DOI: 10.3901/JME.2020.16.001

航天用导电滑环失效建模与工艺优化研究^{*}

孙远航¹ 王永松² 孙习武² 刘贤军¹ 余建波¹

(1. 同济大学机械与能源工程学院 上海 201804;

2. 上海航天设备制造总厂有限公司 上海 201100)

摘要: 航天信号传输系统是航天系统的生命线, 而导电滑环是航天系统信号传输系统的重要组成部件, 是整星少数几个单点失效环节之一。由于导电滑环的工作环境中涉及电流和摩擦影响, 使得滑环处于多场耦合的复杂环境, 导致对其进行物理建模尤为困难; 同时由于滑环价格高、试验过程复杂的特点, 更进一步增加滑环研究的难度。为了提升航天信号传输系统稳定性与可靠性, 对航天系统中重要的信号传输部件导电滑环进行失效物理建模, 并基于模型对滑环工艺进行优化。针对导电滑环运行原理和失效特点, 将滑环失效的关键部位摩擦副产生的磨屑量作为滑环性能退化特征量; 应用赫兹接触理论和传热学方法分别计算摩擦副磨损过程中的接触区域变化和温度变化, 量化热力电多场耦合对摩擦副磨损的影响; 同时结合磨损计算方法建立多物理场耦合磨损模型, 对摩擦副磨损寿命进行预测, 达到对滑环可靠性与稳定性提升的目的。通过与真实滑环磨损试验数据进行对比, 验证模型的正确性, 并将该模型应用于实际的滑环摩擦副工艺设计。结果表明, 多场耦合模型可有效揭示滑环摩擦副微观运作机理并实施寿命预测, 进而可靠地实施滑环工艺优化, 提高滑环寿命与运作可靠性, 满足新一代长寿命卫星空间无故障长期可靠运行的需求。

关键词: 导电滑环; 摩擦副; 多物理场耦合; 寿命预测; 工艺优化

中图分类号: V2

Research on Failure Modeling and Process Optimization of Transmission Conductive Slip Ring for Aerospace

SUN Yuanhang¹ WANG Yongsong² SUN Xiwu² LIU Xianjun¹ YU Jianbo¹

(1. School of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804;

2. Shanghai Aerospace Equipment Manufacturer Co., Ltd., Shanghai 201100)

Abstract: The space signal transmission system is the lifeline of the space system and the conductive slip ring is an important component of the signal transmission system in the space system. It is one of the few single point failure links of the whole satellite. Because of the influence of current and friction in the working environment, the slip ring is in the complex environment of multi-field coupling, which makes its physical modelling particularly difficult. At the same time, its high price and the complexity of the test process further increase the difficulty of the study of the slip ring. In order to improve the stability and reliability of the space signal transmission system, the failure physical model of the conductive slip ring is established, which is an important part of the space signal transmission system. The process of the slip ring is optimized based on the model, so as to enhance the stability and reliability of the whole space system. According to the running principle and failure characteristics, the amount of debris produced by the friction pairs of the slip ring is taken as its degradation characteristic. The contact zone and temperature changes during the wear process are calculated by Hertz contact theory and heat transfer method respectively and the influence of thermal electric multi-field coupling on the wear of the friction pair is quantified. The multi-physical field coupling wear model is used to predict the wear life of friction pairs so as to improve the reliability and stability of slip rings. The correctness of the model is verified by comparing with the real wear test data. The model is applied to the actual process design of slip ring friction pairs. The proposed multi-field coupling model can effectively reveal the micro-operation mechanism of the slip ring friction pair and implement life prediction and then reliably optimize the slip ring process and improve the life and operational reliability. It meets the needs of the new generation of long-life satellite space fault-free long-term reliable operation.

Key words: conductive slip ring; friction pair; multi-physical field coupling; life prediction; process optimization

^{*} 国家自然科学基金(71777173)、中央高校基本科研业务费和上海市科委
创新行动计划(19511106303)资助项目。20191106 收到初稿, 20200430
收到修改稿

0 前言

导电滑环作为航天系统信号传输的核心部件,其主要作用为在相对旋转的太阳帆板和星体间传输电功率与信号,是整星少数几个单点失效环节之一^[1],其工作可靠与否,直接关系到整星的任务成败,是飞行器名副其实的“生命线”。应对新一代长寿命卫星对关键部件高可靠性与长寿命的新要求,导电滑环在设计方法、新材料研制、摩擦学性能、长寿命维持、高精度制造工艺方法均存在巨大的需求。

导电滑环信号传输主要通过其摩擦副对航天信息数据进行传输,摩擦副是决定滑环可靠性运行的主要因素。导电滑环运行过程通过电流,且同时滑环摩擦副之间有伴随有滑动摩擦,加速滑环摩擦副磨损。由于电流的流入,使得滑环磨损具有载流摩擦的特点。载流摩擦的摩擦学性能和导电性能、机械损伤和电损伤之间相互耦合^[2]。

滑环运行过程中,电流通过触头之后流经汇流盘面,电信号经过汇流盘将信号传出。接触过程中由于摩擦、电传输产生热量,使得触头与汇流盘之间磨损加剧,产生磨屑,磨屑过多导致整电信号传输过程中出现短路、断路、电弧现象,影响滑环的传输性能;摩擦副磨屑量的产生由导电滑环摩擦副硬度、材料特性、接触表面摩擦粗糙度、电流流通量及转速决定。因此,导电滑环载流摩擦副性能可靠与否决定着导电滑环的运行可靠性、使用寿命,进而影响着航天传输系统的传输能力和传输质量。

目前,载流摩擦学研究主要在高铁弓网、导电滑环为代表的电接触领域^[3]。载流摩擦由于电流介入,使得载流摩擦比同等条件下的干摩擦磨损更为严重^[4]。载流摩擦磨损的磨屑量受接触载荷影响,文献[5]通过载流摩擦试验机测量不同载荷下磨屑量产生,磨损总量随载荷的增加呈“U”字形变化,且存在最优接触载荷使得磨屑量最低。CHEN等^[6-7]研究大气、温度、电流对载流摩擦副接触稳定性影响,但其研究只针对电传输稳定性,没有考虑摩擦副的磨损情况。文献[8-9]提出基于统计学方法预测继电器载流摩擦接触电阻阻值,进而预测电接触失效问题,但是该方法需要收集大量寿命数据,且只能针对静态载流摩擦。PLESCA^[10]针对高铁弓网系统中载流摩擦磨损行为进行建模,通过边界条件将高铁弓网接触过程建立数学模型,计算不同接触载荷、电流下的热变化。同时,国内针对滑环载流摩擦副进行了研究,XIE等^[11]通过试验方法在不同载荷与滑动速度下,观察滑环摩擦副的电接触性能,得

出接触电压与电噪声、接触载荷、速度之间相互影响关系;郑冀等^[12]在真空(7~8 MPa)和室温 200 ℃下,通过负荷、速度、电流等对导电滑环的摩擦磨损和电性能影响进行观测,选择擦副材料的最优匹配。尹念等^[13]采用分子动力学模拟导电滑环镀金层的金-金(Au)涂层磨损行为,揭示Au-Au涂层的摩擦磨损性能随温度和速度变化的微观机理,为导电滑环长寿命、高可靠设计提供理论基础。

国外针对导电滑环的载流摩擦亦进行了研究,MONNIER等^[14]通过有限元分析法建立热力电多场耦合下的点接触静摩擦模型。分析电流通过接触区域的变形情况,同时应用赫兹接触理论与有限法比较,证明了赫兹接触理论在热力电场耦合下预测变形的正确性,但其只分析了静摩擦下的电接触变形情况。GRANDIN等^[15]针对银-石墨摩擦副系统进行研究,应用优化线材法将磨损转移到环体上,提高滑环系统使用性能。KOBAYASHI等^[16]对银钯合金触头与金镀层的柱式滑环进行寿命试验和磨损机理探究,得到降低柱式滑环摩擦副磨损率的方法。

目前导电滑环研究主要集中在接触电阻、导电性、接触热的变化对磨损影响,基于大量磨损试验数据进行研究,但尚未对载流摩擦的磨损失效物理过程和摩擦副的可靠性进行深入研究。

本文针对空间用导电滑环载流摩擦副进入深入研究,揭示热、力、电多物理场耦合环境下载流摩擦副的运行机理,量化多物理场耦合对摩擦副磨损影响。建立多物理场耦合磨损计算模型,进行滑环摩擦副的寿命预测,开展滑环设计制造工艺的优化,减少滑环设计中的经济和时间投入,提高滑环摩擦副可靠性与稳定性。本文主要贡献点有:① 针对滑环摩擦副运行的热力电耦合环境特点,建立基于赫兹接触理论的摩擦副接触模型,计算摩擦副在热力电耦合环境下的接触区域变化;结合传热学和黑体定律构建滑环摩擦副温升模型,计算摩擦副接触区域温度;② 结合接触模型、温升模型、黏着磨损计算方法,建立多场耦合磨损计算模型,量化热力电多场耦合对摩擦副磨损影响,对摩擦副磨损实施量化分析;③ 基于多场耦合磨损模型,进行滑环摩擦副的设计制造工艺优化,解决导电滑环摩擦副工艺试验价格昂贵、周期长的问题。

1 导电滑环摩擦副运行机理

盘式滑环作为导电滑环的常见种类,用于航天电流与数据传输,受安装空间的尺寸限制;同时,特别受真空环境的影响。滑环的单点失效往

圆^[18], 根据赫兹理论可得半径

$$c = \left(\frac{3Fr}{4E} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (1)$$

式中, F 为接触物体间的接触载荷; E 为当量弹性模量, r 为当量曲率半径; E 、 r 的计算方法如下

$$E = \left(\frac{1-\mu_r^2}{E_r} + \frac{1-\mu_R^2}{E_R} \right)^{-1} \quad (2)$$

$$r = \frac{r_b \cdot R_b}{r_b \mp R_b} \quad (3)$$

式中, E_r 与 E_R 分别为触头与汇流盘材料的弹性模量; μ_r 与 μ_R 分别触头与汇流盘材料的泊松比; r_b 与 R_b 分别为触头与汇流盘初始接触点处的曲率半径; 滑环摩擦副接触中, 汇流盘接触半径 R_b 趋于无穷大; $\mp$ 代表接触形式, 负号“-”对应内接触, 表示触头与汇流盘的中心处于接触点的同一侧; 正号“+”对应外接触, 表示两者中心处于接触点的两侧; 滑环摩擦副属于外接触, 所以两者的接触面积可表示如下。

$$A_t = \pi \cdot c^2 = \pi \cdot \left(\frac{9r^2 F^2}{16E^2} \right)^{1/3} \quad (4)$$

式中, A_t 为摩擦副触头与汇流盘的实际接触面积, 由实际接触面积表达式可知, 摩擦副接触区域变形受到接触载荷影响, 体现多物理场中接触载荷对摩擦副接触影响。

图3 盘式滑环摩擦副接触示意图

2.2 滑环摩擦副接触热计算

摩擦副接触面热量由两部分组成: 摩擦热与焦耳热。摩擦热是由触头与盘面相对摩擦产生的热量; 焦耳热是由接触电阻热和盘面焦耳热构成。

2.2.1 摩擦副焦耳热

摩擦副接触过程中由于电流产生焦耳热, 焦耳热由两部分组成, 一部分为触头与汇流盘接触之间接触电阻产生; 另一部分是工作电流流经汇流盘产生。针对接触电阻产热可直接进行计算, 如式(5)所示

$$P_1 = I^2 R \quad (5)$$

式中, R 为触头与汇流盘之间接触电阻, I 为导电滑环工作电流; 电流流经汇流盘产生焦耳热, 电流经过头分两条支路流经汇流盘, 最后经过导线传出, 输入到星体。电流流入过程中, 电阻值随着触头运动处于动态变化, 电流通过左右两侧动态电阻产生热量, 则通过式(6)表示电阻变化规律

$$\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = \frac{1}{R} \quad (6)$$

$$R_1 = r \cdot \theta \cdot \rho \quad (7)$$

$$R_2 = r \cdot (2\pi - \theta) \cdot \rho \quad (8)$$

式中, R_1 与 R_2 分别为电流流经盘面时的左侧与右侧盘道电阻, 两者随着触头位置变化而处于动态变化; θ 与 r 分别表示为触头对应转过角度和圆盘半径, ρ 为盘面镀层材料电阻率。接触过程简化图如图4所示, R 为摩擦副运行过程中的汇流盘动态总电阻。当转速为 n r/s 时, 则滑环摩擦副运转产生的焦耳热功率可表示为

$$P_2 = I^2 R / n = \frac{1}{n} \int_0^{2\pi} \frac{r^2 \rho^2 (2\pi - \theta)}{2\pi \rho} d\theta = \frac{2}{3n} I^2 r \pi^2 \rho \quad (9)$$

图4 导电滑环电流传输过程

2.2.2 摩擦热

触头与汇流盘滑动摩擦, 根据摩擦学计算两者之间摩擦功率近似为

$$P_3 = f \cdot F \cdot v \quad (10)$$

式中, v 为滑环触头转速, f 为触头与汇流盘之间摩擦因数。

2.3 滑环摩擦副接触热平衡

触头与汇流盘在动态接触中由于焦耳热、摩擦热的产生, 温度一直处于上升状态; 同时, 工作环境为真空, 因此, 热传递方式为热辐射, 热传递过程简图如图5所示。通过汇流盘接触面传递热量, 随着温度上升, 传递热量与产生热量近似平衡, 温度将处于稳定状态, 通过热辐射公式^[19]计算散热速率

$$E_b = C_0 \left(\frac{T_l}{100} \right)^4 \quad (11)$$

式中, C_0 为黑体辐射系数^[20], $C_0=5.76 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$, T_t 单位面积产热功率与散热功率相等时的稳态温度。

图5 导电滑环摩擦副传热过程

根据热辐射计算公式, 可得滑环接触区域散热功率为

$$P_4 = A \cdot E_b = A \cdot C_0 \left(\frac{T_t}{100} \right)^4 \quad (12)$$

式中, A 为单个盘道面积。实际中往往不存在黑体, 但为了达到工程实际的需要可以作为近似。当散热与产热速率达到动态平衡时, 温度达到稳定状态, 通过式(5)、(9)~(12)得出整个触头与汇流盘接触区域的近似稳态温度, 如式(13)所示

$$I^2 R + \frac{2}{3n} I^2 r \pi^2 \rho + f \cdot F \cdot v = A \cdot C_0 \left(\frac{T_t}{100} \right)^4 \quad (13)$$

进而可得稳态温度的表达式为

$$T_t = 100 \sqrt[4]{\frac{I^2 R + \frac{2}{3n} I^2 r \pi^2 \rho + f \cdot F \cdot v}{A \cdot C_0}} \quad (14)$$

由式(14)可知, 摩擦副接触温度受到摩擦副接触载荷、电流影响, 体现热力电多场耦合对温度影响, 而温度变化进一步影响滑环摩擦副材料特性。温度与材料硬度呈现对应关系, 随着温度上升, 材料硬度往往变小, 但目前尚无准确函数表征硬度与温度关系, 一般通过查表或者试验以及经验函数来获得两者对应关系。

2.4 磨损模型近似化处理

2.4.1 摩擦副特征参数

滑环多场耦合磨损模型中的硬度、摩擦因数随着滑环运行呈现动态变化, 具有瞬态变化特征。滑环摩擦副在运行过程中, 弹性系数、泊松比、摩擦因数变化范围小, 因此本文将运行过程中的摩擦因数、弹性系数、泊松比近似为常温下的固定值。

滑环摩擦副硬度由于磨损过程中热量的产生, 使得材料特性在一定程度上发生变化。但由于磨损过程中摩擦副的温升并不大, 对于摩擦副的触头、汇流盘这种合金材料影响较小, 因此, 近似将时效

处理后的硬度值设置为固定值。

2.4.2 滑环摩擦副磨损的双向耦合

滑环摩擦副在热力电多场耦合环境条件下的运行过程中, 温度上升, 影响材料特性, 进而影响滑环磨损程度。因为温度提升时, 摩擦因数、弹性模量发生变化, 进而继续影响滑环摩擦副的稳态温度, 材料特性与温度之间相互作用, 形成双向耦合。但考虑到温升对摩擦因数、弹性模量等特征参数影响小, 以及为了提升滑环磨损模型的适用性和普遍性, 因此, 忽略温度上升后摩擦因数、弹性模量等特征参数的变化, 进而可将滑环摩擦副温度与材料特性之间影响近似为单向耦合。

2.5 基于多物理场耦合的黏着磨损计算

导电滑环载流摩擦磨损属于典型黏着磨损, 磨损过程可分为跑合阶段、稳定磨损阶段、剧烈磨损阶段。其中稳定磨损阶段时间长短决定着滑环摩擦副寿命, 稳定磨损阶段是滑环摩擦副产生磨屑量的主要阶段, 因此本文将稳定磨损阶段近似为滑环摩擦副的寿命。忽略摩擦副的润滑状态、表面膜因素影响, 此阶段黏着磨损满足如下基本定律^[21]: ① 磨损的体积与滑动距离、载荷成正比; ② 磨损产生磨屑量与材料的屈服极限(或硬度)体积为

$$\frac{V_0}{S} = k_v \frac{F}{H} \quad (15)$$

式中, S 为摩擦副触头滑动路程; k_v 为黏着磨损系数, 表征摩擦副之间的磨损程度, 根据目前的经验值设定^[22], 取一般润滑条件的平均值 $k_v=3.5 \times 10^{-5}$; H 为材料硬度, 其受温度影响, 硬度与温度呈现对应关系。同时定义触头与汇流盘之间磨损程度表征量 f_m

$$f_m = \frac{f}{A_t} = \frac{\mu \cdot F}{A_t} \quad (16)$$

式中, A_t 为滑环触头与汇流盘实际接触面积, 由赫兹理论求出; 黏着磨损因子 f_m 表示摩擦副磨损程度, f_m 越大, 说明摩擦副的磨损越严重。定义摩擦副黏着磨损强度 σ_m , 表示摩擦副在规定摩擦因数下, 失效时滑环摩擦副运行路程与黏着磨损因子乘积, 由式(15)、(16)可得

$$\sigma_m = f_m \cdot S = \frac{\mu \cdot F \cdot S}{A_t} = \frac{\mu \cdot H}{k_v} \cdot \frac{V_0}{A_t} \quad (17)$$

同理可计算摩擦副失效时的磨损体积

$$V_0 = \delta \cdot A_t \quad (18)$$

式中, δ 为磨损掉的厚度, 由式(17)、(18)可得

$$\sigma_m = \frac{\mu \cdot H \delta}{k_v} \quad (19)$$

当镀层厚度, 材料硬度, 磨损系数一定时, 黏着磨损强度为定值。滑环会受到材料、黏着磨损颗粒等因素的影响, 所以实际黏着磨损强度表示为

$$\sigma'_m = \frac{1}{n} \cdot \lambda_m \cdot \sigma_m \quad (20)$$

式中, n 为安全系数, 大于 1; λ_m 为材料影响系数, 其计算公式^[23]如下

$$\lambda_m = 6.233 \exp\left(\frac{43.89}{H}\right) \quad (21)$$

按照上式定义, 当触头和盘面结构磨损强度超过黏着磨损强度 σ_m 时, 导电滑环失效。摩擦副磨损过程中, 触头与盘面结构在某一瞬间获得的能量密度分别为总能量的一半。令盘面结构镀层磨去厚度为 δ_1 , 触头结构磨去厚度为 δ_2 , 根据能量守恒可得到如式(22)所示

$$\frac{1}{2} \cdot f_m \cdot S = \frac{\delta_1}{\delta} \cdot \sigma_1 = \frac{\delta_2}{\delta} \cdot \sigma_2 \quad (22)$$

$$\delta_1 + \delta_2 = \delta \quad (23)$$

联立式(22)、(23), 解得触头磨损厚度为

$$\delta_1 = \frac{\delta_2 \cdot \sigma_2}{\sigma_1 + \sigma_2} \quad (24)$$

式中, σ_1 为汇流盘黏着磨损强度, σ_2 为触头黏着磨损强度; 将式(24)代入式(22)可得

$$S = \frac{2\sigma_1 \cdot \sigma_2}{\sigma_1 + \sigma_2} \cdot \frac{1}{f_m} = \frac{2\sigma_1 \cdot \sigma_2}{\sigma_1 + \sigma_2} \cdot \frac{A_t}{u \cdot F} \quad (25)$$

路程 S 亦可表示为

$$S = t \cdot w \cdot R \quad (26)$$

式中, w 、 R 分别表示为滑环角速度、半径; t 表示滑环失效时间长度, 计算方法如下

$$t = N \cdot T \quad (27)$$

式中, N 为滑环摩擦副失效时运转圈数, T 为摩擦副运转一次所需时间。联立式(24)~(27)可得滑环摩擦副运转次数 N 。

$$N = \frac{2\sigma_1 \cdot \sigma_2}{\sigma_1 + \sigma_2} \cdot \frac{1}{f_m} \cdot \frac{1}{T \cdot \omega \cdot R} = \frac{2 \cdot \frac{1}{n^2} \cdot 6.233^2 \cdot \exp\left[-\left(\frac{43.89}{H_1} + \frac{43.89}{H_2}\right)\right] \cdot \frac{\mu^2 \cdot H_1 \times H_2 \cdot \delta^2}{k_v^2}}{\frac{1}{n} \left(6.233 \cdot \exp\left(-\frac{43.89}{H_1}\right) \cdot \frac{\mu \cdot H_1 \cdot \delta}{k_v} + 6.233 \cdot \frac{\mu \cdot H_2 \cdot \delta}{k_v} \right)} \cdot \frac{A_t}{\mu \cdot F \cdot \omega \cdot R \cdot T} = \frac{\frac{2}{n} \cdot 6.233 \cdot \exp\left[-\left(\frac{43.89}{H_1} + \frac{43.89}{H_2}\right)\right] \cdot H_1 \times H_2 \cdot \delta}{\exp\left(-\frac{43.89}{H_1}\right) \cdot H_1 + \exp\left(-\frac{43.89}{H_2}\right) \cdot H_2} \cdot \frac{A_t}{F \cdot C \cdot k_v} \quad (28)$$

式中, C 为滑环单个盘道的周长, T 为滑环摩擦副旋转单周的时间, H_1 、 H_2 分别代表触头、汇流盘硬度值。摩擦副运转次数计算需要滑环摩擦副接触面积、材料硬度等参数。摩擦副接触面积和材料硬度分别受接触载荷和接触温度影响, 而电流、载荷对温度有直接影响。滑环磨损模型考虑热力电多物理场耦合因素对磨损影响, 基于多场耦合磨损模型对滑环摩擦副寿命预测。

为方便滑环多场耦合的计算, 将所有参数单位统一。其中, 滑环摩擦副触头与汇流盘硬度单位一般用维氏硬度或布氏硬度表达, 将维氏硬度与布氏硬度进行统一, 它们之间的换算关系^[24]如式(29)所示

$$\text{HB(布氏硬度)} = \frac{\text{HV(维氏硬度)} + 10.5}{1.05} \quad (29)$$

此公式换算结果与国家标准换算值对照, 换算误差为 ± 2 HV, 试样硬度为 214 HB 时, 维氏硬度值同为 214 HV, 当硬度小于该值时两者几乎相等, 随着硬度增加, $\text{HB} < \text{HV}$, 如 $370 \text{ HB} < 377 \text{ HV}$, 但误差并不大, 且 1 HB 近似等于 1 MPa。

2.6 基于多物理场耦合模型的工艺优化

导电滑环磨损模型由摩擦副的硬度、比热容、接触载荷等特征量决定, 通过磨损模型预测不同摩擦副材料、工艺条件下的磨损。根据构建的多场耦合滑环磨损模型对摩擦副材料、镀金工艺、触头工艺、焊接工艺、装备工艺进行改进及优化, 如图 6 所示的滑环工艺优化。

根据在不同特征参数下的滑环磨损模型计算结果对滑环摩擦副的触头与汇流盘的材料进行筛选, 具体完成如下四方面优化: ① 对滑环摩擦副材料的初步优化, 减少以往对滑环摩擦副的材料选择而进行的大量试验测试; ② 摩擦副材料选择之后, 又因为汇流盘的镀金工艺和触头的失效工艺对摩擦副材料特性具有一定程度影响, 所以还需要考虑汇流盘镀金工艺、触头失效工艺对摩擦副材料特性影响, 基于磨损模型从而对触头、镀金工艺进行优化, 优化镀层体系方案设计和触头热工艺方案设计。③ 滑环摩擦副在装配过程中同样会对摩擦副的材料特性有一定影响, 所以基于模型基础上, 可以对滑环的焊接工艺进行改进, 优化焊接工艺设计方案和滑环摩擦副的工艺, 提升滑环摩擦副的寿命。④ 接触载荷是影响滑环磨损的重要因素, 根据滑环多场耦合的磨损模型可以有效预测不同载荷下的磨损情况, 进而对滑环的装配工艺进行优化。通过对滑环工艺的优化解决了摩擦副设计中触头与汇流盘镀层材料进行逐一试验的缺点, 减少导电滑环摩擦副试验的

经济和时间投入，从而达到滑环摩擦副的设计与制造工艺优化以及提升滑环可靠性的目的。

图 6 基于导电滑环磨损模型的滑环工艺优化

3 试验验证与结果分析

为了验证摩擦副多场耦合磨损计算模型的正确性，进行导电滑环摩擦副磨损试验，将试验结果数据与本文提出的多物理场耦合磨损模型的计算结果比较，验证模型正确性与可靠性。本文将某厂制造的空间用盘式导电滑环作为试验对象，导电滑环结构如图 7 所示，性能参数如表 1 所示。

滑环摩擦副磨损试验分为大气跑合试验与真空环境跑合试验两个阶段，试验方案如图 8 所示。其中大气跑合试验用于模拟导电滑环摩擦副在初始运行阶段磨损跑合阶段，使导电滑环进入稳定磨损阶段；真空跑合试验模拟导电滑环稳定磨损阶段，

表 1 导电滑环组件性能指标

项目	技术指标
功率环额定电流/A	7
信号环额定电流/A	0.25
环境温度/℃	20±5
静摩擦力矩/(N·m)	≤1
绝缘电阻/MΩ	≥200
静态接触电阻变化值/m	≤5
动态接触电阻变化值/m	≤5
触头材料	AuCuAgZn
导电环材料	紫铜，表面覆 Au-Co 镀层
触头硬度	HV 300
汇流盘硬度	HV 180
额定寿命/转	50 000

图 7 盘式滑环环体组环示意图

图 8 导电滑环摩擦副试验流程图

采集导电滑环在真空环境跑合试验后的磨屑量。同时设置同样运行条件和滑环运转相同圈数作为输入条件,通过多物理场耦合磨损计算磨屑量,与实际试验进行比较,验证多物理场耦合磨损模型的正确性与可靠性。

3.1 基于多物理场耦合磨损模型的温升仿真试验

导电滑环摩擦副由于电流传输、摩擦产生热量,接触区域温度升高,加速摩擦副磨损。温升为影响滑环多场耦合磨损重要因素,且可作为表征摩擦副磨损情况的指标,本文首先进行基于多物理场耦合磨损模型的温升仿真试验,检验多物理场耦合磨损模型计算温度的合理性。多物理场耦合摩擦副仿真试验条件参数按照真实滑环摩擦副试验条件设定,滑环性能参数如表 1 所示,同时设置 0.20~0.36 N 等间距 0.04 N 的五种滑环摩擦副设计常用接触载荷进行仿真试验,多物理场耦合摩擦副仿真试验中将滑环摩擦副试验参数、工艺参数作为输入,应用多物理场耦合磨损模型中的温升模型计算各个载荷下滑环摩擦副温度变化情况,结果如图 9 所示。在节点 0.20 N、0.24 N、0.28 N、0.32 N、0.36 N 下摩擦副温升分别为 76 °C、79 °C、82.5 °C、85 °C 与 88 °C,仿真试验随着载荷增加,温升变化越大;在摩擦副接触载荷 0.36 N 时,温度变化达到最大值 88 °C,随着接触载荷增加,接触区域温度升高,可见多物理场磨损模型计算接触区域温升的合理性。

图 9 接触载荷变化下的摩擦副温升

3.2 基于多场耦合磨损模型的磨损分析预测

为验证摩擦副多场耦合磨损模型对摩擦副实际磨损预测的正确性与可靠性,应用磨损模型仿真结果与导电滑环摩擦副在相同条件下的试验结果进行对比,验证其正确性和可靠性。导电滑环摩擦副磨损试验流程如图 8 所示。磨损试验分为大气真空跑合试验、真空环境跑合试验分两阶段,设置 0.20~0.36 N 等间距 0.04 N 为摩擦副的接触载荷,进行 5 次试验,真空环境下累计运转 5 万转左右,试验结

束后,拆卸导电滑环,收集磨屑,并观察触头和汇流盘面磨损现象。利用精度优于 1 mg 的电子天平检测磨屑质量,磨屑实测质量分别为 1 112 mg、1 192 mg、1 230 mg、1 280 mg 与 1 290 mg,用电子显微镜观测盘片磨损后表面形貌如图 10 所示。

图 10 盘片环道镀金层磨痕高倍形貌图

镀金层上与触头接触部位都有较深的磨痕,并且部分功率盘片的镀金层已经被磨穿,露出银白色的镀镍层,详见图 10。磨屑形状均为较小的颗粒状,尺寸为 10~50 μm,呈典型的磨粒磨损形貌。

将导电滑环摩擦副试验的摩擦副参数、环境参数作为多物理场耦合磨损模型仿真试验的条件参数,且设置滑环摩擦副运转 5 万次,按照表 2 所示的接触载荷参数进行仿真试验。

表 2 多物理场耦合摩擦副试验载荷

试验项目	接触载荷/N
试验 1	0.20
试验 2	0.24
试验 3	0.28
试验 4	0.32
试验 5	0.36

比较多场耦合模型计算磨屑量结果与实际磨损量的差异,验证摩擦副多场耦合磨损模型的正确性与可靠性,真实试验与仿真试验结果对比如图 11 所示。

图 11 多物理场耦合摩擦副模型计算结果

图 11 中,滑环摩擦副模型计算磨屑量结果与导电滑环磨损跑合试验结果数据相近。其中在接触载

荷 0.36 N 时, 模型计算结果与实际数据偏差最大, 且偏差仅为 52 mg, 偏差为 4%。模型计算结果与真实导电滑环磨损试验数据偏差在较小范围波动, 可见导电滑环摩擦副模型具有较高的准确性与可靠性。

4 导电滑环摩擦副工艺参数优化

导电滑环摩擦副设计过程中, 需要考虑影响滑环摩擦副性能的诸多因素, 包括导电滑环工作环境、材料特性、接触载荷、几何尺寸等。本文构建的模型可有效地用于提升滑环摩擦副设计制造工艺水平, 减少滑环摩擦副设计过程中的时间与经济投入, 预测滑环摩擦副在不同工艺条件下的寿命, 从而达到摩擦副的工艺优化目的。

4.1 多场耦合摩擦副磨损分析软件系统

为方便滑环设计人员使用本文提出的滑环摩擦副多物理场耦合磨损模型, 本文应用 matlab 软件将摩擦副多耦合模型编写成导电滑环多场耦合磨损分析软件系统, 该系统将滑环摩擦副设计中常考虑的三个关键工艺参数: 触头与汇流盘的硬度差、接触载荷、摩擦因数作为系统三种计算模式, 输入三个关键参数初始值后, 根据摩擦副设计中关键参数常用特点, 生成等间距关键参数组, 同时输入滑环摩擦副工艺参数、运行环境、材料特性的运行条件。同时设置滑环的极限磨损量, 作为滑环失效的阈值, 预测导电滑环寿命。导电滑环多场耦合磨损分析模型软件系统的界面和系统方案流程如图 12、13 所示。

图 12 导电滑环多场耦合磨损分析模型软件系统

图 13 导电滑环多场耦合磨损分析系统

4.2 多场耦合磨损预测模型的工艺参数优化

多场耦合模型能近似计算滑环摩擦副在各种工艺条件下的磨屑量,进而对各滑环工艺参数进行优化,为滑环摩擦副设计提供决策信息。本文针对影响滑环摩擦副寿命的重要工艺进行参数仿真试验,包括接触载荷和接触电阻两种工艺试验,接触载荷试验是在摩擦因数 0.16 下,以三种摩擦副硬度差分别为 100 HB、120 HB、140 HB,载荷为 0.2 N 到 0.34 N 间隔为 0.02 N 进行计算分析,其余的滑环摩擦副环境、工艺参数如图 12 所示,计算结果如图 14 所示,随着摩擦副两者之间硬度差的减少,摩擦副寿命越长;并且随着载荷增加,摩擦副寿命衰减,体现了随着载荷增加,滑环摩擦副的磨损加剧。

图 14 接触载荷变化下运转次数预测

导电滑环摩擦副的接触电阻也是影响摩擦副摩擦磨损重要因素,本文针对滑环摩擦副接触电阻变化范围内对摩擦副磨损影响进行接触电阻试验,接触载荷设置为 0.15 N,试验其它参数与上述试验相同,计算结果如图 15 所示。随着接触电阻的增大,摩擦副磨损产生热量增加,接触区域温度升高,磨损加剧,摩擦副寿命下降。随着接触电阻增加,磨损加剧速率减小,与摩擦副实际运行结果相似。

图 15 接触电阻变化下的运转次数预测

4.3 基于多场耦合磨损模型的接触载荷工艺优化

为进一步验证模型在滑环工艺设计中的作用,

以实际滑环摩擦副工艺设计中的重要工艺参数接触载荷为例验证模型的适用性。接触载荷是保证滑环触头与汇流盘良好接触的关键因素,保证滑环传输信号稳定。接触载荷过小时,滑环寿命长,但是滑环传输稳定性变差,滑环摩擦副传输失效概率增加;接触载荷过大时,滑环传输稳定性好,但是由于载荷的增加,磨损严重,滑环寿命短。因此,合理的接触载荷设定是保证滑环稳定传输与完成规定额定寿命任务的重要因素。

在本节中,假设滑环尺寸、材料特性等已经确定的前提下,对滑环的接触载荷进行优化设计,选择最优接触载荷。同样本文以某航天厂制造的某型号导电滑环为例,根据当前工艺参数条件选择滑环摩擦副的最优接触载荷,接触载优化流程如图 16 所示,滑环参数如表 1 所示。

图 16 接触载荷优化流程图

滑环额定寿命为 5 万转,考虑模型本身的误差,选用高于额定寿命的 20% 到 40% 作为参考寿命,通过模型计算结果如图 17 所示。根据模型计算结果,选定最优载荷在 0.114~0.136 N 的区间作为接触载荷的优选区间,保证滑环摩擦副的传输稳定性和寿命,仿真试验结果优化区间与试验测试优化区间相近,进一步证明了方法的可靠性和准确性。基于最优载荷的选择区间,直接可以对滑环装配工艺进行优化,进而对装配工艺方案合理设计。

图 17 不同载荷下摩擦副寿命预测

5 结论

(1) 本文针对摩擦副在多场耦合运行的复杂环境, 应用赫兹接触理论与传热学方法分别构建摩擦副接触模型和温升模型, 计算滑环运行过程中摩擦副接触变形与温度变化, 量化热力电多场耦合对摩擦副磨损的影响。

(2) 在本文构建的接触模型和温升模型基础上, 结合黏着磨损计算方法, 建立多物理场耦合下的磨损模型, 通过与真实试验数据对比, 证明摩擦副寿命模型的可靠性和合理性。

(3) 应用磨损模型于实际滑环摩擦副的工艺参数优化设计, 以重要的工艺参数接触载荷为例, 进行仿真试验与分析, 证明了磨损模型对工艺决策的有效性; 磨损模型可以显著减少滑环摩擦副工艺设计的经济、时间投入, 并提高空间用导电滑环的可靠性与寿命

参 考 文 献

- [1] 卢锦明, 刑立华, 李耀娥, 等. 精密导电滑环的关键技术及发展趋势[J]. 导航与控制, 2015, 14(1): 20-24.
LU Jinming, XING Lihua, LI Yaoe, et al. The key technology and developing trend of the precision conductive slip-ring[J]. Navigation and Control, 2015, 14(1): 20-24.
- [2] 董霖, 陈光雄, 周仲荣. 载流摩擦磨损系统研究[J]. 润滑与密封, 2009, 34(7): 102-106.
DONG Lin, CHEN Guangxiong, ZHOU Zhongrong. Research on the system of friction and wear with electric current[J]. Lubrication Engineering, 2009, 34(7): 102-106.
- [3] ZHANG Y Z, YANG Z H, SONG K X, et al. Triboelectric behaviors of materials under high speeds and large currents[J]. Friction, 2013, 1(3): 259-270.
- [4] HUANG S, FENG Y, LIU H, et al. Electrical sliding friction and wear properties of Cu-MoS₂-graphite-WS₂, nanotubes composites in air and vacuum conditions[J]. Materials Science and Engineering, 2013, 560(2): 685-692.
- [5] DING T, CHEN G X, ZHU M H, et al. Influence of the spring stiffness on friction and wear behaviours of stainless steel/copper-impregnated metallized carbon couple with electrical current[J]. Wear, 2009, 267(5): 1080-1086.
- [6] CHEN J, YANG F, LUO K, et al. Experimental investigation of the electrical contact characteristics in rolling contact connector[C]// Electrical Contacts. Electrical Contacts. the 61st Holm Conference on Electrical Contacts, October 11-14, 2015, San Diego, CA, USA. New York: IEEE, 2015: 235-240.
- [7] CHEN J, RONG M, YANG F, et al. Numerical research on the electrical contact model and thermal analysis of the roll-ring[C]// International Conference on Electric Power Equipment-Switching Technology, October 20-23, 2013, Matsue, Japan. New York: IEEE, 2013: 1-4.
- [8] 李玲玲, 韩俊杰, 王成山. 基于灰色理论的继电器电接触可靠性预测[J]. 机械工程学报, 2012, 48(2): 68-72.
LI Lingling, HAN Junjie, WANG Chengshan. Based on grey theory of prediction on electrical contact reliability of relay[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(2): 68-72.
- [9] 李玲玲, 马东娟, 李志刚. 基于状态监测数据的电器电接触性能评估[J]. 机械工程学报, 2015, 51(18): 198-203.
LI Lingling, MA Dongjuan, LI Zhigang. Performance assessment based on condition monitoring data of electrical contact of electrical products[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(18): 198-203.
- [10] PLESCA A. Thermal analysis of sliding electrical contacts with mechanical friction in steady state conditions[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2014, 84(84): 125-133.
- [11] XIE Xinlin, ZHANG Lei, XIAO Jinkun et al. Sliding electrical contact behavior of AuAgCu brush on Au plating[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2015, 25(9) : 3029-3036.
- [12] 郑冀, 欧阳锦林. 真空长寿命自润滑电刷—滑环材料的研究[J]. 摩擦学学报, 1997, 17(2): 129-139.
ZHENG Ji, OUYANG Jinlin. Study on long life electrical brush slip-ring in vacuum[J]. Tribology, 1997, 17(2): 129-139.
- [13] 尹念, 张执南, 张俊彦. 导电滑环 Au 涂层摩擦磨损行为的分子动力学模拟[J]. 摩擦学学报, 2018, 38(1): 108-114.
YIN Nian, ZHANG Zhinan, ZHANG Junyan. Molecular dynamics simulation of friction and wear behaviors of Au coating for conductive slip ring[J]. Tribology, 2018, 38(1): 108-114.
- [14] MONNIER A, FROIDUROT B, JARRIGE C, et al. A mechanical, electrical, thermal coupled-field simulation of a sphere-plane electrical contact[J]. IEEE Transactions on

- Components & Packaging Technologies, 2007, 30(4): 787-795.
- [15] GRANDIN M, WIKLUND U. Wear and electrical performance of a slipring system with silver-graphite in continuous sliding against PVD coated wires[J]. Wear, 2016, 348(2): 138-147.
- [16] KOBAYASHI T, SAWA K, ENDO K, et al. A study of sliding characteristics of small-size slip-ring system for electric power supply[C]// 53rd IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, September 16-19, 2007, Pittsburgh, PA, USA. New York: IEEE, 2007: 194-199.
- [17] 吴晓君, 刘睿平, 于兴展, 等. 基于赫兹理论的弹性磨具磨抛 M300 钢表面参数模型研究[J]. 表面技术, 2015, 44(6): 109-114.
- WU Xiaojun, LIU Ruiping, YU Xingzhan, et al. Study on the parameter model of grinding and polishing the m300 steel surface by elastic abrasive tools based on hertz theory[J]. Surface Technology, 2015, 44(6): 109-114.
- [18] HENNESSY R P, MCGRUER N E, ADAMS G G. Modeling of a thermal-electrical-mechanical coupled field contact[J]. Journal of Tribology, 2012, 134(4): 041402-041410.
- [19] 王天壹, 宣益民. 热辐射对气膜冷却叶片冷却性能影响[J]. 航空动力学报, 2018, 33(8): 1801-1810.
- WANG Tianyi, XUAN Yimin. Effect of thermal radiation on the heat transfer performance of a film cooling vane[J]. Journal of Aerospace Power, 2018, 33(8): 1801-1810.
- [20] 站洪仁. 工程传热学基础[M]. 北京: 中国石化出版社, 2014.
- ZHAN Hongren. Fundamentals of engineering heat transfer[M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2014.
- [21] 李聪波, 何娇, 杜彦斌, 等. 基于 Archard 模型的机床导轨磨损模型及有限元分析[J]. 机械工程学报, 2016, 52(15): 106-113.
- LI Congbo, HE Jiao, DU Yanbin, et al. Archard model based machine tool wear model and finite element analysis[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(15): 106-113.
- [22] 赵义鹏, 梁医, 冯虎田. 滚动直线导轨副的磨损预测模型与精度保持[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2018, 10(6): 122-127.
- ZHAO Yipeng, LIANG Yi, FENG Hutian. Wear prediction model and precision maintenance of rolling linear guide modular[J]. Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2018, 10(6): 122-127.
- [23] 续海峰. 粘着磨损机理及其分析[C]// 晋冀鲁豫鄂蒙川云贵甘沪湘十二省区市机械工程学会 2007 年学术年会, 2007 年 10 月 1 日, 济南: 中国机械工程学会, 2007(S1): 95-96.
- XU Haifeng. Adhesion wear mechanism and analysis[C]// 2007 Academic Annual Meeting of Mechanical Engineering Society of 12 Provinces and Cities, October 1, 2007, Jinan: China Society of Mechanical Engineering, 2007(S1): 95-96.
- [24] 崔进海, 刘全红. 探讨相似定律在布氏和维氏硬度试验中的应用[J]. 现代测量与管理, 2001, 9(4): 30-33.
- CUI Jinhai, LIU Quanhong. Discussion on the application of similarity law in brinell and vickers hardness test[J]. Modern Measurement and Test, 2001, 9(4): 30-33.

作者简介: 孙远航, 男, 博士研究生。主要研究方向为导电滑环、摩擦学、智能维护。

E-mail: 289956762@qq.com

余建波(通信作者), 男, 余建波, 男, 博士, 教授。主要研究方向为质量与可靠性、设备智能维护、生产与服务系统设计。

E-mail: jbyu@tongji.edu.cn