

铁路信号继电器二次吸合机理 分析及参数测量计算

李文华, 郑 杭, 王立国, 周露露

(河北工业大学 电气工程学院, 天津 300130)

摘 要: 铁路信号继电器工作是否可靠将极大地影响铁路通信系统的稳定性及可靠性。以铁路信号继电器作为研究对象, 对触点电压、线圈电流和线圈电压的高速数据进行采集, 对采集的数据进行频谱分析和滤波器滤波, 去除噪声干扰, 通过电磁继电器的电磁机构动作原理分析二次吸合现象产生的机理, 研究了二次吸合时刻 t_6 的计算方法, 得出继电器的时间参数。同时分析了时间参数与继电器可靠性之间的关系。通过与实测数据进行对比, 证明精度达到了设计要求。

关键词: 铁路信号继电器; 二次吸合; 机理分析; 参数测量

中图分类号: TM581; U284.71

文献标识码: A

doi: 10.13890/j.issn.1000-128x.2018.01.015

Mechanism Analysis and Parameter Calculation of Second Time Close for Railway Signal Relay

LI Wenhua, ZHENG Hang, WANG Ligu, ZHOU Lulu

(School of Electrical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

Abstract: The reliability of railway signal relay will greatly affect the stability and reliability of the communication system. By using the railway signal relay as the sample, the high speed-data acquisition of the relay contact voltage, coil current and coil voltage was completed. In order to remove the noise interference, the collected data were analyzed by frequency spectrum and filter filtering. Based on the principle of electromagnetic mechanism of electromagnetic relay, the mechanism of the second time close was analyzed, and the calculation method of close time t_6 was studied, then the time parameters of relay were obtained. In addition, the relationship between time parameters and relay reliability was described. The accuracy of the test system was proved meet the design requirement by compared with the measured data.

Keywords: railway signal relay; second close; mechanism analysis; parameter test

0 引言

近年来, 继电器的可靠性对通信系统、电力系统可靠性的影响日益严重, 甚至可能威胁整个系统的安全运行^[1]。对继电器可靠性的检测有利于提高系统工

作的可靠性, 减少事故发生。因此, 国内外学者越来越重视电磁继电器参数的自动化检测和计算分析^[2]。

时间参数是影响继电器可靠性的主要参数之一。结合继电器时间参数和接触电阻等主要参数, 可以综合判断继电器的可靠性。

随着科技的快速发展, 结合虚拟仪器技术, 采用先进的技术手段建立精确、快速的继电器时间参数检

收稿日期: 2017-03-28; 修回日期: 2017-04-21

基金项目: 河北省自然科学基金项目(E2016202206); 河北省高等学校创新团队领军人才培养计划项目(LJRC003)

测和分析系统, 对实时检测继电器的时间参数及在线分析继电器的可靠性, 具有重要的理论和实际意义^[3]。

1 二次吸合波形特征分析

1.1 频谱分析与滤波

铁路信号继电器时间参数测试系统的目标测试参数有线圈电流、线圈电压、触点压降以及继电器相关时间参数。本文重点研究了衔铁完全闭合时刻 t_6 的计算方法。

本文设计的铁路信号继电器时间参数测试系统是以 PCL-720 数字输入输出控制卡为核心控制单元, 通过控制卡的数字量输出控制固态继电器的通断, 进而实现对继电器线圈的通断电操作^[4], 用 PCI-1747 和 PCI-1713 模拟量采集卡采集触点电压、线圈电流、线圈电压等信号。

由于本测试和分析系统是在实际环境下运行, 肯定会有噪声干扰, 而且电流信号仅几毫安到十几毫安, 所以要进行频谱分析和滤波, 使后续的计算和分析更为准确^[5]。

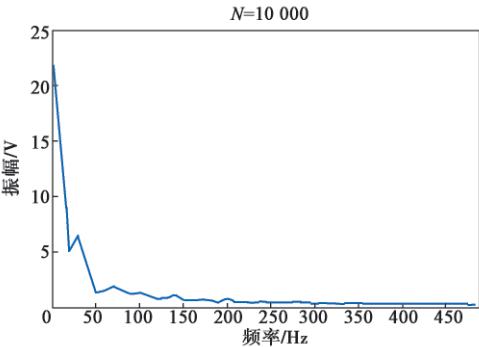
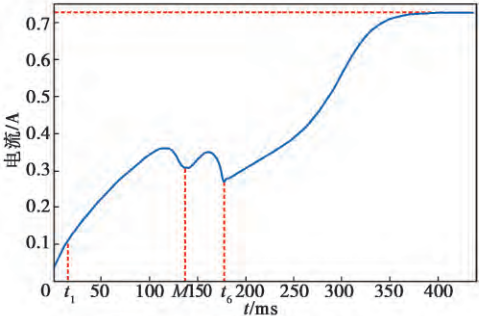


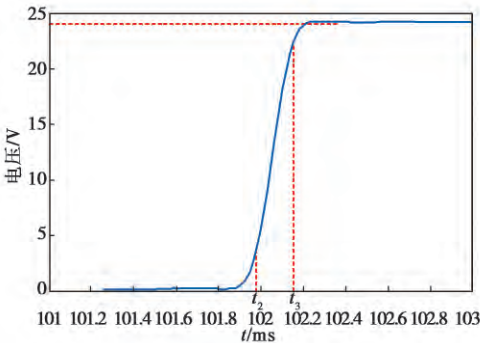
图 1 采集信号的频谱分析图

从频谱分析图 1 上可以看出, 频率小于 50 Hz 时, 系统所采集的信号幅值较大, 是我们所需要的信号; 频率大于 50 Hz 时, 信号的幅值比较小, 而且逐渐衰减, 是需要排除的干扰信号。由此可见: 系统信号频率应小于 50 Hz。我们选择低通滤波器, 截止频率设置为 50 Hz。

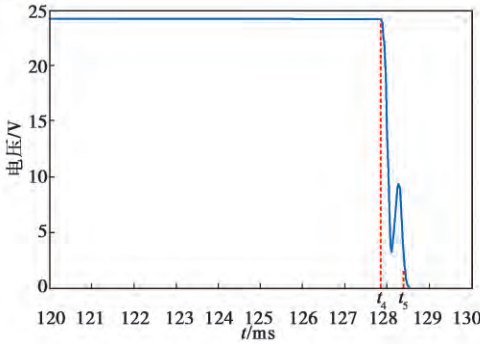
将频率归一化, 即截止频率除以采样频率的一半称为数字截止频率。如采样频率为 100 kHz, 截止频率为 50 Hz, 则数字截止频率为 0.001 Hz, 经过低通滤波器滤波之后的波形如图 2 所示。



(a) 线圈电流波形



(b) 常闭触点电压波形



(c) 常开触点电压波形

图 2 继电器吸合过程中线圈电流、触点压降波形图

1.2 二次吸合机理分析

图 3 是另一种型号继电器的线圈电流波形, 没有动触点与静触点不实闭合的过程。下面从继电器的磁路原理分析这 2 类继电器吸合特性的差异。

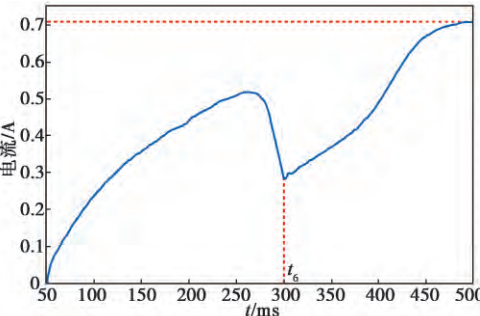


图 3 另一种型号继电器的线圈电流波形
根据磁路欧姆定律有磁通量计算公式 (1):

$$\phi = \frac{F}{\sum_{k=1}^n R_m k} \tag{1}$$

$$R_m = \frac{l}{\mu S}, \quad F = NI$$

式中: F 为安匝数; l 为磁路长度, μ 为磁导率, S 为磁路截面积。

根据磁路电压平衡方程式可得

$$L \frac{di}{dt} = U - iR - NS' \frac{d\phi}{dt} \tag{2}$$

式中: U 为励磁电源电压; R 为励磁线圈电阻; L 为励磁线圈电感; S' 为电磁线圈截面积。

式 (2) 是继电器磁路平衡的电压方程, 用于分析线圈电流的变化过程。

本文研究的继电器有 2 次吸合状态。在给继电器线圈线性加压的过程中，当继电器常开触点与静触点发生初次闭合（不实闭合）时^[6]，称为一次吸合。当衔铁与线圈铁心初次闭合时，常开触点与静触点第一次紧密吸合，称为二次吸合^[7]。

一次吸合现象产生的机理：继电器通电之后，线圈电流呈指数增长；电磁力克服弹簧的拉力，衔铁开始运动，此时电流不再呈指数增长，而是增速放慢，同时衔铁快速向电磁线圈铁心移动，常开触点与静触点发生初次不实闭合，此时气隙迅速减小，使 R_m 减小，从而磁通量增大，使励磁电流产生突降。

二次吸合现象产生的机理^[13]：线圈电流继续增大，电磁力能克服释放弹簧拉力与连接动触头的弹簧片弹力，弹簧片弯曲，衔铁继续向电磁铁移动，使励磁电流又一次产生突降；当运动到衔铁第一次与励磁线圈铁心接触时，励磁线圈电流开始上升。

另一种型号的继电器所用弹簧的弹性系数较大，在触动时刻与衔铁闭合 t_6 时刻之间，衔铁做自由运动，直到电磁力足够大，才能使弹簧拉长足够的长度，从而衔铁与励磁线圈铁心完全闭合^[8]，动触点与静触点紧密接触。

2 时间参数计算与分析

电磁继电器的主要时间参数如表 1 所示。

表 1 继电器的主要时间参数

项目	时间范围
触动时间	$0 \sim t_1$
动断超程时间	$t_1 \sim t_2$
燃弧时间	$t_2 \sim t_3$
开距时间	$t_2 \sim t_4$
触点回跳时间	$t_4 \sim t_5$
动合超程时间	$t_4 \sim t_6$
吸合时间	$0 \sim t_4$
释放时间	动触点与动合静触点第一次接触的时间间隔

2.1 二次吸合时刻 t_6 分析

计算电磁继电器的 8 个主要时间参数的关键在于确定 t_1 、 t_2 、 t_3 、 t_4 、 t_5 、 t_6 这 6 个时刻。试验时，采集到的数据常常会有噪声干扰叠加，为了降低干扰信号对精度的影响，提升曲线的光滑度，一般都需要对采样数据进行平滑处理^[9]。

时刻 t_6 的计算方法如下：先确定时刻 t_m ，再确定 A' 点，最后结合多重标准确定时刻 t_6 。图 4 中的线圈电流波形是经过平滑处理后的线圈电流波形，其干扰已经基本消除。如图 4 中所示，局部最小点 M 的求解过程分为以下 2 个步骤（ A 点的求解和 M 点的求解）：

①采用逐点比较搜索法求 t_a ，当搜索到 A 点时，它与其后面的数据点比较得出的结果是有连续的很多点都比它小，而且是一个比一个小，以此为判据，确定 A 点对应的时刻 t_a 。

②令 M 点的时刻为 t_m ，用步长减半搜索法求 M 点，即获得 A 点对应的的时间值 t_a 后，数据点向前增加步长 L_0 ，判断该点值大小，如果比当前值小，则以此点为基础再向前迈进 L_0 点，直到点 B ，此时再向前迈进步长 L_0 后，得到 C 点值，其数值比当前点 B 的值大，这样就把局部最小值点 M 限定在 BC 两点之间；然后把步长减半，再判断，直到点 D ，其值比 B 点值小，把 M 点进一步限制在 BD 之间，然后以 D 点为基础，不断重复之前的步骤就可以得到时间点 t_m ，并保存下来。

获得 t_m 之后，以 t_m 为基准再次利用搜索 A 点时的方法来搜索 A' 点；重新利用搜索 M 点的方法来搜索 t_6 时刻。

这样，就确定了 t_6 和 t_m 这 2 个时刻，从而将 t_6 的范围限制在 t_m 和 t_6 2 个时刻。 t_6 求解图如图 4 所示。

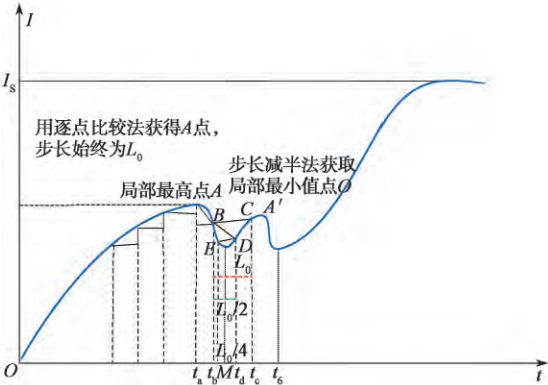


图 4 时刻 t_6 求解图

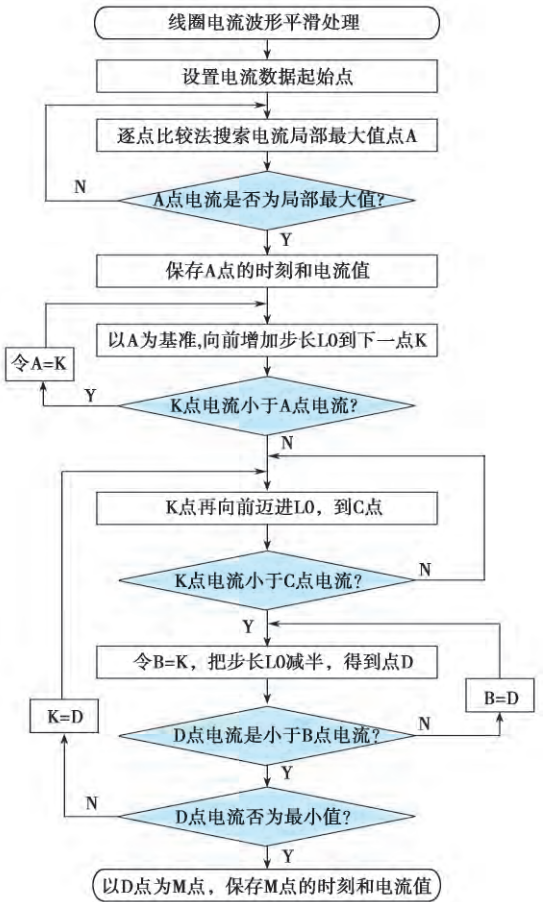


图 5 时刻 t_m 求解流程图

先以 1 号继电器为例说明本算法的可行性。搜索 A 点时, 步长选择为 1 ms, 这样做效率低一些, 但是精确度高; 搜索 M 点时, 步长选择为 20 ms; 搜索 A' 时选择步长为 1 ms; 搜索 t_6 时, 步长选择为 10 ms。

表 2 时刻 t_6 检测结果误差比较

时刻	示波器测量值 /ms	程序检测值 /ms	误差结果 /%
t_a	116	114.8	1.04
t_m	139	140.2	-0.86
t_a'	160	159.2	0.20
t_6	178	177.3	0.39

对表 2 中的误差结果数据进行分析可知, 误差均在 2% 以内, 基本满足设计要求, 可以比较准确地搜索到 t_m 和 t_6 。接下来, 只需从 t_m 和 t_6 中取出 t_6 。 t_m 在数值上小于 t_6 , 此条件可作为判断标准之一。但仅此一个判断标准势必会影响求解精度, 因为大于 t_m 的时刻有很多, 若之前算法捕捉的 t_6 偏差较大, 则后续的求解也会出现较大偏差。所以, 需从该型铁路信号继电器的电磁动作原理上寻找某种特征, 作为更高要求的判断标准。

表 3 二次吸合线圈电流值占线圈电流稳定值的比例

继电器	数据组数	线圈电流值 /A		线圈电流稳定值 /A	占线圈电流稳定值比例 /%	
		t_m 时刻	t_6 时刻		t_m 时刻	t_6 时刻
1	1	0.306	0.28	0.731	41.8	37.6
	2	0.309	0.27	0.719	42.9	38.1
	3	0.307	0.27	0.723	42.5	38.0
2	1	0.361	0.27	0.724	49.8	37.7
	2	0.361	0.27	0.721	20.0	38.0
	3	0.363	0.27	0.723	50.4	37.8
3	1	0.342	0.28	0.733	46.4	38.4
	2	0.344	0.28	0.732	47.0	38.1
	3	0.341	0.28	0.736	46.3	37.9
4	1	0.324	0.28	0.728	44.5	38.2
	2	0.323	0.27	0.727	44.4	37.7
	3	0.322	0.27	0.727	44.2	37.1

由表 3 中数据可知, t_6 时刻的电流值占线圈电流稳定值的比例始终在 37%~39% 范围内, 而且波动范围较小, 这是由铁路信号继电器的电磁动作结构的特点决定的。

经过分析可知, 一次吸合是动静触头的不实闭合。随着励磁电流继续增大到某一值, 电磁力使连接动触头的簧片产生变形, 衔铁继续向电磁线圈铁心移动并最大限度紧密接触^[10], 形成的动静触头的更可靠接触称之为二次吸合。

可见二次吸合时, 衔铁与电磁线圈铁心是稳定接触^[11]。由式(2)可知, 二次吸合时, 气隙磁路长度为 0, 此时式(2)可简化为:

$$L \frac{di}{dt} = U - iR$$

(3)

由式(3)可知, 对同一型号的产品励磁电源电压、

励磁线圈电阻、励磁线圈电感不变, 线圈电流在衔铁完全闭合时刻时为一个定值, 并可由式(3)求得。所以, 二次吸合线圈电流值占线圈电流稳定值的百分比也是不变的。

二次吸合时线圈电流值占线圈电流稳定值的比例是该型铁路信号继电器的一个特征, 可作为求得 t_6 的更高要求判断标准。表 4 是 t_6 时刻的测试结果及误差比较。

表 4 t_6 时刻测试结果误差比较

继电器	数据组数	程序计算值 /ms	示波器测量值 /ms	误差结果 /%
1	1	175.0	178.0	-1.71
	2	176.0	178.3	-1.31
	3	177.0	179.7	-1.51
2	1	213.2	213.6	-0.18
	2	207.0	207.1	-0.05
	3	199.5	200.6	-0.55
3	1	197.0	198.2	-0.61
	2	199.4	198.0	0.70
	3	197.0	195.3	0.86
4	1	189.0	192.7	-1.98
	2	187.3	186.0	0.72
	3	186.5	188.0	-0.80

2.2 其他时刻的计算

① t_1 时刻的计算。在许多科学试验和实际工程应用中, 研究者们往往先通过各种试验手段获得若干离散的数据, 然后根据这些数据, 如果能够找到一条连续光滑的曲线并建立其离散方程, 使得试验数据与方程的曲线能够达到某种误差指标的最小化, 就可以对曲线方程确定的数据进行数学分析, 并开展进一步的理论研究和预测估计^[12]。

曲线拟合不必严格通过所有数据点, 可适合处理数据量较大、数据有误差的样本^[13]。在对触动时间进行计算分析之前, 利用拟合数据建立触动阶段的电流数学模型如下:

$$i = \frac{U}{R} (1 - e^{-\frac{L}{R}t}) = I_s (1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$$

(4)

式中: I_s 为线圈电流稳定值; τ 为触动阶段的时间常数。

由最小二乘法^[14]算出时间常数 τ 为 13.747 1 ms, 则触动阶段^[15]的线圈电流数学模型如式下:

$$i = 0.731 (1 - e^{-\frac{t}{13.7471}})$$

(5)

② t_2 和 t_3 时刻的计算。燃弧时间是触点电压为开路电压的 10%~90% 之间持续的时间间隔 ($t_2 \sim t_3$)。 t_2 和 t_3 时刻可由常闭触点电压波形图获得。图 2(b) 中 t_2 和 t_3 时刻分别是开路电压的 10% 和 90% 的点。可确定 t_2 时刻为 101.2 ms, t_3 时刻为 101.3 ms。

③ t_4 和 t_5 时刻的计算。根据触点回跳时电压不小于开路电压的 90%, 且脉宽不小于 10 s 的要求, 触点回跳开始时刻 t_4 和结束时刻 t_5 可由常开触点电压波形

图 2 (c) 获得, t_4 为 127.2 ms, t_5 为 127.6 ms。

线圈断电时刻和动触点与动合静触点第一次接触的
时刻分析。图 6 中, a 点对应线圈断电时刻, b 点
对应动触点与动合静触点第一次接触的时刻。 a 点时刻
为 442.4 ms, b 点时刻为 480.6 ms, 可计算出该继电器的
释放时间是 38.2 ms。

本文对 4 组继电器进行了测试, 分析得到了计算
时间参数所需的各个时刻。分析计算出的时间参数如
表 5 所示。

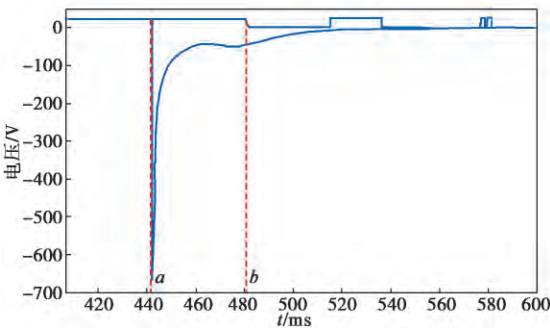


图 6 继电器断电后电压和触点压降波形

表 5 继电器时间参数测试结果

继电器	数据组数	触动时间 /ms	动断超程时间 /ms	燃弧时间 /ms	开距时间 /ms	回跳时间 /ms	动合超程时间 /ms	吸合时间 /ms	释放时间 /ms
1	1	0.56	100.64	0.1	26.4	0.4	47.8	127.2	38.2
	2	0.60	100.30	0.1	25.8	0.5	49.3	126.7	38.7
	3	0.58	101.22	0.1	26.0	0.3	49.2	127.8	39.2
2	1	0.54	96.46	0.1	44.1	0.3	71.7	141.5	37.1
	2	0.57	104.03	0.2	30.8	0.2	71.6	135.4	38.7
	3	0.56	87.03	0.1	44.0	0.3	67.9	131.6	39.2
3	1	0.50	68.10	0.1	59.9	0.2	68.5	128.5	39.6
	2	0.56	65.94	0.3	61.6	0.3	65.9	128.1	39.2
	3	0.52	64.68	0.2	59.6	0.4	72.2	124.8	38.4
4	1	0.59	74.25	0.2	50.86	0.2	63.3	125.7	38.6
	2	0.58	89.80	0.2	30.5	0.4	66.4	120.8	38.4
	3	0.58	93.62	0.3	30.2	0.3	62.1	124.4	38.6

3 时间参数与可靠性的关系

继电器试验条件及参数如表 6 所示。

表 6 继电器试验条件及参数

项目	参数
线圈电压	直流 24 V
负载电压	直流 24 V
负载电流	1 A
负载	24 Ω 电阻
检测参数	接触电阻、接触压降等
计算参数	吸合时间、超程时间、燃弧时间、回跳时间等

继电器失效的主要模式是触点接触不良, 其主要原因是: 超程不足、初压力和终压力过小等。

超程变化的一个主要原因是: 正常使用过程中触点的电磨损。电磨损会导致继电器的超程不断减少, 减少到一定值的时候, 继电器的触点就无法可靠接触。超程难以检测, 而超程所经历的时间容易检测。超程时间可以定量地表征超程的变化情况。

电磨损的主要原因是触点电弧的存在 (燃弧能量和燃弧时间) 和触点回跳。燃弧时间可以定量地表征电磨损的程度。由于触点回跳是发生在电路接通过程中, 而电路中的感性负载在接通时均有较大的冲击电流, 所以触点回跳现象对触点会造成很大危害, 它不仅会加剧触点磨损, 而且会导致触点粘在一起, 影响继电器的可靠性。触点回跳时间表征触点回跳所经历的时间间隔。触点时间参数可以描述触点机械参数的

变化, 触点机械参数的变化直接影响继电器触点接触可靠性, 所以时间参数可以描述触点接触可靠性。

结合继电器时间参数和接触电阻等主要参数, 可以综合判断继电器的可靠性。

时间参数是影响继电器可靠性的主要参数之一, 下面从继电器性能退化的角度分析时间参数与可靠性的关系。

将继电器做试验直至失效, 得到试验期间继电器的时间参数和接触电阻等主要参数的退化趋势。

利用得到的时间参数和接触电阻等主要参数, 选择典型回归函数进行拟合, 根据拟合残差平方和选择最优拟合函数, 选取常用典型回归退化函数 (直线函数、抛物线函数、幂函数、指数函数和对数函数) 组成参数退化模型的函数选择库。

为了从函数选择库中选出拟合数据最佳的函数, 本文采用残差平方和 SSE 作为退化模型拟合精度的评价标准, 其定义如下:

$$SSE = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2$$

(6)

式中: ε_i 为继电器第 i 次动作的参数检测值与退化模型计算值之间的误差。

故 SSE 的实际物理意义为参数退化函数拟合曲线与实际检测值之间的差值。 SSE 小于 0.001 的退化模型就是要选择的参数退化模型。

通过所得到的参数退化模型, 可以 (下转第 76 页)

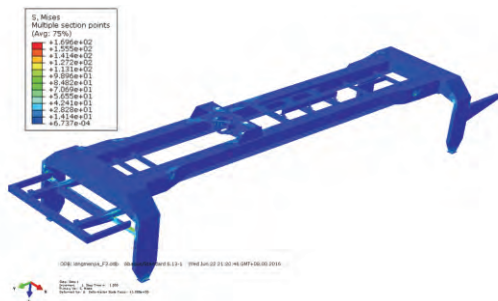


图 14 工况 1 构架应力云图

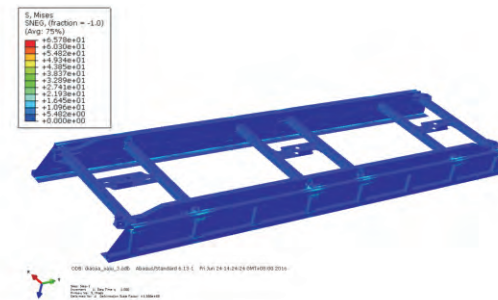


图 15 工况 2 提升平台应力云图

5 结语

采用杆单元和刚性单元对滑轮进行模拟,采用接

触对和刚性单元对提升平台进行有限元装配,对构架和提升平台分别进行了静强度分析和模态分析,同时考虑了结构的静态和动态刚性。分析结果表明,龙门吊钢结构满足强度和刚度要求,现场实践证明采用有限元装配技术的分析结果与实际情况一致。

参考文献:

- [1] 刘金玥. 浅谈大修列车安全作业防护措施与常见故障分析[J]. 科技风, 2014(12): 10.
- [2] 夏春华. P95 大修列车龙门架齿轮箱走行装置的国产化研制[J]. 上海铁道科技, 2014(4): 44-45.
- [3] 范广胜. DXC-500 型大修列车换枕施工技术研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2012.
- [4] 谢素明, 杨文平, 高阳. 高速转向架焊接构架性能仿真建模方法[J]. 大连交通大学学报, 2015, 36(1): 29-32.
- [5] 何鹏秋, 孙秦. 一种基于精确刚度分析的刚性连接单元[J]. 航空工程进展, 2017, 8(1): 68-72.

作者简介: 刘铁军(1975-), 男, 高级工程师, 研究方向为铁路工务机械。

4 结语

本文分析了铁路信号继电器的动态特性, 先对采集信号进行频谱分析, 得出采集信号的频率分布范围, 然后设计适当的滤波器去除噪声。采用定步长比较法、步长减半法搜索二次吸合时刻 t_6 , 获得准确的衔铁完全闭合时刻; 从电磁继电器的电磁动作原理上分析了二次吸合的机理; 结合试验数据, 分析了电磁继电器励磁电流的变化过程, 得出了该型继电器二次吸合线圈电流值占电流稳定值的比例为定值这一特征, 使参数计算结果达到设计要求。最后, 叙述了时间参数与继电器的可靠性之间的关系。

参考文献:

- [1] Song Yixu, Hu Jing. A method for data stream processing based on curve fitting [C]. Dalian, China: 2010 2nd International Conference on Signal Processing Systems, 2010: 542-546.
- [2] Ye Xuerong, Ma Yue, Meng Hang. Degradation failure model of electromagnetic relay [C]. Beijing, China: The 26th international conference on electrical contacts, 2012: 116-123.
- [3] 陆俭国, 张乃宽, 李奎. 低压电器的试验与检测[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007: 30-50.
- [4] 徐广瑞. 直流电磁继电器可靠性测试系统的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.

- [5] 李宏义. 电磁继电器线圈时间常数的检测研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2012.
- [6] 张青森, 陈兴文, 翟国富. 电磁继电器触动时间、超程时间及自由运动时间的测试分析方法[J]. 机电元件, 2003, 23(3): 3-7.
- [7] 杜太行, 刘振海, 耿立辉, 等. 电磁继电器二次吸合电压的研究与测量[J]. 继电器, 2002 (2): 51-53.
- [8] Chen Yu. Research and Design of Multi-channel Programmable Anti-aliasing Filter Circuit [C]. Pasadena, USA: International Joint Conf on Artificial Intelligence, 2009: 845-848.
- [9] Fei Li. Competitive FIFO buffer management for weighted packets [C] // Proceedings of the 7th Annual Communication Networks and Services Research Conf. 2009: 126-132.
- [10] 陆俭国, 王景芹, 陆宾. 电器可靠性工作概况与发展前景[J]. 低压电器, 2014(2): 1-7.
- [11] Yang Zhang, Regan Zane, Aleksandar Prodic. Online calibration of MOSFET on-state resistance for precise current sensing [J]. Power Electronics Letters, IEEE, 2004, 2(3): 100-103.
- [12] Gabriel Eirea, Seth R. Sanders. High Precision Load Current Sensing using On-Line Calibration of Trace Resistance in VRM Applications [C]. Jeju, Korea: The 37th IEEE Power Electronics Specialists Conference, 2006: 1-6.
- [13] 薄志谦, 张保会, 董新洲, 等. 保护智能化的发展与智能继电器网络[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(2): 1-5.
- [14] 佟为明, 翟国富. 低压电器继电器及其控制系统[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2003: 83.
- [15] 蔡山, 张浩, 陈洪辉. 基于最小二乘法的分段三次曲线拟合方法研究[J]. 科学技术与工程, 2007, 7(3): 352-355.

作者简介: 李文华(1973-), 男, 教授, 从事电器可靠性及其检测技术、智能电器及其通信技术的研究。