

中国核科学技术进展报告

(第二卷)

——中国核学会2011年学术年会论文集

第7册

- ▲ 核电子学与核探测技术分卷
- ▲ 脉冲功率技术及其应用分卷
- ▲ 核聚变与等离子体物理分卷

中国原子能出版社

中国核科学技术进展报告

(第二卷)

——中国核学会 2011 年学术年会论文集

第 7 册

核电子学与核探测技术分卷
脉冲功率技术及其应用分卷
核聚变与等离子体物理分卷



中国原子能出版社

图书在版编目(CIP)数据

中国核科学技术进展报告. 第2卷: 中国核学会2011年学术年会论文集. 第7分册, 核电子学与核探测技术分卷、脉冲功率技术及其应用分卷、核聚变与等离子体物理分卷 / 中国核学会主编.

—北京: 中国原子能出版社, 2012. 10

ISBN 978-7-5022-5607-4

I. ①中… II. ①中… III. ①核技术—技术发展—研究报告—中国 IV. ①TL-12

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 150934 号

内 容 简 介

自首届全国学术年会以来,我国核科学技术取得长足发展。从基础核科学到核技术应用,从核电技术到核电配套产业集群,均呈现蓬勃发展态势。在这种时代背景下,中国核学会第二届全国学术年会于2011年10月11日至14日在贵阳召开。大会以“蓬勃发展中的核科学技术”为主题,吸引了来自政府部门、企业界、科研机构、高等院校及学术团体的知名院士、专家、教授及青年核科技工作者,共计1200余人(其中院士31人)与会。年会共征集论文1192篇,内容涵盖基础核科学、核电及其关联产业、核技术应用、核技术经济及核科技信息等学科。会后,经过各个二级学科专家组的评审,近800篇论文通过了学术(技术)审查,结集为《中国核科学技术进展报告(第二卷)》,全卷分为10册,并按21个二级学科设立分卷。

各册包含的分卷如下:第1册为“铀矿地质”分卷;第2册含“铀矿冶”分卷和“核能动力”分卷(上)两部分;第3册为“核能动力”分卷(下);第4册收录了“核材料”、“同位素分离”和“核化学与放射化学”3个分卷;第5册内容为“辐射防护”和“核化工”两个分卷;第6册共收录了“核物理”、“计算物理”和“粒子加速器”3个分卷;第7册则为“核电子学与核探测技术”、“脉冲功率技术及其应用”和“核聚变与等离子体物理”3个分卷;第8册包含有“辐射研究与应用”、“同位素”和“核农学”3个分卷;第9册收录有“核医学”和“核技术工业应用”两个分卷;第10册内容为“核情报(含计算机技术)”分卷和“核技术经济与管理现代化”分卷。

作为公共信息,文集还列出了中国核学会2011年学术年会的组织机构,《中国核科学技术进展报告(第二卷)》的总编委会和21个(二级学科)分卷编委会的名单。

中国核科学技术进展报告(第二卷)

出版发行 中国原子能出版社(北京市海淀区阜成路43号 100048)

责任编辑 孙凤春

技术编辑 丁怀兰

责任印制 潘玉玲

印 刷 保定市中华美凯印刷有限公司

经 销 全国新华书店

开 本 890 mm×1240 mm 1/16

印 张 27.625 字 数 817千字

版 次 2012年10月第1版 2012年10月第1次印刷

书 号 ISBN 978-7-5022-5607-4 定 价 100.00元

网址: <http://www.aep.com.cn>

E-mail: atomep123@126.com

发行电话: 010-68452845

中国核学会 2011 年 学术年会大会组织机构

大会主席 翟彦
执行主席 李冠兴
副主席 (按姓氏笔画排序)
丁中智 孙汉虹 邱爱慈 贺禹 康克军
彭先觉 雷增光 穆占英

顾问委员会

主任 王乃彦
委员 (按姓氏笔画排序)
王大中 毛用泽 方守贤 吕敏 朱永贍
阮可强 李德平 杨福家 吴德昌 陈能宽
胡思得 钱绍钧

组委会

主任 雷增光
副主任 潘传红(常务) 刘长欣 王德林
委员 (按姓氏笔画排序)
王敏 王国保 石金水 冉木子 朱升云
刘毅 苏艳如 李思凡 吴春喜 何作祥
辛锋 张闯 张一心 张生栋 杨华庭
罗志福 金蓓 哈益明 赵京伟 顾军
徐燕生 崔建春 康力新 程建平 简晓飞
蔚喜军
秘书 秦昭曼 张宝珠 耿庆云 王义伟 马正锋
李钢 伍险峰 张小庆 王宇 黄伟
苏萍

学术委员会

主 任 李冠兴

副 主 任 彭先觉 邱爱慈

委 员 (按姓氏笔画排序)

王志东	王贻芳	邓建军	刘国治	李金英
李德连	沈文庆	吴中俭	吴国忠	何多慧
张飞凤	张焕乔	张锦荣	陈念念	陈盛祖
畅 欣	周永茂	赵志祥	赵宪庚	侯惠群
柴之芳	崔建春	樊明武	潘传红	潘自强

主办单位 中国核学会

承办单位 贵阳市人民政府

协办单位	中国核工业集团公司	中国核工业建设集团公司
	中国电力投资集团公司	国家核电技术有限公司
	中国广东核电集团有限公司	中国工程物理研究院
	清华大学	贵州大学

技术支持单位

铀矿地质分会、铀矿冶分会、核能动力分会、核材料分会、同位素分离分会、核化学与放射化学分会、核化工分会、辐射防护分会、核农学分会、计算物理分会、核物理分会、粒子加速器分会、核电子学与核探测技术分会、脉冲功率技术及其应用分会、核聚变与等离子体物理分会、同位素分会、核医学分会、辐射研究与应用分会、核技术工业应用分会、核情报分会、核技术经济与管理现代化分会

北京市核学会、湖南省核学会、江西省核学会、广东省核学会、四川省核学会、浙江省核学会、湖北省核学会、福建省核学会、陕西省核学会、辽宁省核学会、甘肃省核学会、山西省核学会、吉林省核学会、新疆自治区核学会、安徽省核学会、河南省核学会、江苏省核学会、上海市核学会、天津市核学会、贵州省核学会、黑龙江省核学会

中国核科学技术进展报告

(第二卷)

总编委会

主 任 李冠兴

副主任 彭先觉 邱爱慈

委 员 (按姓氏笔画排序)

王志东	王贻芳	邓建军	刘国治	李金英
李德连	沈文庆	吴中俭	吴国忠	何多慧
张飞凤	张焕乔	张锦荣	陈念念	陈盛祖
畅 欣	周永茂	赵志祥	赵宪庚	侯惠群
柴之芳	崔建春	樊明武	潘传红	潘自强

编委会办公室(中国原子能出版社)

主 任 侯惠群

副主任 杨树录

成 员 (按姓氏笔画排序)

丁怀兰	卫广刚	王 丹	付 真	任重远
刘 朔	孙凤春	张关铭	赵志军	侯茸方
谭 俊				

核电子学与核探测技术分卷

编 委 会

主 任 王贻芳

委 员 (按姓氏笔画排序)

王良厚 王焕玉 王群书 刘以农 安 琪
安继刚 苏 伟 李卫国 肖国青 陈盛祖
赵京伟

脉冲功率技术及其应用分卷

编 委 会

主 任 邓建军

委 员 (按姓氏笔画排序)

石金水 江伟华 许 州 张天爵 张建德
林福昌 曾正中 蒙 林

核聚变与等离子体物理分卷

编 委 会

主 任 彭先觉

副主任 刘 永 李建刚

委 员 (按姓氏笔画排序)

王 珂 冯开明 庄 革 安 竹 杨青巍
胡立群 胡明刚 李晓东 张年满

前 言

“创新是一个民族进步的灵魂,是国家兴旺发达的不竭动力”(江泽民《在全国科学技术大会上的讲话》),我国核科技事业的发展史实际上就是一部蓬勃发展的科技创新史。从基础核科学领域的原始创新,到核技术广泛应用于工业、农业、医学等各个领域,从成功研制核武器,到核电技术快速发展,核科学技术的每一项技术进步都闪耀着核科技工作者的创新精神。以“蓬勃发展中的核科学技术”为主题,中国核学会两年一度的全国学术年会于2011年于10月11日至14日在贵阳市隆重举行。本届学术年会由贵阳市人民政府承办。年会共征集论文1192篇,内容涵盖基础核科学、核电及其关联产业、核技术应用、核技术经济及核科技信息等学科。会议期间,来自政府部门、企业界、科研机构、高等院校及学术团体的知名院士、专家、教授及青年核科技工作者,共计1200余人(其中院士31人)参加会议。共同围绕我国核工业发展、核电及其相关产业技术进步、核技术应用研究、基础核科学创新和发展、以及核科技人才培养等问题,交流观点,畅谈体会,切磋学术,探讨对策,以期促进中国核科技事业健康发展。

本届学术年会会期三天,第一天为主会场邀请报告。13名相关领域的专家学者,分别介绍了近年来我国在核安全监管、核电及其关联产业技术进步、以及基础核科学、核技术应用、核武器等相关领域取得的进展、未来的发展趋势与展望。第二天和第三天为“分会场口头报告”和“张贴报告”时段,两天时间里,计有486名科技工作者分别在10个分会场进行“口头报告”交流,有600多篇报告在张贴报告区进行书面交流。大会全景式展示了我国核科技界近两年来最新研究成果,包括AP1000的工程建设实践、AP1400科研进展、CPR1000自主化实践、我国铀矿冶新技术、高放废物深地质处置技术、同步辐射光源进展与展望、中微子实验、同位素及辐照加工技术进展、核技术在医学领域的应用等。此外,核物理、核化学、粒子与加速器物理、核聚变与等离子体物理等基础学科领域的进展,以及核医学、核农学、同位素与辐照加工技术、核技术工业应用等应用学科领域的技术进步,也引起人们的极大兴趣。

由于日本福岛核事故的影响,与核电有关的议题成为本届学术年会关注的焦点,会议回顾和总结了福岛核事故的经验教训及其对世界核能发展的影响,提出了大力发展最先进的核电技术,加强核安全法规(制度)体系及核安全文化建设,加强铀资源保障工作和核燃料后端产业发展、实现核燃料闭式循环,大力推进核电及其关联产业全面协调可持续发展等项对策和建议。使参会代表不仅近距离了解我国核基础科学技术的最近研

究成就,还感受到我国“发展核电的决心不能动摇”(张德江副总理语)和核电关联产业蓬勃发展的态势。

本届学术年会期间,在各个二级学科推荐基础上,通过学术委员会严格评审,共有66篇论文分别获得“优秀学术论文”一、二、三等奖和“青年优秀科技论文奖”。会后,经过各个二级学科专家组的评审,近800篇论文通过了学术(技术)审查,结集为《中国核科学技术进展报告(第二卷)》。和上届学术年会的论文集一样,《中国核科学技术进展报告(第二卷)》分为10册,并按21个二级学科设立分卷。

中国核学会作为全国性学术团体,自创立以来,努力贯彻执行党的方针政策,紧密团结广大核科技工作者,搭建高水平学术交流平台,推动各学科间的交流与融合,提升我国核科技创新能力,为经济社会发展服务、为提高全民科学素质服务、为科学技术工作者服务。通过广大核科技工作者的共同努力,经过两次成功办会所积累的经验,中国核学会的全国学术年会已经初步显示出旺盛的生命力,成为我国核科技界规模最大、最具影响力的学术交流平台。《中国核科学技术进展报告(第二卷)》如期结集出版,便是这场盛会之具体成果,可喜可贺!我们期待着中国核学会全国学术年会这朵奇葩,在广大核科技工作者的精心呵护和关怀下,绽放更绚丽的光彩,结出更丰硕的成果!

中国核学会第二届全国学术年会的顺利召开,离不开贵阳市人民政府的大力支持,离不开全国大核科技工作者的理解与支持,离不开中国核学会全体分支机构和21个省级(地方)核学会的密切配合,因此,要首先感谢那些为学术年会顺利召开做出贡献的单位和个人;其次,在论文学术(技术)评审和论文集出版发行过程中,学科评审专家组、分卷编委会及总编委会的全体同仁,付出了辛勤的劳动,在此对他们严谨学风和治学态度表达崇高敬意;此外,中国核学会秘书处和出版社的工作人员,在文字的编辑和校核过程中,也做出了具体贡献。在此一并致谢。

《中国核科学技术进展报告(第二卷)》编委会
2012年5月24日

目 录

高强度脉冲辐射场诊断中电子学设备 NEMPI 屏蔽的极限条件分析法

..... 程晓磊,刘 芳,欧阳晓平(1)

YAP 伴随 α 粒子探测器的研制 李井怀,吴军随,梁庆雷,等(6)

声空化核效应实验的中子探测方法 李欣年,朱晓娟,冯 涛,等(11)

运输核材料辐射可探查性研究 罗 降,王 冰,贾俊波,等(18)

应对日本核泄漏事件惰性气体氙的应急监测 胡 丹,丁 逊,宋建锋,等(23)

快中子成像的 Geant4 模拟以及 3D 图像重建方法研究

..... 陈永浩,安旅行,张春晖,等(26)

^{252}Cf 自发裂变时间关联符合谱的 Monte Carlo 模拟 梁庆雷,李井怀,刘国荣(31)

一种单通道多个区域在线放射性监测设备在田湾核电的应用

..... 李 中,郑素红,洪远进(37)

CZT 探测器测量铀浓缩厂容器中 UF_6 铀丰度实验研究

..... 吕学升,刘宏斌,赵永刚(40)

基于 GEANT4 的 Clover 探测器模拟研究 刘辉兰,宋玉收,颜 强,等(44)

基于 PLC 的 β 射线吸收法粉尘浓度测量系统设计 练德幸,赵修良,刘丽艳,等(50)

氟-18 微尘在取样通道中输运特性数值模拟 李成果,屈国普,李四方(56)

基于 Windows API 的 CAMAC 系统仿真 李 磊,宋玉收,席印印,等(63)

移动式核应急监测实验室的功能分析 来永芳,王永红,高 静,等(70)

基于筛网扩散组的放射性气溶胶粒径分布测量软件 王凯锋,刘良军(75)

基于医学影像数据的 HPGe 探测器无源刻度 陈朝斌,余若谷,肖 刚,等(79)

基于蒙卡的区域 γ 辐射定向监测仪准直器设计 王江勇,刘良军(85)

基于 Bulk-Micromegas TPC 快中子成像探测器的研制进展

..... 沈华亚,David Attie ,张春晖 ,等(89)

基于 FPGA 与 USB 的数字化多道硬件设计与实现

..... 方 飞,李 政,魏义祥,等(94)

基于 Verilog HDL 的数字化多道预处理算法研究 王 珂,李 政,魏义祥,等(99)

燃料元件包壳破损监测三元法数字化技术研究..... 袁 彬,刘才学,曾少立(103)

fA 级微弱电流测量 余小平,度先国,奚大顺,等(108)

^{218}Po 正离子的中和动力学研究现状 马文荣,赵桂芝(113)

区域环境核辐射无线传感网络监测系统的设计

..... 刘 冲,刘 道,王尧君,等(119)

塑料闪烁体能谱积分特性的研究与应用..... 王丽婷,周畅,方登建(123)

DEB-硅橡胶吸氢拉曼检测技术研究 杨锁龙,仲敬荣,王 晃,等(128)

掺铈溴化镧闪烁晶体的性能评估 谢 明,林 立,刘世豪,等(133)

基于 PET 列表式单事件数据处理的能量校正..... 龙岸文,奚道明,吴中毅,等(138)

中子弹核爆炸空间中子注量分布特性研究 张文仲,毛用泽,于文静(143)

不同压强下氦气运移实验研究 张金钊,度先国(147)

正比计数器的设计与性能测试 宋茜茜,度先国,成 毅,等(152)

可抽真空便携式 α 谱仪测试及效率分析 李 丽,度先国,李 哲,等(157)

NaI(Tl)伽马能谱全谱数据高斯分解软件的实现与应用

..... 曾立晖,王南萍,田 贵(163)

电子个人剂量仪发展现状及未来发展趋势研究

..... 马 捷,王百荣,来永芳(169)

电子对湮没辐射效应用于铁矿石品位在线分析的研究

..... 侯朝勤,龚亚林,尚庆敏(174)

液闪 TDCR 活度测量装置的研制 吴永乐,梁君成,柳加成,等(178)

^{22}Na 活度测量方法研究 郑艳明,汪建清,吴永乐,等(183)

高强度脉冲辐射场诊断中电子学设备 NEMPI 屏蔽的 极限条件分析法

程晓磊¹, 刘芳¹, 欧阳晓平²

(1. 华北电力大学, 北京 102206; 2. 西北核技术研究所, 陕西 西安 710024)

摘要:本文介绍了在高强度脉冲辐射场诊断工作中, 现场开展电子学设备的 NEMPI(核电磁脉冲干扰)评估及屏蔽工作的难点问题, 并提出通过“极限条件分析法”保守可靠地解决这一类问题。通过“电场能量完全耦合”这一极限条件的假设, 无需通过获取现场 NEMP 的信息进行繁复耗时的计算, 即可得到电子学设备正常运行所能承受的最大电磁脉冲强度 $E_{\max}$ 。最后, 通过可行性论证确定了依据 $E_{\max}$ 提出的现场屏蔽要求是保守可靠的, 同时也是易于实现的, 可以满足高强度脉冲辐射场诊断工作中电子学设备的 NEMPI 屏蔽要求。

关键词:极限条件分析; 电磁脉冲干扰屏蔽; 高强度脉冲辐射场诊断; 电场能量完全耦合

某类核装置(如强光一号等)在产生高强度脉冲辐射场的时候, 还会伴随产生强度高、频率高的电磁脉冲(主要形成原因包括 γ 射线与周围物质作用产生康普顿电子所形成的一定方向的瞬时巨大脉冲电流), 这类由致电离辐射形成的电磁脉冲称之为 NEMP(核电磁脉冲)。为了预估这类电磁脉冲对高强度脉冲辐射场诊断设备造成的影响, 并进行电磁屏蔽设计, 需要获得较为准确的由电磁脉冲产生的干扰信号的各项参数, 尤其是电场引起的干扰电压的幅度。计算不同情况下电磁脉冲在电子学设备中产生的干扰信号, 并确定系统正常运行时所能承受的电磁脉冲电场强度最大值 $E_{\max}$, 是一件复杂而困难的工作, 计算过程中将涉及如下的参数及边界条件:

- (1) 电磁脉冲的波形特征及其频谱;
- (2) 电磁脉冲的传播方向与电场极化方向;
- (3) 设备机壳的形状、尺寸、材料等参数, 以及壳体上的耦合通道等;
- (4) 电路板导体及介质的材料(确定其相对介电常数 ϵ_r);
- (5) 电路板传输线的结构形式(微带线、带状线等, 结合其具体尺寸和 ϵ_r 计算相应的等效电容 C 、等效电感 L 等参数);
- (6) 敏感传输线两端负载的结构(容性、纯阻性负载, 线性、非线性的负载网络等)。

其中, 电磁脉冲的波形特征及频谱, 常常是在电磁脉冲发生后才能较为准确的获得。伴随高强度脉冲辐射场产生的电磁脉冲是瞬态不可重复的, 在其发生前无法准确预估其波形特征及频谱的, 而加速器等大型实验装置运行时在实验现场产生的电磁脉冲分布, 也需要长期实验结果的积累才能给出准确的结果, 一旦实验条件更改, 电磁脉冲的波形特征、频谱及其空间分布都会发生变化, 准确地预估上述参数需要重新积累实验结果进行统计分析。

此外, 目前的电子学设备中都包含了很多高端的大规模集成电路芯片, 确定连接这些芯片的传输线两端的负载结构, 必须掌握芯片所使用的材料及其留片方式, 而这些资料大多为商业机密或国防机密, 获取的难度非常大。

为满足基于这一类核装置的试验及研究工作的周期、效率方面的要求, 需要一种简单、依赖参数少、保守又有实际可行性的方法, 高效率的预估电子学设备正常运行所能承受的 $E_{\max}$, 从而为其电磁屏蔽设计提出准确可靠的指导与参考。

1 极限条件分析法

极限条件分析法,是将计算中全部的边界条件和参数均假设为最极端的情况,以求出某一参数在理论上的极值。虽然这一极值在实际工作中出现的可能性微乎其微,但对于电磁屏蔽而言,使用最保守的计算方法求出设备电路能承受的电磁脉冲场强的理论极限 $E_{\max}$,再通过屏蔽措施将设备机壳内的电磁脉冲场强降至该极限值以下,能非常可靠的保障设备电路的运行过程不受电磁脉冲的干扰。

假设的这一极端条件必须满足的要求是,在相同电场强度的影响下,在其他条件下在电路中产生的干扰信号幅度,将永远都小于在这一极端条件下所产生的干扰信号幅度。在忽略了电磁脉冲波形、频谱、传播方向、极化方向以及电子学设备的各项物理参数后,只有一种极端的情况可保证在同等场强下引起的干扰信号幅度最大——电场能量的完全耦合。因为电磁脉冲引起干扰信号的本质是其携带的一部分能量耦合进入了电路的导体中,而已知非均匀电场中某处的电场能量密度 W_e (单位体积的电场能量)与电场强度 E 、该处介质的介电常数 ϵ 的关系为:

$$W_e = \epsilon E^2 / 2 \quad (1)$$

那么对于电路中某一特定的导体,在电磁脉冲影响下产生的干扰信号的幅度,是由其耦合的能量大小所决定的,当能量完全耦合时,同等电场强度的影响下将产生最大的干扰信号,而产生同等大小的干扰信号所需的电场强度最小。这样,如果根据电路运行的原理,确定了该导体所能容许的最大干扰信号,则可根据极限条件分析法求出产生同等幅度干扰信号所需的最小电场强度,将这一电场强度值作为该处导体所能承受的最大电场强度 $E_{\max}$,这样就能可靠的保证电场强度小于 $E_{\max}$ 的电磁脉冲将不会对该导体所在位置的电路正常运行产生影响。

极限条件分析法带来的问题是,通过极端的条件假设得出的参数极值,会在工程应用中提出过于苛刻的要求,导致相应的设计难以实现,因而该方法很难适用于一般的工程设计。但对于电磁辐射屏蔽技术而言,过于保守的估算和设计工作可以保障屏蔽措施有效地发挥作用。在后文的分析和计算中将看到,使用极限条件分析法估算得到的 $E_{\max}$,对屏蔽措施的要求并不苛刻,在实际工作中较容易实现。

2 $E_{\max}$ 估算实例

下面以如图 1 所示的数据采集系统的电路板为例,介绍极限条件分析法的具体计算过程。首先,数据采集系统是一个模数混合电路,而电路的模拟部分和数字部分对干扰信号的容限是不同的,因而需要依据电路原理分别计算 $E_{\max 1}$ (Analog)和 $E_{\max 2}$ (Digital),并取其最小值作为 $E_{\max}$ 的估算结果。

依据式(1)如果在电场中某一位置上存在着传输线,该处电场能量完全耦合至传输线中,则传输线获得的能量可描述为:

$$W_e' = W_e = \epsilon E^2 / 2 = \epsilon' E'^2 / 2 \quad (2)$$

式中, E' 为在单位长度的传输线中耦合出的电势, ϵ' 为传输线的等效介电常数。由式(2)可知,在“电场能量完全耦合”这一假设条件下,电磁脉冲在单位长度的传输线上耦合出的电势可由式(3)求出 (ϵ_r 和 ϵ'_r 分别为空气和传输线的相对介电常数):

$$E' = E \sqrt{\epsilon / \epsilon'} = E \sqrt{\epsilon_r / \epsilon'_r} \quad (3)$$

在该系统的模拟电路中, A/D 变换器件的 LSB 为 8 mV, 为保证 A/D 变换的幅度精度, 在其输入端产生的干扰信号至少要小于 8 mV, 即在正负两路走线中产生的干扰信号幅度差必须小于 8 mV。

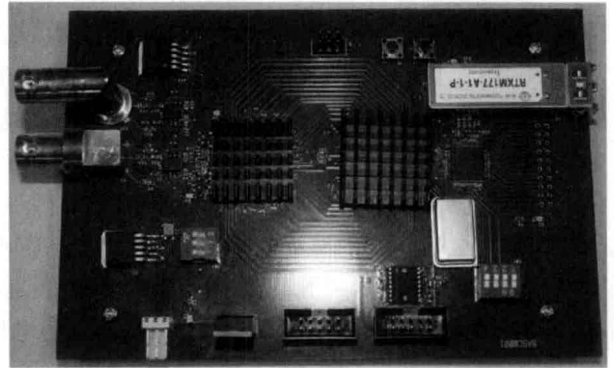


图 1 数据采集系统电路板

进一步地应用极限条件分析法,假设在正负两路走线处的电磁脉冲强度分布为最极端的情况,即一路走线处场强为 $E_{\max1}$,另一路走线处场强为 0,这样干扰信号仅在一路走线中产生。在输入端经差分后产生相同幅度的干扰信号时,这种分布情况所需的 $E_{\max1}$ 将为理论上的最小值,只要保证辐照模拟电路的电磁脉冲强度小于该值,在设备运行时就不会产生 8 mV 以上的电磁干扰。模拟电路中最长的传输线长度为 1 cm,可知该走线允许的干扰信号的最大电势(单位长度上)为 $8 \text{ mV}/1 \text{ cm}=0.8 \text{ V/m}$ 。

已知空气的相对介电常数为 1,由于传输线为微带线结构,则其等效相对介电常数可由下式计算^[101]:

$$\epsilon_{\text{eff}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2 \sqrt{1 + 12d/w}} \quad (4)$$

式中, ϵ_r 为电路板绝缘材料的相对介电常数,该系统电路板使用的是 FR-4,因此 ϵ_r 取 4.3。 d 为绝缘层厚度, w 为微带线线宽,系统的模拟输入端的走线 $d=8 \text{ mil}$ 、 $w=12 \text{ mil}$ ($1 \text{ mil}=0.0254 \text{ mm}$)。由式(4)可得微带线的等效相对介电常数 $\epsilon_{\text{eff}}=3.2$ 。根据式(5)可知:

$$E_{\max1} = E' \sqrt{\epsilon_r'/\epsilon_r} = 0.8 \times \sqrt{3.2} \approx 1.43 \text{ (V/m)} \quad (5)$$

由于使用了极限条件分析法,因此可以确定当模拟电路所处位置的电场强度小于 1.43 V/m 时,在传输线中电场耦合产生干扰信号的最大幅度不会超过 8 mV,对模拟电路的影响可忽略不计。

数据采集系统的数字电路部分情况较复杂,这里仅以建立保持时间最短最容易受到干扰的 32 对 LVDS 数据信号作为研究对象。由芯片手册可知,系统 A/D 变换输出的 LVDS 正负信号间最小的有效幅度差为 220 mV,如果在 LVDS 接收端造成的干扰信号幅度超过 $\pm 220 \text{ mV}$,则有可能导致 LVDS 接受段的差分输入电压错误的“过零”,即产生了正负信号相交的假象,从而造成信号逻辑的错误翻转,因此要控制 LVDS 信号线上的干扰信号幅度在 220 mV 以下。计算过程中,同样假设干扰信号仅在差分对中的一路走线产生,将弯曲的走线长度折算到与 A/D 变换模拟输入端信号走线平行的方向上,可估算出该方向上 LVDS 走线的等效长度最长约为 7 cm,则可知该走线允许的最大干扰电势(单位长度上)为 $220 \text{ mV}/7 \text{ cm} \approx 3.14 \text{ V/m}$ 。设计中单根 LVDS 走线的 $d=8 \text{ mil}$ 、 $w=5 \text{ mil}$,代入式(4)可知其 $\epsilon_{\text{eff}} \approx 3.0$ 。参考式(5)可得:

$$E_{\max2} = E' \sqrt{\epsilon_r'/\epsilon_r} = 3.14 \times \sqrt{3} \approx 5.44 \text{ (V/m)} \quad (6)$$

与模拟电路的要求相比,数字电路的要求要宽松一些,仅需系统机壳内部电磁脉冲强度衰减至 5.44 V/m 以下即可,因而在系统的电磁屏蔽设计过程中将以模拟电路的要求为标准。即其正常运行时可承受的最大电磁脉冲电场强度为 1.43 V/m 。

3 可行性论证

如前文所述,“极限条件分析法”是为了缩短相关试验和研究工作的周期、提高效率而提出的最保守的参考值,因而计算得到的 $E_{\max}$ 要比设备实际能承受的电场强度要小得多,因此对于机壳或者屏蔽外壳的屏蔽效能要求就要苛刻得多。为了论证“极限条件分析法”在实际工作中的可行性,选取了几种典型高强度脉冲辐射场下的 NEMP 进行分析,分析的结果如表 1 所示,其中 $E_{\max}$ 取上述例子中的估算值 1.43 V/m ,即分析图 1 所示的电子学设备在各种高强度辐射场中正常工作所需要的屏蔽措施。

表 1

核装置及实验	NEMP 强度 $E_n/(\text{V/m})$	屏蔽效能需求 $20\lg(E_n/E_{\max})$	参考屏蔽设备材料及其性能
核爆炸	5×10^4	90.87 dB	传统机壳(屏蔽效能 20 dB 左右)+军用方舱(屏蔽效能 80 dB)双屏蔽
强光一号	10^3	56.89 dB	5 mm 厚硬铝屏蔽箱,屏蔽效能 60 dB
闪光二号	10^4	76.89 dB	传统机壳+5 mm 厚硬铝屏蔽箱双屏蔽

由表 1 可知,依据极限条件分析法提出的屏蔽措施要求在实际工作中并不是苛刻而无法满足的,因而该方法具有指导实践工作的可行性。

4 总结

通过上述的计算与分析,可知使用极限条件分析法可大大简化电子学设备电磁屏蔽设计的过程,并能克服基本参数不足的困难,且给出的参考数据为最保守的计算值,能准确可靠的保障设备的正常运行。在高强度脉冲辐射场诊断工作中,通过极限条件分析法得出的电磁屏蔽设计要求并不是难以实现的苛刻要求,因而在实际工作中从缩短理论论证周期和提高实践效率的角度而言,极限条件分析法具有非常好的实用性。

参考文献:

- [1] Ouyang Xiaoping. Detecting Technique of Pulsed Radiation[J]. Chinese Engineering, 2008, 10(4): 44-55.
- [2] Ouyang Xiaoping, et al. The System Design and Experiment Method of Detecting System in Pulsed Radiation Field diagnosing[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 2009.
- [3] Zhang Zhigang. The Research on Numerical Simulation of The Interference in Microstrip Line Caused by Electromagnetic Radiation[D]. The Doctoral Dissertation of Sichuan University, 2005.
- [4] Yuan Zhiyong, He Jinliang, Chen Shuiming. The EMC Analyzing for Edge Placement of PCB Difference Transmission Line[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2004, 19 (6): 691-693.
- [5] Liu Zheng. The Suppression of EMI about Electronic Technique[J]. Sci-Tech Information Development & Economy, 2008, 18(25): 221.
- [6] Xu Xuan, Xu Hongyong, Ouyang Junhui. The EMC Problem of PCB[J]. Application of Electronic Technique, 2001, 22(4): 147-149.
- [7] Tesche. F. M, M. V. Ianoz, T. Karlsson. EMC Analysis Methods and Computational Models[M]. Wiley, New York, 1997.
- [8] Qiao Dengjiang. The Introduction of Nuclear Explosion[M]. Physics. Beijing: National Defence Industry Press, 2003.
- [9] 程晓磊. 核爆炸脉冲射线束测量中的数字化传输技术[D]. 北京:清华大学工程物理系,2010.
- [10] 彭常贤,等. “闪光二号”电子束辐照平板靶产生热击波的实验研究[J]. 高压物理学报,1995,9(1):20-28.
- [11] 陶灵娇,等. 多用途军用方舱和轿式改装车的电磁脉冲加固设计[J]. 机械工程学报,2009,45(5):244-249.

The Extreme Condition Analyzing for NEMPI Shielding of Electronic System in High-intensity Pulsed Radiation Diagnosing

CHENG Xiao-lei¹, LIU Fang¹, OUYANG Xiao-ping²

(1. North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. Northwest institute of nuclear technology, Xi'an of Shanxi Prov. 710024, China)

Abstract: The difficulty for estimating the NEMPI (electromagnetic pulsed interference caused by the nuclear reaction) on the electronic system in high-intensity pulsed radiation diagnosing is analyzed in this article. To solve the difficulty, a method called 'Extreme Condition Analyzing' is presented for estimating the NEMPI conservatively and reliably. Through an extreme condition hypothesizing which could be described as 'Entire Coupling of Electric Field Energy', the $E_{\max}$ (maximum electric field intensity which could be endured by the electronic system in the high-intensity pulsed radiation) could be figured out without any other information of the EMP caused by the nuclear reaction. Then a feasibility inspection is introduced, to confirm that the EMPI shielding request according to $E_{\max}$ is not too extreme to be achieved.

Key words: Extreme condition analyzing; EMPI shielding; High-intensity pulsed radiation diagnosing; Entire coupling of electric field energy

YAP 伴随 α 粒子探测器的研制

李井怀¹, 吴军随², 梁庆雷¹, 刘国荣¹, 李安利¹

(1. 中国原子能科学研究院放射化学研究所, 北京 102413, 2. 西京学院, 陕西 西安 710123)

摘要:研制了一种可应用于 D-T 中子发生器的伴随 α 粒子探测器, 通过探测反应中与 14 MeV 中子同时产生、方向相反的 3.5 MeV 的 α 粒子, 可以监测中子产额, 还可以利用探测器的时间信号进行符合测量。探测器采用掺铈铝酸钇 (YAP:Ce 简称 YAP) 晶体做发光材料, 由蓝宝石 (Al_2O_3) 玻璃法兰密封于 D-T 中子发生器内, 用滨松 R1450 光电倍增管接收光信号, 产生电脉冲。探测器输出负信号的前沿下降时间约为 6 ns; 对 ^{241}Am 5.486 MeV α 粒子的能量分辨率约为 5.4%。在高压倍加器用作 D-T 中子源, (探测器计数率达到 $15\,000\text{ s}^{-1}$ 时, 对 3.5 MeV 伴随 α 粒子的能量分辨率约为 27%, 峰谷比达到 10:1。YAP 闪烁体及蓝宝石玻璃经 8 h 400 $^{\circ}\text{C}$ 烘烤后, 探测器的时间性能和能量分辨性能未发生改变。实验表明, 研制的探测器满足了密封 D-T 中子发生器的制造工艺要求, 性能可靠, 可安装于小型 D-T 中子发生器内用作伴随 α 粒子探测器。

关键词: YAP 闪烁体; 伴随 α 粒子; α 探测器; 密封 D-T 中子发生器

在 $\text{T(d, n)}^4\text{He}$ 核反应中, 14 MeV 中子产生的同时有 3.5 MeV 伴随 $\alpha(^4\text{He})$ 粒子向与中子相反的方向发射。所以人们经常测量伴随 α 粒子来监测 14 MeV 中子的注量率^[1]。由于伴随 α 粒子与中子同时产生, 可以由伴随 α 粒子来确定中子的产生时刻, 这在飞行时间谱测量中非常有用^[2]。符合测量还可以有效降低测量本底^[3]。

小型密封 D-T 中子发生器具有可关断性和移动性, 在实际应用中有很大的优势, 但是其制造工艺需要进行高温除气、使用中要维持高真空, 给加装伴随 α 粒子探测器增加了许多困难^[4]。二十年来, 用于小型密封 D-T 中子发生器内的伴随 α 粒子探测器经历了 ZnS(Ag) 、 ZnO(Ga) 和 YAP(Ce) 闪烁体等发展阶段。国内能够制造小型中子发生器, 也有人曾尝试过研制带有伴随 α 粒子探测器的中子发生器, 但未形成实用的、成熟的产品。

本工作成功地研制了适用的伴随 α 粒子探测器, 并已通过实验检验。

1 YAP 闪烁体性质简介

YAP 是 $\text{YAlO}_3\text{:Ce}$ (掺铈铝酸钇) 的简称, 是一种新型的人造生长的无机单晶材料^[5], 具有非常优良的热力学和化学性能, 密度为 5.4 g/cm^3 , 熔点为 $1\,875\text{ }^{\circ}\text{C}$, 发光效率约为 NaI(Tl) 闪烁体的 40% ($18\,000\text{ 光子/MeV}$), 闪烁光谱的波长峰值约为 370 nm, 易与现有的光电倍增管匹配, 光衰减时间约为 25 ns, 且不潮解、不解理、易加工、抗辐照。是一种理想的用作伴随 α 粒子探测器发光晶体的材料。

2 伴随 α 粒子探测器的结构

YAP 伴随 α 粒子探测器主要由 YAP 闪烁体、蓝宝石光学玻璃法兰、光电倍增管及外壳等组成。

通常闪烁体 α 探测器主要由闪烁体和光电倍增管组成。由于要将耐高温 YAP 闪烁体装入密封 D-T 中子发生器内, 这样需在闪烁体和光电倍增管二者之间加一耐高温的光导部件。此光导部件既要能把闪烁体产生的光传输到光电倍增管光阴极, 又要能起到真空密封作用, 实质是一个耐高温的光学法兰。

选用厚度 1.5 mm、直径 40 mm 的蓝宝石玻璃作为耐高温光学法兰, 其为单晶体 (分子式为

作者简介: 李井怀 (1972—), 男, 北京人, 高级实验师, 现主要从事核保障技术工作