

核电DCS物项替代的一种方法研究

Research on a Method of Nuclear Power DCS Item Substitution

★北京广利核系统工程有限公司 周海, 王春伟, 周立群, 王宝伟

摘要: 随着我国核电事业的不断发展, 核能发电已被人们广泛接受。截至目前, 我国在役运行机组已达到47台。随着机组运行时间的积累, 核电数字化仪控系统设备、部件存在不同程度的故障和性能降低等老化问题, 急需对原始物项进行替代。然而, 国内无论是监管层面还是行业层面, 目前均没有形成一个统一的方法解决在役运行核电厂(NPP)数字化仪控产品的物项替代问题。针对这一情况, 本文结合国内核电厂数字化仪控系统物项替代的实际应用, 对我国能源行业标准及美国EPRI相关的导则、标准进行了研究, 提出适合国内核电行业应用的一种物项替代方法, 对国内核电行业物项替代活动具有很好的借鉴意义。

关键词: 核电厂; 数字化仪控系统; 物项替代

Abstract: With the development of China's nuclear power industry, nuclear power generation has been widely accepted. Up to now, the number of units in-service has reached 47. With the accumulation of unit running time, the equipment and components of nuclear power digital instrument and control system have aging problems of different degrees, such as failure and performance degradation, so it is urgent to replace the primary items. However, both at the regulatory level and the industry level in China, there is no currently a unified method to solve the problem of item substitution of digital instrument control products for in-service nuclear power plant (NPP). In order to solve this situation, combined with the domestic nuclear power plant item substitution of the actual application of DCS instrument control system, this paper studies the criteria of energy industry in China and the related guidelines, standards of EPRI in America, and proposes an approach of item substitution for China's nuclear industry application, which has the very good reference to item substitution activity for China's nuclear industry.

Key words: Nuclear power plant; Digital instrument and control system; Item substitution

1 引言

国家能源行业标准^[1]指出物项替代是在不降低系统和设备的原有设计功能和安全水平的前提下, 用不完全相同的物项替代原始物项的活动。物项替代只涉及所要替代的物项本身, 不改变系统配置, 替代物项的采用不应对应系统的功能与可靠性产生消极影响, 选取的替代品和性能不得低于原设计的要求。物项替代的过程中可能因安装的需要而涉及微小的现场变更, 但不能更改系统的设计基准和要求, 不能变更系统的运行参数, 也不能改变系统的逻辑关系和流程。基于以上要求, 替代物项在被更换到核电厂之前, 需要通过特定的技术论证来证明该替代物项能够完成其现场承担的设计功能。

面对我国在役运行核电机组技术路线广泛、运行堆年差异大的整体特点, 现阶段不同技术路线机组安装设备在执行相同预期功能时, 性能要求不同, 导致替代物项选型存在差异或同一替代物项要经过重复论证; 面对不同在役机组运行堆年差异大的情况, 物项替代活动也将面临着更多设备的首次物项替代, 不利于物项替代经验的积累和借鉴, 不易形成较为统一的物项替代方法。本文结合国内核电厂数字化仪控系统物项替代的实际应用, 对我国能源行业标准及美国EPRI相关的导则、标准进行了研究, 提出一种较为广泛适用国内核电行业应用的物项替代方法。

2 原始物项分级

所谓物项分级就是根据设备执行功能的重要性确定不同核电设备等级，以达到核安全与企业利益双赢的目的。核电厂物项的功能分级可分为安全相关物项、质量相关物项和非质量相关物项^[2]。

安全相关物项，是指该物项执行以下任一功能或由于该物项的故障或瞬态，不能执行以下任一功能的实现。这些功能包括：

- (1) 安全停堆和反应性控制；
- (2) 堆芯余热的排除；
- (3) 控制或缓解事故情况下放射性物质向环境释放。

质量相关物项，是指由于该物项的故障或瞬态，可能导致电厂能力因子、可用率降低，或导致人身安全受到伤害的物项。

非质量相关物项，是指除去安全相关和质量相关物项的其他物项。

确定物项最终应用是确定物项是否物项分级的必要条件。通过审查物项所处系统的系统功能及该物项在支持该系统功能中起到的作用，可以确定该部件的设计功能。根据执行的设计功能，确定原始物项等级。最终确定物项替代活动类别。国家能源行业标准指出，物项替代活动可分为一般物项替代和重要物项替代两类。针对数字化仪控系统，重要物项替代是指安全级电气设备和非安全级中有特殊要求的物项替代工作。

3 关键特性识别

针对重要物项替代工作中的物项，为了保证其在执行安全相关功能、质量相关功能能够有效被验证，关键特性的识别至关重要。物项关键特性的数量和类型基于其预定的安全功能、应用要求、复杂性、可信失效模式和影响及性能要求^[3]。确定物项具体的应用有利于缩小需验证的关键特性范围。关键特性识别方法包含失效模式和影响分析方法、原始设计基准分析方法。在关键特性识别过程中，可以采用其中一种方法

或两种方法的组合方式。具体执行取决于替代过程中获取原始设计基准文件、物项最终应用分析及安全功能相关的信息情况。

3.1 原始设计基准分析方法

现有或实际设计信息可用来确定关键特性。如果可以从原始设计文件（包括依据的设计标准）中得到物项充分的技术和质量要求，则可从物项的设计特性中确定出关键特性。对于原始物项，收集其原始设计文件，将文件中对物项充分的技术和质量要求转化为关键特性。因保证分析的完整性是一个物项替代活动的重要前提，所以技术和质量要求应包括硬件、软件、人机接口、可靠性等要求。对于数字化物项替代，除了预期功能和预期失效模式的设计要求之外，确定与未使用的、非预期的或禁止的功能相关的要求也是非常重要的。如果不能获取确定关键特性所需的充分详细的设计信息，可首先确定物项的安全功能，然后使用FMEA分析得出关键特性。

3.2 失效模式与故障（FMEA）分析方法

FMEA方法是一种基本的分析方法，其主要功能是考虑系统、部件故障的失效机理，以及故障对系统的影响。物项替代活动过程中，结合物项的自身功能和系统功能及所处环境信息，或其他适当的工程判断，识别零部件的主要失效机理。零部件主要失效机理的影响分析应从部件、系统的设计功能、功能模式和功能分级等方面进行。通过评估零部件失效机理发生后对零部件自身和上一级部件和（或）系统的影响，确定零部件的失效模式。部分失效机理可根据零部件在电站服役的历史记录和行业数据中识别。识别出主要失效机理后，可利用图纸、技术规格书、系统手册、安全分析报告等资料评估其失效影响。故障模式影响到了具体设计功能，便可以确定故障模式相关的特性为关键特性。由失效模式与故障（FMEA）分析方法确认物项关键特性的思路如下：

- (1) 物项的潜在故障是什么？
- (2) 产生这些故障模式的失效机理？
- (3) 故障发生，引起的后果？
- (4) 后果是否影响设计功能？
- (5) 确认与影响设计功能的故障相关的特性是什

么？即为关键特性。

一般用FMEA表完成上面思路的分析，FMEA表也是分析方法的核心^[4]。常用的FMEA表的格式如表1所示。

表1 FMEA表

序号	物项名称	功能	失效模式	故障原因	对系统的影响	备注
×××	×××	××	×××	×××	×××	—
×××	×××	××	×××	×××	×××	—

4 替代物项选型

物项替代选型的基本原则为尽可能选取技术成熟和有相关使用经验的产品；对核安全相关物项，应尽可能选用有核电站使用经验的物项进行替代；对于通用设备应尽可能采用标准化、系列化的产品，尽可能用同一厂家的一个产品系列代替多个厂家的产品，从而减少物料的种类和减小库存管理压力。

替代物项选型一般采用原始物项与替代物项参数对照的方法。依据两种物项技术规格书的对比，确认原始物项与替代物项在参数、制造规范和标准等方面的区别。参数主要是指物项的功能、安装、结构和外形等方面的特性，是可以鉴定和测量的^[5]。通过正确而全面的比对尽量确保替代物项能满足系统的设计要求。

5 等效性验证

替代物项与原始物项的等效性由功能等效性、可互换性、相容性和规范一致性四个方面共同决定^[6]。

功能等效主要是指替代物项在关键特性参数上与原始物项相近、相同或更优，能够完成原始物项在现场所需要具备的功能。替代物项的性能必须与现有的设计相符，同时不对系统和设备的性能、安全功能等产生不利影响。

可互换性主要是指替代物项在安装上能满足现场要求（和原始物项互换）。

相容性是指给定使用条件下，如果替代物项的设计寿命和可靠性优于或等同于原始物项。则替代物项与原始物项是“相容的”。

规范一致性是指替代物项与原始物项不同的规范或标准来制造，或经不同规范制造下，功能、可靠性无负面影响。对核安全相关物项，必须分析两种规范的不同点对物项安全功能的影响。如果替代规范（或标准）在检验要求方面没有对可靠性产生负面影响的变化，在特殊工艺方面也没有对功能产生负面影响的变化，则替代规范（或标准）的变化是可接受的。

下文阐述实验室验证和核电厂验证两种方法。

5.1 实验室论证

依据原始物项的功能分级、基本功能、关键特性，通过功能测试和设备鉴定两种方法进行替代物项的实验室论证。

5.1.1 功能测试方法

依据原始物项的设计功能搭建模拟环境，分析替代物项外形能否满足空间要求，接口、安装方式及尺寸能否和现场进行匹配。接线方式、接线顺序及电缆入口等能否都满足现场接线要求。如果安装不匹配，评估是否需要装配、接线、管线和其它接口等做小改动，满足该替代物项与原始物项是“可互换的”。并对替代物项的基本设计功能、软件等进行测试或验证。

5.1.2 设备鉴定方法

依据对关键特性的识别结果，通过功能试验对替代物项的性能进行验证，确认与现有的设计相符，同时不对系统和设备的性能、安全功能等产生不利影响。

替代物项重量发生改变，也需要评价这一变化对互换性的影响。对核级物项或用于核安全相关设备的物项，还要分析其重量变化对主体设备抗震性能的影响，进行抗震试验^[7]。对于安装在有抗震要求设备内的零部件的替代，要分析替代重量的变化是否会影响主体设备的抗震性能，进行抗震试验。

对于与核安全相关的非金属材料及有环境鉴定要求的替代物项，如果能证明其环境鉴定结果与原始物项的鉴定试验报告相同或相当，则二者是“相容的”。

5.2 核电厂实地验证

核电厂替代物项首次安装使用，原则上只在单一系统上使用并跟踪。对于涉及多个系统，不同安装位

置上使用的替代物项，尽量选择环境条件较差的系统位置上进行首次安装使用并跟踪^[8]。跟踪期根据物项重要程度分为三个月、六个月或一个换料周期。替代实施完成后，核电厂将对安装、品质再鉴定、功能再鉴定、运行、维修等环节进行全面评价反馈。跟踪期满后，组织物项替代最终评价。

6 结论

本文结合国内核电厂物项替代的实际应用，提出了

一种针对核电DCS仪控系统物项替代的方法，对原始物项分级、关键特性识别、替代物项选型、等效性验证各环节进行分析，并给出解决办法。对国内核电行业物项替代活动具有良好的借鉴意义。**AP**

作者简介：

周 海（1985-），男，宁夏石嘴山人，工程师，硕士，现就职于北京广利核系统工程有限公司，主要负责核电厂仪控系统设计工作。

参考文献：

- [1] NB/T 20245-2013, 核电厂物项替代[S].
- [2] NB/T 20088-2012, 核电厂安全级电气设备零部件更换要求[S].
- [3] NB/Z 20540-2019, 商品级物项在核电厂安全级电气仪控设备中的应用指南[S].
- [4] GB/T 9225-1999, 核电厂安全系统可靠性分析一般原则[S].
- [5] Revision 1 to EPRI NP-5652 and TR-102260, Plant Engineering : Guideline for the Acceptance of Commercial-Grade Items in Nuclear Safety-Related Applications[S].
- [6] 宇文敏, 徐尧. 我国核电站延寿期间运行设备物项替换探讨[J]. 科技创新导报, 2019, (3) : 66 – 67.
- [7] 王英. 核安全设备鉴定[M]. 北京: 机械工业出版社, 2015 : 29 – 38.
- [8] 任玲妮. 浅谈核电厂物项替代[J]. 中国和科学技术进展报告, 2015, 9 (4) : 32 – 34.