

ICS 23.080

CCS J 71

T

团体标准

T/CWDPA XXX—2026

集成式微型液态金属电磁泵技术规范

Technical specification for integrated micro liquid metal electromagnetic
pump

2026-X-XX 发布

2026-X-XX 实施

中国西部开发促进会 发布

目 次

前言 III

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 分类与型号命名 2

 4.1 分类 2

 4.2 型号命名 2

5 技术要求 2

 5.1 基本要求 2

 5.2 外观与结构要求 2

 5.3 尺寸与公差要求 3

 5.4 材料要求 3

 5.5 性能要求 3

 5.6 电气安全要求 4

 5.7 磁场性能要求 4

 5.8 密封性能要求 4

 5.9 温度要求 4

 5.10 噪声与振动要求 4

 5.11 耐久性要求 4

6 试验方法 4

 6.1 试验条件 4

 6.2 外观与结构试验 5

 6.3 尺寸与公差试验 5

 6.4 材料试验 5

 6.5 性能试验 5

 6.6 电气安全试验 6

 6.7 磁场性能试验 6

 6.8 密封性能试验 7

 6.9 温度试验 7

 6.10 噪声与振动试验 7

 6.11 耐久性试验 7

7 检验规则 7

 7.1 检验分类 7

 7.2 出厂检验 7

 7.3 型式检验 8

8 标志、包装、运输和贮存 8

 8.1 标志 8

 8.2 包装 8

 8.3 运输 8

8.4 贮存 8

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。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国西部开发促进会提出并归口。

本文件起草单位：。

本文件主要起草人：。

本文件为首次发布。

集成式微型液态金属电磁泵技术规范

1 范围

本文件规定了集成式微型液态金属电磁泵的技术要求、试验方法、检验规则、标志、包装、运输和贮存。

本文件适用于以镓基、铋锡基等低熔点导电液态金属为工作介质的集成式微型液态金属电磁泵（以下简称“电磁泵”）的设计、制造与检验。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

- GB/T 191 包装储运图形符号标志
- GB/T 2828.1 计数抽样检验程序 第1部分：按接收质量限（AQL）检索的逐批检验抽样计划
- GB/T 2900.1 电工术语 基本术语
- GB/T 2900.50 电工术语 发电、输电及配电 通用术语
- GB/T 3048.5 电线电缆电性能试验方法 第5部分：绝缘电阻试验
- GB/T 4208 外壳防护等级（IP代码）
- GB/T 5959.1 电热和电磁处理装置的安全 第1部分：通用要求
- GB/T 5959.11 电热装置的安全 第11部分：对液态金属电磁力作用装置的特殊要求
- GB/T 11026.1 电气绝缘材料 耐热性 第1部分：老化程序和试验结果的评定
- GB/T 12350 小功率电动机的安全要求
- GB/T 13560 烧结钕铁硼永磁材料
- GB/T 21067 工业机械电气设备 电磁兼容 通用抗扰度要求

3 术语和定义

GB/T 2900.1、GB/T 2900.50界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

液态金属电磁泵 liquid metal electromagnetic pump

利用磁场与导电液态金属中感应电流相互作用产生的洛伦兹力，驱动液态金属沿流道定向流动的非接触式流体输送装置。

3.2

额定流量 rated flow rate

在额定工作电压、额定频率及规定工作介质条件下，电磁泵在额定工况点输出的体积流量，单位为升每小时（L/h）。

3.3

额定扬程 rated head

在额定流量下，电磁泵进出口单位重量液态金属的能量增量，换算为液柱高度或压力表示，单位为米（m）或兆帕（MPa）。

3.4

工作介质温度 working medium temperature

电磁泵正常连续运行时，泵体内液态金属的平均温度，单位为摄氏度（℃）。

4 分类与型号命名

4.1 分类

4.1.1 按工作原理分类

电磁泵按工作原理分为以下两类：

- a) 传导式电磁泵（代号 C）：通过电极将电流导入液态金属，利用电流与磁场的相互作用产生驱动力；
- b) 感应式电磁泵（代号 I）：利用交变磁场在液态金属中感应涡流产生驱动力。

4.1.2 按磁路类型分类

电磁泵按磁路类型分为以下两类：

- a) 永磁体励磁型（代号 P）：采用永磁体提供工作磁场；
- b) 电磁励磁型（代号 E）：采用电磁线圈通电产生工作磁场。

4.1.3 按流道截面形状分类

电磁泵按流道截面形状分为以下两类：

- a) 矩形流道型（代号 R）；
- b) 圆形流道型（代号 S）。

4.2 型号命名

电磁泵的型号由产品代号、工作原理代号、磁路类型代号、流道形状代号、额定流量和额定扬程组成，编排规则如下：

IMLEP-□-□-□-□□-□□□

其中：

——IMLEP 为集成式微型液态金属电磁泵（Integrated Micro Liquid Metal Electromagnetic Pump）固定产品代号；

——第一位□为工作原理代号：C（传导式）或 I（感应式）；

——第二位□为磁路类型代号：P（永磁体励磁）或 E（电磁励磁）；

——第三位□为流道形状代号：R（矩形）或 S（圆形）；

——第四位□□为额定流量，单位为 L/min，取整数；

——第五位□□□为额定扬程，单位为 kPa，取整数。

示例：ILMEP-C-P-R-05-080 表示传导式、永磁体励磁、矩形流道、额定流量 5.0 L/min、额定扬程 80 kPa 的集成式微型液态金属电磁泵。

5 技术要求

5.1 基本要求

- 5.1.1 电磁泵应按经规定程序批准的图样及技术文件制造。
- 5.1.2 电磁泵所用材料应符合相应标准的规定，并具有合格证明文件。
- 5.1.3 电磁泵的结构应便于安装、维护和检修。
- 5.1.4 电磁泵的电气连接应牢固可靠，接触电阻不应大于 0.5 mΩ。

5.2 外观与结构要求

- 5.2.1 电磁泵表面应光洁平整，不应有裂纹、气泡、毛刺、锈蚀等缺陷，磁体表面应光滑，无杂质、锈斑，流道内壁的表面粗糙度 Ra 不应大于 1.6 μm。
- 5.2.2 各连接部位的紧固件应连接牢固，不应有松动现象。
- 5.2.3 电磁泵的外壳防护等级不应低于 GB/T 4208 规定的 IP54。

5.3 尺寸与公差要求

5.3.1 外形尺寸公差

电磁泵的外形尺寸应符合设计图样的规定，其公差应符合表 1 的要求。

表 1 外形尺寸公差

尺寸范围/mm	公差/mm
≤50	±0.5
>50~100	±0.8
>100~200	±1.2
>200	±2.0

5.3.2 流道截面尺寸公差

流道截面的尺寸公差应符合表 2 的要求。

表 2 流道截面尺寸公差

流道截面尺寸/mm	公差/mm
≤5	±0.10
>5~10	±0.15
>10~20	±0.20
>20	±0.30

5.4 材料要求

5.4.1 流道材料应选用与液态金属具有良好的化学相容性、耐腐蚀性的非磁性材料，宜选用不锈钢（如 304L、316L）、钛合金或陶瓷材料。

5.4.2 电极材料应选用导电性能优良、耐液态金属腐蚀的材料，宜选用钼、钨或镍基合金，其电阻率不应大于 $0.05 \mu\Omega \cdot m$ 。

5.4.3 绝缘材料应选用耐温不低于 200℃、绝缘电阻不小于 100 MΩ 的材料。

5.4.4 永磁体材料宜选用钕铁硼（NdFeB）或钐钴（SmCo），其最大磁能积不应低于 200 kJ/m³，工作温度范围内磁性能衰减不应大于 5%。

5.5 性能要求

5.5.1 流量

电磁泵在额定工况下的流量实测值与额定值的偏差不应超过±5%。

5.5.2 扬程

电磁泵在额定工况下的扬程实测值与额定值的偏差不应超过±5%。

5.5.3 效率

电磁泵在额定工况下的效率不应低于表 3 的规定。

表 3 额定工况下最低效率

额定功率 P/kW	最低效率/%
$P \leq 0.5$	25
$0.5 < P \leq 1.0$	30
$1.0 < P \leq 2.0$	35
$2.0 < P \leq 3.0$	40

5.5.4 流量-扬程特性

电磁泵的流量-扬程特性曲线应在额定扬程的 70%~120%范围内呈单调下降趋势，且在额定工况点附近（额定流量±20%范围内）扬程变化率不应大于额定扬程的 15%。

5.5.5 启动性能

电磁泵在额定电压的 85%~110%范围内应能正常启动，启动时间不应大于 2 s。

5.5.6 连续运行

电磁泵在额定工况下连续运行 72 h，各性能参数的变化不应超过额定值的±5%。

5.6 电气安全要求

- 5.6.1 电磁泵的电气绝缘应符合 GB/T 5959.11 和 GB/T 5959.1 的规定。
- 5.6.2 电磁泵的绝缘电阻在正常环境条件下不应小于 50 MΩ，在湿热环境下不应小于 2 MΩ。
- 5.6.3 电磁泵应能承受 50 Hz、1500V（有效值）的耐电压试验，历时 1 min，不应发生击穿或闪络现象。
- 5.6.4 电磁泵的泄漏电流不应大于 3.5 mA。
- 5.6.5 电磁泵的接地电阻不应大于 0.1 Ω。
- 5.6.6 电磁泵的电磁兼容性应符合 GB/T 21067 的规定。

5.7 磁场性能要求

- 5.7.1 工作气隙中的磁感应强度应在设计值的±5%范围内。
- 5.7.2 磁感应强度的轴向均匀性偏差不应大于±5%。
- 5.7.3 永磁体励磁型电磁泵的磁路在最高工作温度下的磁通量衰减不应大于 5%。

5.8 密封性能要求

- 5.8.1 电磁泵的流道应在 1.5 倍额定工作压力下进行密封性试验，保压 15 min，不应有泄漏现象。
- 5.8.2 电磁泵在额定工作压力下，液态金属的泄漏率不应大于 1×10^{-7} Pa·m³/s。

5.9 温度要求

- 5.9.1 外壳表面温度
电磁泵在额定工况下连续运行 2 h 后，外壳表面温度不应超过表 4 的规定。

表 4 外壳表面最高允许温度

部位	最高允许温度/℃
外壳（可触及表面）	70
接线端子	90
磁体表面	100
线圈绕组（F 级绝缘）	155

- 5.9.2 工作介质温度
电磁泵的工作介质温度范围应为 10℃~100℃。

5.10 噪声与振动要求

- 5.10.1 电磁泵在额定工况下运行时，距设备 1 m 处的噪声声压级不应大于 60 dB(A)。
- 5.10.2 电磁泵在额定工况下运行时，外壳振动速度有效值不应大于 2.0 mm/s。

5.11 耐久性要求

- 5.11.1 电磁泵在额定工况下累计运行时间不应少于 5000 h。
- 5.11.2 电磁泵在额定工况下进行不少于 10000 次启停循环试验后，应能正常工作，性能参数的变化不应超过额定值的±8%。
- 5.11.3 电磁泵的设计使用寿命不应少于 10 年。

6 试验方法

6.1 试验条件

- 6.1.1 环境条件
试验应在下列环境条件下进行：
 - a) 环境温度：15℃~35℃；
 - b) 相对湿度：45%~85%；
 - c) 大气压力：86 kPa~106 kPa。
- 6.1.2 试验介质

试验用液态金属应符合设计要求，宜选用镓铟锡合金（GaInSn），其电导率不应低于 $3.0 \times 10^6 \text{ S/m}$ ，密度不应低于 6.0 g/cm^3 。

6.1.3 试验电源

试验用电源的电压波动不应超过额定值的 $\pm 2\%$ ，频率波动不应超过额定值的 $\pm 1\%$ 。

6.1.4 测量仪器

测量仪器应在有效检定或校准周期内，其准确度应符合下列要求：

- a) 流量测量：准确度不低于 $\pm 1.0\%$ ；
- b) 压力测量：准确度不低于 $\pm 0.5\%$ ；
- c) 温度测量：准确度不低于 $\pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$ ；
- d) 电压测量：准确度不低于 $\pm 0.5\%$ ；
- e) 电流测量：准确度不低于 $\pm 0.5\%$ ；
- f) 磁感应强度测量：准确度不低于 $\pm 1.0\%$ 。

6.2 外观与结构试验

6.2.1 在光照度不低于 300 lx 的条件下，目视检查电磁泵外壳表面质量、各连接部位的紧固件连接状态及磁体表面状态。

6.2.2 采用表面粗糙度仪测量流道内壁的表面粗糙度，在流道内壁沿流向均匀选取不少于 3 个测区，每个测区测量 3 次，取算术平均值。

6.2.3 外壳防护等级试验按 GB/T 4208 的规定进行。

6.3 尺寸与公差试验

6.3.1 采用精度不低于 0.02 mm 的通用量具测量电磁泵的外形尺寸（长、宽、高），每个尺寸测量 3 次，取算术平均值，计算其与设计图样规定值的偏差。

6.3.2 采用精度不低于 0.02 mm 的通用量具测量流道截面的关键尺寸（宽度、高度或直径），在流道入口、中部、出口三个截面分别测量，取算术平均值，计算其与设计图样规定值的偏差。

6.4 材料试验

6.4.1 流道材料

从流道材料上取样，按相应材料标准进行化学成分分析和力学性能试验。

6.4.2 电极材料

电阻率应按 GB/T 3048.5 的规定进行测量。

6.4.3 绝缘材料

应按照以下方法进行：

a) 耐温性能按 GB/T 11026.1 的规定进行热老化试验，采用热重分析法（TGA）测定材料的热分解起始温度；

b) 绝缘电阻测量按 GB/T 3048.5 的规定进行。

6.4.4 永磁体材料

永磁体的磁性能按 GB/T 13560 的规定进行测量，采用闭路测量法测量剩磁、矫顽力和最大磁能积。

6.5 性能试验

6.5.1 流量测量

采用容积法或质量法进行测量。电磁泵在额定工况下稳定运行不少于 10 min 后，在出口管路中连续测量不少于 3 次，取算术平均值。

6.5.2 扬程测量

在电磁泵进出口设置压力传感器，传感器安装位置距泵进出口法兰的距离不应小于 2 倍管径。待压力示值稳定后读数，按式（1）计算扬程：

$$H = \frac{p_2 - p_1}{\rho \cdot g} \dots\dots\dots (1)$$

式中：

H ——扬程，单位为米（m）；

p_2 ——出口压力，单位为帕斯卡（Pa）；
 p_1 ——入口压力，单位为帕斯卡（Pa）；
 ρ ——液态金属密度，单位为千克每立方米（kg/m³）；
 g ——重力加速度，取 9.81 m/s²。

6.5.3 效率计算

按式（2）计算电磁泵的效率：

$$\eta = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H}{P_{in}} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (2)$$

式中：
 η ——效率；
 Q ——流量，单位为立方米每秒（m³/s）；
 H ——扬程，单位为米（m）；
 P_{in} ——输入功率，单位为瓦（W）。

注：输入功率采用功率分析仪在电磁泵电源入口端测量。

6.5.4 流量-扬程特性曲线测定

在额定转速下，调节出口阀门从全闭至全开，在零流量至最大流量范围内均匀选取不少于 8 个工况点，待各工况稳定后分别测量流量和扬程，以流量为横坐标、扬程为纵坐标绘制特性曲线。

6.5.5 启动性能试验

分别在额定电压的 85%、100%和 110%条件下各进行 10 次启动试验。每次启动前确保电磁泵完全停止，用示波器或计时器记录从通电到液态金属开始连续流动的时间。

6.5.6 连续运行试验

电磁泵在额定工况下连续运行 72 h，每隔 4 h 记录一次流量、扬程、输入功率、外壳温度和振动速度有效值。

6.6 电气安全试验

6.6.1 绝缘电阻测量

按 GB/T 3048.5 的规定，采用 500 V 兆欧表测量电源端子与机壳可触及金属部分之间的绝缘电阻。测量前电磁泵处于非通电状态，测量时兆欧表转速不低于 120 r/min，待示值稳定后读数。

6.6.2 耐电压试验

按 GB/T 5959.11 的规定进行。试验电压为 50 Hz、1500 V（有效值）的正弦交流电压，施加于电源端子与机壳之间，升压速度不超过 500 V/s，达到规定电压后保持 1 min，观察是否发生击穿或闪络。

6.6.3 泄漏电流测量

按 GB/T 12350 的规定进行。电磁泵在额定电压和额定工况下运行，在电源线路中串联泄漏电流测试仪，测量电源任一极与机壳之间的泄漏电流。

6.6.4 接地电阻测量

采用接地电阻测试仪，在接地端子与机壳可触及金属部分之间通以 25 A 电流，测量电压降与电流之比。

6.6.5 电磁兼容性试验

按 GB/T 21067 的规定进行抗扰度试验。试验过程中电磁泵处于额定工况下运行，监视其流量和扬程是否发生明显波动。

6.7 磁场性能试验

6.7.1 磁感应强度测量

采用霍尔效应高斯计测量工作气隙中心区域的磁感应强度。高斯计探头置于气隙几何中心，在垂直于磁场方向平面内测量不少于 5 个点，取算术平均值。

6.7.2 轴向均匀性测量

在气隙中沿轴向（液态金属流动方向）均匀选取不少于 5 个测点，间距不大于 10 mm，用高斯计逐点测量磁感应强度，按式（3）计算轴向均匀性偏差：

$$\delta = \frac{B_{max} - B_{min}}{B_{avg}} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (3)$$

式中：

δ ——轴向均匀性偏差；

B_{max} ——各测点磁感应强度最大值，单位为特斯拉（T）；

B_{min} ——各测点磁感应强度最小值，单位为特斯拉（T）；

B_{avg} ——各测点磁感应强度算术平均值，单位为特斯拉（T）。

6.7.3 磁通量衰减

永磁体励磁型电磁泵置于恒温箱中，升温至最高工作温度并保持 2 h 后，取出冷却至室温，按 6.7.1 的方法复测气隙中心磁感应强度，与初始测量值比较计算磁通量衰减率。

6.8 密封性能试验

6.8.1 密封性试验

将电磁泵流道入口封堵，通过出口向流道内缓慢加压至额定工作压力的 1.5 倍，达到压力后关闭加压阀，保压 15 min，观察压力表示值变化并用检漏液涂抹各密封接口检查泄漏迹象。

6.8.2 泄漏率测量

采用氦质谱检漏法。将电磁泵流道抽真空至 1×10^{-2} Pa 以下，在流道外表面各密封部位喷吹氦气，用氦质谱检漏仪测量泄漏率。

6.9 温度试验

6.9.1 表面温度测量

电磁泵在额定工况下连续运行 2 h 后，采用热电偶或红外热像仪测量外壳表面（距出风口或散热面中心 10 mm 处）、接线端子、磁体表面和线圈绕组外表面的温度。热电偶测量时，热电偶与被测表面应可靠接触，并采用导热胶固定以减少热接触电阻。

6.9.2 工作介质温度适应性试验

将液态金属分别加热至 10 °C、55 °C、100 °C 三个温度点，在每一温度点稳定后启动电磁泵，在额定工况下运行 30 min，记录流量和扬程。

6.10 噪声与振动试验

6.10.1 噪声测量

在背景噪声声压级至少比被测声源低 10 dB(A) 的安静环境中进行。声级计置于距电磁泵几何中心 1 m、高度与泵几何中心齐平的 4 个正交方向上各测量一次，取 A 计权声压级的算术平均值。

6.10.2 振动测量

采用加速度计或速度传感器，用磁吸座或粘接剂将传感器固定于电磁泵外壳顶面和侧面，在水平、垂直和轴向三个正交方向上分别测量振动速度有效值。测量时电磁泵处于额定工况下稳定运行状态，采样时间不少于 30 s。

6.11 耐久性试验

6.11.1 连续运行试验

电磁泵在额定工况下连续运行，每隔 24 h 记录一次流量、扬程和输入功率，累计运行时间达到 5000 h 后复测各项性能参数。

6.11.2 启停循环试验

电磁泵在额定工况下，以“运行 5 min—停止 5 min”为一个循环进行启停循环试验，累计进行 10000 次循环后复测流量、扬程和绝缘电阻。每次启动时采用自动控制装置确保启停时间准确

7 检验规则

7.1 检验分类

电磁泵的检验分为出厂检验和型式检验。

7.2 出厂检验

7.2.1 每台电磁泵均应进行出厂检验，经检验合格并附产品合格证后方可出厂。

7.2.2 出厂检验项目应包括外观与结构要求、尺寸与公差要求、性能要求。

7.2.3 出厂检验中若有一项不合格，即判定该产品不合格，允许返修后重新检验。

7.3 型式检验

7.3.1 检验时机

有下列情况之一时，应进行型式检验：

- a) 新产品试制定型鉴定；
- b) 正式生产后，如结构、材料、工艺有较大改变，可能影响产品性能时；
- c) 正常生产每满 2 年时；
- d) 停产 1 年以上恢复生产时；
- e) 出厂检验结果与上次型式检验有较大差异时。

7.3.2 检验项目

型式检验项目应包括本文件第五章规定的全部技术要求。

7.3.3 抽样方案

型式检验的样品应从出厂检验合格的产品中随机抽取，可按 GB/T 2828.1 的规定执行，接收质量限（AQL）由供需双方协商确定。

7.3.4 判定规则

型式检验中若全部项目合格，则判定型式检验合格；若有任一项不合格，应加倍抽样复检，若复检仍有不合格项，则判定型式检验不合格

8 标志、包装、运输和贮存

8.1 标志

包装储运图示标志应符合 GB/T 191 的规定，包装箱上应标明“小心轻放”“防潮”“向上”等标志。每台电磁泵应在明显位置固定产品铭牌，铭牌内容至少应包括：

- a) 产品名称和型号；
- b) 额定流量、额定扬程；
- c) 额定电压、额定功率；
- d) 适用介质及温度范围；
- e) 制造日期或生产批号；
- f) 制造厂名称及商标；
- g) 产品编号。

8.2 包装

8.2.1 产品包装

电磁泵应采用防潮、防震包装，内包装宜采用防静电塑料袋抽真空封装，外加缓冲材料固定。产品出厂前应将泵腔内液态金属排空或充入保护气体，进出口应用密封盖封堵。

8.2.2 随附文件

包装箱内应附有下列文件：

- a) 产品合格证；
- b) 产品使用说明书；
- c) 装箱清单；
- d) 必要的备件。

8.3 运输

电磁泵在运输过程中应避免剧烈振动、冲击和雨淋，运输环境温度范围宜为 $-25\text{ }^{\circ}\text{C}\sim+55\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度不大于 95 %。

8.4 贮存

- 8.4.1 电磁泵应贮存在清洁、干燥、通风良好的库房内，贮存环境温度应为 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 85\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度不应大于85%。
 - 8.4.2 贮存场所不应有腐蚀性气体，不应有强磁场干扰。
 - 8.4.3 产品贮存期超过12个月时，出厂前应重新进行出厂检验。
 - 8.4.4 堆放时应按包装箱标识方向放置，堆码高度不宜超过5层。
-