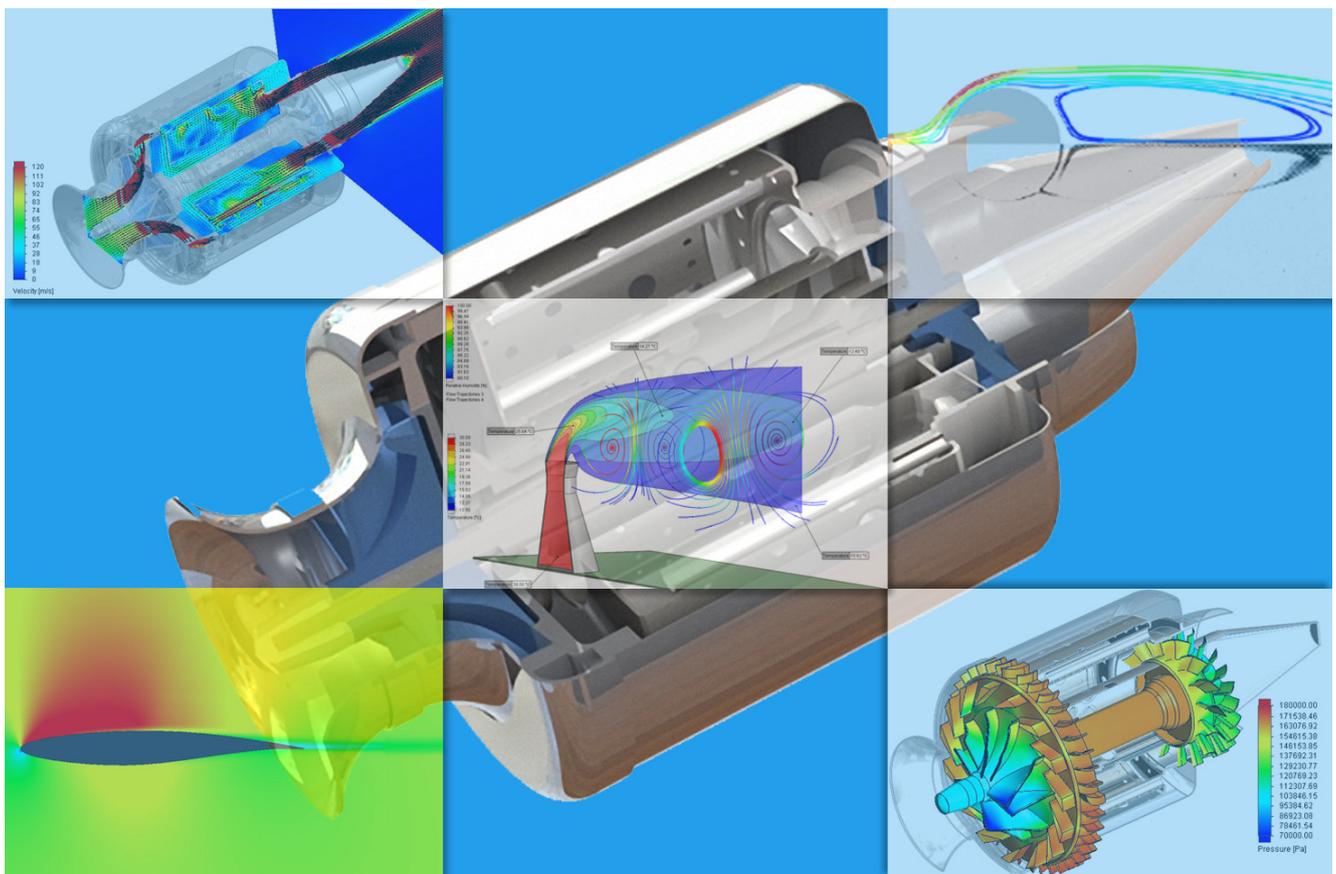


现代 CAD 嵌入式 CFD 软件的确认方法： 从基础测试到行业基准

白皮书



2014 年 2 月

作者：

A.V. Ivanov 博士
T.V. Trebunskikh
V.V. Platonovich
Mentor Graphics
Corporation, 俄罗斯

A.V. Ivanov 博士,
QA 测试经理

主题

对结果充满信心：验证和确认；基准和测例

摘要

SOLIDWORKS Flow Simulation 是一款完全嵌入机械设计环境的新型 CFD（计算流体力学）分析软件（称为并行 CFD），适用于所有通用工程应用。

与所有创新技术类似，SOLIDWORKS Flow Simulation 的验证和确认 (V&V) 也备受关注。由于并行 CFD 软件的终端用户是专业工程师，因此对软件的计算准确度、可靠性、健壮性以及可用性有严格要求。

确认的目的是为用户提供关于软件功能及其正确模拟流体流动和热传导过程中主要物理现象的能力的综合性信息，这些物理现象按设计和在原位出现在设备中（如在流程化工厂中）。

本白皮书将描述在浸润边界 CAD 嵌入式 CFD 软件的 V&V 中所使用的方法，该方法涉及四个不同级别的测试。第一级涉及关于几何体和问题公式的非常简单的基础测试，这些测试用于验证基本物理定律和算法的正确性。第二级将通过多组测试来证实该产品或物理模型的特定功能的工作情况（如共轭热传导、气穴和冷凝等）。第三级包括应用的行业问题和基准，在这一级会考虑对具有复杂几何体的特殊设备进行软件确认（如旋风分离器、热交换器、引擎、鼓风机和泵等）。最后一级集成了来自某个特定行业（如航空航天与国防、电子、HVAC、流程工业等）的确认测试和基准以作为认证和鉴定的前提条件。通常而言，这些级别内的测例分类取决于几何和流体复杂度、参考数据的可用性及其准确性等等。对于每一级，本白皮书都提供一些 SOLIDWORKS Flow Simulation 的确认测例。

第一和第二级的测例随附在该软件中，包括 CAD 几何体加上网格化和求解问题所需的边界条件和其他数值设置，因此用户可在其电脑上重复确认这些测例，并将其用于增强软件提供的教程范例。

关键词

确认、验证、基准、测试、SOLIDWORKS Flow Simulation、CFD、CAD 嵌入式、工程

1. 引言

如今，没有计算机辅助工程（CAE）软件的帮助，不可能再生产出具有竞争力的高质量产品。近年来，我们观察到在 CAE 中 CFD 计算的地位在不断增长。

通过将 CAE 系统（尤其是 CFD）直接插入到产品设计流程中可以使其获得最大效率，不仅专用部门，而且直接参与设计的机械工程师都可以使用 CAE/CFD，尤其是在早期设计中提前使用，即并行设计 CFD（并行 CFD）。此流程最初用于航天、汽车、电子产品和其他高科技行业，现在实际上涵盖了所有工程领域。

浸润边界 CAD 嵌入式 CFD 软件 SOLIDWORKS Flow Simulation 代表着一类新型的 CFD 分析软件，最初是作为产品生命周期管理（PLM）理念的一个组成部分，供机械工程师在设计流程中使用。开发这一类的 CFD 软件需要回答下列问题：机械设计工程师作为 CFD 用户的具体特性是什么？

1. 将 3D CAD 系统用作一种主要的设计工具。现在 3D 产品模型数据已成为所有虚拟原型和物理仿真的基础和起点。因此，通常用户不想将几何体转换成其他格式以随后在传统的 CFD 工作流程中使用。而且，在特定情形中，通常对非常复杂的几何装配体而言，不能保证这些转换的充分性。
2. 缺少 CFD 背景以及数值算法的理论基础。
3. 需要运行多个几何变型的优化计算，而非单个概念计算。在大多数情况下，用户需要的是从不卡壳的健壮工具，而不是更为精准的激光器。
4. CFD 计算不是用户的首要工作职能。这些是辅助任务，因此一个用户可能只是偶尔进行计算，但之后可能密集使用一段时间。而且，这些计算应尽可能快地完成，通常可用的计算资源是有限的。

当然，工程师所从事的特定行业不同，上述每一个特性的重要性也不同。然而，应考虑所有的特性以使 CFD 工具更划算，并更适合于让普通专业工程师作为目标用户角色。对于所有普通工程应用，SOLIDWORKS Flow Simulation 通过完全嵌入 SOLIDWORKS 机械设计环境中，实现了此效果。

SOLIDWORKS Flow Simulation 的基本设计理念是自动准备、执行和可视化针对真实应用工程问题的 CFD 预测。为实现此效果，SOLIDWORKS Flow Simulation 具有一些特定功能，包括：与 SOLIDWORKS 3D CAD 系统完全集成；完全自动的网格生成；求解控制参数的自动规定；用户友好的前处理和后处理；能够执行参数算例并对比不同设计变型的分析结果等。该软件无需调整与基础算法关联的任何数值参数或从十个（或更多）物理模型或数值格式中选择其一。必须注意初始数据（边界和初始条件）指定、执行计算和结果分析（包括可视化和报告生成）都发生在 SOLIDWORKS 之内，结果直接显示在 CAD 模型上或模型周围。计算结果以 MS Office 格式导出，也可以导入到 SOLIDWORKS Simulation 中进行结构分析。

与面向高级 CFD 专家的传统 CFD 软件相比，SOLIDWORKS Flow Simulation 的设计目的是供具有不同兴趣的工程师使用，解决工业产品设计和流程优化中固有的日常性问题。通常，该软件培训期约为两个工作日。在延长休息时间的情况下，用户可轻松熟悉软件。可在一个工作日的课程中执行从初始数据处理到结果分析的整个仿真。

SOLIDWORKS Flow Simulation 技术与传统的 CFD 方法具有明显的不同，它使用了众多的工程技术和方法，帮助用户以较低的计算成本和时间成本获取可靠的预测。这些组合的可能性使得工程师可以加快解决其日常问题，但是为了实现这些工程方法的自动化，对软件的可靠性、健壮性和准确性提出了非常高的要求。从一开始，这个挑战就一直是 SOLIDWORKS Flow Simulation 验证和确认 (V&V) 程序的推动力，使用了大量的解析解和基准解，以及出版物和数据库中的实验结果（例如，Freitas, 1995；Fluid Dynamics Databases, 2002）。在关于 SOLIDWORKS Flow Simulation V&V 方法和分类框架的当前工作中讨论了一些结果。本白皮书不涉及具体技术细节。

2. 确认方法

首先，应讨论软件验证和确认之间的主要区别。按照 Roache (1998)，我们将“验证”简明地描述为“正确地求解方程式”，将“确认”简明地描述为“求解正确的方程式”。区别验证和确认的另一种方法是遵循数学与科学的经典差异。数学是一种科学工具，通常在科学的语言中占据重要地位。但数学自行存在。验证是数学数值分析中一项极为重要的活动。确认是科学和工程科学（如物理、流体动力学、化学等）中一项极为重要的活动。

大多数作者（如 Roache, 1998）强烈认为对软件（或计算）的验证应先于对实验数据的任何对比，即验证优先，确认次之。对于浸润边界 CAD 嵌入式 CFD 软件 SOLIDWORKS Flow Simulation，有必要对此言论进行一番评论。

软件验证应用到多种方法。这些是 Richardson 推断（适用时），在相同的网格上使用高阶和低阶方法进行计算，使用精细或粗糙的网格进行直接重复计算。后一种方法还被称为网格依赖测试，非常普遍用于商业 CFD 软件研发和测试。但需要牢记，只有在测试中满足以下所有的要求才能实现严格意义上的验证：

- 在每个计算单元中，求解相同的方程式，并使用相同的工程技术和模型（包括子网格比例模型）；
- 对于调查的网格要保留所有零部件的几何体；
- 计算域中的网格拓扑是相同的；
- 在每个计算单元中所有逼近方程式的阶数和类型是相同的。

如上所述，SOLIDWORKS Flow Simulation 使用了许多工程技术和方法。因此，满足第一个要求并不能确保解决实际工程问题，因为随着网格变得精细或粗糙，系统会自动使用不同的工程技术或技术组合。所以对于单独的软件验证活动，仅可接受相对简单的例子。对于其余的例子，实际上不可能将验证和确认分离开。这是因为网格依赖研究将显示该软件的整体准确性，并不仅仅是数值算法的正确性。

我们赞同 Melnik et al. (1995)，对于以项目为导向的工程师（当然也包括他们使用的软件）而言，软件验证和确认活动几乎构成一个统一体，并且这些术语通常一起使用，用于指代这一类活动，甚至作为此流程的简称。计划和从事任何 SOLIDWORKS Flow Simulation 确认活动时，必须考虑该重要因素。

另一点源于工程技巧和方法的使用，与传统的 CFD 软件相比，SOLIDWORKS Flow Simulation 计算在较为粗糙的网格上达到可接受的准确性，这一点为大多数测例和实际工程问题的网格依赖测试结果所确认。因此，用户可使用适中的计算资源解决非常复杂的 3D 流体流动和热传导问题。

现在，让我们考虑软件确认。确认是确定一个软件、模型、仿真或模型与仿真组合、及其相关数据（从目的应用的角度而言）准确表示真实世界的程度的过程（Missile Defense Agency, 2008）。换句话说，在软件中获得的方程式解和用户感兴趣的物理问题有什么关系？

当然，对工程师和科学家而言，确认至关重要。软件确认可归结为软件预测结果与物理实验、经验关联式及解析解之间（直接或间接）的对比。对比可分为直接对比和间接对比。在一个先前已经确认过的软件被当作基准时，将会发生间接对比。

此时需要注意的是关于实验数据质量的绝对确定性鲜有发生。在诸多实验中，均不能信心十足地确定误差等级。当今主流的观点（Roache, 1998）是：对于专门为 CFD 软件确认而设计的高质量实验，存在着持续的需求。搜集这些实验数据的来源，其分析和准确性估算也成为软件确认活动的一部分。

要更靠近我们当前的并行 CFD 主题，您可规划旨在为用户提供关于软件功能及其正确仿真流体和热传导流程等主要物理现象能力的综合性信息的确认，以准确地模拟在设备操作中出现的主要物理现象。

有许多确认测例的分类，并且有多种验证和确认方法已被分析过，如 Roache (1998)；Stern et al. (1999)；Oberkampf 和 Trucano (2002)。

一种方法是根据软件模拟某类物理现象（自然对流、可压缩流等）的能力进行分类。另一种方法是根据软件可能被用于的特定技术区域和应用领域（电力和能源、旋转机械等）进行分类。第三种方法是两级（或两类）分类，其中基准和确认测例分为两类——基础测试和应用行业问题。每一类都有其自身的优点和缺点，但这两类相互补充，并且多年来构成 SOLIDWORKS Flow Simulation 软件的 V&V 程序（Balakin et al. 2004）。第四种方法是将两级分类扩展到多级分类。当前在我们的 SOLIDWORKS Flow Simulation V&V 程序中使用的是这种方法（四级分类），下面我们将详述这种方法。

第一级，如在 Balakin et al. (2004) 中，包括对几何体（通常为 2D）和问题公式来说非常简单的基础（学术）测试。

如上所述，SOLIDWORKS Flow Simulation 的技术使用了大量的工程技术和方法。首先，这些技术和方法涉及壁效应仿真（摩擦和热传导）。其中有些技术是独特的，同时，大多数技术不为熟悉传统 CFD 技术的用户所知。这就是在 SOLIDWORKS Flow Simulation 的确认库中存在一组相当综合的基础测试和例子的原因。这些测例是关于基础物理法则和现象（平板上、管道内、通道内和散热片内等的流动和对流热传导）的检查和证实，以及验证算法的正确性。

这些测试成本低，使其可在最大范围内采用实验、数值、解析方法针对各种热和流体条件进行参数研究。而且，这些基础测试多种多样，允许同一个配置可以耦合或分离方式被用于研究不同的物理效应。

第二级是多组测试，以证实该软件的复杂功能或特定物理模型是否运行良好（如耦合热传导、气穴、冷凝等）。

第三级包括行业问题和基准，除了复杂的 3D 几何体，还包括不同的强耦合物理现象组合。此外，在此情况下，需要设备部件材料属性的精确值以及工况，因此实验不确定性的级别更高。在此级别中，会考虑特殊设备的软件确认（旋风分离器、热交换器、引擎、鼓风机和泵等）。

最后一级将确认测试和特定行业（航天和国防、电子产品、HVAC、流程工业）基准集成在一起。一些作者（例如 Melnik et al., 1995）将此级别与软件认证甚至软件鉴定等活动相关联。细微差别是软件认证和鉴定通常是工程管理的一部分。这些似乎仅仅是一些授权过程（或许合法或合规），正式声称某个软件适合于特定行业或项目（Roache, 1998）。

当然，这些级别的边界通常比较模糊，根据行业应用，可在多个级别中找到相同的确认测例。通常而言，这些级别内的情况分类取决于测例的复杂度、参考数据的可用性及其准确性等。随着几何和流体复杂度的增加，观察到实验数据可用性降低和准确性减小的趋势。

当前 SOLIDWORKS Flow Simulation 采用的 V&V 程序如图 1 所示。该图表是层次结构，看起来像倒金字塔，每一级基于上一级。

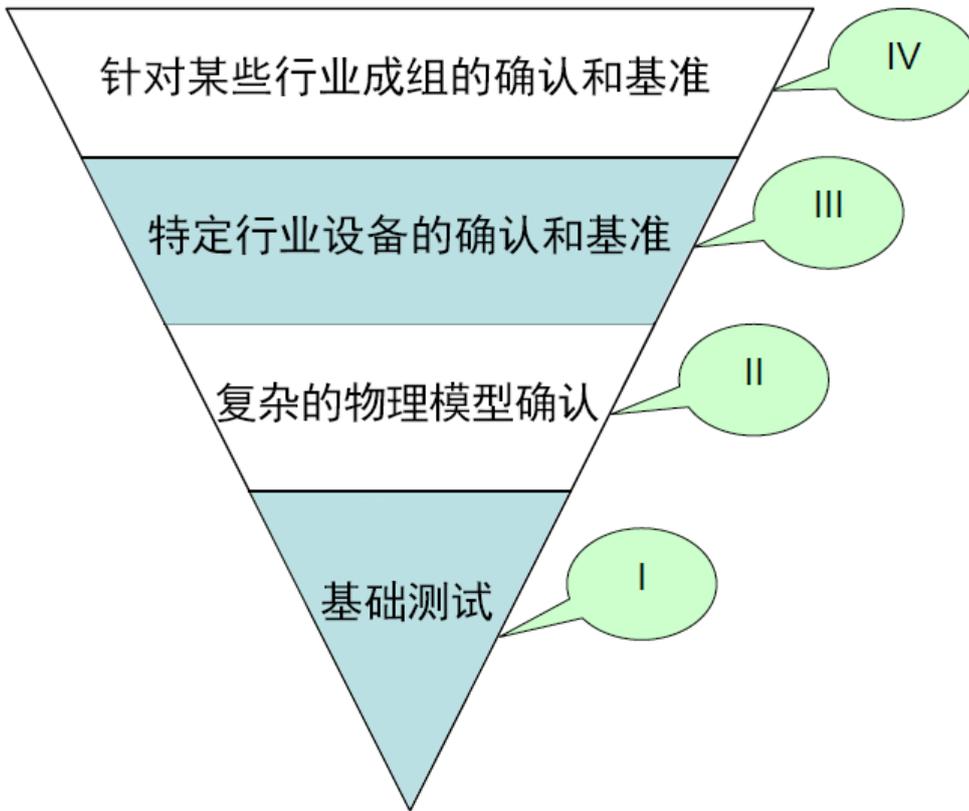


图 1 : SOLIDWORKS Flow Simulation 验证和确认中所用的四个层级。

SOLIDWORKS Flow Simulation 是一个通用工具，已成功应用于诸多行业。因此，我们实际上有多个如图 1 所示的金字塔。这就是为什么将此金字塔聚合在类似于地球内部结构的 3D 视图中会更加便于表达的原因（图 2）。

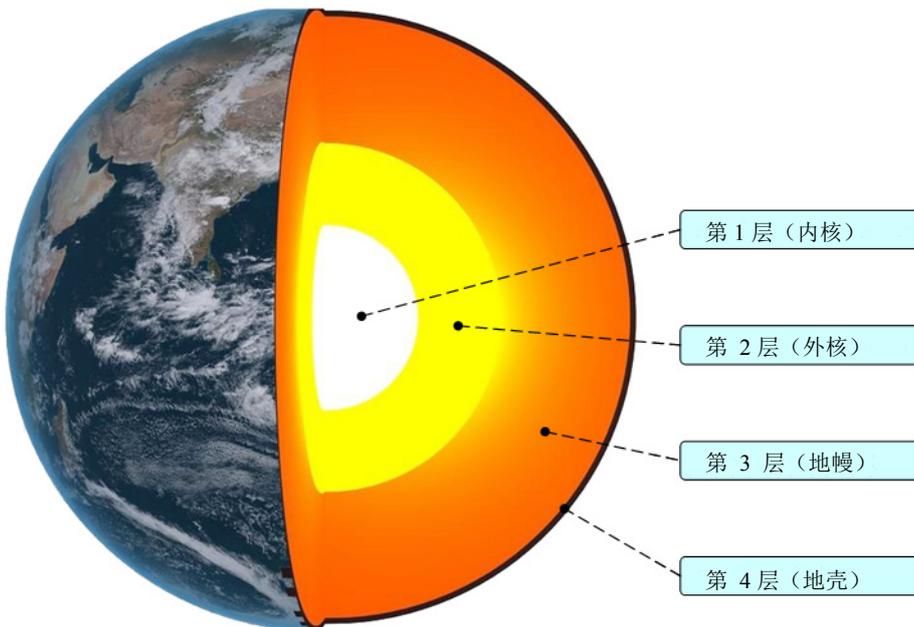


图 2 : 类似于“地球内部结构”的 SOLIDWORKS Flow Simulation 软件确认的 3D 视图。

和地球一样，SOLIDWORKS Flow Simulation 也具有一个由基础确认与测试构成的稳定内核。放置在表面上的特定行业类似于地球表面的大陆。与地球不同的是，SOLIDWORKS Flow Simulation 具有更多的动态结构。随着 SOLIDWORKS Flow Simulation 的发展，地球的大小在增加。SOLIDWORKS Flow Simulation 软件的功能、适用性和有效性也在增加，这意味着新大陆会出现在地球的外壳上，并且外核和地幔的厚度会增加。

SOLIDWORKS Flow Simulation 和地球的另一区别是 SOLIDWORKS Flow Simulation 的内部结构可以是非对称的。这是由于不同行业在第 4 级（软件认证）需要不同数目的确认测例和物理模型，因此某些大陆可以基于不同厚度的层。

还需注意，随着 SOLIDWORKS Flow Simulation 的发展，确认活动转换到更高级别（地幔和地壳），这解释了之前基于两级分类（Balakin et al., 2004）的 SOLIDWORKS Flow Simulation 软件 V&V 程序被当前基于四级的 V&V 程序所取代的原因。很可能未来 SOLIDWORKS Flow Simulation 软件的发展会导 V&V 程序再次修改，基于更高级的确认测例分类。

类似于地球内部结构的确认测例四级分类，看起来对支持和市场营销活动非常有用。四级分类满足了用户想要看到简单确认的需求，以理解每个物理流程仿真得怎么样，同时，满足了用户想要了解该技术对复杂“真实世界”设备性能的预测结果怎么样的需求。

确认及其方法与质量保证（QA）相关。搜索和收集确认数据、数据分析、选择、执行计算和编写测例文档花费了 QA 小组的大量时间和资源。这些例子共同构成一组测试，在发布每一软件版本或服务包之前必须通过这些测试。确认测例的数量正在稳定上升。

由于网格化和解决问题需要 CAD 几何体加上边界条件和其他的求解控制设置，该软件随附了第一级和第二级的测例，因此用户可在其电脑上复制确认测例，并将其用于增强软件提供的教程范例。应用于确认测例设置和求解的基本原则是在 V&V 程序计算中应自动设置软件输入参数，那意味着：

- 完全自动的网格生成（针对基础确认，其他确认级别建议使用）；
- 求解控制收敛准则的设置采用其默认值。

还可以非自动化或手动方式构建网格，如均匀网格，或依照用户指定输入参数伸展的网格。通常而言，在第一级确认中使用完全自动的网格化，在高级别中更加普遍使用手动设置。全面地研究所有测例的初始数据的完整性、一致性以及网格收敛性。一些典型的 V&V 测例显示如下。

3. 确认测例

1. 基础确认：在有热传导的平板上的流动

考虑随着在加热平板上带层流边界层的均匀 2D 流。问题陈述如图 3 所示。在长度 0.31 米的板上定义的雷诺数等于 3.1×10^4 ，因此边界层为层流 (Holman, 1997)。

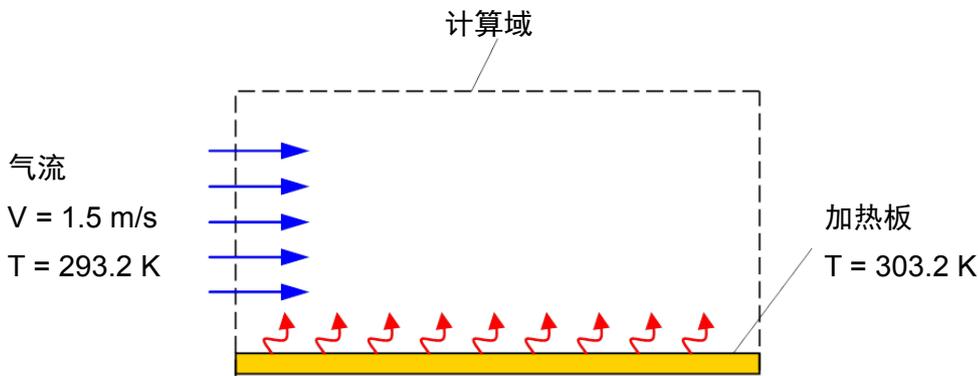


图 3：问题陈述。

SOLIDWORKS Flow Simulation 预测的 h 和 C_f ，使用完全自动生成的网格计算得出，结果分辨率级别 (RRL) 设置为 7，理论曲线 (Holman, 1997) 如图 4 和 5 所示。用户可看到 SOLIDWORKS Flow Simulation 预测结果非常一致。

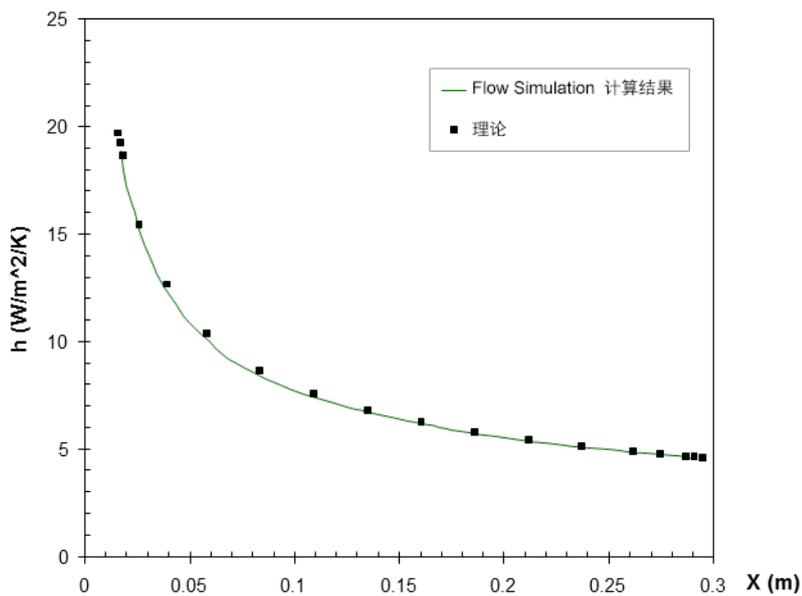


图 4：沿加热板的热传导系数。

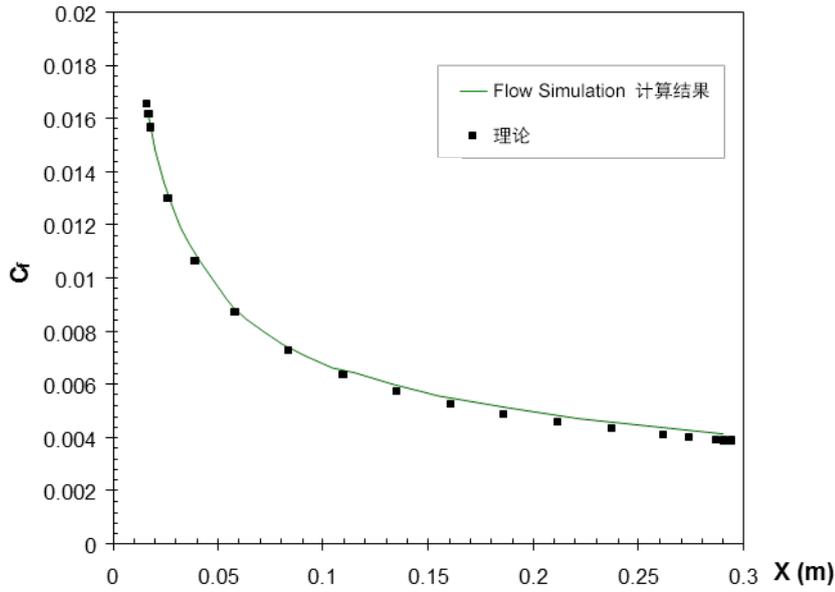


图 5：沿加热板的表面摩擦系数。

2. 基础确认：管道内的层流和湍流

考虑通过带圆形横截面的长直管道的 3D 水流预测（参见图 6）。设置均匀的入口速度 U_{inlet} 。

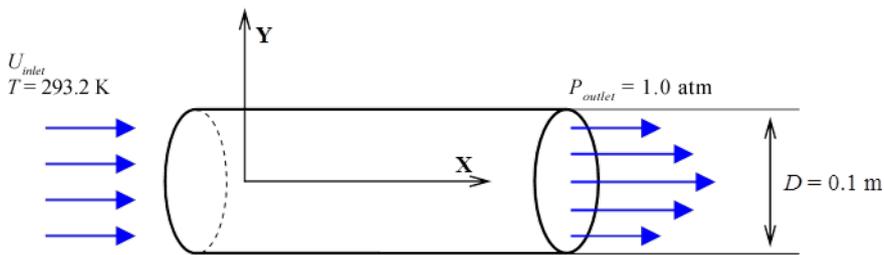


图 6：问题陈述。

图 7 显示 RRL=5 处平滑管道在整个红色范围内执行的 SOLIDWORKS Flow Simulation 预测，并与理论值 (Schlichting, 1979; White, 1994) 进行对比。

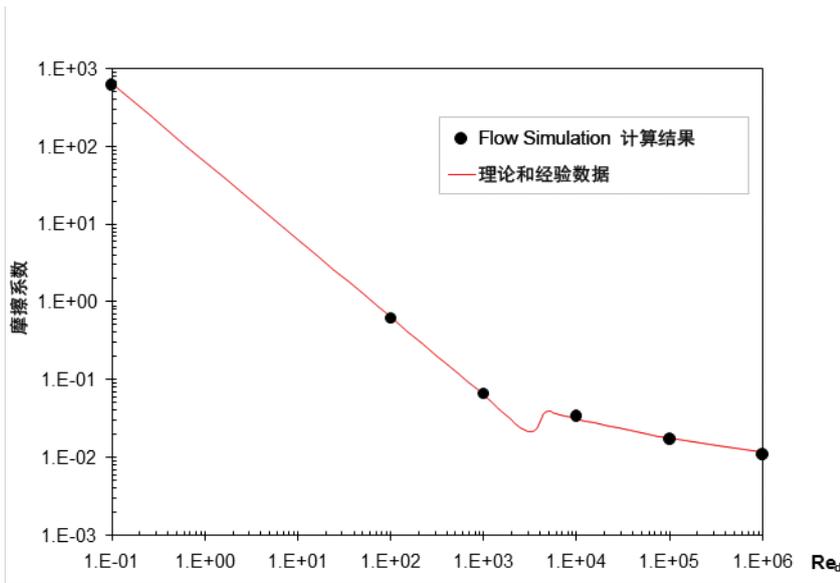


图 7：平滑管道的摩擦系数。

可以看出平滑管道摩擦系数的预测值非常接近理论和经验曲线。预测误差不超过 5%。

3. 基础确认：在 90 度弯曲方形管线内的流动

在这种情况下，考虑管线中的稳态水流 (Humphrey et al., 1977)。管线的几何体如图 8 所示。ReD = 790 意味着是层流。

入口温度等于 293.2 K，并且入口均匀速度 $U_{inlet} = 0.0198$ m/s。

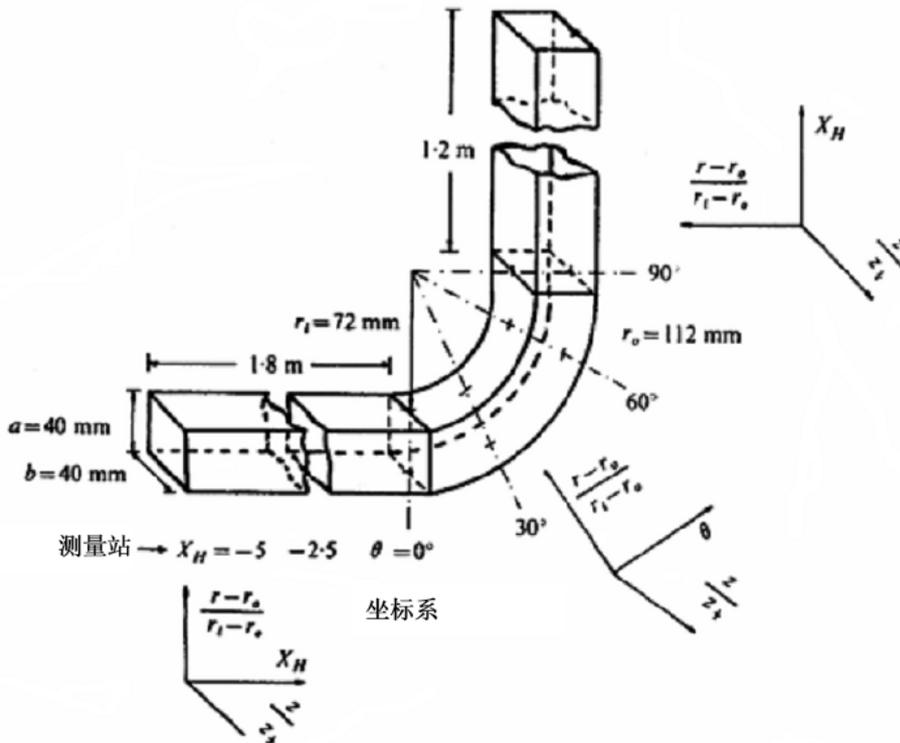


图 8：90° 弯曲方形管线的配置显示速度测量站和无量纲坐标。

在图 9、10 中，预测的无量纲（除以 U_{inlet} ）速度曲线与测量的速度进行对比，在以下管线横截面位置： $X_H = -5D, -2.5D, 0$ （或 $\theta=0^\circ$ ）。坐标 $(r-r_o)/(r_i-r_o)$ 和 $z/z_{1/2}$ 代表 z 和 r 方向。其中 $z_{1/2} = 20 \text{ mm}$ 。

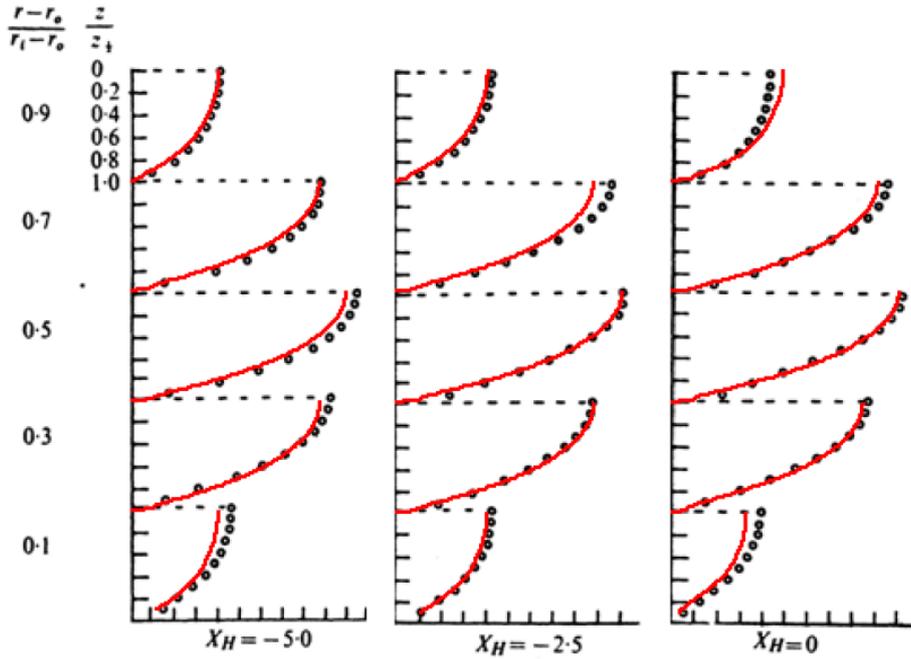


图 9：SOLIDWORKS Flow Simulation 预测的管线速度曲线（红线）与实验数据（圆圈）对比。

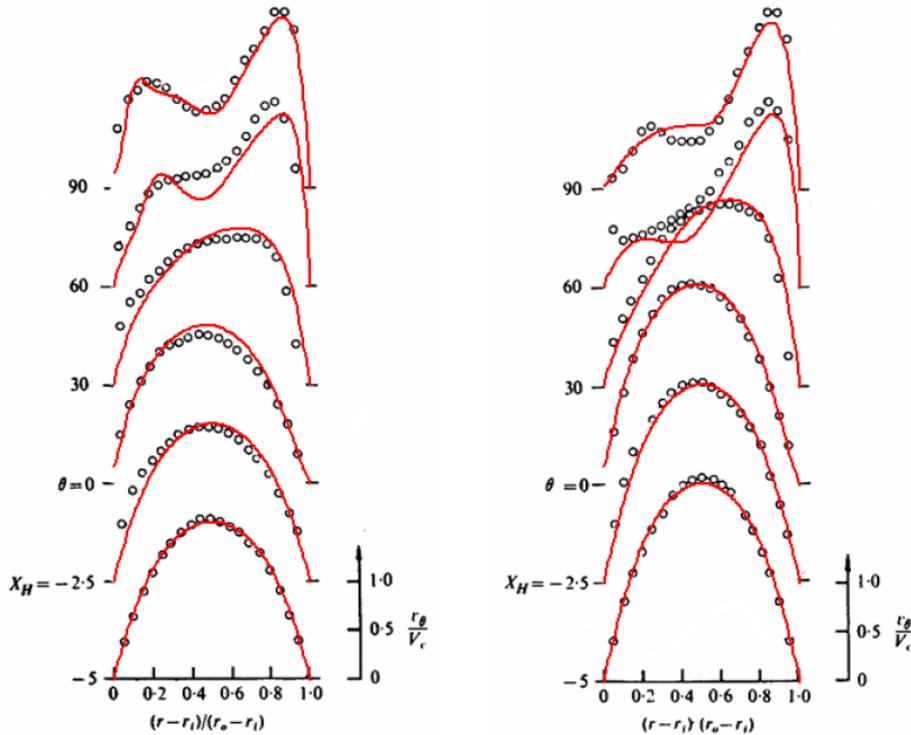


图 10：SOLIDWORKS Flow Simulation 预测的管线速度曲线（红线）与在 $z/z_{1/2}=0.5$ （左）和 $z/z_{1/2}=0$ （右）处的实验数据（圆圈）对比。

可看出 SOLIDWORKS Flow Simulation 的预测与实验数据非常一致（Humphrey et al., 1977）。

4. 基础确认：在有单边突然扩展的 2D 通道内的流动

在此例中，层流不可压缩稳态水流通过 2D（平面）通道，检查单边突然扩展和平行壁。问题草图如图 11 所示。水温 -293.2 K，平均速度 -8.25 mm/s。

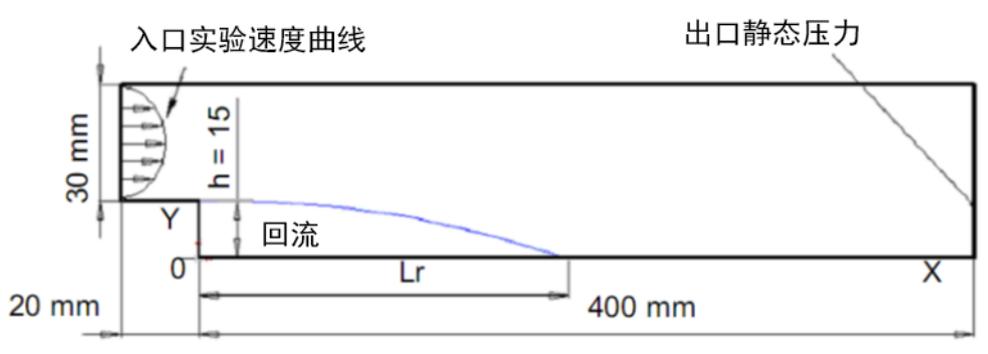


图 11：在有单边突然扩展的 2D（平面）通道内的流动

在此入口指定对应于 $Re_h = 125$ 处实验测量的平均速度曲线（Denham 和 Patrick, 1974）。在出口处指定 10^5 Pa 静态压力。

在图 12-14 中，SOLIDWORKS Flow Simulation 采用自动生成网格（RRL=8）预测的流动速度与测量值（Denham 和 Patrick, 1974）进行对比。

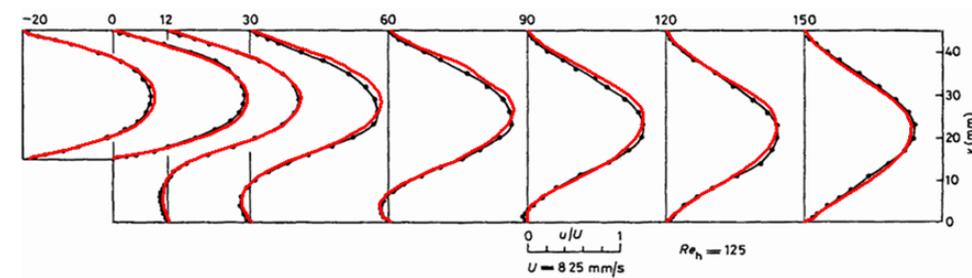


图 12：SOLIDWORKS Flow Simulation 预测的速度曲线（红线）与实验数据（带黑圈的黑线）对比。

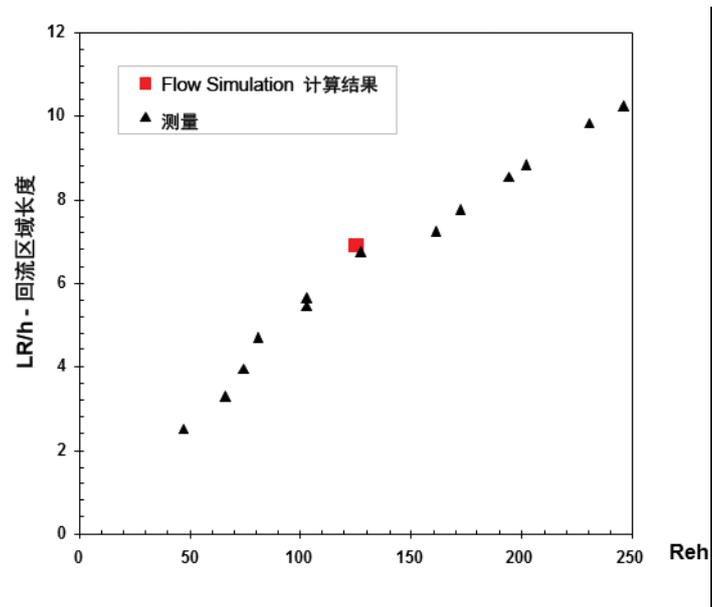


图 13：SOLIDWORKS Flow Simulation 预测的回流区域长度与实验数据对比。

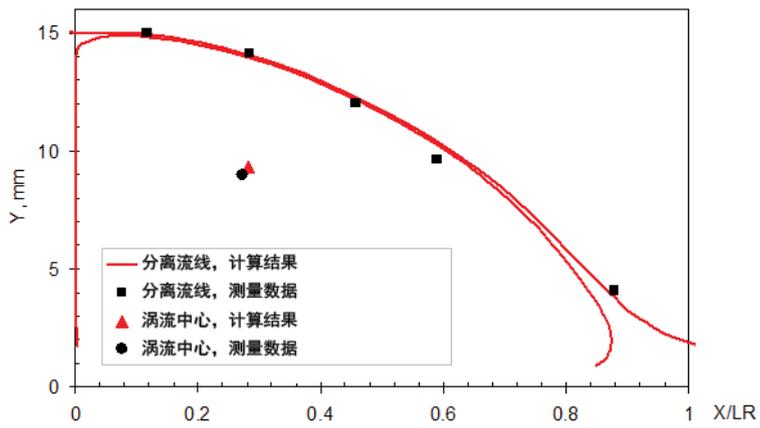


图 14 : SOLIDWORKS Flow Simulation 预测的回流区域分离流线和涡流中心与实验数据对比。

在多个 $X = \text{const}$ 的横截面的流体 X -速度 (u/U , 其中 $U = 8.25 \text{ mm/s}$) 曲线如图 12 所示。可看到预测的流动速度曲线在主流和回流区域非常接近于实验值。

回流区域的特点, 即沿通道壁的长度 L_R 、分离流线和涡流中心如图 13、14 所示。可以看出它们与实验数据极为一致。

5. 基础确认：在带有和不带供热的圆柱体上的流动

首先, 作为瞬态问题, 在宽泛的管理参数范围内数值研究不带供热的圆柱体上的不可压缩流。众所周知, 低雷诺数 $Re_D < Re_{osc}$ (Re_{osc} 约为 45) 在封闭的近尾迹中会形成两个涡流。图 15 显示: 对于 $Re_D = 41$, 自动生成网格 (RRL = 7), SOLIDWORKS Flow Simulation 的预测和 Van Dyke (1982) 的照片非常一致。

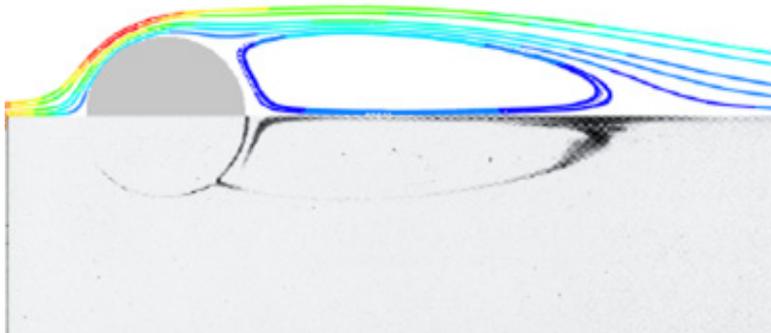


图 15 : 对于 $Re_D = 41$, 用彩色标出的压力幅值预测流动轨迹 (上部) 和 Van Dyke (1982) (下部) 的照片。

雷诺数较高时，流体变得不稳，并且 von Karman 涡道出现在通过圆柱体的尾迹中。对于 $Re \geq 10^5$ ，SOLIDWORKS Flow Simulation 预测的斯特劳哈尔 (Strouhal) 数与实验数据 (White, 1994) 的对比如图 16 所示。

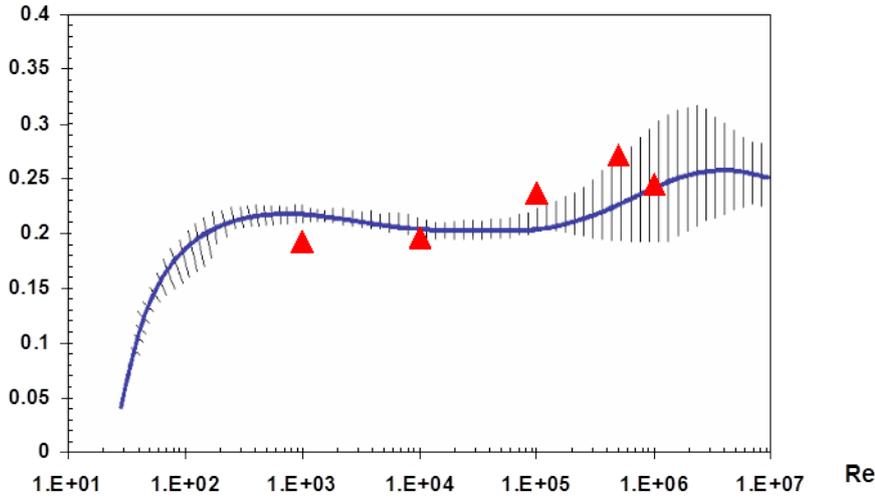


图 16：SOLIDWORKS Flow Simulation 预测的圆柱体流斯特劳哈尔数 (三角形) 与实验数据 (虚线) 的对比。

计算的 $RRL=7$ 时均圆柱体拖动系数与众所周知的 $C_D(Re)$ 实验数据 (Panton, 1996) 的对比如图 17 所示。可轻松看到数值结果非常接近各种 Re 的实验数据。

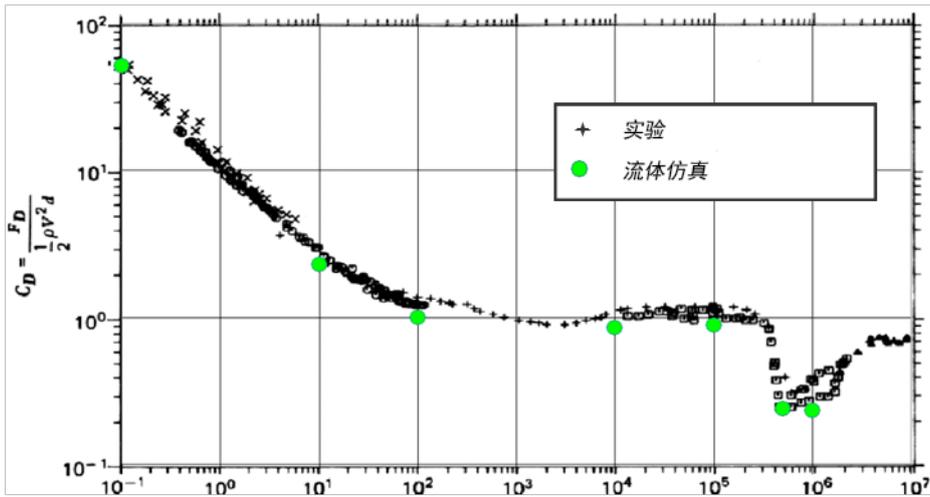


图 17：圆柱体的拖动曲线。

对此问题最简单的修改是考虑气流内加热圆柱体的对流热传导 (总的生热率 q)。

在考虑的整个 Re 范围内计算结果和测量结果 (Holman, 1997) 的 Nu_D 具有极好的相关性 (参见图 18)。

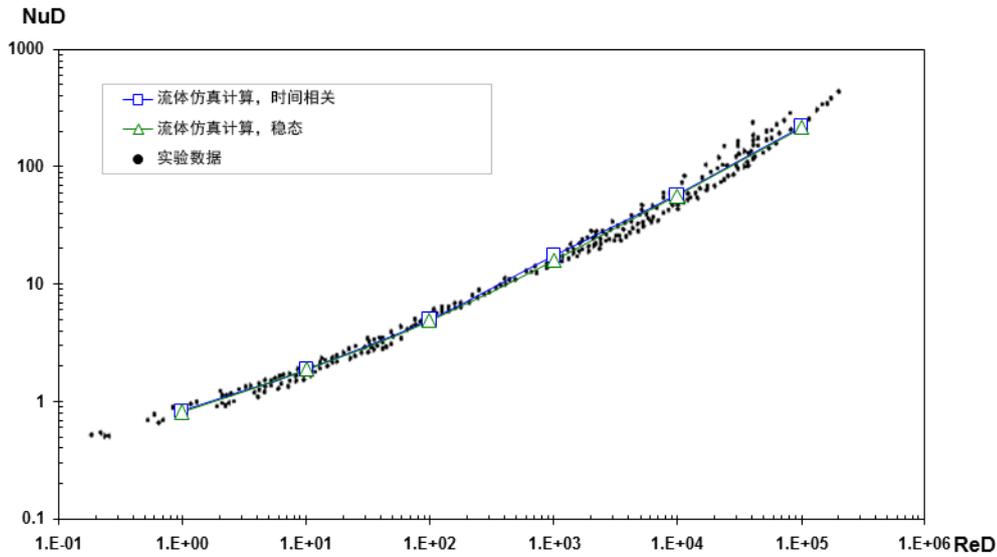


图 18 : 加热圆柱体上气流的努塞尔 (Nusselt) 数 Nu_D 。

6. 基础确认：浮力驱动空腔流

此 2D 测试是经典的对流热传导。在此测试中，考虑方形空腔内的自由对流，具有不同温度值的等温侧壁，并且顶部和底部隔热 (参见图 19)。该空腔充满空气。

从约 40 个计算机软件的高精度预测中获取的基准解 (Davis, 1983)，而且与实验研究的半经验公式非常一致 (Emery 和 Chu, 1965)。

方形空腔的侧面尺寸 L 在 0.0111...0.111 m 范围内变化，以使空腔的瑞利 (Rayleigh) 数在 103 - 106 范围内变化。

考虑瑞利数范围的网格收敛性研究如图 20 所示。

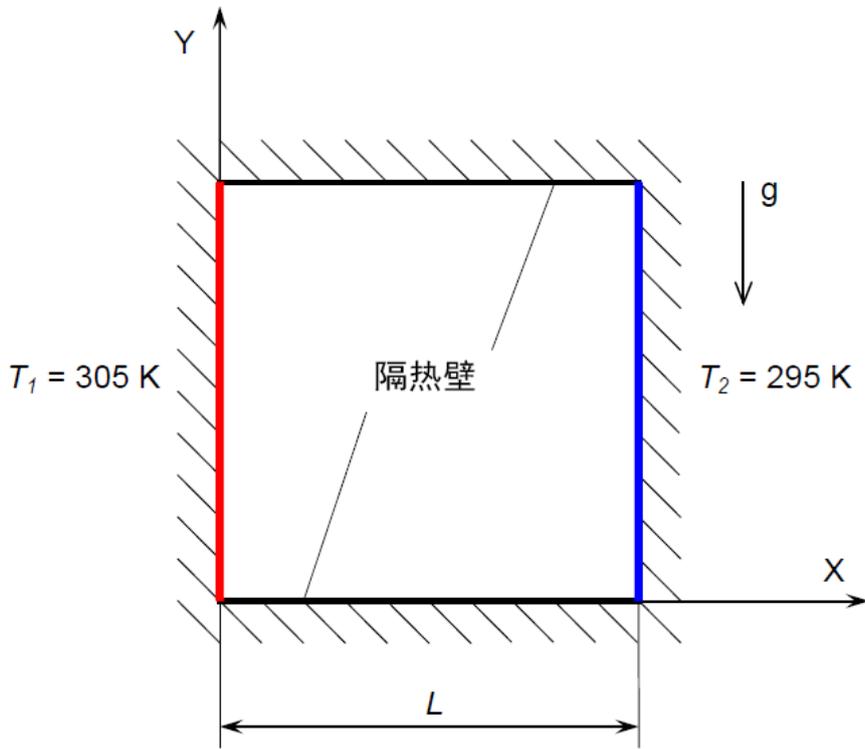


图 19：使用自然对流的闭合 2D 方形空腔。

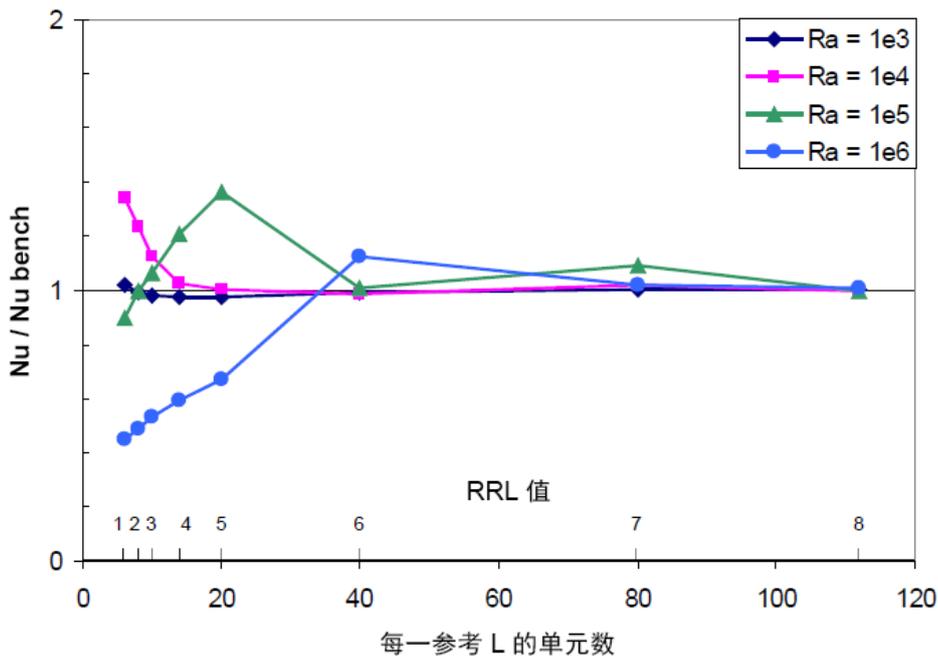


图 20：不同 Ra 的网格收敛性研究。

此图表明在网格自动生成级别 (RRL) 和每一参考 L (方形空腔大小) 单元数上的依赖比率 $Nu/Nu_{benchmark}$ 。此图确认在 $RRL = 8$ 处达到网格收敛。在此 RRL 值处得到的数值结果显示如下。

图 21 显示在预测的最高 $RRL = 8$ 处 $Ra = 10^6$ 的特殊情况下动态适应于求解特性得到的网格。

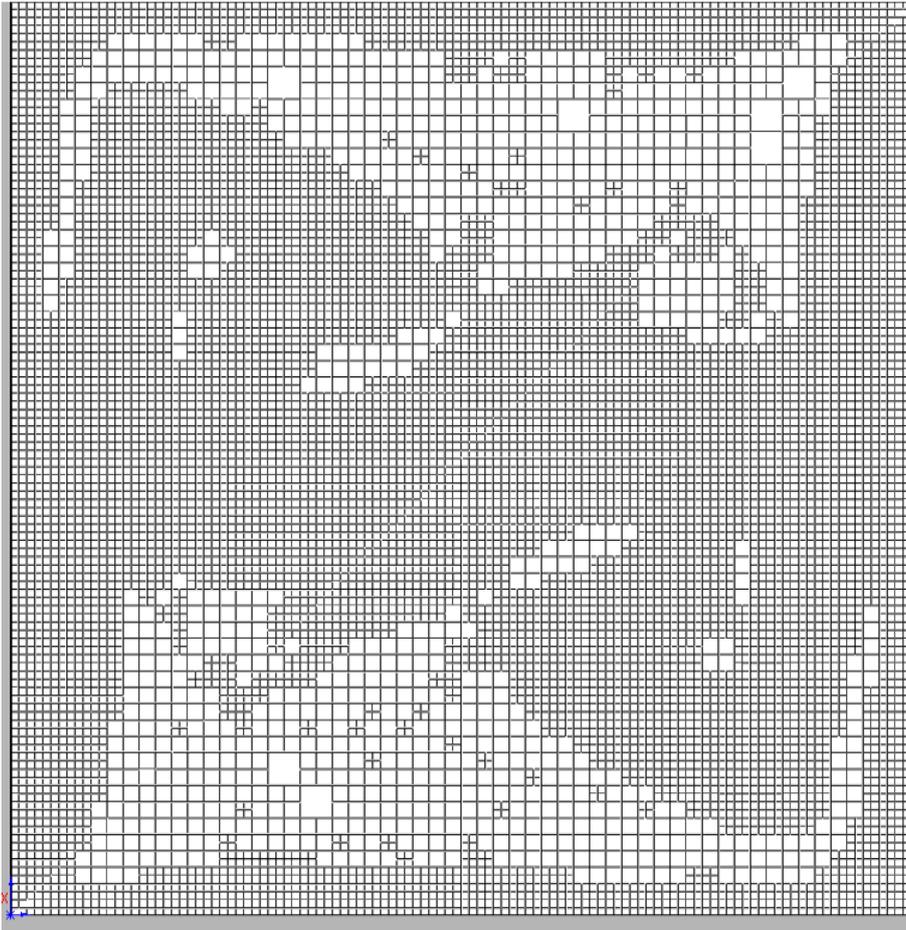


图 21 : 在 $Ra = 10^6$ 、 $RRL = 8$ 处适应于求解网格。

下图显示在热力学 (参见图 22) 和流体力学 (参见图 23、24) 领域、对于所有考虑的瑞利数, SOLIDWORKS Flow Simulation 的预测和基准解 (Davis, 1983) 都非常一致。

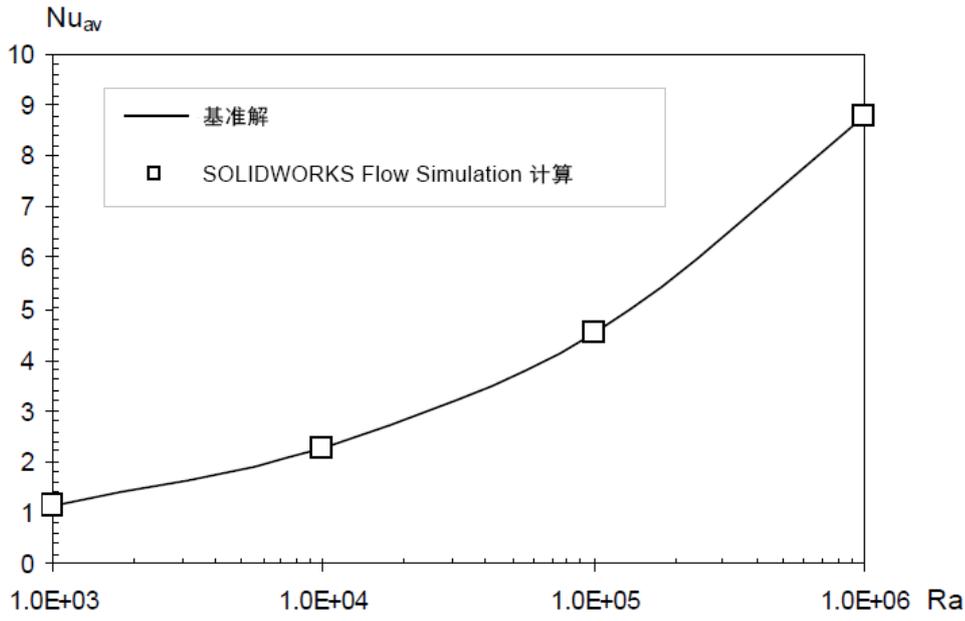


图 22：平均努塞尔数和瑞利数。

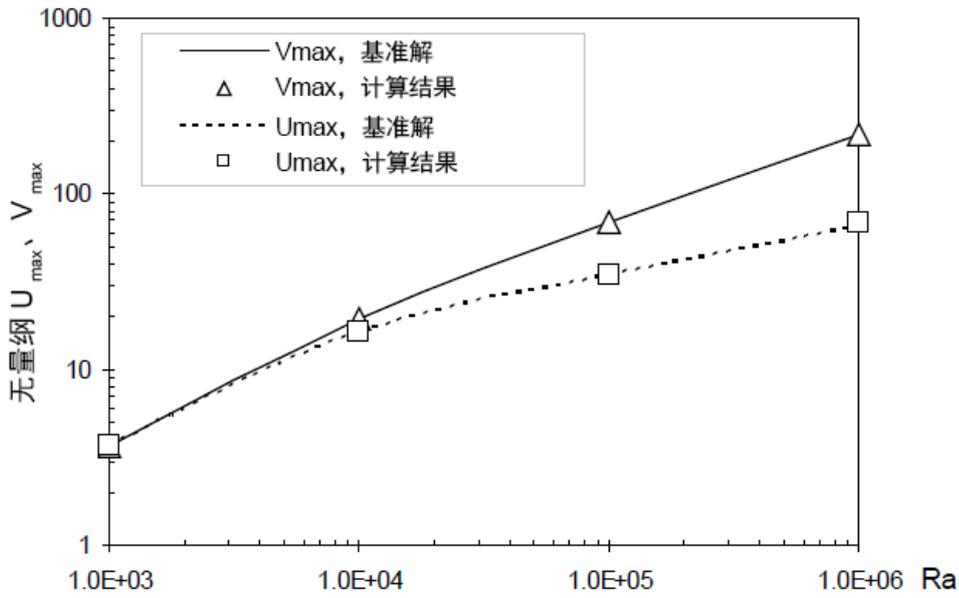


图 23：最大无量纲速度部件与瑞利数。

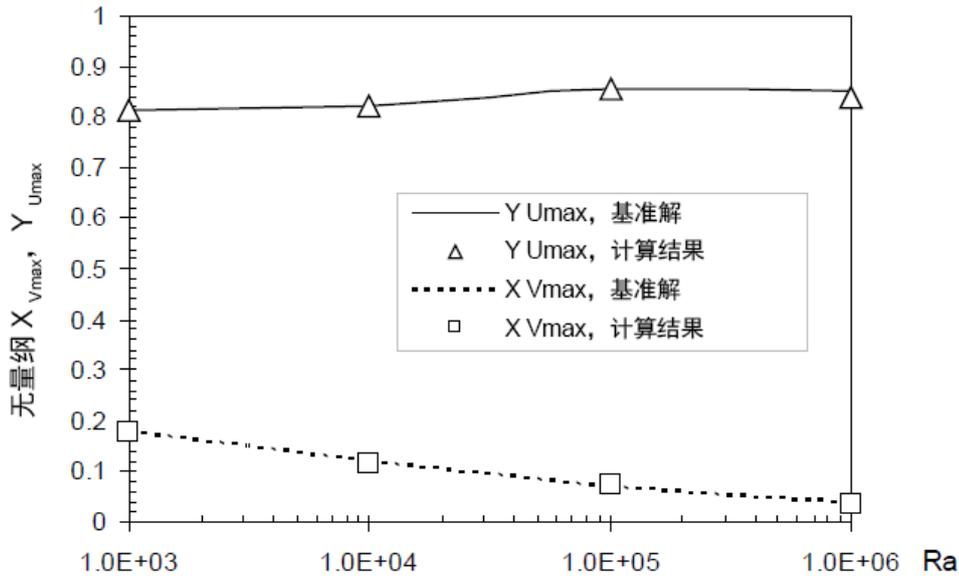


图 24：最大速度位置的无量纲坐标和瑞利数。

7. 基础确认：RAE 2822 机翼上的流动

在此例中，SOLIDWORKS Flow Simulation 对 RAE 2822 机翼附近的 2D 气流进行预测。机翼几何体如图 25 所示。



图 25：RAE 2822 机翼。

机翼弦长为 1.0 米。计算域大小为 30.24 米。计算网格有 350 200 单元，在机翼附近的单元更加精细。网格单元的总数约为 70000。

考虑五种测例。表 1 中显示了每一个测例的流动条件 (Cook et al., 1979)。

测例	M	α , °	Re	T, K	P, Pa
1	0.676	2.4	5.7e+6	300	38684.5408
2	0.676	-2.18	5.7e+6	300	38684.5408
3	0.725	2.55	6.5e+6	300	41132.45548
4	0.725	2.92	6.5e+6	300	41132.45548
5	0.728	3.22	6.5e+6	300	40962.95361

表 1：预测 RAE 2822 机翼上流动的流动条件。

计算的马赫数平面图解如图 26 所示。

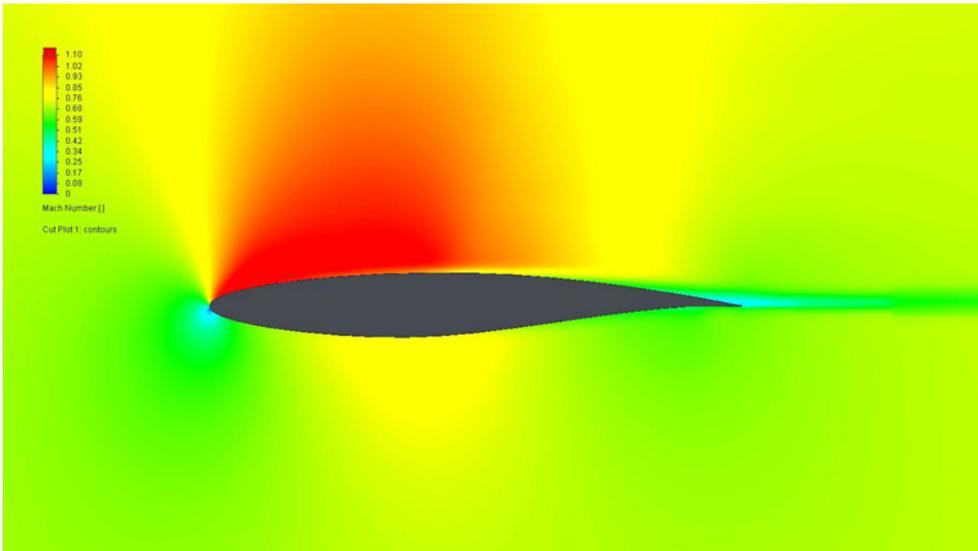


图 26：测例 5 机翼周围的马赫数平面图解。

在此测例下，接近中弦位置处的上表面可见到强烈的冲击，这会导致边界层下游变厚。

对于测例 5，SOLIDWORKS Flow Simulation 预测的表面压力系数分布与实验数据 (Cook et al., 1979) 对比如图 27 所示。在显示的测例中 (图 27) 可以看到，无论是总体分布还是冲击位置，SOLIDWORKS Flow Simulation 计算结果和实验结果的一致性都令人满意。

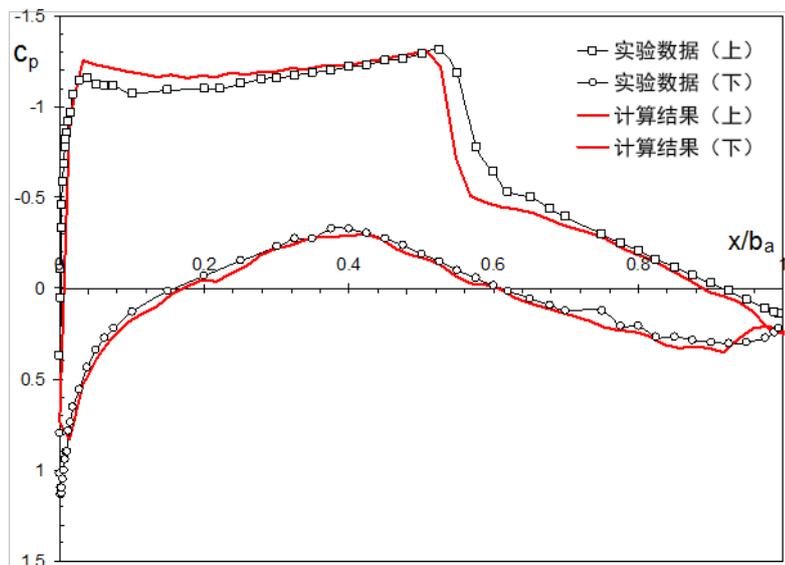


图 27：对于测例 5，计算的和测量的曲面压力系数对比。

对于整体空气动力学系数 C_L 和 C_D ，计算数据和实验数据也非常一致。预测值为 $C_L = 0.807$ 和 $C_D = 0.0192$ ，它们的相对预测误差分别为 0.61% 和 9.5%。

遗憾的是，由于缺少专门用于辐射模型确认的测试空间描述，实体内的热量传导、非牛顿流体的流动、压缩模型、真实气体等超出了本白皮书的限制。

8. 行业问题和基准：通用汽车车体外形上的流体仿真（Ahmed 车体模型）

“Ahmed 车体模型”是一个经典的汽车外部空气动力学风洞测例 (Lienhart et al., 2000)。

估算对应 $Re = 7.68 \times 10^5$ 处气流接近 40 m/s。车体所有的参数源于 Lienhart et al. (2000)。

使用长度方向 209 个单元、高度方向 58 个单元和宽度方向 78 个单元的计算网格来执行 SOLIDWORKS Flow Simulation 计算 (图 28)。

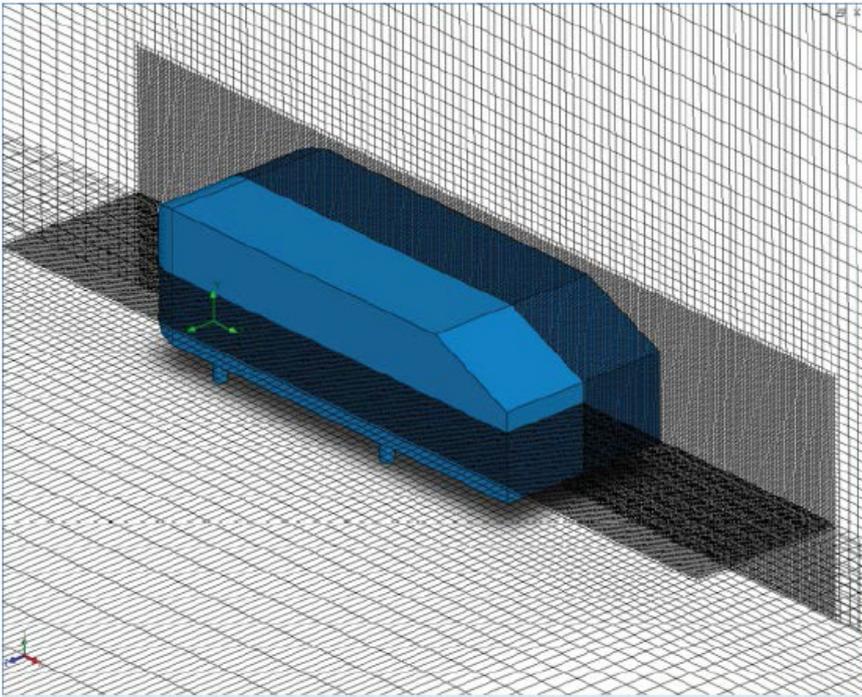


图 28：带有 250 后斜度的车体模型上的 SOLIDWORKS Flow Simulation 计算网格。

对于两个倾斜的后角，SOLIDWORKS Flow Simulation 计算的流场如图 29 所示。SOLIDWORKS Flow Simulation 计算的流动速度曲线和车体拖动系数与实验数据(Lienhart et al., 2000) 对比如图 30 和表 2 所示。

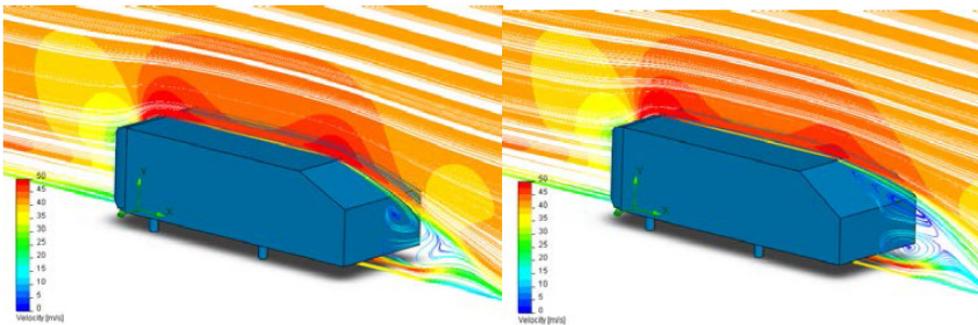


图 29：计算的车体模型上游、车体模型上和车体模型下游的流体流线和速度曲线：250 后斜度（左），350 后斜度（右）。

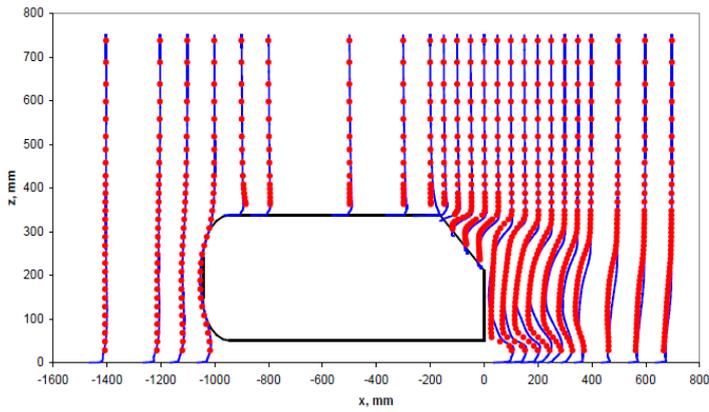
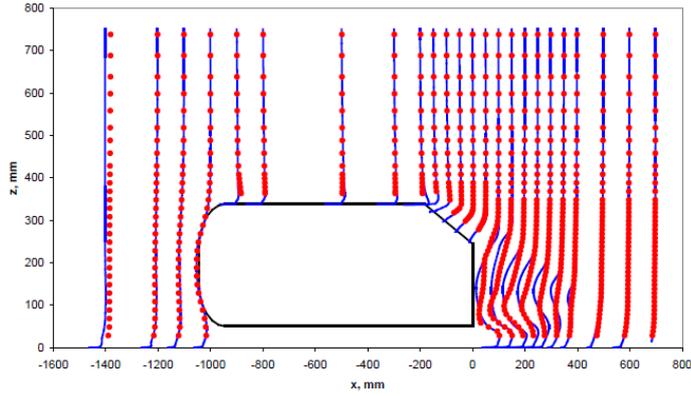


图 30：在不同车体斜度角的车体对称面内的速度曲线（直线 - 计算结果；红线 - 实验结果）：25° 后斜度（上部），35° 后斜度（下部）。

倾斜角	$C_{d,exp}$	$C_{d,calc}$	误差, %
25°	0.298	0.284	-4.8
35°	0.676	0.274	6.6

表 2：使用 SOLIDWORKS Flow Simulation 计算的和通过实验获得的车体模型拖动系数。

从图 29 和 30 中可以看出计算的流动速度曲线接近于实验的速度曲线。从表 2 中可以观察到 SOLIDWORKS Flow Simulation 计算的车体拖动系数与实验的拖动系数非常一致。

9. 行业问题和基准：冷却塔外部空气动力学的预测

这个确认测例描述了将 SOLIDWORKS Flow Simulation 技术应用于冷却塔壳体周围流动的分析结果。

冷却塔壳体的双曲线外形是通过一个位于喉部的短圆柱体与两个截断的圆锥体连接起来逼近而成，可参见图 31。

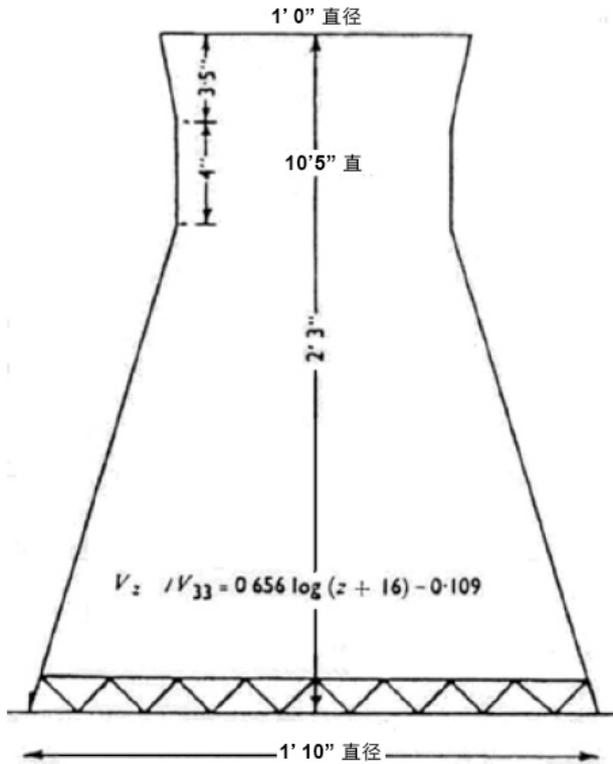


图 31：冷却塔几何体。

冷却塔底座孔认为是密封的。冷却塔由表 3 中给出的几何参数定义。所有显示的参数以及实验风洞测试数据均出自于 Zdravkovich (2003)、Cowdrey 和 O' Neill (1956)。

几何参数	单位	数值
总高度	in	27.0
底座直径	in	22.0
喉部直径	in	10.5
顶部直径	in	12.0
圆柱贯穿高度	in	4.0
上部截断的圆锥高度	in	3.5
气流属性		
温度	K	293.2
压力	atm	1.0
参考速度 V_{33}	m/s	103.9
摩擦速度 U_{τ}	m/s	7.86
雷诺数		$\approx 6.0E6$

表 3 : 冷却塔参数和流动条件。

在下列计算域中考虑流体计算问题：长度 - 3.75 m，宽度 - 1.25 m，高度 - 1.4 m。仅有一半冷却塔用于计算。SOLIDWORKS Flow Simulation 计算的初始网格是长度方向 75 个单元、高度方向 30 个单元和宽度方向 25 个单元，在模型附近经过细化后得到约 580000 个单元的计算网格。

图 32 显示了在 $Z/H=0.79$ 处预测的 CP 分布与实验数据的对比。

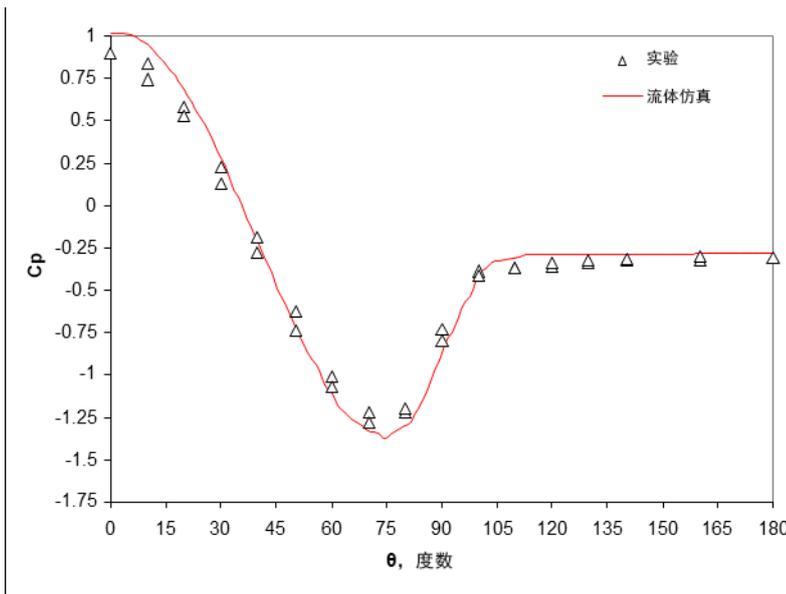


图 32 : 标高为 $Z/H=0.79$ 时冷却塔周围的局部 CP 分布。

我们可以看到，对于几乎所有的角度，计算结果均与实验数据非常一致。

模型后部的高度 CP 分布也与实验数据具有很好的相关性（参见图 33）。

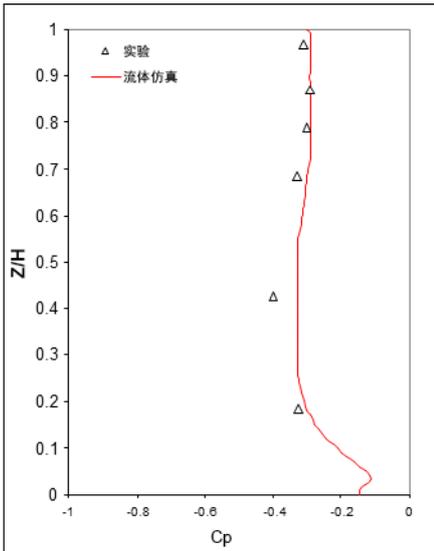


图 33 : 在冷却塔后部 ($\theta=180$) 的局部高度 CP 分布。

应当指出的是，考虑了非常好的 SOLIDWORKS Flow Simulation 位置预测和所有标高的最大吸入值。

作为复杂的多物理学计算的例子，图 34-35 显示了可见饱和水蒸气柱形成的预测结果。

首先，应当注意反向旋转涡流对（参见图 34），这在横向气流的湍流浮力射流中非常典型。

其次，下游横向截面中羽毛状的温度和相对湿度分布与湍射流中涡流引起的标量参数场完全对应（参见图 35）。

可以这么说，SOLIDWORKS Flow Simulation 已成功确认冷却塔外部空气动力学的预测问题。

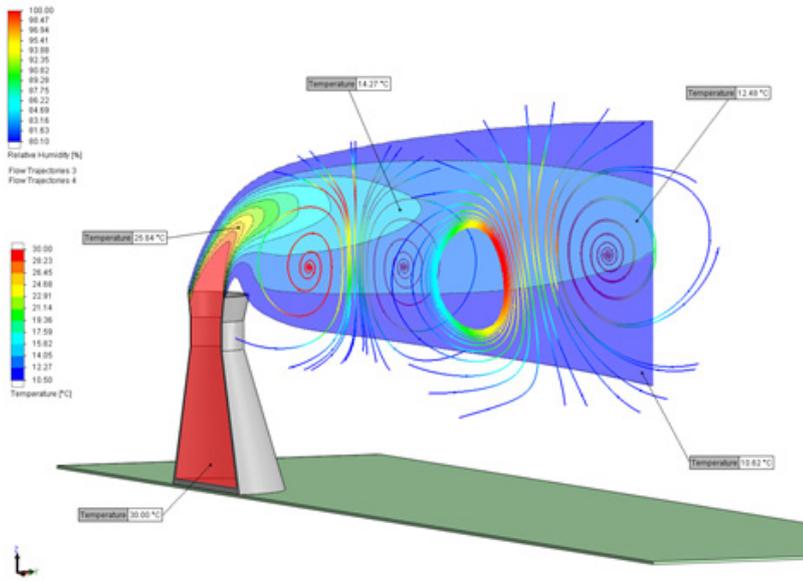


图 34：在竖直对称面内的温度分布，在两个侧面下游截面上绘制并按相对湿度值着色的流动轨迹。

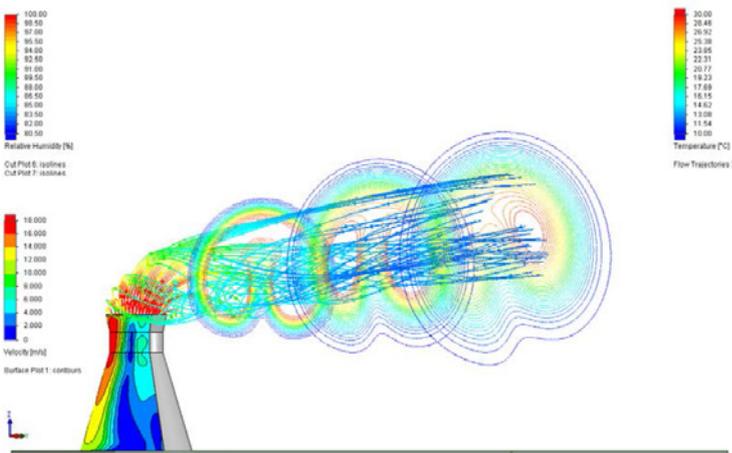


图 35：冷却塔壳体上的速度分布，在三个下游横截面上按温度值和相对湿度曲线着色的流动轨迹。

10. 行业问题和基准：旋风分离器在极端温度下的性能预测

气体旋风分离器是在工业中最常用的分离设备。

考虑用于确认目的的旋风分离器总体视图如图 36 所示。表 4 中的几何条件定义了旋风分离器。所有显示的参数以及实验数据均来源于 Lorenz (1994)。

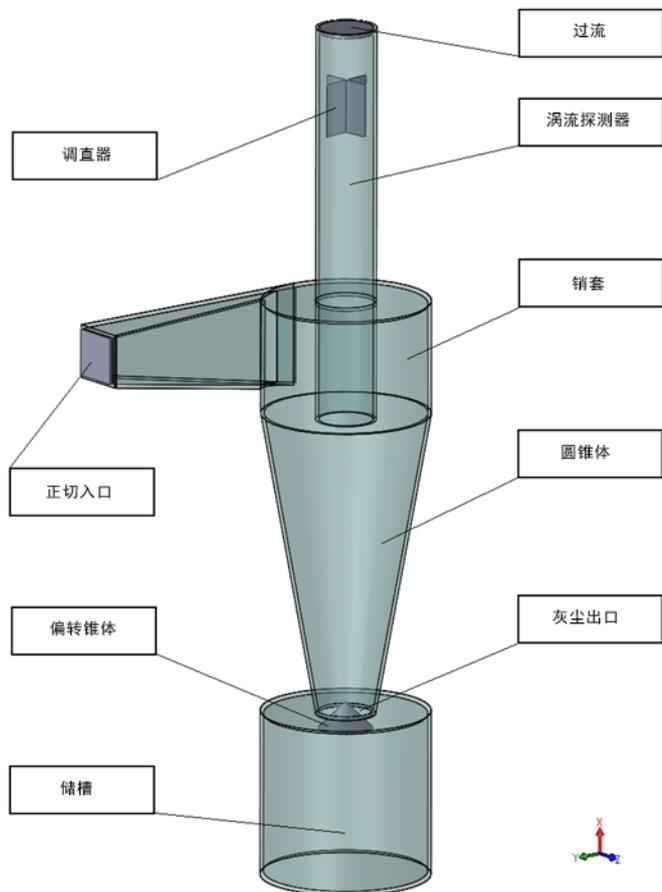


图 36：旋风分离器模型的总体视图。

SOLIDWORKS Flow Simulation 使用 350000 个单元的计算网格进行计算。

仿真采用瞬态方法。时间步长 Δt_c 可以普通形式提供：

$$\Delta t_c = \frac{\min(D_d, D_{vf})}{U_{\max}} = \frac{\min(D_d, D_{vf})}{U_{inlet} D_{bar}} D_{vf},$$

此处 D_d - 灰尘出口直径、 D_{vf} - 涡流探测器直径、 D_{bar} - 筒直径、 U_{inlet} - 在旋风分离器入口处的速度。

几何参数	单位	数值
筒直径	米	0.15
漩涡探测器直径	米	0.05
灰尘出口直径	米	0.05
旋风分离器总高度	米	0.387
入口管线长度	米	0.245
入口高度	米	0.02
入口宽度	米	0.08
筒高度	米	0.104
涡流探测器下部长	米	0.11
涡流探测器上部长	米	0.21
调直器长度	米	0.05
入口方形侧面长度	米	0.044
偏转圆锥和灰尘出口之间的缝隙	米	0.01
圆锥倾角	度	10

表 4：旋风分离器模型的主要几何尺寸。

计算结果如图 37-39 所示。

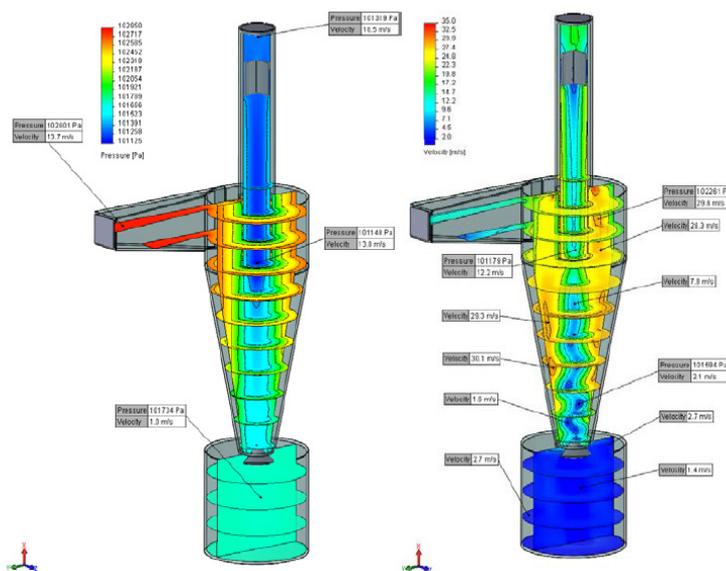


图 37：3 s 物理时间仿真之后，在 80 m³/h 体积流量下、环境空气（200°C）的旋风分离器内的压力分布（左）和速度分布（右）。

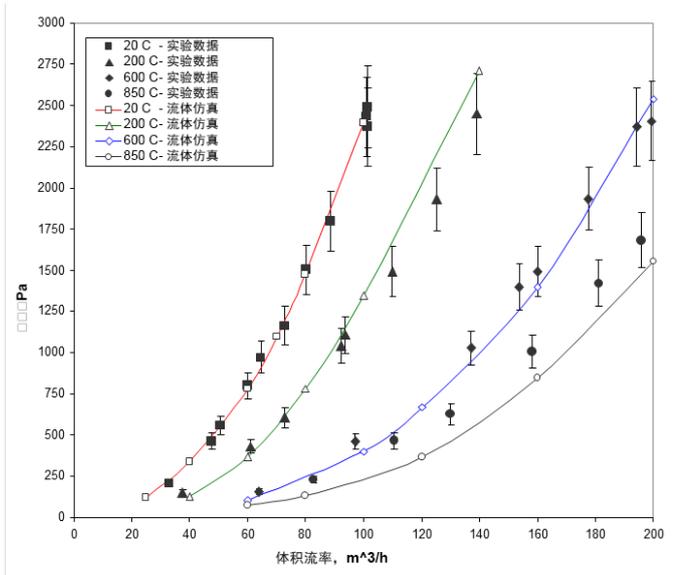


图 38：不同温度下旋风分离器的压降。

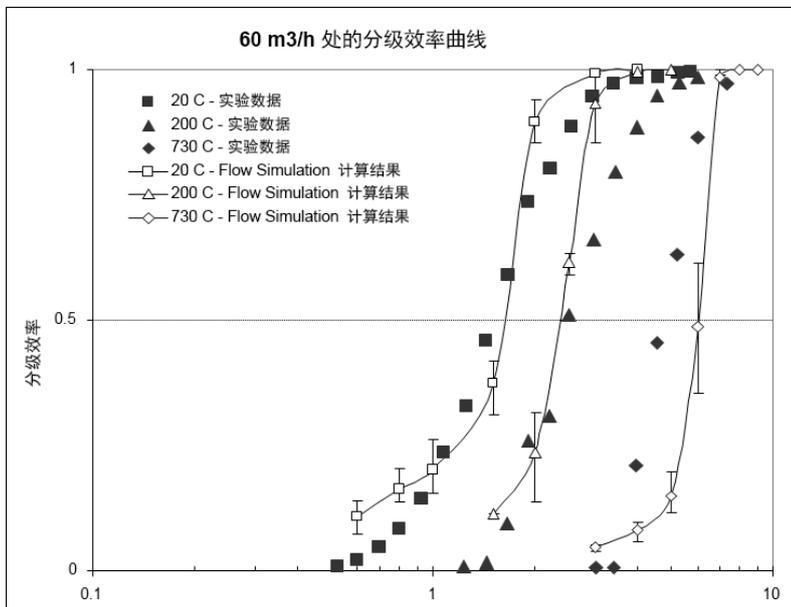


图 39：在 60 m³/h 体积流率和不同气温下的分级效率曲线。

旋风分离机内的流场如图 37 所示。可在该处找到典型的压力和速度分布。

图 38 显示了不同气温下预测的压降与来自 Lorenz (1994) 的实验数据的对比。它证实了大多数操作条件与实验结果非常一致。计算结果与实验数据的相差通常在 5% - 10% 之间。仅针对热气流时，相大会变大。

SOLIDWORKS Flow Simulation 预测的从环境温度到极端温度下操作的旋风分离器分级效率如图 39 所示。预测值处的竖直栏表示在 5 个计算系列中获得的最大和最小去除概率。微粒密度为 2650 kg/m³。

可看到 SOLIDWORKS Flow Simulation 预测的旋风分离器分级效率与报告的数据 (Lorenz, 1994) 非常一致。应特别关注切断大小 (微粒大小, 低于此可实现 50% 的微粒去除) 非常好的预测。

4. 结论

关于全球 CAE 市场的趋势分析清楚地表明: 在解决当今工程设计问题中 CFD 计算市场份额稳定增长。以前的 CFD 计算主要用于航天、汽车、发电和电子工业, 但现在此类计算几乎对所有行业都至关重要。SOLIDWORKS Flow Simulation 是运用 CAE 技术 (即流体力学和热传导) 满足设计工程师日常所需的典型示例。

对于以项目为导向的工程师所使用的软件, 实际上在大多情况下, 不可能将验证和确认分开, 因为软件中内置有高度的自动化。这意味着软件验证/确认活动几乎是一个统一体, 在指代这一类活动时, 这些术语被一起使用, 甚至用其首字母缩写 V&V 作为简称。

由于 SOLIDWORKS Flow Simulation 使用了笛卡尔网格, 以及一些工程技术和方法, 与传统的 CFD 软件相比, 数值计算在很粗糙的网格上也达到可接受的准确度。正因为如此, 用户可使用相对适中的计算资源计算非常复杂 3D 例子中的流体流动和热传导。

当前 SOLIDWORKS Flow Simulation 质量保证中使用的 V&V 步骤采用确认测例的四级分类。可通过倒金字塔图形显示这四个级别, 每一级以前一级为基础, 并受到前一级的支持。

通常而言, 这些级别内的确认测例的分类取决于例子的复杂度、参考数据的可用性及其准确性等等。随着几何和流体复杂度的增加, 观察到实验数据可用性降低和准确度减小的趋势。此四级分类具有动态结构。随着 SOLIDWORKS Flow Simulation 的发展, V&V 活动, 尤其是新测例的开发, 转换到更高级别。

本文所展示的每一个级别的典型确认测例证实了 SOLIDWORKS Flow Simulation 软件多年来已成功确认了各种各样的问题。通过 SOLIDWORKS Flow Simulation 数值地复现了实验数据和解析解, 并具有可以接受的准确度。相对粗糙网格的良好性能、CAD 嵌入式功能、高级别的自动化和可用性, 这些特点结合起来使 SOLIDWORKS Flow Simulation 软件成为针对工程设计和分析的非常适当和有用的 CFD 工具。

参考文献

- Balakin, V., Churbanov, A., Gavrioliouk, V., Makarov, M. and Pavlov A. (2004) 'Verification and Validation of EFD.Lab Code for Predicting Heat and Fluid Flow', *Proceedings of ICHMT International Symposium on Advances in Computational Heat Transfer*, Norway, April 19-24, 2004.
- Cook, P., McDonald, M. and Firmin, M. (1979) 'Airfoil RAE 2822 — Pressure Distributions, and Boundary Layer Wake Measurements', AGARD AR-138, p. A6.
- Cowdrey, C.F. and O'Neill, P.G.G. (1956) 'Report of Tests on a Model Cooling Tower for CEA: Pressure Measurements at High Reynolds Numbers'. *Nat. Phys. Lab.*, Aero. Rep. 316a.
- Davis, G. de Vahl (1993) 'Natural Convection of Air in a Square Cavity: a Bench Mark Numerical Solution', *Int. J. Numer. Methods Fluids*, Vol. 3, No. 3, pp 249-264.
- Denham, M.K. and Patrick, M.A. (1974) 'Laminar Flow over a Downstream-Facing Step in a Two-Dimensional Flow Channel', *Trans. Instn. Chem. Engrs.*, Vol. 52, pp. 361-367.
- Emery, A. and Chu, T.Y. (1965) 'Heat Transfer across Vertical Layers', *Trans. ASME, J. Heat Transfer*, Vol. 87, p 110.
- Fluid Dynamics Databases (2002), ERCOFTAC Bulletin, No. 52.
- Freitas, C.J. (1995) 'Perspective: Selected Benchmarks From Commercial CFD Codes', *Trans. ASME, J. Fluids Eng.*, Vol. 117, No. 2, pp 208-218.
- Holman, J.P. (1997) *Heat Transfer*, 8th ed., McGraw-Hill, New York.
- Humphrey, J.A.C., Taylor, A.M.K. and Whitelaw, J.H. (1977) 'Laminar Flow in a Square Duct of Strong Curvature', *J. Fluid Mech.*, Vol.83, part 3, pp.509-527.
- Kamps, T. (2005) *Model Jet Engines*, UK.
- Lienhart, H., Stoots, C. and Becker, S. (2000) 'Flow and Turbulence Structures in the Wake of a Simplified Car Model (Ahmed Model)', DGLR Fach Symp. der AG STAB, Stuttgart University.
- Lorenz, T. (1994) 'Heisgasentstaubung mit Zyklonen', VDI-Fortschritt-berichte, Reihe 3, Verfahrenstechnik N^o 366, VDI-Verlag, Dusseldorf.
- Melnik, R.E., Siclari, M.J., Marconi, F., Barber, T., Verhoff, A. (1995) 'An Overview of a Recent Industry Effort at CFD Code Validation', AIAA Paper 95-2229, 26th AIAA Fluid Dynamics Conference, San Diego, California, June 19-23, 1995.
- Missile Defense Agency (2008), *Validation & Accreditation (VV&A) for Models and Simulations*, Department of Defense Documentation of Verification, Missile Defense Agency.
- Nandula, S.P., Pitz, R.W., Barlow, R.S. and Fiechtner, G.J. (1996) 'Rayleigh/Raman/LIF Measurements in a Turbulent Lean Premixed Combustor', AIAA Paper 96-0937, 34th Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, Reno, NV, January 15-18, 1996.
- Oberkampf, W.L. and Trucano, T.G. (2002) 'Verification and Validation in Computational Fluid Dynamics', *Progress in Aerospace Sciences*, Vol. 38, pp 209-272.

