

doi: 10.7690/bgzdh.2024.04.014

基于压缩空气发射毁伤源拦阻无人机的方法

黄 强, 李银河, 雷凯文, 李 鑫

(西北机电工程研究所一部, 陕西 咸阳 712099)

摘要: 针对压缩空气作为清洁可控的发射介质具有诸多优势, 构建一种采用压缩空气为发射动力源的多管发射系统, 简述其设计方法。该系统可用于城市环境下重点目标、场所的“黑飞”无人机硬毁伤拦阻; 通过仿真计算确定使用压缩空气作为发射介质发射系统的系统压力、体积、毁伤源未来点存速等基本参数, 并在此基础上仿真计算该发射系统拦阻民用级旋翼无人机的命中概率。结果表明, 该系统对构建拦阻旋翼无人机的无火药发射系统具有借鉴意义。

关键词: 压缩空气; 无人机; 毁伤源; 拦阻

中图分类号: E924.5 **文献标志码:** A

Method for Arresting UAV Based on Compressed Air Launching Damage Sources

Huang Qiang, Li Yinhe, Lei Kaiwen, Li Xin

(No. 1 Department, Northwest Institute of Mechanical and Electrical Engineering, Xianyang 712099, China)

Abstract: Compressed air has many advantages as a clean and controllable launch medium. A multi-tube launch system using compressed air as a launch power source is constructed, and its design method is briefly described. The system can be used for the “black flight” UAV’s hard damage arresting of key targets and places in the urban environment. The basic parameters of the launch system using compressed air as the launch medium, such as the system pressure, volume, and the velocity of the damage source in the future, are determined by simulation and calculation. On this basis, the hit probability of the launch system arresting civil class rotor UAV is simulated and calculated. The results show that the system can be used for reference in the construction of gun-free launching system for arresting rotor UAV.

Keywords: compressed air; UAV; damage source; arresting

0 引言

在当前的军事技术发展, 使用压缩空气作为动力源的发射系统主要应用于弹道导弹发射系统及鱼雷发射系统。陆军装备武器系统中用压缩空气作为动力源的武器发射系统还鲜有涉及。当前利用压缩空气发射毁伤源在陆军装备中主要应用于枪械, 比如某型号的气步枪、气手枪等, 所发射的毁伤源都是体积小、质量轻的气枪弹, 有效射击距离多在 100 m 内。

其实相对于火药发射, 用压缩空气发射毁伤源有其独特优势: 1) 能量的产生与传递介质均为空气, 取用便捷, 对毁伤源做功整个过程中不发生化学反应, 不产生大气污染物, 对环境友好, 更适合城市环境使用; 2) 高压空气的能量传递过程相对于火药爆炸更为平稳、方便、可控; 3) 对所用毁伤源的结构要求简单, 无需安装火药、底火、引信等结构; 4) 发射过程相较于火药发射更为安全可靠; 5) 对发射系统的维护保养更为方便; 6) 气体的压力、

流量便于调节, 使得发射能量精准可控, 可构成变威力、变初速的发射系统, 进一步适应低附带毁伤的城市环境^[1]。

鉴于使用压缩空气作为发射动力源具备以上优点, 笔者构建一种压缩空气发射系统, 阐述其构建方法。该发射系统可用于应对民用级旋翼无人机对城市重点目标的“黑飞”拒止拦阻。作为一种硬毁伤近距防御系统, 该发射系统有以下 2 种应用方式: 1) 将发射系统装载在有快速机动能力的运载平台上, 机动部署于机场、重要活动现场等重点目标周边, 对无人机进行拒止防御; 2) 将该发射系统直接装载在需要保护的机动平台上随车机动, 可用于某些重要活动的关键车辆、仪仗车队等移动目标近空防御, 随时对“黑飞”或来袭的无人机进行硬毁伤拒止。

1 压缩空气发射系统结构模型构建

目前, 机场及关键敏感设施周围“黑飞”的无人机基本为市场上可采购到的微小型民用级旋翼无

收稿日期: 2023-12-20; 修回日期: 2024-01-25

第一作者: 黄 强(1979—), 男, 陕西人, 硕士。

人机。由于民用级旋翼无人机机体防护弱，同时为增大命中概率，笔者构建一种16管同步发射单元，可同时发射16个毁伤源。该发射单元减轻了单个毁伤源的质量，增加了同时可达目标未来点的毁伤源数量，结构简略模型如图1所示。

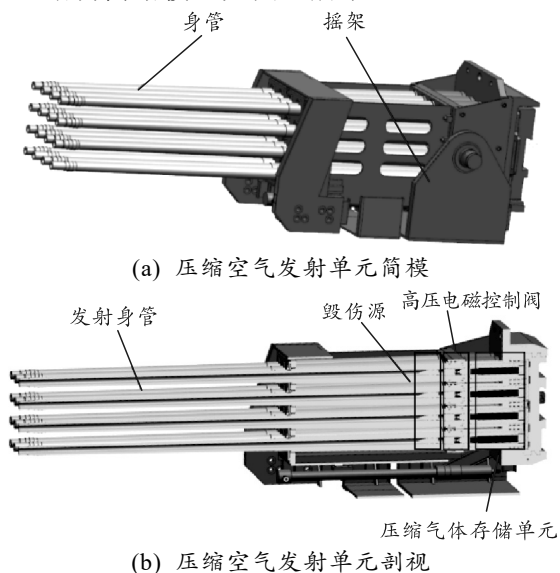


图1 压缩空气发射单元模型

作为一种压缩空气发射系统，该发射系统的主要功能有：1) 储存或产生用于发射毁伤源的高压空气；2) 压缩空气的充、放可控；3) 毁伤源的制动、解脱可控；4) 按发射初速要求向发射管内气体存储单元注入高压空气，保证毁伤源的炮口初速要求。

该发射系统由发射身管、摇架、毁伤源、高压电磁控制阀和压缩气体存储单元等主要部分组成^[2]。其中有16根平行排布的发射身管，采用12.7 mm口径；毁伤源质量为75 g，一次最多可同时发射16枚；高压气体的释放控制采用高压电磁发射阀控制。根据拦阻的无人机目标特性，可单管发射，也可多管同时发射。

2 压缩空气发射系统参数设定

压缩空气发射系统的主要作用是储存和发射用于杀伤来袭目标的弹药。

本压缩空气发射系统中的压缩气体被认定为理想气体模型，在压缩空气发射系统发射毁伤源的过程中，高压空气推动毁伤源进行短时运动，系统外部环境与压缩气体存储单元内的气体基本上没有热交换；因此，该发射过程可被认定为一个绝热过程。

由热力学第一定律可知，内能变化量通过功或者热量的形式传出、传入系统：

$$kRTdm = kp dV + V dp \quad (1)$$

式中： k 为气体比热容； R 为气体常数； T 为气体温度； m 为气体质量； p 为气体压强； V 为气瓶容积。

在毁伤源发射过程中，压缩气体存储单元的容积是恒定的，所以 $dV=0$ 。根据气体状态方程：

$$p = \rho RT \quad (2)$$

代入式(1)中，可得：

$$\frac{dp}{dt} = \frac{kp}{m} \frac{dm}{dt}$$

在毁伤源发射过程中压缩空气释放，忽略摩擦损失，进行简化计算，则该过程被认为是等熵过程。根据等熵过程的关系式：

$$T = T_0 (p/p_0)^{(k-1)/k} \quad (3)$$

式中： T_0 为存储单元内的压缩气体初始温度； P_0 为存储单元内的压缩气体初始压强^[3]。

经过以上的参数确定过程，相关的计算参数为：拦阻毁伤源总质量：1.2 kg(分为16发，每发75 g)；炮口初速330 m/s；能量利用系数：0.15；定容比热容：717 J/(kg·K)；发射阀节流后的空气温度：266 K。

发射毁伤源所需的压缩空气质量按下式计算：

$$m_{B0} = (m_T v_{Tc}^2) / (2\eta c_v T_{c_j}) = 0.229 \text{ kg} \quad (4)$$

若选定压缩空气初始压力35 MPa，压缩空气温度300 K，那么压缩空气总容积为：

$$V_{B0} = (m_{B0} R T_{B0}) / p_{B0} = 0.563 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \quad (5)$$

式中： R 为空气气体常数， $R=287 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ^[4-5]。

根据发射管长度及发射管内壁与毁伤源尺寸配合情况，取损耗系数为2。假设气体存储单元为圆柱体，如分为16个独立发射单元，则每个发射单元用来存储压缩气体的圆柱体直径 $D=30 \text{ mm}$ ，长度 $L=160 \text{ mm}$ 。

压缩气体存储单元尺寸基本参数由此确定，以上数据可作为毁伤源弹道估算的初始数据。

3 毁伤源的外弹道响应

该压缩空气发射系统有效拦阻距离设定在600 m范围内，则600 m处毁伤源存速应确保可以毁伤无人机机体。

民用级旋翼无人机机体材料多采用工程塑料材质，也有部分型号采用铝合金材质。为方便计算，笔者将民用无人机外壳等效为2 mm厚的Q235钢板^[6]，进行毁伤源极限穿透估算。根据德·马尔公式：

$$V_c = K \cdot \frac{d^{0.75} \cdot b^z}{m^{0.5} \cdot \cos^n \alpha} \quad (6)$$

式中： K 为穿甲系数， $K=2470$ ； V_c 为极限穿透速度；

d 为毁伤源直径； m 为毁伤源质量； b 为穿甲厚度； α 为靶板斜置时的法向角度； z 为随 α 角度变化的指数； n 为随 α 角度变化的指数。代入各参量计算得该毁伤源在 600 m 处击穿无人机所需的存速 $V_c=124.8$ m/s。

利用 CFD 气动仿真分析软件进行口径 12.7 mm 毁伤源的气动力计算，计算条件如下：攻角为 45° ；来流马赫数 $Ma=1$ ；计算压力 $P_0=101\ 325$ Pa；计算温度 $T_0=228.15$ 。

本节所有计算及仿真所有气象诸元均采用我国标准气象条件，地面标准值^[7]。流场仿真计算域如图 2 所示，出于对计算精度与计算效率的综合考虑，在大的圆柱外流域内再增加一个小圆柱加密区域作为计算域。其中外部区域作为静止区域，内部区域随着弹体一起旋转。

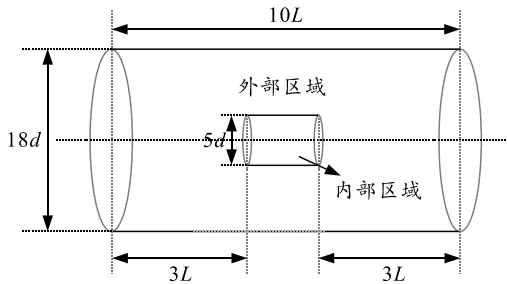


图 2 流场仿真计算域

计算域及弹体边界层网格划分如图 3 所示，计算出的压力云图如图 4 所示^[8-9]。

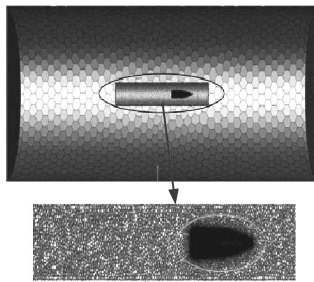


图 3 计算域及弹体边界层网格划分

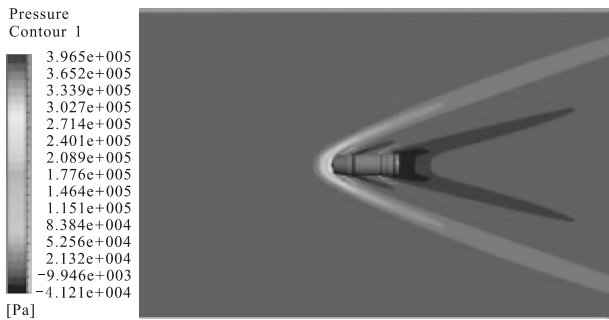


图 4 毁伤源气动仿真压力云图

通过仿真计算得到 45° 射角时 600 m 处毁伤源存速 V_{600} 约为 165 m/s；因此，前文设定的压缩空气

参数可满足对民用级旋翼无人机的毁伤要求。

4 典型目标特性分析

民用微型无人机典型外观如图 5 所示。机体采用工程塑料或铝合金，多旋翼轴距 ≥ 350 mm，飞行速度 ≤ 70 km/h (19.5m/s)，飞行高度 600 m 以内。



图 5 旋翼微型无人机

无人机属于微小目标，其 RCS 值很小。由于目标的 RCS 值关系到命中概率的计算仿真，因此必须对典型目标通过 RCS 测试系统进行 RCS 值测量。笔者用到的 RCS 测试系统主要由收发天线、发射子系统、接收子系统、转台控制子系统、数据采集及处理系统组成，测试原理如图 6 所示，转台和反射面分别如图 7 和 8 所示。

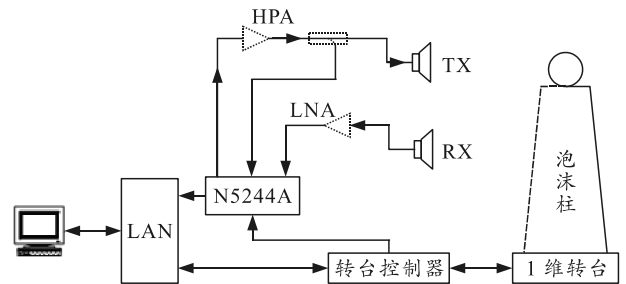


图 6 测量系统原理

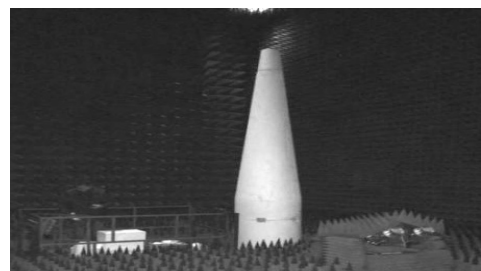


图 7 转台

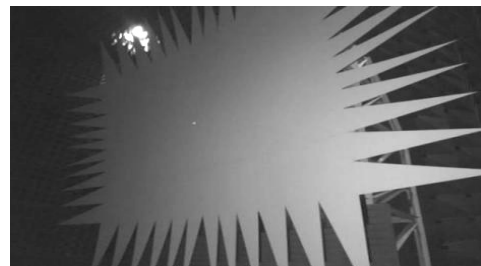


图 8 反射面

旋翼微型无人机目标 RCS 测试是依据 GJB

5022—2001 “室内场缩比目标雷达散射截面测试方法”，采用自由空间反射的相对标定法进行测量。在确定的雷达工作频率、极化方式等条件下，用 RCS 解析值已知的定标体标定，完成对测量系统的频响误差校准，经校准后的系统即可进行被测目标的 RCS 精密测量。在测量过程中采用了距离选通门等处理技术，以降低背景电平，提高测量精度。具体测量步骤如下：

- 1) 测量空暗室回波获取背景响应；
- 2) 测量定标体获得定标参考体响应；
- 3) 放置目标进行 RCS 测量。

在放置目标前，首先利用低 RCS 硬泡沫制作支架和载体，将待测目标水平放置或以一定角度放置，旋翼微型无人机放置状态如图 9 所示。测量结果如表 1 和 2 所示。



图 9 无人机放置状态

表 1 C 波段无人机水平 0°测试结果统计

序号	频率/GHz	平均值/m ²	最大值/m ²	最小值/m ²
1	5.3	0.044 2	0.315 2	2.7×10 ⁻⁵
2	5.4	0.049 1	0.286 5	3.1×10 ⁻⁵
3	5.5	0.049 9	0.428 4	4.2×10 ⁻⁶
4	5.6	0.048 8	0.485 4	1.3×10 ⁻⁵
5	5.7	0.041 9	0.236 6	3.4×10 ⁻⁵
6	5.8	0.041 3	0.250 9	5.2×10 ⁻⁵

表 2 X 波段无人机水平 0°测试结果统计

序号	频率/GHz	平均值/m ²	最大值/m ²	最小值/m ²
1	8.6	0.058 6	0.514 2	6.5×10 ⁻⁷
2	8.7	0.052 9	0.430 9	2.3×10 ⁻⁶
3	8.8	0.055 0	0.834 4	2.2×10 ⁻⁶
4	8.9	0.052 4	0.758 5	5.0×10 ⁻⁵
5	9.0	0.049 2	0.518 9	5.9×10 ⁻⁵
6	9.1	0.045 5	0.313 7	1.0×10 ⁻⁵
7	9.2	0.051 2	0.513 4	8.8×10 ⁻⁵
8	9.3	0.053 5	0.546 6	4.5×10 ⁻⁵
9	9.4	0.053 1	0.689 9	2.5×10 ⁻⁵
10	9.5	0.058 9	0.872 5	7.7×10 ⁻⁷

针对城市“黑飞”常见的微小型旋翼无人机的 RCS 特性进行测试的结果表明，某型 4 旋翼小型无人机，C 波段 RCS 测试平均值 < 0.05 m²，X 波段 RCS 测试平均值 < 0.06 m²。

5 多管同步发射命中概率的估算

通过上述的仿真、计算、测量，获得了计算无人机命中概率的基本参数。对于命中概率的计算需要进一步明确毁伤源的散布概率和散布面积。毁伤源在飞向目标方向的散布投影视图，如图 10 所示，毁伤源在 dx 微环带里头的数量公式如下：

$$n_i = N \int_{x_1}^{x_2} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_x} e^{-\frac{x^2}{2\sigma_x^2}} dx \quad (7)$$

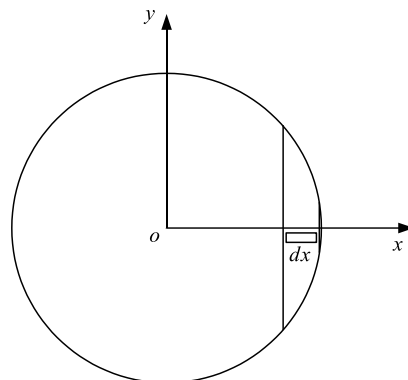


图 10 毁伤源散布对目标投影方向

假设毁伤源在微环带内均匀分布，那么单个毁伤源命中无人机目标的概率为：

$$P = 1 - (1 - s_1/S)^{n_i} = 1 - e^{-M(x)} \quad (8)$$

$$M(x) = (s_1/S) * n_i \quad (9)$$

式中：S 为微环带面积；s₁ 为目标沿毁伤源视线方向在微环带上的投影面积。

通过仿真，毁伤源对相对中心点的分布概率如图 11 所示。

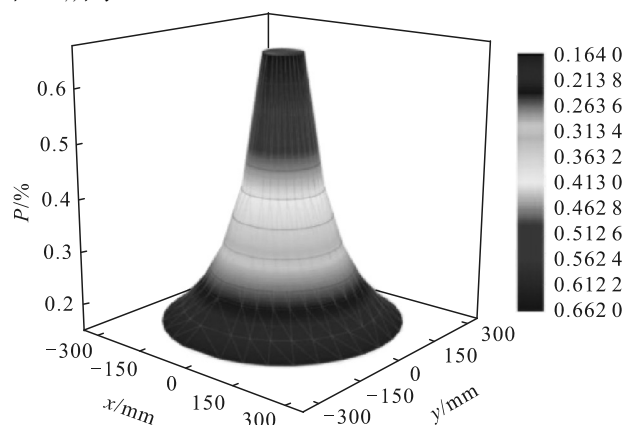


图 11 毁伤源分布概率

使用该发射系统一次 16 管齐射，16 发毁伤源同时到达目标未来点。根据上述计算和测量参数进行仿真计算，在 600 m 距离该压缩空气发射系统一次击发对微小型旋翼无人机(非悬停状态)的命中概率如图 12 所示^[10]。

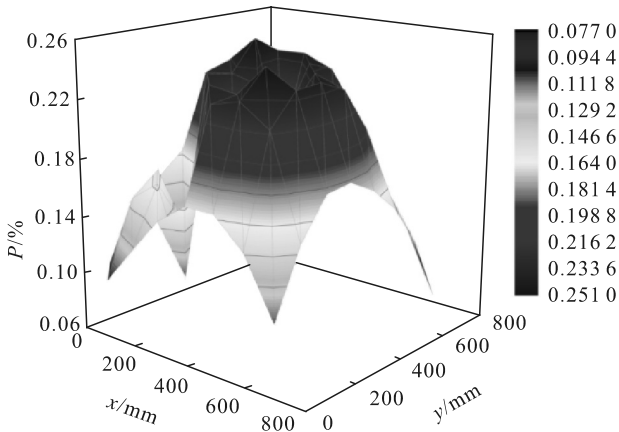


图 12 一次齐射时对无人机命中概率

从图中得知, 16 管发射系统一次击发, 在毁伤源分布中心 0.5 m×0.5 m 范围内对 RCS 为 0.05 m² 的 4 旋翼小型无人机命中概率约为 25%。

6 结束语

笔者采用压缩空气为动力源, 设计一种针对微小型旋翼无人机的毁伤源发射系统, 简要论述其设计方法。通过模型数值仿真与计算分析, 得到了毁伤源到达未来点的存速, 确定了压缩空气发射系统所用的压缩气体的体积与压力, 构建了基本的压缩空气发射单元模型。笔者对典型旋翼无人机的 RCS 进行了测试, 并以此为基础进行了该发射系统对典型目标的命中概率估算。通过仿真计算分析, 采用压缩作为动力源构建微小型旋翼无人机的拦阻发射

系统方案可行。该发生装置如配合低附带毁伤源使用, 可较好地完成城市环境下重点目标的小型旋翼无人机拦阻任务。综上所述, 笔者为构建拦阻旋翼无人机的无火药发射系统提供了一种设计方法和一定的设计依据。

参考文献:

[1] 尚兴超. 某气动发射系统关键问题研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2014.

[2] 何志强, 黄守仁, 李载弘. 航空自动武器设计手册[M]. 北京: 国防工业出版社, 1990: 86-112.

[3] 方九如. 超远程防御系统压缩空气发射装置分析[D]. 南京: 南京理工大学, 2014.

[4] 金志民. 现代内弹道学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1992: 106-132.

[5] 胡艳玲. 气动枪械发射原理有关问题的研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2008.

[6] 李向东, 杜忠华. 目标易损性[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2013: 121-145.

[7] 钱林方. 火炮弹道学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2016: 58-73.

[8] 厉相宝. 预制破片速度的数值模拟与分析[D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2009.

[9] 陆家鹏, 谭兴良, 雷志义, 等. 自动武器气体动力学[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1991: 201-243.

[10] 张德丰. MATLAB/Simulink 建模与仿真实例精讲[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010: 256-274.

(上接第 49 页)

4 结束语

随着信息化时代的到来, 公立医院的预算信息化管理就变得尤为重要。针对传统信息化管理方法存在的问题, 提出基于数据分析的公立医院财务预算信息化管理系统设计。该方法首先建立系统框架, 详细分析硬件模块功能; 再以此为基础, 设计系统数据库, 以及各项模块的软件实现流程, 最后将二者结合, 完成公立医院的预算信息化管理。由于在系统管理时还存在问题, 今后会针对该项缺陷继续优化。

参考文献:

[1] 王瑞麟, 满春霞, 李思聪, 等. 医疗卫生体制改革背景下我国药师队伍发展现状的调查分析[J]. 中国医院药学杂志, 2021, 41(11): 1091-1096, 1113.

[2] 孙广亚, 张征宇, 孙亚平. 中国医疗卫生体制改革的政策效应——基于综合医改试点的考察[J]. 财经研究, 2021, 47(9): 19-33.

[3] 罗春蓉, 盛敏, 刘锐. 一种以 ERP 和全面预算管理为基础的医院信息化系统开发[J]. 微型电脑应用, 2021, 37(2): 139-141, 146.

[4] 赵月平, 王兴举, 赵琳, 等. 基于 BIM+GIS 的公路工程施工预算三维地理信息管理系统[J]. 公路, 2021, 66(12): 309-312.

[5] 闫新峰. 基于 Silverlighr 技术的财政预算管理系统的的设计[J]. 长江信息通信, 2021, 34(10): 148-150.

[6] 李涛, 叶青, 曹国庆. 高等级生物安全实验室动力系统冗余设计原则探讨[J]. 暖通空调, 2020, 50(1): 37-42.

[7] 刘一鸣, 吴茜, 张瑞萍. 核电机组一键启动控制系统设计原则研究[J]. 仪器仪表用户, 2022, 29(1): 49-52.

[8] 李扬裕, 马建光, 李大成, 等. 空间偏移拉曼光谱技术及数据处理方法研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2020, 40(1): 71-74.