

DOI:10.19431/j.cnki.1673-0062.2019.05.006

基于倾角传感器的 MC 法优化设计⁶⁰Co 辐射屏蔽装置

卜玉峰^{1,2}, 邹树梁^{2*}, 马辉强³

(1. 南华大学 机械工程学院, 湖南 衡阳 421001; 2. 南华大学 核设施应急安全作业技术与装备
湖南省重点实验室, 湖南 衡阳 421001; 3. 南华大学 核科学技术学院, 湖南 衡阳 421001)

摘要:实验室自主研发“葫芦娃”机器人在完成自动换装过程中需要倾角传感器对机械臂转动角度进行实时反馈。针对电子元器件耐辐照能力较弱的情况, 本文为倾角传感器设计辐射屏蔽装置, 利用 MCNP 程序建立屏蔽装置模型, 通过对 5 个面的辐射通量分析, 通过优化各面铅的厚度, 减小整个屏蔽体的重量, 研究开散热孔对屏蔽体整体性能的影响以及辐射衰减与距离之间的关系, 初步验证了本文设计的辐射屏蔽装置作为高辐射场下屏蔽 γ 射线的模型所具有的合理性。

关键词:倾角传感器; MC 模拟; 辐射屏蔽; 优化设计

中图分类号: TL75 **文献标志码:** B **文章编号:** 1673-0062(2019)05-0036-05

Optimal Design of ⁶⁰Co Radiation Shielding Device Based on MC Method of Inclination Sensor

BU Yufeng^{1,2}, ZOU Shuliang^{2*}, MA Huiqiang³

(1. School of Mechanical Engineering, Hengyang, Hunan 421001, China; 2. Hunan Key Laboratory of Nuclear Facilities Emergency Safety Technology and Equipment, Hengyang, Hunan 421001, China;
3. School of Nuclear Science and Technology, Hengyang, Hunan 421001, China)

Abstract: The independent research and development of the "cucurbit" robot in the laboratory requires the tilt sensor to provide real-time feedback on the angle of rotation of the arm during the automatic dressing process. In view of the weak radiation resistance of electronic components, this paper designs a radiation shielding device for the inclination sensor, and uses the MCNP program to establish the shielding device model. Analyzing the radiant flux of the five surfaces, the thickness of lead on each surface is optimized. The weight of the entire shield is studied, and the effect of the opening holes on the overall per-

收稿日期: 2018-05-24

基金项目: 湖南省军民融合产业发展专项资金项目(2017JMH01)

作者简介: 卜玉峰(1994-), 男, 硕士研究生, 主要从事机器人电子元器件耐辐照能力及辐射屏蔽加固方面的研究。

E-mail: buyf1994@163.com。* 通信作者: 邹树梁(1956-), 男, 教授, 博士, 主要从事辐射安全方面的研究。

E-mail: zousl2013@126.com

formance of the shield and the relationship between the radiation attenuation and the distance are investigated. The radiation shielding device designed in this paper is proved to be reasonable as a model for shielding γ -rays under high radiation field.

key words: inclination sensor; MC simulation; radiation shielding; optimized design

0 引言

伴随着核电能源应用的推广,放射性所带来的对环境和生物的潜在损伤也逐渐被人们所了解与重视^[1]。随着切尔诺贝利核电站、福岛核电站、三哩核电站等历史上重大核事故的发生,核应急抢先作业机器人的发展迫在眉睫,对于核环境作业内容和机器人系统负载损伤机理及辐射屏蔽加固的研究也逐步被人们认识并开始进行深入研究^[2]。

结合应用需要,核环境机器人逐渐从单一机器人、单一功能、简单控制向多机器人协同、复合功能、智能控制方向发展^[3]。未来的核环境作业机器人对性能、速度、精度、可靠性等参数方面有更高要求。瑞典的BROKK通过人员操控进行完成半自动换装,但是仍然存在距离、监测、反馈等问题^[4]。目前,实验室在自主研发核环境应急抢险作业第二代“葫芦娃机器人”将增加自主换装功能。在自动换装过程中,将出现液压缸的复合运动。因此,迫切需要选择耐辐照性能更好的倾角传感器对机器人动臂、斗杆的角度变化进行实时反馈。出于经济效益的考虑,选择适当传感器之后,将通过直接加固方式^[5]减小单位时间内传感器所承受的辐射剂量,从而提高核环境内作业设备的耐辐射性能。

本文以倾角传感器作为研究对象,在以高辐射剂量为工作环境下,设计一款能够满足其性能要求的辐射屏蔽装置为主要目的。通过MCNP程序仿真计算出不同铅厚度下辐射通量,得出其与屏蔽装置尺寸、散热孔大小、工作范围之间的关系。

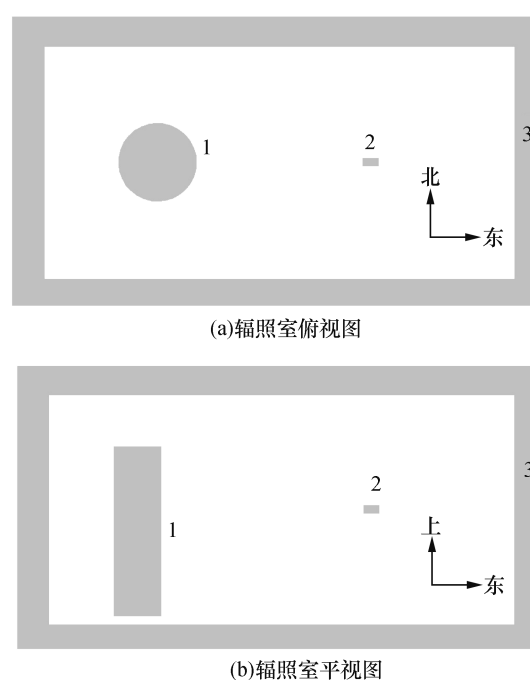
1 实验条件

本次仿真实验模拟的辐照室如图1所示,其为一个长方体的空间区域,东西距离为15 m,南北距离为6.8 m,辐照室高3.6 m;辐照室每一面墙体均是以2 m厚度的混凝土作为屏蔽层与外界隔。

1.1 放射源

本次实验按照中国原子能科学研究院实际环

境进行仿真,采用柱状⁶⁰Co γ 射线放射源,柱状放射源高度设置为180 cm,直径15 cm。设以辐照室地面中心为坐标原点,向东为 x 轴正向,向北为 y 轴正向,向上分布为 z 轴;放射源平均活度为90 kCi,辐射场不均匀度小于10%,环境温度约为19℃,模拟真实大气环境。



1—柱源;2—屏蔽体;3—混凝土墙

图1 辐照室整体模型图

Fig. 1 Scheme of entire irradiation chamber

1.2 传感器源

本次仿真实验选用HCA726S倾角传感器,其尺寸为56 mm×46 mm×20.5 mm,采用垂直安装方式,测量 α 轴转角变化。根据实验研究证明,倾角传感器存在总剂量阈值^[6];在辐照环境下,倾角传感器测量数据精准性、响应时间及稳定性等参数都将受到影响,从而影响换装的精准性;当传感器达到辐射阈值时功能将完全失效,影响整个电子系统的运行。通过设计屏蔽体,降低单位时间的吸收剂量以延长工作时间。

1.3 屏蔽装置

图2是忽略右端(连接线出口,约10 mm)开

口的辐射屏蔽体简要模型。

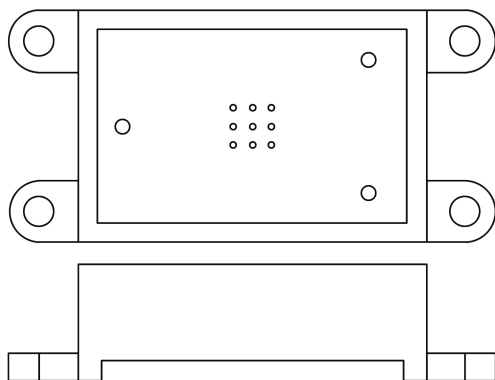


图2 屏蔽体简要模型图

Fig.2 Schematic diagram of the shield

仿真实验中将屏蔽装置原始尺寸设置为 $60\text{ mm} \times 50\text{ mm} \times 24.5\text{ mm}$, 当铅的厚度较薄时采用钢板夹铅板设计, 当铅板厚度大于 10 mm 时采用浇铸的方法制造; 仿真时采用外延法保持内部空间不变化, 其体积为 V_1 。屏蔽体整体设计:

1) 增加铅厚度以后的屏蔽体整体体积为 V_2 , 则屏蔽体的重量为(忽略钢板及地面重量):

$$V_2 = (60 + \Delta x) \cdot (50 + 2\Delta y) \cdot (24.5 + 2\Delta z)$$

$$m = (V_2 - V_1) \cdot \rho$$

2) 根据“质量-体积-屏蔽通量-经济效益”进行多目标优化;

3) 在底面以中心为阵列中心进行矩形方式阵列 9 个 2 mm 散热孔;

4) 根据对称原理, 左右两侧、上下两侧屏蔽增加厚度分别相同。

2 屏蔽体建模与仿真

2.1 MCNP 模型建立

如图3所示, 在 MCNP 中建立屏蔽体模型。

屏蔽装置夹层为重核材料铅层。在建立仿真模型时, 按照如图3所示对屏蔽装置内外共 12 各面进行标记, 通过对 MCNP5 对各个表面的辐射通量进行仿真计算, 对比数据进行屏蔽效果分析:

1) 对比 2 号面、8 号面, 获知正面增加铅的厚度对屏蔽效果的影响;

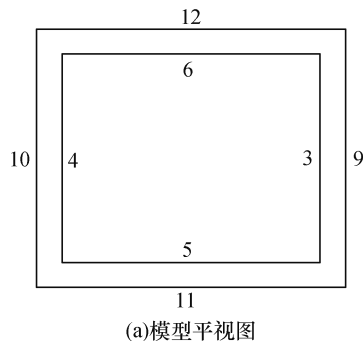
2) 对比 4 号面、10 号面, 获知左右两面铅的厚度对屏蔽效果的影响;

3) 对比 6 号面、12 号面, 获知上面铅的厚度对屏蔽效果的影响;

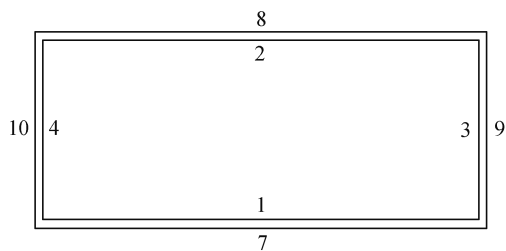
4) 对比封闭与开孔后的 1 号面、7 号面, 获得

开散热孔对屏蔽体整体屏蔽效果的影响;

5) 改变屏蔽装置到放射源的距离, 从 25 cm 开始, 每次增加 25 cm , 获得通量因距离改变的变化规律, 从而获得辐射衰减与工作距离改变之间的规律, 7 号面为安装面, 不考虑增加铅板厚度。



(a)模型平视图



(b)模型俯视图

图3 屏蔽体模型示意图

Fig.3 Shield model diagram

2.2 仿真结果与讨论

2.2.1 不同铅的厚度的屏蔽效果

通过增加、铅的厚度, 测量各面的通量, 对比分析其屏蔽效果, 经仿真软件计算得 8 号面、10 号面、12 号面的初始通量分别为 $1.674\ 51 \times 10^{10}$ 、 $1.284\ 76 \times 10^{10}$ 、 $1.623\ 24 \times 10^{10}\text{ Bq/cm}^2$ 。

表1 三面通量对比表格

Table 1 Three-sided flux comparison

厚度 δ/mm	(Bq · cm ⁻²)		
	2 号面	4 号面	6 号面
1	1.64×10^{10}	1.06×10^{10}	1.41×10^{10}
3	1.54×10^{10}	9.52×10^9	1.22×10^{10}
5	1.42×10^{10}	8.69×10^9	1.07×10^{10}
10	1.11×10^{10}	6.54×10^9	7.74×10^9
20	6.45×10^9	3.72×10^9	4.07×10^9
40	1.92×10^9	1.27×10^9	1.16×10^9
50	1.06×10^9	6.02×10^8	6.11×10^8

通过增加铅厚度,各面的屏蔽效果图如图4、图5、图6所示。

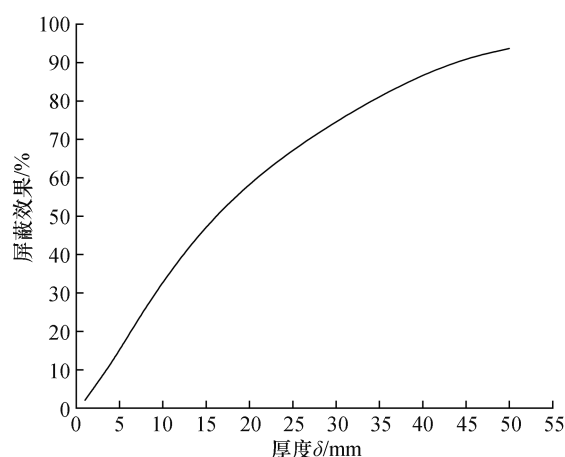


图4 正面屏蔽效果图

Fig.4 Front shield effect diagram

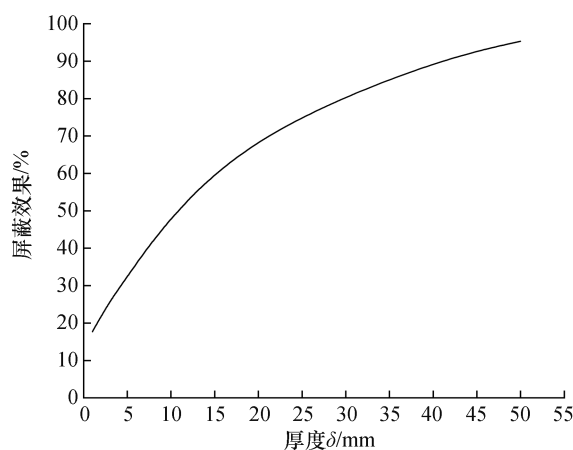


图5 侧面屏蔽效果图

Fig.5 Side shield effect diagram

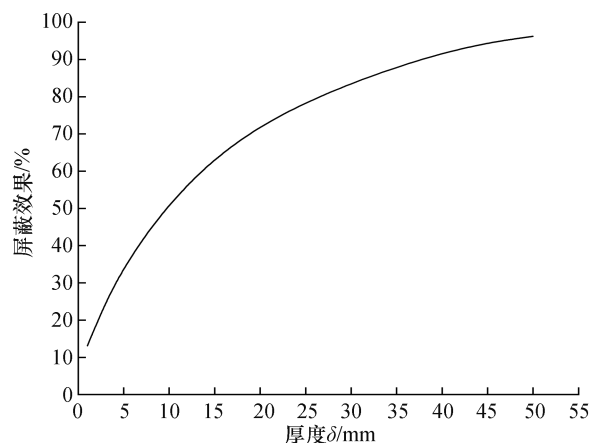


图6 上下面屏蔽效果图

Fig.6 Upper and lower shield renderings

由表1、图4可知,正对放射源的平面铅的厚度达到20 mm时,大约可以屏蔽61.50%的流量,仿真误差0.469%,可以延长传感器2.5倍工作时长;铅的厚度达到50 mm时,基本可以屏蔽掉绝大部分流量,可以延长近15倍工作时长,确保机器人不因传感器失效导致丧失工作能力的情况发生。

对比侧面和正面的初始流量可以得到,侧面受到的辐射影响小于正面。侧面的初始流量也只有正面的76.7%,由表1知,当铅的厚度达到1 mm的时候,侧面的流量已经变成正面流量的64.6%;当流量同时只剩下 6.50×10^9 Bq/cm²的时候,侧面的铅的厚度只需要正面铅厚度的一半左右,在设计屏蔽体的时候,为达到质量、体积优化设计,可以根据实际工作环境,设计正面及左右两侧面铅的厚度。

正面和上下两面的初始流量相同,但是对比图4、图6,可以得知,上下面随着铅的厚度增加,流量屏蔽效果较正面要大很多;经仿真计算获得上下面流量达到 6.50×10^9 左右时的铅厚度为15 mm。对屏蔽体进行整体结构设计时,为达到质量、体积优化设计,可以根据实际工作环境,分别设计屏蔽体整体的铅的厚度。

依据表1及后期数据,利用二分法进行仿真,计算延长传感器10倍、100倍工作时长时各面的铅的厚度,计算屏蔽体的总体质量。在仿真过程中,3个面之间铅的厚度对屏蔽效果的影响存在相互作用,确定2面厚度之后采用控制变量法确定第3面尺寸。各面流量达到 $1.674\ 51 \times 10^9$ 、 $1.674\ 51 \times 10^8$ Bq/cm²左右时的铅的厚度如表2所示。

表2 各面铅厚度

Table 2 Lead thickness of each side mm			
倍数	正面	侧面	上下面
10	45	27	30
100	82	62	72

根据表2可以计算各自对应的屏蔽体质量分别为10.57 kg、47.23 kg。

2.2.2 散热孔对屏蔽效果影响分析

预选倾角传感器的工作温度为零下40℃到75℃,考虑到封闭式屏蔽装置对传感器散热的影响,防止传感器受温度变化影响,使得静态工作点发生变化,并被逐级放大和传输,导致电路输出端电压偏离原固定值而上下漂动^[7];从而影响测量

精度,使得自动换装动作无法完成;在传感器耐辐照性能测试实验中,温度变化引起的零漂可能导致误判传感器工作性能减低或者干扰测量传感器的极限累积剂量。为考虑屏蔽体整体抗辐射能力以及质量-体积-经济效益多约束优化,决定在安装底部开散热孔,以底部中心为阵列中心,采用矩形阵列方式阵列 9 个 2 mm 的孔,对比开孔前后 7 号面的通量,从而获知散热孔对整体屏蔽效果的影响。

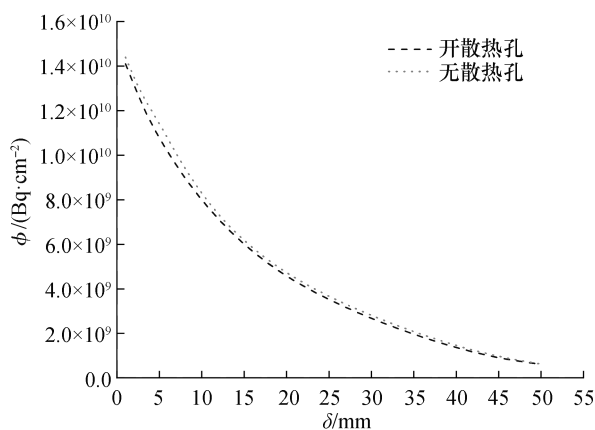


图 7 散热孔屏蔽通量对比图

Fig. 7 Shield hole flux comparison chart

如图 7 所示,开散热孔对屏蔽装置的屏蔽效果的影响几乎可以忽略,阵列方式简单、易于加工安装。

2.3 γ 射线辐射场通量-距离规律研究

在应急抢险工作环境中,与放射源的直线距离不同,从而受到的辐射剂量也不相同。赵瑞^[8]等人对在一定距离内,X 射线辐射场强度能够很好地满足距离的平方反比规律;本文研究 γ 射线辐射场通量与距离之间的规律,从而对在不同工作范围内的屏蔽装置进行整体优化设计,在满足辐射屏蔽状况下优化屏蔽体的尺寸。

由图 8 可知,通量衰减与距离之间存在着一一定关系,根据拟合曲线方程式,可以获知在不同工作范围内的辐射通量,从而对传感器所用辐射屏蔽体进行优化设计。

3 结 论

本论文设计的辐射屏蔽装置结构简单、易于安装,可以根据实际工作环境进行整体设计,同时也可以为相类似几何尺寸物体设计屏蔽装置作参考,为第三代“葫芦娃”机器人驾驶舱设计提供理

论基础。

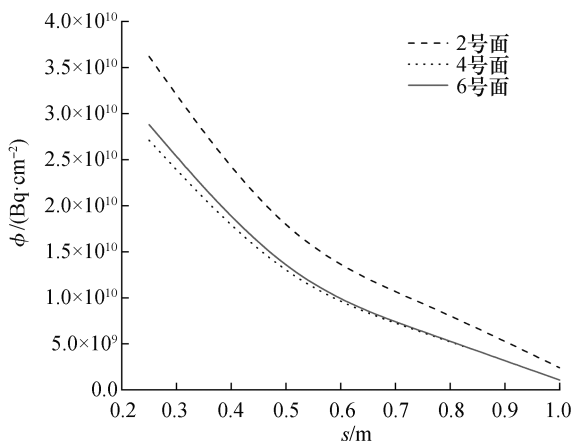


图 8 通量-距离关系图

Fig. 8 Flux-distance relationship diagram

1)屏蔽体中受辐照剂量最大为正面,左右两侧最小,初始通量相差 38.3% ;

2)通量同样达到 $6.447\ 56 \times 10^9$ Bq/cm² 左右,正面铅的厚度为 2 cm,左右铅的厚度为 1 cm,上下铅的厚度为 1.5 cm,此时延长增加传感 2.5 倍工作时长;

3)开散热孔可以较好改善零漂现象,且对屏蔽体整体屏蔽效果无较大影响;

4)经过仿真数据拟合曲线,放射源通量与距离之间存在一定规律,可满足二次多项式拟合。

参考文献:

- [1] 张韬懿. 核环境探测及作业机器人关键技术研究[D]. 北京:北京航空航天大学,2014 :2-3.
- [2] 刘永霞,邹树梁. 核辐射环境作业挖掘机的研制[J]. 机械设计与制造,2016(3):265-268.
- [3] 杜树标,蒋韦韦,丁洋. 核环境机器人现状及关键技术分析[J]. 兵器装备工程学报,2016,37(5):93-97.
- [4] 徐振. 多功能 Brokk 机器人工具头通用接口的结构设计及其可靠性分析[D]. 衡阳:南华大学,2017:3-4.
- [5] 张正选,邹世昌. SOI 材料和器件抗辐射加固技术[J]. 科学通报,2017,62(10):1004-1017.
- [6] 孟萃,陈向跃,聂鑫,等. 电磁脉冲传感器 γ 射线干扰阈值实验研究[J]. 核电子学与探测技术,2007,27(3):466-469.
- [7] 周庆飞,徐明龙. 具有温度自补偿功能的高分辨力倾角传感器的设计[J]. 传感器与微系统,2012,31(1):107-110.
- [8] 赵瑞,吴金杰,余继利,等. X 射线辐射场平方反比规律的研究[J]. 核科学与工程,2017,37(3):482-486.

(责任编辑:周泉)