

压水堆驱动线落棒历程计算

周肖佳, 毛飞, 闵鹏, 林绍萱

(上海核工程研究设计院, 上海 200233)

摘要: 控制棒落棒性能验证是核电厂安全分析的重要部分, 研制驱动线落棒历程计算程序有利于验证和改进控制棒驱动线设计。基于驱动线结构特点, 分析运动组件的受力情况并进行分解, 选择理论或数值方法逐一求取各分力的瞬态值, 从而建立驱动线落棒历程的循环步进计算程序。利用秦山核电二期工程驱动线落棒性能试验数据对理论模型和程序计算结果进行对比验证。结果证明: 所建立的驱动线落棒历程计算程序适用于压水堆驱动线系统, 能正确地对运动组件落棒受力与运动历程进行模拟。

关键词: 驱动线; 控制棒组件; 落棒历程

中图分类号: TL364

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2013)09-1584-06

doi: 10. 7538/yzk. 2013. 47. 09. 1584

Calculation of Drop Course of Control Rod Assembly in PWR

ZHOU Xiao-jia, MAO Fei, MIN Peng, LIN Shao-xuan

(Shanghai Nuclear Engineering Research & Design Institute, Shanghai 200233, China)

Abstract: The validation of control rod drop performance is an important part of safety analysis of nuclear power plant. Development of computer code for calculating control rod drop course will be useful for validating and improving the design of control rod drive line. Based on structural features of the drive line, the driving force on moving assembly was analyzed and decomposed, the transient value of each component of the driving force was calculated by choosing either theoretical method or numerical method, and the simulation code for calculating rod cluster control assembly (RCCA) drop course by time step increase was achieved. The analysis results of control rod assembly drop course calculated by theoretical model and numerical method were validated by comparing with RCCA drop test data of Qinshan Phase II 600 MW PWR. It is shown that the developed RCCA drop course calculation code is suitable for RCCA in PWR and can correctly simulate the drop course and the stress of RCCA.

Key words: drive line; control rod assembly; drop course

反应堆控制棒的落棒时间是核电厂安全分析的重要参数之一, 也是驱动线设计考核的重要

指标之一。控制棒驱动系统结构复杂, 落棒过程与驱动线结构设计、制造和安装直接相关, 并受

到堆内流场、温度、压力和外载荷等的影响^[1-3]。

近年来,国内外核反应堆研究设计部门开始关注控制棒下落的物理机制、计算模型和程序开发。文献[1]探讨了控制棒组件在流体环境中下落时所受阻力的理论计算方法,但对流阻的划分过于简单,难以与驱动线内复杂结构相吻合;文献[2]使用实验结果对计算模型进行了修正,但模型中没有局部冷却剂与控制棒的相对流速的计算;文献[3]研究了碰撞效应对落棒时间的增量,但未考虑完整的驱动线。

已有研究或简化模型存在不合理之处,或瞬态阻力项的计算不够精确。本文试图建立一种全面、精确,且简单、可靠的控制棒落棒历程计算方法。落棒仿真数值模型的建立和验证,将有助于减少安全验证工作对昂贵且耗时的台架试验的依赖,为驱动线设计提供依据^[4]。

控制棒落棒过程由3部分组成:驱动机构释棒、驱动线落棒、缓冲段停棒。当控制棒组件到达缓冲段入口后,其再引入的负反应性很小,所以一般不考核缓冲段落棒时间。本文研究对象为驱动线落棒历程:控制棒组件从最高位置受重力作用,克服浮力、机械摩擦力和流体阻力下落至燃料组件导向管缓冲段入口的过程。

1 受力分析

1.1 驱动线结构

驱动线是反应堆内构成控制棒及驱动杆上下运动的通道的总成。反应堆驱动线由控制棒驱动机构、堆内构件导向筒、燃料组件导向管组成的静侧组件以及驱动杆连带控制棒组成的运动组件组成。

1.2 运动组件受力

运动组件在下落过程中,受到重力、浮力、流体阻力及机械摩擦力4种力,其中重力和浮力易于计算,研究重点在于流体阻力和机械摩擦力。

1.3 机械摩擦力

本文根据驱动线摩擦阻力的产因,认为运动组件与静侧组件之间存在的摩擦力由两部分组成:动致摩擦力和位移致摩擦力。

动致摩擦力指对中度达到极限理想状态,且无振动影响时驱动线内仍存在的摩擦最小摩擦力。动致摩擦力是只要运动存在即无法避免的摩擦力。位移致摩擦力指存在错对中和振动

(流致振动)时,驱动线静侧和运动组件间的碰撞几率和接触应力增加所产生的附加摩擦力。

1.4 流体阻力

驱动线结构复杂、内流道长宽比非常大,使用有限元方法很难保证简化模型与实际情况相符,因此本文尝试将驱动线分区后结合理论与数值方法求解流阻分量。

基于驱动线的结构特点,将流体阻力按区域划分如下。

1) 在控制棒驱动机构中:导向隔热套/顶盖贯穿件区域流阻 $F_{CRDM(1)}$; 钩爪区域流阻 $F_{CRDM(2)}$; 棒行程壳体区域流阻 $F_{CRDM(3)}$ 。

2) 在堆内构件导向筒中:驱动杆在导向筒中所受流阻 F_{GUIDE} ; 连接柄在导向筒中所受流阻 F_{SPI} ; 控制棒在导向筒中所受流阻 F_{DRAG} 。

3) 在燃料组件中:控制棒在燃料组件中所受流阻 F_{CORE} 。

共划分为7个分力以便分别建立计算模型。驱动线结构与流体阻力分段划分如图1所示。

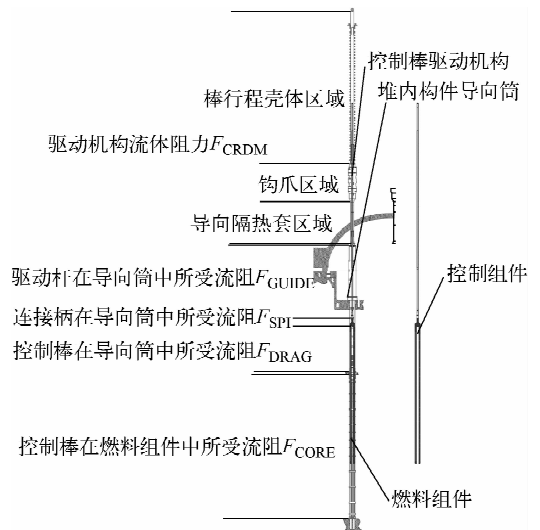


图1 驱动线结构与流体阻力分段划分
Fig.1 Structure drawing of drive line and subsection of hydro-resistance

2 理论方法

2.1 控制运动方程

在每个瞬态步长循环完成后,按式(1)计算运动组件瞬态加速度 A :

$$A = \frac{W \cos \theta - F_B \cos \theta - F_{BF} - F_{sum}}{W_R} \quad (1)$$

式中: W 为运动组件干重, kg; θ 为压力容器倾斜角, °; F_B 为浮力, N; F_{BF} 为机械摩擦力合力, N; F_{sum} 为流体阻力合力, N。

下落过程中运动组件内腔、表面缝隙中会携带一部分冷却剂, 因此应在运动组件干重的基础上进行修正, 以保证计算结果准确或偏保守:

$$W_R = W(1 + \kappa) \quad (2)$$

式中, κ 为修正因子。

2.2 机械摩擦力

1) 动致摩擦力

在驱动线性能试验台架上通过抽插试验可得最小摩擦力的值, 在本文中依据经验将动致摩擦力设为 45 N。

此外依据燃料组件抽插试验数据在燃料组件发生弯曲时动致摩擦力增加约 20%; 依据驱动线抗震试验数据反推估算在 SSE 地震工况下动致摩擦力增加约 115 N。本文算例未计入上述两因素的影响。

2) 位移致摩擦力

位移致摩擦力与总位移量间存在对应关系。总位移由静态位移和动态位移两部分组成。静态位移指组件制造和安装中产生的错对中量; 动态位移指静侧组件振动引起的位移量。总位移按式(3)计算:

$$D_{SM} = D_S + \cos \frac{2\pi t}{f_{FRQ}} \cdot D_{SO} \quad (3)$$

式中: D_{SM} 为总位移量, mm; D_S 为静态位移量, mm; t 为落棒时间, s; f_{FRQ} 为自振频率, Hz; D_{SO} 为振幅, mm。

堆内构件下部导向筒两端为固定结构, 忽略其微振动; 而上部导向筒为悬臂梁结构, 因此根据堆内构件流致振动响应频率^[5]计算上部导向筒动态位移量。

得到总位移量后, 依据导向筒抽插测试中所得错对中量与摩擦力的对应数组通过插值法求取位移附加摩擦力。

最后, 瞬态摩擦力根据式(4)进行计算:

$$F_{BF} = F_{FT} + F_{FOM} \quad (4)$$

式中: F_{FT} 为动致摩擦力, N; F_{FOM} 为位移致摩擦力, N。

2.3 流体阻力

运动组件下落过程中受到的流体阻力依据其产生的机理不同分为: 1) 粘性流动边界层效

应产生的粘性摩擦阻力; 2) 粘性存在使物体后缘流动产生分离, 尾部压力低于头部而形成的压差阻力; 3) 驱动线通道存在突变处, 附加计算局部形状阻力以修正计算结果。

根据本文对流体阻力的划分, 简化为细长圆柱体的驱动杆、控制棒主要计算其外表面所受粘性摩擦力; 而控制棒连接柄投影面积较大, 主要计算其前后压差阻力。此外, 流道当量直径突变处应附加计算形阻。

1) 环形通道壁面摩擦阻力

$F_{CRDM(1\sim3)}$ 、 F_{CORE} 的主要产生机理为圆柱形组件在环形通道内前进时外表面所受粘性摩擦。通常在计算环形通道内摩擦阻力时采用圆管中摩擦阻力计算式, 只是在摩擦阻力计算式中应用环形通道的当量直径替代圆管直径。如式(5)^[6]计算:

$$F_{ring} = A_{rea} f \frac{L}{D_E} \cdot \frac{\rho v^2}{2} \quad (5)$$

式中: A_{rea} 为运动组件横截面积, m²; f 为无量纲粘性摩擦系数; ρ 为冷却剂密度, kg · m⁻³; v 为运动组件与冷却剂的相对速度, m · s⁻¹; L 为接触面长度, m; D_E 为当量直径, m。

需根据雷诺数、壁面粗糙度及流道形状尺寸确定摩擦系数 f :

$$f = \frac{64}{Re} \quad (\text{层流}) \quad (6)$$

$$f = C_t Re^{-0.25} \quad (\text{紊流}) \quad (7)$$

$$C_t/C_{t0} = \sqrt[3]{0.0154 \frac{C_1}{C_{t0}} - 0.012 + 0.85} \quad (8)$$

式中: C_t 为非圆形管道的紊流几何参数; C_{t0} 为圆形管道的紊流几何参数, 在水力光滑区域 $C_{t0} = 0.3164$; C_1 、 C_{t0} 分别为非圆形管道和圆形管道的层流几何参数。

C_1/C_{t0} 的值可根据管道的几何形状和尺寸由文献[7]关系图查得。按驱动线尺寸比例, C_1/C_{t0} 均取值为 1.5。式(8)中 $C_1/C_{t0} = 1.073$, 根据一般驱动线内零部件壁面粗糙度及流动雷诺数判断处于水力光滑区域, 取 $C_{t0} = 0.3164$, 因此 $C_t = 0.3395$ 。继而确定紊流水力摩擦系数为:

$$f = \frac{0.3395}{Re^{0.25}} \quad (9)$$

综上, 按图 2 流程求 $F_{CRDM(1\sim3)}$ 和 F_{CORE} 。

求解 F_{CRDM} 时, 可根据瞬态棒速和通道面积比例直接求解运动组件和冷却剂的相对流

速。而对于 F_{CORE} , 由于控制棒端部存在分流 (冷却剂部分向上、部分向下流出导向管) 不能

简单求得流速(图 3)。因此, 需先求解流速 V_A 和 V_T , 方法如下。

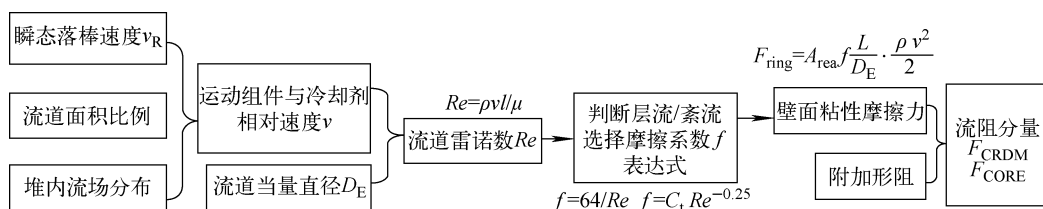


图 2 F_{CRDM}/F_{CORE} 算法流程概要

Fig. 2 Flow chart of F_{CRDM}/F_{CORE} calculation

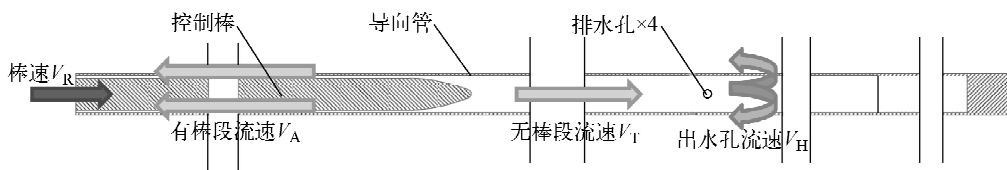


图 3 控制棒-导向管运动模型

Fig. 3 Schematic drawing of control rod and thimble tube moving model

假定控制棒头部向前运动时, 50% 的冷却剂绕过端塞向上, 其余向下。由假设的分流比例可按流道面积比例求 V_A 、 V_T 与 V_H , 然后用常规方法计算导向管有棒段、无棒段的压降。最后, 需通过导向管内外压降相等关系式(式(10))经迭代得 V_A 。

$$\Delta p_{in} + f_a \frac{Z}{D_E} \cdot \frac{\rho V_A^2}{2} + f_t \frac{E_{LT} - Z}{D_T} \cdot \frac{\rho V_T^2}{2} + \Delta p_{out} = \Delta p_{core} \quad (10)$$

式中: Δp_{in} 为导向管入口压降, Pa; f_a 为有棒段控制棒表面摩擦系数; Z 为瞬态落棒行程, m; V_A 为有棒段冷却剂向上流速, m/s; f_t 为无棒段导向管内壁摩擦系数; E_{LT} 为缓冲段以上的导向管长度, m; D_T 为导向管内径, m; V_T 为无棒段冷却剂向下流速, m/s; Δp_{out} 为导向管底部排水孔出口压降, Pa; Δp_{core} 为堆芯压降, Pa。

式(10)中每一项均可用 V_A 表示。经证明, 其求根式在分流比例 0%~70% 的域内存在唯一的迭代不动点, 因此该算法稳定可靠。

得到 V_A 解析解后, 可计算控制棒外壁流阻。最终 F_{CORE} 由导向管入口、控制棒端塞的形状阻力以及棒外壁与流体间摩擦阻力合成。

本文计算案例中的落棒历程至控制棒端塞进入燃料组件缓冲段入口为止, 如继续模拟控

制棒在水力缓冲作用下的减速过程, 则在上述方法基础上添加计算缓冲段阻力: 随落棒位移更改燃料组件导向管内径; 控制棒端塞经过缓冲段底部排水孔后, 将排水孔面积改为零。如此可得控制棒组件在燃料组件导向管缩紧缓冲段水力缓冲作用下逐渐减速至最终停止在燃料组件中的运动历程。

2) 开阔流道内壁面摩擦阻力

分析国内在役/在建机组泰山二期、大亚湾、福清一期、红沿河一期、宁德一期、岭澳 3、4 号机组等反应堆驱动线结构特点, 其堆内构件导向筒为封闭式、内腔较开阔, 下部连续导向段较短; 而我国自主设计的 300 MW 型核电厂, 如泰山一期、巴基斯坦恰西玛一期、二期机组反应堆堆内构件导向筒为开放式结构, 且对控制棒整体连续导向。结构的差异导致适用的流体阻力算法不同。

针对国内大多核电机组, 导向筒内供驱动杆运动的流道是较为开阔的(仅导向板处存在小间隙), 因此将 F_{GUIDE} 和 F_{DRAG} 简化为开阔空间内的粘性流体绕流阻力, 应用顺流平板边界层摩擦阻力公式^[8]:

$$F_{opensurface} = C_D \cdot \frac{1}{2} \rho v^2 A_w \quad (11)$$

式中: C_D 为摩擦阻力系数; A_w 为运动组件外壁

面积, m^2 。其中, 外壁面积 A_w 用棒位 Z 的函数分段表示, 相对速度 v 为瞬态值; 将驱动杆环槽杆长度乘以修正系数之后视作光滑杆。

3) 压差阻力

不同于控制棒和驱动杆, 控制棒连接柄为粗短结构, 迎流面积较大, 因此计算其前后压差阻力。

按式(12)^[8]计算 F_{SPI} :

$$F_{SPI} = C_D \cdot \frac{1}{2} \rho v^2 A_1 \quad (12)$$

式中, A_1 为迎流面积, m^2 。

2.4 堆内冷却剂瞬态

堆内冷却剂压力视为一定; 依据环路数、环路流量、堆芯旁通系数、导向筒分配比例及燃料间平均分配来确定流场; 结合堆芯入口温度及反应堆功率确定简化的温度场。通过

调用物性函数获得冷却剂密度、黏度值, 供流体阻力计算使用。

2.5 程序流程

按图 4 编写循环步进计算程序。

3 案例计算

为了对计算模型进行验证, 选择秦山核电二期工程作案例计算。利用所建立的程序计算该反应堆热态零功率(调试)工况下控制棒从最高点下落至燃料组件缓冲段入口的落棒历程。棒位、速度、加速度及历程中各分力的值列于表 1。

计算结果显示, 案例落棒耗时 1.409 4 s, 缓冲入口速度为 2.67 m/s。通过计算预测该速度能为燃料组件缓冲管内径及排水孔直径、个数、分布提供设计输入。若设计输入存在偏

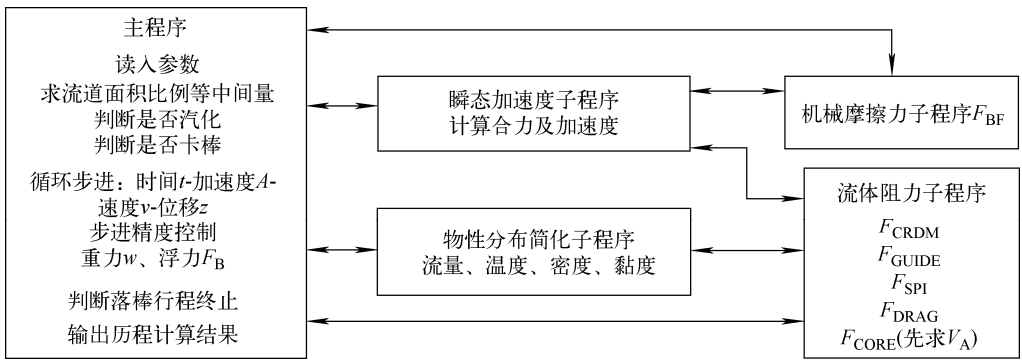


图 4 落棒历程计算程序流程概要

Fig. 4 Brief flow chart of RCCA drop course assessment code

表 1 秦山核电二期工程落棒历程计算数据

Table 1 Theoretical RCCA drop course calculating result of Qinshan Phase II NPP Project

时间/s	棒位行程/ m	速度/ ($m \cdot s^{-1}$)	加速度/ ($m \cdot s^{-2}$)	摩擦力/ N	F_{CORE}/N	F_{CRDM}/N	F_{GUIDE}/N	F_{SPI}/N	F_{DRAG}/N
0.000	0.00	0.00	5.84	193.28	69.75	0.00	0.00	0.76	0.86
0.100	0.03	0.61	5.36	171.32	107.53	53.61	0.13	3.23	3.28
0.200	0.12	1.13	4.69	119.58	152.65	158.79	0.89	6.77	6.37
0.300	0.25	1.56	3.94	68.95	195.95	274.94	2.44	10.62	9.35
0.400	0.43	1.90	3.09	58.19	225.20	382.56	4.98	14.26	11.74
0.591	0.84	2.34	1.63	79.13	253.16	546.32	11.87	19.87	14.19
0.691	1.08	2.49	1.12	71.35	274.05	607.40	16.14	21.93	14.37
0.791	1.33	2.58	0.72	66.28	294.19	650.43	20.40	23.30	13.87
0.891	1.59	2.64	0.47	55.48	311.30	679.51	24.54	24.24	12.89
0.991	1.86	2.66	0.25	53.17	325.66	698.53	28.41	24.52	11.59
1.091	2.13	2.67	0.14	52.59	337.00	702.09	32.05	24.65	10.09
1.191	2.39	2.68	0.11	54.01	346.82	694.71	35.52	24.70	8.51
1.291	2.66	2.68	0.06	58.10	355.49	687.06	38.94	24.72	6.85
1.391	2.93	2.67	-0.09	80.77	363.05	678.75	42.19	24.68	5.13
1.409 4	2.98	2.67	-0.24						

差,则导致缓冲过程中缓冲力不均匀或导致控制棒连接柄与堆芯上板撞击影响组件寿命。

将结果与文献[2,9-10]所述驱动线热态落棒试验数据进行对比,结果列于表2。对比显示计算所得历程中速度变化规律与试验吻合;最高点落棒至缓冲段入口的时间、速度则存在10%左右的偏差。证明本文建立的计算方法较准确且偏保守。

表2 计算与试验结果对比

Table 2 Comparison of calculation and test data

类别	至缓冲段	缓冲段入口	历程 规律
	入口时间/s	速度/(m·s ⁻¹)	
计算结果	1.409 4	2.67	相符
试验数据	1.24	3.03	

偏差原因估计:实验为模拟热态零功率工况的台架试验数据,而试验台架对中度较高,且流致振动影响不同,因此台架落棒较实堆稍快。

4 结论

本文对反应堆控制棒驱动线运动组件受力进行了分析与分解,采用理论解、经验值、迭代逼近的方法逐一求解落棒过程中的瞬态摩擦阻力与流体阻力分力,编写了适用于国内大部分核电机组的落棒历程计算程序。选择秦山二期工程作了案例计算,程序计算结果与台架试验结果较为相符。

结果表明:本文建立的落棒历程计算方法较为全面、精确,可对反应堆驱动线落棒历程进行动态分析和模拟仿真。

参考文献:

- [1] 于建华,魏永涛,孙磊,等. 控制棒组件在流体环境中下落时所受阻力的计算[J]. 核动力工程, 2001,22(3):236-241.
YU Jianhua, WEI Yongtao, SUN Lei, et al. Computation of resistance force of dropping control rod assembly under environment of fluid[J]. Nuclear Power Engineering, 2001, 22(3): 236-241(in Chinese).
- [2] 赵良举,彭云康,谭曙时. 秦山600 MW核反应堆控制棒热态落棒实验模拟分析[J]. 核动力工程, 2003,24(3):211-214.
ZHAO Liangju, PENG Yunkang, TAN Shushi.

Numerical simulation and analysis of control rod dropping of Qingshan 600 MWe Nuclear Reactor [J]. Nuclear Power Engineering, 2003, 24(3): 211-214(in Chinese).

- [3] 窦一康,姚伟达,杨仁安,等. 事故工况下控制棒落棒时间分析方法及其工程应用[C]//第十届全国反应堆结构力学术会议论文专辑. 上海:中国核学会,1998:371-376.
- [4] ANDRIAMBOLOLONA H, BOSELUT D, MASSIN P. Methodology for a numerical simulation of an insertion or a drop of the rod cluster control assembly in a PWR[J]. Nuclear Engineering and Design, 2007, 237: 600-606.
- [5] 叶奇蓁,张敬才,黄坚持,等. 秦山核电二期工程反应堆堆内构件流致振动综合评价[J]. 核动力工程, 2003,24(2):82-86.
YE Qizhen, ZHANG Jingcai, HUANG Jianchi, et al. Reactor internals FIV synthetical assessment for Qinshan Phase II NPP Project [J]. Nuclear Power Engineering, 2003, 24(2): 82-86 (in Chinese).
- [6] 王树众,王栋,林宗虎. 竖直环形管道内的两相流摩擦阻力研究[J]. 西安交通大学学报, 1994, 28(5):101-109.
WANG Shuzhong, WANG Dong, LIN Zonghu. A study of the two-phase frictional pressure drop in vertical annular channels[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1994, 28(5): 101-109 (in Chinese).
- [7] SADATOMI M, SATO Y. Two phase flow in vertical noncircular channel[J]. Int J Multiphase Flow, 1982, 8(6): 641-655.
- [8] 景思睿,张鸣远. 流体力学[M]. 西安:西安交通大学出版社,2001:216-223.
- [9] 钟艳敏,王源,付仿松. 秦山核电二期工程反应堆控制棒落棒性能测试[J]. 核动力工程, 2003, 24(2):221-223.
ZHONG Yanmin, WANG Yuan, FU Fangsong. Drop performance testing of Qinshan Phase II NPP Project [J]. Nuclear Power Engineering, 2003, 24(2): 221-223(in Chinese).
- [10] 孙磊,于建华,魏永涛,等. 控制棒组件落棒时间与历程计算[J]. 核动力工程, 2003,24(1):59-62.
SUN Lei, YU Jianhua, WEI Yongtao, et al. Analysis of drop-time and course of control rod assembly[J]. Nuclear Power Engineering, 2003, 24(1): 59-62(in Chinese).