

# 舰船轴频电场中的接触电阻研究

姬庆, 蒋培

(海军工程大学 兵器工程系, 武汉 430033)

**摘要:** 研究发现, 舰船主要轴系部件具有很高的结构相似性且都存在周期性变化的接触电阻。经过对舰船结构的实体调研和轴系结构的简化, 建立了轴系部件接触电阻物理模型, 并进行理论分析和实验验证。结果证明: 接触电阻变化导致回路中电流的波动, 变化率可达80%, 是产生轴频电场的一个重要因素。

**关键词:** 轴频电场; 接触电阻; 接触形式; 附加应力

**本文引用格式:** 姬庆, 蒋培. 舰船轴频电场中的接触电阻研究[J]. 四川兵工学报, 2014(8): 127-130.

**中图分类号:** TJ83

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1006-0707(2014)08-0127-04

## Contact Resistance in Shaft-frequency Electric Field

Ji Qing, JIANG Pei

(Department of Weaponry Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

**Abstract:** The study found that a high structural similarity and periodic contact resistance existed in the main shaft parts of ship. Physical contact resistance of shaft parts is established after researched and simplified the structure of the entity ship structure, and then have theoretical analysis and experimental verification to the model. The results prove that the contact resistance variation lead to fluctuations in the loop current, the change rate is up to 80%, which is an important factor in generating shaft-frequency electric field.

**Key words:** shaft-frequency electric field; contact resistance; contact form; additional stress

**Citation format:** Ji Qing, JIANG Pei. Contact Resistance in Shaft-frequency Electric Field[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2014(8): 127-130.

为了抑制钢体船(甚至玻璃钢壳船、塑料壳船)在海水中的腐蚀, 普遍的措施是在船身安装阴极保护系统, 主要可分牺牲阳极阴极保护系统(passive cathodic protection system, PCP)和外加电流的阴极保护系统(impressed current cathodic protection system, ICCP)。然而无论采取何种防腐方法, 都会有部分的电化学腐蚀电流或阴极保护电流经海水流向螺旋桨, 经轴系机械部件流回船壳, 形成闭合的电流回路。当舰船航行时主轴的旋转和螺旋桨的转动会产生周期性脉动成分对流经海水的电流进行调制, 形成周期性变化的电流, 最后产生轴频电磁场, 不断地向海水中辐射。其最显著的特征就是其频域的线谱特性, 基频低, 使得轴频电场信号在海洋

中传播距离相对其他成因的电场信号更远更不易衰减<sup>[1]</sup>。近年来, 随着对水下目标电磁场研究的深入、传感器技术和信号处理技术的高速发展, 舰船轴频电场已经成为继舰船物理场中声、水压、磁场之后的又一重要目标特征信号。轴频电场的研究对于水下目标探测、舰船非声隐身技术和提高舰船生命力有着极其重要意义<sup>[2]</sup>。

在研究轴频电场中发现, 舰船的轴频电流可以等效成一个闭合的等效电路, 而舰船轴系部件电阻就是电路中主要的电阻部件。本文对某型船体调研发现, 轴系的零部件有着很高的结构相似性; 同时轴系部件机械连接处都是电接触点, 随着主轴的转动存在接触电阻的周期性变化。本文对着重

对轴系部件结构进行简化并对电接触点进行分析建立相应的轴频电场中接触电阻物理模型,分析研究了接触电阻对轴频电场中电流变化的重要影响,并进行了实验验证。

## 1 轴频电场的接触电阻

接触电阻是指2个导电的载流体以机械方式互相接触,在接触部位产生阻碍电流流向附加阻值,是电接触理论中的一个基本的、重要的参数。凡具有电接触的地方,接触电阻都客观地存在。接触电阻是由收缩电阻和表面膜电阻2部分组成。依据现代接触理论,影响接触电阻的因素主要有:两导体的接触形式、接触压力、接触表面的光洁度、接触电阻在长期工作过程中的稳定性、温度、材料性质和电流信号的频率。实际上接触电阻的形成是一个非常复杂的过程,影响接触电阻大小变化的因素很多,也很复杂。不同的接触条件,对接触电阻的影响程度是不一样的,往往这些因素又是相互影响,不是独立存在的。比如温度的变化会直接影响到接触材料的电阻率,接触压力的变化会使接触形式有所改变等<sup>[3-4]</sup>。

本文以某型舰船为研究对象,对其轴系结构进行实体调研,得到轴频电流的流向和与之相关的主要轴系机械部件。通过进一步简化,得到相应的轴系机械部件的结构简图,如图1所示。舰船传动轴为一体制造的阶梯轴,以机械方式连接安装了轴承等轴系部件。船体与海水全面积接触,轴承等轴系部件通过各自支座固定在船体上,此时可认为轴系部件就是“接地点”。轴频电流经舰轴前、后轴承,推力轴承,接地装置,电机等轴系部件(以后统称为轴系部件)流回船体形成各自的闭合支路,此时从电接触角度看,轴与轴系部件的接触部位之间有电流通过,形成电接触。

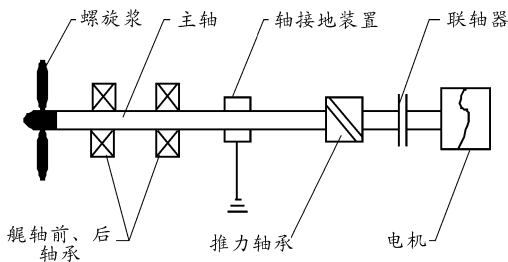


图1 与轴频电流回路相关的轴系部件简图

舰船系统中轴系部件的存在不同的表面粗糙度、圆度、偏心度、变形挠度等误差,加之安装误差和转动时引起的温度变化等变化因素都不可避免。当舰船航行时,显然这些误差会随着主轴的周期性转动致使回路中电接触部位的接触压力、接触面,接触间隙等接触因素发生周期性地变化,从而产生周期性变化的接触电阻,以致产生易被探测与识别的周期性变化的轴频电流。可知回路中这些电接触部位的接触电阻的变化就是产生轴频电场的重要根源,由以上对轴系部件接触电阻的分析建立轴频电场电流回路等效电路图,如图2所示。

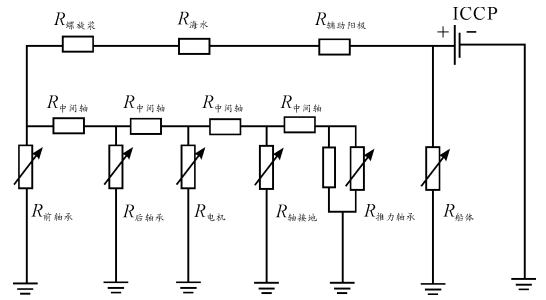


图2 轴频电场的等效电路

## 2 轴频电路中接触电阻的模型建立

### 2.1 轴频电场接触电阻模型建立

为分析电流回路中接触电阻的变化,现就舰船轴系部件结构进行具体分析。舰船传动轴是整体制造的阶梯轴,舰轴的前、后轴承是用来支撑舰轴的两端,以保证转动的稳定性,并且用密封装置将轴与前、后轴承密封。推力轴承主要是用来传递转动轴的动力,推动螺旋桨转动从而推动船体向前航行。推力轴承也是通过轴瓦与轴接触,之间有润滑剂,通过密封来保证润滑的有效性,之间有电流通过形成电接触。电机主轴通过内部的轴承支座与船体相连,电机主轴与传动轴通过联轴器刚性连接,此时部分轴频电流流经电机主轴和轴承支座的连接处到船体形成一个电流支路。为了降低轴频电流,舰船安装了主动接地装置(active shaft grounding, ASG),一般是用碳刷与铜环,铜环固定在轴上,碳刷安装船体上,两者直接接触,结构类似与轴承的轴瓦。

通过以上对轴系回转体部件和传动轴的结构分析发现轴系部件电接触的接触形式都是轴与类似“轴瓦”的机械接触,之间有润滑剂润滑(除碳刷和铜环),以保证接触部件的润滑和降温,有很高的结构相似性。结合接触电阻理论分析发现这些回转体部件与传动轴之间必然存在接触电阻的变化。舰船在航行过程中,轴与轴承之间是弧面接触,而且接触面的大小和位置是随着主轴的转动不断变化的<sup>[5-6]</sup>。本文将轴系部件接触电阻这种电接触形式简化为如图3所示的弧面接触模型。

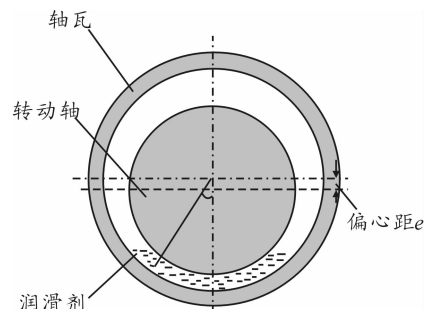


图3 轴系主要电接触点的弧面接触模型

为了进一步分析轴频电场中接触电阻的变化,哪些因素变化会对接触电阻产生影响。要对等效模型进一步简化,对

舰船轴系总体结构进行分析及典型部件电阻分析发现,轴与轴承等机械结构间的接触可以把弧面简化成平面,接触电阻的接触形式可等效为如图4所示的平面接触物理模型。在这种情况下,对影响接触电阻的因素进行进一步分析则更加方便。

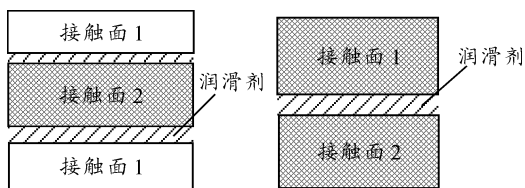


图4 轴系接触电阻的平面接触物理模型

## 2.2 接触电阻物理模型分析

根据实际的轴系结构和工况,影响轴系部件的点接触电阻变化的主要因素可以总结为2类:一类是影响接触力变化的因素如变形挠度,偏心度等;第二类是影响接触面积变化的因素如轴承的润滑,轴的表面状态等。下面就对接触电阻模型进行定性分析。

舰船在航行时,由于主轴的转动会产生动不平衡,从而产生较大的附加应力 $F$ ,转动前后轴系部件变形如图5所示。此时轴承对主轴就要提供相应的支撑力,方向与指向轴心,且支撑力会随着轴的旋转位置变化而产生周期性变化。事实上,这个支撑力就是接触电阻中的接触力<sup>[7]</sup>。根据其受力分析建立接触力数学表达式

$$F = \int \rho \pi r^2 \omega^2 [e + q(x)] dx \cdot H(\theta) \cdot H(d)$$

式中: $\rho$ 为主轴质量; $r$ 为转轴半径; $\omega$ 为转动角速度; $\theta$ 为主轴转动的位置; $e$ 为偏心度; $d$ 为同轴度误差; $q(x)$ 为挠度。

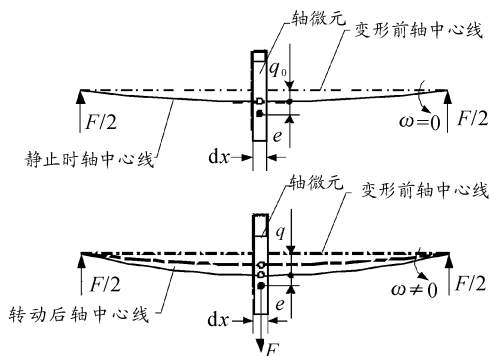


图5 运动前后轴系部件变形分析图

接触面积的变化,也直接影响接触电阻。在轴转动过程中,轴与“轴瓦”接触面积会随着位置的不同而产生周期性变化。轴承的润滑也是接触面积的重要影响因素,润滑剂黏度、油膜厚度等都直接影响轴与轴瓦之间的电接触介质的接触面。轴系部件表面粗糙度对接触面的实际接触面积的影响也很明显。

## 3 接触电阻对回路电流影响的实验分析

为了验证轴系部件与轴间接触电阻的变化对轴频电流

回路的影响,进行了接触电阻实验。接触电阻的定义符合欧姆定律,测量原理如图6所示。接触电阻的计算表达式为 $R_j = U/I$ ,其中: $U$ 为导体两端电压; $I$ 为通过电流。

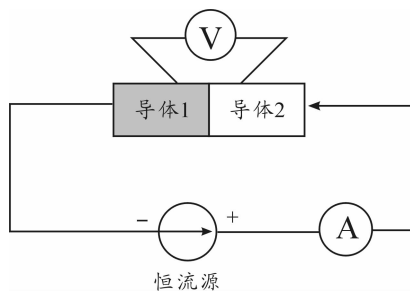


图6 接触电阻 $R_j$ 的测量原理

本实验采用新三思实验机为实验平台提供变化的接触力,接触压力可程序控制。

接触电阻试件为45#钢制造,圆柱型,粗糙度有0.7、1.6、3.3,共3种。实验时,恒流源为相接触的电阻试件提供2A稳定电流,然后采用高精度Agilent 3458A多用表对电阻试件两端电压进行实时测量,实验设备如图7所示。实验采用LabVIEW程序编写的数据采集程序为软件平台实现在计算机上实现实时大量的高速数据采集。



(a) 新三思实验机

(b) 计算机与多用表

图7 实验装置

图8中,接触力随时间均匀增加,得到的接触电阻随接触压力的变化曲线。其中蓝色实线和绿色虚线是接触电阻值与接触压力随实验时间的变化图。可以发现接触电阻随着接触压力的增大而减小,尤其是在力较小时变化较快,对接触压力敏感。

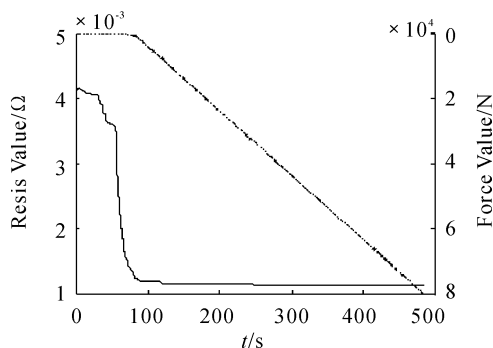


图8 接触力匀速加载时接触阻值变化

图9中,接触压力是随着时间周期性变化,明显接触电阻也是周期性变化,且变化规律与力的变化规律相反,也就是说接触与接触电阻成反比。从图9中可以发现弹性范围内,当接触力为周期性变化时,接触电阻也将周期性变化。

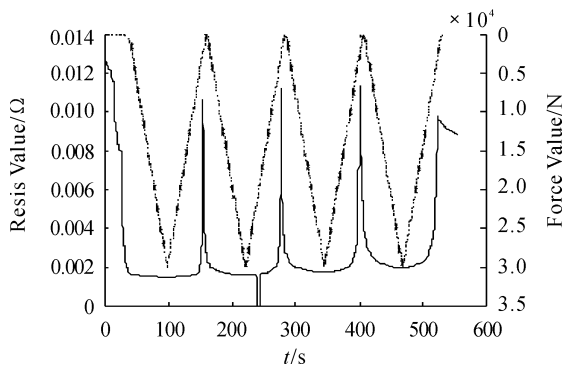


图9 接触力周期加载时接触阻值变化

经过理论分析和接触电阻实验验证,发现接触电阻的变化可引起电场回路中的电流较大波动。比较实验其他组数据可知,因接触电阻变化导致电流波动平均变化率可达到80%。在轴频电场中,接触电阻是整个电场变化的重要因素,是影响舰船电场目标特性的重要考虑因素。

## 4 结束语

本文主要是针对舰船轴系部件与轴的电接触点机械接

触进行分析,简化各接触点的物理结构得到接触电阻的弧形接触面物理模型,并分析了接触电阻主要影响因素,可以分为接触力和接触面积2类。并进行了实验验证物理模型的有效性、可靠性。对不同粗糙度的电阻试件加载不同的接触压力,可以发现,接触电阻的变化率可达到80%以上,对电流回路有很大影响。从而验证了,在轴频电场中,接触电阻的变化是产生轴频电场的一个重要因素。

## 参考文献:

- [1] 谭浩. 舰船电场信号特征控制研究[D]. 武汉:海军工程大学,2012:14-16.
- [2] 林春生,龚沈光. 舰船物理场[M]. 2版. 北京:兵器工业出版社,2007:235-238.
- [3] 许军,李坤. 电接触的接触电阻研究[J]. 电工材料,2011(1):10-13.
- [4] 程礼春. 论接触电阻模型与应用问题[J]. 高压电,1993(2):34-37.
- [5] 马先贵. 润滑与密封[M]. 北京:机械工业出版社,1985.
- [6] 彭拾义. 旋转密封装置[M]. 北京:国防工业出版社,1976.
- [7] 李柱国. 机械设计与理论[M]. 北京:科学出版社,2003:592-593.

(责任编辑 杨继森)

(上接第121页)

## 4 结束语

本文在对VLBI相关数据处理中,分析了残留延迟率对长期累加的影响,提出短期积累+基于数据的延迟率拟合+带补偿的长期积累处理结构;分析了拟合数据的统计特性,采用在数据统计特性下具有最有线性滤波性能的卡尔曼滤波方法进行拟合,仿真结果表明,采用这种处理结构,成功拟合了数据残留延迟率,能有效提高长期累积的处理性能。

## 参考文献:

- [1] Takahashi F, Takahashi Y, Kondo T. Very Long Baseline Interferometer[Z]. Tokyo: Ohmsha Ltd, 2000.

(责任编辑 杨继森)

- [2] Gelb A. Applied Optimal Estimation[M]. MIT Press, Cambridge, MA, 1974.
- [3] Kalman R E. A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems[J]. Transaction of the ASME—Journal of Basic Engineering, 1960;35-45.
- [4] 叶叔华, 黄城. 天文地球动力学[M]. 济南: 山东科学技术出版社, 2000.
- [5] 王威, 胡小工. 影响奔月分析器定轨精度的误差源分析[J]. 飞行器学报, 2005, 24(1): 44-50.
- [6] 舒逢春, 张秀忠. 相关处理软件系统中模型计算的精度分析[J]. 中国科学院上海天文台年刊, 2010(1): 100-106.