

doi: 10.7690/bgzd.2018.11.014

药型罩锥角对聚能杆式侵彻体影响的数值分析

崔魁文, 米双山, 高敏

(陆军工程大学石家庄校区导弹工程系, 石家庄 050003)

摘要: 为研究药型罩锥角对聚能杆式侵彻体的影响, 运用 AUTODYN 软件建立聚能装药模型, 对 $90^\circ \sim 130^\circ$ 大锥角药型罩形成的聚能杆式侵彻体进行数值模拟。建立装药结构有限元模型, 研究不同锥角药型罩形成的聚能杆式侵彻体在同一时刻、同一炸高下的成型情况, 分析在 5 倍装药口径炸高条件下聚能杆式侵彻体对均质靶板的侵彻情况, 得到在装药口径和高度一定的前提下, 药型罩锥角对聚能杆式侵彻体成型参数的影响规律。研究结果表明: 药型罩锥角在 $100^\circ \sim 110^\circ$ 时, 形成的聚能杆式侵彻体具有较好的连续性、稳定性与侵彻性能, 可为聚能杆式侵彻体战斗部的设计及应用提供参考。

关键词: 聚能杆式侵彻体; 药型罩; 锥角; 数值模拟; 侵彻

中图分类号: TJ410 **文献标志码:** A

Numerical Analysis on Effect of Jetting Projectile Charge by Liner Cone Angle

Cui Kuiwen, Mi Shuangshan, Gao Min

(Department of Missile Engineering, Shijiazhuang Campus of PLA University of Army Engineering, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: In order to study the effect of cone angle of the liner on jetting projectile charge (JPC), AUTODYN simulation software is used to build the shaped charge model. Numerical simulation of the jetting projectile charge with the large angle between $90^\circ \sim 130^\circ$ of the liner is performed. The jetting projectile charge molding with different liner angle at the same time and the same burst height is studied, and the penetration of the homogeneous target is analyzed under the condition that the burst height is 5 times of the charge diameter. Under the same diameter and height of shaped charge, the effect laws of cone angle of the liner on the jetting projectile charge molding parameters are proposed. The research also shows that the jetting projectile charge has better continuity, stability and penetration performance when the liner angle is $100^\circ \sim 110^\circ$. The results provide a reference for design and application of jetting projectile charge warhead.

Keywords: JPC; liner; cone angle; numerical simulation; penetration

0 引言

聚能装药炸药爆炸后, 产生的高温、高压爆轰产物迅速压垮药型罩, 使其在轴线上闭合, 形成金属射流。根据药型罩锥角的大小, 聚能装药领域发展了 3 种类型的聚能侵彻体, 分别为聚能射流 (shaped charge jet, JET)、聚能杆式侵彻体 (jetting projectile charge, JPC) 和爆炸成型弹丸 (explosively formed projectile, EFP)^[1]。聚能杆式侵彻体性能介于 JET 和 EFP 之间, 在大炸高条件下具有较好的连续性、较高的稳定性以及较强的侵彻能力, 其独特的性能使其在反装甲战斗部领域具有很好的应用前景^[2]。随着新型爆炸反应装甲和主动防御装甲的出现, 现代装甲目标防护能力得到显著提高。为了满足现代战场的需求, 有效地打击新型装甲以及工事等作战目标, 聚能杆式侵彻体成为了国内外研究的热点。

影响 JPC 成型的关键因素有起爆方式、炸药材

料以及药型罩材料和几何结构等。目前国内对 JPC 成型有了初步的研究, 杨亚东等研究了起爆方式对 JPC 成型的影响^[3]; 吴有龙等研究了壳体厚度对 JPC 成型的影响^[4]; 朱亮等研究了炸药材料性能对 JPC 成型的影响^[5]; 吴晗玲等通过数值模拟方法研究了药型罩压跨, 射流的形成、延伸和失稳断裂的全过程并对药型罩的材料进行了深入的分析^[6]; 陈威等研究了药型罩锥角对有利炸高的影响^[7]。

笔者在前人研究的基础上, 采用 AUTODYN 软件建立聚能装药模型进行数值模拟, 确定了 JPC 成型时间, 研究分析了装药口径和高度保持不变的条件下, 药型罩锥角分别为 90° 、 100° 、 110° 、 120° 和 130° 。5 种角度生成的 JPC 在同一时刻、同一炸高下的成型情况, 以及在 5 倍装药口径炸高条件下, JPC 对均质靶板的侵彻情况, 得到药型罩锥角对 JPC 成型的影响规律, 解决了 JPC 应用过程中药型罩锥角的选取问题, 为下一步聚能杆式侵彻体战斗部设

收稿日期: 2018-09-05; 修回日期: 2018-09-22

作者简介: 崔魁文(1992—), 男, 河北人, 硕士, 从事弹箭毁伤理论与技术研究。

计及应用提供了依据。

1 数值模拟

1.1 仿真模型

聚能装药结构设计为船尾形，药型罩采用弧锥结合结构，成型装药结构(1/2 剖面)如图 1 所示。聚能装药高度 $L=8\text{ cm}$ ，装药口径 $D=6\text{ cm}$ ，药型罩壁厚 $d=0.35\text{ cm}$ 。

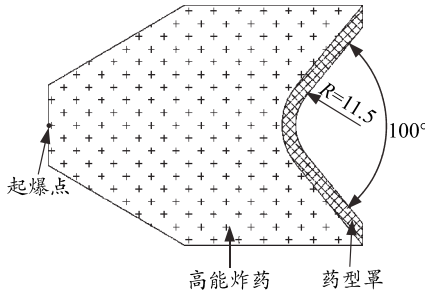


图 1 聚能装药结构

炸药爆炸和药型罩压垮属于大变形问题。在聚能杆式射流形成的过程中，炸药材料和药型罩材料会发生愈来愈剧烈的变形。Euler 算法由于不涉及网格变形，特别适合模拟爆炸等大变形的问题，故主装药、药型罩和空气场均采用 Euler 单元建立，并在观测的区域对模型进行细化处理；Lagrange 算法能够很好模拟固体材料的小、中度网格变形，且与其他算法相比，计算速度较快、精度较高。因此靶板采用 Lagrange 算法，在靠近轴线区域进行细化处理，采用 Lagrange/Euler 自动耦合算法求解，求解时间 $300\ \mu\text{s}$ ^[8]。其中对网格细化处理能够使得射流形成区域网格大小合理，既保证了仿真的准确性，又合理减小了仿真运行时间。

边界条件选择 Flow-Out，表示边界无反射，防止爆轰波的反射对射流形成造成影响。因为聚能装药结构为轴对称结构，所以可采用 1/4 结构建模仿真^[9]，对真实性无影响，同时运算量的减少也缩短了仿真时间，减少了仿真运算中误差的积累，提高了仿真的可靠性和稳定性。起爆方式为中心起爆，炸高为 5 倍装药口径，由于涉及冲击起爆问题，故选择单位制 $\text{cm-g-}\mu\text{s}$ 建模。有限元网格模型如图 2 所示。

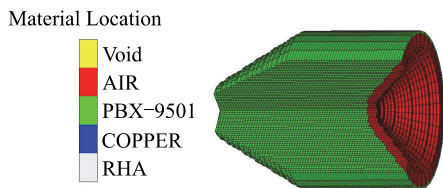


图 2 装药结构有限元模型

1.2 材料模型

在文中数值模拟中，涉及到空气、炸药、药型罩以及靶板 4 种材料模型，所用材料对应软件库中的材料选择如表 1 所示。

表 1 装药材料模型

部件	材料名称	状态方程	强度模型	失效模型
空气	AIR	Ideal Gas	None	None
主装药	PBX9501	JWL	None	None
药型罩	COPPER	Shock	Johnson Cook	None
靶板	RHA	Shock	von Mises	None

1.2.1 空气参数

空气采用理想气体模型，Ideal Gas 状态方程，该状态方程主要用来描述理想气体的状态，表现形式为：

$$P = (\gamma - 1)\rho e + p_{\text{shift}} \quad (1)$$

式中：密度 $\rho=1.225\text{ e}^{-3}\text{ g/cm}^3$ ；理想气体常数 $\gamma=1.4$ ；初始化内能 $e=2.066\text{ 4 J}$ ；初始压力 $p_{\text{shift}}=0$ 。

1.2.2 炸药参数

炸药材料为以奥克托今为主体的 10#-159 装药，采用 JWL 状态方程描述。JWL 状态方程常用来描述炸药及爆轰产物，可以用来计算由化学能转化成的压力，其压力和能量的关系式^[10]为：

$$p = A_1 \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B_1 \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E}{V} \quad (2)$$

式中：参数 A_1 、 B_1 、 R_1 、 R_2 和 ω 为材料常数； p 为爆轰压力； V 为相对体积； E 为初始内能密度。10#-159 装药相关参数如表 2 所示。

表 2 炸药材料主要参数

材料	$\rho/(\text{g/cm}^3)$	$D/(\text{m/s})$	A_1/GPa	B_1/GPa	R_1	R_2	ω	E/GPa	p/GPa
PBX9501	1.840	8 800	852.4	18.02	4.55	1.3	0.38	10.2	37

1.2.3 药型罩参数

药型罩材料为紫铜，采用 Shock 状态方程，一般形式如下：

$$p = P_H + \Gamma_\rho (e - e_H); \quad (3)$$

$$P_H = \rho_0 c_0^2 \mu (1 + \mu) [1 - (s - 1)\mu]^2; \quad (4)$$

$$e_H = \frac{P_H}{2\rho_0} \left(\frac{\mu}{1 + \mu} \right); \quad (5)$$

$$\mu = \frac{\rho}{\rho_0} - 1. \quad (6)$$

式中： Γ 为系数； p 为压力； ρ_0 为初始密度； c_0 和 s 为常数。

同时使用 Johnson-Cook 动态屈服模型描药型

罩的力学行为。该模型是描述材料在大变形、高应变率 and 高温条件下的本构模型，适用于高速碰撞或爆炸引起的材料变形，表达式^[11]为：

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n)(1 + c \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\varepsilon_0}) [1 - (T^*)^m]; \quad (7)$$

$$T^* = \frac{T - T_r}{T_m - T_r} - 1. \quad (8)$$

式中： ε 为有效塑性应变； T^* 为相似温度， T_r 为参考温度， T_m 材料的熔点； A 为材料屈服强度， B 为硬化常数， c 为应变率常数， n 为硬化指数， m 为热软化指数， A 、 B 、 C 、 n 、 m 均由实验获得。紫铜材料模型参数如表 3^[12]所示。

表 3 Johnson-Cook 材料模型参数

A	B	C	n	m	T_r / K	T_m / K
0.000 9	0.002 92	0.31	0.025	1.09	1 356	293

1.2.4 靶板参数

靶板材料为装甲钢，采用 Shock 状态方程和 von Mises 强度模型。该强度模型用于描述金属材料的



图 3 观察点设置

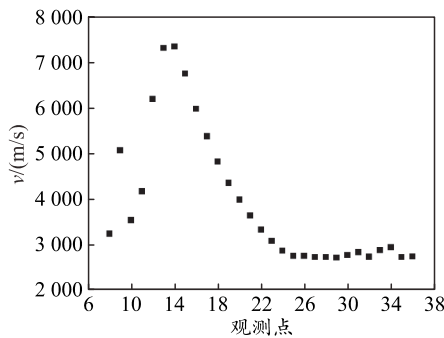


图 4 观测点 8~38 速度峰值

由图 4 可知：观测点 25 之后的各观测点速度峰值基本相同，观测点 25 速度峰值对应时间为 $t=70 \mu s$ ，表明 $t=70 \mu s$ 之后，JPC 头部经过设置观测点的速度保持稳定，可以得出 JPC 成型时间为 $t=70 \mu s$ 。同时观测到 5 种不同药型罩锥角的 JPC 成型时间均为 $t=70 \mu s$ ，由此还可以得出，药型罩锥角对 JPC 成型时间无影响。

2.1.2 $t=70 \mu s$ 时 JPC 成型情况及分析

当 $t=70 \mu s$ 时，从 AUTODYN 软件中得到 JPC 成型后头部速度、尾部速度、长度以及直径等数据，如表 4 所示。

塑性行为，应变增量可写成下面的形式：

$$d\varepsilon = d\varepsilon^e + d\varepsilon^p. \quad (9)$$

式中： $d\varepsilon^e$ 为弹性形变增量； $d\varepsilon^p$ 为塑性应变增量。

对于 Erosion 模型，选择“Geometric strain”，同时根据仿真经验修改“erosion strain”为 1.5。

2 仿真结果及分析

2.1 同一时刻 JPC 成型情况研究

为了得到药型罩锥角对 JPC 成型参数的影响规律并为今后的研究提供参考，笔者选择 JPC 成型时间作为观测时间。

2.1.1 JPC 成型时间的确定

JPC 头部速度不再快速增长并保持相对稳定时的时刻即为 JPC 成型时间。为了确定 JPC 的成型时间，笔者在模型上设置连续等间隔的固定观测点，如图 3 所示。仿真得到空间固定观测点速度峰值，观测点 8~38 速度峰值如图 4 所示。

表 4 JPC 成型参数 ($t=70 \mu s$)

锥角/(°)	头部速度/(m/s)	尾部速度/(m/s)	长度/cm	直径/cm	长径比
90	2 858	1 056	15.1	1.4	10.785 7
100	2 717	1 231	11.4	1.4	8.142 6
110	2 508	1 431	9.2	1.3	7.076 9
120	2 271	1 642	6.9	1.3	5.307 7
130	2 024	1 837	4.5	1.4	3.214 3

根据表 4 中 JPC 成型参数，得到 JPC 头尾速度以及长径比随药型罩锥角变化曲线，如图 5、图 6。

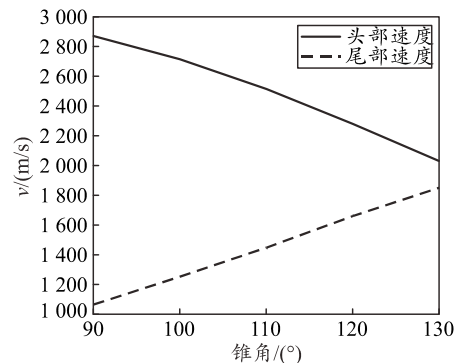


图 5 JPC 头尾速度随药型罩锥角变化曲线

由图 5 可以看出：随着药型罩锥角的增大，JPC 头部速度逐渐减小，尾部速度逐渐增大，头尾速度差越来越小。

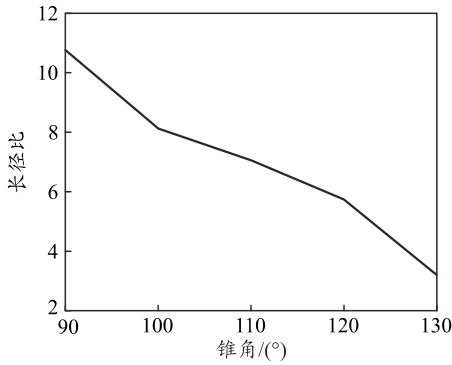


图 6 JPC 长径比随药型罩锥角变化

由图可以发现：JPC 长径比随着药型罩锥角的增大而减小，在同一时刻，药型罩锥角越大，JPC 拉伸越小，从而也具有更好的连续性。图 5 和图 6 表明增大药型罩锥角，JPC 头尾速度梯度减小，具有较高的稳定性。

2.2 同一炸高 JPC 成型情况研究

对于聚能杆式侵彻体而言，不但要考虑其成型参数分析其侵彻性能，而且要考虑其在大炸高条件下射流的连续性和稳定性。笔者取炸高为 5 倍装药口径，在同一炸高条件下，从 AUTODYN 软件中得到 JPC 成型后效果如图 7 所示。

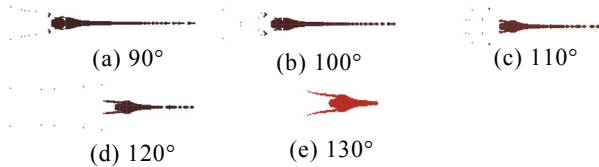


图 7 不同药型罩锥角聚能杆式侵彻体成型效果

由图可见：在炸高为 5 倍装药口径条件下，药型罩锥角为 90°时，JPC 具有一个较大的长径比，射流出现了明显断裂，连续性较差；随着药型罩锥角的增大，JPC 长径比逐步减小，射流的连续性和稳定性不断提升，当锥角为 130°时，JPC 在炸高为 5 倍装药口径条件下仍保持较高的连续性和稳定性。

JPC 头部速度、尾部速度、长度以及直径等数据，如表 5 所示。

表 5 JPC 成型参数

锥角/(°)	头部速度/(m/s)	尾部速度/(m/s)	长度/cm	直径/cm	长径比
90	2 875	1 095	21.3	1.8	11.833 3
100	2 682	1 295	18.4	1.8	10.222 2
110	2 496	1 466	15.0	1.8	8.333 3
120	2 190	1 636	12.4	1.8	6.888 9
130	1 776	1 763	7.2	1.8	4.000 0

根据表中 JPC 成型参数，得到 JPC 头尾速度以及长径比随药型罩锥角变化曲线如图 8、图 9 所示。

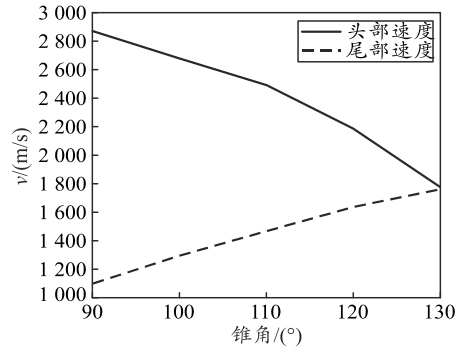


图 8 JPC 头尾速度随药型罩锥角变化曲线

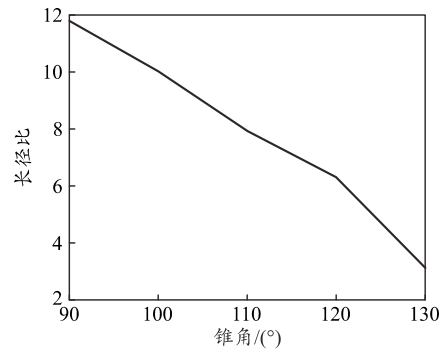


图 9 JPC 长径比随药型罩锥角变化

由图 8 和图 9 可以发现：与 $t=70 \mu s$ 时相比，在 5 倍炸高下 JPC 头尾速度较小，头尾速度梯度和长径比也减小，与图 7 中 JPC 成型效果图相一致。

2.3 不同锥角药型罩形成 JPC 侵彻性能研究

聚能杆式侵彻体对 5 倍装药口径处均质靶板侵彻性能随药型罩锥角变化曲线，如图 10 所示。

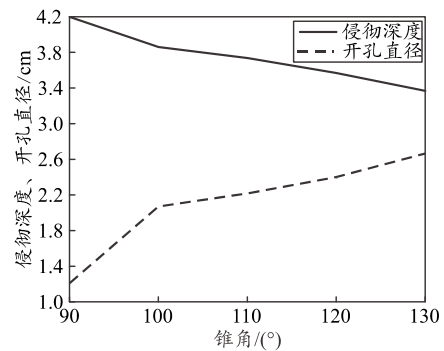


图 10 JPC 侵彻性能随药型罩锥角变化曲线

由图可以发现：随着锥角增大，JPC 对均质靶板侵彻的深度呈逐渐减小的趋势，开孔直径呈逐渐增大的趋势。其中，当药型罩锥角由 90°增大到 100°时，侵彻深度由 4.23 cm 降为 3.88 cm，减少 8.27%，开孔直径由 1.21 cm 增大到 2.08 cm，增幅为 71.90%；锥角在 100°~110°时，侵彻深度和开孔直径曲线较平缓；锥角在 110°~130°时，侵彻深度和开孔直径随锥角增加变化较剧烈，曲线变陡峭。

聚能杆式侵彻体战斗部的性能要求其前级战斗

部在保证具有较大开孔直径的前提条件下, 具有较高的侵彻深度。由图 10 可得: 锥角在 $100^{\circ}\sim 110^{\circ}$ 时, 前级聚能杆式侵彻体能够较好的满足这一要求。同时, 结合图 8 和图 9 可以发现: 在锥角为 $100^{\circ}\sim 110^{\circ}$ 时, JPC 在具有优越侵彻性能的同时也具有良好的连续性和稳定性。

3 结束语

笔者运用 AUTODYN 软件, 对 JPC 侵彻均质靶板进行了数值模拟, 研究分析了药型罩锥角对 JPC 成型性能的影响规律, 得到了以下结论:

1) 通过数值模拟, 分析了药型罩锥角对 JPC 成型参数的影响, 得到药型罩锥角对同一时刻、同一炸高条件下 JPC 成型参数的影响规律。研究结果表明: 锥角为 90° 时, 在大炸高条件下, JPC 出现明显断裂, 随着锥度数的增加, JPC 头部速度和长径比呈减小趋势, 尾部速度呈增大趋势, JPC 的连续性和稳定性是明显的。

2) 为了满足现代战场的需求, JPC 应具有良好的连续性、稳定性以及侵彻性。通过仿真分析可得: 药型罩锥角在 $100^{\circ}\sim 110^{\circ}$ 时, JPC 具有优越的侵彻性能, 并具有良好的连续性和稳定性。这一结论为聚能杆式射流战斗部的设计及应用提供了参考。

(上接第 59 页)

[6] DONOHO D L, TSAIG Y, DRORO O, et al. Sparse Solution of Underdetermined Linear Equations by Stagewise Orthogonal Matching Pursuit[R]. Technique Report, 2006.

[7] DAI W, MILENKOVIC O. Subspace pursuit for compressive sensing signal reconstruction[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2009, 55(5): 2230-2249.

[8] NEEDELL D, TROPP J A. CoSaMP: iterative signal recovery from incomplete and inaccurate samples[J]. Communications of the ACM, 2010, 53(12): 93-100.

[9] 张晓伟, 李明, 左磊. 基于 SWCoSaMP 算法的稀疏信号重构[J]. 信号处理, 2012, 28(6): 886-893.

[10] 田金鹏, 刘小娟, 郑国莘. 递减候选集正则化子空间追踪算法[J]. 控制与决策, 2017, 32(2): 287-292.

参考文献:

- [1] 尹建平, 王志军. 弹药学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2014: 132-139.
- [2] DANIELS A S, BAKER E L, VUONG T H, et al. Selectable Initiation Shaped Charges[C]. the 20th International Symposium on Ballistics. Florida: NDIA, 2002: 23-27.
- [3] 杨亚东, 陈智刚. 起爆方式对杆式射流形成影响的数值模拟研究[J]. 火箭与制导学报, 2008, 28(5): 89-91, 98.
- [4] 吴有龙, 李伟兵, 王晓鸣, 等. 壳体厚度对聚能杆式侵彻体成型的影响[J]. 火工品, 2010, 32(2): 29-31.
- [5] 朱亮, 李慧子, 王晓鸣, 等. 炸药材料性能参数对 JPC 成型的影响[J]. 四川兵工学报, 2011, 32(3): 13-16.
- [6] 吴晗玲, 段卓平, 汪永庆. 杆式射流形成的数值模拟研究[J]. 爆炸与冲击, 2006, 26(4): 328-332.
- [7] 陈威, 李吉峰, 朱磊. 药型罩锥角对有利炸高影响的数值分析[J]. 火箭与制导学报, 2010, 31(6): 98-99, 107.
- [8] 门建兵, 蒋建伟, 王树有. 爆炸冲击数值模拟技术基础[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2015: 115-122.
- [9] 崔军, 徐峰, 李向荣. 聚能射流对靶板侵彻的数值仿真[J]. 兵工自动化, 2010, 29(1): 24-26.
- [10] 黄正祥. 聚能装药理论与实践[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2014: 379-380.
- [11] 宋梅利, 李伟兵, 王晓鸣, 等. 药型罩材料影响 EFP 成型的数值计算研究[J]. 火工品, 2009, 31(4): 16-19.
- [12] 李阳, 张国伟, 马建, 等. 药型罩锥角对某单兵制导破甲战斗部威力的影响研究[J]. 机电技术, 2013, 37(6): 72-73, 81.
- [11] 刘学文, 肖嵩, 王玲, 等. 迭代预测正交匹配追踪算法[J]. 信号处理, 2017, 33(2): 179-184.
- [12] CHEN S S, DONOHO D L, SAUNDERS M A. Atomic Decomposition by Basis Pursuit[J]. Siam Review, 2001, 43(1): 129-159.
- [13] CANDÈS E J, ROMBERG J, TAO T. Robust uncertainty principles: exact signal reconstruction from highly incomplete frequency information[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(2): 489-509.
- [14] 张鹤妮, 刘哲, 郝珉慧, 等. 改进的小波变换子空间匹配追踪图像重构[J]. 火力与指挥控制, 2013, 38(10): 34-37.
- [15] 丁函, 王毅, 袁磊, 等. 一种新的贪婪回溯子空间追踪算法研究[J]. 计算机应用研究, 2017, 34(10): 1-7.