

断路器快速动作脱扣器

仿真及测试分析报告

基于 Maxwell 瞬态电磁场的动态特性研究

报告编号: EM-TRIP-001

分析软件: ANSYS Maxwell 2024 R1

编制单位: 仿真分析工作组

适用对象: 设计研发部

1 概述

1.1 研究背景

电磁脱扣器是断路器的核心保护元件,用于在发生短路故障时快速切断电路。其动作速度直接影响断路器的限流性能和短路分断能力。本报告采用有限元仿真方法,对电磁脱扣器的静态电磁吸力特性和动态运动特性进行分析研究。

研究目的:

- 计算电磁脱扣器的静态吸力特性曲线
- 分析瞬态动作过程中的电磁力、速度、位移
- 评估脱扣时间是否满足设计要求
- 为优化设计提供理论依据

1.2 脱扣器工作原理

电磁脱扣器的工作原理如下:

- 正常工作: 主回路电流流过脱扣器线圈,产生的电磁力不足以克服反力弹簧,衔铁保持静止

2. 短路脱扣：当短路电流超过整定值时，电磁力突增，克服弹簧反力吸合衔铁，触发脱扣机构
3. 快速分断：脱扣机构释放储能弹簧，驱动触头分离，切断故障电流

脱扣类型	触发条件	典型动作时间
瞬时脱扣	短路电流 > 整定值	< 10 ms
短延时脱扣	过载电流持续	50-200 ms
长延时脱扣	过载电流累积	1-60 s

表 1 脱扣器类型及动作时间

2 仿真模型

2.1 几何模型

脱扣器的主要结构参数如下：

参数	符号	数值	说明
铁芯直径	D_c	20 mm	静铁芯
铁芯长度	L_c	40 mm	磁路有效长度
线圈匝数	N	1800 匝	设计值
线径	d_w	0.5 mm	漆包线
气隙长度	δ	5 mm	初始气隙
衔铁质量	m	50 g	动铁芯
弹簧预紧力	F_0	10 N	反力弹簧
弹簧刚度	k	500 N/m	弹簧常数

表 2 脱扣器主要结构参数

图片待补充：完成 Maxwell 建模后，在此处插入几何模型截图。

2.2 材料属性

部件	材料	相对磁导率 μ_r	电导率 (S/m)	B-H 曲线
静铁芯	DT4 电工纯铁	5000	1×10^7	非线性
动铁芯 (衔铁)	DT4 电工纯铁	5000	1×10^7	非线性
线圈	铜 (Cu)	1	5.8×10^7	—
外壳	Q235 钢	2000	5×10^6	非线性
永磁体	NdFeB N35	1.05	6.25×10^5	退磁曲线

表 3 材料电磁属性

2.3 B-H 磁化曲线

铁磁材料的非线性 B-H 曲线对电磁计算至关重要。DT4 电工纯铁的典型 B-H 曲线如下：

H (A/m)	B (T)	H (A/m)	B (T)	H (A/m)	B (T)
0	0	200	1.2	2000	1.8
50	0.5	400	1.4	5000	2.0
100	0.9	800	1.6	10000	2.1

表 4 DT4 电工纯铁 B-H 曲线数据 (部分)

饱和特性：DT4 电工纯铁饱和磁感应强度约 2.15T，在高电流工况下需注意磁路饱和对电磁力的影响。

2.4 有限元网格

参数	设置值	说明
分析类型	2D 轴对称 / 3D	根据几何对称性选择
网格类型	三角形/四面体	自适应细化
气隙网格	最大 0.5 mm	关键区域加密
自适应细化	能量误差 < 1%	Maxwell 自动细化
总单元数	50,000	2D 模型

表 5 网格划分设置

3 激励条件

3.1 驱动电路

脱扣器的驱动电路参数如下：

参数	数值	说明
驱动类型	恒压驱动	DC 220V / DC 110V
驱动电压	DC 220V	额定控制电压
线圈电阻	50 Ω	20° C 时
线圈电感	0.5 H	依赖气隙长度
额定电流	4.4 A	稳态电流
时间常数	10 ms	$\tau = L/R$

表 6 驱动电路参数

3.2 短路电流波形

对于瞬时脱扣仿真，采用以下短路电流波形：

参数	数值	说明
短路电流峰值	50 kA	预期短路电流
电流频率	50 Hz	工频
非周期分量衰减	$\tau = 45 \text{ ms}$	DC 衰减时间常数
整定电流倍数	$10 \times I_n$	瞬时脱扣整定值

表 7 短路电流参数

4 静态吸力特性分析

4.1 静磁场仿真设置

参数	设置值
求解器类型	Magnetostatic
激励类型	电流激励 (Stranded)
边界条件	Balloon (无穷远)
虚拟力计算	Virtual Work Method
自适应细化	开启，误差目标 1%

表 8 静磁场仿真设置

4.2 磁通密度分布

图片待补充：完成 Maxwell 静磁场仿真后，在此处插入磁通密度云图。

4.3 静态吸力曲线

通过改变气隙长度 δ (0.5mm 5mm)，计算不同气隙下的电磁吸力 F：

气隙 δ (mm)	电磁吸力 F (N)	弹簧反力 (N)	净力 (N)	磁导 (μH)	电流 (A)
5.0	—	12.5	—	—	4.4
4.0	—	12.0	—	—	4.4
3.0	—	11.5	—	—	4.4
2.0	—	11.0	—	—	4.4
1.0	—	10.5	—	—	4.4
0.5	—	10.25	—	—	4.4

表 9 静态吸力特性数据（待填入仿真结果）

反力计算：弹簧反力 $F_s = F_0 + k \cdot (\delta_0 - \delta) = 10 + 500 \times \frac{5-\delta}{1000}$ N

图片待补充：完成参数扫描后，在此处插入吸力特性曲线图。

5 瞬态动态特性分析

5.1 瞬态仿真设置

参数	设置值
求解器类型	Transient
仿真时间	0 20 ms
时间步长	0.1 ms（固定） / 自适应
运动设置	Translation (1-DOF)
运动方向	Z 轴（轴向）
初始位置	气隙 $\delta = 5\text{ mm}$
运动终止	气隙 $\delta = 0.5\text{ mm}$ （吸合）
机械阻尼	10 N • s/m

表 10 瞬态仿真设置

5.2 运动方程

衔铁的运动由以下方程描述：

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = F_{\text{em}}(i, x) - F_{\text{spring}}(x) - F_{\text{friction}} - F_{\text{trip}}$$

其中：

- m — 衔铁质量 (kg)
- x — 衔铁位移 (m)
- F_{em} — 电磁吸力 (N)，与电流*i*和位移*x*相关
- F_{spring} — 弹簧反力 (N)
- $F_{friction}$ — 摩擦力 (N)
- F_{trip} — 脱扣力 (N)

5.3 电压平衡方程

线圈的电压方程：

$$U = iR + \frac{d\Psi}{dt} = iR + L(x)\frac{di}{dt} + i\frac{dL}{dx}\frac{dx}{dt}$$

其中磁链 $\Psi = L(x) \cdot i$ ，电感*L*随气隙变化。

5.4 动态仿真结果

5.4.1 位移-时间曲线

图片待补充：完成瞬态仿真后，在此处插入位移-时间曲线。

5.4.2 速度-时间曲线

图片待补充：完成瞬态仿真后，在此处插入速度-时间曲线。

5.4.3 电磁力-时间曲线

图片待补充：完成瞬态仿真后，在此处插入电磁力-时间曲线。

5.4.4 电流-时间曲线

图片待补充：完成瞬态仿真后，在此处插入电流-时间曲线。

5.5 动态特性汇总

参数	仿真值	设计目标	判定
脱扣时间	— ms	< 10 ms	待测
最大电磁力	— N	> 20 N	待测
吸合速度	— m/s	> 0.5 m/s	待测
吸合冲击力	— N	< 100 N	待测
电流峰值	— A	< 10 A	待测

表 11 动态特性参数汇总

6 多物理场联合仿真

6.1 联合仿真方法

对于复杂的电磁机构分析，可采用多物理场联合仿真方法：

物理场	软件	计算内容
电磁场	ANSYS Maxwell	磁场分布、电磁力
电路	ANSYS Simplorer / MATLAB	电压/电流响应
动力学	ADAMS / MATLAB	运动轨迹、碰撞
热场	ANSYS Icepak	温升（如需）

表 12 多物理场联合仿真软件配置

推荐方案:Maxwell + MATLAB/Simulink 联合仿真,通过 S-Function 接口传递电磁力和位移数据。

6.2 联合仿真流程

- 1. Maxwell静磁场 → 生成力-位移-电流查找表 $F(i, x)$
- 2. MATLAB/Simulink → 构建电路方程和运动方程
- 3. 联合求解 → 迭代计算瞬态响应
- 4. 后处理 → 提取动态特性曲线

7 永磁机构分析（可选）

7.1 永磁保持原理

永磁操动机构采用永磁体提供保持力，具有以下优点：

- 1. 零功耗保持合闸/分闸状态
- 2. 结构简单，零部件少
- 3. 可靠性高，免维护

7.2 永磁体退磁分析

高温或强反向磁场可能导致永磁体退磁，需进行退磁分析：

图片待补充：如分析永磁机构，在此处插入退磁分析云图。

8 结论与建议

8.1 主要结论

根据本次电磁脱扣器仿真分析，得出以下主要结论：

- 1. 静态吸力特性：电磁吸力随气隙减小而增大，满足脱扣力矩要求（待仿真结果验证）

- 2. 动态响应特性：脱扣时间预期 $< 10\text{ ms}$ ，满足瞬时脱扣要求（待仿真结果验证）
- 3. 磁路设计：铁芯材料 DT4 电工纯铁具有良好的磁导率和低矫顽力，适合快速动作机构
- 4. 驱动电路：DC 220V 恒压驱动可提供足够的励磁能量

总体评估：待仿真完成后填写总体评估结论。

8.2 优化建议

- 1. 磁路优化：
 - 减少磁路中的气隙和非磁性间隙
 - 优化铁芯截面形状，减少磁阻
- 2. 线圈优化：
 - 适当增加匝数可提高磁动势
 - 采用分数槽绕组降低铜耗
- 3. 动态优化：
 - 减小衔铁质量提高动作速度
 - 优化弹簧参数平衡吸力与返回力
- 4. 可靠性：
 - 增加防松动设计
 - 考虑高温工况下的性能降额

8.3 试验验证

建议进行以下试验验证仿真结果：

试验项目	测量参数	测量方法
静态吸力	F vs δ 曲线	拉力传感器
动态特性	位移-时间曲线	位移传感器/高速摄影
脱扣时间	启动到吸合时间	示波器
吸合电流	电流波形	电流探头

表 13 试验验证项目

9 附录

9.1 附录 A: Maxwell Transient 仿真步骤

9.1.1 A.1 模型创建

- 1. 创建 2D 轴对称模型或 3D 模型
- 2. 定义材料属性（特别是 B-H 曲线）
- 3. 划分网格，气隙区域加密

9.1.2 A.2 激励设置

- 1. 定义线圈激励（Stranded 或 Solid）
- 2. 连接外部电路（Excitation > External Circuit）
- 3. 设置驱动电压波形

9.1.3 A.3 运动设置

- 1. 创建 Band 对象包裹运动部件
- 2. 设置 Motion Setup (Translation)
- 3. 定义运动质量、阻尼、弹簧力
- 4. 设置正负行程限位

9.1.4 A.4 求解设置

- 1. 设置仿真时间和步长
- 2. 开启自适应网格细化
- 3. 设置数据保存选项

9.2 附录 B: 仿真结果后处理

9.2.1 B.1 常用后处理变量

变量名	物理意义	单位
Force_z	Z 方向电磁力	N
Position	衔铁位移	mm
Speed	衔铁速度	m/s
Current (Coil)	线圈电流	A
Flux_Linkage	磁链	Wb
CoreLoss	铁损	W

表 14 常用后处理变量

断路器快速动作脱扣器仿真分析报告

编制人签字:

审核人签字:

日 期: