

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2022.03.020

# 磁流体角速度传感器的固液接触电阻特性研究

纪越<sup>1,2</sup>, 张彦鹏<sup>1,2</sup>, 李醒飞<sup>3</sup>

- (1. 天津工业大学控制科学与工程学院, 天津 300387;
2. 天津工业大学天津市电气装备智能控制重点实验室, 天津 300387;
3. 天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072)

**摘要:**针对基于磁流体动力学(MHD)的角速度传感器中源级输出电阻波动的抑制问题,主要分析了MHD角速度传感器金属电极与镓合金的接触电阻特性,以及随着应力改变和接触面粗糙度的变化规律。通过理论推导建立了传感器中固-液接触电阻的理论模型,并据此使用COMSOL仿真了不同接触应力下接触电阻的变化情况;使用接触角测量仪分析了电极粗糙度对接触电阻的影响,电极材料为铝或铁时,粗糙度由1.6增加到3.2时,接触角增加 $4^{\circ}\sim 10^{\circ}$ 。仿真表明,MHD角速度传感器的接触电阻随着接触应力的增加而减小,在1kPa应力变化范围内,固-液接触电阻急剧变化。接触角测试表明,随着粗糙度的增加,接触角增加,浸润性变差。

**关键词:**角速度传感器;磁流体动力学;接触电阻;接触应力;粗糙度;液态金属

**中图分类号:**V241.9 **文献标志码:**A **文章编号:**2095-8110(2022)03-0153-06

## Research on Solid Liquid Contact Resistance Characteristics of Magnetohydrodynamic Angular Velocity Sensor

Ji Yue<sup>1,2</sup>, Zhang Yan-peng<sup>1,2</sup>, Li Xing-fei<sup>3</sup>

- (1. School of Control Science and Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387, China;
2. Tianjin Key Laboratory of Intelligent Control of Electrical Equipment, Tiangong University, Tianjin 300387, China;
3. State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** This paper mainly analyzes the contact resistance characteristics between metal electrode and gallium alloy with the change of stress and contact surface roughness, regarding the problems of suppression of the output resistance fluctuation in magnetohydrodynamic (MHD) angular velocity sensor. The theory of solid-liquid contact resistance in the MHD sensor is established and then COMSOL is used to simulate the change of contact resistance under different contact stresses. The influence of electrode roughness on contact resistance is analyzed using a contact angle measuring instrument. When the roughness increases from 1.6 to 3.2, the contact angle generally increases by  $4^{\circ}\sim 10^{\circ}$ . The simulation shows that the contact resistance of the MHD angular velocity sensor decreases with the increase of the contact stress. The solid-liquid contact resistance changes sharply in the range of 1kPa stress. The contact angle test shows that the contact angle increases and the wettability gets worse as the roughness increases.

**Key words:** Angular velocity sensor; Magnetohydrodynamic; Contact resistance; Contact stress; Roughness; Liquid metal

收稿日期:2021-06-30;修订日期:2021-08-23

基金项目:国家自然科学基金面上项目(62173245);国家自然科学基金重点项目(61733012)

作者简介:纪越(1990-),女,博士,副教授,主要从事惯性传感器方面的研究。

## 0 引言

随着空间探测距离的逐步增加,以高精度激光通信为代表的高精度航天器,对微角振动的测量和控制提出了越来越严格的要求<sup>[1]</sup>。传统的陀螺仪带宽受限<sup>[2]</sup>,基于磁流体动力学(Magnetohydrodynamic, MHD)的角速度传感器,是由美国 ATA (Applied Technology Associates)研究机构在 20 世纪 80 年代提出并发展起来的,具有宽频带内低噪声的优势,是目前最适合测量空间结构微角振动的传感器,已经在美国中继反射镜实验、静止轨道环境卫星以及月球激光通信演示中得以成功应用<sup>[3]</sup>。国内在磁流体角速度传感器方面是由天津大学等机构进行相关研究,截止到目前,我国自主研发的 MHD 角速度传感器与国外的磁流体角速度传感器相比在测量精度方面有差距,研究主要噪声源的抑制与优化设计方法,对我国在轨微角振动测量精度的提升至关重要<sup>[4]</sup>。

MHD 传感器的基本原理是利用金属液体的磁流体动力学效应,即相关惯性空间静止的导电液体切割与载体固连的磁场产生的感应电动势。一般地, MHD 角速度传感器表头标度因数在  $10^{-5}$  V/(rad/s) 的数量级,检测亚微弧度量级的角速度,表头部分的输出电压低至  $10^{-10}$  V,需要 kHz 带宽内噪声级极低的信号调理电路进行放大<sup>[5]</sup>。MHD 角速度传感器的表头电阻,作为信号放大电路的源级输入负载,其与后级电路的精确匹配直接关系着整个传感器的噪声水平,同时为了降低电阻的热噪声,表头的输出电阻要尽量小<sup>[6]</sup>。而传感器的输出电阻是由导电电极与液态金属接触形成的,电极和液态金属自身的电阻相对固定,而其接触电阻成为了 MHD 传感器主要的噪声源之一,所产生的干扰叠加在微弱的输出信号电动势中,对 MHD 传感器测量结果的准确性产生影响。接触电阻主要是由粗糙度和层膜的原因在接触部位产生的附加电阻值<sup>[7]</sup>,微弱的信号在传递过程中会因为接触电阻的存在而产生误差,严重时甚至使信号无法通过<sup>[8]</sup>。因此,对 MHD 传感器的接触电阻进行定性计算与分析,将会对 MHD 传感器的性能优化具有重要的指导意义。

目前,关于接触电阻之间的研究主要集中在固-固接触电阻方面,关于固-液接触电阻的研究较少<sup>[9]</sup>。中国科学院的刘艳娇团队通过对液态金属潮汐能发电机接触电阻的研究,提出了静态测量接

触电阻的方法,并通过实验研究了液态镓合金和固体紫铜电极间的静态接触电阻<sup>[10]</sup>。天津大学李醒飞教授团队设计了固体电极氧化膜对液固接触电阻影响的测量装置,从实验中获取镓合金与电极的接触电阻特性<sup>[11]</sup>。而针对固-固接触电阻的研究,随着我国接触电阻及电弧专业委员会的成立,研究较多,涉及的领域比较广泛,研究方向也不尽相同,但前期的理论研究可以为固-液接触电阻的理论与实验研究提供参考。I. Dutta 等研究了电枢在轨道上高速移动时与轨道的接触情况,发现接触面的热电流引起的老化以及接触面的粗糙度、接触压力、接触材料的电导率等都会影响接触电阻的大小<sup>[12]</sup>。第五电子研究所的施明哲等对器件电磁继电器接触表面的失效机理进行了相关研究,通过扫描电镜等实验器材进行接触点的微观观测,对比了正常情况下和失效情况下接触点形貌的不同,并进行了相关分析,以探究电磁继电器失效的相关原因,结果发现:镀层磨损致使金属与氧气形成氧化层,导致氧化层处局部触点负载电流过大,出现局部烧灼现象<sup>[13]</sup>。海军航空大学的王腾、郁大昭等研究了电连接器在插拔过程中随着接触压力和粗糙度的变化,其接触电阻的变化情况,结果表明:接触电阻不仅与接触压力有关,还与接触面粗糙度有关,且随着接触面粗糙度的增大而增大<sup>[14]</sup>。因此,固-固接触电阻的研究表明:接触电阻与接触面的粗糙度、接触面间的作用力有着直接的关系。本文将针对固-液接触中接触压力和接触面粗糙度对接触电阻的影响情况进行分析与讨论。

本文首先建立 MHD 传感器的理论模型,然后使用 Comsol Multiphysics 软件仿真分析传感器液态金属和金属电极之间接触压力变化情况对固-液接触电阻的影响。之后通过测量相同电极材料不同粗糙度下接触面的接触角,进行对比实验分析,以确定粗糙度与接触电阻之间的关系。

## 1 接触电阻理论模型

传感器的基本结构如图 1 所示,下层圆柱体是永磁体,其功能是为上方环形通道的导电液体提供垂直穿过的稳定磁场,上层环形通道为导电液体通道,该通道的上下层由绝缘材料制成,外壁流体环为导电性能良好的电极材料,环内装满金属导电液体。接触电阻则在电极与金属流体接触部位的固液接触面产生,接触电阻是由收缩电阻和层膜电阻

产生的附加电阻,是电接触中的一种现象。

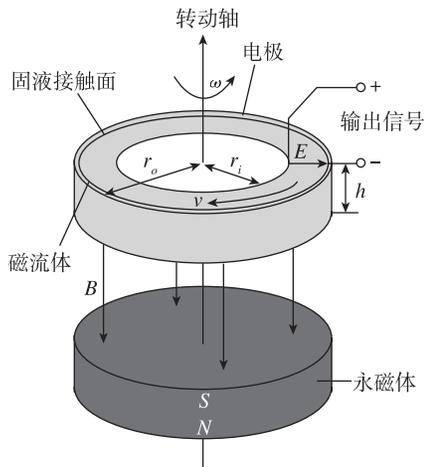


图 1 传感器结构图

Fig. 1 Sensor structure diagram

Holm 是电接触领域中最先提出电接触模型的科学家,他所建立的模型也被之后的研究者称为长收缩模型<sup>[15]</sup>。他认为电流在 2 个物体之间的接触是通过接触区的导电斑点实现的,这些导电斑点就是一些细小的接触点。电流在接触面之间通过时,主要是通过接触面之间的接触点来实现的,即导电斑点。后来 Williamson 在此模型的基础上进行改进,提出了两级模型,此模型也被之后的研究者称为两级收缩模型。收缩模型中有大收缩和小收缩,接触面之间导电斑点呈集群式分布,电流通过导电斑点时会产生一个收缩电阻,导电斑点集群处的收缩电阻是由众多微小收缩电阻叠加而成。早期的接触电阻的模型只考虑了收缩电阻的部分,之后随着在接触电阻领域研究的不断深入,接触电阻中除了收缩电阻之外还有表面膜层电阻。以上的接触电阻的模型都是建立在固-固接触电阻的基础上,目前,关于固-液接触电阻的模型还没有被科学家提出来。

液态金属具有稳定性的特点,在实际接触面积、接触面粗糙度、电导率不变的条件下,液态金属与电极接触时,接触电阻并不会随时间的变化而变化,因此不需要考虑接触电阻与时间的关系。该理论模型只考虑了接触电阻随着接触面积、粗糙度、电导率等几个因素的变化情况,因而可在 Holm 模型的基础上假设液态金属与固体表面接触时接触斑点的半径为  $r_i$ , 导电斑点为圆形,且互相不干扰。

本文固-液接触电阻是在理论模型理想、假设的情况下直接推导出数学公式,因为实际中接触电阻的影响因素太多,故而无法准确写出接触电阻的数

值表达式,需要大量的实验数据摸索。

理想状态下,固-液接触电阻的单个导电斑点收缩电阻为

$$R_{si} = \frac{\rho_1 + \rho_2}{4r_i} \quad (1)$$

式中,  $R_{si}$  为单个导电斑点的收缩电阻;  $r_i$  为理想材料表面导电斑点的等效半径;  $\rho_1$ 、 $\rho_2$  分别为两金属材料表面电阻率。

当满足长收缩模型时,导电斑点相互分散且不会相互干扰。假设每个导电斑点流过电流时的温度相同,则多斑点收缩电阻相当于导电斑点之间的并联电阻,因此总的收缩电阻的表达式如下

$$R_s = \frac{\rho_1 + \rho_2}{4 \sum_{i=1}^n r_i} \quad (2)$$

式中,  $R_s$  为总收缩电阻;  $n$  为两理想表面导电斑点个数。

由于膜层电阻的大小取决于层膜的厚度,即单位面积下的层膜电阻  $R^*$ , 每个导电斑面层膜电阻的表达式为

$$R_{bi} = \left| \frac{R^*}{\pi r_i^2} \right| \quad (3)$$

式中,  $R_{bi}$  为单个导电斑点膜层电阻;  $R^*$  为单位面积下膜层电阻,其阻值随膜层厚度的增加而增加;  $r_i$  为两接触材料表面导电斑点的等效半径。

当接触表面为实际粗糙度时,通过引入表面粗糙因子  $\varphi$  来描述粗糙面上的导电斑点,随着粗糙度的增加、接触角的增加,导电斑点的等效半径减小。表达式为

$$r_w = \frac{r}{\varphi} \quad (4)$$

式中,  $\varphi$  为电极表面粗糙因子;  $r$  为理想表面导电半径;  $r_w$  为实际接触表面的导电斑点半径。

因此,单个导电斑点的收缩半径为

$$R_{si} = \frac{\varphi(\rho_1 + \rho_2)}{4r_i} \quad (5)$$

式中,  $\rho_1$ 、 $\rho_2$  为两金属材料表面电阻率;  $\varphi$  为电极表面粗糙因子;  $r_i$  为理想材料表面导电斑点的等效半径;  $R_{si}$  为单个导电斑点的收缩电阻。

总导电斑点收缩电阻的表达式为

$$R_s = \frac{\varphi(\rho_1 + \rho_2)}{4 \sum_{i=1}^n r_i} \quad (6)$$

式中,  $\rho_1$ 、 $\rho_2$  为两金属材料表面电阻率;  $r_i$  为理想材料表面导电斑点的等效半径;  $\varphi$  为电极表面粗

糙因子; $R_s$  为总收缩电阻。

每个导电斑点膜层电阻的表达式为

$$R_{bi} = \left| \frac{\varphi^2 R^*}{\pi r_i^2} \right| \quad (7)$$

式中,  $R_{bi}$  为单个导电斑点膜层电阻; $R^*$  为单位面积下膜层电阻; $r_i$  为两接触材料表面导电斑点的等效半径; $\varphi$  为电极表面粗糙因子。

每个导电斑点接触电阻的表达式为

$$R_{ci} = R_{si} + R_{bi} = \frac{\varphi(\rho_1 + \rho_2)}{4r_i} + \left| \frac{\varphi^2 R^*}{\pi r_i^2} \right| \quad (8)$$

式中,  $R_{si}$  为单个导电斑点的收缩电阻; $R_{bi}$  为单个导电斑点的膜层电阻。

假设每个导电斑点在接触面上相互不干扰,导电斑点接触电阻都处于并联状态,则接触面的总接触电阻表达式为

$$R_c = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{R_{ci}}} \quad (9)$$

式中,  $n$  为两粗糙面的导电斑点个数。

由于该模型的建立是以固-固接触理论为基础的,所以该理论模型只能定性展示接触压力、粗糙度、膜层电阻、接触材料电阻率和导电斑点等对固-液接触电阻的影响方式。

## 2 接触面应力对接触电阻影响分析

根据以上的接触电阻理论分析可知,基于接触电阻理论求得接触电阻值,首先要求出接触面的应力值和材料电导率等参数。由于传感器在正常运行时固-液接触面会受到多个力的作用,其中有离心力、电磁力、粘滞力等。对于求导接触电阻而言起主要作用的力是离心力,因为电磁力和粘滞力是切向力,而切向力并不会使固液接触电阻的接触面之间的接触更加紧密,因为它提供的并不是针对固-液接触电阻的正压力,但是离心力却是正应力,会使接触电阻的2个接触面之间接触的更加紧密。

仿真中使用的传感器仿真结构示意图,如图2所示,中心的圆柱是内铜电极半径为20mm,剩下的2个圆环分别是液态金属和外铜电极,其半径分别为100mm和110mm。其中传感器中液态金属和铜电极的物理参数具体如表1所示,在Comsol仿真中将之前建立好的模型导入,生成有限元分析模型。对MHD传感器固-液接触电阻的仿真涉及电场、固体力学、流体力学等多个物理场,对应于电流、固体力学、层流等物理场接口,需要考虑的多物

理场为流固耦合,网格类型选为自由四面体网格,整体划分方法比较细化,对接触区域要进一步细化,最大单元大小不超过0.0002mm。对模型进行稳态分析,考虑到需要在液态金属与电极的接触面添加电接触边界条件,所以此时可以定义流-固接触面为电接触边界条件,实际中固-液接触电阻也是在此界面产生。上述模型的处理符合实际情况。根据上述建立的模型,分别计算应力变化对回路电阻的影响,如图3所示,通过研究接触电阻可知,接触面压力越大,接触电阻越小,这是因为接触压力越大时,固-液接触电阻的导电斑点变形就越大,导电斑点接触区域就越多,增大了接触面间的实际接触面积,直接导致收缩电阻值的减小。在1kPa范围内,接触电阻急剧变化,根据MHD角速度传感器的

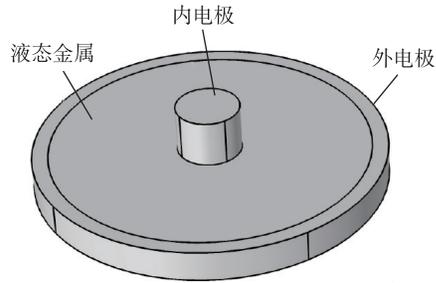


图2 仿真结构图

Fig. 2 Simulation structure diagram

表1 物理参数表

Tab. 1 Physical parameters

物理参数	镓锡合金	铜电极
密度/(kg/m <sup>3</sup> )	6.4 × 10 <sup>3</sup>	8.96
电导率/(s/m)	3.46 × 10 <sup>6</sup>	57142857
动力黏度/(kg/m <sup>3</sup> )	0.0024	—

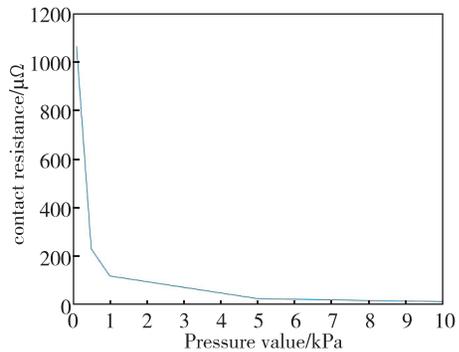


图3 接触电阻与压力值关系

Fig. 3 Relationship between contact resistance and pressure

几何和物理参数,壁面压强在 0 至几十 Pa 的范围内时,接触电阻变化范围可到几十  $\mu\Omega$ ,足以影响后续放大电路的源级电阻设计,不可忽略。

### 3 接触面粗糙度对接触电阻影响分析

粗糙度对固-固接触电阻的影响与对固-液接触电阻的影响不同,粗糙度对固-固接触电阻的影响主要体现在弹性变形的比例上面,粗糙度越小,接触面的实际接触面积越大;粗糙度对固-液接触电阻的影响主要体现在接触角上面,接触角可以反映出粗糙度对接触电阻的影响。接触角的变化将会影响接触面实际接触面积的大小,从而影响接触电阻。接触角是指液滴在与固体表面接触时,气、液、固三相交点处液固界面与液气界面的切线之间的夹角  $\theta$ ,是润湿程度的量度。本实验通过使用接触角测量仪测量接触角,实验系统如图 4 所示。

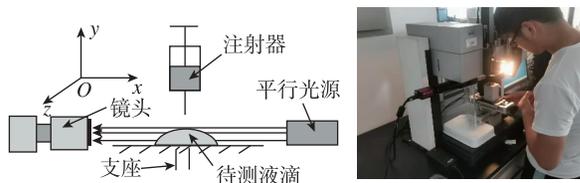


图 4 实验系统图

Fig. 4 Diagram and picture of the experimental system

本实验在环境温度  $26^\circ\text{C}$ 、环境压力  $10^5\text{ Pa}$  下进行,通过机械加工 2 个完全相同的铝板和铁板,加工为  $90\text{ mm} \times 30\text{ mm} \times 3\text{ mm}$  的矩形,正反面的粗糙度分别为 1.6 和 3.2。用直径为  $0.67\text{ mm}$  的针管吸取适量的液态金属,然后调整好针管的位置放在卡座上。然后将被测金属粗糙度加工面放在针管正下方,调整针管正对被测金属片粗糙度加工面,调整焦距使成像清晰。然后将被测金属液体从注射器中缓慢地、自动地滴至被测金属粗糙度加工表面,待液滴形状稳定后,测量其直径。然后利用 Young-Laplace 法计算出接触角,为减小测量误差,移动金属片,使液滴滴在金属片上 8 个不同的位置,再进行接触角测量,对测量结果取平均值,作为被测液体与金属片的接触角的最终结果。首先选择铝板作为被测金属片,当放置在接触角测量仪上的铝板的表面粗糙度为 1.6 时,实验测得接触角为  $93.45^\circ$ ;当放置的铝板表面粗糙度为 3.2 时,接触角为  $98.3^\circ$ 。随着铝板粗糙度由 1.6 增加到 3.2,接触角也增加了  $4.85^\circ$ 。在相同的实验环境下,将被测金属由铝板变为铁板,

当放置在接触角测量仪上的铁板的表面粗糙度为 1.6 时,接触角为  $93.17^\circ$ ;当放置的铁板表面粗糙度为 3.2 时,接触角为  $103.02^\circ$ 。随着铁板粗糙度由 1.6 增加到 3.2,接触角也增加了  $9.83^\circ$ 。通过对接触角实验的总结,得出了:电极材料为铝或铁时,粗糙度由 1.6 增加到 3.2 时,接触角增加  $4^\circ \sim 10^\circ$ 。接触角测量仪拍到的接触角照片如图 5 所示。分析主要原因在于:从式(8)可以看出,粗糙度对接触电阻的影响主要体现在导电斑点的等效半径上,随着粗糙度的增加,固-液接触电阻的导电斑点面积减小,从而增大了电流的收缩程度,增加收缩电阻。实验中接触角的增加意味着金属液体在固体表面润湿性变化,液体和固体表面的相对接触面积减小,因此随着粗糙度变大接触界面接触角也变大,固-液接触电阻也变大,理论推导与实验相符。

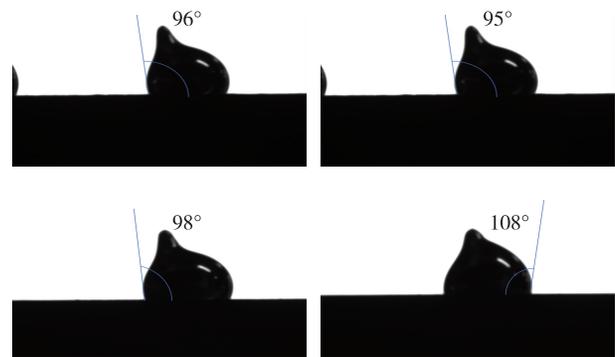


图 5 接触角测量图像

Fig. 5 Image of contact angle measurement

## 4 结论

MHD 角速度传感器的固液接触电阻是其主要的噪声源之一。本文借鉴了经典的 Holm 理论模型,推导建立了固-液接触电阻理论模型。对固-液接触电阻的影响因素进行了分析,结果如下:

1) 通过仿真软件分析了随着固液接触界面应力的变化,接触电阻受接触应力的影响显著,随着接触应力的增加,接触电阻随之减小。

2) 利用接触角测量仪对同一电极材料进行不同粗糙度下接触角的测量,随着粗糙度的增加,接触角也逐渐增大,进而分析出接触电阻变大的变化趋势,上述实验研究对后续传感器的设计具有一定指导意义。

## 参考文献

- [1] Zedini E, Kammoun A, Alouini M S. Performance of

- multibeam very high throughput satellite systems based on FSO feeder links with HPA nonlinearity[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2020, 19(9): 5908-5923.
- [2] 吴宇列, 肖定邦. 新型磁悬浮振动陀螺的设计与分析研究[J]. *导航定位与授时*, 2020, 7(3): 1-8.  
Wu Yulie, Xiao Dingbang. Design and analysis of a novel electromagnetic suspended vibratory gyroscope [J]. *Navigation Positioning and Timing*, 2020, 7(3): 1-8(in Chinese).
- [3] Ji Y, Li X F, Wu T F, et al. Quantitative analysis method of error sources in magnetohydrodynamic angular rate sensor for structure optimization[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2016, 16(11): 4345-4353.
- [4] Lu P, Fang R L, Ye Q H, et al. Numerical research on the flow fields in the power generation channel of a liquid metal magnetohydrodynamic system[J]. *ACS Omega*, 2020, 5(48):31164-31170.
- [5] Wang H Q, Watkins J G. Enhanced particle flux due to localized divertor MHD instability in DIII-D tokamak[J]. *Physics of Plasmas*, 2020, 27(2): 022504.
- [6] W Y J, Li X F, Liu F. An on-orbit dynamic calibration method for an mhd micro-angular vibration sensor using a laser interferometer[J]. *Sensors (Switzerland)*, 2019, 19(19): 4291.
- [7] Li X, Gao D, Hou B, et al. An inserted layer LBM for thermal conduction with contact resistances[J]. *Chemical Engineering Science*, 2021, 233(1): 116431.
- [8] Tazuhara S, Nagase T, Kobayashi T, et al. Understanding the influence of contact resistances on short-channel high-mobility organic transistors in linear and saturation regimes [J]. *Applied Physics Express*, 2021, 14(4): 041010.
- [9] 王大语, 王智勇, 雒贤华, 等. 滑动电接触表面粗糙度与接触电阻特性[J]. *辽宁工程技术大学学报(自然科学版)*, 2021, 40(1): 72-77.  
Wang Dayu, Wang Zhiyong, Luo Xianhua, et al. Surface roughness of sliding electrical contact and characteristics of contact resistance[J]. *Journal of Liaoning Technical University (Natural Science)*, 2021, 40(1): 72-77(in Chinese).
- [10] 刘艳娇, 夏琦, 李然, 等. 液态金属磁流体发电机中固液金属界面接触电阻的研究[J]. *电测与仪表*, 2014, 51(22): 110-114.  
Liu Yanjiao, Xia Qi, Li Ran, et al. Research on the contact resistance on the solid-liquid metal interface of a LMMHD generator[J]. *Electrical Measurement and Instrumentation*, 2014, 51(22): 110-114(in Chinese).
- [11] 李醒飞, 陈进宇, 夏赣民, 等. 研究固体电极氧化膜对液固接触电阻影响的装置及方法[P]. CN110470908A, 2019-11-19.  
Li Xingfei, Chen Jinyu, Xia Ganmin, et al. Device and method for studying the effect of solid electrode oxide film on liquid-solid contact resistance [P]. CN110470908A, 2019-11-19(in Chinese).
- [12] Dutta I, Delaney L, Cleveland B, et al. Electric-current-induced liquid Al deposition, reaction, and flow on Cu rails at rail-armature contacts in railguns [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2009, 45(1): 272-277.
- [13] 李继伟, 施明哲, 刘子莲. 继电器触点接触电阻偏大的失效机理研究[J]. *电子产品可靠性与环境试验*, 2009, 27(s1): 117-121.  
Li Jiwei, Shi Mingzhe, Liu Zilian. The study of failure mechanism of contact resistance enhancement of relay contact[J]. *Electronic Product Reliability and Environmental Testing*, 2009, 27(s1): 117-121(in Chinese).
- [14] 汪日超, 张伟, 徐佳济, 等. 电连接器接触件结构分析与结构参数优化设计[J]. *机械制造与自动化*, 2021, 50(3): 136-139.  
Wang Richao, Zhang Wei, Xu Jiayi, et al. Structural analysis of electrical connector contacts and optimization design of structural parameters[J]. *Machinery Manufacturing and Automation*, 2021, 50(3): 136-139(in Chinese).
- [15] 张超, 任万滨. 连续通电条件下触点接触电阻劣化的初步分析[J]. *电工材料*, 2021(2): 24-27.  
Zhang Chao, Ren Wanbin. Preliminary study on the contact resistance deterioration under the continuous load current [J]. *Electrical Engineering Materials*, 2021(2): 24-27(in Chinese).

(编辑:李瑾)