

核反应堆的堆芯仪表

【美】J. F. 勃兰德 著

原子能出版社

**NUCLEAR REACTOR INSTRUMENTATION
(IN-CORE)**

JAMES F BOLAND

核反应堆的堆芯仪表

[美] J. F. 勃兰德 著

《核反应堆的堆芯仪表》翻译组 译

原子能出版社出版

北京印刷一厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

☆

开本 $850 \times 1168^{1/32}$ · 印张 7 · 字数 184 千字

1977 年 8 月北京第一版·1977 年 8 月北京第一次印刷

统一书号: 15175·097

定 价: 0.88 元

内 容 简 介

本书概要地介绍了核反应堆堆芯参数的测量技术和仪表装置。书中讨论了堆芯的压力、位移、应变、液位、流量、温度、中子通量及 γ 射线通量的测量技术，并且介绍了反应堆瞬态试验的测试仪表以及沸水堆中测量空泡的方法和压水堆、钠冷堆中检测沸腾的方法。对堆芯参数测量中共同性问题——材料的辐照损伤，测量线路的辐照效应等也作了讨论。

本书可供从事核反应堆控制和检测等方面工作的工人和技术人员参考。也可作为大专院校有关专业的教学参考书。

本书由陈道龙（第一、二、六、七、八、十章）、刘以林（第三、十一章）、江兴英（第四、五章）、万东平（第九章）等同志翻译，沈明道同志校对。高石坚、莫国钧、汪希时、汪谔迪、韦娟、史炎椿、凌存仁、龚云峰、周颂浩、丁若格、杨钦汉等同志也参加了译校工作。

目 录

作者序	1
第一章 绪论	3
1-1 什么是堆芯仪表	3
1-2 堆芯仪表的发展	3
1-3 堆芯仪表的用途	4
1-4 堆芯仪表的设计和选择	6
1-5 仪表成功或者失败的责任	10
参考文献	11
第二章 辐照效应	12
2-1 概述	12
2-2 辐射和材料的相互作用	14
2-2.1 γ 射线	14
2-2.2 光电效应	14
2-2.3 康普顿效应	14
2-2.4 电子对生成	15
2-2.5 光子的衰减和吸收	15
2-2.6 电子	17
2-2.7 中子	18
2-2.8 质子	19
2-3 瞬态效应	19
2-4 有机材料的辐照损伤	20
2-5 无机材料	20
2-5.1 金属	21
2-5.2 陶瓷	22
参考文献	25
第三章 电路的辐照效应	27
3-1 概述	27

3-2 电缆的辐照感应信号	28
3-3 直流电路	32
3-3.1 电阻元件的串联直流电路	32
3-3.2 电阻元件的桥式直流电路	35
3-4 交流电路	38
参考文献	42
第四章 压力测量	44
4-1 概述	44
4-2 一般考虑	44
4-3 弹性元件	45
4-3.1 膜片元件	45
4-3.2 波纹管元件	46
4-3.3 布登管弹性元件	48
4-4 应变式压力传感器	49
4-4.1 非粘接型应变式传感器	51
4-4.2 粘接型应变式传感器	55
4-5 磁性压力传感器	56
4-5.1 差动变压器式传感器	56
4-5.2 可变磁阻式传感器	59
4-5.3 涡流型传感器	62
4-5.4 磁弹型压力传感器	65
4-6 充液式压力传感器	66
4-7 力平衡式压力传感器	68
4-8 压差传感器	70
参考文献	72
第五章 位移和力的测量	75
5-1 概述	75
5-2 应变测量	75
5-3 线位移测量	77
5-3.1 差动变压器式位移传感器	77
5-3.2 涡流型位移传感器	79
参考文献	81

第六章 液位测量	83
6-1 概述	83
6-2 差压方法	83
6-3 热效应方法	84
6-4 超声波或声波传感器	85
6-5 净化气体系统	87
6-6 电感式、磁阻式及涡流式传感器	88
6-6.1 自感式探头	88
6-6.2 双线圈互感式探头	89
6-6.3 三线圈互感式探头	90
6-7 电阻探头传感器	91
参考文献	96
第七章 流量测量	98
7-1 概述	98
7-2 差压式流量计	99
7-3 涡轮流量计	100
7-4 电磁流量测量法	103
7-4.1 电磁流量计	103
7-4.2 涡流流量计	106
7-5 热流量计	107
7-6 声波及超声波流量计	109
7-7 利用统计分析方法测量流量	112
7-7.1 周期性信号	113
7-7.2 随机信号	116
7-7.3 实验结果	117
7-7.4 在反应堆中的应用	118
参考文献	119
第八章 温度仪表	122
8-1 概述	122
8-2 热电偶	123
8-2.1 热电效应	124
8-2.2 热电偶辐照效应的理论研究	126

8-2.3	热电偶辐照效应的实验研究	127
8-2.4	热电偶的电绝缘	130
8-2.5	套管材料	132
8-2.6	热电偶组件	133
8-2.7	热区误差	138
8-2.8	装设热电偶造成的温度畸变	140
8-3	电阻温度计	141
8-4	声学的和超声的测温装置	142
8-5	热膨胀式温度计	143
8-6	气动探头温度计	144
8-7	辐射高温计	144
8-8	熔点指示器	145
	参考文献	146
第九章 中子和 γ 通量测量		151
9-1	概述	151
9-2	自给能探测器	153
9-2.1	β 流探测器工作原理	153
9-2.2	内转换中子探测器工作原理	155
9-2.3	自给能 γ 探测器工作原理	155
9-2.4	自给能探测器的结构	156
9-2.5	自给能探测器连接电缆	157
9-2.6	自给能探测器的应用	160
9-3	电离室和裂变计数器	162
9-3.1	电离室工作原理	162
9-3.2	γ 补偿电离室	165
9-3.3	裂变计数器工作原理	166
9-3.4	交流极化技术	167
9-3.5	统计涨落技术	168
9-3.6	反应堆壳体内用的电离室	170
9-3.7	堆芯电离室	171
9-3.8	堆芯电离室的结构	171
9-3.9	中子灵敏电离室的涂层	172

9-3.10	堆芯电离室的连接电缆	174
9-3.11	堆芯电离室的应用	175
9-4	热量法测量中子通量	177
9-5	γ 温度计	178
9-6	中子通量测量的活化法	180
9-6.1	活化丝通量测绘系统	180
9-6.2	球体通量测绘系统	181
9-6.3	气体或者液体活化通量测绘系统	181
	参考文献	182
第十章 反应堆瞬态试验用的仪表		186
10-1	概述	186
10-2	压力测量	187
10-2.1	由连接管路引起的压力信号衰减和失真	188
10-2.2	压电式压力传感器	189
10-2.3	瞬态测量的压力传感器的选择	189
10-3	瞬态温度测量	191
10-4	应变和位移测量	193
10-4.1	应变计	193
10-4.2	电感式位移测量仪	194
10-4.3	电位计式位移传感器	194
10-5	堆芯瞬态中子通量测量	195
10-5.1	测量瞬态中子通量的裂变热电偶	195
10-5.1.1	从裂变热电偶得到的实验数据	199
10-5.1.2	裂变热电偶的今后发展	200
	参考文献	200
第十一章 其它仪表		203
11-1	概述	203
11-2	沸水堆内的空泡测量	203
11-2.1	涡轮流量计法	203
11-2.2	阻抗空泡仪	204
11-2.3	核空泡仪	206
11-2.4	差压法	207

11-2.5 螺线管空泡仪	207
11-2.6 数字空泡仪	208
11-3 压水堆和钠冷堆内的沸腾探测	208
11-3.1 探测沸腾的核功率波动分析	208
11-3.2 探测沸腾的声学仪表	209
参考文献	209
术语注释	211

作者序

在过去十年间，用以获得核反应堆数据的堆芯仪表的应用得到迅速的发展。然而很难得到关于堆芯仪表测量技术的情报，因为资料广泛地分散在许多报告和各种科学和工程的杂志中，这些报告是作为政府制订的发展计划的一部分公布的。只有少部分有用的资料可以综述在这种规模的书中，但是作者希望这里所发表的综述将使得今后的研究人员免于重复过去的错误，并且促进堆芯仪表的进一步发展和应用。我们打算介绍每一种有希望的堆芯测量技术；对于那些作者认为更重要的，或者在参考文献中只以有限篇幅介绍的技术，则作更详细的说明。

因为在着手进行或者说明堆芯测量时涉及到的人员知识水平差别很大，那么应该假定什么样的基础知识，这是难于知道的。这本书的范围不允许充分讨论每一种仪表的工作原理或者说明为设计仪表所需要的详细知识。我们力图包括足够的原理、基本方程和设计描述，以便使得具有一定科学知识的任何人都能够理解每一种类型仪表的工作原理，都能估计出辐照对于仪表性能可能有的影响。参考文献应该能够使读者补充正文中所讨论的原理，但是文献难得包含为人们复制一台成功的仪表所必需的细节。

这本书的主要对象是那些希望了解关于目前进行堆芯测量的方法、目前仪表的局限性或者与发展更好的堆芯仪表有关问题的科技人员和大专院校学生。这本书不打算写成本一本仪表设计手册。

本书第一章是概论，第二章讨论了材料的辐照损伤，在第三章中讨论了关于电路的辐照效应，因为关于这些效应的知识对于理解其余各章是不可缺少的。第四章到第九章叙述了测量压力、

位移、液位、流量、温度、中子通量以及 γ 射线通量的仪表。第十章讨论了反应堆瞬态试验的特殊仪表要求，在第十一章中考虑了沸水反应堆中测量空泡的方法，以及压水堆和钠冷堆中检测沸腾的方法。在书末给出了专用术语的注释。

关于任何迅速发展的技术的书籍在它发表之前都有变成陈旧的倾向，这本书也不例外。虽然正文的大多数是在1967年写成的，但文献调研最后继续到1968年10月，其中当新的数据比较重要时，将正文作了一定的修改，并且增添了补充的参考文献。

J. F. Boland

1969年1月

第一章 绪 论

1-1 什么是堆芯仪表

因为反应堆的堆芯一般认为是系统装有燃料的部分，那么“堆芯(in-core)仪表”术语的严格定义是指反应堆装料区域内的仪表。然而安装在反应堆壳体内部的仪表通常也称作堆芯仪表，在这里我们将应用这种广义的定义，但是这种定义不包括那些安装在堆芯之外堆壳之内、而其技术要求却大大不同于堆芯内部的技术要求的仪表。在那些情况中，将应用“壳体内”或“堆内”的术语来表示。“堆内(in-pile)仪表”的术语在早期的文献中也广泛地用来标志反应堆壳体内部的仪表或者核反应堆装料区域内的仪表，但是目前反应堆已很少称作为 pile。一个测量堆芯参数的仪表系统，如果它的主要敏感元件是在反应堆壳体外部，那么这样的仪表不能看做堆芯仪表，并且在这本专著中将不讨论它们。

1-2 堆芯仪表的发展

好些年来需要用堆芯仪表来测量象中子通量、 γ 射线通量、压力、温度、位移、应变、流量以及液位这样一些参数。因为最初的反应堆不是在高的通量水平下运行，也不使用高温冷却剂，那么普通的工业控制仪表对于这些测量的大部分是适用的，因此敏感元件的发展大部分只局限于中子和 γ 射线敏感装置。随着反应堆的发展，堆芯测量成为必需，很快感到市售仪表的不适用性。个别的团体曾经努力研制或出资委托其他单位研制他们所需要的仪表，但是他们显然没有认识到需要统一的发展堆芯仪表的长期计划。因此，堆芯仪表的发展落后于对实验数据的需要，这是不奇

怪的。

大约从 1960 年以来,用于压水堆和沸水堆的堆芯仪表的研制有很快的进展。目前,在这些反应堆中测量温度、流量、液位、中子通量和 γ 射线通量的堆芯仪表在市面上是可以购买到的,但除了热电偶外,其他仪表的使用寿命是不定的。堆芯压力、位移和应变传感器短期运行是满意的,但是目前在市面上买不到已被证明确实可靠的这类东西。然而,堆芯的热电偶和中子通量检测器被列入美国所有第二代水冷动力堆的安装计划中。

除了热电偶之外,市面上通常买不到用于温度大约在 400°C 以上的合格的堆芯仪表。目前为熔盐增殖反应堆^[2]和液态金属冷却的增殖反应堆^[3]所考虑的仪表和控制的发展计划包括以巨额费用来发展用于温度达到 700°C 的强辐射场中的主要敏感装置。这些提出的计划可望实现并将加速堆芯仪表的发展。

1-3 堆芯仪表的用途

根据在什么地方使用和如何使用的区别,可以把堆芯仪表的应用划分为四个大的范畴:

1. 动力堆的控制和保护;
2. 材料试验堆的实验;
3. 反应堆瞬态实验;
4. 核动力的空间应用。

我们可以把这些大范畴的每一个进一步按照使用实验数据的学科领域来划分堆芯仪表的用途,如物理、化学、冶金、传热、水力以及工程力学等。尽管这些领域中某些研究工作可能要求同样参数的测量,但是仪表量程、准确度、频率响应等的相对重要性可以完全不同。例如:物理工作者可能需要热中子通量的数据来计算功率分布,但是研究结构材料辐照损伤的冶金工作者可能首先对快中子通量的数据感兴趣,那么从热中子检测器得到的数据对于冶金工作者将没有多大用处。

第一，考虑动力堆的应用。反应堆的运行人员必须具有足够的信息来安全、经济地控制反应堆。这意味着必须用堆芯仪表或者堆芯外的仪表测出一定的参数。对于许多早期的动力堆，至少需要这样一些数据：反应堆总功率，冷却剂入口温度，冷却剂出口温度，系统压力以及冷却剂的总流量。这些数据是由堆芯外的仪表提供的。但是这些数据不能保证反应堆的所有部分都不处于危险边界附近运行。当反应堆的物理尺寸较大时，尤其是这样。因此，从安全性考虑，促使我们利用堆芯仪表来测量堆芯内部的局部功率大小，而且某些大的动力堆的运行也需要堆芯仪表^[1]。理想的情况是进行大量的堆芯流量或温度的测量，以便发现堆芯内部任何地方冷却不足的区域，但这并不切合实际。堆芯的经济性要求堆芯的每一个部分在最大的设计工况下运行。堆芯仪表测出这些局部工况，往往可使控制棒布置得更合理从而使现有堆芯获得更经济的性能，或者为了将来堆芯得到更好的性能而改变设计。在反应堆设计期间可能忽略了某些因素，当反应堆处于功率状态运行时这些因素会造成预料不到的、甚至是难以克服的振动以及反应性振荡等。在寻找这样一些问题的原因时，堆芯仪表可能是非常有用的。反应堆运行期间在燃料元件表面上或者在冷却剂通道内部可能形成沉淀物，这可以改变冷却剂流量或者燃料元件的传热特性。这些变化在它们造成任何故障之前通常可以用堆芯仪表探测出来。一般来说，动力堆用的堆芯仪表的最小使用寿命必须等于两次换料停堆之间的时间间隔。除此之外，特别值得注意的是电站最初运行期间所使用的仪表，以及那些可能有助于寻找不可预料问题的解决办法的仪表。因此，堆芯温度、压力、流量、应变、位移、中子通量以及液位敏感元件全都可能用于动力堆。

第二，材料试验反应堆中所进行的实验往往可以从安装在试验管内的仪表得到益处，这个试验管插在堆芯里面或者在堆芯附近的高通量区域。在这样试验管中的通量水平和温度往往要比动力堆高得多，因为进行大多数实验是为了得到设计更先进的动力

堆必需的数据。通常这些试验管只有非常有限的空间，因此为材料试验反应堆使用的堆芯仪表的设计就难于满足这项要求。曾经广泛地使用了热电偶，但是在这些试验管中很少企图进行堆芯中子通量、流量、应变和压力的测量。关于在这些应用方面最需要什么类型的堆芯仪表，还没有一般的一致看法。往往由进行反应堆燃料辐照实验的实验人员记载裂变气体的压力、燃料的膨胀以及包壳应变的测量；中子的能量分布和通量密度的测量对于许多实验人员将是有价值的，而且在研究非裂变材料的辐射损伤时将是特别有用的；如果可以得到可靠的仪表，那么无疑地在材料试验堆的实验中都广泛地应用堆芯压力、应变、位移、流量和中子通量敏感装置。

第三，堆芯仪表对于反应堆瞬态试验是不可缺少的，无论它们涉及到整个反应堆堆芯的动态特性研究，或者涉及到插在瞬态试验堆堆芯的试验管的研究。快响应的堆芯温度、压力、流量、应变、位移和中子通量敏感装置全都应用于这些研究工作中，在第十章中讨论了它们的特殊要求。

第四，外层空间推进动力和辅助能源反应堆的最近发展提出了新的堆芯仪表设计问题，因为敏感元件和读数装置二者都必须设计成经受得住外层空间的环境。需要测量的参数和进行测量的原因非常类似于其它动力堆给出的那些参数和原因。

1-4 堆芯仪表的设计和选择

历史上有两种得到堆芯测量装置的途径。搞工业的人一般依赖于专业仪表制造厂，而搞科研的人则倾向于发展他们自己的仪表或者就在他们自己的机构内部研制这些仪表。作者不打算讨论哪一种途径更好些，而是简略地叙述一种建议性的设计和选择程序，这对于随便哪一种途径都将是适用的。

1. 充分了解要测量什么、何时测量以及为什么要测量。
2. 要充分了解敏感元件和读数装置所处的环境条件。

3. 弄清问题的主要方面，列出那些可能有助于问题解决的学科领域，并找到在每个领域中的专家顾问。

4. 确定在市面上是否可以买到合适的仪表，是否可以利用现有技术制造出这些仪表，或者是否可以在一定的时间内研制出来。

5. 如果没有一种设计是明显的最佳方案，则对最有希望的设计方案和替代方案作出费用估算和时间进度表。

6. 费用估算和时间进度表得到主管人员的批准，并且使主管人员理解到成功的把握有多少。

7. 获取说明书、设计详图或签订研制合同。

8. 拟定一个堆外试验计划，以便检验原型仪表是否满足所有非核环境的性能规格要求。

9. 根据实际可能拟定一个原型仪表堆内试验计划。

10. 严格地制造和试验原型仪表。

11. 如果原型仪表是成功的，那么在制造样机时不用改变设计。尽可能防止制造方法的变更，并坚持遵循适当的、但不是过分的质量监督程序，以便查出材料和工艺的缺陷。

关于以上各条，下面再做一些详细的阐述。

使用者必须充分地了解所要测量的是什么量，要求在什么时间进行测量以及为什么要进行测量；否则，他可能对下列这样一些因素的相对重要性作出错误的判断：准确性、可靠性、寿命、响应速度以及在仪表设计、制造和试验期间的预定进度计划。想要进行堆芯测量的人们往往很少了解实际的仪表设计问题和为得到某些特性必须要做的折衷方案。因此，仪表工程师应该审查难于满足的性能规格的任何部分，以便弄清楚哪些是重要的、而且是不能放松的。

了解环境因素就象了解需要测量什么那样重要。而且，提出测量要求的人们可能不知道所有环境因素，如温度、压力、辐照强度、振动、腐蚀、电场或磁场等，这些因素对于仪表的性能可能具有不利的影响。因此，仪表工程师不应该忽视在测量要求中

没有提到的因素。

了解测量要求和环境因素之后，仪表工程师必须鉴别主要问题的领域。对于给定类型的反应堆有经验的工程师可以容易地识别这些领域，但新手应该向那些熟悉特定类型反应堆的科学家和工程师们请教。不管他有多少经验，工程师应该有顾问，这些顾问能够审查概念设计、最后的加工图纸以及技术条件。不合适的材料比所有牵涉到的其它因素更可能造成堆芯仪表的失败。如果由各个领域的专家们审查过设计的话，那么很可能这些材料的许多问题可以及早得到解决。

把一套仪表规格和制造厂家的数据表进行比较，并选择那些市面上可买到的、对于特殊的堆芯应用值得详细评价的仪表，这是一件困难的工作。但是，如果市售仪表是用得上的话，为了尽可能地降低成本应该首先尝试这一途径。甚至当特殊类型的一个仪表成功地用于类似的反应堆时，也应作出仔细的鉴定，以便保证在使用过程中不因某些表面上看来微小的差别而引起大的问题。第二种选择途径通常是寻找几个机构，它们似乎掌握了合适的工艺，而且愿意以固定的价格制造原型仪表。然后着手订立一个一定投资水平的发展计划，指望在一定的时间内生产出合适的仪表。未推荐的一种通常试行的途径是：给所有感兴趣的投标者发出一套性能规格说明书，接受低的出价。并且，在交货时要确信仪表符合技术条件。如果这条途径不行的话，则希望还有时间来尝试某些其他途径。

如果从市面上可以得到合适的仪表，则对于仪表的购买和试验做相当准确的费用估算是比较容易的。然而当必须设计、制造和试验原型仪表时，或者需要一个广泛的发展计划时，费用的估算是困难的。在估算过程中，经验和工程判断是不可缺少的。由于通常把检查和试验的费用估计过低，那么在费用和进度的估计时，主管部门应该考虑到某些不定因素的影响。

仪表工程师工作的主要部分是把下列情况提供给主管部门：现实的费用估算、进度、成功可能性的估计以及放松一定的性能