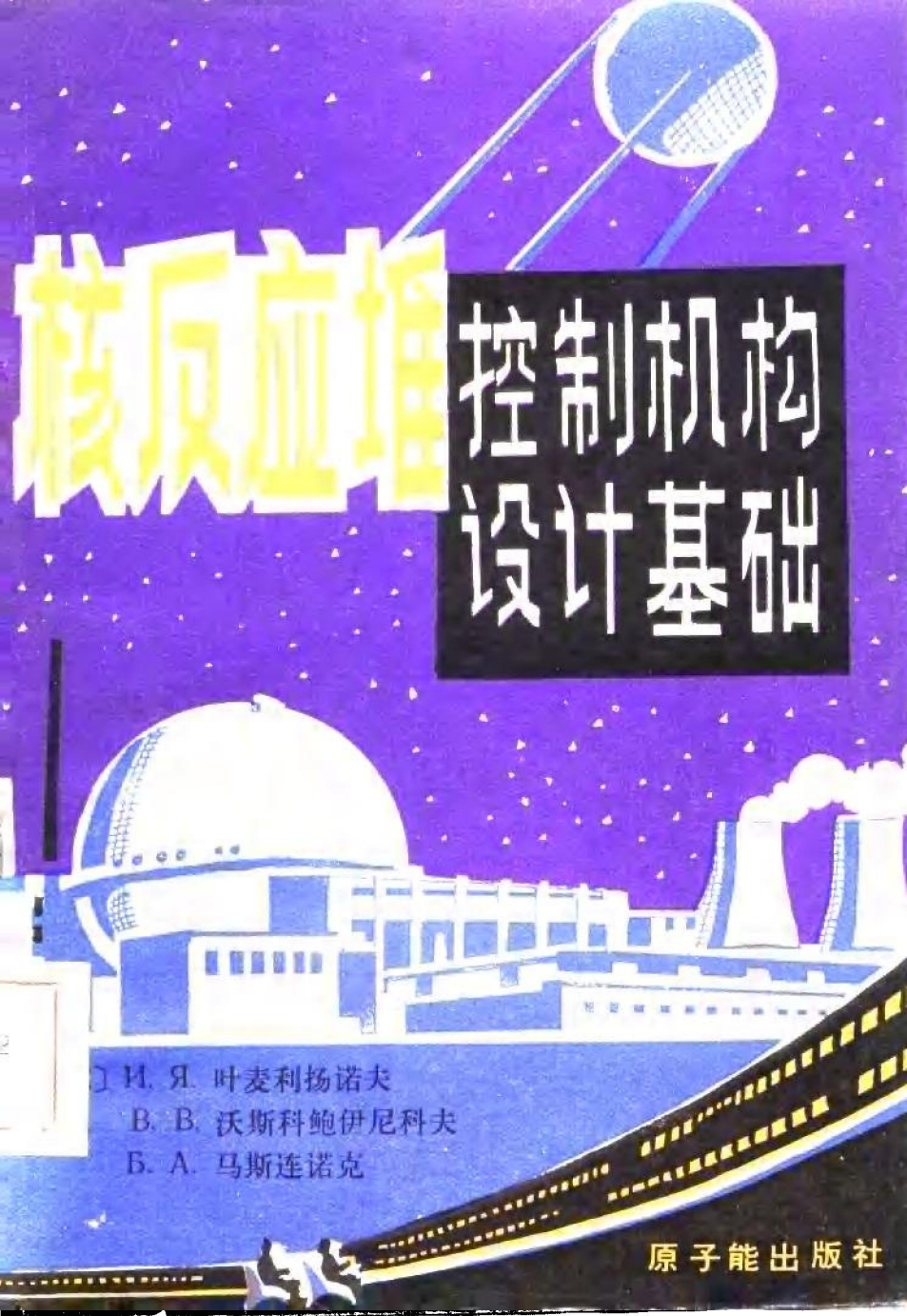




И. Я. 叶麦利扬诺夫
В. В. 沃斯科鲍伊尼科夫
Б. А. 马斯连诺克

原子能出版社

ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ
МЕХАНИЗМОВ УПРАВЛЕНИЯ
ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ

И. Я. ЕМЕЛЬЯНОВ
В. В. ВОСКОБОЙНИКОВ
Б. А. МАСЛЕНКО

МОСКВА АТОМИЗДАТ, 1978



核反应堆控制机构设计基础

[苏] И. Я. 叶麦利扬诺夫
В. В. 沃斯科鲍伊尼科夫
Б. А. 马斯连诺克
陈效军 译

原子能出版社出版
(北京2108信箱)

北京印刷一厂印刷
(北京市西便门)

新华书店北京发行所发行·新华书店经售



开本 $787 \times 1092 \frac{1}{32}$ ·印张10·字数220千字
1982年5月第一版·1982年5月第一次印刷
印数001—1100·统一书号: 15175·412
定价: 1.25元

内 容 简 介

本书分析了核反应堆控制机构的设计问题,指出了核动力装置自动化的前景和方向。

书中总结了苏联和其它国家在控制和保护系统驱动机构的设计、制造和运行方面的经验,并使之系统化。对核电站的控制系统、控制机构的最佳结构及其单个部件进行了描述,并给出了它们的计算方法。书中还特别注意到控制机构设计领域中具有发展前途的控制和保护系统的断续式电磁驱动装置,分析了结构的可靠性、经济性和工艺问题。

本书可供从事核反应堆控制机构设计和运行的工程师和技术人员使用,也可供大专院校有关专业的学生学习核反应堆设计时参考。

本书译稿承杨水泉同志审阅,特此致谢。

前 言

核动力事业的发展是与核动力装置在控制和自动化方面的进展不可分割地联系在一起。大型核电站反应堆活性区的结构复杂,有大量的释热元件和调节器在严格的条件下工作。为了使这种活性区中的能量释放最佳化和提高核电站运行的经济性,要求采取特殊的手段和设计专门的自动化装置,以保证对这些核反应堆进行监督和控制。这些手段应能使沿活性区半径和高度方向上的释热分布得到展平,能克服大型反应堆中发生的不稳定性,而又确保核安全的全部要求,不让核电站停下来。这是因为电站停止运行会引起巨大的经济损失。

控制手段和自动化的改进也使反应堆制造业在其它领域中获得了发展。目前,在船舶制造、科学研究和征服宇宙空间等方面都在利用核动力装置。当调节和控制这些装置的核反应堆时,必须考虑它们运行中的特殊要求。

在核动力装置自动化过程中所要解决的基本的,也是最复杂的问题之一是研制控制机构。这是因为控制机构直接与反应堆设备及其活性区配套。这些机构的部件经常在很高的压力和温度下工作,并承受辐照、振动和冲击载荷。这种机构在船用反应堆上工作时,还有船舶的倾斜和颠簸问题。

在宇宙核装置中,控制系统的执行机构必须在高真空下,在巨大的超载和高温下工作,而没有维护。控制机构的结构设计是与反应堆部件的构造及其运行条件密切相关的。例如,管式反应堆的控制机构可以在工作着的反应堆的运行过程中进行更换;而壳式压水堆的密闭型控制机构则要求停堆和打

开一次回路后才能进行更换。很显然,对这些机构来说,从经济核算的角度来寻求可靠性的出发点是完全不同的。控制机构的检修空间常常是非常有限的。另一方面,控制机构又是反应堆装置控制系统的组成部分,要满足这个系统所提出的一系列要求,诸如保证调节器以一定的速度或几种速度移动,保证调节器在给定位置上有必要的定位精度,保证它的事件动作时间等等。因此,在设计控制机构时通常要解决整套的问题,要根据具体的反应堆装置的条件达到控制的要求。此外,还必须指出,控制机构是反应堆装置核安全系统的重要部件,它与调节器直接相连。

目前已经为各种核反应堆设计了大量的控制机构。它们利用不同的能源(电气的、液压的等等),有各种各样的结构,而在控制系统中完成着同一的功能。然而,在所有多样化的机构中,由于上面提到的反应堆制造业,尤其是动力反应堆制造业的迅速发展,在控制机构的设计领域内,目前已经可以看出一定的趋向。其中最主要的是提高可靠性、提高动作速度、研制有同样结构而在调节系统中完成不同功能的通用机构,研制断续式的控制机构和研制不需要转换运动形式的直线机构(尤其是断续动作的)。

近来,日益广泛地采用直线式断续控制机构,它是利用电磁力来移动调节器的。这种机构的特点是在反应堆一次回路中没有机械传动。这就大大地提高了它们的可靠性。在设计控制机构时,设计人员必须解决与反应堆部件的结构、传热、材料选择、制造工艺等等有关的许多复杂问题。在机构研制前,必须有大量的科学研究和试验性的设计工作。

目前,苏联和其他国家在研究、试验和制造控制机构方面积累了相当多的经验,并对这些机构的个别部件的可靠性

收集了某些统计资料。这个领域中的专利资料也是很吸引人的。然而到现在为止,在文献中还没有对控制机构研究中所积累的经验进行综合。关于这些机构,还有一系列的理论问题和计算方法没有解决。实际上,还没有对控制机构的结构进行过分类和分析。本书的目的是在某种程度上填补这一空白。书中分析了控制机构的组成(适用于任何一种结构),给出了基本部件的计算和例子,详细地叙述了个别机构的动作原理,并着重分析了控制机构设计领域中先进的和新的动向,尤其是在反应堆制造业中日益获得推广的带步进电动机的机构和密封的直线式断续机构。

书中阐述了运行条件和对控制机构的结构所提出的基本要求,描述了控制机构基本类型的结构设计,分析了它们工作中的动力学、可靠性、经济性、制造工艺和一系列其它问题。本书是根据苏联和其他国家的文献资料和作者的设计和 research 经验编写成的。

第一、第二章由И. Я. 叶麦利扬诺夫(Емельянов)编写。第三、第八章由И. Я. 叶麦利扬诺夫和В. В. 沃斯科鲍伊尼科夫(Воскобойников)合写。第四、五、七、九、十和十一章由В. В. 沃斯科鲍伊尼科夫编写,第六、十二、十三、十四和十五章由Б. А. 马斯连诺克(Масленок)编写。

作者向В. Н. 斯特里饶夫(Стрижов)表示感谢,他热情地提供了РБМК反应堆控制机构的资料,并向А. Ф. 莉涅娃(Линева)表示谢意,她在电磁计算和本书装帧方面给予很大的帮助。还要感谢Е. А. 斯塔罗斯京(Старостин), А. И. 克辽明(Клёмин), В. В. 格拉西莫夫(Герасимов), М. Д. 拉勃津(Лабзин),他们在审稿时提出了宝

贵的意见，感谢В. В. 杰利诺夫（Дельнов）在选择素材时所给予的技术上的帮助。

目 录

前言

第一章 控制机构的运行条件	1
§ 1.1 决定控制机构运行条件的因素	2
§ 1.2 控制机构的尺寸限制	9
参考文献	12
第二章 对控制机构的基本要求	14
§ 2.1 运行要求	14
§ 2.2 结构工艺要求	27
§ 2.3 结构的经济性要求	29
参考文献	30
第三章 控制机构的结构	31
§ 3.1 动力反应堆的控制机构	31
§ 3.2 试验反应堆的控制机构	63
§ 3.3 船用核反应堆的控制机构	79
§ 3.4 宇宙飞行器核反应堆的控制机构	86
参考文献	90
第四章 控制机构的组成	94
§ 4.1 控制机构的基本组成单元	94
§ 4.2 控制机构的构成和组成单元举例	96
第五章 控制机构的动力学	101
§ 5.1 控制机构的普遍运动方程式	102
§ 5.2 普遍运动方程式的积分	108
§ 5.3 在事故动作时驱动装置活动部分的运动	110
§ 5.4 冲击载荷的考虑	115

§ 5.5	振动时控制机构中的动态载荷	117
§ 5.6	调节器与液体在回路中的非稳态运动 方程组	119
§ 5.7	气动式驱动装置的动力学	122
参考文献		128
第六章	控制机构的辅助装置	129
§ 6.1	固定连接处的密封	129
§ 6.2	活动连接处的密封	130
§ 6.3	轴承	131
§ 6.4	控制机构与调节器啮合的装置	133
§ 6.5	止动装置	136
§ 6.6	电缆引入件	140
参考文献		142
第七章	控制机构用的电动机	143
§ 7.1	普通工业用电动机的选择	144
§ 7.2	特种电动机	147
参考文献		163
第八章	直线步进电动机的设计和计算	165
§ 8.1	直线步进电动机的基本参数和特性	165
§ 8.2	直线步进电动机的计算	171
§ 8.3	带直线步进电动机的驱动装置的动态 工况	180
§ 8.4	直线步进电动机的试验研究	187
§ 8.5	直线步进电动机的单位指标	188
§ 8.6	工艺误差对直线步进电动机特性的影响	189
参考文献		196
第九章	步进电动机的设计和计算	198

§ 9.1 步进电动机的参数和特性	198
§ 9.2 步进电动机工作气隙的磁导及其导数的 确定	200
§ 9.3 步进电动机的控制	204
§ 9.4 步进电动机的动态工况	207
§ 9.5 步进电动机的计算	212
§ 9.6 步进电动机的密封方法	213
参考文献	215
第十章 握持装置和加速装置	217
§ 10.1 加速装置	217
§ 10.2 握持装置	218
§ 10.3 制动装置	224
参考文献	229
第十一章 调节器位置测量工具	231
§ 11.1 角位移发送器指示系统	232
§ 11.2 直线位移发送器指示系统	235
参考文献	246
第十二章 运动转换器的结构设计和计算	248
§ 12.1 丝杠-丝母式转换器	248
§ 12.2 齿条-齿轮式转换器	256
参考文献	261
第十三章 制造控制机构用的结构材料	262
§ 13.1 载热剂对材料特性的影响	262
§ 13.2 结构材料的腐蚀	263
§ 13.3 制造控制机构零件用的材料	266
§ 13.4 焊接	273
§ 13.5 提高材料稳定性的措施	274

参考文献	276
第十四章 控制机构的可靠性	277
§ 14.1 可靠性计算的理论基础	278
§ 14.2 控制机构可靠性的试验数据	285
参考文献	291
第十五章 控制机构工艺性和经济性的估计	293
§ 15.1 结构工艺性的估计	293
§ 15.2 结构经济性的估计	296
参考文献	301
附录	302

第一章 控制机构的运行条件

核反应堆是一种综合的技术装置，用来实现重元素核裂变的可控链式反应。改变活性区内能俘获中子而不给出新的中子的元素核的数目，改变活性区内俘获中子时能发生裂变而放出新的中子的元素核的数目，改变反射层的有效性，改变慢化剂和载热剂的性质，都可以调节核反应堆活性区内中子通量和能量释放的水平和分布。

目前在大多数反应堆中，为了调节堆内核反应过程，大都采用移动活性区内的元件的方法。这些元件含有能吸收中子的固态材料。这些材料包括这样一些元素，如硼、镉、铪、钐、钆及其它类似的元素。含有固态吸收剂的构件，即调节器，通常制成棒状。它们具有各种形状的横截面：圆柱形的、正方形的、十字形的等等。调节器的移动是根据信号，依靠专门的装置，即控制机构来实现的。信号是在反应堆控制和事故保护系统中形成的。控制机构的结构与反应堆的活性区和其它部件的结构密切相关。在运行过程中控制机构要经受很多因素的作用，它们取决于反应堆的类型和用途，以及反应堆的结构特点。这些因素包括载热剂、温度、压力、电离辐射等各种作用。

只有在具体的反应堆装置上，考虑到对控制机构发生作用的全部因素，才可能选择控制机构的原则性结构原理图。譬如，当反应堆中的载热剂和慢化剂有压力时，则控制机构照例要做成密封式结构。当反应堆将在船舶上运行时，控制

机构应当能承受振动和冲击载荷，或装有减轻这些作用的设备。

因此，设计人员应仔细分析和估计反应堆运行时作用于控制机构的所有因素的影响。下面分析不同类型和用途的反应堆装置中，可能对控制机构发生影响的各基本因素的特点。

§ 1.1 决定控制机构运行条件的因素

在核反应堆运行过程中，对控制机构发生影响的有下列诸因素：

载热剂 在反应堆内可利用轻水、重水、气体、液态金属和有机化合物作为载热剂。

大多数反应堆采用轻水作载热剂。反应堆的水中含有天然杂质、结构材料的腐蚀产物、燃料的气态裂变产物和由于水的辐照分解而形成的气体。当释热元件的包壳破损时，核燃料的裂变产物会进入水中。这些杂质会在反应堆一次回路中的控制机构的零件表面上形成固态的沉积物，它们使机构的工作恶化，对于摩擦副（齿轮、轴承、导向件等）尤其如此。在电气部件上形成的固态沉积物会使它们的热工况变坏，并使机械结构的去污发生困难。因此，要保持水的物理化学指标和化学指标，使腐蚀性为最小，并使腐蚀产物处于溶解状态。

黄铜的腐蚀产物会显著地增加控制机构的活性，因为铜和锌的同位素会发射很硬的射线。因此，不希望在一次回路中采用以铜为基体的零件。不锈钢的腐蚀强度与pH值有关。在pH=6.5—10的范围内，奥氏体不锈钢的腐蚀速度实际上不会增大^[1]。

在壳式压水堆中，除了带固态吸收剂的调节器以外，为

了补偿反应性，还利用了硼酸(H_3BO_3)，其正常浓度为 6—12 克/公斤。硼酸的存在会加速腐蚀过程。在上述硼酸浓度下，BB Θ P 型反应堆中腐蚀产物的浓度为：在过渡工况时不超过 1 毫克/公斤；稳态工况时不超过 0.1 毫克/公斤。但在装换燃料期间，硼酸浓度则可达 16 克/公斤。

重水与轻水相比，重水是较好的慢化剂，也是良好的载热剂，而且重水的热中子俘获截面较小。在反应堆上要用高纯度的重水，其中轻水的含量不超过 0.2%^[2]。重水的腐蚀性较小。与轻水相比，盐类在重水中的溶解度要小一些。在辐照情况下，重水会分解而形成气体——氘和氧。

重水(轻水也一样)受中子辐照后会活化。反应的结果使 ^{16}O 变成 ^{16}N 。它放出 γ 量子，半衰期为 7.5 秒。在进行管道、阀门等设计时，应当考虑到这一情况，并保证必要的生物屏蔽，而且要注意，沿着回路还会有腐蚀产物在循环。此外，还要预先考虑好随后用再复合的方法除去形成的氘和氧的可能性。

在核反应堆中，也可用气体：氮、氮、二氧化碳、一氧化碳、氢等作为载热剂。气态载热剂很少被活化，它们的腐蚀性不大。

氮具有良好的传热性能和低的热中子吸收截面，它实际上不会被活化。氮作为载热剂的基本缺点是流动性大。这一点在选择控制机构的密封方法时应该加以考虑。

二氧化碳被广泛地应用于一系列的反应堆装置上。英国的核电站普遍采用二氧化碳作为载热剂。在中等温度下，二氧化碳与金属不起反应；在高温下，二氧化碳与石墨起作用，分解成一氧化碳和氧，这会加速金属的腐蚀。

氮相对于反应堆材料来说是化学惰性的，在辐照下是稳

定的，它的热工性能较氮、氢和二氧化碳差。

氢与其它气态载热剂相比，具有最高的放热系数，但若与空气中的氧混合时有爆炸的危险。这就要求精心地设计密封件。氢溶解在金属中会增加金属的脆性。上述因素使氢作为载热剂的使用受到了限制。

液态金属载热剂基本上用于快中子堆。这种载热剂有良好的导热性能和在低压下沸点高的特性。液态金属载热剂有钠、钾、铯、铅、锡和它们的合金。

钠是碱金属，熔点为 97.3°C ，沸点为 878°C 。液态钠具有高的导热性，对结构材料有轻微的腐蚀；当存在氧化物时，腐蚀加快。钠在空气中急剧氧化，与水起猛烈的反应；在辐照下会活化，活化钠的半衰期为15小时。由于这些原因，要采取特殊措施来保证生物屏蔽和预防钠和水的接触。

在反应堆上多利用各种浓度的钠钾合金，因为这种合金的熔点较钠低得多。

铅铯合金(铅44.5%，铯55.5%)的熔点为 123.5°C ，沸点为 1670°C 。纯铅铯合金受辐照后实际上不会被活化。这种合金对结构材料有较强的腐蚀作用。在熔化的铅铯合金中，奥氏体不锈钢在温度不超过 $550-600^{\circ}\text{C}$ 以前，以及铝在不超过 800°C 以前，都是稳定的。

可以用联二苯 $\text{C}_{12}\text{H}_{10}$ 、联三苯 $\text{C}_{18}\text{H}_{14}$ 和联苯类混合物作为有机载热剂。有机载热剂的沸点高，不易活化，不引起结构材料的腐蚀。这种载热剂的缺点是放热系数小，在中子通量作用下会分解；分解产物可能沉积在结构元件上将不利于热量的导出和元件的移动。

温度 在核反应过程中，反应堆内产生大量的热能，它由载热剂带走。控制机构的结构元件常常处于载热剂本身的

作用下，或从被载热剂包围的反应堆结构向它传递热量。当载热剂温度相对说来不高时，控制机构的热工况可用一般的方法解决；当温度提高时，设计控制机构的结构元件时就要考虑下列附加的因素：发生热应力和由于热循环而产生的疲劳应力；零件尺寸的变化；由于结构元件线膨胀系数的差异而引起的应力；电气钢材和合金的磁性变化；电气部件中绕组电阻的变化和材料电绝缘性能的变化。

(1) 由于温度场的梯度变化而产生的热应力，对于在载热剂压力下工作的、并用不同质的材料焊接起来的机械结构（外壳、电气设备）特别危险。这些应力可以引起结构变形，出现裂缝，密封性破坏及其它缺陷。

(2) 在温度作用下结构零件的尺寸变化，可能会引起结构元件的显著位移，或使某些零件（如齿轮、滚动轴承和滑动轴承）卡死。在设计中，当零件是用不同质的，并具有不同的线膨胀系数的材料制成时，必须考虑它们的尺寸变化。

以石墨为基体的材料的线膨胀系数如下：碳素石墨化材料 AΓ-600，AΓ-1600(TY621-61) 为 $5.0 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ，石墨氟塑料 AΦΓ 为 $(17.0 - 22.0) \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 。

(3) 电气合金和钢材的磁性变化。在具有高导磁性的磁合金中，当温度上升时导磁率的数值有很大变化。在含镍的铁合金中，当温度在大范围内变动时，线膨胀系数可增大几倍。温度对电气钢材性能的影响为：当加热时，饱和磁感应和磁异向性降低，而且导磁率在弱磁场中增加，在强磁场中减小。

(4) 电气设备（电磁铁、电动机等）绕组电阻的变化。电阻随温度的上升而增大，因此在电源电压不变的情况下，当反应堆在各种功率水平下工作时（起动工况、额定功率下工

作)通过绕组的电流是不同的。在设计控制机构时,应采取相应的措施来保持电气设备的参数要求。

(5) 材料电绝缘性能的变化。绝缘电阻随着温度的上升而下降,同时,击穿电压也急剧降低。因此,对于在高温下工作的控制机构,按 Г О С Т 8865-70 国家标准的规定,应采用耐热性较好的电绝缘材料。

电离辐射 在活性区内移动的控制机构和零部件(调节棒和与其相连的零件),或紧靠活性区的零部件,会受到各种强度的中子通量的作用。当反应堆在额定功率下工作时,活性区内的中子通量密度为 $10^{13}—10^{15}$ 中子/厘米²·秒。

核反应堆内有强烈的 γ 辐射场。在活性区内 γ 辐射的照射率为 $10^8—10^9$ 伦/小时,而在活性区附近为 $10^5—10^6$ 伦/时。 γ 辐射中,约有 20% 是在反应堆材料(包括控制机构的结构材料在内)俘获中子时形成的。在短期停堆时,中子通量密度下降 8—10 个数量级,而 γ 辐射强度下降 2—3 个数量级。

控制机构的部分构件布置在反应堆活性区附近,受到中子通量的作用。为了防止机构中可拆换部件的活化,要预先考虑屏蔽,以降低结构各部件上的辐射强度。在控制机构中需要维护的那些表面上,剂量率不应超过 0.8 生物当量微伦/秒。在某些情况下,为了将机构中辐射强度高的那部分抽出来,要利用特殊的容器或设备来保证生物屏蔽。容器表面的剂量当量率不应超过 16—20 生物当量微伦/秒。这种装拆设备是控制机构的组成部分。

控制机构的各部件有很大的辐射强度。所有与更换控制机构有关的工作,这些机构及其装拆工具的设计,以及装到反应堆上以后机构的维护,都应当按照放射性安全标准和卫