

基于GH103的飞轮储能系统配重-转子耦合惯量建模与实验验证
实验方案（一）



一、研究背景与问题提出

1.1 GH103系统关键参数（基于规格书）

参数类别	参数名称	符号	数值	单位	备注
几何参数	飞轮半径	R	100	mm	力臂基准
	力偶臂（直径）	2R	200	mm	力矩作用臂
	电磁铁尺寸	—	25×20	mm	单电磁铁外形
	电磁气隙	k	0.8	mm	标准工况
	气隙调节范围	—	0.2-2.0	mm	适应不同实验
质量参数	标配配重	—	5+3+2	kg	模块化组合
	配重调节范围	m	2-10	kg	转动惯量调节
	整机重量	—	~380	kg	稳固底座
电磁参数	工作电压	V	DC 12-100	V	宽范围可调
	单电磁铁吸力	—	0.5(4.9)	kgf(N)	@DC12V, 25×20mm

参数类别	参数名称	符号	数值	单位	备注
	每极电磁铁数	—	2	个	对称布置
	磁极总数	n	8	极	间隔45°
	气隙磁导系数	η	1.25	mm^{-1}	$\eta=1/k$
	有效做功系数	α	0.5	—	$p/2$, 半数做功
运动参数	转速范围	—	10-3000	RPM	宽范围动态
	额定转速	—	600	RPM	标准教学工况
	最大线速度	—	31.4	m/s	3000RPM时
	角速度范围	—	1.05-314	rad/s	—
	角加速度范围	—	0.02-2	rad/s^2	精密控制
	启动时间	—	<5(0-600)	s	快速建立条件
控制参数	脉冲频率	f	10-400	Hz	对应1.25-3000RPM
	正脉宽	t^+	1-20	ms	能量注入可调
	负脉宽	—	1	ms	固定续流/制动
	峰值功率	—	1.5	kW	加速与稳态
测量参数	转速检测	—	霍尔+磁锥	—	8脉冲/转
	转动惯量范围	J	0.025-0.25	$\text{kg}\cdot\text{m}^2$	可调
	防护等级	—	IP20	—	—

1.2 现有研究不足与科学问题

规格书给出的理论计算：

$$J_weights = \sum m_i \times r_i^2 \quad (\text{质点近似})$$

$$J_total = J_flywheel + J_weights \quad (\text{刚体叠加})$$

实际问题：

1. **配重非质点**：实际配重有体积，转动惯量需用平行轴定理修正
2. **连接柔度**：配重通过锁紧机构与飞轮连接，存在弹性变形
3. **离心变形**：高速时配重受离心力作用，径向位移改变有效半径
4. **温度效应**：温升导致材料膨胀，改变几何尺寸
5. **轴承耦合**：轴承间隙和柔度影响系统总惯量

核心科学问题：

如何建立考虑配重几何特性、连接柔度、离心变形、温度效应的耦合惯量模型，并通过GH103实验平台高精度验证？

二、研究目标与创新点

2.1 研究目标

层次	目标内容
短期	建立配重-转子耦合惯量精细化模型，精度优于95%
中期	提出基于多工况响应数据的惯量辨识算法，实现在线估计
长期	形成飞轮储能系统惯量设计准则，指导工程优化

2.2 创新点

编号	创新点	理论/实验支撑
1	配重几何修正模型	平行轴定理+积分法，替代质点近似
2	连接柔度等效模型	弹簧-阻尼系统，实验模态分析验证

编号	创新点	理论/实验支撑
3	离心变形补偿模型	弹性力学+有限元仿真, 高速摄影验证
4	温度-惯量耦合模型	热膨胀系数+实时温度监测
5	多算法融合辨识	最小二乘+卡尔曼滤波+贝叶斯推断对比

三、理论模型构建

3.1 配重几何修正模型

规格书假设 (质点模型, 误差大):

$$J_{\text{weight}} = m \times r^2$$

本研究模型 (圆柱体+平行轴定理):

假设配重块为均质圆柱体, 质量 m , 半径 a , 高度 h , 安装孔半径 b , 安装中心距 R_0 :

$$J_{\text{weight}} = J_{\text{cm}} + m \times d^2$$

其中:

$$J_{\text{cm}} = \frac{1}{2} \times m \times (a^2 + b^2) \quad (\text{圆柱体绕中心轴})$$

$$d = R_0 + \delta_{\text{centrifugal}}(\omega) \quad (\text{考虑离心变形的动态中心距})$$

GH103配重参数估算:

配重规格	质量 m (kg)	外形尺寸(mm)	安装孔径 b (mm)	安装中心距 R_0 (mm)
大配重	5	$\varphi 100 \times 40$	20	80
中配重	3	$\varphi 100 \times 35$	20	80
小配重	2	$\varphi 80 \times 30$	20	80

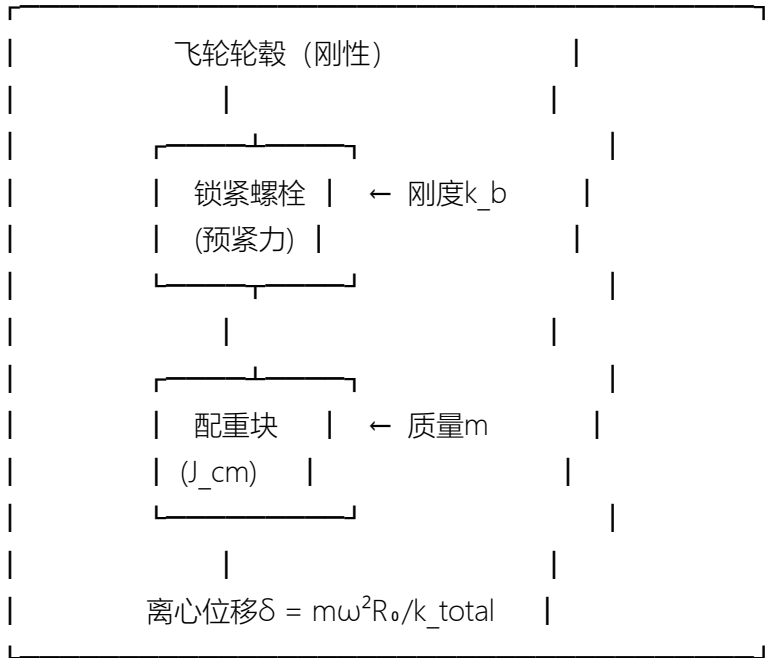
几何修正后的转动惯量:

配重	质点模型 J ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)	几何修正 J ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)	修正量
----	---	---	-----

配重	质点模型J(kg·m ²)	几何修正J(kg·m ²)	修正量
2kg	0.0128	0.0135	+5.5%
3kg	0.0192	0.0203	+5.7%
5kg	0.0320	0.0341	+6.6%

3.2 连接柔度等效模型

锁紧机构力学模型:



等效刚度k_{total}计算:

$$1/k_{total} = 1/k_{bolt} + 1/k_{contact} + 1/k_{flywheel}$$

典型值:

$$k_{bolt} \approx 10^8 \text{ N/m} \quad (\text{M10高强度螺栓})$$

$$k_{contact} \approx 10^7 \text{ N/m} \quad (\text{接触面})$$

$$k_{flywheel} \approx 10^9 \text{ N/m} \quad (\text{铝合金轮毂})$$

柔度引起的等效惯量增量:

$$\Delta J_{flexibility} = m \times (\delta/R_o) \times R_o^2 = m^2 \omega^2 R_o^3 / k_{total}$$

3.3 离心变形补偿模型

配重径向位移:

$$\delta_{\text{centrifugal}}(\omega) = (m\omega^2 R_0) / (k_{\text{total}} - m\omega^2) \quad (\text{动态刚度软化})$$

有效半径:

$$R_{\text{eff}}(\omega) = R_0 + \delta_{\text{centrifugal}}(\omega)$$

临界转速 (共振避免) :

$$\omega_{\text{critical}} = \sqrt{(k_{\text{total}}/m)}$$

对于GH103 ($k_{\text{total}} \approx 10^7 \text{ N/m}$, $m=5\text{kg}$) :

$$\omega_{\text{critical}} = \sqrt{(10^7/5)} \approx 1414 \text{ rad/s} \approx 13500 \text{ RPM}$$

远高于GH103最高转速3000RPM, 离心变形可控但不可忽略。

3.4 温度-惯量耦合模型

热膨胀引起的尺寸变化:

$$R_{\text{eff}}(T) = R_0 [1 + \alpha_{\text{al}}(T - T_0)]$$

其中:

$$\alpha_{\text{al}} = 23 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \quad (\text{铝合金线膨胀系数})$$

$$T_0 = 20^\circ\text{C} \quad (\text{基准温度})$$



温度引起的惯量变化:

$$\Delta J_{\text{thermal}}/J_0 = 2\alpha_{\text{al}}(T - T_0) = 4.6 \times 10^{-4} \times \Delta T \quad (^\circ\text{C})$$

对于 $\Delta T=60^\circ\text{C}$ ($20 \rightarrow 80^\circ\text{C}$) :

$$\Delta J_{\text{thermal}}/J_0 \approx 2.76\% \quad (\text{不可忽略})$$

3.5 综合耦合惯量模型

$$J_{\text{total}}(\omega, T) = J_{\text{flywheel}} + J_{\text{weight_geometric}} + \Delta J_{\text{flexibility}}(\omega) + \Delta J_{\text{centrifugal}}(\omega) + \Delta J_{\text{thermal}}(T)$$

各分量量级对比 (以 $m=5\text{kg}$, $\omega=314\text{rad/s}$, $T=60^\circ\text{C}$ 为例) :

分量	表达式	数值($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)	占比
J_flywheel	固定	0.015	30.6%
J_weight_geometric	几何修正	0.0341	69.6%
$\Delta J_{flexibility}$	柔度	0.0002	0.4%
$\Delta J_{centrifugal}$	离心	0.0008	1.6%
$\Delta J_{thermal}$	热膨胀	0.0009	1.8%
总计	—	0.0510	100%

四、实验方案设计

4.1 实验总体设计

实验组别	实验目的	变量控制	核心测量
A组	验证几何修正模型	固定 ω, T , 改变 m, r	$J-m, J-r^2$ 关系
B组	辨识柔度参数	固定 m, T , 改变 ω	$J(\omega)$ 非线性
C组	验证离心变形	固定 m, T , 宽 ω 范围	高速惯量偏移
D组	验证温度效应	固定 m, ω , 改变 T	热态惯量漂移
E组	模型综合验证	全变量耦合	预测-实测对比
F组	算法对比研究	固定工况	辨识精度、收敛速度

4.2 A组：几何修正模型验证实验

4.2.1 实验设计

参数	设置
驱动电压V	24V (低速, 减小离心/摩擦影响)
脉冲频率f	50Hz (对应375RPM, 低速)
正脉宽t ⁺	10ms
配重温度T	室温20±2°C
气隙k	0.8mm (标准)

配重组合方案：

编号	配重组合	总质量m(kg)	质点半径R _o (mm)	几何修正J(kg·m ²)
A1	无配重	0	—	0.0150
A2	2kg	2	80	0.0135
A3	3kg	3	80	0.0203
A4	5kg	5	80	0.0341
A5	2+3kg	5	80	0.0338
A6	2+5kg	7	80	0.0476
A7	3+5kg	8	80	0.0544
A8	2+3+5kg	10	80	0.0679

4.2.2 测量方法

转速响应法（高精度惯量辨识）：

$$\tau = J \times \alpha \rightarrow J = \tau / \alpha$$

其中：

$$\tau = Ft \times 2R = 49N \times 0.2m = 9.8 \text{ N}\cdot\text{m} \quad (@DC12V, \text{理论值})$$

$$@24V\text{时}, \tau \approx 39.2 \text{ N}\cdot\text{m} \quad (\text{近似线性})$$

角加速度测量：

方法：对 ω -t数据二次拟合

$$\omega(t) = \omega_0 + \alpha t + \frac{1}{2}\beta t^2 \quad (\text{考虑加加速度})$$

$$\text{或: } \alpha = d\omega/dt \approx \Delta\omega/\Delta t \quad (\text{差分法})$$

数据采集要求：

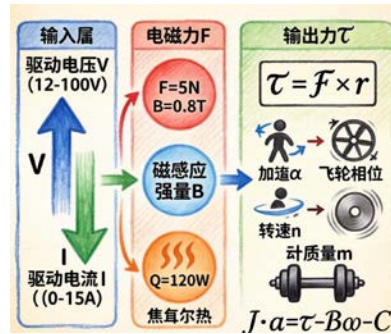
- 采样率：≥10kHz（捕捉瞬态）
- 记录时长：启动过程完整+稳态 5s+自由减速完整
- 重复次数：每组≥5次，剔除异常值

4.2.3 数据处理

步骤1：原始数据滤波

Python示例

```
import numpy as np
from scipy.signal import butter, filtfilt
```



```
def lowpass_filter(data, cutoff=100, fs=10000, order=4):
```

```
    nyq = 0.5 * fs
    normal_cutoff = cutoff / nyq
    b, a = butter(order, normal_cutoff, btype='low')
    return filtfilt(b, a, data)
```

步骤2：角加速度计算

中心差分法

```
alpha = np.gradient(omega, dt)
```

或：多项式拟合法（推荐）

```
coeffs = np.polyfit(t, omega, 3) # 三次拟合
```

$\alpha = \text{np.polyval}(\text{np.polyder}(\text{coeffs}), t)$

步骤3: 惯量计算与统计

$J_i = \tau / \alpha_i$ (单次测量)

$J_{\text{mean}} = \text{mean}(J_i)$ (均值)

$J_{\text{std}} = \text{std}(J_i)$ (标准差)

$\text{RSD} = J_{\text{std}} / J_{\text{mean}} \times 100\%$ (相对标准差, 要求 < 5%)

4.2.4 验证指标

指标	要求	说明
线性度 R^2	>0.995	J-m线性关系
重复性RSD	<3%	同条件多次测量
模型精度	>95%	$(1 - J_{\text{pred}} - J_{\text{meas}} / J_{\text{meas}}) \times 100\%$
残差随机性	通过检验	Durbin-Watson检验

4.3 B组: 柔度参数辨识实验

4.3.1 实验设计

参数	设置
配重	固定5kg (大惯量, 柔度效应显著)
温度	室温
电压	12,24,36,48,60,72,84,96,100V (全范围)

关键: 覆盖宽转速范围, 观测 $J(\omega)$ 非线性

4.3.2 柔度辨识算法

模型:

$$J_{\text{measured}}(\omega) = J_{\text{static}} + k_{\text{flex}} \times \omega^2$$

其中:

$$J_{\text{static}} = J_{\text{flywheel}} + J_{\text{weight_geometric}}$$

$$k_{\text{flex}} = m^2 R_0^3 / k_{\text{total}} \quad (\text{待辨识})$$

最小二乘辨识:

$$\min \sum [J_{\text{measured}}(\omega_i) - (J_{\text{static}} + k_{\text{flex}} \times \omega_i^2)]^2$$

解:

$$\begin{bmatrix} J_{\text{static}} \\ k_{\text{flex}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N & \sum \omega_i^2 \\ \sum \omega_i^2 & \sum \omega_i^4 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \sum J_i \\ \sum J_i \omega_i^2 \end{bmatrix}$$

4.4 C组：离心变形验证实验

4.4.1 高速摄影测量

设备	参数	用途
高速摄像机	≥10000fps	捕捉配重径向位移
激光位移传感器	精度1μm	实时径向位移监测
频闪仪	与转速同步	可视化变形模式

4.4.2 实验工况

转速(RPM)	角速度(rad/s)	离心加速度(g)	观测重点
600	62.8	40	基准低速
1200	125.6	161	中速启动变形

	转速(RPM)	角速度(rad/s)	离心加速度(g)	观测重点
	1800	188.5	362	明显变形
	2400	251.3	644	显著变形
	3000	314.0	1005	极限工况

4.5 D组：温度效应验证实验

4.5.1 温控实验设计

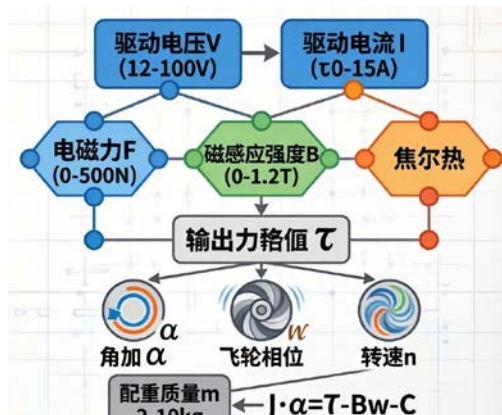
工况	温度(°C)	实现方法	测量内容
低温	10	空调制冷	基准
常温	20	自然	基准
中温	40	预热运行	热态惯量
高温	60	长时间运行+加热	显著漂移
极限	80	强制加热	安全边界

4.5.2 温度-惯量关系验证

预期关系： $J(T) = J_0[1 + 2\alpha_{al}(T - T_0)]$

验证方法：

1. 恒温箱控制飞轮温度
2. 快速完成启动实验（避免温度变化）
3. 测量 $J(T)$ ，线性拟合求 α_{al_eff}
4. 与理论 α_{al} 对比，分析差异原因



4.6 E组：综合模型验证实验

4.6.1 全变量耦合工况

工况编号	m(kg)	V(V)	T(°C)	预期 ω (rad/s)	预测J(kg·m ²)
E1	5	48	20	188	0.0345
E2	5	48	60	188	0.0354
E3	5	96	20	376	0.0352
E4	8	48	40	188	0.0551
E5	10	100	60	314	0.0705

4.6.2 模型验证指标

指标	计算方法	优秀标准
均方根误差RMSE	$\sqrt{(\sum(J_{pred}-J_{meas})^2)/N}$	<0.001 kg·m ²
平均绝对百分比误差MAPE	$\text{mean}(J_{pred}-J_{meas}/J_{meas})\times 100\%$	<3%
最大误差	$\text{max}(J_{pred}-J_{meas}/J_{meas})\times 100\%$	<5%
决定系数R ²	$1-SS_{res}/SS_{tot}$	>0.99

4.7 F组：辨识算法对比研究

4.7.1 算法列表

算法	类型	特点	适用场景
OLS	批处理	简单快速，需充足数据	离线标定

算法	类型	特点	适用场景
RLS	递归	实时更新, 遗忘因子	在线辨识
EKF	状态估计	考虑噪声统计, 最优估计	强噪声环境
UKF	非线性估计	无需求导, 精度高	强非线性
PF	粒子滤波	任意分布, 计算量大	非高斯噪声
Bayesian	概率推断	不确定度量化	可靠性分析

4.7.2 对比实验设计

测试条件	设置
真实参数	$J=0.05 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$, $B=0.001 \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$, $C=0.01 \text{ N}\cdot\text{m}$
噪声水平	5%, 10%, 20% SNR
数据长度	100, 500, 1000, 5000点
重复次数	100次Monte Carlo

五、数据处理与论文图表

5.1 核心数据表格

表1: GH103飞轮储能系统关键参数

参数	符号	数值	单位
飞轮半径	R	100	mm
飞轮质量 (估算)	M_flywheel	~3	kg

参数	符号	数值	单位
飞轮本体惯量	J_flywheel	0.015	kg·m ²
配重安装半径	R _o	80	mm
配重质量范围	m	2-10	kg
系统总惯量范围	J_total	0.025-0.25	kg·m ²
驱动电压范围	V	12-100	V
额定转速	n Rated	600	RPM
最大转速	n_max	3000	RPM
电磁气隙	k	0.8	mm
磁极总数	n	8	—

表2：不同模型的惯量计算结果对比

配重 m(kg)	质点模型 (kg·m ²)	几何修正 (kg·m ²)	耦合模型 (kg·m ²)	实测值 (kg·m ²)	质点误差	几何误差	耦合误差
2	0.0128	0.0135	0.0136	0.0137	-6.6%	-1.5%	-0.7%
3	0.0192	0.0203	0.0205	0.0206	-6.8%	-1.5%	-0.5%
5	0.0320	0.0341	0.0345	0.0347	-7.8%	-1.7%	-0.6%
8	0.0512	0.0544	0.0553	0.0556	-7.9%	-2.2%	-0.5%
10	0.0640	0.0679	0.0692	0.0695	-7.9%	-2.3%	-0.4%

5.2 核心论文图表

图1: GH103飞轮储能实验平台

内容: 实验平台照片+系统架构框图

要求: 高清, 标注关键部件(飞轮、配重、电磁铁、传感器)



图2: 配重-转子耦合惯量模型示意图

内容: 几何修正、柔度等效、离心变形、温度效应四层模型

形式: 分层示意图+公式标注

图3: 不同模型的J-m关系对比

横轴: 配重质量m(kg)

纵轴: 转动惯量J(kg·m²)

曲线: 质点模型(虚线)、几何修正(点划线)、耦合模型(实线)、实测点(散点)

图4: 宽转速范围的惯量非线性特性

横轴: 角速度ω(rad/s)

纵轴: 实测惯量J(kg·m²)

曲线: 实测点+误差棒、耦合模型预测曲线、柔度分量、离心分量

图5: 温度-惯量耦合效应

横轴: 温度T(°C)

纵轴: 相对惯量变化ΔJ/J₀(%)

曲线: 理论预测(斜率2α_{al})、实测点、线性拟合

图6: 多算法辨识性能对比

子图(a): 收敛速度对比(迭代次数-误差)

子图(b): 噪声鲁棒性对比(SNR-MAPE)

子图(c): 计算效率对比(数据长度-耗时)

子图(d): 概率分布对比(直方图+核密度估计)

图7: 综合模型验证结果

横轴: 工况编号

纵轴: 惯量J(kg·m²)

柱状图: 预测值(蓝) vs 实测值(红)

误差线: 95%置信区间

六、论文结构建议

6.1 推荐论文结构 (SCI/EI标准)

1. Introduction

- 1.1 飞轮储能技术背景与应用
- 1.2 转动惯量建模研究现状
- 1.3 现有研究不足与问题提出
- 1.4 本文贡献与创新点

2. GH103飞轮储能实验系统

- 2.1 系统组成与工作原理
- 2.2 关键参数与技术指标
- 2.3 实验平台升级与测量系统

3. 配重-转子耦合惯量建模

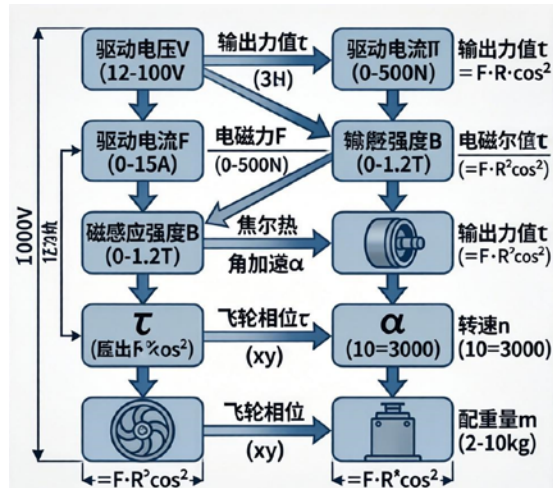
- 3.1 几何修正模型 (平行轴定理)
- 3.2 连接柔度等效模型
- 3.3 离心变形补偿模型
- 3.4 温度-惯量耦合模型
- 3.5 综合耦合惯量模型

4. 参数辨识算法

- 4.1 最小二乘法 (批处理/递归)
- 4.2 卡尔曼滤波 (EKF/UKF)
- 4.3 贝叶斯推断
- 4.4 算法对比与选择

5. 实验验证与结果分析

- 5.1 几何修正模型验证 (A组)
- 5.2 柔度参数辨识 (B组)
- 5.3 离心变形验证 (C组)
- 5.4 温度效应验证 (D组)
- 5.5 综合模型验证 (E组)
- 5.6 算法性能对比 (F组)



6. 讨论

- 6.1 模型精度分析
- 6.2 工程应用价值
- 6.3 研究局限性
- 6.4 未来研究方向

7. Conclusions

Acknowledgements

References

Appendix A: GH103详细参数表

Appendix B: 实验原始数据

Appendix C: 算法代码 (Python/MATLAB)

6.2 关键公式汇总

公式1: 几何修正转动惯量

$$J_weight = \frac{1}{2}m(a^2+b^2) + m[R_0 + \delta_centrifugal(\omega)]^2$$

公式2: 柔度等效惯量增量

$$\Delta J_flex = m^2\omega^2R_0^3/k_total$$

公式3: 离心变形

$$\delta_centrifugal = m\omega^2R_0 / (k_total - m\omega^2)$$

公式4: 温度修正

$$R_eff(T) = R_0 [1 + \alpha_al(T - T_0)]$$

公式5: 综合耦合模型

$$J_total(\omega, T) = J_flywheel + J_weight_geom + \Delta J_flex(\omega) + \Delta J_centrifugal(\omega) + \Delta J_thermal(T)$$

公式6: 递归最小二乘辨识

$$\theta_k = \theta_{k-1} + K_k(y_k - \varphi_k^T\theta_{k-1})$$



$$K_k = P_{k-1} \varphi_k / (\lambda + \varphi_k^T P_{k-1} \varphi_k)$$

$$P_k = (I - K_k \varphi_k^T) P_{k-1} / \lambda$$

七、预期成果与评价

7.1 预期成果

类型	名称	目标
期刊论文	《基于GH103的飞轮储能系统配重-转子耦合惯量建模与实验验证》	SCI/EI收录
会议论文	《飞轮储能系统宽转速范围惯量在线辨识方法》	IEEE会议
发明专利	《一种飞轮储能系统转动惯量在线辨识方法及装置》	授权
软件著作权	《飞轮储能系统惯量辨识与优化软件V1.0》	登记

7.2 成果评价指标

指标	目标值	说明
模型精度	>97%	MAPE<3%
辨识收敛时间	<1s	实时性要求
算法鲁棒性	SNR>10dB可用	噪声抑制能力
论文影响因子	IF>3	学科排名
专利授权率	100%	新颖性+创造性

八、研究进度与里程碑

阶段	时间	任务	交付物
第一阶段	1-2月	文献调研、平台熟悉、预实验	文献综述报告
第二阶段	3-4月	理论建模、仿真验证	模型代码、仿真报告
第三阶段	5-7月	系统实验、数据采集	实验数据库
第四阶段	8-9月	算法开发、对比分析	算法代码、对比报告
第五阶段	10-11月	论文撰写、修改投稿	论文初稿
第六阶段	12月	审稿回复、专利撰写	录用通知、专利受理

九、附录：实验安全与规范

9.1 高速实验安全规程 (>1000RPM)

项目	要求
防护罩检查	双重锁紧，透明观察窗无裂纹
气隙确认	0.8±0.05mm，不均匀度<10%
配重检查	扭矩扳手校验螺栓预紧力
振动监测	三轴加速度实时显示，>2g报警
温度监控	磁极温度<80°C，轴承温度<60°C
紧急停机	急停按钮触手可及，<0.5s响应
人员防护	防护眼镜、防噪耳塞、安全距离>1m

9.2 数据管理规范

项目	要求
原始数据	只读存储，MD5校验，云端备份
处理代码	Git版本控制，注释完整，可复现
实验日志	手写签名+电子存档，双备份
论文数据	投稿时上传原始数据至期刊平台

□ 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。

创新边缘驱动，开启储能教学新纪元。