

欠压脱扣器操动装置用复位弹簧的应力松弛分析

文山中¹, 胡明^{1*}, 李维忠², 纪存栋², 赵德明¹, 江鹏林¹

¹浙江理工大学机电产品可靠性分析与测试国家地方联合工程研究中心, 浙江 杭州

²西门子能源高压开关(杭州)有限公司, 浙江 杭州

收稿日期: 2023年2月28日; 录用日期: 2023年5月4日; 发布日期: 2023年5月11日

摘要

欠压脱扣器在高压断路器起着重要的保护作用。当断路器电压下降到额定工作电压35%时, 欠压脱扣器闭合使断路器停止工作。欠压脱扣器的关键部件之一是安装于其外部的采用复位弹簧实现储能的操动装置, 为评估长期服役下复位弹簧的储能性能, 对复位弹簧在同一应力水平不同温度下的应力松弛进行有限元分析, 建立复位弹簧的应力松弛模型; 使用SCDM右旋方式建立不同结构参数复位弹簧的有限元模型, 完成应力松弛仿真分析, 得到200°C下复位弹簧的应力与时间的变化规律, 拟合出负荷损失率与时间对数 $\ln t$ 关系图, 确定复位弹簧的应力松弛率; 基于不同的线径 d , 外径 D , 节距 t 等结构参数的复位弹簧模型, 得到复位弹簧结构参数与应力松弛率间的对应关系, 为提高复位弹簧使用寿命提供依据。

关键词

复位弹簧, 弹簧松弛理论, 应力松弛, 有限元分析

Stress Relaxation Analysis of the Reset Spring Used in the Operating Device of Underpressure Trip

Shanzhong Wen¹, Ming Hu^{1*}, Weizhong Li², Cundong Ji², Deming Zhao¹, Pengling Jiang¹

¹National and Local Joint Engineering Research Center for Reliability Analysis and Testing of Electromechanical Products, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou Zhejiang

²Siemens Energy High Voltage Switch (Hangzhou) Co., Ltd., Hangzhou Zhejiang

Received: Feb. 28th, 2023; accepted: May 4th, 2023; published: May 11th, 2023

*通讯作者。

文章引用: 文山中, 胡明, 李维忠, 纪存栋, 赵德明, 江鹏林. 欠压脱扣器操动装置用复位弹簧的应力松弛分析[J]. 建模与仿真, 2023, 12(3): 2006-2015. DOI: 10.12677/mos.2023.123184

Abstract

The undervoltage release plays an important protective role in the high voltage circuit breaker. When the circuit breaker voltage drops to 35% of the rated operating voltage, the undervoltage trip is closed and the circuit breaker stops working. One of the key components of the undervoltage release device is the operating device which uses the reset spring to realize energy storage. In order to evaluate the energy storage performance of the reset spring under long-term service, the stress relaxation of the reset spring under the same stress level and different temperatures was analyzed by finite element method, and the stress relaxation model of the reset spring was established. The finite element model of reset spring with different structural parameters was established by SCDM right rotation mode. The stress relaxation simulation analysis was completed to obtain the variation law of stress and time of the reset spring at 200°C, and the relationship between load loss rate and time $\log Int$ diagram was fitted to determine the stress relaxation rate of the reset spring. Based on different structural parameters such as wire diameter d , outer diameter D , pitch t and so on, the corresponding relationship between the structural parameters of the reset spring and the stress relaxation rate is obtained, which provides a basis for improving the service life of the reset spring.

Keywords

Resetting Spring, Spring Relaxation Theory, Stress Relaxation, Finite Element Analysis

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在高压断路器设备中，欠压脱扣器起着重要的保护作用。当高压断路器电压下降到额定工作电压的35%时，欠压脱扣器闭合使断路器停止工作。欠压脱扣器的关键部位是安装于外部的操动装置，该装置采用复位弹簧来实现储能。高压断路器一般使用寿命为20年，为评估满足服役要求下复位弹簧的储能性能，对其主要失效形式应力松弛进行仿真分析研究。

弹簧失效的模式并非单一，应力松弛是其最主要的失效模式[1][2]。长期工作的弹簧元件，必须考虑应力松弛对其工作性能的影响[3][4]，避免因弹簧元件性能衰退造成机构或系统无法实现预定功能。

国内外研究者，如：Goyal S [5]等针对2.25Cr-1Mo铁素体铁焊接件进行了823 K温度下应力范围为100~240 MPa的蠕变试验，采用有限元方法针对IV型裂纹行为进行了预测；Grachev.SV [6]考虑钢制弹簧条的碳含量在0.1%~1.0%之间对其机械性能的影响，研究表明硬化弹簧条的抗松弛性是回火温度和碳含量的函数；Seshadri等[7]采用广义局部应力应变法(GLOSS)以单轴应力松弛为基础建立了多轴应力松弛方程；李腾[8]对不同温度 and 不同载荷下弹簧试样的蠕变和应力松弛进行了研究，通过退化函数和Arrhenius模型对弹簧温室下蠕变和应力松弛服役寿命进行了预测；农鑫和高金忠[9]对100°C、140°C、180°C和220°C下的1Cr18Ni9弹簧进行了应力松弛试验，发现了100°C松弛过程一阶段和二阶段时间拐点较其它温度不明显，并通过从微观的松弛机理分析了100°C松弛曲线呈现的不同趋势；王柯和师俊平[10]设计搭建了弹簧应力松弛连续动态测试装置，基于蠕变理论及弹簧受力特点得到了蠕变本构方程，测得了仿真结果和实验误差相差不大于4%；金丹和刘兵[11]采用Abaqus对60Si2Mn钢制弹簧在同一应力水

平下不同温度的应力松弛实验结果进行了有限元模拟，应力松弛模拟结果与实验结果吻合较好，随着温度的升高，模拟结果与实验结果误差值逐渐变大；周勇和周北岳[12]基于 ANSYS 分析了断路器弹簧，对初始应力的大小与蠕变应力松弛速率进行了研究；赵华和王延喜[13]基于硅锰合金弹簧钢扭转应力松弛实验提出了新的动力学方程，将其嵌入 Abaqus，利用 Creep 子程序修正时间硬化蠕变模型，对 400℃下的硅锰合金弹簧钢扭转应力松弛行为进行了数值模拟。

综上，国内外研究者目前主要以温度和载荷为变量对弹簧进行应力松弛研究，未从弹簧结构参数角度进行应力松弛分析。

本文基于高压断路器的服役条件、松弛动力学曲线和传统松弛理论建立欠压脱扣器操动装置用复位弹簧的应力松弛模型，分析不同结构参数下复位弹簧应力松弛率的变化规律，提出减小复位弹簧应力松弛的措施，具体流程图如图 1 所示。

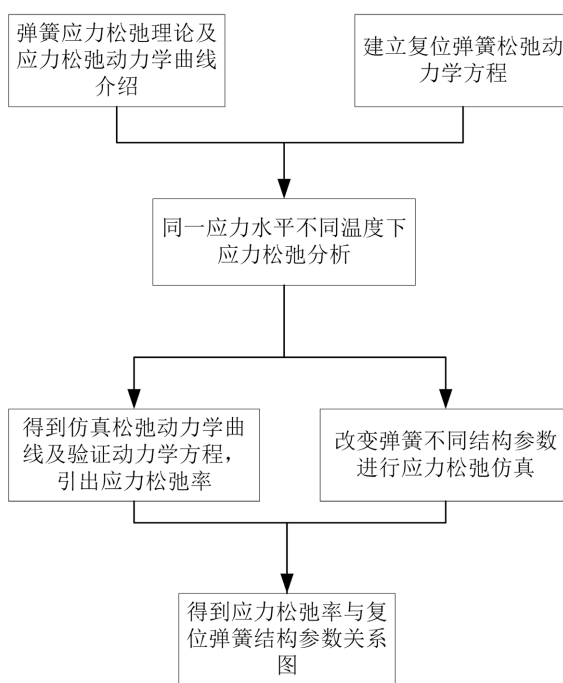


Figure 1. Stress relaxation simulation flow chart of the reset spring

图 1. 复位弹簧应力松弛仿真流程图

2. 复位弹簧应力松弛模型建立

2.1. 弹簧应力松弛理论简介

图 2 所示的典型应力松弛曲线一般分为两个阶段：ab 段为第 I 阶段，第 I 阶段持续时间较短，在该阶段内应力随时间急剧下降，但下降速度逐渐降低，趋于一个平稳值；bc 段为第 II 阶段，第 II 阶段应力随时间延续而缓慢降低，甚至趋向一恒定值，且接近线性[14]。

由此可知应力松弛过程可用应力松弛曲线来描述。应力松弛曲线的各项特性指标中，松弛率最为重要。应力松弛有多种表达方式：

1) 用应力形式表示： $\frac{\sigma_0 - \sigma}{\sigma_0} \times 100\%$ 或 $\frac{\tau_0 - \tau}{\tau_0} \times 100\%$ 。

2) 用负荷损失率形式表示： $\frac{\Delta P}{P_0} \times 100\%$ 。

因需描述在发生应力松弛时弹簧的应力松弛率和自身结构参数之间的关系，故选用负荷损失率的表示方法。由此获得复位弹簧松弛的动力学基本方程[4]为：

$$\Delta P/P_0 = A + B \ln t_R \tag{1}$$

其中， p_0 为弹簧初始载荷； ΔP 为弹簧载荷损失量； A, B 为温度相关参数； t_R 为松弛时间。

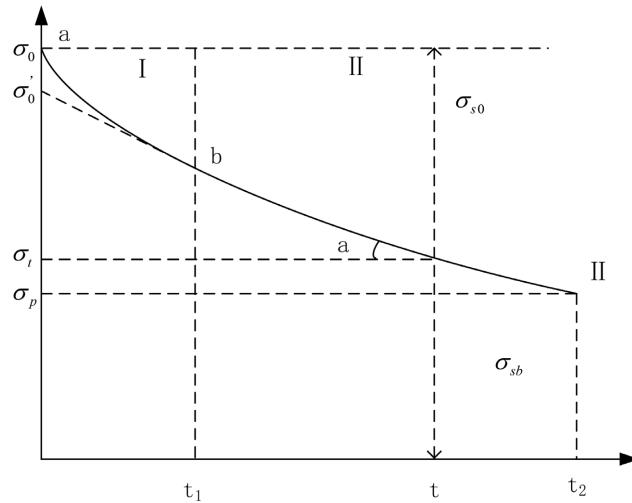
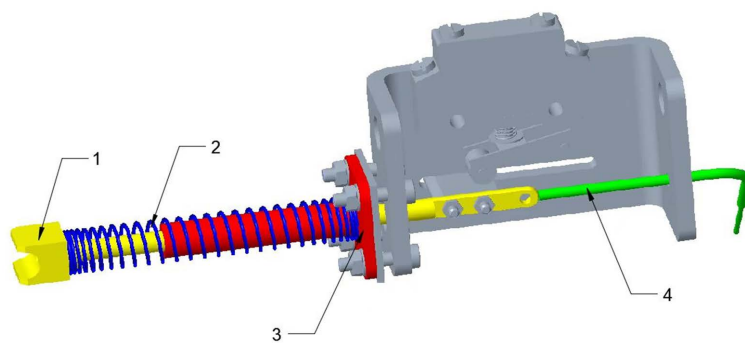


Figure 2. Typical stress relaxation dynamics curves
图 2. 典型的应力松弛动力学曲线

2.2. 欠压脱扣器操动装置建模

欠压脱扣器操动装置的工作原理如下：用复位弹簧 2 套在 U 型块圆柱 1 和圆柱支座 3 外，当拉动拉锁软管 4 进而带动 U 型块 1 移动时，圆柱支座 4 挤压复位弹簧 2 压缩且同步移动。其三维模型如图 3 所示。



1-U 型块圆柱，2-复位弹簧，3-圆柱支座，4-拉锁软管。

Figure 3. 3D model of undervoltage trip operating device
图 3. 欠压脱扣操动装置三维模型

2.3. 复位弹簧有限元模型建立

基于 ANSYS-SCDM 采用右旋方式建立复位弹簧有限元模型(图 4)，具体参数如下：弹簧外径 $D = 12$

mm, 弹簧丝直径 $d = 1.2$ mm, 节距 $t = 3$ mm, 自由高度 $h = 72$ mm, 复位弹簧上下端各增加高度 $h_1 = 4$ mm, 节距 $t = 1.5$ mm 的弹簧圈数 $n = 2$, 且两端削平, 以便施加载荷作用。

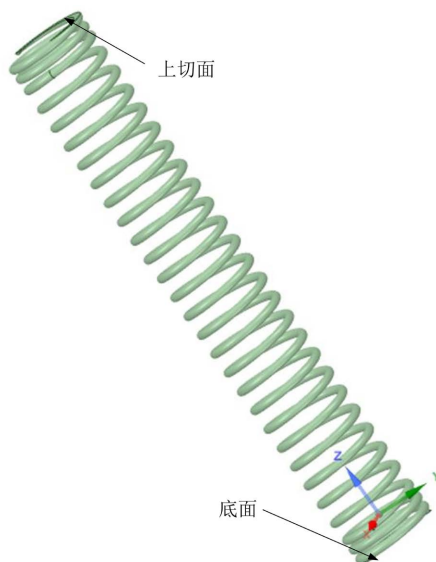


Figure 4. Finite element model of reset spring
图 4. 复位弹簧有限元模型

2.4. 不同温度下复位弹簧应力松弛仿真

以温度为应力松弛仿真模拟条件, 一般要求温度点不少于 4 个[10]。若条件设置越多, 建立的加速方程越精确, 但对应的样本数也会增加[10]。这里选定 100℃、150℃、200℃、250℃、300℃五个温度点对复位弹簧有限元模型进行应力松弛仿真分析。

在 ANSYS 中选用蠕变方程并输入蠕变常数, 导入 SCDM 并建立复位弹簧模型。在 workbench 中改变温度数据, 得到 100℃、150℃、200℃、250℃、300℃下复位弹簧的应力随时间变化规律, 如图 5 所示。

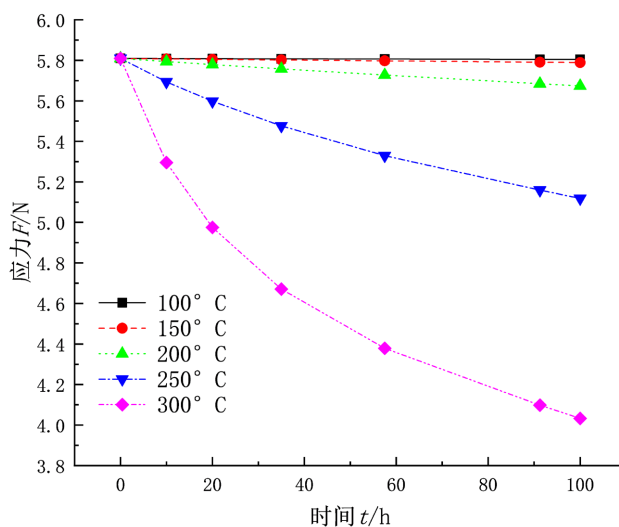


Figure 5. Stress relaxation curves at different temperatures
图 5. 不同温度下的应力松弛曲线

由图 5 可知, 各温度下的应力松弛曲线变化趋势相同, 即各温度应力松弛过程表现出两个阶段: 第一阶段曲线斜率较大, 表明应力衰减迅速, 持续时间短; 第二阶段, 曲线斜率较小, 持续时间较长, 表明应力衰减逐渐平缓, 松弛率也趋向定值。

图 5 中弹簧应力与时间呈非线性关系, 现对各温度下复位弹簧的仿真曲线做线性处理。以时间对数 lnt 为横坐标, 负荷损失率 $\Delta P/p_0$ (其中 p_0 为初载) 为纵坐标, 分别对 100℃、150℃、200℃、250℃、300℃ 五个温度点复位弹簧的仿真曲线进行处理, 如图 6 所示。

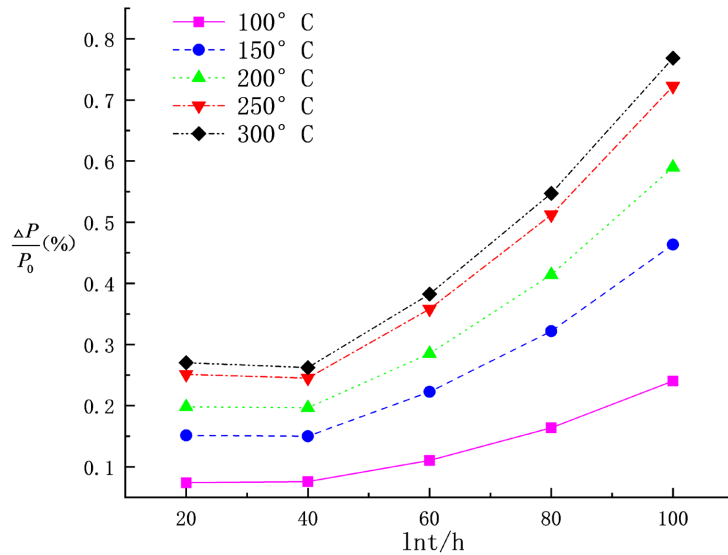


Figure 6. Relationship between load loss rate and logarithm of time
图 6. 负荷损失率与时间对数关系

由图 6 可知, 经处理复位弹簧的不同温度下的应力松弛曲线呈线性关系, 说明负荷损失率与时间对数成正比。即在相同初始载荷下, 直线斜率即是应力松弛率, 可表示为:

$$v_s = d\left(\frac{\Delta P}{P_0}\right) / d(lnt) \tag{2}$$

由式(2)可知, 复位弹簧的应力松弛率随温度升高而增大, 对应力松弛率表达式两边积分得:

$$\Delta P/P_0 = C + v_s lnt \tag{3}$$

其中, $\Delta P/P_0$ 为负荷损失率; C 为积分常数。

由此拟合出式(3)与上述松弛动力学通式(1)吻合, 说明通过复位弹簧应力松弛仿真分析得到应力与时间的非线性关系, 通过拟合外推为负荷损失率与时间对数 lnt 关系, 符合复位弹簧应力松弛基本动力学方程[4]。

3. 复位弹簧的应力松弛分析

3.1. 蠕变参数设定

根据欠压脱扣操动装置用复位弹簧 2 模型(图 2), 建立右旋复位弹簧的有限元模型。

基于 workbench 采用 Norton 公式[15]得到蠕变常数见表 1。

Table 1. Creep constants
表 1. 各温度下的蠕变分析参数

温度/°C	幂律指数	等效应力阶数	时间阶数
25°C	3.97E-22	6.42	-0.021
200°C	5.43E-21	6.33	0.0076

3.2. 复位弹簧边界设定及网格划分

如图 4 所示，复位弹簧上切面为载荷施加面，且整个弹簧只保留 Z 方向自由度；弹簧底面为固定平面。施加载荷选用压缩 10 mm 位移量作为应力松弛模拟的加载量。

在 workbench 中，对复位弹簧模型进行网格划分，弹簧单元选择 SOLID186 类型单元，获得了 16,984 个弹簧单元，其中复位弹簧的部分网格如图 7 所示。



Figure 7. Meshing of finite element model of reset spring
图 7. 复位弹簧有限元模型网格划分

3.3. 不同结构参数复位弹簧应力松弛仿真

复位弹簧结构参数为原始值时，即弹簧线径 $d = 1.2$ mm，外径 $D = 12$ mm，节距 $t = 3$ mm。改变复位弹簧不同结构参数，得到 15 类复位弹簧的三维模型，见表 2。在 ANSYS 中对每个复位弹簧模型设定相同条件下，即在 200°C 试验温度和压缩 10 mm 位移量下进行应力松弛分析。

Table 2. Structural parameters of spring
表 2. 弹簧结构参数

变量	原始值	最小值	最大值	增量
线径 d /mm	1.2	1	1.4	0.1
外径 D /mm	12	10	14	1
节距 t /mm	3	2.8	3.2	0.1

在 workbench 中对复位弹簧进行应力松弛模拟。当温度增加到 300°C 时，复位弹簧应力松弛现象明显。如图 5 所示，在 300°C 时应力随时间变化明显，复位弹簧储能效果降低，第一阶段曲线斜率变化大，表明应力衰减迅速，持续时间短；第二阶段，曲线斜率变化较小，持续时间较长，表明应力衰减逐渐平缓，松弛速率也趋向定值，应力衰退值大。

为降低复位弹簧应力松弛特性的影响，不改变温度载荷，研究复位弹簧的结构参数对应力松弛特性的影响，分别进行 15 类不同结构参数复位弹簧应力松弛仿真，得到 200°C 下的复位弹簧的应力 - 时间曲线如图 8 所示。

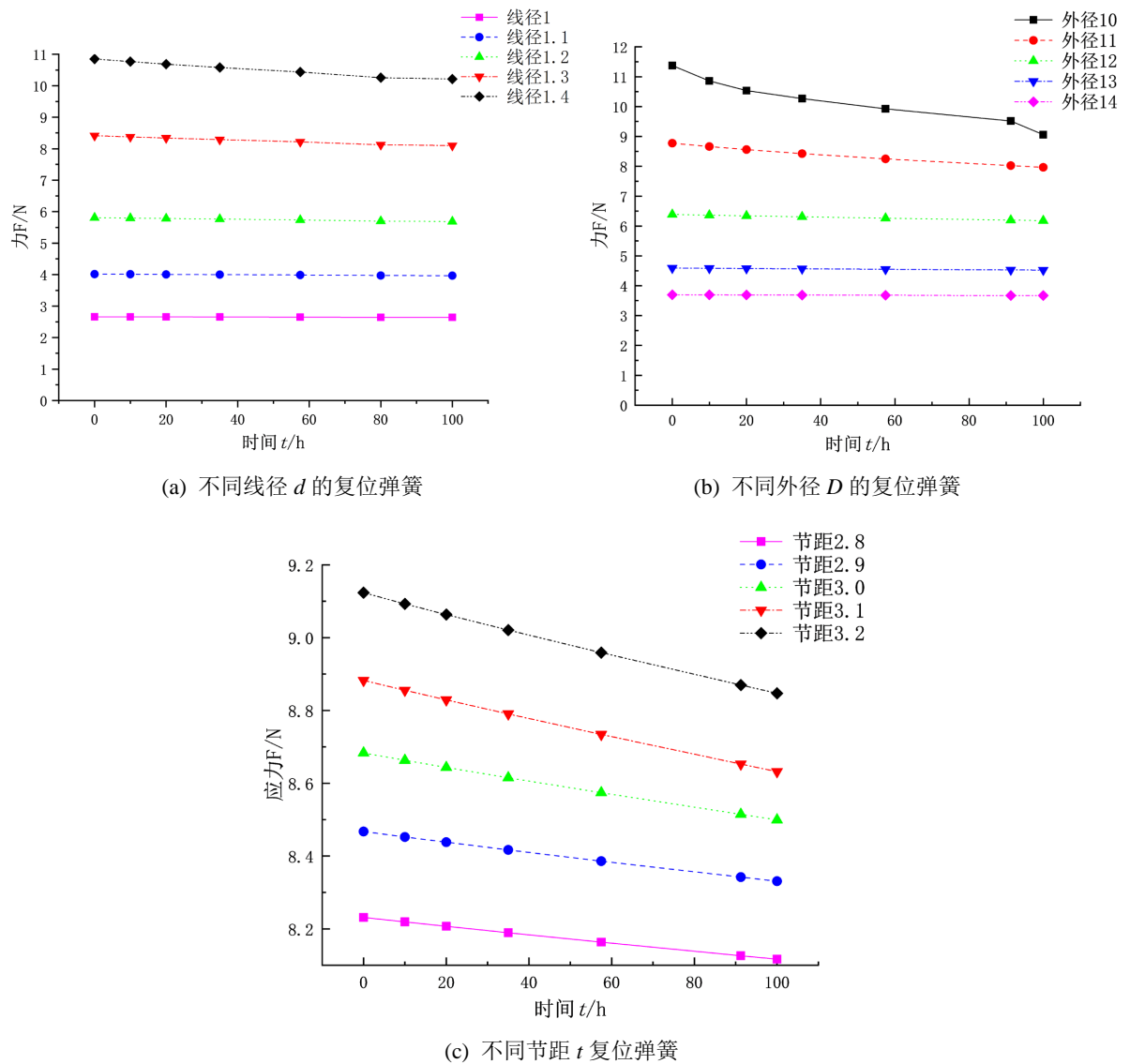


Figure 8. Relationship between reset spring stress and time under different structural parameters
图 8. 不同结构参数下复位弹簧应力与时间关系

另外，为研究复位弹簧结构参数对应力松弛特性的影响，对以上不同结构参数的复位弹簧应力 - 时间曲线通过公式(1)转化为负荷损失率和 $\ln t$ 图，如图 6 所示。

由公式(2)可知，弹簧的应力松弛率是负荷损失率和 $\ln t$ 曲线图的斜率，由此可把图 8 拟合为负荷损失率和 $\ln t$ 关系图；再通过计算负荷损失率和 $\ln t$ 图的斜率(应力松弛率)，得到复位弹簧的应力松弛率和结构参数关系图，如图 9 所示。

由图 9 可知，复位弹簧应力松弛率随复位弹簧的线径和节距递增，复位弹簧应力松弛率随复位弹簧的外径递增而变小。复位弹簧的线径 d 、外径 D 、节距 t 对于复位弹簧应力松弛特性呈非线性影响。所以原来复位弹簧外径 $D = 12 \text{ mm}$ ，丝径 $d = 1.2 \text{ mm}$ ，节距 $t = 3 \text{ mm}$ 在考虑应力松弛的基础上，复位弹簧结构参数为外径 $D = 14 \text{ mm}$ 、丝径 $d = 1.0 \text{ mm}$ 、节距 $t = 2.8 \text{ mm}$ 应力松弛特性差，可以提高复位弹簧使用寿命。

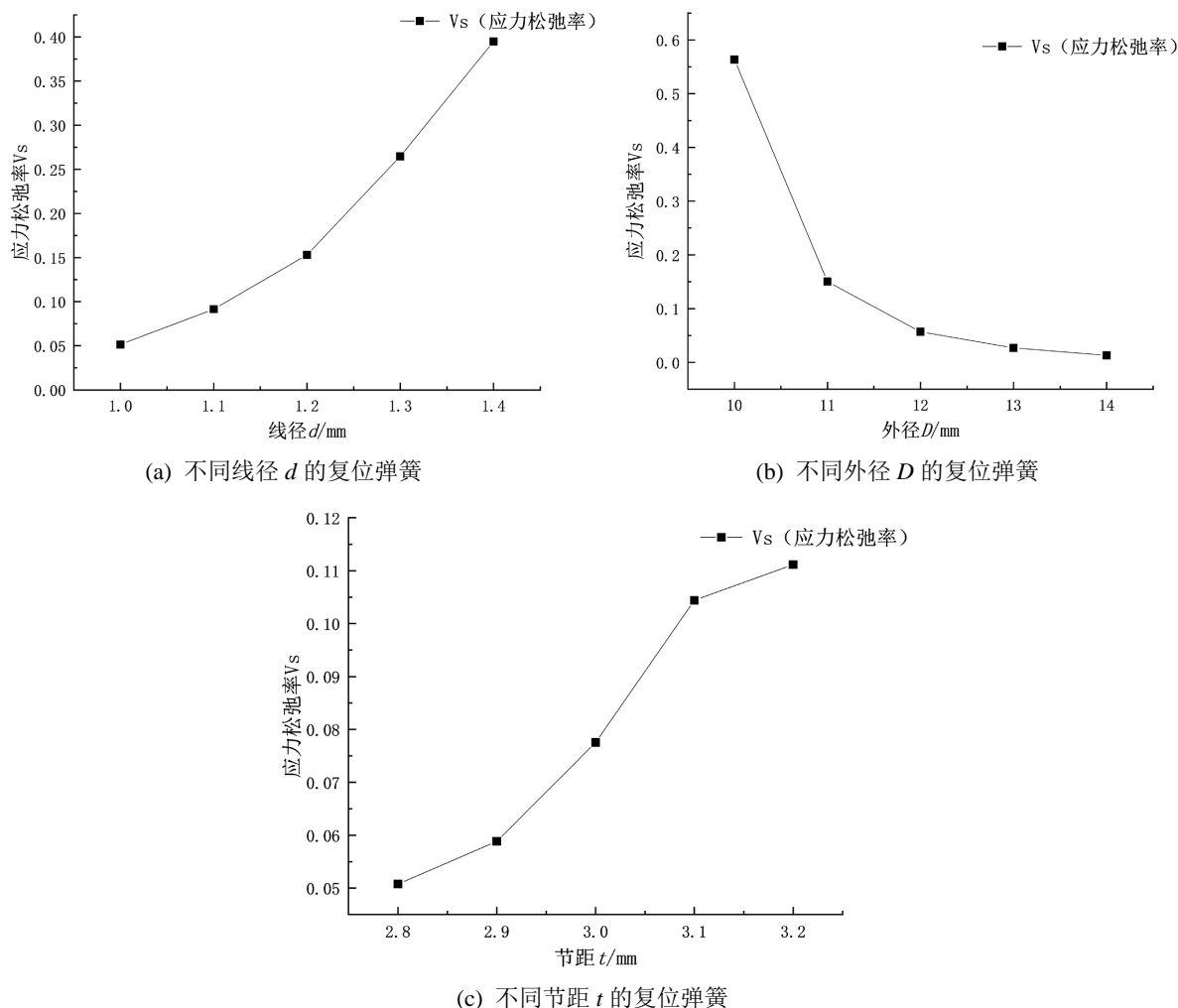


Figure 9. Relationship of stress relaxation rate of reset spring under different structural parameters
图 9. 不同结构参数下复位弹簧的应力松弛率关系

4. 结论

基于 workbench 的蠕变模块对某型高压断路器用欠压脱扣器操动装置复位弹簧进行了应力松弛仿真分析，得到了弹簧应力松弛率随结构参数线径 d 、外径 D 、节距 t 的变化规律，主要结论如下：

1) 当复位弹簧节距 t 增加 0.1 mm 时，应力松弛率 V_s 提高 1.51%；当线径 d 增加 0.1 mm 时，应力松弛率 V_s 提高 8.58%；当外径 D 增加 1 mm 时，应力松弛率 V_s 降低 13.76%。复位弹簧外径 D 和线径 d 对应力松弛特性的影响较大，节距 t 次之。

2) 使用 workbench 进行应力松弛仿真分析，仿真分析的应力松弛曲线与经典应力松弛动力学曲线同一规律，验证应力松弛理论和仿真的正确性。

3) 分析弹簧结构参数对于应力松弛特性的影响，得出外径 D 和线径 d 是影响复位弹簧应力松弛速率的主要参数，为提高弹簧服役寿命提供理论指导。

基金项目

国家重点研发计划项目(2018YFB1308100)；国家自然科学基金项目(51375458)。

参考文献

- [1] Xin, F., Liu, Z.C., Wang, S., *et al.* (2018) Study of Heat Transfer in Oscillatory Flow for a Stirling Engine Heating Tube Inserted with Spiral Spring. *Applied Thermal Engineering*, **143**, 182-192. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.07.071>
- [2] 张保山, 王永平, 李志勇, 彭良明. 60Si2Mn 螺旋弹簧的压缩应力松弛行为与贮存寿命预测[J]. 实验力学, 2011, 26(6): 699-706.
- [3] Yang, Y., Zhan, L., Liu, C., *et al.* (2019) Stress-Relaxation Ageing Behavior and Microstructural Evolution under Varying Initial Stresses in an Al-Cu Alloy: Experiments and Modeling. *International Journal of Plasticity*, **127**, Article ID: 102646. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2019.102646>
- [4] 王廷喜. 弹簧钢的应力松弛行为研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2012.
- [5] Goyal, S., Laha, K., Chandravathi, K.S., *et al.* (2011) Finite Element Analysis of Type IV Cracking in 2.25Cr-1Mo Steel Weldment Based on Micro-Mechanistic Approach. *Philosophical Magazine*, **23**, 3128-3154. <https://doi.org/10.1080/14786435.2011.570279>
- [6] Grachev, S.V. (2012) Effect of Carbon on Mechanical Properties and Resistance to Stress Relaxation of Steel Spring Strips. *Metal Science and Heat Treatment*, **54**, 160-164. <https://doi.org/10.1007/s11041-012-9474-7>
- [7] Seshadri, R. (1993) Multiaxial Relaxation and Creep Damage Assessments—A Comparison of ASME N-47 and GLOSS Time-Scaling Methods. *Journal of Pressure Vessel Technology*, **115**, 32-37. <https://doi.org/10.1115/1.2929492>
- [8] 李腾. 0Cr18Ni9 不锈钢弹簧蠕变和应力松弛研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- [9] 农鑫, 高金忠, 吴俊武, 师春生, 赵乃勤. 1Cr18Ni9 钢螺旋压缩弹簧应力松弛机理[J]. 金属热处理, 2022, 47(1): 106-112.
- [10] 王柯, 师俊平, 金朋. 螺旋压缩弹簧应力松弛特性试验分析及其应用[J]. 应用力学学报, 2021, 38(1): 158-165.
- [11] 金丹, 刘兵, 吕春堂. 60Si2Mn 钢制弹簧应力松弛行为预测[J]. 化工机械, 2020, 47(3): 359-362.
- [12] 周勇, 周北岳, 李荣华, 李小松. 断路器弹簧应力松弛研究[J]. 机械研究与应用, 2009, 22(4): 36-38.
- [13] 赵华, 王廷喜, 王萌, 牛瑛奎. 硅锰合金扭簧应力松弛行为研究[J]. 固体力学学报, 2014, 35(4): 410-416.
- [14] 王阳英夫. 高压断路器的机械可靠性分析及寿命评估[D]: [硕士学位论文]. 南京: 东南大学, 2017.
- [15] 刘卫卫. 60Si2Mn 钢热机械损伤行为研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.