

doi: 10.7690/bgzd.2025.08.007

基于 PSCAD/EMTDC 的风力发电场集电线路接地故障测距系统

邢 涛

(华电山东新能源有限公司, 济南 250014)

摘要: 针对原有测距系统故障点位置的检出与实际位置具有较大偏差的问题, 提出基于 PSCAD/EMTDC 的风力发电场集电线路接地故障测距系统研究。构建故障测距系统框架, 接收脉冲信号, 设计非接触传感器分压单元, 转换故障信号; 基于 PSCAD/EMTDC 设定测距流程, 获取故障点数据信息, 通过最小分辨率给定测量间距, 测量集电线路接地故障点发生距离。实验结果表明: 以单极接地故障和双极接地故障作为测试类型, 系统能够对不同距离接地故障点中的信号能量进行测量, 保证故障点测距的精准度, 减少测距误差, 具有应用价值。

关键词: PSCAD/EMTDC; 风力发电场; 集电线路接地故障; 测距系统

中图分类号: TM734 **文献标志码:** A

PSCAD/EMTDC-Based Grounding Fault Location System for Wind Farm Collector Line

Xing Tao

(Huadian Shandong New Energy Co., Ltd., Ji'nan 250014, China)

Abstract: In order to solve the problem that there is a large deviation between the detected fault location and the actual location in the original fault location system, the research on the fault location system for grounding fault of wind farm collector line based on PSCAD/EMTDC is proposed. A fault location system framework is constructed, a pulse signal is received, a non-contact sensor voltage division unit is designed, and a fault signal is converted; a location process is set based on PSCAD/EMTDC, data information of a fault point is obtained, a measurement distance is given through minimum resolution, and the distance of a grounding fault point of a power collecting line is measured. The experimental results show that the system can measure the signal energy of different distance grounding fault points, ensure the accuracy of fault location, reduce the error of fault location, and has application value.

Keywords: PSCAD/EMTDC; wind farm; ground fault of collector line; fault location system

0 引言

在我国经济迅速发展的情况下, 工业生产力不断提高, 对电能的需求日益增加。为满足电力系统的持续运行, 我国进行了大规模的长距离输电系统建设, 且开展了新能源的使用。长距离输电过程中容易发生故障问题, 对线路的电能造成损耗, 需要设计一个精准的故障检测方法, 许多科研人员针对此方面进行研究, 并取得显著成果。李猛克等^[1]提出了基于回归分析法的故障测距方法, 重点分析了接地线路在发生故障时的电气量变化特征, 且对不同类型故障进行了具体分类, 以线性回归形式表示暂态过电压的形成原因。该方法主要是在故障发生后对线路的稳态电压和电流直流量进行统计, 并依据回归分析法建立发生故障时的关系模型, 以此判断不同故障情况下其位置与暂态过电压的相对关系, 对故障进行具体定位。基于线性回归形式构建

的故障测距定位方法被应用于 ± 800 kV 接地电力系统中, 且对不同故障具有较好的检测效果, 但没有被应用于新能源的电力系统中, 无法保证该方法应用的广泛性。廖名洋等^[2]提出了基于多脉冲注入法的故障测距方法, 分析了脉冲信号在输电系统中的传播过程与选择特性, 并根据脉冲注入法设计了多宽度脉冲的接地线路故障测距方案, 能够在线路发生故障后判断其具体位置。该方法主要是将脉冲分为 4 和 2 μs 2 种形式, 在均值处理下检测接地线路的运行状态, 以此获取具体的故障测距结果。通过多宽度脉冲注入法能够减小测距盲区, 避免故障电阻的影响, 可以满足电力工程的故障检测需求, 但也没有在风力发电场中进行模拟分析。此次为保证风力发电场的输电线路运行安全, 综合 2 种传统测距方法的优势, 并结合 PSCAD/EMTDC 技术设计一个故障测距系统, 为其线路的接地故障测量提供理论支持。

收稿日期: 2024-09-07; 修回日期: 2024-10-15

第一作者: 邢 涛(1973—), 男, 山东人。

1 线路接地故障测距系统硬件设计

1.1 基于 PSCAD/EMTDC 构建测距系统框架

电力系统中的故障多来自配电网,而配电网中的故障多为接地故障,为获取故障点的实际距离,采用 PSCAD/EMTDC 设计测距系统^[3]。风电场电力系统中具有集电网络和并网交流输电线路以及变压器和无功补偿等结构,通过 PSCAD/EMTDC 接收脉冲信号,构建测距系统框架如图 1 所示^[4]。

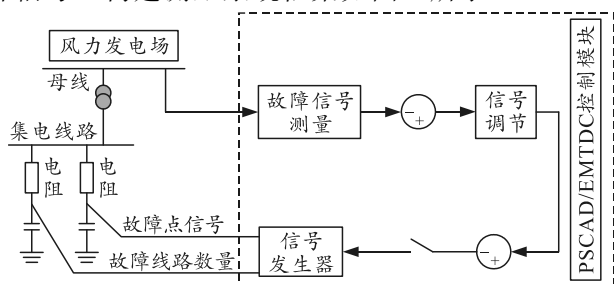


图 1 基于 PSCAD/EMTDC 的测距系统框架

图 1 中,在整个测距系统中以 PSCAD/EMTDC 划分为独立控制模块,对风电场中集电线路的故障信号进行获取,并在调节器的作用下,将信号连接至信号转化器中转化数据,标定出集电线路组的具体数量^[5]。

此次测距系统框架以 PSCAD/EMTDC 为基础,能够对测量的变量进行有效控制,并根据测量大小给定适宜的数据采集参数。通过不断变化的设计参数,将数据采集的误差控制在最小范围内,保证风力发电场的故障点数据采集精度。

1.2 非接触感应下设计传感器分压单元

传感器在输电线路中可以将行波信号转换为电压信号,为保证此次测距系统的应用效果,以非接触式感应原理设计传感器的分压单元,对风力发电场中的输电线路进行高频响应^[6]。具体电压传感器的非接触式原理如图 2 所示。

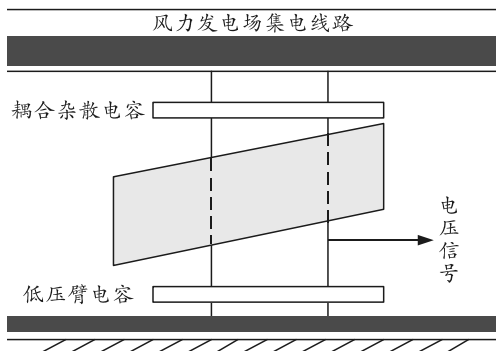


图 2 非接触式电压传感器原理

图 2 中,将传感器安置于输电线路的正下方,

保证输电线路与传感器之间存在感应金属板,其间可以形成耦合杂散电容,对应在传感器感应金属板下方连接适应的电容组,表示为低压臂电容^[7]。以电容分压比作为非接触感应的设计基础,通过对较高幅值的电压信号转换,将其表现为较低的电压幅值信号,实现分压单元设计。则 2 组电容之间的分压比为:

$$w=(q_1+q_2)/q_1。 \quad (1)$$

式中: w 为电容之间的分压比; q_1 为上方电容; q_2 为下方电容,是固定的数值。当测试出 q_1 大小后,即可知道 2 组电容 q_1 与 q_2 的分压比,就能得到传感器输出电压的数值。通过非接触式的传感器设计,能够保证高频电压的响应特性,减少风力发电场中集电线路接地故障测距的局限性。

2 线路接地故障测距系统软件设计

2.1 基于 PSCAD/EMTDC 获取故障数据

PSCAD/EMTDC 是目前应用较为广泛的电磁暂态软件包,可以通过时域分析方式对电力系统中的输电情况进行分析,包含电磁和电机 2 个系统,能对不同的输电线路进行电路模型构建,并可以直接观察到数据采集结果^[8]。对风力发电场中的集电线路进行分析,基于 PSCAD/EMTDC 构建测距流程如图 3 所示。

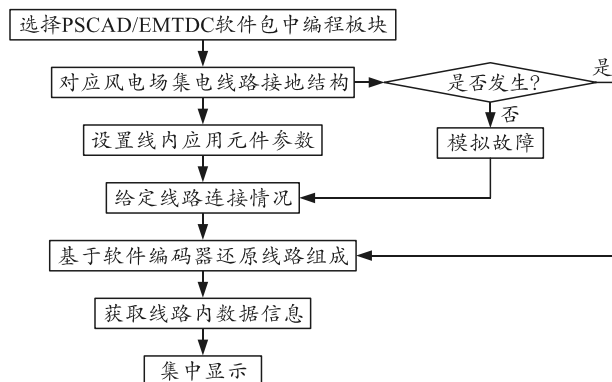


图 3 以 PSCAD/EMTDC 设定线路接地故障测距流程

图 3 中,通过 PSCAD/EMTDC 软件包能够直接对应集电线路接线模式,并对不同的元件进行参数设计,对线路中的各组数据的采集和处理^[9]。在软件包中选择编译器进行线路连接,确定集电线路发生故障时的接地三相电压,以此划分故障的补偿方式。当某一相发生接地故障时:

$$\left. \begin{aligned} r_{Ai} &= r_p + r_A \\ r_{Bi} &= r_p + r_B \\ r_{Ci} &= r_p + r_C \end{aligned} \right\}。 \quad (2)$$

式中： r_A 、 r_B 、 r_C 为风力发电场中的对称运行的三相； r_{Ai} 、 r_{Bi} 、 r_{Ci} 为各相的对地电压^[10]； r_p 为中性点电压。以 A 相发生故障为条件，设定风力发电场中存在接地短路情况，则存在如下关系：

$$\left. \begin{aligned} r_{Ai} &= 0 \\ r_p + r_A &= 0 \\ r_{Bi} &= r_B - r_A \\ r_{Ci} &= r_C - r_A \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

当 A 相发生接地故障产生短路时，中性点的电压会升高，中性点会发生零点漂移，表现为 $p \rightarrow A$ 。对其进行移项，可以得出 $r_p = -r_A$ 。当 A 相中心点的对地电位为零时，则 B 相、 C 相的始电容电流会发生变化，表示为：

$$O_i = O_{Bi} + O_{Ci} \quad (4)$$

式中： O_i 为入地的电容性电流^[11]； O_{Bi} 、 O_{Ci} 为 B 相、 C 相的对地电容性电流。当线路发生接地故障时，采用软件包中的编码器获取线路流通数据，对非故障相和故障相进行划分，分别对各相的数据进行处理，实现接地故障点的测距。

2.2 最小分辨率下测量集电线路接地故障点距离

由于线路中的信号成分较复杂，可能会含有不同的频率分量信号。为精准获取线路接地故障点的实际距离，需要对故障点的信号还原。为减少测距盲区，此次以无接触的传感器进行采集，其信号采集的最低频率应大于原始信号的最高频率，给定测量间距：

$$a = s/2d \quad (5)$$

式中： a 为测量间距， m ； s 为故障点信号传输极限值； d 为传感器采用率^[12-13]。本次以 2 倍关系定义采集频率与原始信号，为尽可能减少信号在集电线路中的传播损耗，获取采集过程中信号的最小分辨率：

$$f_{\min} = h_{\max}/g \quad (6)$$

式中： $f_{\min}$ 为采集过程中的最小分辨率， mV ； $f_{\max}$ 为最大量程； g 为数据的采样宽度。当线路中的数据量越大时，表示故障点距离采集位置的距离越远，或者是故障形成的电压越高，反之则越小^[14]。为满足故障点的实际测距过程，依据测量间距计算接地故障的实际距离，公式如下：

$$j = l_{\max} \times a/k \quad (7)$$

式中： j 为故障点与测量点的间距， km ； $l_{\max}$ 为采集模块的最大放置距离； k 为信号采集的深度，此次设定为 $k=2.5$ ^[15]。为保证故障点信号的原始特征不

被破坏，通过最小频率获取线路中的数据，保证数据采集的宽度和精度。至此，笔者基于 PSCAD/EMTDC 实现测距系统设计。

3 实验测试分析

通过 PSCAD/EMTDC 技术设计了新的测距系统。为验证该系统能够应用在风力发电场集电线路接地故障距离检测过程中，采用对比测试的方法进行论证。分别选择基于回归分析法的测距系统、基于多脉冲注入法的测距系统作为对照组，与本文中测距系统进行比较，验证不同测距系统的测量准确度。

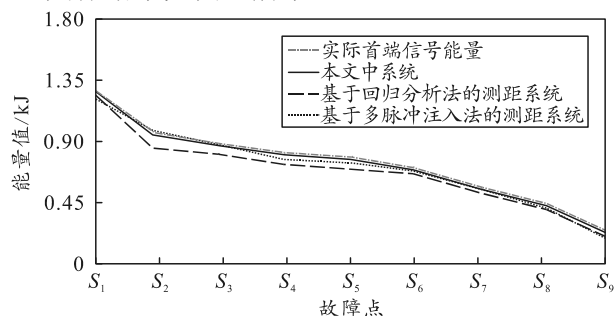
3.1 单极接地故障模式下测量结果

通过 VSC-HVDC 测试系统描述风力发电厂的直流电缆组成，认定该系统中每个点均可能发生故障，当不同位置发生故障时，暂态故障信号中产生的频率和能量各不相同。为保证测距结果的准确性，直接以响应前的暂态信号进行分析，在故障发生后的 10 ms 获取站台故障数据。设定直流电缆的总长为 80 km，分别在直流电缆距离整流段 0 开始，每隔 10 km 设置故障点，最后一个故障点设置在直流电缆末端，则此次共计 9 组故障点。各故障点的具体参数情况如表 1 所示。

表 1 单极接地故障模式下故障点参数情况

故障点	测量间距/ km	对地电压/ V	中性点 电压/V	对地电容性 电流/A
S_1	10	221	152	45
S_2	10	230	156	47
S_3	10	240	157	48
S_4	10	245	160	48
S_5	10	252	165	49
S_6	10	260	168	52
S_7	10	270	170	53
S_8	10	278	172	56
S_9	10	283	172	57

基于上述参数设置，为检测不同测距系统的测量精准度，以首端和末端信号能量检测为基础，只有精准地获取两端的信号值才能保证测距的准确性，具体结果如图 4 所示。



(a) 首端信号能量检测结果

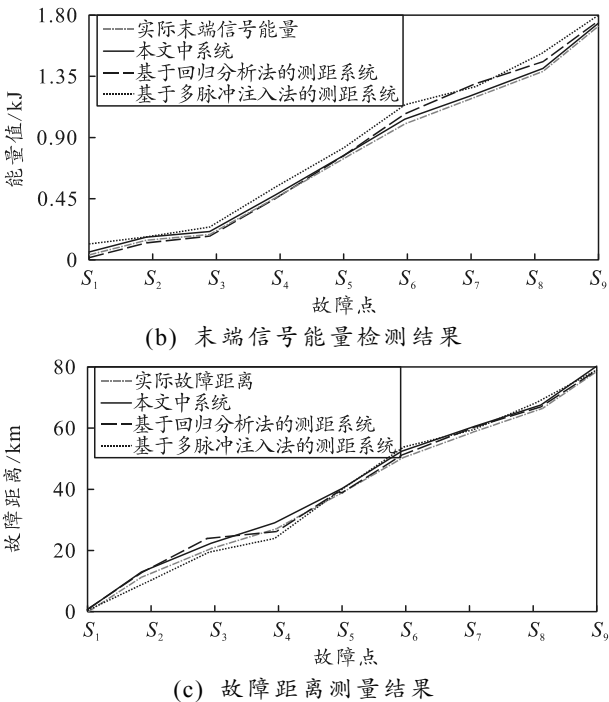


图 4 不同系统对单极接地故障点的测距情况

图 4 中,本文中系统能够对故障点的首端和末端的信号能量进行精准检测,数值与实际情况基本相同;因此,能保证故障点的测距精度,其误差不超过 0.01。而 2 组传统系统对末端的信号能量检测具有一定误差,误差范围在 0~0.15 之间浮动。在故障点测量中无法保证精度,综合说明本文中方法更加有效。

3.2 双极接地故障模式下测量结果

上一阶段验证了本文中系统的有效性。为进一步分析不同系统的应用效果,在 VSC-HVDC 测试系统中模拟双极接地故障模式,设定在不同频带中发生了不同大小的能量波动。保持直流电缆的总长度不变,在线路 16 km 处发生双极接地故障,并每隔 8 m 存在一组故障点,共有 9 组故障点,对不同位置的故障点参数分析,详情如表 2 所示。

表 2 单极接地故障模式下故障点参数情况

故障点	测量间距/ km	对地电压/ V	中性点 电压/V	对地电容性 电流/A
Z ₁	8	246	201	46
Z ₂	8	252	214	49
Z ₃	8	263	221	51
Z ₄	8	276	231	52
Z ₅	8	280	238	58
Z ₆	8	289	245	60
Z ₇	8	294	251	65
Z ₈	8	301	260	68
Z ₉	8	309	264	71

根据上述参数设置,分别连接 3 组测距系统进行检测,验证不同系统的测距精准度,具体结果如

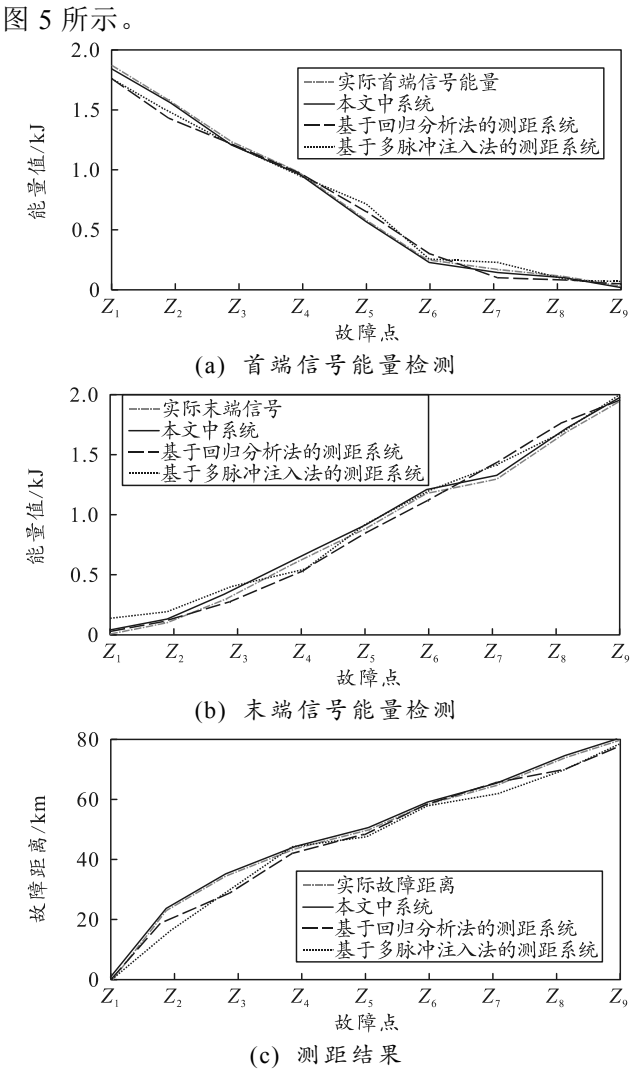


图 5 双极接地故障点的测距结果

图 5 中,本文中系统对双极接地故障点的测距仍能保持较高精度,与实际情况基本一致,误差未超过 0.01,而传统系统的测距误差有了一定范围的缩减,主要是在首端能量检测中提高了一定的测量精度,但较比本文中系统仍存在一定差距,误差范围在 0~0.12 之间浮动。说明本文中系统更加具有应用价值。

4 结束语

笔者设计一个故障测距系统,并在实验论证下证明其能够应用在风力发电场之中,可以弥补原有测距方法的不足,具有一定的测距精度。由于时间有限,在研究过程中仍存在少许问题,如此次测试中直接给定了故障点的实际距离,没有针对系统进行未确定因素的分析。在后续研究中,会针对该问题进行多方面的测试分析,为故障测距系统的应用提供更多可能性。

参考文献:

- [1] 李猛克, 王阳, 孙广, 等. 基于回归分析法的特高压直流接地极线路故障测距方法研究[J]. 电测与仪表, 2021, 58(9): 129-134.
- [2] 廖名洋, 张文, 袁海, 等. 基于多脉冲注入法的高压直流输电接地极线路故障测距[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(9): 98-104, 111.
- [3] 陈晓龙, 余联课, 裴东锋, 等. 一种基于故障支路判定和迭代计算的单回 T 型输电线路故障测距新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(20): 1-11.
- [4] 陈柏宇, 喻锐, 曾祥君, 等. 基于柔性接地装置的不对称配电网接地故障选相选线方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(12): 1-10.
- [5] 王盩鑫, 汪晋安, 邓伟成, 等. 抑制网侧交流单相接地故障下混合型 MMC 子模块过电压的谐波耦合注入策略[J]. 电网技术, 2023, 47(1): 313-322.
- [6] 高淑萍, 徐振曦, 宋国兵, 等. 基于小波阈值去噪和 CEEMD 的混合三端直流输电线路故障测距[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(3): 29-40.
- [7] 周伟绩, 李凤婷, 解超. 带并联电抗器同杆双回输电线路跨线接地故障自适应重合闸策略[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(1): 33-41.
- [8] 喻锐, 胥鹏博, 曾祥君, 等. 基于模糊测度融合诊断的

(上接第 7 页)

5 结论

针对多孔发射药制备过程中发生的模针变形问题, 笔者采用流固耦合方法对药料的挤出成型过程进行了模拟分析, 详细分析了模具结构参数对模针变形的影响规律, 并对现有模具结构进行了优化设计, 得到以下结论:

- 1) 成型段长度对模针变形量的影响最大, 压缩段高度的影响次之, 收缩角的影响最小;
- 2) 模针变形量随收缩角的增大呈递减趋势, 随压缩段高度和成型段长度的增加呈递增趋势;
- 3) 对现有模具进行正交优化设计, 所得模具的模拟结果显示, 在相同入口速度条件下, 优化模具的模针变形量较优化前减小了 73.3%, 效果明显。

参考文献:

- [1] KHOMENKO Y P, ISCHENKO A N, KASIMOV V Z. Mathematical Modeling of Interior Ballistic Processes in Barrel System[M]. Novosibirsk (Russian): Publication House of SB of RAS, 1996: 256.
- [2] ERMOLAEV B S, SULIMOV A A, KHRAPOVSKII V E.

配电网接地故障选线[J]. 电工技术学报, 2022, 37(3): 623-633.

- [9] 胡永昌, 李泰, 曹森, 等. 基于 PSCAD/EMTDC 的特高压直流输电系统并行仿真研究与应用[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(17): 178-186.
- [10] 楚恬歆, 张文海, 瞿科, 等. 基于复合判据的小电流接地系统接地型早期故障检测[J]. 高电压技术, 2022, 48(3): 1022-1031.
- [11] 陶彩霞, 杜雪, 高峰阳, 等. 基于经验小波变换的混合输电线路单相接地故障测距[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(10): 105-112.
- [12] 刘战磊, 曾祥君, 喻锐, 等. 基于不平衡过电压动态抑制的谐振接地配电网单相接地故障保护新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(8): 41-49.
- [13] 古智鹏, 胡蕴斌, 翁洪志, 等. 基于 PSCAD/EMTDC 的换流站交流滤波器电容器不平衡电流异常分析[J]. 电力电容器与无功补偿, 2021, 42(1): 12-17.
- [14] 王宾, 任莹. 中性点经小电阻接地风电场集电线路单相接地故障测距研究[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(6): 2136-2144.
- [15] 罗美玲, 郑涛, 潘志远, 等. 基于选相投旁通对的 LCC-HVDC 系统逆变侧换流变故障性涌流主动抑制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(1): 158-164.

Traveling Charge: Investigation Results[J]. Combustion, Explosion, and Shockwave, 2011, 4: 255-261.

- [3] ERMOLAEV B S, SULIMOV A A, ROMANKOV A V. Traveling high-density charge of convective burning in hybrid shot scheme: new results[J]. Combustion, Explosion, and Shockwave, 2013, 39(6): 206-210.
- [4] ERMOLAEV B S, ROMANKOV A V, SULIMOV A A. Compacted modified propellant blocks as traveling charge in the hybrid shot scheme[J]. Propellant, Explosives, Pyrotechnics, 2014, 6: 881-889.
- [5] 廖昕, 杨文宝, 黄振亚, 等. 低易损发射药配方用粘结剂与力学性能关系探索研究[J]. 火炸药学报, 2001, 24(4): 36-38.
- [6] 廖昕, 黄振亚, 杨文宝, 等. 高能低易损性发射药试验研究[J]. 火炸药学报, 2001, 24(4): 8-9.
- [7] 刘志涛, 徐滨, 南风强, 等. 低温感包覆火药装药的内弹道势平衡理论模拟[J]. 含能材料, 2012, 20(6): 701-704.
- [8] MU Y, ZHAO G Q. Numerical study of nonisothermal polymer extrusion flow with a differential viscoelastic model[J]. Polymer Engineering and Science, 2008, 48(2): 316-328.
- [9] 叶慈南, 曹伟丽. 应用数理统计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004: 19-23.