

doi: 10.7690/bgzd.2024.07.002

## 自动化装箱线数字孪生模型构建方法

李一蕊<sup>1</sup>, 沙金龙<sup>1</sup>, 李翠勇<sup>1</sup>, 焦鹤勇<sup>2</sup>

(1. 中国兵器工业第二〇八研究所体系仿真评估中心, 北京 102202;  
2. 中国五洲工程设计集团有限公司, 北京 100055)

**摘要:** 为提高生产线的工作效率和质量, 提出一种自动化装箱线数字孪生模型。按照物理装箱及其工艺流程、虚拟装箱线 3 维模型构建、孪生数据的顺序, 对装箱线数字孪生所需要的具体模型, 以及孪生数据采集位置和内容、对物理装箱线数据的采集与传输方式、数据向虚拟装箱线模型发送与解析等方式进行详细描述, 并对数字孪生模型在实际装箱线中的应用成效进行总结分析。该方法能实现对实体装箱线生产过程的实时监控和检测, 并根据检测结果对现有的装箱线进行修正与优化。

**关键词:** 数字孪生模型; 孪生数据; 装箱线; 生产线

**中图分类号:** TP271 **文献标志码:** A

## Construction Method of Digital Twin Model for Automated Packing Line

Li Yirui<sup>1</sup>, Sha Jinlong<sup>1</sup>, Li Cuiyong<sup>1</sup>, Jiao Heyong<sup>2</sup>

(1. No. 208 Research Institute of China Ordnance Industries, Beijing 102202, China;  
2. China Wuzhou Engineering Group Corporation, Beijing 100055, China)

**Abstract:** In order to improve the efficiency and quality of the production line, a virtual twin model of automatic packing line was proposed. According to the sequence of physical packing and its process flow, 3D model construction of virtual packing line and twin data, the specific model needed by the digital twin of the packing line was designed. As well as the location and content of the twin data acquisition, the way of data acquisition and transmission of the physical packing line, the way of data transmission and analysis to the virtual packing line model, and so on, and the application effect of the digital twin model in the actual packing line is summarized and analyzed. The method can realize the real-time monitoring and detection of the production process of the solid packing line, and modify and optimize the existing packing line according to the detection results.

**Keywords:** digital twin model; twin data; packing line; production line

### 0 引言

随着我国制造业向自动化、信息化、智能化转型, 各种自动化设备与智能终端正在逐渐取代人力劳作, 自动化程度有了极大的提高, 进而带动了生产运作和管理效率的提升。生产系统的自动化程度越高, 出现的隐患问题也就越多, 如自动化设备控制系统复杂、可视性差、控制代码 BUG 多且难于定位等, 致使生产过程中遇到突发问题的风险加大。为了对其进行有效的监控与管理, 提高生产线的工作效率, 人们引入数字孪生的概念, 实现对自动化生产线的实时监控已经成为趋势。

数字孪生的概念自 2003 年由 Grieves 教授<sup>[1]</sup>提出以来, 受到了各界的广泛关注和广泛研究, 结合数据建模与 3 维可视化监控技术, 国内外学者从不同角度对可视化监控系统方面进行了大量研究。如文献[2]面向装配车间构建了 5 层数字孪生模型技术

架构, 对装配车间关键生产资源开发了实时监控系統, 证明用孪生技术能实现装配车间各类资源的实时、动态监控, 具备有效性; 文献[3]开展了变批量装配质量一致性管控技术研究, 搭建了基于数字孪生的某产品总装智能车间集成应用总体架构, 实现了生产过程质量一致性管控、关键工装寿命预测; 文献[4]开展了基于实时数据驱动的数字孪生车间研究及实现; 文献[5]基于数字孪生的生产单元可视化管控技术进行了研究。目前的数字孪生技术研究与应用大多数集中在现有生产线和车间运行的研究层面, 对复杂生产线实时监控、生产线故障诊断等方面的研究较少。

笔者以自动化装箱线为例, 对其工艺流程进行了系统的分析, 对装箱线的控制管理系统、生产过程控制指令和反馈信息等进行梳理和数字化表达, 并对控制指令、状态反馈、数据采集位置、采集方

法等进行详细描述，提出了装箱线孪生模型与实体生产线之间实时数据传输与解析的方法。依据此方法设计开发了虚拟孪生模型系统，实现了对实体装箱线生产过程的实时监控和检测，并根据检测结果对现有的装箱线进行了修正与优化。

### 1 装箱线数字孪生模型框架

装箱线数字孪生模型是一个系统过程，

包括实际的物理装箱线，与实际物理装箱线 1:1 克隆的虚拟装箱线，以及按照工艺流程，有序接收物理装箱线的控制驱动指令、装箱任务、货箱移动、取货指示信号、装箱信号、设备运行状态等实时数据，并用这些实时数据驱动虚拟装箱线上的 3 维实体，实现虚拟装箱线与物理装箱线的工艺流程一致、装箱任务进度同步、物料箱动作同步、设备动作同步等。装箱线的数字孪生模型框架如图 1 所示。

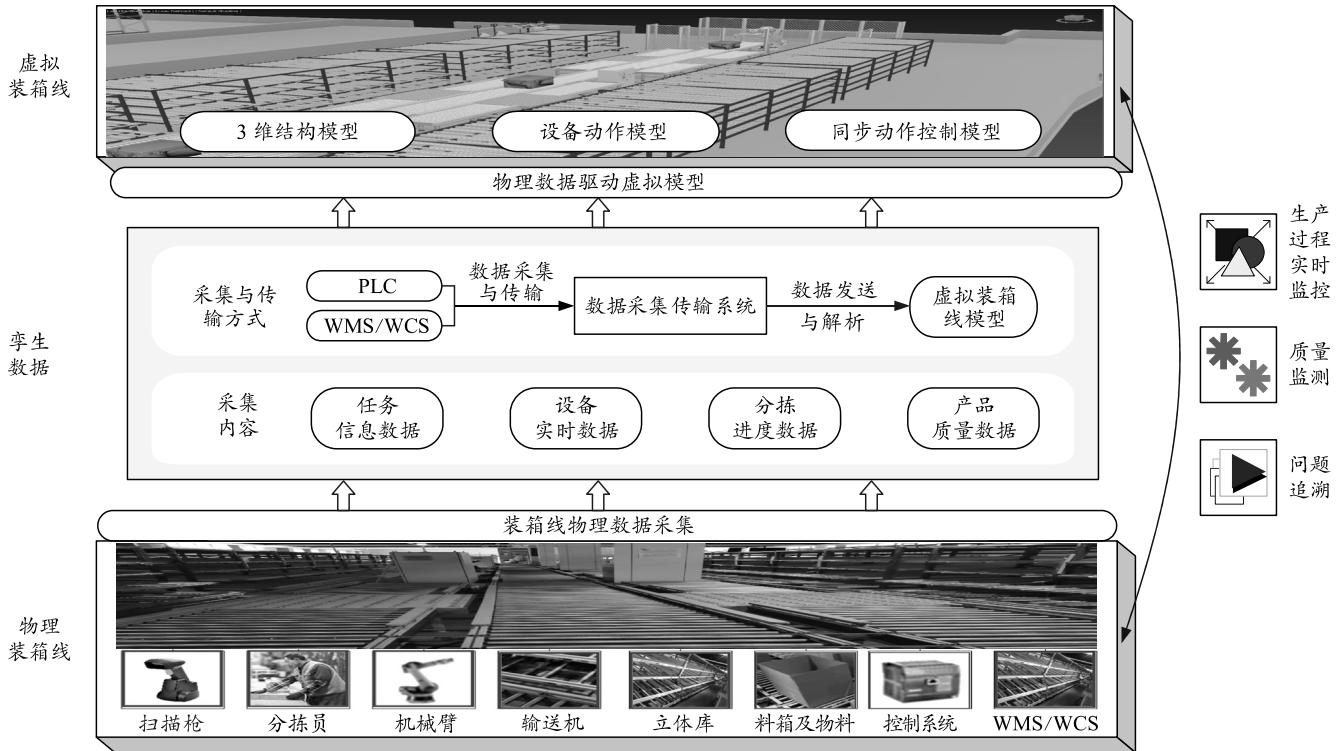


图 1 装箱线数字孪生技术总体框架

装箱线数字孪生技术的总体框架主要包括物理装箱线、虚拟装箱线和孪生数据 3 部分，通过虚实映射、互动操作等实现对生产过程实时监控、产品质量检测，以及问题追溯等功能，进而达到对装箱线进行远程管控的目的。

1) 物理装箱线：是现有生产线组成中的设备和控制管理系统，是装箱线数字孪生模型和数据产生的基础和依据。

2) 虚拟装箱线：依据实际的物理装箱线可见的实体，构建虚拟的 3 维模型，使其能够与物理实体一样接收控制指令，并完成同样的动作。虚拟实体包括 3 维结构模型、设备动作模型、同步动作控制模型 3 层。这些模型与实际的物理数据集成之后，形成装箱线数字孪生体，满足生产过程实时监控、质量监测、问题追溯等功能需求。

3) 孪生数据：是结合装箱线数字孪生模型需

求，按照工艺路线从物理装箱线中采集出来，并输入到虚拟装箱线模型，驱动虚拟模型执行与实体设备一样的动作数据。主要包括：任务信息、进度信息、设备实时数据、产品质量数据。

### 2 物理装箱线组成要素及工艺流程

如图 2 所示，这是一条典型的通用货物人机混合的柔性装箱线，主要用于成品装箱及相似的自动化分拣打包业务。



图 2 装箱线现场

图 3 为装箱线平面布置图。中间位置为输送机运输订单货箱，从左到右，共有 8 个装箱分拣台，每个分拣台 2 个工位，所有货物放置在运输线两侧的货架上，同时可分装 512 种货物。整条装箱线的运输及数据采集全部自动化，线边货架库存信息实时更新、每个货箱信息唯一，可以实现每个货箱按订单信息装箱的柔性化要求。

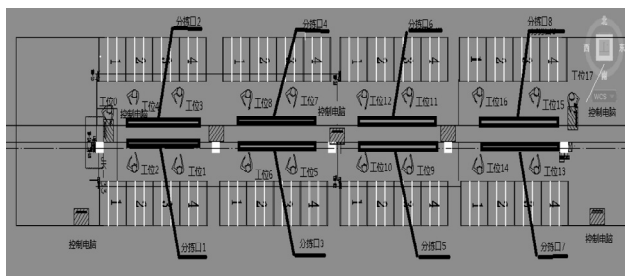


图 3 装箱线平面布置

装箱线工艺流程为：

- 1) 物料在生产前按照指定顺序摆放在输送机两旁的货架上，入库时使用手持终端填写入库信息；
- 2) 订单货箱贴好订单编号后用托盘放到输送机上；
- 3) 工位 0 人员对上线货箱进行编码绑定，发出货箱上线信号，并开启输送机启动按钮，货箱进入分拣装箱生产线；
- 4) 货箱由输送机控制系统，自动送到各个分拣口；
- 5) 各工位装箱员用手持扫码枪扫描货箱编号，系统自动点亮货架灯指示装箱员取货位置；
- 6) 装箱员取出货物，拍灭指示灯，将货物放到货箱；
- 7) 货物装箱完成，装箱员将货箱送出本分拣工位，输送机按照本货箱的装箱需求将货箱运送到下一个分拣口；
- 8) 货箱分拣完成后，到达输送线的末尾，工位 17 号人员手持扫描枪扫描货箱标签，打印装箱单；
- 9) 输送机继续运送货箱到达终点下线。

### 3 虚拟装箱线 3 维模型构建

为了构建装箱线的 3 维孪生模型，首先需要将物理装箱线的实体进行分类，创建设备的部件 3 维模型，然后将所有部件的 3 维模型组合为设备模型，形成设备模型库，这个过程一般利用 3dmax 等 3 维建模和渲染工具软件完成。针对装箱线组成要素的作用其分为 8 类，如图 4 所示。

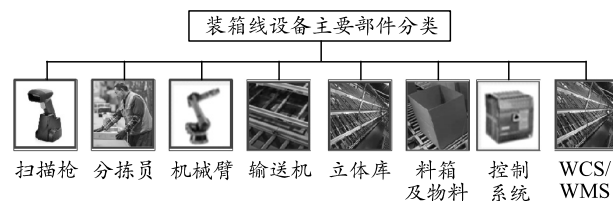


图 4 3 维模型的装箱线组成要素分类

按照上述分类对装箱线可见设备及部件构建 3 维模型库，在此基础上，按照平面布置图组装成虚拟装箱线，并编写数据驱动 3 维模型动作的控制逻辑。实现虚拟生产线组装和逻辑控制的支撑软件有很多，主要分为系统仿真软件（例如 automod、plant）和游戏开发平台（unity）2 类。系统仿真软件的优点是建模容易、耗时短、数据准确、有逼真的逻辑控制工具，而且有数据统计、预测分析等功能。缺点是画面观感差，沉浸感差；游戏开发平台的优点是观感逼真、沉浸感好，缺点是建模难、可修改性差、开发代码量大、分析预测功能还需再开发仿真分析模型。根据项目主要任务是实时监控、且无预测功能需求的特点，笔者选择用 unity5 作为开发平台完成建模，完成的虚拟装箱线 3 维模型如图 5。



图 5 虚拟装箱线 3 维模型

## 4 孪生数据的采集及传输

### 4.1 装箱线孪生数据采集内容

装箱线产生的控制信号和状态数据是用于实现虚实系统动作同步的关键，因此，在构建数字孪生模型之初，首先要确定数据源头，以及数据采集的点位、内容和频次等信息。

物理装箱线的运行主要由 WMS 控制。其中，物理装箱线的运行主要由 WMS 控制，WMS 将装箱任务和工艺路线发送给输送机 WCS、亮灯信号发送给货架墙指示灯 WCS、拆垛和码垛信号发送给机械臂 WCS。分拣员根据货箱移动进行扫码、拍灯、装箱等操作，WMS 从指示灯系统和手持扫描枪得到系统运行信号。

结合这一过程的实际情况，需要从装箱线采集

并传输的数据主要包括：

- 1) 同步动作实时监控：需要获取设备的运行状态和驱动货箱在流水线上移动的信号；
- 2) 监控分拣进度和质量：需要及时获得每个任

务每件商品分拣装箱信息；

- 3) 采集并保存用于预测分析的数据：包括装箱信息、设备状态信息和动作信息等。

具体采集的位置和内容如图 6 所示。

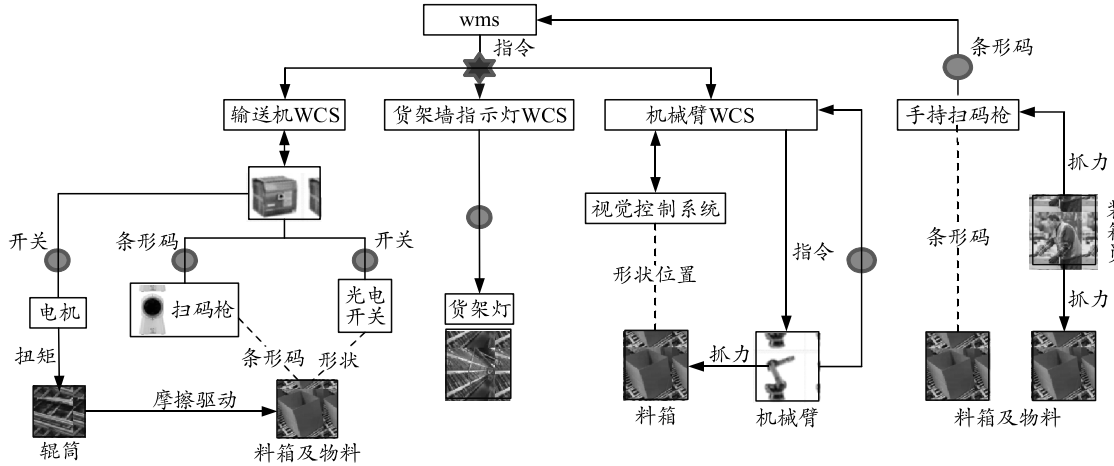


图 6 数据采集位置及内容

物理装箱线数据采集位置、内容与数据来源见表 1。

表 1 数据采集位置、内容与来源

采集位置	分类	采集内容	数据来源
输送机	设备信息	电机状态、扫码枪、光电开关	PLC
	任务信息	料箱号、料箱任务路线、拣选商品明细	WMS
机械臂	设备信息	机械臂设备状态信息	WCS
	任务信息	机械臂任务信息	WMS
货架	物料	库存信息	WMS
		入库信息	WMS
		出库信息	WMS
	指示灯	亮灯、灭灯信息	WMS
货箱	任务信息	实际工艺路线与计划是否一致	WMS
	进度质量	装箱进度信息、装箱质量信息	WMS

由于货箱和物料的移动没有控制信号和状态信号，只能借助输送机电机状态信号、机械臂状态信号和扫码枪的操作信息驱动。

### 4.2 数据采集及传输

数据采集及传输的准确性和实时性是数字孪生系统成功的保证。笔者从装箱线实时采集数据，并根据不同的应用需求进行传输和存储。直接传输给虚拟实体模型的数据为驱动动作数据，其他数据全部保存入库，用于查询和分析。

从物理装箱线获得数据的途径主要为输送机系统的 PLC 和 WMS 发出的指令数据和接收的扫码枪信息，以及 WCS 发出和接收的机械臂信息。根据数据实时性的需求，增加了数据采集存储系统，其原理和通信传输协议如图 7 所示。

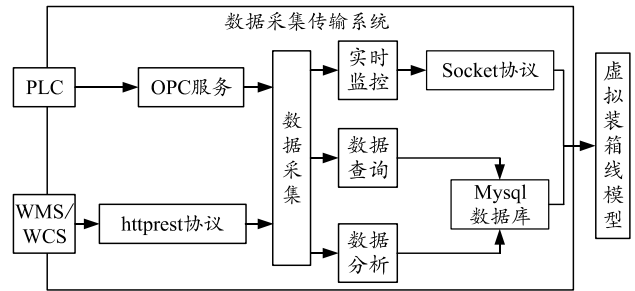


图 7 数据采集传输系统数据传输流程

#### 1) PLC 数据采集。

为实时获取 PLC 控制系统的数据库，笔者在系统中增加 1 台 OPC 服务器，从 PLC 获得输送机的扫描枪、光电开关和电机状态等数据，每 100 ms 扫描 1 次 PLC 数据存储器，获得所有输送机的实时运行状态信息。根据输送线上每节输送机的用途，规定整条输送线的状态值串的组合规则，按照规则把采集信号组成 1 个数据串，用以表示输送线的状态值。例如，输送机电机开关状态的组合规则如图 8 所示。

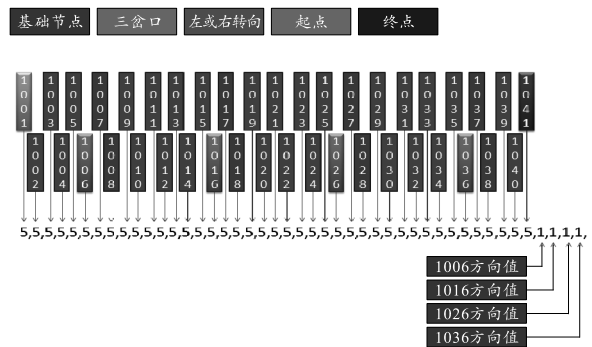


图 8 输送机电机开关状态的组合规则示例

其中,1001-1041 位为 41 个单向电机的状态值,在 1006、1016、1026、1036(可以将其设置为 1042-1045)的位置是输送机分道转弯位置,这里会产生 4 个移栽机的方向值。

根据上述规则,得到货箱在输送机上的运动轨迹数据,该数据可以驱动虚拟货箱同步移动。货箱从生产线入口到第 1 和第 2 工位分拣装箱的运行轨迹数据示例如图 9 所示(1: 有货, 2: 无货, 5: 停止)。

Table with 25 rows and multiple columns containing binary data representing conveyor belt tracking information.

图 9 输送机数据采集值示例

将这些数据逐条发送给虚拟装箱线模型,即可驱动装箱线模型的货箱按照实际的运行轨迹在虚拟的输送机上移动,进而实现虚实同步。

2) WMS/WCS 数据采集。

针对 WCS/WMS 下达与反馈等指令信息的采集,笔者采用了 httprest 协议,该协议具有通用、易理解,数据访问不会对现有系统造成干扰等优点。通过该协议,实时采集 WCS/WMS 系统发出的每条指令信息和装箱过程的反馈信息,保证虚拟模型和物理模型能够同时获得控制系统的指令和反馈信息。

笔者以机械臂为例,描述规定的指令格式,如表 2 所示。

3) 实时监控数据发送及解析。

实时监控的数据包括驱动虚拟实体与物理实体同步动作数据、错误报警信号数据。笔者以 socket 协议将采集到的输送机状态信息和 WMS/WCS 信息即时发送给虚拟装箱线模型,驱动虚拟模型同步运行。

表 2 机械臂动作指令格式说明

Table with 5 columns: 中文名, 英文名, 参数类型, 非空, 说明. It lists parameters for the crane action command such as device\_no, from\_point, to\_point.

虚拟模型得到的监控数据主要包括输送机设备状态信息、货箱运行路线信息、机械臂任务信息和状态信息、货架出货指令和分拣进度信息等多类信息。为了快速区分接收的实时数据并实现同步动作,笔者采用 2 位数字顺序编码,对整个系统的每条信息进行编码。装箱线指令编码如表 3 所示。

表 3 指令编码

Table with 4 columns: 采集位置, 分类, 采集内容, 信息编码. It lists collection points like '输送机' and '机械臂' with their respective categories and codes.

由于每类采集信息的内容不同,虚拟实体接收到实时数据后,首先需要确定接收信息的类别,然后按照该类别信息的组成,解析每个字段数据值,因此,用于实时发送和解析数据的每个实时驱动指令的组合规则为:

驱动虚拟动作指令串=指令信息编码+指令数据串。

按照该规则,驱动机械臂取货的指令如下:

“04”, “device\_no”: “001”, “from\_point”: “001”, “to\_point”: “002”

虚拟实体可以解读指令为机械臂的动作指令,要求机械臂的动作为 001 号机械臂完成从 001 工位取货,放到 002 工位。按此指令虚拟实体的设备和货物可以实时与物理实体同步动作。指令串不符合此规则,即为诊断到的指令错误。

应用本文中的建模方法,建成的数字孪生模型实例如图 10 和 11 所示。



图 10 装箱线物理场景和数字孪生场景实例



图 11 装箱线数字孪生场景实例的近景

### 5 结论

该自动化装箱线数字孪生模型构建方法已在某装备装箱线上进行了应用，构建形成了某装备装箱线数字孪生体，并进行了试运行。试运行结果证明：该数字孪生体不仅数据流程完整、数据准确，达到了利用虚拟装箱线进行远程实时监控生产过程的目的，而且完成了对现有物理装箱线功能进行系

\*\*\*\*\*

(上接第 4 页)

### 4.3 性能试验

常温输入及输出性能、高温输入性能和低温输入性能、18 V 可靠击发试验采用动态方法和静态方法，包括直接法和间接法<sup>[12]</sup>，过程中未发生故障，满足指标要求，试验结果如表 3 所示。

表 3 电底火性能试验结果

项目	数量	点火压力 /MPa	最大压力上升时间/ms	备注
常温输入及输出性能	55	1.9~2.4	25~116	可靠发火
高温工作	30	—	—	可靠发火
低温工作	30	—	—	可靠发火
18 V 可靠击发	115	—	—	可靠发火

其中常温试验对点火压力和最大压力上升时间进行了摸底，为系列电底火设计进行了数据积累。

### 5 结束语

长管电底火结构功能适用于可编程引信的信息装定要求，装定系统采用低电压小电流，并依靠限压限流模块等措施，确保装定过程中的底火安全。装定信号通过坦克炮电击发机构和长管电底火共线通道，实现信息装定和反馈，同时为引信供电。引信具有空炸、触发和延期 3 种作用方式和小落角发火、自毁功能，杀爆弹预制大量前向杀伤元，采用

统化的检查与优化，为生产质量和效率的提升奠定了基础。

### 参考文献：

[1] GRIEVES M. Digital twin:manufacturing excellence through virtual factory replication[M]. melbourne, fla, USA: flori-dalnstute of technology, 2015.

[2] 邱枫. 基于数字孪生的装配车间资源实时监控方法[J]. 兵工自动化, 2022, 41(11): 18-23.

[3] 朱春明, 何仁平. 基于数字孪生的总装车间质量智能管控决策应用技术[J]. 兵工自动化, 2022, 40(6): 24-30.

[4] 魏一雄, 郭磊, 陈亮希. 基于实时数据驱动的数字孪生车间研究及实现[J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27(2): 352-363.

[5] 马靖, 王译晨, 赵明. 基于数字孪生的生产单元可视化管控[J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27(5): 1256-1268.

侵彻型弹体，具备多种作战功能，可有效压制和消灭敌有生力量。

### 参考文献：

[1] 刘志学. 火箭筒漫谈[J]. 人民公安, 2007(12): 50-51.

[2] 夏建才. 火工品制造[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2009: 116.

[3] 陈福梅. 火工品工艺学[M]. 北京: 北京工业学院, 1964: 126-141.

[4] 王志军, 尹志平. 弹药学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2005: 56-57.

[5] 王凯民, 张学舜. 火工品工程设计与试验[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010: 11.

[6] 王凯民, 张学舜. 火工品工程设计与试验[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010: 16.

[7] 高峰. 引信隔爆试验内腔气体压力的工程计算[C]// 第十四届引信学术年会. 中国兵工学会, 2005: 375-380.

[8] 任鹏. 弹道特性参数计算及密闭燃烧压力实验[J]. 含能材料, 2005(1): 55-65.

[9] 王德才. 火药学[M]. 南京: 南京理工大学, 1998: 155.

[10] 邓康. 导弹点火系统安全性设计方法研究[J]. 现代防御技术, 2017, 45(3): 22-27, 33.

[11] 马宏宣. 国外抗静电抗射频电火工品[J]. 火工品, 1981(3): 21.

[12] 祝逢春. 浅谈雷管输出性能的测试方法[C]// 第十一届火工烟火专业年会. 中国兵工学会, 2001: 404-408.