

基于多点接触的轮轨型面磨耗演变预测分析

早在十多年前,俄罗斯 **UM** 软件实验室就基于 **UM Loco** 和 **UM Experiments** 开发出了用于轨道车辆轮轨型面磨耗演变预测分析的专业模块 **UM Rail/Wheel**, 并应用于俄罗斯重载线路车轮和钢轨型面的优化^[1]。该模块基于 **Archard**、**Specht**、**VNIIZHT** 和 **Plasticity** 等磨损理论,实现了车轮和钢轨型面自动更新迭代。软件功能模块化、界面操作智能化,无人值守,无需用户编写程序代码,大大降低了轮轨型面磨耗仿真预测的门槛,提升了科研效率,有效地指导工程实际。然而,由于理论模型和仿真技术的完善和发展,该模块即将停止发布,替之以两个新的磨耗工具: **UM Wheel Profile Wear Evolution** 和 **UM Rail Profile Wear Evolution**。本文介绍这两个新的轮轨磨耗工具的基本原理和使用方法。

1. 轮轨型面磨耗预测理论模型

众所周知,轮轨型面磨耗会显著影响铁路机车车辆的动力学行为,特别是车辆运行平稳性、乘坐舒适性和脱轨安全性。对于轮轨磨耗分析,赫兹接触理论并不适用,虽然之前的 **UM Rail/Wheel** 模块虽然也支持非赫兹接触,但由于最多支持两个接触斑,因而不能很好的模拟车轮和钢轨型面的中度和重度磨耗。新的磨耗分析工具基于多点非赫兹接触理论而开发,支持 **CONTACT** (需要具有 **CONTACT** 授权) 和 **Kik- Piotrowski** 算法,可以更好地模拟中度和重度的轮轨型面磨耗。

请注意,多点接触一般指的是一组轮轨型面可能有两个(不含)以上的接触斑,这对于磨耗后的轮轨型面很常见,如图 1。早期的动力学计算一般只支持单点或两点接触,并不适合用于轮轨磨耗仿真,特别是当轮轨接近共形或达到共形时。

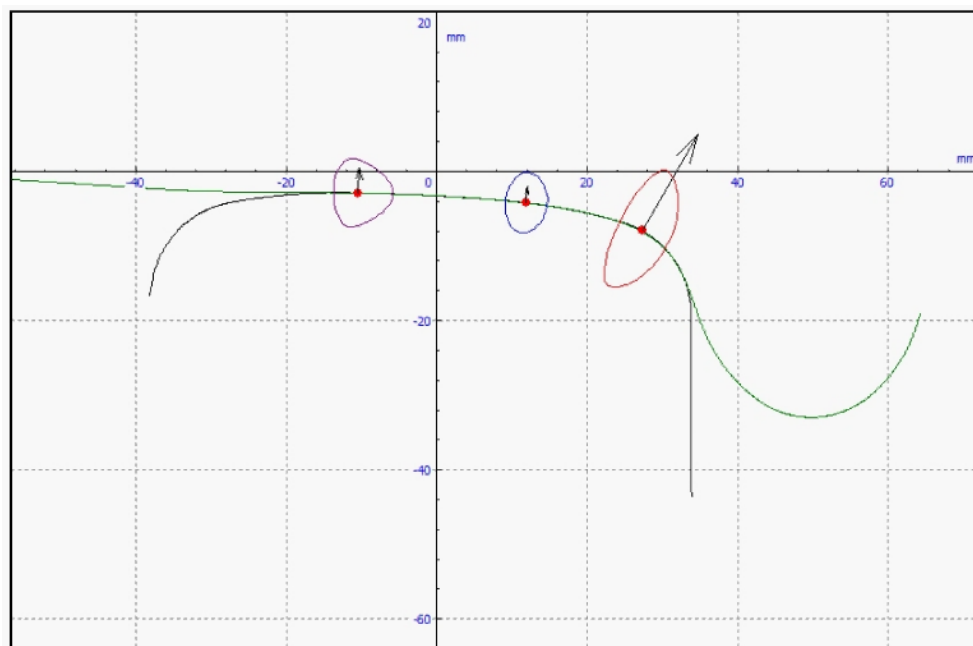


图 1 轮轨多点接触

在仿真有轨电车时，车轮轮背与槽型轨可能发生接触，如图 2，这也需要用到多点接触算法，否则仿真计算得到的结果是不合理的。

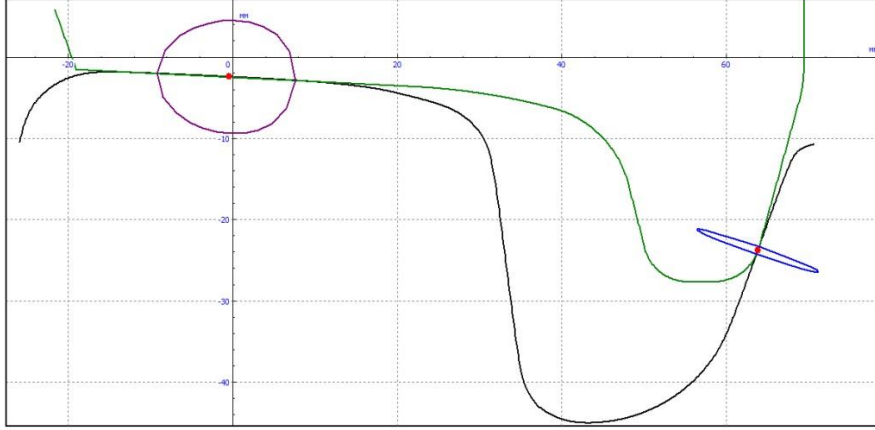


图 2 车轮轮背与槽型轨的接触

UM 软件新的轮轨磨损预测工具仍然延续基于轮轨摩擦功的体积磨损原理，根据磨损体积和摩擦功的线性或非线性关系，软件提供如下三个计算模型。

- **Archard model**

该模型认为磨损体积与摩擦功成线性关系：

$$W = k_v A \quad (1)$$

其中， W 是磨损体积， k_v 是磨损系数， A 是摩擦功。

$$A = \int_0^t P dt \quad (2)$$

其中， P 是摩擦功率。

$$P = \int_F \tau s dF \quad (3)$$

其中， τ 是接触单元内的切向应力， s 是滑动速度， F 是接触斑面积。

- **Archard model with wear coefficient map**

$$W = k_v \frac{Ns}{H} \quad (4)$$

其中， N 是法向接触力， s 是滑动距离， H 是硬度， k_v 参数取值见图 3。

- **Specht model**

Specht model也基于 **Archard model**，它将磨损划分为轻度和重度两个区间，可分别设置不同的磨损系数。

$$W = \begin{cases} k_v A, & p < p_{kp} \\ k_v \gamma A, & p \geq p_{kp} \end{cases} \quad (5)$$

其中， p_{kp} 是摩擦力的临界功率密度， γ 是跳跃系数。

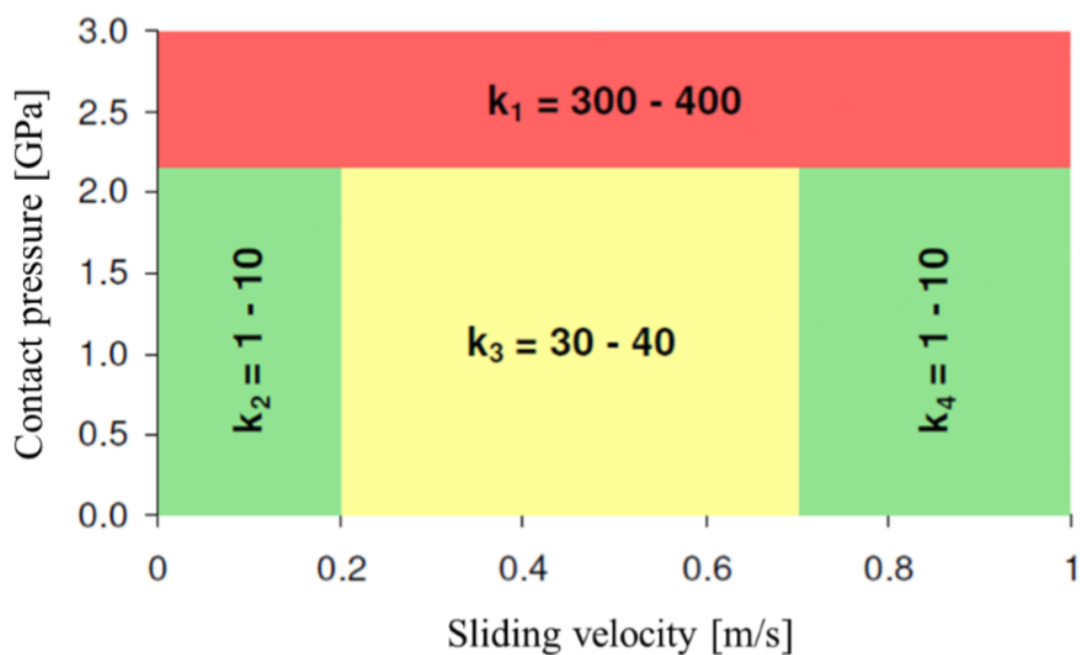


图 3 磨损系数分布图

UM Loco 模块应用 FASTSIM、修正的 FASTSIM 以及 CONTACT 等算法求解轮轨切向接触问题，通常将接触斑视为同一平面，并将其离散为多个矩形单元，如图 4 所示。

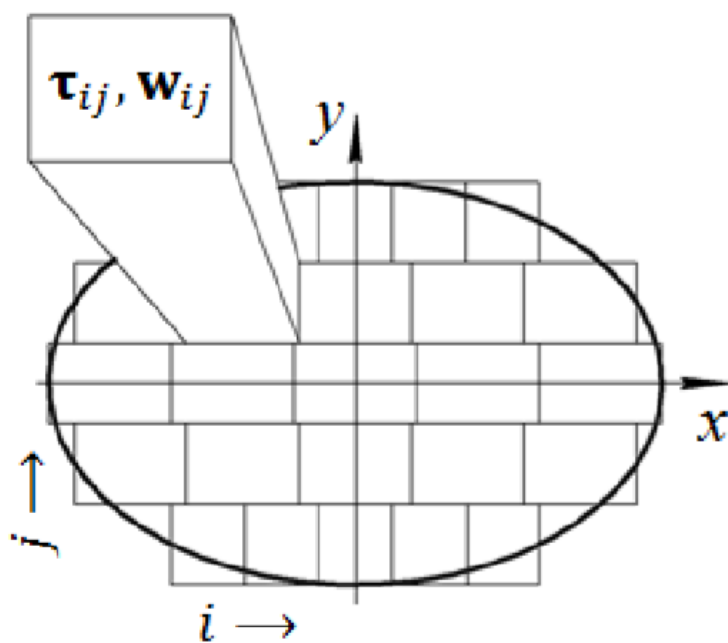


图 4 典型的轮轨接触斑

对于 Archard model，在一个时间积分步 Δt 内，轮轨接触斑里每个平面单元的磨损体积计算公式为

$$W_{ij} = k_v \tau_{ij} v w_{ij} \Delta F_{ij} \Delta t \quad (6)$$

其中， v 是车轮速度， w_{ij} 是接触单元中心的蠕滑率， ΔF_{ij} 是接触单元的面积。

而对于 **Archard model with wear coefficient map**，计算公式则为

$$W_{ij} = k_v \frac{p_{n_{ij}} \Delta F_{ij}}{H} |w_{ij}| \Delta x_j \quad (7)$$

其中， $p_{n_{ij}}$ 是接触单元内的法向应力， Δx_j 是接触单元沿 X 轴的长度。

因此，将接触斑内每个单元对应的磨耗体积累计求和，即可得到整个接触斑总的磨耗体积。

在进行磨耗计算前，程序自动将轮轨型面沿弧长方向离散为等间距的 n 个区段。在完成动力学计算后，程序自动统计出每个区段的磨耗体积，最终得到沿着型面的磨耗深度分布图，如图 5。

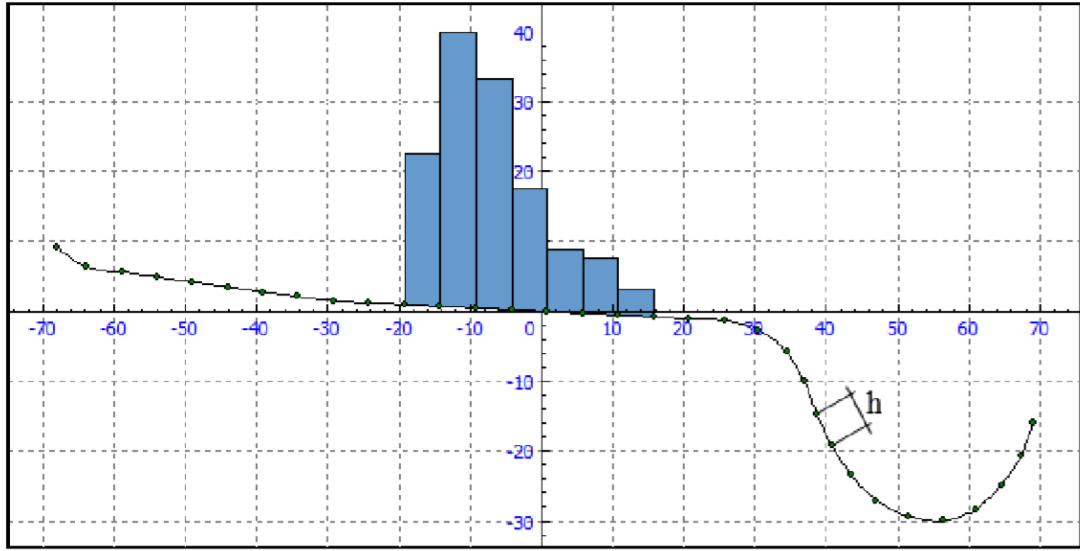


图 5

对于车轮型面上任一点，其磨耗深度计算如下

$$\delta_w(s) = \frac{w(s)}{2\pi R(s)h} \quad (8)$$

其中， w 是磨耗体积， R 是车轮半径， s 是弧坐标。

假设车轮沿圆周方向磨耗是均匀的，始终是轴对称形状，车轮型面磨耗深度可表示为

$$\delta_w(r) = \frac{w(s)}{Lh} \quad (9)$$

其中， L 是型面区段的车轮的平均圆周长度。

对于钢轨，假定沿着轨道方向的一个设定区间内的磨耗是均匀的，则钢轨型面坐标满足

$$(x_i \ y_i)^T = (x(s_i) \ y(s_i))^T - \delta(s_i) \mathbf{n}(s_i) \quad (10)$$

其中， $\mathbf{n}$ 是外法向。

2. 评价指标

新的轮轨磨耗工具采用更符合行业标准的指标进行磨耗型面分析。

图 6 描述了车轮型面的磨耗控制参数。

- Sd : 轮缘厚度 (以名义滚动圆为测量基点)
- Sh : 轮缘高度
- qR : 轮缘综合值
- Tw : 踏面磨耗
- St : 轮缘厚度 (以轮缘顶部为测量基点)
- dSd, dSt : 轮缘厚度减小值 (相对初始型面)

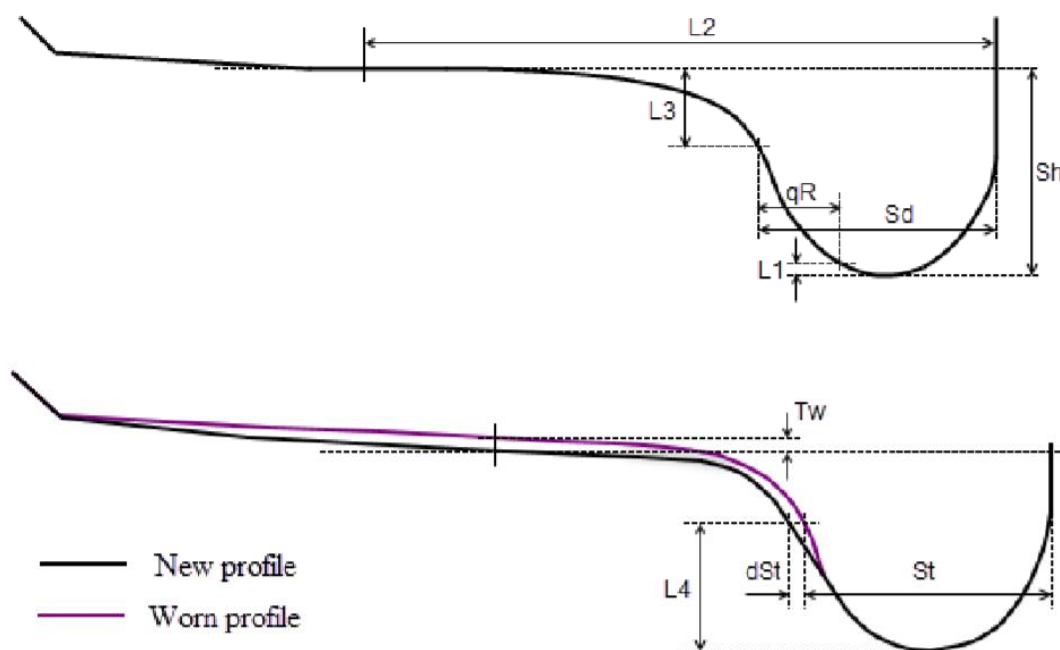


图 6 车轮型面磨耗指标

图 7 描述了钢轨型面的磨耗控制参数。

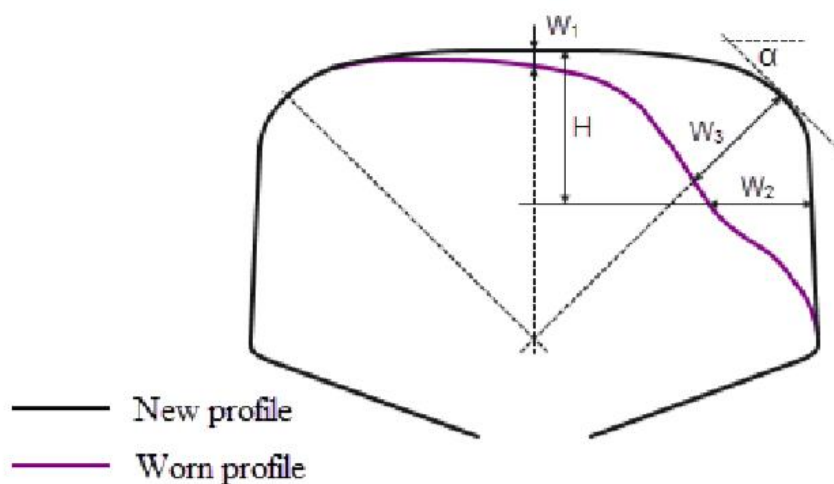


图 7 钢轨型面磨耗指标

- $W1$: 垂直磨耗
- $W2$: 侧面磨耗
- $W3$: 轨距角磨耗

对于轮轨型面，不同国家有不同的测量基准，因此支持用户自定义图 6 和 7 中的几何参数（**UM Simulation | Tools | Options | Wear control parameters**）。

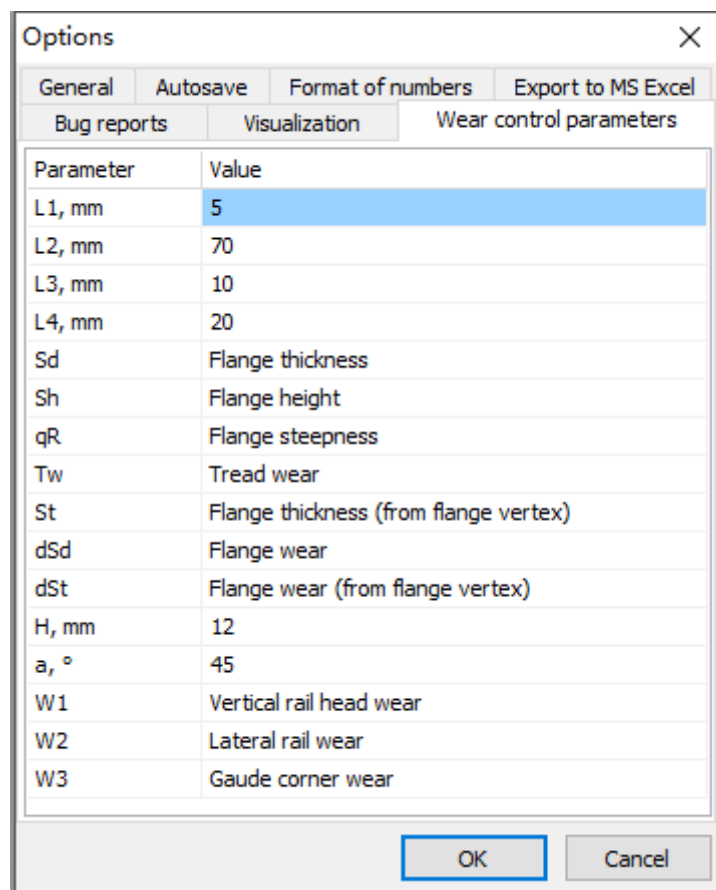


图 8

3. 车轮型面磨耗模块

UM Wheel Profile Wear Evolution 是 **UM Loco** 模块的一个附加工具（子模块），用于车轮型面的磨耗演化分析（无需 **UM Experiments** 模块）。**UM Wheel Profile Wear Evolution** 模块具有如下功能：

- 预测铁路车轮型面的磨耗分布；
- 保存每一个磨耗分析子步的型面文件；
- 计算得到基于相关标准的磨耗控制参数；
- 为车轮滚动接触疲劳分析提供载荷数据；
- 保存每个工况的动力学变量结果。

而以下情形，暂不支持磨耗仿真：

- 车辆数量超过 1；
- 模型包含外部子系统；

- 模型包含外部导入的柔性体；
- 采用了符号法生成运动方程。

新的车轮磨耗工具采用并行离散法来计算和更新车轮型面，支持多核并行计算，以提高效率，其方法和流程示意如图 9。

所谓**并行**，指的是，对于一个车辆模型，设置一组典型的运行工况，如：不同的轨道线路、轨道不平顺、车辆载重、车辆速度等，这些典型工况应该能代表车辆实际运行的状态，每个工况所占比重亦不同。

所谓**离散**，是将轨道线路（每个工况仿真的长度）等分为多个区间，每个区间为一个磨耗分析子步。每个并行的仿真工况，其离散数目是相等的。在每个磨耗分析子步里，车轮型面保持不变，每完成一次子步，程序自动将磨耗体积线性放大，使得磨耗体积对应预先设定的里程，得到磨耗的型面（B 样条拟合）再进行下一个分析子步，如此迭代演化。

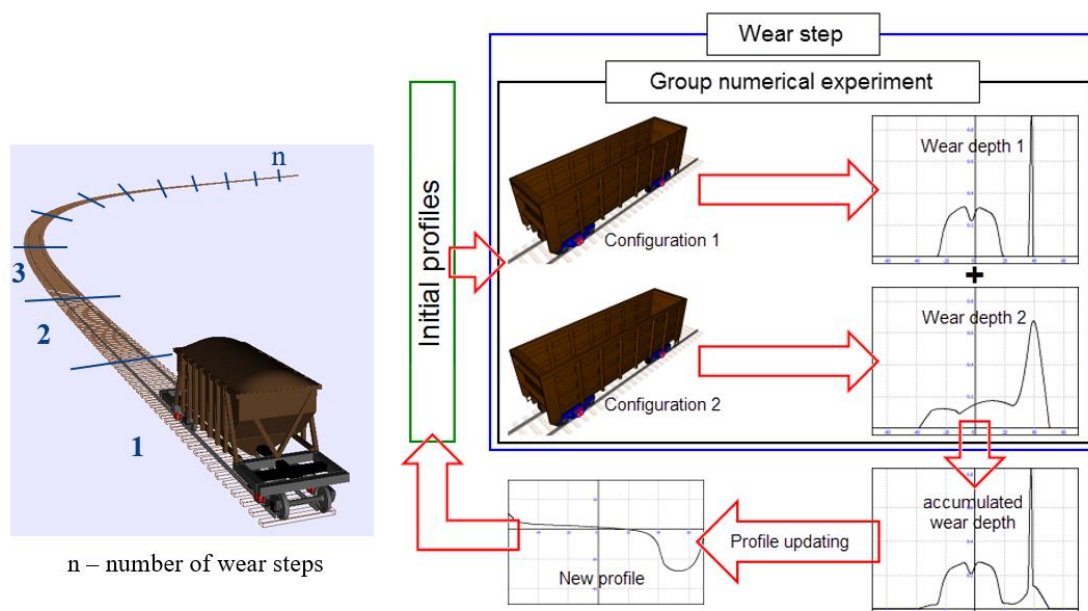


图 9 车轮磨耗

在仿真控制界面，先设置好一组轮轨参数（**Track/Profiles/Contact**），再到 **Wear** 页面，点击加号按钮，添加一个磨耗工况，在这里用户可指定仿真线路长度、起始有效距离、车辆速度等。

然后修改轮轨参数（**Track/Profiles/Contact**），点击加号按钮，又添加一个磨耗工况。一个合理的磨耗仿真应该包含多个典型工况。在 **Weights** 页面可以设置每个工况所占的权重。

在 **Wear parameters** 页面，可以设置磨耗模型、磨耗系数、对称磨耗、磨耗分析步（大循环）和子步数（小循环）、子步对应的里程数、弧坐标离散步长等参数。

在 **Finish conditions** 页面，可以设置图 6 中的磨耗指标作为仿真终止条件。

在 **Results** 页面，设置磨耗结果文件保存路径以及是否保存数据用于滚动接

触疲劳分析。

在开始仿真计算前，务必记得勾选 **Wear profile evolution**。

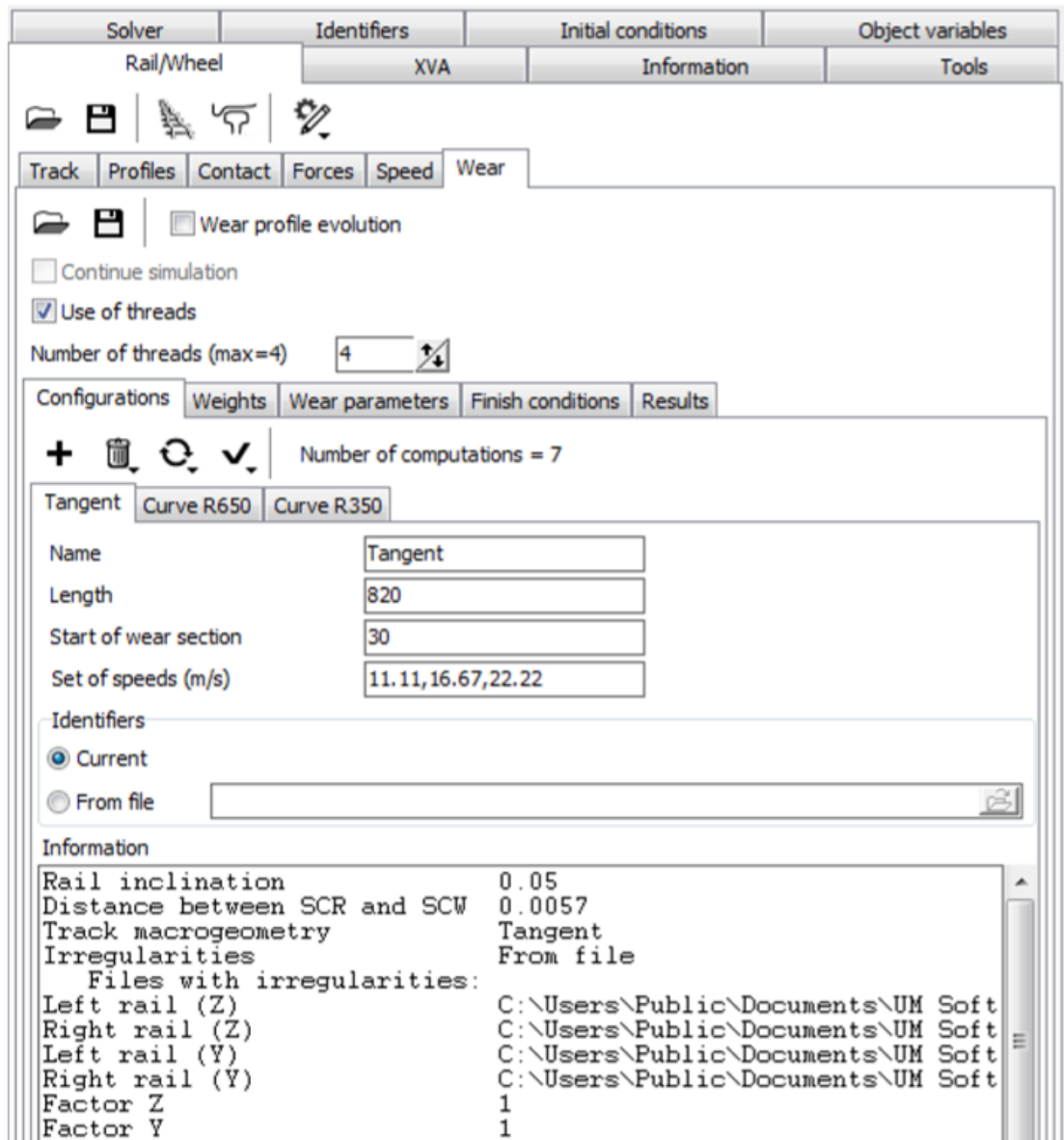


图 10

计算完毕后，选择菜单 **Tools | Analysis of wear of railway profiles | Wheel profiles**，打开车轮型面磨耗结果分析工具，加载结果文件进行统计分析。

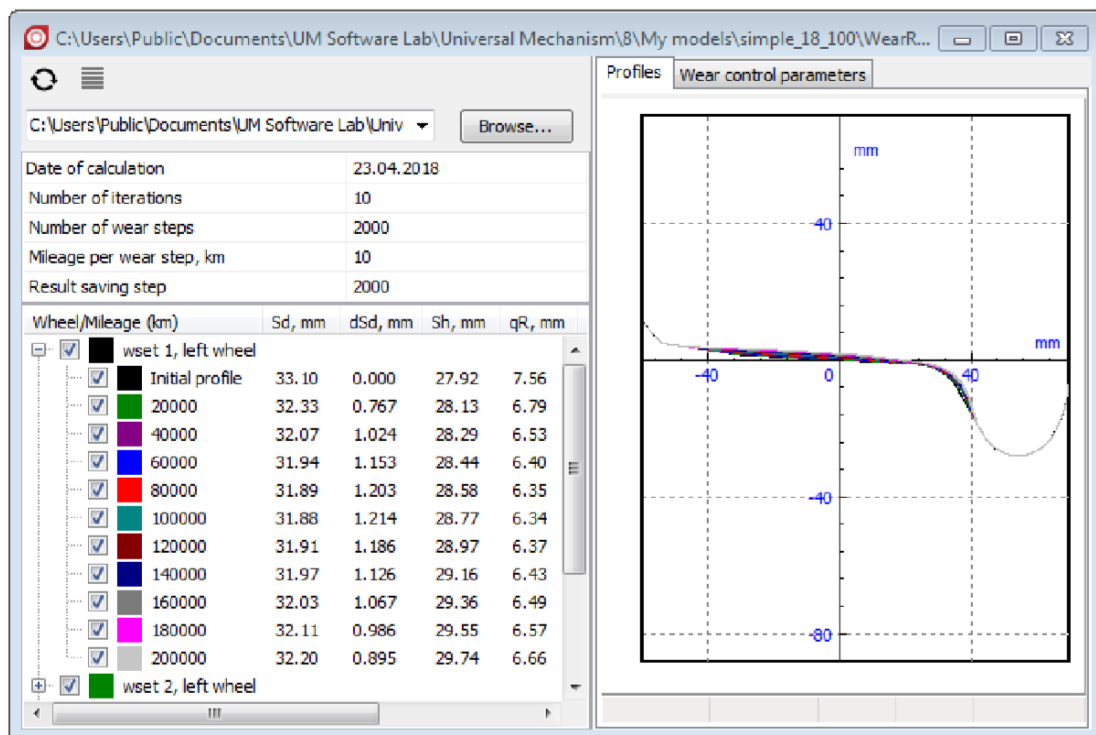


图 11

4. 钢轨型面磨耗模块

UM Rail Profile Wear Evolution 也是 **UM Loco** 模块的一个附加工具（子模块），用于钢轨型面的磨耗演化分析。由于钢轨型面磨耗分析一般要用到多个车辆模型，因此需要 **UM Experiments** 模块的 **Scanning** 工具。**UM Rail Profile Wear Evolution** 模块具有如下功能：

- 预测铁路钢轨型面的磨耗分布；
- 保存每一个磨耗分析步的型面文件；
- 计算得到基于相关标准的磨耗控制参数；
- 为钢轨滚动接触疲劳分析提供载荷数据；
- 保存每个工况的动力学变量结果。

用户在使用前应准备好多个车辆模型，并掌握 **UM Experiments** 模块的基本用法。

运行 **UM Simulation** 程序，选择菜单 **Scanning | New project – rail profile wear**，即可打开钢轨磨耗专用界面。

如图 12 所示，用户可添加多个车辆模型，并设置不同的权重。

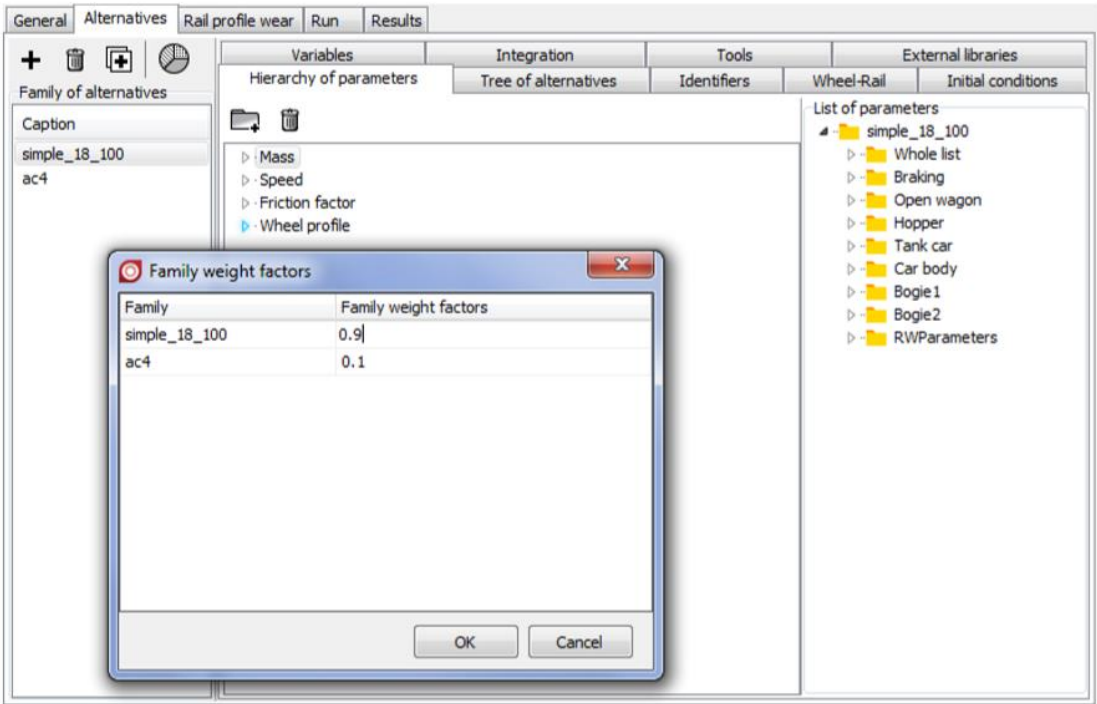


图 12

对于每个车辆模型，可设置多种运行工况。

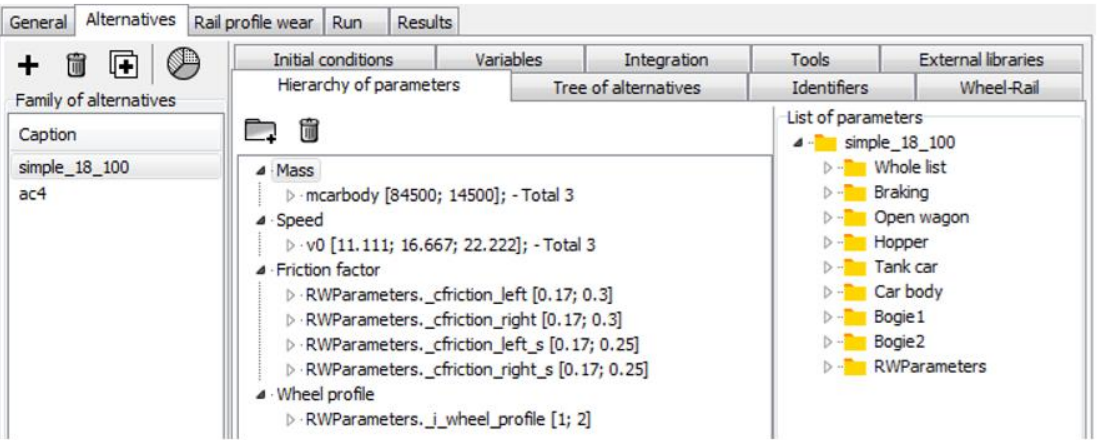


图 13

对于每个工况，应设置不同的权重。

Identifier: **mcarbody**
Current value: **84500**
Mode: ☒ List of values ☐ Loop
Add value:
+

Value	Weight
84500	0.5
14500	0.5

OK Cancel
Use for:
☒ Bogie1.mcarbody (11840)
☒ Bogie2.mcarbody (11840)

图 14

最后，选择磨耗模型及参数设置。注意，对于钢轨磨耗，型面更新条件是通过的车辆总重。

General Alternatives **Rail profile wear** Run Results
Wear parameters Track R/W contact forces Rails profiles
Number of iterations
Tonnage per iteration
Width of wear accumulation interval (mm)
Interval of wear averaging along track ☒ Whole wear section
☒ Interrupt of simulation on degeneration of profile
Wear section
Start of wear section
End of wear section
Save list of variables every iteration
Wear model
☒ Archard ☐ Specht ☐ Wear map
Parameters
Wear coefficient (m³/J)

图 15

以下是典型的钢轨磨耗仿真结果。

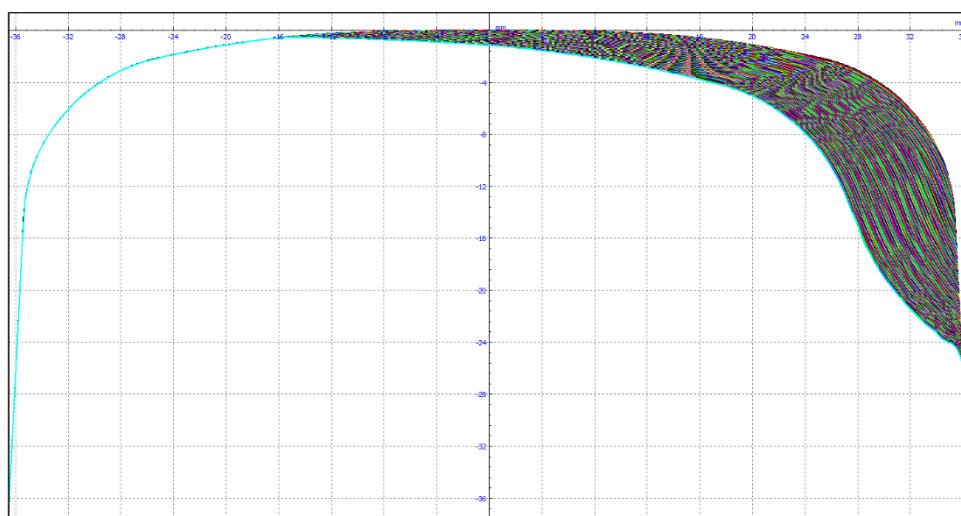


图 16

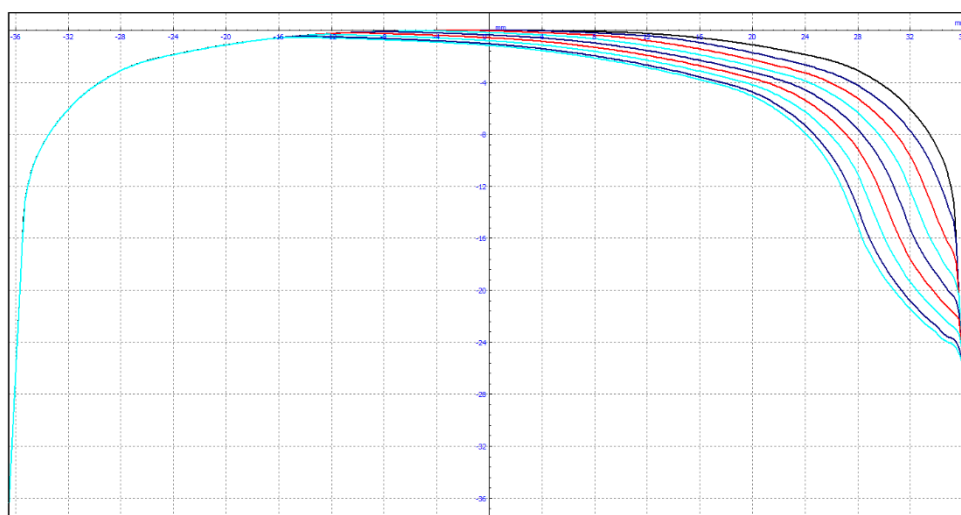


图 17

参考文献

1. Sergey M. Zakharov, & 邵文东. (2008). 俄罗斯重载线路车轮和钢轨外形的优化. 国外铁道车辆, 045(004), 16-19.
2. Pogorelov, D., Simonov, V., Kovalev, R., Yazykov, V., & Lysikov, N. (2009). Simulation of Freight Car Dynamics: Mathematical Models, Safety, Wear.
3. Kovalev, R., Lysikov, N., Mikheev, G. et al. Freight car models and their computer-aided dynamic analysis. Multibody Syst Dyn 22, 399 (2009). <https://doi.org/10.1007/s11044-009-9170-6>