核数据评价与建库研究

葛智刚*, 陈永静

中国原子能科学研究院核数据重点实验室, 北京 102413

*联系人, E-mail: gezg@ciae.ac.cn

收稿日期: 2019-07-04; 接受日期: 2019-08-09; 网络出版日期: 2019-10-23

国家自然科学基金(编号: 11790325, 11790320, 11790321)资助项目

摘要 核数据是描述原子核基本性质以及原子核与其他粒子发生相互作用的核参数的总称, 是核科学发展的基础数据, 是连接核物理基础研究与核工程以及核技术应用的重要桥梁, 是核物理研究的一个重要分支学科. 本文首先简要说明了核数据的内涵、种类和用途; 然后对中子核反应实验数据库、核数据评价的关键流程以及国际上几个主要的评价核数据库情况进行了简单的介绍; 之后对我国核数据评价与建库工作研究的起步与发展历程、国际主要核数据组织的活动以及目前国际核数据研究的发展趋势进行了评述; 最后探讨了我国核数据评价与建库研究工作需要重点关注的问题以及未来我国核数据工作可能的发展方向.

关键词 核数据, 核数据评价, 核数据库

PACS: 25.40.-h, 25.90.+k, 28.20.-v

1 引言

核数据是核科学与核工程应用所需的重要基础数据, 它主要包括用于描述入射粒子与原子核发生相互作用的核反应数据以及描述单个原子核自身基本特征的核结构与放射性衰变数据^[1]. 核数据表征了核物理基础研究中的核结构、核衰变和核反应等特征信息. 常用的核反应数据主要包括各种入射粒子(中子、质子、伽马射线等)与原子核发生各种相互作用过程的概率, 通常用截面表述. 包括散射截面, 如弹性散射截面和非弹性散射截面(通常是能量的函数); 各种吸收截面, 如 (n, α) , (n, p) , (n, γ) , $(n, 2n)$ 等反应截面; 此外,

对于可裂变核, 还有裂变截面、裂变产额(原子核裂变产生某种裂变产物核素的概率)、裂变中子及伽马数据等物理量. 常用的核结构及放射性衰变数据主要包括原子核的质量、自旋、宇称、能级纲图、衰变模式及衰变寿命等信息.

核数据研究主要是针对实际应用以及基础研究中需要的上述数据而进行的相关实验测量、描述核反应与核结构的理论模型以及实验数据评价研究, 如利用核物理相关实验方法测量部分核反应与核结构数据(即微观实验测量数据); 实验数据评价; 发展核反应、核结构理论模型并开展理论模型计算; 为各种核装置、核工程及核技术应用提供配套的评价核数据库与

引用格式: 葛智刚, 陈永静. 核数据评价与建库研究. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2020, 50: 052003

Ge Z G, Chen Y J. Research on nuclear data evaluation and development of data library (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2020, 50: 052003, doi: [10.1360/SSPMA-2019-0232](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2019-0232)

多群常数数据库(即针对不同需求而建立的各种核数据库)以及核数据基准检验等. 实际应用中核反应数据通常有不同的分类方式^[2], 如表1.

不同种类的核数据根据实际应用中不同需求进行组合并按不同的格式存储而形成通用核数据库与专用核数据库. 通用核数据库一般指全套数据(一个粒子入射到一个靶核上, 所有可能发生的各种核反应的各种数据, 如反应截面、出射粒子角分布、双微分截面、伽马产生数据等). 专用核数据库是指具有专门用途的数据, 如核结构和衰变数据、裂变产额数据、活化和剂量学反应数据、光核反应和光致裂变截面数据以及缓发中子数据等. 目前, 中子核数据是核能利用的重要数据, 也是核反应数据的重要研究内容, 本文描述的核数据主要指中子核数据.

随着核科学与核技术发展, 核数据有着更广泛的用途, 其应用领域不仅包括国防建设, 而且还涵盖了国民经济发展中所有重要的核科学与核技术领域^[1,2]. 例如, 在核反应堆工程与核能应用方面^[3], 反应堆堆芯中子学计算、屏蔽和辐射防护计算、反应堆临界安全分析等; 在核医学方面^[4,5], 放射性同位素治疗和诊断、射线治疗等; 在加速器设计和运行、地质和环境工作、放射性废物处理和空间旅行等^[6-8], 都需要核数据的支撑. 此外, 核数据在基础科学研究领域也扮演着重要的角色^[9], 是高水平理论模型发展的基础, 可为理论模型提供关键参数和实验验证.

因此, 核数据, 特别是中子核数据, 是核科学基础与应用等交叉学科的重要基础数据, 是先进核基础科

研向核应用领域实现成果转化的桥梁.

2 核数据评价与建库

核数据评价是核数据用户和核数据测量者之间不可缺少的环节和桥梁. 核数据评价最重要的基础是实验测量数据. 下面简要介绍核反应实验数据库、核数据评价流程和评价核数据库.

2.1 核反应实验数据库(EXFOR)

目前国际上最全面的核反应实验数据库是由国际原子能机构牵头通过正式的国际合作而建立的计算机可交互识别的数据库(Exchange FORmat, EXFOR), 该库包含了自核科学研究开始以来的约22000个核反应实验的测量数据、实验测量基本信息和相关参考文献信息. EXFOR数据库是为了存储实验测量数据以及便于核数据中心进行数据交流和传播而建立的, 有约定的存储格式和代码, 并在国际上公开发布和推广使用. EXFOR数据格式、结构以及相关约定在EXFOR手册中有详细的介绍^[3].

最初EXFOR只编撰、收录中子诱发的核反应实验数据, 后来范围扩大到带电粒子诱发核反应和能量低于介子产生阈值的光子诱发核反应实验数据. 其中中子数据类型涉及上述提及的各种类型的实验测量数据, 而带电粒子和光子诱发核反应数据则是有选择地进行编撰.

截至2018年初, EXFOR库中中子、质子、 α 粒子和光子诱发反应实验数据所占的比例分别为47.9%, 19.8%, 7.36%和6.2%^[10]. 图1给出了EXFOR库内容的变化历史. 这些统计结果表明对许多实际应用、基础研究和应用科学非常重要的中子诱发反应数据一直是EXFOR库的重要组成部分.

目前EXFOR数据库收集的主要是中低能中子核反应数据. 世界各国很多科学家把他们的原始测量数据贡献给EXFOR库, 世界上主要核数据中心的EXFOR编撰者有地区性的分工和协作, 按照共同约定的

表1 核反应数据分类表

Table 1 Classification of nuclear data

分类方式	核数据种类
按核数据用途	通用核数据和专用核数据
按入射粒子种类	中子、带电粒子、光核等数据
按靶核质量	轻核、中重核、易裂变核数据
按入射粒子能量	低能、中能和高能数据
按数据的获取方式	测量数据和评价数据

1) Final Report for the Workshop for Applied Nuclear Data Activities (WANDA), LLNL-PROC-769849.

2) Proceedings of the Nuclear Data Roadmapping and Enhancement Workshop (NDREW) for Nonproliferation, ORNL/LTR-2018/510.

3) Holden N. A short history of CSISRS: At the cutting edge of nuclear data information storage and retrieval systems and its relationship to CINDA, EXFOR and ENDF 2005. Available from <http://www.nndc.bnl.gov/exfor/compilation/CSISRSHistory.pdf>.

图 1 (网络版彩图) EXFOR数据库内容的变化趋势, 相关数据取自文献[10]

Figure 1 (Color online) Content evolution of the EXFOR database (Data are taken from ref. [10]).

格式把收集到的实验数据进行编撰并存储在计算机中, 然后提交给国际原子能机构核数据科(IAEA-NDS), 以便于交换和使用. 每一个EXFOR条目不仅包含收集到的实验数据, 而且还有必要的文字说明, 包括实验数据的来源(作者和实验室)、数据类型、能区、主要实验技术及设备、简短的实验方法、管理历史以及主要参考文献等信息.

到2019年初, EXFOR数据库共收集了21885个实验信息(每个实验都有按一定的规律编撰给定的唯一的标号), 170088个数据集, 15213129个数据点. 这些数据包含了968个靶核信息, 386个入射粒子信息, 2606个核反应信息^[10]. 表2给出了2019年初EXFOR网站统计给出的EXFOR数据库中包含的核反应物理量、相关的计算机检索关键词. 从表中可以看出, 反应截面数据几乎占了数据库内容的一半. EXFOR数据库每月更新一次, 为核数据评价、核技术应用开发和基础科学研究提供必要的数据支持. 它可在国际原子能机构核数据科(<http://www-nds.iaea.org/exfor>), 美国国家核数据中心(<http://www.nndc.bnl.gov/exfor>)以及中国(<http://www-nds.ciae.ac.cn/exfor>)、印度和俄罗斯的镜像网站上公开获取.

EXFOR数据检索系统不仅提供核反应实验数据检索以及各种格式的输出结果, 还可以对检索到的实验数据按照最新国际标准反应截面对其进行修正, 并将修正后的实验数据与其他测量数据及评价库数据

表 2 EXFOR数据库编撰包含的核反应物理量以及编撰的数目(<https://www-nds.iaea.org/exfor>)

Table 2 Compiled physics quantities and counts in the EXFOR database (<https://www-nds.iaea.org/exfor>)

EXFOR代码	物理量描述	编撰数目
CS	截面数据	11645
DAP	分立能级角分布	4406
DA	角分布	4399
RP	共振参数	2016
CSP	分立能级截面	1943
POL	极化数据	1120
FY	裂变产物产额	1160
DAE	双微分谱	1105
MFQ	裂变中子数据	555
SP	Gamma谱	465
RI	共振积分	467
DE	能谱	388
E	动能	348
L	散射振幅	223
INT	对入射能量积分截面	202
PY	产物产额	182
NQ	核素特性	114
MLT	出射粒子多重度	110
RR	反应率	106
TTD	厚靶微分产额	49
CST	温度相关的截面数据	43
SQ	特殊参数	19
DEP	分立能级能谱	12
TTP	分立能级的厚靶产额	7
COR	次级粒子关联	5

进行对比.

EXFOR核反应实验数据库是国际核数据界合作的成果, 也是唯一一个存储大量核反应实验测量结果和实验设施信息的数据库, 从这个数据库中可以调研核物理研究趋势以及核数据评价背景^[11]. 目前EXFOR库已经和评价核数据库、核数据文献计算机索引库Computer Index of Nuclear Reaction Data (CINDA: <https://www-nds.iaea.org/exfor/cinda.htm>)以及核科学文献数据库Nuclear Science Reference (NSR: <https://>

www-nds.iaea.org/nsr/)合并在一起.

2.2 核数据评价流程

核数据评价是核数据从产生到可以实际应用过程的一个重要环节. 虽然有的实验测量数据可直接提供给用户使用, 但是由于核反应实验测量所涵盖的能量范围、样品、测量技术以及测量成本等因素, 多数核反应数据无法直接从实验测量获得, 因此核数据评价是极为重要的, 特别是对那些需要包含各类核反应信息的全套数据的需求, 只能在现有实验测量数据基础上开展核数据评价来满足对数据的需求. 核数据评价通常包括如下几个步骤.

2.2.1 实验测量数据的收集与评价

目前国际上评价核数据过程均是以微观实验测量数据为基础, 包括核反应和核结构实验数据. 在核数据评价工作中, 首先需要根据用户提出的需求调研国内外数据现状, 从核反应实验数据库EXFOR库或者CINDA库或者公开发表的文献中对已有的实验测量数据进行收集, 由于不同的实验数据可能有分歧, 所以需要对这些实验测量数据进行详细的分析、比较和数学处理. 在这个过程中经常涉及相对测量结果和绝对测量结果. 对于相对测量结果, 由于系统本身的不确定度能够很好地被扣除或相互抵消, 一般用最新的标准截面、标准产额或国际推荐值将其转换成绝对量, 然后再与绝对测量数据一起进行分析. 对于绝对测量结果, 我们需要更加注重对实验数据的分析, 如根据最新的标准截面、标准产额或衰变数据对其进行适当的归一和修正等处理, 对修正后仍然与其他实验数据分歧很大的数据, 还要进行仔细的分析, 以做到准确地对实验数据进行取舍^[12].

2.2.2 核数据理论模型计算

实验上不可能对所有的能区和反应道都进行测量, 因此要获得能区完整、反应道齐全, 且物理上自洽的成套的核数据还必须借助核反应理论模型计算. 目前核反应理论模型主要包括: 用于描述核反应第一阶段的光学模型, 用于描述直接过程的平面波玻恩近似、扭曲波玻恩近似, 用于描述靶核集体运动的耦合道理论, 用于描述复合核反应的共振理论、Hauser-

Feshbach理论和蒸发模型, 用于描述预平衡过程的激子模型等. 国际上著名的核反应模型程序有荷兰的Talys^[13]、美国的Empire^[14]和Gnash、日本的CCONE^[15]以及中国的UNF^[16]系列等, 这些模型程序在国际主流评价核数据库研制中起到了非常重要的作用. 需要强调的是, 这里提及的国际上几个著名的核反应程序主要是针对中重核和裂变核, 目前对轻核的处理, 由于机制比较复杂, 国际上还没有公认的较好的程序.

理论模型计算与实验数据评价结合的基本流程如下: (1) 选取合适的理论模型程序, 根据评价修正后的实验测量数据来调整理论模型程序的模型参数(如光学势参数、能级密度参数等), 使得理论模型计算结果能够较好地再现评价后的实验数据, 这样理论计算就可以给出更宽能区和更多反应道的核反应数据; (2) 对有实验数据的反应道, 用经过评价的实验数据结果代替理论计算结果.

2.2.3 全套数据的统调

理论计算结果本身物理上是自洽的, 如所有分截面之和等于全截面. 但是如果用评价后的实验数据代替部分理论计算结果必然会导致数据不自洽. 另外, 目前的核反应理论模型无法给出共振区数据, 因此评价过程中还有一个重要环节, 即评价和确定一套共振参数, 调整共振参数使得共振能区截面数据与快中子能区可以光滑衔接. 这样, 经过评价后的实验数据结合核反应理论模型计算给出的结果, 并经过合理的调整, 就可以形成物理上自洽的、成套的评价核数据, 并按照国际通用的评价核数据格式ENDF保存全套数据. 经过核数据加工制作并进行宏观基准检验, 同时根据宏观检验结果的反馈信息做进一步改进, 并反映到新的评价中去. 这个过程可能需要经过多次反复, 最终得到高质量的评价核数据, 满足用户的需求. 图2^[17]给出了国际上通行的核数据评价过程示意图.

2.2.4 核数据协方差评价

新型反应堆设计中经济性、安全性指标的高水平要求, 使得核数据协方差评价受到人们的关注. 在核数据研究中, 协方差工作就是为了全面量化描述各种不确定因素(包括实验测量以及评价数据)的影响而引入的, 是核数据可靠性评估的重要组成部分. 它是传统意义上误差概念的推广, 多以矩阵的形式给出, 既包含数

图 2 (网络版彩图)核数据产生流程示意图(在文献[17]图的基础上做了修改)

Figure 2 (Color online) Schematic diagram of the nuclear data generation process (based on the figure of ref. [17]).

据总误差(对角元), 同时也可描述各数据间的关联性(非对角元). 国际通用的实验核反应数据库(EXFOR)中已经包含了专门的实验数据协方差计算功能. 但是目前大多数核数据都来源于核反应模型程序计算, 因此需要研究模型计算核数据的协方差评价方法. 目前国际上针对模型依赖型核数据协方差的评价方法仍没有统一的定论, 这是核数据研究中面临的难题与挑战. 就研究方法来看, 协方差评价类型可分为确定论(即简单和推广型的最小二乘法)、随机抽样法(即基于参数蒙特卡罗抽样法)以及混合法(包含确定论和随机抽样理论的双重特性)三种类型. 到目前为止, 以上方法都有各自的优缺点, 并且已经不同程度地应用于各国的核数据协方差评价工作中.

我国从20世纪80–90年代开始, 在核数据协方差评价方法研究中做了许多工作, 为中国评价核数据库(Chinese Evaluated Nuclear Data Library, CENDL)中子评价数据协方差研究打下了技术基础, 未来会对中国CENDL中众多重点核素开展全面研究, 不仅包括截面协方差数据, 还包括角分布、能谱、裂变 ν 值等协方差数据的系统研究工作^[1].

2.3 评价核数据库(Evaluated Nuclear Data Files, ENDF)

随着经济的发展, 对核数据需求的领域更多. 但是实验测量难以满足越来越广泛的对核数据的需求, 一方面由于实验的费用较高, 另一方面是产生的入射粒

子的种类、能量和靶核等实现的可能性不一定能满足需求, 因此往往通过实验来测量那些重要的、有可能实现的核数据, 别的则用理论计算结果进行补充. 迅速发展的计算机技术对各种装置设计的模拟计算应用越来越广泛, 因为它比大型或中型实验更经济. 这类计算需要完善的成套的数据作为输入. 为了适应日益增长的对核数据的需求, 国际上主要核大国和地区均成立了核数据中心, 专门从事包括中子数据库在内的各种数据库的评价、建立和不断更新.

目前国际公认的主要数据中心包括美国国家核数据中心(US National Nuclear Data Center, NNDC)、经合组织核能署数据银行(Organization for Economic Cooperation and Development, Nuclear Energy Agency Data Bank, OECD, NEA-DB)、俄罗斯数据中心(Russian Nuclear Data Center, CJD)、日本核数据中心(Nuclear Data Center, Japan Atomic Energy Agency, JAEA/NDC)以及中国核数据中心(China Nuclear Data Center, CNDC), 还有国际原子能机构的核数据科(International Atomic Energy-Nuclear Data Section, IAEA-NDS). 这些数据中心都有自己的评价中子核数据库(见表3), 所谓评价数据库就是由核物理专家们对尽可能收集到的实验数据进行客观的、科学的物理分析, 结合理论模型的计算结果, 得到全套的数据存入库中推荐给用户使用(见上一节内容). 简单说, 评价数据库就是由大量的评价核数据按照一定格式组成的数据集. 中子数据由于其应用面广, 特别是核能利用的需求, 国际上主要核数据中心都是从中子核数据库的建立开始的. 表3给出了国际上主要的评价中子核数据库的最新版、最近更新的时间以及包含的核素数目. 表3给出的数据库常称为通用数据库, 也有各种不同的针对特殊应用目的的数据库, 如我们前面提到的针对裂变装置的裂变产额数据库、针对聚变装置库建立的数据库(FENDL-3.1) (<https://www-nds.iaea.org/fendl31>)、标准截面数据库等.

这些不同评价核数据库均采用统一的评价数据格式ENDF/B-VI格式建立, 便于存储、检索、国际交流和进行数据处理. 不同的数据库覆盖的靶核数目有差别, 覆盖的中子能区也有所不同, 个别库所给的文档也会有差别. 之前各评价中子数据库所覆盖的中子能区都是从 10^{-5} eV–20 MeV, 2017年更新的欧洲库JEFF-3.3和2018更新的美国库ENDF/B-VIII.0已经把能区扩

表 3 国际上主要评价中子核数据库**Table 3** The major evaluated neutron nuclear data libraries in the world

核数据中心	评价中子核数据库	最近更新时间	包含核素数目
中国(CNDC)	CENDL-3.1	2009	246
美国(NNDC)	ENDF/B-VIII.0	2018	557
日本(NDC)	JENDL-4.02	2012	406
欧洲(NEA)	JEFF-3.3	2017	562
俄罗斯(CJD)	BROND-3.1	2016	686

展到30 MeV.

对不同的靶核材料评价库中用不同的标识数字进行区分, 用不同的文档号(MF=1-99)来区分数据类型, 如中子截面、共振参数、能谱和角分布等. 不同的数据段中存放不同反应类型(MT=1-999)的数据, 也用不同的数字进行标识. 除了列表式的数据之外, 在文档1中有评价者对所评价的数据提供详细的文字信息, 包括这些数据是怎样评价得到的, 列出该种材料的数据段目录等. 对于裂变材料来说, 还可包括每次裂变产生的中子数、裂变产物产额数据等. 不同的评价数据库包含的反应类型和数据类型不完全相同, 依赖于进行核数据评价时采用的理论模型和各个评价库自身的发展. 表4和5给出ENDF/B-VI格式规定的, 各国评价核数据库共同遵循的一些常用的文档号和反应类型号(主要针对中子核反应数据)⁴⁾.

不同类型的数据库, 比如带电粒子数据库、光核数据库的定义总体上与中子数据库相同, 但是有细微的差别. 各个主流评价核数据库可在国际原子能机构核数据科(<http://www.nds.iaea.org/endl>)、美国国家核数据中心(<http://www.nndc.bnl.gov/endl>)以及中国(<http://www.nds.ciae.ac.cn/endl>)、印度和俄罗斯的镜像网站上公开获取.

随着经济的发展, 对核数据的需求不减, 特别是对数据精度要求比过去更高, 推动人们在新的形势下开展核数据的深入研究, 因此国际上各个评价核数据也在不断的更新. 以美国库为例, 自1968年第1版ENDF/B-I问世以来, 已经经过多次更新, 目前已经发展到ENDF/B-VIII.0版.

表 4 评价中子核数据库常用的文档类型(MF)**Table 4** Definitions of file types of ENDF-6

文档号(MF)	数据类型
1	综述信息
2	共振参数
3	中子反应截面
4	出射中子的角分布
5	出射中子的能谱
6	出射中子的能量-角度分布
7	热中子散射律
8	放射性数据
9	放射性核素产生多重性
10	放射性核素产生截面
12	光子多重性
13	光子产生截面
14	光子角分布
15	光子能谱
33	中子截面协方差信息

3 我国评价核数据库发展历程

核数据是核事业发展的基础数据, 一直受到核能应用发达国家的重视. 美国、前苏联、西欧由于其研制核武器等核事业发展的亟需, 从20世纪40年代就开始建造各种设施设备, 进行重要核数据的测量, 60年代竞相建立自己国家的核数据机构, 系统地开展核数据评价和建库工作. 我国的核数据工作始于20世纪50年代末, 起步阶段还只是开展一些国防亟需的关键核数据测量工作, 到1975年才系统开展核数据评价建库工作. 特别是1975年中国核数据中心成立后, 通过全国核数据工作协作网各成员单位的共同努力, 先后完成了多期重大核数据任务, 取得了许多重要成果. 形成了以实验测量、理论模型发展、核数据评价、核数据基准检验等构成的核数据研究能力, 发布了三个版本的《中国评价核数据库》(CENDL库)和一批重要的专用数据库, 不仅有力地支持了我国核装置研究和军用核动力技术的发展, 满足了国防及经济建设对核数据的需求, 同时也得到了国际核数据界的高度认同, 奠定了我国作为国际上主要核数据大国的地位.

到目前为止, 我国核数据研究工作已经走过50多

4) ENDF-6 Format Manual, Report BNL-NCS-44945-05-Rev.

表 5 主要反应类型标记(MT)

Table 5 Definitions of reaction nomenclature of ENDF-6

反应类型 (MT)	反应道	描述内容
1	(n, total)	中子全截面
2	(n, n)	弹性散射截面
3	(n, nonelastic)	去弹性散射截面
4	(n, n')	非弹性散射截面
16	(n, 2n)	产物为2中子+剩余核
17	(n, 3n)	产物为3中子+剩余核
18	(n, fission)	总裂变截面
19	(n, f)	第一机会裂变截面
20	(n, nf)	第二机会裂变截面
21	(n, 2nf)	第三机会裂变截面
38	(n, 3nf)	第四机会裂变截面
102	(n, gamma)	中子辐射俘获截面
103	(n, p)	产物为1个质子+剩余核
104	(n, d)	产物为1个氘+剩余核
105	(n, t)	产物为1个氚+剩余核
107	(n, a)	产物为1个 α 粒子+剩余核

年,大体上可以分为以下三个阶段.

第一阶段是从1960年到1985年. 这个阶段主要应我国核装置研制与改进以及核动力发展的迫切需要而解决了关键核数据的有无问题, 初步建立了核数据评价系统的框架, 发布了中国评价核数据库第一版 CENDL-1库. CENDL-1库包含37个重点核素的全套中子数据, 中子能区1 keV–20 MeV, 有的延伸到1 keV以下, 数据是以ENDF/B-IV格式给出, 包括文档1, 3, 4, 5. 同时还完成了一些重要专用核数据的评价, 如激发函数、裂变产额和衰变数据, 并初步建立了评价库的管理程序系统和评价处理程序, 包括数据的存贮、检索和检验、校正. 中国评价核数据库第一版获国家科技进步二等奖.

第二阶段是从1985年到2000年. 这个阶段主要建立核数据评价的相关方法和手段. 不仅是国防需要, 而且也强调了核电建设和国民经济发展所需要的核数据. 1993年我国完成了中国评价核数据库CENDL-2版(包含54个核素的全套中子数据), 它包含了CENDL-1中31个核素数据的重新评价和个别核素数据的修订改进, 把能区扩充到 10^{-5} eV, 增加了共振参数(文档2), 又增加了17个新核素的全套数据评价及部分核素的双微

分截面、 γ 产生数据和协方差文档. 中子能区从 10^{-5} eV到20 MeV, 数据以ENDF/B-VI格式给出, 全部包含文档1–5, 还有5个核素含有文档6(双微分截面), 9个核素含文档12–15(γ 产生数据的多重性、截面、角分布和能谱), 7个核素含文档33(截面协方差数据). 此外, 还有各种专用核数据库, 如激发函数、裂变产额、衰变数据等.

1994年, 对CENDL-2库评价数据进行了比对和宏观检验, 对发现的问题进行了改进、更新和补充, 在此基础上建立了CENDL-2.1. CENDL-2.1共包含69个核素, 其中含双微分截面(文档6)14个, γ 产生数据(文档12–15)49个, 协方差信息(文档31–33)11个. 与CENDL-2相比, CENDL-2.1新增加了15个核素.

CENDL-2的评价实现了计算机化, 在中国核数据中心建立了计算机化的评价系统, 实验数据可以直接从EXFOR库中检索, 分析比较、格式转换、数据处理、合并统调、画图比对、入库检查等都有相应的程序, 且互相配套接口, 形成系统, 这不仅使工作效率大大提高, 而且使数据的质量得以保证.

第三阶段是2000年至今. 这个阶段主要任务是提高核数据质量, 大幅增加核素数目, 增加核数据的种类. 2009年, 我们完成了中国评价核数据库CENDL-3.1版的发布^[18], 包含246个核素的全套中子数据库和各种专用数据库以及群常数数据库, 发展了截面协方差评价方法和程序, 开展了裂变后理论模型研究. 这一阶段的核数据工作整体国际先进、部分成果国际领先; 轻核的双微分截面数据在国际上独具特色. 这一阶段完善了计算机化的中国评价核数据库, 初步建成了评价数据库宏观系统检验的平台, 开始了系统宏观检验.

目前, 中国核数据中心以及协作网针对新时期国防科研及新型核能系统研发的需求, 不断发展核数据测量、评价与宏观检验技术, 提高中国评价核数据库的质量, 更好地为我国的核科学发展以及核技术服务.

4 国际核数据组织以及主要核数据活动

前面我们介绍了目前国际上主要的核数据组织有美国国家核数据中心、欧盟的核能署数据中心、俄罗斯数据中心、日本的核数据中心以及中国核数据中

心. 这些数据组织都有自己的评价中子核数据库, 也一直在积极提高自己的评价核数据库的水平, 包括核素范围、数据种类、数据质量以及数据库的更新频率等. 各个数据中心都建立了完整的核数据评价体系, 包括用于核数据评价的先进的理论模型与计算程序、完整的核数据建库与检验技术、面向用户的完善的数据加工与制作技术、核数据灵敏度分析与数据调整技术等. 另外, 韩国与印度也进行部分核数据研究活动. 韩国的核数据研究多数是与美国和欧洲合作, 印度的核数据研究比较碎片化. 韩国和印度的核数据研究均没有体系化, 没有自己的评价核数据库.

最初, 上述各国的中子评价数据库是不公开的. 自 20 世纪 90 年代前后, 随着美国 ENDF/B-VI 库的公开, 各国的评价中子核数据库也相继对外释放, 各国核数据评价建库工作国际合作也逐渐展开. 现在核数据评价国际合作有了很大的发展, 有了固定的模式和成熟的经验. 目前通过国际组织开展的合作主要有两种: 一种是通过国际原子能机构定期召开会议, 研究国际核数据的需求发展, 确定国际核数据的发展重点与项目, 由国际原子能机构通过组织协调研究项目(Coordinated Research Program, CRP)予以实现. 另一种渠道是由经合组织核能署(OECD-NEA)牵头的国际核数据评价合作工作组(Working Party on Nuclear Data Evaluation Cooperation, WPEC). OECD-NEA 每年举行一次核数据工作组会议, 根据核数据用户在使用核数据过程中反馈的信息列出一个核数据需求优先度列表(High Priority Nuclear Data Request List, HPRL), 任何国家的核数据使用者都可以提出需求, 要求每一个需求都包含非常详细的信息, 包括需求提出的背景、核素、反应类型、能区及精度需求等. 工作组经过评估, 将需求分为两类: 高优先度需求和普通需求, 这些需求对国际核数据的测量、理论评价以及宏观检验等工作提供非常清晰有用的指导. 工作组会根据需要设立若干由各国核数据领域的专家参加的工作组(Subgroup)对共同关注的需要解决的重要核数据问题进行专门研究. 如上所述, 这两种合作研究内容在很大程度上体现了当前国际核数据评价领域的重要课题和发展趋势. 与此同时, 各国之间根据自身需要也会开展相关的合作研究. 这里需要指出的是, 对于一些涉及极为核心的核数据及其相关技术, 各国仍然不会进行交流合作.

中国核数据中心已经和世界上其他数据中心特别

是国际原子能机构的核数据科建立了紧密的联系和良好的合作关系, 为年轻的核数据工作者创造了很多向国外同行学习和交流的机会, 使他们不断开拓视野, 不断追求创新, 我国核数据工作取得的研究成果也逐步得到了国际同行的认可. 通过国际合作, 我们可以有效利用国际相关领域的专家学者和技术力量开展合作研究和技术攻关促进我们国内的核数据研究. 通过国际数据交流与合作, 我们能够吸收国外的技术, 也可以获得更多数据, 整合后使之服务于我国核数据相关领域的应用需求.

5 我国核数据评价与建库未来发展

目前, 就 CENDL 库全套中子数据研究情况来看, 我国全套中子数据仅能满足国防和国民经济发展的一些急需, 在核数据可靠性、数据种类、核素范围及涵盖能量范围等方面尚无法全面满足用户的需求, 另外在全套中子评价数据库工程应用和反馈方面也与其他核数据大国间存在明显的差距, 我们的核素总数以及同位素种类明显偏少. 此外, 还存在其他方面的不足, 从而造成核数据评价的更新和改进未能完全满足用户急需.

目前国际核数据工作呈现新的发展态势: 核数据工作规模不断扩大; 关键核数据精确度不断提高; 新型测量装置不断涌现; 中子源强度更高、能区更广; 不稳定核研究比重不断地加强, 评价核数据库的核素不断扩充.

纵观国内外核数据库的发展与研究方法对比, 未来我国在核数据评价与建库方面的工作重点如下:

(1) 不断完善我国具有自主知识产权的 UNF 系列程序, 同时做好相关配套程序的开发与完善, 以确保计算数据质量的不断提高;

(2) 加强核数据基础理论研究, 特别是裂变核以及裂变过程中的不稳定核理论基础研究, 提高裂变数据以及不稳定核数据的计算能力.

(3) 继续扩大我国评价核数据库的规模, 拓展核数据种类和能区, 补齐协方差数据文档. 如中子评价核数据库规模向国际先进水平看齐, 激发函数向 30 MeV 的高能端拓展, 补充中高能、高能全套核反应数据等.

总之, 要不断提高中国评价核数据库的质量, 更好地为我国的核科学发展服务.

致谢 向评审人和对本文撰写提出宝贵建议的中国原子能科学研究院的周祖英研究员、刘廷进研究员和刘萍研究员表示感谢.

参考文献

- 1 Development Strategy Research Group of Nuclear Physics and Plasma Physics. Nuclear Physics and Plasma Physics (in Chinese). Beijing: Science Press, 2017 [核物理与等离子体物理发展战略研究编写组. 核物理与等离子体物理. 北京: 科学出版社, 2017]
- 2 Ge Z G, Chen Y J. Status and prospects of nuclear data development in China (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2015, 60: 3087–3098 [葛智刚, 陈永静. 我国核数据发展现状与未来发展思考. 科学通报, 2015, 60: 3087–3098]
- 3 Harada H, Plompen A. Meeting Nuclear Data Needs for Advanced Reactor Systems. Technical Report. Nuclear Energy Agency, Nuclear Science Center, 2014
- 4 Qaim S M. Nuclear data for medical applications: An overview. *Radiachim Acta*, 2001, 89: 189–196
- 5 Al-Abyad M, Spahn I, Sudár S, et al. Nuclear data for production of the therapeutic radionuclides ^{32}P , ^{64}Cu , ^{67}Cu , ^{89}Sr , ^{90}Y and ^{153}Sm via the (n, p) reaction: Evaluation of excitation function and its validation via integral cross-section measurement using a 14 MeV d(Be) neutron source. *Appl Radiat Isotopes*, 2006, 64: 717–724
- 6 Sartori E. Nuclear data for radioactive waste management. *Ann Nucl Energy*, 2013, 62: 579–589
- 7 Norbury J W, Miller J, Adamczyk A M, et al. Nuclear data for space radiation. *Radiat Measurem*, 2012, 47: 315–363
- 8 Benlliure J, Schmidt K H. Basic nuclear data for nuclear waste transmutation and radioactive nuclear beam production. *Nucl Phys A*, 2004, 746: 281–287
- 9 Smith M S. Nuclear data for astrophysics. *Nucl Phys A*, 2003, 718: 339–346
- 10 Zerkov V V, Pritychenko B. The experimental nuclear reaction data (EXFOR): Extended computer database and Web retrieval system. *Nucl Instr Methods Phys Res Sect A*, 2018, 888: 31–43, arXiv: 1802.05714
- 11 Pritychenko B. Intriguing trends in nuclear physics authorship. *Scientometrics*, 2015, 105: 1781–1786
- 12 Chen G C, Yu B S, Cao W T, et al. Neutron nuclear data evaluation for actinide nuclei (in Chinese). *Atomic Energy Sci Tech*, 2010, 44: 138–143 [陈国长, 于保生, 曹文田, 等. 裂变核全套中子数据评价. 原子能科学技术, 2010, 44: 138–143]
- 13 Koning A J, Hilaire S, Duijvestijn M C. TALYS-1.0 A nuclear reaction program. In: *Proceedings of the International Conference on Nuclear Data for Science and Technology*. Nice, 2007
- 14 Herman M, Capote R, Carlson B V, et al. EMPIRE: Nuclear reaction model code system for data evaluation. *Nucl Data Sheets*, 2007, 108: 2655–2715
- 15 Iwamoto O. Development of a comprehensive code for nuclear data evaluation, CCONE, and validation using neutron-induced cross sections for uranium isotopes. *J Nucl Sci Tech*, 2007, 44: 687–697
- 16 Zhang J. UNF code for fast neutron reaction data calculations. *Nucl Sci Eng*, 2002, 142: 207–219
- 17 Koning A J, Blomgren J, Jacqmin R, et al. Nuclear Data for Sustainable Nuclear Energy. Technical Reports. Joint Research Center, 2009
- 18 Ge Z G, Zhao Z X, Xia H H, et al. The updated version of chinese evaluated nuclear data library (CENDL-3.1). *J Korean Phy Soc*, 2011, 59: 1052–1056

Research on nuclear data evaluation and development of data library

GE ZhiGang^{*} & CHEN YongJing

Key Laboratory of Nuclear Data, China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China

Nuclear data describe the basic properties of nuclei and the nuclear interaction properties between particles and nuclei. It is the basic data for the development of nuclear science, and an important bridge connecting the fundamental research of nuclear physics, nuclear engineering, and nuclear technology applications. Nuclear data are also an important branch of nuclear physics research. This paper briefly introduces the connotation, types and applications of nuclear data, as well as the experimental nuclear database, the evaluation process of nuclear data and the evaluated nuclear data libraries. Then the development history of nuclear data evaluation and data library in China are introduced, as well as the activities of the International Nuclear Data Organization and the prospects of nuclear data research were reviewed. Finally, some key issues are discussed, such as what need to be paid attention to in the nuclear data evaluation and the future development of nuclear data evaluation in China.

nuclear data, neutron data evaluation, nuclear data library

PACS: 25.40.-h, 25.90.+k, 28.20.-v

doi: [10.1360/SSPMA-2019-0232](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2019-0232)