



ISSN 1006-2467

CN 31-1466/U

上海交通大学 JOURNAL OF 学报 SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY



第51卷 第8期
Vol.51 No.8

第45卷
2018年6期

上海交通大学学报
JOURNAL OF XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY

Vol. 45
June 2018

大藤峡人字闸门智能监控 MEMS 传感器

段力, 2018工导狗

上海交通大学工程实验班

作者(用签名的):

朱跃 苗雨润 伍致宇
徐鸿 张澳 段力 熊逸芸 余经舟 向思勐
黄翌栩 张云骥 张睿桐 邱致远 王润绮 赖俊宇
杨明杰 陈沛东 魏皓 林嘉豪 康鑫宜 吴方舟
王凯源 李泽 朱浩然 隋思哲 赵星文 谢禹琳
李天童 石炜昂 王浩然 赵欢烟 颜物 周云

9 771006 246174

SHANGHAI JIAO TONG DAXUE XUEBAO

2018年工导班

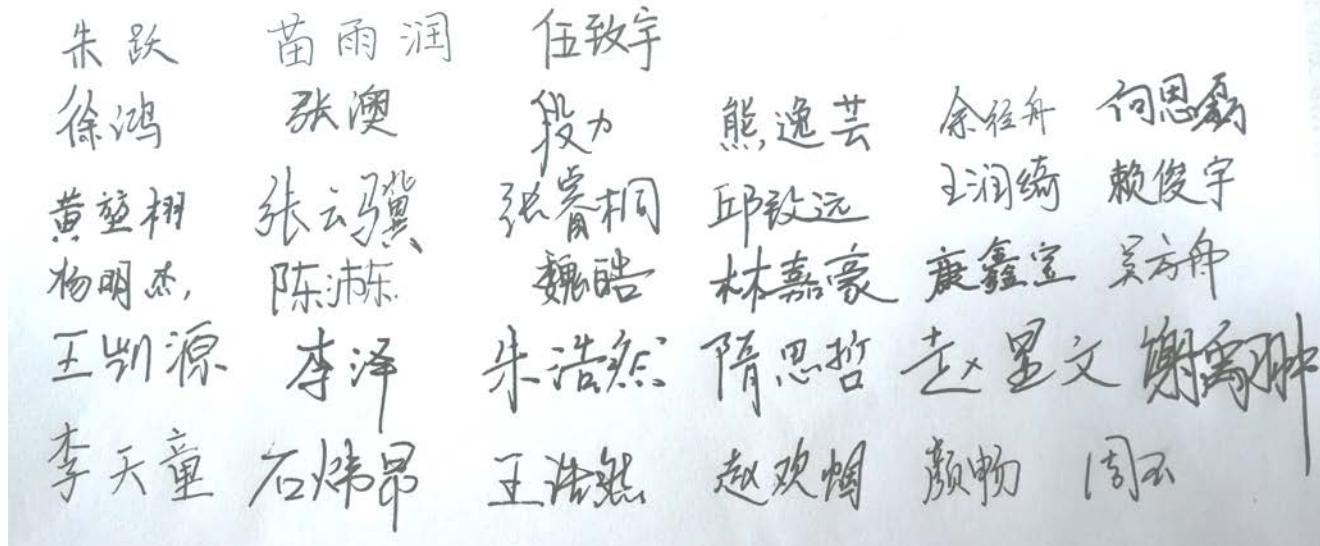


06/02/2016 10:53:03

大藤峡人字闸门智能监控 MEMS 传感器

段力, 2018工导狗
上海交通大学工程实验班

作者(用签名的):



摘要

大藤峡人字闸门是水利设施中重要的结构,而底枢轴承是整个人字闸门最底部的支撑构件,当磨损量达到一定程度后,底枢轴承就可能出现问题进而可能会影响到整个人字闸门。并且深水的恶劣条件下,对底枢轴承磨损量进行直接监测非常困难。在本工程项目当中,设计了电阻型磨损量传感器,并对磨损电阻传感器的工作性能和状态进行了全方位的研究。MEMS 磨损量电阻传感器利用薄膜电阻会随其表面磨损量的增加而增大的基本原理检测其薄膜电阻随宽度的变化,藉此检测底枢轴承磨损情况。通过大量的计算机仿真实验及其磨损与电阻的实验,研究了不同工作状态下的磨损量监控电阻传感器和磨损参量之间的关系。

关键词: 大藤峡; 传感器; 磨损量; 智能化;

这届的工程学导论班,一共33位同学,每一个人负责写一部分内容,比如下列分工所示:

每个人的分工

1. 课题的背景

关于大藤峡 李泽
关于大藤峡闸门 向思磊
关于磨损量传感器 邱致远

2. 传感器的原理

磨损电阻的变化 王浩然
磨损量电阻器的两种工作方式 余径舟

3. 传感器制造与实验过程

环氧树脂及其样品的形成过程 颜畅
关于磨损的实验 李天童
传感器制造的结构 周玉
王润绮 关于仿真的物理模型和物理过程

4. 传感器的表征和测量结果

磨损量传感器的测量过程 康鑫宝
测量结果 赵欢帽

5. MEMS 传感器仿真

陈沛东 磨损量电阻和电阻率、磨损宽度的关系
伍致宇,
张云骥,
赖俊宇,
林嘉豪,
吴方舟

谢禹翀 开路情况和短路情况对磨损量电阻之影响的比较
分工情况
魏皓: 短路的两个 n1 0.5 两维 和 ss 500 两维
王凯源: 开路 n10.5 两维
朱浩然: 开路 ss500 两维
谢禹翀: 开路 ss 2000 和 n1 2 3 维

朱跃 不同焊点的位置和大小对于磨损量电阻的影响
苗雨润,

石炜昂,
张澳,
张博闻

隋思哲 粗糙度对于磨损量电阻的影响

杨明杰:粗糙度大小及深度对电流测量的影响(三维制图)

徐鸿:粗糙度深度对电流测量影响规律的探究(二维制图)

赵显文:粗糙度大小(cc)对电流测量影响规律的探究(二维制图)

张睿桐:粗糙度深度对磨损度测量的影响

隋思哲(组长):粗糙度大小(cc)对磨损度测量的影响

下边是每一个人的内容的组合

第45卷
2018年6期

上海交通大学学报
JOURNAL OF XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY

Vol. 45
June 2018

课题的背景

关于大藤峡水电站 李泽

水利工程是用于控制和调配自然界的地表水和地下水，达到除害兴利目的而修建的工程。也称为水工程。水是人类生产和生活必不可少的宝贵资源，但其自然存在的状态并不完全符合人类的需要。只有修建水利工程，才能控制水流，防止洪涝灾害，并进行水量的调节和分配，以满足人民生活和生产对水资源的需要。水利工程需要修建坝、堤、溢洪道、水闸、进水口、渠道、渡漕、筏道、鱼道等不同类型的水工建筑物，以实现其目标。水利事业的发展与人类文明有着密切的关系。中国的水利事业源远流长。水电站，是能将水能转换为电能的综合工程设施。三峡水电站是世界上规模最大的水电站，也是中国有史以来建设最大型的工程项目。本文介绍的大藤峡水利枢纽是南盘江红水河水电基地综合利用规划 10 个梯级中的最末一级，上游为桥巩水电站。坝址位于广西桂平市黔江彩虹桥上游 6.6km 的峡谷出口处，是国务院批准的珠江流域防洪控制性枢纽工程，也是珠江—西江经济带和“西江亿吨黄金水道”基础设施建设的标志性工程，是两广合作、桂澳合作的重大工程。2014 年 11 月 15 日，大藤峡水利枢纽工程建设动员大会在桂平市召开，标志着这个西江黄金水道的控制性重大工程进入全面建设阶段。大藤峡水利枢纽工程可充分开发利用梯级水能资源，向电网提供清洁能源，缓解电力供需矛盾，为西电东送创造条件，促进地区经济社会发展。

向思磊 大藤峡人字闸门

1 人字闸门简介

人字闸门是船闸闸门中最常采用的一种型式，它是由左右两扇门叶及支承门叶的部件所组成。闸门开启时，门叶绕顶、底枢轴转动，打开后隐藏在门龛中。闸门全关闭时，其水平投影呈人字状，故而得名。

1.1 人字闸门结构组成

人字闸门的结构由门扇承重结构、支承部件等部分组成。其中门扇承重结构又由挡水面板、次梁、主梁、隔板、背拉杆、门轴柱以及斜接柱等组成。

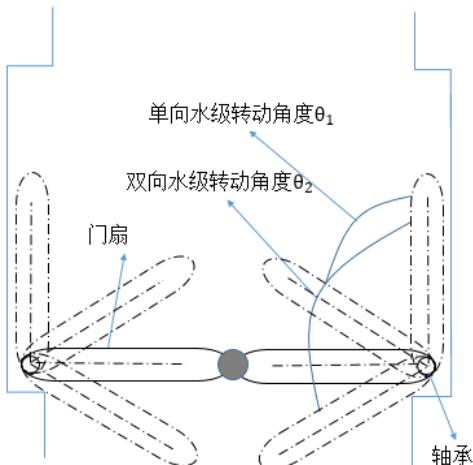
人字闸门的主梁是门扇的主要受力构件，通常都采用有利于加强门扇的刚度的实腹式焊接工字形截面。

背拉杆是对人字闸门的安全运转起着重要的作用的构件。

斜接柱与门轴柱联结主梁，并与顶主梁、底主梁一起构成了门扇的外框，以使门扇有足够的刚度。门轴柱的上下端分别设置顶、底枢轴，门扇的启闭则绕顶枢-底枢中心连线转动。

底枢轴承是作为整个人字闸门最底部的支撑构件，它的可靠性影响整个人字闸门，更影响着整个大坝的安全。

人字闸门示意图



人字闸门水平截面简图

2. 大藤峡人字闸门简介

大藤峡水利枢纽设千吨级船闸一座。船闸采用一级过闸方案，它的闸室有效尺度：长×宽×最小水深为 $190 \times 23 \times 4$ 米。分有上闸首和下闸首，下闸首采用人字闸门，门顶标高 61.8 米，人字闸门的拱轴线与下闸首横轴线的水平夹角为 22.5 度

大藤峡水利枢纽船闸人字门，它高 42.4m，但宽仅 13.75m，高宽比大于 3。它比我国著名的三峡永久船闸上游一级闸首的人字闸门(高 39.75m)，还高 2.65m。

3. 人字闸门监测

3.1 要点难点分析

3.1.1 监测系统的防护

监测系统设备靠近水源，空气潮湿，所以必须要对监测仪器采取防潮保护措施，采用防水防尘机箱对监测仪器进行防护。采集仪、计算机、通讯设备等放置在温湿度受控的室内环境，从而提高系统的耐久性。

3.1.2 传感器、防护材料、测点的选择

该项目对传感器的防水性有很高的要求，选择可在水下工作的传感器，底枢防护等级需满足最大水深 50 米下长期可靠工作的要求。

该项目对防护材料的耐久性、耐候性有很高的要求，施工时应选择合适的防护胶等材料。

在选择测点时要考虑传感器的可维护性，位于闸门中下部及底枢的传感器安装后 5-10 年无法维护。

3.1.3 底枢轴承的监测

人字闸门是水利设施中的重要结构，保障航运畅通的同时还能防洪抗旱，关乎民生大计。而底枢轴承作为人字闸门中的重要部件，可谓重中之重，所以在人字闸门整个监测系统设计上，需要具备底枢轴承监测的经验与能力。

3.2 监测重点及可行方案

底枢轴承是作为整个人字闸门最底部的支撑构件，其服役的工况极为恶劣，并且它的可靠性影响整个人字闸门，更影响着整个大坝的安全。而且在重载情况下工作的底枢轴承的磨损量是十分大的。而当磨损量达到一定程度后，底枢轴承就可能出现问题进而可能会影响到整个人字闸门。并且恶劣的工作条件，对底枢轴承进行直接监测是比较困难的。

基于上述描述，利用在底枢轴承上面布置一个磨损量传感器来实时监测底枢轴承的运行情况不失为一个可行的方案。

邱致远 课题的背景-磨损量传感器

磨损量是表征摩擦学系统的重要参量。摩擦学系统（在本课题中为大藤峡闸门磨损）是时变系统，也就是说，材料的摩擦学性质并不是材料的固有特性，而是所在的系统条件下的系统特性，这给摩擦学参量尤其是磨损量的测量带来诸多不便。传统的磨损量测量方法，是测量某个时间历程内磨损后，试件的线度（由此推算出体积）、重量与磨损前的量的差值，即为磨损量。但从系统观点看，在测量时，摩擦学系统已发生了变化，所得的摩擦学性质与实际磨损时并非处于同一个系统，而目前尚无此种系统转化的知识，这显然造成了摩擦学问题解决的难度。

因此，正在探索的磨损量的测量方法是传感器测量法，这样的测量法能实时地检测大藤峡闸门的磨损情况。

例如，利用位移传感器测量在摩擦过程中因磨损造成的相对位移。这一方法的基准是摩擦副之一的摩擦面，设其磨损量很小或没有磨损，则产生的位移被看作另一试样的磨损，即一对摩擦副磨损量的总和。

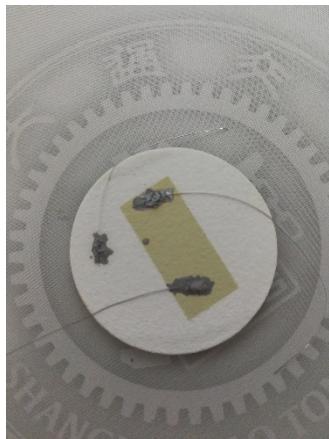
另一种方案是采用薄膜磨损传感器。利用真空镀膜技术，将电阻率大的 Ni—Cr 等材料镀在事先镀有 Si 等绝缘膜的金属基材上。其形状是用掩模刻蚀而成的。传感器测量运动的磁带对磁头造成的磨损，取得了较好的结果。磨损改变着传感器的宽度，而这宽度与电阻值有着一一对应的关系，经实验，电阻率变化和表面粗糙度成近似线性关系，因此在摩擦过程中根据磨损传感器的电阻值的变化可实时在线地得到磨损量。

【董光能, 谢友柏, 虞烈. 磨损量的传感器测量[J]. 润滑与密封, 1998(2):38-41.】

研究表明纳米薄膜材料的电阻随着晶粒尺寸的减少而增大。电阻与晶粒尺寸的关系一般可以从以下的观点来加以理解：传导电子同时受到晶粒内部的电子散射，可以看作一定长度和高度的势垒的晶界散射，也就是说纳米薄膜材料在电学性质上表现出的复杂性来源于小尺寸的晶粒和大量存在的晶界。

【王晶, 余花娃, 田来科. 磁控溅射制备纳米 Ni—Al 薄膜的表面粗糙度和电阻率的研究[C]// 陕西省物理学会 2008 年学术年会. 2008】

金属薄膜电阻率与表面粗糙度的关系。在垂直于薄膜表面方向上颗粒尺寸起伏可达到 $50\sim75\text{ nm}$, 这种尺寸范围与导电电子的平均自由程很接近, 电子与薄膜表面的碰撞就不能够忽略。表面粗糙度正是对薄膜的这种表面生长微观结构的综合反映, 表面高低起伏越大, 粗糙度值就越大, 电子与之碰撞的几率就越多, 在电场方向降低的传输速度就加快, 导致薄膜电导率下降, 相应电阻率升高。也就是说, 表面粗糙度越大, 薄膜电阻率将增大。它虽然不是影响薄膜电阻率的决定因素, 但在表观上却与电阻率有很好的对应关系。薄膜电阻率是否与表面粗糙度有本质联系, 其物理内涵及其相关程度有待进一步研究。【唐武, 邓龙江, 徐可为, 等. 金属薄膜电阻率与表面粗糙度、残余应力的关系[J]. 稀有金属材料与工程, 2008, 37(4):617-620】



第45卷
2018年6期

上海交通大学学报
JOURNAL OF XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY

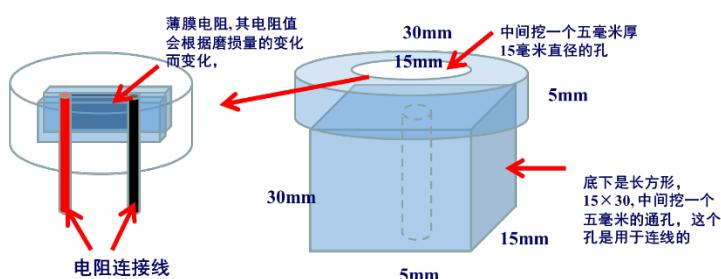
Vol. 45
June 2018

传感器的原理

磨损度传感器测量原理



要加工的磨损试验件



原理是

AL 薄膜电阻率与表面粗糙度的关系（薄膜电阻 与 粗糙度）。

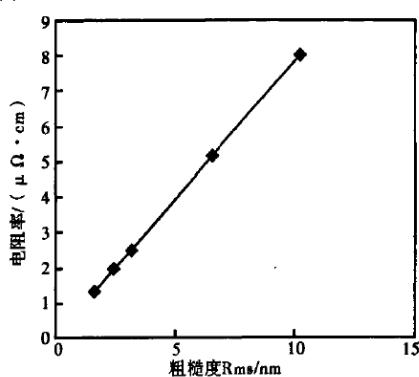
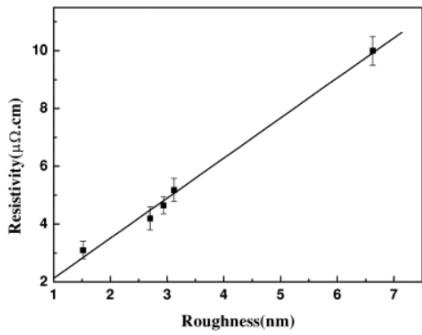


图 4 Ni-Al 薄膜的电阻率随表面粗糙度的变化

Figure 1 【王晶, 余花娃, 田来科. 磁控溅射制备纳米 Ni—Al 薄膜的表面粗糙度和电阻率的研究[C]// 陕西省物理学会 2008 年学术年会. 2008.】



[Download full-size image](#)

Fig. 5. The resistivity versus surface roughness.

Figure 2 Wu T, Xu K, Ping W, et al. Surface roughness and resistivity of Au film on Si-(111) substrate[J].

Microelectronic Engineering, 2003, 66(1):445-450.

可见，随着薄膜表面粗糙度增加，在试验范围内，电阻率几乎呈线性增长。由此可知，至少在表观上电阻率与表面粗糙度有关。

所以对于金属一个 10mm 长 1mm 宽 100nm 厚的金属条的电阻~10ohm，如下图所示。而当表面的粗糙度达到 100 μ m 左右的时候这个电阻值可以是 10-100K Ω（见里边的截图）。

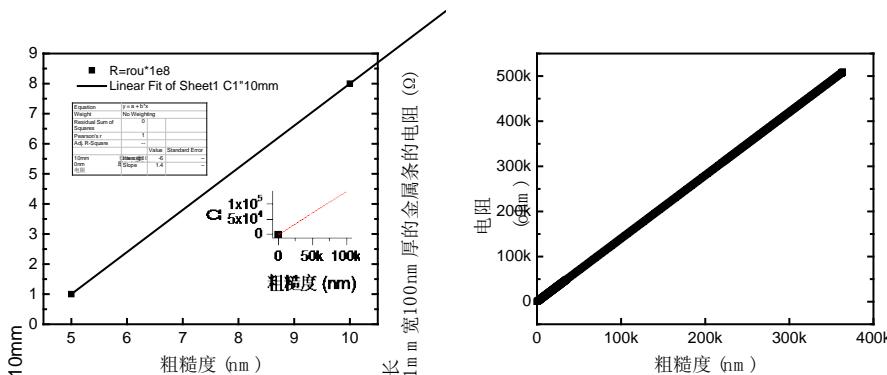


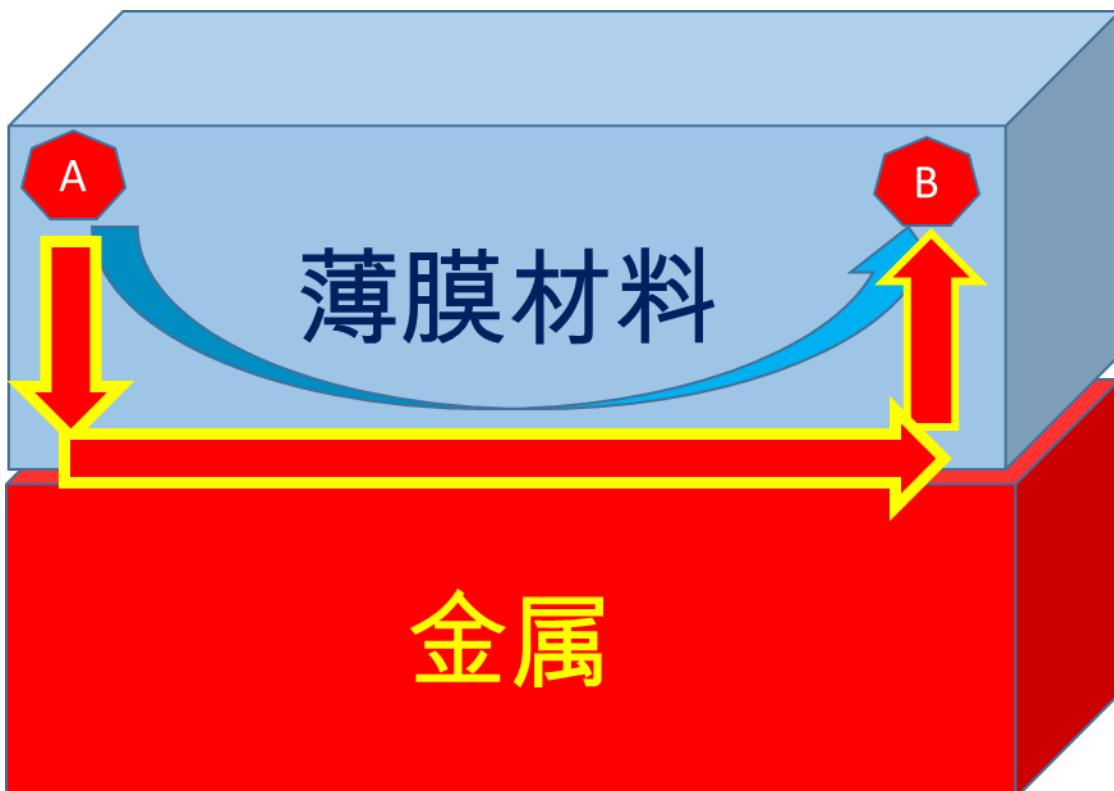
Figure 3 如果金属薄膜的电阻率随表面粗糙度是线性变化的话，推演到 100 μ m 的粗糙度，其金属薄膜的电阻在 1K 以上

金属薄膜电阻率与表面粗糙度的关系。在垂直于薄膜表面方向上颗粒尺寸起伏可达到 50~75 nm，这种尺寸范围与导电电子的平均自由程很接近，电子与薄膜表面的碰撞就不能够忽略。表面粗糙度正是对薄膜的这种表面生长微观结构的综合反映，表面高低起伏越大，粗糙度值就越大，电子与之碰撞的几率就越多，在电场方向降低的传输速度就加快，导致薄膜电导率下降，相应电阻率升高。也就是说，表面粗糙度越大，薄膜电阻率将增大。它虽然不是影响薄膜电阻率的决定因素，但在表观上却与电阻率有很好的对应关系。薄膜电阻率是否与表面粗糙度有本质联系，其物理内涵及其相关程度有待进一步研究。【Tseng W T, Wang Y L, Niu J.

Microstructure-related resistivity change after chemical-mechanical polish of Al and W thin films[J]. Thin Solid Films, 2000, 370(1):96-100.】【王晶, 余花娃, 田来科. 磁控溅射制备纳米 Ni—Al 薄膜的表面粗糙度和电阻率的研究[C]// 陕西省物理学会 2008 年学术年会. 2008.】【唐武, 邓龙江, 徐可为, 等. 金属薄膜电阻率与表面粗糙度、残余应力的关系[J]. 稀有金属材料与工程, 2008, 37(4):617-620.】

余径舟 磨损量传感器的两种工作方式

磨损量传感器在短路和开路这两种情况下会有两种不同的工作方式。开路的情况是，在磨损的当中，由于两个金属磨损之间的空隙，使得ab点没有联通，这个时候的电阻值应该是偏大；短路的情况指的是，在磨损器在磨损的过程当中，由于磨损的界面也是金属，这层金属，会使两端产生短路，由于薄膜材料的电阻率比较高，金属薄膜的电阻率比较低，所以短路的电阻，会比开路的电阻要大。我们用计算机仿真的原理，仿真的这两种情况具体的仿真内容。具体情况参阅下边相关的内容。



第45卷
2018年6期

上海交通大学学报
JOURNAL OF XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY

Vol. 45
June 2018

传感器制造与实验过程

环氧树脂及其样品的形成过程 (颜畅)

环氧树脂

环氧树脂(通称为 epoxy resin)，是一种环氧低聚物(epoxy oligomer)，与固化剂(hardener)反应可形成三维网状的热固性塑料。环氧树脂通常是在呈液体的状态下，经常温或加热进行固化，达到最终的使用目的；作为一种液态体系的环氧树脂具有在固化反应过程中收缩率小，其固化物的粘接性、耐热性，耐化学药品性以及机械性能、电气性能优良的特点，是热固性树脂中应用量较大的一个品种。

【陈平, 刘胜平, 王德中. 环氧树脂及其应用[M]. 化学工业出版社, 2014.】

样品的形成过程

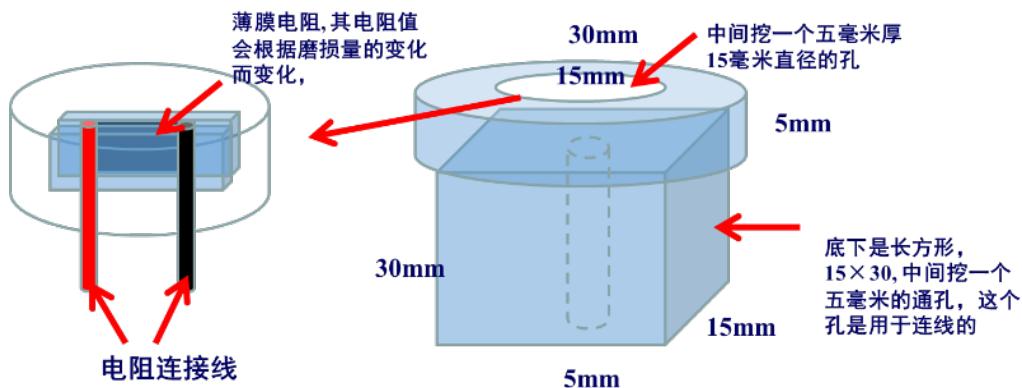
环氧树脂的固化过程：固化剂和树脂的比例是 1:4，是重量比，倒出 16 克环氧树脂，70 度烘两分钟，然后加入 4g 的固化剂，顺时针搅拌，在真空中抽气，变透明之后，然后用吸管倒入模具。在此之前，用固定的胶膜，将传感器叶片固定在模具中，然后等十个小时之后才会固化完毕，并取出。

要加工的磨损试验件

磨损试验件由一个圆环和一个长方体构成。圆环参数：外圆直径 $D=30\text{mm}$ ，内圆直径 $d=15\text{mm}$ ，厚度 5mm；长方体参数：高 30mm，长 30mm，宽 15mm，其正中有一个直径 5mm 的通孔，用于连接导线。圆环中间的孔洞置有一个薄膜电阻，其电阻值会根据磨损量的变化而变化，连接电阻的导线从长方体的通孔连出。

示意图如下。

要加工的磨损试验件



参考资料

环氧树脂 与 固化

剂 <https://detail.tmall.com/item.htm?spm=a230r.1.14.114.7903592a84fYxG&id=547619196468&ns=1&abbucket=1>

环氧树

脂 http://xueshu.baidu.com/s?wd=%E7%8E%AF%E6%B0%A7%E6%A0%91%E8%84%82&tn=SE_baiduxueshu_c1gjeupa&cl=3&ie=utf-8&bs=A+Novel+Bulk+Acoustic+Wave+Resonator+for+Filters+and+Sensors+Applications&f=8&rsv_bp=1&rsv_sug2=0&sc_f_para=sc_tasktype%3D%7BfirstSimpleSearch%7D

李天童-实验原理

本实验中，我们运用 COMSOL Multiphysics(简称 COMSOL) 的软件建立薄膜电阻的模型，改变薄膜电阻的磨损量和位置，测量薄膜电阻阻值的改变情况，寻找对应关系，应用到监测大藤峡水电站人字闸门磨损量 MEMS 传感器中，便于检测大藤峡人字闸门实时磨损量。

通过查询资料，我们可以知道金属薄膜电阻率与表面粗糙度的关系。在垂直于薄膜表面方向上颗粒尺寸起伏可达到 $50\sim75\text{ nm}$ ，这种尺寸范围与导电电子的平均自由程很接近，电子与薄膜表面的碰撞就不能够忽略。表面粗糙度正是对薄膜的这种表面生长微观结构的综合反映，表面高低起伏越大，粗糙度值就越大，电子与之碰撞的几率就越多，在电场方向降低的传输速度就加快，导致薄膜电导率下降，相应电阻率升高。也就是说，表面粗糙度越大，薄膜电阻率将增大。

具体仿真实验中，我们通过改变模型的长宽和位置模拟出电阻变化的情况，在课堂模拟实验中，用砂纸打磨薄膜电阻，一段时间后使用游标卡尺测量薄膜电阻的长宽，使用万用表测量薄膜电阻组值的变化情况，探究薄膜电阻磨损量与其电阻变化的关系。

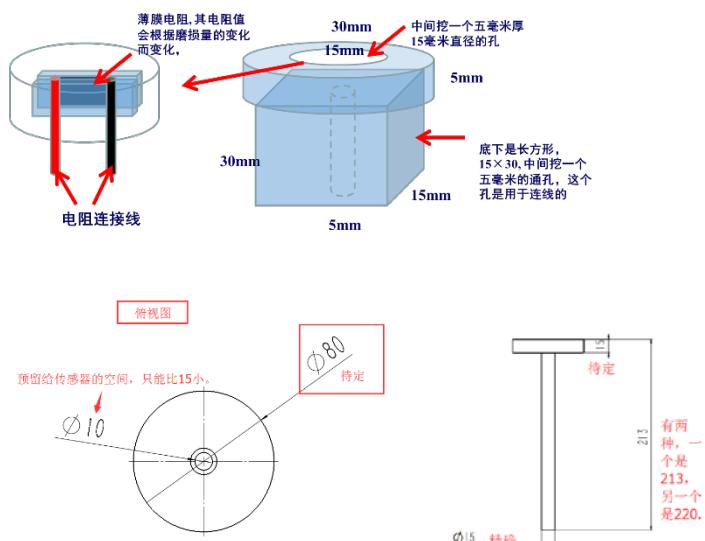


周玉 磨损度传感器制造的结构

传感器核心部位利用环氧树脂将薄膜电阻和金属柱状导电材料结合，位于整体的底部，导线接通传感器薄膜电阻，通过中部呈空心状的柱状金属材料延伸至上端，再与外部的检测仪器连接，仪器通过测量各种电量的变化，达到检测传感器磨损程度的目的。

传感器从下往上分别为核心部位，金属长方体，金属圆柱体。

要加工的磨损试验件



核心部位的中心是内径为 15mm，外径为 30mm，高为 5mm 的金属圆环，圆环中部为呈矩形的薄膜电阻。考虑到薄膜电阻需要牢固的固定在圆环中间，需要一种收缩性小，且黏附力强的材料，根据查找的资料，环氧树脂具有和要求相符的优良性能。
1) 黏附力强 由于环氧树脂中固有的极性羟基和醚键的存在，其对各种物质具有很强的黏附性
2) 收缩率低 环氧树脂和所用的固化剂的反应是通过直接合成立进行的，没有水或其他挥发性副产品放出，环氧树脂与酚醛树脂、聚酯树脂相比，在其固化过程中只显示出很低的收缩性（小于 2%）。
3) 力学性能 由于环氧树脂含有较多的极性基团，固化后分子结构较为紧密，所以固化后的环氧树脂体系具有优良的力学性能。
4) 化学稳定性 固化后的环氧树脂体系具有优良的耐碱性、耐酸性和耐溶剂性。
5) 电绝缘性能 固化后的环氧树脂体系在宽广的频率和温度范围内具有良好的电绝缘性能。它们是一种具有高介电性能、耐表面漏电、耐电弧的优良绝缘材料。
(7) 尺寸稳定性 上述的许多性能的综合使固化的环氧树脂体系具有突出的尺寸稳定性和耐久性。
(8) 耐霉性 固化的环氧树脂体系耐大多数霉菌，可以在苛刻的热带条件下使用。所以金属远环与薄膜电阻之间的空隙选择用环氧树脂来填充。连接薄膜电阻的导线位于电阻的两端，将其导通。

金属长方体尺寸为 5*15*30mm，为中空结构，连接薄膜电阻的导线将通过中部的小孔。

金属圆柱体同样为中空结构，长度为（待定），金属导线从小孔中通过延伸至上方。



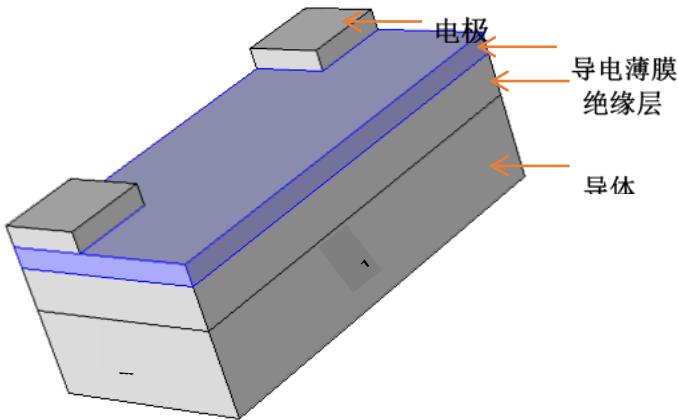
仿真的物理模型和物理过程 王润绮

COMSOL Multiphysics 软件简称 COMSOL，是由 1986 年成立于瑞典的 COMSOL 集团开发的一款多物理场数值仿真软件，具有强大的物理现象模拟、数值计算及偏微分方程求解功能，广泛应用于工程计算和科学研究领域。COMSOL 数值仿真的主要原理是对某一问题的控制偏微分方程进行离散和分片插值处理，得到差分方程，通过数值算法得到数值解。COMSOL 自带了很多模块，涵盖了热传导、化学化工、结构力学等多方面的问题，对求解一般的物理问题十分方便，使用者只需选定相应模块，通过几何建模、材料定义、边界条件设置、网格划分以及最终求解、后处理等步骤就可以得到自己想要的结果。

以下是运用 COMSOL 的整个过程，首先新建三维模型，然后创建几何、指定材料、定义物理场、运行仿真、最后对结果进行处理。

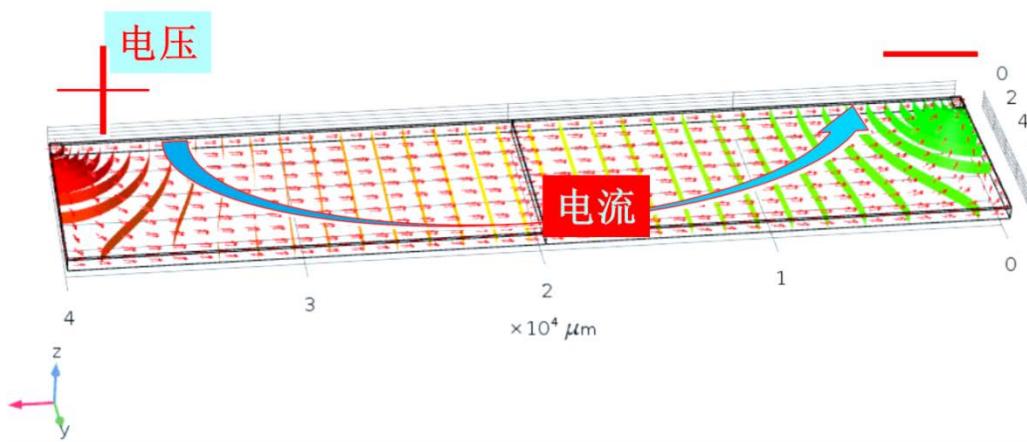
几何结构和材料描述

下图展示了薄膜电阻的几何结构。在 COMSOL 软件中新建模型，构建几何图形，添加材料。薄膜电阻最下面是一层导电材料做成的导体，为长方体，设其宽为 w ，长为 1，定为全局参数。中间是一层绝缘材料，其上为一层导电薄膜，由图可知，它们的长宽均与最下层导体保持一致。最上面是两个由金属材料做成的电极。随后，设置好所有材料需要的属性。模型中使用的所有材料及材料属性都是从 MEMS 模块材料库中获得的。



薄膜电阻的 3D 结构模型图

物理场设置与研究的描述



完成几何体的创建和材料的选定后，添加电流物理场。随后添加电势，为两个电极添加不同的电势，使得它们之间形成电压。参数化扫描 w ，当 w 减小，电阻 R 增大。

传感器的表征 和测量结果

磨损量传感器的测量过程（康鑫宝）

1 仿真实验

1.1 磨损量传感器的结构与模型

磨损量传感器仿真模型采用柱状镶嵌结构，如图 1 所示。其中，被嵌入体为耐磨材料，嵌入体为导电材料。在本文的仿真实验中，耐磨材料与导电材料如下图所示：

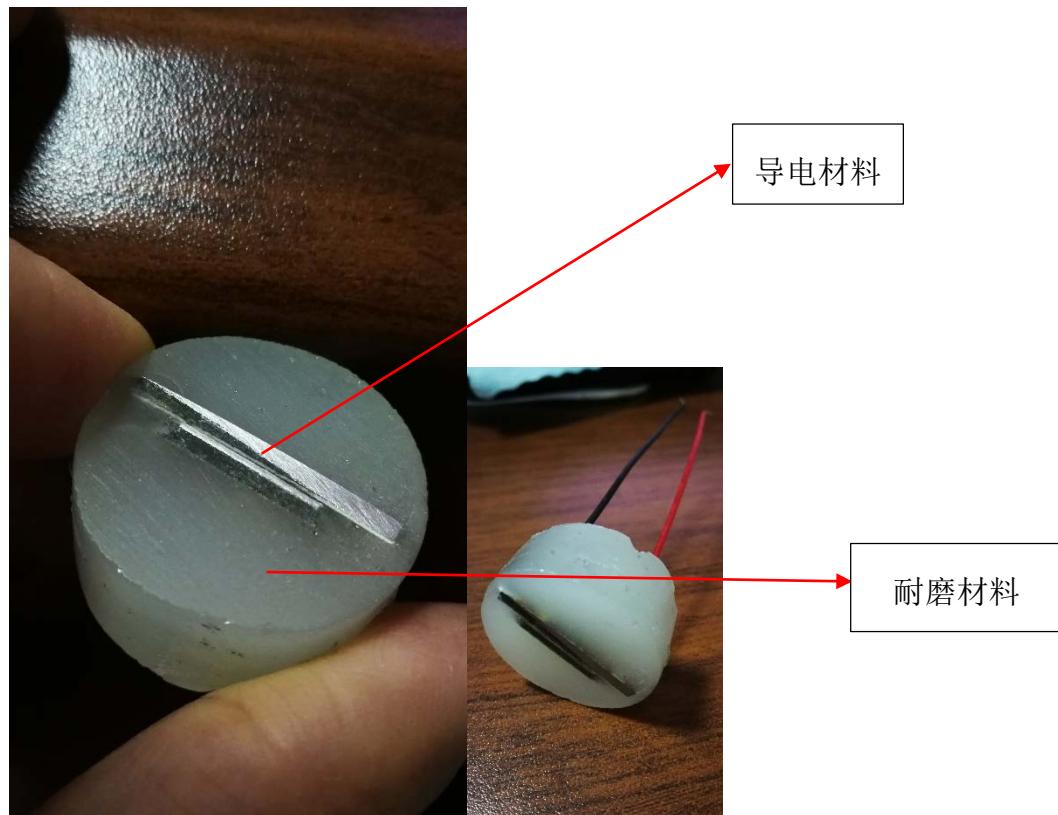
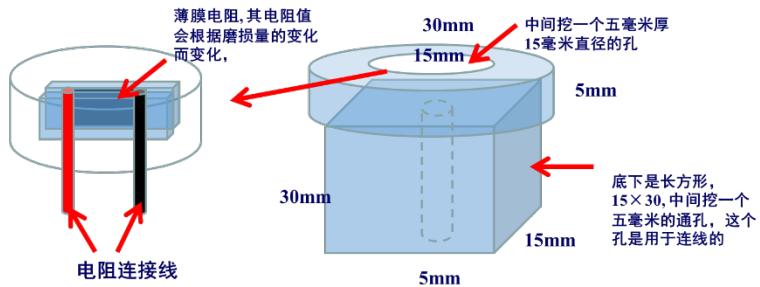


图 1

理论结构图如下图所示：

要加工的磨损试验件



1.2 仿真方法

考虑到磨损量传感器所处的液体环境，包括温度、压强和离子浓度，采用数值分析的方式进行仿真。

1.3 测量过程

本实验采用如下方法模拟处于液体环境中的磨损量传感器的腐蚀磨损：

- (1) 用砂纸打磨传感器模拟其磨损过程；
- (2) 用可腐蚀耐磨材料的化学试剂涂抹于砂纸上模拟传感器所处的液体环境中的腐蚀；

连续打磨 4h，每 10min 测量 3 次磨损量传感器的宽度与电阻，求取平均值，记录数据。



赵欢惆-实验数据和模拟数据比较

为验证实验结果的合理性，我们将实验所测得的实验数据和 COMSOL 软件模拟得到的数据进行比较。由于 COMSOL 软件获得的结果为电流，所以我们将其所得的电阻取倒数，即假设外加电压 1V，所得倒数即为实验所得的电流值。我们通过改变模拟中的参数，如电导率、导电膜厚度，得到多组模拟数据。之后我们用 Origin 软件，对模拟数据和实验数据进行线性拟合，得到如下的结果：

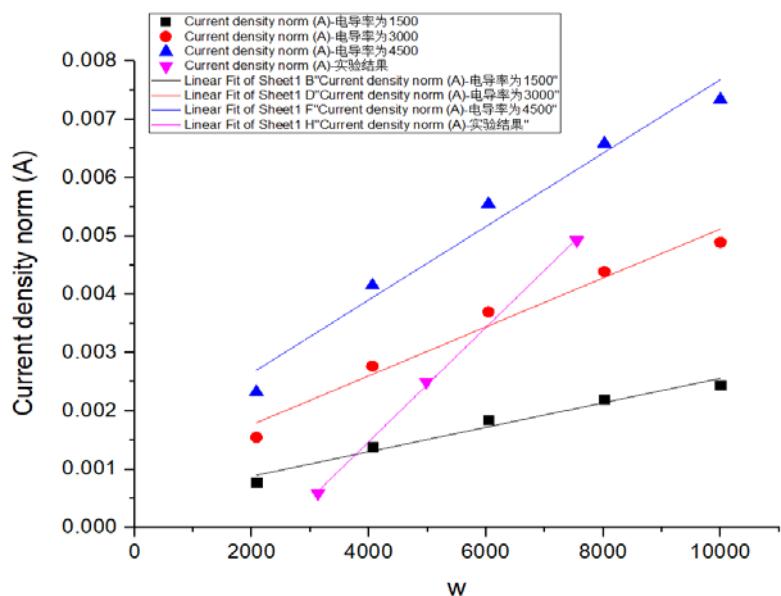


图 1、电流与电导率的关系图

如图 1 所示，我们控制其它量不变，仅改变电导率。我们可以发现随着电导率的增大，模拟结果的线性拟合线与实验结果的线性拟合线的斜率不断接近，但是截距的差距会增大。

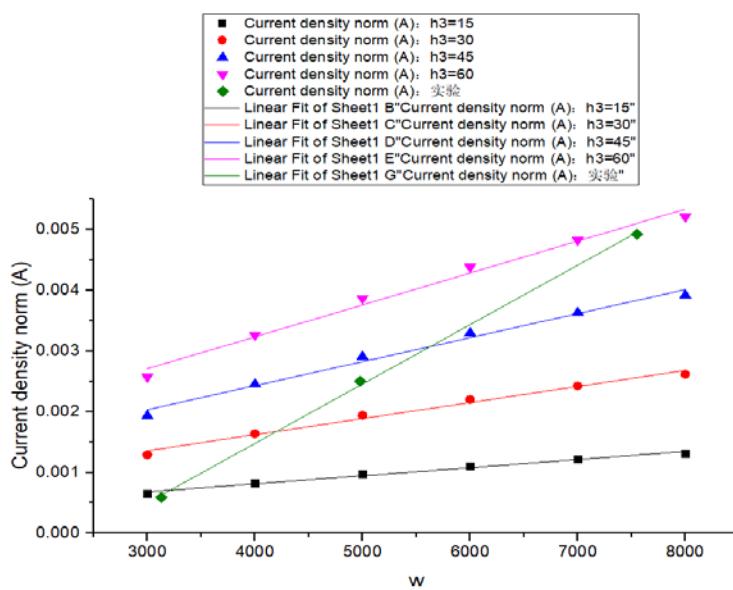


图 2、电流与导电膜厚度的关系图

如图 2 所示，我们控制其它量不变，仅改变导电膜厚度。我们发现实验所得到的数据结果均处在模拟出来的数据集内，但是线性拟合线之间的斜率差距还是有很多。

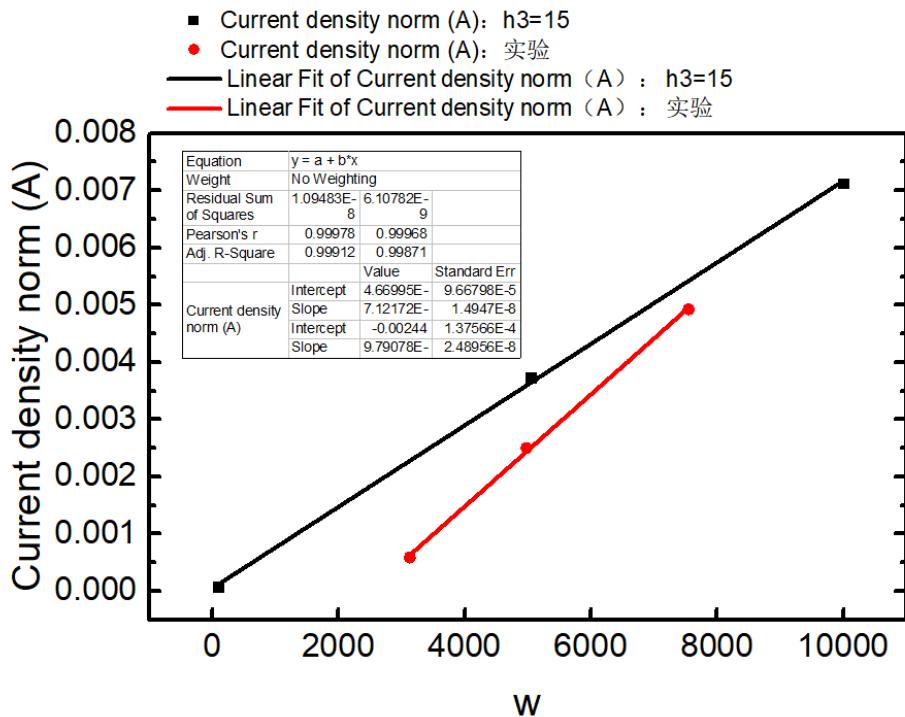


图 3、模拟与实验结果相近的结果图

如图 3 所示，我们通过不断改变相关的参数，最终在导电率取 20000，导电膜厚度取 15 时得到如上的两条拟合曲线。两条拟合曲线已比较贴近，由此可得出实验结果的合理性。下一步我们将收集更多的实验数据，以此来获得更符合模拟结果的拟合曲线。

第45卷
2018年6期

上海交通大学学报
JOURNAL OF XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY

Vol. 45
June 2018

MEMS 传感器仿真

粗糙度大小(cc)对磨损度测量的影响： 隋思哲(组长) 杨明杰 徐鸿 赵显文 张睿桐

粗糙度小组结果汇总 (隋思哲、徐鸿、赵显文、杨明杰、张睿桐)

综述

考虑到导电材料可能对传感器的结果输出产生影响，我们利用 COMSOL 仿真软件，对导电材料不同粗糙度情况进行模拟。

模型设计

为了简化模型制作流程及方便最终结果的计算，在模型的构建时，将不规则锯齿形粗糙度统一视为相同大小的、嵌入在导电层中的、截面为正方形的立方体。通过改变正方形边长（cc）以及立方体的高度（h6），实现对不同粗糙度状况的模拟。通过 COMSOL 内置的面积分函数对中截面积分后求出电阻。

参数设计及模型构建流程

模型中，w 代表导体材料的宽度，cc 代表粗糙度方块的大小，h6 代表粗糙度的深度。通过 COMSOL 内部 array 功能，对构造好的粗糙度模板进行复制，形成粗糙度阵列。对导电层模型进行布尔运算，形成最终的模型。其中，粗糙度的材质设置为空气，以符合现实情况。

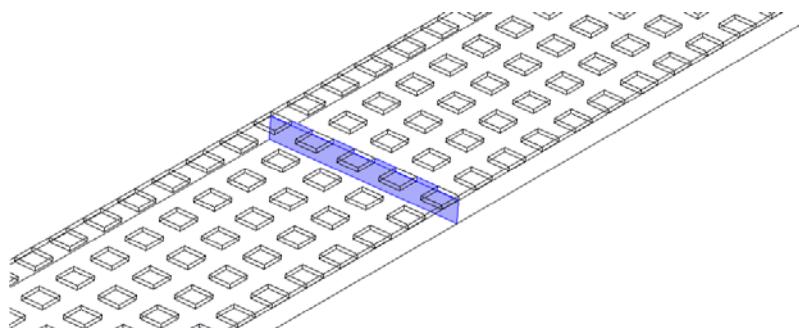


Fig-0.2.1 面积分积分对象 (图示中的方块即为粗糙度)

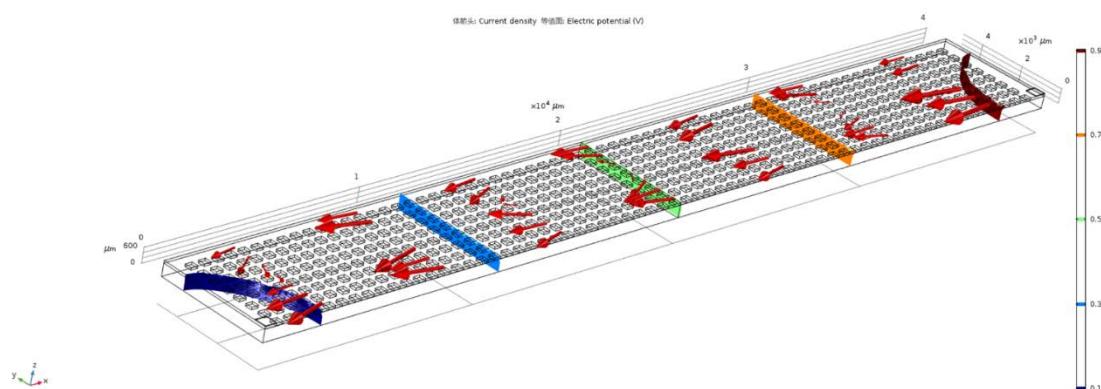


Fig-0.2.2 结算结果的呈现

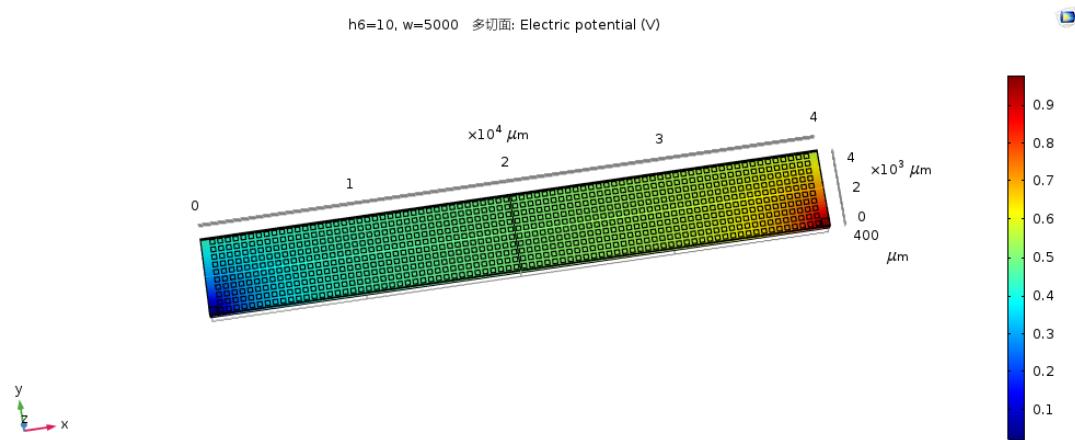


Fig-0.2.3 模拟结果电势示意图

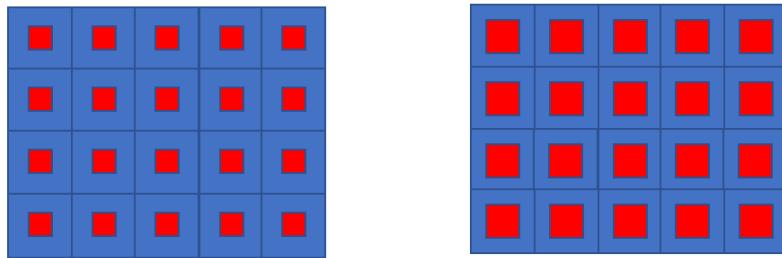


Fig-0.2.4 粗糙度方块的构建说明（仅为示意图，不代表实际模拟情况）

如 Fig-0.2.4 所示，本次模拟中，粗糙度方块的中心位置确定，不随 w 的变化而变化。而数量仅与 w 有关。

CC 对于测量结果的影响 (隋思哲)

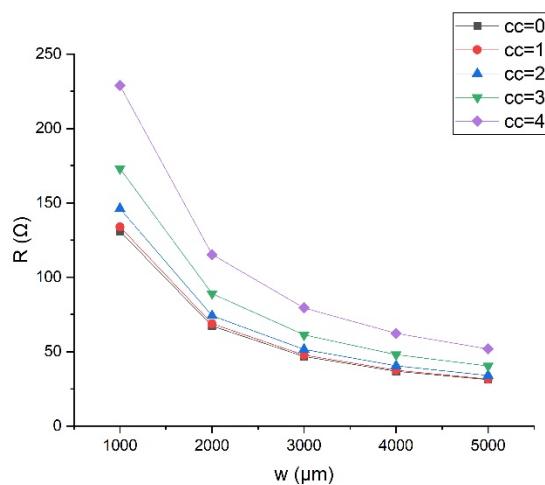


Fig-1.1 cc 对于测量结果的影响

固定 $h6=50$, 对 cc 和 w (含有 $cc=0$ 的空白对照组) 进行分析得出上图所示的结果 :

- 1、 cc 的出现增大了导电材料的电阻
- 2、 cc 的变化不会改变电阻随 w 的增大趋势
- 3、 cc 较小时对于电阻的影响很有限

测量对象电阻随 H6 的变化 (徐鸿)

利用 COMSOL 软件进行仿真获得的数据 : $cc=300$ 时, 通过扫描 $h6$ (即改变粗糙度), 得到如下结果

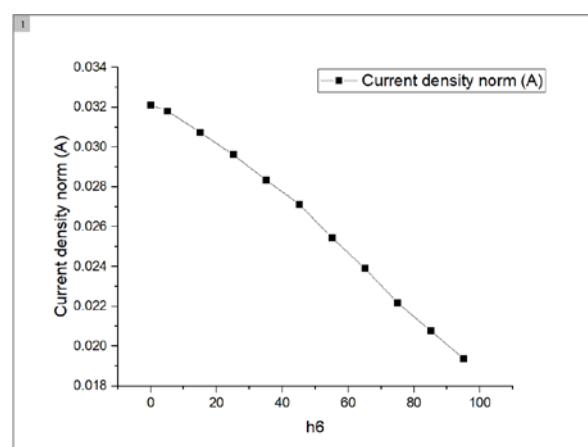


Fig-2.1 测量电阻随 $h6$ 变化曲线

可以看出，随着 h_6 增大，即粗糙度越来越大，电流密度随之减小。从图中可以看出：随着粗糙度越来越大，电流密度越小，说明电阻变大了。当 $h_6=0$ 时，可见电流密度是最大的，即没有粗糙度的时候，我们可以得到最小的电阻。

测量对象电阻随 CC 的变化 (赵显文)

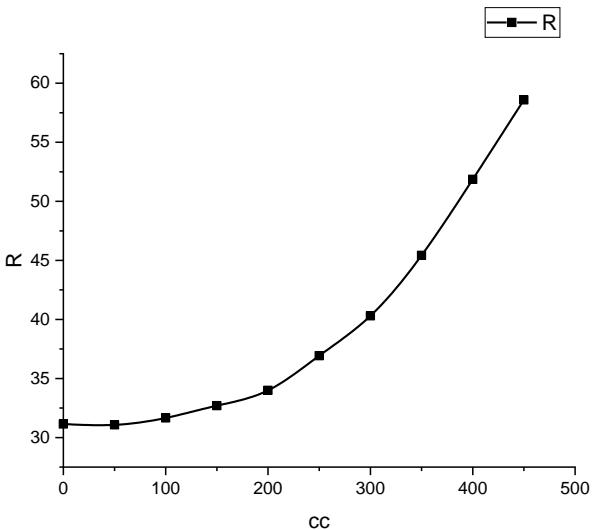


Fig-3.1 测量对象电阻随 cc 的变化

固定 h_6 的值不变 ($h_6=50$)，单独讨论 cc 对电阻的影响。如图 Fig-3.1 所示，当 cc 变大时（即粗糙度变大时），导电体的电阻增大。

H6 对于测量结果的影响 (张睿桐)

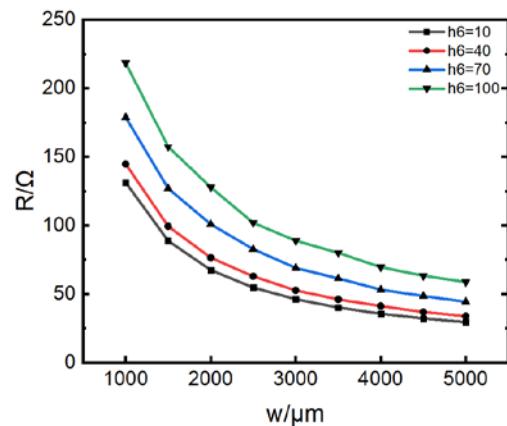
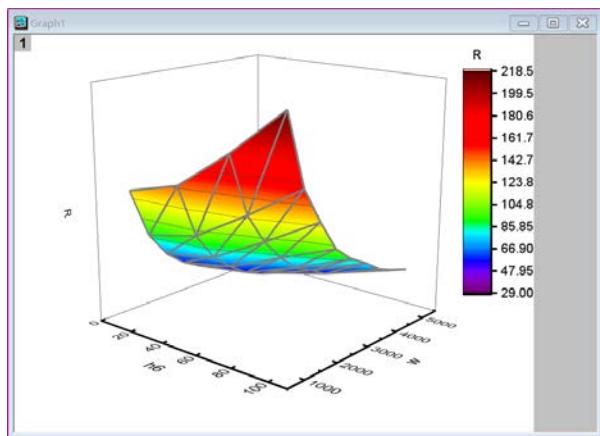


Fig-4.1 h_6 对于测量结果的影响 (三维展示) Fig-4.2 h_6 对于测量结果的影响 (二维展示)

如图可以看出，随着 w 的增加，电阻逐渐减小，曲线近似为一条双曲线。结合理论来分析：保持 h_6 不变时，理论 R 正比于 l (导体长度)，反比与宽度 w ，因此扫描和计算的结果和理论相符。因为是反比例函数关系，因此曲线呈双曲线形状证明了仿真结果的可靠性。

测量对象电阻随 CC-H6 的变化 (杨明杰)

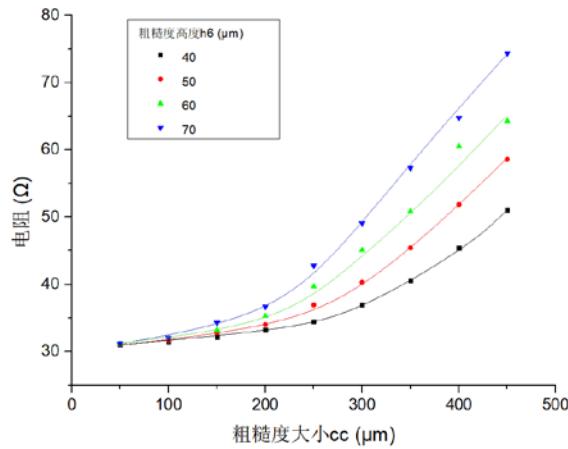


Fig-5.1 测量对象电阻随 cc-h6 的变化

模拟结果表明，在粗糙度高度 (h6) 相同的情况下，传感器两电极之间的电阻随磨损度大小 (cc) 增大而增大，在磨损度大小相同时，该电阻随粗糙度高度增大而增大，同时，对电阻取倒数得到电流，电流值随 h6 基本呈线性变化 ($R^2>0.95$)。

如下图，对电阻随 cc 变化做多项式拟合（取 5 次以及 2 次，取 h6=50μm），对比得出，电阻随粗糙度大小 (cc) 变化基本符合二次函数模型，即 $R=A*cc^2+B*cc+C$ 。

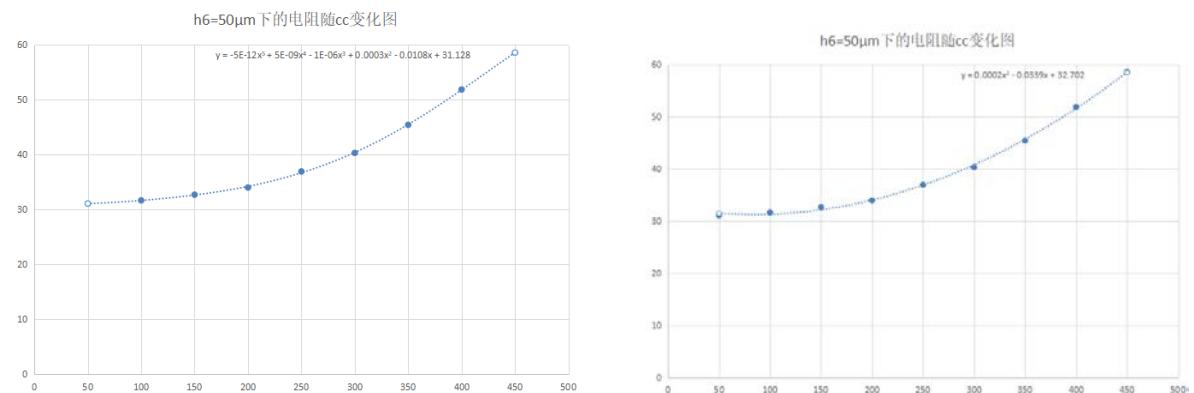


Fig-5.1 电阻随 cc 变化非线性拟合图像 (5 次, 2 次)

考虑短路的情况

由于由金属门轴导致的短路情况会影响到电阻的测量，在此将短路情况和粗糙度情况综合考量。

考虑 CC 的变化（赵显文）

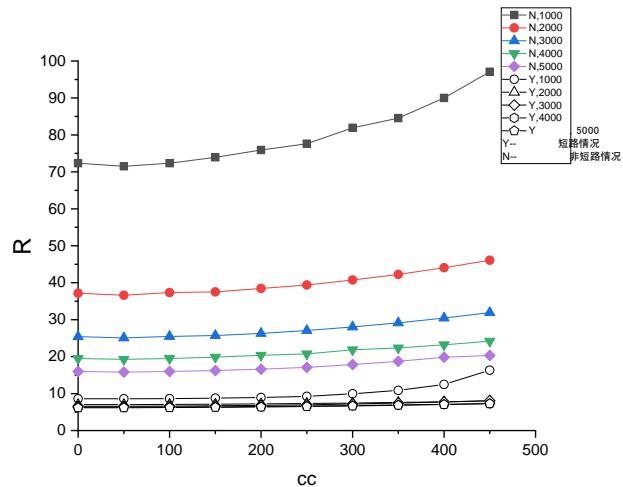


Fig-6.1.1 短路与非短路情况下，电阻随 cc 的变化（不同曲线对应不同 w）

分析从图中可以看出：

1. 当 w 一定时，模型的电阻 R 随 CC 的增大而增大；
2. 在两种情况下，当 CC 一定时，电阻随 w 的减小而增大；
3. 从图中可以看出，当 w 取值一定时，短路情况下 R 明显小于非短路情况下的 R

4.

考慮 H6 的变化 (隋思哲)

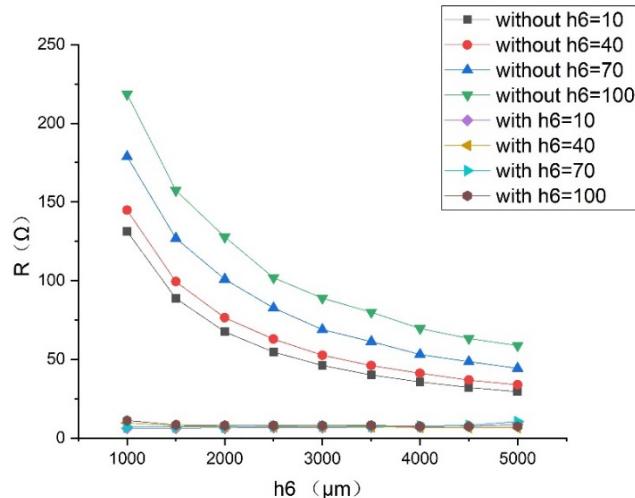


Fig-6.2.1 短路与非短路情况下，电阻随 h6 的变化（不同曲线对应不同 h6）

分析结果得出以下结论：

- 1- 有无短路金属片时，电阻随 h6 的变化与先前预测一致，即 h6 越大，待测元件电阻越大
- 2- 有短路金属片时，测量结果明显小于没有短路金属片时的电阻

结论

考虑粗糙度，对 cc 和 h6 做出模拟分析后，总结得出如下结论：

- 1、粗糙度孔径越大（即 cc 越大），测量电阻的测量值越大
- 2、粗糙度越深（即 h6 越大），测量电阻的测量值越大
- 3、以上两点可能使磨损度的测量判断偏小

磨损量、电阻和电阻率、磨损宽度的关系

陈沛东(组长) 伍致宇, 张云骥, 赖俊宇, 林嘉豪, 吴方舟

磨损量电阻和电阻率、磨损宽度的关系

陈沛东(组长) 伍致宇, 张云骥, 赖俊宇, 林嘉豪, 吴方舟

综述:

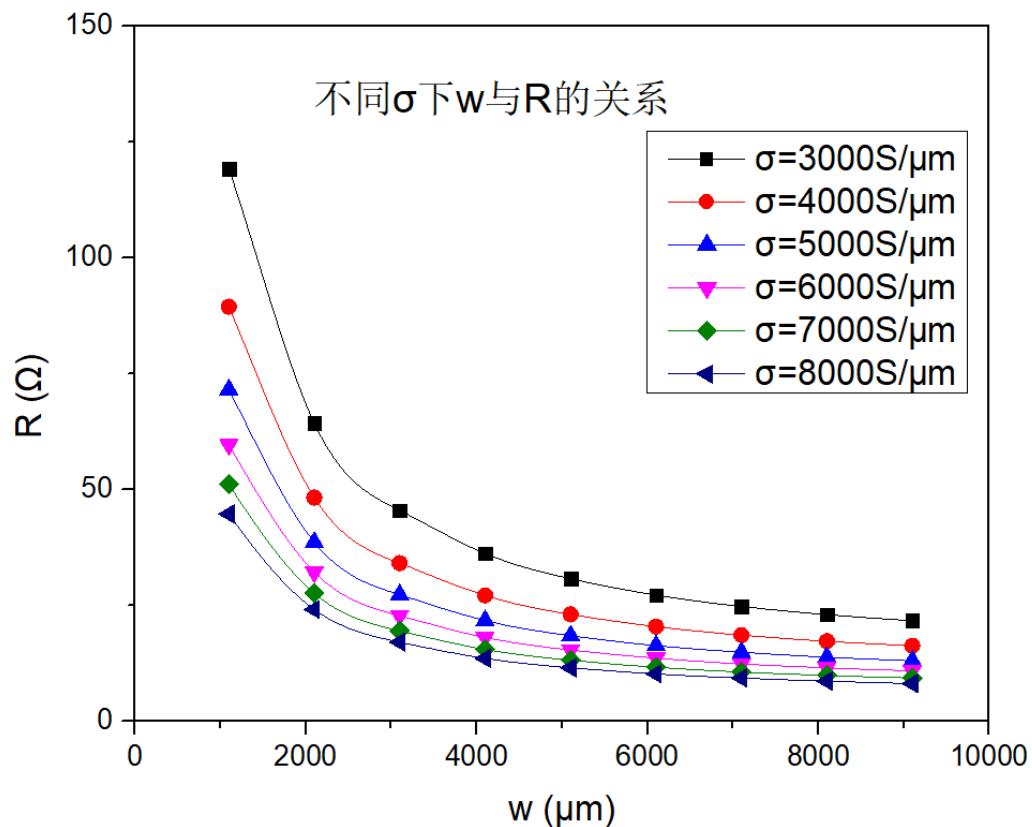
考虑到传感器的尺寸与制作传感器材料的导电率都会对传感器的电阻产生影响, 进而影响传感器的工作性能, 我们组利用 COMSOL 软件对 w , σ 与 I 进行仿真, 再通过 COMSOL 软件的积分功能将 I 转化为 R , 进而研究它们的关系。

模型设计:

为了方便计算, 在构建模型时, 我们将传感器视为规则的长方体, 并假设其各处的电导率相等 (即用单一材料构建传感器)。

W 与 R 的关系 陈沛东

绘制不同 σ 下 W 与 R 的关系并分析

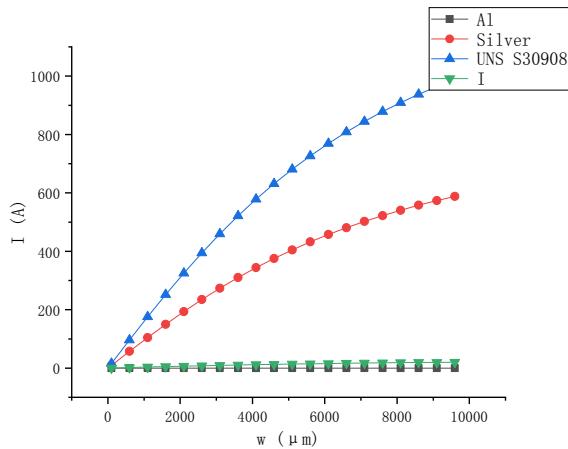


不同 σ 下 W 与 R 的关系

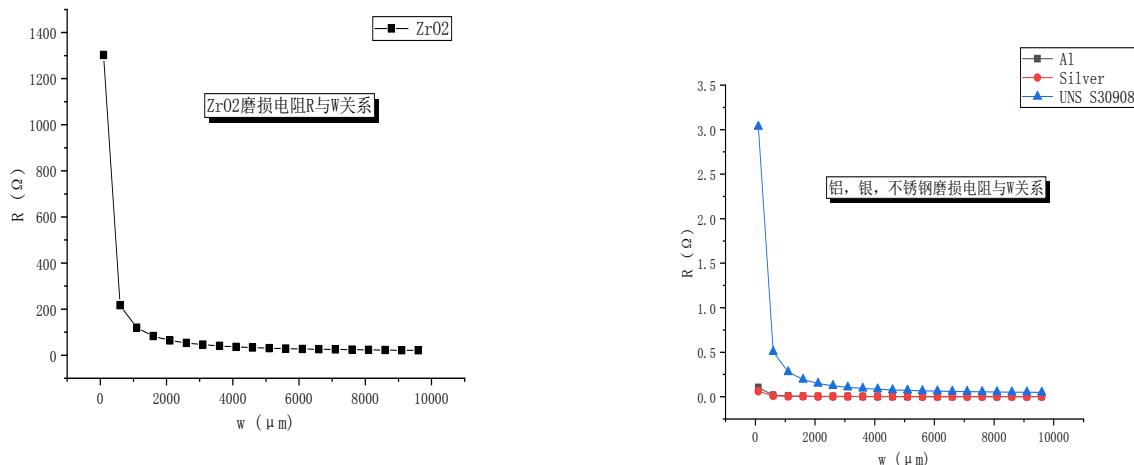
由图可看出，在不同的 σ 下，R 均随着 W 的增大而减小；且 σ 越小，R 随 W 减小的趋势越大。在实际应用中，要将 R 控制在一个合理的值，则制造传感器的材料的电导率应始终，传感器的尺寸也要控制在一个合理的值。

W 与 I 的仿真关系 林嘉豪

进行 W 与 I 的仿真并绘图分析



A1, ZrO₂ 等材料下 W 与 I 的关系



A1, ZrO₂ 等材料下 W 与 R 的关系

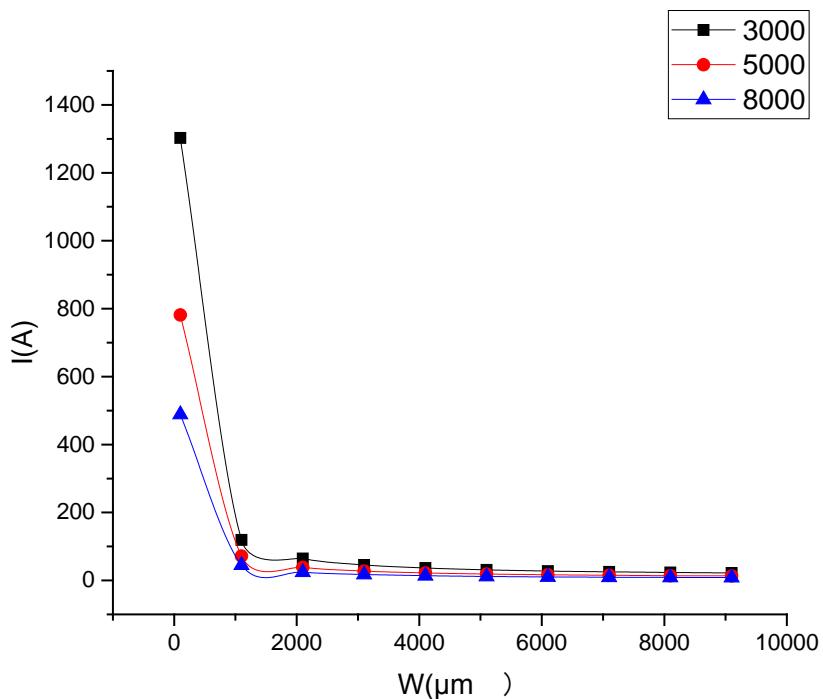
这里我们进行多种材料进行仿真实验比较轴承磨损量 (W 变化) 与电流电阻关系。

由图可以看出，Al 等材料下和 ZrO₂-Y₂O₃ 材料下 I 均随 W 的增大而增大，即 W 增大，电阻变小。同时可看出，铝，银导电材料下的 I 明显大于 ZrO₂-Y₂O₃ 不锈钢材料下的 I，说明 Al 等材料的电导率高于 ZrO₂-Y₂O₃ 等材料，即 Al 的导电性能好于 ZrO₂-Y₂O₃。

我们要检测该轴承磨损电阻，那么其 I 变化的程度要显著才容易观察得到并进行更换，可看出银的变化程度最大其次是铝。同时又考虑到 Al 的价格较为便宜，可以首先考虑 Al。但是在水中 Al 容易被氧化形成氧化膜干扰电流观察，而不锈钢 UNS S30908 虽然电导率不高，但具有优良的不锈耐腐蚀性能和较好的抗晶间腐蚀性能，要耐用许多，所以若是长时间的使用，该材料更有实用价值。

W 与 I 的关系 吴方舟

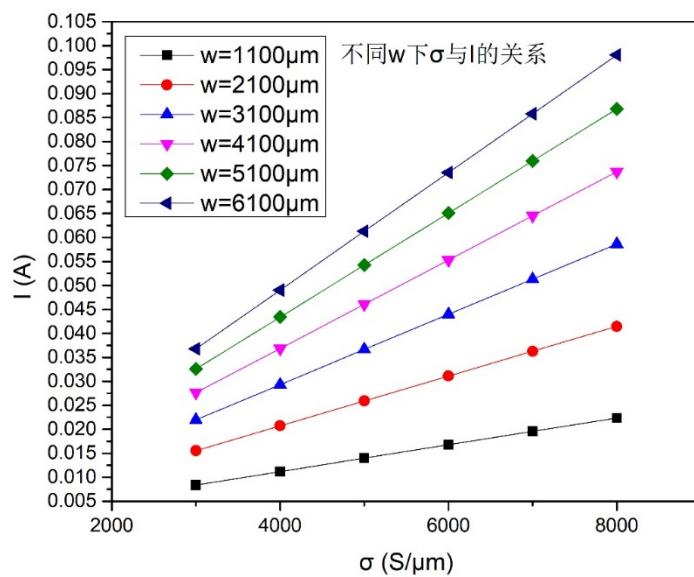
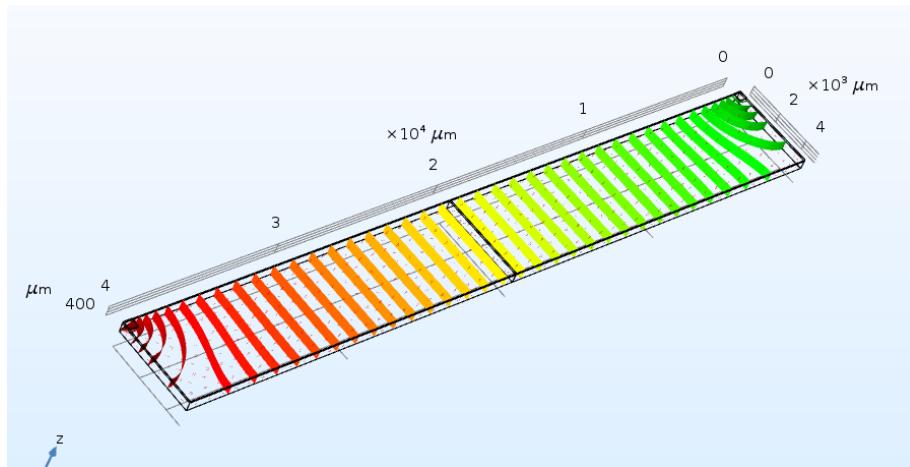
绘制不同 σ 下 W 与 I 的图并分析



如图所示为在电导率 3000、5000、8000 下的 I-W 图像。由图中可以看出，在一定的电导率下，随着 W 的增大，电流 I 逐渐减小。其中在 1000-1500 微米间，电流减小相当迅速，之后趋于平坦。而在相同的 W 下，电阻的电导率越高，电流就越小。

Σ 与 I 的仿真——张云骥

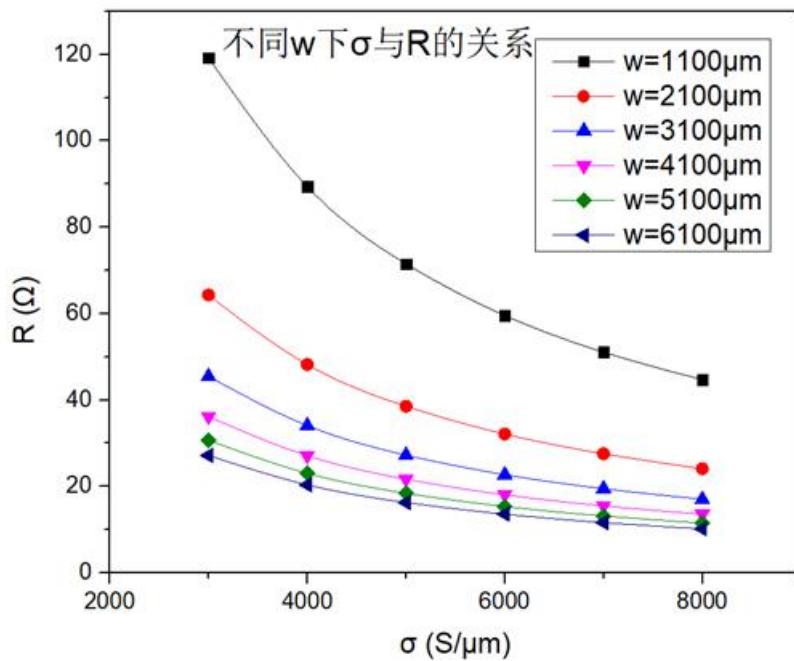
利用 COMSOL 软件对试样的 σ 与 I 进行仿真。并绘制二维图，分析。



由图知随着 σ 的增大， I 逐渐增大，即电阻逐渐变小。且 w 越大， I 随 σ 变化的曲线越陡峭，说明 w 越大， I 随 σ 增大的趋势越大。

Σ 与 R 的关系 伍致宇

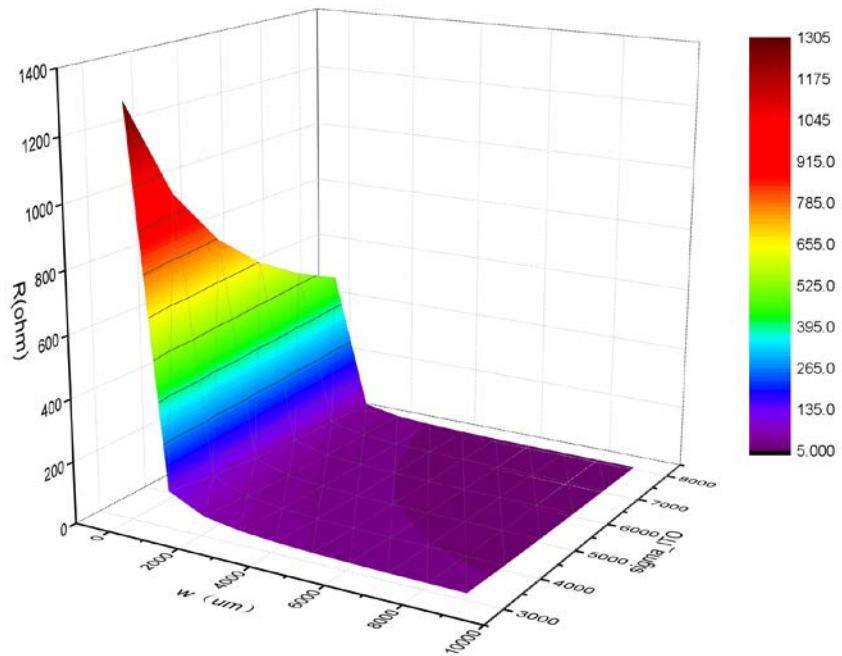
绘制 σ 与 R 的关系图并进行分析



分析：由图可以看出，电阻随着电导率的增大而增大，其原因是电阻是电导的倒数，电导率增大，电导增大，从而电阻变小。同时可以发现，从 $w=100 \mu m$ 到 $w=1100 \mu m$ 之间，相同的 σ 下，电阻急剧下降，在 $w=100 \mu m$ 时， σ 增大，电阻减小较为明显；而在其后 $w=1100 \mu m$ 到 $w=3100 \mu m$ 间，电阻随 w 与 σ 变化的下降幅度均减小，说明随着 w 与 σ 的增大， w 与 σ 的变化对 R 的影响逐渐减小。这与 $R=\sigma L/S$ 的公式是相符的。

Σ , W 与 R 的三维图 赖俊宇

利用 origin 绘制三维图并分析



由图看出，电阻随着电导率的增大、传感器宽度的增大而减小，与电导率和宽度成反比。电导率不变时，随着磨损量的增加，传感器宽度增大，电阻的减小速率减小，曲线近似于双曲线。这是因为焊点是在传感器的两个角上，距离较远的地方电流较小，对电流分布影响也不大，因此宽度过大时对电阻的影响不大。

开路情况和短路情况对磨损量电阻之影响的比较

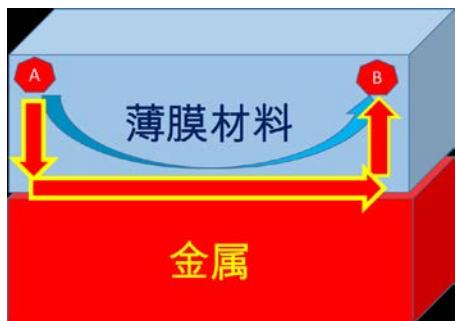
谢禹翀（组长） 魏皓 王凯源 朱浩然

开路情况和短路情况小组汇报（谢禹翀、王凯源、朱浩然、魏皓、熊逸芸、黄堃栩）

综述（谢禹翀）

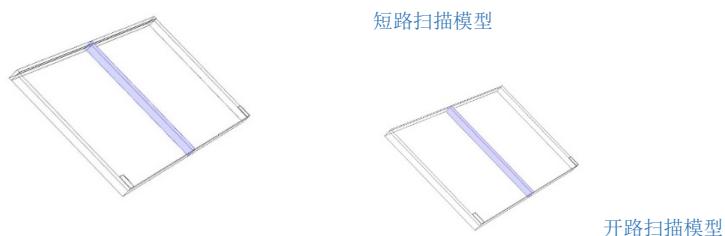
考虑到导电材料电导率，焊点宽度、电阻宽度及短路情况下金属条的宽度可能对传感器的结果输出产生影响，我们利用 COMSOL 仿真软件，对导电材料开路情况和短路情况进行模拟。

在实际情况下，电阻和金属条进行摩擦，磨损量传感器在短路和开路这两种情况下会有两



种不同的工作方式。开路的情况是，在磨损的当中，由于两个金属磨损之间的空隙，使得 ab 点没有联通，这个时候的电阻值应该是偏大；短路的情况指的是，在磨损器在磨损的过程当中，由于磨损的界面也是金属，这层金属，会使两端产生短路，由于薄膜材料的电阻率比较高，金属薄膜的电阻率比较低，所以短路

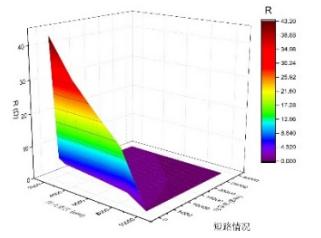
的电阻，会比开路的电阻要大。我们用计算机仿真的这两种情况，短路情况下就设计为电阻外接一个金属条，同时设计两个变量使得金属条和电阻宽度都会变化。在开路情况下，便是将电阻外接的金属条去掉。在设计电阻的时候，需要考虑电阻的电导率及电阻上的焊点宽度，于是在 COMSOL 中又设计了两个变量。



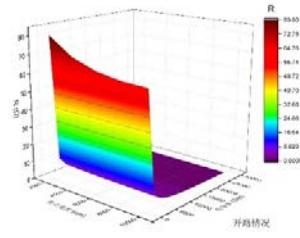
短路模型中扫描积分的时候要添加金属条的截面；开路模型中扫描积分的时候不用添加金属条的截面。

短路情况和短路情况下电阻和电导率和焊点长度的关系（谢禹翀）

用 COMSOL 仿真计算得到数据后，用 excel 处理数据，最后用 origin 做出图像并分析得出结论。



短路情况下电阻和电导率和焊点长度的关系



开路情况下电阻和电导率和焊点长度的关系

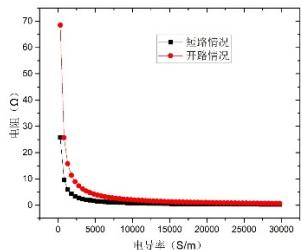
由图可以看出：

电导率增大，电阻减小，焊点宽度增大，电阻减小。

对比开路情况和短路情况，可以发现随着焊点长度的变化，短路情况的电阻阻值下降得更快，电导率的变化对开路情况和短路情况下的电阻影响差别不大。

开路情况和短路情况电阻和电导率的关系对比（谢禹翀）

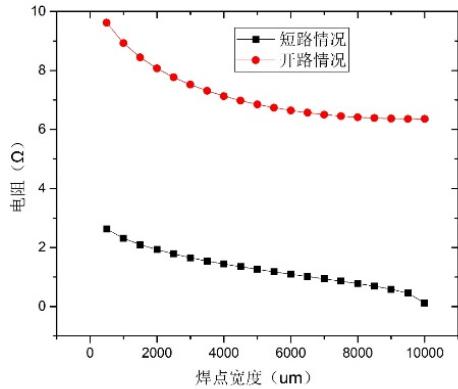
将开路情况和短路情况的数据从 excel 导出，在 origin 作图，产生两条曲线



电阻和电导率的关系

在开路与短路情况下，电阻均随电导率增大而减小。相比下，开路情况下，电导率对电阻影响更大。开路情况和短路情况电阻和焊点宽度的关系（谢禹翀）

将开路情况和短路情况的数据从 excel 导出，在 origin 作图，产生两条曲线

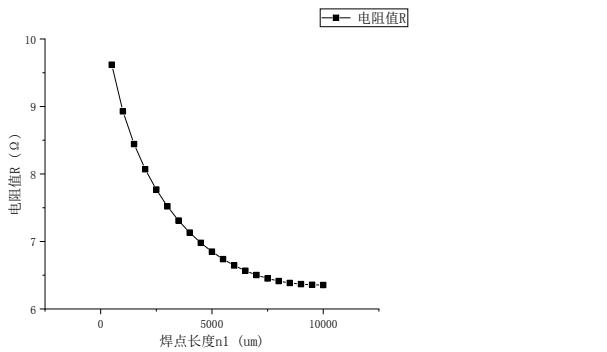


电阻和焊点宽度的关系

由图可以看出，随着焊点 n_1 长度的增大，开路及短路情况下电阻均逐渐减小。相比较而言，在相同的焊点宽度的条件下，开路情况的电阻总是比短路情况的电阻大。

开路情况下电阻和焊点长度的关系（王凯源）

使用 comsol 软件计算得到数据后，使用 excel 软件对数据进行处理，最后使用 origin 软件进行作图。

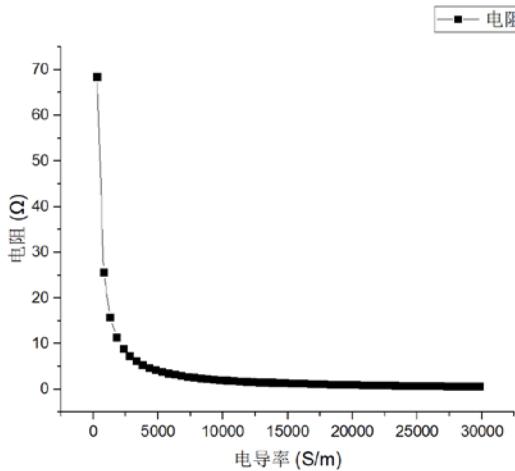


电阻和焊点长度的关系

由图可以看出，随着焊点长度 n_1 的增大，电阻值逐渐减小，且减小的速度逐渐放缓直至曲线趋于不变。

开路情况下电阻和电阻率的关系（朱浩然）

使用 COMSOL 计算得到数据后，用 excel 对数据进行处理，最后用 Origin 作图。

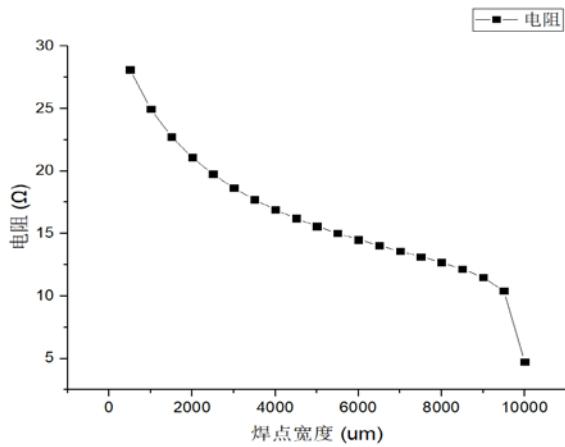


电阻和电阻率的关系

由图可以看出，电导率与电阻成反比例线性关系，电阻越大，电导率越小，

短路情况下电阻和焊点长度的关系（魏皓）

用 COMSOL 仿真计算得到数据后，用 excel 处理数据，最后用 origin 做出图像并分析得出结论。

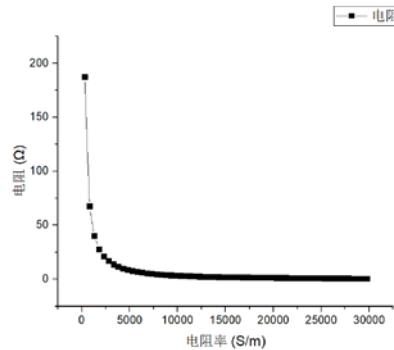


电阻和焊点长度的关系

当焊点宽度增大时，电阻减小。而当焊点宽度接近最大值时，电阻趋近于短路，所以电阻会很快变小。

短路情况下电阻和电导率的关系（熊逸芸）

用 COMSOL 仿真计算得到数据后，用 excel 处理数据，最后用 origin 做出图像并分析得出结论。

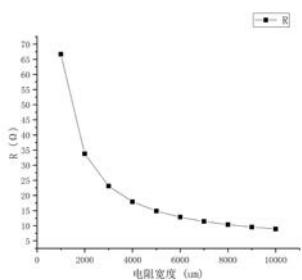


电阻和电导率的关系

由图可以看出：随着电阻率的增大，电阻会减小。

开路情况下电阻和电阻宽度的关系（谢禹翀）

用 COMSOL 仿真计算得到数据后，用 excel 处理数据，最后用 origin 做出图像并分析得出结论。

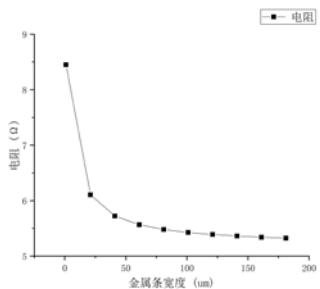


开路情况下电阻和电阻宽度的关系

由图可以看出，开路情况下随着电阻宽度的增大，电阻值逐渐减小，且减小的速度逐渐放缓直至曲线趋于不变。

短路情况下电阻和金属条宽度的关系(王凯源)

用 COMSOL 仿真计算得到数据后, 用 excel 处理数据, 最后用 origin 做出图像并分析得出结论。

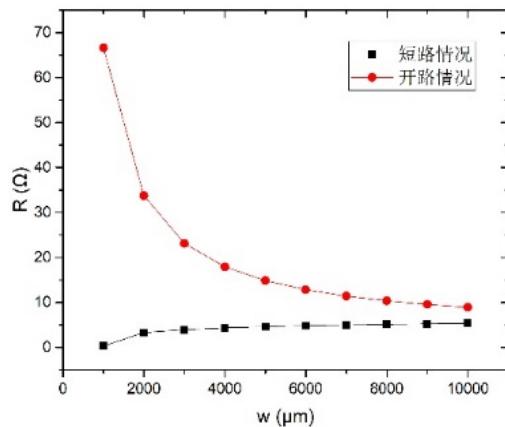


短路情况下电阻和金属条宽度的关系

由图可见, 短路情况下当金属条宽度增大时, 电阻减小。而当金属条宽度接近最大值时, 电阻变化减缓直至趋于不变。

开路情况和短路情况电阻和电阻宽度的对比(朱浩然)

将开路情况和短路情况的数据从 excel 导出, 在 origin 作图, 产生两条曲线

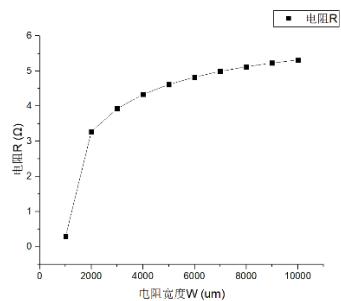


电阻和电阻宽度的对比

由图可以看出, 随着电阻宽度的增大, 开路情况下电阻均逐渐减小, 短路情况下电阻逐渐增大。相比之下, 开路情况下, 焊点长度对电阻影响更大。

短路情况下电阻和电阻宽度的关系（魏皓）

用 COMSOL 仿真计算得到数据后，用 excel 处理数据，最后用 origin 做出图像并分析得出结论。

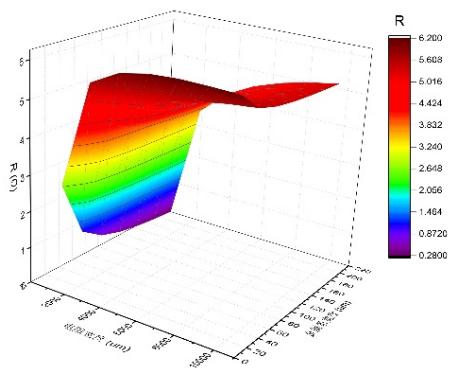


电阻和电阻宽度的关系

由图可见，短路情况下当焊点宽度增大时，电阻增大。而当焊点宽度接近最大值时，电阻变化减缓直至趋于不变。

短路情况下电阻和金属条宽度和电阻宽度的关系（熊逸芸）

用 COMSOL 仿真计算得到数据后，用 excel 处理数据，最后用 origin 做出图像并分析得出结论。



短路情况下电阻和金属条宽度和电阻宽度的关系

由图可以看出：电阻宽度增大，电阻减小，金属条宽度增大，电阻减小。

结论

考虑到导电材料电导率，焊点宽度、电阻宽度及短路情况下金属条的宽度，总结得出以下结论：

1. 电导率越大，测量电阻的阻值越小。相比较而言，开路和短路情况的差别不大。
2. 焊点宽度越大，测量的电阻阻值越小，相比较而言，在相同的焊点宽度的条件下，开路情况的电阻总是比短路情况的电阻大。
3. 随着电阻宽度的增大，开路情况下电阻均逐渐减小，短路情况下电阻逐渐增大。相比之下，开路情况下，焊点长度对电阻影响更大。
4. 短路情况下当金属条宽度增大时，电阻减小。而当金属条宽度接近最大值时，电阻变化减缓直至趋于不变。

不同焊点的位置和大小对于磨损量电阻的影响

朱跃 (组长) 苗雨润, 石炜昂, 张澳, 张博闻

焊点的位置与大小小组结果汇总（朱跃、苗雨润、张澳、张博闻、石炜昂）

综述

考虑到焊点大小及位置移动的可操作性难度较大，我们利用 COMSOL 仿真软件，对焊点的位置以及大小进行模拟。

模型设计

为了简化模型制作流程及方便最终结果的计算，在模型的构建时，将焊点视为规矩的长方体贴于导电材料下部。在仿真过程中，通过移动两侧焊点实现位置的变化，改变两焊点的宽度或长度实现大小的变化。通过 COMSOL 内置的面积分函数对中截面积分后求出电阻。

参数设计及模型构建流程

模型中， b 代表焊点的宽度， $w2$ 代表焊点的长度， t 代表焊点距离下部的距离， $b2$ 代表左侧焊点与左侧边界的距离。对导电层模型进行布尔运算，形成最终的模型。

Fig-3.0.1 面积分积分对象

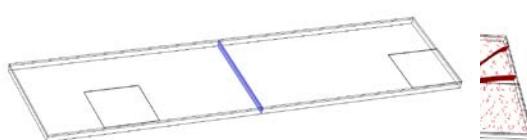
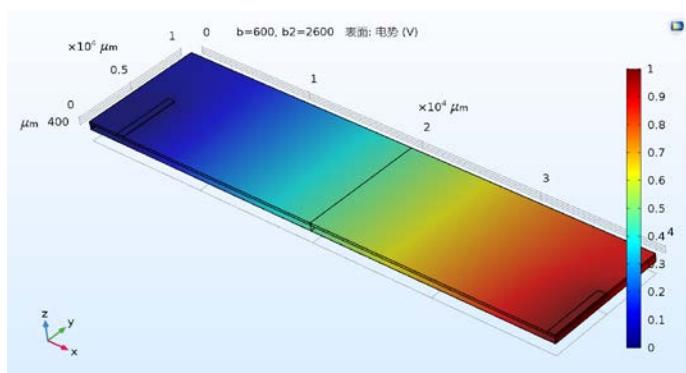


Fig-3.0.2 结算结果的呈现
（图示中的左右两个方片即为焊点）



本次模拟中，右侧焊点紧贴右侧边界，不随 b 的变化而变化。右侧焊点电势为 1V 左侧为 0V。

Fig-3.0.3 模拟结果电势示意图

观察焊点宽度技间距对电流的影响 3D 展示 (朱跃)

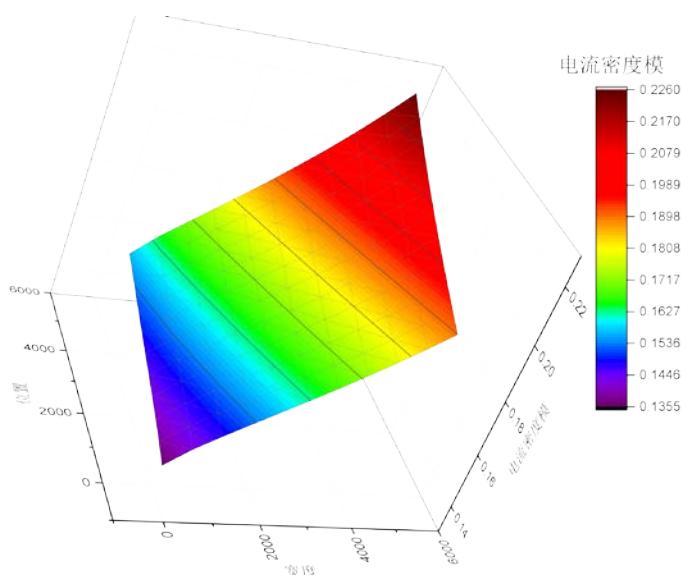


Fig-3.1.1 间距与宽度改变对电流的影响 (3D 展示)

固定焊点的长度 $w_2=30$, 对 b_2 和 b 进行分析得出上图所示的结果：

- 1、两焊点间距减小时，电流呈增大趋势，即电阻在减小。
- 2、两焊点宽度增加的时候，电流增加，即电阻减小。
- 3、另，观察到 3D 图边界几乎为直线，推测可能为线性关系。

改变焊点的长度 W2 对电流的影响 (石炜昂)

改变焊点的长度 w_2 。使用 comsol 软件计算得到数据后，使用 excel 软件对数据进行处理，最后使用 origin 软件进行作图。

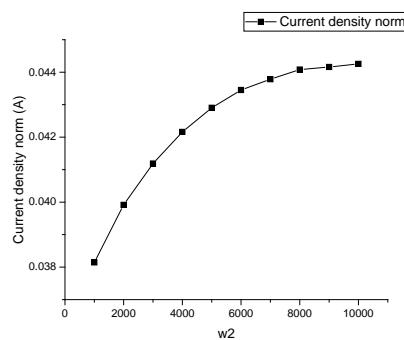


Fig-3.2.2 电流密度模与长度关系图

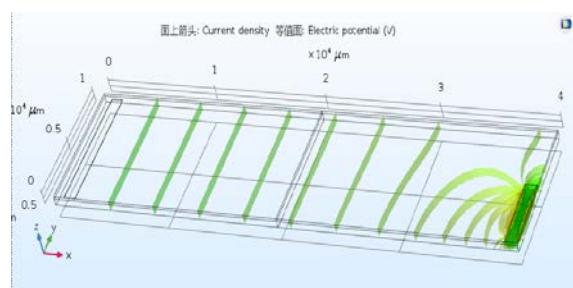


Fig-3.2.3 电流等值面

由图可见，随着焊点长度的增加，电流呈上升趋势，但上升趋势逐渐减缓，也即焊点长度增加时，电阻减小。

焊点宽度 B 的改变对电阻的影响 (张澳)

在前面 3D 图的基础上，尝试更细化宽度 b 的改变。使用 comsol 软件计算得到数据后，使用 excel 软件对数据进行处理，最后使用 origin 软件进行作图。

随着焊点宽度的增加，在较短时，500um 以内，电流减小，电阻增大。

接着随着宽度的继续增加，电阻减小。

下图为电阻与宽度改变的关系。

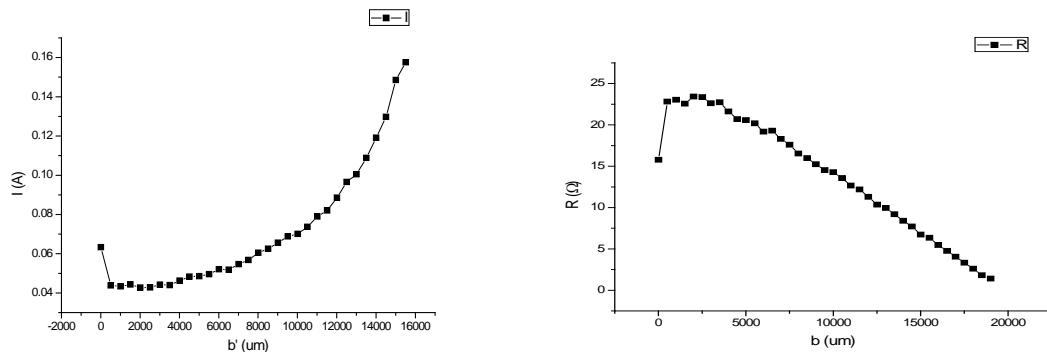


Fig-3.3.1 焊点宽度 b 与电流密度模关系图

Fig-3.3.2 焊点宽度 b 与电流密度模关系图

焊点高度 T 对电流的影响 (苗雨润)

改变两侧焊点的高度 t 进行研究。使用 comsol 软件计算得到数据后，使用 excel 软件对数据进行处理，最后使用 origin 软件进行作图。

由图可知，随着焊点向上移动，大致来说电流先变大后变小，但局部无规律。

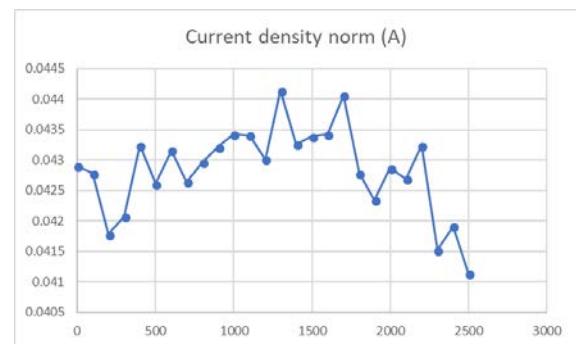
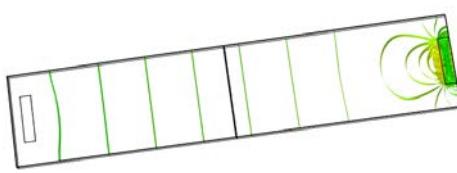


Fig-3.4.1 电流等值图

Fig-3.4.2 电流密度模与高度 t 的关系图

左侧焊点与左边界间距 B2 改变对电阻的影响(张博闻)

在 3D 图的基础上细化数据，改变左侧焊点的 x 数据，使其向右位移 b2，研究对电流的影响。使用 comsol 软件计算得到数据后，使用 excel 软件对数据进行处理，最后使用 origin 软件进行作图。

由图可知，电阻与焊点左右间距大致呈线性关系，且随焊点左右间距的增大逐渐减小。

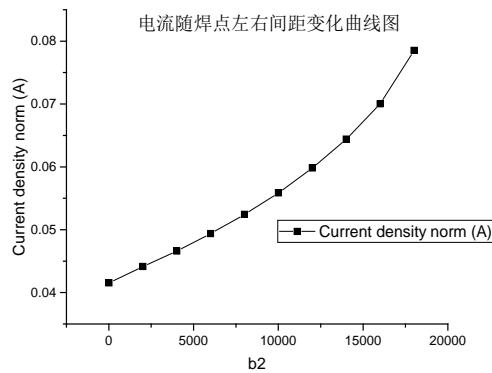


Fig-3.5.1 电流密度模与 b2 的关系图

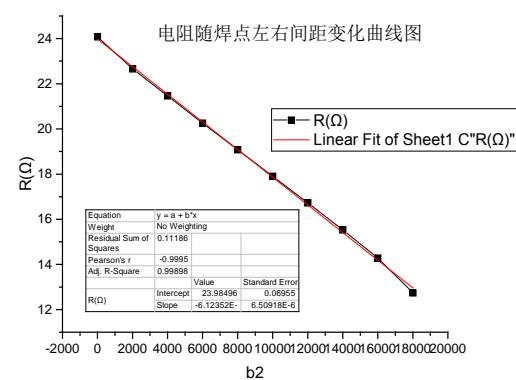


Fig-3.5.2 电阻与 b2 的关系图

结论

对焊点的位置与大小做出模拟分析后，总结得出如下结论：

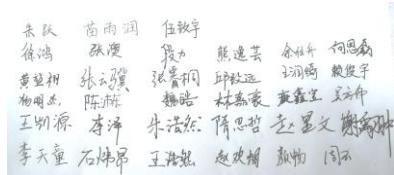
- 1、当焊点的长度与宽度增加时，均会使测量电阻值减小；
- 2、当焊点上下移动时，测量电阻存在变化，但并未发现初步规律；
- 3、当焊点左右移动时，由于间距的减小，测量电阻也会减小；
- 4、上述的几点会对磨损度的测量产生误差。

大藤峡人字闸门智能监控 MEMS 传感器

段力, 2018工导狗

上海交通大学工程实验班

作者 (用签名的):



摘要

大藤峡人字闸门是水利设施中重要的结构,而底枢轴承是整个人字闸门最底部的支撑构件,当磨损量达到一定程度后,底枢轴承就可能会影响到整个人的恶劣条件下,对底枢接监测非常困难。在本计了电阻型磨损量传阻传感器的工作性能位的研究。MEMS 磨损薄膜电阻会随其表面大的基本原理检测其变化,藉此检测底枢轴大量的计算机仿真实的实验,研究了不同工监控电阻传感器和磨系。

可能出现问题进而影响到整个人字闸门。并且深水轴承磨损量进行直接检测,并对磨损电和状态进行了全方位的检测。利用磨损量的增加而增薄膜电阻随宽度的承磨损情况。通过实验及其磨损与电阻作状态下的磨损量与磨损参量之间的关

