核电厂的风险如何评估？
——认识概率风险评估（PRA）

核电厂发生严重事故的可能性有多大？哪些设备故障或人员操作可能导致事故？不同事故可能造成怎样的后果？如何利用这些信息提高核电厂的安全水平？这些问题与核安全监管密切相关，也是概率风险评估（Probabilistic Risk Assessment，PRA）试图回答的问题。

为什么需要概率风险评估？

核电厂的安全分析和监管长期采用确定性方法，即考虑一系列可能的安全挑战，并确定应当采取哪些措施加以应对。但核电厂是一个复杂系统。不同设备故障、人员失误和外部事件可能相互作用，形成不同的事故序列。这些事故发生的可能性及其后果并不相同，对核电厂风险的贡献也存在差异。

1975 年，美国发布《反应堆安全研究》（WASH-1400）。研究发现，一些过去未受到足够重视的事故情景可能具有较大的风险意义。例如，小破口冷却剂丧失事故虽然不如大破口事故严重，但其风险贡献可能更大。研究还揭示了辅助给水系统、人员失误和共因失效等因素的重要性。

此后的 PRA 研究进一步发现，全厂断电、最终热阱丧失、

火灾、内部水淹、地震和外部洪水等都可能成为重要的风险来源。而且，不同核电厂的主要风险因素可能有很大差异，具体取决于电厂的设计、运行和场址条件。

这些发现说明，仅分析预先确定的事故情景还不够，还需要从整个核电厂系统出发，更广泛地识别事故的可能性，并判断不同因素对风险的影响程度。**PRA 的价值，正是在于提供这样一种系统性的分析方法。**

什么是 PRA？

概率风险评估（PRA），也称概率安全评估（Probabilistic Safety Assessment，PSA），是一种系统性的工程分析方法。它通过建立核电厂系统模型，回答三个基本问题：

- 可能发生什么问题？
- 这些问题发生的可能性有多大？
- 这些问题可能造成什么后果？

这三个问题构成了 PRA 的基本框架。

PRA 通常从可能扰乱核电厂正常运行的始发事件入手，例如冷却剂泄漏、设备故障、火灾或地震，分析安全系统和运行人员可能作出的响应，以及事故可能如何发展。

分析中通常采用事件树和故障树等逻辑模型，识别不同事故序列并量化其发生频率。PRA 不仅能够给出风险的定量估计，还

能够说明哪些事故序列、设备或其他因素对风险具有较大影响。

根据分析终点的不同，核电厂 PRA 通常分为三个层级:

一级 PRA（Level 1）主要分析可能导致堆芯损伤的事故序列及其发生频率。

二级 PRA（Level 2）进一步分析堆芯损伤后的事故发展，以及放射性物质可能向环境释放的情况。

三级 PRA（Level 3）则进一步评估放射性物质释放可能造成的场外后果。

在实际应用中，**堆芯损伤频率（CDF）**和**大量早期释放频率（LERF）**是常用的风险度量指标。它们可以用于辅助判断核电厂的安全水平，但并不等同于对公众健康风险的直接、完整评价。

PRA 能够为核安全带来什么？

PRA 的重要作用不仅在于计算事故发生频率，更在于揭示风险的主要来源，为安全改进提供依据。

首先，PRA 能够系统识别潜在事故情景。通过分析不同事件及其组合，PRA 有助于发现其他分析方法可能忽略的事故序列。其次，PRA 能够比较不同因素的风险重要性。核电厂的设备、系统和运行活动对安全的影响并不相同。通过 PRA，可以识别对风险影响较大的因素，从而更加合理地确定关注重点。再次，PRA 能够评估不同改进措施的效果。例如，当电厂拟调整设备维护安

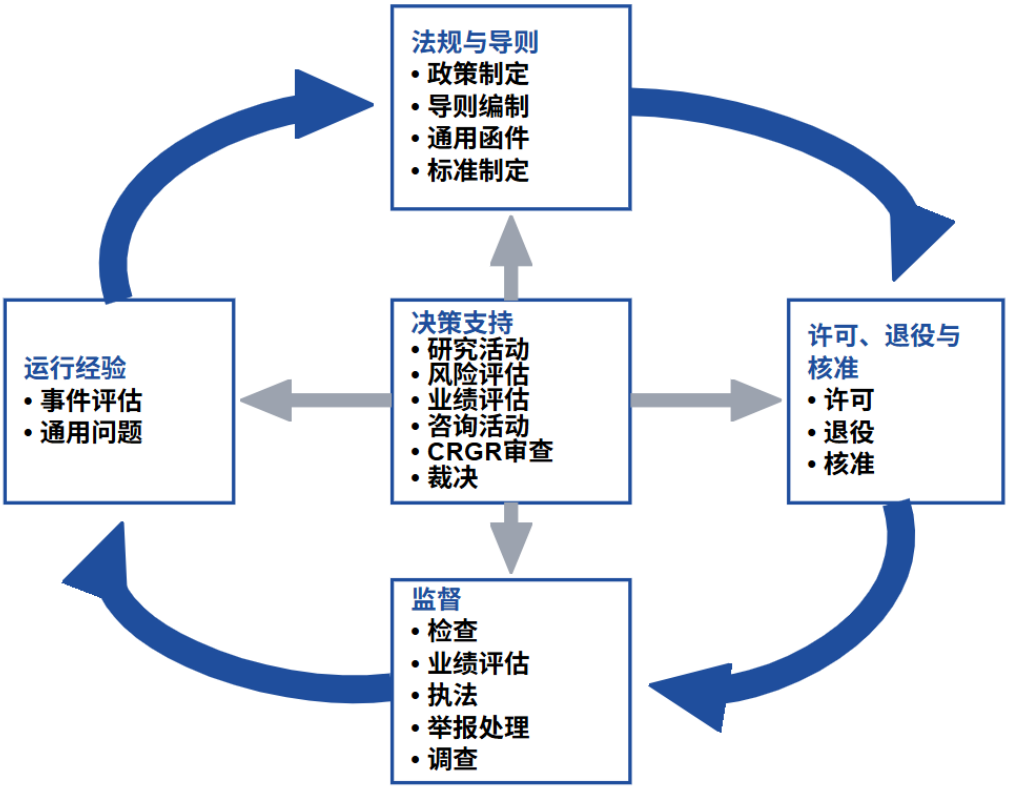
排或改变某项运行要求时，可以利用 PRA 分析相关变化可能带来的风险影响。

此外，PRA 将设备可靠性、人因工程、热工水力、外部危险源等不同领域的信息整合在同一分析框架中，使决策者能够从核电厂整体安全的角度认识风险。因此，PRA 既是一种风险量化工具，也是一种支持安全决策的分析工具。

美国如何在核安全监管中应用 PRA？

美国核监管委员会（NRC）较早开始将 PRA 用于监管决策。1975 年《反应堆安全研究》发布后，NRC 逐步利用概率分析结果评估有关核电厂安全的问题。1995 年，NRC 正式发布《PRA 政策声明》，鼓励在技术方法和数据条件允许的情况下，更广泛地将 PRA 应用于核监管活动。这一政策明确指出，PRA 应当作为确定性分析方法的补充，并支持传统的纵深防御理念，而不是取代它们。

根据 NUREG-2201 的介绍，PRA 已被应用于 NRC 的多类监管活动。



NRC 的监管活动

在**法规和监管导则制定**方面，PRA 可以帮助判断不同事故情景的风险重要性，评估新增或修订监管要求可能带来的安全效益。例如，美国针对核电厂全厂断电的监管要求，就受到了 PRA 研究结果的重要影响。

在**核电厂许可和设计审查**方面，PRA 可以用于支持许可证变更、设备和系统的风险分类，以及新反应堆设计认证等工作。

在**运行监督与检查**方面，NRC 利用 PRA 信息确定检查重点，并评价检查发现问题的风险重要性。在运行事件评估中，PRA 也可用于支持判断事件的安全意义和需要采取的监管措施。

在**维护和消防安全管理**方面，PRA 可以帮助评价不同安排对核电厂风险的影响，为相关要求的调整提供依据。

这些应用体现了 PRA 在监管中的一个重要作用：帮助监管机构更加关注对安全具有重要影响的问题，同时减少不必要的保守性和监管负担。

PRA 与风险指引型监管是什么关系？

PRA 与风险指引型监管（Risk-Informed Regulation）密切相关，但二者并不是同一个概念。PRA 是一种分析方法，其任务是提供风险信息；风险指引型监管则是一种决策方式，其任务是将风险信息与其他因素综合考虑，形成监管决定。

在传统确定性监管方法的基础上，PRA 提供了更广泛的事故情景信息，以及不同风险因素的重要性和潜在影响。但 NRC 强调，风险信息不是监管决策的唯一依据。

根据 NRC《监管导则》RG 1.174，基于风险信息的监管决策还需要综合考虑现行法规要求、纵深防御、安全裕度，以及监测和绩效评价等因素。

这意味着，即使 PRA 结果表明某项风险较低，也不能仅凭这一结果就认定相关安全要求可以取消或降低。监管机构仍需综合判断拟议变更是否符合有关要求，是否保持适当的纵深防御和安全裕度，以及是否能够通过后续监测确保安全。

因此，风险指引型监管并非完全依赖风险数值的监管，更不是以概率分析取代确定性安全要求，而是将两者结合起来，为监管决策提供更加全面的依据。

PRA 能预测下一次核事故吗？

不能。

NUREG-2201 特别指出，PRA 并不是预测未来事故的工具。它所描述的是，在当前知识和模型假设下，哪些事故情景可能发生、发生的可能性有多大，以及可能造成什么后果。

例如，PRA 估计某类事故的发生频率较低，并不意味着事故必然按照某个固定的时间间隔发生，也不意味着下一次事故一定属于模型中概率最高的情景。

与此同时，PRA 模型不可能涵盖所有事故可能性。它受到数据、建模方法以及现有知识水平的限制，分析结果也存在不确定性。因此，PRA 需要结合运行经验和新的技术信息不断更新，其结果也应当在充分认识不确定性的前提下使用。

结语

概率风险评估的发展，为核电厂安全分析提供了新的认识视角。它通过系统识别事故情景、量化发生可能性并分析潜在后果，帮助人们理解核电厂风险的主要来源。

美国核安全监管的实践表明，PRA 能够为法规制定、许可证

审查、运行监督和安全改进提供重要支持。但 PRA 并不代替确定性分析、纵深防御和安全裕度。

PRA 提供风险信息，风险指引型监管则将这些信息纳入综合决策。二者的结合，使核安全监管能够在坚持基本安全要求的同时，更有针对性地关注重要风险。

国际交流合作部　逯馨华　供稿

编译自《美国核监管委员会（NRC），NUREG-2201，《概率风险评估与监管决策：常见问题解答》，2016 年

文章内容不代表本公众号观点