

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 (μ H)	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 $\delta = 5$ mm
运动终止	气隙 $\delta = 0.5$ 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 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

仿真工具：ANSYS Maxwell 2024 R1

报告日期：2026 年 01 月 04 日

求解器：Magnetostatic / Transient

版本：v1.0 (框架版)

联合仿真：Maxwell + MATLAB

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: