

# 3D流动求解器中的流动前沿移动

## 要点综述

Autodesk Moldflow 2011 版本新开发了用于3D网格的流动前沿追踪算法，水平集 (Level Set) 算法，替代了以前Autodesk Moldflow Insight 和 Autodesk Moldflow Adviser 产品中耦合3D流动求解器中采用的VOF(Volume of Fluid)算法。水平集算法改进了对称几何体流动前沿预测的对称性，以及预测喷射时流动前沿的平顺度和准确度。在不进行惯性模拟的情况下，该方法比旧版本中所用的VOF方法计算速度更快。当启用“**模拟惯性效应**”选项时，计算时间可能会延长，但流动前沿的预测会更为精准，特别是在发生喷射时。

## 介绍

通过引入水平集的流动前沿追踪算法，Autodesk Moldflow 2011 产品中的耦合3D流动求解器所预测的流动前沿得到了改进，从而避免了产生对称几何上产生不对称流动前沿的情况，改善流动前沿的平滑度，增加喷射预测的精确性。

## 数学模型

水平集流动前沿追踪算法可用以下方程来表示：

$$\frac{\partial F}{\partial t} + u \frac{\partial F}{\partial x} + v \frac{\partial F}{\partial y} + w \frac{\partial F}{\partial z} = 0 \quad [1]$$

其中  $F$  为水平集的距离函数，而  $u,v,w$  分别为  $x,y$  和  $z$  方向的速度分量。水平集函数  $F$  定义为求解区域内任意点到流动前沿的距离。 $F < 0$  指已填充区域内的任意位置， $F > 0$  表示已填充区域外的任意位置，而  $F = 0$  表示流动前沿界面（参考资料 [1] 和 [2]）。

VOF 方法也可以表示为方程 [1]， $F$  则定义为在求解区域内控制体积的填充率。 $F = 0$  指空的子体积， $F = 1$  指已填充满的子体积， $F = 0.5$  指子体积代表自由表面的界面。

## 实际应用

水平集流动前沿追踪算法使用方程 [1] 求解从整个求解区域中的任意位置到流动前沿的距离  $F$ 。这样可以得到更为平滑和精确的表现自由表面。如选择了“**模拟惯性效应**”选项，水平集方法在捕获喷射方面表现更佳。

## 验证

### 流动前沿平滑度及精确度

图 1 中的圆柱状零件用于说明 Autodesk Moldflow Insight 2011 的水平集算法在流动前沿平滑度和精确度方面要优于 Autodesk Moldflow Insight 2010 的VOF方法。该模型凸显了选择“模拟惯性效应”选项时，喷射预测方面的改进。

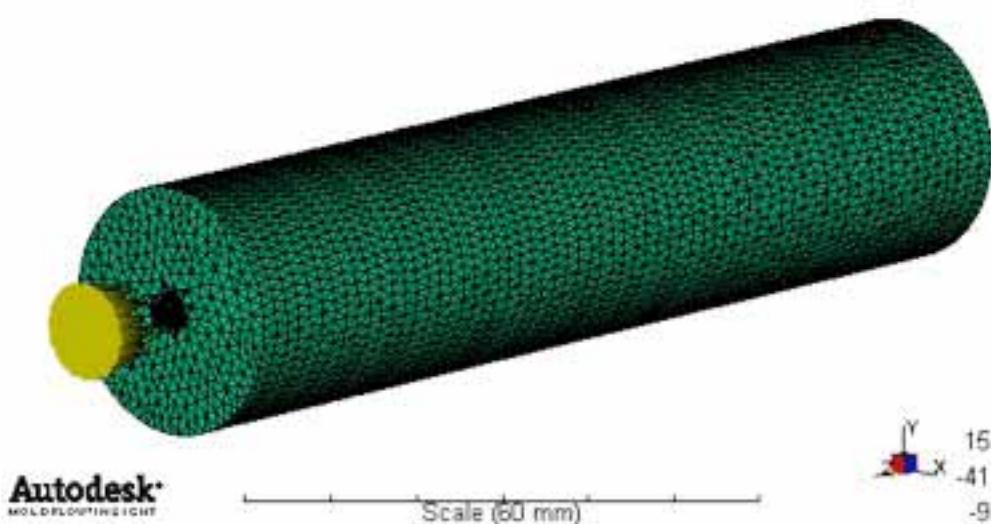


图 1. 用于显示预测的流动前沿平滑度和精确度的柱状零件。

图2 显示了约 0.04、0.1 和 0.3 秒时聚合物填充区域云图的截图，以比较 Autodesk Moldflow Insight 2011 和 Autodesk Moldflow Insight 2010, Release 2 的计算结果。显然 Autodesk Moldflow Insight 2011 捕捉到了喷射现象。在 Autodesk Moldflow Insight 2010, Release 2 中，流动前沿被错误地分解为多个节段。The Autodesk Moldflow Insight 2011 版本在喷射预测方面优于其之前的版本。

观察最后两张即充填时间为 0.3 秒时的流动前沿云图，与 Autodesk Moldflow Insight 2010-R2 中的 VOF 法相比，水平集算法的“聚合物填充区域”云图表现的更为平滑。2011 版本中云图更为平滑是因为水平集算法计算了求解区域中的每个节点与流动前沿的距离并且当距离为 0 时的内插等值线，然后再绘制出流动前沿的界面位置。而旧版 VOF 方法仅通过简单填充/未填充内插来表现流动前沿的界面，因此比较粗糙。

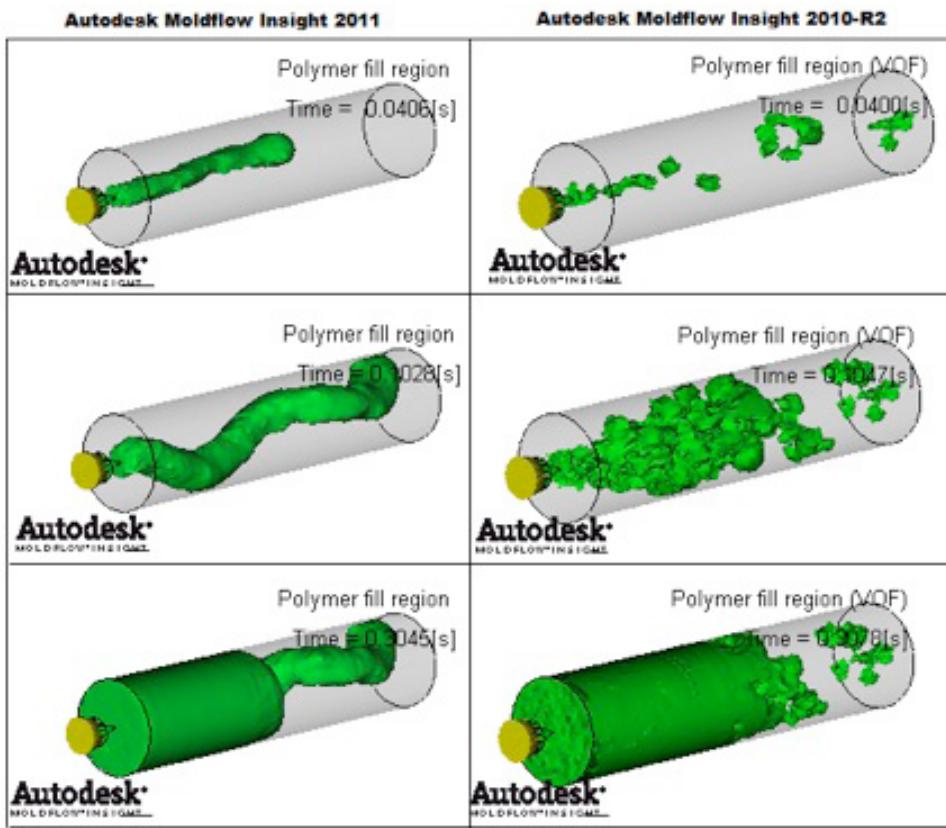


图 2. 聚合物填充区域云图比较

总体而言，如果选择“模拟惯性效应”选项，Autodesk Moldflow Insight 2011 的运行速度较之 Autodesk Moldflow Insight 2010, Release 2 慢。当然，对于本例，2011 版要比其之前的版本运行速度快（请参阅表 1）。在 Autodesk Moldflow Insight 2010, Release 2 中，基于 VOF 算法的分析早期应可预测到喷射，但实际上流动前沿被分割成数个小的区域。流动前沿的分割导致求解器采用极小的时间步长，从而延长了 Autodesk Moldflow Insight 2010, Release 2 的解算时间。总体上说，只要选择了“模拟惯性效应”选项且发生喷射，Autodesk Moldflow Insight 2011 应比 Autodesk Moldflow Insight 2010, Release 2 运行更快。当然，如果未发生喷射，预计 Autodesk Moldflow Insight 2010, Release 2 运行将会更快。

### 流动前沿对称性

为显示 Autodesk Moldflow Insight 2011 在对称零件的流动模式的对称性的预测方面的表现更为出色，我们使用了图3 所示的模型。该模型为对称的多型腔模具，由两个完全对称的长 700mm、厚 3 mm 的半环形管组成，两个半环形管的顶端应同时被填满。基于该零件的几何形状，喷射发生的几率极小。因此，在分析中不选择“模拟惯性效应”选项。

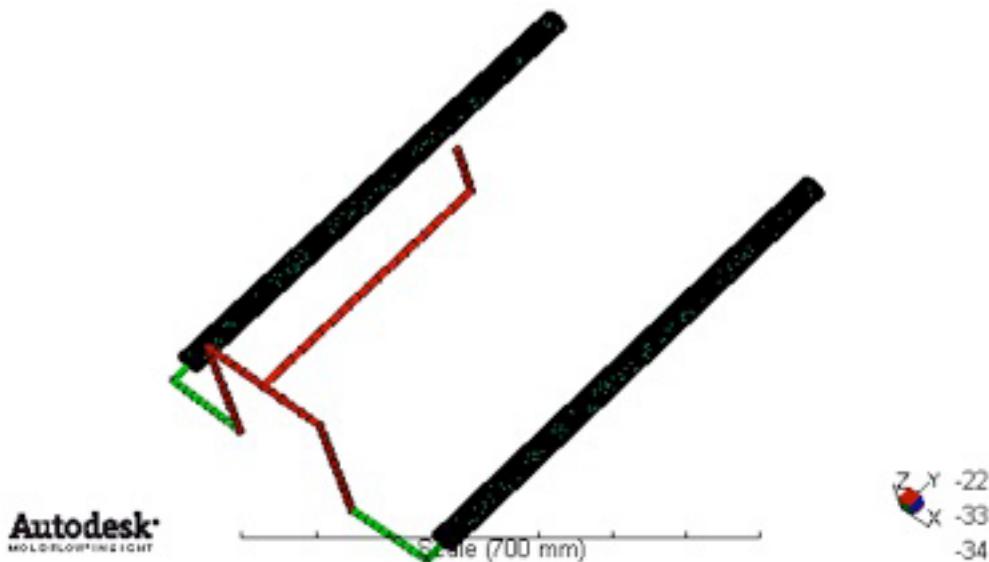


图3. 半管的对称模型。

图4和图5对Autodesk Moldflow Insight 2011和Autodesk Moldflow Insight 2010, Release 2在1.38秒预测的“聚合物填充区域”结果进行了直接比较。左上图所示为左侧管的局部放大图，右上图为右侧管的局部放大图，下方的图则显示两管与流道系统的关系。

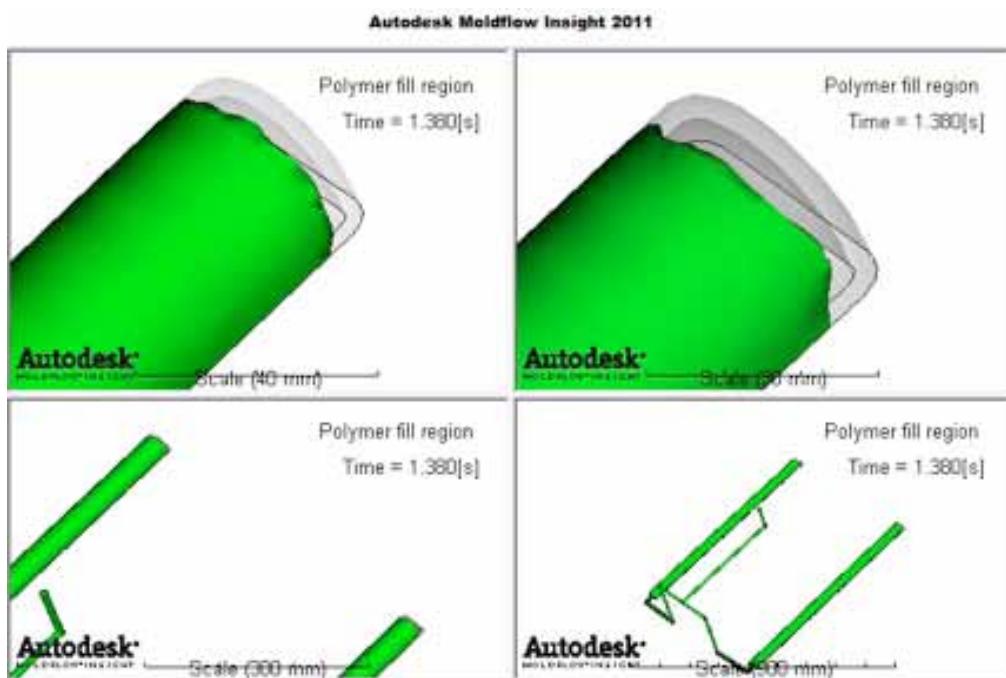
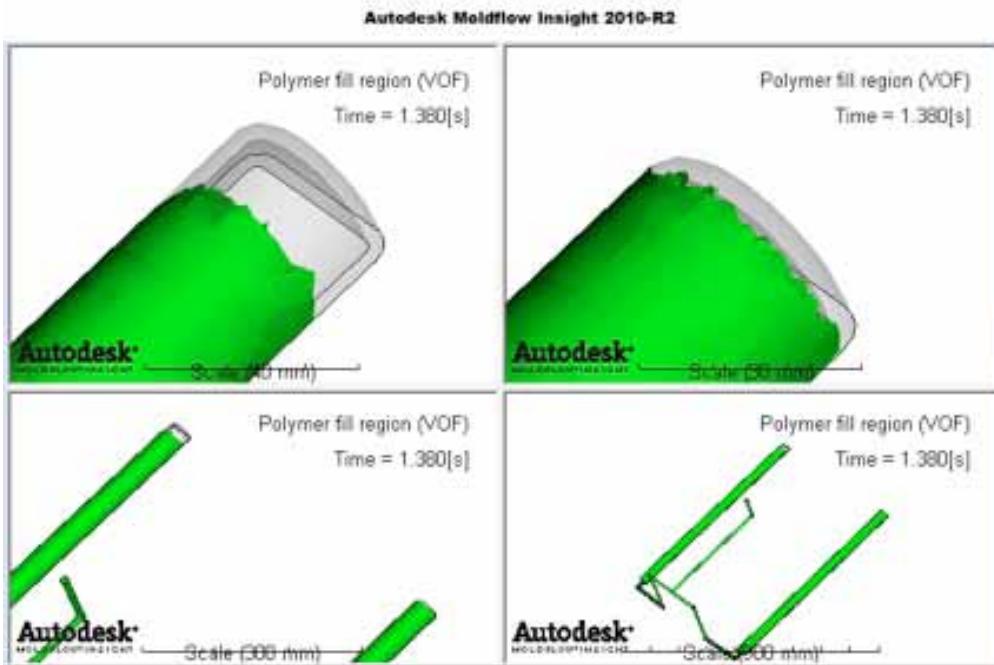


图4. Autodesk Moldflow Insight 2011中的对称聚合物填充云图。

Autodesk Moldflow Insight 2011的“聚合物填充区域”结果（图4）显示水平集方法正确预测了每个管具有相似的流动模式及流动前沿的位置。对应的Autodesk Moldflow Insight 2010, Release 2云图（图5）显示右侧管先于左侧管被填充（这是错误的）。



**图 5. Autodesk Moldflow Insight 2010, Release 2 中的非对称性聚合物填充云图。**

### 三维流体解算速度

请注意，在对前文所述（图3、4和5）的半环形管模型进行对称性测试时，未启用惯性模拟。表1显示，在选择“模拟惯性效应”选项时，Autodesk Moldflow Insight 2011的水平集方法比其之前版本所用的VOF方法运行速度快10%以上。尽管Autodesk Moldflow Insight 2011添加了新的凹痕和熔接线计算等其他CPU密集型功能，但其整体运行速度还是提高了。但是，Autodesk Moldflow Insight 2011在运行对称模型分析时，启用“模拟惯性效应”选项比未启用该选项耗时多三倍。Autodesk Moldflow Insight 2011中出现的因启用“惯性模拟”而导致的计算减速现象比之前的旧版本明显。然而，2011版本结果的精度却提高很多，尤其是在喷射预测方面（图2）。

**表 1. 启用及未启用“惯性模拟”时，圆柱模型及对称模型所需计算时间。**

	Autodesk Moldflow Insight 2010, Release 2	Autodesk Moldflow Insight 2011
圆柱形零件（启用“惯性模拟”）	6281.96秒 *	1296.94秒
圆柱形零件（未启用“惯性模拟”）	228.1秒	339.3秒
对称零件（启用“惯性模拟”）	634.38秒	1667.63秒
对称零件（未启用“惯性模拟”）	595.84秒	526.25秒

\*该分析的流动前沿结果不正确。因此所耗费的时间不能作为典型案例的代表。

## 结论

Autodesk Moldflow Insight 2011 改进了 Autodesk Moldflow Insight 和 Autodesk Moldflow Adviser 产品中的3D耦合流动求解器的喷射预测、对称性预测以及流动前沿的预测。这是通过引入水平集流动前沿追踪算法实现的。水平集流动前沿追踪算法取代了旧版中的VOF 流动前沿追踪算法。在选择了“模拟惯性效应”选项的分析中，水平集方法显著提高了结果的精度，但延长了计算时间。

## 参考资料

1. Adalsteinsson, D., & Sethian, J. A., A fast level set method for propagating interfaces, *Jour. Comp. Phys.*, Vol. 118, pp. 269-277, 1995.
2. Osher, S., & Sethian, J. A., «Fronts propagating with curvature dependent speed:Algorithms based on Hamilton-Jacobi formulation», *Jour. Comp. Phys.*, Vol 79, pp. 12-49, 1988.



欧特克软件(中国)有限公司  
100004  
北京市建国门外大街1号  
国贸大厦2座2911-2918室  
Tel: 86-10-65056848  
Fax: 86-10-65056865

欧特克软件(中国)有限公司  
上海分公司  
200122  
上海市浦东新区浦电路399号  
Tel: 86-21-38653333  
Fax: 86-21-68767363

欧特克软件(中国)有限公司  
广州分公司  
510613  
广州市天河区天河北路233号  
中信广场办公楼7403室  
Tel: 86-20-83936609  
Fax: 86-20-38773200

欧特克软件(中国)有限公司  
成都分公司  
610021  
成都市滨江东路9号  
香格里拉中心办公楼1507-1508室  
Tel: 86-28-84459800  
Fax: 86-28-86203370

欧特克软件(中国)有限公司  
武汉分公司  
430015  
武汉市汉口建设大道700号  
武汉香格里拉大酒店439室  
Tel: 86-27-87322577  
Fax: 86-27-87322891

欧特克中国研究院  
200233  
上海市古美路1515号  
19号楼21层  
Tel: 86-21-54452525  
Fax: 86-21-54452130

7月9日修改。

© 2010 Autodesk, Inc. 保留所有权利。

除非经Autodesk, Inc.允许，否则任何人不得出于任何目的、以任何形式、采用任何方法对本出版物或其任何部分进行复制。

商标

Autodesk和Moldflow是Autodesk公司在美国和/或其它国家（地区）的注册商标或商标。其它所有品牌名称、产品名称或商标均属于各自持有者。

免责声明

本文以及所含信息均由AUTODESK, INC.以概不保证的形式提供。AUTODESK, INC.不提供任何明确或暗示的保证，包括但不限于暗示这些材料适合销售或用于其它用途。