



中 华 人 民 共 和 国 国 家 标 准

GB/T XXXXX—XXXX

磁悬浮飞轮储能单元通用技术规范

General technical specification for maglev flywheel energy storage unit

(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
国家标准化管理委员会 发 布

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	2
5 通用技术要求	2
5.1 结构组成	3
5.2 功能要求	3
5.3 外观要求	4
5.4 机械性能	4
5.5 电气性能	5
5.6 安全性能	6
5.7 通信功能	7
6 试验方法	7
6.1 试验条件	7
6.2 一般检查	7
6.3 试验电路	7
6.4 机械性能试验	8
6.5 电气性能试验	9
6.6 安全性能试验	10
6.7 通信功能试验	11
参考文献	12

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。

本文件由全国磁悬浮动力技术基础与应用标准化工作组（SAC/SWG28）提出并归口。

本文件起草单位：

本文件主要起草人：

磁悬浮飞轮储能单元通用技术规范

1 范围

本文件界定了磁悬浮飞轮储能单元（简称储能单元）的术语和定义，规定了工作环境要求、通用技术要求及对应的试验方法。

本文件适用于储能单元的设计、生产和试验。

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 755 旋转电机 定额与性能

GB/T 11021 电气绝缘 耐热性和表示方法

GB/T 44934 电力储能用飞轮储能单元技术规范

GB/T 46078 磁悬浮动力技术 术语

ISO 14839—1—2018 机械振动 装有主动磁悬浮轴承的旋转机械的振动 第1部分：词汇

3 术语和定义

GB/T 44934、GB/T 46078界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

磁悬浮飞轮储能 maglev flywheel energy storage

采用磁悬浮技术在规定方向上实现飞轮稳定悬浮，以飞轮为储能载体储存能量，并通过发电/电动机实现电能和动能之间相互转换的一种物理储能方式。

3.2

磁悬浮飞轮本体 maglev flywheel assembly

由飞轮、发电/电动机、飞轮磁悬浮系统、机壳等构成，在储能单元中存储和释放能量的机电设备组合。

[来源：GB/T 44934—2024，3.7，有修改]

3.3

磁悬浮飞轮储能单元 maglev flywheel energy storage unit

由磁悬浮飞轮本体、辅助装置等组成的，能独立充放电的储能装置。

[来源：GB/T 44934—2024，3.9，有修改]

3.4

飞轮磁悬浮系统 flywheel maglev system

由磁悬浮轴承、保护轴承及辅助机构等构成（对于采用主动磁悬浮轴承类型的，还应包括磁悬浮轴承控制系统、位移传感器、电源等），在磁悬浮飞轮本体中支承飞轮转子稳定悬浮的机电设备组合。

3.5

磁悬浮轴承定子 magnetic bearing stator

磁悬浮轴承中安装在磁悬浮飞轮本体上,与飞轮本体基座没有相对运动关系的磁悬浮轴承部件。对于主动电磁悬浮轴承其定子由定子铁心、线圈等组成;对于被动磁悬浮轴承,则由永磁体或其他磁体等组成;对于混合磁悬浮轴承,则由定子铁心、线圈、磁体等组成。

[来源:GB/T46078—2025, 4.2.4, 有修改]

3.6

磁悬浮轴承转子 magnetic bearing rotor

磁悬浮轴承中安装在飞轮或电机转子上,随转子共同运动的磁悬浮轴承部件。对于主动电磁悬浮轴承,转子由铁心及结构件组成;对于被动磁悬浮轴承,转子由磁体及结构件组成。

3.7

磁悬浮轴承系统功耗 magnetic bearing system power consumption

磁悬浮轴承本体结构涡流和磁滞引起的铁损耗、磁悬浮轴承定子线圈的铜损耗(欧姆损耗)、磁悬浮轴承控制系统及电缆的电路损耗之和。

注:为方便测量,磁悬浮轴承转子表面的风阻损耗及转子转动带来附加损耗没有计入。

[来源:ISO 14839—1:2018, 3.1.29, 有修改]

3.8

飞轮储能自取能电源 flywheel self-generation power supply

将飞轮旋转动能进行电能转化,为磁悬浮轴承控制系统提供备用供电的设备。

3.9

磁悬浮轴承最高工作温度 maximum operating temperature of magnetic bearing

磁悬浮轴承在额定工况下持续稳定运行时允许达到的最高温度或极限工作温度。

注:磁悬浮轴承最高工作温度由其各组成材料所能承受的不同最高温度中的最小值决定,各组成材料包括了硅钢片、励磁线圈、灌封材料、钎焊磁材料、线架、传感器、永磁体、超导体、电子元器件等。

[来源:GB/T 46078—2025, 4.3.38]

3.10

失稳 instability

飞轮转子运行时,由于悬浮控制失效、磁体失磁或其他原因导致振动幅度增大,飞轮转子丧失稳定悬浮的现象。

3.11

跌落 drop

飞轮转子运行时,由于失稳、磁悬浮轴承控制系统掉电或者其他原因,导致飞轮转子与保护轴承发生触碰的现象。

4 使用环境条件

储能单元在下列环境下应正常工作。

4.1 环境温度: $-20\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

4.2 相对湿度: $0\sim 95\%$, 无凝露。

4.3 海拔高度: 不大于 2000 m ; 当海拔高度大于 2000 m 时, 符合 GB/T 20626.1 的相关规定。

4.4 应用在海洋性气候下, 满足耐盐雾要求。

注: 针对具体应用场景, 以行业相关要求或具体应用场景要求为准。

5 通用技术要求

5.1 结构组成

储能单元的典型构成包括飞轮、发电/电动机、磁悬浮轴承、磁悬浮轴承控制系统、电源、保护轴承、机壳、辅助装置等。图1给出了采用五自由度磁悬浮轴承的储能单元典型组成示意图。

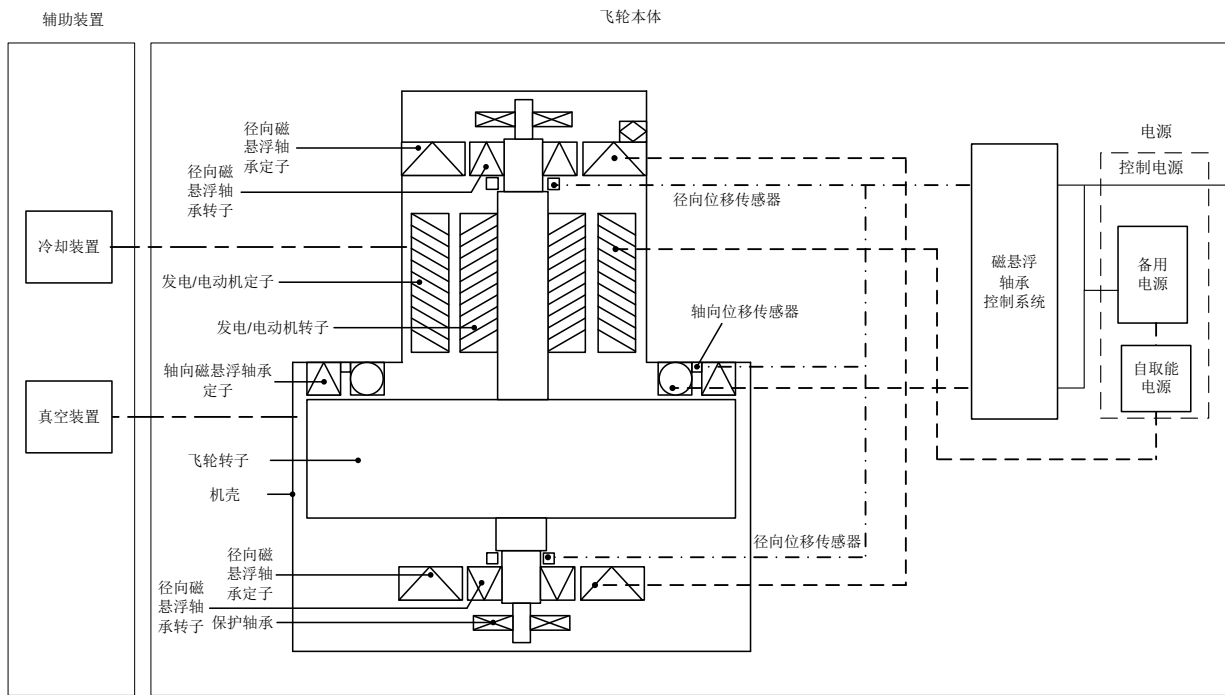


图1 储能单元典型组成示意图

5.2 功能要求

5.2.1 储能基本功能

储能单元应能在变流装置的控制下完成启动、停机、充电、放电、转速保持、空载待机、自由降速等功能。

5.2.2 悬浮功能

储能单元应在设计的全部自由度上实现转子的稳定悬浮，且在全工况范围内，磁悬浮轴承转子在设计自由度上与保护轴承无机械接触。

5.2.3 主动悬浮保护功能

储能单元的转子发生失稳时，储能单元应具备主动保护功能，以降低转子失稳状态带来的风险。

5.2.4 被动机械保护功能

储能单元应配置保护轴承，在飞轮转子悬浮跌落后或未悬浮状态下能支承飞轮转子。

5.2.5 信息采集和监测功能

储能单元应具备对飞轮转子位移信息、振动、温度、运行状态等信息进行采集和监测的功能。

5.2.6 备用供电功能

包含主动磁悬浮轴承系统的储能单元，除配置常规的控制电源外，还应配置磁悬浮轴承控制系统备用电源，以确保供电可靠。宜增设储能单元自取能电源为备用供电的补充。

5.3 外观要求

- 储能单元的外观应满足下列要求：
- a) 表面无划痕、锈蚀、裂纹及结构变形；
 - b) 紧固件无松动；
 - c) 标识清晰、完整。

5.4 机械性能

5.4.1 磁轴承转子振动位移

本条适用于含有主动磁悬浮轴承的储能单元，规定了稳态运行（不含通过临界转速及瞬态工况）时的转子振动位移稳态值。转子振动位移 $D_{\max}$ 指在主动磁悬浮轴承处或附近测得的轴相对于轴承中心的总位移，位移传感器应安装于磁悬浮轴承处轴颈位置或附近。

为避免转子与静止件（如磁悬浮轴承定子、位移传感器、保护轴承等）接触，应满足位移限值条件。最小间隙 $C_{\min}$ 为转子在任意径向静态移动时的最小间隙，通常取保护轴承间隙。

$D_{\max}$ 采用分区评估，分区数值可作为设计、状态监测、运行限制设定的参考依据，不作强制验收要求。振动位移区域划分推荐准则见表1。

注：区域A——新交付的储能单元转子振动位移通常落在该区域；区域B——可长期运行；区域C——不适宜长期连续运行，可短时运行后择机整改；区域D——有设备损坏风险，应排查整改。

表1 含主动磁悬浮轴承的磁轴承转子振动位移区域划分推荐准则

区域界限	A/B	B/C	C/D
转子振动位移最大值 $D_{\max}$	$<0.3C_{\min}$	$<0.4C_{\min}$	$<0.5C_{\min}$
注： $C_{\min}$ 是磁悬浮轴承径向或轴向保护轴承间隙。			

5.4.2 最大悬浮力

磁悬浮轴承的最大悬浮力应满足飞轮转子长期稳定运行要求。

5.4.3 悬浮间隙

制造商应根据磁悬浮轴承承载力及系统加工精度要求，选择合适的悬浮间隙。对于电磁悬浮轴承，悬浮间隙宜为0.3 mm～1 mm。

5.4.4 振动速度

储能单元在设定工况运行范围内，飞轮本体机壳的振动区域界限值用振动速度表征，采用综合振动速度的均方根值（rms）作为主要评价量，频率范围通常为10 Hz～1000 Hz。

飞轮本体机壳径向振动速度采用在机壳径向两个正交方向安装的振动传感器测得的最大宽频带振动速度值，取两者中的较大值。轴向振动速度取轴向安装在机壳上的振动传感器测得的最大宽频带振动速度值。

振动速度分区推荐值见表2。评价区域的划分为飞轮本体振动提供定性评价，并对可能采取的措施提供指南。

注：区域A——新交付的储能单元的振动通常落在该区域；区域B——振动处在该区域的储能单元可无限制长期运行；区域C——振动处在该区域的储能单元不适宜长时间连续运行，可在此状态下运行有限时间，直至采取补救措施；区域D——振动处在该区域的储能单元，其振动烈度通常足以导致设备损坏。

指定的区域边界值不作为验收规范，而是作为指南，以避免过大的缺陷或不切实际的要求。特殊情况下，可允许采用不同的区域边界值，但应确保设备在较高振动值下运行不会损坏。

表 2 磁悬浮飞轮本体机壳振动速度区域分类推荐值

区域边界	刚性支承			柔性支承		
	A/B	B/C	C/D	A/B	B/C	C/D
振动速度均方根值 v_{rms} (mm/s)	2.3	4.5	7.1	3.5	7.1	11

5.4.5 噪声

储能单元在额定功率连续运行时，距离设备1 m处（水平和垂直方向）的噪声应不大于85 dB（A）声压级。

注：针对具体应用场景，可按行业相关要求或具体应用场景的要求执行。

5.4.6 温升

磁悬浮飞轮本体在额定功率连续运行条件下，温度及温升应满足下列要求：

- 磁悬浮飞轮本体温度不应超过GB/T 11021规定的电机绝缘结构热分级限值或电机转子材料耐受温度限值；磁悬浮轴承温度不应超过其组成材料的耐受温度限值。
- 温升应满足GB/T 755中规定的限值要求。当海拔和环境温度超过正常工作条件时，应按GB/T 755中规定的限值修正规则进行修正。

5.4.7 强度

磁悬浮飞轮本体机壳的机械强度应满足下列要求：

- 机壳承受不低于10 kPa的压力，不应产生明显的塑性变形；
- 对于非下沉式防护结构的飞轮本体，飞轮转子破损分离体不应飞出机壳及飞轮储能单元附属其他防护结构。
- 飞轮转子材料强度应满足飞轮转子长期稳定运行对强度的要求，金属飞轮转子材料的最大屈服强度宜不小于飞轮转子运行过程中最大应力的1.5倍。

5.4.8 密封性

磁悬浮飞轮本体机壳的密封性应满足下列要求之一：

- 保压10 min后，压力变化不超过100 Pa；
- 真空漏率不大于 $1 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 。

5.5 电气性能

5.5.1 额定充电功率

储能单元充电功率应不小于额定充电功率。

5.5.2 额定放电功率

储能单元放电功率应不小于额定放电功率。

5.5.3 额定充电能量

储能单元充电能量应不小于额定充电能量。

5.5.4 额定放电能量

储能单元放电能量应不小于额定放电能量。

5.5.5 充放电循环效率

储能单元充放电循环效率应不低于85%。

5.5.6 自放电率

储能单元与外部电网无能量交换，其自放电率应不大于2%。

注：自放电率指由工作转速上限自由降速30 s后，储能单元所存储的动能减少量与工作转速上限时存储的动能的比值。

5.5.7 磁悬浮轴承系统功耗

储能单元的磁悬浮轴承系统功耗宜不大于其额定功率（以充电功率和放电功率的较大值为准）的1%。

5.5.8 备用供电

磁悬浮轴承控制系统备用供电的维持时长，应至少能满足飞轮从工作转速上限紧急制动降速到系统能安全停机（即飞轮转子安全软着陆）所需的时长。

5.6 安全性能

5.6.1 机械安全

储能单元的机械安全应满足下列要求：

- a) 飞轮转子在设计寿命周期内，不应发生因强度不足导致的失效破坏。
- b) 采用合金钢锻件的飞轮转子，其力学性能应满足工作转速的超速设计要求。根据飞轮转速及储能能量，超速值范围取值宜为飞轮工作转速上限的1.05-1.15倍，典型值为1.1倍。
- c) 飞轮本体安装在防护罩、防护掩体或下沉式防护结构内。

5.6.2 绝缘电阻

储能单元的绝缘电阻，按表3中规定的绝缘测试电压档位下测试的绝缘电阻值应满足下列要求：

- a) 导电部分（如电机定子线圈、磁轴承线圈等）对机壳之间的绝缘电阻不小于10 MΩ；
- b) 无电气连接的各电路之间的绝缘电阻不小于10 MΩ。

表 3 绝缘电阻测试电压等级

额定绝缘电压 U_i/V	$U_i \leq 60$	$60 < U_i \leq 300$	$300 < U_i \leq 800$	$800 < U_i \leq 1500$
绝缘测试电压/V	250	500	1000	2500
注：额定绝缘电压 U_i 根据主电路的额定工作电压（交流均方根值或直流值）确定。				

5.6.3 耐压

正常环境气压下，储能单元的带电主回路根据其工作电压，承受表4中规定的历时1min的工频耐受电压试验，试验过程中应无绝缘击穿和闪络现象。

表 4 工频耐受电压等级

额定绝缘电压 U_i/V	$U_i \leq 60$	$60 < U_i \leq 200$	$200 < U_i \leq 300$	$300 < U_i \leq 690$	$690 < U_i \leq 800$	$800 < U_i \leq 1500$
工频耐受电压/V	1000	1500	2000	2500	3000	3500

注：额定绝缘电压 U_i 根据主电路的额定工作电压（交流均方根值或直流值）确定。

5.6.4 悬浮故障处理

储能单元发生转子失稳或跌落时，应立即启动系统紧急制动功能，将转子转速降低至安全阈值以下。故障排除后，系统应具备再悬浮功能。

5.6.5 断电软着陆

外部供电完全中断时，储能单元应紧急制动，依靠备用电源继续为磁悬浮轴承控制系统供电，确保转子在安全制动停机过程中稳定悬浮，最终实现转子从悬浮状态安全降落至机械支承状态。

5.7 通信功能

储能单元应具备与飞轮储能管理系统、飞轮储能变流器等设备信息交互的功能。传输信息宜包括但不限于：飞轮转速、振动、电机温度、转子位移、磁悬浮轴承温度、磁悬浮轴承控制系统运行状态、电源状态、腔体真空度、冷却装置状态、运行状态、故障报警信息。

通信采用 CAN、RS-485、RS-232、以太网等接口，通信协议支持 CAN、Modbus 等。

6 试验方法

6.1 试验条件

6.1.1 环境条件

除另有规定外，试验宜在温度5℃~40℃、相对湿度≤95%且无凝露、大气压为86 kPa~106 kPa的环境中进行。

6.1.2 机械安全条件

储能单元试验系统应满足下列机械安全条件：

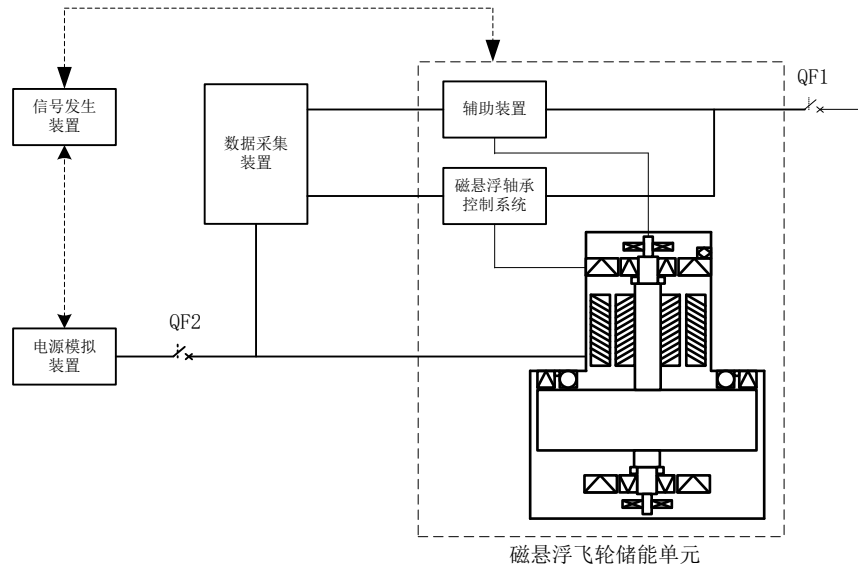
- 试验的飞轮本体放在下沉式防护结构内，或在周围增设防护罩或防护掩体；
- 对于试验中采用防护罩或防护掩体的情形，防护罩或防护掩体具备包容飞轮转子破裂后分离体飞出的能力。
- 试验测试人员与飞轮本体保持足够安全距离。

6.2 一般检查

储能单元的一般检查包括：磁悬浮飞轮储能本体（含磁悬浮轴承、磁悬浮轴承控制系统、控制电源、备用电源等）、辅助装置的外观、尺寸和接口等。

6.3 试验电路

储能单元试验电路示意图如图2所示。



标引序号说明：

QF1——磁悬浮飞轮本体电源开关；

QF2——储能单元辅助装置、磁悬浮控制系统电源开关。

注：电源模拟装置采用飞轮储能电机变流器、电源及辅助设备。

图 2 储能单元试验电路示意图

电源模拟装置应满足下列要求：

- a) 电能双向流动；
- b) 功率不小于试验储能单元额定功率的 1.1 倍；
- c) 在设定功率进行充放电操作；
- d) 具备储能单元制动保护功能。

6.4 机械性能试验

6.4.1 磁悬浮轴承转子振动位移测试

本测试在产品规定的悬浮方向上进行。

测试记录磁悬浮轴承转子在静态悬浮、转速下限空载、转速下限充电、转速上限充电、转速上限空载、转速上限放电、转速下限放电共7个状态下的振动位移最大值。

测试按下列步骤进行：

- a) 按图2连接试验电路，闭合开关QF1，观察磁悬浮轴承控制系统与辅助系统启动正常，闭合开关QF2，观察电源模拟装置与数据采集装置监测功能正常；
- b) 记录磁轴承转子静态悬浮状态下振动位移最大值；
- c) 通过信号发生装置向电源模拟装置和储能单元下达启动指令，电源模拟装置控制储能单元升速至工作转速下限，保持运行2 min以上，记录磁悬浮轴承转子的振动位移最大值；
- d) 通过信号发生装置下达额定功率充电指令，记录磁悬浮轴承转子的振动位移最大值；

- e) 电源模拟装置控制飞轮储能单元从工作转速下限升速至工作转速上限，记录磁悬浮轴承转子的振动位移最大值；
- f) 保持工作转速上限运行2 min以上，记录磁悬浮轴承转子的振动位移最大值；
- g) 通过信号发生装置下达额定功率放电指令，记录磁悬浮轴承转子的振动位移最大值；
- h) 电源模拟装置控制飞轮储能单元从工作转速上限降速至工作转速下限，记录磁悬浮轴承转子的振动位移最大值。

6.4.2 振动速度测试

按照GB/T 44934规定的振动测试方法执行。

6.4.3 噪声测试

按照GB/T 44934规定的噪声测试方法执行。

6.4.4 温升测试

温升测试包括静态温升测试和动态温升测试，按下列方法进行：

a) 静态温升测试：按图2连接试验电路，启动储能单元，飞轮本体不运转，对磁悬浮轴承进行静态温升测试，记录磁悬浮轴承定子和转子温度。每分钟记录一次数据，直到磁悬浮轴承达到热稳定（温升变化不超过2℃/h）。

b) 动态温升测试：按照GB/T 44934规定的试验方法，可测量发电/电动机机壳表面、定子绕组、电机转子、磁悬浮轴承定子、磁悬浮轴承转子等部位的温度，每分钟记录一次数据，直到达到热稳定（温升变化不超过2℃/h）。测试内容根据实际情况选择。

6.4.5 机壳强度与密封性

按GB/T44934规定的试验方法执行。

6.5 电气性能试验

6.5.1 额定充放电试验

储能单元额定充电功率、额定放电功率、额定充电电量、额定放电电量、充放电循环效率按GB/T44934规定的试验方法执行。

6.5.2 自放电率试验

按GB/T44934规定的测试方法执行。

6.5.3 磁悬浮轴承系统功耗测试

试验前确保备用电源满电，外部供电正常，数据采集记录磁悬浮轴承系统控制电源端口的输入功率。功耗试验按下列步骤进行：

a) 按图2连接试验电路，闭合开关QF1，启动磁悬浮轴承控制系统与辅助系统；闭合开关QF2，启动电源模拟装置与数据采集装置；

b) 记录静态悬浮下磁悬浮轴承系统瞬时功率 P_{m0} ；

c) 通过信号发生装置下达启动指令，由电源模拟装置控制飞轮储能单元升速至工作转速下限，保持运行2 min以上，记录磁悬浮轴承系统瞬时功率 P_{m1} ；

- d) 通过信号发生装置下达额定功率充电指令, 利用数据采集装置记录磁悬浮轴承系统瞬时功率 P_{m2} ;
- e) 由电源模拟装置控制储能单元从工作转速下限升速至接近工作转速上限, 记录磁悬浮轴承系统瞬时功率 P_{m3} ;
- f) 保持工作转速上限运行2 min以上, 利用数据采集装置记录磁悬浮轴承系统瞬时功率 P_{m4} ;
- g) 通过信号发生装置向电源模拟装置和飞轮储能单元下达额定功率放电指令, 记录磁悬浮轴承系统瞬时功率 P_{m5} ;
- h) 由电源模拟装置控制储能单元从工作转速上限降速至接近工作转速下限, 利用数据采集装置记录磁悬浮轴承系统瞬时功率 P_{m6} ;
- i) 计算 P_{m1} 、 P_{m2} 、 P_{m3} 、 P_{m4} 、 P_{m5} 和 P_{m6} 的算术平均值, 作为磁悬浮轴承系统功耗。

6.5.4 备用供电试验

备用供电试验包括静态备用供电试验和动态备用供电试验。静态备用供电试验为最低要求, 动态备用供电试验可根据实际情况选择。

a) 静态备用供电试验:

- 1) 启动储能单元磁悬浮系统, 飞轮本体不运转。断开磁悬浮轴承控制系统的外部供电, 记录从外部供电断开时刻到磁悬浮轴承控制系统不能正常工作时刻的时长, 作为备用电源静态维持时长 T_{m0} 。
- 2) 启动储能单元磁悬浮系统, 确保外部供电及备用供电均正常工作。将飞轮本体运转至工作转速上限并稳定后, 启动储能单元紧急制动功能, 记录从此时刻到飞轮安全停机时刻的时长 T_{b0} 。

b) 动态备用供电试验:

- 1) 启动储能单元磁悬浮系统, 确保备用电源满电。将飞轮本体运转至工作转速上限并稳定后, 断开磁悬浮轴承控制系统的外部供电, 同时启动储能单元紧急制动功能, 记录从此时刻到飞轮安全停机时刻的时长 T_{b1} 。
- 2) 记录从外部供电断开时刻到磁悬浮轴承控制系统断电不能正常工作时刻的时长 T_{m1} , 作为备用电源动态维持时长。

注: 备用供电试验存在一定风险, 试验前应完成备用电源的单机验证试验, 试验过程中如出现异常应立即恢复外部供电。

6.6 安全性能试验

6.6.1 机械安全试验

按GB/T44934规定的试验方法执行。

6.6.2 绝缘测量

在储能单元静止、冷态下, 用绝缘电阻测试仪或兆欧表, 在被测导体(如电机定子线圈、磁悬浮轴承线圈)与飞轮本体机壳之间施加规定的绝缘测试电压, 待读数稳定后测量其绝缘电阻值。

6.6.3 耐压试验

在正常环境气压下, 储能单元处于静止、冷态, 用工频耐压测试装置在电机绕组和飞轮本体机壳之间, 磁悬浮轴承线圈和飞轮本体机壳之间施加规定的试验电压1 min, 观察无闪络和击穿。

在正常环境气压下, 储能单元处于静止、冷态。用工频耐压测试装置, 在电机绕组与飞轮本体机壳之间, 以及磁悬浮轴承线圈与飞轮本体机壳之间, 分别施加规定的试验电压, 历时1 min, 试验过程中无闪络或击穿现象。

6.6.4 主动悬浮保护逻辑验证试验

主动悬浮保护逻辑验证试验按下列步骤进行：

- a) 按图2连接试验电路，闭合开关QF1，启动磁悬浮轴承控制系统与辅助系统；
- b) 闭合开关QF2，启动电源模拟装置与数据采集装置；
- c) 待磁悬浮轴承静态悬浮稳定后，通过人为方式（如向磁悬浮轴承控制系统注入异常参数，或断开磁悬浮轴承控制系统的控制电源及备用电源等）触发磁悬浮轴承失稳状态；
- d) 确认紧急制动装置收到紧急制动停机信号；
- e) 故障排除（恢复磁悬浮轴承控制系统的正常参数，或恢复其控制电源及备用电源）后，确认磁悬浮轴承系统能够自动或手动恢复悬浮功能，实现转子正常悬浮；
- f) 记录飞轮转子的振动位移、紧急制动停机信号、储能单元报警和保护信息。

注：由于磁悬浮系统失效导致飞轮失稳及跌落的试验存在较大破坏性，本试验仅进行逻辑验证。高速主动悬浮保护试验不做强制要求，可根据实际试验条件选择执行。

6.6.5 断电软着陆试验

断电软着陆试验按下列步骤进行：

- a) 按图2连接试验电路，闭合开关QF1，启动磁悬浮轴承控制系统与辅助系统；
- b) 闭合开关QF2，启动电源模拟装置与数据采集装置；
- c) 待磁悬浮轴承静态悬浮稳定后，断开磁悬浮轴承控制系统的外部供电；
- d) 确认储能单元检测到外部供电中断，并向紧急制动装置发出紧急制动停机信号；
- e) 确认磁悬浮轴承控制电源启动备用电源并持续供电，直至转子实现安全停机及软着陆。

注：由于磁悬浮飞轮转子高速运转时外部供电中断存在较大风险，本试验仅进行静态悬浮断电逻辑验证。高速试验不做强制要求，可根据实际试验条件选择执行。

6.7 通信功能试验

按GB/T44934规定的测试方法执行。

参考文献

- [1] GB/T 4798.2 电工电子产品应用环境条件 第2部分：运输
 - [2] GB/T 5226.1 机械电气安全 机械电气设备 第1部分：通用技术条件
 - [3] GB/T 6075.1 机械振动 在非旋转部件上测量评价机器的振动 第1部分：总则
 - [4] GB/T 6075.3 机械振动 在非旋转部件上测量评价机器的振动 第3部分：额定功率大于15 kW
额定转速在120r/min至15000r/min之间的在现场测量的工业机器
 - [5] GB/T 10069.1 旋转电机噪声测定方法及限值 第1部分：旋转电机噪声测定方法
 - [6] GB/T 11348.1 旋转机械转轴径向振动的测量和评定 第1部分：总则
 - [7] GB/T 20626.1 特殊环境条件 高原电工电子产品 第1部分：通用技术条件
 - [8] GB/T 44933 电力储能用飞轮储能系统技术规范
 - [9] ISO 14839—2 机械振动 装有主动磁悬浮轴承的旋转机械的振动 第2部分：振动评估
-