

ICS 47.020.60
CCS U61

团 体 标 准

T/CAMETA XXXXX-20XX

船舶综合电力系统运行模式的安全 评估方法

Safety Evaluation Method for Operational Mode of Ship Integrated
Power System

(征求意见稿)

20××-××-××发布

20××-××-××实施

中国机电一体化技术应用协会 发布

目 次

| | |
|-----------------------------|----|
| 前 言 | 3 |
| 1 范围 | 4 |
| 2 规范性引用文件 | 4 |
| 3 术语和定义 | 4 |
| 3.1 船舶综合电力系统 | 4 |
| 3.2 运行模式 | 4 |
| 3.3 失效模式 | 4 |
| 3.4 设备失效概率 | 4 |
| 3.5 连锁故障概率 | 4 |
| 3.6 功率裕度 | 5 |
| 3.7 安全评估模型 | 5 |
| 3.8 安全评估值 | 5 |
| 3.9 安全运行等级 | 5 |
| 4 运行模式分类 | 5 |
| 4.1 正常运行模式 | 5 |
| 4.2 应急运行模式 | 5 |
| 4.3 低负荷运行模式 | 5 |
| 4.4 高负荷运行模式 | 5 |
| 4.5 岸电供电模式 | 5 |
| 5 故障模式分析 | 6 |
| 6 安全评估模型的构建与安全评估值的计算 | 7 |
| 6.1 基于失效模式的安全评估模型 | 7 |
| 6.1.1 安全评估模型建立方法 | 7 |
| 6.1.2 安全评估值计算公式 | 7 |
| 6.1.3 应用原理 | 7 |
| 6.2 基于设备失效概率预测的安全评估模型 | 7 |
| 6.2.1 安全评估模型建立方法 | 8 |
| 6.2.2 安全评估值计算公式 | 8 |
| 6.2.3 应用原理 | 8 |
| 6.3 基于连锁故障概率预测的安全评估模型 | 8 |
| 6.3.1 安全评估模型建立方法 | 8 |
| 6.3.2 安全评估值计算公式 | 8 |
| 6.3.3 应用原理 | 8 |
| 6.4 基于功率裕度的安全评估模型 | 8 |
| 6.4.1 安全评估模型建立方法 | 8 |
| 6.4.2 安全评估值计算公式 | 9 |
| 6.4.3 应用原理 | 9 |
| 7 系统安全运行等级划分与评定 | 9 |
| 7.1 安全评估值综合加权 | 9 |
| 7.2 安全运行等级的划分标准 | 10 |

| | |
|----------------------|----|
| 7.3 安全运行等级评定方法..... | 10 |
| 7.3.1 计算综合安全评估值..... | 10 |
| 7.3.2 根据评估值划分等级..... | 10 |
| 7.3.3 提出安全性改进建议..... | 10 |
| 7.4 应用实例..... | 10 |
| 8 评估模型的适用条件与局限性..... | 11 |
| 9 实施与应用指南..... | 12 |
| 9.1 标准实施的步骤..... | 12 |
| 9.1.1 确定评估对象和工况..... | 12 |
| 9.1.2 收集和整理数据..... | 12 |
| 9.1.3 选择评估模型..... | 12 |
| 9.1.4 计算安全评估值..... | 12 |
| 9.1.5 综合评估与等级划分..... | 12 |
| 9.1.6 提出安全改进建议..... | 12 |
| 9.2 应用指南..... | 13 |
| 9.2.1 定期评估与监控..... | 13 |
| 9.2.2 实施动态调整..... | 13 |
| 9.2.3 集成管理系统..... | 13 |
| 9.2.4 培训与技术支持..... | 13 |
| 参考文献..... | 13 |

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。

本文件由中国机电一体化技术应用协会提出并归口。本文件某些内容可能涉及专利，本标准发布单位不承担识别这些专利的责任。

本文件起草单位：中国舰船研究院、哈尔滨工程大学、中国船舶集团有限公司第七〇一研究所、中国船舶集团有限公司第七一二研究所

本文件主要起草人：王浩、张兰勇、杨天旨、姚钦博、龙飞、王五桂、赵凯岐、谭银朝、任元杰、赵世泉、刘胜兰、郝路丰、李陇南、陈卓、殷进军、胡国昭、柯常国、任伟杰

船舶综合电力系统运行模式的安全评估方法

1 范围

本文件确立了船舶综合电力系统运行模式的安全评估方法，通过建立四种安全评估模型，对船舶综合电力系统在不同工况下可能发生的多种故障模式进行评估，得出系统安全评估值，最终对系统的安全运行等级进行划分。

本文件适用于各类船舶综合电力系统的运行模式评估，包括但不限于正常运行模式、应急运行模式、低负荷运行模式、高负荷运行模式以及岸电供电运行模式的安全评估。

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/T 35719-2017 船舶中压直流电力系统通用要求

GB/T 7357-2010 船舶电气设备 系统设计 保护

GB/T 40581-2021 电力系统安全稳定计算规范

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件

3.1 船舶综合电力系统

由发电设备、配电设备、用电设备及控制系统组成的整体电力供应和管理系统，用于船舶的电力生成、分配和使用，确保船舶各项电力需求的高效满足。

3.2 运行模式

船舶综合电力系统在不同运行状态下，为保障系统稳定、安全和高效运行所采取的操作模式，包括正常运行模式、应急运行模式、低负荷运行模式、高负荷运行模式以及岸电供电运行模式。

3.3 失效模式

船舶综合电力系统或其组成设备在特定工作条件下出现故障的方式或形式。失效模式可以是系统中任何设备或功能失效的表现，包括电力设备的停运、功能丧失或性能下降等。

3.4 设备失效概率

在一定时间范围内，船舶综合电力系统中某一设备发生故障的可能性。该概率通常通过历史数据、故障模式和环境因素等进行统计分析，用于反映设备的可靠性。

3.5 连锁故障概率

系统中初始故障引发连锁反应、导致其他设备或功能失效的概率。在船舶综合电力系统中，连锁故障的概率与设备间的相互依赖、故障传播路径及系统的冗余性密切相关。

3.6 功率裕度

船舶综合电力系统在正常运行情况下，系统可用的冗余功率容量。它代表了系统在面临负荷突增、设备故障等情况时，能够承受的最大额外功率负载。

3.7 安全评估模型

通过定量分析船舶综合电力系统中故障模式、设备失效概率、连锁故障以及功率裕度等因素，评估系统在不同工况下的安全状态的数学或计算模型。

3.8 安全评估值

安全评估值是指通过应用安全评估模型计算得到的系统安全性指标，用于量化船舶综合电力系统在特定运行模式下的安全性。反映了系统在面临故障模式、设备失效概率、连锁故障等因素的影响下，其安全运行的可能性。

3.9 安全运行等级

根据安全评估值将船舶综合电力系统在特定工况下划分为不同的安全等级。根据评估结果，系统的安全运行等级通常分为四个等级：安全、不安全、紧急和不工作。

4 运行模式分类

4.1 正常运行模式

正常运行模式是指船舶综合电力系统在无故障和异常情况下的运行状态。在该模式下，系统各部分均按照预定的设计参数和操作流程正常工作，确保船舶的电力需求得到充分满足。

4.2 应急运行模式

应急运行模式是指在发生故障或紧急情况下，船舶综合电力系统采取的特定运行状态。该模式旨在确保船舶关键设备的持续供电，并最大限度地降低故障对船舶安全和运营的影响。

4.3 低负荷运行模式

低负荷运行模式是指船舶综合电力系统在负荷较低情况下的运行状态。该模式下，系统应优化能量利用，减少能源消耗和运行成本。

4.4 高负荷运行模式

高负荷运行模式是指船舶综合电力系统在负荷较高情况下的运行状态。此模式下，系统必须具备足够的电力供应能力，确保高负荷设备的正常运行，并防止因过载引发的系统不稳定或故障。

4.5 岸电供电模式

岸电供电模式是指船舶停靠港口时，利用港口提供的岸电进行供电的运行状态。该模式旨在减少船舶自发电带来的环境污染和能源消耗，同时确保船舶在港停泊期间的电力需求。

5 故障模式分析

为了确保船舶综合电力系统的稳定性和可靠性，我们选择了17种故障模式进行详细分析。这些故障模式的选择依据是其对船舶综合电力系统可能造成的严重影响，包括但不限于系统停运、电力中断、设备损坏或安全隐患等。这些故障一旦发生，可能会对船舶的正常运行、设备安全和人员生命财产造成重大影响。因此，针对这些关键故障模式进行深入分析是制定安全评估标准的基础。

以下是详细的故障模式分析表格：

| 子系统 | 故障模式 | 故障描述 | 影响分析 |
|-------|------------|-----------------------------|--|
| 发电子系统 | 柴油机增压器润滑失效 | 增压器润滑失效导致增压器损坏。 | 影响柴油机进气效率，降低发动机功率，导致发电机功率下降，严重时柴油机无法启动，造成系统停运。 |
| | 发电机绝缘故障 | 发电机绕组绝缘层发生故障，可能导致电气短路或漏电。 | 电气设备过热、短路或电力供应不稳定，严重时可能引发火灾或设备损坏。 |
| | 柴油机燃油供给故障 | 燃油无法正常输送至发动机，通常由燃油泵或管道堵塞引起。 | 柴油机无法正常工作，影响发电机电力输出，严重时船舶失去电力来源，导致系统停运。 |
| | 发电机绕组故障 | 发电机绕组断路或短路。 | 发电机无法稳定输出电能，电力系统不稳定，长时间可能引发严重设备损坏。 |
| 配电子系统 | 配电板短路故障 | 可能由过载或接线故障引起。 | 电流无法正常分配，可能导致电力系统停运，严重时引发火灾或电力系统广泛瘫痪。 |
| 推进子系统 | 负载过载 | 负载超过额定值，通常由操控失误或电力需求增加引起。 | 电动机过热、损坏，甚至烧毁电动机，导致推进系统失效，电力系统停运。 |
| | 电压过高 | 电压超过电动机设计额定电压，通常由配电系统异常引起。 | 电动机绕组损坏、过热，最终可能导致电动机损坏，影响船舶推进能力。 |
| | 电压不平衡 | 三相电机的三相电压不对称。 | 电机运行不稳定，增加电机温升，降低效率，可能导致电动机损坏或停运。 |
| | 交流电机单项缺项故障 | 三相电源中的一相电压丢失，电机无法正常启动。 | 电机无法产生正常的转矩，导致电机负载不均，可能造成电机过热、损坏。 |
| | 匝间故障 | 绕组内部相邻匝之间发生短路或断路。 | 电机效率降低，发热增加，可能导致电机损坏，影响推进系统正常运行。 |
| | 定子绕组断路 | 电动机定子绕组部分断路，可能由负载过大或老化引起。 | 电机无法正常运行，影响推进系统，严重时船舶停运。 |
| | 绕组温度过高 | 由负载过大或通风不良引起。 | 绕组绝缘老化、损坏，电机性能下降，最终可能导致电机烧毁。 |
| | 转子断条 | 电动机转子中的导条发生断裂或损坏。 | 电机失去平衡，增加振动与噪音，最终可能导致电机失效。 |
| | 气隙偏心 | 转子与定子之间的 | 电机产生不均匀电磁力，增加振动和噪音， |

| | | | |
|--|-------|--------------------------|--------------------------------------|
| | | 气隙不均匀, 通常由制造缺陷或损坏引起。 | 影响电机稳定运行。 |
| | 转子不平衡 | 电动机转子由于制造缺陷或损坏失去平衡。 | 增加电机的振动和噪音, 降低电机效率, 可能导致电机损坏。 |
| | 转子轴弯曲 | 电动机转子轴发生弯曲, 通常由外力或疲劳引起。 | 导致电机不正常运转, 增加磨损, 可能引发轴承损坏, 最终影响电机性能。 |
| | 轴承故障 | 轴承故障通常由润滑不良、负载过大或制造缺陷引起。 | 轴承故障导致电机振动增加, 可能引发转子损坏或电机失效。 |

此表格详细列出了船舶综合电力系统中可能发生的17种关键故障模式及其对系统的影响。这些故障模式一旦发生, 可能导致严重的电力中断、设备损坏甚至系统瘫痪, 影响船舶的正常运行, 因此在标准制定中重点关注这些故障模式下系统运行模式的安全评估。

6 安全评估模型的构建与安全评估值的计算

为了有效评估船舶综合电力系统在不同工况下的安全性能, 必须建立科学、合理的安全评估模型。该标准根据系统运行状态和故障模式, 构建了四种安全评估模型, 分别基于失效模式的安全评估模型、设备失效概率预测的安全评估模型、连锁故障概率预测的安全评估模型、基于功率裕度的安全评估模型。以下将详细介绍这四种模型的构建方法及其应用原理, 并提出相应的评估公式。

6.1 基于失效模式的安全评估模型

6.1.1 安全评估模型建立方法

基于失效模式的安全评估模型主要依赖于故障模式分析(FMEA)与故障树分析(FTA), 通过识别和分析系统中每个部件可能出现的故障模式, 并计算每种故障模式发生的概率。在此模型中, 评估的核心是各个设备或系统的失效概率以及失效对系统整体安全的影响。

6.1.2 安全评估值计算公式

在评估时, 首先需要计算每种故障模式对系统安全的贡献, 并对所有故障模式进行加权求和, 得出最终的安全评估值。

$$S_{fail} = \sum_{i=1}^n P_{fail_i} \times Impact_i$$

其中, P_{fail_i} 为第 i 种故障模式的发生概率; $Impact_i$ 为该故障模式对系统的影响程度; n 为系统中故障模式的总数。

6.1.3 应用原理

通过计算每个故障模式的发生概率及其对系统的影响, 累积得到系统的安全评估值。此模型适用于分析单一故障模式的影响, 适合于复杂度较低的系统, 或是单一部件的故障分析。

6.2 基于设备失效概率预测的安全评估模型

6.2.1 安全评估模型建立方法

基于设备失效概率预测的安全评估模型使用蒙特卡洛模拟方法来进行风险预测。蒙特卡洛模拟通过对设备故障概率的随机抽样生成大量可能的设备失效情形。根据船舶综合电力系统中各关键设备（如柴油机、发电机、电力配电板等）的历史数据和失效模型，模拟出设备失效的随机过程，并通过大量的仿真计算得出系统整体的风险评估值。

6.2.2 安全评估值计算公式

通过对设备的失效模式进行概率建模，模拟不同工况下系统设备的失效过程，进一步得到系统安全的综合评估结果。

$$S_{MC} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N S_j$$

其中， N 为蒙特卡洛模拟的仿真次数； S_j 为第 j 次仿真结果的安全评估值。

6.2.3 应用原理

该模型适用于具有随机性、复杂度较高的系统，在系统中各设备存在不同失效概率且故障行为较为复杂的情况下尤为有效。通过多次计算，可以全面评估系统在不同情境下的安全性，减少因设备不确定性带来的误差。

6.3 基于连锁故障概率预测的安全评估模型

6.3.1 安全评估模型建立方法

在船舶综合电力系统中，设备故障往往不是独立发生的，一种故障可能引发其他设备的连锁反应。因此，基于连锁故障概率的安全评估模型考虑了各故障模式之间的相互依赖关系。通过构建故障传播模型（如马尔可夫链、贝叶斯网络等），模拟各故障模式之间的传播路径和因果关系，从而预测系统在多个故障联动情况下的安全性。

6.3.2 安全评估值计算公式

假设系统中存在 m 种故障模式，且故障模式之间具有连锁反应，则系统整体的安全评估值可以通过连锁故障概率加权求和来表示：

$$S_{chain} = \sum_{i=1}^m P_{fail_i} \times \prod_{j=1}^m P_{chain_{ij}} \times Impact_i$$

其中， P_{fail_i} 为第 i 种故障模式的发生概率； $P_{chain_{ij}}$ 为故障模式 i 和 j 之间的连锁故障发生概率； $Impact_i$ 为第 i 种故障模式对系统的影响程度；

6.3.3 应用原理

该模型适用于评估多种故障模式联动的风险，特别是在设备之间存在复杂的相互依赖关系时。它能够精确地预测一类故障引发连锁反应的概率，帮助系统设计人员识别潜在的高风险区域。

6.4 基于功率裕度的安全评估模型

6.4.1 安全评估模型建立方法

基于功率裕度的安全评估模型关注系统在不同工况下的功率需求和供给的差距。功率裕度是指系统中每个关键设备的实际功率负荷与其最大额定功率之间的差值。当功率裕度较大时，系统的负荷波动能够得到较好的缓解，而功率裕度过小则可能导致设备过载、失效或系统故障。

6.4.2 安全评估值计算公式

功率裕度是判断系统稳定性的核心指标。通过监测系统中各设备的功率裕度，评估其在负载波动或异常情况下的安全性。

$$S_{PM} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left(\frac{P_{\max_i} - P_{load_i}}{P_{\max_i}} \right)$$

其中， S_{PM} 为基于功率裕度的安全评估值； P_{\max_i} 为设备 i 的最大额定功率； P_{load_i} 为设备 i 在当前工况下的实际负荷； m 为系统中所有关键设备的数量。

6.4.3 应用原理

该模型适用于实时监控和评估电力系统的运行状况，尤其在船舶综合电力系统负载波动较大或设备运行状态不稳定时，通过功率裕度评估系统的安全性。系统中各设备的功率裕度较大时，表示系统有较高的安全冗余空间，能够有效应对负载波动或故障。

这四种安全评估模型分别从不同的角度对船舶综合电力系统的安全性进行了分析。基于失效模式的模型通过故障发生概率进行评估，基于设备失效概率的模型利用蒙特卡洛方法模拟随机失效，基于连锁故障的模型考虑了设备间的耦合影响，而基于功率裕度的模型则从负载和功率需求的角度评估系统稳定性。每种模型都有其独特的优势和适用场景，结合使用将提供全面的安全性评估，帮助船舶综合电力系统管理者及时发现潜在风险并采取有效的应对措施。

7 系统安全运行等级划分与评定

系统安全运行等级的划分与评定是基于前述四种安全评估值的计算结果，通过对评估值的分析，判定船舶综合电力系统在不同工况下的安全运行状态。安全运行等级不仅是对系统当前安全状态的定量化反映，也是对系统可能出现故障或安全隐患的预警工具。通过划分不同的安全等级，能够帮助船舶管理人员及时采取措施，降低风险，确保船舶综合电力系统的安全稳定运行。

7.1 安全评估值综合加权

为了综合各项评估指标的影响，系统的最终安全运行等级不仅仅依赖于单一的评估值，而是根据四种安全评估值的加权平均值进行评定。每个评估值反映了系统不同维度的安全性。通过加权平均法，综合计算得到一个总的安全评估值，并基于此值划定系统的安全等级。加权平均计算公式：

$$S_{total} = \omega_1 \times S_{fail} + \omega_2 \times S_{MC} + \omega_3 \times S_{chain} + \omega_4 \times S_{PM}$$

其中， S_{total} 为综合安全评估值； $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4$ 分别为对应评估值的权重，通常根据各评估模型的重要性进行赋值，且满足 $\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 + \omega_4 = 1$

权重的设置依据不同故障模式和设备重要性的优先级。例如，在一些特定船舶中，可能需要更重视基于失效模式的安全评估值，而在其他情况下，基于功率裕度的安全评估值可能具有更高的权重。可以根据具体应用场景灵活调整这些权重。

7.2 安全运行等级的划分标准

为了清晰地评定系统的安全运行状态，我们根据四种安全评估值（基于失效模式、基于设备失效概率、基于连锁故障、基于功率裕度）对系统安全性进行综合分析，并设定相应的等级标准。每种评估值都会影响系统的安全等级，最终将根据所有评估值的综合结果给出系统的安全运行等级。

系统安全运行等级的划分标准主要依据综合安全评估值（ S_{total} ），这个评估值是通过加权平均法计算得到的。根据系统的实际情况，综合安全评估值的范围将被分为以下四个安全等级：

| 安全评估值范围 | 安全运行等级 | 描述 |
|------------------------------|--------|--|
| $S_{total} \geq 0.85$ | 安全 | 系统处于完全正常的运行状态，所有关键设备在安全负荷范围内，故障概率较低，系统稳定，运行安全。 |
| $0.65 \leq S_{total} < 0.85$ | 不安全 | 系统存在一定的安全隐患，个别设备可能接近故障边界，存在中等风险，需关注并做好监控。 |
| $0.35 \leq S_{total} < 0.65$ | 紧急 | 系统存在较大风险，多个设备可能处于不安全状态，需要立刻采取应急措施，降低风险。 |
| $S_{total} < 0.35$ | 不工作 | 系统处于严重失效状态，多个关键设备已发生故障或存在重大安全隐患，无法正常运行，需停机检修。 |

这些安全运行等级是依据四个安全评估值（基于失效模式、基于设备失效概率、基于连锁故障、基于功率裕度）的综合分析结果，综合考虑各项指标的安全性，反映系统整体的安全状态。

7.3 安全运行等级评定方法

根据计算得到的综合安全评估值，按照以下步骤评定系统的安全运行等级：

7.3.1 计算综合安全评估值

根据加权平均公式，将四个安全评估值（ $S_{fail}, S_{MC}, S_{chain}, S_{PM}$ ）代入计算公式，得到综合安全评估值 S_{total} 。

7.3.2 根据评估值划分等级

根据评估值 S_{total} 的数值，参考上述划分标准，将系统的安全运行等级划分为“安全”、“不安全”、“紧急”或“不工作”。

7.3.3 提出安全性改进建议

当系统处于“不安全”或“紧急”状态时，标准要求提供相应的安全性改进建议，指导船舶管理人员进行及时的维修、调整或优化措施。

7.4 应用实例

以下是一个示例，展示如何根据具体的安全评估值来划分安全运行等级。假设某船舶在某一工况下的评估值如下：

基于失效模式的安全评估值 $S_{fail} = 0.72$

基于设备失效概率的安全评估值 $S_{MC} = 0.68$

基于连锁故障的安全评估值 $S_{chain} = 0.75$

基于功率裕度的安全评估值 $S_{PM} = 0.78$

假设权重为 $\omega_1 = 0.25, \omega_2 = 0.25, \omega_3 = 0.25, \omega_4 = 0.25$ ，则综合安全评估值 S_{total} 为：

$$S_{total} = 0.25 \times 0.72 + 0.25 \times 0.68 + 0.25 \times 0.75 + 0.25 \times 0.78 = 0.735$$

根据上述划分标准， $S_{total} = 0.735$ 落在“不安全”等级区间，因此系统的安全运行等级为不安全，需要采取紧急修复或调整措施。

8 评估模型的适用条件与局限性

在船舶综合电力系统的安全评估过程中，四种安全评估模型具有不同的适用条件、优缺点及局限性。每种模型侧重于系统的某个维度，适用于不同的工况和设备状态。因此，选择合适的评估模型至关重要。以下是关于评估模型的适用条件与局限性的表格：

| 评估模型 | 适用条件 | 优点 | 局限性 | 建议 |
|-------------------|--|---|--|---|
| 基于失效模式的安全评估模型 | -适用于设备故障模式明确的系统。 -需要通过可靠性分析（如故障树、事件树）获得相关数据。 | -精确识别各故障模式的潜在风险。 -可以结合设备的设计、运行情况和历史故障记录进行量化分析。 | -无法充分考虑连锁故障和功率裕度等因素的综合影响。 -在系统复杂度较高或数据缺乏时，难以准确分析。 | -与其他评估模型结合使用，尤其是在设备层面的故障诊断和预测中。 |
| 基于设备失效概率预测的安全评估模型 | -适用于设备失效概率数据可获得的情况。 -系统较为复杂或设备之间的失效概率较为均衡。 -需要通过蒙特卡洛模拟进行风险预测。 | -对系统中大量设备失效概率进行系统模拟，适合复杂非线性系统。 -提供更为细致的风险预测结果，适合动态环境下评估。 | -计算量大，尤其是在大型系统中可能非常耗时。 -输入数据要求高，若数据不准确，预测结果可能出现偏差。 | -适用于中大型船舶系统时要确保足够的计算能力。 -确保输入数据的准确性，必要时进行数据验证和补充。 |
| 基于连锁故障概率预测的安全评估模型 | -适用于设备间有较强相互联系的系统。 -特别适用于设备间故障链条可能引发连锁反应的复杂系统。 -系统故障间有相互依赖的关系。 | -能全面考虑连锁故障的影响。 -对于复杂系统中的故障链条能够提供有效的风险评估。 | -模型复杂，需要详细的设备间关系数据和系统故障链条的精确建模。 -难以全面覆盖所有可能的故障模式，尤其在系统关系较复杂时。 | -可与专家经验或设备故障数据结合进行建模，确保故障链条的精确性。 -适用于大型动力系统和电力系统中，能够提供有效的风险预警。 |

| | | | | |
|---------------|--|--|---|--|
| 基于功率裕度的安全评估模型 | <ul style="list-style-type: none"> -适用于评估功率供应是否满足需求的系统，尤其在负荷波动较大的工况下。 -电力负荷波动较大或需要预测功率裕度的系统。 | <ul style="list-style-type: none"> -有效评估系统在负荷波动或突发负荷下的应对能力。 -为电力负荷管理和应急决策提供支持，提前识别功率不足的风险。 | <ul style="list-style-type: none"> -主要关注功率平衡，无法考虑设备故障或连锁反应的影响。 -在功率供应较为稳定的情况下，可能无法充分反映系统的安全性。 | <ul style="list-style-type: none"> -可与其他评估模型结合使用，尤其在负荷波动较大、功率需求不稳定的情况下，提供综合性评估。 |
|---------------|--|--|---|--|

此表格总结了四种评估模型的适用条件、优缺点及建议，方便技术人员根据实际情况选择合适的模型进行安全评估。

9 实施与应用指南

本标准的实施指南旨在帮助船舶管理人员和技术人员正确应用安全评估方法，确保船舶综合电力系统能够在各种运行模式下保持安全、稳定的运行状态。

9.1 标准实施的步骤

9.1.1 确定评估对象和工况

根据船舶的类型、配置和运行环境，选择合适的评估对象（如柴油发电机、配电板、推进系统等）。

根据具体工况（如正常负荷、应急负荷、低负荷等）和不同的故障类型确定评估范围。

9.1.2 收集和整理数据

收集船舶综合电力系统中各设备的历史运行数据、失效模式记录、维修记录等。

获取设备的可靠性数据，如失效率、设备寿命等，并根据设备性能建立故障模式数据库。

9.1.3 选择评估模型

根据系统的复杂程度和可获得的数据，选择适合的评估模型。

在数据充分的情况下，建议同时使用多个评估模型进行交叉验证。

9.1.4 计算安全评估值

使用标准中提供的公式和方法计算四个安全评估值：基于失效模式的安全评估值、基于设备失效概率的安全评估值、基于连锁故障的安全评估值、基于功率裕度的安全评估值。

对每个评估值进行详细计算，确保输入数据的准确性。

9.1.5 综合评估与等级划分

根据四个安全评估值的加权平均值计算综合安全评估值。

根据综合安全评估值，将系统的安全运行等级划分为“安全”、“不安全”、“紧急”或“不工作”，并生成安全评估报告。

9.1.6 提出安全改进建议

对于不安全或紧急等级的评估结果，应提供相应的安全改进建议，帮助船舶管理人员及时采取应急措施。

9.2 应用指南

9.2.1 定期评估与监控

建议定期对船舶综合电力系统进行安全评估，尤其是在船舶运营期间的高风险期（如恶劣天气、特殊任务等）进行重点监控。

9.2.2 实施动态调整

在实施过程中，应根据船舶运行状况的变化动态调整评估模型的参数，如设备的运行状态、负荷波动等。

9.2.3 集成管理系统

可以将本标准集成到船舶的综合管理系统中，通过自动化数据采集、分析和监控，提高评估的实时性和准确性。

9.2.4 培训与技术支持

定期对船舶技术人员进行安全评估培训，确保他们能够熟练使用本标准进行评估工作。提供标准实施的技术支持，确保遇到问题时可以及时获得帮助。

通过以上步骤和指南，船舶管理人员能够科学、有效地进行电力系统的安全评估，提升船舶的安全管理水平，确保船舶在不同工况下的电力系统稳定运行。

参考文献

- [1] GB/T 35719-2017 船舶中压直流电力系统通用要求
- [2] GB/T 7357-2010 船舶电气设备 系统设计 保护
- [3] GB/T 40581-2021 电力系统安全稳定计算规范
- [4] JB/T 5777.4-2000 电力系统直流电源设备通用技术条件及安全要求
- [5] GB/T 35715-2017 船舶直流电力系统短路电流计算方法
- [6] GB/T 32822-2016 船用中压开关设备和控制设备通用技术要求
- [7] 20241486-T-469 船舶低压电力系统绝缘故障定位装置

船舶综合电力系统运行模式的安全 评估方法

(征集意见稿)

编 制 说 明

2024 年 12 月

一 工作简况

（一）任务来源

本标准来源于国家对于船舶综合电力系统安全性评估的需求，特别是在我国海洋经济快速发展的背景下，船舶综合电力系统在确保船舶安全高效运行中的关键作用愈加显现。随着船舶电力系统的复杂度增加，传统的安全评估方法已难以满足现代船舶尤其是大型、智能化船舶的运行需求，因此亟需开发更为系统、全面的安全评估标准。

本标准依托船舶动力基础科研（MPRD）计划（课题名称为：“船舶综合电力推进系统安全分析与控制技术研究与验证”），通过整合国内顶尖科研院所的技术力量，重点攻克船舶电力系统安全性评估技术中的核心难题，旨在提高船舶综合电力系统的安全保障能力，确保在复杂环境和突发情况下系统能够稳定运行。此外，标准的起草单位包括中国舰船研究院、哈尔滨工程大学、中国船舶集团有限公司第七〇一研究所和第七一二研究所等，具有丰富的船舶电力系统研究经验，并在相关领域取得了显著的科研成果。通过多方协作与专家指导，本标准在理论研究、实验验证和应用案例的基础上，提出了适用于我国船舶综合电力推进系统的安全评估方法，并为行业提供了一套可操作、具有实用性的标准体系。

这项任务的来源不仅回应了国家对船舶电力系统安全管理的迫切需求，也体现了行业对提升船舶电力系统安全性与智能化水平的持续关注。通过这一标准的制定与推广，旨在为我国船舶电力系统的安全评估提供科学、标准化的解决方案，进一步推动船舶安全技术的进步。

（二）国内关于船舶综合电力系统运行模式的安全评估方法标准的制定情况及最新要求

随着船舶综合电力系统技术的快速发展，国内在船舶电力系统运行模式的安全评估方法标准制定方面逐渐引起重视。目前，国内目前有一些涉及船舶电力系统安全性、可靠性的标准和规范，如《船舶电力系统设计规范》（GB/T 40526）、《船舶电力系统综合保护技术规范》等。这些标准多针对电力设备的技术要求、系统设计的安全标准及设备保护等方面进行规定，但缺乏系统性和全局性安全评估的内容。现有标准多依赖传统的电力系统安全分析方法，未充分

考虑船舶电力系统在实际运行中的复杂工况等，以及智能化技术带来的新挑战。

近年来，一些研究机构和标准化组织已开始开展相关研究，推动船舶电力系统安全评估方法的探索和验证。部分初步标准已涉及电气设备的安全防护和系统保护，但总体上对系统协同工作和智能化控制的评估尚显不足。随着我国船舶工业的发展，特别是智能船舶和绿色航运的推广，对船舶电力系统安全评估的要求也愈加严格。最新要求主要包括：系统化评估方法、智能化和自适应能力、应对多工况和复杂环境的适应性、实时监控与故障预测能力，以及国际标准的对接和融合。总的来说，国内标准化工作仍处于起步阶段，未来有望出台更多符合智能船舶和绿色航运要求的安全评估标准，以保障船舶电力系统的安全、稳定和高效运行。

在此背景下，中国舰船研究院结合自身在船舶综合电力系统技术方面所积累的丰富经验，作为主编单位承担了《船舶综合电力系统运行模式的安全评估方法》的标准编制工作。

（三）标准编制的目的、意义

编制该标准的主要目的在于随着船舶综合电力系统技术的不断发展，尤其是集成化和智能化水平的提升，系统的安全性与可靠性已成为保障船舶安全航行、提高电力系统稳定性、减少系统故障和停运的重要因素。然而，由于船舶综合电力系统面临多种工况变化、故障模式复杂且多变，传统的安全评估方法往往无法充分考虑系统在复杂工况下的综合安全性和风险预判能力。因此，迫切需要制定一种科学、系统且具有实践指导意义的标准，针对不同工况下的船舶综合电力系统安全运行进行综合评估，以确保船舶电力系统的可靠性和安全性。

目前，船舶综合电力系统的安全评估尚缺乏统一、系统化的标准，尤其是在应对多种复杂工况及故障模式的综合评估方面，仍然存在较大的研究和应用空白。船舶综合电力系统由多个设备和子系统组成，各种设备在不同工况下可能发生不同的故障模式，导致整个电力系统的安全性面临着巨大的挑战。对于这些故障模式的有效识别、评估与预警，尤其是在故障发生前采取相应的控制和应对措施，直接关系到船舶的安全性、航行稳定性及乘客和货物的生命财产安全。

当前的电力系统安全评估方法主要侧重于单一设备或简单工况的评估，而对于船舶电力系统这种复杂的集成系统，现有的安全评估标准普遍存在无法有

效应对多故障模式、多工况变化的局限性。此标准的提出，不仅填补了现有研究空白，还能够为船舶电力系统的安全性评估提供更为全面、科学的方法框架，为行业提供具有国际竞争力的技术支持。

此外，随着现代船舶综合电力系统的智能化水平提升，对系统安全性评估提出了更高的要求。基于不同评估模型的系统性分析，能够更准确地评估系统的安全状态，提前预警潜在的风险，从而为船舶的运行管理提供决策依据，提高船舶运营效率，降低事故发生概率，保障国家和企业的经济利益与安全。

本标准通过建立基于失效模式、设备失效概率、连锁故障及功率裕度的四种评估模型，对船舶综合电力系统在不同工况下可能发生的 17 种故障模式进行评估，最终得出系统安全评估值，为船舶电力系统的设计、运行、维修及故障诊断提供理论依据和操作指导，确保船舶电力系统在多变的工况下能够始终保持安全、高效运行。

（四）标准特点

1. 本标准完全遵循了《GB/T 35719-2017 船舶中压直流电力系统通用要求》的总体要求。本标准旨在建立船舶综合电力系统运行模式的安全评估方法，目前针对船舶综合电力系统运行模式的安全评估方法尚无相关标准出台。

2. 本标准在《GB/T 35719-2017 船舶中压直流电力系统通用要求》国家标准指导下进行船舶综合电力系统运行模式的安全评估方法标准的编制。结合我国船舶电力系统的实际应用需求，制定了适用于船舶综合电力系统的安全评估方法。本标准引入了全方位的安全评估框架，涵盖了船舶电力系统在正常工况、异常工况及应急运行等多种情况下的安全分析，提升了评估的全面性和深度，能够有效识别潜在的系统风险，提高船舶电力系统的安全性与可靠性。

（五）主要工作过程

1. 编制准备阶段

2024 年 9 月-12 月。主编单位接到编制任务后，组织专业技术人员成立编制组，开展大量的资料收集和前期调研工作，编写完成标准大纲、标准初稿等。

2. 征求意见阶段

未进行

3. 送审阶段

未进行

4. 报批阶段

未进行

二 标准编制原则

(一) 科学性原则：本标准编制是在科学理论和实践经验基础上，确保技术要求和规范具有科学性和可行性，能够有效指导实际施工过程。

(二) 统一性原则：本标准编制统一了各方的要求和标准，确保项目参建单位在制定说明书时过程中能够按照该标准进行操作，参照统一标准，减少歧义。

(三) 公正性原则：本标准编制过程公正、公平、透明，确保标准的制定过程中各方利益的平衡，不偏袒任何一方，保证标准的客观性和公信力。

(四) 可操作性原则：本标准编制时充分考虑了实际操作性，确保项目参建单位能够对照标准的要求进行船舶综合电力系统运行模式的安全评估，避免标准过于理论化或难以实施的情况。

(五) 合规性原则：本标准编制符合国家法律法规和相关行业的规范和标准，确保标准的合法性和合规性，遵循国家政策和法律要求。

三 标准主要内容

1. 范围：本标准适用于船舶综合电力系统在不同工况和不同故障模式下的安全性评估，适用于船舶电力系统的设计、运行、检修、故障诊断及安全管理等方面。

2. 规范性引用文件：本标准编制时引用的标准规范等文件；

3. 术语与定义：对本标准中所涉及的名词术语进行定义；

4. 运行模式分类：本标准明确船舶电力系统可能运行的工况，涵盖 5 种工况，包括：正常运行模式、应急运行模式、低负荷运行模式、高负荷运行模式和岸电供电模式；

5. 故障模式分析：本标准明确船舶航行过程中的故障模式，涵盖 17 种典型故障模式，并对每种故障模式影响进行分析，建立其故障传播路径和影响范围；

6. 安全评估模型的构建与安全评估值的计算

1) 四种安全评估模型的构建

分别建立基于失效模式的安全评估模型、基于设备失效概率预测的安全评估模型、基于连锁故障概率预测的安全评估模型、基于功率裕度的安全评估模型；

2) 安全评估值的计算与评定

基于以上四种评估模型，本标准提供了详细的计算方法，得出四个安全评估值，包括：基于失效模式的安全评估值、基于设备失效概率的安全评估值、基于连锁故障的安全评估值、基于功率裕度的安全评估值；

7. 系统安全运行等级的划分与评定

根据四个安全评估值，评定船舶电力系统在不同工况下的安全运行等级。运行等级划分为四个级别：安全、不安全、紧急、不工作；

8. 评估模型的适用条件与局限性

明确每种评估模型适用的工况和条件，分析不同模型的优缺点以及在不同场景下的适用性，指导使用者选择最合适的评估模型进行系统安全性评估；

9. 实施与应用指南

为确保标准的顺利实施，本标准提供了应用指南，包括标准的使用流程、计算步骤、数据收集方法及评估结果的解读。帮助企业和组织在实际应用中高效实施安全评估。

四 预期经济效果

本标准的实施将有效推动船舶综合电力系统的安全性和可靠性提升，从而带来显著的经济效益。通过标准化的安全评估方法，船舶运营方能够更准确地评估和预测电力系统在不同运行模式下的安全风险，及时发现潜在的故障隐患，避免了因设备故障导致的停运、维修以及更换部件的高昂成本。此外，标准化的评估方法还将有助于降低船舶的维护频次和故障率，延长系统的使用寿命，降低船舶运营的总成本。

从长远来看，本标准的推广应用将促进我国船舶电力系统技术的进步，推动船舶电力系统的智能化、绿色化发展，提升我国船舶行业的国际竞争力。标准的实施还可为船舶设计、生产和运营相关企业提供更为规范的技术框架，提高其产品和服务的市场认可度，进而推动船舶行业相关产业链的健康发展，促进经济效益的持续增长。

五 采用国际标准和国外先进标准情况

在编制船舶综合电力系统运行模式的安全评估方法的标准过程中，我们充分借鉴了国际标准和国外先进标准，结合国内实际情况进行了深入研究与修订。通过与国际接轨，确保我国船舶综合电力系统运行模式的安全评估方法的标准达到国际先进水平，为产业发展提供有力支撑。

六 与有关的现行法律、法规和强制性国家标准的关系

在编制船舶综合电力系统运行模式的安全评估方法的标准过程中，我们严格遵循了相关的现行法律、法规和强制性国家标准，确保标准的合规性和权威性。同时，我们也充分考虑了船舶综合电力系统运行模式的安全评估方法的发展趋势和应用需求。

七 重大分歧意见的处理经过和依据

本标准在起草过程中未出现重大分歧意见。

八 标准性质的说明

建议本标准为推荐性标准。

九 贯彻标准的要求和措施建议

本标准经征求各相关方意见，已形成共识，标准实施之日起，各相关方将遵照执行。