

## **KISSsoft 03/2013 – 教程 11**

针对塑料、粉末冶金、线切割和锻压成型在 **KISSsoft** 软件中对齿轮的齿形优化及修形

**KISSsoft AG**

Rosengartenstrasse 4  
8608 Bubikon  
Switzerland

Tel: +41 55 254 20 50  
Fax: +41 55 254 20 51  
info@KISSsoft.AG  
www.KISSsoft.AG

# 目录

|     |                        |    |
|-----|------------------------|----|
| 1   | 简介 .....               | 3  |
| 1.1 | 齿轮设计方略总结 .....         | 3  |
| 1.2 | 引言 .....               | 3  |
| 2   | 定义几何齿形 .....           | 3  |
| 2.1 | 简介 .....               | 3  |
| 2.2 | 齿顶修缘 .....             | 3  |
| 2.3 | 齿顶最小齿厚 .....           | 9  |
| 2.4 | 对预先定义齿廓的齿轮更改几何参数 ..... | 9  |
| 2.5 | 通过改变基本齿廓改变齿轮几何参数 ..... | 10 |
| 2.6 | 通过修形消除接震动 .....        | 11 |
| 2.7 | 优化齿根 .....             | 15 |
| 2.8 | 检查啮合 .....             | 16 |
| 2.9 | 检查齿轮咬死 .....           | 18 |
| 3   | 强度计算 .....             | 19 |
| 3.1 | 简介 .....               | 19 |
| 3.2 | 自定义塑料参数 .....          | 19 |
| 3.3 | 考虑几何齿形影响的强度校核 .....    | 22 |
| 4   | 定义齿厚公差 .....           | 24 |
| 4.1 | 简介 .....               | 24 |
| 4.2 | 计算工作侧隙 .....           | 24 |
| 4.3 | 增加工作侧隙 .....           | 26 |
| 5   | 注塑模具设计 .....           | 27 |
| 5.1 | 简介 .....               | 27 |
| 5.2 | 修改注塑模具补偿收缩 .....       | 27 |
| 5.3 | 显示线切割和放电间隙 .....       | 30 |
| 5.4 | 线切割过程中线的直径的检查 .....    | 33 |
| 5.5 | 计算模具 3D .....          | 33 |

# 1 简介

## 1.1 齿轮设计方略总结

本章是针对使用模具成型工艺制造（包括注塑成型、粉末冶金和锻造成型等）的齿轮进行一些齿轮设计优化策略的介绍。KISSsoft 软件集成了使用这些加工方式的齿轮选型及优化的特殊方法。

选型过程包括以下步骤：

- 定义大概的尺寸（模数、齿宽等），使用强度校核；
- 定义公差；
- 优化细长齿（目的：调整端面重合度至 2.0 并考虑修改齿顶圆角和啮合曲线来降低噪音；
- 齿顶修缘；
- 优化啮合曲线/齿廓修形（目的降噪，提高磨损安全系数）；
- 优化齿根圆角（增加齿根安全系数）；
- 确定加工使用的模具。

## 1.2 引言

现在，更多的齿轮采用塑料加工，主要是因为新材料的发展允许它们具有更高的承载能力。相较于金属而言，塑料的特殊性能可以应用在更多的领域。设计者也因此可以选择最可能的塑料材料在他们特殊的应用上。一些最重要的属性例如承载能力、耐磨性、阻尼特性、刚度和噪音可以被很好的解决。

金属齿轮通常是滚刀加工。与此不同的是，塑料齿轮通常用注塑模具加工。如果模具通过线切割加工出来，齿形优化无需额外的费用。用滚刀加工时，这个只可能是用昂贵的特殊刀具完成。然而，注塑模具加工不能达到很好的精度等级，另外，这个问题只能通过特殊测量来解决。在一些技术文献上把这种修形的齿轮当做混合齿形齿轮。

KISSsoft 软件包含大量的塑料齿轮选型和优化的特殊方法。这些程序都被完全整合到一个综合的现代软件系统中，可以让您设计优化标准齿形和混合齿形。

# 2 定义几何齿形

## 2.1 简介

可以通过很多方式来设计达到最合适传动比的齿轮几何参数。这取决于需要达到目标的重要性，例如低的噪音、低的振动、强度、滑动、刚度和平衡，这些都必须按照优先顺序考虑。

当开始这个优化步骤时，需要设置一下的默认参数：

## 2.2 齿顶修缘

对于使用模具工艺加工齿形，齿顶必须倒圆角，因为尖角在注塑时是不可能很精确的完成的。最好将齿轮 1 和齿轮 2 的这个参数同时在一个界面控制。这样可以确保所有重要的参数（例如重合度等）计算时可以同时考虑齿顶倒圆角的影响。

这是阐明下面的例子：对于这个指定计算使用 KISSsoft 中提供的例子。在斜齿轮计算模块中打开这个文件：

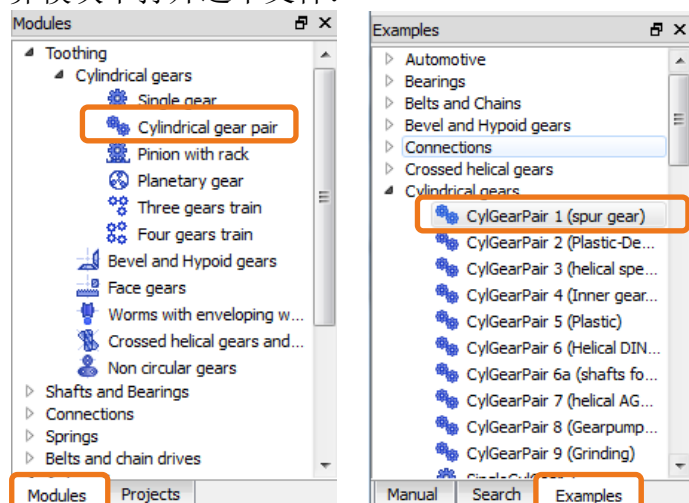
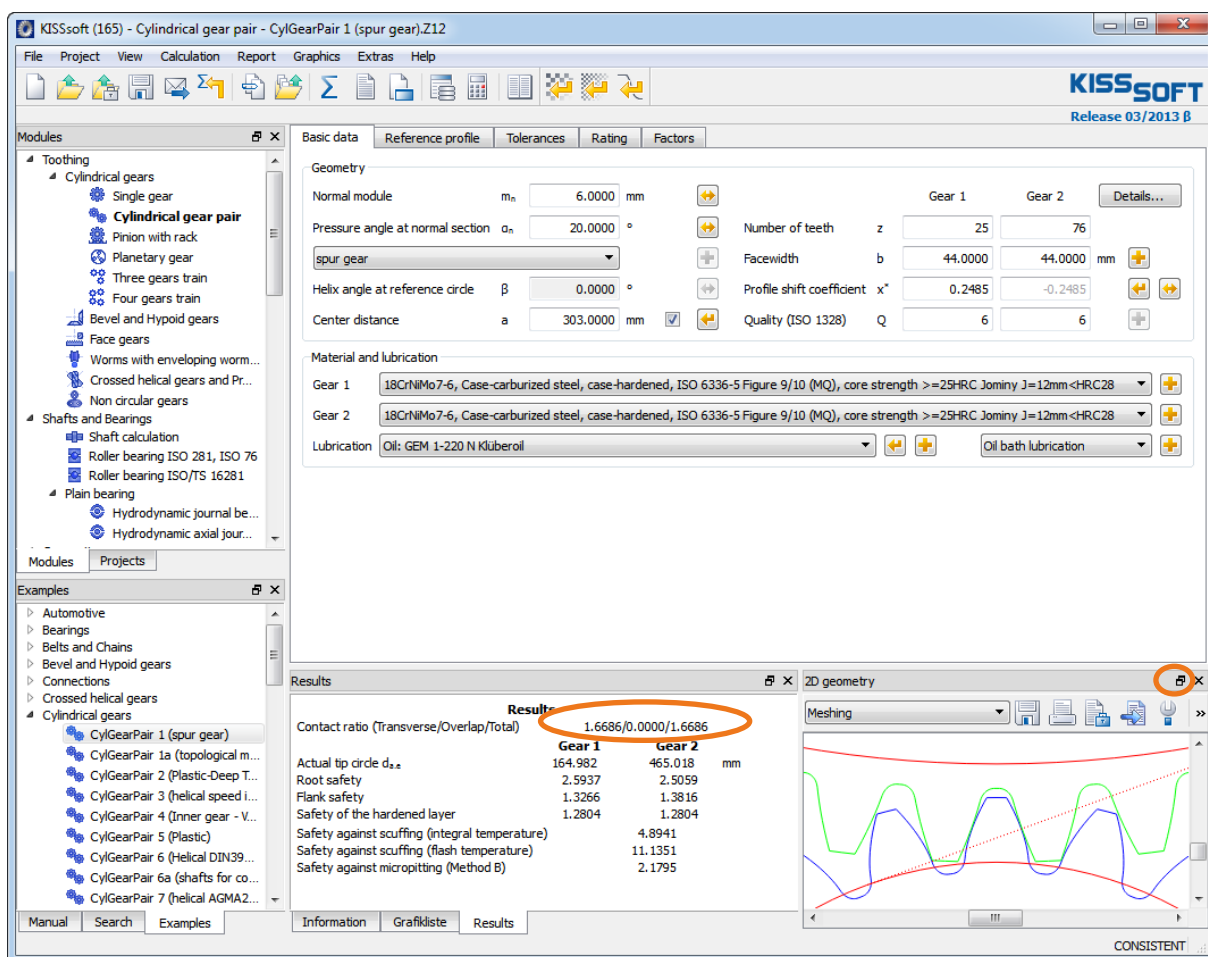


图 1. 打开斜齿轮计算模块然后找到 CylGearPair 1 (spur gear)这个例子文件



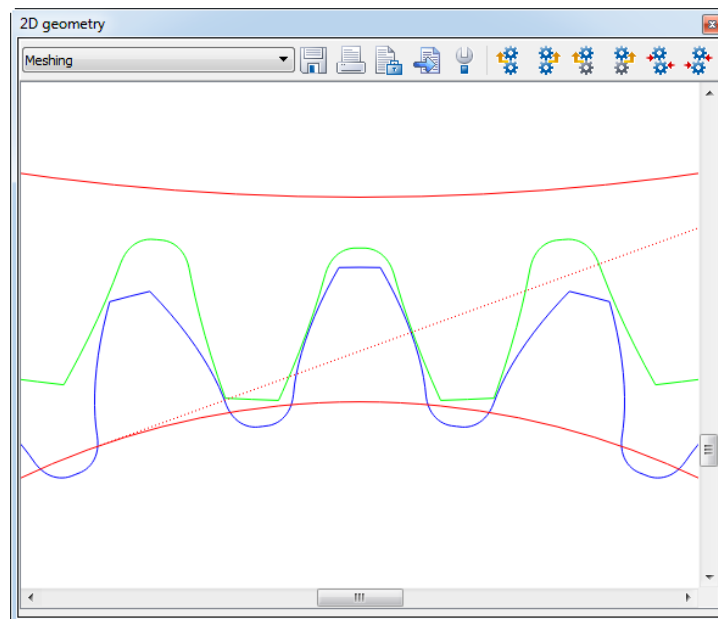
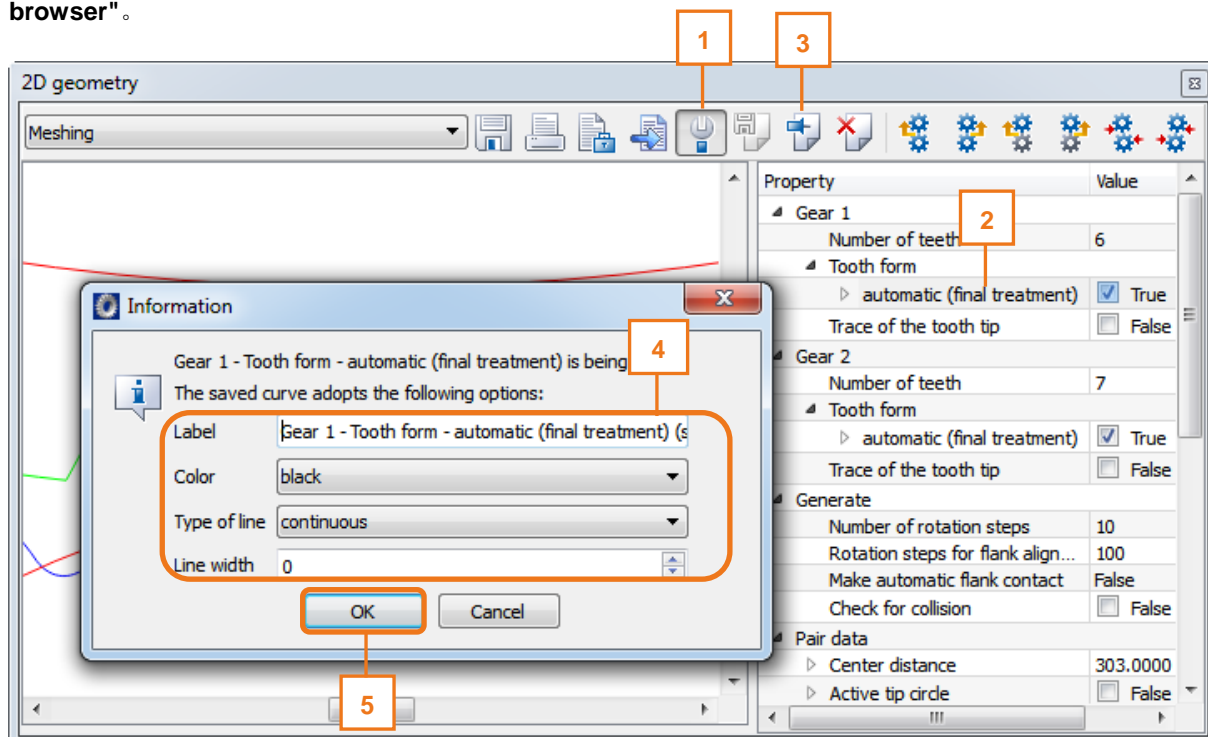


图 3. 齿形显示

可以保存齿形到电脑里。打开**"Property browser"** (1)。然后选上**齿轮 1 齿形** (2)，点击**"Save"**按钮 (3) 能保存。这将打开一个信息窗口。在这里可以做一些必要的改变 (例如颜色) 和一些其他项目 (4)。点击**"OK"** (5) 来保存**齿轮 1** 的齿形。同样的操作来保存**齿轮 2** 的齿形。这样可以查看齿形的变化。完成这些后，可以关闭**"Property browser"**。



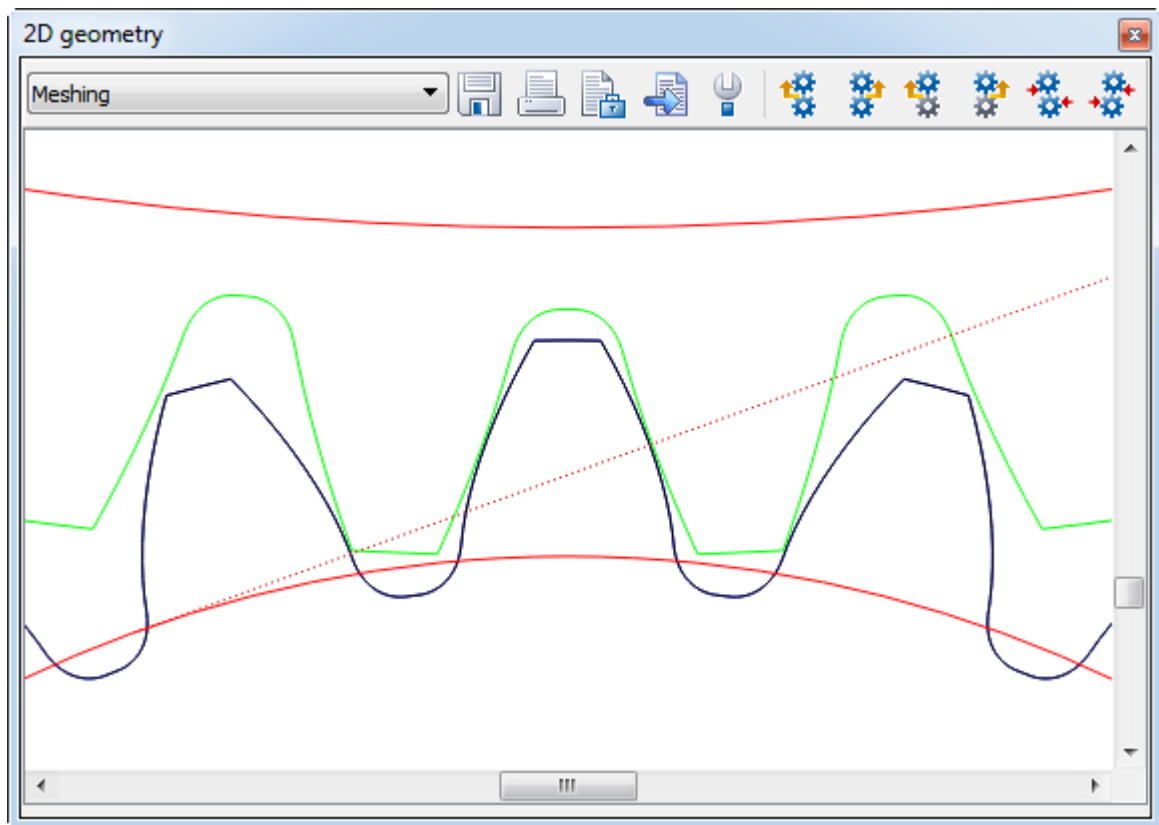



图 4. 保存一个齿形

在 "Modifications" 中定义齿轮 1 和齿轮 2 的齿顶倒圆角如下：（打开标签通过 "Calculation" → "Modifications"）(看图 5):

| Basic data                    | Reference profile                          | Tolerances       | Modifications                        | Rating   | Factors               |
|-------------------------------|--|------------------|--------------------------------------|----------|-----------------------|
| Modifications                 |  |                  |                                      |          |                       |
|                               |  | Gear 1           |                                      | Gear 2   |                       |
| Start of modification at tip  | Tip circle                                 |                  | Tip circle                           |          |                       |
| Start of modification at root | maximum root form diameter $d_{fke}$       | +                | maximum root form diameter $d_{fke}$ | +        |                       |
| Type of tip modification      | Rounding                                   | i                | Rounding                             | i        |                       |
| Tip modification              | $r_k$ 2 mm 45.0000 °                       |                  | $r_k$ 2 mm 45.0000 °                 |          |                       |
| Chamfer / tooth en            | $b_{kf}$ $\delta_{bk}$ 0.0000 mm 45.0000 ° |                  | 0.0000 mm 45.0000 °                  |          |                       |
| Gear                          | Type of modification                       | Value [ $\mu$ m] | Factor 1                             | Factor 2 | Status Inform Comment |

图 5. 定义齿顶圆角，这个例子中半径是 2mm

然后点击  重新计算，接受倒圆角。如果仔细查看图形，可以发现圆角已经在齿形上了。原始的齿形也显示在上面（黑色、绿色或者蓝色）。

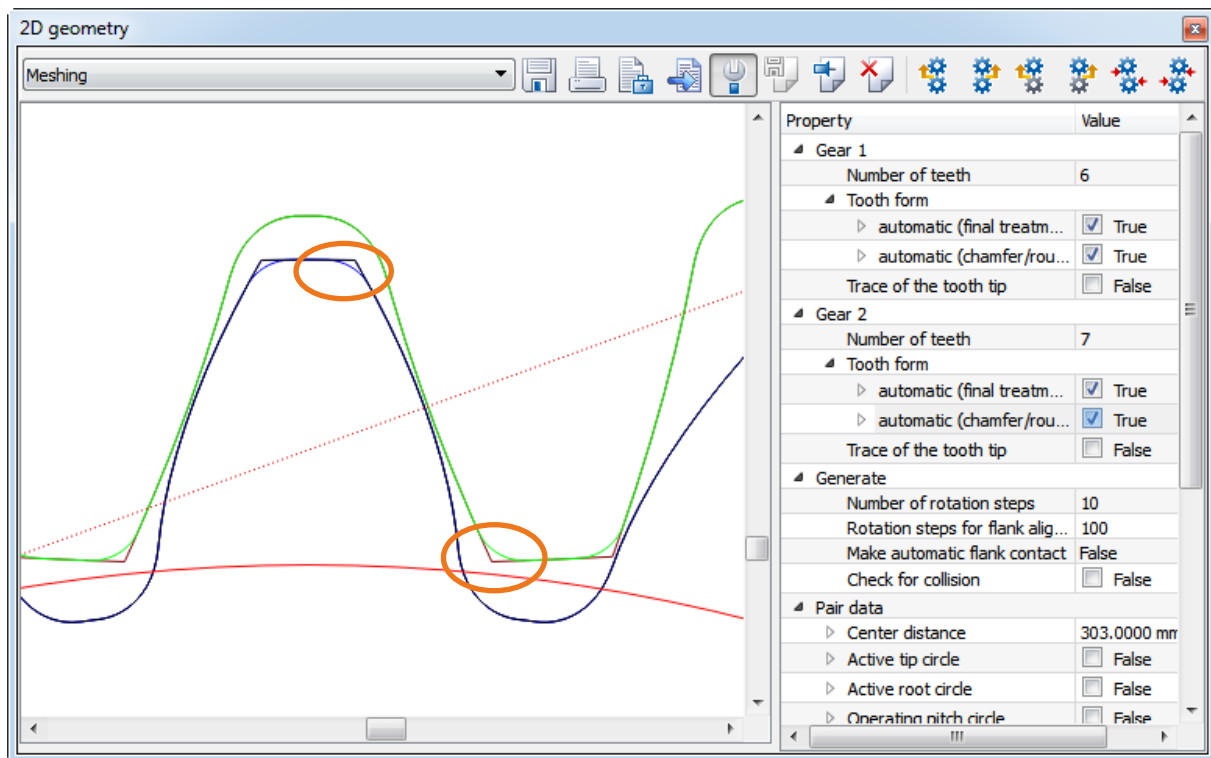


图 6. 齿形上的倒圆角

重要注释:

当保存齿形的时候, 所有先前的计算操作也都激活了。

一些情况可能最好查看一下每个计算步骤下的激活或者未激活的改变。

可以对图形显示属性重新设置. 这样当每次几何窗口中有显示变化时, 它都会自动重置。或者选择"Extras"→ "Configuration tool"在"Settings"中点击"Graphics"的 "Reset"。

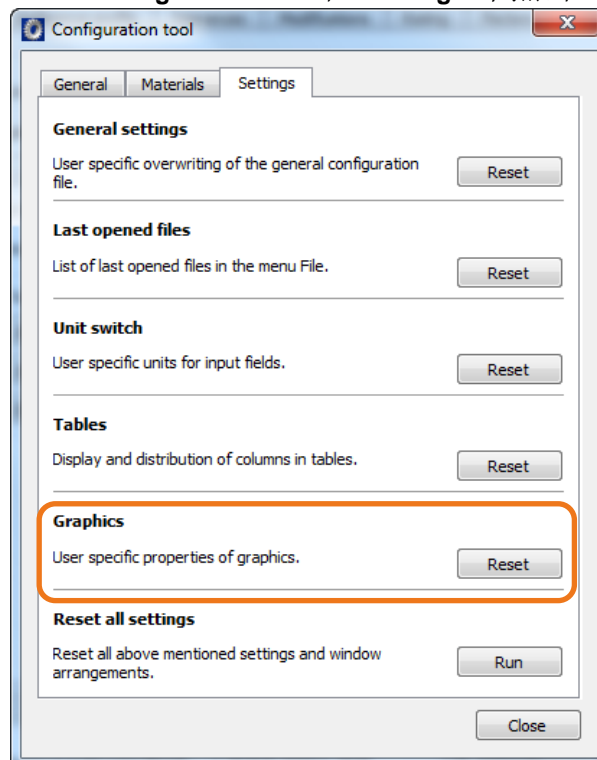


图 7. 重置"Graphic properties"

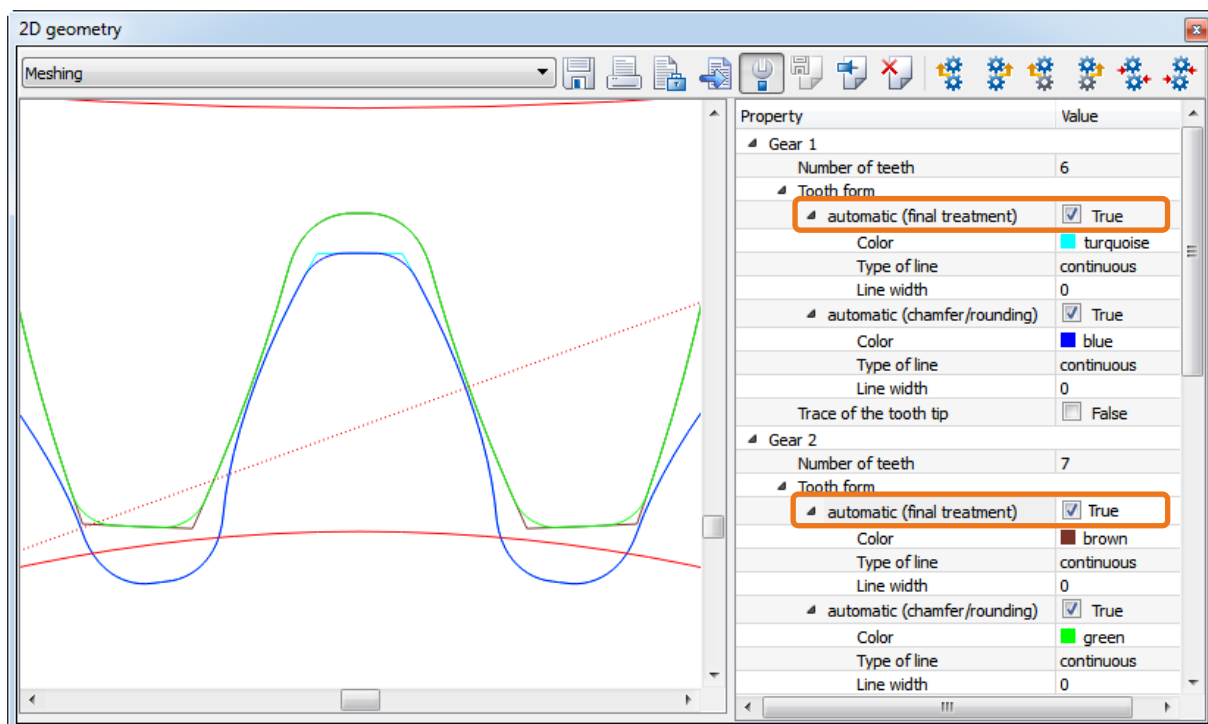


图 8. 激活所有计算操作

在屏幕上，重合度值降到了 1.3712。

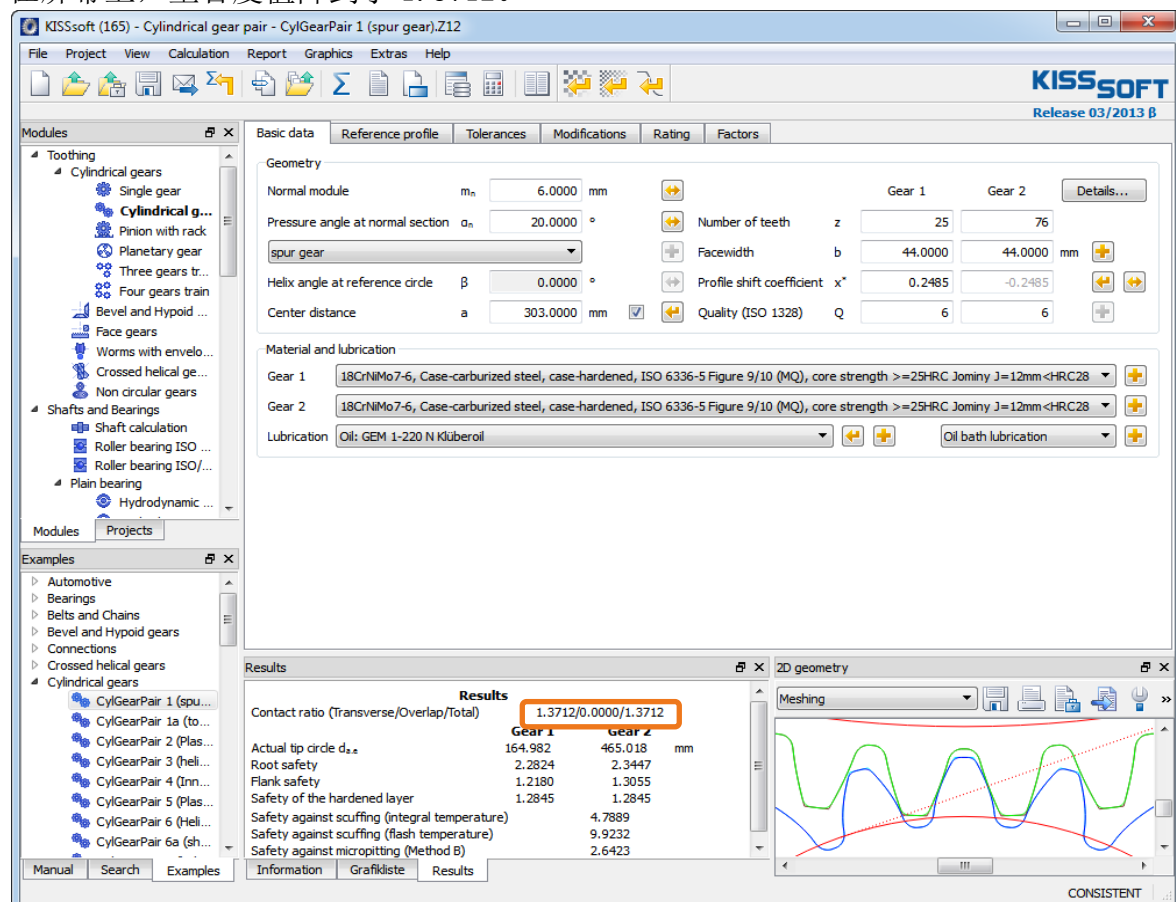


图 9. 齿顶修缘降低重合度



## 2.3 齿顶最小齿厚

在 KISSsoft 中，默认的最小齿顶厚是  $0.2 \times \text{模数}$ 。但对塑料齿轮（齿顶圆角）这个值会相对较低。这时应该设置为  $0.4 \times \text{模数}$ 。在 "Module specific settings" 中的 "General" 设置。

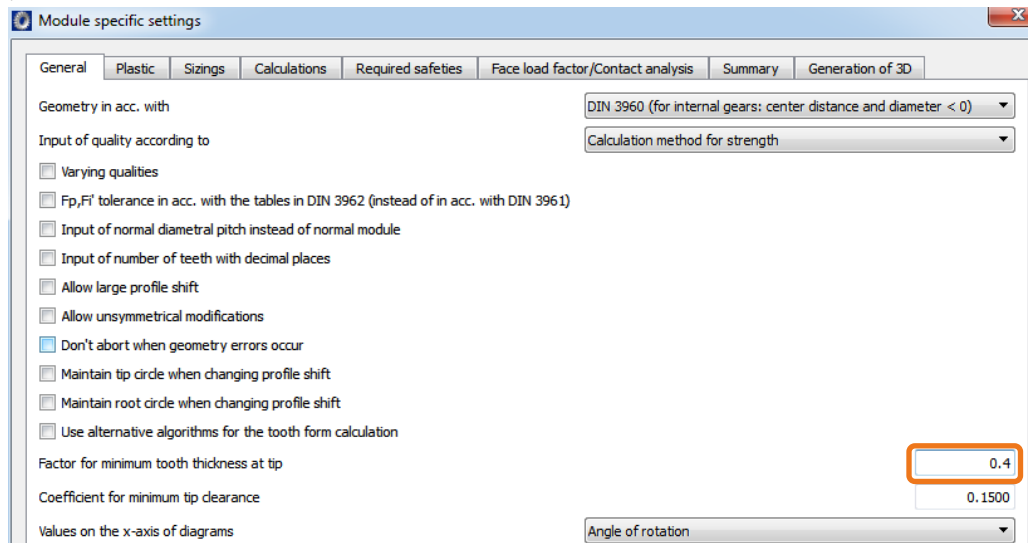


图 10. 在 "Module specific settings" 中设置最小的齿顶厚度

对于最优几何而言，最基本最有效的措施是：

## 2.4 对预先定义齿廓的齿轮更改几何参数

通过改变模数、压力角、螺旋角和指定齿廓的变位系数来修改齿轮几何参数。特别是，对于斜齿轮，通常可以找到一个近似的最优解。KISSsoft 软件提供一个最有效的工具来优化设计。精选型功能可以产生所有可能的结果。然后通过相关操作原则指定结果。

可以通过点击 "Calculation → Fine Sizing" 打开精选型模块。KISSsoft Tutorial 009 文章包含这部分详细内容。

精选型界面：

The screenshot shows the 'Fine Sizing' window with the following parameters:

| Conditions I                        |              | Conditions II                   |                                     | Results   | Graphics                            |
|-------------------------------------|--------------|---------------------------------|-------------------------------------|-----------|-------------------------------------|
| Maximal no of solutions             |              | 250                             |                                     |           |                                     |
| Nominal ratio/deviation in %        |              | $i, i_c$                        | 3.0400                              | 5.0000    |                                     |
|                                     |              | Minimum                         | Maximum                             | Step      |                                     |
| Normal module                       | $m_n$        | 6.0000                          | 6.0000 mm                           | 0.0000 mm | <input checked="" type="checkbox"/> |
| Pressure angle at normal section    | $\alpha_n$   | 20.0000                         | 20.0000 °                           | 0.0000 °  |                                     |
| Helix angle at reference circle     | $\beta$      | 0.0000                          | 0.0000 °                            | 0.0000 °  | <input checked="" type="checkbox"/> |
| Center distance                     | $a$          | 303.0000                        | 303.0000 mm                         | 0.0000 mm | <input checked="" type="checkbox"/> |
| Range for profile shift coefficient | $x^*$        | -0.6000                         | 1.0000                              |           | <input checked="" type="checkbox"/> |
|                                     |              | Gear 1                          | Gear 2                              |           |                                     |
| Maximum tip diameter                | $d_{a, max}$ | 999999.0000                     | 999999.0000 mm                      |           |                                     |
| Minimum root diameter               | $d_{f, min}$ | 0.0000                          | 0.0000 mm                           |           |                                     |
| Fix number of teeth                 | $z$          | 0 <input type="checkbox"/>      | 0 <input type="checkbox"/>          |           |                                     |
| Fix profile shift coefficient       | $x^*$        | 0.0000 <input type="checkbox"/> | 0.0000 <input type="checkbox"/>     |           |                                     |
| Facewidth                           | $b$          | 44.0000                         | 44.0000 mm <input type="checkbox"/> |           |                                     |

Buttons: Accept, Delete, Report, Calculate, Close

图 11. 圆柱齿轮精选型

## 2.5 通过改变基本齿廓改变齿轮几何参数

如果改变基本齿廓（一般通过增加齿长），也可以改变重合度。为了确保生产的齿形有尽可能低的噪音并啮合平稳，应该将重合度尽量接近 **2.0**（或者更高）。这样可以将单双齿交替接触引起的刚度变化降到最低。尽管合适的齿廓乐意达到需要的重合度，但实际加工时也会引起干涉。对这种情况，只有一小部分的结果可以使用。为了确保有效避免这个问题，KISSsoft 精选型功能可以帮助选择所有可能的结果来达到要求的端面重合度，然后显示这些选项。

在"Cylindrical gear Fine Sizing"选择这个方法，找到"Conditions II"打开适当的屏幕

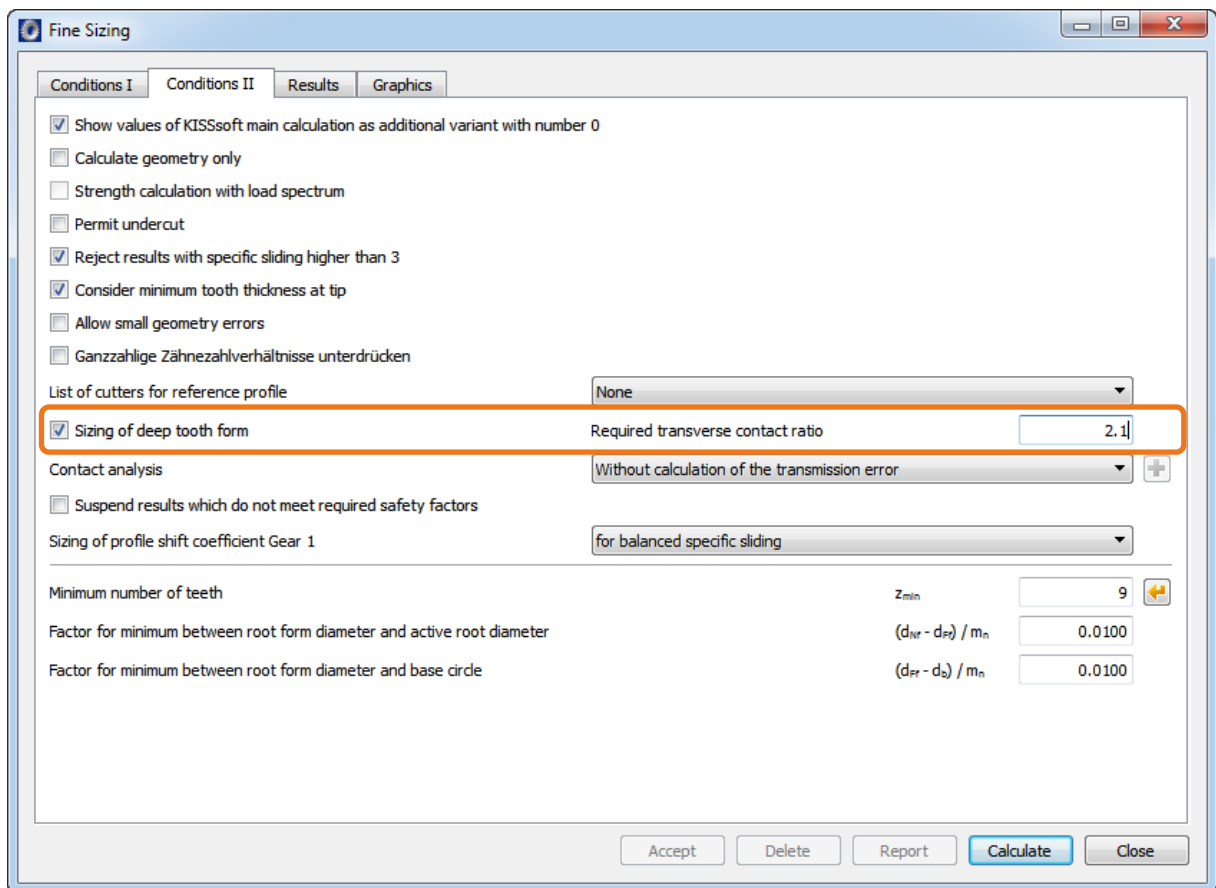


图 12. 选择细长齿

选择 **"Sizing of deep tooth form"**.

也可以直接指定需要的端面重合度或者用一个预定值。这个预定义值在主菜单下的 **"Calculation → Settings"** 中的 **"Sizings"** 标签下设置。

## 2.6 通过修形消除接震动

当一对齿轮旋转时，两个齿轮啮合齿的冲击称作 **"contact shock"**，啮合越不精确，轮齿在有载荷下的形变越大，冲击产生的噪音等级越高。对这种情况，如果是塑料齿轮，齿顶渐开线要进行用修形曲线修改（齿廓修形）。如果是金属齿轮，这个工艺称为齿顶齿廓修形，但是在这种情形下，由于材料刚度较大，修形通常较小。通常两个齿轮都进行齿顶修形。然后，一些特殊情况（例如齿条传动），也可以只在一个齿轮上修形，但这时候齿顶齿根都需要修形。修形曲线包含三段渐增的窄圆弧，这些圆弧都是 KISSsoft 软件自动计算出来然后加到齿形上。

**在 KISSsoft 系统中，可以有两种方式输入齿廓修形：**

### A) 在 **"Modifications"** 标签下

这个新的选项在 03-2008 以上版本才有。

在 **"Modifications"** 标签下可以定义齿顶或者齿根的不同修形类型。

这个的好处在于做的任何修形都可以在主报告文件中体现。也就是说输入和查看都变得更简单。

这里推荐在 03-2008 以上版本使用这个新功能。这个功能的说明在另一个教程 Variant B 中。

**B) 在"Tooth form"下(和先前版本一样)**

输入作为齿形计算一部分的齿顶修形曲线。通过"**Tooth form**"打开：

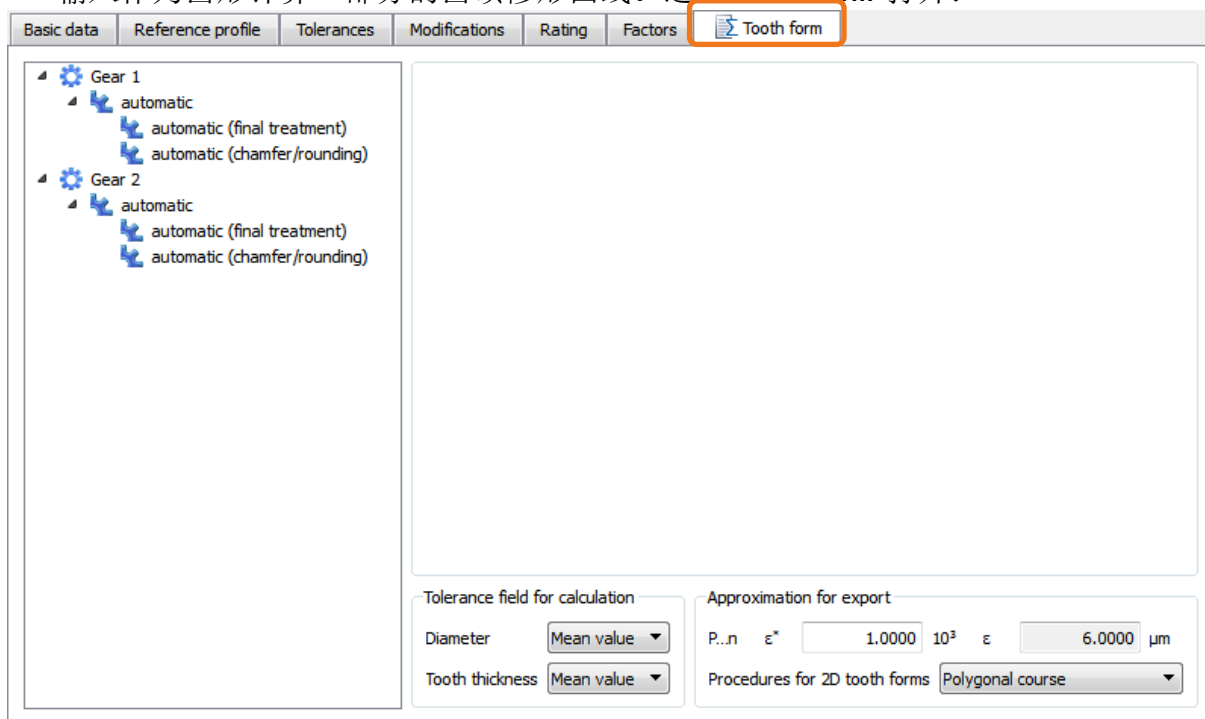


图 13. 计算齿形

这里计算的默认设置是"automatic"。这意味着生成齿形的刀具参数是自动从定义的基准齿廓上获取的。

对"automatic"右击，打开计算操作的选项菜单。左击可以添加需要的操作。

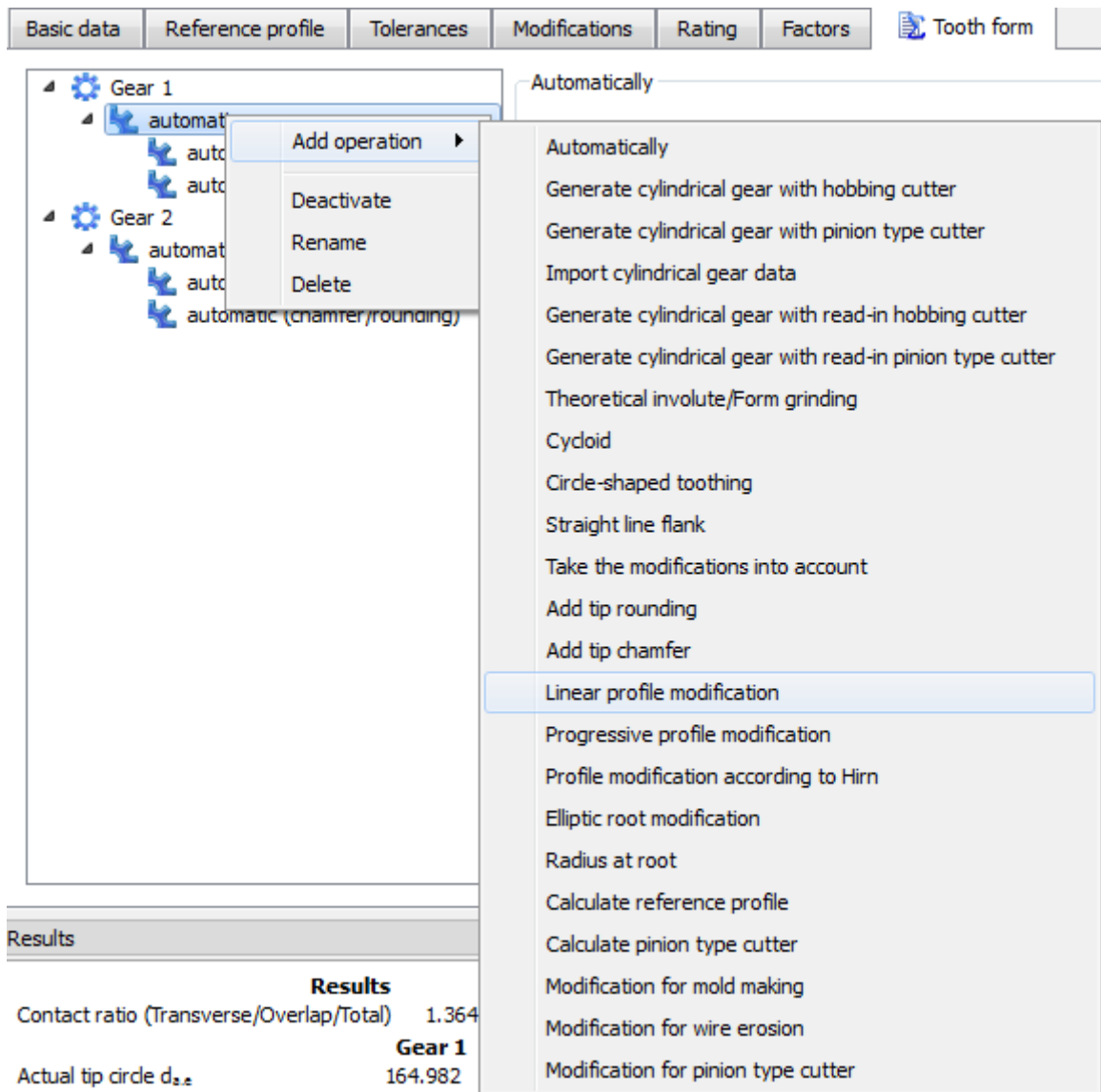


图 14. 齿轮 1 齿形操作选项

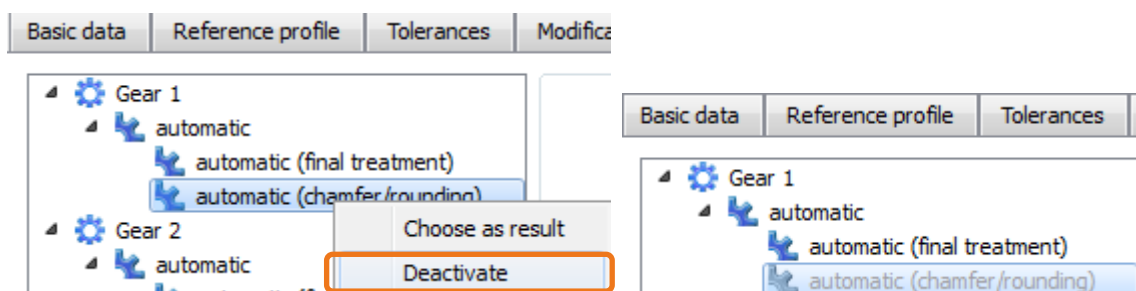


图 15. 在齿轮 1 考虑"Deactivate tip rounding"

不能自动生成齿顶圆角。在这个例子中，当有其他的齿形修形（例如齿廓修形）时，齿顶圆角必须的最后一步操作。这就是为什么这里先不激活它。

在基本齿轮几何参数定以后，就可以修改渐开线。在软件中集成了多种方法。可以选用：线性或抛物线齿廓修形，H. Hirn 定义的由三个圆弧组成的跑合曲线，每个都与齿顶斜角或圆角结合。在这个例子中，必须指定修形高度（修形开始的直接）和齿顶修形量。软件可以基于重合度、精度等级、材料类型（塑料或金属）、刚度及载荷推

荐出最优值。通过定义**"Factors for tip rounding"**，可以或者指定曲线形状（在**"Progressive profile modification"**选项）。

抛物线齿廓修形，相较于线性齿廓修形，它可以增加啮合线长度并提升自身润滑属性。下面是这些齿廓修形的公式：

线性修形： $\delta s(r) = Ca * \delta r / \delta rK$

抛物线修形： $\delta s(r) = Ca * (\delta r / \delta rK)^{Exp}$

$\delta s$  齿廓修形量

$r$  齿形任意一点的半径

$Ca$  齿顶圆上的修形量

$\delta r$   $ra - r$

$\delta rK$   $ra - raK$

$ra$  齿顶圆半径

$raK$  修形起始点半径

$Exp = Factor/5$

Factor: 从 1-20，通常取 5-10

(可以在这输入自定义的值)

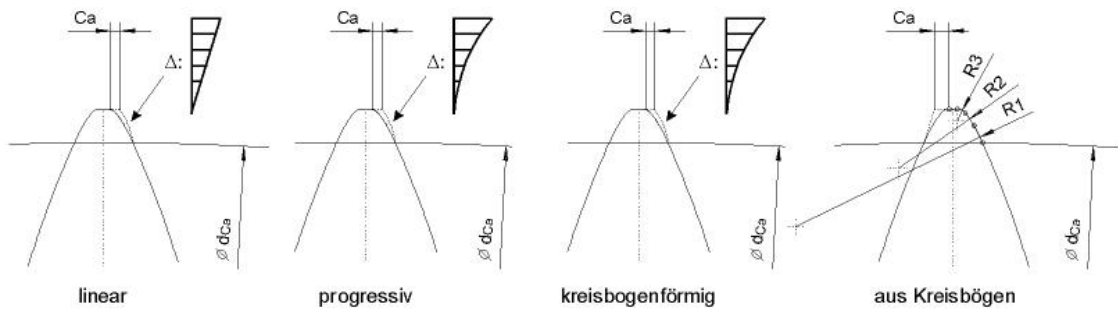


图 16. 齿廓修形类型

点击**"Modification starting at diameter"**右边的按钮，获取一个合适的齿顶修形起始推荐值。

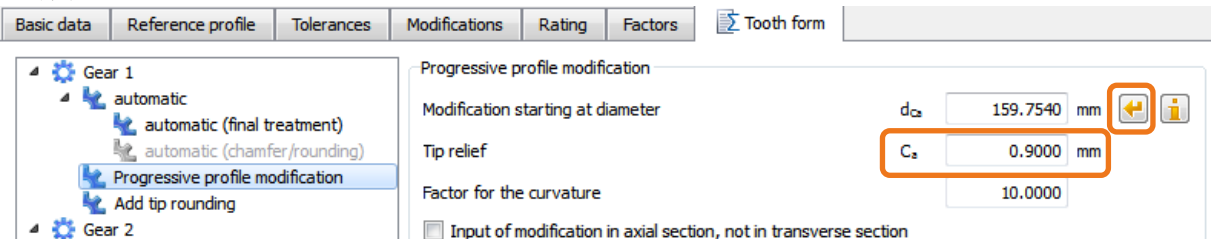


图 17. 推荐齿顶修形

如果齿轮时模具加工（注塑或者粉末冶金），所有的边角都需要是圆弧的。可以独立的设置齿顶圆角，跟齿廓修形无关。也可以选择**"Add tip rounding"**来添加齿顶圆角。

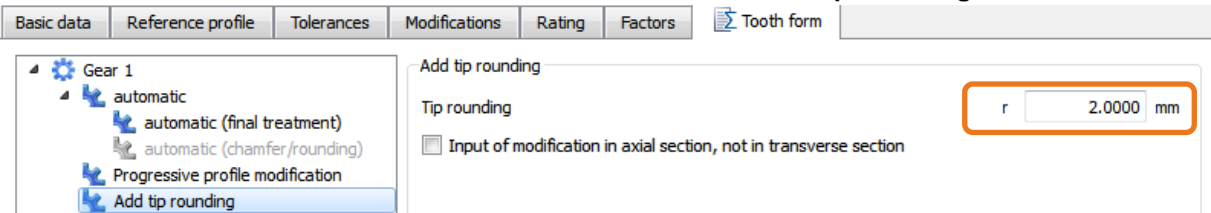


图 18. 添加齿顶圆角

通过不断尝试和错误提示，可以找到最好的系数。通过打开"Meshing"窗口（在窗口的右边）可以查看更详细的齿面接触和齿形。

当做齿形修形时可以比较不同的设置，保存最后计算的齿形，如下图 4。

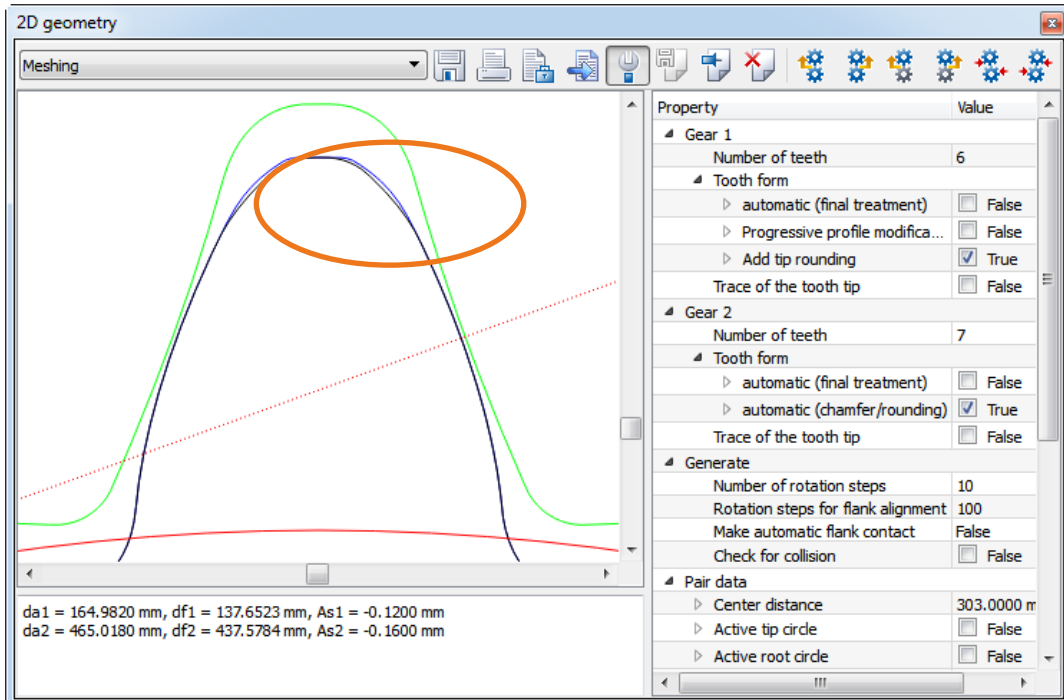


图 19. 对比齿形修形

首先，在屏幕中找到" Tooth form"标签，激活计算，在" Progressive profile modification"计算步骤中取 10 作为它的" Factor for tip rounding"。在" Add tip rounding"计算步骤中设置" Tip rounding"为  $r=2\text{mm}$ 。再次计算，这次" Factor for tip rounding"是 18, " Tip rounding" 是  $r=1\text{mm}$ 。

## 2.7 优化齿根

在齿根过渡面上使用大的圆角可以显著地提高疲劳安全系数。如果齿轮由滚刀加工，有时候就算用很好的圆弧齿顶刀具都很难做出最优的圆弧。然而，通过合适的修形（在可用齿根直径以下）可以大大提高齿根安全系数。

这个修形非常有用，尤其是想消除根切时（看下一个图）。

在 KISSsoft 中可以自动生成这种修形。

通过点击" Elliptic root modification"并直接输入齿顶修形量例如 2.6 介绍的内容，可以输入计算出的齿根圆角。

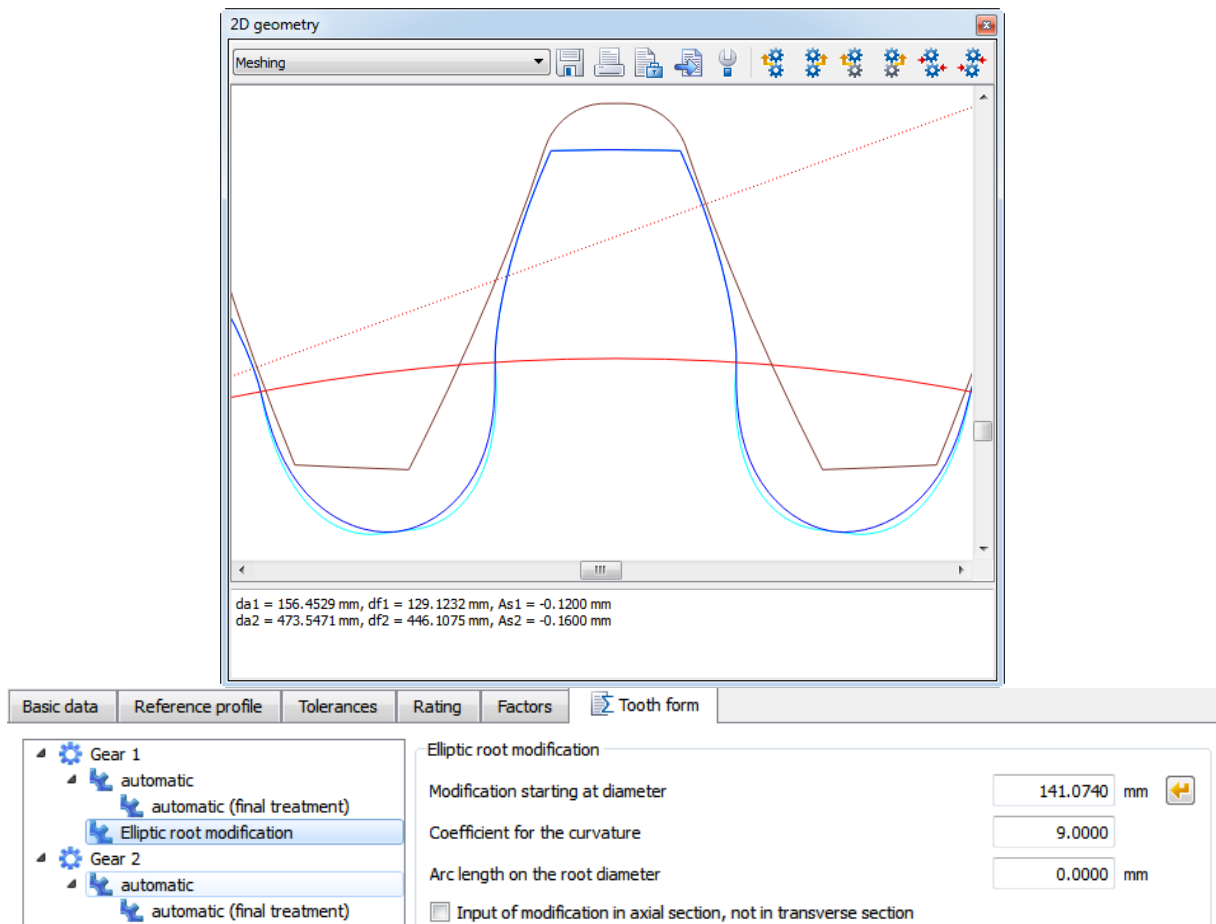



图 20. 分别是齿根没有（蓝绿色有根切）和有（深蓝色）优化的情形

注意：如果在反转齿轮上使用跑合曲线或者齿顶倒圆角，齿根圆角的起始位置也可以在理论齿根圆以上。这种情况最好检查一下啮合情况（看下一个章节）

## 2.8 检查啮合

在优化齿形后，建议需要检查齿轮啮合的精确度。齿轮啮合接触应该在理论渐开线区域内。两个齿的碰撞，尤其是主动轮的齿顶和从动轮的齿根，会对齿轮有很大的损害。应该在最小中心距的时候检查一下齿轮啮合（用最大中心距检查齿根安全）。可以直接输入中心距。

这个"Check for collisions"功能非常有用，

可以用来检查啮合是否正确。点击检查框激活碰撞检查。然后点击  图标 "Flank to the left or right"来放置齿轮右面接触或者左面接触。如果两个面接触了，会出现一个黑色方块，如果有干涉就会湿红色的。



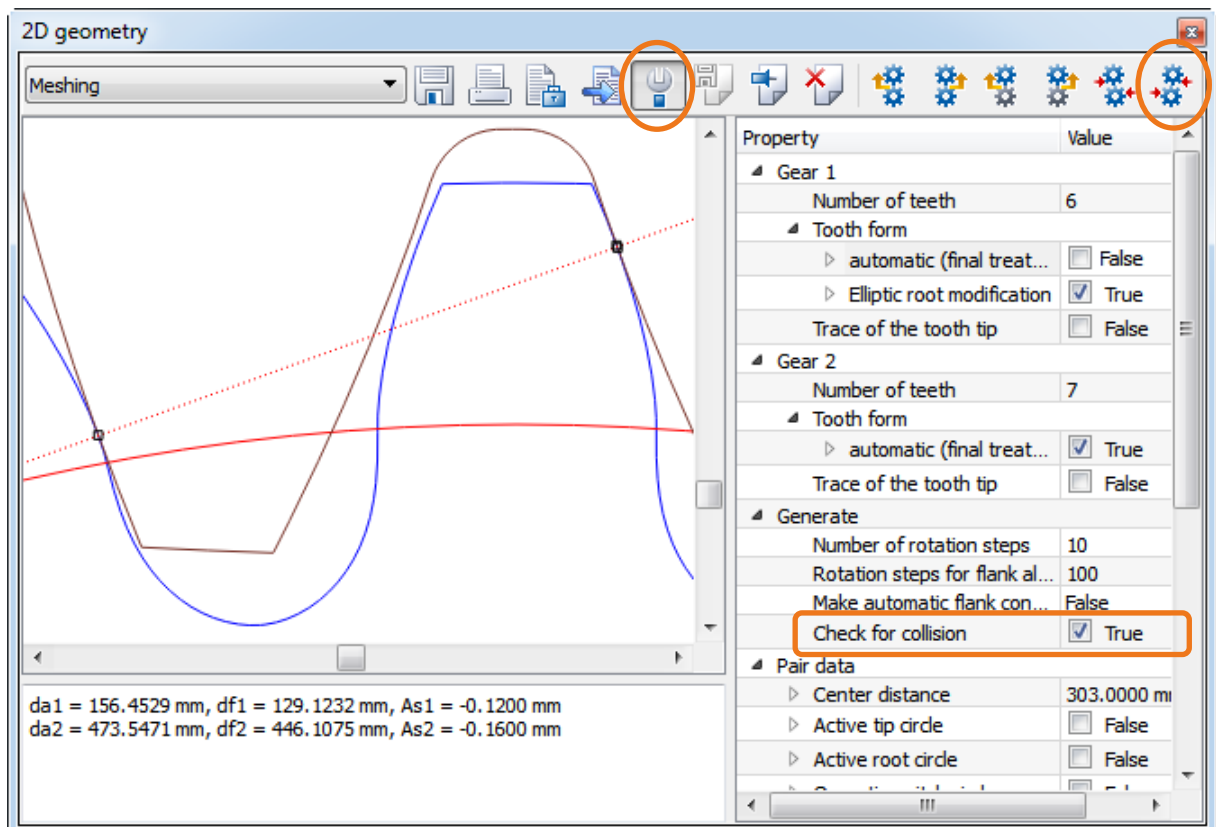



图 21. 激活碰撞检查

点击  "Properties" 图标，在右侧显示图形设置，可以用它来做碰撞检查。

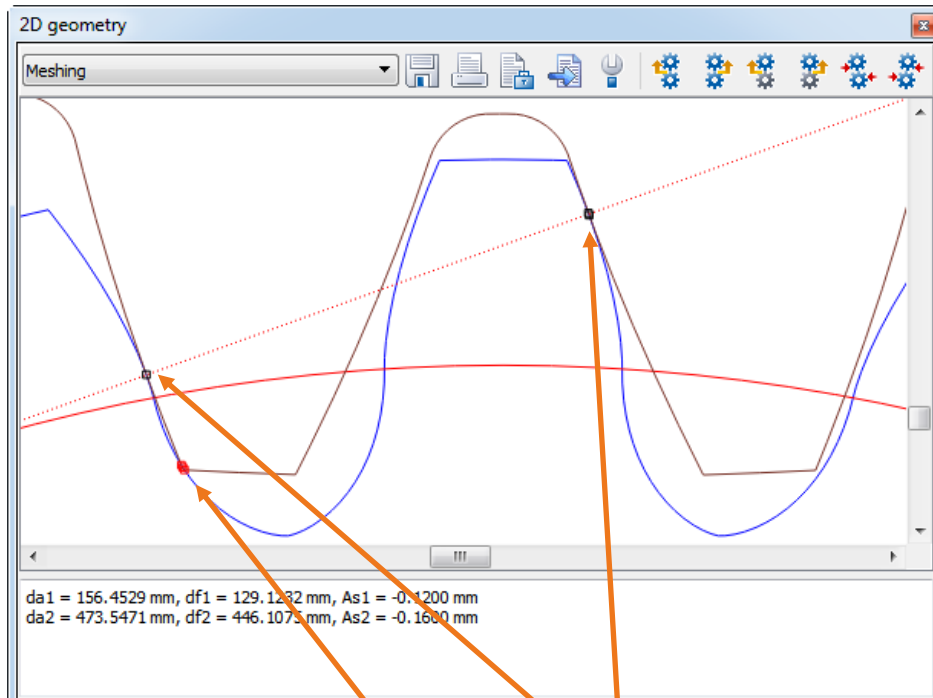


图 22. 碰撞检查

"碰撞"

正确接触

## 2.9 检查齿轮咬死

可以通过使用适当的齿厚公差（章节 4 描述）来防止齿轮咬死。如果不能给出理论上尽量大的齿厚公差（例如齿厚会非常小）或者其他原因使得齿轮啮合很紧，这时候必须仔细检查。

当齿轮一起运动时，齿轮应该在齿顶碰到齿根前卡死（侧隙必须是 0.0）。可以从实际寿命上反应出这个情况的后果而且必须注意这个情况，因为齿根冲击比齿面卡死更严重。

在 KISSsoft 中，可以在"Meshing"窗口中直接减小中心距，直到消除侧隙。此时一个齿轮的齿顶和另一个齿轮的齿根之间还必须留有间隙。

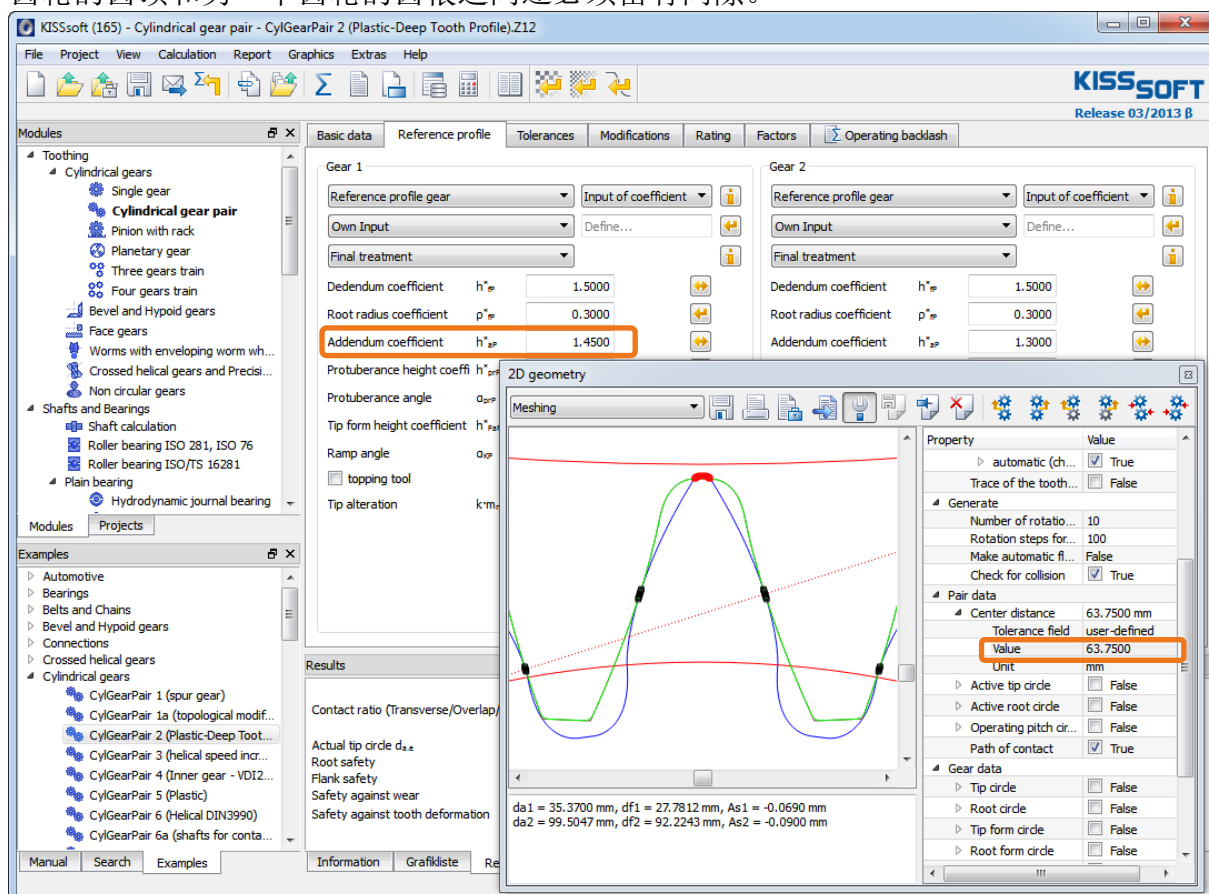


图 23. 这是一个反面例子：当侧隙消除后，齿轮 1 的齿顶已经深入到齿轮 2 的齿根区域！！

## 3 强度计算

### 3.1 简介

在设计优化齿轮时，对齿轮服务寿命而已，尤为重要的还是齿根、齿面和磨损的安全系数。

跟金属齿轮一样，塑料齿轮的材料属性（齿根抗弯和齿面强度）决定了循环次数。这些属性还被温度和润滑形式影响（润滑油、润滑脂或者干润滑）。

然而，对金属齿轮的齿根强度校核（例如材料为 17 CrNiMo6: 525 N/mm<sup>2</sup> 的齿轮齿根疲劳强度 $[\sigma_{Flim}]$ ）只需要计算一个值。但对塑料齿却需要几个图表。这个参数根据润滑油、润滑脂或者干润滑分成独立的图表存储在 KISSsoft 系统中。在计算时，自动处理这个数据。这意味着可以很简单的修改材料参数。在我们手册中可以找到更详细的信息，尤其在章节中"Materials for gears", "Plastic as specified in VDI 2545 ...", "Plastics" sections。

### 3.2 自定义塑料参数

在 KISSsoft 材料库中已经包含了一些塑料材料。如果已经知道了一些塑料数据，可以通过下面描述的方法保存其在 KISSsoft 数据库中。这里用的已经准备好的"POM"材料作为例子：

点击"Extras" -> "Data base tool"打开材料库，在这能使用齿轮计算的材料参数。

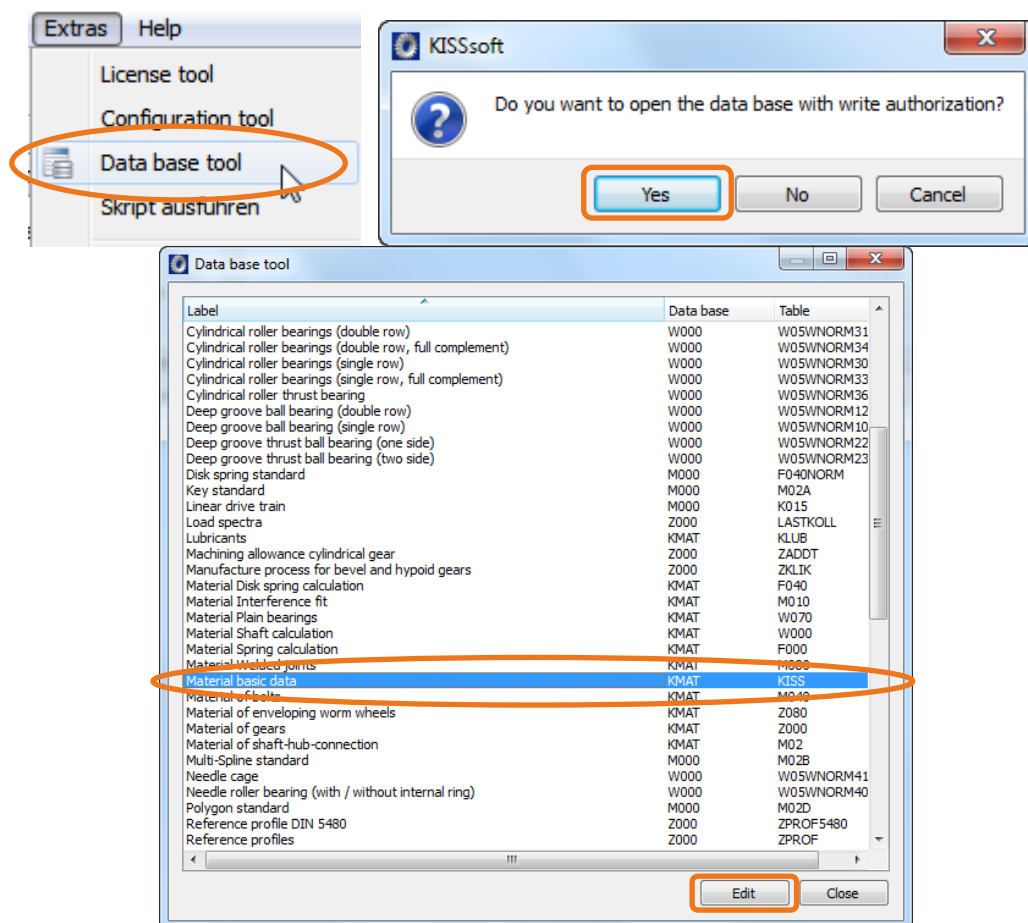


图 24. 打开分析例子

在生成新的材料前，它必须在基础材料库先建立。点击**"Material basic data"**定义基础数据。然后点击**[Edit]**打开适当的基础材料库。点击生成新的数据档案，可以在这里编辑它的参数。如果已经选了一个材料，这些数据会转移到新的数据档案中，一个新的材料就建成了。可以在里面修改成所需要的参数。

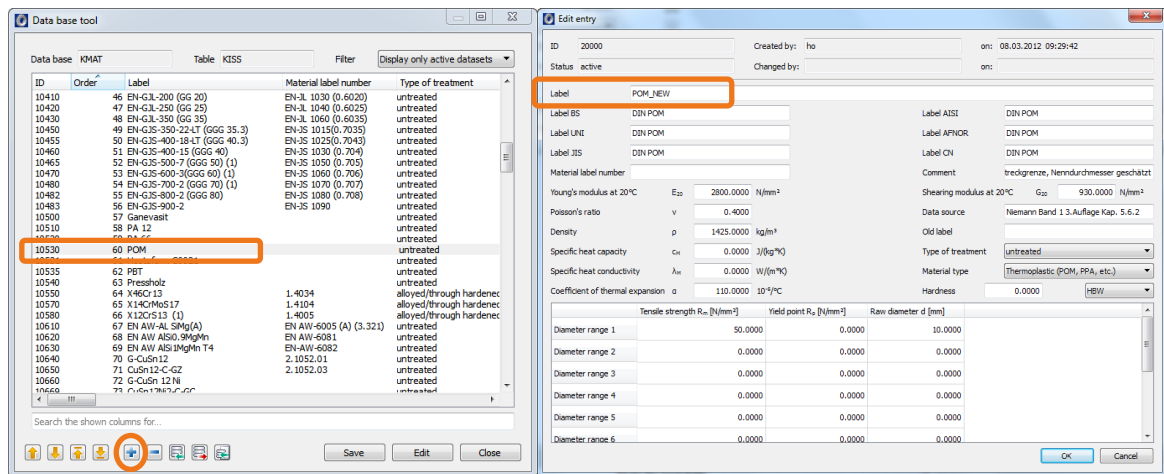


图 25. 生成新的数据档案

点击**[OK]**确认输入并关闭"Edit entry"菜单回到数据库。然后点击**[Save]**保存数据。然后会出现一个信息说明已经成功修改了数据库。

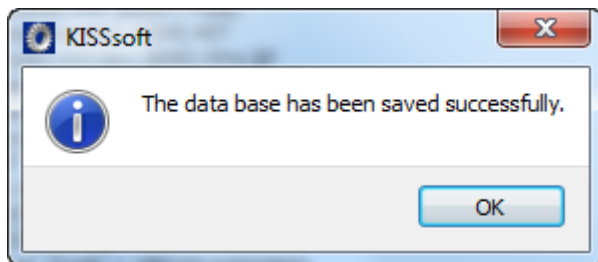


图 26. 数据库中新的数据已经被成功的更改并保存。

下一个章节会用到 POM（已经保存在 KISSsoft 中），会展示一下哪些条目需要用到。这就是**"Material basic data"**和 **module-specific data**，这里用的是**"Material Gears"**。

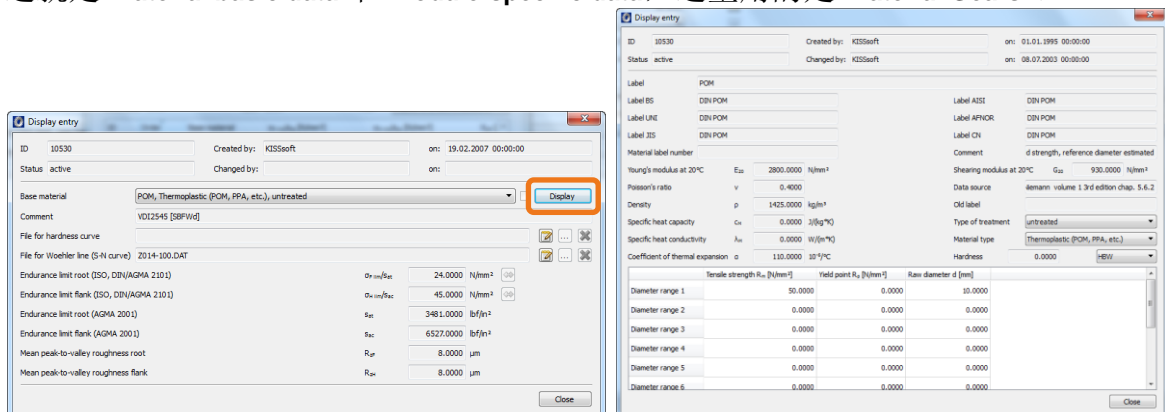


图 27. "Material basic data" - Module-specific data "Material Gears"

最重要的信息登记在"File for Woehler line"条目下，图 27 可以看到标记。在这里可以输入文件名和温度，润滑等参数并保存。需要将这个文件存在安装目录下（通常是 C:\Programs\KISSsoft-03-2012\ext\dat）。

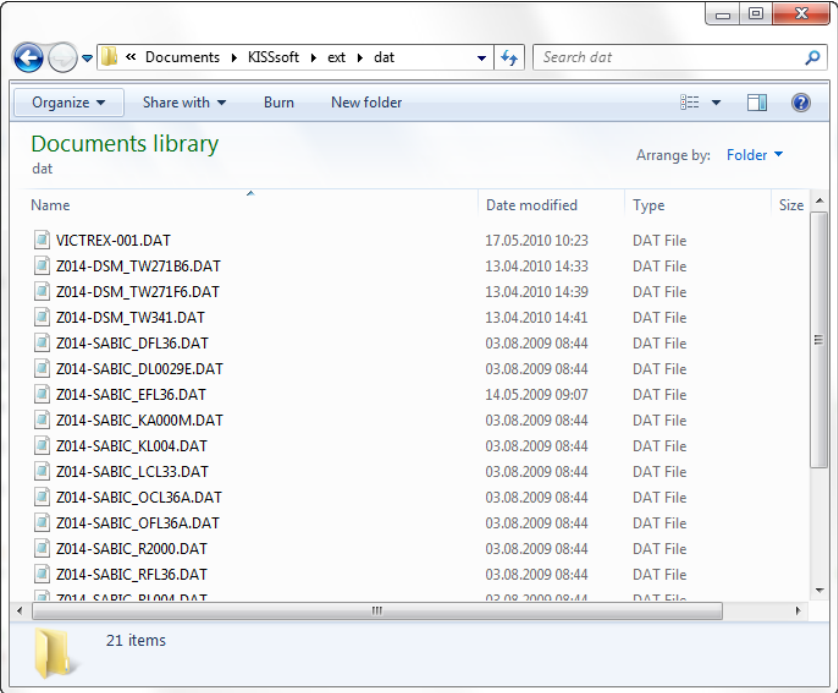


图 28. 存储自定义的塑料数据

下面即将导入自定义的文件（这个可以任意命名）。最方便的就是复制一个已有的塑料材料文件（例如 Z014-100.DAT, POM 材料），重新命名然后编辑成需要的参数。

从 Z014-100.DAT（POM 材料）提取：杨氏模量  
（一个单行表格的杨氏模量，跟温度有关）

```
:TABLE FUNCTION Young's modulus INPUT X ToothTempRoot TREAT LINEARDATA -20 0
20 40 60 80 100 120 4400 3950 3500 2950 2400 1800 1400
950
END
```

从 Z014-100.DAT（POM 材料）提取：润滑油影响的齿面强度  
（两行的 sig.Hlim 表格，列是温度，行是循环次数）

```
-- Data for flank strength with oil lubrication
-- From Niemann, diagram 22.4/4, for PA66, oil lubrication
:TABLE FUNCTION FlankenSigHNOel
INPUT X ToothTempFlank TREAT LINEAR
INPUT Y Load change TREAT LOG
DATA
20 40 60 80 100 120
0 120 115 108 99 91 76
1E5 120 115 108 99 91 76
1E6 95 90 85 78 68 57
1E7 70 67 63 58 50 40
1E8 52 50 47 44 37 28
1E9 45 42 40 38 32 25
1E10 43 41 38 36 30 24
1E11 43 41 38 36 30 23
1E99 43 41 38 36 30 23
END
```

### 3.3 考虑几何齿形影响的强度校核

根据 VDI 2545, DIN 3990, ISO 6336 或 AGMA 2001 标准的齿根强度校核方法是使用一个简化的模型来算齿根应力。这个方法计算的是名义上定义的危险截面（在中是与齿根圆角成 30 度切线的切点）。然而，对于压力角从 20 度变化的齿轮或者带有齿根圆角的齿轮，这个截面可能会离最大载荷处的危险截面很远。KISSsoft 中使用图解法（根据 Obsieger 在 "Die Konstruktion" 书中描述的过程）。完全按照选择算法（YF 和 YS 根据 DIN, ISO, AGMA 标准中指定）中的相关公式执行计算。在整个齿根区域从中间齿深大齿根大约 50 处危险截面，通过计算决定最大弯曲应力。在后来的计算中使用到这个数据。这些数据可以在非渐开线齿形计算时使得结果更精确。更多信息参照手册相关章节。

在 KISSsoft 中激活 "Graphical method"：在 "Rating" 标签中点击屏幕右边 [Details] 按钮。打开 "Form factors  $Y_F$ ,  $Y_S$ " 下拉框，选择 "Using graphical method"。

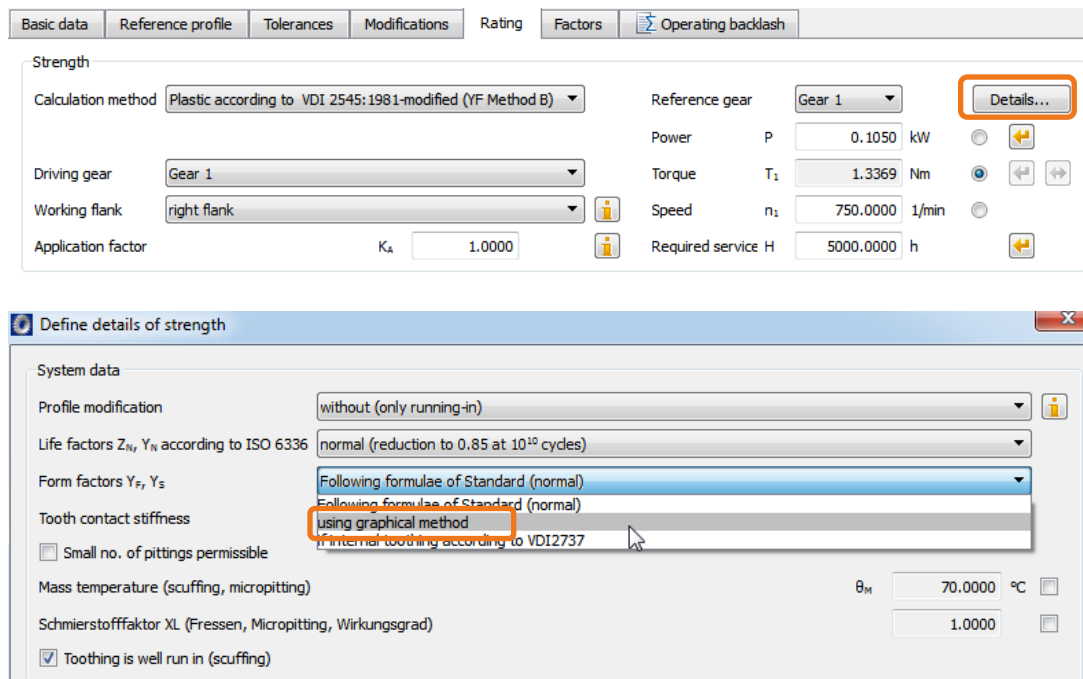


图 29. 激活图解法强度校核

现在，每个计算都会首先自动计算齿形并从中得出  $Y_S$  和  $Y_F$ 。

也可以在 KISSsoft 系统中显示齿根应力。在 "Contact analysis" 中输入需要的设置，然后点击计算。

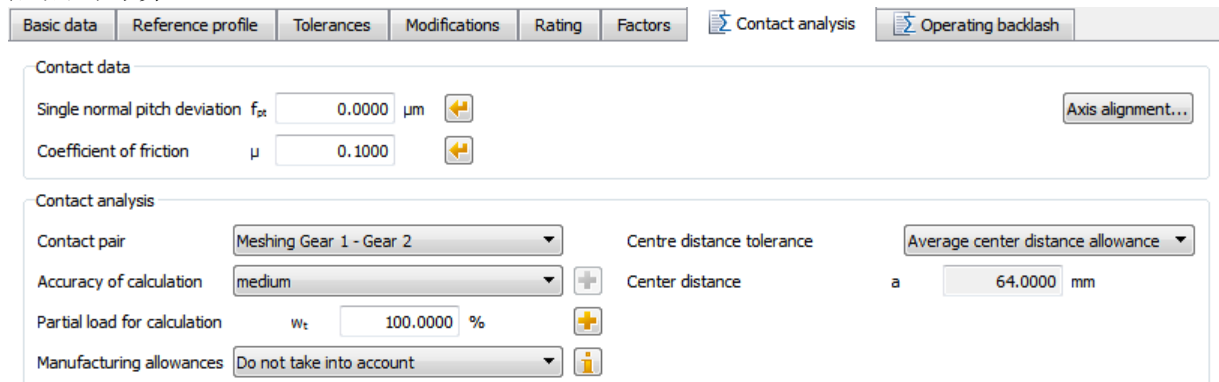


图 30. 计算接触分析

进度条显示计算正在进行。



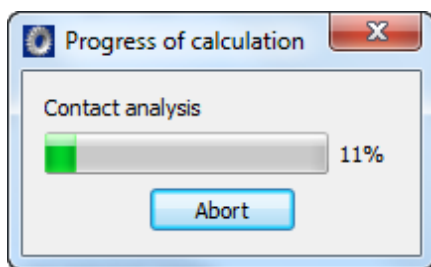


图 31. 接触分析计算过程

选择图形显示，选择"**Graphics**"→ "**Contact analysis**", 如下图示例，额定受力图和额定受力分布图和齿根应力曲线一样都很好。

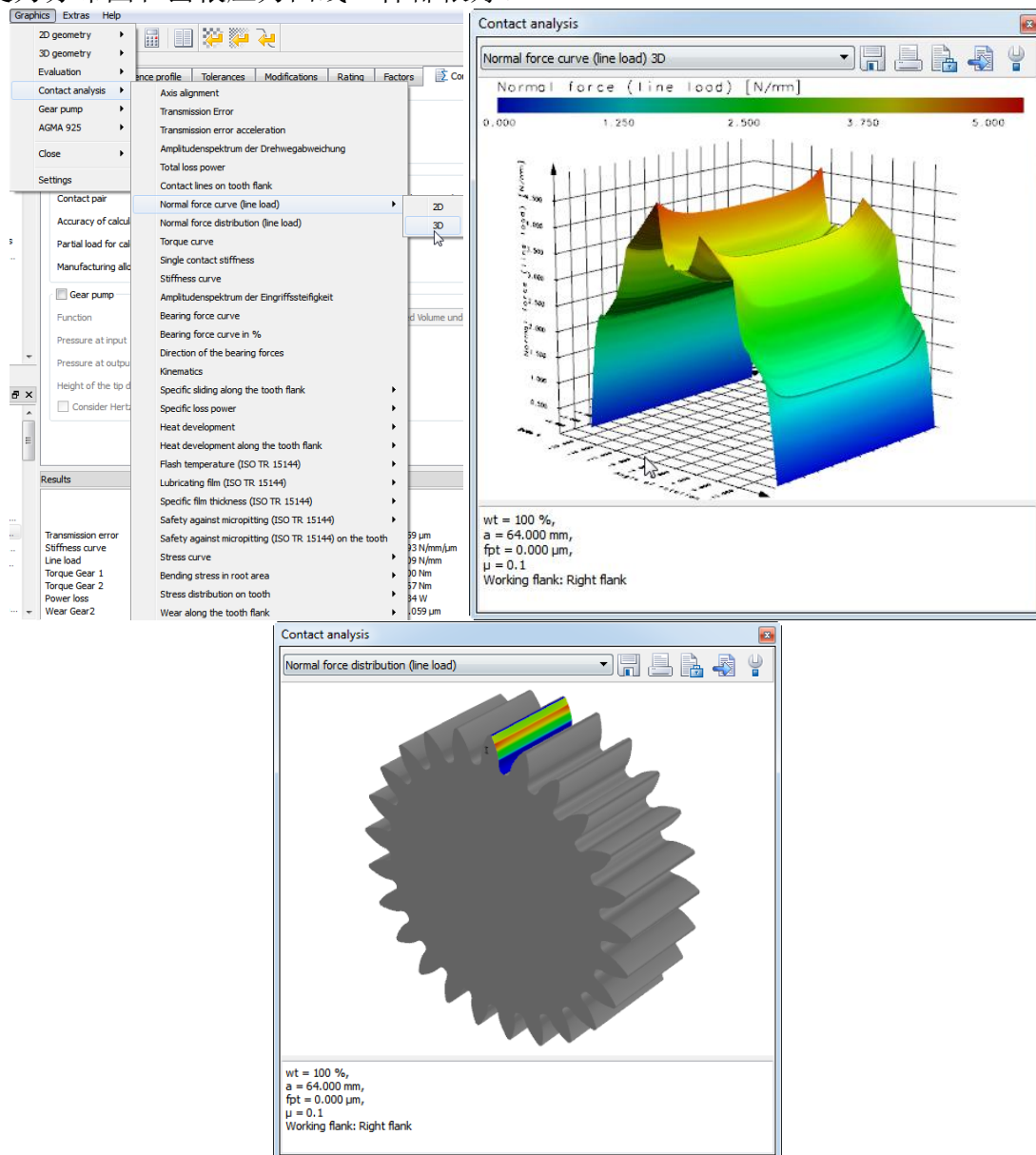


图 32. 例子"CylGearPair 2"啮合的额定受力曲线

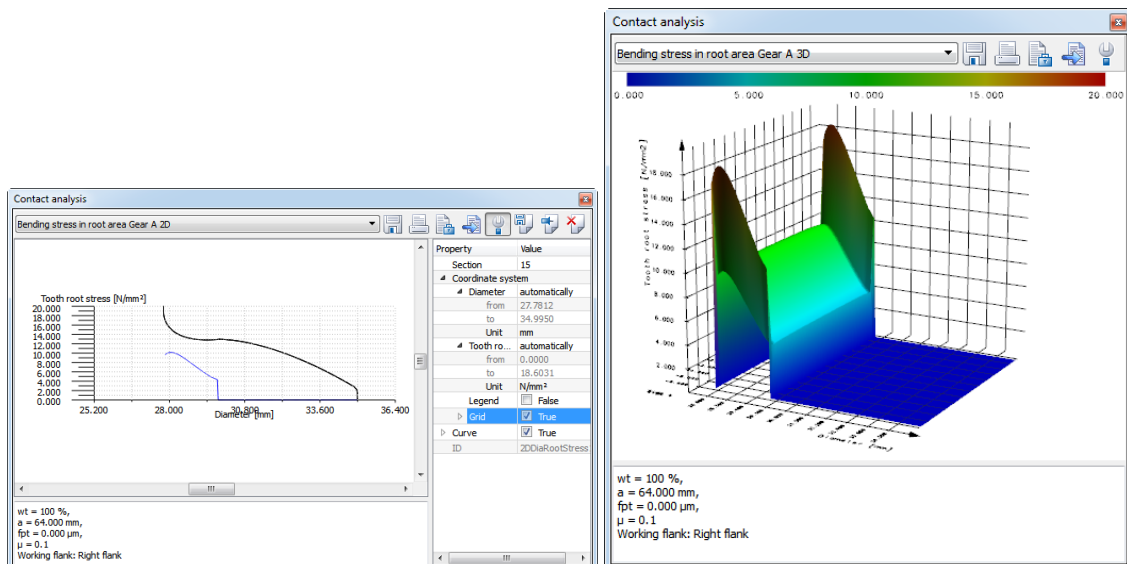


图 33. 分布在齿轮 1 齿根处的齿根应力

## 4 定义齿厚公差

### 4.1 简介

在精密机械工业，相对偏差（公差/齿厚）对模数 1.0 以上的齿轮比较高。如果中心距公差很大，精度等级比较低，此时必须选择一个足够大的偏差来防止齿轮卡死。此外，许多塑料齿轮都出现缩水和膨胀。

经验说明在设计齿轮初期最好定义必要误差。在详细优化齿形（如下说明）时没有点出现，然后发现极大的偏差会消耗齿顶处的齿厚优化。

使用 DIN3967 中指定的方法来定义偏差。在这之前，必须先知道齿轮和箱体的工作温度和热膨胀系数。这里必须考虑膨胀产生的影响。尼龙是膨胀最严重的塑料材料（吸水后会膨胀 2%）。

### 4.2 计算工作侧隙

KISSsoft 提供一个塑料齿轮计算的例子"CylGearPair 5"。在圆柱齿轮模块中打开这个文件。

这里必须记录选择的齿轮 1、齿轮 2 和中心距的公差。

| Basic data  | Reference profile | Tolerances | Modifications | Rating  | Factors | Operating backlash |  |        |  |  |        |  |  |         |         |    |         |         |  |         |         |    |         |         |                                 |        |        |    |        |        |  |        |        |    |        |        |  |        |         |    |        |         |  |         |         |    |         |         |
|---|-------------------|------------|---------------|---------|---------|--------------------|--|--------|--|--|--------|--|--|---------|---------|----|---------|---------|--|---------|---------|----|---------|---------|---------------------------------|--------|--------|----|--------|--------|--|--------|--------|----|--------|--------|--|--------|---------|----|--------|---------|--|---------|---------|----|---------|---------|
| <div> <div>Allowances</div> <div> <div>Gear 1</div> <div> <div>Tooth thickness tolerance</div> <div>DIN 3967 cd25</div> </div> </div> <div> <div>Gear 2</div> <div> <div>Tooth thickness tolerance</div> <div>DIN 3967 cd25</div> </div> </div> </div>  |                   |            |               |         |         |                    |  |        |  |  |        |  |  |         |         |    |         |         |  |         |         |    |         |         |                                 |        |        |    |        |        |  |        |        |    |        |        |  |        |         |    |        |         |  |         |         |    |         |         |
| <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th colspan="2">Gear 1</th> <th></th> <th colspan="2">Gear 2</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Tooth thickness...e (upper/lower) <math>A_{s1}</math></td> <td>-0.0540</td> <td>-0.0840</td> <td>mm</td> <td>-0.0700</td> <td>-0.1100</td> </tr> <tr> <td>Base tangent le...e (upper/lower) <math>A_{b1}</math></td> <td>-0.0515</td> <td>-0.0801</td> <td>mm</td> <td>-0.0668</td> <td>-0.1049</td> </tr> <tr> <td>Normal backlash (min/max) <math>j_n</math></td> <td>0.0515</td> <td>0.0801</td> <td>mm</td> <td>0.0668</td> <td>0.1049</td> </tr> <tr> <td>Circumferential...lash (min/max) <math>j_c</math></td> <td>0.0540</td> <td>0.0840</td> <td>mm</td> <td>0.0700</td> <td>0.1100</td> </tr> <tr> <td>Tip diameter al...e (upper/lower) <math>A_{cs}</math></td> <td>0.0000</td> <td>-0.0100</td> <td>mm</td> <td>0.0000</td> <td>-0.0100</td> </tr> <tr> <td>Root diameter ... (upper/lower) <math>A_{cr}</math></td> <td>-0.1713</td> <td>-0.2664</td> <td>mm</td> <td>-0.2220</td> <td>-0.3489</td> </tr> </tbody> </table> |                   |            |               |         |         |                    |  | Gear 1 |  |  | Gear 2 |  | Tooth thickness...e (upper/lower) $A_{s1}$ | -0.0540 | -0.0840 | mm | -0.0700 | -0.1100 | Base tangent le...e (upper/lower) $A_{b1}$ | -0.0515 | -0.0801 | mm | -0.0668 | -0.1049 | Normal backlash (min/max) $j_n$ | 0.0515 | 0.0801 | mm | 0.0668 | 0.1049 | Circumferential...lash (min/max) $j_c$ | 0.0540 | 0.0840 | mm | 0.0700 | 0.1100 | Tip diameter al...e (upper/lower) $A_{cs}$ | 0.0000 | -0.0100 | mm | 0.0000 | -0.0100 | Root diameter ... (upper/lower) $A_{cr}$ | -0.1713 | -0.2664 | mm | -0.2220 | -0.3489 |
|   | Gear 1            |            |               | Gear 2  |         |                    |  |        |  |  |        |  |  |         |         |    |         |         |  |         |         |    |         |         |                                 |        |        |    |        |        |  |        |        |    |        |        |  |        |         |    |        |         |  |         |         |    |         |         |
| Tooth thickness...e (upper/lower) $A_{s1}$  | -0.0540           | -0.0840    | mm            | -0.0700 | -0.1100 |                    |  |        |  |  |        |  |  |         |         |    |         |         |  |         |         |    |         |         |                                 |        |        |    |        |        |  |        |        |    |        |        |  |        |         |    |        |         |  |         |         |    |         |         |
| Base tangent le...e (upper/lower) $A_{b1}$  | -0.0515           | -0.0801    | mm            | -0.0668 | -0.1049 |                    |  |        |  |  |        |  |  |         |         |    |         |         |  |         |         |    |         |         |                                 |        |        |    |        |        |  |        |        |    |        |        |  |        |         |    |        |         |  |         |         |    |         |         |
| Normal backlash (min/max) $j_n$   | 0.0515            | 0.0801     | mm            | 0.0668  | 0.1049  |                    |  |        |  |  |        |  |  |         |         |    |         |         |  |         |         |    |         |         |                                 |        |        |    |        |        |  |        |        |    |        |        |  |        |         |    |        |         |  |         |         |    |         |         |
| Circumferential...lash (min/max) $j_c$  | 0.0540            | 0.0840     | mm            | 0.0700  | 0.1100  |                    |  |        |  |  |        |  |  |         |         |    |         |         |  |         |         |    |         |         |                                 |        |        |    |        |        |  |        |        |    |        |        |  |        |         |    |        |         |  |         |         |    |         |         |
| Tip diameter al...e (upper/lower) $A_{cs}$  | 0.0000            | -0.0100    | mm            | 0.0000  | -0.0100 |                    |  |        |  |  |        |  |  |         |         |    |         |         |  |         |         |    |         |         |                                 |        |        |    |        |        |  |        |        |    |        |        |  |        |         |    |        |         |  |         |         |    |         |         |
| Root diameter ... (upper/lower) $A_{cr}$  | -0.1713           | -0.2664    | mm            | -0.2220 | -0.3489 |                    |  |        |  |  |        |  |  |         |         |    |         |         |  |         |         |    |         |         |                                 |        |        |    |        |        |  |        |        |    |        |        |  |        |         |    |        |         |  |         |         |    |         |         |

图 34. 预先选择齿轮 1、齿轮 2 和中心距的公差



在运行工作侧隙计算前，先点击" $\Sigma$ "计算一下啮合，然后点击"**Operating backlash**"来计算工作侧隙。

考虑加工精度的影响 (轴错位)

考虑温度引起的箱体和齿轮膨胀的影响

选择箱体材料

图 35. 工作侧隙计算设置

这个例子已经将它定义在了工作时卡死。当开始计算工作侧隙时，会出现下面的警告信息：

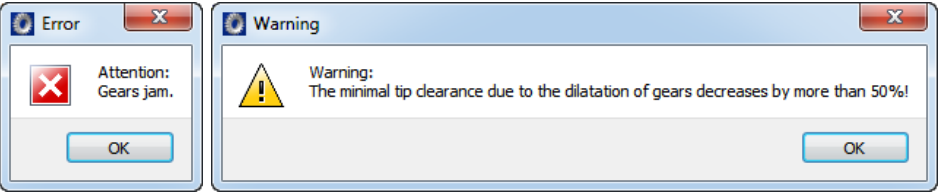



图 36. 错误信息: "Gears jam" 警告信息: 齿顶干涉

点击  $\Sigma$  右边的按钮（创建报告 ）来显示报告。

|  |        |               |              |        |
|--|--------|---------------|--------------|--------|
| <u>Results:</u>                                |        |               |              |        |
| Center distance change by:                     |        |               |              |        |
| Warming  | (mm)   | [DaC]         | 0.026        | Casing |
|  | (mm)   | [DaW]         | -0.247       | Gears  |
| Change to backlash due to:                     |        |               |              |        |
| Center distance tolerance                      | (mm)   | [Dja.e/i]     | 0.012/-0.012 |        |
| Swelling due to water absorption               | (mm)   | [DjQ]         | 0.000        |        |
| Warming  | (mm)   | [Djtheta]     | -0.170       |        |
| Axes not parallel                              | (mm)   | [DjSigmabeta] | -0.006       |        |
| Individual intermeshing variations             | (mm)   | [DjF]         | -0.015       |        |
| <u>Theoretical backlash (reference circle)</u> |        |               |              |        |
| - Circumferential backlash                     |        |               |              |        |
|  | (min.) | (mm)          | [jt.i]       | 0.112  |
|  | (max.) | (mm)          | [jt.e]       | 0.206  |
| <u>Theoretical backlash (pitch circle)</u>     |        |               |              |        |
| - Circumferential backlash                     |        |               |              |        |
|  | (min.) | (mm)          | [jtw.i]      | 0.113  |
|  | (max.) | (mm)          | [jtw.e]      | 0.207  |
| <u>Backlash reduction</u>                      |        |               |              |        |
| - Circumferential backlash                     |        |               |              |        |
|  | (min.) | (mm)          | [jtw.a.i]    | 0.100  |



|  | Gear 1    |            | Gear 2    |            |
|--|-----------|------------|-----------|------------|
| Tooth thickness deviation                        | Own Input |            | Own Input |            |
| Tooth thickness allowance (upper/lower) $A_{s1}$ | -0.0940   | -0.1240 mm | -0.1100   | -0.1500 mm |
| Base tangent length (upper/lower) $A_{b1}$       | -0.0507   | -0.0789 mm | -0.0658   | -0.1034 mm |
| Normal backlash (min/max) $j_n$                  | 0.0507    | 0.0789 mm  | 0.0658    | 0.1034 mm  |
| Circumferential backlash (min/max) $j_t$         | 0.0540    | 0.0840 mm  | 0.0700    | 0.1100 mm  |
| Tip diameter allowance (upper/lower) $A_{s2}$    | 0.0000    | 0.0000 mm  | 0.0000    | 0.0000 mm  |
| Root diameter allowance (upper/lower) $A_{r1}$   | -0.1484   | -0.2308 mm | -0.1923   | -0.3022 mm |

图 40. 增加两个齿轮周向侧隙，每个增加 0.04mm。

最后点击 (计算) 来运行啮合计算并再次进行工作侧隙计算-如上所述。这次没有经过出现了（因为齿轮不再卡死）并且可以在 报告中看到正的工作侧隙。

| Smallest operating backlash |        |      |           |       |
|-----------------------------|--------|------|-----------|-------|
| - Temperature combination   |        |      |           |       |
| Gear body temperature       | (°C)   | [TR] |           | 50.00 |
| Case body temperature       | (°C)   | [TC] |           | 50.00 |
| - Circumferential backlash  |        |      |           |       |
|                             | (min.) | (mm) | [jtwop.i] | 0.010 |
|                             | (max.) | (mm) | [jtwop.e] | 0.111 |
| - Normal backlash           |        |      |           |       |
|                             | (min.) | (mm) | [jnwop.i] | 0.010 |
|                             | (max.) | (mm) | [jnwop.e] | 0.104 |
| - Radial clearance          |        |      |           |       |
|                             | (min.) | (mm) | [jrwop.i] | 0.013 |
|                             | (max.) | (mm) | [jrwop.e] | 0.136 |

图 41. 从工作侧隙计算报告中提取。现在工作侧隙时正值了。

## 5 注塑模具设计

### 5.1 简介

在 KISSsoft 计算中上面描述的优化后的理论齿形是用齿厚偏差的中间值计算出来的。这个齿形结果可以转成或者格式导入程序中。然后用这个几何轮廓通过使用投影过程来监督模拟齿轮加工。

也可以精确的定义注塑模具。当塑料齿轮被注塑过程中，凝固时会出现一定量的收缩。所以注塑模具理论上会设计的稍大一点来弥补收缩。为了达到这个效果，齿形都要进行径向和切向扩大。径向膨胀是在径向上长宽固定比例的变化（例如齿形上每个点都从中心点处直线移动）。切向膨胀是将齿增厚，齿间隙也相应减少。在 KISSsoft 中计算模具，可以预定义齿顶和齿根的预定义需要的径向膨胀和切向膨胀比例。

### 5.2 修改注塑模具补偿收缩

点击 "Tooth form" 打开齿形计算，在这里做这些修形。然后添加其他操作在已激活的 "automatic (Rack)" 标签下。

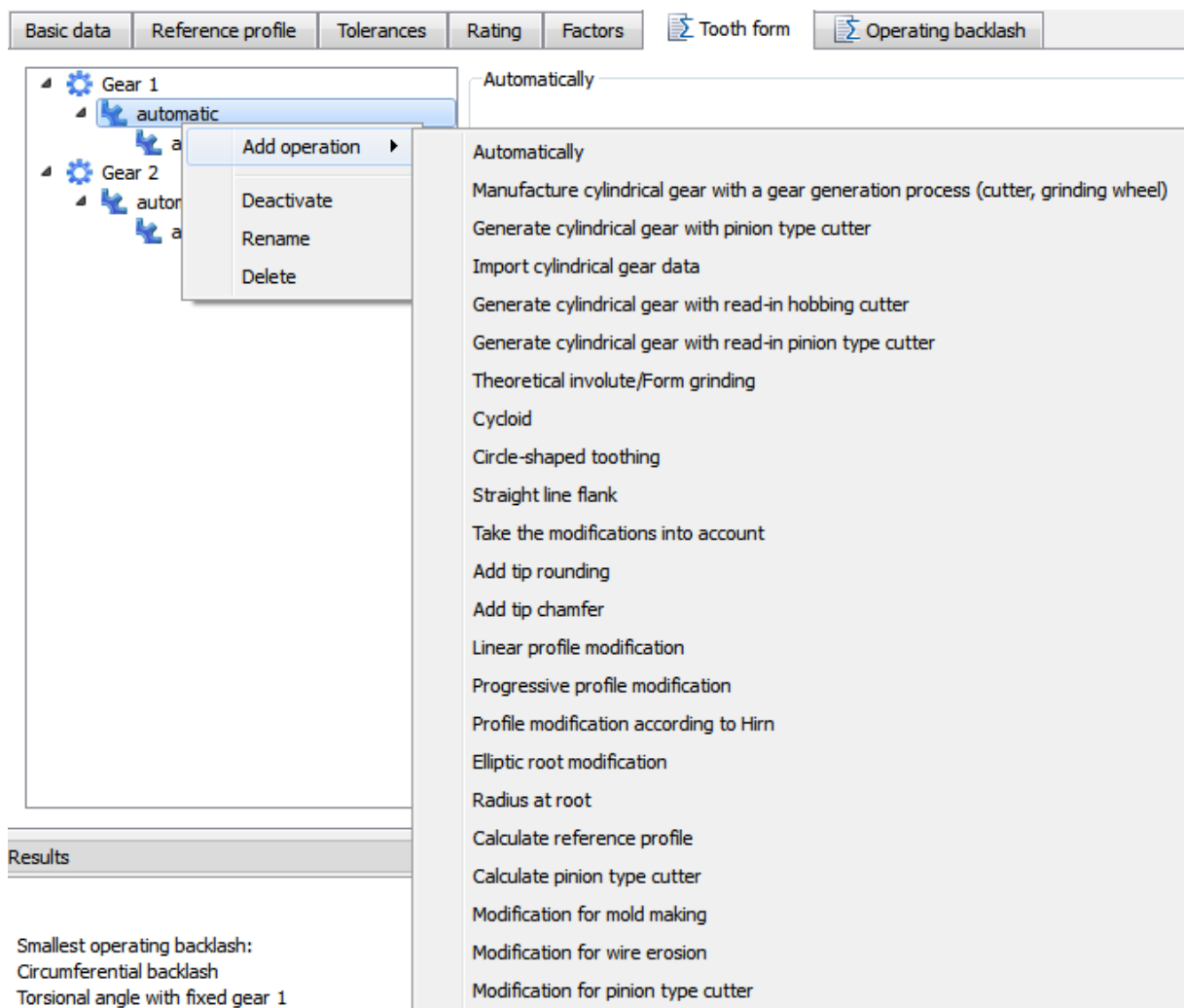


图 42. 模具齿形修形计算

可以输入径向和切向膨胀。齿形结果可以在点击  $\Sigma$  后被计算出来然后显示成"2D"。

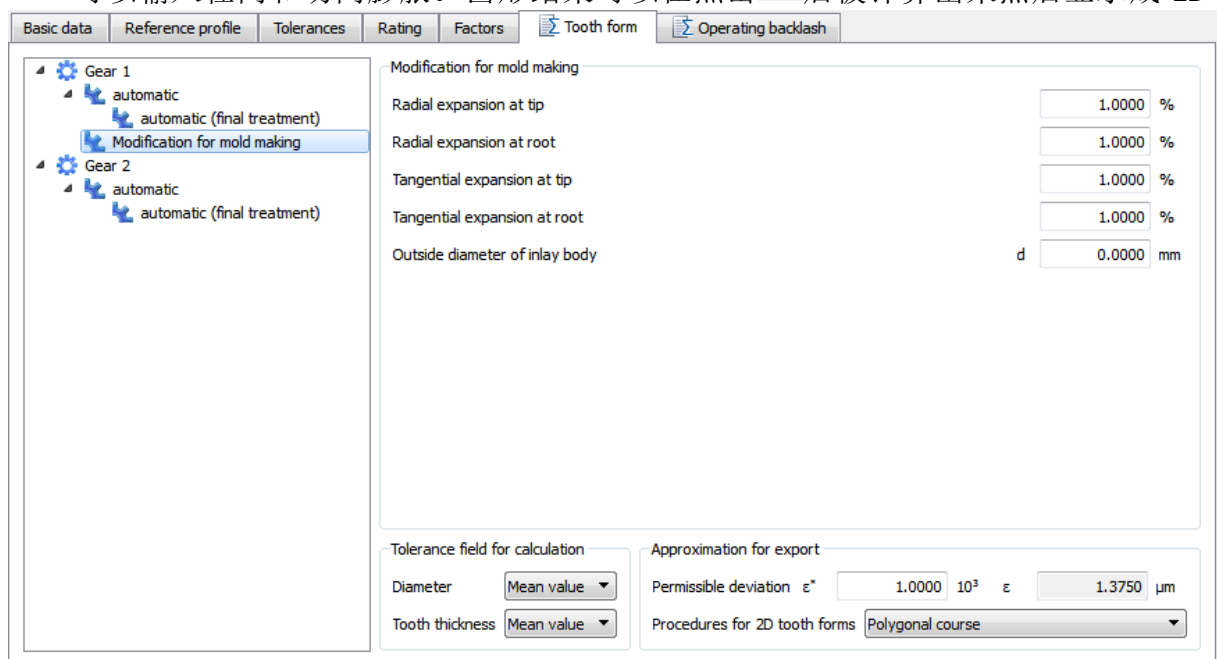
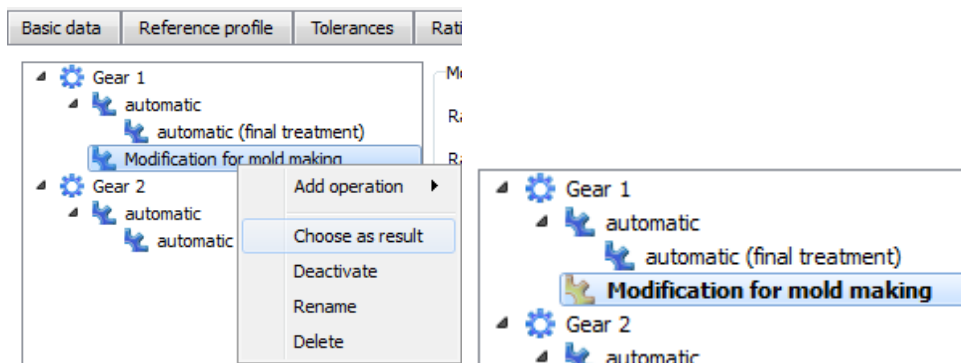


图 43. 调出齿轮副显示

**注意：**在显示修改后齿形前，必须激活"Modification for mold making" ("Choose as result")。



黄色图标是用来做一些显示操作。

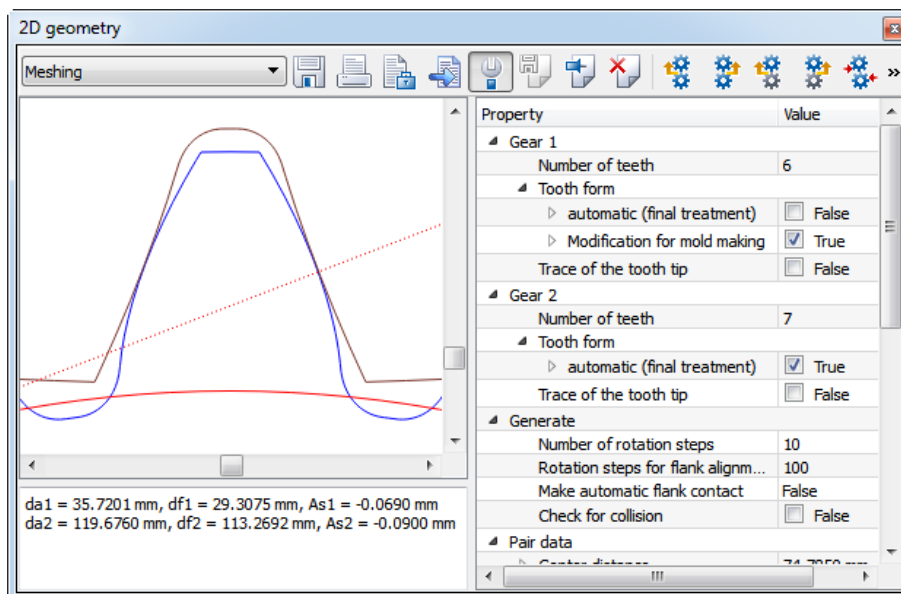
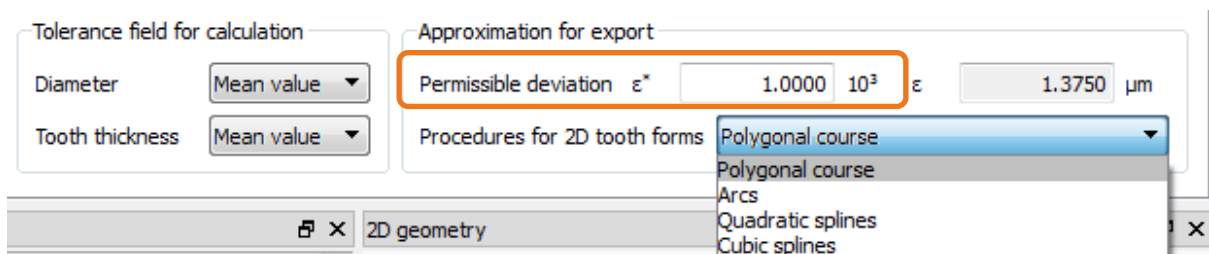


图 44. 显示齿轮，通过预定义的收缩率增厚齿轮。

如果想用这些齿形来加工模具，最好单独把他们输出。在"Permissible deviation"下可以输入一个 $\epsilon^*$ 值指定最大的齿形允许误差和想要的近似值的类型。可以打开"2D geometry"显示窗口，直接显示齿轮 1 和齿轮 2 的齿形。



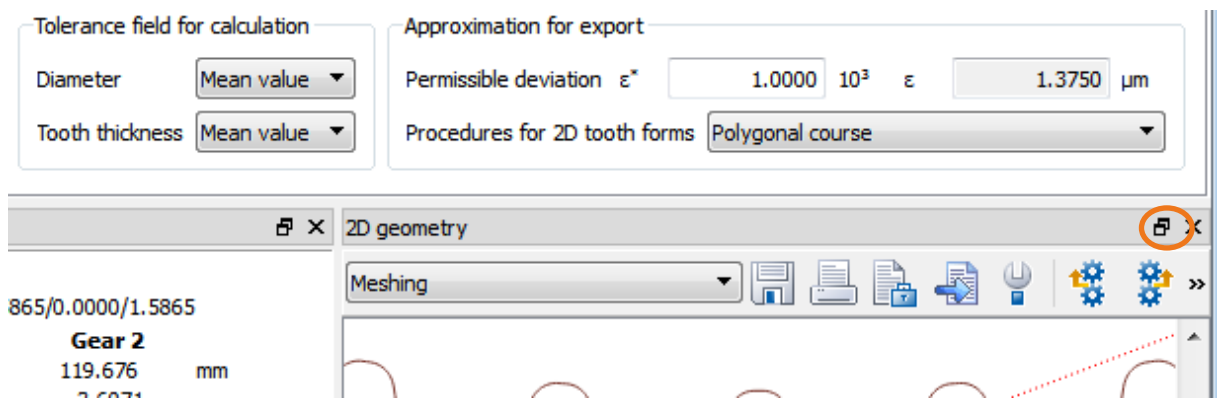


图 45. 允许的误差；打开显示窗口

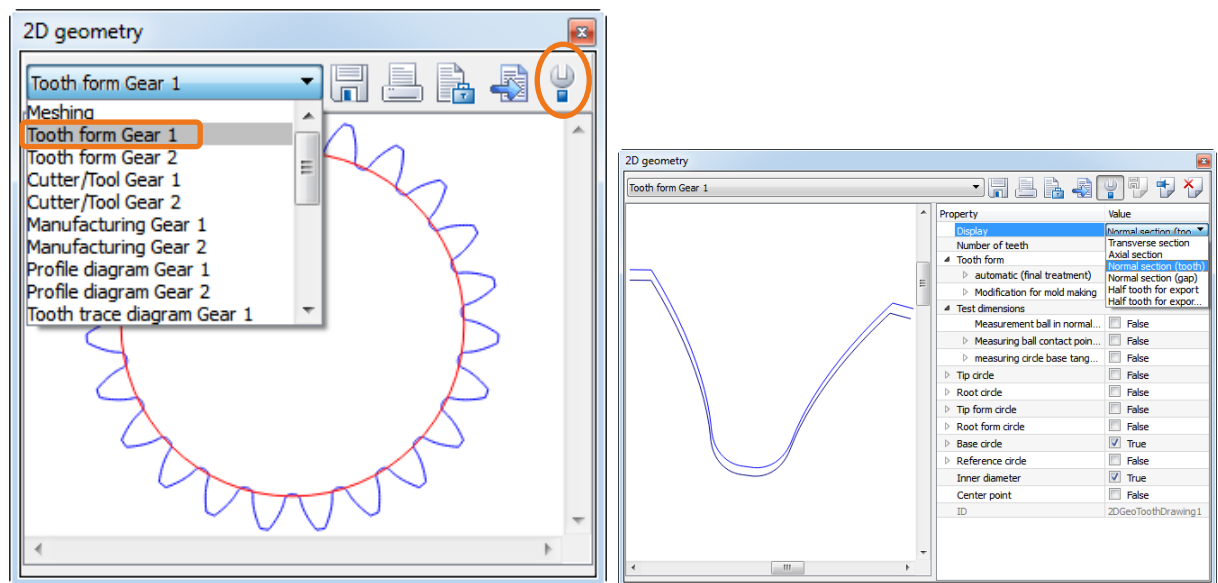


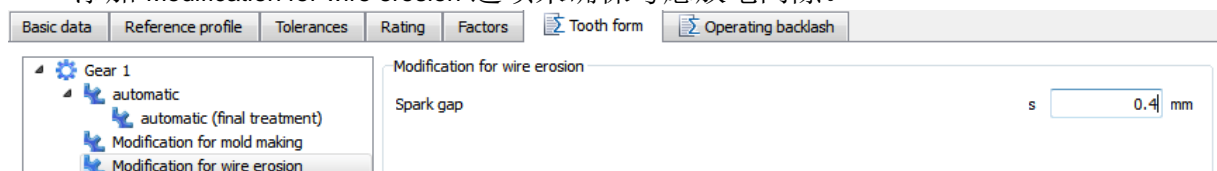
图 46. 打开单个齿轮的齿形显示然后输出 DXF 和 IGES 格式的齿形

检查显示标题很重要：左手边屏幕显示膨胀后的齿形（模具修形后）。右边屏幕可以看到没有修形的齿形时黑色的。可以用这个步骤来显示膨胀后的齿形，如图 46 所示。

### 5.3 显示线切割和放电间隙

另外，当计算注塑模具时，可以在定义线切割时考虑放电间隙。在线切割过程中，放点间隙就是材料和线之间的间隙，可以成型模具。线切割必须必放点间隙小。在用线切割加工齿形时，齿形将相应变瘦。如果模具时用线切割成型，可以用相同的步骤（放电间隙加上线直接）来定义线补偿。

添加"Modification for wire erosion"选项来确保考虑放电间隙。



注意：要显示修改后的齿形，还需要激活"Modification for wire erosion"选项("Choose as result")。

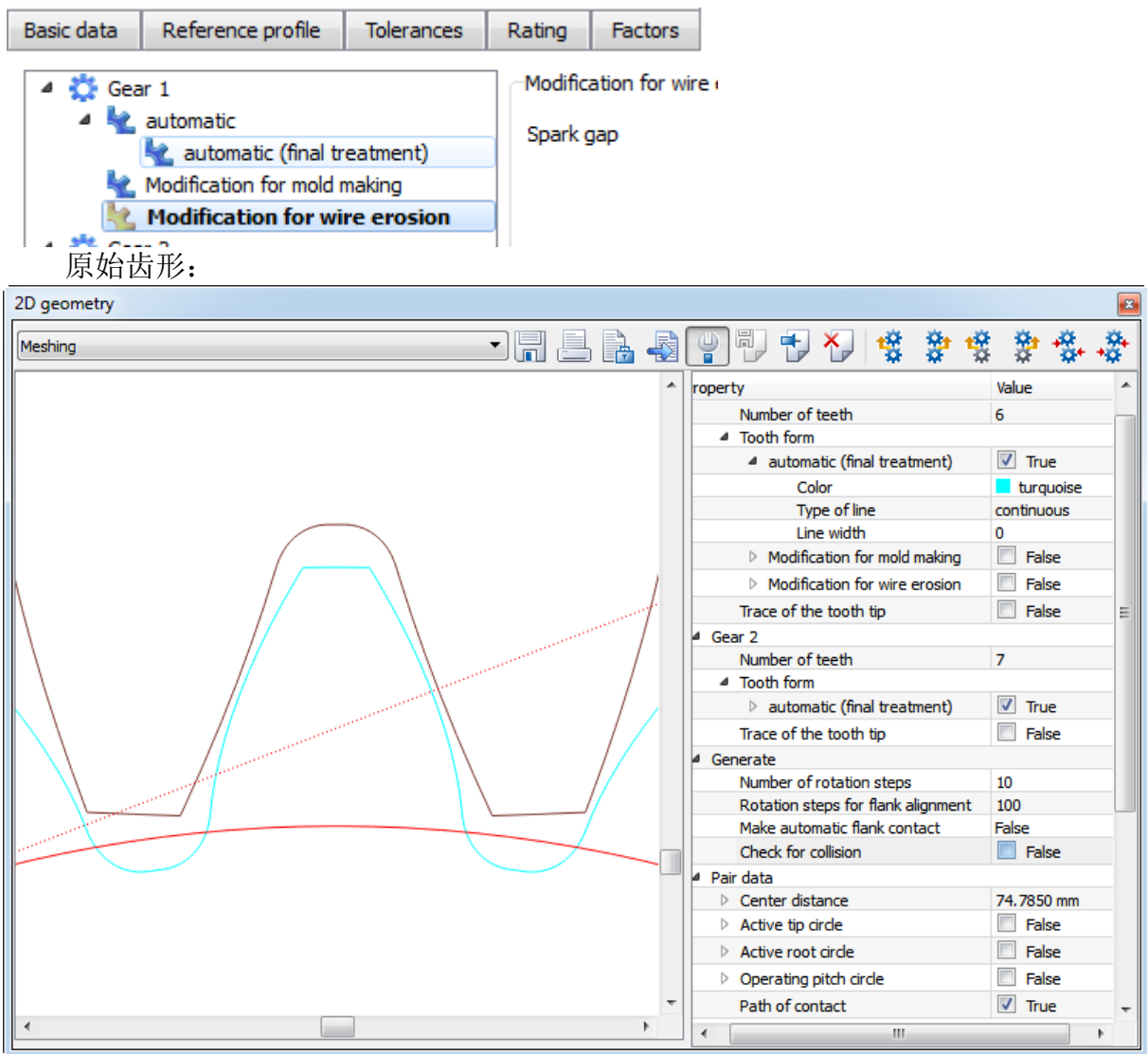
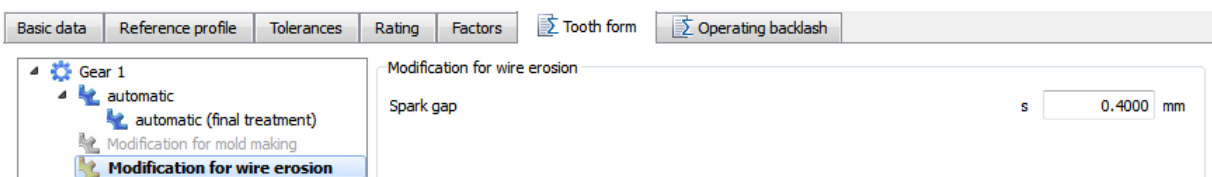


图 47. 没有修形的齿形



如果定义放电间隙值为正值，齿形会放大（补偿放电间隙）。

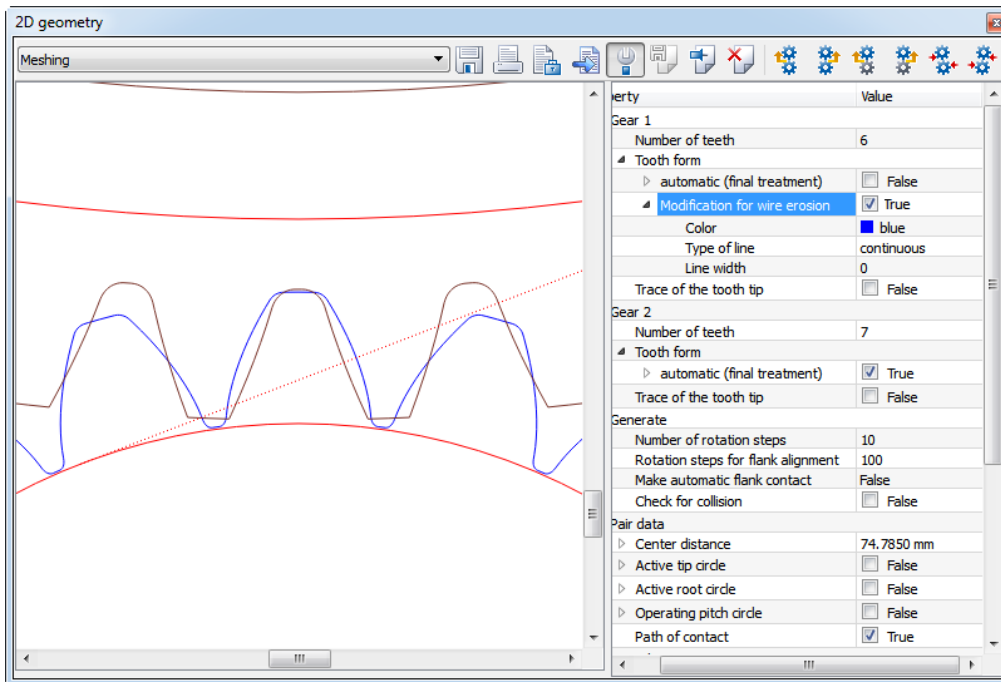
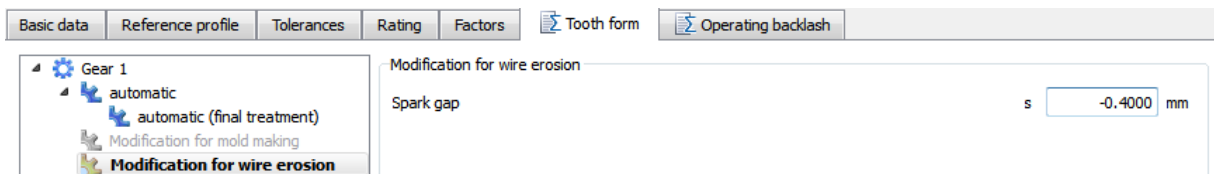


图 48. 带有 0.4mm 放电间隙的齿形



如果放电间隙定义负值，切割的线就像从模具下面通过。

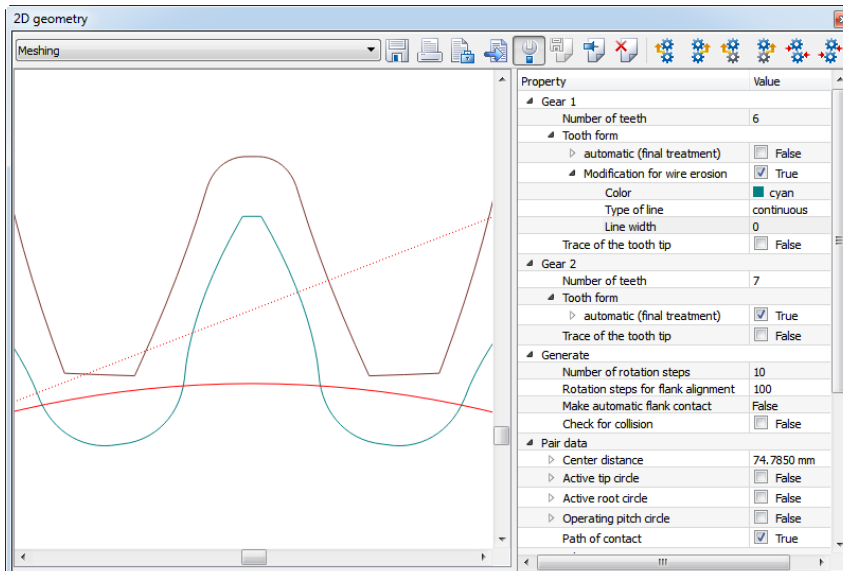


图 49. 带有-0.4mm 放电间隙的齿形



## 5.4 线切割过程中线的直径的检查

如果注塑模具加工是线切割，必须检查使用的线是否合格。要检查这个问题，在" Tooth form"下做下面的步骤。然后再次导入"CylGearPair 5"文件：

在"Modification for wire erosion"中给定负的放电间隙，这个值相当于半个线的直径。然后再次输入一个正直到"Modification for wire erosion"中，也是线直径的一半。然后激活"Choose as result"。在图形显示属性中，所有计算步都选择"True"。

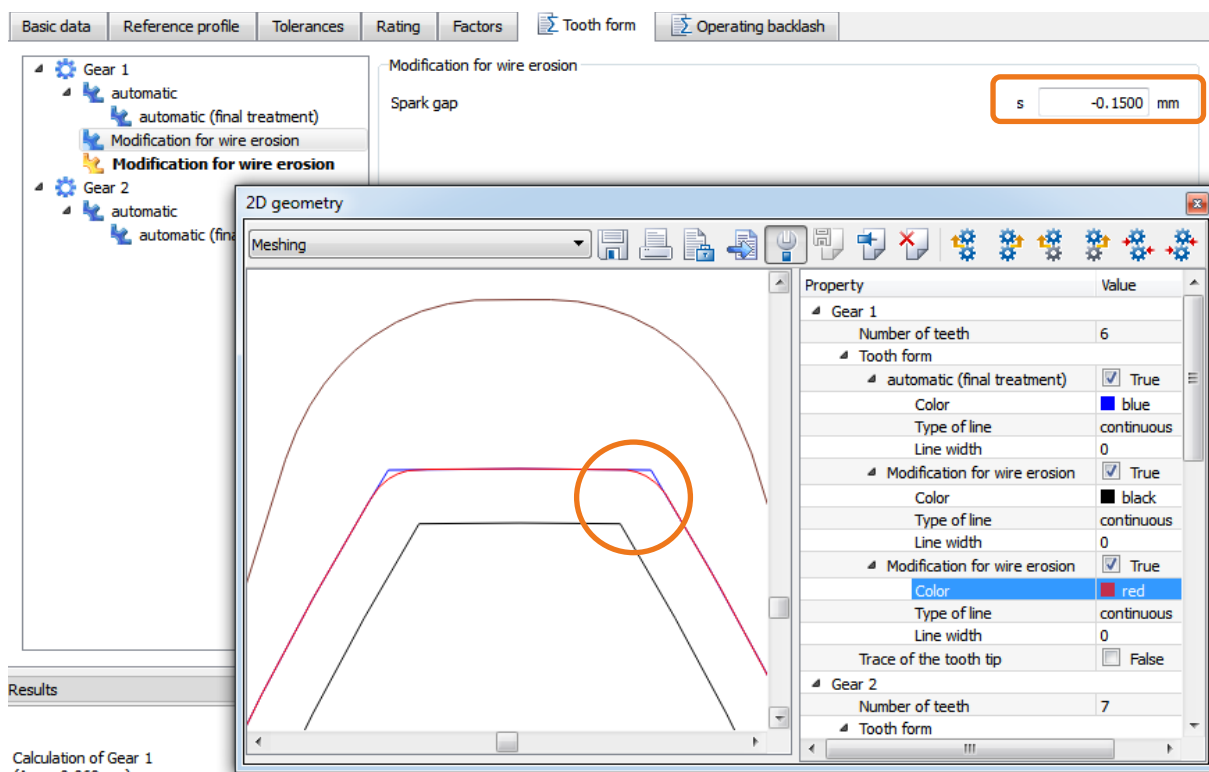


图 50. 输入切割线直径的一半作为放电间隙

可以在几何齿形中看到所有的计算步骤。黑线是切割线中点的轨迹。红线是加工过程的外部轮廓，蓝线是目标轮廓。

## 5.5 计算模具 3D

3D 模型可以通过手动点小磁盘图标生成（和 2D 输出一样）。这个参数可以保存下来。也可以用 Parasolid 或者 STEP 格式保存。

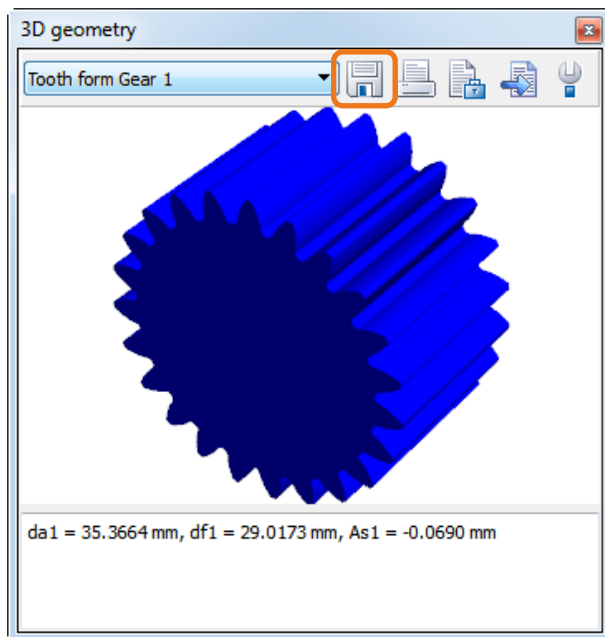


图 51. 几何输出