



| | |
|------|-----------------|
| 课题编号 | 20120073130009 |
| 学科代码 | 290.29.20 |
| 版本号 | 1301.01.004.100 |

高等学校博士学科点专项科研基金
申 请 书
(优先发展领域)

课 题 名 称: 大体积非均匀放射性废物三维活度探测技术研究

所 属 领 域: 新能源领域

申 请 者: 王德忠

所 在 单 位: 上海交通大学

所 在 院 系: 机械与动力工程学院

联 系 电 话: 021-34205303

是否博士生导师: 是

博 士 点 名 称: 核能科学与工程

国家重点学科名称:

国家重点实验室: 机械系统与振动国家重点实验室

申 请 日 期: 2012-03-05

中华人民共和国教育部

简 表 一

| | | | | | | | | | | |
|--|--------------------|----|--|------------|-------------------|--|----------------|--|--------------------|------|
| 研 究 课 题 | 名 称 | | 大体积非均匀放射性废物三维活度探测技术研究 | | | | | | | |
| | 学科名称 | | 核探测技术 | | 学科代码 | | 2902920 | | 研究 类别 | 应用基础 |
| | 相关学科 | | 辐射防护技术 | | 学科代码 | | 2902990 | | | |
| | 起始日期 | | | 终止日期 | | | 申 请 经 费（万元人民币） | | | |
| | 2013-01-01 | | | 2015-12-31 | | | 40 | | | |
| 申 请 者 | 姓 名 | | 王德忠 | | 出生日期 | | 1962-10-25 | | 性 别 | 男 |
| | 技 术 职 称 | | 定 职 时 间 | | 行 政 职 务 | | 联 系 电 话 | | 021-34205303 | |
| | 教授 | | 2001-08-31 | | 上海交通大学核电 中心副主任 | | 电 子 邮 件 | | dzwang@sjtu.edu.cn | |
| | 毕 业 学 校 | | 上海交通大学 | | 毕 业 时 间 | | 1994-07-05 | | | |
| | 最终 学位 | 博士 | 外 语 | 语 种1: | 英语 | | 程 度 | | 四会 | |
| | | | | 语 种2: | 日语 | | 程 度 | | 一般 | |
| | 学 术 兼 职 (限45汉字) | | 国家标准化管理委员会委员、国家能源核电站核级设备研发中心委员、《辐射防护》编委。 | | | | | | | |
| 填写概括课题内容的六个关键词（主题词），关键词个数可少于六个，关键词之间用逗号隔开 | | | | | | | | | | |
| 核废物, 活度探测, 效率刻度, 等效点源, 寻峰 | | | | | | | | | | |
| 课题摘要（300字以内） | | | | | | | | | | |
| <p>核能利用中会产生大量的大体积、非均匀、核素成份复杂的放射性废物，在最终处置前必须提供其核素组成与活度信息，但目前的探测技术还存在许多科学问题有待深入研究。本课题拟研究基于自适应小区域法和伴随蒙特卡罗方法，建立粒子输运过程中与物质作用的物理模型，通过数值模拟和实验分析，实现大体积、非均匀放射性废物的准确刻度；针对能谱分析中重峰和弱峰，研究基于探测阵列的γ能谱解谱方法，建立二维能谱的寻峰准则，提高能谱识别能力；在三维活度重建上提出等效点源的最优估计方法，采用自适应网格重构技术计算衰减校正系数，以提高探测的精度与效率。最终形成大体积非均匀放射性废物三维活度探测技术，为最终处置提供科学依据。</p> | | | | | | | | | | |

一、研究的目的、意义和成果的预计去向（包括本课题所要解决的科学问题、理论上的科学价值或预见在应用中对经济建设的影响等）。

研究目的与意义

随着核能的大规模应用和核材料的大量使用，从铀矿开采、冶炼到反应堆和后处理厂各个环节将产生大量放射性废物。据测算，一个百万千瓦级的核电厂每年产生的中低放废物大概为 70 至 100 立方米。目前，我国核电运行以来产生的放射性废物大量贮存在核电厂的废物暂存库内，若不能得到及时处置，将可能成为影响核电安全运行的隐患。除此之外，国防和核设施退役产生的放射性废物如何安全处置也是一个迫切需要解决的问题。如果处置不好，会成为制约今后我国核工业发展的因素之一。因此，在核能利用的同时，应重视对后端放射性废物的探测，提高放射性废物管理与处置能力。

在对放射性废物最终处置之前，必须对放射性废物中的核素组成与活度进行准确鉴别与测量，为其暂存、运输和最终处置提供科学依据。从放射性废物包含的核素特点来讲，其种类与活度未知、分布不均匀、物理与化学形态复杂；从其填充的物质来讲，不仅包括纸片、布条等低密度物质，还包括水泥、金属等高密度物质，空间密度变化大、衰减系数涨落大。这些放射性废物的特点造成了对其进行三维活度准确测量的困难。

目前，国外已有专门的研究机构进行放射性废物包检测技术研究，我国在此方面研究工作起步相对较晚。采用破坏性取样分析法对大体积非均匀放射性废物活度进行测量，存在样品取样代表性差与放射性安全问题。在测量中比较理想的是采用无损分析方法（Non Distractive Analysis-NDA），可以在样品的物理、化学形态不发生任何变化的情况下准确分析出样品中所含的放射性核素及其含量，能够克服破坏分析法取样的难题。在应用无损检测技术进行放射性活度三维测量时，针对大体积非均匀的放射性废物，如何建立有效可行的探测方法，如何进行探测效率的准确刻度，如何对复杂能谱的弱峰与重峰进行准确解谱，如何对空间密度变化大的固体废物建立快速重建算法，还存在许多科学问题需要进一步研究，这造成了目前的探测技术难以满足实际要求。

因此，开展对放射性废物的三维活度探测技术的研究，不仅具有重要的科学价值，而且对提高我国放射性废物探测与管理水平具有实际意义。

成果去向

随着核能的大规模利用和放射性废物的大量产生，亟待开发大体积非均匀放射性废物三维活度的探测技术。目前的放射性废物测量技术缺少统一的标准，在探测精度与探测效率上难以满足工程实际需求。通过本课题的研究，可以推动开发具有自主知识产权的放射性废物探测系统，对放射性废物的探测标准以及最终处置提供科学依据与技术支撑。



二、研究课题所涉及的科学领域，国内外达到的水平，存在的主要问题；本课题的学术思想、理论根据、创新性、主攻关键及独到之处。

研究课题所涉及的科学领域，国内外现状，存在的主要问题

本课题拟针对大体积非均匀核素复杂的放射性废物进行三维活度探测技术研究，涉及科学领域包括粒子在物质中的运输、复杂能谱识别与三维活度重建。

由于放射性废物的特殊性，目前普遍采用无损分析方法对放射性废物进行测量，无损分析方法又包括 γ 射线分析法、中子分析法和量热分析法。其中 γ 射线分析法利用样品本身发射的 γ 射线来对样品进行定量分析，且不会产生二次放射性废物，是应用最为广泛的无损分析方法之一。

探测器 γ 射线的效率刻度是无损检测中的一个重要难题。由于 γ 射线与物质相互作用后，产生次级 γ 射线和电子，次级 γ 射线和电子在运输过程中又会产生新的 γ 射线。 γ 射线与电子的耦合运输过程非常复杂，采用传统的数值方法难以进行准确的效率刻度。蒙特卡罗方法能够真实地模拟上述复杂的物理过程，是解决该问题的有效工具。

Kahn, H.在使用蒙特卡罗方法研究平板屏蔽穿透概率时发现，当屏蔽层非常厚时，结果会出现较大的统计偏差^[1]。如果探测器尺寸远小于屏蔽层厚度，到达探测器并被统计的粒子数较少，造成了大尺寸物体蒙特卡罗方法计算的深穿透问题。解决深穿透问题的方法包括半解析方法，小区域方法和伴随蒙特卡罗方法。Berger, M. J.提出使用半解析法来解决平板屏蔽中的深穿透问题，该方法虽然能改善简单的平板屏蔽计算，但是在解决复杂模型的深穿透问题时很难建立准确的数学模型^[2]。Goldstein, M.提出使用递推的蒙特卡罗方法来解决大体积深穿透问题时，将整个屏蔽层划分为许多小区域，先计算出靠近放射源侧区域的探测效率，再以这部分区域为放射源计算相邻区域的探测效率，依次类推，直至完成整体的效率刻度计算^[3]。这种小区域法通过分步计算，能够很好地降低每一步计算时的统计误差，但是计算量大，计算效率低。伴随蒙特卡罗方法是建立在粒子伴随运输方程基础上的一种蒙特卡罗方法，其最大特点是把原来的粒子源变为探测器，而探测器变为粒子源，因此把点通量问题转化为非点通量问题。Maynard, C.W.提出了在伴随运输方程的基础上建立了伴随蒙特卡罗方法的可能性^[4]。Kalos, M. H.在对光子的运输计算中建立了使用直接抽样的伴随蒙特卡罗方法，该方法能够解决光子受复杂几何结构影响下的通量计算问题^[5]。将伴随蒙特卡罗方法与小区域法相结合进行效率刻度，能够在一定程度上解决深穿透问题，而且能够同时计算多个放射源的探测效率，但这方面的研究还不够深入。

在能谱分析方面，核素复杂、衰减后探测统计涨落大、探测时间短，会导致能量计数少，重峰、弱峰严重等问题。一般情况下，对解谱算法的研究主要分为两类，一类是通过匹配滤波法、导数法等方法进行能峰的简单识别，能够较好地抑制统计涨落，在较高的本底上探测弱峰，但是重峰分辨能力较差^[6]；另一类是通过最小方差估计等最优化算法进行能峰函数和本底函数的拟合，提高分辨重峰的能力^[7]。这

两种方法在能谱识别精度上并没有明显的差异,针对国际原子能机构发布的测试能谱,上述方法也难以完全实现自动寻峰和核素识别^[8]。随着智能算法的发展,遗传算法、神经网络算法等可以针对特定的核素提高寻峰精度,但是也难以解决整个能量区间的重峰、弱峰识别问题^[9]。因此,国内外针对该问题的研究主要集中在对特定核素的识别,有学者对²⁵²Cf核素的自发裂变产生的三重峰进行识别,使用最小平方估计方法进行寻峰得到了比较准确的结果^[10]。Lasche, G.P.等对环境中的微量²³⁹Pu源进行能谱分析,采用了具有鲁棒性的非线性最小误差分析方法,对弱²³⁹Pu源能够有效的识别^[11]。这种针对性的建模可以一定程度地解决重峰问题,但是各有其局限性。在自动寻峰技术研究上, Morháč, M.采用Gold反卷积的方法对多维的 γ 能谱进行分解,以提高能峰分辨的准确性^[12]。Garcia-Talavera, M.采用遗传算法进行反卷积计算,对复杂的重峰分析得到了鲁棒性较好的分析手段,但是针对出现大量弱峰的情况,该方法并不适用^[13]。综合来看,自动分析弱峰和重峰在数值上较为困难,需要深入研究突破性算法,以得到理想的结果。

在探测重建技术上,二十世纪七十年代发展起来的放射性废物的 γ 射线扫描技术最先用于放射性废物桶的放射性铀、钚的定量测量,之后也扩展到中低放废物桶中其它 γ 放射性核素的测量。美国 LANL 实验室 (Los Alamos National Laboratory - LANL) 最先提出了分段 γ 扫描技术^[14],它探测时假设废物桶各层的填充物质与放射性核素均匀分布。该假设只对非均匀低密度介质或者高密度均匀介质的样品成立,对非均匀中、高密度的介质的放射性样品,特别是对高密度、有结块、分布极不均匀样品的重建结果造成很大的误差。为解决该问题,在二十世纪九十年代出现了层析 γ 扫描技术。该技术通过透射扫描测量和发射扫描测量并利用CT原理计算得到样品的介质衰减系数分布和放射性强度分布。由于它基于PET-CT成像测量技术,解决了 γ 射线能谱测量中由于样品介质不均匀分布而引起的射线衰减校正不准确的问题,大大提高了非均匀样品中放射活度重建的准确性。但是由于存在转动与平动扫描,测量时间将大大增加。美国 LANL 国家实验室的 Prettyman, T.H.等人采用高纯锗探测器建立了层析 γ 扫描装置来重建样品中的组分和密度,同时对模型参数、重建算法等进行了模拟研究^[15]。Martz, H.E.等人用小同轴 HPGe 探头,也建立了一个简单的实验装置,应用于高温冶金化学领域,进行铈、钚分离实验研究^[16]。Tran Ha Anh 研究了层析 γ 扫描技术中金属钚结块对测量结果的影响,提出了校正结果的准确性依赖体素边长的选取以及放射源在废物桶中的位置^[17]。Robert, C.等学者研究了不同能量 γ 射线对层析 γ 扫描技术衰减系数的影响,并结合双能CT技术,建立材料密度和有效原子序数在不同能量下与衰减系数的函数关系,提高了衰减校正的精度^[18]。1994年,美国 LANL 的 Prettyman, T.H.等人组成的研究小组首次开发研制成功层析 γ 扫描原型装置^[19], LLNL 和西欧各国也相继研制出了不同类型层析 γ 扫描测量装置^[20]。分段 γ 扫描技术分析时间短,但是物质与核素分布的均匀假设导致重建结果准确度不高;层析 γ 扫描技术虽然分析结果较好,但是由于测量方法的要求,对大型样品的分析时间较长,测量效率较低,因而在实际应用中的范围不广。

近年来,改进型的分段 γ 扫描技术逐渐引起了国内外一些学者的关注。Tran Ha Anh 在分段 γ 扫描技术分层的基础上,再将每层分成若干环,通过探测器在若干个不同距离进行测量,得到每环的放射性核素活度^[21]。Bai, Y.F.等在桶旋转一圈的过程中每隔30°记录下计数率,分析得到热点在桶内的位置和核素活度^[22]。采用分环

或分角度测量，虽然测量的复杂性较层析 γ 扫描技术有所降低，但对比分段 γ 扫描技术，如何提高测量效率仍是一个主要问题。

国内最早关于上述问题的研究开始于中国原子能科学研究院。在效率刻度方面，裴鹿成等人建立了一种基于**偏倚抽样的伴随蒙特卡罗方法**来提高计算效率。该方法不需要处理复杂的伴随截面，抽样方法简单，但是如果偏倚抽样分布取得不合适，其抽样方差会比直接抽样方法的方差大^[23]。施工等在计算反应堆屏蔽问题时引入了几何抽样技术的蒙特卡罗分步计算方法，使得计算结果统计误差小于 10%^[24]。在 γ 扫描技术研究上，中国原子能科学院核保障室自二十世纪九十年代开始研究分段 γ 扫描技术^[25]，之后也对层析 γ 扫描技术的关键问题进行了研究。朱荣保研究了分段 γ 扫描技术的原理及机械装置，采用均匀样品进行实验，发现 1 升塑料瓶和 80 升铁桶的自吸收校正因子与透射率存在很好的线性关系^[26]。吕峰等人对分段 γ 扫描技术中透射能量与透射率之间的关系进行拟和来提高精确度，并研制了分段 γ 扫描技术测量机械装置和自动控制系统，采用近立体角三维自吸收模型来计算自吸收校正因子^[27]。周志波等人开发了一套三高纯锗探测器的分段 γ 扫描系统，采用蒙特卡罗方法计算了探测效率，指出蒙特卡罗刻度效率与实验值的偏差小于 10%^[28]。这些对分段 γ 扫描技术的研究中所使用的实验样品都是均匀的或者近似均匀的，尚未见到对非均匀样品进行研究。肖雪夫对层析 γ 扫描技术的原理，机械结构等进行了基础研究，指出**层析 γ 扫描技术关键问题是效率矩阵的获取、准直器的设计和等效厚度的计算**^[29]。张全虎对层析 γ 扫描技术中透射图像的重建算法进行了研究，提出了平均径迹长度迭代法和蒙特卡罗统计迭代法，并采用蒙特卡罗方法对透射图像模拟仿真计算，发现**蒙特卡罗迭代法优于平均径迹长度迭代法**^[30]。虽然国内开展了上述研究，但在高效准确的大体积复杂样品的探测上依然没有成熟的技术。

根据上述分析，对大体积非均匀核素复杂的放射性废物进行三维活度探测还存在如下问题：

(1) 效率刻度在使用蒙特卡罗方法计算时，大尺寸、高密度介质的计算结果统计误差较大。为解决 γ 射线的深穿透问题，降低统计误差，各种改进的蒙特卡罗算法均存在不同程度的局限性，需要进一步研究新的方法或多种方法相结合，以降低粒子输运过程中计算的统计误差，提高计算效率。

(2) 在复杂能谱的分析上，重峰与弱峰问题、核素识别与自动寻峰技术依然是研究的难题，其关键在于对**能峰信息**的获取能力较低，充分解读能峰信息的技术较弱，因此需突破传统方法对复杂能峰分析的局限，结合空间信息对能谱进行二维重构，建立具有空间信息的能谱寻峰准则。

(3) 分段 γ 扫描技术与层析 γ 扫描技术在测量精度与测量时间各有局限性，而且层析 γ 扫描技术与 CT 技术相比在解决不均匀分布问题上空间分辨能力仍然较低，因此固定网格的重建算法对热点核素难以进行准确的定位与效率计算，而减少测量次数导致网格粗化会更加降低测量的精度，目前的改进型测量技术无法解决该问题。因此需要探索新的探测与重建方法，提高探测效率与精度。

本课题的学术思想、理论根据

本课题是针对大体积非均匀放射性废物开展三维活度探测技术研究，主要包括

三个方面:

在效率刻度方面,目前广泛应用蒙特卡罗方法计算粒子运输的各种问题,包括探测器 γ 能谱的模拟。传统的蒙特卡罗方法在计算高密度,大体积物体的效率时存在很大的统计涨落误差。同时,由于蒙特卡罗方法采用的随机数序列容量有限,造成效率过低时无法通过增加模拟粒子数的方法降低统计误差。使用小区域法解决屏蔽计算的深穿透问题时,需要将屏蔽层划分为若干小区域,首先计算出离放射源最近的区域的探测效率,再以这部分区域作为外放射源计算与之接近的区域的探测效率,依次类推直至计算出探测器位置的探测效率。由于本课题的研究对象体积大、物质分布不均匀,因此在使用小区域法解决深穿透问题时面临如何合理划分区域的问题。同时,粒子的随机游动分别在小区域中进行,前次计算的小区域在之后的计算中会被视为外源,这种处理会加大最终得到探测效率的时间。本研究将使用自适应的区域划分方法,根据计算的粒子分布去除粒子出现概率极低的区域,以缩短计算时间。同时,本研究还将在此方法上结合伴随蒙特卡罗方法,将探测器与放射源反置,此时的效率刻度问题与原问题共轭。通过将这两种计算方法相结合,可以同时计算整个被测对象所有位置的探测效率,这将大大缩短效率刻度的计算时间并且解决深穿透问题。

在复杂能谱分析方面,由于本课题研究的对象核素复杂,采用传统的能谱分析方法会造成较大的分析误差。通过建立探测阵列,将探测的空间相关性集合到能谱中,把一维的能谱信息重构为二维信息。借鉴双参数能谱的分析方法,利用一维空间的重叠峰数据抑制计数的统计涨落,建立合理的检验准则与二维能谱数据的自动寻峰方法,从而能够有效的解决三维活度测量的重峰、弱峰问题,提高甄别放射性核素与峰值的准确性。

在探测方法与重建算法方面,分段 γ 扫描技术由于采用物质与核素均匀分布的假设而产生较大的测量误差,层析 γ 扫描技术虽然精度较高,测量过程复杂、时间较长,不能满足大规模应用的要求。因此,这两种测量技术在测量精度与测量复杂性两个方面差异显著,需要建立并研究改进型或新型的探测技术与重建方法。在实际测量中,放射性废物中核素一般不是均匀分布的,近似为多点源的形式存在,即所谓的热点问题。这样,分段 γ 扫描技术的均匀分布假设会使得探测效率存在偏差,造成很大的测量误差。如果依据积分中值定理,通过效率自修正的方法将多点源等效点源的半径求出,则可获得相对精确的探测效率,大大提高测量的精度。层析 γ 扫描技术探测精度取决于有限数量的高热点问题的准确测量,这在减少层析 γ 扫描中的测量位置与次数情况下是可以实现的。但重建过程如采用固定网格,测量次数的减少会造成网格粗化,产生较大的重建误差。因此,采用动态自适应网格、多重正交网格技术,在热点位置细化网格则能在一定程度上解决上述问题。这样,在保证探测精度的前提下,减少测量的复杂性,能大大提高测量的效率。

创新性

- (1) 提出的自适应小区域法结合伴随蒙特卡罗方法以实现对大体积复杂密度分布的对象快速准确的效率刻度,可解决深穿透问题。
- (2) 针对能谱分析,利用空间探测信息,将探测阵列的相关性信息引入到解谱中,

进行能谱二维重构, 提出新的解谱算法。

- (3) 提出的放射源等效点源方法与自适应网格重构方法进行非均匀放射性废物的三维活度重建, 可提高重建的精度与效率。

主攻关键

- (1) 建立高效的抽样方法, 实现自适应的小区域法和伴随蒙特卡罗方法的结合进行粒子在物质中的输运计算, 提高效率刻度的准确度与效率。
- (2) 进行二维能谱重构, 获得重峰的可信权重, 建立结合峰计数和空间位置的概率性模型和接受准则, 准确甄别弱峰和重峰。
- (3) 提出等效点源的最优估计方法, 实现自适应动态网格的重构, 进行非均匀介质与核素的三维重建。

参考文献

- [1] Kahn, H., Random sampling (Monte Carlo) techniques in neutron attenuation problems. Nucleonics (U.S.) Ceased publication, 1950, 6 (5): 27-33.
- [2] Berger, M. J., Doggett, J., Reflection and transmission of gamma radiation by barriers: semianalytic monte carlo calculation. J. Research Natl. Bur. Standards, 1956, 56: 89-98.
- [3] Goldstein, M., Greenspan, E., A recursive Monte Carlo method for estimating importance function distributions in deep-penetration problems. Nucl. Sci. Eng. (United States), 1980, 26: 308-322.
- [4] Maynard, C. W., An application of the reciprocity theorem to the acceleration of Monte Carlo calculations. Nuclear Sci. and Eng., 1961, 10: 97-101.
- [5] Kalos, M. H., Monte Carlo integration of the adjoint gamma-ray transport equation. Nucl. Sci. Eng., 1968, 33: 284-90.
- [6] Phillips, G. W., Marlow, K. W., Automatic analysis of gamma-ray spectra from germanium detectors. Nuclear Instruments and Methods, 1976, 137, (3): 525-536.
- [7] Uher, J., Roach, G., Tickner, J., Peak fitting and identification software library for high resolution gamma-ray spectra, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2010, 619, (1-3): 457-459.
- [8] Nielsen, S. P., Pålsson, S. E., An intercomparison of software for processing Ge γ -ray spectra. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 1998, 416, (2-3): 415-424.
- [9] Diver, D. A., Ireland, D. G., Spectral decomposition by genetic algorithm. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 1997, 399, (2-3): 414-420.
- [10] Wu, S. C., Donangelo, R., Rasmussen, J. O., Daniel, A. V., Hwang, J. K., Ramayya, A. V. and Hamilton, J. H., Resolution of complex γ spectra from triple-coincidence data: Ba-Mo split in ^{252}Cf spontaneous fission. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2002, 480(2-3), 776-781.
- [11] Lasche, G. P., Coldwell, R. L. and Nobel, J. A. Detection of low levels of plutonium in natural environments from gamma-ray spectra with advanced methods in robust fitting. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 1999, 422(1-3), 455-462.
- [12] Morháč, M., Kliman, J., Jandel, M., Krupa, L., Matoušek, V., Hamilton, J. H. and Ramayya, A. V., Efficient fitting algorithms applied to analysis of coincidence γ -ray spectra. Comput Phys Commun 2005, 172, (1), 19-41.
- [13] Garcia-Talavera, M. and Ulicny, B., A genetic algorithm approach for multiplet deconvolution in γ -ray spectra. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2003, 512(3), 585-594.
- [14] Parker J L. The use of calibration standards and the correction for sample self-attenuation in gamma-ray nondestructive assay. Los Alamos National Laboratory Document, LA-10045, Rev. 1986.

- [15] Prettyman, T.H., Gardiner, R.P., Russ, J.C., Verghese, K. A combined transmission and scattering tomographic approach to composition and density imaging. *Applied Radiation and Isotopes*, 1993, 44(10-11): 1327-1341.
- [16] T.F. Wang, H.E. Martz, G.P. Roberson, et al. Three dimensional imaging of a molten-salt-extracted plutonium button using both active and passive gamma-ray computed tomography. *Nuclear Instrument and Methods In Physics Research A*, 1994, 353: 672-677.
- [17] Tran Ha Anh, Tran Quoc Dung. Evaluation of performance of gamma tomographic technique for correcting lump effect in radioactive waste assay, *Annals of Nuclear Energy*, 2001, 28(3): 265-273.
- [18] C. Robert Coutant, V. Moulin, R. Sauze, et al. Estimation of the matrix attenuation in heterogeneous radioactive waste drums using dual-energy computed tomography, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 1999, 422:945-956.
- [19] Tran Ha Anh, Nguyen Duc Thanh and Tran Quoc Dung, Evaluation of performance of a new measuring technique for assay of radioactive waste, *Ann. Nucl. Energy*, 2005, 32 (13):1516-1523.
- [20] Y.F. Bai, E. Mauerhofer, D.Z. Wang, R. Odoj, An improved method for the non-destructive characterization of radioactive waste by gamma scanning, *Appl. Radiat. Isotopes*. 2009, 67(10):1897-1903.
- [21] R.J. Estep, T.H. Preeyman, G.A. Sheppard. Tomographic gamma scanning to assay heterogeneous radioactive waste. *Nuclear Science and Engineering*, 1994, 118(3):145-152.
- [22] Jacobsson S, Hakansson A, Andersson C, et al. A Tomographic Method for Verification of the Integrity of Spent Nuclear Fuel. ISSN 1104-1374, ISBN SKI-R-98/17--SE. Swedish Nuclear Power Inspectorate, 1998.
- [23] 裴鹿成, 伴随蒙特卡罗方法在屏蔽计算中的应用, *数值计算与计算机应用*, 1982, (01): 24-30.
- [24] 施工, 钟兆鹏, 胡永明, 蒙特卡罗方法用于研究堆的屏蔽计算, *清华大学学报 (自然科学版)*, 2001, (06): 19-22.
- [25] 吕峰, 曹斌, 辛标等, 可移动式高分辨率分段 γ 扫描现场测量装置的研制, *原子能科学技术*, 1998, 32 (3): 239-244.
- [26] 朱荣保, 谭亚军, 袁晓鑫等, 大型高分辨分段 γ 扫描装置的研制, *原子能科学技术*, 1994, 28 (1) : 16-24.
- [27] 吕峰, 曹斌, 辛标等, 分段 γ 扫描自吸收校正法分析残渣和废物中的铀、钚含量, *原子能科学技术*, 1998, 32 (5) : 445-449.
- [28] 周志波, 桶装核废物快速检测方法研究, 硕士学位论文, 中国原子能科学研究院, 2007.
- [29] 肖雪夫, 夏益华, 吕峰等, 用于固体放射性废物无损定量测量的 TGS 图象重构技术, *辐射防护*, 2001, 21 (1) : 1-10.
- [30] 张全虎, 隋洪志, 吕峰等, 层析 γ 扫描透射图像重建方法, *原子能科学技术*, 2004, 38 (2) : 162-165.

三、研究内容、工作方案（包括采取的措施、技术路线、可行性分析、进度安排、拟达到的技术指标、提交成果方式等）。

研究内容

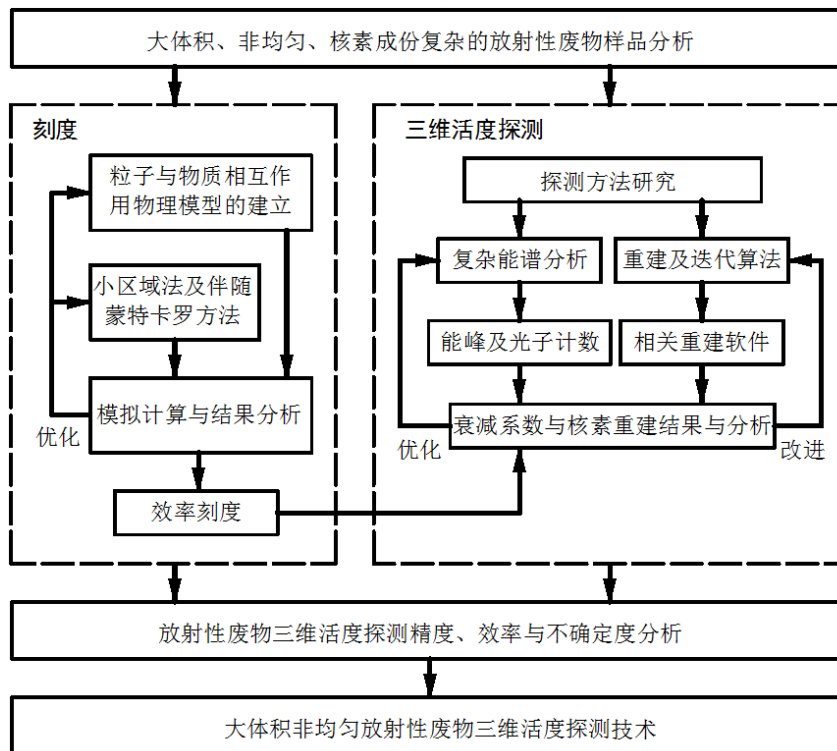
1、大体积、非均匀、复杂核素的放射性废物中探测效率的准确高效刻度。建立粒子输运过程中与物质作用的物理模型，应用自适应小区域法结合伴随蒙特卡罗方法进行数值模拟，分析该方法在 γ 能谱数值模拟以及探测效率刻度上的时间、精度与不确定度，并对算法进行优化。

2、复杂能谱识别与解谱算法的研究。针对多重峰、弱峰情况下的能谱分析开展理论与算法研究，基于探测空间的能谱信息，建立二维重峰、弱峰的接受准则以及基于探测阵列的二维 γ 能谱数据分析方法，以提高能谱的分析精度。

3、高精度、高效率三维活度重建算法与迭代算法的研究。基于最新的 PET-CT 理论与效率自修正、自适应动态网格、多重正交网格等方法，建立复杂测量条件下的改进型或新型重建理论与算法。并且基于核素或光子在网格内的概率统计模型，研究复杂网格、非均匀网格条件下迭代优化准则，优化透射、发射重建的迭代算法。

采取的措施与技术路线

技术路线如图所示，主要采用实验与理论分析相结合的方法，从样品特征分析开始，进行刻度与三维活度探测的研究，依据分析的结果改进与优化数学模型、测量方法与相关算法，分析探测技术的精度、效率与不确定度，最终形成高效准确的大体积非均匀放射性废物三维活度探测技术。



可行性分析

本课题的学术思想和研究内容是申请者经过长期思考,并在已完成的国家自然科学基金项目基础上进一步提炼提出的,是对该项目的继承与深化。申请者已深入研究了核电厂 200 升中低放射性废物桶的分段 γ 扫描技术和层析 γ 扫描技术,在采用蒙特卡罗方法进行效率刻度、探测器校核修正、重建算法等方面具有较好的研究基础与技术积累,确保了该课题的研究价值以及研究目标、研究内容的合理性与可行性。

课题申请人同秦山核电公司有长期的合作关系,在“中低放射性固体废物外活度测量装置效率刻度”、“标准 200 升钢桶放射性废物活度测量方法”等项目上进行过合作研究,对大体积非均匀放射性废物的特点有深入的了解,熟知核电厂废物桶的探测过程与相关准则。以上工作为本课题的实验研究奠定了基础。

课题组成员长期从事辐射测量与防护的教学与科研工作,具有扎实的专业知识和软件开发能力。依托上海交通大学机械系统与振动国家重点实验室及课题组与德国于利希研究中心的合作关系,在前沿信息、人员协作、技术支持上可获得保障,确保了研究工作的顺利开展与研究难题的克服。

进度安排

2013.1-2013.3

资料调研与分析;

对测量对象的特征进行分析,确定研究的数学模型与探测方法;

2013.4-2013.6

建立粒子输运及与物质相互作用的数学模型,确定计算算法;

研究蒙特卡罗抽样算法;

设计实验台架以及实验方案;

2013.7-2013.9

编写粒子输运及与物质相互作用模拟计算的相关程序;

采用已有的蒙卡软件进行刻度计算;

搭建实验台架;

2013.10-2013.12

完善粒子输运及与物质相互作用模拟计算的相关程序;

完善实验台架;

部分完成采用已有的蒙卡软件进行的刻度计算工作;

2014.1-2014.3

进行自适应小区域法结合伴随蒙特卡罗方法的效率刻度计算;

编写分段 γ 扫描技术、层析 γ 扫描技术的重建软件;

研究新型重建方法与相关算法;

开展实验准备,包括制备实验样品;

2014.4-2014.6

进行实验测量,采用传统方法进行谱分析;

采用传统重建方法进行重建分析;

分析采用自适应小区域法结合伴随蒙特卡罗方法的效率刻度模拟计算结果;

2014.7-2014.9

对比分析刻度计算结果；
研究新型谱分析方法，建立相关算法，编写程序；
完善新型及改进型重建算法，编写相关重建程序；

2014.10-2014.12

优化自适应小区域法结合伴随蒙特卡罗方法的效率刻度计算算法；
分析新型谱分析结果，并对算法进行优化；
分析新型及改进型重建结果；

2015.1-2015.3

全面分析并总结刻度、谱分析、重建算法取得的进展与存在的问题；
针对研究存在的问题，再次进行实验测量；
进行模型、算法的改进与优化；

2015.4-2015.6

处理实验数据；
分析总结本课题研究探测方法的效率、精度与不确定度；

2015.7-2015.9

总结研究成果，最终完善研究方法、算法与相关软件；

2015.10-2015.12

撰写项目总结报告、项目结题。

拟达到的技术指标与提交成果方式

结合本课题培养博士研究生 2 名，硕士研究生 4 名。

在国内外高水平期刊上发表 4 到 6 篇学术论文，在“中国科技论文在线”的“首发论文”栏目上发表论文 2 篇。

提交项目结题报告。



四、为了进行本课题的研究，课题组已具备的工作基础和实验室条件。

申请者于 1984 年和 1989 分别获得物理系理学学士和硕士学位，1994 年获工学博士学位。系统地学习了物理学和核辐射等方面的知识，有宽广的知识面和扎实的理论基础。先后主持国家自然科学基金、教育部博士点基金及校企合作等项目 30 余项，在国内外学术期刊上发表学术论文 100 余篇，其中 40 余篇被 SCI 和 EI 收录。在长期的“辐射测量与防护”教学和科研中，深入掌握了核辐射测量和计算机图像重建技术。在完成国防科研预研项目研究中，解决了高速喷雾图像实时采集的难题，在此基础上，成功地应用激光 CT 技术测量了燃油喷雾的三维浓度分布，该项成果获中船总科技进步三等奖。近年来，主要开展射线与物质相互作用机理和探测技术方面的研究，为本项目的研究建立了良好的研究基础和技术积累。

申请者经过长期的调研和研究已经充分掌握了有关课题的国内外研究现状和发展趋势。申请者与秦山核电公司的长期稳定的合作关系，在项目合作中，对 ISOCS 系统和 SGS 系统已开展多次测量实验，并且在实验台架设计等方面积累了一定的经验，并已开始对放射性废物活度三维探测系统方案的初步设计。课题组成员都长期从事课题相关领域的课题研究，知识结构与年龄结构合理，为课题成功提供了坚实的研究基础。

2011 年 12 月，申请者与德国于利希研究中心在核辐射探测及放射性废物管理方面签订关于合作研究与联合培养博士生的协议，申请者的两名博士生分别于 2009 年 6 月和 2012 年 1 月在于利希联合培养学成回校，与国外同行有良好的交流及合作渠道。

在实验条件上，上海交通大学与上海核工程研究设计院联合建立了环境工程实验室，已具备核辐射探测的信号分析和处理装置、气相色谱仪、分光光度计、HPGe 探测器、低温保持器、光电倍增管和配套的模数转换卡、多道数据采集仪等仪器和设备，并具备 ^{60}Co 等一定数量的放射源。



五、说明最近一次获得博士学科点专项科研基金博导类资助课题（已结题）的执行情况。

申请者最近一次获得博士学科点专项科研基金资助课题的名称是“减阻流体剪切诱导结构与湍流作用机理试验研究”。执行时间为 2004 年 1 月至 2006 年 12 月，经费为 6 万元。

课题主要内容为通过实验与理论分析对减阻流体的流动结构分布情况进行了研究，揭示减阻流体的流动规律，得出减阻流动与粘弹性流动之间的关系，并对影响减阻流动的各项因素进行分析，得出减阻模型，探索减阻流动与传热的控制方法。在执行过程中，按项目要求，如期完成了研究计划规定的各项内容，主要工作包括：完成了减阻性能试验，完成了用 PDA、PIV 对减阻流体速度场的测量，完成了对传热实验台的设计改造，完成了添加金属筛网后流体流动与传热性能变化的实验测试，完成了对减阻流体传热特性的研究。同时，开展了多次与该课题相关的国际学术交流。

该基金于 2006 年 12 月顺利结题，培养博士研究生 2 名、硕士研究生 5 名，在国内外期刊上发表论文 8 篇（其中被 EI 收录 4 篇，SCI 收录 1 篇），发表国际会议论文 4 篇。

| 六、申请人作为课题负责人承担的博士点基金博导类课题。 | | | | |
|----------------------------|-----------------------|---------------------------|--------------|------|
| 课题编号 | 课题名称 | 起止时间 | 项目经费 (万元) | 执行情况 |
| 20030248032 | 减阻流体剪切诱导结构与湍流作用机理试验研究 | 2004-01-01至 2006-12-31 | 6 | 结题 |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |

| 七、申请人作为课题负责人承担的国家及省部级科研项目（博士点基金博导类课题除外）。 | | | | | |
|--|------------------------|---------------------------|--------------|------|------------------|
| 课题编号 | 课题名称 | 起止时间 | 项目经费 (万元) | 执行情况 | 课题来源 |
| 2009CB724302 | 转子组件超长使役特性及安全评估方法 | 2009-01-01至 2013-12-31 | 385 | 在研 | 科技部973项目 子项 |
| 11175118 | 核事故气载放射性核素的参数自适应大气扩散研究 | 2012-01-01至 2015-12-31 | 60 | 在研 | 国家自然科学基金 基金项目 |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |

简 表 二

| 经 费 概 算 | | | | | | 单位：万元人民币 |
|--------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|----------|
| 合计 | 设备费 | 材料费 | 计算费 | 资料费 | 差旅费 | 其它 |
| 40 | 10 | 10 | 6 | 2 | 4 | 8 |
| 需购置的设备 | | | | | | |
| 名 称 | | | 数 量 | | 金 额 | |
| 伺服电机 （实验台架平动、转动、升降驱动） | | | 3 | | 4.5 | |
| PLC | | | 1 | | 0.5 | |
| 辐射测量仪 | | | 5 | | 5 | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| 其他经费来源（限120个字以内）： | | | | | | |
| | | | | | | |



简 表 三

| 课题申请人及主要参加人员发表论文或专著情况表 | | | | | | |
|------------------------|------------|---|------|--|---|--------|
| 序号 | 时 间 | 姓 名 | 本人排名 | 论文或专著名称 | 发表刊物（卷期页）或出版社 | 是否通讯作者 |
| 1 | 2010-02-01 | BAI Yunfei, WANG Dezhong, MAUERH OFER | 2 | MC simulation of thermal neutron flux of large samples irradiated by 14 MeV neutrons | Nuclear Science and Techniques, 2010, 21(1):11-15 | 是 |
| 2 | 2010-08-01 | LIU Cheng, WANG Dezhong, BAI Yunfei, QIAN Nan | 2 | An improved segmented gamma scanning for radioactive waste drums | Nuclear Science and Techniques, 2010, 21(4):204-208 | 是 |
| 3 | 2010-05-01 | Weiguo GU, Yasuo Kawaguchi, Dezhong Wang, | 3 | Experimental study of turbulence transport in a dilute surfactant solution flow investigated by PIV | Journal of Fluids Engineering, 2010, 132(5) | 是 |
| 4 | 2009-08-01 | ZHANG Hongxia, WANG Dezhong, CHEN Hanping | 2 | Experimental study on the effects of shear induced structure in a drag-reducing surfactant solution flow | Archive of Applied Mechanics, 2009, 79(8):773-778 | 是 |
| 5 | 2009-10-01 | Bai, Y F; Mauerhofer, E; Wang, D Z | 3 | An improved method for the non-destructive characterization of radioactive waste by gamma scanning | Applied Radiation Isotopes, 2009, 67(10):1897-1903 | 否 |
| 6 | 2008-10-01 | ZHANG Hong-xia, WANG De-zhong, GUO Wei-guo CHEN | 2 | Effects of temperature and concentration on rheological characteristics of surfactant additive solutions | Journal of Hydrodynamics, Ser. B, 2008, 20(5):603-610 | 是 |
| 7 | 2012-01-26 | Nan Qian, Thomas Krings, Eric Mauerhofer, | 4 | Analytical calculation of the collimated detector response for the characterization of nuclear waste drums by segmented gamma scanning | J. Radioanal Nucl. Chem. | 否 |
| 8 | 2011-06-01 | 秦超, 王德忠, 于文丹, 张适 | 2 | 体源样品 γ 自吸收修正因子的蒙卡方法研究 | 核技术, 2011, 34(6):437-441 | 是 |

简 表 三

| 课题申请人及主要参加人员发表论文或专著情况表 | | | | | | |
|------------------------|------------|-----------------------|------|--|---------------------------------------|--------|
| 序号 | 时 间 | 姓 名 | 本人排名 | 论文或专著名称 | 发表刊物（卷期页）或出版社 | 是否通讯作者 |
| 9 | 2011-11-01 | 马元巍,王德忠,于文丹,朱月龙,张适 | 2 | 基于支持向量机的环境 γ 剂量率模型研究 | 原子能科学技术, 2011, 45(11):1394-1398 | 是 |
| 10 | 2010-01-01 | 钱楠,王德忠,白云飞,刘诚,张勇,杨永亮 | 2 | HPGe探测器死层厚度及点源效率函数研究 | 核技术, 2010, 33(1): 25-30 | 是 |
| 11 | 2010-09-01 | 刘诚,王德忠,戚屯锋,李守平,王川,张稳 | 2 | 核废物桶放射性探测的层析 γ 扫描技术 | 上海交通大学学报, 2010, 44(9):1287-1291 | 是 |
| 12 | 2010-01-31 | 花正东,王德忠,刘怡,赵征,陈晨 | 2 | 125I植入治疗源的计量学参数的Monte Carlo模拟 | 介入放射学杂志, 2010, Vol. 19, No. 1, P38-41 | 是 |
| 13 | 2009-04-01 | 姜福明,王德忠 | 2 | 秦山CANDU核电厂大修周期延长的初步研究 | 核动力工程, 2009, 30(4):64-67 | 是 |
| 14 | 2008-05-01 | 翁文庆,王德忠,张勇,刘诚,杨永亮 | 2 | 层析 γ 扫描透射图像重建算法研究 | 核技术, 2008, 31(5):396-400 | 是 |
| 15 | 2008-09-01 | 成雨,翁文庆,白云飞,王德忠,杨永亮,张勇 | 4 | 层析 γ 扫描技术效率矩阵计算模型分析与修正 | 上海交通大学学报, 2008, 42(9):1471-1473 | 是 |
| 16 | 2006-04-01 | 李厚文,王德忠,王斌 | 2 | CANDU6型重水反应堆装料区 γ 辐射源的来源分析及降低剂量率的建议 | 辐射防护, 2006, 26(2):122-128 | 是 |

简 表 四

| 课题申请人及主要参加人员的基本情况表（课题参加人员必须有博士生） | | | | | | | | | | |
|---|-----|------------|------|-----------------|--------|---------------|----------------|-----|-----|------|
| 序号 | 姓名 | 出生年月 | 技术职称 | 从事专业 | 工作单位 | 投入工时 （月/年） | 课题中的分工 | | 签名 | |
| 1 | 王德忠 | 1962-10-25 | 教授 | 辐射防护与探测 | 上海交通大学 | 5 | 负责 | | | |
| 2 | 高景 | 1955-01-24 | 教授 | 物理学中的数学问题 | 上海交通大学 | 6 | 蒙特卡罗算法研究 | | | |
| 3 | 张继革 | 1968-09-20 | 副研究员 | 核电关键设备研究 | 上海交通大学 | 8 | 台架建设与实验研究 | | | |
| 4 | 蒋校丰 | 1976-10-23 | 讲师 | 核反应堆物理理论与数值计算方法 | 上海交通大学 | 8 | 物理模型建立与蒙卡计算 | | | |
| 5 | 顾卫国 | 1979-09-24 | 博士后 | 核能科学与工程 | 上海交通大学 | 8 | 重建算法研究与软件编写 | | | |
| 6 | 刘诚 | 1985-12-17 | 博士生 | 辐射防护与探测 | 上海交通大学 | 10 | 重建算法、迭代算法研究 | | | |
| 7 | 马元巍 | 1984-07-11 | 博士生 | 核辐射与环境监测 | 上海交通大学 | 10 | 实验及能谱分析 | | | |
| 8 | 钱楠 | 1985-04-09 | 博士生 | 辐射防护与探测 | 上海交通大学 | 10 | 实验台架设计、蒙卡计算与刻度 | | | |
| 9 | 吉志龙 | 1988-11-20 | 硕士生 | 核辐射与探测 | 上海交通大学 | 10 | 数据处理及谱分析 | | | |
| 10 | 谈文姬 | 1988-01-21 | 硕士生 | 核能科学与工程 | 上海交通大学 | 10 | 效率刻度 | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| 总人数 | | 教授 | | 副教授 | | 讲师 | | 博士生 | 硕士生 | 其他人员 |
| 10 | | 2 | | 0 | | 1 | | 3 | 2 | 2 |
| 课题申请人简介： | | | | | | | | | | |
| 王德忠，男，1962年10月生。多年来一直从事核辐射防护与探测、核成像技术、减阻流体、流场可视化与激光测试技术、核电装备关键技术等方面的研究工作。主持科研项目三十余项，其中包括国家自然科学基金项目5项，科技部973项目子项1项，教育部高等学校科技创新工程重大项目培育项目1项，高校博士点基金项目1项。发表论文100余篇，其中SCI和EI收录40余篇。 | | | | | | | | | | |

申请人承诺：

本人符合高等学校博士学科点专项科研基金优先发展领域课题的申报条件，申请书内容真实有效。若获得基金资助，我将认真开展相关工作，遵守《高等学校博士学科点专项科研基金管理办法》，按要求完成项目的结题工作，在项目结题前在中国科技论文在线（<http://www.paper.edu.cn>）发表2篇以上的论文，注明“高等学校博士学科点专项科研基金优先发展领域课题”及项目编号。若申报信息失实或者违反规定，本人愿承担全部责任。

申请人签字：

简 表 五

| | |
|--|---|
| 学校学术委员会意见： | |
| <p>研究大体积非均匀放射性废物的探测技术，能够为放射性废物的核素甄别与活度测量，以及最终处置提供科学依据与技术支持。本课题的顺利开展有助于解决探测过程中在效率刻度、复杂能谱分析与非均匀三维活度重建上存在的科学与技术难题，最终形成高效准确的大体积非均匀放射性废物的探测技术。本课题经过充分的前期调研，工作设想具有充分的理论依据，研究方案先进可行。</p> <p>王德忠教授长期从事核探测技术与核辐射防护方面的教学与科研工作，承担了国家级、省部级及企业合作科研项目30余项，其中包括国家科技部“973”子项1项，国家自然科学基金项目6项、教育部重点项目1项、上海市经委重大装备研制专项2项，具有扎实的理论基础与研究积累，科学作风严谨，有较强的创新能力。所在团队知识结构与年龄结构合理，同秦山核电公司与德国于利希研究中心有良好的合作关系。若能得到基金支持，有能力完成预期目标。</p> | |
| <p style="text-align: center;">校学术委员会负责人签名：</p> <p style="text-align: right;">年 月 日</p> | |
| 学校意见： | |
| <p>已对王德忠教授进行了资格审查，对申请书内容进行了审核，同意学术委员会的审查意见，同意王德忠教授申请教育部博士点基金优先发展领域课题，并保证在项目获得资助后做到以下几点：</p> <p>(1) 按照教育部规定，对研究计划实施所需的人力、物力和工作时间等条件给予支持。</p> <p>(2) 严格遵守有关资助项目管理、财务等各项规定。</p> <p>(3) 督促项目负责人和本单位项目管理部门按规定及时报送有关报表和材料。</p> | |
| <p style="text-align: center;">校长（签字）：</p> | <p style="text-align: center;">学校盖章</p> <p style="text-align: right;">年 月 日</p> |