GH103 飞轮储能实验系统

产品规格书

边缘磁极驱动技术，飞轮储能教学科研平台

□ 产品概述

GH103 飞轮储能实验系统采用 W→A（Wheel-to-Arm）边缘驱动架构，区别于传统轴心驱动模式，电磁力作用于飞轮外缘，力臂较轴心驱动提升 4-8 倍（视飞轮直径而定），可用于模拟大型储能飞轮的外转子电机驱动特性。适用于高校教学演示、科研实验及原型验证。

□ 核心技术

● 驱动方式对比

对比项	传统轴心驱动	GH103 边缘对称驱动
力学模型	$T = F \times r$	$T = F_t \times 2R$
力臂	r（轴半径，小）	2R（飞轮直径，大）
力臂长度	~10-20 mm	200 mm
力矩提升	基准（1×）	4-8 倍

● 技术特点

- 独创边缘驱动：电磁力作用于飞轮外缘，力臂提升 4-8 倍
- 对称力偶布置：8 极均匀分布，形成 4 组对称力偶
- 真实模拟：完美复现大型储能飞轮外转子电机特性

□ 理论公式体系

● 基础动力学方程

公式	表达式	物理意义
转动定律	$\tau = J\alpha$	力矩等于转动惯量乘以角加速度
力矩定义	$T = F \times R$	力矩等于力乘以力臂
GH103 边缘力矩	$T = F_t \times 2R$	切向力乘以直径（力偶臂），力矩提升 4-8 倍

- 电磁驱动方程

公式	表达式	物理意义
总切向电磁力	$F_t = \eta \times f \times n \times \alpha$	综合气隙、吸力、极数和做功系数的切向驱动力
气隙磁导系数	$\eta = 1/k$	气隙距离倒数，决定磁场耦合强度
输出力矩	$T = F_t \times 2R$	GH103 核心驱动公式

- 运动学方程

公式	表达式	物理意义
转速-频率关系	$n = 60f / N_{poles} = 60f / 8$	脉冲频率转换为飞轮转速（RPM）
角速度	$\omega = 2\pi n / 60 = \pi f / 4$	转速转换为角速度（rad/s）
储能动能	$E_k = \frac{1}{2}J\omega^2 = \frac{1}{2}J(2\pi n/60)^2$	飞轮旋转储存的动能（J）

- 能量转换方程

公式	表达式	物理意义
输入电能	$E_{ele}C = \int_0^T V(t)I(t)dt$	驱动系统消耗的总电能
转换效率	$\eta = E_{kinetic} / E_{ele}C \times 100\%$	电能→动能转换效率
功率关系	$P = dE_k/dt = \tau \cdot \omega$	瞬时功率等于力矩乘以角速度

□ 系统参数

- 电磁驱动系统

参数	数值	说明
工作电压	DC 12-100V	额定工作电压
单电磁铁吸力	0.5 kgf（4.9 N）	@DC12V，25mm×20mm
每极电磁铁数	2 个	对称布置
磁极总数	8 极	均匀分布于圆周，每极间隔 45°
电磁气隙	0.8 mm	电磁铁与飞轮外缘间隙
气隙磁导系数	1.25 mm^{-1}	$\eta = 1/k$

- 机械结构参数

参数	数值	说明
飞轮半径 R	100 mm	力臂基准
力偶臂 2R	200 mm	直径，力矩作用臂
电磁铁尺寸	25mm×20mm	单电磁铁外形尺寸

□ 电磁力计算

- 总切向电磁力

$F_t = \eta \times f \times n \times \alpha$

- 参数定义

符号	数值	物理意义	单位
η	1.25	气隙磁导系数，η = 1/k	mm^{-1}
k	0.8	电磁气隙距离	mm
f	9.8	每极电磁吸力（等效 1 kgf，2×0.5 kgf）	N
n	8	磁极总数	个
nm	2	每极电磁铁数	个
α	0.5	有效做功系数（p/2，仅半数磁极切向做功）	—

- 计算实例（@DC12V）

总切向电磁力计算：

$F_t = \eta \times f \times n \times \alpha$

$= 1.25 \times 9.8 \times 8 \times 0.5$

$= 1.25 \times 9.8 \times 4$

$= 49\ N$

输出力矩计算：

$T = F_t \times 2R$

$= 49\ N \times 0.2\ m$

$= 9.8\ N \cdot m$

注： 8 极均匀分布（每极 45°），每极 2 个电磁铁对称布置，共 16 个电磁铁形成 4 组对称力偶。

□ 实验公式速查卡

GH103 实验公式速查卡	
力矩计算	$T = F_t \times 2R = 9.8\ N{\cdot}m$
惯量计算	$J = \frac{1}{2}mR^2$ (圆盘模型)
动能计算	$E_k = \frac{1}{2}J\omega^2$ [J]
转速换算	$\omega = 2\pi n/60 = 0.1047n$ [rad/s]
效率计算	$\eta = E_k/\int VIdt \times 100\%$
PWM 占空比	$D = t^+/(t^+ + t^-)$
步进转速	$n = 60f/8$ [RPM]

□ 八极顺序脉冲驱动

- 8 极磁极周向均匀分布，步进式加速旋转磁场
- 每转 8 步，步进角 45°，运转平稳低振动
- 频率 10-400Hz 无级调节，转速精准可控

□ 技术参数

● 机械系统

参数	规格	说明
飞轮直径	φ200 mm	高强度铝合金，动平衡 G2.5 级
砣码配重系统	5kg + 3kg + 2kg	模块化组合，惯量 0.025-0.25 kg·m²可调
磁极配置	单级 8 极	调压式电磁线圈，φ25mm
杠杆作用角	45°（π/4）	优化力矩传递效率
气隙调节	0.2-2 mm	适应不同实验需求
整机尺寸	600×600×400 mm	实验室桌面型设计
整机重量	约 380 kg	稳固防振底座

- 电气驱动

参数	规格	说明
驱动电压	DC 12-100 V	宽范围可调，适配多种电源
脉冲频率	10-400 Hz	对应转速 75-3000 RPM（n = 60f/8）
正脉宽	1-20 ms	能量注入时间可调
负脉宽	1 ms	固定续流/制动
峰值功率	1.5 kW	满足加速与稳态需求
输入电源	AC 100-240V	宽电压全球通用

- 运动性能

参数	规格	说明
转速范围	10-3000 RPM	覆盖低速调试到高速储能
额定转速	600 RPM	标准教学工况（f = 80Hz）
最大线速度	31.4 m/s	3000 RPM 时边缘线速度（v = ωR）
角速度	1.05-314 rad/s	宽范围动态响应
角加速度	0.02-2 rad/s²	精密加速控制（α = τ/J）
启动时间	<5 s（0-600 RPM）	快速建立实验条件

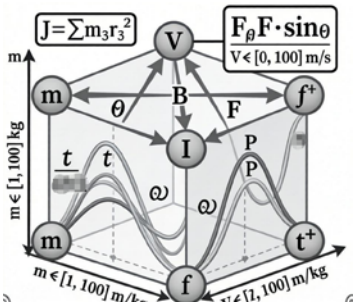
- 测控系统

参数	规格	说明
转速检测	霍尔传感器+磁锥	8 脉冲/转，非接触测量
波形分析	Tektronix TDS7404B	100MHz，四通道实时观测
电气测量	HAMEG HM1507-3	电压/电流/频率/占空比
转速显示	4 位 LED 数码管	直观 RPM 读数
安全防护	GH19C 智能系统	过速/过流/过热/振动/位移五重保护

□ 十维实验变量

序号	变量名称	符号	调节范围	实验意义	关联公式
1	配重质量	m	2–10 kg	转动惯量 J 调节	$J = \sum m_i r_i^2$
2	电磁力	F	0–500 N	驱动力矩 T = F·R	$T = F \cdot R$
3	驱动电压	V	12–100 V	控制励磁电流	$V = IR + L(dI/dt)$
4	驱动电流	I	0–15 A	电磁力激励源	$F \propto B \propto I$
5	脉冲频率	f	10–400 Hz	转速设定	$n = 60f/8$
6	正脉宽	t^+	1–20 ms	能量注入时长	$E_{pulse} = VIt^+$
7	角加速度	α	实测值	动态响应输出	$\alpha = \tau/J$
8	磁场位移偏角	θ	±7–13.5°	最优作用角度	$F_t = F \cdot \sin\theta$
9	磁感应强度	B	0–1.2 T	与电流成正比	$B = \mu_0 \mu_r NI/l_g$
10	飞轮相位	(x,y)	$[0,2\pi]^2$	状态空间变量	$\dot{x} = Ax + Bu$

□ 核心实验功能



● 基础物理实验

- 转动定律验证：$\tau = J\alpha$，力矩-角加速度线性关系
- 惯量测定实验：$J = \sum m_i r_i^2$，对比理论计算与实测值
- 能量守恒演示：$E_{ele}c \rightarrow E_k \rightarrow E_{ele}c$ 转换效率分析

● 电机驱动实验

- 开关磁阻电机原理：8 极顺序同相机制，$n = 60f/8$
- 机械特性曲线：转速-转矩-效率三维关系
- PWM 控制技术：$D = t^+/(t^+ + t^-)$，脉宽调制与占空比优化

● 储能系统实验

- 充放电循环：$\eta = E_k/\int VIdt$，能量存储与释放效率分析
- 动态响应测试：阶跃/斜坡/扰动响应，$\alpha = d\omega/dt$
- 制动能量回收：能耗制动与反接制动对比

- **高级研究实验**

- 多变量耦合分析：十维参数正交实验设计
- 边缘驱动优化：气隙/角度/频率协同优化
- 模型辨识与验证：理论数学建模与实验对比

□ 适用对象

用户类型	应用场景	价值体现
高等院校	物理/电气/能源专业实验教学	填补飞轮储能实验设备空白，理论结合实践
职业院校	新能源技术实训	掌握储能系统装调与维护技能
科研院所	飞轮储能机理与控制研究	提供可重复的精密实验平台
企业研发	电机驱动与能量管理预研	低成本验证创新方案可行性

□ 产品优势

对比项	传统实验装置	GH103
驱动方式	轴心电机驱动	边缘磁极驱动，$T = F_t \times 2R$，力矩大 4-8 倍
参数调节	固定参数，实验单一	十维可调，实验设计灵活
测量手段	机械式/简易电子	霍尔传感+数字示波器，精密采集
安全防护	基础保护	GH19C 五重智能保护，安全可靠
扩展能力	封闭结构	模块化设计，支持多级扩展与真空升级
理论支撑	无系统公式体系	完整公式体系，教学科研一体化

□ 标准配置

✓ GH103 主机（飞轮转子、8 极驱动、控制系统、防护罩）
✓ 配重块组（飞轮砣：5kg×1、3kg×1、2kg×1，带快速锁紧机构）
✓ 泰克 TDS7404B 数字示波器（100MHz，四通道）
✓ HAMEG HM1507-3 多功能测量仪
✓ 霍尔传感器套件（8 组，含磁锥）
✓ 电气连接线束（电源线、信号线、BNC 线）
✓ 操作手册（含实验指导与理论推导）
✓ 出厂检验证书与质保卡

可选扩展

选项	功能描述	应用场景
真空腔体套件	不锈钢真空罩+真空泵，真空度≤100Pa	高速低风阻实验，风损机理研究
二级扩展模块	增加 8 极磁极，16 极配置	高分辨率步进驱动，微振动分析
数据采集系统	16 位 USB-DAQ，4 通道同步，配套软件	自动化实验记录，大数据量采集
温度监测模块	8 路 PT100 温度传感器，磁极热管理	长时间运行热特性研究，效率优化
陶瓷轴承升级	高速轴承，支持 5000 RPM 扩展	超高速储能实验，极限性能测试

服务承诺

服务项目	内容
质保期	整机 1 年，控制器及驱动器 3 年
安装调试	免费上门安装、调试、操作培训
技术支持	7×24 小时电话支持，远程诊断，现场服务
软件升级	控制算法持续优化，终身免费升级
定制开发	根据特殊需求定制参数、开发专属实验方案

技术规格速查表

关键指标	数值
飞轮直径	200 mm
转速范围	10-3000 RPM
驱动电压	12-100 V
峰值功率	1.5 kW
转动惯量	0.025-0.25 $kg·m^2$
角加速度	0.02-2 rad/s^2
整机重量	~380 kg
防护等级	IP20

联系我们

杰华智感（深圳）科技有限公司
地址：深圳市龙华区观澜街道观光路 1301 号
电话：+86-755-28168358
传真：+86-755-28168293
网址：http://www.szgeha.com
邮箱：szgeha@163.com

GH103 飞轮储能实验系统——让抽象的储能理论，化为直观的实验数据。边缘磁极驱动，助力储能教学实践。