

低温系统与高等流体流动设计

SINDA/FLUINT 中采用的通用热力学和水力学求解器能够满足低温流体系统设计需求。许多组织以前一直使用自己研发的、满足各自专业应用需求的、分散的设计与分析工具，但是，在编程者离开后，这些组织一般都没有资源或基础去保留、发展或培训新成员使用这些程序。因此，采用满足不同系统需求的、单一、通用的设计分析工具不仅解决了以上问题，而且有助于集成化分析和方便软件销售商与顾客间的沟通。

在 SINDA/FLUINT 中提供了多种通用热/流体模拟工具以满足低温流体系统设计与分析的特殊需求。这些工具独一无二地提供了整个低温容器系统（含压力系统）的集成模拟能力。这些模型能与结构和环境的热模型建立内在联系。相关内容可以在 SINDA/FLUINT 的高级综合设计、统计学分析和模型实验修正等模块 以及几何和非几何用户界面、培训及客户支持处获取。

低温系统设计应用：

- 氦压系统设计
- 低温工质管线骤冷过程 (ChillDown) 瞬态模拟
- 可再生喷嘴冷却 (Regenerative nozzle cooling)
- 低温泵骤冷过程瞬态模拟 (Cryogenic turbomachinery chilldown transients)
- 振荡抑止 (Pogo suppression)
- 防尾焰加热设计 (Anti-geyser design)
- 低温容器加压和排放过程模拟，包括热力分层、压力剂的溶解、液体毛细捕获设备等 (Cryogenic tank pressurization and discharge, including thermal stratification, dissolved pressurant, and capillary liquid acquisition devices)

以下是两个案例：

1. 液氢管线的骤冷过程模拟 (CHILLDOWN)
2. 低温容器的热力分层现象模拟

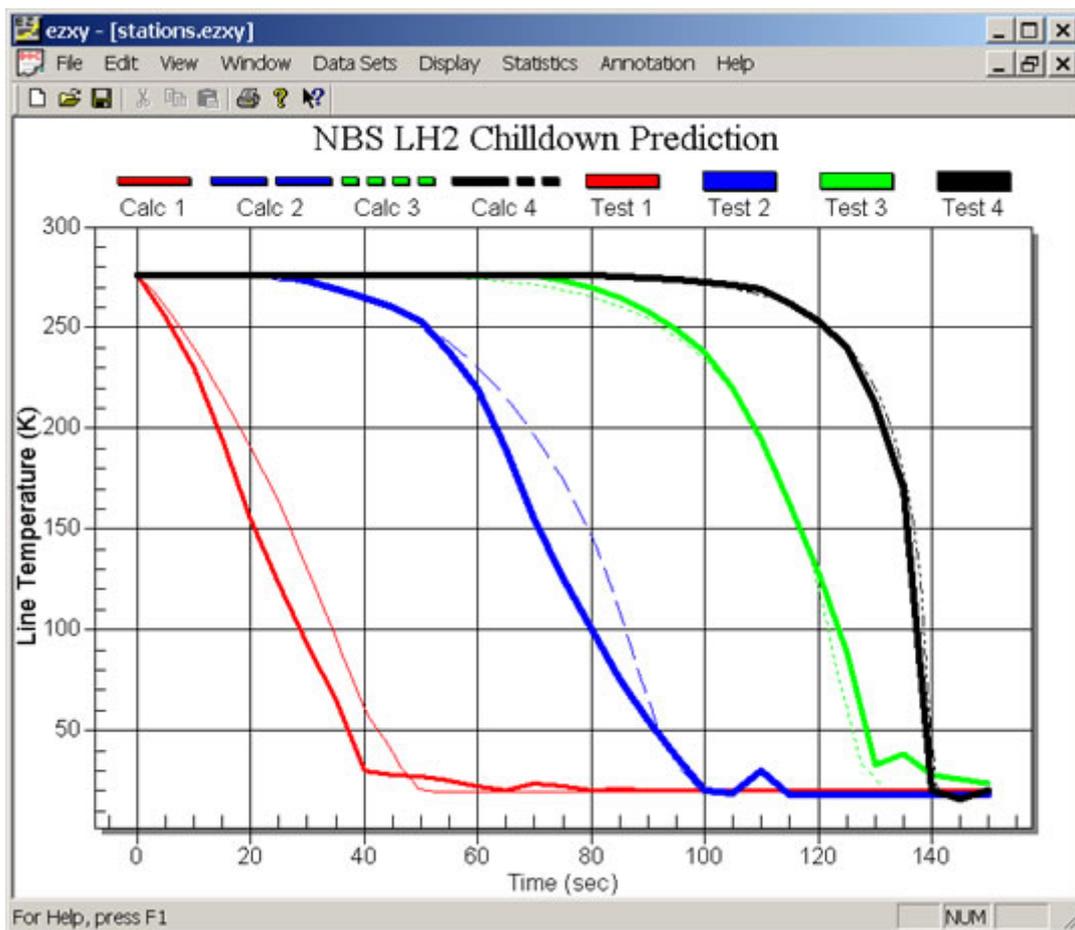
液氢管线的骤冷过程 (CHILLDOWN)

这个案例对比了 SINDA/FLUINT 计算结果与 1966 年美国国家标准局的实验数据 (现在的国家标准技术研究所 NIST)，新模型为 SINDA/FLUINT 4.7 版本，同时使用了 C&R 公司的 Thermal Desktop 和 FloCAD，用于建模和后处理。

在国家标准局的实验中，使用了 300 升容积的压力箱提供近乎常温常压的液氢。压力箱与大气环境间通过装有一系列阀门的空管线隔离。管线为真空隔离的 3/4 英寸铜管。在起始时刻，打开一个阀门 (假定是最下游处)，使得液氢流动起来并充满整个管线，然后在出口处排放。

与实验数据的对比

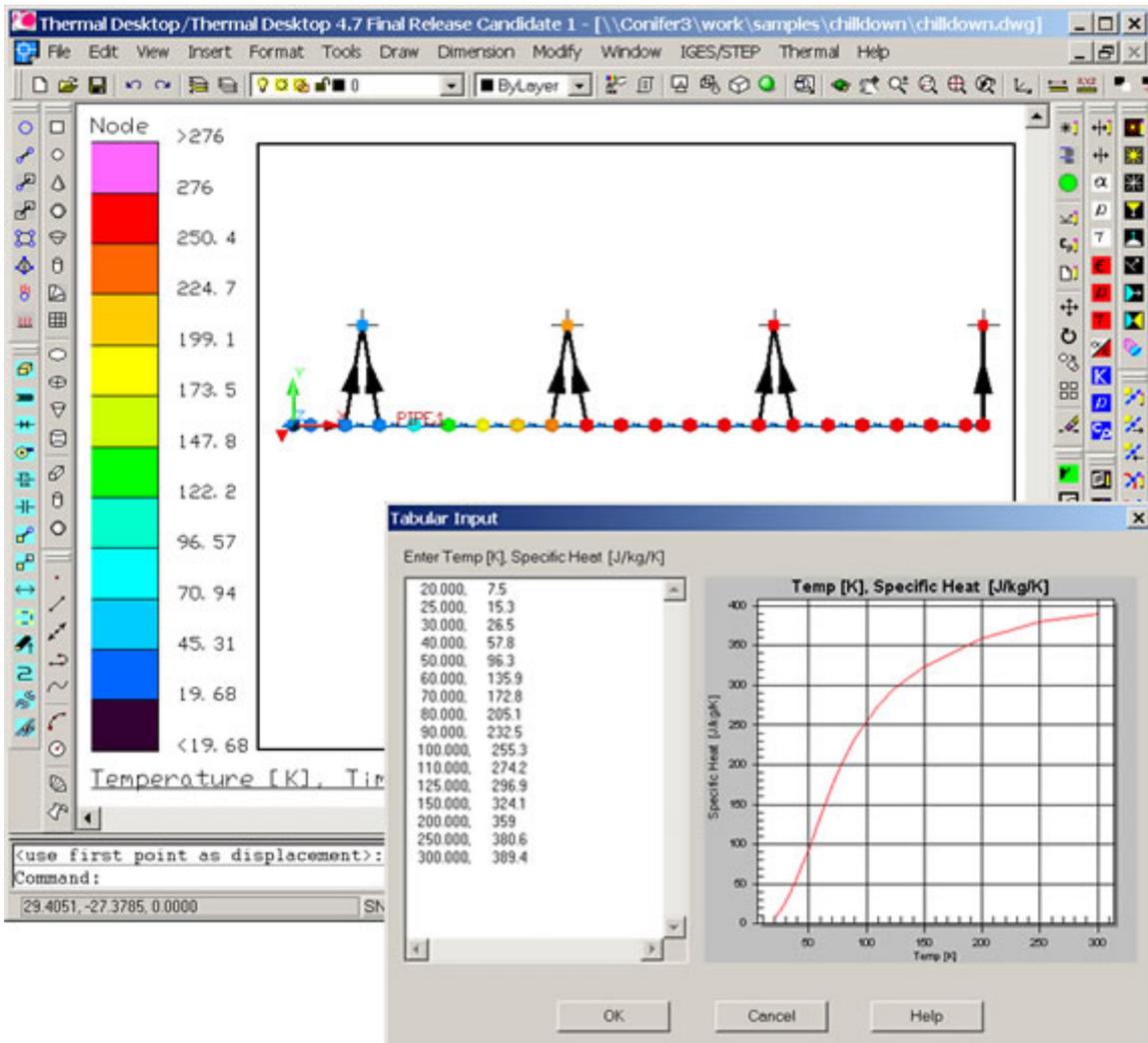
下面给出的瞬态变化规律代表了这次研究的主要内容——计算结果和国家标准局的实验数据对比。数据表明：计算得到的管线进口端注入速度稍稍快于实验结果，但在整体上，计算结果与实验数据符合程度很好，尤其对最重要的参数——管线完全冷却下来的时间 (液氢消耗时间)，模拟的非常准确。



借用第三方的实验数据进行分析评估通常都是很困难的，因为许多参数都是未知的。这个案例恰好是个例外，几乎所有的不确定参数都对最终结果没有影响或影响很小。但也有 2 个例外，就是铜的比热和壁面粗糙度。

比热 -- 随温度变化的比热对计算结果有着重要影响。比热影响显著的原因在于管线温度迅速下降的范围有 250K 之多。模型采用了抗氧化高热导铜的比热与温度关系曲线。这种材料虽然不太可能出现在 NBS 实验室的清单上，但是由于没有更好的数据，因此，尽管知道曲线比例系数的调整有可能会引起最终计算结果（时间）出现较大的变化，也未对此再做进一步的修正。

壁面粗糙度 -- 另一个不可忽略的、但影响相对较小的随机影响就是壁面粗糙度。上一部分给出的计算结果是在 $e/D = 0.0004$ (FLUENT 中的 WRF 系数) 条件下得到的，这个值比商用铜管粗糙度值稍稍高一些 ($e/D \sim 10^{-4}$)。给出偏高粗糙度值的原因是考虑到 NBS 报告中未描述接头或接缝等因素的影响。需注意的是，光滑壁面假设 ($e/D=0$) 只是会使降温时间加速 3.5%，所以粗糙度对计算结果的影响并不很重要。



低温容器的热力分层现象 (Thermally Stratified Cryogenic Tanks)

箱子是半空还是半满?

在预估低温制冷箱内部压力时，即使是乐观主义者也会遇到非常艰难的时刻，更不必说优化压力剂容器尺寸 (pressurant bottles) 和根据复杂的瞬态过程设计压力控制系统了。

CFD 工具能预计液体位置，并大致给出在近乎滞止的非液空间 (蒸汽/压力剂) 和液体区的缓慢环流 (recirculation)。但 CFD 软件经常在热力学 (如沸腾、溶解) 上偷工减料，而且不能模拟重要的瞬态现象，比如填料 (fill)、排放 (drain)、升压 (pressurization) 等过程。流动网络类型的程序则在热分层 (流体没有充分混合——压力虽然相同，但是存在由重力或环境热流诱导的温度梯度) 现象的模拟上遇到困难。

因此，C&R 在 SINDA/FLUINT 软件中开发了独一无二的处理此类特殊的非液空间和液体区分层问题的算法。包括重要不确定因素的处理和主要物理现象的描述，如：

- 换热器内与液位水平相关 (liquid level-dependent) 的所有变量的描述 (如沸腾 vs 冷凝)
- 池式沸腾、过冷沸腾、膜态沸腾和过渡沸腾 (超出临界热流和 Leidenfrost 温度，出现在燃料注入到暖壁温容器时) 模拟
- 耗散冷凝极限 (diffusion-limited condensation)、非液空间耗散 (diffusion within the ullage)、压力剂进出流体的溶解和析出过程。

右图是一个复杂专业模型的简化案例。结合 SINDA/FLUINT 软件的其它功能，可以将此模型改为更详细的压力系统模型的一个节点，或者是作为填充管线 (feedline) 或发动机模型的起始点。

