



中华人民共和国国家标准化指导性技术文件

GB/Z XXXXX—XXXX

超导电动磁悬浮系统通用技术规范

**General technology specification for superconducting electrodynamic magnetic
suspension system**

(点击此处添加与国际标准一致性程度的标识)

(征求意见稿)

XXXX - XX - XX 发布

- - 实施

国家市场监督管理总局 发布
国家标准化管理委员会

目 次

前言 II

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 使用环境条件 3

5 一般要求 4

 5.1 系统组成 4

 5.2 系统功能 4

6 技术要求 5

 6.1 系统性能要求 5

 6.2 超导磁体性能要求 5

 6.3 感应装置性能要求 5

 6.4 环境适应性要求 6

 6.5 防护性能要求 6

7 试验方法 7

 7.1 系统性能试验 7

 7.2 超导磁体性能试验 11

 7.3 感应装置性能试验 11

 7.4 环境适应性试验 11

 7.5 防护性能试验 12

8 贮存、运输 12

 8.1 贮存 12

 8.2 运输 12

前 言

本文件为规范类指导性技术文件。

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》的规则起草。

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。

本文件由全国磁悬浮动力技术基础与应用标准化工作组提出并归口。

本文件起草单位：XXX、XXX、XXX。

本文件主要起草人：XXX、XXX、XXX。

超导电动磁悬浮系统通用技术规范

1 范围

本文件界定了超导电动磁悬浮系统的术语和定义，规定了使用环境条件、一般要求、技术要求、贮存和运输，描述了试验方法。

本文件适用于电磁发射、磁浮火箭橇、磁浮风洞等磁浮载运领域涉及的超导电动磁悬浮系统的设计、生产、验收等。

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 755 旋转电机 定额和性能
GB/T 2423.1 电工电子产品环境试验 第2部分：试验方法 试验A：低温
GB/T 2423.2 电工电子产品环境试验 第2部分：试验方法 试验B：高温
GB/T 2423.4 电工电子产品环境试验 第2部分：试验方法 试验Db：交变湿热（12 h+12 h循环）
GB/T 2423.5 环境试验 第2部分 试验方法 试验Ea和导则：冲击
GB/T 2423.15 电工电子产品环境试验 第2部分：试验方法 试验Ga和导则：稳态加速度
GB/T 2423.17 环境试验 第2部分：试验方法 试验Ka：盐雾
GB/T 2423.37 电工电子产品环境试验 第2部分：试验方法 试验L：沙尘试验
GB/T 2423.38 环境试验 第2部分：试验方法 试验R：水试验方法和导则
GB/T 2423.56 环境试验 第2部分 试验方法 试验Fh：宽带随机振动和导则
GB/T 4208—2017 外壳防护等级（IP代码）
GB/T 20160—2006 旋转电机绝缘电阻测试
GB/T 21563 轨道交通 机车车辆设备 冲击和振动试验
GB/T 22715—2016 旋转交流电机定子成型线圈耐冲击电压水平
GB/T 24338.4 轨道交通 电磁兼容 第3-2部分：机车车辆 设备
GB/T 32791—2016 铜及铜合金导电率涡流测试方法
GB/T 36176—2018 真空技术 氦质谱真空检漏方法
GB/T xxxxxx 磁悬浮动力技术 术语
GB 8624—2012 建筑材料及制品燃烧性能分级

3 术语和定义

GB/T xxxxxx界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

超导电动磁悬浮系统 **superconducting electrodynamic magnetic suspension system**
采用超导电动磁悬浮方式的磁悬浮系统。

3.2

超导磁体 superconducting magnet

利用超导材料做成的磁体。

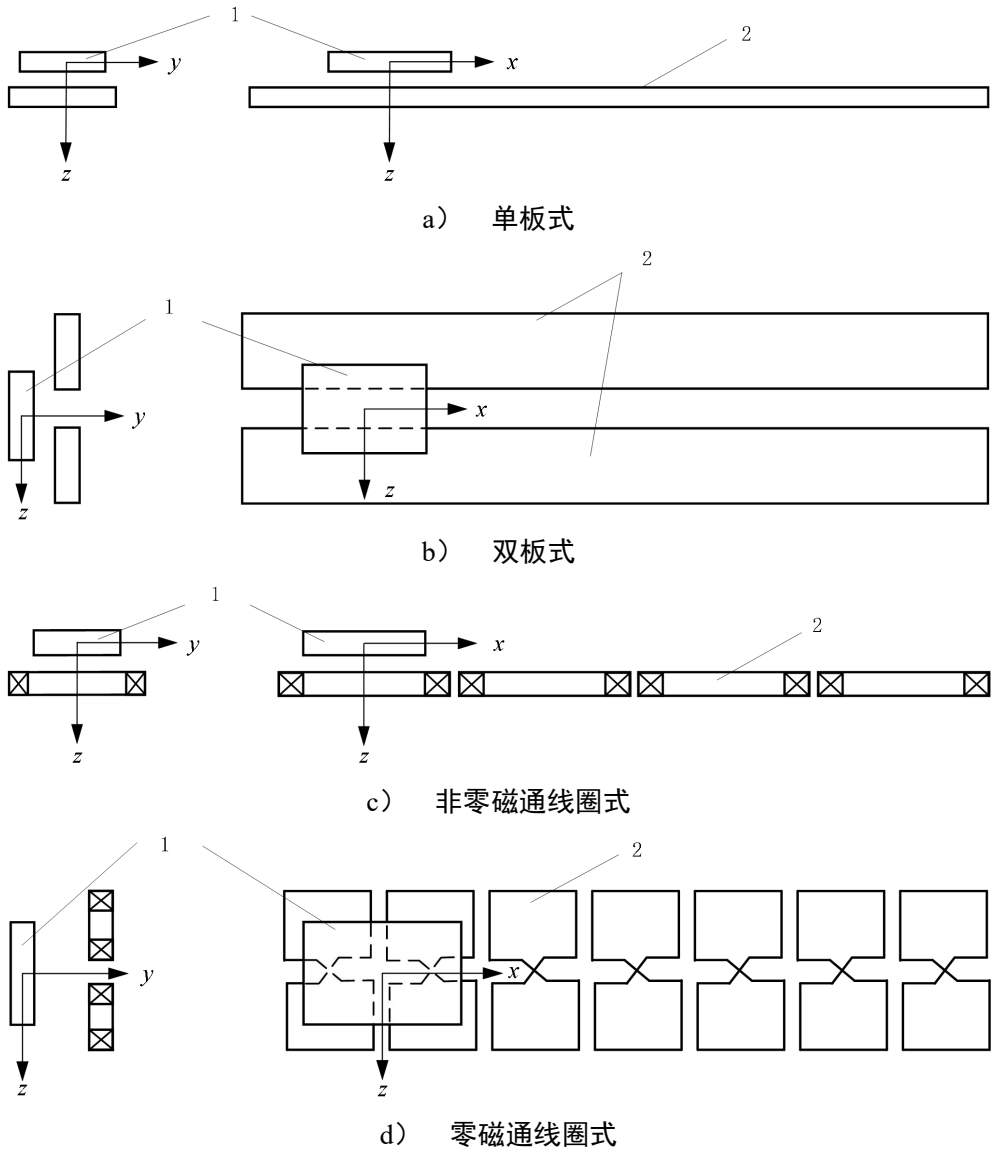
注：超导材料可为低温超导线、高温超导带材等。

3.3

感应装置 induction device

与超导磁体相对运动时产生感应电流的导电装置。

注：感应装置包含板式和线圈式两种，板式感应装置包括单板式和双板式两种；线圈式感应装置包括非零磁通线圈式和零磁通线圈式两种。分别见图1a)～图1d)。



标引序号说明：

1——超导磁体；

2——感应装置；

x ——推进方向；

y ——导向方向；

z ——悬浮方向。

图1 感应装置结构与超导电动磁悬浮系统方向示意图

3.4

超导磁体临界电流 superconducting magnet critical current

在特定温度和磁场条件下，超导磁体中超导体呈现超导电性所能传输的最大电流。

3.5

超导磁体运行电流 superconducting magnet operation current

在给定温度和磁场条件下，超导磁体的工作电流。

3.6

临界电流安全系数 critical current safety factor

在工作温度和工作磁场条件下，超导磁体临界电流与超导磁体运行电流的比值。

3.7

失超保护 quench protection

在超导磁体失去超导状态时，为防止磁体过热、过压等并保护其不受损伤或破坏所采取的措施。

3.8

推进方向 propulsion direction

超导磁体行进的方向。

3.9

悬浮方向 levitation direction

与超导磁体重力相反的方向。

3.10

导向方向 guidance direction

推进方向和悬浮方向构成平面的法向方向。

注：超导电动磁悬浮系统各方向示意图见图1a)～图1d)。

3.11

悬浮力波动 levitation force fluctuation

悬浮力峰值和悬浮力平均值的差值与悬浮力平均值的比值。

3.12

导向力波动 guidance force fluctuation

导向力峰值和导向力平均值的差值与悬浮力平均值的比值。

3.13

浮重比 lift-to-weight ratio

悬浮力与超导磁体及其辅助设备总重量的比值。

3.14

浮阻比 lift-to-drag ratio

悬浮力与磁阻力的比值。

4 使用环境条件

4.1 正常工作大气条件

正常工作大气条件如下：

- a) 环境温度-10℃～+55℃；
- b) 相对湿度5%～95%（无凝露，也不应结冰）；

c) 大气压力80 kPa~106 kPa。

4.2 贮存、运输环境温度

贮存、运输环境温度如下：

- a) 贮存环境温度为-10 °C~+55 °C，相对湿度不大于85%；
- b) 运输环境温度为-40 °C~+70 °C，相对湿度不大于85%。

4.3 特殊环境使用条件

工作环境超过4.1正常工作环境条件时，由用户和制造商协商解决。

5 一般要求

5.1 系统组成

超导电动磁悬浮系统应由超导磁体、感应装置和辅助设备三个子系统组成，其中辅助设备包括超导磁体用抽真空设备、制冷设备、励磁设备和监控设备，如图2所示。

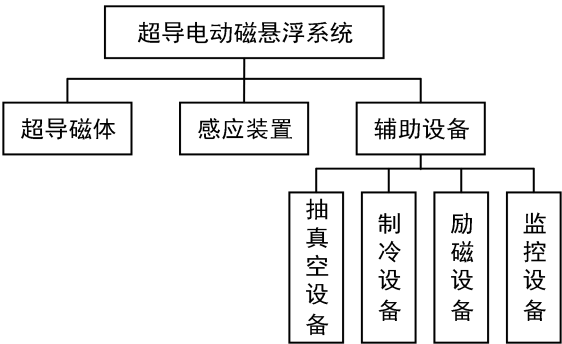


图2 超导电动磁悬浮系统组成

5.2 系统功能

5.2.1 悬浮功能

超导电动磁悬浮系统应具有沿悬浮方向上的稳定悬浮功能，被悬浮物体沿悬浮方向不与轨道及感应装置发生机械接触。

5.2.2 导向功能

超导电动磁悬浮系统应具有沿导向方向上的稳定导向功能，被悬浮物体沿导向方向不与轨道及感应装置发生机械接触。

5.2.3 监测功能

超导电动磁悬浮系统应具有超导磁体温度、磁场、电流、电压、真空度、加速度等物理量的监测功能。

5.2.4 保护功能

超导电动磁悬浮系统应具有超导磁体失超保护功能，超导磁体在失超后不发生不可逆损坏。

6 技术要求

6.1 系统性能要求

6.1.1 起浮速度

起浮速度应不大于150 km/h。

6.1.2 悬浮力波动

悬浮力波动应不大于5%。

6.1.3 导向力波动

导向力波动应不大于5%。

6.1.4 悬浮刚度

当超导电动磁悬浮系统的运行速度大于起浮速度时，悬浮刚度应满足被悬浮物体沿悬浮方向不与轨道及感应装置发生机械接触。

6.1.5 导向刚度

当超导电动磁悬浮系统的运行速度大于起浮速度时，导向刚度应满足被悬浮物体沿导向方向不与轨道及感应装置发生机械接触。

6.1.6 浮阻比

超导电动磁悬浮系统的浮阻比应满足如下要求：

- a) 板式超导电动磁悬浮系统起浮速度下的浮阻比应不小于1；
- b) 非零磁通线圈式超导电动磁悬浮系统起浮速度下的浮阻比应不小于10；
- c) 零磁通线圈式超导电动磁悬浮系统起浮速度下的浮阻比应不小于20。

6.1.7 浮重比

起浮速度下的浮重比应不小于2。

6.2 超导磁体性能要求

6.2.1 密封性要求

超导磁体密封部件的漏率应不大于 10^{-9} Pa·m³/s。

6.2.2 临界电流安全系数

超导磁体的临界电流安全系数宜不小于1.3。

6.2.3 结构安全系数

稳定悬浮时超导磁体的结构安全系数应不小于2.0。

注：结构安全系数指结构的承载能力与设计载荷的比值。

6.3 感应装置性能要求

6.3.1 电导率

感应装置内导体的室温电导率应不小于 3.0×10^7 S/m。

6.3.2 绝缘电阻

感应装置内导体的对地绝缘电阻应不小于10 M Ω 。

6.3.3 绝缘耐压

感应装置的绝缘耐压等级应满足GB/T 755中9.2的规定。

6.3.4 结构安全系数

感应装置的结构安全系数应不小于2.0。

6.4 环境适应性要求

6.4.1 机械环境适应性要求

超导电动磁悬浮系统设备应满足如下机械环境适应性要求：

- a) 随机振动试验量级比最高预示环境高4 dB；
- b) 冲击试验量级比最高预示环境高6 dB；
- c) 正弦振动量级为最高预示环境的1.5倍。

6.4.2 电磁环境适应性要求

超导电动磁悬浮系统电气设备应满足如下电磁环境适应性要求：

- a) 对于直流磁场环境，在超导磁体静磁场环境下能正常工作；
- b) 对于交流磁场环境，电磁兼容性应符合GB/T 24338.4中的规定。

6.4.3 温度环境适应性要求

超导电动磁悬浮系统设备应能承受GB/T 2423.1规定的低温试验和GB/T 2423.2规定的高温试验。

6.4.4 湿热环境适应性要求

超导电动磁悬浮系统设备应能承受GB/T 2423.4规定的湿热试验。

6.4.5 盐雾环境适应性要求

超导电动磁悬浮系统设备应能承受GB/T 2423.17规定的盐雾试验。

6.4.6 粉尘环境适应性要求

超导电动磁悬浮系统设备应能承受GB/T 2423.37规定的降尘试验。

6.4.7 淋雨环境适应性要求

超导电动磁悬浮系统设备应能承受GB/T 2423.38规定的淋雨试验。

6.5 防护性能要求

6.5.1 阻燃性能

超导电动磁悬浮系统设备的燃烧性能等级应满足GB 8624中规定的B1等级要求。

6.5.2 外壳防护

超导电动磁悬浮系统设备的外壳防护等级应符合GB/T 4028中IP55的规定。

7 试验方法

7.1 系统性能试验

7.1.1 起浮速度试验

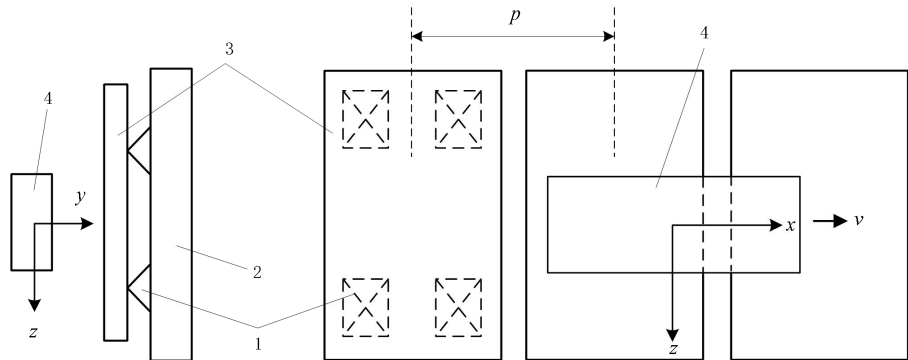
起浮速度试验的具体步骤如下：

超导电动磁悬浮系统加速过程中，利用速度传感器测量被悬浮物体行进速度，利用位移传感器监测被悬浮物体与悬浮方向支承面接触状态，被悬浮物体与悬浮方向支承面脱离时刻对应的被悬浮物体的行进速度即为起浮速度。

7.1.2 悬浮力波动试验

悬浮力波动试验的具体步骤如下：

a) 采用力传感器完全支承单个感应装置，测量并记录超导磁体以恒定运行速度、恒定姿态掠过该感应装置全程的悬浮力时域数据。图3为超导磁体掠过由力传感器支承的感应装置的过程示意图，其中感应装置沿推进方向的相邻安装间距为 p ，超导磁体沿推进方向的运行速度为 v 。



标引序号说明：

1——力传感器；

2——轨道梁；

3——感应装置；

4——超导磁体；

p ——感应装置沿推进方向的相邻安装间距；

v ——超导磁体沿推进方向的运行速度；

x ——推进方向；

y ——导向方向；

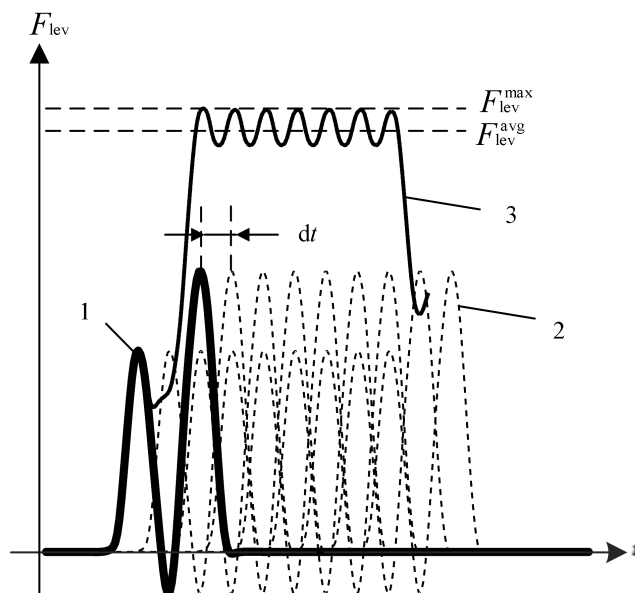
z ——悬浮方向。

图3 超导磁体通过由力传感器支承的感应装置的过程示意图

b) 将获得的悬浮力数据沿时域以时间间隔 dt 阵列 n 组，其中： dt 由式（1）计算得到； n 的选取需要确保 n 组感应装置的总长 $n \times p$ 大于两倍超导磁体长度。

$$dt = \frac{p}{v} \quad (1)$$

c) 对 n 组悬浮力数据在时域中进行累加, 获得超导磁体以恒定运行速度、恒定姿态掠过以间距 p 沿推进方向连续布置的感应装置时超导磁体所受的悬浮力时域数据, 如图4所示。



标引序号说明:

- 1——被测感应装置悬浮力时域曲线;
 2——被测感应装置后连续 $n-1$ 个感应装置悬浮力时域值;
 3——连续 n 个感应装置悬浮力时域值累加值;
 t ——时间;

dt ——超导磁体以恒定速度掠过相邻感应装置间距的时间;

F_{lev} ——时域悬浮力;

F_{lev}^{avg} ——悬浮力累加值稳定段平均悬浮力;

F_{lev}^{max} ——悬浮力累加值稳定段最大悬浮力。

图4 由感应装置动态悬浮力阵列累加获得超导磁体平均悬浮力示意图

d) 基于获得的超导磁体所受悬浮力时域数据, 采用式(2)计算悬浮力波动 α_{lev} 。

$$\alpha_{lev} = \left| \frac{F_{lev}^{max} - F_{lev}^{avg}}{F_{lev}^{avg}} \right| \times 100\% \quad (2)$$

7.1.3 导向力波动试验

导向力波动试验的具体步骤如下:

a) 如图3所示, 采用完全由力传感器支承的单个感应装置测量并获得超导磁体以恒定运行速度、恒定姿态掠过该感应装置全程的导向力时域数据。

b) 采用与悬浮力波动试验相同数据处理方法, 对导向力数据采取在时域上进行阵列与累加的方式, 获得超导磁体所受导向力的均值与最大值, 由公式(3)计算出导向力波动 α_{gui} 。

$$\alpha_{gui} = \left| \frac{F_{gui}^{max} - F_{gui}^{avg}}{F_{gui}^{avg}} \right| \times 100\% \quad (3)$$

式中：

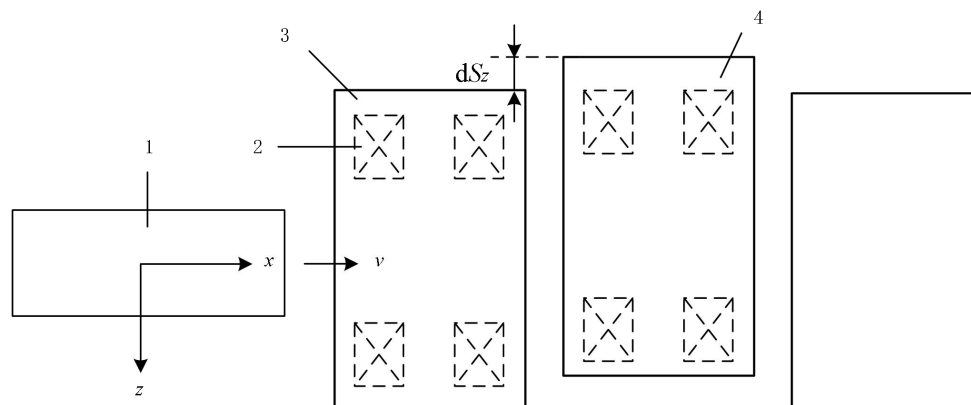
$F_{\text{gui}}^{\text{avg}}$ ——导向力累加值稳定段平均导向力；

$F_{\text{gui}}^{\text{max}}$ ——导向力累加值稳定段最大导向力。

7.1.4 悬浮刚度试验

悬浮刚度试验的具体步骤如下：

a) 如图5所示，采用力传感器支承两组垂向互错 dS_z 的感应装置，测量在超导磁体以恒定速度、恒定姿态掠过两组感应装置全程的悬浮力时域数据。



标引序号说明：

1——超导磁体；

2——力传感器；

3——悬浮方向无偏置安装的感应装置；

4——悬浮方向有偏置安装的感应装置；

dS_z ——悬浮方向偏置位移；

v ——超导磁体沿推进方向的运行速度；

x ——推进方向；

z ——悬浮方向。

图5 感应装置对超导磁体悬浮刚度测试示意图

b) 采用与悬浮力波动试验相同的数据处理方法，计算出两组数据阵列累加后的平均悬浮力 F_1^{lev} 和 F_2^{lev} ，由公式（4）计算出该速度下的悬浮刚度 K_{lev} 。

$$K_{\text{lev}} = \left| \frac{F_2^{\text{lev}} - F_1^{\text{lev}}}{dS_z} \right| \quad (4)$$

式中：

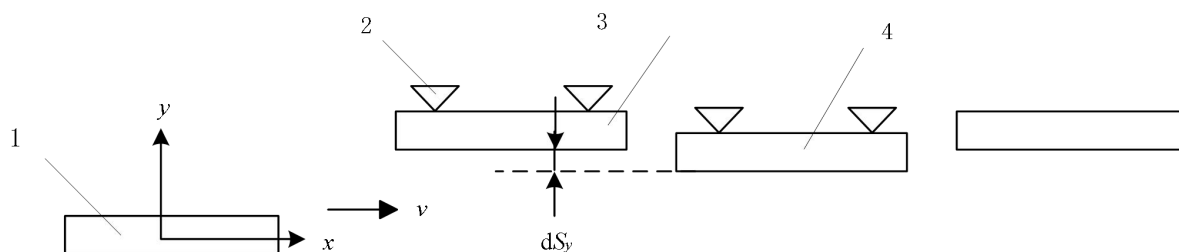
F_1^{lev} ——正常安装的感应装置对超导磁体作用的平均悬浮力；

F_2^{lev} ——偏置安装的感应装置对超导磁体作用的平均悬浮力。

7.1.5 导向刚度试验

导向刚度试验的具体步骤如下：

a) 如图6所示，采用力传感器支承两组导向互错 dS_y 的感应装置，测量在超导磁体以恒定速度、恒定姿态掠过两组感应装置全程的导向力时域数据。



标引序号说明：

1——超导磁体；

2——力传感器；

3——导向方向无偏置安装的感应装置；

4——导向方向有偏置安装的感应装置；

dS_y ——导向方向偏置位移；

v ——超导磁体沿推进方向的运行速度；

x ——推进方向；

y ——导向方向。

图6 感应装置对超导磁体导向刚度测试示意图

b) 采用与导向力波动试验相同的数据处理方法，计算出两组数据阵列累加后的平均导向力 F_1^{gui} 和 F_2^{gui} ，由公式（5）计算出该速度下的导向刚度 K_{gui} 。

$$K_{\text{gui}} = \left| \frac{F_2^{\text{gui}} - F_1^{\text{gui}}}{dS_y} \right| \quad (5)$$

式中：

F_1^{gui} ——正常安装的感应装置对超导磁体作用的平均导向力；

F_2^{gui} ——偏置安装的感应装置对超导磁体作用的平均导向力。

7.1.6 浮阻比试验

浮阻比试验的具体步骤如下：

a) 采用力传感器支承单个感应装置，测量并获得超导磁体以恒定速度、恒定姿态掠过该感应装置全程的悬浮力与磁阻力时域数据。

b) 采用与悬浮力波动试验相同的数据处理方法，计算出超导磁体所受的平均悬浮力 $F_{\text{lev}}^{\text{avg}}$ 和平均磁阻力 $F_{\text{darg}}^{\text{avg}}$ 。由公式（6）计算超导电动磁悬浮系统的浮阻比。

$$\beta_{\text{lev_to_drag}} = \frac{F_{\text{lev}}^{\text{avg}}}{F_{\text{drag}}^{\text{avg}}} \quad (6)$$

7.1.7 浮重比试验

浮重比试验的具体步骤如下：

a) 采用力传感器支承单个感应装置，测量并获得超导磁体以恒定速度、恒定姿态掠过该感应装置全程的悬浮力时域数据。

b) 采用与悬浮力波动试验相同的数据处理方法，计算出超导磁体所受的平均悬浮力 $F_{\text{lev}}^{\text{avg}}$ 。通过线下称重方法测得超导磁体及其辅助设备总重量 m 。由公式（7）计算超导电动磁悬浮系统的浮重比。

$$\beta_{\text{lev_to_weight}} = \frac{F_{\text{lev}}^{\text{avg}}}{mg} \quad (7)$$

7.2 超导磁体性能试验

7.2.1 密封性试验

按照GB/T 36176—2018中5.1的方法对超导磁体进行密封性试验，记录超导磁体漏率。

7.2.2 临界电流安全系数试验

利用制冷设备将超导磁体制冷至工作温度后，采用励磁设备首先将超导磁体励磁至运行电流，记录超导磁体温度、电压、电流及磁场随时间变化的曲线；待超导磁体温度、电压、电流及磁场曲线稳定后，再将超导磁体继续励磁至运行电流的1.3倍，并记录超导磁体温度、电压、电流与磁场随时间变化的曲线。

7.2.3 结构安全系数试验

将超导磁体励磁至运行电流后，对其施加2倍稳定悬浮运行时的三向电磁力。

7.3 感应装置性能试验

7.3.1 电导率测量

按照GB/T 32791规定的方法对感应装置内导体的电导率进行测量。

7.3.2 绝缘电阻测量

按照GB/T 20160—2006第9章规定的方法采用兆欧表直接测量感应装置的绝缘电阻。

7.3.3 绝缘耐压试验

按照GB/T 22715—2016第4章规定的方法对感应装置进行绝缘耐压测试。

7.3.4 结构安全系数试验

对感应装置进行静力加载试验，验证感应装置在等效电磁力作用下的结构安全性。

7.4 环境适应性试验

环境适应性试验应根据超导电动磁悬浮系统的具体使用环境针对性开展。

7.4.1 机械振动试验

对超导磁体、感应装置和超导磁体辅助装置，按照GB/T 2423.5的规定做冲击试验，按照GB/T 2423.56的规定做随机试验，对超导磁体和超导磁体辅助设备按照GB/T 2423.15的规定做加速度试验。

7.4.2 电磁兼容性试验

按照GB/T 24338.4的规定对超导磁体所处直流磁场环境中的电气设备进行电磁兼容性试验。

7.4.3 高低温试验

对感应装置、监控设备，按照GB/T 2423.1的规定做低温试验，按照GB/T 2423.2的规定做高温试验。

7.4.4 湿热试验

按照GB/T 2423.4的规定对感应装置进行湿热试验。

7.4.5 盐雾试验

按照GB/T 2423.17的规定对感应装置进行盐雾试验。

7.4.6 降尘试验

按照GB/T 2423.37的规定对感应装置进行降尘试验。

7.4.7 淋雨试验

按照GB/T 2423.38的规定对感应装置进行淋雨试验。

7.5 防护性能试验

7.5.1 阻燃性能试验

按照GB 8624—2012的B1阻燃等级测试的规定进行。

7.5.2 外壳防护试验

按照GB/T 4208—2017中IP55防护等级测试的规定进行。

8 贮存、运输

8.1 贮存

8.1.1 超导磁体应处于非抽空、非制冷与非励磁状态。

8.1.2 贮存期超过一年的产品，出库前应进行指标测试，合格后方可出库。

8.2 运输

8.2.1 超导磁体应处于非抽空、非制冷与非励磁状态。

8.2.2 运输过程中应避免挤压、防止冲击和碰撞，不得淋雨受潮和曝晒。