

文章编号: 2097-1974(2026)01-0016-07

DOI: 10.7654/j.issn.2097-1974.20260103

# 模块化飞行器通用部件构建方法研究

郭斐然<sup>1,2</sup>, 刘璐芳<sup>1</sup>, 韩铭麟<sup>1</sup>, 张旭辉<sup>1</sup>

(1. 中国航天科技创新研究院, 北京, 100088; 2. 中国运载火箭技术研究院, 北京, 100076)

**摘要:** 为了满足多样化任务需求、降低设计生产成本, 模块化设计已成为飞行器系统设计的重要发展方向。对于模块化飞行器而言, 通用部件是关键组成部分, 同时也是开展模块化设计的首要前提与重要基础。针对传统飞行器设计中模块通用性差的问题, 提出了一种基于自组织映射神经网络的通用部件构建方法。首先, 介绍了模块化飞行器设计的特点及内容; 其次, 针对自组织映射算法计算时间较长、易陷入局部最优的问题, 给出了自组织映射与神经网络相结合的通用部件构建方法计算流程; 最后, 结合模块化飞行器设计实例开展仿真试验验证。试验结果表明, 提出的通用部件构建方法能够有效满足模块化飞行器通用部件构建需求, 同时相较于单一自组织映射算法在计算时间、求解精度方面有大幅提升。

**关键词:** 飞行器; 模块化; 通用部件; 自组织映射; 神经网络

中图分类号: V19

文献标识码: A

## Research on the Construction Method of General Components for Modular Flight Vehicles

GUO Feiran<sup>1,2</sup>, LIU Lufang<sup>1</sup>, HAN Minglin<sup>1</sup>, ZHANG Xuhui<sup>1</sup>

(1. China Academy of Aerospace Science and Innovation, Beijing, 100088;

2. China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing, 100076)

**Abstract:** In order to meet diverse mission requirements and reduce design and production costs, modular design has become an important development direction for flight vehicle system design. For modular flight vehicle, general components are key components and also the primary prerequisite and important foundation for carrying out modular design. To address the problem of poor module universality in traditional flight vehicle design, a general component construction method based on self-organizing mapping neural network is proposed. Firstly, the characteristics and content of modular flight vehicle design are introduced. Secondly, in response to the problem of long computation time and easily getting in the local optimization in self-organizing mapping algorithm, the calculation process for the general component construction method combining self-organizing mapping and neural network is proposed. Finally, simulation experiments are conducted using a modular flight vehicle design example to validate the proposed general component construction method. The results show that the method can effectively meet the requirements of modular flight vehicle general component construction, and significantly improve computation time and solution accuracy compared to a single self-organizing mapping algorithm.

**Keywords:** flight vehicle; modularization; general component; self-organizing mapping; neural network

## 0 引言

随着人工智能技术的飞速发展, 未来战场的复杂性和不确定性日益增强<sup>[1]</sup>。在实际执行任务过程中, 复杂的战场环境和多样化的任务需求对飞行器系统的灵活性、机动性以及高效性提出了极大要求, 同时任务目标的多样性也对未来飞行器的研制成本提出了极大挑战, 仅有的几种单一型号飞行器很有可能无法满足更高的任务需求。通过模块化设计, 以模块为基本

单元进行系统的快速集成及功能性拓展, 在降低研制成本的同时将大大提高飞行器系统的任务适应能力。模块化飞行器设计即将飞行器按照结构组成分解为各种功能不同的模块, 且各模块间采用通用化设计的标准接口, 可根据不同任务的需要进行实时组装, 以适应不同的任务场景。

近年来, 以美国为代表的许多军事大国均在一定程度上将模块化设计理念融入飞行器系统研制工作中<sup>[2]</sup>, 推出一系列相应型号, 如美国的战斧巡航导

弹<sup>[3-5]</sup>，俄罗斯的C-300B、C-400防空导弹<sup>[6-8]</sup>，欧洲国家的FlexiS柔性导弹<sup>[9-10]</sup>，法国的AASM制导炸弹<sup>[11]</sup>等，有效提升了飞行器系统的战场适应能力。

针对模块化飞行器而言，通用部件是关键组成部分，同时也是开展模块化设计的首要前提与重要基础。根据飞行器的结构功能组成，在形成不同类型通用部件库的过程中，每一类型部件库中会存在若干具有不同属性及相关参数值的通用部件，这样根据不同的任务需求，可以实时匹配满足相应任务需求的不同功能模块，实时组装为相应功能的飞行器系统，从而可极大提高实时战场环境下面对不同任务需求时飞行器的灵活性。通用部件库的构成要求其中的各部件在组成结构上大体相同，且在相应性能参数方面的差异要在可接受范围内。自组织映射（Self-Organizing Mapping, SOM）作为一种非监督聚类算法，由Teuvo Kohonen<sup>[12]</sup>于1981年提出，可通过人工神经网络的“胜者为王”（Winner Takes All, WTA）竞争机制<sup>[13]</sup>实现对输入样本特征的有效聚类<sup>[14-17]</sup>，目前已在各领域得到广泛应用。

然而，随着样本数据量的大幅增加，采用单一自组织映射算法存在计算时间较长、求解精度下降的问题。针对这一问题，本文根据自组织映射的聚类特性，结合BP神经网络的优势，将其应用于模块化飞行器通用部件构建中，通过自组织映射神经网络算法，实现了模块化通用部件库的构建。

## 1 模块化飞行器设计

### 1.1 模块化设计特点

模块化设计方法是产品多样化、通用化、系列化、标准化以及智能化的有机统一，是一种先进高效的设计方法。模块化设计具有如下特点：

a) 相对独立性。

模块化设计系统中的每个模块都具有某个特定的功能，模块间没有或者少有功能交叉的部分，有利于形成功能模块间清晰的设计界面。

b) 互换性。

模块间的接口在机械、电气等特性上均是通用的，有利于模块间进行互换。

c) 通用性。

在产品体系的横向系列和纵向系列，甚至跨系列中，单个模块均可实现通用。

d) 系列化。

对于一批模块，当它们结构特征相似，仅各相关参数不同时，则构成系列化的模块，这些模块既可运

用于系列化的产品中，也可运用于单件产品中。

### 1.2 飞行器模块化设计内容

对于飞行器系统而言，模块化设计飞行器系统由通用平台+不同载荷的形式构成，如图1所示，为模块化设计飞行器系统的典型组成结构。

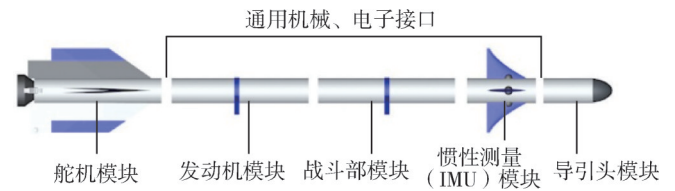


图1 模块化飞行器典型组成结构

Fig.1 Typical composition structure of modular flight vehicle

根据模块化设计的定义，可以得出飞行器系统模块化设计主要包括3个方面内容，如表1所示，分别是宏模型设计、微模型设计以及组构模式设计<sup>[18]</sup>。

表1 飞行器系统模块化设计主要内容

Tab.1 Main content of modular design for flight vehicle systems

名称	具体内容	
宏模型设计	目标	指标的区段划分
	可能的任务环境	系列化、多样化型谱设计
	生产条件	模块任务、功能规划
微模型设计	模块内部详细设计	标准接口界面设计
组构模式设计	组构模式种类	各模式下性能指标设计

## 2 自组织映射神经网络算法

### 2.1 自组织映射网络结构

自组织映射（Self-Organizing Map, SOM）网络结构如图2所示，它由输入层和竞争层（输出层）组成，网络采用全连接结构，即每个输入节点都同所有的输出节点相连接。

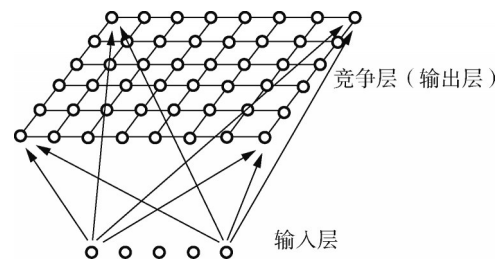


图2 SOM网络结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of SOM network structure

### 2.2 神经元交互模式

SOM网络能将任意维输入模式在输出层映射成一维或二维图形，并保持其拓扑结构不变。其竞争层中各神经元竞争对输入模式的响应机会，获胜神经元

有关的各权重朝着更有利于它竞争的方向调整,即以获胜神经元为圆心,对近邻的神经元表现出兴奋性侧反馈,而对远邻的神经元表现出抑制性侧反馈,近邻者相互激励,远邻者相互抑制。图3为SOM网络的神经元交互模式。

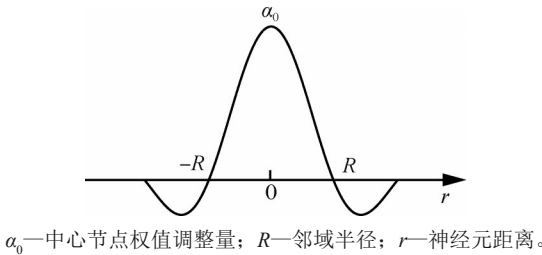


图3 神经元交互模式  
Fig.3 Neuron interaction mode

2.3 自组织映射神经网络算法流程

SOM算法的计算过程主要基于遗传算法<sup>[19]</sup>,由于遗传算法具有较好的搜索特性,结合自组织映射神经网络结构中各神经元不断学习的过程,随着遗传算法的持续迭代和种群更新,各神经元的学习率会不断衰减,且学习的邻域半径也会不断缩小,最终会得到学习率衰减为0时的聚类结果。然而,随着样本数据量的大幅增加,采用单一SOM算法存在计算时间较长、求解精度下降的问题。下面给出结合BP神经网络的自组织映射算法流程,如图4所示。

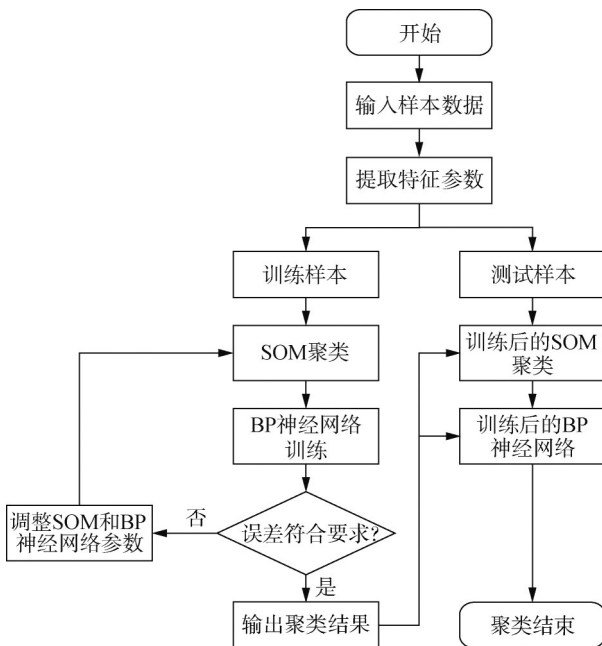


图4 自组织映射神经网络算法流程

Fig.4 Flowchart of self-organizing mapping neural network algorithm

从图4所示的自组织映射神经网络算法流程中可以看出,相较于单一SOM算法而言,与BP神经网络相结合的改进算法通过网络学习训练的方式实现对SOM聚类误差的快速收敛,同时利用BP神经网络在处理非线性复杂关系、反向传播算法等方面的优势,大幅提升SOM聚类结果的准确性。图5为BP神经网络结构示意图。

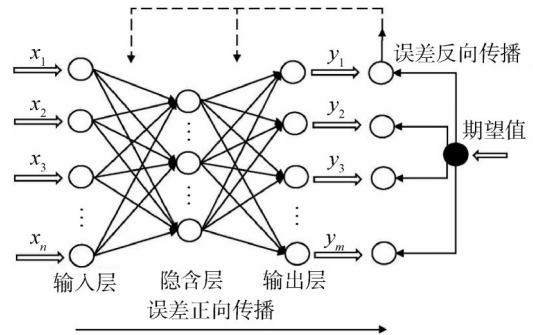


图5 BP神经网络结构

Fig.5 Structure of BP neural network

对神经元 $c$ 与输入层神经元之间的连接权向量 $W_c$ 进行初始化,对输入的样本数据做归一化处理,设输入向量 $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ ,计算可得样本与输出层神经元之间的欧式距离表示如下:

$$d_j = \|X - W_c\| = \sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i(t) - W_{ij}(t))^2} \quad (1)$$

式中  $W_{ij}$  为输入层神经元  $i$  与输出层神经元  $j$  之间的权值。

将与样本距离最小的输出层神经元选取为获胜神经元,同时对输入层神经元之间的权值进行修正,修正过程表示如下:

$$W_{ij}(t+1) = W_{ij}(t) + \eta h_{c_j}(t)(x_i - W_{ij}(t)) \quad (2)$$

式中  $\eta$  为学习率;  $h_{c_j}(t)$  为域函数。二者均随时间呈递减关系。

更新学习率  $\eta(t)$  和域函数  $h_{c_j}(t)$ , 可分别表示为

$$\eta(t+1) = \eta(t) - \frac{\eta(0)}{T} \quad (3)$$

$$h_{c_j}(t) = \exp\left(-\frac{d_{c_j}^2(t)}{2r^2(t)}\right) \quad (4)$$

式中  $T$  为迭代总次数;  $d_{c_j}$  为获胜神经元与邻域内任一神经元  $j$  之间的距离;  $r$  为邻域半径,其变化规律为

$$r(t+1) = \text{INT}\left((r(t)-1) \times \left(1 - \frac{t}{T}\right)\right) + 1 \quad (5)$$

式中 INT为取整运算。

由此可计算得到SOM网络输出为

$$Y_k = f(\min \|X - W_c\|) \quad (6)$$

对SOM网络输出结果 $Y_k$ 进行归一化处理,初始化BP神经网络模型,确定隐藏层结构、目标训练误差、训练次数及学习率;初始化输出层,确定BP神经网络输入层与隐藏层、隐藏层与输出层之间的连接权值 $W_{ij}$ 、 $W_{jk}$ ;初始化隐藏层阈值 $a$ 、输出层阈值 $b$ ,将SOM网络输出结果 $Y_k$ 输入BP神经网络进行计算,将输出与期望值进行比较,根据输入变量 $Y_k$ 、权值 $W_{ij}$ 以及阈值 $a$ ,可将隐藏层输出表示为

$$H_i = F\left(\sum_{j=1}^n W_{ij} Y_j + a_i\right), j = 1, 2, \dots, p \quad (7)$$

式中  $p$ 为隐藏层节点数。

根据隐藏层输出 $H_i$ 、权值 $W_{jk}$ 以及阈值 $b$ ,可得预测输出为

$$O_k = \sum_{j=1}^p H_j W_{jk} + b_k \quad (8)$$

则预测误差可计算得:

$$E_k = Y_k - O_k \quad (9)$$

更新BP神经网络的权值 $W_{ij}$ 和 $W_{jk}$ 如下:

$$W_{ij} = W_{ij} + \eta H_j (1 - H_j) y(i) \sum_{k=1}^n W_{jk} E_k \quad (10)$$

$$W_{jk} = W_{jk} + \eta H_j E_k \quad (11)$$

更新网络节点阈值 $a$ 和阈值 $b$ 如下:

$$a_j = a_j + \eta H_j (1 - H_j) \sum_{k=1}^n W_{jk} E_k \quad (12)$$

$$b_k = b_k + E_k \quad (13)$$

对以上步骤进行迭代计算,直至 $E_k$ 满足误差要求,即可得到最终的聚类结果。

### 3 通用部件构建仿真试验

#### 3.1 仿真条件

根据自组织映射神经网络算法的特点,将其应用于模块化飞行器通用部件构建中。其中输入向量为各类型部件不同指标属性的 $m$ 维参数向量,对应不同的 $n$ 个部件节点,经过神经网络训练,当迭代次数达到给定值,且学习率衰减到0时,可以得到最终输出层中的部件聚类结果。

通用部件的构建过程示意如图6所示。

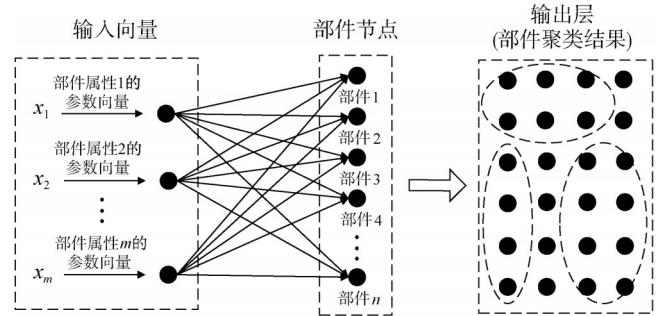


图6 通用部件构建过程示意

Fig.6 Schematic diagram of the general component construction process

参考目前常见的航天飞行器构成部件,现给定待聚类的部件类型、各类型部件构成及其待聚类指标属性如表2所示。

表2 各类型部件待聚类指标属性

Tab.2 Attributes of clustering indicators for various types of components

部件类型	部件构成	指标属性
导引头	捷联主动寻的导引头	有效作用距离/km
	捷联半主动寻的导引头	
	平台主动导引头	
	平台半主动导引头	
IMU	导航用IMU	姿态精度/ $(^\circ \cdot h^{-1})$
	控制用IMU	位置精度/ $(m \cdot h^{-1})$
舵机	三通道舵机	最大舵偏角/ $^\circ$ 最大舵偏角速度/ $(^\circ \cdot s^{-1})$
	双通道舵机	
	单通道舵机	
发动机	超口径高能量增程发动机	推力/kN 总冲/ $(kN \cdot s)$
	超口径低特征信号增程发动机	
	同口径增速发动机	
战斗部	聚能破甲战斗部	质量/kg
	攻坚战斗部	
	爆破杀伤战斗部	

自组织映射神经网络算法的初始参数设定如表3所示。

表3 自组织映射神经网络算法初始参数

Tab.3 Initial parameters of self-organizing mapping neural network algorithm

初始参数	设定值
学习率 $\eta$	0.8
有效宽度 $\sigma$	2
步幅 $\alpha$	0.2
激活函数的幂次方	10
最小计算步长	$10^{-5}$
最大迭代次数	100
评价参数	0.95

### 3.2 仿真试验结果及分析

根据自组织映射神经网络算法流程, 分别对5类部件的8种指标属性进行聚类计算, 得到相应的聚类结果分别如图7~14所示。

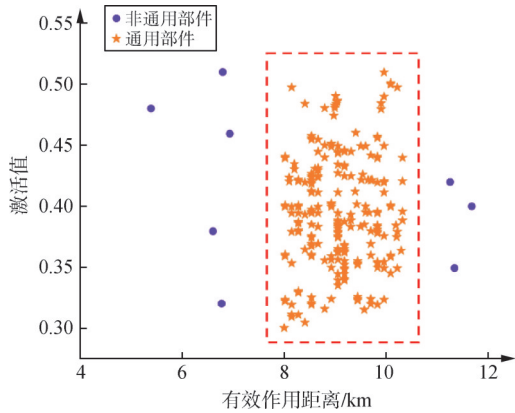


图7 导引头类型部件有效作用距离属性聚类结果  
Fig.7 Clustering results of effective operational range attributes for guidance head type components

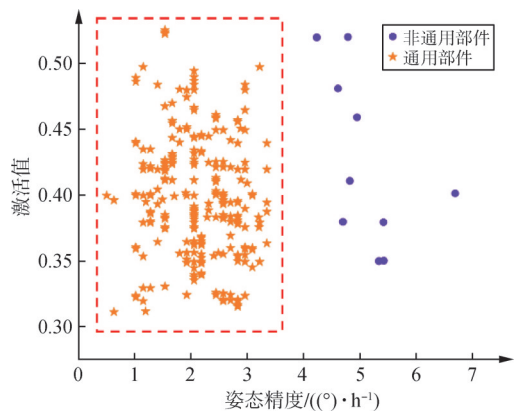


图8 IMU类型部件姿态精度属性聚类结果  
Fig.8 Clustering results of attitude accuracy attribute for IMU type components

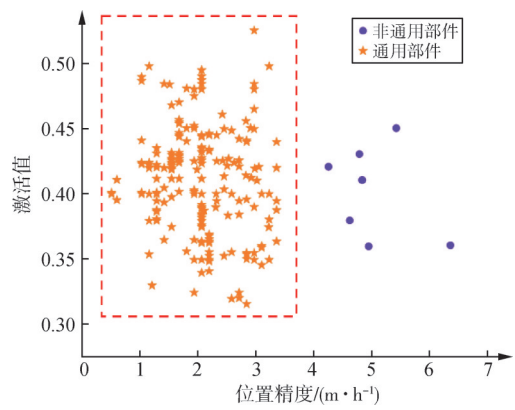


图9 IMU类型部件位置精度属性聚类结果  
Fig.9 Clustering results of position accuracy attribute for IMU type components

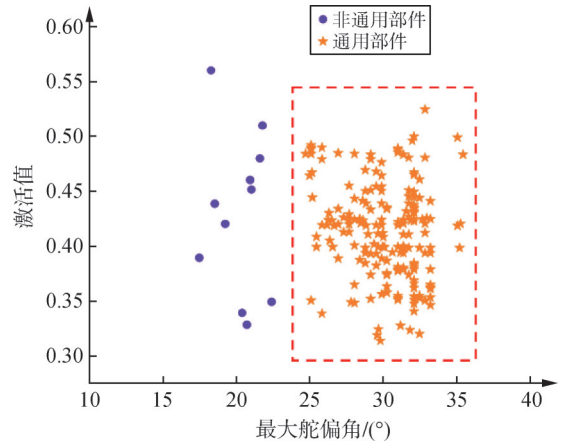


图10 舵机类型部件最大舵偏角属性聚类结果  
Fig.10 Clustering results of maximum steering angle attribute for steering engine type components

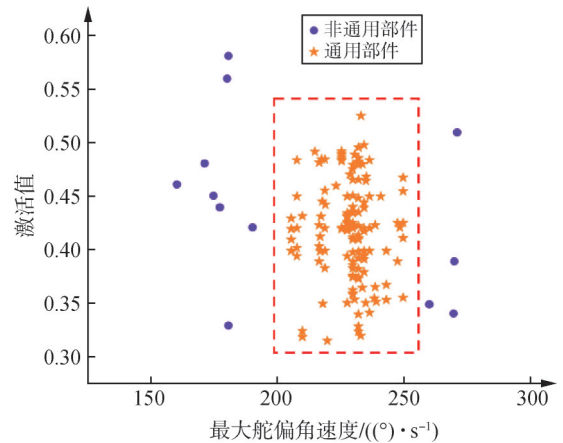


图11 舵机类型部件最大舵偏角速度属性聚类结果  
Fig.11 Clustering results of maximum steering angle velocity attribute for steering engine type components

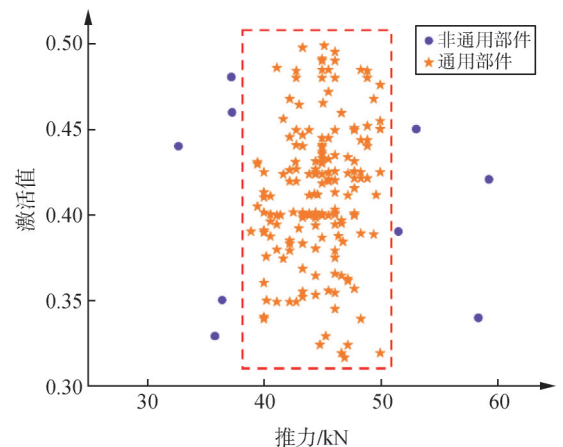


图12 发动机类型部件推力属性聚类结果  
Fig.12 Clustering results of thrust attribute for engine type components

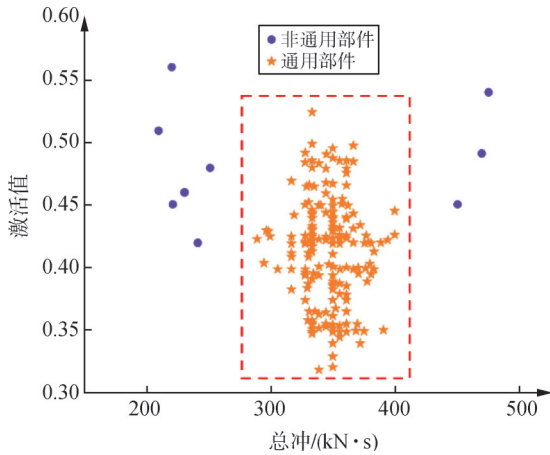


图13 发动机类型部件总冲属性聚类结果

Fig.13 Clustering results of total impulse attribute for engine type components

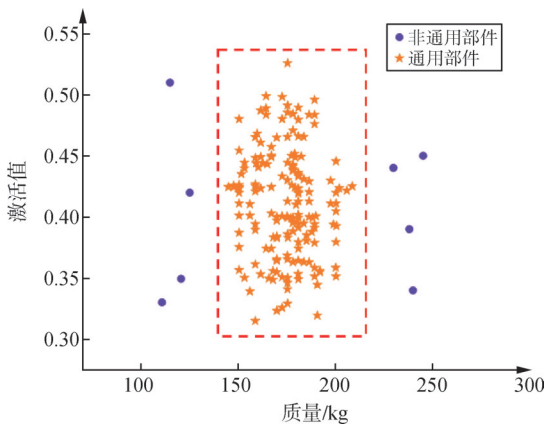


图14 战斗部类型部件质量属性聚类结果

Fig.14 Clustering results of quality attribute for warhead type components

通过仿真测试验证，对比经典自组织映射算法，采用自组织映射神经网络算法的计算时间及准确率如表4所示。

表4 计算时间及准确率对比

Tab.4 Comparison of computation time and accuracy

算法类型	计算时间/s	准确率/%
自组织映射神经网络算法	4.93	92
自组织映射算法	12.52	75

根据图7~14以及表4的结果可以看出，采用自组织映射神经网络算法可以得到各类型部件相应属性的明显聚类结果。相较于单一的经典自组织映射算法，结合神经网络的自组织映射算法可以大幅缩减计算时间、提升计算准确率。为了进一步简化计算，将导引头类型部件的有效作用距离属性聚类值取整为8 km、

9 km和10 km；IMU类型部件的姿态精度属性聚类值取整为1 (°) /h、2 (°) /h和3 (°) /h，位置精度属性聚类值取整为1 m/h、2 m/h和3 m/h；舵机类型部件的最大舵偏角属性聚类值取整为25°、30°和35°，最大舵偏角速度属性聚类值取整为200 (°) /s、225 (°) /s和250 (°) /s；发动机类型部件的推力属性聚类值取整为40 kN、45 kN和50 kN，总冲属性聚类值取整为300 kN·s、350 kN·s和400 kN·s；战斗部类型部件的质量属性聚类值取整为150 kg、175 kg和200 kg。可构建得到模块化飞行器通用部件库如表5所示。

表5 模块化飞行器通用部件库

Tab.5 Modular flight vehicle universal component library

部件类型		部件属性	参数值
导引头	捷联主动寻的导引头	有效作用距离/km	8、9、10
	捷联半主动寻的导引头		
	平台主动导引头		
	平台半主动导引头		
IMU	导航用IMU	姿态精度/(°·h <sup>-1</sup> )	1、2、3
	控制用IMU	位置精度/(m·h <sup>-1</sup> )	1、2、3
舵机	三通道舵机	最大舵偏角/(°) 最大舵偏角速度/ (°·s <sup>-1</sup> )	25、30、35 200、225、250
	双通道舵机		
	单通道舵机		
发动机	超口径高能量增程发动机	推力/kN 总冲/(kN·s)	40、45、50 300、350、400
	超口径低特征信号增程发动机		
	同口径增速发动机		
战斗部	聚能破甲战斗部	质量/kg	150、175、200
	攻坚战斗部		
	爆破杀伤战斗部		

## 4 结论

本文以模块化飞行器为研究对象，结合通用部件库的构成要求，即其中的各部件在组成结构上大体相同，且在相应的性能参数方面的差异要在可接受范围内，提出了一种基于自组织映射神经网络的通用部件构建方法。首先，介绍了模块化飞行器设计的特点、内容及优势；其次，针对自组织映射算法计算时间较长的问题，给出了自组织映射与神经网络相结合的通用部件构建方法计算流程；最后，基于自组织映射神

经网络算法流程,分别对导引头类型部件的有效作用距离属性、IMU类型部件的姿态精度属性和位置精度属性、舵机类型部件的最大舵偏角属性和最大舵偏角速度属性、发动机类型部件的推力属性和总冲属性以及战斗部类型部件的质量属性进行了聚类分析,进而构建了模块化飞行器设计所需的通用部件库。仿真试验结果表明提出的通用部件构建方法能够有效满足模块化飞行器通用部件构建需求,同时相较于单一自组织映射算法在计算时间、求解精度方面有大幅提升。

### 参 考 文 献

- [1] 王立盟. 2023年国外军事人工智能领域科技发展综述[J]. 战术导弹技术, 2024(2): 17-26.  
WANG Limeng. Overview of technological development in the field of military artificial intelligence abroad in 2023[J]. Tactical Missile Technology, 2024(2): 17-26.
- [2] 郭斐然, 张旭辉, 路鹰, 等. 导弹系统柔性设计技术[J]. 战术导弹技术, 2024(4): 92-102.  
GUO Feiran, ZHANG Xuhui, LU Ying, et al. Flexible design technology for missile systems[J]. Tactical Missile Technology, 2024(4): 92-102.
- [3] 董露, 李文胜. 美军战斧5巡航导弹发展及技术特点分析[J]. 飞航导弹, 2021(12): 116-121.  
DONG Lu, LI Wensheng. Development and technical characteristics analysis of the US Tomahawk 5 cruise missile[J]. Aerial Missiles, 2021(12): 116-121.
- [4] 张小东, 胡海, 姜林君. 美国海军战斧巡航导弹战术技术特性分析[J]. 飞航导弹, 2020(11): 31-36.  
ZHANG Xiaodong, HU Hai, JIANG Linjun. Tactical and technical characteristics analysis of US navy tomahawk cruise missiles[J]. Aerial Missiles, 2020(11): 31-36.
- [5] 姜本正, 潘殿省. 美国“战斧”巡航导弹的发展历程及启示[J]. 科技视界, 2019(7): 12-14+31.  
JIANG Benzhen, PAN Diansheng. The development process and enlightenment of the US Tomahawk cruise missile[J]. Science and Technology Vision, 2019(7): 12-14+31.
- [6] 天宇. 俄罗斯陆军盾牌——C-300B系列地空导弹[J]. 航空知识, 2006(6): 14-17.  
TIAN Yu. Russian army shield: C-300B series surface to air missiles[J]. Aviation Knowledge, 2006(6): 14-17.
- [7] 周颖, 王琼, 王伟. C-400地空导弹武器系统性能分析与比较[J]. 航天电子对抗, 2008(1): 1-3+12.  
ZHOU Ying, WANG Qiong, WANG Wei. Performance analysis and comparison of C-400 surface to air missile weapon system[J]. Aerospace Electronic Warfare, 2008(1): 1-3+12.
- [8] 刘文. 防空导弹新星C-400[J]. 航空知识, 2006(6): 21.  
LIU Wen. New star of air defense missile C-400[J]. Aviation Knowledge, 2006(6): 21.
- [9] 申超, 何煦虹, 王一娇. 欧洲导弹公司柔性导弹创新设计方案[J]. 飞航导弹, 2016(5): 29-31.  
SHEN Chao, HE Xuhong, WANG Yijiao. Innovative design scheme for flexible missiles by european missile company[J]. Aerial Missiles, 2016(5): 29-31.
- [10] PHAM D M, AZIZ S M. FlexiS—a flexible sensor node platform for the internet of things[J]. Sensors, 2021, 21(15): 38-46.
- [11] DUCLOS D, QUINQUIS N, BRODA G, et al. A presentation of ATR processing chain validation procedure of IR terminal guidance version of the AASM modular air-to-ground weapon[J]. Automatic Target Recognition XIX, 2009, 2(4): 7335.
- [12] TEUVO K. Essentials of the self-organizing map[J]. Neural Networks, 2013, 37(2): 13-25.
- [13] 闫玉铎. 面向陆军分队级CGF的武器目标分配问题研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2016.  
YAN Yuduo. Research on weapon target allocation problem for army unit level CGF[D]. Changsha: National University of Defense Science and Technology, 2016.
- [14] 刘月, 刘铁林, 姜相争, 等. 基于径向基函数和自组织映射的导弹控制系统健康状态评估[J]. 兵工学报, 2022(2): 1-9.  
LIU Yue, LIU Tielin, JIANG Xiangzheng, et al. Health status assessment of missile control systems based on radial basis functions and self-organizing maps[J]. Journal of Ordnance Engineering, 2022(2): 1-9.
- [15] 王华鲜, 华容, 刘华平, 等. 无人机群多目标协同主动感知的自组织映射方法[J]. 智能系统学报, 2020, 15(3): 609-614.  
WANG Huaxian, HUA Rong, LIU Huaping, et al. A self-organizing mapping method for multi-target collaborative active perception of unmanned aerial vehicle swarms[J]. Journal of Intelligent Systems, 2020, 15(3): 609-614.
- [16] GIORDANO L, GLIOZZI V, THESEIDER D D. A conditional, a fuzzy and a probabilistic interpretation of self-organizing maps[J]. Journal of Logic and Computation, 2022, 32(2): 81-89.
- [17] FERLES C, PAPANIKOLAOU Y, SAVAIDIS S P, et al. Deep self-organizing map of convolutional layers for clustering and visualizing image data[J]. Machine Learning and Knowledge Extraction, 2021, 3(4): 112-123.
- [18] 陈永航, 郭洋铭. 基于设计结构矩阵、最小描述长度理论与可适应性评价的产品模块化设计方法[J]. 机械设计, 2023, 40(2): 140-148.  
CHEN Yonghang, GUO Yangming. Product modular design method based on design structure matrix, minimum description length theory, and adaptability evaluation[J]. Mechanical Design, 2023, 40(2): 140-148.
- [19] 李鹏松, 刘欣, 李俊达. 基于免疫遗传算法的自组织映射网络应用研究[J]. 东北电力大学学报, 2018, 38(6): 82-85.  
LI Pengsong, LIU Xin, LI Junda. Application research of self-organizing mapping network based on immune genetic algorithm[J]. Journal of Northeast Electric Power University, 2018, 38(6): 82-85.

### 作 者 简 介

郭斐然 (1997—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为飞行器总体设计。  
刘璐芳 (1996—), 女, 博士, 工程师, 主要研究方向为光学成像仿真。  
韩铭麟 (1992—), 男, 博士, 工程师, 主要研究方向为航天器制导控制。  
张旭辉 (1975—), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为飞行器总体设计。