

ICS 27.120.10
CCS F83



团 体 标 准

T/CI 1033—2025

船舶核动力热力系统评估仿真 技术规范

Technical norm of thermal systems evaluation simulation in ship
used nuclear power plant

2025-06-04 发布

2025-06-04 实施

中国国际科技促进会 发布

湖北科学技术出版社 出版

目 次

前言.....	II
1 范围.....	1
2 规范性引用文件.....	1
3 术语和定义.....	1
4 船舶核动力热力系统评估仿真技术框架.....	3
5 船舶核动力热力系统评估仿真范围限定.....	4
5.1 模拟极限要求与工况限定.....	4
5.2 设备的仿真范围限定.....	4
5.3 系统的仿真范围限定.....	7
6 船舶核动力热力系统评估仿真模型接口与测试要求.....	9
6.1 接口类型限定.....	9
6.2 运行工况仿真范围限定.....	11
6.3 仿真测试范围限定.....	12
7 船舶核动力热力系统评估仿真模型评价.....	14
7.1 实时性评价规范.....	14
7.2 稳态结果评价规范.....	14
7.3 瞬态结果评价规范.....	14

前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由哈尔滨工程大学提出。

本文件由中国国际科技促进会归口。

本文件起草单位：哈尔滨工程大学、中国船舶集团有限公司第七一九研究所、中国人民解放军海军研究院、中国核工业集团有限公司核动力运行研究所、中国船舶集团有限公司第七〇三研究所。

本文件主要起草人：夏庚磊、孙凯琳、张元东、李韧、王琮、成守宇、魏巍、代守宝、王晨阳、廖毅、李磊、张博文、彭敏俊、陈广亮。

本文件为首次发布。

船舶核动力热力系统评估仿真技术规范

1 范围

本文件规定了船舶核动力热力系统评估仿真的仿真范围、测试方法、实时性要求和结果评价准则等。

本文件适用于压水堆核动力装置热力系统的评估仿真应用，包含蒸汽发生器以外的全部热力系统。其他堆型的汽水循环回路或采用朗肯循环作为热力循环的回路，在评估仿真过程中也可参考本文件进行。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件的必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB 13624 核电厂安全参数显示系统的功能设计准则

ANS 3.5 操作员训练和检验用核电厂模拟装置

HAF 102 核动力厂设计安全规定

NB/T 20015—2021 核电厂操纵人员培训及考试用模拟机

NB/T 25048—2016 核电厂汽轮机仿真调试技术导则

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

仿真 simulation

使用评估仿真开发环境下的建模技术来展示仿真机组的系统或子系统。

[来源：NB/T 20015—2021]

3.2

工况 working condition

评估仿真模型某一时间点的运行状态，全部参数的数据在该时间点的集合。

3.3

稳态工况 steady condition

未附加控制的仿真模型运行到稳定状态，全部压力、温度等强度量参数（不包含水位等广延量参数）在连续时间段内的变化小于 1%。

3.4

瞬态工况 dynamic condition

不同稳态工况之间的过渡过程。

3.5

故障工况 malfunction condition

向模型中人为插入内部或外部非预期运行因素而出现的动态过程。

3.6

初始条件 initial condition

一套代表被仿真对象状态而实时模拟，又可从这一状态开始的数据。

[来源：NB/T 20015—2021]

3.7

重现性 repeatability

模型以相同的时基关系、顺序、持续时间、速率和加速度，重复地对仿真模型进行稳态工况、瞬态工况和故障工况进行测试，得到一致性结果的能力。

3.8

复现性 reproducibility

模型能够针对作为输入的给定工况进行准确的表征与模拟。

3.9

预测性 predictability

模型能够针对未完全给定输入的工况，进行合理的预测性计算与模拟。

3.10

明显差异 noticeable difference

能够由肉眼观察判断、经专家证实的仿真计算结果与实装运行状态之间的差异，或瞬态工况、故障工况下的响应差异。

[来源：ANS 3.5, 5.1.8]

3.11

通用故障 general fault

由通用设备（电动泵、阀、旋转机械、螺杆机械、液压机械等）误动、拒动引起的故障。

3.12

特定故障 specific fault

由管道设备破损、失效或退化而引起的，针对特定管道、设备的故障。

3.13

设计基准事故 design basis accident

核动力系统按确定的设计准则在设计中采取了针对性措施的那些事故工况。

[来源：HAF 102]

3.14

时间步长 time step

仿真模型计算 1 次后，仿真时钟向前推进的时间。

3.15

实时模式 real time

按照真实世界动态性能相同的时间、顺序、速率和加速度所进行的动态模拟。

[来源：NB/T 20015—2021]

3.16

超实时仿真 ultra real time simulation

仿真模型求解完毕的时间小于 1 个时间步长，并在仿真进程控制下，实现仿真时钟的流逝速度快于实际时钟。

4 船舶核动力热力系统评估仿真技术框架

船舶核动力热力系统评估仿真技术框架如图 1 所示。

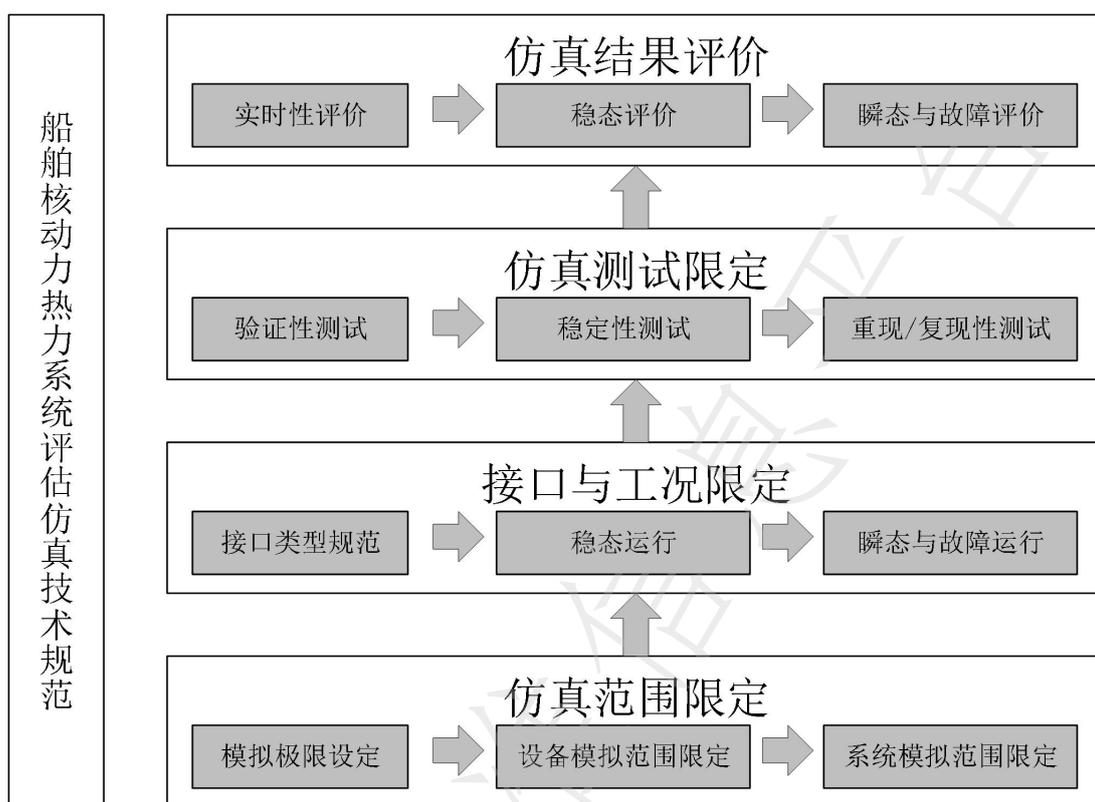


图1 船舶核动力热力系统评估仿真技术结构

5 船舶核动力热力系统评估仿真范围限定

5.1 模拟极限要求与工况限定

评估仿真模型在计算过程中，受相关理论限制，其运行工况与极限存在限制，不能无限制地对实际系统进行模拟，但又必须满足评估仿真的需要。这些模拟极限要求与工况限定如下：

- 在达到或超出模拟范围极限时，仿真模型应通过变量赋值提示相关人员，并中断仿真程序运行；
- 模型的仿真能力应满足评估目的的需求；
- 模型采用的经验公式，应满足评估仿真应用的工况范围；
- 建模过程所设立的简化假设等内容，必须符合仿真应用的目标；
- 建模完成后，分析的工况应限定在模型计算能力与许可的范围内。

5.2 设备的仿真范围限定

5.2.1 阀门的仿真范围限定

不同类型的阀门用处不同，其评估的内容也不相同，因此在评估仿真建模过程中，需要针对不同类型的阀门提出不同的仿真范围需求，这些阀门的仿真范围限定如下：

- 对于调节阀门，应模拟其不同开度、不同前后压差下的流量特性；
- 对于启闭阀门，应模拟其开关的动态过程；

- c) 对于安全阀门，应模拟其开启与关闭过程；
- d) 对于止回阀门，应模拟其止回特性、开关时间特性；
- e) 对于疏水阀、减压阀等自动阀门，除模拟其调节特性外，还应包括其自动调节过程；
- f) 对于手动阀门，应模拟其开关状态下的系统差异。

5.2.2 电动离心泵的仿真范围限定

电动离心泵包含定速泵与变频泵，其工作过程复杂、涉及学科众多，针对船舶核动力热力系统评估仿真的实际应用，需要对其仿真范围进行限定，这些限定如下：

- a) 对于定转速离心泵，应模拟其流量——扬程特性、电功率消耗特性；
- b) 对于变频泵，应模拟其不同转速下的流量——扬程、流量——效率、流量——功率特性；
- c) 电动泵应模拟启泵、停泵过程中，转速、电流、电功率的变化情况；
- d) 电动泵应能够模拟吸入近饱和工质导致的汽蚀现象；
- e) 电动泵模型应能模拟发热与对流体进行的加热现象。

5.2.3 推进用汽轮机仿真范围限定

推进用汽轮机负责将蒸汽的内能转化为机械能，其启动、运行与停止均是评估仿真的重要分析内容，因此需要明确的仿真范围限定，这些限定如下：

- a) 应模拟其不同进汽流量、不同凝汽压力下的热功转换特性，模拟功率输出、乏汽焓值；
- b) 模型应能够模拟不同船舶航速下的螺旋桨转速；
- c) 模型应能够模拟盘车过程；
- d) 模型应能够模拟汽轮机内除湿级或外置式汽水分离器的除湿效果；
- e) 模型应能模拟空车试转、空车飞车行为；
- f) 模型应能够模拟离合器的充放气工况。

5.2.4 发电用凝气式汽轮机仿真范围限定

发电用汽轮机负责将蒸汽的内能转化为机械能，并在指定转速下维持运行，随着船舶动力逐渐全电化，发电汽轮机成为评估仿真的重要分析内容，因此需要明确的仿真范围限定，这些限定如下：

- a) 应模拟其不同进汽流量、不同凝汽压力下的热功转换特性，模拟功率输出、乏汽焓值；
- b) 模型应能够模拟不同汽轮机转速下的效率及输出功；
- c) 模型应能够模拟转速调节过程与转速波动率；
- d) 模型应能够模拟汽轮机内除湿级或外置式汽水分离器的除湿效果；
- e) 模型应能模拟飞车行为；
- f) 模型应能模拟从热态停止到门槛转速的瞬态行为，模拟不同转速间的切换行为；
- g) 模型应能够模拟瞬间加载或卸载后的热力学参数、转速响应。

5.2.5 背压式汽轮辅机仿真范围限定

背压式汽轮辅机的耗汽、做功与排汽影响到蒸汽的热平衡计算，并对相关压力与耗汽的控制产生影响，因此其必须能够准确反馈运行特性，从而保证核动力系统模型计算准确，背压式汽轮辅机

仿真范围的限定如下：

- a) 应模拟其不同进汽流量、不同背压下的热功转换特性，模拟功率输出、乏汽焓值；
 - b) 模型应能够模拟不同汽轮机转速下的效率及输出轴功；
 - c) 模型应能够模拟转速调节过程；
 - d) 模型应能模拟飞车行为；
 - e) 模型应能模拟从热态停止到指定最低转速的瞬态行为，模拟不同转速间的切换行为。
- 来源[NB/T 25048—2016]

5.2.6 汽轮泵仿真范围限定

汽轮泵对蒸汽、凝给水、循环水、滑油等系统均产生高关联性的影响，其计算结果直接与热平衡参数进行对比，因此其必须能够准确反馈运行特性。汽轮泵仿真范围的限定如下：

- a) 汽轮辅机部分模拟能力要求同 5.2.5 中各条；
- b) 泵体部分模拟能力满足 5.2.3 中的 b)、d)、e) 条；
- c) 模型应能够模拟汽轮机进汽阀不变的情况下，由于汽蚀引起的转速波动；
- d) 模型应能够模拟导泵的加压行为，模拟导泵对汽蚀的抑制作用；
- e) 模型应能模拟泵出口的空排止回阀门；
- f) 模型应能模拟双泵并车时流量与压力的波动现象。

5.2.7 混合式换热器仿真范围限定

船舶核动力热力系统中的混合式换热器包括冷凝器除氧热井、除氧器、扩容器、冷却器等，其是稳态热平衡对比的重要设备之一，因此其必须能够准确反馈运行特性，从而保证评估仿真模型的准确性与模拟能力，混合式换热器仿真范围的限定如下：

- a) 模型应能模拟汽水直接接触换热的过程，计算换热功率；
- b) 模型应能模拟汽水间的换热速率以及瞬态热不平衡现象；
- c) 模型应能够模拟各种截面形状的水箱水位；
- d) 模型应能够模拟设备内部的凝结、闪蒸与沸腾行为，并计算相变速率；
- e) 模型应能模拟设备内部的压力与温度的变化情况；
- f) 模型应能够考虑设备散热损失及换热效率。

5.2.8 表面式换热器仿真范围限定

表面式换热器是船舶核动力热力系统中重要的能量交换设备，直接影响到系统的初、终状态，为实现评估仿真需求，必须进行规范化的仿真范围限定，其仿真范围的限定如下：

- a) 模型应能模拟汽水通过换热壁面开展的非接触换热的过程，包含管壳式换热器与印刷电路板式换热器，计算换热功率；
- b) 模型应能模拟两侧的换热速率以及瞬态热不平衡现象；
- c) 模型应能够模拟各种截面形状的壳侧水位；
- d) 壳侧如发生相变时，模型应能够模拟壳侧的相变行为，并计算相变速率、壳侧压力、温度等参数，以及凝结后的疏水温度、压力、水位等；
- e) 模型应能模拟设备因结垢导致的换热退化、阻力变大的现象；

- f) 模型应能够模拟换热管浸管、露出水面后的换热行为；
- g) 模型应能够考虑设备散热损失及换热效率。

5.2.9 变截面流动设备仿真范围限定

变截面原件一般影响压力分布，并可能因临界状态而影响流量，其仿真范围的限定如下：

- a) 模型应能模拟气体在元件内的流动过程，包括喷管、扩压管等；
- b) 模拟能够模拟工质流过时产生的压降过程；
- c) 模型能够模拟工质流经变截面元件后的流速。

5.3 系统的仿真范围限定

5.3.1 蒸汽部分系统仿真范围限定

蒸汽部分系统是以蒸汽工质为主的热力系统，其负责传输、消耗蒸汽，并进行相关调节，是船舶核动力热力系统评估仿真模型的重要组成，该部分系统仿真范围的限定如下：

- a) 蒸汽部分系统的各子系统间应维持良好的耦合关系，避免由于工质可压缩性过强、显式数值接口而引起的流动振荡现象；
- b) 蒸汽部分系统的各子系统均采用两相、五方程或六方程模型进行模拟，需能够模拟不同干度下的汽水流动与换热过程；
- c) 主蒸汽系统应进行全面、详细的仿真，仿真蒸汽在管道内的传输、换热与热功转化过程。主蒸汽系统的模拟范围应包括支管、母管、阀门。主蒸汽系统应模拟的故障包括电动阀门拒动、误动的通用故障，以及各主要管道的特定故障如破损、断裂等；
- d) 辅蒸汽系统应进行全面的仿真，仿真蒸汽在辅蒸汽管道内的传输、换热与热功转化过程，模拟辅蒸汽系统对蒸汽的消耗过程。辅蒸汽系统的模拟范围应包括支管、母管、阀门、汽轮发电机组、汽轮辅机、各抽汽器等辅蒸汽消耗设备。辅蒸汽系统应模拟的故障包括电动阀门的通用故障、管道的特定故障，汽轮发电机组的特定故障如超速、调节阀速关，汽轮辅机的特定故障；
- e) 乏汽系统应进行全面的仿真，仿真蒸汽在乏汽管道内的传输与换热过程，模拟乏汽的产生、补充与消耗过程。乏汽系统的模拟范围应包括支管、母管、阀门、汽轮辅机排汽管线等乏汽产生设备，乏汽补充管线及补充阀，汽封、造水等乏汽消耗设备，乏汽排放管线、排放阀门。乏汽系统应模拟的故障包括电动调节阀门的通用故障、管道的特定故障；
- f) 蒸汽排放系统应进行不低于简化仿真层级的仿真，至少能够仿真蒸汽在蒸汽排放管道、阀门内的传输过程，在减温减压器内的降压、混合换热过程，模拟蒸汽与冷却水的混合。蒸汽排放系统的模拟范围应包括支管、排放阀门、减温减压箱。蒸汽排放系统应模拟的故障包括排放阀门的通用故障；
- g) 其他蒸汽系统，如高低压吹除系统、通海阀吹除系统等，在没有要求的情况下，应至少对其进行功能仿真，或按实际需要进行仿真。所实现的功能应包括仿真蒸汽在相关辅助管道、阀门内的传输、流动过程，截止阀门的截止功能。上述系统应模拟的故障包括电动阀门的通用故障。

5.3.2 淡水部分系统仿真范围限定

淡水部分系统是以凝水、给水、冷却淡水等淡水工质为主的热力系统，其负责传输淡水，并进

行相关调节与换热，部分参与朗肯循环的系统是船舶核动力热力系统评估仿真模型的重要组成，该部分系统的仿真范围的限定如下：

- a) 淡水部分系统的各子系统间应维持良好的耦合关系，由于水工质可压缩性差，分系统可以在同一仿真模型中模拟，也可按实际系统流程独立模拟，通过显式数值接口进行系统间连接与数据交互；
- b) 为考虑水的汽化过程，淡水部分系统的各子系统均应采用两相、五方程或六方程模型进行模拟，能够模拟不同温度、压力下，水的流动与换热、相变过程；
- c) 凝给水系统应进行全面、详细的仿真，仿真凝水、给水在管道内的传输、加压、节流与散热过程。凝给水系统的模拟范围应包括支管、母管、阀门、凝水泵、给水泵、给水加热器或除氧器、冷凝器、淡水舱、冷凝器水位调节线路。凝给水系统应模拟的故障包括电动阀门的通用故障，水泵的汽蚀、拒动、误动，以及水位过低或过高，各主要管道的破损、断裂，冷凝器失真空等设备特定故障；
- d) 辅凝水、辅给水系统（如有）应进行全面的仿真，仿真辅凝水、辅给水在管道内的传输、加压、节流与散热过程，模拟辅凝水、辅给水的产生、运输以及消耗过程。辅凝水、辅给水系统的模拟范围应包括支管、母管、阀门、辅凝水泵、辅给水泵、辅冷凝器等设备。系统应模拟的故障包括电动阀门、泵的通用故障，管道、辅冷凝器的特定故障；
- e) 冷却水系统应进行简化的仿真，仿真淡水冷却水在闭环系统内的传输、吸热、放热过程，模拟淡水冷却水的稳压、补充、加压过程。系统的模拟范围应包括支管、母管、阀门、淡水泵、淡水冷却器、各冷却设备加热边界、各冷却设备截止阀、调节阀等。系统应模拟的故障包括电动阀门的通用故障；
- f) 其他淡水系统，如疏水系统、药剂水系统等，应进行功能仿真、简化仿真或按实际需要进行更高层级的仿真，仿真淡水在相关辅助管道、阀门内的传输、换热过程，截止阀门的截止功能，泵的加压泵送功能。上述系统应模拟的故障包括电动阀门、泵的通用故障。

5.3.3 海水部分系统仿真范围限定

海水部分系统是以海水工质为主的热力系统，其负责传输海水并冷却相关设备，并进行相关调节，是整个核动力系统的最终热阱，也是船舶核动力热力系统评估仿真模型的重要组成，该部分系统的仿真范围的限定如下：

- a) 海水部分系统的各子系统间应维持良好的耦合关系，由于水工质可压缩性差，分系统可以在同一仿真模型中模拟，也可按实际系统流程独立模拟，通过显式数值接口进行系统间连接与数据交互；
- b) 除海水淡化系统（造水系统）需要考虑水的汽化过程外，其他子系统通常不考虑相变过程。因此，海水淡化系统（造水系统）应采用两相、五方程或六方程模型进行模拟，能够模拟不同温度、压力下，水的流动与换热、相变过程；其他海水系统可采用单项、三方方程模型进行模拟。海水需要考虑低于 0℃ 的工况仿真；
- c) 循环水系统应进行全面、详细的仿真，仿真循环水在管道内的传输、加压、节流与冷凝器管侧的吸热过程。循环水系统的模拟范围应包括支管、蝶阀、循环水泵、冷凝器管侧线路。循环水系统应模拟的故障包括电动阀门的通用故障，水泵的拒动、误动故障；
- d) 海水淡化系统（造水系统）应进行简化层级以上的仿真，仿真不同造水机（含闪发式、低压浸

管式、RO 反渗透式等)的造水、排盐过程,模拟淡水的生产与运输过程。系统的模拟范围应包括支管、母管、阀门、淡水泵、排盐泵、预热器(如有)、闪发器(如有)、加热器(如有)、反渗透机组(如有)等设备。系统应模拟的故障包括电动阀门、泵的通用故障,反渗透机组堵塞、泄漏的特定故障(如有);

- e) 其他海水系统,如海水冷却系统、轴系海水系统等,应进行功能仿真、简化仿真或按实际需要进行更高层级的仿真,仿真海水在相关辅助管道、阀门内的传输、流动、换热过程,截止阀门的截止功能,泵的加压泵送功能。上述系统应模拟的故障包括电动阀门、泵的通用故障。

5.3.4 油部分系统仿真范围限定

油部分系统是以润滑油、压力油等单相液相不可相变工质为主的热力系统,其负责传输、加压各类油品,并冷却相关设备。该部分系统的仿真范围的限定如下:

- a) 油部分系统的各子系统间应维持良好的耦合关系,由于油工质可压缩性差,分系统可以在同一仿真模型中模拟,也可按实际系统流程独立模拟,通过显式数值接口进行系统间连接与数据交互;
- b) 油系统中的子系统通常不考虑相变过程。因此可采用单相、三方程模型进行模拟;
- c) 主滑油系统应进行简化仿真,仿真滑油在管道内的传输、流动、加压、与各润滑设备的吸热过程。滑油系统的模拟范围应包括支管、阀门、滑油泵、冷各用油设备简化的线路。滑油系统应模拟的故障包括电动阀门的通用故障,泵的拒动、误动故障;
- d) 调节油系统应进行功能层级以上的仿真,仿真调节油泵的启动、油的输送与加热、冷却过程,系统的模拟范围应包括支管、阀门、调节油泵。本系统仿真模型无故障要求;
- e) 其他用油系统,如汽轮泵自带的润滑系统、轴系滑油系统等,应进行功能仿真或按实际需要进行更高层级的仿真,仿真相关油工质在管道内的传输与泵送程。

5.3.5 空气系统仿真范围限定

空气系统是以空气、氮气等单相不可相变、不溶气工质为主的热力系统,其负责传输、加压各类气体,并输送至指定用气设备。该部分系统的仿真范围的限定如下:

- a) 空气系统应进行功能层级以上的仿真,用于模拟高压、中压空气的流动分配、减压过程。空气系统的模拟范围应包括支管、阀门、压缩机、减压装置、气瓶。空气系统仿真模型无故障设置要求;
- b) 空气系统工质应按比例设置氮气、氧气组分,将空气视作不凝、不溶的气体。

6 船舶核动力热力系统评估仿真模型接口与测试要求

6.1 接口类型限定

船舶核动力热力系统评估模型系统与系统、系统与设备间不可避免的存在接口,为了统一化数据接口的标准,实现不同设计单位模型的通用,提出以下规范:

- a) 船舶核动力热力系统内部多系统模型间的接口,以显式的数值格式进行数据传递,具体分为传热接口、传热接口、动量接口与转速接口;

- b) 船舶核动力热力系统内部多系统模型间的接口,在进行数据传递与交互过程中,必须保证接口处的质量、能量与动量守恒,并不得影响各自系统内部的质量、能量与动量守恒;
- c) 模型间的接口需维持连接的刚性,尽量避免为了追求求解稳定而采用延迟、平均、滤波等工程数值处理手段。
- d) 船舶核动力热力系统评估仿真模型与其他系统(如反应堆物理、控制系统、电力系统等)模型间的连接,参考本节系统进行。

6.1.1 传质接口规范

传质接口是系统-系统、系统-设备间,既传递工质质量流量,又跟随工质流动传递能量的接口,具体规范如下:

- a) 传质接口为双向接口,在相互连接的甲乙系统中,工质既能够从甲系统传递至乙系统,也可以从乙系统传递至甲系统;
- b) 传质接口传递的数据为接口处的质量流量,流动工质的温度(或比焓、比内能),以及另一系统对应的流入(或流出)压力。系统间工质的流动需能够体现工质的种类、相态、携带能量;
- c) 传质接口分为质量流量边界与压力边界两部分,在相互连接的甲乙系统中成对使用,甲系统采用压力边界流出质量时,乙系统采用质量流量边界流入;甲系统采用质量流量边界流出质量时,乙系统采用压力边界流入。质量流量边界中的质量流量可以为正值(正向流动)、0(不流动)、负值(反向流动);
- d) 对于未进行模拟的外界系统,需要按照实际系统的需要,选用质量流量边界与压力边界中的1个进行模拟;
- e) 系统间通过传质接口连接时,必须保证系统的总工质质量不变,不得影响系统内工质的质量守恒。

6.1.2 传热接口规范

传热接口是系统-系统、系统-设备间,只传递能量/热量,但不发生工质质量流量传递的接口,具体规范如下:

- a) 传热接口为双向接口,在应用传热接口相互连接的甲乙系统中,热量既能够从甲系统传递至乙系统,也可以从乙系统传递至甲系统;
- b) 传热接口传递的数据为接口处的热功率,另一系统的工质温度(或比焓、比内能),以及对应的流速(或雷诺数)。系统间热量的流动需能够体现传热速率,通过传热接口相连接的系统,没有质量交换,仅有能量交换;
- c) 传热接口分为功率边界与温度边界两部分,在相互连接的甲乙系统中成对使用,甲系统采用温度边界流出能量时,乙系统采用功率边界流入;甲系统采用功率边界流出能量时,乙系统采用温度边界流入。功率边界中的热功率可以为正值(加热)、0(不换热)、负值(制冷)。功率边界应指明其所作用工质的相态;
- d) 对于未进行模拟的外界系统,需要按照实际系统的需要,选用功率量边界与温度边界中的1个进行模拟外界环境的加热或散热;
- e) 系统间通过传热接口连接时,必须保证系统的总能量不变,不得影响系统内工质的能量守恒。

6.1.3 动量接口规范

传热接口是系统-系统、系统-设备间，只传递动量，不发生工质质量、流量与能量传递的接口，表现为流动受到阻力或者提升力，具体规范如下：

- a) 动量接口为单向接口，在应用动量接口连接相互连接的甲乙系统时，仅体现甲系统（或设备）对乙系统中动量的提升或削弱作用；
- b) 动量接口传递的数据为接口处的动量提升（或削弱）量。系统间动量的传递流是单向的，仅对被作用系统产生作用；
- c) 动量接口适用于泵、阀、阻力件、孔板、汽轮设备等对系统产生动量提升（或削弱）的系统设备对目标系统的作用体现，对于未进行模拟的动量源或阱，也可通过动量边界连接入系统；
- d) 系统间通过动量接口连接时，必须保证整体系统的总动量不变，不得影响系统内工质的动量守恒。

6.1.4 转速接口规范

转速接口是热力系统与旋转机械的接口，主要用来计算设备的转速受动力、阻力的影响，具体规范如下：

- a) 转速接口为单向接口，在应用转速接口连接相互连接的甲乙系统时，仅体现乙系统耗能需求对甲系统边界处的设备转速的影响；
- b) 转速接口传递的数据为下游系统的能量需求量与转速；
- c) 转速接口适用于泵、发电机、推进用汽轮机等旋转设备，对于未进行模拟的能量消耗系统或转动设备，也可通过转速接口连接入系统。

6.2 运行工况仿真范围限定

6.2.1 稳态工况限定

仿真工况是测试、评价与应用评估仿真模型的重要因素，评估仿真模型不可能在任何稳态工况下都稳定准确运行。针对评估仿真应用，其限定如下：

- a) 仿真系统进行相关稳态工况仿真时，需要覆盖全部的可能出现的运行稳态，包含热平衡计算的各稳态工况、动力系统长期运行的各稳态工况、需要在系统稳定运行时进行相关操作的各稳态工况；
- b) 稳态工况的仿真基准工况为设计满工况，其他工况的计算均基于仿真系统在设计满工况下的设备变动而来；
- c) 系统的阻力特性、设备特性等参数，在不同稳态工况下需与设计满工况仿真模型中保持一致，在不同的稳态工况下不应通过修改系统特性实现稳定计算；
- d) 稳态工况不宜进行扩展，除上述 a) 条目中列举的工况外，考虑系统设备的运行特性，允许部分特殊功率点处不能长期稳定运行，但这部分功率点需进行严格论证，确认系统设备特性导致。

6.2.2 正常瞬态工况限定

评估仿真模型理论上应能模拟全部正常瞬态，正常瞬态工况的限定如下：

- a) 评估仿真系统能够进行冷启动模拟。从管路充满空气状态进行模拟，模拟注入工质、释放空气

过程；

- b) 评估仿真系统能够进行暖管模拟。从管路充满对应工质进行模拟，模拟暖管、吹除、启动疏水过程；
- c) 评估仿真系统能够进行不同功率间连续升降功率的模拟。从系统热态至额定满功率，评估仿真系统应能进行设计功率变化速率范围内任意速率、任意功率范围内的连续升降功率过程模拟；
- d) 评估仿真系统能够进行不同功率间阶跃升降功率的模拟。从系统最低稳定运行工况至额定满功率，评估仿真系统应能进行 5%以内（含 5%）的阶跃快速功率负荷变动模拟。

6.2.3 故障瞬态工况限定

评估仿真模型应具备一定程度上的故障瞬态模拟能力。由于模型算法、数值求解等内容的限制，导致其可能难以模拟全部的故障工况，但至少应满足以下限定：

- a) 评估仿真系统能够进行通用故障状态下的模拟，包含泵阀拒动、误动情况下的模拟，能够计算短时间内的系统响应；
- b) 评估仿真系统能够进行特定故障的模拟，包含管道泄漏、堵塞，设备特性退化、换热壁面结垢等；
- c) 热力系统评估仿真模型在与其他系统模型联合调试后，对设计基准事故下船舶核动力热力系统的主要参数的变化具有定量模拟能力，并可计算相关安全参数。

来源[GB 13624]

6.3 仿真测试范围限定

6.3.1 准确性测试规范

评估仿真结果的准确性是最重要的指标参数。不同重要程度的模型均应直接取自仿真模型的计算结构，而不可进行额外的修饰或处理，具体规范如下：

- a) 系统的重要参数，包括蒸汽流量、汽发（主机）输出轴功率，需要同设计基准数据或热平衡数据相比，提取参数为在稳态运行条件下，稳定运行 5 min 后的计算结果；
- b) 系统的主要参数，包括蒸汽温度、各用汽设备耗汽、泵扬程、凝/给水流量，需要同设计基准数据或热平衡数据相比，提取参数为在稳态运行条件下，稳定运行 5 min 后的计算结果；
- c) 系统的其他热力学参数，包括各设备进汽干度/温度、排汽焓、冷却器出口温度等，需要同设计基准数据或热平衡数据相比，提取参数为在稳态运行条件下，稳定运行 5 min 后的计算结果；
- d) 设有测点的非重要参数，如液位等，由于在设计阶段无设计基准数据或热平衡数据，因此不进行比对，需要对参数的区间、变化趋势等进行分析。

6.3.2 实时性测试规范

仿真系统是否具有实时性能，是评价其评估能力的重要部分。本部分内容对实时性测试做出了具体要求，如下所示：

- a) 仿真系统消耗计算资源有限、可控，单进程占用算力不会导致仿真计算机死机、内存溢出、程序闪退；
- b) 仿真时钟与真实时钟保持同步，在不同的运行环境下进行同步性测试，对比仿真时钟与实际时

钟；

- c) 仿真程序在满足 a)、b) 两条的基础上，正常稳态、瞬态运行时，不出现死机、闪退现象；
- d) 评估仿真系统原则上应具有实时仿真能力，根据实际使用需要进行要求，可要求超实时或欠实时仿真。

6.3.3 稳定性测试规范

系统稳定性是确定系统是否具备稳定的稳态、瞬态模拟分析能力的重要性能指标，其具体测试规范如下：

- a) 系统在 6.2.2 节中的工况进行仿真时，程序重要参数、主要参数不出现振荡情况；
- b) 系统在 6.2.3 节中的工况进行仿真时，程序重要参数、主要参数不出现长时间高频大幅度振荡。故障模拟超出仿真能力边界时应进行提示，而非直接闪退；
- c) 系统运行结果不受外界环境影响，在仿真主计算机运行其他程序且未占用满计算负荷时，仿真系统不受其他程序或软件的影响。

6.3.4 时间漂移测试规范

在稳态运行情况下，各调节设备不动作，随着仿真时间的推移，稳态结果不应受仿真时间的影响。时间漂移测试规范如下：

- a) 系统在 6.2.1 中的工况进行仿真时，系统的重要参数、主要参数、其他热力学参数在达到稳定的时刻与达到稳定后的 3 h 相比，偏差不应大于 1%；
- b) 系统在 6.2.2 中的工况进行仿真时，在系统完成瞬态工况并稳定后，系统的重要参数、主要参数、其他热力学参数在达到稳定的时刻与达到稳定后的 3 h 相比，偏差不应大于 1%；
- c) 系统在 6.2.3 中的工况进行仿真时，系统故障修复并达到稳定运行状态后，系统的重要参数、主要参数、其他热力学参数在达到稳定的时刻与达到稳定后的 3 h 相比，偏差不应大于 2%。

6.3.5 重现性测试规范

仿真模型应具有确定性。针对同一初始条件、同样操作步骤，所得到的稳态、瞬态参数在多次测试下应保持一致，使对固定稳态、瞬态的模拟具有确定的模拟效果，重现性是评价仿真模型预测能力的重要依据，具体测试规范如下：

- a) 系统在 6.2.1 中的工况进行仿真时，无论初始工况在何处，每次复位该运行工况时，系统均能保持一致的运行状态，各参数变化趋势、速度一致；
- b) 系统在 6.2.2 中的工况进行仿真时，在进行完全相同的操作、完全相同的时序下，系统内各参数的瞬态响应一致；
- c) 系统在 6.2.3 中的工况进行仿真时，当事故处理操作一致的情况下，各曲线趋势保持一致。当故障修复后，运行结果趋势保持一致。

6.3.6 复现性测试规范

复现性作为仿真系统对给定数据的复现能力指标，是评价评估仿真结果的重要依据之一。所建立的评估仿真模型必须能够复现输入的给定数据，具体测试规范如下：

- a) 系统针对作为仿真输入的给定稳态工况的仿真结果，能够满足 6.3.1 中的准确性要求；
- b) 系统针对作为仿真输入的给定瞬态工况的仿真结果，各主要参数的变化趋势、变化时序与给定一致，瞬态过程中仿真结果的最大值、最小值与实际偏差不超过 5%，出现时序与实际过程一致；
- c) 系统针对作为仿真输入的给定故障工况的仿真结果，各主要参数的变化趋势、变化时序与给定一致，影响系统安全的参数、引起保护系统动作的参数仿真结果的最大值、最小值与实际过程偏差不超过 2%，其他主要监测参数仿真结果的最大值、最小值与实际偏差不超过 5%，保护系统自动投入的时序与实际过程一致。

7 船舶核动力热力系统评估仿真模型评价

7.1 实时性评价规范

仿真实时性评价是确定仿真模型能否达到实时计算的能力、是否具备实时运行的条件而开展的评价。实时仿真可以与真实世界同步，具有 1:1 时序还原系统运行特性的特点，是评估仿真模型的重要属性。其评价规范具体如下：

- a) 仿真时钟与真实时钟保持同步，在进行至少 5 min 的仿真时间时，仿真时钟与实际时钟的相对偏差不超过 1%，评价结果称仿真模型满足实时仿真要求；
- b) 仿真时钟与真实时钟相比较慢，CPU 计算负荷满载，评价结果称仿真模型不满足实时仿真要求；
- c) 仿真时钟与真实时钟相比较慢，但 CPU 计算负荷未满载，评价结果称仿真平台不满足实时仿真要求，仿真模型无法确定；
- d) 仿真时钟与真实时钟相比较快，评价结果称仿真平台不满足实时仿真要求，仿真模型满足实时仿真要求。

7.2 稳态结果评价规范

稳态分析结果是评估仿真模型准确性判断的重要依据，其直接决定评估仿真模型是否能够承担评估任务需求，因此需要规范化、统一化稳态仿真结果的评价，本部分规范如下：

- a) 系统的重要参数，包括蒸汽流量、汽发（主机）输出轴功率，同设计基准数据或热平衡数据相比，偏差不大于 1%；
- b) 系统的主要参数，包括蒸汽温度、各用汽设备耗汽、泵扬程、凝/给水流量，同设计基准数据或热平衡数据相比，偏差不大于 2%；
- c) 系统的其他热力学参数，包括各设备进汽干度/温度、排汽焓、冷却器出口温度等，同设计基准数据或热平衡数据相比，偏差不大于 5%；
- d) 设有测点的非重要参数，如液位等，要求不同功率阶梯下参数的数值处于合理的范围区间，在不同功率阶梯下的参数趋势合理。

7.3 瞬态结果评价规范

瞬态分析结果是评估仿真输出的重要结果，其准确程度的评价直接影响评估仿真是否满足使用

需求，因此需要规范化、统一化瞬态仿真结果的评价，本部分规范如下：

- a) 系统的重要参数及主要参数，在对 6.2.2、6.2.3 中的工况进行仿真时，程序重要参数、主要参数未出现不合理的高频现振荡情况；
 - b) 系统的各参数在 6.2.2 中的工况进行仿真时，峰谷值均不得超越安全边界，系统重要参数、主要参数、其他热力学参数的变化趋势符合理论分析或样机试验数据，瞬态时间切片参数分布合理，设有测点的非重要参数处在调控区间内；
 - c) 系统进行 6.2.3 中的工况进行仿真时，参数的变化趋势符合安全分析结论或样机试验数据，允许无人干预时的短时间运行。
-

团 体 标 准

船舶核动力热力系统评估仿真技术规范

T/CI 1033—2025

*

湖北科学技术出版社出版发行

武汉市雄楚大街268号湖北出版文化城B座

13—14座 (430070)

总编室: (027) 87679429

湖北新华印务有限公司印刷

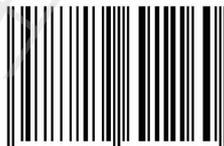
各地新华书店经销

*

开本 880×1230 1/16 印张 1.25 字数 12 千字

2025年4月第一版 2025年4月第一次印刷

书号: 155706 · 117 定价: 53元



6 977819 691160

版权专有, 侵权必究