

车轮镟修踏面对地铁小半径曲线段外轨侧磨发展影响的仿真分析*

刘杨煜 王少锋 刘林芽

(华东交通大学土木建筑学院, 330013, 南昌//第一作者, 硕士研究生)

摘 要 建立常用的车辆-轨道耦合动力学分析模型计算轮轨动态相互作用, 基于非椭圆接触模型进行轮轨滚动接触分析。选用改进的 Archard 材料磨损模型计算材料磨损, 分析地铁 A 型车及 B 型车的 3 种车轮镟修踏面分别对小半径曲线外轨侧磨发展的影响。分析结果表明: 对每种镟修踏面, 钢轨服役的不同时期外轨侧磨增加的速率均不相同, 有快有慢; 外轨侧磨的发展可大致分为无侧磨阶段、侧磨平稳增长阶段及侧磨极速增长阶段; 在后两阶段中, 同种镟修踏面侧磨发展趋势近乎相同。对于地铁 B 型车而言, 将车轮镟修成 DIN5573 型有利于延缓外轨侧磨的发展。

关键词 地铁; 小半径曲线段; 车轮镟修踏面; 钢轨侧磨; 仿真分析

中图分类号 U270.331⁺1; U213.4⁺2

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2020.11.017

Simulation Analysis of Influence of Wheel Tread on Development of Outer Rail Side Wear of Small Radius Curve in Metro

LIU Yangyu, WANG Shaofeng, LIU Linya

Abstract A vehicle-track coupling dynamics analysis model is established to calculate the wheel-rail dynamic interaction. Wheel-rail rolling contact analysis is conducted based on the non-elliptic contact model. Improved Archard material wear model is used to calculate the material wear, to analyze the development of the rail side wear of the three metro wheel treads under the metro type-A and type-B vehicles. The analysis results show that the rate of increase of side wear in different periods of rail service is different; the development of side rail wear of metro outer rail can be roughly divided into three stages: side-less wear, side wear smooth growth and side wear speed increasing. Once the side wear occurs, the side wear strength of the same kind of metro wheel tread develops at similar speed. For the type-B vehicles, lathing the wheel into type DIN5573 will help to delay the development of the side rail wear.

Key words metro; small radius curve; wheel tread; rail side wear; simulation analysis

Author's address School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, 330013, Nanchang, China

地铁车辆轮对在使用过程中不断地被磨耗, 必须对其及时维修保养(主要是镟修)^[1]。我国北京、南京、杭州及深圳等城市地铁车辆车轮踏面大部分镟修成 LM 型踏面^[2]。随着外国地铁车辆的引进, 上海和广州等某些线路的地铁车辆车轮镟修踏面采用欧洲标准的 S1002 型踏面或者德国标准的 DIN5573 型踏面^[3]。由轮轨接触理论可知, 车轮踏面将直接影响轮轨接触几何关系, 进而影响钢轨磨耗的发展速率^[4]。已有研究表明, 外轨侧磨已经成为地铁小半径曲线钢轨更换的决定性因素^[5]。文献[6-11]分析了车轮镟修踏面对轮轨匹配关系的影响, 并提出措施来减缓钢轨磨耗的发展。

目前, 对不同车轮镟修踏面对外轨侧磨发展影响的研究较少。车轮镟修踏面会影响外轨侧磨的发展。为了不影响正常的列车运行, 保证地铁列车运行的安全性, 降低地铁的运营成本, 根据长期的轨道车辆运营经验, 文献[12]提出“多磨轮少磨轨”期望。对此, 有必要针对不同的车轮镟修踏面对地铁小半径曲线侧磨发展的影响进行研究。本文基于多体动力学理论, 采用非椭圆接触的轮轨滚动接触模型以及 Archard 材料磨损模型, 研究 3 种地铁车轮镟修踏面的小半径曲线外轨侧磨发展规律, 为延缓外轨侧磨、延长钢轨服役时间提供科学依据。

1 外轨侧磨发展仿真分析模型

1.1 车辆动力分析模型及轨道模型

基于多体动力学软件, 分别建立地铁车辆常用

* 国家自然科学基金项目(51708221); 江西省自然科学基金项目(20171BAB206055); 江西省教育厅科研基金项目(GJJ150508)

的 A 型车与 B 型车车辆-轨道多体动力学模型。转向架、轮对等均采用 6 自由度刚体模拟。悬挂系统由一系和二系悬挂组成,采用弹簧阻尼或特殊力元进行模拟,可精确描述车辆结构间相互作用力的非线性特性。车辆载重工况为满载。图 1 为地铁 A 型车车辆-轨道多体动力学模型。

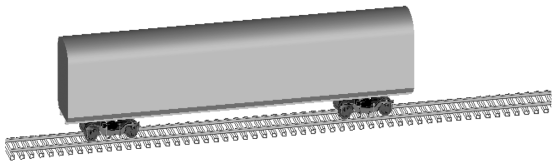


图 1 地铁 A 型车车辆-轨道多体动力学模型

其中,分别采用了 S1002 型、DIN5573 型和 LM 型等 3 种车轮镟修踏面,其外形图见图 2。

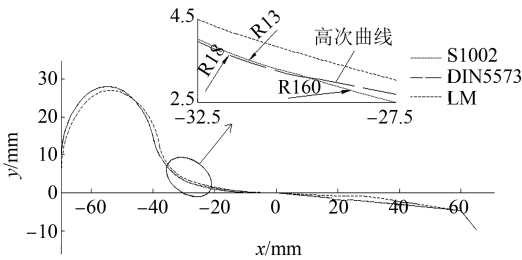


图 2 三种镟修踏面外形

基于常用的现场轨道条件,轨道模型基本参数设置如表 1 所示。

表 1 轨道参数设置表

曲线半径/ m	超高/ m	轨底 坡度	钢轨 类型	车速/ (km/h)	轨道不 平顺谱
300	0.12	1:40	CN60	60	德国高干扰谱

1.2 轮轨滚动接触模型

对于轮轨滚动接触模型,本文采用的是非椭圆接触模型。非椭圆接触模型是在假设车轮和钢轨的材料特性相同的基础上,把轮轨接触问题分解成轮轨法向接触问题及轮轨切向接触问题。

对于法向接触问题,假定非椭圆接触模型接触斑的形状为非椭圆形,车轮为旋转体,钢轨为圆柱体。对于切向接触问题,非椭圆接触模型基于 Kalker 的轮轨接触完全理论进行求解计算。

1.3 材料磨损模型及侧磨发展

目前,被广泛应用于轮轨磨损的模型是 Archard 材料磨损模型^[10,12]:

$$V = K_v \frac{Fd}{H} \quad (1)$$

式中:

- V ——材料磨损体积;
- d ——滑动距离;
- F ——法向接触力;
- H ——两相接触物理中较软材料的布氏硬度;
- K_v ——体积磨损系数。

本文对 Archard 磨损模型进行变形,把 Fd 定义为摩擦功 A ,把 $\frac{K_v}{H}$ 定义为新的磨损系数 K_w ,故有:

$$V = K_w A \quad (2)$$

根据文献[14]可知, K_w 的取值范围为 $0.04 \times 10^{-15} \sim 17.58 \times 10^{-15}$ 。

基于地铁车辆-轨道耦合模型计算 A ,并基于 Archard 材料磨损模型计算外轨侧磨量,得到钢轨侧磨如图 3 所示。在图 3 中,单次列车通过时的左右钢轨型面侧磨量分别为 $C_l(y)$ 及 $C_r(y)$,二者均为钢轨型面竖向位置 y 的函数。 $C_l(y)$ 明显较大, $C_r(y)$ 可忽略不计。故本文仅针对 $C_l(y)$ 进行研究。

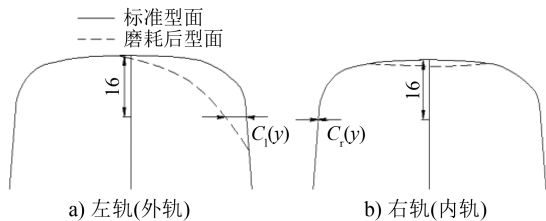


图 3 钢轨侧磨量示意图

一般有:

$$C_l(y) = \frac{\Delta V(y)}{Sdy} \quad (3)$$

式中:

- S ——小半径曲线的钢轨计算长度;
 - dy ——钢轨型面竖向的长度微段;
 - $\Delta V(y)$ —— dy 范围内钢轨的总磨损体积。
- 其中 ΔV 基于 Archard 磨损模型计算:

$$\begin{cases} \Delta V = \int dv \\ dv = k_w dA \end{cases} \quad (4)$$

式中:

- dA ——轨道长度微段上的轮轨摩擦功。

在多体动力学仿真软件中,采用累积磨损深度 ξ 设定迭代终止条件。当最大 ξ 达到一定值时,当前迭代步结束,并将磨损后的钢轨型面平滑处理后作为下次迭代的初始条件进行计算。当外轨侧磨出现时,计算外轨侧磨量最大值 C_{max} 。假设同一迭

代步内每次列车通过引起的钢轨侧磨相同,均等于外轨平均侧磨量 $\overline{C_1(y)}$, 则当前迭代步达到累积磨耗深度值时对应的列车通过次数 N 为:

$$N = \xi / C_{\max} \quad (5)$$

依据平均每月地铁车辆的运行次数 Q , 将列车通过次数转化为钢轨服役时间 T , 并因此计算外轨在当前迭代步的累积侧磨量为:

$$C_1(y) = \overline{C_1(y)} \cdot \frac{N}{Q} \quad (6)$$

根据 $C_1(y)$ 计算磨耗后的钢轨型面, 并采用 B 样条曲线进行平滑处理, 画出钢轨在不同服役时间所对应的型面, 继而得到外轨侧磨发展曲线。

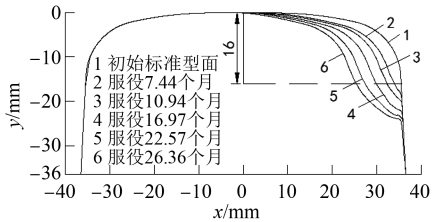
2 不同镟修踏面的外轨侧磨发展规律

为研究不同镟修踏面的外轨侧磨发展规律, 本文采用式(3)~(6), 分别对 A 型车与 B 型车在 3 种不同镟修踏面工况下的 $C_1(y)$ 进行计算, 当 $C_1(y)$ 达到重伤标准(即 $C_1(y) \geq 19$ mm) 时, 计算结束。

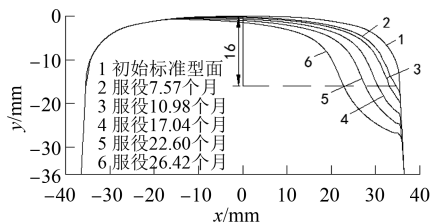
2.1 地铁 B 型车不同车轮踏面的钢轨型面变化

以地铁 B 型车为例, 不同车轮镟修踏面的钢轨型面变化情况如图 4 所示。图 4 中 x 、 y 为车轮背面的横纵坐标。

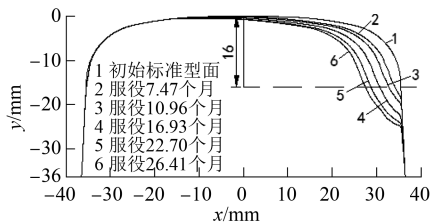
从图 4 可以看出, 随着钢轨服役时间的不断增



a) LM型车轮踏面



b) S1002型车轮踏面



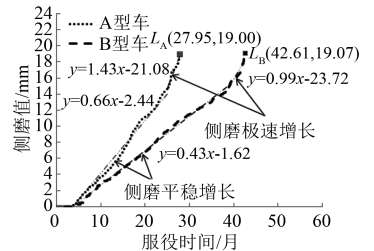
c) DIN5573型车轮踏面

图 4 地铁 B 型车不同车轮踏面的钢轨型面变化

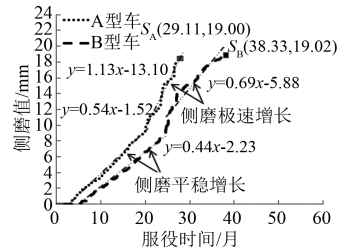
加, 3 种镟修踏面的外轨侧磨均逐渐加重。在相近的服役时间内, 不同镟修踏面造成的外轨磨耗范围与磨耗值均不同, 相应的磨耗发展速率也不同, 有快有慢。

2.2 不同车型不同车轮踏面的钢轨型面变化

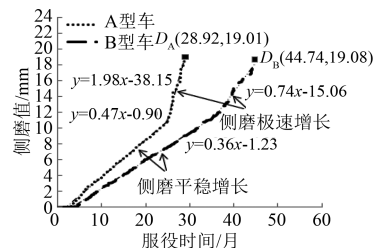
当不同类型地铁车辆分别采用 3 种镟修踏面时, 外轨侧磨发展曲线如图 5 所示。对图 5 中点 L_A 和 L_B 、 S_A 和 S_B 、 D_A 和 D_B 即分别为 3 种全旋修踏面的外轨侧磨重伤标准临界点。



a) LM型车轮踏面



b) S1002型车轮踏面



c) DIN5573型车轮踏面

图 5 不同踏面下不同车辆类型的外轨侧磨值

由图 5 可知:

1) 外轨侧磨的发展可大致分为无侧磨阶段(第一阶段)、侧磨平稳增长阶段(第二阶段)及侧磨极快速增长阶段(第三阶段)。分别对后两个阶段进行线性拟合, 其斜率可大致反映对应阶段的侧磨发展快慢。对于地铁 A 型车: 侧磨平均发展最小速率为 0.47 mm/月, 出现在 DIN5573 型车轮踏面的第二阶段; 侧磨平均发展最大速率为 1.98 mm/月, 也出现在 DIN5573 型车轮踏面的第三阶段; 两速率之比约为 1:4。对于地铁 B 型车: 侧磨平均发展最小速率为 0.36 mm/月, 出现在 DIN5573 型车轮踏面第二阶段; 侧磨平均发展最小速率为 0.99 mm/月, 出现在

LM 型车轮踏面第三阶段;两速率之比将近 1:3。

2) 外轨侧磨一般在新轨上道 4~5 个月后开始出现,并在接下来的一段时期内大致呈线性增长,其增长速率先小后大,整体的变化曲线大致呈抛物线型。这与文献[15]得出的规律基本一致。第一阶段为新轨刚上道时,轮轨接触主要在轨距角位置,磨耗还未达到侧磨位置处(钢轨型面下 16 mm 处),因此在该阶段外轨侧磨值为 0;第二个阶段,外轨侧磨增长速率趋于平缓,在轮轨之间经过第一阶段磨耗后,轮轨接触关系趋于稳定;第三个阶段,接触斑内磨耗越来越大,引起了轮轨踏面的较大改变,轮轨接触状态也不断恶化,反过来又加剧了磨耗的发展,故侧磨发展速率急剧变大。

3) 对图 5 点 L_A 和 L_B 、 S_A 和 S_B 、 D_A 和 D_B 横坐标进行比较可知,在同一种镟修踏面下,运行 B 型车的外轨侧磨达到重伤标准所需的服役时间都明显大于 A 型车。在 2 种车型服役时间差距中,最大的为 DIN5573 型踏面下的 15.82 个月,最小的是 S1002 型踏面下的 9.22 个月。可见,在一定程度上,地铁 B 型车对钢轨的友好度是优于 A 型车的,并且不同镟修踏面下友好程度也不同。

4) 地铁 B 型车出现外轨侧磨的时间晚于地铁 A 型车,而一旦第一阶段结束,在后两阶段中,地铁 A、B 型车的侧磨发展趋势近乎相同,只是由第二阶段发展到第三阶段的过渡时间不同。这说明地铁车辆车型除了车轮踏面会影响外轨侧磨发展外,还有其他的因素会影响外轨侧磨的发展,比如车辆轴重等。

2.3 小半径曲线段同一车型不同车轮踏面的钢轨型面变化

小半径曲线段不同踏面运行同一种车型时的外轨侧磨发展规律如图 6 所示。图 6 中 A_L 、 A_S 、 A_D 、 B_L 、 B_S 、 B_D 点分别表示该踏面下外轨侧磨由平缓增长阶段发展到极速增长阶段的过渡点。

由图 6 a) 可以看出,对于地铁 A 型车而言,3 种地铁车轮镟修踏面下外轨侧磨达到重伤标准所服役的时间几乎一致。为了延缓外轨侧磨的发展,可将初始型面镟修成 DIN5573 型。这样当地铁曲线段外轨侧磨值达到 10 mm 左右时,可将此时的车轮踏面镟修成 S1002 型,进而让外轨侧磨的发展沿着 S1002 型踏面的曲线发展,从而能够延长钢轨因侧磨过大而下道的时间。

由图 6 b) 可以看出,对于地铁 B 型车而言,DIN5573 型踏面下钢轨达到重伤标准的所需时间为

44.74 个月,是三种镟修踏面下时间最长的,因此该车轮踏面也更有利于延缓外轨侧磨的发展。

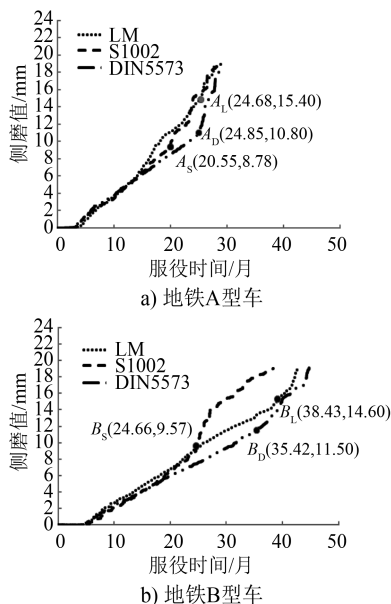


图 6 同种车型不同踏面的外轨侧磨情况

3 结论

1) 随着钢轨服役时间的不断增加,3 种镟修踏面作用下的外轨侧磨均逐渐加重,但是在钢轨服役的不同时期外轨侧磨增加的速率均不相同,有快有慢。

2) 地铁外轨侧磨的发展可大致分为无侧磨、侧磨平稳增长以及侧磨极速增长三个阶段。外轨侧磨出现该发展趋势的主要原因是轮轨关系的反复改变以及接触斑内应力的时常变化。

3) 在同种地铁车轮镟修踏面下,一旦第一阶段结束,在后两阶段中,地铁 A、B 型车的侧磨发展趋势近乎相同,只是由第二阶段发展到第三阶段的过渡时间不同。这说明地铁车辆除了车轮镟修踏面会影响外轨侧磨发展外,还有其他的因素会影响外轨侧磨的发展,比如车辆轴重等。

4) 对于地铁 A 型车而言,三种地铁车轮镟修踏面下外轨侧磨达到重伤标准所服役的时间几乎一致;对于地铁 B 型车而言,DIN5573 型踏面下钢轨达到重伤标准的所需的时间更长,因此将车轮镟修成 DIN5573 型将有利于延缓外轨侧磨的发展。

参考文献

- [1] 许宏,员华,王凌,等. 基于高斯过程的地铁车辆轮对磨耗建模及其镟修策略优化[J]. 机械工程学报,2010(24): 88.

(下转第 92 页)

5 结论

1) 在调整量不超过 1 倍支撑轴力的情况下,相邻钢支撑轴力随着调整支撑轴力的增大而减小,随着调整支撑的减小而增大,且变化呈线性关系。竖向上,轴力调整对位于调整支撑上方的支撑轴力影响大于位于调整支撑下方的支撑轴力。在水平方向上,当支撑与调整支撑的距离超过 10 m 后,其轴力已不受影响。

2) 在 2 道伺服钢支撑中间设置普通钢支撑,会使得普通钢支撑轴力较小;合理地布置伺服钢支撑,有利于支撑系统高效地工作。

3) 适量增大伺服钢支撑轴力可以有效地控制围护结构变形,但支撑轴力过大时,会使围护结构的侧移分布模式向“踢脚型”模式发展;合理设置伺服钢支撑轴力是控制基坑开挖变形的关键。

参考文献

- [1] 贾坚,谢小林. 上海软土地区深大基坑的卸荷变形及控制[J]. 岩土工程学报,2008(增刊1): 376.
- [2] 郭鹏飞,杨龙才,周顺华,等. 基坑开挖引起下卧隧道隆起变形的实测数据分析[J]. 岩土力学,2016(增刊2): 613.
- [3] 元翔,孙玉永,宫全美,等. 世博轴深大基坑逆作法施工变形控制研究[J]. 岩土工程学报,2009(7): 1127.
- [4] CLOUGH G W, TSUI Y. Performance of tied-back walls in clay[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,1975(7): 100.
- [5] 熊栋栋,杨钊,廖正根. 地铁深基坑钢支撑预加轴力分析[J].

地下空间与工程学报,2018(4): 1049.

- [6] 王俊东,梁寅,王红咏. 钢支撑轴力在安装过程中的监测分析[J]. 铁道勘察,2016(3): 57.
- [7] 贾坚,谢小林,罗发扬,等. 控制深基坑变形的支撑轴力伺服系统[J]. 上海交通大学学报(自然科学版),2009(10): 1589.
- [8] 郭利娜,胡斌,李方成,等. 武汉地铁深基坑围护结构钢支撑轴力研究[J]. 地下空间与工程学报,2013(6): 1386.
- [9] TAN Y, ZHU H, PENG F, et al. Characterization of semi-top-down excavation for subway station in Shanghai soft ground[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2017, 68: 244.
- [10] 卢礼顺,刘建航,刘国彬. 基于变形控制设计的支撑轴力与墙位移规律探讨[J]. 地下工程与隧道,2004(1): 2.
- [11] 姚燕明,周顺华,孙巍,等. 支撑刚度及预加轴力对基坑变形和内力的影响[J]. 地下空间与工程学报,2003(4): 401.
- [12] GOH A T C, ZHANG F, ZHANG W, et al. Assessment of strut forces for braced excavation in clays from numerical analysis and field measurements[J]. Computers and Geotechnics, 2017,86: 141.
- [13] 张光建,姚小波,胡瑾. 地铁换乘车站基坑支撑轴力监测与数值模拟[J]. 岩土工程学报,2014(增刊2): 455.
- [14] 陈海龙. 地铁明挖车站深基坑钢支撑轴力转换研究[C]//中国城市科学研究会轨道交通学组,北京国建信文化发展中心. 智慧城市与轨道交通 2016. 北京:中国城市出版社,2016: 5.
- [15] 郑刚,邓旭,刘畅,等. 不同围护结构变形模式对坑外深层土体位移场影响的对比分析[J]. 岩土工程学报,2014(2): 273.

(收稿日期:2019-06-26)

(上接第 87 页)

- [2] 陶功权,温泽峰,陆文教,等. 不同轨底坡下地铁车辆轮轨型面匹配的动力学分析[J]. 铁道学报,2016(5): 16.
- [3] 陈丰宇,沈钢. 地铁车轮踏面的运用分析及优化途径研究[J]. 城市轨道交通研究,2016(2): 84.
- [4] 张剑,肖新标,王玉艳,等. 三种高速轮对型面的性能比较[J]. 铁道学报,2009(2): 45.
- [5] 侯茂锐,王卫东,常崇义,等. 动车所小半径曲线钢轨磨耗及减磨措施研究[J]. 铁道学报,2018(3): 45.
- [6] 黄运华,李芾,傅茂海,等. 踏面形状对地铁车辆动力学性能的影响[J]. 机车电传动,2017(1): 39.
- [7] 周睿,罗仁. 地铁车辆轮轨匹配关系研究[J]. 铁道车辆,2010(9): 1.
- [8] 李金城,李芾,徐凯,等. 基于车轮损伤的地铁动力车辆轮轨匹配研究[J]. 中国铁道科学,2018(3): 71.
- [9] 颜怡翥. 广州地铁 5 号线小半径曲线钢轨磨耗分析[J]. 城市

轨道交通研究,2011(6): 55.

- [10] 薛蕊. 北京地铁钢轨非正常磨耗的机理研究[D]. 北京:北京建筑大学,2015.
- [11] 周宇,詹刚,许玉德. 城市轨道交通小半径曲线钢轨磨耗分析[J]. 城市轨道交通研究,2011(7): 42.
- [12] 金伟,栾治国,刘小松,等. 杭州地铁 1 号线项目的轮轨硬度匹配及车轮材质选用[J]. 铁道车辆,2012(7): 27.
- [13] 孙宇,翟婉明. 钢轨磨耗演变预测模型研究[J]. 铁道学报,2017(8): 1.
- [14] 陆文教. 地铁车轮磨耗数值仿真研究[D]. 成都:西南交通大学,2016.
- [15] 陈峰,张金雷,王子甲. 铁路小半径曲线外轨侧磨影响因素分析[J]. 铁道科学与工程学报,2018(7): 1678.

(收稿日期:2019-01-18)