

核工业机器人关节电机设计及试验验证分析

任宏喜^{1*}, 寸有超¹, 宋定安¹, 罗蓉蓉²

(1. 贵州航天控制技术有限公司, 贵州 贵阳 550009;

2. 核工业西南物理研究院, 四川 成都 610041)

Design and Experimental Verification Analysis of Joint Motors for Nuclear Industry Robots

REN Hongxi^{1*}, CUN Youchao¹, SONG Ding'an¹, LUO Rongrong²

(1. Guizhou Aerospace Control Technology Co., Ltd., Guiyang 550009, China;

2. Southwestern Institute of Physics, Chengdu 610041, China)

Abstract: [Objective] To enhance the performance stability of robot joint motors in high-radiation environments, a design and prototype development are carried out for radiation-resistant robot joint motors to meet the long-term operation and maintenance requirements of nuclear industrial robots in high-radiation conditions. [Methods] Firstly, according to the basic performance parameters required for the joint motor, simulation was carried out by finite element method to get the ideal design value. Then, the main components of the joint motor were analyzed, and it was determined that the metal materials were less affected by nuclear radiation, while non-metallic materials were the weak links. Through radiation experimental verification of paint-coated wire, heat-shrinkable tube, adhesive material, lubricating grease, outgoing line, etc., the radiation-resistant performance limits of the materials used in the motor were analyzed. Finally, the appropriate materials were selected for the physical verification of the robot joint motor, so that the joint motor could withstand the γ -ray radiation level of 5 MGy. [Results] Through the designed and analysed of the joint motor, the rated torque of the motor was more than $1.5 \text{ N}\cdot\text{m}$, and the rated speed of 240 r/min met the use requirements. The joint motor remained in a controlled state after 5 MGy γ -ray radiation, with a significant decrease in internal resistance, a decrease in rotational speed, an increase in

current, and a decrease in the overall performance of the motor of about 15%. [Conclusion] Through the design and prototype test verification of the joint motor, it can ensure that the nuclear industrial robot can perform long-term operation and maintenance in a high-radiation environment, and the test magnitude reaches 5 MGy, which fully meets the current application requirements of radiation environment robots. With the increase of radiation level, the performance of the motor shows a decreasing trend, but it is still in a controlled state. This study provides certain reference and support for the development of motors in the nuclear field.

Key words: robot; joint motor; experimental verification; 5 MGy γ -ray

摘 要: 【目的】为了提高机器人关节电机在高核辐射环境中的性能稳定性,对耐核辐射机器人关节电机进行设计和样机研制,以满足核工业机器人在高辐射环境下长期运维作业。【方法】首先,根据关节电机所需的基本性能参数,通过有限元方法进行仿真,得到设计理想值;然后,分析关节电机的主要组成部分,确定金属材料受核辐射影响较小,而非金属材料是薄弱环节,通过对漆包线、热缩管、胶粘材料、润滑脂和引出线等进行辐射试验验证,分析电机所用材料的耐辐射性能极限;最后,选取适当材料进行机器人关节电机实物验证,使得关节电机能够耐受 5 MGy 辐射量级的 γ 射线。【结果】通过对关节电机的设计和分析,其额定力矩大于 $1.5 \text{ N}\cdot\text{m}$,额定转速为 240 r/min 时满足使用要求;关节电机经过 5 MGy γ 射线辐射后,依然保持受控状态,内阻明显下降,转速降低,电流增加,电机整机性能下降约为 15%。【结论】通过对关节电机的设计和样机测试验证,可以保证核工业机器人在高辐射环境中进行长期运维作业,试验量级达到 5 MGy,完全满足当前核辐射环境机器人的应用需求。随

基金项目: 贵州省科技计划项目黔科合平台人才 (CXTD [2023]002); 贵州省科技计划项目黔科合平台 (KXJZ [2024] 018)

Guizhou Science and Technology Plan Project Qiankehe Platform Talent (CXTD [2023] 002); Guizhou Science and Technology Plan Project Qiankehe Platform (KXJZ [2024] 018)

着辐射量级的提升,电机性能虽然呈现下降趋势,但是依然处于受控状态。本研究为核领域电机的研制提供了一定的参考和支撑。

关键词: 机器人;关节电机;试验验证;5 MGy γ 射线

0 引言

核能以其高效清洁等特点逐渐为各国所采用,其对缓解供电紧张、保护环境都有重要贡献。我国核能源的利用发展经历了“起步”、“适度发展”阶段,战略上已向“积极发展”转变。由于核能源设备的高放射性,人员无法进入现场实现设备维护和检修。因此,采用机器人代替人进入核能发生装置开展现场探测、载重作业以及运维的任务具有重要意义,机器人控制主要采用远程遥控操作方式^[1-9]。然而,核设施维护及核事故中产生的高能射线和高温高压高湿及腐蚀环境会造成机械构件、电子器件、密封和润滑失效,从而导致救灾机器人系统性能急速退化和破坏。因此,载重作业、运行维护及救灾抢险等机器人的抗辐射防护设计是亟待解决的难题^[10-11]。

核领域相关团队及学者对核工业机器人及其相关部组件进行了深入研究。文献[12]对特种机器人关节模组设计及辐射防护进行了研究,设计的关节模组在经过 600 Gy 的 γ 射线辐射后可以正常工作。文献[13]设计了一款适用于核设施退役场所的智能辐射探测与去污机器人。文献[14]对核环境作业机器人的研究现状及关键技术进行了总结,对机器人结构和功能进行了分类。文献[15]分别从物理屏蔽、器件选型等各方面对核工业机器人系统的辐射加固技术进行了介绍。文献[16]对遥控机器人的设计和测试开展了研究和分析论证,机器人可承受的辐射量级达 3 000 Gy。虽然对核领域的探索在逐步加强,但是由于机器人设计、材料限制等,对于 γ 射线的辐射探索基本停留在 1 MGy 以内,未进行过高量级 γ 射线的耐辐射试验。

关节电机是主要研究对象^[17-23]。为探究高量级 γ 射线对机器人的影响,本文设计了一种耐辐射电动关节,其主要由直流无刷力矩电机、谐波减速器以及旋转变压器等部件构成。电动关节连接回转臂 1 和回转臂 2,并通过直流无刷力矩电机+减速器的驱动方式带动回转臂 2 以

及末端机构共同完成回转动作,其三维模型如图 1 所示。

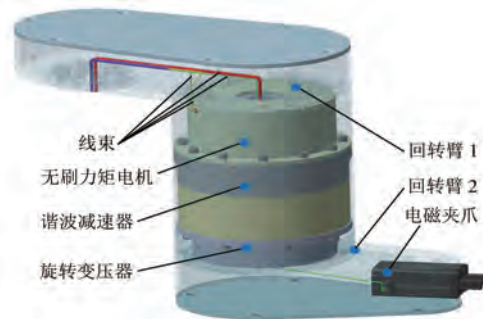


图 1 电动关节三维模型

Fig. 1 Three dimensional model of electric joint

采用直流无刷力矩电机作为电动关节驱动器件,采用减速比为 100:1 的谐波减速器进行电机减速和扭矩放大。无刷力矩电机的额定输出扭矩不低于 1.5 N·m,经谐波减速器放大扭矩输出后驱动回转臂 2 进行转动,放大后关节扭矩输出大于 150 N·m,能够满足技术要求。

根据常规的机械臂关节运动速度 3°/s 进行反算,要求执行电机的额定转速不得低于 50 r/min。

1 无刷直流电机的数学模型

电动关节主要由电机本体和检测位置的旋转变压器组成,两种组件所应用的材料基本一致^[24-25]。电机并非全部由耐辐射的金属组成,还含有大量的有机组成部分,比如漆包线以及漆包线外的绝缘漆、绝缘纸、润滑脂、引出线和热缩管等^[26-28]。这些有机部件对于辐射非常敏感,并且在恶劣环境下可能加速对电机的伤害。高能射线辐射会导致聚合物分子产生自由基,进一步引发降解或交联,从而导致有机部件丧失机械性能。有机部件机械性能的改变会导致电机出现故障,最终导致核机器人失去行动能力^[29-31]。

为了简化模型,本文作出如下假设:(1)定子绕组的电阻和互感均相等;(2)忽略电枢反应和铁心饱和;(3)各定子绕组空间对称。简化后无刷直流电机等效电路如图 2 所示。

根据图 2 可得三相定子绕组的端电压方程^[32]:

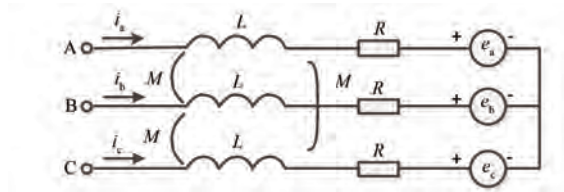


图 2 无刷直流电机等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit of brushless direct current motor

$$\begin{aligned} u_a &= Ri_a + (L - M) \frac{di_a}{dt} + e_a \\ u_b &= Ri_b + (L - M) \frac{di_b}{dt} + e_b \\ u_c &= Ri_c + (L - M) \frac{di_c}{dt} + e_c \end{aligned} \quad (1)$$

式中: $u_a, u_b, u_c, i_a, i_b, i_c$ 和 e_a, e_b, e_c 分别为三相定子绕组的端电压、电流和反电动势; R, L 分别为三相定子绕组的电阻、自感; M 为绕组间的互感。

电磁转矩 T_e 可表示为^[32]

$$T_e = \frac{1}{\omega_m} (e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c) \quad (2)$$

式中: ω_m 为电机的机械角速度。

电机运动方程为^[32]

$$T_e - T_L = J \frac{d\omega_m}{dt} + B\omega_m \quad (3)$$

式中: T_L 为负载转矩; J 为转子转动惯量; B 为阻尼系数。

2 关节电机设计及有限元分析

本文所研究的电机的基本设计参数如表 1 所示。

表 1 电机基本设计参数

Tab. 1 Basic design parameters of motor

参数名称	参数值	参数名称	参数值
额定电压/V	48	额定电流/A	2
连续堵转扭矩/(N·m)	2.3	连续堵转电流/A	5
额定扭矩/(N·m)	1.5	极对数 n_p	11
额定转速/(r·min ⁻¹)	240	空载转速/(r·min ⁻¹)	685

为便于电动关节的结构集成及电缆敷设,执行电机采取无框空心轴输出设计。关节电机本体结构总重量为 1 060 g,电机外形结构设计如图 3 所示。

根据表 1 设计参数,在 Ansoft 的 RMxpert 及

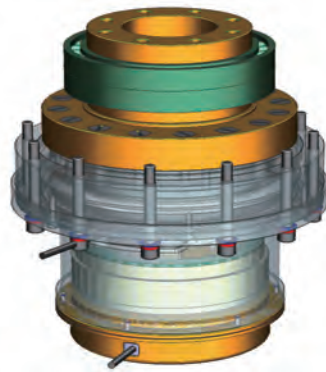


图 3 机器人关节电机结构外形

Fig. 3 Robot joint motor structure appearance

Maxwell 模块中进行仿真分析,得到电机磁密云图如图 4 所示。

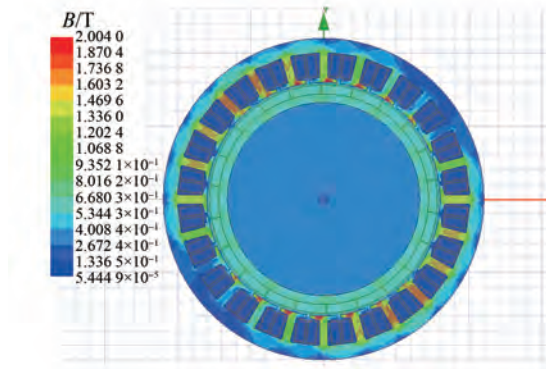


图 4 电机磁密云图

Fig. 4 Motor flux density cloud map

由图 4 可知,电机的磁密分布合理,在较高转速下,现有磁密设计可以有效控制损耗,提高电机可靠性,材料性能得到充分应用。

根据电机设计的空载转速 685 r/min 以及连续堵转扭矩 2.3 N·m,经 Ansoft 的 RMxpert 模块仿真分析,得到电机扭矩与转速关系设计曲线如图 5 所示。

由图 5 可知,电机在 1.538 1 N·m 的扭矩下转速为 262.88 r/min,在 1.504 4 N·m 的扭矩下转

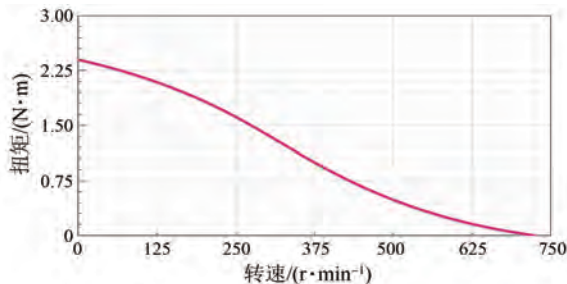


图 5 电机扭矩与转速关系设计曲线

Fig. 5 Design curve of motor torque versus speed

速为273.696 r/min。在额定负载下,电机二维瞬态仿真曲线如图 6 所示。

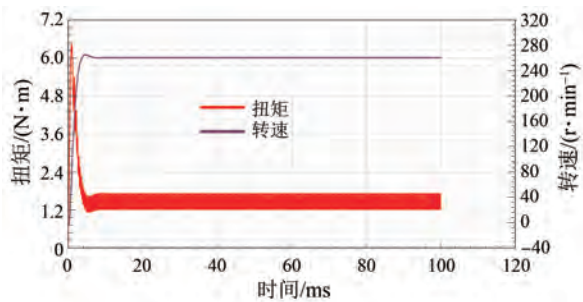


图 6 额定负载下电机速度与扭矩仿真图
Fig. 6 Simulation diagram of motor speed and torque at rated load

由图 6 可知,电机在 1.5 N·m 额定负载下的转速为260.7 r/min,电机实际转速=仿真转速×转速修正系数(本文取 0.92)=260.7×0.92=239.8 r/min。在额定负载下,电机输出额定扭矩时,相电流仿真分析结果如图 7 所示。由图 7 可知,电机实际电流比仿真电流大 0.25 A 左右。因此,当电机输出扭矩为 1.5 N·m 时,实际转速为 240 r/min,电流为 1.9 A。

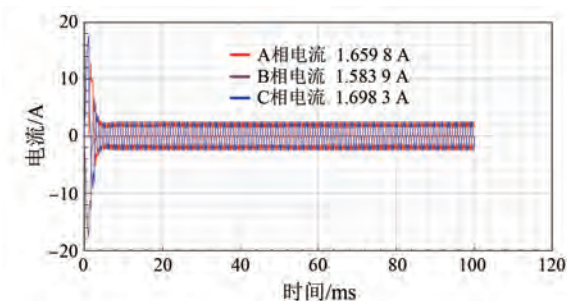


图 7 额定负载下电机相电流仿真图
Fig. 7 Simulation diagram of motor phase current at rated load

对电机工作温升情况进行仿真分析。设定额定工作电压,扭矩 1.5 N·m,转速 240 r/min。在自然冷却条件下,环境温度为 20 ℃,利用 MotorCAD 进行仿真分析,工作 50 min 后,电机温度分布如图 8 所示。由于绕组端部最高温度为 58 ℃,在此温度下,电机的焊点、导线等均可正常工作。

3 电机非金属材料耐 γ 射线辐射性能分析及验证

核工业级设备的耐辐射性能主要是针对有机

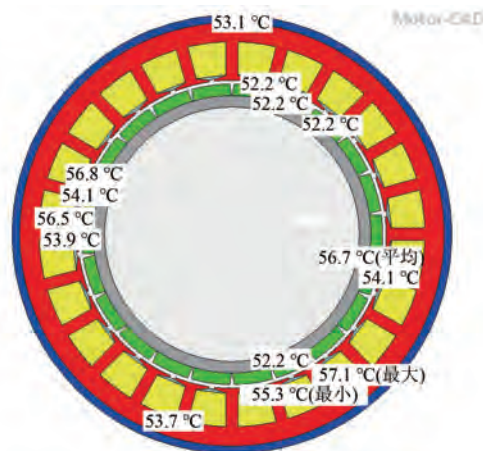


图 8 电机温度分布图

Fig. 8 Motor temperature distribution diagram

材料而言的。根据无刷电机所处的环境,经过分析及论证,对结构设计材料做详细约束。电机的结构除金属材料外,漆包线、热缩管、引出线和粘接胶是较薄弱环节,通过对材料的选取及试验验证,以达到耐更高辐射的目的。

试验中材料辐射剂量率为 30 000 Gy/h,按总剂量要求分别辐射相应时间,试验以累计辐射总剂量 5 MGy 为时间终止点。非金属材料制作多个相同的试件,达到不同的辐射时间后取出进行测试。

通过测试,得到材料在不同辐射量级下的变化曲线,分析电机薄弱环节的材料属性,具体材料测试结果如图 9~图 13 所示。

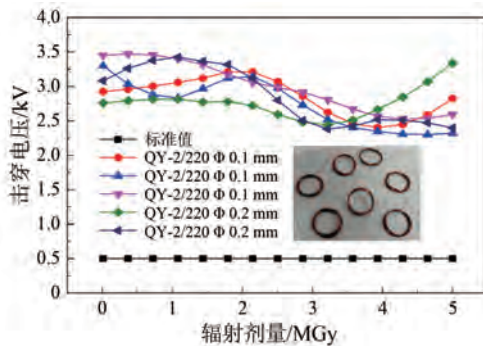


图 9 漆包线(聚酰亚胺)击穿电压测试结果
Fig. 9 Breakdown voltage test results of enameled wire (polyimide)

由图 9 可知,经过 5 MGy 的 γ 射线辐射试验,QY-2/220 型的电磁线性能保持得更好,辐射下的击穿电压没有任何规律性的变化趋势,击穿电压是标准值的 4 倍以上,但是未对电磁线的组织变

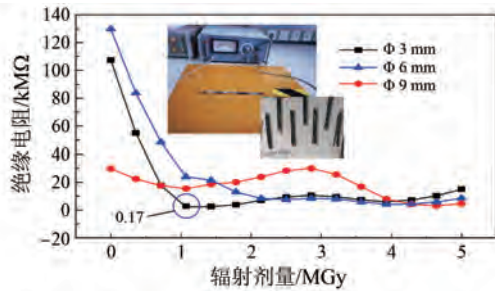


图 10 热缩管(交联聚烯烃)绝缘电阻测试结果

Fig. 10 Insulation resistance test results of heat shrink tubing (cross-linked polyolefin)

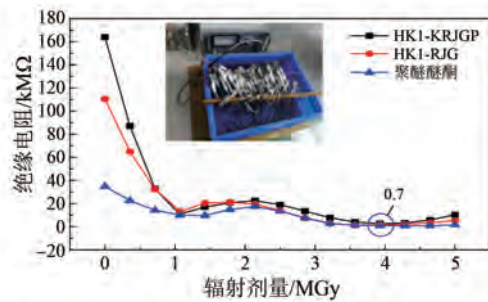


图 11 线缆(聚醚醚铜)绝缘电阻测试结果

Fig. 11 Insulation resistance test results of cable (polyether ether copper)

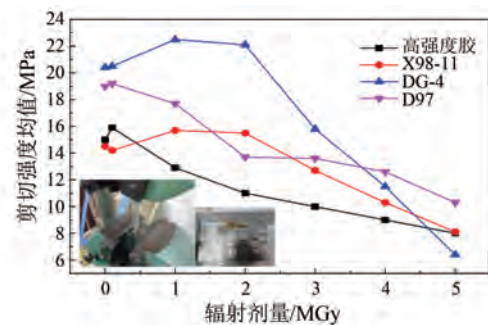


图 12 粘接胶(环氧树脂)剪切强度测试结果

Fig. 12 Shear strength test results of adhesive (epoxy resin)

化做任何测试。由图 10 可知,热缩管 $\Phi 3$ mm 最低阻值量级为 170 M Ω ,经过 1 MGy 辐射后,阻值变化趋势不明显,材料在 500 V 的电压下 1 min 内均未发生击穿的现象。由图 11 可知,聚醚醚铜线缆在经过 5 MGy 辐射后,绝缘性有下降趋势,耐压性能正常,能够满足使用要求。通过对辐射后的 D97、X98-11、DG-4 和高强度胶进行粘接样件的剪切强度测试,发现 4 种胶的性能基本差别不大,高强度胶、D97 胶的性能相对更好一些,在经过 5 MGy 辐射后的强度大概是无辐射的 50%。

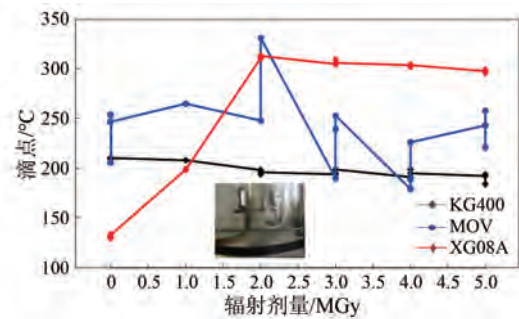


图 13 润滑脂滴点测试结果

Fig. 13 Lubricating grease drop point test results

后续在机械臂中受力零部件处可以使用高强度胶或 D97 胶,接插件绝缘密封等处 4 种胶基本都可以使用。

4 电动关节实物样机测试验证

根据电动关节所应用的环境,经过分析及论证,对结构设计材料做详细约束,以达到耐辐射的目的,实物样机如图 14 所示。电动关节所用电机,其绝缘结构电磁线选用聚酰亚胺漆包圆铜线,槽绝缘和相间绝缘选用聚四氟乙烯材料,引接线选用耐辐射特种专用电缆(聚醚醚铜绝缘线缆),端部绑扎采用无碱带,浸渍漆选用醇酸磁漆 C30-11,磁钢粘接选用高强度胶,且粘接过程避免胶的过量使用。轴承、电工钢和磁钢仍选择衫钻 XG28/20 稀土永磁材料,轴承两端的润滑采用 KG400 润滑脂。具体材料明细如表 2 所示。



图 14 实物样机

Fig. 14 Physical prototype

电机辐射时间如表 3 所示。通过测试,电机经过 5 MGy 的 γ 源辐射前后的空载性能变化如图 15 所示。

在每个辐射试验节点后,降源取出机械臂整机,并将整机与外部驱控设备连接通电,进行关节功能验证,包括电动关节性能测试、复位测试以及

回转臂耦合测试。结果表明每一次测试所有功能均可正常运转。

表 2 电机所用材料

Tab. 2 Materials used in the motor

材料分类及名称		材料选型及规格
机电材料	漆包线	QY-2/220
	安装线	聚醚醚酮
非金属	绕线挡板	聚四氟乙烯
	出线护套	C30-11
辅料	浸渍漆	银铜
	银铜焊料	聚四氟乙烯
	聚酰亚胺薄膜	高强度胶
	粘接胶	聚酰亚胺
	焊点处热缩管	交联聚烯烃
	轴承润滑剂	KG400

表 3 电机辐射时间

Tab. 3 Motor radiation time

辐射试验节点/Gy	剂量率/(Gy·h ⁻¹)	辐射时长/min
1×10 ⁴	47.9×10 ³	12.5
1×10 ⁵	47.9×10 ³	125
1×10 ⁶	47.9×10 ³	1 253
2×10 ⁶	47.9×10 ³	2 505
3×10 ⁶	47.9×10 ³	3 758
4×10 ⁶	47.9×10 ³	5 011
5×10 ⁶	47.9×10 ³	6 264

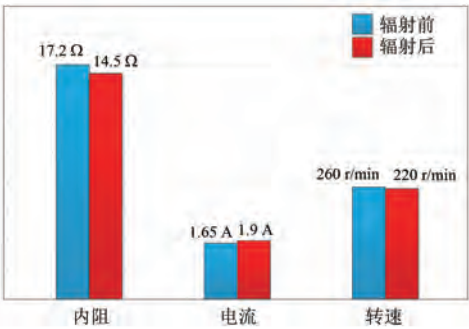


图 15 电机辐射前后的性能测试对比

Fig. 15 Comparison of motor performance testing before and after irradiation

由图 15 可知,通过样机测试,电机辐射前后完全处于受控的状态,但是内阻、转速都发生了变化,有一定的下降趋势,下降幅度约为初始性能的 15%,基本性能满足使用要求。

5 结语

本文针对核工业机器人应用中的关键瓶颈高辐射环境下关节电机的可靠性问题,从设计、材料筛选到 5 MGy 高剂量 γ 源辐射试验验证三方面进行了系统性研究。 γ 源辐射试验量级 5 MGy 属于行业领先,不同材料在 5 MGy 辐射环境下的性能变化趋势也为首次试验验证,为后续核工业机器人工程研究提供重要的参考价值,主要结论如下。

(1) 聚酰亚胺、交联聚烯烃和聚醚醚酮等材料具有良好的耐辐射性能;环氧树脂及润滑脂经辐射后其性能明显下降。

(2) 通过对电机的外观进行观察,固定的胶层被辐射后明显发生变化,由于产生化学反应螺旋纹紧固剂等颜色异常,但是连接紧固性能良好;热缩管绝缘性能良好,无明显异常。

(3) 关节电机经过 5 MGy γ 射线辐射后,电机内阻明显下降,转速降低,电流呈上升趋势,整体性能下降约 15%;在控制方面无明显异常,正反转受控。关节电机的耐辐射试验量级满足试验应用状态。

利益冲突声明

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

作者贡献

任宏喜进行了文章结构梳理、框架搭建与论文撰写,寸有超进行了电机性能仿真分析,宋定安进行了数据整理、分析,罗蓉蓉进行了试验研究。所有作者均阅读并同意了最终稿件的提交。

The paper structuring, framework construction and paper writing were carried out by Ren Hongxi. The motor performance simulation analysis was conducted by Cun Youchao. The data organization and analysis were conducted by Song Ding'an. The experimental research was conducted by Luo Rongrong. All authors have read and approved the final version of the manuscript for submission.

参考文献

[1] 陈小璐,李鹏远,魏海鸿,等. 遥操作机械臂在托

- 卡马克内运动轨迹的虚拟仿真研究[J]. 核聚变与等离子体物理, 2024, 44(2): 191-197.
- CHEN X L, LI P Y, WEI H H, et al. Research on virtual simulation of motion trajectory of remote handling manipulator in a tokamak [J]. Nuclear Fusion and Plasma Physics, 2024, 44(2): 191-197.
- [2] 刘金平, 马明豪, 吴闯, 等. 辐射环境下遥控操作焊接设备研究[J]. 金属加工(热加工), 2023, (8): 84-90.
- LIU J P, MA M H, WU C, et al. on Remote operation of welding equipment in radiation environment [J]. MW Metal Forming, 2023, (8): 84-90.
- [3] 谭雨峰. 基于混合现实的机器人遥操作关键技术研究[D]. 天津: 天津职业技术师范大学, 2024.
- TAN Y F. Research on key technologies of robot teleoperation based on mixed reality [D]. Tianjin: Tianjin University of Technology and Education, 2024.
- [4] 王振霖, 何学寿, 崔文星, 等. 自动化先进技术在核工业领域的应用及展望[J]. 化工自动化及仪表, 2023, 50(3): 277-279.
- WANG Z L, HE X S, CUI W X, et al. Application and prospect of advanced automation technology in nuclear industry field [J]. Control and Instruments in Chemical Industry, 2023, 50(3): 277-279.
- [5] 熊树钦, 刘硕. 放射性复杂管段检查机器人的设计探析[J]. 中国设备工程, 2023, (19): 31-33.
- [6] 魏传胜, 张金富, 翟连付, 等. 核电站通风系统风管清理机器人功能设计要点分析研究[J]. 电工技术, 2023, (21): 186-189.
- WEI C S, ZHANG J F, ZHAI L F, et al. Analysis and research on function design points of air duct cleaning robot for nuclear power plant ventilation system [J]. Electric Engineering, 2023, (21): 186-189.
- [7] 姚建锋, 陈青, 胡俊杰, 等. 反应堆试验装置巡检机器人性能综合评价[J]. 设备管理与维修, 2023, (11): 143-147.
- [8] 马明豪, 吴闯, 刘金平, 等. 基于遥控操作机器人视觉传感系统的人机交互设计[J]. 金属加工(热加工), 2023, (5): 72-76.
- MA M H, WU C, LIU J P, et al. Design of human-machine interaction based on robot visual sensor system for remote operation [J]. MW Metal Forming, 2023, (5): 72-76.
- [9] 刘富贵, 刘立坡, 郑吉家, 等. 远程操作技术在乏燃料管理中的应用研究[J]. 产业与科技论坛, 2025, 24(4): 50-52.
- [10] 张齐昊, 赵伟, 褚胜男, 等. 耐辐照核应急机器人研究现状及关键技术分析[J]. 核科学与工程, 2019, 39(4): 629-645.
- ZHANG Q H, ZHAO W, CHU S N, et al. Research status and key technology analysis of radiation resistant nuclear emergency response robot [J]. Nuclear Science and Engineering, 2019, 39(4): 629-645.
- [11] 张栋葛, 刘尧华, 林宇, 等. 可耐受 100 Mrad γ 射线辐照电机的制备及绝缘润滑材料耐辐射性研究[J]. 机械工程学报, 2017, 53(21): 26-30.
- ZHANG D G, LIU Y H, LIN Y, et al. Development of super 100 Mrad radiation durable motor and study of radiation resistance properties for related materials [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(21): 26-30.
- [12] 苏康佳, 杨芳艳, 陈媛媛. 特种机器人关节模组设计及辐射防护[J]. 农业装备与车辆工程, 2023, 61(9): 56-61.
- SU K J, YANG F Y, CHEN Y Y. Design and radiation protection of special robot joint module [J]. Agricultural Equipment and Vehicle Engineering, 2023, 61(9): 56-61.
- [13] 韩毅, 王川, 王超, 等. 核设施退役场景中耐辐射机器人应用设计[J]. 核电子学与探测技术, 2022, 42(6): 92-99.
- HAN Y, WANG C, WANG C, et al. Application and design of radiation resistant robot in decommissioning scene of nuclear facilities [J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2022, 42(6): 92-99.
- [14] 冯常, 王从政, 赵建平, 等. 核环境作业机器人研究现状及关键技术分析[J]. 光电工程, 2020, 47(10): 86-96.
- FENG C, WANG C Z, ZHAO J P, et al. Research status and key technologies analysis of operating robots for nuclear environment [J]. Opto-Electronic Engineering, 2020, 47(10): 86-96.
- [15] 辛露, 陈凯. 核工业机器人系统中辐照加固技术研究[J]. 科技视界, 2019, (3): 8-12.
- XIN L, CHEN K. Research on radiation reinforcement technology in nuclear industry robot system [J]. Science & Technology Vision, 2019, (3): 8-12.

- [16] 陈法国, 朱万宁, 董强敏, 等. 遥控机器人的耐辐射设计和测试[J]. 核电子学与探测技术, 2016, 36(2): 121-124.
CHEN F G, ZHU W N, DONG Q M, et al. The radiation tolerance design and test of a tele-controlled robot [J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2016, 36(2): 121-124.
- [17] 张双双, 葛星梅, 陆欣云, 等. 基于 Maxwell 的机器人关节电机优化设计[J]. 现代信息科技, 2024, 8(5): 179-182+189.
ZHANG S S, GE X M, LU X Y, et al. Optimization design of robot joint motor based on Maxwell [J]. Modern Information Technology, 2024, 8(5): 179-182+189.
- [18] 谢琦. 机器人一体化电机模组减速器传动效率优化方法[J]. 微特电机, 2024, 52(8): 74-78.
XIE Q. Optimization method of transmission efficiency for integrated motor module gearbox of robot [J]. Small & Special Electrical Machines, 2024, 52(8): 74-78.
- [19] 吕石磊, 曹其新, 李想, 等. 机电一体化机器人关节及其驱控系统硬件设计[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2021, 33(1): 111-117.
LYU S L, CAO Q X, LI X, et al. Design of mechatronics robot joint and its control system hardware [J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2021, 33(1): 111-117.
- [20] 何伟严, 马吉恩, 王宏涛, 等. 机器人关节电机转矩动态特性研究[J]. 电机与控制学报, 2023, 27(12): 12-20.
HE W Y, MA J E, WANG H T, et al. Dynamic characteristics of robot joint motor torque [J]. Electrical Machines and Control, 2023, 27(12): 12-20.
- [21] 孙佳豪. 新型机器人关节电机减速器一体化设计方法及试验研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2022.
SUN J H. Integrated design method and experimental research of new robot joint motor reducer [D]. Chongqing: Chongqing University, 2022.
- [22] 刘德友, 陈仕富, 杜思成, 等. 智能巡检操作机器人关节电机设计与优化[J]. 电力科学与工程, 2024, 40(7): 52-59.
LIU D Y, CHEN S F, DU S C, et al. Design and optimization of joint motor for intelligent patrolling and operating robots [J]. Electric Power Science and Engineering, 2024, 40(7): 52-59.
- [23] 石麟, 胡桥, 石鑫东, 等. 水下装备关节电机多参数辨识研究[J]. 水下无人系统学报, 2024, 32(6): 1029-1038.
SHI L, HU Q, SHI X D, et al. Multi-parameter identification of underwater equipment joint motor [J]. Journal of Unmanned Undersea Systems, 2024, 32(6): 1029-1038.
- [24] 马利娇, 贾欣雨, 陈少华. 永磁同步电机旋转变压器解码算法优化设计[J]. 电机与控制应用, 2021, 48(2): 31-35.
MA L J, JIA X Y, CHEN S H. Optimal design of resolver decoding algorithm for permanent magnet synchronous motor [J]. Electric Machines & Control Application, 2021, 48(2): 31-35.
- [25] 吴伟强, 朱孝勇, 项子旋, 等. 少稀土组合励磁永磁无刷电机设计与分析[J]. 电机与控制应用, 2018, 45(9): 73-77.
WU W Q, ZHU X Y, XIANG Z X, et al. Design and analysis of a less-rare-earth permanent magnet brushless motor with hybrid permanent magnets [J]. Electric Machines & Control Application, 2018, 45(9): 73-77.
- [26] 葛红岩, 卓亮, 刘勇, 等. 基于 Halbach 阵列的机器人关节电机关键技术研究[J]. 电机与控制应用, 2020, 47(12): 65-69.
GE H Y, ZHUO L, LIU Y, et al. Research on key technologies of robot joint motor based on Halbach array [J]. Electric Machines & Control Application, 2020, 47(12): 65-69.
- [27] 汪宗彪, 龚纯, 姜淑忠, 等. 深海推进用永磁无刷电机温度场分析[J]. 电机与控制应用, 2022, 49(2): 47-53.
WANG Z B, GONG C, JIANG S Z, et al. Temperature field analysis of permanent magnet brushless motor for deep-sea propulsion [J]. Electric Machines & Control Application, 2022, 49(2): 47-53.
- [28] 石红顺, 夏堃, 崔浪浪, 等. 无刷力矩电机力矩波动系数实测值与设计值差异性[J]. 电机与控制应用, 2020, 47(4): 71-75.
SHI H S, XIA K, CUI L L, et al. Difference between measured and design values of torque fluctuation coefficient in brushless torque motor [J]. Electric Machines & Control Application, 2020, 47(4): 71-75.

- [29] 陈坦. 托卡马克腔高温辐射环境下内窥机械臂关键单元部件研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2016.
- CHEN T. Research on key components of tokamak in-vessel inspection manipulator [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2016.
- [30] 段星光, 李常, 王永贵, 等. 核电站蒸汽发生器堵板操作机器人机构设计与实现[J]. 制造业自动化, 2014, 36(10): 1-5.
- DUAN X G, LI C, WANG Y G, et al. The mechanism design and implementation of blocking plate operation robot in nuclear power plant steam generator [J]. Manufacturing Automation, 2014, 36(10): 1-5.
- [31] 沈华亚, 朱万宁, 董强敏, 等. 耐强辐射遥控探测机器人研制[J]. 核电子学与探测技术, 2015, 35(1): 74-77.
- SHEN H Y, ZHU W N, DONG Q M, et al. Development of the tele-control robot for nuclear detection in intense radiation environment [J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2015, 35(1): 74-77.
- [32] 王桢, 周洪, 陆瑜吉. 基于 STC12C5A60S2 的无刷直流电机调速系统[J]. 电子设计工程, 2021, 29(12): 179-184.
- WANG Z, ZHOU H, LU Y J. The brushless DC motor speed-regulating system based on STC12C5A60S2 [J]. Electronic Design Engineering, 2021, 29(12): 179-184.

收稿日期:2025-03-30

收到修改稿日期:2025-08-31

作者简介:

任宏喜(1993-),男,硕士,高级工程师,研究方向为伺服系统设计工作,rxh0621@163.com;

*通信作者:任宏喜(1993-),男,硕士,高级工程师,研究方向为伺服系统设计工作,rxh0621@163.com。