

doi: 10.7690/bgzd.2025.12.020

通航飞机飞行任务的着色 Petri 网建模与分析

钱 宇, 李欣颖

(中国民用航空飞行学院飞行技术学院, 四川 广汉 618307)

摘要: 为解决现有建模分析方法在飞行任务中系统建模和性能分析中存在的不足, 提出一种建立飞行任务过程模型、从任务角度出发对通航飞机操纵过程进行研究的方法。结合飞行任务人机工效分析及逻辑关系, 基于着色 Petri 网理论提出通航飞机飞行任务建模与性能分析方法, 利用 CPN Tools 工具建立飞行任务模型, 基于该模型构建同构马尔可夫链求解模型主要性能指标, 并以实例分析验证该方法的有效性。结果表明: 该方法对飞行任务操纵过程的描述清晰直观, 可为飞行任务设计及保障飞行安全提供数据支持。

关键词: 通航飞机飞行任务; CPN; 马尔科夫链; 建模与分析

中图分类号: TP302.7; V223.1 **文献标志码:** A

Modeling and Analysis of General Aviation Aircraft Flight Mission Based on Colored Petri Net

Qian Yu, Li Xinying

(College of Flight Technology, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, China)

Abstract: In order to overcome the shortcomings of the existing modeling and analysis methods in system modeling and performance analysis in flight mission, a method is proposed to establish a flight mission process model and study the operation process of a general aviation aircraft from the mission point of view. Combined with the ergonomic analysis and logical relationship of flight mission, a method of flight mission modeling and performance analysis for general aviation aircraft is proposed based on colored Petri net (CPN) theory. The flight mission model is established by CPN Tools, and the isomorphic Markov chain is constructed based on the model to solve the main performance indicators of the model, and the effectiveness of the method is verified by an example. The results show that the method can describe the flight mission control process clearly and intuitively, and can provide data support for flight mission design and flight safety.

Keywords: general aviation aircraft flight mission; CPN; Markov chain; modeling and analysis

0 引言

航空领域中, 通航飞机的使用范围不断扩大, 飞行任务的复杂性和挑战性也随之增加。在这些任务中, 飞行员需要面对各种挑战和决策问题, 如指令解读、飞行计划制定和任务执行等。通航飞机的特点使得这些任务具有高度的灵活性和复杂性, 对飞行员的认知和决策能力提出了更高的要求。当飞行员不能承担复杂的飞行任务带来的认知负荷时, 易造成判断决策及实际操作错误, 进而威胁飞行安全; 因此, 通航飞机飞行任务建模对于提高飞行任务的执行效能和飞行安全性具有重要意义。

为了实现上述目标, 使用形式化方法对飞行任务操纵过程进行建模与分析是一种可行的方法。在主流的建模方法中, Petri 网适用于描述异步、并发的计算机系统模型, 目前, 许多学者通过使用 Petri 网对工作流程进行建模 Chen 等^[1]使用着色 Petri 网

(CPN) 方法对 iPad 生产流程建模, 实现流程优化从而降低成本。Denno 等^[2]把 Petri 网理论和遗传规划理论运用到生产制造系统建模中, 提出一种能够辅助生产调度决策的生产系统识别方法。周学广等^[3]应用 CPN Tools 建立舰艇指挥信息流模型, 构建舰艇指挥控制模型。张原等^[4]建立了基于 Petri 网的航空装备虚拟维修训练仿真模型。张源原等^[5]基于采用着色 Petri 网对无人机侦查战术进行规划。潘华等^[6]采用 Petri 网对飞行组流程进行优化研究。高颖杰等^[7]提出维修工作 Petri 网对装备维修资源需求进行预测。孙国磊等^[8]建立作战指挥引导的工作流模型, 并使用 Petri 网对其进行验证。从上述研究可得, 学者们在不同的研究领域将 CPN 运用到系统工作流程建模中, 但总体而言, 对通航飞机飞行任务的 CPN 建模研究较少, 将 Petri 网与通航飞机飞行任务各要素相结合并建模, 进行性能分析, 方便检验

收稿日期: 2024-10-11; 修回日期: 2024-11-18

基金项目: 国家自然科学基金委员会与中国民用航空局联合基金(U2133209); 民航飞行技术与飞行安全重点实验室自主研究项目(FZ2020ZZ01)

第一作者: 钱 宇(1981—), 男, 四川人, 博士。

飞行任务中是否出现资源冲突、死锁等现象。

该研究在对通航飞机的飞行任务基本要素及任务中的人机交互进行分析的基础上,利用 CPN 基本理论将飞行任务逻辑关系与 Petri 网要素相结合,提出利用 CPN 理论构建飞行任务 CPN 模型的建模方法,将人机交互任务流程细化,动态描述通航飞机飞行任务流程,通过对模型有界性及活性的验证,进而对模型进行相关性能分析。利用该方法对某通航飞机中断着陆飞行任务进行建模,验证了该方法的有效性。

1 通航飞机飞行任务分析

1.1 飞行任务基本要素

通过分析相关飞行任务,确定通航飞机飞行任务基本要素包含:

1) 航行计划:飞行任务的第一步是制定航行计划,包括起飞机场、目的地、飞行路线和预计飞行时间等信息。

2) 飞行条件:考虑飞行任务期间的天气状况、风速和风向、气温等因素,这些因素会影响飞行性能和安全。

3) 起飞和降落:飞行任务的起点和终点是 2 个重要环节。起飞时,需要考虑跑道长度、风向等因素,以确保安全起飞。降落时,需要选择适当的跑道和逼近程序。

4) 巡航阶段:飞行任务的巡航阶段是飞机在飞行路线上匀速飞行和保持高度的阶段。需要考虑燃油消耗、航速、空中交通管制等因素。

5) 燃油管理:在飞行任务中,燃油管理至关重要。需要考虑燃油消耗率、燃油储备和加油站点等,以确保在目的地前有足够的燃油。

6) 空中交通管制:飞行任务期间可能需要与其他飞机和空中交通管制部门进行通信和协调,以确保飞行安全和遵守规定。

1.2 飞行任务中人机交互分析

1) 信息获取。在任务执行过程中,飞行员利用主飞行显示器、语音提示等视听觉通道获取完成任务飞行阶段所需要的信息,包括天气状况、航路信息、机场情况等;通过操作装置的肌肉记忆和压觉反馈等触觉对飞行状态和操纵装置位置等信息进行获取。飞行员通过视觉、听觉、触觉等感官来获取完成飞行任务的所需信息。

2) 信息处理。飞行员完成信息获取后,将接收

到的信息发送到大脑进行识别,调用大脑中相关操纵知识分析获取信息,产生相应决策并调整飞行计划。获取的信息通过大脑加工处理后,贮存到飞行员的长期记忆和短期记忆中,便于下次调用。如果飞行员要处理的感知信息资源大于脑中长期记忆或者短期记忆的判断资源,则容易产生认知负荷,威胁飞行安全。

3) 任务执行。基于对信息的获取和处理,飞行员将执行各种飞行任务,包括起飞、导航、飞行姿态控制、仪表飞行、下降和着陆等。飞行员在手、脚等执行资源的支持下操纵执行装置将决策信息执行到驾驶舱各控制面板上。

2 着色 Petri 网模型

Petri 网是一种图形化建模工具,用于描述系统的并发性、同步性和状态转换。其元素包含库所(place)、变迁(transition)、有向弧(arc)和托肯(token),库所表示系统中的状态,变迁表示系统中的活动或事件,弧表示地点和变迁之间的关系,托肯表示系统的资源。基于传统的 Petri 网建立的模型较大且复杂,为解决此问题,在基本 Petri 网的基础上对其拓展,通过引入颜色集(color)的概念,可以对系统中的对象和资源进行更精确的建模,进而简化模型的复杂程度。着色 Petri 网^[9-10]定义如下:

定义 1:着色 Petri 网可以用 7 元组 $\Sigma=(S, T, F, C, M, W, K)$ 表示。

1) S 是库所集合, $S=(s_1, s_2, s_3, \dots, s_m)$;

2) T 是变迁集合, $T=(t_1, t_2, t_3, \dots, t_n)$;

3) F 是有向弧集合, $F \subseteq S \times T \cup T \times S$;

4) C 是颜色函数,映射到库所的颜色函数;

5) $M:S \rightarrow L(C)$ 为 Σ 的一个标识, $\forall s \in S$: $M(s) \leq K(s)$;

6) $W:F \rightarrow L(C)_+$ 为权函数;

7) $K:S \rightarrow L(C)_+$ 为容量函数。

$L(C)$ 表示定义在颜色函数 C 上的一个线性函数,其系数为非负整数系数, $L(C)_+$ 表示系数不全为 0 的 $L(C)$ 。

定义 2:着色 Petri 网变迁实施规则。

1) 对于 $t \in T$, 在标识 M 下实施的条件为:

$$\left. \begin{aligned} \forall s = \cdot t : M(s) &\geq W(s, t) \\ \forall s = t \cdot \dots : M(s) + W(t, s) &\leq K(s) \\ \forall s = t \cdot \cap \cdot t : M(s) + W(t, s) - W(s, t) &\leq K(s) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: $\cdot t$ 为 t 的前集; $t \cdot$ 为 t 的后集; $t \cdot \cap \cdot t$ 为 t 的

外延。

2) 在变迁 t 发生后, 对于任意 $s \in S$:

$$M'(s) = \begin{cases} M(s) - W(s, t), & \text{若 } s \in t - t \cdot \\ M(s) - W(s, t), & \text{若 } s \in t \cdot - t \\ M(s) + W(t, s) - W(s, t), & \text{若 } s \in t \cdot \cup t \cdot \\ M(s), & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

3 通航飞机中断着陆飞行任务 CPN 模型

参考某型通航飞机飞行手册和真实飞行操作情况, 结合 Petri 网时序性特点总结飞行任务流程, 根据时间先后顺序可将通航飞机飞行流程分为起飞前准备、起飞、爬升、降落过和接地 5 个基本飞行阶段。可得知, 飞行员执行任务的过程有很强的结构性, 必须按照计划好的航线完成整个飞行任务, 而随着飞行环境、飞行资源等出现变化, 飞行员在各阶段飞行任务的操作重点也将发生变化。以通航中断着陆飞行阶段为例, 介绍研究方法于 CPN 建模中的应用。

3.1 飞行任务逻辑映射为 Petri 网模型规则

由上述分析可知, 在飞行任务中, 操纵步骤之间存在串行关系、并行关系和选择关系 3 种常见的逻辑关系。

1) 串行关系表示操纵步骤按照一定的顺序依次执行。当前步骤的执行依赖于前一步骤的完成。只有前一步骤完成后, 才能进行下一步骤。这种关系常见于飞行任务中的操作流程, 例如起飞前的检查流程, 需要按照一定的顺序逐步完成各项检查。

2) 并行关系表示操纵步骤可以同时或部分同时执行。多个步骤可以在同一时间段内进行, 彼此之间相互独立。这种关系常见于飞行任务中的多个操作同时进行的情况, 例如在飞行过程中, 飞行员可能需要同时监控飞行仪表、与空中交通管制进行通信和调整飞行姿态等。

3) 选择关系表示操纵步骤之间存在多个可选的路径或选项。根据特定的条件或情况, 只能选择其中的一个路径或选项进行执行。这种关系常见于飞行任务中的决策过程, 例如在遇到紧急情况时, 飞行员可能需要根据飞机状态和环境条件做出不同的决策, 选择最合适的行动方案。

3 种关系结合 Petri 网基本元素可通过图 1 所示模型表示。

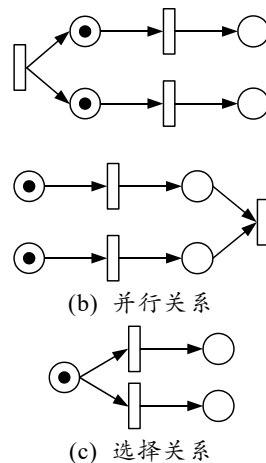
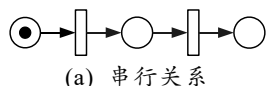


图 1 逻辑关系

3.2 飞行任务基本要素

选取某型通航飞机中断着陆操作飞行任务作为建模对象。当疑似出现相关不利于着陆的因素时, 飞行员根据对当前飞行状态的分析作出是否中断着陆的决断: 若继续着陆, 则继续该操纵程序; 若执行中断着陆, 断开自动驾驶, 油门杆前推最大, 减小襟翼设定至 50%。如果在复飞过程中必须飞越障碍物, 使用 50%襟翼的最佳角度爬升 (81 KIAS)。飞越所有障碍物之后, 收上襟翼并加速至正常的襟翼收上爬升速度。到达安全高度 91.44 m, 建立并保持速度 96 KIAS, 加入相应的程序。此飞行任务操纵流程如图 2 所示。

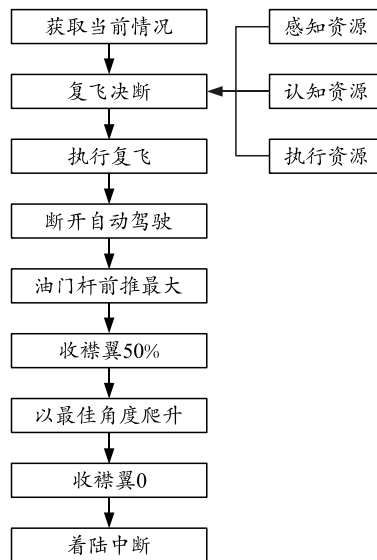


图 2 中断着陆操纵过程

在获取飞行员驾驶通航飞机进行中断着陆操作流程的详细描述基础上, 针对流程中飞行的决策及其对流程状态的改变, 采用研究中提到的 CPN 对其进行建模。

3.3 任务建模

3.3.1 模型声明

通过 CPN Tools 建立中断着陆飞行任务的着色 Petri 网模型。运用 CPN ML 语言对模型中所需颜色集、函数和信息变量等进行声明^[11]。通航飞机中断着陆飞行任务流通的信息主要是任务信息(颜色集 A)和资源信息(颜色集 R)，分别用 a 和 b 标记。同时在声明中增加感知、认知和执行 3 类资源变量^[12]，则资源颜色集“ $rs(n)$ ”为“ $rs(3)$ ”。依照颜色集划分，将飞行任务信息的 2 类信息变量“托肯”分别定义为 x 、 y 。

3.3.2 库所及变迁设置

利用库所和变迁对中断着陆飞行任务中的不同飞行状态及内容进行描述，基于任务信息和资源信息对各库所进行相应颜色集划分。所建飞行任务模型中所有库所、颜色集和变迁的含义见表 1 所示。

3.3.3 资源调度情况

在实际执行飞行任务过程中，可能会因为飞行任务操纵所需资源处于被占用等状态而影响对其的调用，因此，在模型中采用“if-then-else”函数解释资源所处状态，感知、认知和执行 3 类资源分别

使用 $rs(1)$ ， $rs(2)$ ， $rs(3)$ 进行描述。以 $rs(1)$ 为例，其“if-then-else”函数为：

ifx=a
then1'rs(1)
else empty.

(3)

当感知资源处于可正常调用状态时，信息托肯 $x=a$ ，则赋予一个 $rs(1)$ 。当感知、认知和执行 3 类资源都可实施正常调用和释放时，才能触发该变迁，即进入下一飞行状态。中断着陆流程运用 CPN Tools 进行模型构建，如图 3 所示。

表 1 模型中库所、颜色集和变迁含义

库所	含义	颜色集	变迁	操纵动作
P_1	飞行	A	T_1	获取任务信息
P_2	开始调用感知资源	A	T_2	调用感知资源
P_3	开始调用认知资源	A	T_3	调用认知资源
P_4	开始检查执行资源	R	T_4	检查执行资源
P_5	感知资源释放	R	T_5	判断决策
P_6	传输与储存认知资源	R	T_6	断开自动驾驶
P_7	执行资源正常	A	T_7	油门杆前推最大
P_8	完成复飞决策	A	T_8	收襟翼 50%
P_9	手动驾驶	A	T_9	以最佳角度爬升
P_{10}	修正相关参数	A	T_{10}	收襟翼 0
P_{11}	修正相关参数	A	T_{11}	着陆中断
P_{12}	修正相关参数	A	T_{12}	复飞完成
P_{13}	修正相关参数	A		
P_{14}	复飞	A		

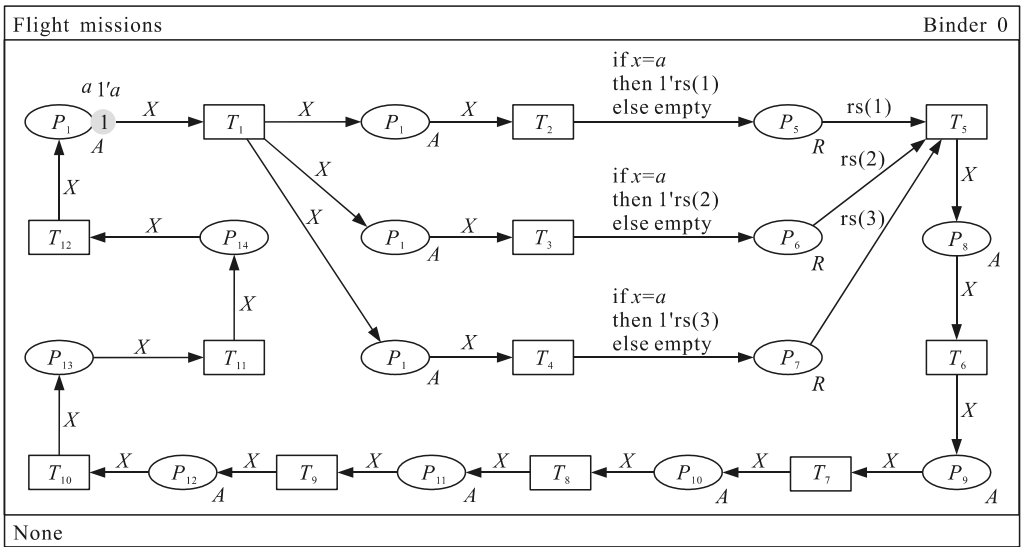


图 3 中断着陆过程 CPN 模型

3.4 模型分析

模型包含 16 个节点和 21 条弧，状态空间有限，可对模型性质在状态空间中进行模拟验证。分析模型中每个库所在所有可达状态下所拥有的托肯个数，从图 4 可知最大值 (upper) 均为 1，最小值 (lower) 均为 0，说明模型中的所有事件都只存在发生或者

不发生 2 种情况，即此模型有界。

同时，活性检验如图 5 中的死标识 (dead markings) 和死变迁 (dead transition instances) 的数值都是“None”，即模型中的变迁都具有活性，每个变迁都能因相应条件的发生而被触发，则研究中模型具有活性。综上，研究所建模型通过有界性和

了解系统中资源的分配情况和利用率。库所的概率函数为：

$$A[m(s_i)=1]=\sum_j P_j。$$
 (5)

变迁利用率表示使变迁可触发的所有标识的稳定概率之和，反映各个变迁的利用程度以及系统稳定性。变迁利用率为：

$$U(t_i)=\sum_{m\in e}A[m]。$$
 (6)

根据中断着陆飞行任务流程构建的可达图，得到各标识状态下各库所的托肯分布矩阵，代入式(5)和(6)，在 Matlab 中求得各库所的平均托肯数和变迁利用率，结果如表 3 和 4 所示。

表 3 模型库所平均托肯数

库所	平均托肯数	库所	平均托肯数
P_1	0.022 27	P_8	0.047 49
P_2	0.059 38	P_9	0.047 49
P_3	0.111 32	P_{10}	0.047 49
P_4	0.055 68	P_{11}	0.047 49
P_5	0.324 68	P_{12}	0.047 49
P_6	0.272 74	P_{13}	0.118 74
P_7	0.328 38	P_{14}	0.237 48

由表 3 可知：除复飞完成外，操纵过程中库所 P_5 、 P_6 、 P_7 平均托肯数较大，表现较为繁忙，意味着复飞任务的工作状态最容易在这些状态停留，影响复飞任务的执行。主要原因是在这些环节飞行员需要进行感知资源的传递与释放、认知资源的调用、确保执行资源准备完毕，主要将精力集中在获取相关飞行状态信息及周围环境信息等，对是否进行复飞做出决策的工作中，同时可能造成飞行员工作负荷的增加。

表 4 变迁平均利用率

变迁	平均利用率	变迁	平均利用率
T_1	0.022 27	T_7	0.047 49
T_2	0.059 38	T_8	0.047 49
T_3	0.111 32	T_9	0.047 49
T_4	0.055 68	T_{10}	0.047 49
T_5	0.237 48	T_{11}	0.118 74
T_6	0.047 49	T_{12}	0.237 48

由表 4 可知：除复飞完成外， T_5 的变迁利用率较高，进行判断决策耗时较长，进一步说明飞行员的复飞决策是整个中断着陆任务的关键节点。由于涉及多类资源的调度，如视听觉资源、工作记忆资源、长期记忆资源和各类执行资源等，需加强飞行员对获取的资源信息进行正确研究判断的能力，从而提供决策方案。

据统计，超过 70% 的进近和着陆事故中都包含一些应该被机组识别而且应该复飞的不利于着陆的因素^[15]。可见，正确的复飞决策是保证飞行安全的关键。研究模型的分析结果与实际情况相符，说明

研究模型合理有效。

4 结束语

1) 分析通航飞机飞行任务，确定任务逻辑，运用 CPN 对通航飞机飞行任务进行建模与分析，利用 CPN Tools 平台，验证模型的有界性和活性，结果表明研究提出模型和方法的有效性与适用性。

2) 结合实例，将 CPN 模型与通航飞机飞行任务相结合，具有对任务活动流程、资源分配和状态转换进行直观和形式化描述的优势，同时可对操纵流程时间进行分析评估，能够为设计人员合理设计飞行任务操纵流程，提高飞行效率，保证飞行安全提供科学依据。

3) 飞行任务执行过程中，飞行员是此过程中的主体，该研究中未能充分考虑到主体的意图，从而根据发生的动作推测出飞行员的意图，更好地对飞行员的目标和行为进行监控。在模型基础上可考虑将模糊理论引入 Petri 网建模。

参考文献：

[1] SHEN R K, CHIOU G J, YANG C Y, et al. Petri net modeling and analysis of an iPad manufacturing system[J]. Systems Engineering, 2018, 21(2): 115-130.

[2] DENNO P, DICKERSON C, HARDING J A. Dynamic production system identification for smart manufacturing systems[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2018, 48: 192-203.

[3] 周学广, 吕伟栋, 袁志民. 基于着色 Petri 网的舰艇指挥控制信息流建模研究[J]. 系统仿真学报, 2019, 31(5): 828-842.

[4] 张原, 李璇. Petri 网作用下航空装备虚拟维修训练仿真[J]. 计算机仿真, 2023, 40(4): 52-56.

[5] 张源原, 高阳, 朱鹏, 等. 基于着色 Petri 网的无人机侦察战术规划[J]. 系统工程与电子技术, 2022, 44(3): 900-907.

[6] 潘华, 王凌, 沈铮, 等. 基于 Petri 网的飞行组训流程 RPA 优化研究[J]. 电光与控制, 2022, 29(10): 92-95.

[7] 高颖杰, 曹继平, 杨阅兵, 等. 基于改进 Petri 网的装备维修资源需求预测[J]. 兵工自动化, 2021, 40(2): 81-84.

[8] 孙国磊, 李冬, 李京. 基于 UML 和 Petri 网的舰载机作战指挥引导[J]. 兵工自动化, 2016, 35(4): 76-80.

[9] JENSEN K. Colored Petri nets: basic concepts[M]. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 1992: 23-50.

[10] THANGARAJAH J, WINIKOFF M, LIN P, et al. Avoiding resource conflicts in intelligent agents[C]// Proc. of the 15th European Conference on Artificial Intelligence. Amsterdam, Netherlands: IOS Press, 2002: 18-22.

- [11] 梁伟婷, 杨高升. 基于着色 Petri 网的地铁系统运营期应急管理流程建模与分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2023, 19(5): 179-185.
- [12] 张源原, 高阳, 周晓光, 等. 逻辑靶场操作流程设计[J]. 兵工自动化, 2022, 41(4): 44-48.
- [13] 张晓燕. 驾驶舱中飞行员动态视觉特性及操纵特性建

(上接第 68 页)

从表 1 中可以看出: 所接受测试的 6 只产品, 最大基本误差为 0.04%、0.02%、0.04%、0.04%、0.04%、0.02%, 线性度在 5/10000 以内。

4 结束语

测试数据表明, 笔者设计的变压器耦合隔离放大器已具备较高的线性度, 验证了这种高线性度耦合隔离放大器具有技术优势。

(上接第 91 页)

参考文献:

- [1] 郝飞, 李玫, 徐鹏, 等. 简析反应装甲及其装药现状与发展趋势[J]. 兵工自动化, 2019, 38(8): 94-96.
- [2] 熊冉, 高欣宝, 张俊坤, 等. 杆式穿甲弹侵彻下陶瓷与均质钢板的等效关系数值分析[J]. 弹箭与制导学报, 2013, 33(5): 102-104.
- [3] 谭力犁, 张团, 乔立刚, 等. 聚能射流侵彻运动钢靶的数值仿真[J]. 兵工自动化, 2021, 40(10): 6-9.
- [4] 张自强. 装甲防护技术基础[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2000: 242-247.
- [5] 赵留平. 破片模拟弹侵彻陶瓷/船用钢复合靶板的理论分析模型研究[J]. 中国舰船研究, 2011, 6(2): 40-45.
- [6] 李坤. 基于射流作用的国外某坦克复合装甲等效靶研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2021: 2-7.
- [7] 柯源, 刘彦, 黄风雷. 不同着角下爆炸成形弹丸对坦克发动机等效靶的毁伤效应[J]. 北京理工大学学报, 2021, 41(2): 130-136.
- [8] 陈威, 李吉峰, 朱磊. 聚能射流侵彻下舰船钢与均质钢的等效关系[J]. 装甲兵工程学院学报, 2010, 24(2): 45-48.
- [9] FARRAND T, MAGNESS L, BURKINS M. Definition and Uses of RHA Equivalences Formedium Caliber

模与仿真[D]. 西安: 西北工业大学, 2017.

- [14] 刘勇, 武昌, 曾玉君, 等. 基于广义随机 Petri 网的装备战场抢修建模与分析[J]. 火力与指挥控制, 2008(8): 124-127.
- [15] 刘军凯. 飞机复飞过程风险的影响因素研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2017.

参考文献:

- [1] 张肃文. 高频电子线路[M]. 北京: 高等教育出版社, 1984: 539-544.
- [2] 赵希才. 隔离放大器及其应用[J]. 电子技术应用, 2000(3): 70-72.
- [3] 邱关源. 电路[M]. 北京: 人民教育出版社, 1978: 604-609.
- [4] 蹇锡钧. 载波通信原理电路[M]. 北京: 人民邮电出版社, 1991.
- [5] FRANCO S. Design with Operational Amplifiers and Analog Integrated Circuits[M]. High Voltage Engineering, 1988.
- Targets[C]//the 19th International Symposium of Ballistics. Switzerland: Interlaken, Kanton Bern, 2001: 1159-1165.
- [10] HELD M. Shaped Charge Steel Equivalence[C]//the 20th International Symposium of Ballistics. America: Florida, Orlando, 2002: 23-27.
- [11] 侯俊超, 王春光, 邓德志, 等. 高速弹丸侵彻混凝土靶板等效厚度研究[J]. 兵器装备工程学报, 2021, 42(2): 9-14.
- [12] 刘蓓蓓. 爆炸反应装甲等效靶研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2015: 46-51.
- [13] 李金柱, 黄风雷, 张连生. EFP 模拟弹丸侵彻陶瓷复合靶的数值模拟研究[J]. 计算力学学报, 2009, 26(4): 562-567.
- [14] 奥尔连科. 爆炸物理学[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 937-945.
- [15] 孙乐, 张伟, 黄俊卿, 等. 破甲弹侵彻装甲板的数值仿真[J]. 装甲兵工程学院学报, 2009, 23(6): 53-56.
- [16] 王儒策, 赵国志. 弹丸终点效应[M]. 南京: 南京理工大学, 1990: 229-244.
- [17] 王艳苹. 聚能装药杀伤破甲子弹战斗部装药结构优化设计[D]. 南京: 南京理工大学, 2005: 1-2.
- [18] 王颂康. 弹药家族之六: 无控和简易控制火箭弹[J]. 现代军事, 2003(12): 57-59.