

Life Is On



将数字模型应用于电气设备开发的全生命周期

李宁, 施耐德电气研发中心技术经理, 施耐德全球爱迪生一级专家



MATLAB EXPO 2021

施耐德电气引领全球能源管理和自动化领域的数字化转型

2020财年关键数据

5% 的营业收入用于研发

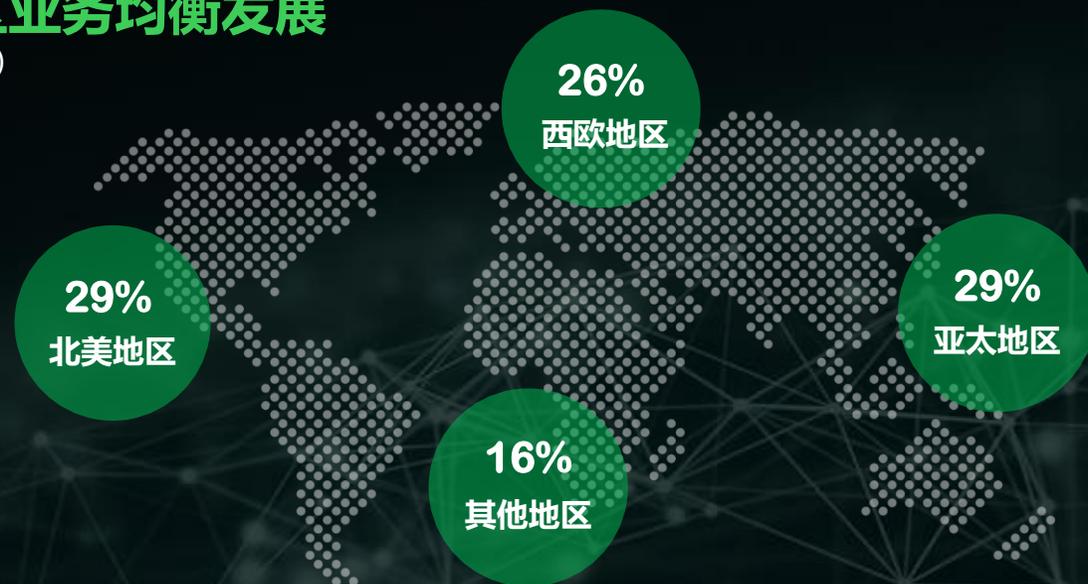
252亿欧元
2020年收入

41%
的营业收入来源于新经济体

135,000+
名员工，业务遍及100多个国家

全球各地区业务均衡发展

(2020年收入来源)



两大业务

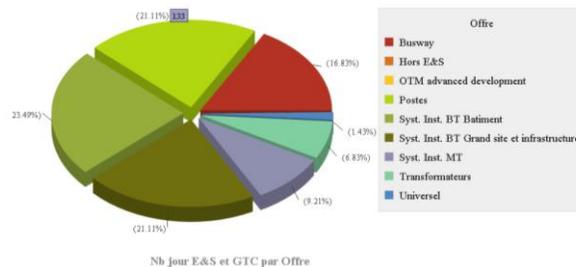
工业自动化

23%
€5.8 billion

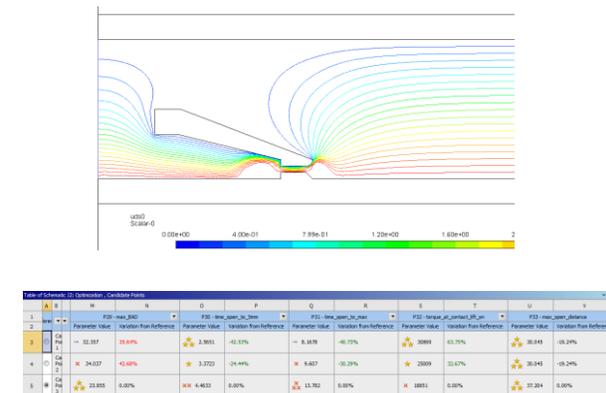
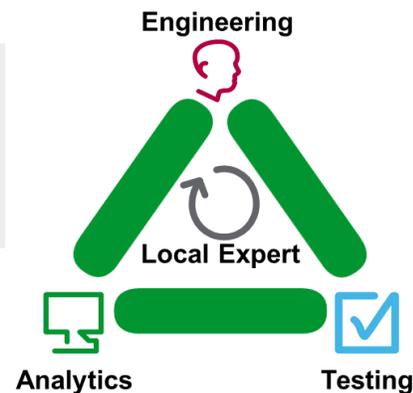
能源管理

77%
€19.4 billion

仿真技术在施耐德电气具有悠久历史和强大基因



From test to simulations



From test to test



Technical support

Technical management

Certification: the range is certified in relation with 2 tests based on our calculation.

Certification

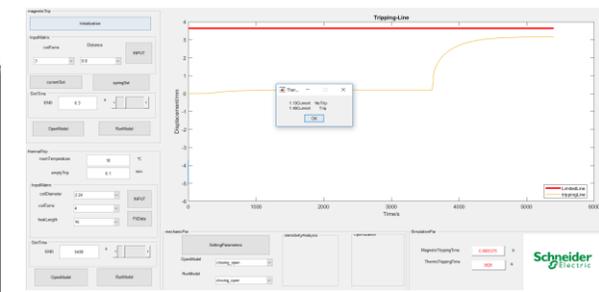
Businesses

Expertise

Architecture

Technical choices

Digital model transition



```

equations
assert(mass > 0)
assert(sp_heat > 0)
assert(Rho_temp_C >= 0)
T == M.T;
let
    % Calculate R, protecting against negative values
    Rdem = Electric_rho*(1+Rho_temp_C*(T-T0));
    R = if Rdem > 0, Rdem else (0,'Ohm/m') end;
in
    mass * sp_heat * T.der == Q + R*Heating_length/area*I*I*Ratio; % Thermal equation
end
assert(T > 0, 'Temperature must be greater than absolute zero')
end
    
```

为什么要进行数字化转型

提升产品开发效率

- 优化产品设计参数，快速寻优
- 基于数字模型，进行虚拟样机性能测试
- 建立数字模型库，便于模型管理即后续开发完善

提高产品及系统的可靠性

- 通过将部件级别的模型进行连接，预测系统的性能
- MATLAB提供了丰富的模型降阶方法及接口
- 基于降阶模型，快速生成系统的故障数据，为预测性维护算法提供数据

应用于电气产品开发的全生命周期

Life Is On

目录

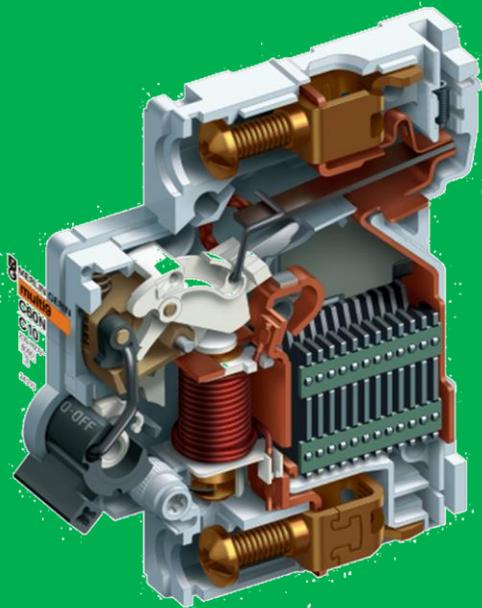
- 基于MATLAB的电气产品数字模型
- 基于MATLAB的预测性故障维护模型
- 总结

Life Is On

Schneider
Electric

配电产品热磁保护特性设计

创建电气产品的数字模型，缩短开发周期



已应用在多种电气产品的开发和验证阶段

技术挑战

从传统开发方法到数字化开发方法：

- 提高产品开发效率
- 减少产品的样品数量和试验次数
- 产品核心机理的深入理解

产品和解决方案

基于数字孪生技术的模型

- 基于MATLAB建立关于电气产品热磁保护组件以及机构组件的系统级别模型，便于**敏感度分析及寻优**
- 作为**数字孪生体模型**，进行系统基本的预测性维护建模及分析

研发效益

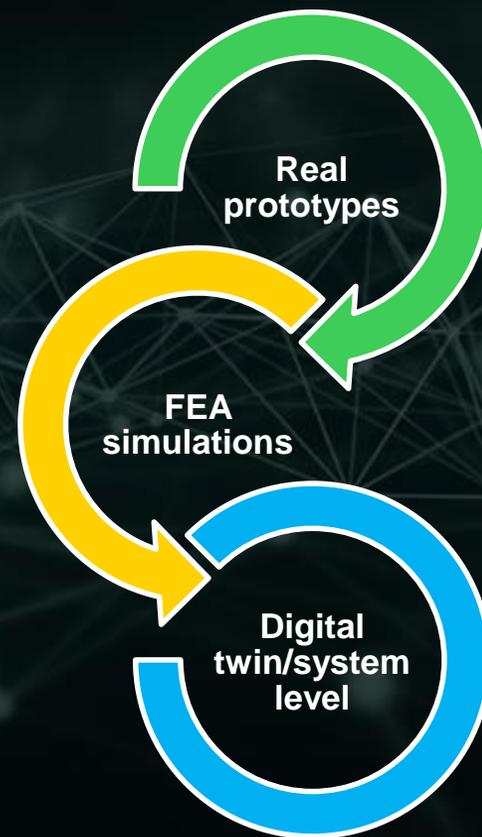
数字化模型带来：

- 产品开发时间缩短~30%
- 虚拟样机验证，节省样机数量

成效: Life is On...

- 将校正好的热磁脱扣模型应用于其他具有相似功能的产品，提升整体研发效率

EcoEtruxure™
Innovation At Every Level



热磁保护特性介绍

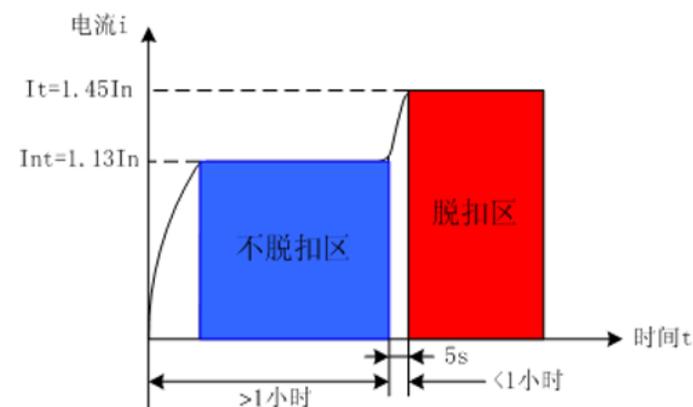
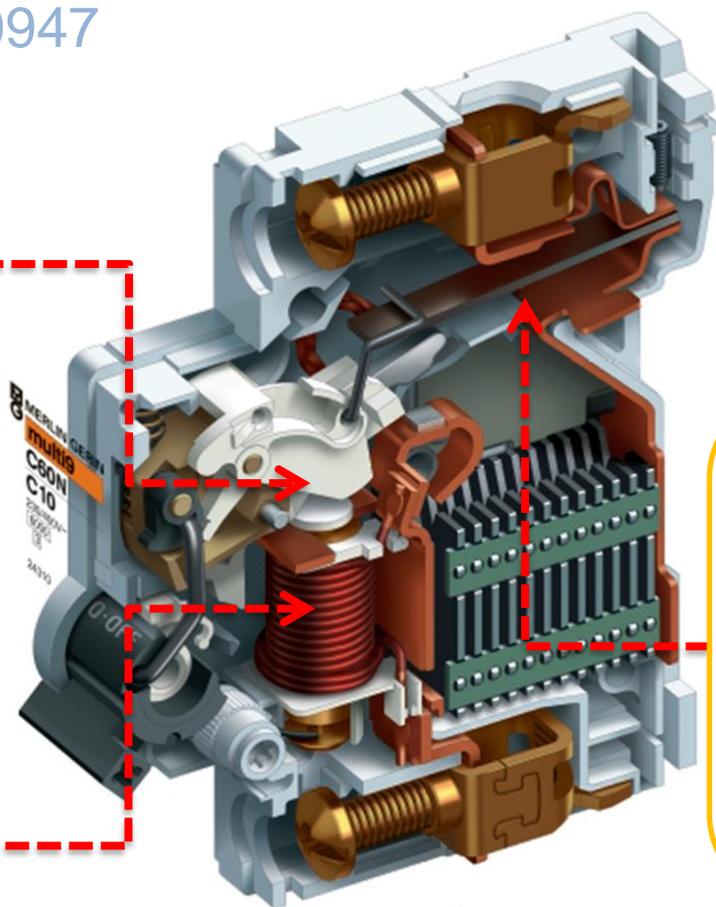
以微断为例说明-IEC60898/IEC60947

机构组件

- 主要采用四连杆设计，配合弹簧完成主回路的各项动作。
- 用来实现断路器产品的合闸，分闸，脱扣，储能等动作特性。

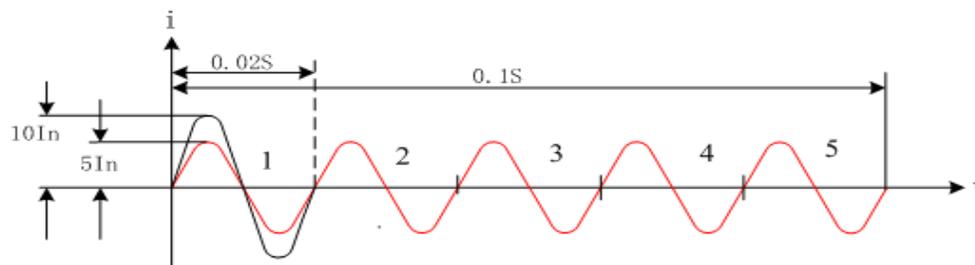
短路保护组件

- 线圈通过电流会产生磁场，磁场会在使处于其中的导体产生电磁力，从而产生运动。
- 设计线圈、铁芯、磁簧等参数，来设定其动作电流，从而实现线路的短路保护



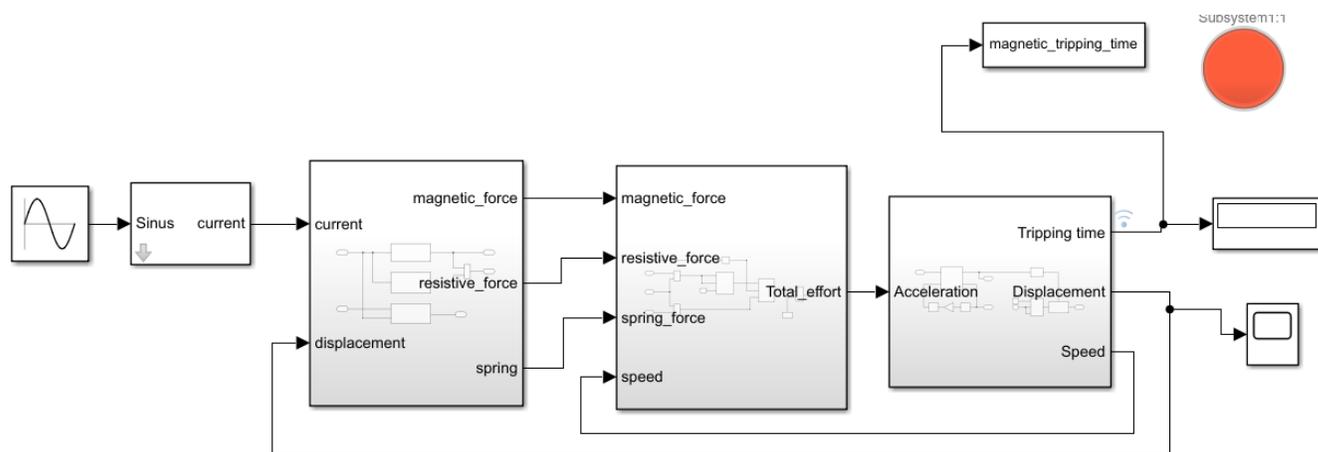
过载保护组件

- 电流流经双金属片时产生热效应，由于双金属片不同片层的弯曲率不同，而使双金属片产生弯曲变形。
- 在给定电流下给定时间内推动脱扣机构脱扣，从而实现线路和负载的过载保护。

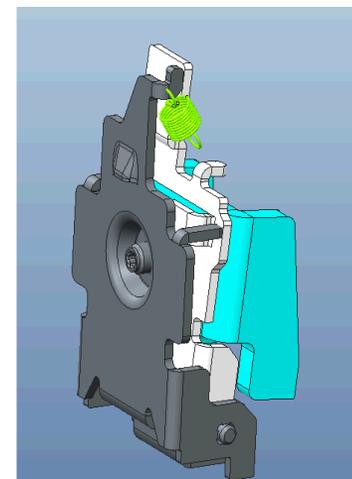


磁保护特性模型建立

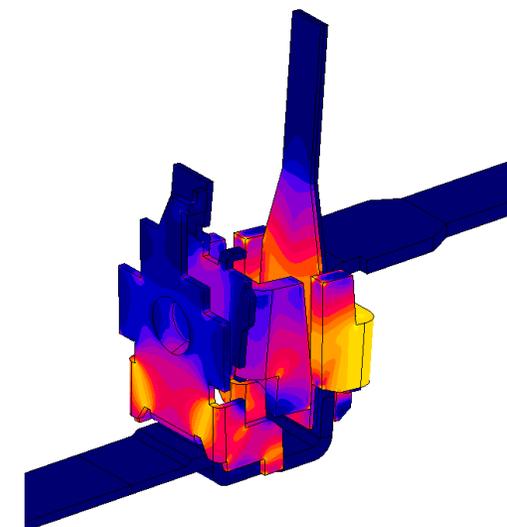
- 模型降阶技术
 - 将有限元计算得到的结果以数组的形式作为磁脱扣模型的输入
- 得益于 **Stateflow** 工具箱
 - 轻松定义动衔铁在不同运动状态条件转换不同的运动形式



磁脱扣Simulink模型



电磁铁结构

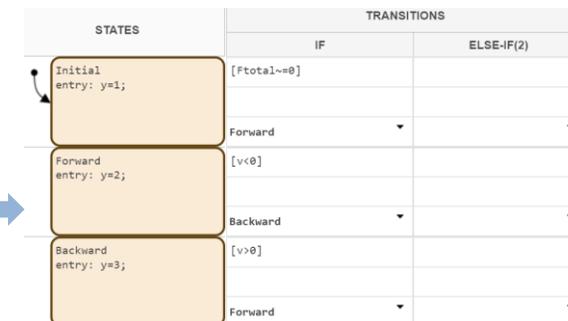


电磁铁磁场分布

```

Moving conditions :
{ If ( F_magnetic - F_spring - F_latching ) < 0
  Stay at initial position (-5.1);
Else
  Go forward ;
  { If (speed < 0)
    Go backward ;
  Else
    Keep moving forward ;
  }
}

```



Stateflow模型

热保护特性模型建立

模型降阶

- 将有限元温升数据处理作为Simulink模型的输入
- 通过公式可知，双金属片的变形仅与温度相关

得益于PDE 工具箱

- 通过热-机械耦合，能够高效精确计算双金属片的变形及反力

得益于 Parameter Estimator

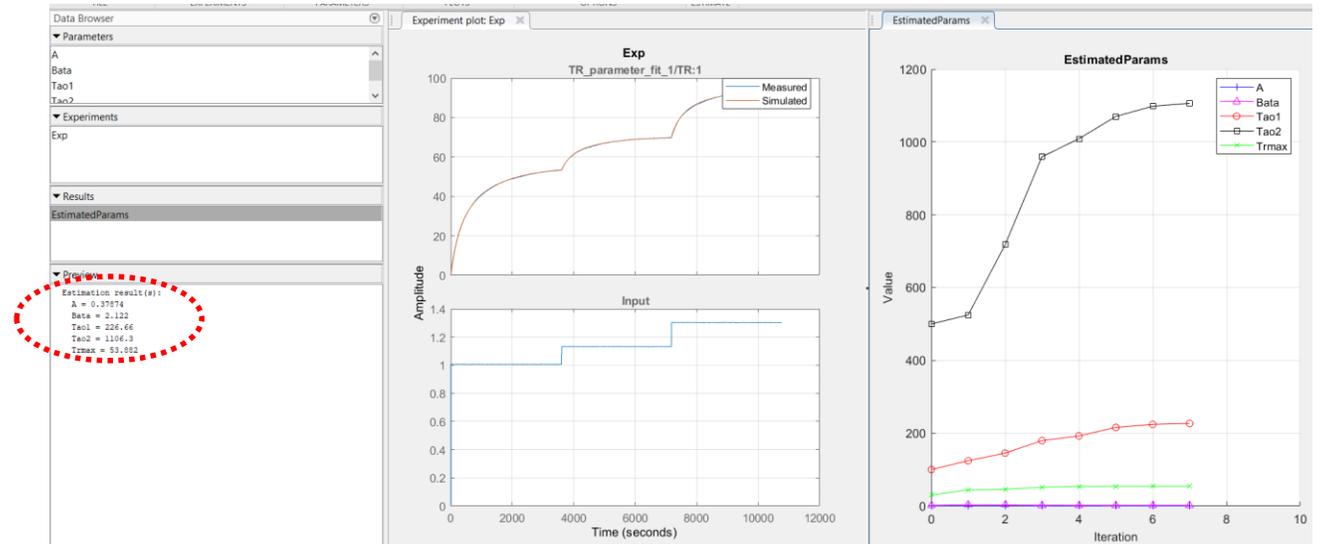
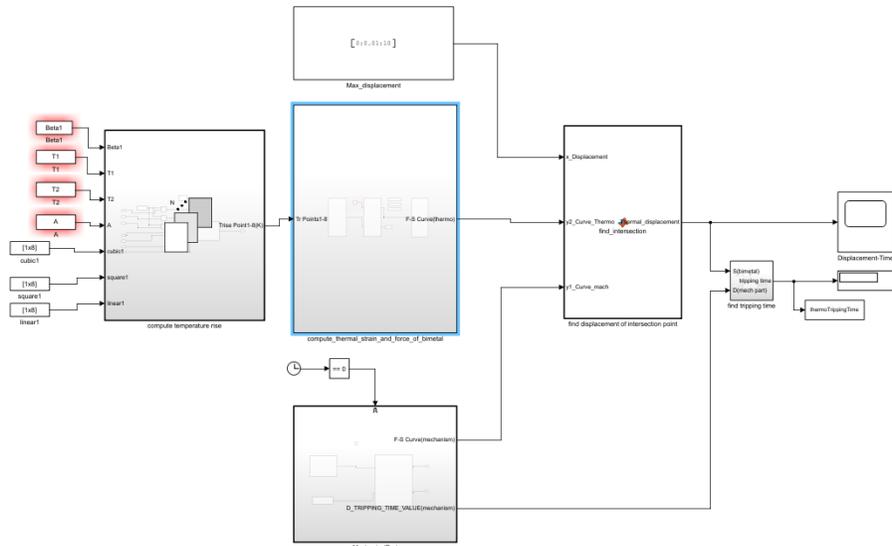
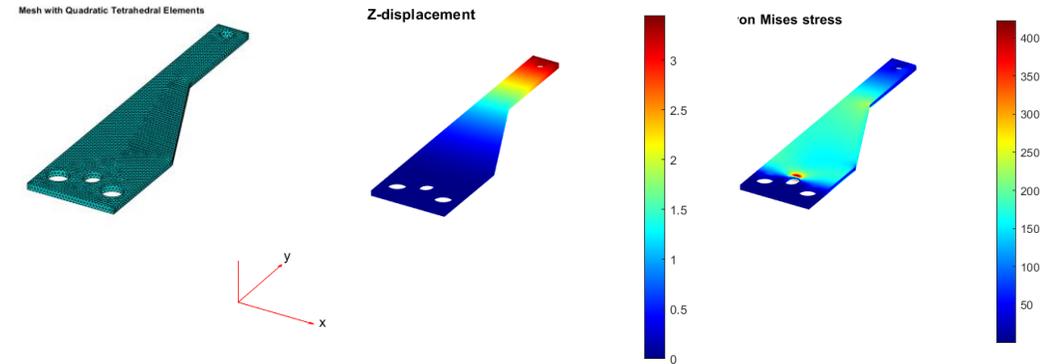
- 能够方便的拟合得到表征双金属片温升的几个参数

$$R(x) = \frac{\left(1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2\right)^{\frac{3}{2}}}{\frac{d^2y}{dx^2}}$$

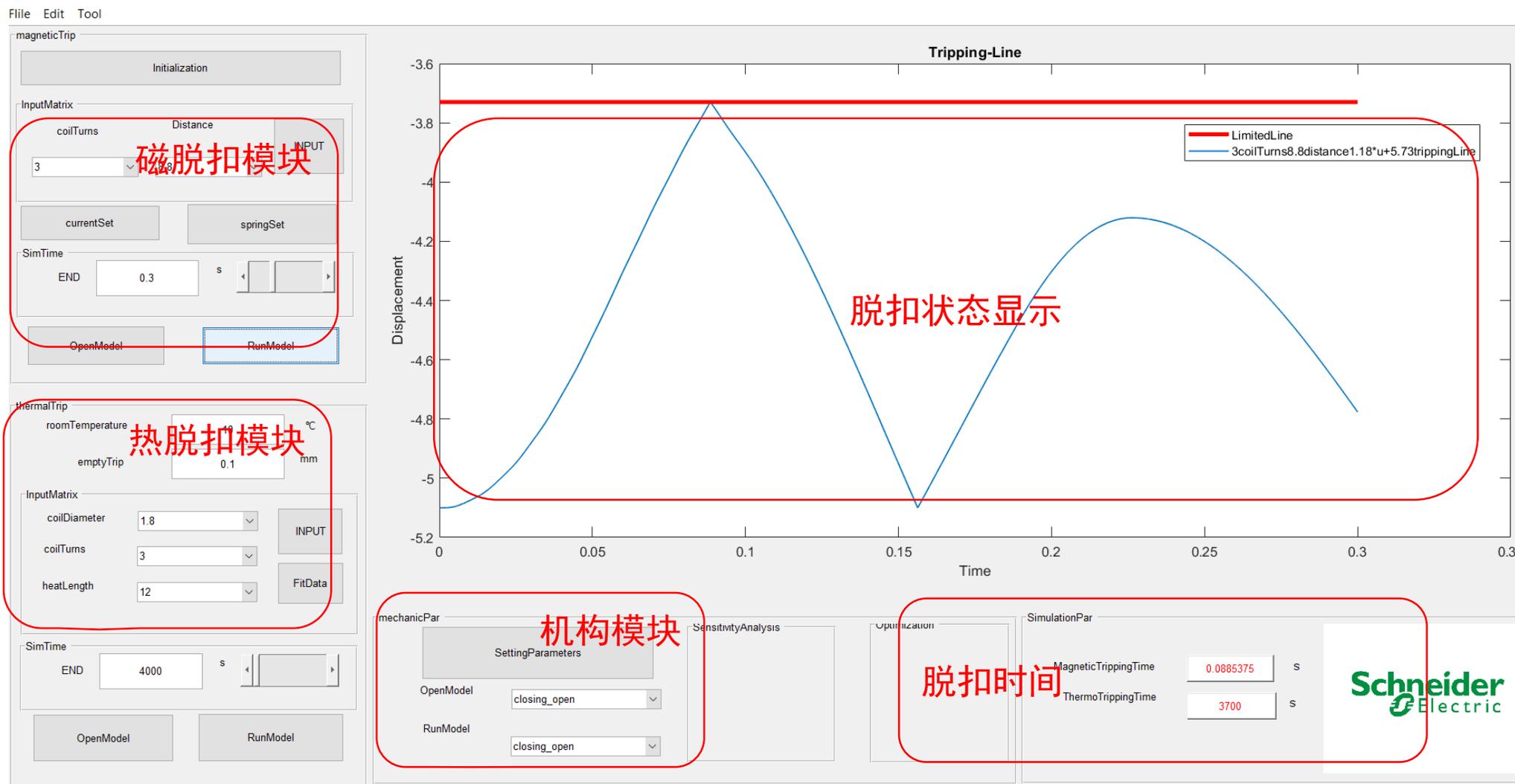
$$\frac{1}{R(x)} = \frac{k}{e} \cdot \Delta T(x)$$

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{k}{e} \cdot \left(1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2\right)^{\frac{3}{2}} \cdot \Delta T(x)$$

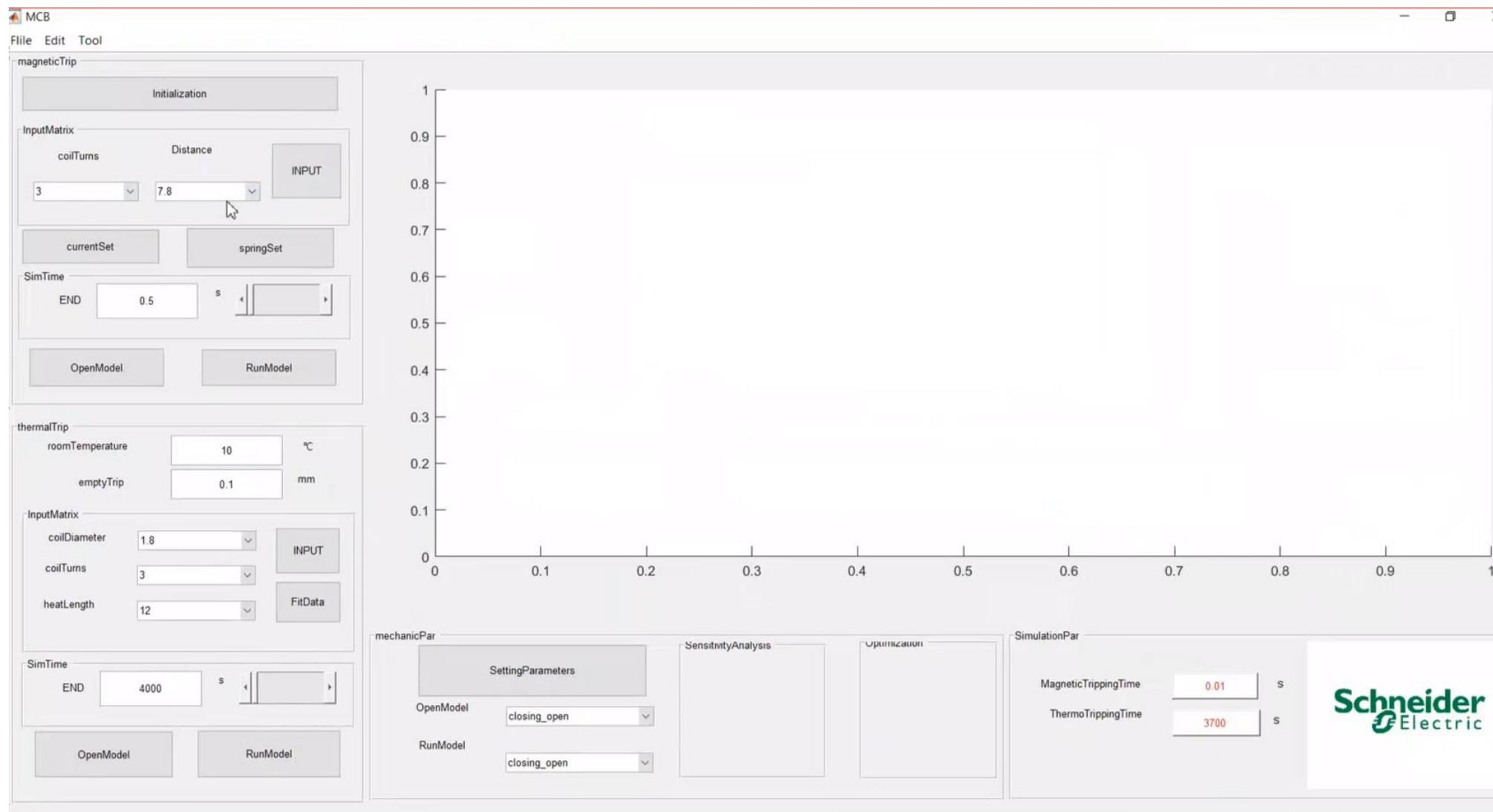
$$\frac{d^2y}{ds^2} = \frac{k}{e} \cdot \Delta T(s)$$



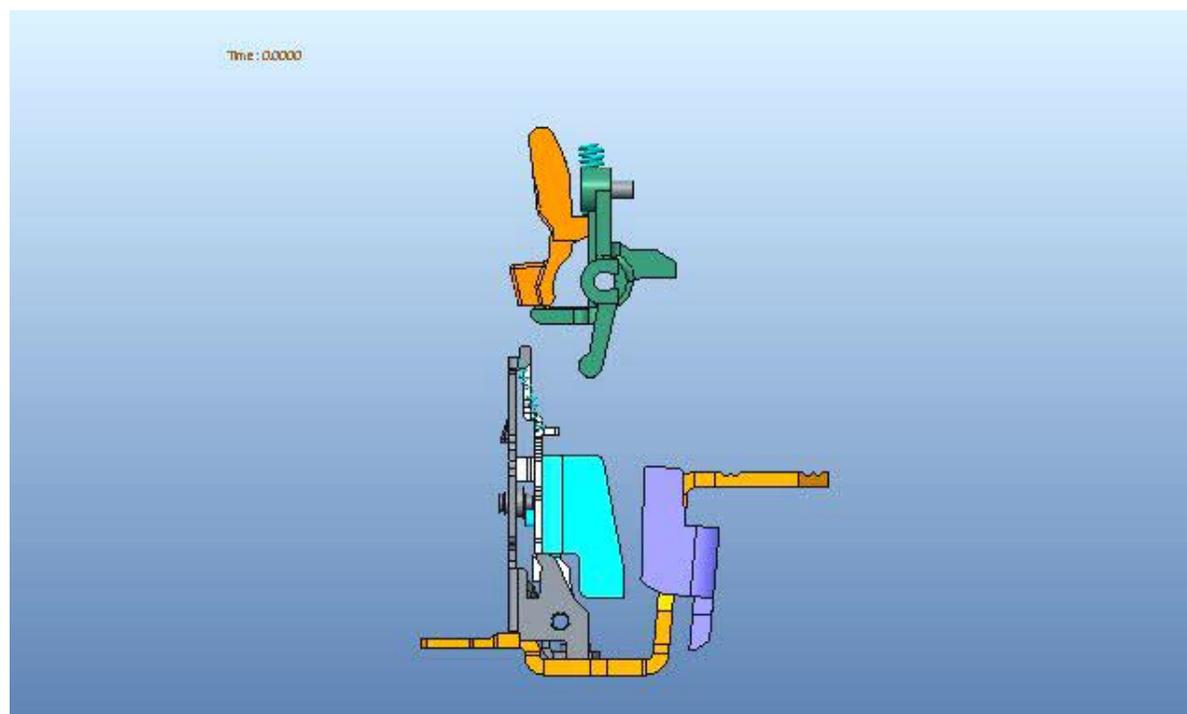
电气产品热磁脱扣器数字模型



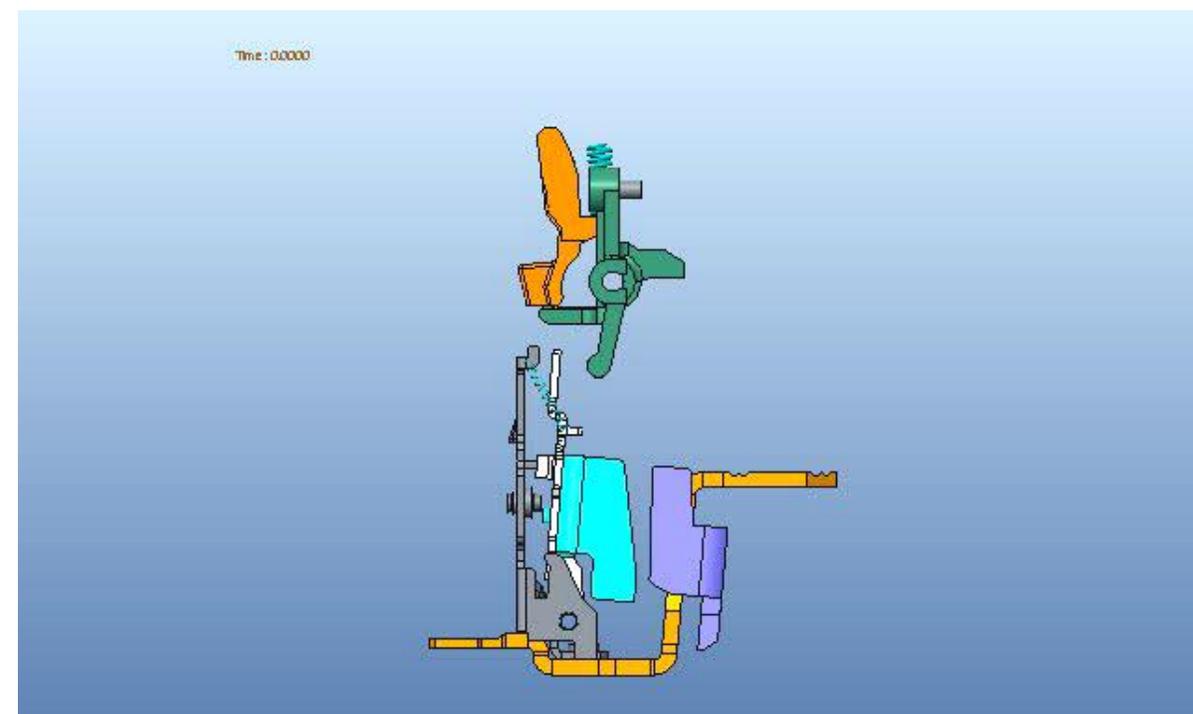
磁脱扣结果演示



多物理场仿真方法结果演示



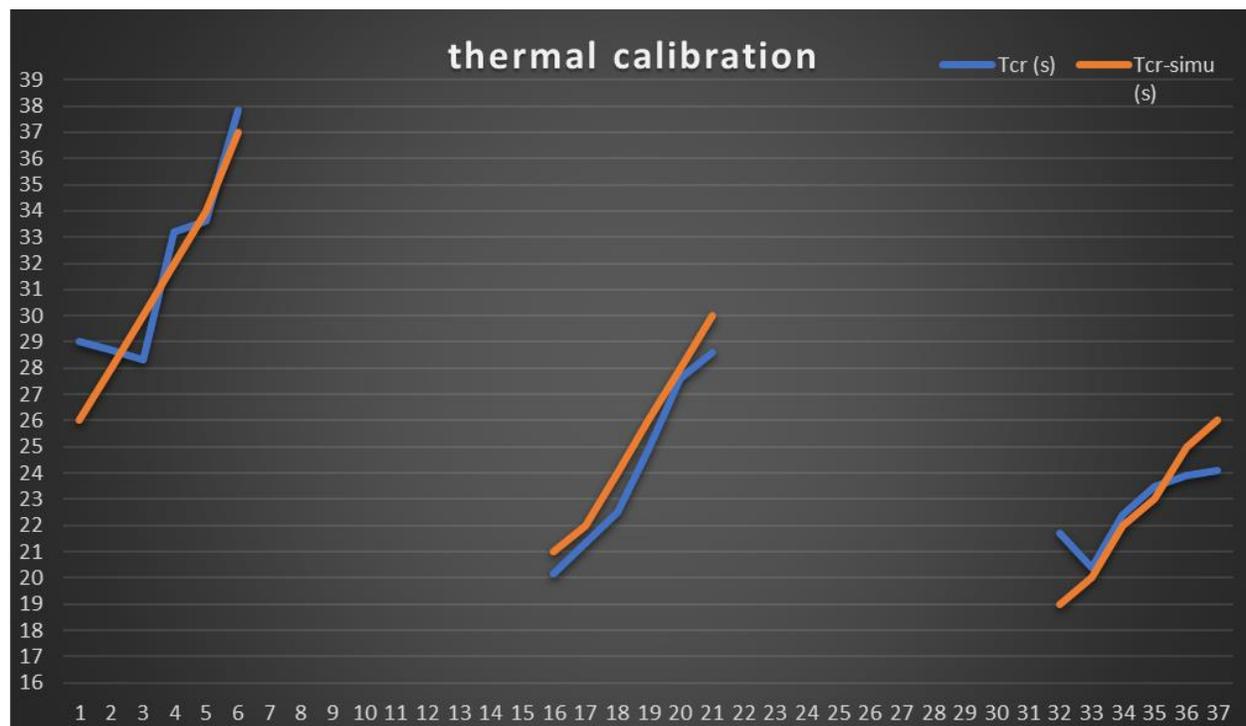
Not tripped



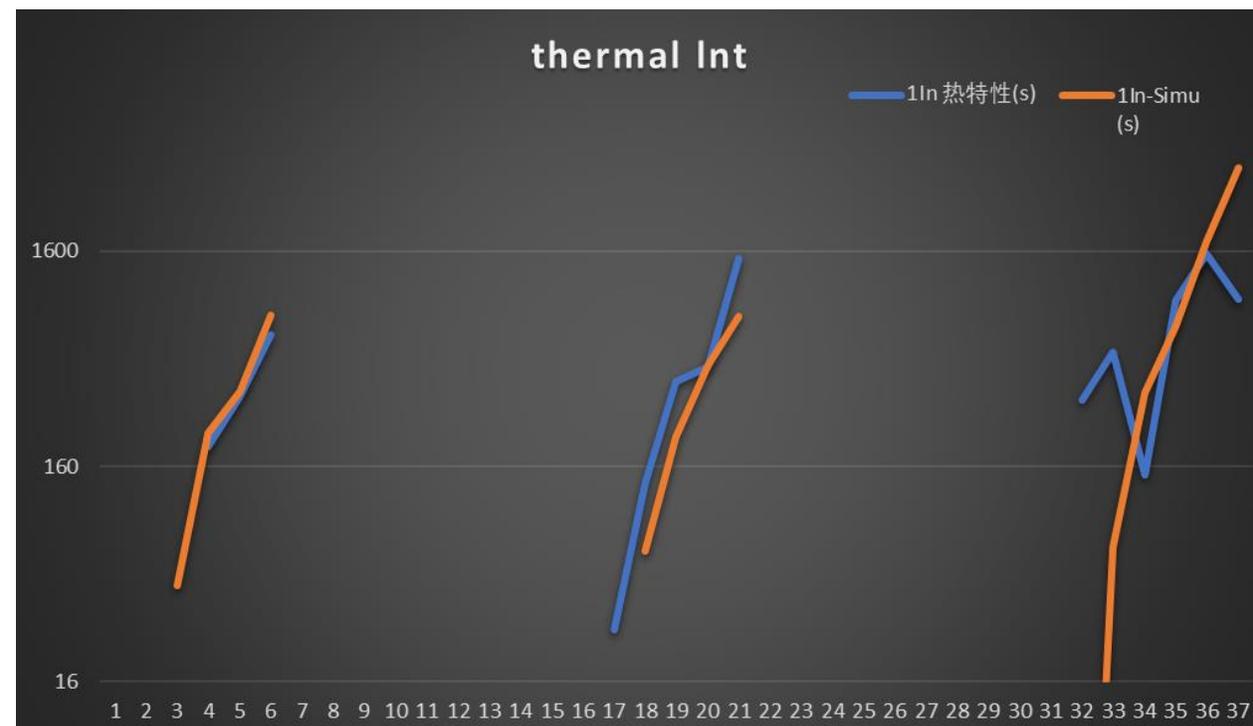
Tripped

模型计算结果(以热脱扣为例)

短时脱扣时间对比



长时脱扣时间对比



低压配电系统预测性维护模型

打造智能配电产品



施耐德于2020年，推出缺省级未来智能盘柜方案。

技术挑战

数字化转型：

- 电力系统可靠性，安全性
- 传统温度预警方法不能满足实际需要
- 电力维护成本上升

解决方案

- 建造数字孪生模型，生成故障及健康数据
- 训练得到数据分类器，并进一步验证其有效性
- 部署到边缘控制，实现运行

带来效益

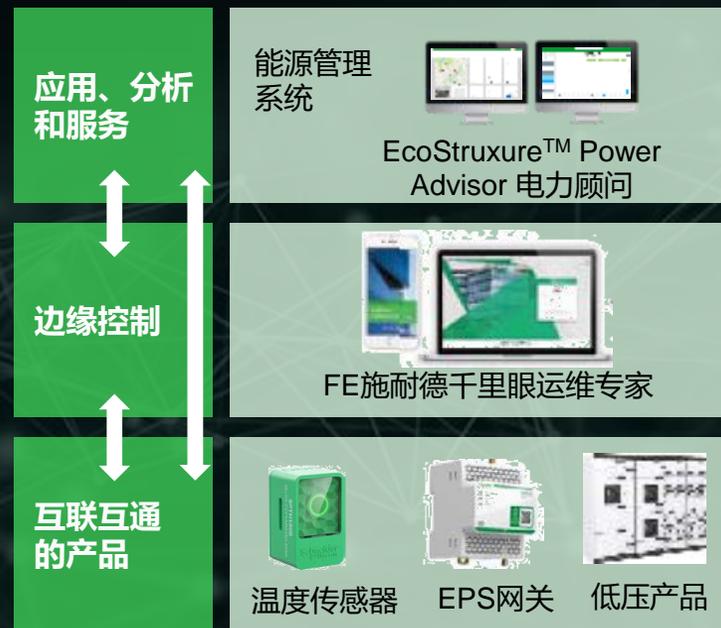
- 提高电力系统的可靠性
- 成本优化，方案稳定
- 减少人工需求

成效: Life is On...

- 效益与系统电力可靠性成果非常显著，能源管理系统应用为客户带来可观业务价值。

EcoStruxure™
Innovation At Every Level

矿业、建材和冶金行业

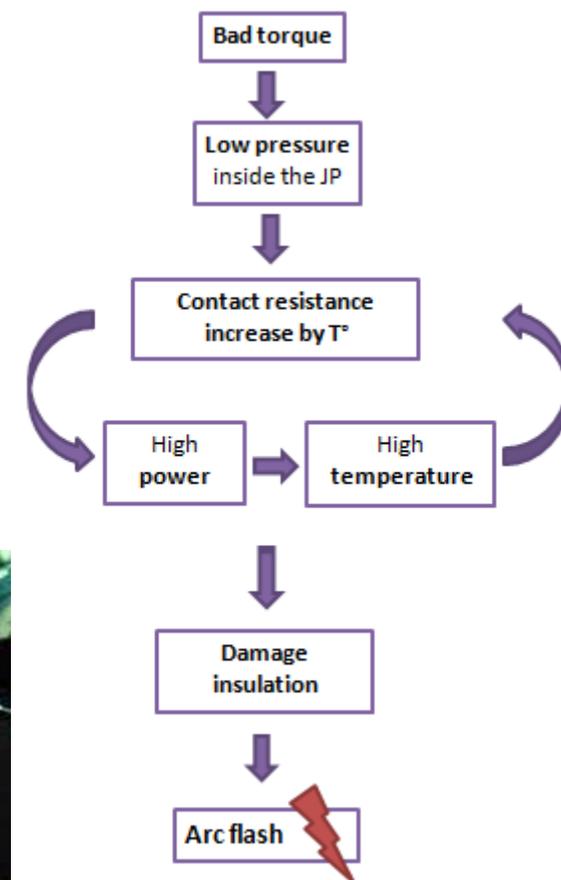


基于物联网的数字化中低压解决方案，全方位改善配电系统，实现预测性维护，保障安全，可靠，高效的配电系统，放大客户业务价值。

配电柜预测性维护开发背景

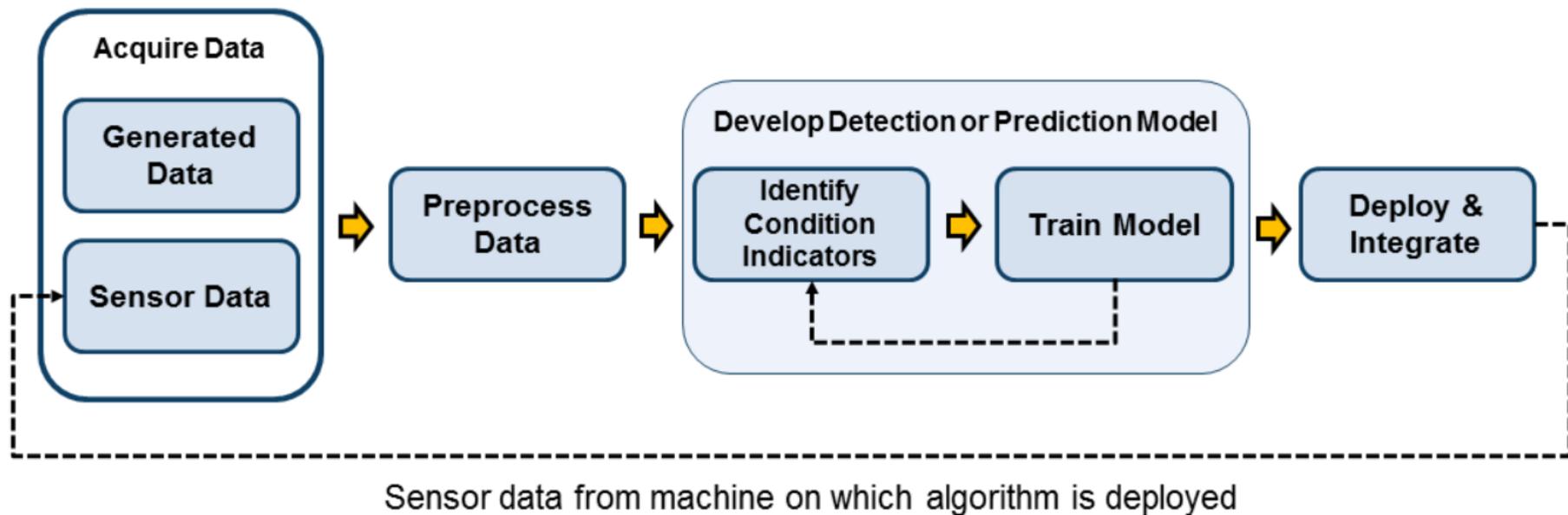
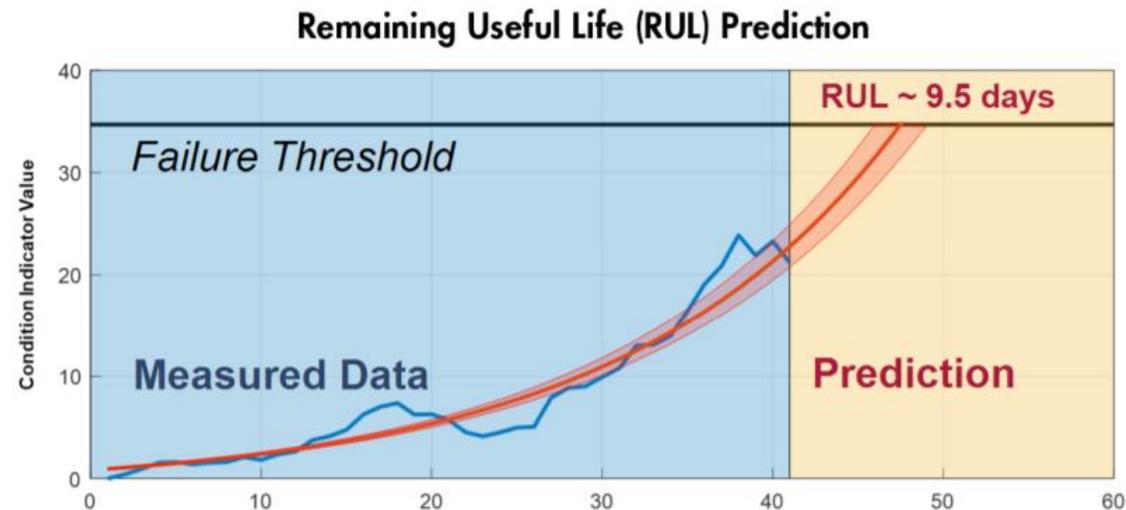
电气系统在工作过程中，往往会发生两种形式的故障：电气连接变差，通风口积灰导致流动散热变差。柜上也布置了很多温度传感器作为监控。但是目前只能给出一些温升信号作为报警值，比如超过25K的温升是一个危险信号，低于20K，说明系统运行良好。但是用户无法立即处理危险信号过来的场景，因为电器柜不能随意关闭。

客户需要知道故障发生后的可维护时间，给客户id提供预警信息。



基于模型的预测性维护工作流程

- 基于Simscape模型降阶，极大提高了数据计算效率
 - 快速生成健康及故障数据
 - 基于数据训练分类器
- 基于校准的Simscape模型，注入故障数据，检验分类的有效性



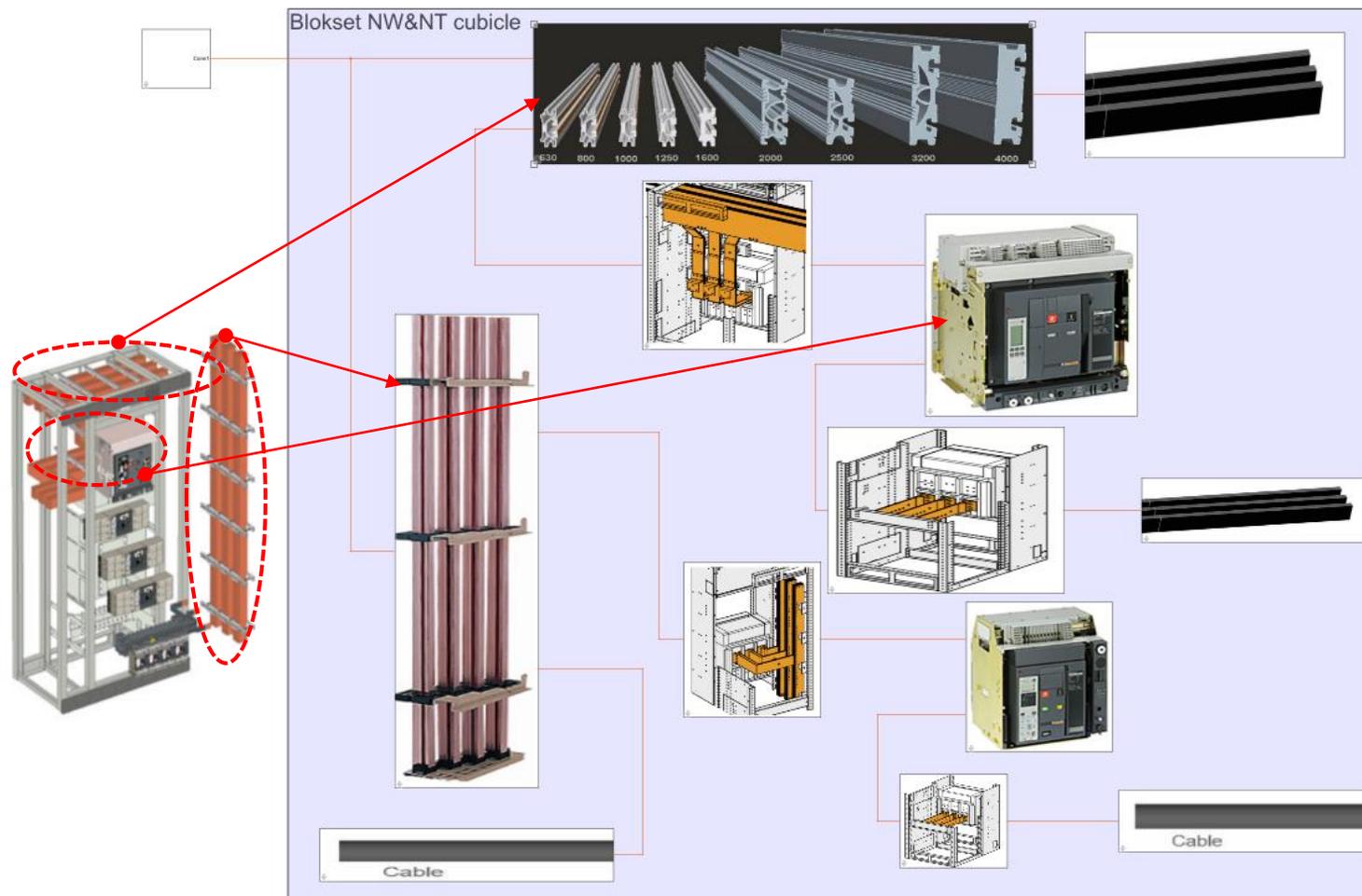
* Overcoming Four Common Obstacles to Predictive Maintenance with MATLAB and Simulink

基于Simscape的数字孪生模型

温度以及热功耗计算

Thanks to Simscape

- 全参数化模型，轻松修改及参数优化分析及设计；
- 电气元器件生成库文件，便于存储和调用；
- 采用MATLAB驱动批处理运行计算，轻松注入故障，批处理生成数据

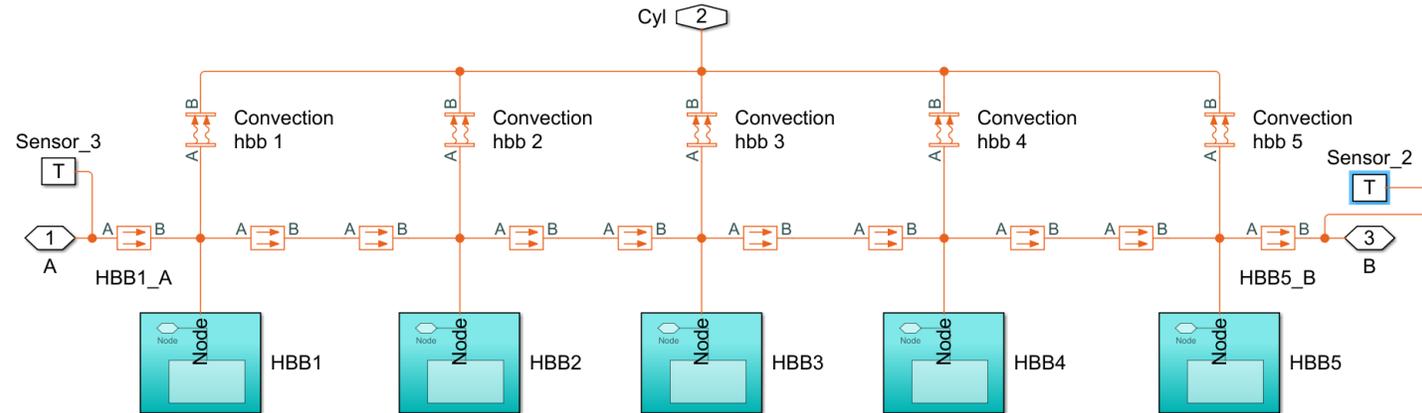


数字孪生热模型的建立

数字模型建立原理

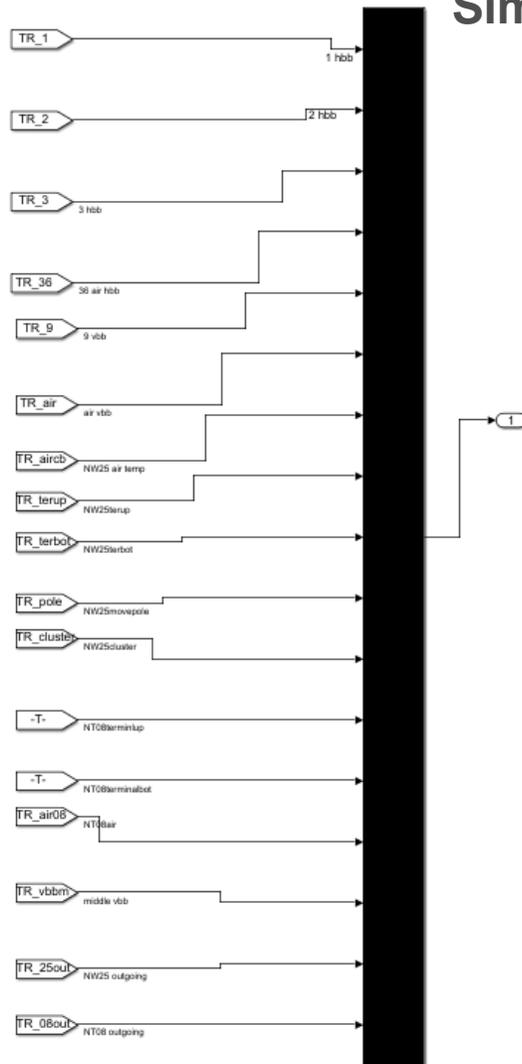
ELECTRICAL	THERMAL
Current, $I = dq/dt$ [Amps]	Heat flow, q [Joules/sec]
Voltage, V [Volts]	Temperature difference, T [°C]
Resistance, $R = \rho L/A$ [Ohms]	Heat transfer resistance, R $R_{convection} = 1/(h A), R_{conduction} = KA/L$
Ohm's Law: $I = V/R$	$q = T / R$
Capacitance, $C = \epsilon A/d$ [Farads]	Thermal heat capacity, $m c_p$ $q = m c_p dT/dt$
Time constant, $T = R \cdot C$	Time constant, $T_{th} = R_{th} \cdot W \cdot C_p$
Ohm's law for current flow $I = \frac{1}{R}(V_1 - V_2)$	One dimensional steady flow equation $\dot{Q} = \frac{kA}{\Delta x}(T_1 - T_2)$
$P = I V$ [Watts]	$P = T q$ [Watts °C]
Kirchhoff's Current Law $\sum I = 0$	Energy equation $\sum q = 0$
Charge, $q = \int I dt$ [Coulombs]	Heat, $Q = \int q dt$ [Joules]
Kirchhoff's Voltage Law $\sum V = 0$	$\sum T = 0$

导体电-热模型

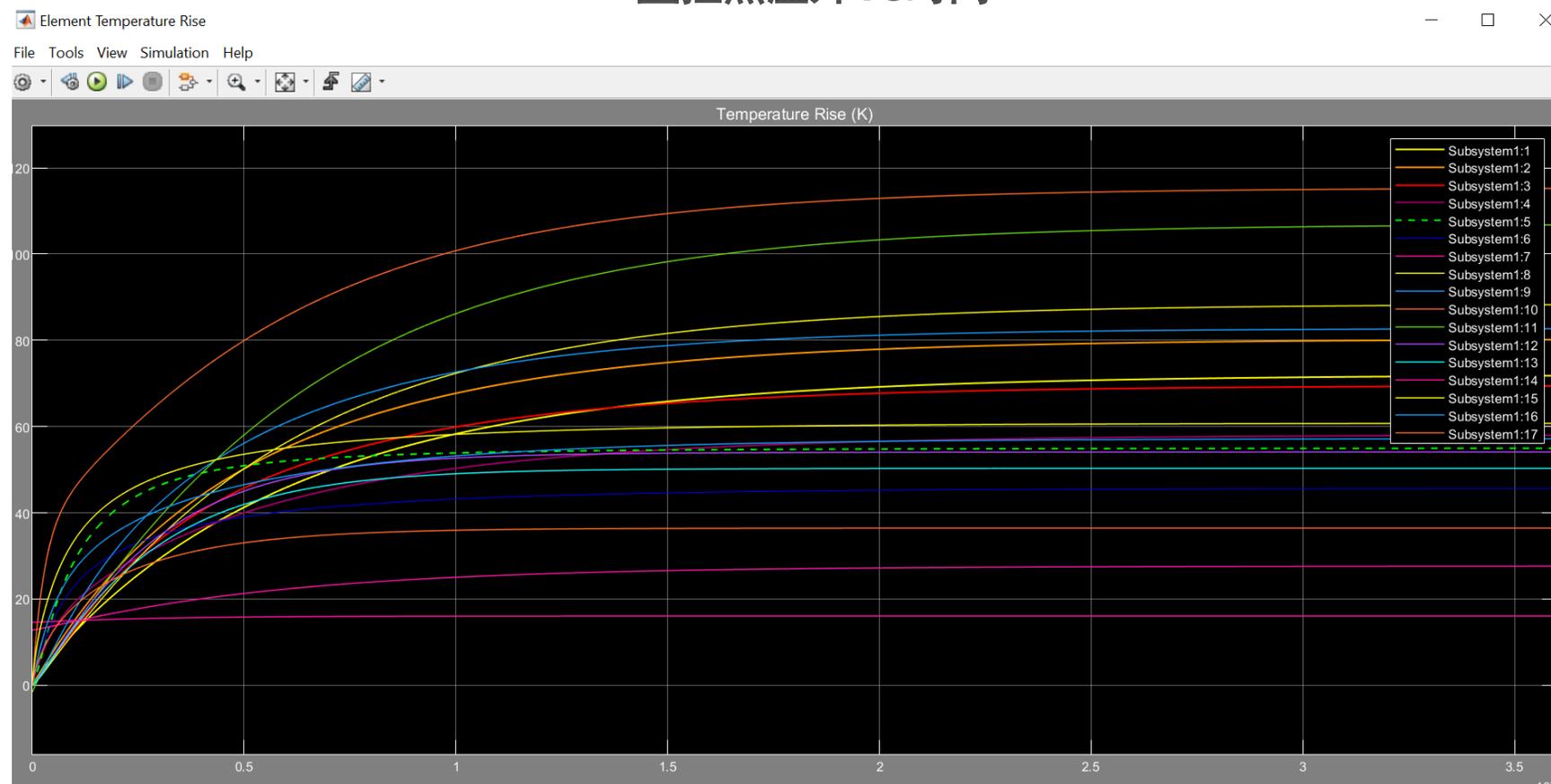


Simscape模型数据输出

Simulink 集线器



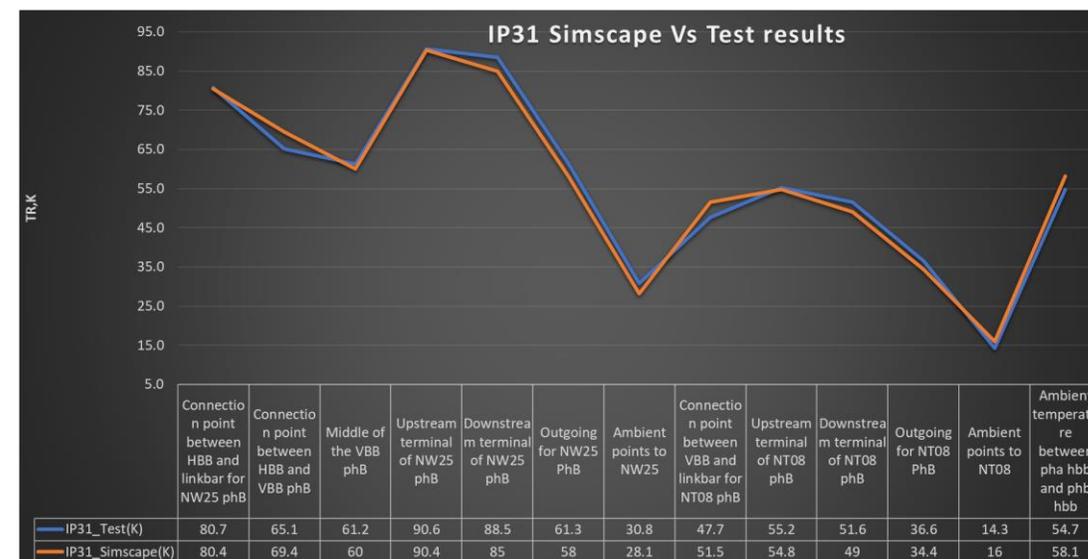
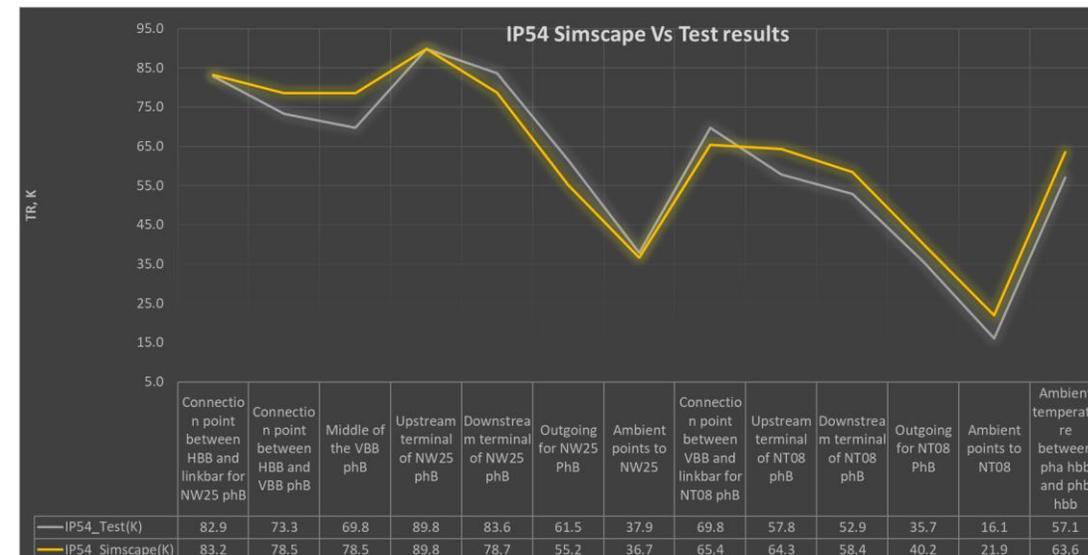
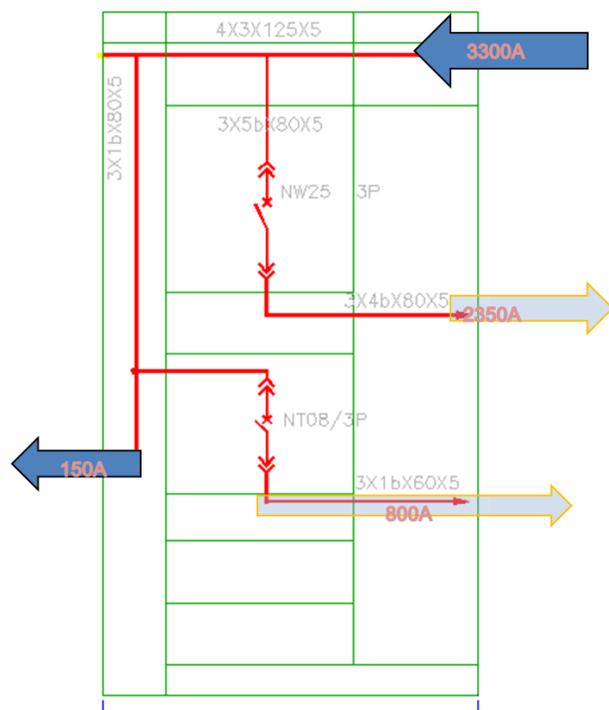
监控点温升Vs时间



Simscape 模型的精度

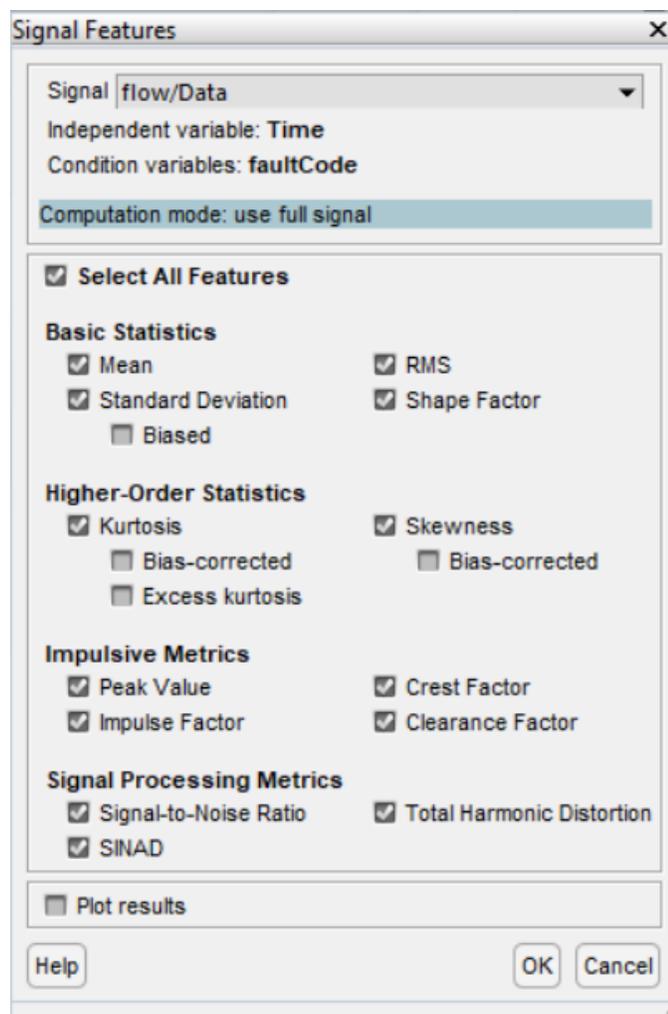
- 经过一种柜型，两种通风形式的验证，发现计算结果精度良好。
- 柜内空气节点温度有待进一步改进。
- 通过APP designer 设计友好界面，供设计工程师使用

产品结构

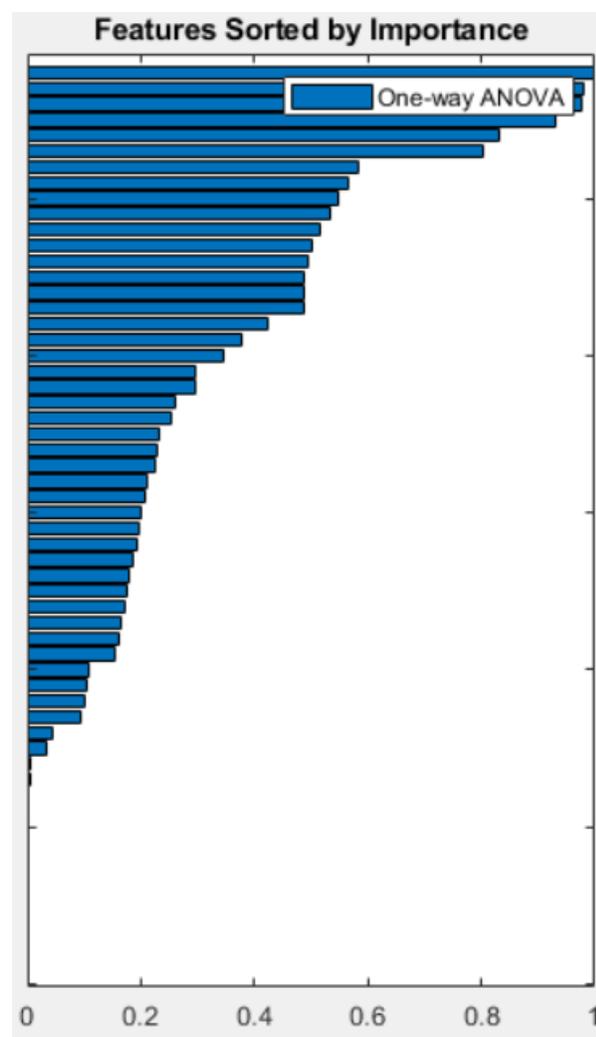


基于验证过Simscape模型，将产生的数据进行分类学习

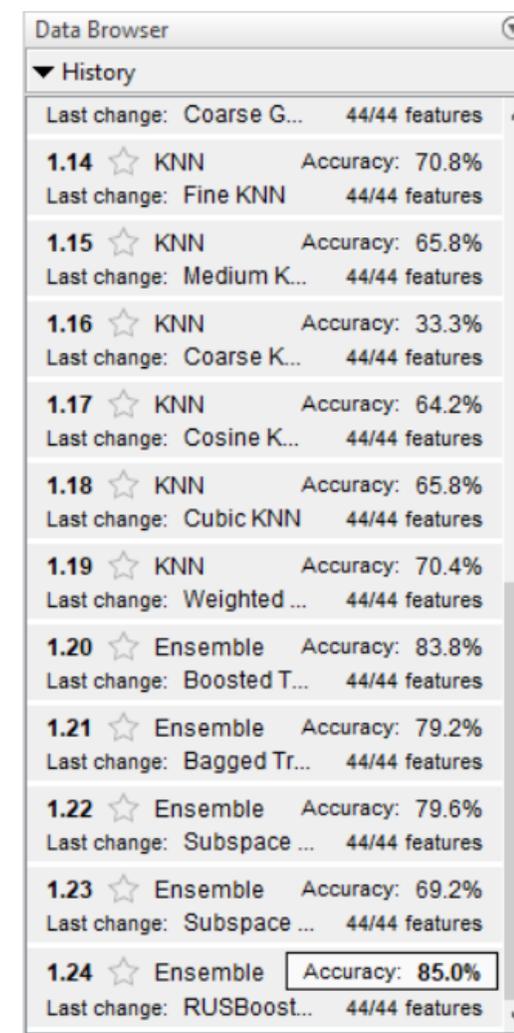
数字特征提取



数据特征排序



数据分类学习器



总结

- 在电气产品热磁脱扣开发过程中，通过建立基于**MATLAB**的数字模型，进行参数寻优及性能验证，可缩短产品开发周期**~30%**，节省**~50%**样品数量及测试。
- 将电气产品应用到系统级别后，为保障电气系统的可靠性，基于**Simscape**平台，建立电气产品系统的数字模型，实现预测性维护。
 - 依据此模型，生成故障及正常数据，进行分类学习
 - 手动注入故障，验证模型的有效性
- 将基于MATLAB的工作流应用到电气领域，为电气产品的全生命周期开发提供了创新性的思考和动力。

MATLAB EXPO 2021

Thank you

Email: Ning-neil.li@se.com

