

核电厂常规岛含油废水处理系统改进研究

李波

(中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663)

摘要: 遵循先进核电厂纵深防御、持续改进的基本原则, 探讨常规岛含油废水处理系统改进方法, 提出采用非能动部件的重力式含油废水处理系统, 无污泥副产物, 运行安全可靠, 降低了潜在放射性污染的风险, 保障环境安全。

关键词: 先进核电厂; 潜在放射性; 非能动; 含油废水处理

中图分类号: X703

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2015)04-0096-06

Research on Improvements of Oily Waste Water System of Conventional Island in Nuclear Power Plant

LI Bo

(China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

Abstract: Following to the general principles of defence in depth, continual improvement for advanced nuclear power plant, this paper describes the passive gravity oily waste water treatment system modified method of conventional island against the problem of sludge byproduct, for operating safe reliability, reducing risk of latent radioactive pollution, improving safety and reliability.

Key words: Advanced Nuclear Power Plant; Latent Radioactive; Passive; Oily Waste Water Treatment

常规岛含油废水处理厂房是核电厂生产中重要的环境保护设施之一, 由于来自核岛的第二回路蒸汽管道存在发生破口的风险, 常规岛汽轮机厂房汽水管道路疏水、厂房地面冲洗及汽机润滑油管道保护区消防排水等废水将受到潜在放射性玷污影响。遵循我国先进核电厂核安全与放射性污染防治提出的“预防为主、纵深防御, 依靠科技、持续改进”的基本原则, 通过改进常规岛含油废水处理工艺系统, 采用非能动部件的重力式含油废水处理系统, 无污泥副产物, 运行安全可靠, 降低了潜在放射性污染的风险, 保障环境安全。

1 核电厂生产废水的特点

1.1 核电厂生产废水水质分析

按核电厂生产废水类型可分为经常性废水和非

经常性废水。2×1 000 MWe 级核电机组生产废水分析见表 1。

GB 14587—2011《核电厂放射性液态流出物排放技术规定》4.8 条规定“核电厂放射性液态流出物排放系统的设计应保证来自核岛系统的放射性液态流出物和来自常规岛系统的放射性液态流出物进入不同的排放系统^[1]”。根据核动力厂放射性废物最小化的原则, 根据放射性废液的特性分类收集各类放射性废液, 尤其要将含洗涤剂的洗衣水、淋浴水、含油废水、有机溶剂与其他废液分开收集。因此, 常规岛潜在受到放射性玷污的生产废水, 为含低、弱放射性的废水, 即使放射性浓度远低于排放浓度管理目标值, 也应实现槽式排放, 进行放射性衰减处理, 剂量监测达标后集中排放。

1.2 核电厂含油废水水质分析

常规岛和 BOP 含油废水处理系统分别接收来自汽机房、循环水泵房、车库、空压机房、柴油和润滑油储存区等设备管道疏水和冲洗排水, 升压站、变压器区、柴油和润滑油储存区的雨水, 以及上述区域发生火灾时的消防排水。根据已运行

表 1 2 × 1 000 MWe 级核电机组生产废水分析
Table 1 2 × 1 000 MWe Nuclear Power Units Productive Wastewater Discharge Quality

废水项目	排水量	排水水质			备注
		含油成份	含盐成份	其他	
除盐水处理系统再生废水	177 m ³ /次, 平均 10 m ³ /h	无	主要为 NaCl	酸碱性废水	就地中和处理, 达标排放
除盐水处理系统过滤器反洗废水	58 m ³ /次, 平均 5 m ³ /h	无	与原水相同	悬浮物高	排至净水站水 污泥处理系统处理
凝结水精处理系统树脂输送废水	80 m ³ /次, 平均 0.5 m ³ /h	无	含盐量低	悬浮物低	剂量监测达标排放
凝结水精处理系统再生废水	300 m ³ /次, 平均 3 m ³ /h	无	主要成份 NaCl	酸碱性废水	就地中和处理, 剂量监测达标排放
二回路取样系统排水	30 m ³ /d, 平均 1.25 m ³ /h	无	除盐水		剂量监测达标排放
厂用水系统排污水	约 33 m ³ /h, 连续	无	含盐量 约 1 200 mg/L	悬浮物 <70mg/L	达标排放
机组运行疏放水	平均 10 m ³ /h	无	除盐水	约 80℃	冷却至 50℃后 剂量监测达标排放
循环冷却水系统排水	约 1 000 m ³ /h, 连续	无	淡水: 含盐量低 海水: 含盐量高	悬浮物 <70mg/L	达标排放, 浓缩倍率: 淡水 3~5 倍, 海水 1.5~2.5 倍
机组启动冷态清洗排水	单台 1 200 m ³ /h, 定期	无	除盐水	约 60℃	启动初期不合格水放水, 冷却至 50℃后回用
机组检修疏放水	单台 8 00 m ³ /h, 定期	无	除盐水	约 80℃	剂量监测达标排放
机组二回路 SGTR 工况排水 (不含蒸汽发生器二回路侧水容积)	单台 1 730 m ³ /次, 不定期	无	除盐水	—	剂量监测达标排放
机组汽机房含油废水	单台消防时 349 m ³ /次, 不定期	轻油	无	冷却至 50℃	处理后经剂量监测达标排放 消防时不与 2.5 项叠加
升压站、变压器区含油废水	消防时 474 m ³ /次, 不定期	轻油	无	—	处理后经剂量监测达标排放 消防时不与 2.4 项叠加
循环水泵房、车库、空压机房、 柴油和润滑油储存区含油废水	113.55 m ³ /h, 不定期	轻油	无	—	处理后经剂量监测达标排放
机组放射性废液系统排水	单台 22.7 m ³ /h, 不定期	无	无	—	经剂量监测达标排放
厂址废物处理设施排水	30 m ³ /h, 不定期	无	无	—	经剂量监测达标排放

表 2 常规岛废液排放量记录
Table 2 Conventional Island Wastewater Discharge Flow Data

年份	机组 编号	项目	逐月记录												全年合计
			1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	
2004	G1	次数	12	12	12	10	11	20	29	19	22	17	16	17	197
	G2	体积/m ³	4 914	4 809	5 007	4 255	4 837	8 700	12 447	8 146	9 004	6 898	6 803	7 203	83 021
	L1	次数	1	0	0	7	18	16	13	14	17	12	19	20	137
	L2	体积/m ³	474	0	0	2 935	7 303	6 678	5 645	5 380	7 065	5 015	7 925	7 890	56 309
2005	G1	次数	13	11	14	15	14	12	13	14	16	12	18	22	174
	G2	体积/m ³	5 458	4 696	5 958	6 330	5 991	5 096	5 502	6 099	6 856	5 126	7 756	9 644	74 510
	L1	次数	26	12	16	12	12	11	13	14	15	10	10	14	165
	L2	体积/m ³	10 915	4 945	6 655	5 000	4 930	4 425	5 380	5 810	6 255	4 225	4 085	5 350	67 975

1 000 MWe 级核电厂的常规岛废液排放量记录, 见表 2, 机组调试时, 排水无放射性, 可直接排往厂区排水管网; 机组启动时, 放射性废水排放量约为 200 m³/h。

机组正常运行时, 每台机组低放射性废液最高日排水量约为 100 m³/d, 平均时排水量约为 4~5

m³/h。含油废水排水呈间断性, 进水水质、水量均有波动, 机组大修时, 含油量明显偏高, 油污难溶于水且粒径较大, 易在水面形成浮油, 少量粒径为 100~10 000 nm 的微小油粒易形成乳化油稳定地悬浮于水中; 消防灭火时, 排水量骤然增大。废水 pH 值为 6.7~7.2, SS 为 3~3.9 mg/L, COD_r 为

20~69 mg/L(基本由废油成分形成),石油类为 95.1 mg/L^[2],无事故排油实测值。BOP 含油废水来源无放射性,其含油废水可单独处理达标后排放;当第一回路冷却剂经蒸汽发生器的管束不严密和蒸汽湿分大,使第二回路蒸汽的比放射性活度超过 3×10^{-2} Bq/kg 时^[3],如蒸汽管道发生破口,常规岛产生的废水存在潜在放射性,因此常规岛含油废水处理系统除具有油水分离功能外,应根据纵深防御的要求采取措施,降低潜在放射性污染的风险。

2 系统设计改进

2.1 工艺流程改进

1 000 MWe 级核电厂常规岛含油废水处理原工艺流程见图 1。

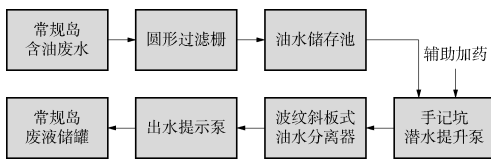


图1 原工艺流程

Fig. 1 Original Processing Flow

1 000 MWe 级半速汽轮发电机组的外形尺寸明显大于全速汽轮机组,需增加汽机房的跨度才能布置下原工艺处理设备。处理设备为浸没式,提升泵为潜污泵,全套进口,当排油量较大时,出水水质不稳定,需采用辅助加药强化处理,而辅助加药产生的污泥副产物需按放射性污染废物处置。设备长期浸没在废水中,维护检修困难,影响使用寿命等问题。针对上述问题,设计提出了改进后的工艺流程见图 2,改进后的工艺系统见图 3。

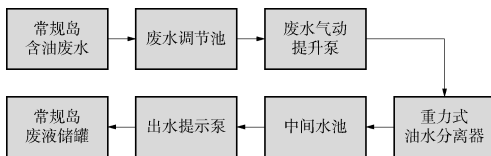


图2 改进后的工艺流程

Fig. 2 Optimized Processing Flow

2.2 系统改进分析和措施

2.2.1 调节池容积改进

2.2.1.1 设计分析

系统设计难点之一是确定废水来水量。进入常规岛废水系统的最大来水量为常规岛的消防排水

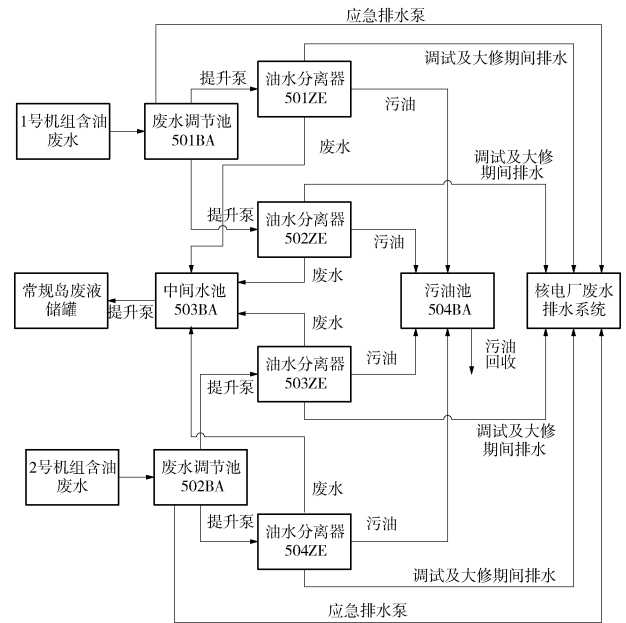


图3 改进后的工艺系统

Fig. 3 Optimized Processing Flow Diagram

量,按 1 000 MWe 级核电厂消防设计,两台机组同时发生火灾次数为一次,一台机组汽机房内运转层下自动喷水消防水量为 8 167 L/min,火灾持续时间 1.0 h;室内消火栓水量为 25 L/s,火灾持续时间 2.0 h,计算出消防总排水量为 670 m³。

理论上,废水调节池贮存容积应容纳常规岛消防总排水量。事实上,常规岛含油废水主要来自汽轮机的给水加热器疏水回收系统、电动给水泵及润滑系统、启动给水系统、凝结水抽取系统、汽水分离再热器系统的机械设备润滑油泄漏废水及附近区域的地面排水,其他大部分系统疏水及冲洗水均为非含油废水,因此常规岛含油废水量是有限的,相应的废水收集系统设计划分为设备管道疏水集水口和地面排水集水口,地面排水集水口相应收集含油废水和非含油废水。消防喷淋均匀喷洒到厂房地面上,一部分含油设备区的排水进入含油收集系统,另一部分排水则进入非含油收集系统。按核电厂系统单一故障准则^[4],第二回路蒸汽管路发生破口,不同时继发消防系统动作,消防排水为非放射性来源,已运行核电厂含油废水处理系统的进水管道上设置了限流孔板,限制上游的消防排水全部进入该系统,消防排水较多时可暂存在收集系统中,如消防时间延长,允许从集水口满溢,因此优化废水调节池容积是允许的。

2.2.1.2 改进措施

设计将汽机房运转层下自动喷水系统划分为4个保护区, 喷头均匀布置在厂房运转层楼板下。含油废水量包括自动喷水灭火系统和消火栓灭火系统排水, 消防喷淋在整个厂房地面面积上的分布是均匀的, 喷水强度在灭火时间内均匀不变, 汇水面积随集流时间增长的速度为常数, 因此适用恒定均匀流推理公式, 自动喷水灭火系统排水量可按式(1)计算:

$$Q_z = q\psi F \quad (1)$$

式中: Q_z 为系统设计排水流量, L/s; q 为系统设计喷水强度, L/s · m²; ψ 为径流系数, 取 1.0; F 为灭火保护面积, m²。

式(1)中灭火保护面积 F 取值国内外标准存在差异, 美国 NFPA 13 标准要求自动喷水保护面积为 465 m², 国标 GB 50745 要求自动喷水作用面积为不低于 260 m²; 设计取值时应与消防系统设计标准协调一致。

含油调节池有效容积, 可按式(2)计算:

$$V = 3\ 600\ t\ Q_w\ \beta \quad (2)$$

式中: V 为调节池有效容积, m³; t 为调节池进水时间(h), 取 1~2 h; Q_w 为含油废水量, m³/s; β 为安全系数, 取 1.1~1.2。

根据常规岛自动喷水灭火系统和消火栓灭火系统排水量, 按地面含油废水收集口数量和集水面积, 可计算出废水调节池所需容积为 349 m³, 考虑水泵吸入口淹没深度和 10%~20% 的裕量, 确定调节池总容积为 500 m³, 并设置应急排水泵防止调节池溢流。

2.2.2 系统处理规模改进

2.2.2.1 设计分析

系统设计难点之二是确定系统处理规模。常规岛含油废水处理系统的原设计处理规模为 2 × 200 m³/h, 由于汽机房内不具备试验条件, 无法实测消防最大排水量, 但常规岛消防设计水量远远大于平均时排水量, 显然系统处理规模不能按平均时排水量设计。常规岛含油废水量有限, 大修时大部分为蒸汽管道清洁冲洗排水, 可直接排至厂区排水管网, 系统规模按最高日排水量设计也不合理, 而且半速汽轮发电机组工艺系统改进, 布置发生较大变化, 最高日排水量仅供设计参考。此外, 原工艺系统油水分离设备全浸没在水池中, 该水池不具备调

节能力, 并且在油水分离设备进口处设置了节流孔板。

2.2.2.2 设计改进

系统设置进水调节池, 火灾发生时, 消防排水全部贮存在废水调节池中, 灭火完成后至机组恢复正常运行, 因此处理系统规模可按机组正常运行时的含油废水量及冷却水量计算, 不受消防排水量影响。系统同时处理机组连续排放废水和贮存的消防排水, 确定处理总规模为 50 m³/h, 考虑国内设备商制造能力, 油水分离设备设置为 4 台, 单台出力为 12.5 m³/h。

2.2.3 实体分隔改进

2.2.3.1 设计分析

含油废水处理设备原设计分别设在各自的汽机房内, 可满足分隔的要求。由于两台机组建设时, 投运时间相隔 8 个月, 当首台机组已装核燃料发电而第二台机组调试时, 如两台机组排水合在一起直接排放, 存在放射性泄漏的风险; 当机组运行时, 一台机组大修而另一台机组正常运行, 由于排水水质不同也不宜合并处理。

如果将废水收集池和调节池合并, 油水分离器分设在各自的汽机房内, 既满足运行要求, 也能简化系统。由于 1 000 MWe 级半速汽机房内布置紧凑, 没有多余地下空间布置更大的废水收集池和处理装置, 增大汽机房跨度布置废水池显然不经济, 因此常规岛含油废水处理厂房宜与汽机房脱开布置。

2.2.3.2 厂房建筑物实体分隔设计改进

两台机组的处理设备设置于独立的厂房, 布置在首台机组汽机房外, 厂房外形尺寸为 13.4 m × 18 m, 与汽机房的间距大于 4 m, 在含油废水处理厂房一侧设置防火墙, 实现平面分隔。处理厂房零米层下部为调节池, 深 4.5 m, 零米层上部为中间水池和设备, 高 5.5 m, 实现竖向分隔, 避免了处理装置、再生油箱、泵、控制设备被水淹的风险。

2.2.3.3 非含油废水管道实体分隔设计改进

常规岛凝结水精处理系统、汽水取样系统排水经中和池中和处理, 与非含油废水排水合并后一起排至低放射性废液储罐。中和池出水管和非含油废水池出水管及汇合后设置一条旁通管和手动阀门, 平时关闭阀门, 大修时临时安装一段可拆卸法兰短管排水, 冲洗排水经监测不含放射性, 则打开旁通

阀排至厂区排水管网。

2.2.3.4 含油废水管道实体分隔设计改进

调节池设中隔墙将其一分为二，两台机组的含油废水管道分别接入两座调节池。在中隔墙底部设置联络管，联络管两端设置阀门，正常运行时开启阀门，实现两池互为备用；一台机组调试或大修清扫水池时，关闭阀门，实现两池独立运行。

2.2.3.5 油水分离设备实体分隔设计改进

油水分离处理设备位于调节池上部，每台机组各设置两列油水分离器设备，两台机组共4套。每列设备采用两台提升泵供水，泵各自设吸水管，泵出水管设联络管和双隔离阀，实现每列的任意一台泵可向每套设备供水；每套设备设置独立的出水管接至中间水池，再通过泵提升至低放射性废液储罐；中间水池排空和溢流可分别回流至调节水池；每套油水分离器均设有独立的旁通管和隔离阀，在调试和大修期间时进行取样检测，将不含放射性和油污的出水排至厂区排水管网。

2.2.4 设计水质

设备可承受一定的水质负荷波动，设计进水悬浮物(SS) $\leq 50 \text{ mg/L}$ ，水温 $\leq 50 \text{ }^\circ\text{C}$ ，石油类 $\leq 110 \text{ mg/L}$ ，在极端情况下，设备具备处理进水含油量100%的能力。设计值出水水质石油类指标 $\leq 5 \text{ mg/L}$ ，满足国家污水综合排放一级标准；期望值出水水质石油类指标 $\leq 3 \text{ mg/L}$ ，满足省级地方排放标准。

2.2.5 主要设备选型

系统主要设备为并联运行，互为备用，设备参数见表3。

表3 常规岛含油废水处理系统主要设备

Table 3 Conventional Island Oily Wastewater Treatment Equipments

名称	规格	台数	质保等级
重力式油水分离器	Q=12.5 m ³ /h, Φ2.3×3 m	4台	QR3
油水提升气动隔膜泵	Q=12.5 m ³ /h, H=14 m	4台	QR3
中间水池提升泵	Q=50 m ³ /h, H=27 m	2台	QR3
污油回收泵	Q=10 m ³ /h, H=10 m	2台	QR3
应急排水潜污泵	Q=25 m ³ /h, H=14 m	2台	QR3

油水提升泵采用低剪切速率的气动隔膜泵，可有效减缓油水乳化效应，泵配底阀，气源由全厂公用压缩空气系统供给，无需单独设置空压机和压力储罐。油水分离器为圆柱形重力式容器，在容器内

自上而下依次设有缓流器、集水器、集油器及上水管。污水进口、净水出口和油出口分别通过各自的水平导管伸出容器之外。含油污水自污水进口流入后，油、水会自动分离，然后分别经油出口、净水出口流出，具有结构简单、运行可靠，分离精度高，无需外动力的优点。油水分离器材质为20号碳钢，内涂环氧树脂漆防腐，外涂醇酸漆。调节池和污油池内壁涂耐油涂环氧树脂漆防腐。废水管道埋地为球墨铸铁管，明敷为内外热浸镀锌钢管，给水管道为衬塑钢管，压缩空气管道为304不锈钢管。

2.2.6 运行和控制

处理系统正常运行时采用自动控制，通过PLC就地控制将报警信号送至DCS集中控制系统，实现无人值守。当调节池达到启泵水位，自动启动油水提升泵将含油废水提升至重力式油水分离器；经分离后的废油自流至污油池，通过污油泵提升至罐车定期回收。当极端情况下，消防灭火时间超过2h，调节池达到报警水位时，自动启动应急排水泵排至厂区排水管网。

3 工程应用及效益

常规岛含油废水处理系统已应用于岭澳核电站二期工程，自2012年9月试运行以来，其出水水质满足国家标准《污水综合排放》(GB 8978—1996)一级标准和广东省地方标准《水污染物排放限值标准》(DB 44/26—2001)的要求，并通过了国家环保部组织的环保验收监测，系统试运行期间水质检验指标见表4。

表4 系统试运行期间水质检验指标

Table 4 Commissioning of System Water Indices

样品编号	SS/ (mg·L ⁻¹)	石油类含量/ (mg·L ⁻¹)
进水: 501BA 调节池	3.31	>100
进水: 502BA 调节池	6.05	>100
501ZE 重力式油水分离器	2.35	3.83
502ZE 重力式油水分离器	3.16	3.98
503ZE 重力式油水分离器	2.26	4.43
504ZE 重力式油水分离器	3.92	4.61

通过优化工艺流程，设置调节池提高系统抗冲击负荷能力，系统规模减少为12.5%，运行安全可靠，无药剂投加，不产生污泥副产物，出水水质达

到国家和地方一级排放标准。两台机组处理设备联合布置在汽机房外,减少汽机房跨度约12 m,避免汽轮机基座土建和地下设施交叉施工,缩短负挖回填工期。设备地上式布置,解决了进口波纹斜板设备长期浸泡问题,提高了耐久性,达到先进核电厂60年寿期的要求,设备国产化率提高到80%,工程节省投资约240万元。本系统已推广应用于山东海阳、广东阳江、广西防城港、福建宁德在建核电机组,经济与社会效益显著。

4 结论

本文分析了核电厂常规岛潜在放射性含油废水产生的原因和特点,并结合1 000 MWe级核电厂工程应用实例,探讨了适用于常规岛含油废水处理系统优化。研究认为:

- 1) 常规岛含油废水处理系统工艺流程选择应根据纵深防御原则降低潜在放射性污染的风险。
- 2) 含油废水处理系统容量应根据收集常规岛工艺系统疏放水和冲洗水量、消防灭火系统排水量确定。处理系统应设置地下废水调节池,其有效容积应根据常规岛汽机运转层下自动喷水和室内消火栓

消防排水量、集水面积经计算确定,并留有一定裕量。系统处理规模宜按 $4 \times 12.5 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

3) 两台机组处理系统宜布置在独立厂房内,设备地上式安装,调节池和管道系统应设置实体分隔,并联运行,互为备用,设计使用寿命为60年。

4) 处理系统宜采用非能动部件的重力式油水分离器,和能动部件少的气动隔膜式提升泵设备,无污泥副产物,运行安全可靠,出水水质达到国家和地方一级排放标准。

参考文献:

- [1] GB 14587—2011, 核电厂放射性液态流出物排放技术要求[S].
- [2] 张强, 任世军, 胡昌贤, 等. 岭澳核电站非放射性油水分离系统改造[J]. 中国给水排水, 2006, (12): 30-33. ZHANG Qiang, REN Shijun, HU Changxian, et al. Modification of the Separation System for Wasted Nonradioactive Oil and Water of Ling'ao Nuclear Power Plant [J]. China Water & Wastewater, 2006, (12): 30-33.
- [3] 阎维平, 周月桂, 刘洪宪, 等. 洁净煤发电技术[M]. 第2版, 北京: 中国电力出版社, 2008: 24-25.
- [4] HAF 102—2004, 核动力厂设计安全规定[S]. 2004.

(责任编辑 黄肇和)

(下接第154页 Continued from Page 154)

- [10] IAEA. IAEA TRS 422: Sediment Distribution Coefficients and Concentration Factors for Biota in The Marine Environment [M]. International Atomic Energy Agency, Vienna, 2004.
- [11] ERICA. Environmental Risk from Ionising Contaminants: Assessment and Management (EC 6th Frame-work Programme) [EB/OL]. <http://www.facilia.se/projects/erica.asp>.
- [12] IAEA. IAEA TRS 472: Handbook of Parameter Values for The Prediction of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments [M]. International Atomic Energy Agency, Vienna, 2010.

- [13] Canadian Standard Association. Guidelines for Calculating Derived Release Limits for Radioactive Material in Airborne and Liquid Effluents for Normal Operation of Nuclear Facilities [R]. CAN/CSA-N288. 1-M87. 1987.
- [14] IAEA. IAEA TRS 479: Handbook of Parameter Values for The Prediction of Radionuclide Transfer to Wildlife [M]. International Atomic Energy Agency, Vienna, 2014.

(责任编辑 高春萌)

(下接第169页 Continued from Page 169)

- [13] DIKMEN I, BIRGONUL M T, TAH J H M, et al. Web-based Risk Assessment Tool Using Integrated Duration-cost Influence Network Model [J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2012, 138(9): 1023-1034.
- [14] 全吉, 黄剑眉, 张水波, 等. 基于风险链和风险地图的风险识别和分析方法[J]. 南方能源建设, 2014, 1(1): 92-96. QUAN Ji, HUANG Jianmei, ZHANG Shuibo, et al. Method of Risk Identification and Analysis Based on Risk Chain and Maps [J]. Energy Construction, 2014, 1(1): 92-96.

- [15] 朱明, 全吉, 黄剑眉, 等. 国际工程项目费用风险量化评估与动态管控[J]. 国际经济合作, 2014, 29(5): 81-86. ZHU Ming, QUAN Ji, HUANG Jianmei, et al. Quantitative Risk Assessment and Dynamic Control of International Engineering Project Cost [J]. Journal of International Economic Cooperation, 2014, 29(5): 81-86.

(责任编辑 郑文棠)