用小波滤波平滑方法对踏面磨耗深度数据进行了平滑, 并与现场实测结果进行了对比。研究表明, 磨耗主要发生在踏面上(-50 mm ~ 45 mm) 范围内, 轮缘根部处磨耗最大; 踏面磨耗量的仿真结果与现场实测结果基本一致, 说明该仿真模型能较好地模拟机车车轮磨耗的演化过程, 可靠性高。

关键词:车辆工程; 车轮磨耗; FASTSIM 算法; 磨耗模型; 动力学仿真; 轮轨接触

中图分类号:TH117.1

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2015)09-1176-05

Wheel wear of locomotive based on Braghin's model

TAO Van-chien, LI Fu, DING Jun-jun

(School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Aiming at the wheel wear problem of D19E diesel locomotive, the basic technology of Vietnam railway and D19E diesel structure were analyzed, the D19E diesel locomotive dynamics model was built by SIMPACK software and a railway line model was built based on Vietnam railway line. A model in which locomotive dynamics, FASTSIM algorithm and Braghin profile wear model were combined, was developed to predict the wheel tread wear. The wheel wear of D19E diesel locomotive was simulated based on this model, the tread wear depth data was smoothed based on sliding mean method, and the simulation results were compared with that of field measured results. The results indicate that, the wear occurs in (-50 mm ~ 45 mm) of wheel tread, the maximum wear depth occurs in wheel flange root. The wear depth of wheel tread in simulation results and field measured results are similar, show that presented simulation model is feasible to predict the wheel tread wear of locomotive, high reliability.

Key words: vehicle engineering; wheel wear; FASTSIM algorithm; wear model; dynamic simulation; wheel rail contact

0 引 言

机车车轮磨耗是一个非常复杂的问题及重要研究的领域。自 19 世纪机车车轮磨耗问题被提出以来, 各国科学家用很多方法与途径在机车车轮磨耗开展了大量的研究, 主要集中在轮轨滚动基础理论, 磨耗的实验和仿真, 磨耗的滚动接触疲劳的耦合关系上面。Jendel

等^[1]基于 Hertz 理论和 Archard 模型提出了车轮磨耗仿真模型, 仿真结果与现场测量数据较吻合; Ansary 等^[2-3]对机车轮缘厚度进行测量, 然后对每个轮缘厚度下的磨耗率进行计算, 结果表明轮缘厚度越小, 磨耗率越大; Zobory^[4]根据能量流密度发展了车轮踏面磨耗预测模型。Kik^[5]介绍了非椭圆接触斑内接触区域和法向接触应力的计算方法。丁军君等^[6]基于半赫兹

收稿日期: 2015-04-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51305359)

作者简介: 曹文战(1982-), 男, 越南人, 博士研究生(留学生), 主要从事机车车辆理论与设计方面的研究。E-mail: tvchiendmtx@gmail.com

通信联系人: 李 芾, 男, 教授, 博士生导师。E-mail: lifuswjtu@gmail.com

接触,赫兹接触和 Kalker 完全理论程序 CONTACT 分别计算轮轨接触应力和接触形状,并计算车轮磨耗深度在踏面上的分布。罗仁等^[7]基于 Archard 磨耗模型,磨耗功的磨耗模型对高速列车车轮磨耗预测仿真,提出了车轮运行一定距离后的车轮型面磨耗发展趋势。通过多年的研究,现在轮轨滚动接触理论越来越完善,并成为铁路机车车辆动力学的主流方向之一。

随着铁路重载的发展趋势加剧了轮轨作用,导致车轮和钢轨间的磨耗也越来越严重,对疲劳寿命有很大的影响。若车轮在实际中磨耗过大,则会影响行车安全,增加消耗列车动力,速度下降,稳定性也降低,对机车在线路上运行品质的影响较大。因此,对机车车轮磨耗进行研究是非常必要的。

本研究针对 D19E 型内燃机车车轮磨耗问题,提出根据机车动力学模型,FASTSIM 算法与 Braghin 车轮磨耗仿真模型为一体的机车车轮磨耗预测模型,并编制相应的计算程序。笔者应用该模型对机车在越南实际线路上运行的车轮踏面磨耗分布和发展情况进行仿真,为机车车轮磨耗领域的研究提供理论与技术参考依据。

1 车轮磨耗计算模型与程序的功能

车轮踏面磨耗预测模型包括机车动力学模型、轮轨接触分析与 Braghin 磨耗预测模型 3 部分。本研究通过机车动力学仿真模型得到了轮轨作用力等数据,并将其与轮轨接触模型计算踏面上的轮轨接触点位置、接触斑形状、滑动量分布、蠕滑率分布、黏滑区分布等参数;然后根据 Braghin 磨耗预测模型对各个位置的磨耗深度进行计算,选择磨耗数据平滑处理方法与车轮型面更新条件得到车轮型面磨耗深度的分布;最后将新的踏面形状再重复计算,直到机车运营距离或车轮磨耗达到限定值为止。

整个仿真计算过程如图 1 所示。

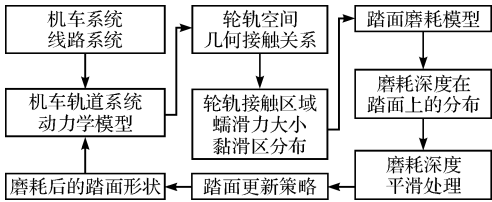


图 1 车轮磨耗仿真计算过程

车轮踏面磨耗预测模型及对应的计算程序可以用于对机车车轮在任意实际线路的磨耗进行模拟,得到车轮型面磨耗深度的分布与对应的运行距离;可以用

于研究轮轨型面、转向架悬挂参数、机车结构对车轮磨耗的影响,从而对这些参数进行优化等。

1.1 机车-轨道系统动力学模型

本研究采用 SIMPACK 软件建立了 D19E 型内燃机车动力学模型,该模型如图 2 所示。

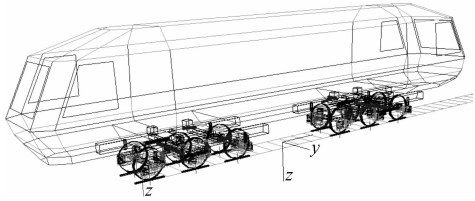


图 2 D19E 型机车动力学模型

该机车用于越南主要干线的客牵引,最高速度 120 km/h,标称功率 1 900 hp,走行部为 13 t 轴重的三轴转向架,轮径为 1 000 mm。模型包括车体,轮对,两个构架,钢轨,道床以及弹簧,阻尼等元件构成。采用实测的 ML₁₉型踏面为初始型面,轨道采用越南 P43 钢轨,轨距为 1 000 mm,1:20 轨底坡,详细参数见文献[8]。模型中假设轮对,构架和车体均为刚体,并忽略钢轨的弹性变形。本研究在动力学模型仿真中采用美国轨道不平顺五级线路谱进行计算。

线路以越南的河内-岷港线路为例,根据越南实际线路的直线和曲线比例进行建立线路模型。河内-岷港线路总长 791 km,共有曲线 811 个,曲线总长 219.34 km,占线路总长的 27.73%。

河内-岷港线路上不同曲线半径及对应长度如表 1 所示。

表 1 河内-岷港线路不同曲线半径及对应长度

曲线半径/m	曲线长度/km	长度百分比/%
$R < 100$	3.21	0.41
$100 < R < 225$	11.13	1.41
$225 < R < 300$	7.28	0.92
$300 < R < 600$	17.43	2.2
$600 < R < 800$	71.18	9
$800 < R < 1\,000$	33.59	4.24
$1\,000 < R < 1\,200$	17.45	2.21
$1\,200 < R < 1\,500$	20.92	2.64
$R > 1\,500$	37.15	4.7
直线	571.66	72.27
总计	791	100.0

1.2 轮轨滚动接触理论

在车轮磨耗仿真分析中,轮轨滚动接触模型对计算速度和精度的影响较大。目前,Kalker 的 FASTSIM 算法被广泛应用。本研究也采用 Kalker 的 FASTSIM 算法对轮轨接触问题进行计算分析。该方法将接触斑

划分成 $n_x \times n_y$ 单元格, 并假设接触斑内任意一个点 (x, y) 的弹性位移 u 与同方向面力 p 和柔度系数 L 有关^[9-11], 即:

$$u(x, y) = L \cdot p(x, y) \quad (1)$$

滑动方程描述如下:

$$\begin{cases} \frac{V_x}{V_v} = \xi_x - \varphi_y - \frac{\partial u_1(x, y)}{\partial x} \\ \frac{V_y}{V_v} = \xi_y + \varphi_x - \frac{\partial u_2(x, y)}{\partial x} \end{cases} \quad (2)$$

式中: V_x, V_y —纵向和横向滑动速度; V_v —机车运行速度; ξ_x, ξ_y —纵向和横向蠕滑率; φ —自旋蠕滑率; u_1, u_2 —纵向和横向弹性位移。

对式(2)进行量纲化处理得到的矢量形式如式(3)所示:

$$\mathbf{w} = \mathbf{s} - \frac{\partial \mathbf{p}}{\partial \mathbf{x}} \quad (3)$$

式中: $\mathbf{w}$ —总的滑动矢量, $\mathbf{s}$ —刚性滑动矢量, $\partial \mathbf{p} / \partial \mathbf{x}$ —弹性滑动矢量。

通过积分式(3)得到接触斑内任意一个单元格的切向力 $F(x, y)$ 。根据库伦摩擦定理与赫兹接触理论, 接触斑内单元格的切向力极限 $F_L(x, y)$ 如下:

$$F_L(x, y) = \mu \frac{2N}{\pi ab} \left(1 - \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} \right) \quad (4)$$

式中: $F_L(x, y)$ —切向力极限值; N —法向正压力; μ —摩擦系数; a, b —椭圆接触斑的半长轴与短轴。

若 $F(x, y) \leq F_L(x, y)$, 则单元格处在黏着区; 若 $F(x, y) > F_L(x, y)$, 则滑动出现, 滑动区内单元格的切向力 $F'(x, y)$ 为:

$$F'(x, y) = F_L(x, y) \frac{F(x, y)}{|F(x, y)|} \quad (5)$$

把式(1~5)联合起来可计算出接触区域内黏滑区分布与各单元格 (x, y) 的蠕滑力。

1.3 Braghin 磨耗预测模型

Braghin 在试验台上对轮轨磨耗进行试验, 并建立了根据试验结果的车轮踏面磨耗预测模型。在每个时间步, 将接触斑划分成黏着区与滑动区, 滑动区即为 A_s , 黏着区即为 A_a , 并认为只滑动区域有磨耗, 接触斑内黏滑区的分布如图 3 所示。对接触斑内任意一个单元格 (i, j) , 其磨耗深度为^[12]:

$$\Delta z(i, j) = \begin{cases} k_B(i, j) \frac{V_v \Delta t(i, j)}{\rho} & (i, j) \in A_s \\ 0 & (i, j) \in A_a \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\Delta z(i, j)$ —单元格 (i, j) 的磨耗深度; V_v —机车运行速度; Δt —车轮滚过单元格 (i, j) 的时间; ρ —材料密

度; $k_B(i, j)$ —磨耗率。

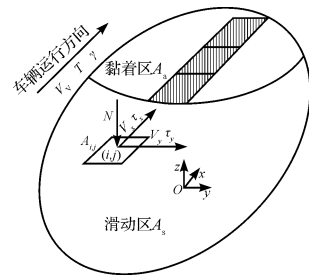


图 3 接触斑内黏滑区的分布

磨耗率 k_B 与 $T(i, j) \cdot \xi(i, j) / A(i, j)$ 的值有关, 不同磨耗区的磨耗率取值条件如表 2 所示。

表 2 Braghin 模型不同磨耗区的磨耗率取值条件

磨耗区	$T(i, j) \cdot \xi(i, j) / A(i, j) /$ ($\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$)	磨耗率 $k_B /$ ($\mu\text{g} \cdot (\text{m}^{-1} \text{mm}^{-2})$)
I	$T(i, j) \cdot \xi(i, j) / A(i, j) < 10.4$	$5.3 \cdot T(i, j) \cdot \xi(i, j) / A(i, j)$
II	$10.4 \leq T(i, j) \cdot \xi(i, j) / A(i, j) < 77.2$	55.0
III	$77.2 \leq T(i, j) \cdot \xi(i, j) / A(i, j)$	$61.9 \cdot T(i, j) \cdot \xi(i, j) / A(i, j)$

$T(i, j), \xi(i, j), A(i, j)$ —单元格的蠕滑力, 蠕滑率与单元格的面积

2 车轮磨耗的平滑方式与更新策略

由于预测仿真过程中机车车轮运动不是连续的过程, 造成磨耗仿真预测得到的数据出现锯齿型, 不符合实际情况, 需要对仿真的磨耗数据进行平滑处理。针对数据平滑处理问题, 目前被广泛采用的方法有: 快速傅里叶变换(FFT)低通滤波平滑; 滑动平均法平滑; 小波滤波平滑, 详细过程见文献[13-16]。本研究选用小波滤波平滑对预测的磨耗数据进行处理。

小波滤波平滑方法描述如下:

在小波滤波分析中, 磨耗深度数据被认为由低频部分的信号和高频部分的噪声两部分信号组成, 对磨耗深度数据进行平滑处理就是对该信号进行滤波去噪。若母小波 $\varphi(t)$ 满足条件^[17]:

$$\int_0^\infty \frac{|\hat{\varphi}(\omega)|^2}{\omega} d\omega < \infty \quad (7)$$

式中: $\varphi(t)$ —母小波, $\hat{\varphi}(\omega)$ — $\varphi(t)$ 的傅里叶变换, ω —频率。

则信号 $x(t)$ 的小波变换描述如下:

$$W(\alpha, \beta) = \int_{-\infty}^\infty x(t) \frac{1}{\sqrt{\alpha}} \psi^* \left(\frac{t-\beta}{\alpha} \right) dt \quad (8)$$

式中: t —时间; $x(t)$ —原始信号; $W(\alpha, \beta)$ — $x(t)$ 的小

波变换; α, β —尺度因子与位移因子,决定小波变换的频率信息与时域信息。

本研究对信号进行小波分解,通过 m 层小波分解后,得到小波变换系数。然后对小波分解高频系数进行软阈值去噪,得到小波分解系数表达如下:

$$\bar{\varepsilon} = \begin{cases} \text{sgn}(\varepsilon) \cdot (|\varepsilon| - \tau) & |\varepsilon| > \tau \\ 0 & |\varepsilon| \leq \tau \end{cases} \quad (9)$$

式中: ε —小波系数; $\bar{\varepsilon}$ —小波分解系数; τ —阈值, $\tau = \xi \sqrt{2\lg(m)}$; ξ —噪声标准差。

本研究基于小波分解的低频系数与处理后的高频系数,重构得到去噪以后的滤波信号。

机车在实际运行中,车轮踏面的磨耗是连续的过程,而在仿真中不能对车轮踏面实时更新,因此只能在车轮磨耗到一定限值时再更新。根据文献[18]最大的磨耗深度达到 0.1 mm 对车轮踏面进行更新一次较为合适。本研究也采用 0.1 mm 磨耗量作为车轮型面更新的条件。

3 机车车轮磨耗仿真分析

本研究应用以上的模型对 D19E 型机车车轮磨耗进行仿真分析。机车在运营一定距离后的车轮型面磨耗分布及踏面形状如图 4、图 5 所示。

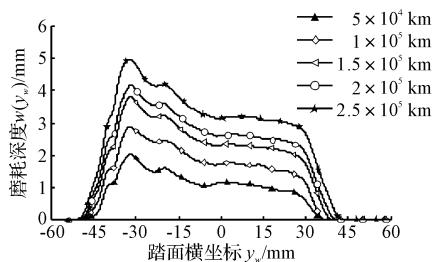


图4 车轮踏面上的磨耗深度分布

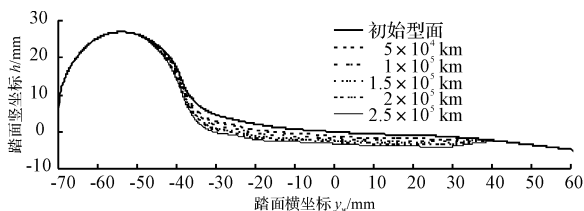


图5 车轮磨耗后踏面形状

由图 4 可见,机车在越南河内-岷港线路上运营时,车轮踏面上(−50 mm ~ 45 mm)区间是发生磨耗的主要范围,在轮缘根部处(−37 mm ~ −30 mm)范围内磨耗深度最大,在踏面中部(−10 mm ~ 0 mm)范围内磨耗最小,与现场测量数据吻合较好。由实际线路的曲线比例可见,小半径的曲线占比例较高,所以轮缘根部处磨耗较严重。机车通过小半径的曲线时,轮缘根

部是车轮接触主要部分,接触点位置主要分布在(−37 mm ~ −30 mm)范围,且对应的滑动量与正压力较大,导致其磨耗较严重,从踏面到轮缘,磨耗逐渐增加。随着运行距离的增加,车轮轮缘根部处的磨耗更加明显,踏面磨耗发展规律基本相同,踏面和轮缘磨耗速度变慢。机车运行 5×10^4 km, 1×10^5 km, 1.5×10^5 km, 2×10^5 km, 2.5×10^5 km 后,圆周磨耗深度分别为 1.164 mm, 1.740 mm, 2.321 mm, 2.611 mm, 3.141 mm。

4 仿真结果与实测结果对比分析

文献[19]对河内-岷港线上内燃机车车轮磨耗数据进行了统计,其中 D19E 型内燃机车运行 1×10^5 km, 1.5×10^5 km, 2×10^5 km, 踏面磨耗量均分别约为 2.179 mm, 2.712 mm, 3.174 mm, 磨耗主要发生在车轮型面横坐标(−50 mm ~ 50 mm)范围内。

仿真计算结果与文献[18]的现场实测结果相比,仿真得到的车轮型面磨耗发展情况与实测结果趋势相同,车轮踏面磨耗量的仿真结果与现场实测结果差异不大。经分析有以下原因:仿真的条件与实际运行条件不尽相同,所以磨耗系数不可能完全一致;机车在实际运行时,机车有制动、启动等过程对车轮磨耗有一定影响;模型中忽略了安装偏转角、轮径差、塑性变形等现象对车轮磨耗的影响;仿真过程中假设轨头型面保持不变,而实际上随着机车的运行轨头型面也发生变化。所以仿真计算结果与实测结果存在一定差异是在所难免的。

通过以上的分析,说明本研究所建的磨耗仿真模型能较好地模拟机车车轮磨耗的演化过程。通过车轮磨耗仿真模型,可以较快地研究机车结构参数、悬挂参数和轮轨型面对磨耗的影响,从而设计出具有较优性的机车。还可以通过磨耗预测仿真,研究减轻机车车轮磨耗的途径和措施,对车轮型面进行优化,为机车的可靠安全运行提供一定的理论与技术支持。

5 结束语

本研究提出了根据机车动力学模型、FASTSIM 算法与 Braghin 磨耗预测模型为一体的机车车轮磨耗预测模型,并编制了相应计算程序。笔者应用该模型对 D19E 型内燃机车在越南实际线路上运行的车轮踏面磨耗分布和发展情况进行仿真,并将仿真结果与实测结果进行了比较。研究结果表明:

(1) 机车在河内-岷港线路上运营时,车轮踏面上

(-50 mm ~ 45 mm) 区间是发生磨耗的主要范围, 在轮缘根部处(-37 mm ~ -30 mm) 范围内磨耗深度最大, 在踏面中部(-10 mm ~ 0 mm) 范围内磨耗最小, 从踏面到轮缘, 磨耗逐渐增加。随着运行距离不断增加, 车轮轮缘根部处磨耗量更加明显, 踏面磨耗发展规律基本相同, 轮缘和滚动圆处的磨耗速度均变慢;

(2) 车轮磨耗仿真模型能较好地模拟机车车轮磨耗行为, 车轮型面磨耗范围和磨耗发展情况与实测结果较吻合, 在相同运营距离, 仿真计算得到的车轮型面磨耗深度小于实测结果, 但差异不大, 由于仿真条件和实际线路运行条件不尽相同, 仿真结果不可能与实测完全一致。

(3) 通过所建的磨耗仿真模型, 可以较快地研究机车结构参数, 悬挂参数和轮轨型面对磨耗的影响, 研究减轻机车车轮磨耗的途径和措施, 为机车的可靠安全运行提供一定的理论与技术支撑。

参考文献 (References):

- [1] JENDEL T. Prediction of wheel profile wear-comparisons with field measurements[J]. **Wear**, 2002, 253(1-2): 89-99.
- [2] 丁军君. 基于蠕滑机理的重载货车车轮磨耗研究[D]. 成都: 西南交通大学机械工程学院, 2012.
- [3] ANSARI M, HAZRATI I A, Esmailzadeh E. Wear rate estimation of train wheels using dynamic simulation and field measurements[J]. **Vehicle system dynamics**, 2008, 46(8): 739-759.
- [4] ZOBORY I. Prediction of wheel/rail profile wear[J]. **Vehicle System Dynamic**, 1997, 28(2): 221-259.
- [5] KIK W, PIOTROWSKI J. A Fast, Approximate Method to Calculate Normal Load at Contact between Wheel and Rail and Creep Forces During Rolling[C]//2nd Mini Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems. Budapest: [s. n.], 1996: 52-61.

- [6] 丁军君, 李 芾, 黄云华. 基于半赫兹接触的车轮磨耗计算[J]. 西南交通大学学报, 2011, 46(2): 195-201.
- [7] 罗 仁, 曾 京, 戴焕云, 等. 高速列车车轮磨耗预测仿真[J]. 摩擦学学报, 2009, 29(6): 551-557.
- [8] 陈忠坚. C₀-C₀ 轴式机车动力学性能研究[D]. 河内: 交通与运输大学, 2009.
- [9] KALKER J J. Three Dimensional Elastic Bodies in Rolling Contact[M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publisher, 1990.
- [10] KALKER J J. A fast algorithm for the simplified theory of rolling contact[J]. **Vehicle System Dynamics**, 1982, 11(1): 1-13.
- [11] 金学松, 刘启跃. 轮轨摩擦学[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2004.
- [12] BRAGHIN F, LEWIS R, DWYER R S. A mathematical model to predict railway wheel profile evolution due to wear[J]. **Wear**, 2006, 261(11): 1253-1264.
- [13] 杨孙楷, 陈庆绸. 脉冲极谱实验数据的 FFT 滤波[J]. 计算机与应用化学, 1991, 8(2): 81-85.
- [14] 裴益轩, 郭 民. 滑动平均法的基本原理及应用[J]. 火炮发射与控制学报, 2001(1): 21-23.
- [15] 潘 泉, 张 磊, 孟晋丽, 等. 小波滤波方法及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [16] 李田科, 刘 辉, 王 亮, 等. 基于小波变换的自适应 Kalman 滤波算法研究[J]. 兵工自动化, 2013(1): 37-40.
- [17] 丁军君, 李 芾, 黄运华. 车轮磨耗仿真中踏面更新策略研究[J]. 铁道车辆, 2011, 49(8): 1-3.
- [18] ENBLUM R, BERG M. Simulation of railway wheel profile development due to wear influence of disc braking and contact environment[J]. **Wear**, 2005(258): 1055-1063.
- [19] 阮重孝, 范辉平. 河内-岷港线路内燃机车车轮磨耗问题的调查与研究[J]. 交通运输科学学报, 2010, 23(1): 90-96.

[编辑: 李 辉]

本文引用格式:

曹文战, 李 芾, 丁军君. 基于 Braghin 模型的机车车轮磨耗研究[J]. 机电工程, 2015, 32(9): 1176-1180.

TAO Van-chien, LI Fu, DING Jun-jun. Wheel wear of locomotive based on Braghin's model[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2015, 32(9): 1176-1180.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>