第 52 卷 第 2 期：520-532 高电压技术 Vol.52, No.2: 520-532
2026 年 2 月 28 日 High Voltage Engineering February 28, 2026
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20250652

TMR 电流传感器可靠性测试方法与失效退化分析

王冠鹰[1]，梁先锋[1]，赵鹏飞[2]，邓庚会[2]，程宇心[1]，郭经红[1]
（1. 中国电力科学研究院有限公司，北京 102209；2. 工业和信息化部电子第五研究所，广州 510610）

摘　要：为全面评估隧穿磁阻(tunneling magnetoresistance，TMR)电流传感器在严酷环境下的长期可靠性，建立涵盖多种应力因素的综合加速试验方法，对传感器开展高温、低温、湿热、温度循环及电磁扰动试验，并跟踪关键性能退化和物理失效机理。结果表明：TMR 电流传感器在 150 ℃贮存 1 000 h 后灵敏度漂移绝对值≤5%，在 85 ℃、相对湿度 85%条件下老化 1 000 h 后，零点输出漂移绝对值≤3%且无趋势性衰退；温度循环(–40 ℃ ↔ 125 ℃)和电快速瞬变脉冲群/浪涌冲击下均未出现功能失效。基于多应力寿命模型对典型运行条件进行寿命预测，传感器预期寿命可达数十年，满足电力设备长期可靠性要求。TMR 电流传感器主要潜在失效模式为高温条件下的材料老化、湿热环境下封装失效可能引发的腐蚀以及雷击浪涌下的瞬态击穿。研究结果为 TMR 电流传感器的寿命评估和高可靠性设计提供了科学依据和参考。

关键词：隧穿磁阻；电流传感器；多应力加速老化；可靠性评估；失效机理；寿命预测

Reliability Testing Methods and Failure Degradation Analysis for TMR Current Sensors

WANG Guanying[1], LIANG Xianfeng[1], ZHAO Pengfei[2], DENG Genghui[2], CHENG Yuxin[1], GUO Jinghong[1]
(1. China Electric Power Research Institute, Beijing 102209, China;
2. No.5 Electronic Institute, Ministry of Industry and Information Technology, Guangzhou 510610, China)

Abstract：To comprehensively evaluate the long-term reliability of tunneling magnetoresistance (TMR) current sensors under harsh environments, a multi-stress accelerated testing methodology was established. The test matrix includes high- and low-temperature storage, damp-heat aging, thermal cycling, and electromagnetic disturbance tests, while key performance drifts and physical failure mechanisms are continuously monitored. The results show that the absolute sensitivity drift is ≤5% after 1 000 h storage at 150 ℃, and the absolute zero-offset drift is ≤3% with no progressive degradation after 1 000 h biased aging at 85 ℃ and 85% relative humidity (RH). No functional failures are observed during thermal cycling (–40 ℃ ↔ 125 ℃) or under electrical fast transient (EFT) and surge stresses. Based on multi-stress lifetime modeling, the lifetime is projected to be decades under typical ambient conditions by translating accelerated-test results to nominal use conditions, meeting long-term reliability requirements for power equipment. Dominant failure modes include material aging at high temperatures, corrosion induced by package degradation in humid environments, and transient dielectric breakdown during lightning surges. This study provides a scientific basis for TMR sensor lifetime assessment and high-reliability design.

Key words：tunneling magnetoresistance; current sensor; multi-stress accelerated aging; reliability evaluation; failure mechanism; lifetime prediction

0　引言

在新型电力系统数字化转型背景下，电流的精确可靠测量是保障智能电网安全、高效运行的关键基础[1-3]。传统的电磁式电流互感器体积庞大且无法测量直流[4]，而霍尔传感器灵敏度低且温漂严重，难以满足智能电网对宽量程、高精度测量的需求[5]。隧穿磁阻(tunneling magnetoresistance，TMR)电流传感器具有高灵敏度、低功耗和宽频响应等优势，作为新型电力专用传感芯片在电流测量领域展现出巨大潜力，可实现接触式或非接触式的交直流电流测量[6-8]。近年来，多项研究表明了 TMR 电流传感技术的性能优势及在智能电网的应用前景[9-10]。例如，参文[11]设计了集成数字补偿的智能 TMR 电流传感器；参文[12]设计了高精度的 TMR 电流传感器；参文[13]研制出体积小巧且高精度的 TMR 母线直流传感器，适用于大电流测量；参文[14]提出了高

基金资助项目：国家电网有限公司科技项目(5700-202358704A-3-3-JC)。
Project supported by Science and Technology Project of SGCC (5700-202358704A-3-3-JC).

精度 TMR 弱电流传感器，用于智能电网的小电流监测；参文[15]研究表明单个 TMR 元件即可同时感知电流和温度，实现电流与温度双参数测量。另外，参文[16]研究开发了自驱动的电流传感器，实现传感器能量自供电以适应智能电网应用；参文[17]将无芯电流互感器与 TMR 元件结合的混合式电流传感方案兼具宽频带和高灵敏度；参文[18]为高压电力设备的泄漏电流监测设计多级 TMR 传感器，拓展测量范围并提高了灵敏度。基于巨磁阻效应(giant magnetoresistance，GMR)的电流传感器也被用于电网监测，但 GMR 传感器的磁阻变化率较低，TMR 传感器展现出更高的稳定性和精度[19-21]。

尽管 TMR 传感器具备诸多性能优势，但其在严酷环境下的长期可靠性仍面临显著挑战。野外场站及变电站中的传感器往往暴露于酷暑和严寒，并经历昼夜反复的热循环冲击；在沿海或高湿地区，相对湿度常年高于 80%，湿热环境易引发器件受潮腐蚀；靠近高压线路的传感装置还会遭受雷击浪涌、电网开关操作产生的快速瞬变脉冲以及静电放电等强电磁应力干扰。这些严酷应力会导致传感器材料和结构逐渐退化。例如，高温会使器件材料发生热膨胀并积累内应力，甚至引起磁性层磁化方向漂移；潮湿高温环境可能造成封装保护层失效，金属薄膜腐蚀、绝缘漏电增加，进而改变 TMR 元件的电阻。过强的电场和浪涌电流可击穿 TMR 隧道结的超薄绝缘势垒层，使元件电阻骤降并发生不可逆击穿。另外，大幅度的脉冲磁场可能导致传感器出现不可逆的磁滞回线展宽和零点漂移等现象。因此，如何保证 TMR 电流传感器在上述综合应力下长期可靠运行成为亟需解决的技术问题。一方面，需要通过加速老化试验模拟长期服役工况，从中识别 TMR 传感器可能出现的失效模式；另一方面，需要发展性能退化模型和寿命预测方法，以便根据加速试验数据评估器件的长期可靠性。

目前已有一些初步研究涉及 TMR 传感器的可靠性[22-23]，研究表明，加速寿命试验是实现电子器件高可靠、长寿命的有效手段，同时相关标准和可靠性模型为器件失效机理分析与寿命评估提供了指导；此外，还有研究致力于提高 TMR 传感器的温度稳定性和抗干扰性能，以减缓外界应力对传感精度的影响[24-25]。在磁随机存储领域，磁隧道结(magnetic tunnel junction，MTJ)单元的数据保持和介质可靠性一直是研究重点。Akerman 等通过长时间应力试验表明，优化设计的 MTJ 存储单元在工作条件下可实现超过 10 年的可靠寿命[26]；然而，不同失效机制在加速应力下可能并行发生，使可靠性预测变得复杂。已有一些研究开始探索传感器的性能退化规律和寿命预测方法。例如，吕瑛等提出了电子元件加速退化的寿命评估方法[22]；Wang 等利用随机效应 Wiener 过程对传感器退化数据建模并估计其剩余寿命[27]。但总体而言，针对 TMR 电流传感器的失效机理与可靠性评估尚处于起步阶段，特别是公开报道的多应力条件下 TMR 性能退化规律和物理失效分析相对缺乏，这在一定程度上制约了 TMR 传感器在电力系统等关键领域的规模化应用。在实际工程应用中，TMR 电流传感器常年暴露于苛刻环境中，易出现零点输出漂移、灵敏度下降以及早期退化等问题，进一步影响传感器的测量精度与稳定性[4]。因此，亟需深入研究多应力环境下 TMR 性能退化的机理与规律。

本文针对智能电网应用的 TMR 电流传感器开展了系统的多应力可靠性研究。分析了热应力、湿热应力、电磁应力和机械应力等环境因素可能导致的失效机理及演变路径，识别 TMR 传感器在严酷环境下的薄弱环节；制定并实施包含高温、低温、温度循环、湿热带电老化、电快速瞬变脉冲群及浪涌冲击等工况的加速试验方案，获取 TMR 传感器在不同应力源作用下的性能退化数据；基于试验结果构建关键性能参数的退化模型，结合寿命统计分析评估器件在典型工作环境下的寿命，并提出提升传感器环境适应性的改进建议。本文的主要贡献在于：提出了一套覆盖多种环境应力和电磁应力的综合可靠性测试方法，获取了电流传感器在长期环境老化和强电磁扰动下的性能演变规律，解决了该类传感器可靠性数据缺失的问题；阐明了不同应力作用下传感器的物理失效机理，揭示了 TMR 敏感元件在热-磁耦合、湿度侵蚀、电场击穿作用下的退化特征和失效路径。这些研究成果为 TMR 电流传感器的寿命评估和高可靠性设计提供了科学依据，对推动磁阻式电流传感技术在新型电力系统电网设备数字化中的应用具有重要意义。

1 传感原理及失效因素分析

1.1 传感原理与结构

TMR 电流传感器利用 MTJ 结构对磁场变化进行感应。典型 MTJ 由自由层/隧穿势垒层/固定层组

成，当两层铁磁材料的磁化方向平行时，隧穿电阻最低；反平行时隧穿电阻最高，即表现出隧穿磁阻效应。1975 年，Jullière 首次发现了铁磁薄膜隧穿的磁阻变化现象[28]；1995 年，Moodera 等人在室温下实现了明显的 MTJ 电阻变化[29]；2004 年，Yuasa 和 Parkin 制备出基于 MgO 隧道势垒的大隧穿磁阻器件[30-31]。这些突破使 TMR 器件开始在磁传感和磁存储领域得到实际应用。与各向异性磁阻(anisotropic magnetoresistance，AMR)和 GMR 传感器相比，TMR 传感器在相同偏置条件下可以获得更高的磁阻变化率和更宽的线性量程[9]。

对于 TMR 电流传感器，一般将桥式 TMR 芯片紧贴被测载流导体安装。流过导体的电流在其周围产生磁场，通过设计磁路将该磁场引导至传感器敏感轴方向，引起 MTJ 电阻的变化。将多个 TMR 元件连接成惠斯通电桥并测量桥路输出电压差即可反映电流变化(如图 1 所示)，其中 U_{DD} 为电源电压，U_{OUT} 为输出电压，U_{BIAS} 为偏置电压，U_+、U_-为差分输出电压。TMR 传感器可获得较高的灵敏度，且线性度更佳。然而，TMR 敏感薄膜的材料和工艺使其对环境应力比较敏感。

1.2 环境应力影响因素

1.2.1 热应力

TMR 传感器的磁隧道结由纳米级薄膜层构成，各层材料的热膨胀系数差异会在温度变化时产生热应力，使界面处产生机械应力和微观缺陷累积。高温加速老化是 TMR 器件面临的突出挑战：当环境温度接近或超过磁性薄膜的居里温度或反铁磁钉扎层的奈尔温度时，MTJ 的磁化态将显著变化，表现为隧道磁阻比降低，磁滞增大，甚至钉扎层退磁失效。尤其是对于采用 IrMn 等反铁磁材料钉扎的 TMR 元件，温度升高会削弱钉扎层对自由层的约束力，导致传感器输出零点偏置漂移[21]。

高温还会加速隧道势垒层(一般为 MgO)的劣化：长期高温偏压可引发隧道绝缘层缺陷增长和电荷陷阱累积，诱发时间依赖绝缘击穿等失效机制。如果隧穿势垒上的电压应力超过临界值，MTJ 结电阻会骤降并发生不可逆击穿。

温度循环中，封装材料与芯片材料的热膨胀不匹配会导致焊点和键合线反复经受拉伸和压缩。随着循环次数的累积，焊点或键合处可能出现裂纹或脱焊，进而导致传感器开路失效。

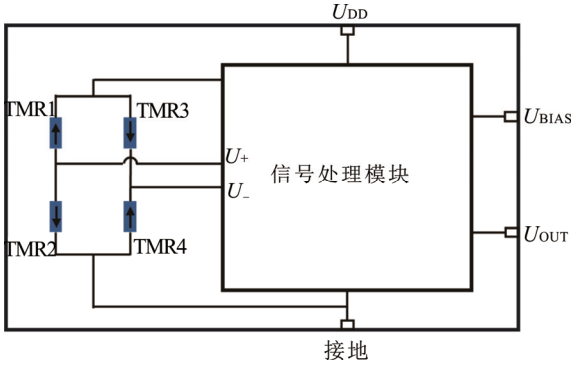


图 1 惠斯通电桥结构示意图

Fig.1 Wheatstone bridge configuration of the TMR sensor

1.2.2 湿热与化学应力

高温高湿环境对 TMR 传感器造成的复合应力，会加速器件的化学降解过程[32]。TMR 传感器通常采用塑料封装，在严苛湿热条件下，水汽会逐步透过封装层渗入内部[33]。水分和杂质在偏置电场作用下会引发电化学腐蚀：水分子形成的电解质使金属导体之间出现微电池效应，导致阳极金属溶解并迁移，在阴极处沉积形成导电枝晶或氧化物。对于 TMR 磁隧道结而言，自由层和钉扎层的外延边缘以及与引线框架相连的薄膜边缘区域最为敏感。如果上述区域的钝化保护不完善，湿气将使这些铁磁材料表面产生锈蚀或氧化膜，从而可能引起磁隧道结电阻和灵敏度的不可逆变化[7]。

水汽进入封装后会在芯片表面及封装界面形成附加导电通道，降低器件绝缘电阻，可能导致电桥电阻失衡甚至短路失效[33]。在长期带电工作条件下，湿热应力往往与电偏置共同作用，诱发更为复杂的失效模式：加速金属互连中的电迁移，在导线处形成空洞或凸起；同时，湿度为离子迁移提供通道，可引发铝线或接触点的电化学迁移和孔洞腐蚀，产生微孔或导电枝晶[32]。这些复合失效会导致互连断裂或局部短路，并使输出电桥出现偏移。

1.2.3 电磁应力

电磁应力包括强电场和强磁场应力，在高压电力环境中尤为常见。高电压操作会在传感器两端及内部介质层上施加很强的电场，瞬间场强可达数千伏每毫米。例如，当雷击或开关操作的过电压经分布电容侵入传感器时，可在毫秒级时间内于芯片引脚间施加数千伏的脉冲，容易导致隧道结的超薄绝缘层发生介质击穿，元件电阻骤降短路失效。同时，大电流冲击还可能烧毁传感器引线或内部元件。

强磁场应力也可能导致 TMR 传感器的功能失效。TMR 元件依赖精细设计的薄膜各向异性来限定磁化方向，但当外部施加的磁场显著超过传感器的设计磁场范围时(如高压母线的大短路电流所产生的脉冲磁场)，自由层和钉扎层的磁矩都有可能被强行旋转，导致传感器内部磁域结构重排。这种场致磁畴不稳定会在冲击磁场消失后留下残留磁化，体现为传感器零点偏置增大、磁滞加宽。研究表明，当外部磁场强度远超磁传感器设计范围时，输出会出现明显的不可逆偏移，需重新校正后才能恢复正常[6,34]。

1.2.4 机械应力

TMR 磁敏元件由固态薄膜组成，其性能对外界机械应力敏感。研究表明，TMR 传感器的 MTJ 薄膜堆栈在机械应力超过约几十 MPa 时会引起磁各向异性的细微改变，表现为磁阻输出偏移但不产生永久损伤[35]。当应力增加到约 100~170 MPa 量级时，会出现显著的磁阻改变或薄膜裂纹，但此时已接近硅基底材料的机械强度极限。

传感器内部的键合金线和锡焊点在反复机械载荷下会发生疲劳损伤。细径 Au 线和 Cu 线的疲劳试验显示，其循环断裂寿命从 10^2 到 10^6 次不等[36]。对于 TMR 传感器，也存在热-机械耦合作用下金线和锡焊点疲劳失效的可能。

大幅度的机械冲击(如跌落冲击)可能直接损伤传感器芯片或使封装开裂。行业标准中器件机械冲击测试通常在数百至上千 g 量级的加速度下验证芯片和封装的完整性，其中 g 表示重力加速度($g\approx 9.81\ \mathrm{m/s^2}$)(如汽车电子器件规范 AEC-Q100)，其耐受阈值通常可达到数百 g 量级。

电力设备在安装和运行中产生的机械振动通常相对温和。以变压器为例，其运行中箱体表面的振动均方根(root mean square，RMS)加速度通常不超过约 0.4 g，主要频率成分集中在电网基频及其谐波附近，为几十至数百赫兹[37]；即使偶发的安装/操作冲击其加速度也仅为数 g，远低于数百 g 的触发阈值。因此，在典型电力环境下使用 TMR 传感器时，其因机械应力而发生失效的可能性很低，能够满足长期可靠性要求。

2 试验方法

2.1 试验对象

本文选取目前市场上广泛应用的某型 TMR 电流传感器作为研究对象。该传感器采用桥式 TMR 芯片及信号调理电路集成封装，零场输出约 2.45 V(5 V 供电)，灵敏度约 0.05 V/A，线性量程约 ±50 A。其内部磁性薄膜体系、钉扎层设计以及势垒层材料均与主流产品一致，整体结构与封装工艺具有较强的代表性，能够充分体现 TMR 电流传感器在实际应用中的典型性能与工艺特点。

为了充分考察样品的可靠性，本研究共准备了 120 只同批次传感器，并随机分成多组分别用于不同应力条件下的加速试验和对比测试。主要测试设备包括：高低温试验箱(温度范围–75~200 ℃)，可编程恒温恒湿箱(温度范围 20~150 ℃、相对湿度 10%~98%)，温度冲击试验箱(两箱式，温度切换时间<10 s)，以及横向电磁波小室、电快速脉冲群发生器等电磁干扰试验设备。此外，搭建了自动参数测试系统，实现对多只传感器的零点输出、电桥电阻和灵敏度同步测量，确保获取一致可靠的数据。这些设备和系统构成了多应力加速老化试验的平台基础(如图 2 所示)。图 3 展示了 120 只被试传感器的初始值参数及其分布。

根据 TMR 传感器在电力系统应用中可能经历的典型环境应力，为评估其在复杂环境条件下的运行稳定性，综合考虑温度波动、湿度变化和电磁干扰等应力因素，制定了多工况的加速寿命试验方案。试验方案遵循有关标准规范，包括半导体器件环境应力测试的 JESD22 系列标准(JESD22-A103、JESD22-A119、JESD22-A110、JESD22-A104)和电磁兼容抗扰度 IEC 61000 系列标准(IEC 61000-4-2-2025、IEC 61000-4-4-2012、IEC 61000-4-5-2014)。

2.2 环境应力加速试验

针对温度应力，进行了高温贮存寿命试验和低温贮存试验。将传感器分别置于 150 ℃和–40 ℃的恒温环境中贮存 1 000 h，试验期间样品不上电(不施加任何工作电压或偏置)，并按阶段监测原则每隔一定时间取出部分样品测量电性能，以评估静态高/低温贮存条件下器件参数的漂移情况。

针对湿热应力，进行了 85 ℃/85%相对湿度(relative humidity，RH)偏置湿热老化 1 000 h 试验：在此过程中对传感器施加 5 V 偏置电压，测试过程中按照阶段监测方法测量各项性能参数，以模拟传感器运行情况下的长期退化。

针对温度循环应力，进行了–40 ℃↔125 ℃的快速温度循环试验：循环温度上下限分别为–40 ℃



图 2 试验平台实物图

Fig.2 Physical photos of test platform

和 125 ℃，高低温各停留 15 min，转换时间约 3 min，共循环 1 000 次，同时阶段监测各项性能参数。该试验用于加速评估封装及互连结构的热疲劳寿命。

本试验按照 JEDEC 标准建议，在试验过程中分阶段抽样检测器件性能(包括早期、中期和末期阶段)，全面评估器件在不同阶段的性能演变。

2.3 电应力抗扰度试验

静电放电抗扰度(electrostatic discharge，ESD)试验采用人体放电模型，分别对传感器的电源引脚和信号引脚施加逐级升高的静电放电冲击。测试电压从±0.5 kV 起步，以±0.5 kV 为步进逐级升高至±8 kV，每个电压等级正、负极性各放电 10 次，监测放电过程中传感器输出是否出现异常。

电快速瞬变脉冲群(electrical fast transient，EFT)试验通过耦合夹在传感器电源线上注入电快速瞬变脉冲干扰，脉冲幅值从±200 V 开始，逐级升高至±1 600 V，每级脉冲持续 1 min。观测传感器在脉冲施加期间及之后的输出波形变化，以评估其抗快速脉冲干扰能力。

雷击浪涌试验按照 1.2/50 μs 组合波雷击浪涌模型，对传感器施加幅值从 0.5 kV 逐步增加至 3 kV 的正、负极性浪涌电压，每级电压正反各冲击 5 次，测试不同浪涌电平下传感器的工作状况。

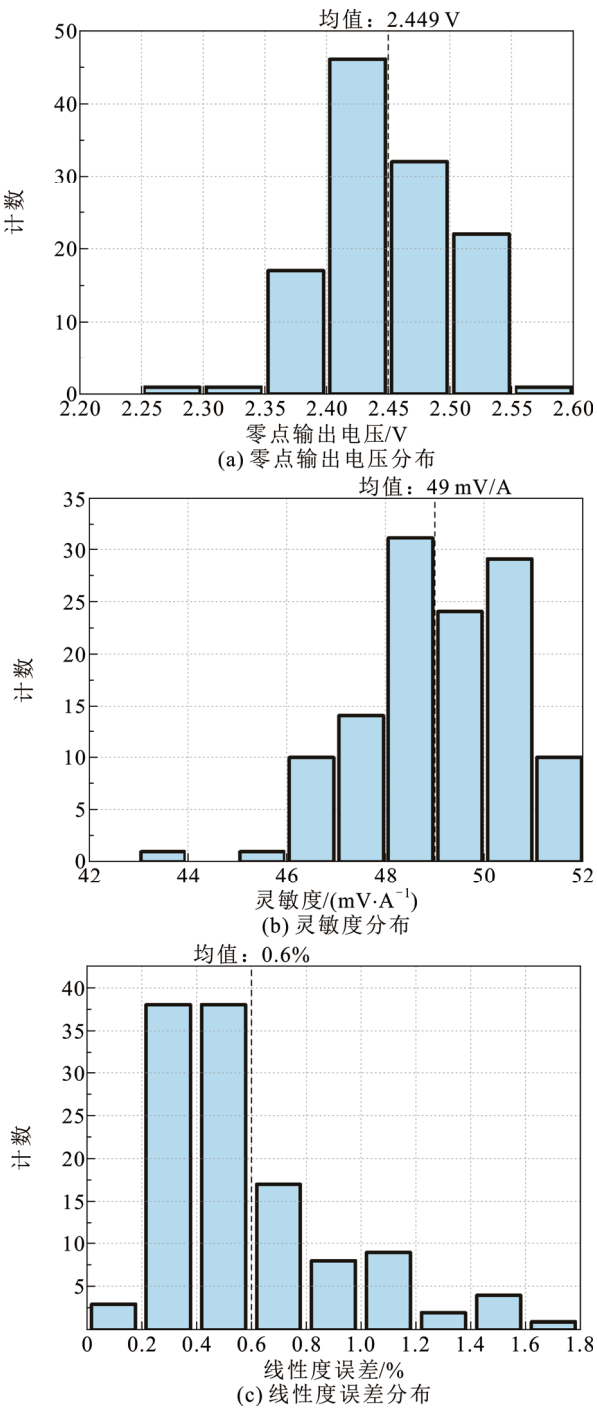


图 3 120 只被试传感器的初始值参数及其分布

Fig.3 Initial parameters of the 120 tested sensors and their histogram distributions

持续浪涌寿命试验为评估多次过电压冲击的累积影响，自行制定了重复浪涌加压方案，在 0.4~2.8 kV 区间反复施加多级浪涌电压，各电平冲击 50 次，观察经历大量浪涌冲击后器件性能的变化趋势。

此外，本文还进行了工频磁场(400 A/m)、射频辐射(场强 10 V/m)等典型电磁环境试验，并测试了传感器的近场磁辐射。

所有电应力抗扰度试验均在传感器处于正常工作状态(加额定电压、输出监测)的条件下进行，并通过监测输出信号的变化来判断传感器功能是否异常或退化。

2.4 试验后分析

对于高温贮存、低温贮存和湿热老化试验，在规定时间取出样品后于室温下测量其零点输出、电桥电阻和灵敏度等参数，并与初始值对比以评估漂移程度。灵敏度的测量方法为：在传感器穿心导线中施加±50 A 直流电，记录传感器输出电压的变化量以计算得到灵敏度值。温度循环试验则每完成约 250 次循环后进行一次室温参数测试。

对于瞬态应力试验(ESD、EFT、浪涌)，在每种应力施加前后分别测试传感器的零点输出和灵敏度，以判断瞬态扰动是否引起性能变化。

判据方面，本研究将零点输出相对初始值的漂移绝对值持续超过 5%或灵敏度相对初始值的变化绝对值持续超过 5%定义为性能退化；零点输出漂移绝对值超过 10%或灵敏度变化绝对值超过 10%定义为功能失效。试验结束后，对部分样品进行拆解分析，包括光学外观检查、X 射线透视成像、扫描电子显微镜(scanning electron microscope，SEM)和透射电子显微镜(transmission electron microscopy，TEM)检查，以观察内部结构完整性。如必要，还使用能量色散谱(energy dispersive spectroscopy，EDS)法对腐蚀产物成分进行分析。这些措施能确保及时捕捉到加速老化过程中 TMR 传感器性能退化的轨迹和失效征兆，为后续研究提供依据。

如果发现样品出现异常漂移或失效，则停止对该样品继续施加应力并重点分析其失效原因。通过上述测试流程，获得了 TMR 传感器在各种应力作用下随时间演变的可靠性数据。

3 试验结果与可靠性分析

3.1 加速老化试验结果

3.1.1 高温贮存试验结果

对 TMR 传感器进行 150 ℃高温贮存 1 000 h 老化后，大部分传感器性能保持稳定，只有个别样品出现失效。其余传感器在 1 000 h 老化过程中零点输出波动均保持较低水平，且未出现明显的持续漂移趋势。试验监测时间分别为：0、490、680、1 000 h。

第 680 h 时，有 1 只样品输出突然降为 0，经检查确定为传感器输出端对地短路失效。对该失效样品的 X 射线成像发现，其电路引线键合处出现熔珠和桥连现象，推测为封装内部局部焊料熔化所致的短路。这属于制造缺陷导致的早期失效，并非 TMR 敏感元件本身的薄弱环节。剔除该失效件后，剩余样品在 150 ℃、1 000 h 老化后的零点输出和灵敏度仅发生了极小变化。图 4 显示零点输出平均漂移绝对值<3%，灵敏度平均漂移绝对值<5%，表明 TMR 磁阻薄膜堆栈在 150 ℃高温下具有良好的稳定性。

此结果与 Pant 等针对 AMR 传感器在 225 ℃下 1 000 h 稳定工作的报道相一致[38]。说明经过优化设计的 TMR 传感器可在一定高温下保持参数稳定，符合在未超过钉扎层奈尔温度时不会发生明显退磁的预期。

3.1.2 低温贮存试验结果

–40 ℃低温环境下贮存老化 1 000 h 后，全部 TMR 传感器均正常工作，未出现功能失效或明显性能退化。图 5 中，主要参数如零点输出和灵敏度与初始值相比变化较小(零点输出变化绝对值在 3%以内，灵敏度变化绝对值在 5%以内)，表明低温对器件性能影响较小。试验监测时间分别为：0、300、642、1 000 h。

结果符合预期，低温环境主要会引起封装应力增加和材料收缩，但由于传感器芯片尺寸较小，其影响相对有限。在试验过程中曾观察到个别样品在 –40 ℃时零点输出出现轻微下降，但恢复至室温后

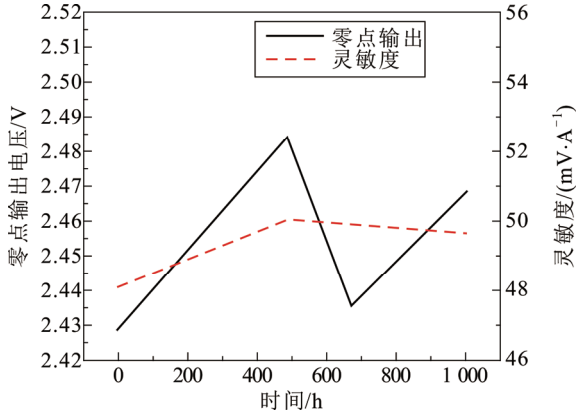


图 4 150 ℃高温加速试验后传感器零点输出、灵敏度随时间的平均变化

Fig.4 Temporal average drift of zero output and sensitivity after 150 ℃ accelerated testing

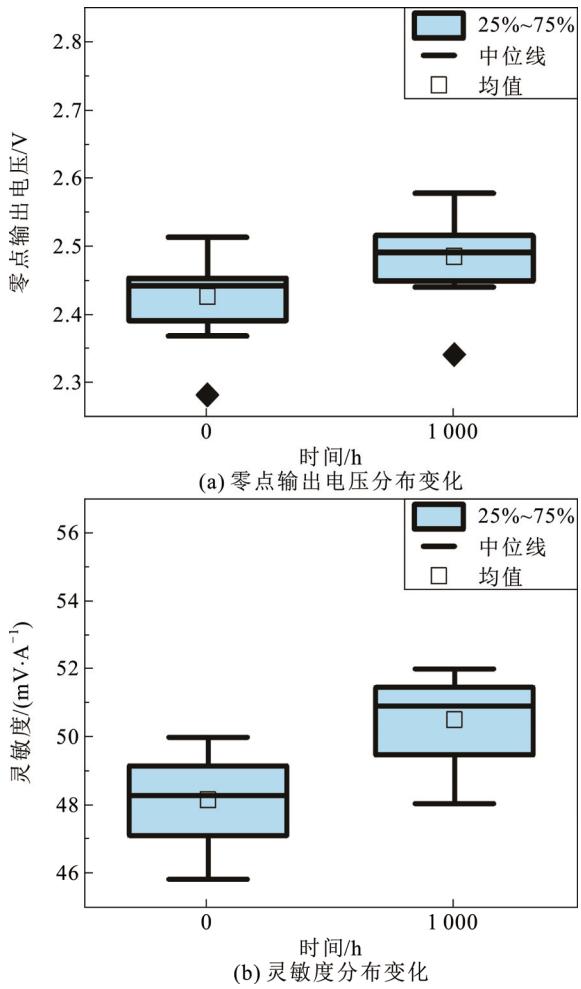


图 5 –40 ℃低温贮存 1 000 h 试验后传感器的主要参数分布变化

Fig.5 Statistical distribution shifts of key parameters after 1 000 h storage at −40 ℃ low-temperature exposures

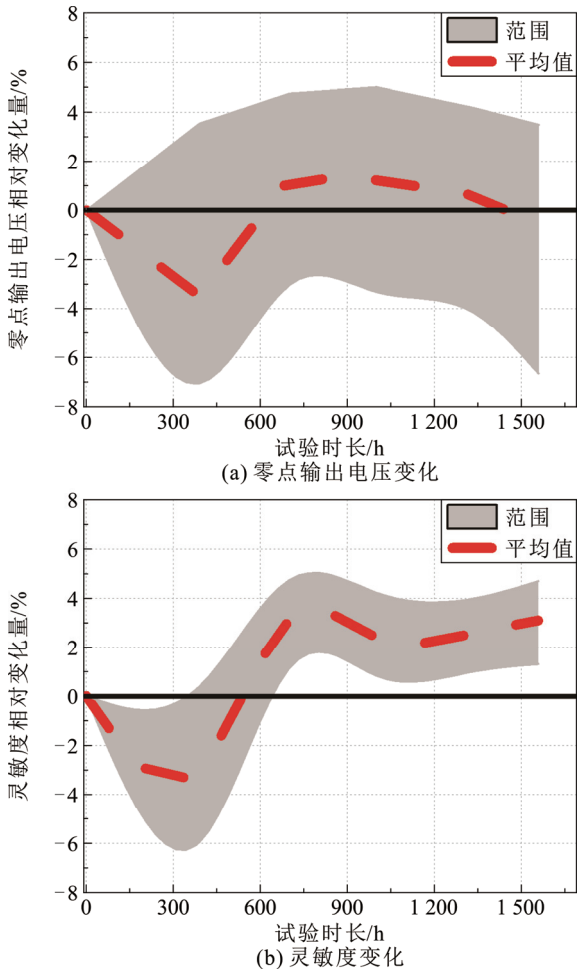


图 6 85 ℃/85%RH 湿热偏置试验中传感器主要参数相对变化的平均值和范围

Fig.6 Parametric drift statistics during 85 ℃/85%RH biased damp-heat aging

这一现象消失，推测是封装收缩所致的暂时性应力效应，而非永久漂移。检查亦未发现封装开裂、引线脱落等低温损伤迹象。由此可见，TMR 传感器能够经受长期低温环境而性能无明显劣化。

3.1.3 湿热偏置试验结果

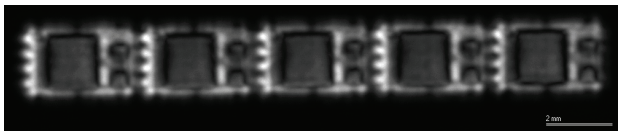
在 85 ℃、85%RH 环境下对传感器施加 5 V 偏置电压并连续老化 1 000 h(后期又扩展至 1 560 h)，期间所有样品均正常工作，无功能故障。图 6 对比显示试验前后传感器零点输出漂移均值的绝对值在 3%以内、灵敏度变化均值的绝对值不超过 4%。这说明严苛的湿热环境并未对 TMR 磁隧道结元件造成明显的性能损伤。试验监测时间分别为：0、390、700、1 000、1 560 h。

为进一步确认没有潜在退化，试验后随机抽取样品进行声学扫描和 SEM 检查，并对多层膜堆进行了 TEM 表征。图 7 成像结果显示芯片与封装界面结合良好，未发现界面分层等失效迹象；多层膜堆结构清晰完整，无分层和杂质缺陷；SEM/TEM 形貌未见典型的腐蚀产物或金属氧化物积聚。

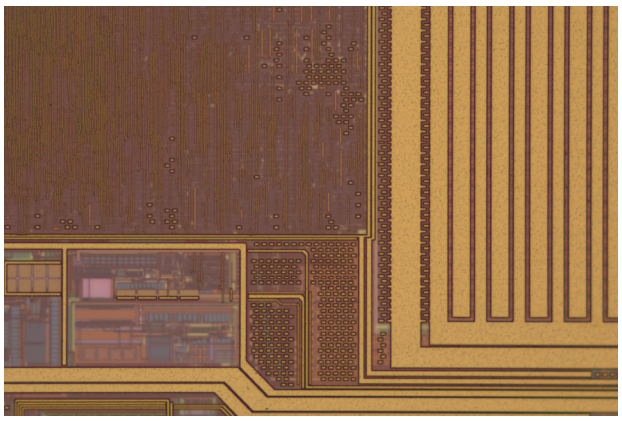
这在一定程度上得益于传感器内部电桥采用了保护性涂层和密封胶处理，从而使内部敏感区域与外部湿气隔离。同时，TMR 磁隧道结本身为固态薄膜结构，其耐湿性优于某些暴露电接触式传感器。说明封装对湿度有一定阻隔能力，没有产生大规模金属腐蚀或氧化短路；与如封装能抵御水汽，则退化表现为可逆的灵敏度劣化或微弱迁移预期一致。从加速试验结果可以推断，在常见野外环境下，该传感器具有足够的湿度可靠性裕度。

3.1.4 温度循环试验结果

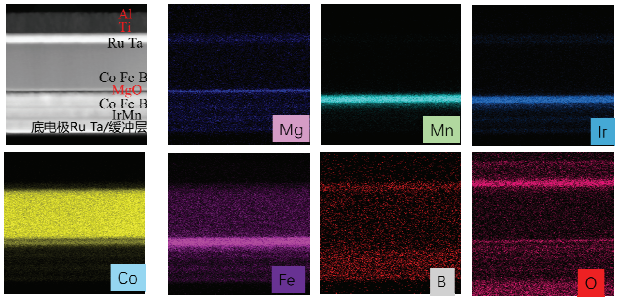
经–40 ℃↔125 ℃快速温度循环 1 000 次后，所有 TMR 传感器均正常工作，电性能保持稳定。如



(a) 声学扫描结果



(b) SEM 结果



(c) TEM 结果

图 7　检查结果

Fig.7　Defect morphology analysis

图 8 所示，在约每 250 次循环后对样品进行一次检测，零点输出和灵敏度相对于初始值的平均变化量绝对值均不超过 4%。个别检测点的变化量绝对值稍有超过 4%，出现退化迹象，但在完成 1 000 次循环后所有参数仍保持在产品规格允许的范围内。试验监测次数分别为：0、300、500、700、1 000 次。

X 射线透视成像结果显示传感器内部引线、芯片等结构完整清晰，引线无断裂、焊点连接正常，封装材料内部未出现裂纹、空洞等缺陷(见图 9)。对样品进行切片解剖后得到的内部照片表明芯片表面钝化层完整，晶圆切割边缘无裂纹缺口，金线球焊键合点形变正常，焊盘表面无剥离损伤(见图 10)。上述 X 射线检查和解剖分析均未发现封装开裂、芯片与封装界面脱层等问题，且金线键合点完整无裂纹、焊盘无损伤。这表明传感器封装结构及内部互连能够经受反复的热胀冷缩应力冲击，循环应力并未累积到足以引发疲劳破坏的程度。

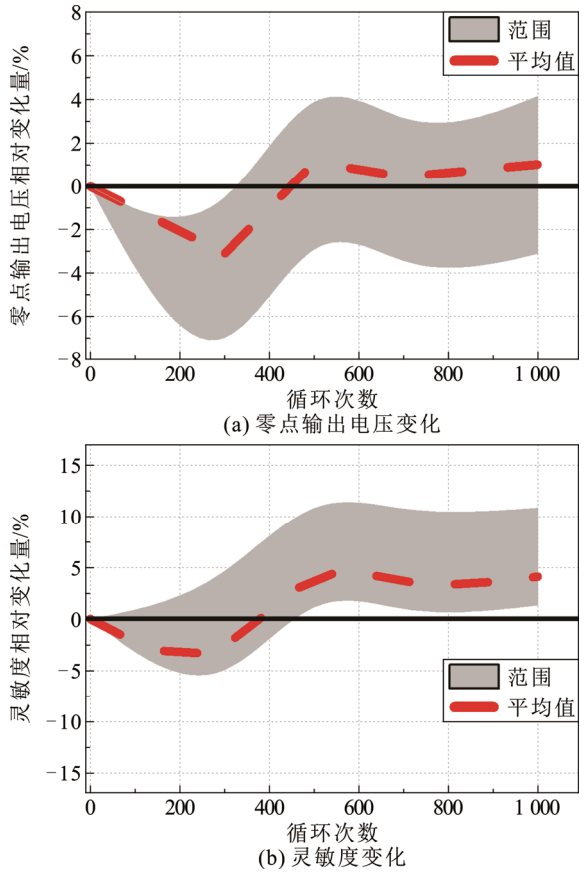


图 8　–40 ℃↔125 ℃温度循环试验中传感器主要参数相对变化的平均值和范围

Fig.8　Parametric drift statistics during −40 ℃↔125 ℃ thermal cycling test

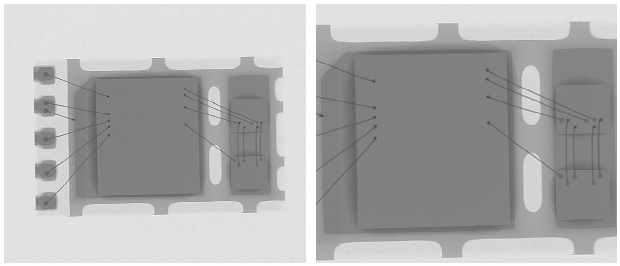


图 9　X-ray 透视成像结果

Fig.9　X-ray inspection results

一方面，金线具有良好的延展性和热循环耐受性——有研究表明 Au 线在热循环中不易发生疲劳断裂[36]；另一方面，由于传感器尺寸较小，封装材料施加在芯片上的热应力也相对有限。此外，在制造中采用柔性银胶，进一步缓冲了热循环应力。

本试验的温度骤变速率较快、条件苛刻，而传感器依然未出现性能衰退，体现出较高的可靠性。进一步，对部分样品进行了更高应力水平下的探索性试验：将样品置于–75 ℃与 200 ℃之间交替的温度冲击下持续 24 h，结果同样未出现失效。

3.1.5 电磁应力试验结果

1）ESD 抗扰度

所有样品在静电放电冲击下均未出现功能中断或永久损伤。器件对正向 ESD 的耐受能力略优于负向：当对电源引脚施加–5 kV 放电时，有 1 只样品发生闩锁(Latch-up)现象，需掉电复位后才能恢复正常；而正向放电需要接近+8 kV 时才出现类似情况。对于信号输出和偏置引脚，在约±7.5 kV 左右达到器件耐受极限。超过该电压水平后，个别样品的零点输出出现轻微漂移，但断电重启后可以恢复正常。综合各端口的试验现象可知：电源引脚的抗 ESD 能力相对较弱(约在 4~5 kV 时就出现闩锁)，信号/偏置引脚的耐受极限约为±7.5 kV。

2）EFT 抗扰度

在脉冲电压幅值为±1.6 kV 的应力条件下，传感器输出虽然出现瞬时波动(<5 ms 即恢复)，但整体功能正常，且脉冲过后输出无任何漂移。当在电源端口叠加–1.8 kV 脉冲时，样品在冲击后输出失效(芯片内部供电异常，无法恢复)。这说明该电压已超出器件的耐受能力。对于信号输出(U_{OUT})和偏置输入(U_{BIAS})引脚，当脉冲电压幅值达到或者接近±1.4 kV 时，即可观察到冲击后传感器零点输出发生漂移，需要掉电重启才能恢复正常。由此近似认为：电源端口的 EFT 耐受阈值约为 1.6 kV，而信号/偏置端口约为 1.2~1.4 kV。考虑到电网现场开关操作、变压器励磁涌流等瞬态干扰通常仅为数百伏量级，可见该传感器具备足够的 EFT 抗扰裕度。

3）浪涌冲击抗扰度

试验结果显示，随浪涌电压进一步增加，当负极性浪涌电压幅值增大至约−1.4 kV 时，个别样品的电源端发生稳态损坏(供电电流异常增加，输出失效)，表明内部电源管理电路被击穿；而正向浪涌需要接近+2.0 kV 才引发类似损伤。这说明负极性浪涌对电源端口耐受能力是主要限制因素。对于偏置和输出端口，浪涌耐受阈值则更高：当浪涌电压幅值为 1.8 kV(正、负极性)时未出现任何永久异常；仅当浪涌电压幅值增至 2.0 kV(正、负极性)这一极端水平时，才观察到输出零点漂移且无法自行恢复。据此可确定各端口浪涌耐受阈值下限：电源端口负极性浪涌耐受阈值约 1.4 kV(正极性需接近 2.0 kV 才出现类似损伤)；偏置与输出端口在接近±2.0 kV 时出现不可恢复漂移。总体而言，该传感器对浪涌冲击具有较强的耐受能力。

此外，针对 3 只样品的多次浪涌冲击“寿命”试验显示：重复施加 0.4~1.4 kV 浪涌各 50 次后，器件参数未出现逐步退化迹象，说明累积浪涌并未直接对传感器造成损伤累积；在工频磁场 400 A/m、射频辐射场强 10 V/m 等典型电磁环境下，TMR 传感器工作正常，输出波动幅度在可忽略范围内；传感器的近场磁辐射发射约为 0.01 μT，不会对邻近设备造成干扰。

电磁应力试验结果汇总见表 1。

3.2 分析与优化建议

基于上述加速试验结果与现象，对传感器的潜在失效机理进行归纳分析，并提出相应的改进措施：

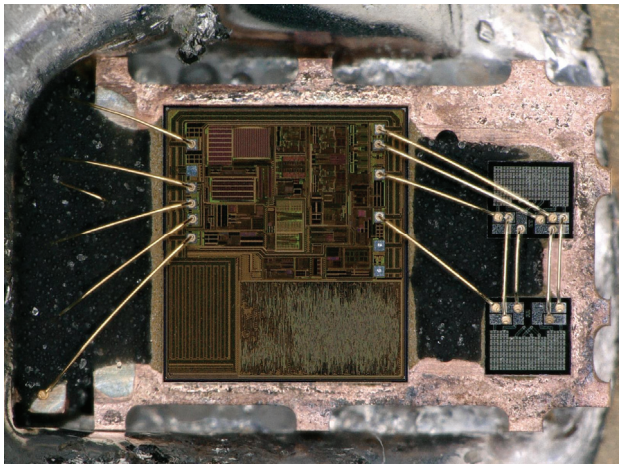


图 10 解剖分析结果

Fig.10 Post-failure characterization via destructive physical analysis

表 1 电磁应力试验结果汇总表

Table 1 Summary of electromagnetic stress test results

序号	试验项目	施加应力条件	器件耐受极限	等级标准
1	ESD 抗扰度	人体放电模型，±0.5 kV 起步，每级±0.5 kV，最高±8 kV，接触放电 10 次/级	电源引脚在 4~5 kV 时出现闩锁；信号/偏置端约±7 kV 出现瞬态漂移	IEC 61000-4-2 (Level 4)
2	EFT 抗扰度	电快速脉冲群，5 kHz 重复频率，经耦合夹注入，±200 V 起步，逐级至±1.8 kV	±1.6 kV 下功能正常(仅瞬态扰动<5 ms)；–1.8 kV 电源端发生永久失效，在脉冲幅值接近±1.4 kV 后需复位恢复	IEC 61000-4-4 (Level 3)
3	浪涌抗扰度	1.2/50 μs 组合波雷击浪涌，±0.5 kV 起，逐级至±3 kV，每级正负各 5 次冲击；额外累积冲击 0.4~1.4 kV 各 50 次	约–1.4 kV 出现电源端永久损坏，+2 kV 电源端损坏；偏置/输出端在浪涌电压幅值接近±2.0 kV 时出现不可恢复漂移	IEC 61000-4-5 (Level 3)

1）钉扎层高温失磁。当温度升高接近钉扎层材料的奈尔温度时，其磁各向异性显著下降，导致固定层磁矩无法有效钉扎自由层磁矩方向，器件可能出现隧穿磁阻幅度下降、磁滞回线变宽、零场输出漂移等性能退化现象。这一定程度上决定了 TMR 传感器的最高工作温度上限。因此，为提升器件在极端高温应用环境的可靠性裕度，可在设计和工艺中选用具有更高奈尔温度的钉扎材料，从根本上改善高温失磁问题，提高整体的耐热性能与长期稳定性，拓展 TMR 传感器在高温工况下的使用范围。

2）隧穿势垒缺陷累积。在持续偏置电压和高温共同作用下，MTJ 隧穿势垒中的缺陷态会缓慢积累，可能出现氧空位迁移或界面元素扩散，导致隧穿电阻逐渐降低，失效时间与温度、电场强度有关。对于瞬时发生的绝缘击穿，则是势垒在过高电压下一次性崩溃，属于击穿强度超限所致。设计上应确保隧穿势垒质量和厚度满足可靠性裕度。

3）互连疲劳与热失配。键合金丝在热循环中承受拉伸和压缩反复应变，根据 Coffin-Manson 规律，较大的温度循环幅度将显著增加封装互连的应变幅值 $\Delta\varepsilon$ 而缩短其疲劳寿命。因此封装设计应尽量降低封装材料与芯片的热膨胀系数差异，或采用更柔性的键合材料来缓冲热应力。同时，由于 TMR 传感器芯片尺寸较小、封装结构紧凑，这些因素都有助于减轻热循环应力的危害。

4）湿度侵蚀。长期高湿会在材料界面引发腐蚀和绝缘性能下降。例如，键合金线与铝焊垫之间也可能形成微电偶腐蚀。针对湿热失效，要求封装材料低吸湿，芯片表面钝化层完好无裂纹，并避免制造过程中残留卤素离子等有害杂质。

5）电路老化。TMR 传感器内部集成的信号调理电路在长期通电后可能出现阈值电压漂移、漏电流增加等老化效应，例如热载流子注入、负偏置温度不稳定性等。然而由于 TMR 传感器整体功耗低、内部工作电压和电流较小，此类机理的目前观测到的影响很有限。

6）持续改进传感器结构和电路设计，可进一步提高传感器在复杂应力条件下的稳定性。如采用多对 MTJ 元件差分桥路实现输出的温度补偿和线性化，提高对环境扰动的抑制能力；在电源和信号线上增加浪涌抑制器件和滤波网络，增强抗瞬态冲击能力；优化封装工艺以降低内部应力和湿气渗入。

3.3 可靠性模型推导与寿命预测

基于上述多应力加速老化试验数据，本文建立了传感器的综合可靠性模型，并据此推断其在正常工作条件下的寿命。

3.3.1 热应力寿命模型

根据高温贮存试验结果，采用 Arrhenius 加速模型对温度老化数据进行拟合[39]。Arrhenius 模型假设某些主导失效机制的速率随温度呈指数关系，即 $r=A\exp(-E_a/(k_BT))$，其中 E_a 为表观激活能；k_B 为玻耳兹曼常数；T 为绝对温度；r 为失效率；A 为模型系数。选择 E_a=0.7 eV 作为 TMR 传感器整体可靠性的有效激活能，该值参考了 JEDEC JEP122H 等标准中针对半导体器件热失效机制的典型激活能范围(约 0.6~0.8 eV)，结合传感器材料中金属迁移、势垒氧化、界面态演化等主导机制，该取值处于上述激活能范围的中间水平，具有一定代表性。同时，该模型为经验估计形式，假设温度加速与其他应力因素相互独立，适用于当前单一应力作用下的工程寿命预测。

以 150 ℃试验为基准，通过模型预测较低温度下达到等效老化程度所需的时间。根据 Arrhenius 关系，温度加速因子可表示为：$AF_T=\exp((E_a/k_B)(1/T_{use}-1/T_{stress}))$。其中 T_{stress} 为加速试验温度对应的绝对温度，T_{use} 为使用条件温度对应的绝对温度(单位均为 K)。代入 T_{stress}=423 K(150 ℃)和 T_{use}=358 K (85 ℃)，得到 $AF_T\approx32.7$。这意味着，在 85 ℃环境下需要约 1 000 h×32.7=33 000 h(约 3.8 年)的连续运行才能与 150 ℃、1 000 h 试验达到相当的老化水平。据此推断，即使 TMR 传感器在 85 ℃的较高温环境下连续工作近 4 年，其灵敏度漂移预计也低于设定的 10%判据。对于更接近实际工况的 40 ℃环境(313 K)，温度加速因子将更高($AF_T\approx853$)，估计在数十年内纯高温引起的性能漂移都很小。因此可以认为，在正常工作温度范围内热老化并非限制 TMR 传感器寿命的主要因素。

3.3.2 湿热应力寿命模型

利用 Peck 模型评估湿度对寿命的加速作用[40]，Peck 模型给出的温度-湿度组合加速因子为 $AF_{THB}=(\varphi_{stress}/\varphi_{use})^n\exp((E_a/k_B)(1/T_{use}-1/T_{stress}))$，其中 φ 为相对湿度；φ_{stress} 表示加速湿热试验条件下的相对湿度；φ_{use} 表示器件实际使用环境下的相对湿度；n 为湿度加速指数。对于塑封器件，经验上通常取 n 为 2~3。

以 85 ℃/85%RH 偏置湿热老化 1 000 h 试验为参考，在假定 n=3、E_a=0.7 eV 的条件下，预测 T_{use}=40 ℃、φ_{use}=60%典型环境下的寿命。n=3 的设定为 Peck 模型中对塑封器件经验建议值(2~3)中的上限，用于保守性预测。该模型假设湿度和温度两种加速因子独立作用，为广泛采用的经验形式。但其未显式考虑温度-电场耦合退化机制，适用于乘积构成湿热加速情况。计算得到湿热加速因子 $AF_{THB}=(85/60)^3\exp(0.7/(0.000\ 086\ 17(1/313–1/358))$，为 74 左右。这表明，在 40 ℃/60%RH 条件下，需要约 1 000 h×74=74 000 h(约 8.4 年)才能累积与 85 ℃/85%RH 老化 1 000 h 相当的湿热应力。85 ℃/85%RH 湿热试验中传感器零点输出最大漂移约 3%(且断电后可恢复)，远低于设定的 10%判据阈值。因此推断，在普通环境湿度下，即使连续运行数十万小时(数十年)，湿度诱发的性能变化也难以达到失效判据水平。仅当实际现场湿度极高(如潮湿的热带地区接近 100%RH)时，才需要相应缩短预估寿命，或采取额外的防护措施以提高器件抗湿能力。

3.3.3 温度循环疲劳寿命模型

采用 Coffin-Manson 模型预测焊点和键合线等封装互连的热循环疲劳寿命[41]。Coffin-Manson 模型常用形式表示为 $\Delta\varepsilon\cdot N_f^c=C$，其中 $\Delta\varepsilon$ 为温度循环引起的等效应变幅；c 为疲劳指数(一般 c=0.5~1)；N_f 为失效所需循环数；C 为常数。针对金线键合互连，文献报道 c≈0.4 较为符合实际情况[36]。

本研究中，TMR 传感器在 ΔT=438 K(165 ℃)的循环条件下经过>1 000 次循环未出现失效。将此结果作为基准，利用 Coffin-Manson 关系可推算较小温差下的寿命：若实际应用中传感器经历 ΔT=323 K(50 ℃)的日常温度周期(相当于户外昼夜温差)，则相对试验条件的疲劳加速因子 $AF_{\Delta T}=(165/50)^{1/0.4}$≈20。因此，在 ΔT=323 K(50 ℃)条件下需要约 1 000×20=20 000 次循环才能达到与试验相当的疲劳损伤。即便按每天 1 次昼夜温度循环计算，这也对应 55 年的运行时间。即使考虑现场可能叠加的机械振动等应力，预测的热循环寿命仍在数十年以上，与观测到的极小疲劳迹象相符。据文献报道[42]，对于典型无铅焊点，在约 100 ℃的温度循环下经过 1 000 次循环后无失效。因此 TMR 电流传感器在常规温度波动下不会首先因热疲劳失效。需要注意的是，若传感器安装位置存在显著的机械振动，应力则会与热循环应力部分叠加。

3.3.4 综合寿命预测

综上分析，可对 TMR 电流传感器在典型电网运行条件下进行综合寿命评估。假设传感器工作环境的年均温度在–25~+45 ℃之间波动，年平均相对湿度不超过 60%，且所受电压瞬变和机械振动等应力冲击均不超过相关标准限值。在上述正常应力水平下，各潜在失效机制的驱动力均远低于本研究所施加的加速应力条件。为验证当前模型的合理性，本文进行了多种方式的交叉验证。

本研究依据 Telcordia SR-332 方法(IEC 61709 标准也提供了类似模型)，将加速测试数据折算评估产品场景下的可靠性。利用 AF_T 因子，将加速应力下累计的测试时间转换为等效的使用寿命时间。随后采用卡方分布推断法，在 60%置信水准下估计无故障概率对应的失效率上限，得到年失效率分别为 $\lambda_T=4.98\times10^{-9}$ h^{-1}、$\lambda_{THB}=5.49\times10^{-9}$ h^{-1}。其中，λ_T 表示基于高温贮存加速试验外推得到的失效率，而 λ_{THB} 表示基于偏置湿热加速试验外推得到的失效率。对应的平均无故障时间(mean time between failures，MTBF)均超过 20 年，表明其可靠性水平较高。当然，实际寿命还受制造工艺一致性等因素影响，需要留有一定裕度。如果采用 MIL-HDBK-217F 手册中的传统可靠性预测方法进行计算，按照工业控制模块的基准失效率并结合本传感器所承受应力的折减系数，得到的寿命结果也在同一量级。考虑到本文以较严格的性能漂移 10%作为寿命判据(而非完全失效)，因此器件的实际功能寿命可能比预测值更长。

建议在传感器全寿命周期中实施状态监测和定期标定(例如定期校准零点和灵敏度)。这样，即使器件发生缓慢漂移，也可通过校准将其关键参数恢复到标称值，从而进一步延长传感器的有效使用寿命。

为评估寿命的分布特性，本文还进行了蒙特卡罗模拟[43]。基于文献报道与经验，选取激活能 E_a 在 0.6~0.8 eV 之间、湿度加速指数 n 在 2~3 之间，并假设它们在该区间内均匀分布，通过随机抽样(样本数 N=10^6)生成大样本失效时间数据，进而计算传感器在 20 年时的生存概率。结果表明，模拟得到的 20 年可靠度约为 85.6%，多次独立模拟的标准偏差低于 0.5%。总体而言，通过上述可靠性分析，本文定量化了多应力加速试验结果与传感器正常运行寿命之间的关系，验证了 TMR 电流传感器在预期应

用环境下具备满足要求的可靠度水平。

寿命预测模型参数及结果汇总见表 2。

需要指出，本研究基于一定的环境假设和有限时间的加速试验数据，对模型参数的选取也依据经验估计，主要针对单应力而并未系统探讨组合应力协同叠加可能产生的额外效应，如电场和温度的耦合关系、时间依赖介质击穿等。未来可通过更长期的试验获取数据来修正模型。此外，不同厂商和型号的 TMR 传感器在材料工艺上可能存在差异，其可靠性表现也宜分别评估。后续工作将开展更大样本量(>10^3 只)和更长时段(>10^4 h)的寿命试验，并对失效样品进行更深入的物理失效分析，以进一步揭示影响 TMR 传感器寿命的关键因素。

4 结论

1）本文建立了涵盖高温、低温、湿热、温度循环及多种电磁冲击的综合可靠性测试方法，零点输出和灵敏度漂移被量化为核心退化指标。

2）试验结果显示，在 150 ℃贮存 1 000 h 后灵敏度变化绝对值≤5%；在–40 ℃贮存 1 000 h 后零点输出变化绝对值≤3%、灵敏度变化绝对值≤5%；在 85 ℃/85%RH 偏置老化 1 000 h 后零点输出变化绝对值≤3%、灵敏度变化绝对值≤4%；在−40 ℃↔125 ℃温度循环 1 000 次后零点输出、灵敏度变化绝对值均≤5%，且上述试验均未出现功能失效。

表 2 寿命预测模型参数及结果汇总表

Table 2 Summary of lifetime prediction model parameters and results

序号	类别	模型/方法	参数	主要结论
1	单模型	Arrhenius 模型	E_a=0.7 eV；基准 150 ℃(1 000 h)，预测 40 ℃	加速因子约 853，推断 40 ℃下寿命达数十年
2		Peck 模型	n=3、E_a=0.7 eV，基准 85 ℃/85%RH(1 000 h)，预测 40 ℃/60 %RH	加速因子约 74，推断正常湿度下连续运行数十年
3		Coffin-Manson 模型	疲劳指数 c≈0.4；ΔT=165 ℃(1 000 次循环)，预测 ΔT=50 ℃	疲劳加速因子约 20，推断叠加机械振动应力寿命仍有数十年以上
4	综合方法	Telcordia SR-332	环境温度–25~+45 ℃；相对湿度≤60%RH；瞬态电磁应力在限值内	MTBF 超过 20 年
5		MIL-HDBK-217F		寿命预测结果数十年量级
6		蒙特卡罗方法	考虑参数的不确定性	85.6%的置信度下寿命超过 20 年

在电磁抗扰度方面，器件可承受 2.8 kV 浪涌、1.6 kV EFT 及±8 kV ESD 冲击而不发生功能失效。

3）基于 Arrhenius、Peck、Coffin-Manson 与 Telcordia SR-332 等模型由加速条件换算至使用条件推算，传感器在 25 ℃/60%RH 典型条件下预期寿命可达数十年，MTBF>20 年，满足电力设备长期可靠性要求。

4）本文研究识别的主要潜在失效模式包括钉扎层高温失磁、湿热渗湿腐蚀及浪涌瞬态击穿；提出使用高奈尔温度钉扎材料、降低封装吸湿性、增设浪涌抑制等针对性改进措施。

5）本文研究填补了 TMR 电流传感器长期可靠性数据空白，为产品设计优化、应用标准制定及现场状态监测提供试验依据和模型支撑，助力新型电力系统数字化升级。

参考文献 References

[1] ALONSO M, AMARIS H, ALCALA D, et al. Smart sensors for smart grid reliability[J]. Sensors, 2020, 20(8): 2187.

[2] 杨 挺，耿毅男，郭经红，等. 人工智能在新型电力系统智能传感、通信与数据处理领域应用[J]. 高电压技术，2024，50(1)：19-29.
YANG Ting, GENG Yinan, GUO Jinghong, et al. Applications of artificial intelligence in sensing, communication, and data processing in the new power system[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(1): 19-29.

[3] 江俊杰，胡 军，马国明，等. 数字化电力装备专用传感应用需求与发展趋势[J]. 高电压技术，2024，50(8)：3271-3302.
JIANG Junjie, HU Jun, MA Guoming, et al. Application requirements and development trend of special sensors in digital electrical equipment[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(8): 3271-3302.

[4] AN Z G, ZHANG L, FAN Y Y, et al. A comprehensive review of TMR current sensors for smart grids: materials, optimization methods, and applications[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2025, 382: 116174.

[5] 李振华，崔九喜，卢和平，等. 电力系统宽频宽动态电流量测技术研究综述[J]. 高电压技术，2024，50(8)：3421-3439.
LI Zhenhua, CUI Jiuxi, LU Heping, et al. Review of wideband and wide-dynamic-range current measurement techniques in power systems[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(8): 3421-3439.

[6] TUMANSKI S. Thin film magnetoresistive sensors[M]. Boca Raton, USA: CRC Press, 2001.

[7] FREITAS P P, FERREIRA R, CARDOSO S. Spintronic sensors[J]. Proceedings of the IEEE, 2016, 104(10): 1894-1918.

[8] 丰家峰，陈 星，魏红祥，等. 自由层磁性交换偏置效应调控隧穿磁电阻磁传感单元性能[J]. 物理学报，2023，72(19)：197103.
FENG Jiafeng, CHEN Xing, WEI Hongxiang, et al. Key performance of tunneling magnetoresistance sensing unit modulated by exchange bias of free layer[J]. Acta Physica Sinica, 2023, 72(19): 197103.

[9] YANG Z C, JIANG Y F. Prospective review of magneto-resistive current sensors with high sensitivity and wide temperature range[J]. Journal of Low Power Electronics and Applications, 2024, 14(3): 43.

[10] 余 涛，梁敏航，罗庆全，等. 新型电力系统专用传感与边缘智能关键技术及其展望[J]. 高电压技术，2024，50(8)：3324-3338.
YU Tao, LIANG Minhang, LUO Qingquan, et al. Key technologies and perspectives of specialized sensing and edge intelligence for new power systems[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(8): 3324-3338.

[11] WU J, ZHOU K, JIN Q R, et al. A high-precision temperature compensation method for TMR weak current sensors based on FPGA[J]. Micromachines, 2024, 15(12): 1407.
[12] SU H F, LI H J, LIANG W H, et al. Non-contact current measurement for three-phase rectangular busbars using TMR sensors[J]. Sensors, 2024, 24(2): 388.
[13] XU X P, LIU T Z, ZHU M, et al. New small-volume high-precision TMR busbar DC current sensor[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2020, 56(2): 4000105.
[14] XU Y, JIN Z H, CHEN J M. High-precision tunneling magnetoresistance (TMR) current sensor for weak current measurement in smart grid applications[J]. Micromachines, 2025, 16(2): 136.
[15] LIU X Y, PONG P W T, LIU C H. Dual measurement of current and temperature using a single tunneling magnetoresistive sensor[C]//Proceedings of 2018 IEEE SENSORS. New Delhi, India: IEEE, 2018: 1-4.
[16] WANG Z X, HU J, OUYANG Y, et al. A self-sustained current sensor for smart grid application[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(12): 12810-12820.
[17] TROESTER N, RUTHARDT J, NITZSCHE M, et al. Wide bandwidth current sensor combining a coreless current transformer and TMR sensors[C]//Proceedings of the International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management. Nuremberg, Germany: VDE, 2018: 1-7.
[18] SUN X, LUI K S, WONG K K Y, et al. Novel application of magnetoresistive sensors for high-voltage transmission-line monitoring[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2011, 47(10): 2608-2611.
[19] OUYANG Y, WANG Z X, ZHAO G, et al. Current sensors based on GMR effect for smart grid applications[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2019, 294: 8-16.
[20] MUȘUROI C, OPROIU M, VOLMER M, et al. High sensitivity differential giant magnetoresistance (GMR) based sensor for non-contacting DC/AC current measurement[J]. Sensors, 2020, 20(1): 323.
[21] 周子童，闫韶华，赵巍胜，等. 隧穿磁阻传感器研究进展[J]. 物理学报，2022，71(5)：058504.
ZHOU Zitong, YAN Shaohua, ZHAO Weisheng, et al. Research progress of tunneling magnetoresistance sensor[J]. Acta Physica Sinica, 2022, 71(5): 058504.
[22] 吕 瑛，王振宇，赵 岩，等. 电子元器件加速退化寿命评估方法研究[J]. 计算机测量与控制，2021，29(11)：230-234，239.
LÜ Ying, WANG Zhenyu, ZHAO Yan, et al. Study on accelerated degradation life assessment method of electronic components[J]. Computer Measurement & Control, 2021, 29(11): 230-234, 239.
[23] O'CONNOR P D T, KLEYNER A. Practical reliability engineering[M]. 5th ed. Chichester, UK: Wiley, 2012.
[24] YIN X, ZHOU K, LI P, et al. Design and development of intelligent current sensor based on tunnel magnetoresistance[C]// Proceedings of the 12th IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. Nanjing, China: IEEE, 2020: 1-5.
[25] HU X X, DUAN X T, ZHANG W, et al. Design and optimization of multi-stage TMR sensors for power equipment AC/DC leakage current detection[J]. Sensors, 2023, 23(10): 4749.
[26] ÅKERMAN J, BROWN P, DEHERRERA M, et al. Demonstrated reliability of 4-Mb MRAM[J]. IEEE Transactions on Device and Materials Reliability, 2004, 4(3): 428-435.
[27] WANG X. Wiener processes with random effects for degradation data[J]. Journal of Multivariate Analysis, 2010, 101(2): 340-351.
[28] JULLIERE M. Tunneling between ferromagnetic films[J]. Physics Letters A, 1975, 54(3): 225-226.
[29] MOODERA J S, KINDER L R, WONG T M, et al. Large magnetoresistance at room temperature in ferromagnetic thin film tunnel junctions[J]. Physical Review Letters, 1995, 74(16): 3273-3276.
[30] KUWASHIMA T, FUKUDA K, KIYONO H, et al. Electrical performance and reliability of tunnel magnetoresistance heads for 100-Gb/in2 application[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2004, 40(1): 176-181.
[31] PARKIN S S P, KAISER C, PANCHULA A, et al. Giant tunnelling magnetoresistance at room temperature with MgO (100) tunnel barriers[J]. Nature Materials, 2004, 3(12): 862-867.
[32] BAYLAKOĞLU İ, FORTIER A, KYEONG S, et al. The detrimental effects of water on electronic devices[J]. e-Prime-Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy, 2021, 1: 100016.
[33] BENDER E, BERNSTEIN J B, BONING D S. Modern trends in microelectronics packaging reliability testing[J]. Micromachines, 2024, 15(3): 398.
[34] RASLY M, NAKATANI T, LI J N, et al. Magnetic, magnetoresistive and low-frequency noise properties of tunnel magnetoresistance sensor devices with amorphous CoFeBTa soft magnetic layers[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2021, 54(9): 095002.
[35] ZHUKOV D, AMELICHEV V, KASATKIN S, et al. Investigation of multilayer nanostructures of magnetic straintronics based on the anisotropic magnetoresistive effect[J]. Sensors, 2021, 21(17): 5785.
[36] CZERNY B, SCHUH S. Bond wire fatigue of Au, Cu, and PCC in power LED packages[J]. Micromachines, 2023, 14(11): 2002.
[37] GIELNIAK J, CZERNIAK M. Investigation of distribution transformers vibrations in terms of core and winding condition assessment[J]. Energies, 2021, 15(1): 13.
[38] PANT B B, WITHANAWASAM L, BOHLINGER M, et al. High-temperature anisotropic magnetoresistive (AMR) sensors[J]. Journal of Microelectronics and Electronic Packaging, 2015, 12(4): 205-211.
[39] NELSON W B. Accelerated testing: statistical models, test plans, and data analyses[M]. Hoboken, USA: John Wiley & Sons, 2004.
[40] PECK D S. Comprehensive model for humidity testing correlation[C]//Proceedings of the 24th International Reliability Physics Symposium. Anaheim, USA: IEEE, 1986: 44-50.
[41] COFFIN L F JR. A study of the effects of cyclic thermal stresses on a ductile metal[J]. Transactions of the ASME, 1954, 76(6): 931-949.
[42] JIANG N, ZHANG L, LIU Z Q, et al. Reliability issues of lead-free solder joints in electronic devices[J]. Science and Technology of Advanced Materials, 2019, 20(1): 876-901.
[43] MEEKER W Q, ESCOBAR L A. Statistical methods for reliability data[M]. New York, USA: Wiley, 1998.



王冠鹰(通信作者)
1991—，男，博士，高工
从事电力传感技术、传感器可靠性的研究
E-mail: sgccwgy@aliyun.com

WANG Guanying
Ph.D.
Senior engineer
Corresponding author

收稿日期 2025-04-30 在线出版日期 2025-09-17 编辑 卫李静