

ICS

CCS

团 体 标 准

T/CMES XXXX—202X

液态金属轴承性能测试方法 第2部分 极端服役环境

Liquid Metal Bearing Performance Test Methods-Part 2:
Extreme Service Environments

202X-X-XX 发布

XXXX-XX-XX 实施

中国机械工程学会 发布

中国机械工程学会标准征求意见稿

中国机械工程学会（英文简称 CMES）是具备开展国内、国际标准化活动资质的全国性社会团体。制定中国机械工程学会团体标准，以满足企业需要和市场需求，推动机械工业创新发展，是中国机械工程学会团体标准的工作内容之一。中国境内的团体和个人，均可提出制、修订中国机械工程学会团体标准的建议并参与有关工作。

中国机械工程学会团体标准按《中国机械工程学会标准化管理办法》进行制定和管理。

中国机械工程学会团体标准草案经向社会公开征求意见，并得到参加审定会议的 3/4 以上的专家、成员的投票赞同，方可作为中国机械工程学会团体标准予以发布。

在本标准实施过程中，如发现需要修改或补充之处，请将意见和有关资料寄给中国机械工程学会，以便修订时参考。

中国机械工程学会标准征求意见稿

本标准版权为中国机械工程学会所有。除了用于国家法律或事先得到中国机械工程学会正式许可外，不许以任何形式复制、传播该标准或用于其他商业目的。

中国机械工程学会地址：北京市海淀区首体南路 9 号主语国际 4 座 11 层

邮政编码：100048 电话：010-68799027 传真：010-68799050

网址：www.cmes.org 联系人：袁俊瑞 电子信箱：yuanjr@cmes.org

目 次

目 次	II
前 言	III
引 言	IV
1. 范围	1
2. 规范性引用文件	1
3. 术语和定义	1
4. 通用技术要求	3
4.1 环境	3
4.2 被测液态金属轴承	3
4.3 测试系统	3
5. 测量方法	5
5.1 测量的内容	5
5.2 固定轴承	5
5.3 传感器安装	5
5.4 测试方法	5
6. 数据处理	6
6.1 数据预处理	6
6.2 数据特征分析	6
6.3 结果输出与生成报告	6
7. 测量报告	7

前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件由中国机械工程学会提出并归口。

本文件起草单位：中国工程物理研究院流体物流研究所，中国工程物理研究院机械制造工艺研究所，中国科学院兰州化学研究所，四川华东科技有限公司。

本文件主要起草人：赵伟，张国花，夏志辉，崔海龙，阳红，魏巍，于源，刘洋，李加胜，李建北。

考虑到本文件中的某些条款可能涉及专利，中国机械工程学会不负责任何该类专利的鉴别。本文件首次制定。

中国机械工程学会标准征求意见稿

引 言

电子加速器、医用 CT 机等高端装备的长时稳定工作需要高性能轴承作为旋转支承部件，并能够服役于强辐射、高真空及高温等极端环境，液态金属轴承作为一种新型滑动支承形式，具有耐高温、抗辐射、高导热、长寿命的性能优势，是满足电子加速器、医用 CT 机等高端装备的最佳轴承形式。极端服役环境下液态金属轴承的转速、振动、位移等关键性能指标直接影响装备的性能，其性能指标的定量表征已成为研发优化、工程应用及安全评估中的基础性技术工作。目前，行业内对液态金属轴承极端服役环境下性能测试方法缺乏统一标准，在一定程度上制约了液态金属轴承技术的规范化发展。本技术规范旨在建立一套科学、系统、可操作的液态金属轴承极端服役环境下性能测试方法，明确转速、振动、位移等核心性能指标的测试原理、模拟环境要求、设备设置、测试步骤、数据处理方法和结果评价准则。通过制定和实施本规范，可有效提升液态金属轴承极端服役环境测试数据的准确性、一致性与规范性，为液态金属轴承技术在极端工况装备中的设计优化、可靠性验证与产业化应用提供稳定的技术依据，进一步推动我国在极端环境用高性能轴承领域的技术进步。

中国机械工程学会标准

液态金属轴承极端服役环境下性能测试技术规范

1. 范围

本文件规定了液态金属轴承在服役环境下静态特性测试的技术要求、测试装置、测试方法、数据处理方法。

本文件适用于液态金属轴承在服役环境下平稳工作状态下转速、振动和位移检验。

2. 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

ISO 13939:2019 轴颈轴承的性能测试

GB/T 43324-2023 静态承载能力、摩擦力矩、摩擦因数和寿命测试

3. 术语和定义

ISO 13939:2019 及 GB/T 43324-2023 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1 转速 rotation speed

轴承在平稳运行时的恒定旋转速度（通常为设计转速）。

3.2 位移 displacement 相对位移 relative displacement

表征轴承上一点相对于某参考系的位置变化的时间变量。

注 1：参考系通常是平均位置或静止位置的一组轴线。一般来说，旋转位移矢量、平移位移矢量，或二者的组合均能表示位移。

注 2：如果所测量的位移不是相对于给定情形设计的原始参考系，而是相对于某参考系，则该位移称为相对位移。

注 3：位移可能是振荡的，在简谐分量情况下可以用位移振幅（和频率）来定义；或者位移也可能是随机的，在随机情况下，均方根（rms）位移（以及带宽和概率密度分布）能够用于定义在任何给定的范围内位移取值的概率。短时间段内的位移定义为瞬态位移；长时间段内的非振荡位移被定义为持续位移；短时间段内的非振荡位移定义为位移脉冲。

3.3 加速度 acceleration 相对加速度 relative acceleration

轴承振动速度的变化率。

注 1：一般来说，加速度是随时间变化的。

注 2：参考系通常是在平均位置或静止位置的一组轴线。一般来说，旋转加速度矢量、平移加速度矢量，或者二者及科里奥利（Coriolis）加速度的组合均能表示加速度。

注 3：如果所测量的加速度不是相对于给定情形设计的惯性参考系，而是相对于某参考系，则该加速度称为相对加速度。两点之间的相对加速度是两点加速度的矢量差。

注 4：对于随时间变化的加速度，常常要使用诸如：峰值、平均值和均方根（rms）等各种带有自身说明性的修饰词。取平均值或均方根值的时间间隔宜标明或暗示出来。

注 5：加速度可能是振荡的，这种情况下，简谐分量能用加速度振幅（和频率）来表示；加速度也可能是随机的，在随机情况下，均方根加速度（以及带宽和概率密度分布）能够用于定义在任何给定的范围内加速度取值的概率。很短时间内的加速度定义为瞬态加速度。长时段内的非振荡加速度定义为持续加速度；持续时间短的非振荡加速度定义为加速度脉冲。

3.4 振动 vibration

围绕某一平衡点的机械振荡。

注：该振荡可以是周期性的或随机的。

3.5 振幅 amplitude

轴承振动量的幅度、大小或数值。同义词：幅值。

3.6 轴承振动峰值 peak value of bearing vibration

在给定时间范围内，轴承振动量的最大值。

3.7 传感器 transducer

以某种方式将能量从一种形式转化为另一种形式的装置，从而使输入能量所期望的特征在输出端显示出来。

注 1：输出通常是电参数。

注 2：测量转速使用的传感器主要类型有：

- a) 光电式转速传感器；
- b) 磁电式转速传感器；
- c) 霍尔效应式转速传感器；
- d) 电容式转速传感器；
- e) 激光多普勒转速传感器；
- f) 接触式转速传感器；
- g) 光纤式转速传感器；

注 3：测量振动使用的传感器主要类型有：

- a) 压电加速度传感器；
- b) 压阻加速度传感器；
- c) 应变式加速度传感器；
- d) 可变电阻传感器；
- e) 静电（电容）传感器；
- f) 粘丝（箔片）式应变计；
- g) 可变磁阻传感器；
- h) 磁致伸缩传感器；
- i) 动导体传感器；
- j) 动圈传感器；
- k) 电感传感器；
- l) 激光振动传感器。

注 4：测量位移使用的传感器主要类型有：

- a) 电位器式位移传感器；
- b) 电感式位移传感器；
- c) 电容式位移传感器；

- d) 光电式位移传感器；
- e) 超声波位移传感器；
- f) 激光测距式位移传感器；
- g) 涡流效应式位移传感器；
- h) 磁致伸缩式位移传感器；

注 5：也可以使用其他类型的传感器，如动态力传感器，它们将信号转换为位移、速度或加速度信号。

4. 通用技术要求

4.1 环境

在液态金属轴承的极端服役环境下，满足如下：

- a) 真空度 $\leq 1 \times 10^{-5}$ Pa。
- b) 温度 $20^{\circ}\text{C} \sim 300^{\circ}\text{C}$ 。
- c) 辐射最大能量 $\geq 3\text{MeV}$ 。
- d) 辐射剂量率 $\geq 15\text{Gy/h}$ 。
- e) 周围无影响位移、振动测试的振动源存在。

4.2 被测液态金属轴承

- a) 提供液态金属润滑介质参数和安装结合面等技术参数。
- b) 应确保被测液态金属轴承中润滑介质为新灌装的。
- c) 液态金属润滑剂应满足无氧化、洁净度等要求。
- d) 确保液态金属轴承芯轴表面液态金属浸润充分、轴承可正常工作。
- e) 液态金属轴承在调控之前应静置 20min 以上，与调控环境应达到热平衡状态。

4.3 测试系统

4.3.1 测试系统组成

这里所建议的测量装置仅为举例。其他具有相同程度的测量能力并具有同等或更高精度的装置同样可以使用。

液态金属轴承服役环境下静态测试系统的基本组成为：真空系统、固定底座、加速度传感器、光电转速传感器、激光位移传感器、驱动系统、辐射系统和被测液态金属轴承，组成示意图如图 1。真空系统包括了真空腔和真空泵组，真空腔体上设置多个法兰和一个密封门。驱动系统包括了驱动电机和驱动电源。辐射系统通过真空连接法兰引入到真空腔内产生辐射环境，同时利用辐射对轴承进行加热，达到服役温度。液态金属轴承、固定底座、传感器和驱动电机安装于真空腔内，真空腔通过法兰连接至真空泵组，实现高真空度。驱动电机为感应电机，通过法兰连接至真空腔外的驱动电源。加速度传感器安装于轴承固定基座的竖直面和水平面上，将轴承运行过程中产生的振动信号转化为电信号传送至数据采集仪中从而获取液态金属轴承在 x 与 y 轴方向上的加速度数据。光电转速传感器利用工装安装于真空腔内的顶部，使得光电转速传感器发出的光束对准粘贴于轴承前端旋转部件处的反光贴，手动旋转轴承，测试并调整光电转速传感器的安装位置及距离至合适位置，用以对轴承启停阶段及平稳工作过程中的转速变化进行测量并将转速变化数据传输至数据采集仪用以记录。两个激光位移传感器分别垂直地安装于液态金属轴承靶盘上方和侧方，用于记录液态金属轴承工作过程中在 x 轴方向和 y 轴方向的位移变化。传感器均通过传感器连接法兰将信号传输至真空腔外的数据采集仪进行记录。

整体测量过程为：液态金属轴承（示例如图 2）正确安装后，关闭真空腔的密封门，启动真空泵组对真空腔抽真空，使真空腔内的真空度达到要求。通过设置驱动电源不同输出频率以及

工作电压从而驱动液态金属轴承的感应电机，使液态金属轴承达到一定转速。然后通过安装在垂直方向和水平方向上安装非接触式的激光位移传感器，粘贴加速度传感器和布置光电转速传感器，采集液态金属轴承运行过程在垂直和水平方向上的位移信号、振动信号和转速变化情况。通过东华测试系统进行转速信号、加速度信号和位移信号的采集，再通过光纤接入计算机中进行数据处理。

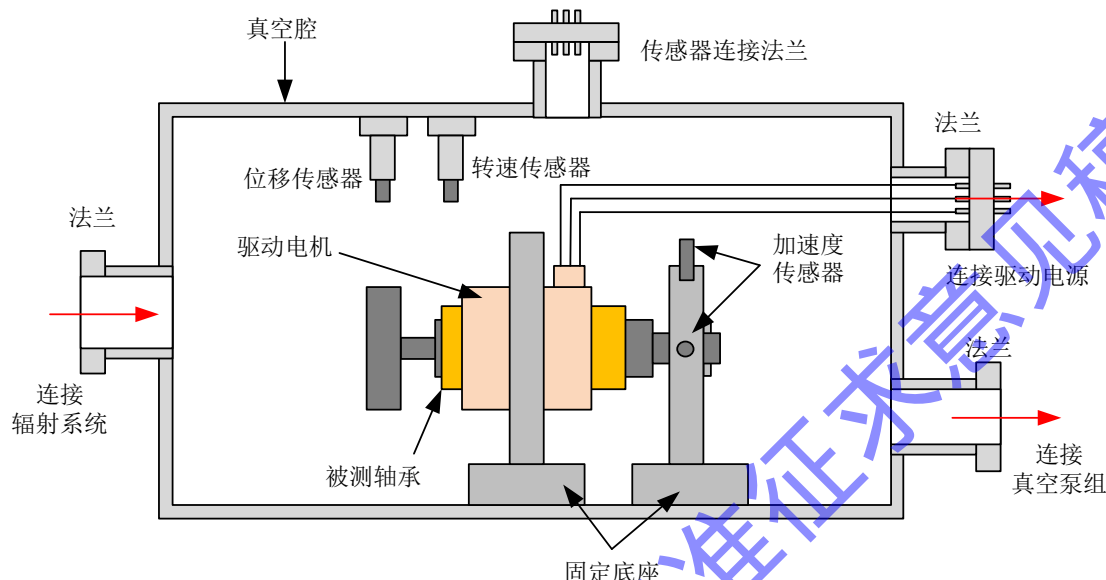


图 1 轴承转速、振动与位移测试系统示意图

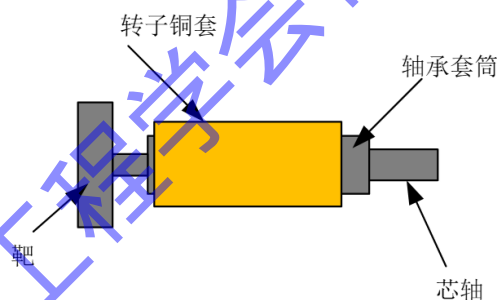


图 2 被测轴承示意图

注 1：不同于传统的滑动轴承，液态金属轴承为外转子轴承，因此将加速度传感器安装于轴承固定基座。

注 2：数据采集系统可选用具有类似采集和处理功能的其他品牌。

4.3.2 真空系统

真空系统的真空泵组采用机械泵和分子泵的组合，先通过机械泵将真空腔内的真空度抽至 $\leq 10\text{Pa}$ ，再启动分子泵将真空度抽至 $\leq 1 \times 10^{-5}\text{Pa}$ 。

4.3.3 驱动系统

驱动系统的驱动电源应连接三相电从而与驱动装置所需电压匹配，标准电压应在 380V ，输出最大频率 $\geq 60\text{Hz}$ 。

4.3.4 辐射系统

辐射系统通过真空腔体上设置的连接法兰进行连接或者辐射通过法兰上的辐射窗透射进入真空腔内。辐射系统可以采用电子加速器或者其他满足产生辐射条件的装置。

4.3.5 传感器

- a) 激光位移传感器监测负载面位移,型号 LK-H020,重复定位精度 $0.02\mu\text{m}$,采样周期 $5\text{--}1000\mu\text{s}$,测量范围 $\pm 3\text{mm}$,参考距离 20mm 。
- b) 光电转速传感器量程应与被调控液态金属螺旋槽轴承转速匹配,最大示值误差不大于 $\pm 2\%$ 。
- c) 加速度传感器灵敏度越高越能提高测量的精度,但是也会导致传感器的质量加大,这不会影响轴承本身的特性,因此推荐灵敏度在 1000mV/g 左右的加速度传感器进行测量。

5. 测量方法

5.1 测量的内容

该测量方法实现了包括转速、加速度、工作位移在内的液态金属轴承静态特性测试,结构简单、易于操作。

5.2 固定轴承

利用固定工装将轴承固定在测试台上,使其轴向和径向安装稳固,并保证测试时轴承状态与实际工作时的姿态一致。

5.3 传感器安装

传感器的安装不能对被测物体原本的振动、位移产生影响。加速度传感器需要确保与被测物体紧密地连接在一起,常用的连接方式有螺栓连接、胶合连接及石蜡连接等。转速传感器与位移传感器的安装不能对被测物体原本的工作状态产生影响,同时需要确保传感器准确对应被测轴承测点,确保位移传感器固定工装稳定,不影响最终测试结果。

加速度传感器安装时,为避免寄生振动,建议不要使用夹具,必须使用的情况下要保证安装夹具的固有频率是被测结构的 $5\text{--}10$ 倍以上。

加速度传感器使用胶粘时,应避免胶层太厚导致高频振动被阻隔。

加速度传感器的测振动方向应该与待测方向一致,否则,会造成测量幅值误差。

固定信号传输导线时,应使其处于舒展状态,不存在拉紧受力。

对每个测量位置使用的传感器信号、序列号和测量方向做好记录,并对安装了传感器的每个测点拍照留存。

5.4 测试方法

- 1) 将测试台安装在稳定的支撑平台上,将灌装好的液态金属轴承利用螺母穿过电机固定于底座上并控制轴承低速旋转使液态金属充分浸润,感应电机通过法兰上的接线柱连接至真空腔外的驱动电源。

- 2) 将辐射连接法兰连接至辐射系统,辐射系统的参数满足极端服役环境的要求。

- 3) 关闭真空腔的密封门,启动真空系统的真空泵组抽真空,使真空腔内的真空度达到要求。

- 4) 启动数据采集程序,并设置数据采集频率,根据转速及启动快慢的需求,设置好感应电源的输出频率、启动电压等驱动参数,通过控制器,启动被测液态金属轴承,在轴承启动后开始转速、振动和位移测量,测量持续时间 50s 左右,覆盖轴承启停全过程。

- 5) 转速传感器、加速度传感器与位移传感器将轴承启停全过程的转速、振动及位移数据测量并传输给数据采集系统,加速度传感器将被测轴承不同频域的加速度峰值进行记录并传输至数据采集系统,其中,低频段加速度峰值记为 A_{Li} ,中频段加速度峰值记为 A_{Mi} ,高频段加速度峰值记为

A_{Hi} ，其中 A_i 为第 i 次测量时的振动数据；

6) 重复上述测量过程，共测量三次。

表 1 服役环境下静态特性测试数据记录表

测量次数 i	转速	频域振动峰值			平均位移	
		低频 A_{Li}	中频 A_{Mi}	高频 A_{Hi}	X方向	Y方向
$i=1$						
$i=2$						
$i=3$						
测试时间：				仪器及编号：		
环境条件：				测试人：		

6. 数据处理

在通过上述方法获得完整的静态特性测试数据之后，需要对该数据进行一定的数据处理。数据处理部分主要围绕数据预处理、数据特征分析、静态特性分析、结果输出四步进行，以便生成针对测试数据记录表的真实、合理、可信的测量报告。

6.1 数据预处理

1) 对于通过测量得到的原始数据文件，使用与所用测试系统配套的数据读取/分析软件或将原始数据文件格式转换成如.txt、.dat 等可以被通用数据分析软件可读的数据文件格式，将原始数据可视化、便于检查，同时需要注意测试数据的数据量纲问题，确保数据与物理量的换算关系准确；

2) 对得到的原始数据进行数据检查，判断原始数据是否有出现数据缺失或断连、原始数据是否超过测试仪器量程、原始数据中的环境噪声部分是否满足测量技术要求等问题，如果原始数据出现包括或不限于上述提及的数据问题时，该原始数据应被判定为无效数据，需要测试人检查测试设备后重新测量；

3) 在确认原始数据没有问题后，需要对原始数据进行噪声分析与滤波处理，将原始数据中所包含的环境噪声、设备噪声等无效数据清除，并检查是否存在需要进行修正的异常数据。

6.2 数据特征分析

原始数据在经过预处理之后，即可对转速、振动、位移这三个数据进行特征提取：

1) 对于转速数据，可以通过处理后的数据计算转速的平均值、稳定度等参数，分析转速的波动情况及其对振动和位移的影响；

2) 对于振动数据，需要从时域和频域两方面进行特征分析：在时域范围内可以分析振动信号的峰值、均值、有效值等参数；在频域范围内可以得到振动的频谱数据，并可以从中提取主要频率成分、共振频率等特征；

3) 对于位移数据，可以分析位移随时间的变化趋势以及位移随转速的变化规律。

6.3 结果输出与生成报告

在数据分析软件中完成上述内容的数据处理后，即可使用与所用测试系统配套的图形绘制功能或使用如 Origin 等的绘图软件进行转速-振动幅值曲线、转速-位移曲线等图像的绘制，并根据以上内容生成最终的数据处理报告。

7. 测量报告

产品名称		规格型号	
生产日期		出厂编号	
生产单位			
委托单位			
样品编号		样品数量	
样品接收日期		样品接收 状态	
测试条件	环境温度/°C		
测试日期			
测试地点			
测试依据			
轴承转速			
位移测点位置:			
转速/rpm			
轴承加速度			
位移测点位置:			
x 位移值/ μm		y 位移值/ μm	
轴承位移/ μm (附图)			