DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2026.6.287 **中图分类号**：TM46 **文献标志码**：A

电力电子变换器拓扑智能构造方法及实现

肖轶婷[1]，丘东元[1](中国电源学会高级会员)，张 波[1](中国电源学会会士)，
曾洋斌[1]，李 虹[2](中国电源学会高级会员)
(1.华南理工大学电力学院，广州 510641；2.浙江大学电气工程学院，杭州 310027)

摘要：随着“双碳”目标的持续推进以及再电气化发展需求的不断增加，新型电力电子变换器的构造仍是电力电子领域的研究热点之一。然而，传统拓扑构造方法主要依赖设计者经验，设计过程低效且设计方法缺乏一般性，因此，拓扑构造的智能化有助于提升拓扑设计效率和泛化能力。以DC-DC变换器为例，首先将电力电子变换器智能构造流程划分为拓扑描述、拓扑生成和拓扑性能分析3个主要环节，然后分别阐述了适合智能构造的拓扑描述方法、拓扑构造规则、拓扑约束条件和拓扑性能指标等，最后介绍了基于可编程搜索算法及强化学习实现拓扑智能构造。研究表明，电力电子变换器拓扑智能构造才刚起步，在多类型拓扑构造、多目标优化、性能智能分析等方面还有大量工作亟待开展。

关键词：电力电子变换器；DC-DC变换器；拓扑构造；强化学习；可编程搜索算法

Intelligent Construction Method and Realization of Power Electronic Converter Topology

XIAO Yiting[1], QIU Dongyuan[1], *Senior Member*, *CPSS*, ZHANG Bo[1], *Fellow*, *CPSS*, ZENG Yangbin[1], LI Hong[2], *Senior Member*, *CPSS*
(1. School of Electric Power Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China;
2. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: With the continuous promotion of “dual-carbon” goals and the increasing demand for re-electrification development, the construction of new power electronic converters is still one of the research hotspots in the field of power electronics. However, the traditional topology construction method relies on designers’ experience, so the design process is inefficient, and the design method lacks generality. Therefore, the intelligence of topology construction contributes to improving the efficiency and generalization of topology design. A DC-DC converter is taken as an example, first, the process of power electronic converter intelligent construction is divided into three main links, i.e., topology description, topology generation and topology performance analysis. Then, the topology description method, topology construction rules, topology constraints and topology performance indicators suitable for intelligent construction are described in turn. Finally, the realization of topology intelligent construction based on a programmable search algorithm and reinforcement learning is introduced. The research shows that the power electronic converter topology intelligent construction has just started, and there is still a lot of work to be carried out in multi-type topology construction, multi-objective optimization, performance intelligence analysis, etc.

Keywords: Power electronic converter; DC-DC converter; topology construction; reinforcement learning; programmable search algorithm

收稿日期：2025-09-30；**修回日期**：2025-11-12；**录用日期**：2025-11-19；**网络首发日期**：2026-02-05
基金项目：国家自然科学基金联合基金资助项目(U24B20101)
This work is supported by the Joint Funds of the National Natural Science Foundation of China under the grant U24B20101

随着能源需求的不断增长，在全球“零碳”战略与我国“双碳”目标的驱动下，构建以新能源为主体的新型电力系统，促进电力脱碳，已成为能源转型和绿色发展的重要途径。电力电子变换器作为

电能转换的关键设备，其优越性能对推进节能减排具有重要意义。

变换器拓扑是决定变换器性能的核心因素之一。例如，由单个电感和多个功率半导体器件组成的变换器拓扑具备“多硅少磁”特性，能有效减小体积、提升集成度[1]。高增益变换器则满足电动汽车、储能等应用场景中的宽电压范围需求[2]。尽管现有电力电子变换器已成功支撑多领域发展，但新兴场景对变换器“低损耗、宽范围、强鲁棒性、高功率密度”等的升级要求，使新型电力电子变换器构造持续成为研究焦点。

在传统的电力电子变换器构造中，研究人员通常根据具体应用场景，基于经验设计出符合要求的变换器拓扑，但这种构造过程随机低效，且构造结果较为单一[3]；也可基于电路规则直接进行拓扑构造[4-5]，但该方法仍需人工完成复杂的推演和分析，需要花费较高的时间成本，且往往难以达到目的。为突破传统构造方法低效单一的局限性，可借助计算机编程技术实现拓扑的辅助设计，全面提升拓扑构造效率和完备性。例如深度优先搜索 DFS (depth-first search)算法[6]、A*搜索算法[7]等可编程搜索算法，通过遍历给定规则下的拓扑空间，可快速实现完整的拓扑构造。然而，随着拓扑复杂度的上升，搜索空间会急剧膨胀，进而耗费大量的计算资源。人工智能方法则为复杂拓扑构造提供了新思路。例如，专家系统通过匹配专家建立的 IF-THEN 规则获得构造结果[8]，但该系统严重受限于专家经验，难以创新且拓展性差[9]；强化学习通过智能体与环境的自主交互学习构造策略，能够突破经验束缚，生成创新型拓扑，有助于提升拓扑构造的智能化水平[10]。

为实现电力电子变换器拓扑的智能构造，本文在梳理和总结现有的拓扑构造方法及实现手段的基础上，提出了拓扑智能构造的一般流程。根据拓扑的构造目标，依次经过拓扑描述、拓扑生成、拓扑性能分析等环节，得到性价比最优的变换器拓扑。其中，拓扑描述是对变换器中元件、元件间的连接方式、回路等信息的表征，是拓扑智能构造的基础；拓扑生成指对变换器中元件的选择以及元件间连接方式的设计；拓扑性能分析则是在具体应用需求下，对构造出的拓扑进行性能对比和评估，以筛选出最优拓扑方案。

结合电力电子变换器拓扑智能构造思路，本文内容安排如下：首先归纳了电力电子变换器的拓扑描述方式；然后介绍了用于生成电力电子变换器拓扑的构造原理和基本约束条件；接着总结了电力电子变换器常用的性能分析指标；然后以 DC-DC 变换器为例，概述了结合可编程搜索算法和结合强化学习的电力电子变换器拓扑构造过程；最后对电力电子变换器拓扑智能构造的发展趋势进行了展望。

1 拓扑描述

本文所提电力电子变换器拓扑智能构造的一般流程如图 1 所示。

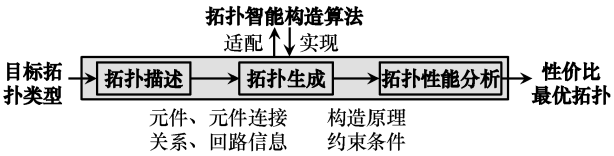


图 1 电力电子变换器拓扑智能构造的一般流程

Fig. 1 General process of power electronic converter topology intelligent construction

拓扑描述指对电力电子变换器的元件、元件间的连接方式、基本回路等进行物理和数学描述，是拓扑智能构造的基础。传统拓扑描述通过逐一枚举元件和回路信息来表征拓扑物理信息，该方法无疑会随着元件类型数量的增多而变得复杂，不利于新拓扑的生成。现有拓扑描述方法主要包括单元描述法和数学描述法，分别通过划分单元模块或代数图论等数学形式，简化对电力电子变换器拓扑的描述。

1.1 单元描述法

单元描述法通常将电力电子变换器划分为输入、输出和电能变换单元。根据电能变换需求，输入单元可以是直、交流电源，输出单元可以是负载、电池等，电能变换单元通常由开关管、二极管、电感、电容、变压器等元件组成。常见的电能变换单元见图 2(a)~(e)，分别为开关电感 SL(switched-

inductor)单元[11]、开关电容 SC(switched-capacitor)单元[12]、三电平单元[13]、升压单元[14]、两电平单元[15]等。图中：S_1、S_2 均为开关管；D、D_1、D_2 均为二极管；L 为电感；C、C_1、C_2 均为电容。

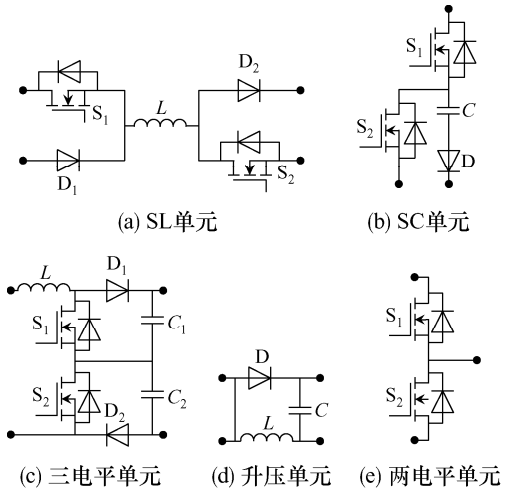


图 2　典型电能变换单元

Fig. 2 Typical power conversion units

将电能变换单元与输入输出单元相结合，可得到不同的变换器拓扑。以图 2(a)所示的 SL 单元为例，将该单元与输入输出单元(直流电源电压 U_S、负载电压 U_L、储能电池电压 U_B)相连接，得到图 3 所示的一种三端口 DC-DC 变换器拓扑[11]。

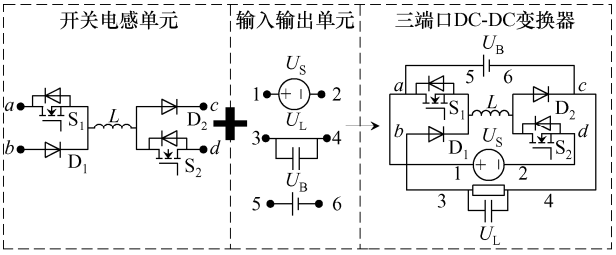


图 3　三端口 DC-DC 变换器的单元描述

Fig. 3 Unit description of three-port DC-DC converter

综上所述，单元描述法通过划分单元的方式，简化了对拓扑物理信息的描述。基于此，开展拓扑构造，仅需考虑单元的选取及单元间的连接，过程简单，且易于获得结构性能相似的变换器族。然而，有限的单元类型使拓扑构造结果受限。

1.2 数学描述法

数学描述法的思路是将电力电子变换器拓扑的物理属性转化为数学表征，从而将拓扑构造过程转化为数学问题[16]。例如利用图论，可将变换器拓扑转化为图[17]，即表示为由节点集 V_G 和边集 E_G 组成的有限集[18]，具体表示为 $G=(V_G, E_G)$。其中，节点表示元件间的连接点，$V_G=\{V_{G1}, V_{G2}, \cdots, V_{Gn}\}$($n$ 为节点数)；边表示变换器中的元件，$E_G=\{E_{G1}, E_{G2}, \cdots, E_{Gm}\}$($m$ 为元件数)。

一个元件通常用 1 条边表示，而当元件为变压器时，可采用 2 条互不相连的边表示变压器的一、二次侧[19]。根据边的方向性，可采用无向图或有向图的形式表示变换器；根据边是否赋权重，可采用无权图或有权图进一步描述变换器[20]。以 Buck 变换器为例，其无向图描述如图 4(a)和(b)，不考虑元件电气特性，元件被描述为无向边；有向图描述如图 4(c)和(d)，元件被描述为有向边，边的方向取决于元件电气特性[21]。可双向流过电流的元件被定义为双向边，如电感；只能单向流过电流的元件被定义为单向边，如二极管。无权图描述如图 4(a)和(c)所示，边权重默认为 1；有权图描述如图 4(b)和(d)所示，边权重由元件名表示。相比于无权图，有权图能更直观地描述拓扑元件类型及元件的连接关系。图中：U_i 为输入直流电压；R 为负载。

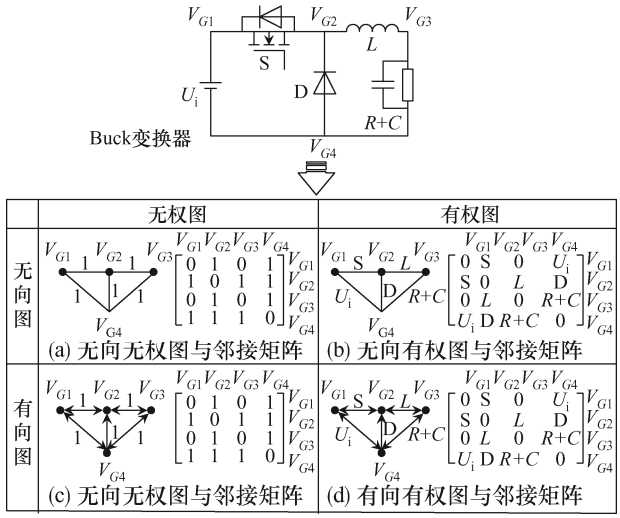


图 4　Buck 变换器的图描述

Fig. 4 Graph description of Buck converter

进一步地，将图转化为对应的邻接矩阵，可以反映节点间的连接关系[22]。邻接矩阵是一个 $n\times n$ 的矩阵(n 为节点数)，矩阵元素 a_{ij} 表示节点 i 和 j 间是否存在边。当 $i=j$ 时，$a_{ij}=0$；当 $i\neq j$ 时，若 i

和 j 间无边连接，则 a_{ij}=0；当 $i \neq j$ 时，若 i 和 j 间有边连接，a_{ij}=边的权重，即为 1(无权图)或边所代表的元件名(有权图)，其具体定义为

$$a_{ij}=\begin{cases}0 & i=j\text{或}i\neq j\text{且}i\text{和}j\text{间无边连接}\\ 1\text{或元件名} & i\neq j\text{且}i\text{和}j\text{间有边连接}\end{cases} \tag{1}$$

若节点间存在并联元件，则矩阵元素为元件名相加；若节点间存在串联元件，则矩阵元素为元件名相乘。Buck 变换器的邻接矩阵如图 4 所示。

对于有权图，邻接矩阵的行列式是取自不同行和列所有元素乘积的代数和，可表示电路中所有的回路。故 $n \times n$ 邻接矩阵的行列式共有 n!个乘积，每个非零乘积均代表着 1 条回路[23]，但是否为可行回路还需依据电路规则判断。

在基于图论的拓扑描述中，由于节点顺序不同或串联路径中元件的连接顺序不同，相同的拓扑可能会被描述成不同的数学形式。为了使拓扑与其描述一一对应，文献[24]提出对有向图的边分配素数权重来表征元件及元件的连接关系。

从上述分析可见，数学描述法通常基于图论将拓扑物理信息转化为数学信息，提升了拓扑描述的简洁性和通用性，且所转化的数学信息可直接作为计算机算法的输入，故被广泛用于电力电子变换器拓扑智能构造，但实际应用时需要考虑数学问题的求解难易度。

综上，适合电力电子变换器拓扑智能构造的拓扑描述需满足以下要求：一是具有足够丰富的单元图库；二是能自动将图库中单元描述转换为数学描述。如何将现有单元描述法和数学描述法融合为一种描述，是电力电子变换器拓扑智能构造的关键。

2 拓扑生成

在电力电子变换器拓扑智能构造中，生成的拓扑须符合电能转换规律和基本电路原理，前者相当于拓扑构造原理，后者则属于拓扑约束条件。

2.1 构造原理

拓扑构造原理根据层级可分为变换器/单元级拓扑构造和元件级拓扑构造，旨在确定拓扑元件的连接方式，从而形成拓扑智能构造算法的搜索空间或动作空间。

2.1.1 变换器/单元级拓扑构造

变换器/单元级拓扑构造是针对现有变换器或单元拓扑进行修改、简化、替换、组合或派生，从而得到新拓扑。其中修改是指在现有变换器中通过增删改元件/路径实现新拓扑的构造。在单相全桥整流器的每个桥臂中点接入 1 个电感，并将新增电感连接到另一个直流端口，可得到一种单相三端口混合交直流变换器[25]，如图 5 所示。图中：U_{ac} 为交流侧电压；U_{dc} 为直流侧电压；L_1、L_2 均为接入电感。

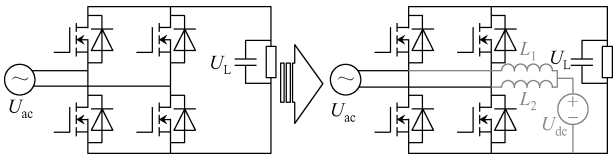
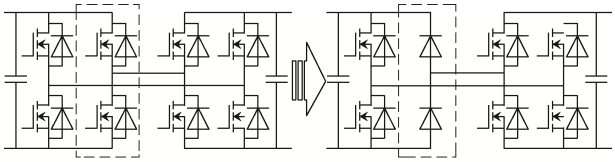


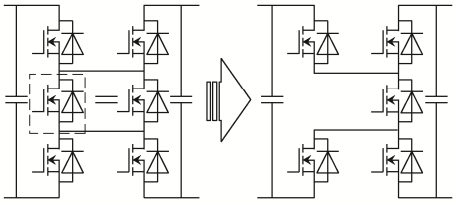
图 5 拓扑修改

Fig. 5 Topology modification

简化指删除或替代变换器中重复功能的元件，以提升变换器的紧凑性并降低成本。在保证电流回路不变的前提下，可采用二极管代替开关管或去除冗余元件以简化拓扑[26]，如图 6 所示，但简化后需保证拓扑电流回路的完整性。



(a) 采用二极管代替开关管



(b) 去除冗余元件

图 6 拓扑简化

Fig. 6 Topology simplification

替换指通过用新的电能变换单元替换原有变换器中的部分元件，实现新拓扑的构造[27]。将传统

Boost 变换器中的开关和电感替换为开关电感单元，得到一种新的升压变换器，如图 7 所示，电压增益从 1/(1−*D*)提升至(1+*D*)/(1−*D*)[28]，其中，*D* 为占空比。

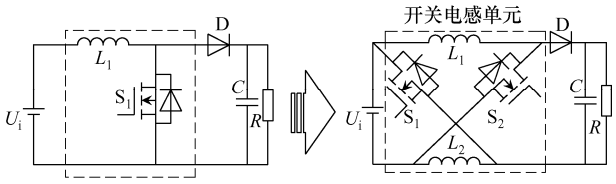


图 7　拓扑替换

Fig. 7 Topology replacement

组合指利用若干个相同电能变换单元的组合，实现新拓扑的构造。将 Cuk 变换器与“外衣电路”单元组合，可得到一种高增益 DC-DC 变换器，如图 8 所示，且电压增益的提高可通过增加“外衣电路”单元数量来实现[29]。

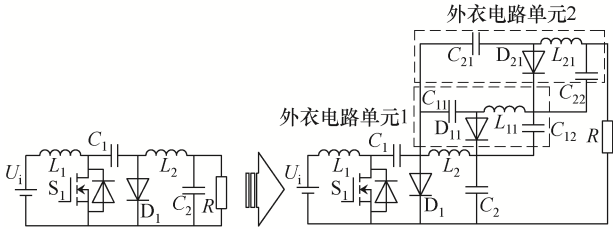


图 8　拓扑组合

Fig. 8 Topology combination

派生指从特定单元或变换器抽象出一定的规则或电气特性，构造出一系列结构或性能相似的变换器族[30]。通过改变单端初级电感 SEPIC(single-ended primary inductor converter)变换器[31]中 2 个电容的位置，可得到一系列具有相似电压增益和元件应力的 SEPIC 族变换器[32]，如图 9 所示。

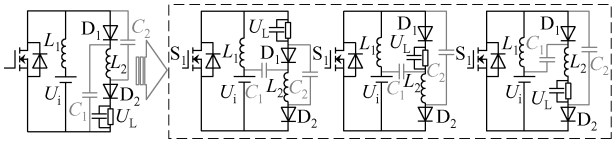


图 9　拓扑派生

Fig. 9 Topology derivation

2.1.2　元件级拓扑构造

元件级拓扑构造指基于独立元件，通过构造可行回路生成新拓扑，构造过程主要采用状态方程、伏秒平衡原理、图论等。

状态方程是描述电路输入输出与状态变量关系的表达式，不同工作模态下的状态方程具有不同的系数，其中，系数中包含变换器回路信息。基于状态方程的拓扑构造过程如图 10 所示，确定元件类型及数量后，可通过设置不同工作模态下状态方程的系数，实现拓扑构造[33-34]。图中：$\dot{i}_{L_1}$、$\dot{i}_{L_2}$ 分别为电感 L_1、L_2 的电流变化率；$\dot{v}_{C_1}$、$\dot{v}_{C_2}$ 分别为电容 C_1、C_2 的电压变化率；U_{C_1}、U_{C_2} 分别为电容 C_1、C_2 的电压；i_{L_1}、i_{L_2} 分别为电感 L_1、L_2 的电流。然而，随着元件数量的增加或工作模态的增多，构造状态方程以及从状态方程还原成拓扑的难度也随之增加。

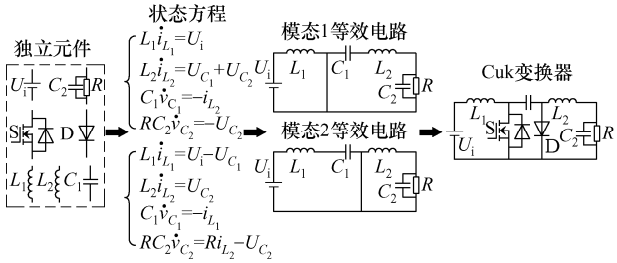


图 10　基于状态方程的拓扑构造过程

Fig. 10 Topology construction process based on state equations

伏秒平衡原理指稳态时电感电压在开关周期内平均值为 0，由此获得的伏秒平衡方程是描述变换器电感电压、电源电压、电容电压关系的表达式，间接反映了电感、电压源、电容的连接关系。基于伏秒平衡原理的拓造过程如图 11 所示，确定元件类型及数量后，可通过给定电压增益推导伏秒平衡方程，获得不同工作模态的回路信息，进而将伏秒平衡方程还原为拓扑[35]。图中 U_{L_1}、U_{L_2} 分别为电感 L_1、L_2 的电压。然而，随着元件数量的增加或工作

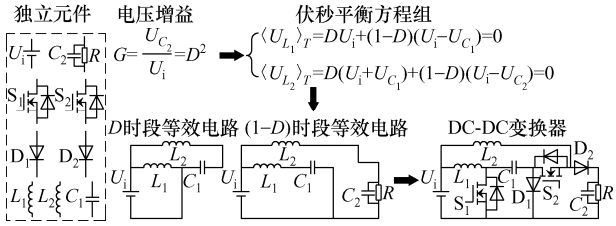


图 11　基于伏秒平衡的拓扑构造过程

Fig. 11 Topology construction process based on volt-second balance

模态的增多，从伏秒平衡方程还原到拓扑的过程将会十分复杂[5]。

图论是目前拓扑智能构造常用的方法之一，基于图论的拓扑构造过程如图 12 所示，将指定的元件类型及数量转换为节点和边，连接节点和边生成不同的图，从而实现一系列变换器拓扑的构造[36-37]。图中：U_o为输出直流电压。然而，由图直接生成的变换器拓扑存在冗余，需要验证其可行性。

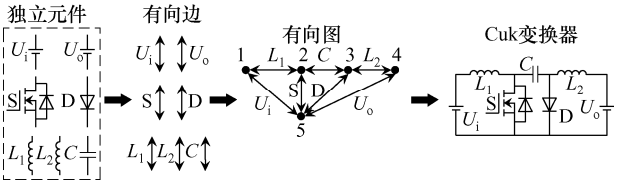


图 12 基于图论的拓扑构造过程

Fig. 12 Topology construction process based on graph theory

综上，变换器/单元级拓扑构造依赖于特定的变换器或单元，这使生成的新拓扑受限，更适用于现有拓扑优化。元件级拓扑构造则可生成大量的新拓扑，有助于满足不同应用场景的需要。

2.2 约束条件

无论采用哪种构造方法，都不可避免地会生成一些违反电路规则的无效拓扑或者结构重复、性能等效的冗余拓扑。如何筛选出有效拓扑，对拓扑构造效率和构造结果正确性起着重要作用。为此，需要在拓扑构造过程中加入约束条件，即满足电路规则约束的拓扑才被保留，以确保所生成拓扑的有效性。一些用于剔除电力电子变换器无效拓扑的电路规则约束见表 1。

此外，重复拓扑是指元件类型与数量相同、连接方式不同，但具有相同等效回路或性能的拓扑。因此，对于满足电路规则约束的拓扑，还需进一步筛选，剔除冗余拓扑，以确保所生成拓扑的唯一性。显然，上述元件级拓扑的构造及约束条件的实施均可借助计算机编程实现，尤其适用于电力电子变换器的智能构造。

表 1 拓扑构造的电路规则约束

Tab. 1 Circuit rule constraints of topology construction

序号	约束条件
1	不允许任何孤立节点，即节点不允许只连接 1 个元件。
2	任意 2 个相同的元件串联时，需将其简化为 1 个元件。
3	回路中不能出现短路。
4	电感遵循伏秒平衡，每个电感均至少出现在 2 个回路中。
5	电容遵循安秒平衡，每个电容均至少出现在 2 个回路中。
6	电感电流和电容电压不能突变。
7	变换器至少存在 2 个回路。
8	每个端口的电压、电流需独立控制，端口不能共用节点。
9	任意 2 个相同元件不能并联，需将其简化为 1 个元件。
10	变换器中包含端口的回路数应不少于端口数。

3 拓扑性能分析

由于计算机算法生成的有效拓扑数量通常较多，因此需要对其进行性能分析，以选出满足性能要求的拓扑。性能指标为拓扑智能构造算法生成的拓扑提供了可量化的评估标准。效率、功率密度、元件应力、成本等是电力电子变换器的关键性能指标，波形质量、电压增益等则属于变换器较为关注的性能指标[38-39]。

(1)效率

电力电子变换器的效率可表示为

$$\eta=\frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}}=\frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{out}}+P_{\text{loss}}} \tag{2}$$

式中，P_{out}、P_{in}、P_{loss}分别为输出功率、输入功率、电路损耗。

由于P_{loss}包括开关管损耗、磁性元件损耗等，故变换器效率会受到元件类型、元件数量以及开关频率的影响。随着开关频率的增加，开关损耗也会增加。因此，对于高频变换器，开关损耗是影响效率的主要因素。若变换器中的开关管能实现软开关，即零电压开通和零电流关断，则可有效降低开

关损耗，提高变换器效率[40-41]。

(2)功率密度

功率密度通常用变换器单位体积所传输的功率来衡量，其大小一方面受拓扑中元件体积的影响，另一方面与散热器的体积相关。由于电感、变压器等磁性元件的体积通常占电力电子变换器总体积的 20%~30%，故可根据拓扑中磁性元件的大小和数量初步评估变换器的功率密度[42]。

(3)元件应力

元件应力主要包括开关管/二极管的电压电流应力、电感电流应力、电容电压应力。对于含有多个元件的变换器，可利用元件的归一化累积应力进行综合比较[43]。元件的归一化累积电压应力和电流应力的定义分别为

$$\begin{cases}\hat{U}=\sum U_{\mathrm{im}}/U_{\mathrm{ref}}\\ \hat{I}=\sum I_{\mathrm{im}}/I_{\mathrm{ref}}\end{cases} \tag{3}$$

式中：U_{im} 和 I_{im} 分别为元件 i 的电压、电流应力；U_{ref} 和 I_{ref} 分别为归一化的电压、电流参考值。

(4)成本

电力电子变换器的成本主要取决于所使用的开关管、二极管、电容、磁性元件等元件成本，与元件的数量和应力大小密切相关。

(5)波形质量

输出电压电流波形的质量可采用稳态偏差、纹波系数或总谐波畸变率 THD(total harmonic distortion)等进行评估。其中，稳态电压偏差 ΔU 为稳态下输出电压平均值U_{out}与额定电压U_{rated}之间的误差，是衡量变换器输出电压稳定性的重要指标，其表达式为

$$\Delta U=\frac{\left|U_{\mathrm{out}}-U_{\mathrm{rated}}\right|}{U_{\mathrm{rated}}}\times 100\% \tag{4}$$

纹波系数是衡量直流输出波形平滑程度的指标，如电压纹波系数 R_{RF} 表示稳态时输出电压的最大值 $U_{\max}$ 和最小值 $U_{\min}$ 之差与输出电压平均值 U_{out} 的比值，其表达式为

$$R_{\mathrm{RF}}=\frac{U_{\max}-U_{\min}}{U_{\mathrm{out}}} \tag{5}$$

对于交流变量，THD 是衡量波形畸变的指标，如电流谐波畸变率的定义为

$$T_{\mathrm{THD}i}=\frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty}I_n^2}}{I_1} \tag{6}$$

式中：I_1 为基波电流的有效值；I_n 为第 n 次谐波电流的有效值。

(6)电压增益

电压增益通常用于衡量高增益直流变换器的性能，用输出电压平均值U_{out}与输入电压平均值U_{in}之比表示，具体为

$$G=\frac{U_{\mathrm{out}}}{U_{\mathrm{in}}} \tag{7}$$

其大小可反映变换器的工作范围。

值得注意的是，不同性能指标之间可能存在相互制约的关系，故对变换器进行性能分析时应结合设计需求，通过主观赋权法、客观赋权法或组合赋权法对各个性能指标赋权，并采用如线性加权综合法、模糊综合评价法等方法对拓扑的性能指标进行综合评估，从而实现拓扑优选[44]。

4　拓扑智能构造实现

用计算机实现拓扑描述、拓扑生成及拓扑性能分析过程，即为拓扑智能构造。目前，常见的拓扑智能构造算法是可编程搜索算法，以及人工智能中的强化学习。本文以 DC-DC 变换器为例，分别介绍这 2 种拓扑智能构造方法的实现手段。

4.1　基于可编程搜索算法的拓扑智能构造

基于可编程搜索算法的拓扑智能构造流程如图 13 所示，共包括 3 个步骤。

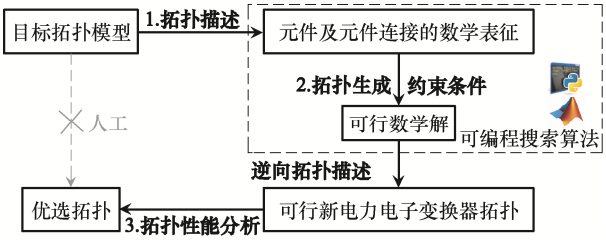


图 13　基于可编程搜索算法的拓扑智能构造实现流程

Fig. 13 Topology intelligent construction process based on programmable search algorithm

步骤 1 确定目标拓扑的基本模型，包括输入输出电能类型、端口数量、元件类型及数量等，经过拓扑描述获得拓扑元件及元件连接关系表征。例如采用数学描述法、结合单元描述法和数学描述法将拓扑元件及元件连接关系转化为数组、矩阵等数学形式，并将其作为算法的输入。

步骤 2 选用变换器/单元级拓扑构造或元件级拓扑构造，通过代码生成具有大量拓扑连接关系的搜索空间；确定约束条件，并将其转化为代码中的函数，遍历约束下的搜索空间，获得所有可行数学解[45]。将所有可行数学解通过逆向拓扑描述，即可获得一系列新型电力电子变换器。

步骤 3 根据实际需求，对构造的一系列新型电力电子变换器进行性能分析，筛出最优拓扑。

以单元为基础，构造一种多端口 DC-DC 变换器的流程如图 14 所示[46]。具体流程如下。

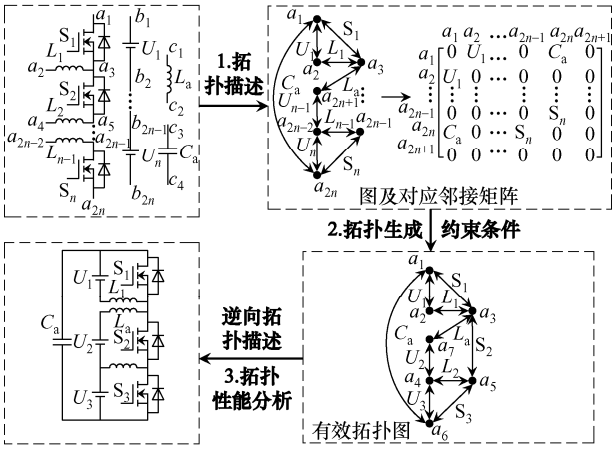


图 14 基于可编程搜索算法的拓扑智能构造实例

Fig. 14 Topology intelligent construction case based on programmable search algorithm

(1)结合单元描述法和数学描述法将目标拓扑描述为 3 个单元：n−1 个电感 L_1~L_{n-1} 和 n 个开关管 S_1~S_n、n 个直流电压 U_1~U_n、1 对储能电感 L_a 和电容 C_a，将单元组合关系描述为图，图可转化为对应的邻接矩阵。其中，a_1~a_{2n+1} 分别为每个开关管和电感两端的节点；b_1~b_{2n} 分别为每个直流电压两端的节点；c_1~c_4 分别为储能电感和电容两端的节点。

(2)选用变换器/单元级拓扑构造，生成图集 G={g_1, g_2, g_N}，其中，N 为单元间可能存在的不同组合数，G 包含了所有可能的单元组合，为搜索空间；将表 1 中的约束条件转化为对邻接矩阵元素的约束。采用 DFS 算法遍历约束条件下的搜索空间 G，经过 N 次迭代后，输出有效拓扑图。将有效拓扑图通过逆向拓扑描述，获得三~五端口的 DC-DC 变换器拓扑。

(3)在生成的多端口 DC-DC 变换器拓扑中，首先筛选出开关管归一化累积电压应力最低的拓扑；接着在其中进一步选出电感归一化累积电流应力最低的拓扑；最后，搭建对应的电路仿真及实验样机进行性能验证。

综上所述，现有基于可编程搜索算法的拓扑智能构造是通过遍历搜索空间，在迭代过程中获得满足设计要求的结果，具备准确性和通用性。然而，随着元件数量的增加，存在着大量可能的元件连接形式，导致搜索空间庞大，需要耗费大量的计算资源[47]，难以实现复杂的拓扑构造。

4.2 基于强化学习的拓扑智能构造

强化学习是解决具有大搜索空间复杂问题的有效算法。在强化学习中，无需预先准备训练数据，智能体通过与环境交互，根据反馈的奖励生成训练数据，从中学习以改进策略，从而有效降低数据依赖性，提升拓扑构造结果的创新性。

奖励通常包括零、正、负奖励，零奖励表示中性的结果，正奖励用来训练智能体遇到相同输入时增加对应动作的可能性，负奖励用来训练智能体遇到相同输入时减少对应动作的可能性。奖励的设计可参照第 2.2 节中的约束条件。在强化学习中，常通过计算折扣回报 G_t 来衡量智能体在某个时间段内所获得的累积奖励，具体表示为

$$G_t = R_t + \gamma R_{t+1} + \gamma^2 R_{t+2} + \ldots = \sum_{k=0}^{\infty} \gamma^k R_{t+k} \tag{8}$$

式中：R_t 为时间步 t 的即时奖励；γ 为折扣因子，且 $\gamma \in [0,1]$，用于控制即时奖励与未来奖励的权重。即时奖励指智能体执行每一步元件连接动作后，针对更新的拓扑状态，立即根据电路规则等约束条件计算出的奖励值，仅与当前动作有关，不考虑后续动作产生的影响。未来奖励指智能体在执行当前元

件连接动作后，继续执行多轮元件连接动作所获得的奖励值，能够体现元件连接动作的长期影响。γ 越接近 0，即时奖励对智能体的影响越大；γ 越接近 1，未来奖励影响越大。因此，可编程搜索算法中“在搜索空间寻找满足约束条件的可行解”被转化为强化学习中“寻找使累积奖励最大化的最优解”，提高了构造复杂拓扑的效率。

强化学习中智能体可通过价值函数法、策略梯度法选择最优动作。价值函数法指通过学习状态和动作的价值函数来指导智能体的决策，其中 Q 学习算法、深度 Q 网络 DQN (deep Q network)算法常用于拓扑构造，以动作价值 Q 值为导向，逐步逼近最优策略。此外，它们常结合 ε–贪心策略选择动作，以提高动作的随机性，实现对拓扑构造的有效探索。策略梯度法则直接通过学习状态到动作的映射来优化策略，无需学习价值函数，其中近端策略优化 PPO (proximal policy optimization)算法被用于拓扑构造，通过限制新旧策略间的差异，避免每次更新时策略变化过大，以提高构造效率。此外，由于神经网络擅长从大量输入中学习复杂的非线性关系并提取好的特征，在拓扑构造中常引入神经网络设计智能体。

基于强化学习的拓扑智能构造实现流程如图 15 所示，共包含 3 步，具体如下。

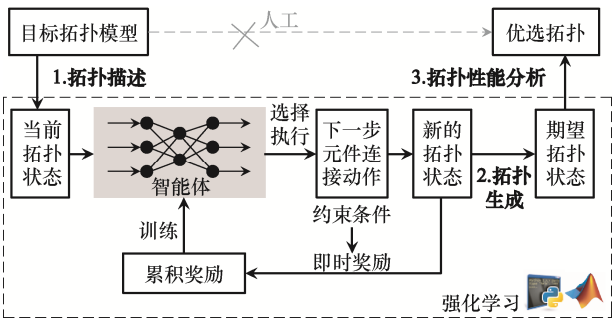


图 15　基于强化学习的拓扑智能构造实现流程

Fig. 15 Topology intelligent construction process based on reinforcement learning

步骤 1 确定目标拓扑的基本模型后，经过拓扑描述获得拓扑元件及元件连接关系表征，即为强化学习框架中的当前拓扑状态。可采用数学描述法或结合单元描述法和数学描述法，将拓扑元件及元件连接关系描述为向量、矩阵等数学形式，作为智能体的输入。

步骤 2 选用变换器/单元级拓扑构造或元件级拓扑构造，由智能体选择和执行下一步元件的连接动作。智能体执行动作后生成新拓扑，并获得由约束条件评估的即时奖励。以最大化累积奖励为目标训练智能体，经过迭代学习，可生成期望的拓扑结构。

步骤 3 根据实际应用需求，对强化学习生成的一系列电力电子变换器拓扑进行性能分析，筛选出最优拓扑。

一种基于强化学习实现多端口 DC-DC 变换器的拓扑构造过程[1]如图 16 所示。首先采用数学描述法，通过 0 或 1 组成的邻接矩阵 $\boldsymbol{A}_{dj}=\{a_{ij}\}$描述目标拓扑的元件连接状态，并将其作为智能体的输入。然后，选用元件级拓扑构造，采用神经网络设计智能体，并结合 DQN 算法和 ε–贪心策略选择和执行下一步元件的连接动作。将满足表 1 中约束条件 1、3、4 的动作赋予正奖励，违反的动作赋予负奖励，在生成的新拓扑状态中评估动作产生的即时奖励，以最大化累积奖励为目标训练神经网络，构造出多种可行的三端口拓扑。在生成的可行拓扑中，初步选择回路数量少、回路中元件数量少的拓扑以降低成本；再根据式(2)的效率分析模型，在给定端口电压、输出功率、开关频率等电路参数的情况下，对拓扑的效率进行计算，从而筛选出效率最优拓扑。最后，搭建对应的电路仿真及实验样机进行性能验证。

根据不同的输入输出端口数量需求，该强化学习算法可通过修改智能体的输入拓扑状态邻接矩阵，在 10 个小时内构造出约 40 种可行的多端口 DC-DC 变换器拓扑，构造效率高。所构造的拓扑涵盖了双输入单输出、单输入双输出、双向多端口等不同端口类型的多端口拓扑，通用性强。在所构造的拓扑中，部分为现有已知拓扑，验证了强化学习构造拓扑的有效性；同时包含了 10 余种全新拓扑，体现了强化学习构造拓扑的创新性。

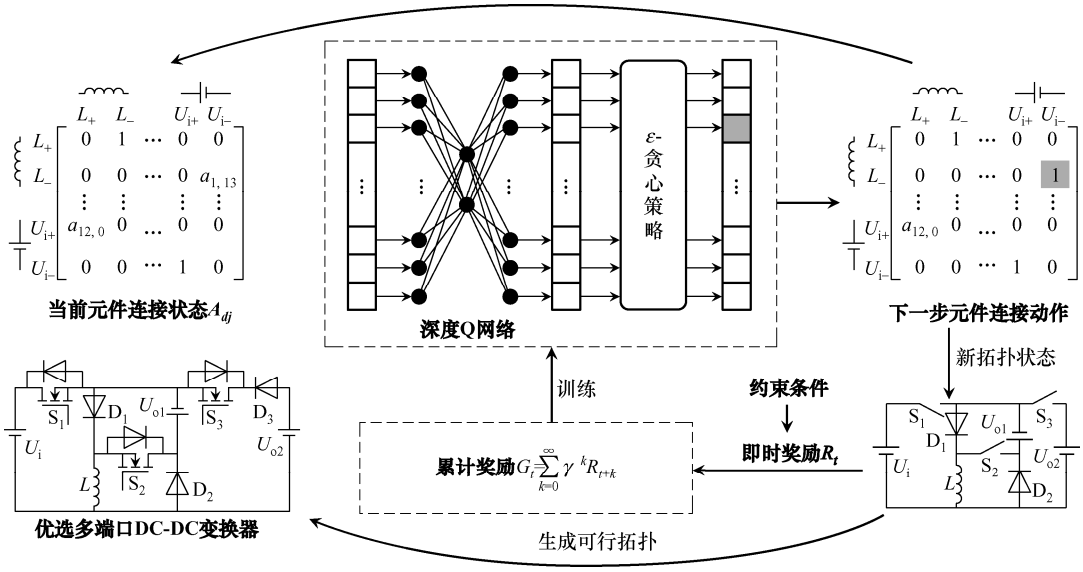


图 16 基于强化学习的拓扑智能构造实例

Fig. 16 Topology intelligent construction case based on reinforcement learning

当目标拓扑元件数量增多时，可通过增加神经网络中的节点数实现复杂拓扑状态表征。此外，也可通过更改初始邻接矩阵信息或给出新的设计奖励满足新的拓扑构造需求。然而，神经网络节点数和构造可行拓扑的迭代次数会随着元件数量的增加而增加，从而导致多元件拓扑构造过程的耗时显著增加。

以构造图 14 所示的多端口 DC-DC 变换器为例，表 2 对比了强化学习[48]与可编程搜索算法[46]构造 50 个有效拓扑的耗时。由表可知，相比于可编程搜索算法，强化学习在构造端口数≥6 的 DC-DC 变换器时具有显著的速度优势。因此，强化学习在复杂拓扑构造中更具准确性与实用性。

表 2 可编程搜索算法与强化学习构造有效拓扑的耗时对比

Tab. 2 Comparison of time consumed in construction of effective topologies between programmable search algorithm and reinforcement learning

s

算法类型	端口数				
	4	5	6	7	8
可编程搜索算法[46]	$<1.0\times10^0$	6.0×10^1	2.4×10^3	1.0×10^6	1.0×10^8
强化学习[48]	$<1.0\times10^0$	8.0×10^1	8.0×10^1	1.0×10^2	7.0×10^2

综上，基于强化学习的拓扑智能构造是一种端到端的过程，只需将拓扑描述作为强化学习的输入，根据约束条件制定奖励，通过寻找最大化累积奖励的最优解，即可构造出期望的拓扑结构。

4.3 小结

基于可编程搜索算法与强化学习的拓扑智能构造方法对比见表 3。由表可知，可编程搜索算法的步骤清晰直观，不存在数据依赖，易于设计人员调试，且相对成熟。然而，目前可编程搜索算法在处理复杂拓扑构造问题时效率较低、计算资源消耗较大，更适用于元件数量不超过 10 的拓扑构造。相比于可编程搜索算法，强化学习通过与环境交互获得的数据进行学习，以改进策略，其数据依赖度相对较高，但具有更优的试错性和泛化能力，并可在短时间内生成大量多样化的创新型目标拓扑。然而，强化学习的调试复杂度较高，对硬件的要求也更高，当元件数量较少时，训练智能体比直接遍历搜索空间更耗时，且需耗费更多的计算资源。因此强化学习在实现复杂电力电子变换器拓扑智能构造时更具优势。

表 3　可编程搜索算法和强化学习的拓扑智能构造方法对比

Tab. 3 Comparison between topology intelligent construction methods based on programmable search algorithm and reinforcement learning

算法类型	预设条件	优点	缺点	适用范围	发展趋势
可编程搜索算法	元件类型及数量	不存在数据依赖，可控性强，易于调试，算法成熟	构造复杂拓扑时效率较低，计算资源消耗大	元件数量不大于 10 的拓扑构造	改进算法性能、开发实现更多需求的多目标构造算法等
强化学习	元件类型及数量	泛化能力强，效率高，创新性强	数据依赖度较高、调试复杂；构造简单拓扑时效率较低，计算资源消耗大	元件数较多的复杂拓扑构造	改进奖励机制、结合不同的人工智能技术

5　结论

本文将电力电子变换器的拓扑构造过程划分为拓扑描述、拓扑生成和拓扑性能分析 3 个环节，总结了现有的拓扑描述方法，阐述了拓扑构造原理，归纳了拓扑构造的约束条件，概括了电力电子变换器常用的性能分析指标；并以 DC-DC 变换器为例，介绍了结合可编程搜索算法或强化学习的拓扑构造过程，为实现电力电子变换器的智能构造提供了参考。为了进一步提升电力电子变换器拓扑智能构造速度和完备性，未来还可以从以下方面开展研究。

(1)多类型拓扑实现。目前拓扑智能构造的主要对象是非隔离型 DC-DC 变换器，针对 DC-AC 变换器、隔离型 DC-DC 变换器等其他类型拓扑的智能构造研究较少，难以满足电动汽车充电站等新能源场景对隔离电能变换、交直流电能变换的需求。因此，实现 DC-AC 变换器、隔离型 DC-DC 变换器等多类型拓扑的智能构造，为工程应用建立丰富的拓扑库，是拓扑智能构造的主要发展方向。

(2)多目标拓扑优化。目前拓扑生成环节通常只实现了满足电路规则的可行拓扑构造，未来可以引入多目标优化算法，并结合变换器的设计目标，直接生成满足应用需求的拓扑。

(3)拓扑性能分析智能化。目前性能分析环节主要依赖人工获取仿真数据并计算性能指标，未来可将其集成于拓扑智能构造算法中，结合拓扑的参数设计，实现拓扑自动优化选型。

参考文献：

[1] Chen Yu, Bai Jingbo, Kang Yong. A nonisolated single-inductor multiport DC-DC topology deduction method based on reinforcement learning [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2022, 10(6): 6572-6585.

[2] 范玉鹏, 姜浩, 吴影, 等. 面向光伏发电的高增益磁集成 DC-DC 变换器研究[J/OL]. 电源学报, 1-4. (2025-03-26)[2025-09-30]. https://link.cnki.net/urlid/12.1420.tm.20250326.1631.018.

Fan Yupeng, Jiang Hao, Wu Ying, et al. Research on high-gain magnetically integrated DC-DC converter for photovoltaic power generation[J/OL]. Journal of Power Supply, 1-4. (2025-03-26)[2025-09-30]. https://link.cnki.net/urlid/12.1420.tm.20250326.1631.018. (in Chinese)

[3] Salehi S M, Dehghan S M, Hasanzadeh S. Interleaved-input series-output ultra-high voltage gain DC-DC converter [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(4): 3397-3406.

[4] Nag S S, Panigrahi R, Mishra S K, et al. A theory to synthesize nonisolated DC-DC converters using flux balance principle [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(11): 10910-10924.

[5] Zhang Yang, Qiu Dongyuan, Zhang Bo, et al. Systematic synthesis of DC-DC converters based on loop matrices [J]. International Journal of Circuit Theory and Applications, 2025, 53(8): 4720-4734.

[6] Chen Guipeng, Jin Zhufeng, Liu Yuwei, et al. Programmable topology derivation and analysis of integrated three-port DC-DC converters with reduced switches for

low-cost applications [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(9): 6649-6660.

[7] Dong Guangzhong, Yang Fangfang, Tsui K L, et al. Active balancing of lithium-ion batteries using graph theory and A-star search algorithm [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2021, 17(4): 2587-2599.

[8] 尚荣艳, 彭长青, 方瑞明. 专家系统改进模型及其在电机声学设计中的应用[J]. 电机与控制学报, 2015, 19(12): 75-81.
Shang Rongyan, Peng Changqing, Fang Ruiming. Improved model of expert systems and its application in motor acoustic design [J]. Electric Machines and Control, 2015, 19(12): 75-81. (in Chinese)

[9] 陈宇, 祝之森, 白敬波, 等. 电力电子设计智能化: 技术路线综述和前沿探索[J]. 中国电机工程学报, 2026, 46(1): 339-356.
Chen Yu, Zhu Zhisen, Bai Jingbo, et al. Intelligent design of power electronics: Technical roadmap overview and frontier exploration [J]. Proceedings of the CSEE, 2026, 46(1): 339-356. (in Chinese)

[10] Zhao Shuai, Blaabjerg F, Wang Huai. An overview of artificial intelligence applications for power electronics [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(4): 4633-4658.

[11] Mo Liping, Huang Jiangming, Chen Guipeng, et al. Computer-aided systematic topology derivation of single-inductor multi-input multi-output converters from working principle [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2022, 69(6): 2637-2649.

[12] Abbasi M, Babaei E, Tousi B. New family of non-isolated step-up/down and step-up switched-capacitor-based DC-DC converters [J]. IET Power Electronics, 2019, 12(7): 1706-1720.

[13] Ruan Xinbo, Li Bin, Chen Qianhong, et al. Fundamental considerations of three-level DC-DC converters: Topologies, analyses, and control [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2008, 55(11): 3733-3743.

[14] 丁新平, 刘欣宇, 蔡金涛, 等. 集成倍压单元与开关电容的改良 Sepic 变换器[J/OL]. 电源学报, 1-11. (2025-09-22)[2025-09-30]. https://link.cnki.net/urlid/12.1420.TM.20250919.1545.002.
Ding Xinping, Liu Xinyu, Cai Jintao, et al. Improved Sepic converter with integrated voltage multiplier cell and switched capacitor [J/OL]. Journal of Power Supply, 1-11. (2025-09-22)[2025-09-30]. https://link.cnki.net/urlid/12.1420.TM.20250919.1545.002.(in Chinese)

[15] 李志健, 汪锐, 胡松, 等. LCL 型全−半桥谐振变换器调制策略及分析[J]. 电源学报, 2026, 24(1): 31-39.
Li Zhijian, Wang Rui, Hu Song, et al. Modulation strategy and analysis of LCL-type full-half bridge resonant converter [J]. Journal of Power Supply, 2026, 24(1): 31-39. (in Chinese)

[16] Li Yuzhuo, Kuprat J, Li Yunwei, et al. Graph-theory-based derivation, modeling, and control of power converter systems [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2022, 10(6): 6557-6571.

[17] Wolaver D. Basic constraints from graph theory for DC-to-DC conversion networks [J]. IEEE Transactions on Circuit Theory, 1972, 19(6): 640-648.

[18] Zhang Bo, Qiu Dongyuan. Sneak circuits in power converters: Concept, principle and application [J]. CPSS Transactions on Power Electronics and Applications, 2017, 2(1): 68-75.

[19] 李虹, 梁一迪, 尹成东, 等. 两开关隔离型直流变换器拓扑自生成方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2025, 51(5): 1415-1427.
Li Hong, Liang Yidi, Yin Chengdong, et al. Topology self-generating method of isolated DC-DC converters with two switches [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2025, 51(5): 1415-1427. (in Chinese)

[20] Diestel R. Graph Theory [M]. 5th ed. Berlin, Heidelberg : Springer, 2017.

[21] Huang Zhengqin, Zhou Dehong, Shen Zewei, et al. Directed graph-based topology derivation method for single-stage multiport inverters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(11): 14614-14627.

[22] Zhang Bo, Qiu Dongyuan. Sneak Circuits of Power Electronic Converters [M]. Singapore: IEEE/Wiley, 2015.

[23] Zhang Guidong, Liao Yukai, Yu S S, et al. A graph-modeling approach to topology simplification in power

converters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(7): 8248-8261.

[24] Xu Chenyao, Dong Mi, Liang Ruijin, et al. A graph and number theory based description method and equivalence judgment of power electronics topology [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2024, 39(5): 5862-5872.

[25] Neira S, Pereda J, Rojas F. Three-port full-bridge bidirectional converter for hybrid DC/DC/AC systems [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(12): 13077-13084.

[26] Fang Jingyang, Blaabjerg F, Liu S, et al. A review of multilevel converters with parallel connectivity [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(11): 12468-12489.

[27] 权利敏, 张民, 贾海涛, 等. 基于开关倍压钳位单元的 DC-DC 变换器[J]. 电源学报, 2026,24(3): 30-36.
Quan Limin, Zhang Min, Jia Haitao, et al. DC-DC converter based on switching voltage doubling clamp unit[J]. Journal of Power Supply, 2026, 24(3): 30-36. (in Chinese)

[28] Tang Yu, Wang Ting, Fu Dongjin. Multicell switched-inductor/switched-capacitor combined active-network converters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(4): 2063-2072.

[29] 邢玢鑫, 杨浴金, 黄煜, 等. 适用于基本 DC/DC 变换器的“外衣电路”拓扑家族研究[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(11): 4151-4161.
Zhu Binxin, Yang Yujin, Huang Yu, et al. Research on family of “coat circuit” topology for basic DC/DC converters [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(11): 4151-4161. (in Chinese)

[30] 陈桂鹏. 基于统一模型法的非隔离直流变换器拓扑衍生与分析研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
Chen Guipeng. Research on topology derivation and generalized analysis of non-isolated DC-DC converters based on unified model method [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017. (in Chinese)

[31] Gules R, dos Santos W M, dos Reis F A, et al. A modified SEPIC converter with high static gain for renewable applications [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(11): 5860-5871.

[32] Mo Liping, Wang Yibo, Jiang Chaoqiang, et al. A novel topology derivation method revealed from classical Cuk, Sepic, and Zeta converters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2024, 39(7): 7828-7833.

[33] Maksimovic D, Cuk S. General properties and synthesis of PWM DC-to-DC converters [C]// 20th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference. Milwaukee, WI, USA, 2002: 515-525.

[34] 张洋, 丘东元, 张波, 等. DC-DC 变换器分层级构造方法[J]. 电工技术学报, 2023, 38(20): 5473-5487.
Zhang Yang, Qiu Dongyuan, Zhang Bo, et al. Hierarchical synthesis methods of DC-DC converters [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(20): 5473-5487. (in Chinese)

[35] Panigrahi R, Mishra S K, Joshi A, et al. Synthesis of PWM converters from conversion ratios using flux- or charge-balance equations [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2022, 10(6): 6430-6443.

[36] 李虹, 王文财, 李亚敏, 等. 基于图论的 S1D1L2C1 型 DC-DC 变换器可编程拓扑搜索算法[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(16): 5670-5682.
Li Hong, Wang Wencai, Li Yamin, et al. Programmable topology searching algorithm for S1D1L2C1 type DC-DC converters based on graph theory [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(16): 5670-5682. (in Chinese)

[37] Li Hong, Li Yamin, Yin Chengdong, et al. Vertex prime degree-based nonisomorphic topology automatic search algorithm for DC-DC converters with two switches [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Industrial Electronics, 2023, 4(4): 1084-1095.

[38] Wang Guangyu, Wen Huiqing, Xu Peichao, et al. A comprehensive review of integrated three-port DC-DC converters with key performance indices [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2024, 39(5): 6391-6408.

[39] 潘学伟, 李司南, 张钟月, 等. 基于开关电感和开关电容的新型高增益 DC-DC 变换器[J]. 电源学报, 2026, 24(2): 18-29.
Pan Xuewei, Li Sinan, Zhang Zhongyue, et al. Novel high-gain DC-DC converter based on switched inductor and switched capacitor [J]. Journal of Power Supply,

2026, 24(2): 18-29. (in Chinese)

[40] Liang Yidi, Li Hong, Wei Mingbo, et al. An automatic optimization topology recommendation method for DC-DC converters [J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2025, 11(2): 235-250.

[41] 白洪超, 赵迎辉, 禹金标, 等. 三相双向 LLC 谐振变换器效率特性优化设计研究[J/OL]. 电源学报, 1-13. (2024-09-18)[2025-09-30]. https://link.cnki.net/urlid/12.1420.tm.20240914.1714.002.

Bai Hongchao, Zhao Yinghui, Yu Jinbiao, et al. Optimization design of efficiency characteristics based on three phase bidirectional LLC resonant converter[J/OL]. Journal of Power Supply, 1-13. (2024-09-18)[2025-09-30]. https://link.cnki.net/urlid/12.1420.tm.20240914.1714.002. (in Chinese)

[42] 肖蕙蕙, 李茂丽, 杨奕. 高效高功率密度车载双向电能变换器设计[J]. 电源学报, 2021, 19(2): 34-40.

Xiao Huihui, Li Maoli, Yang Yi. Design of high efficiency and high power density vehicle-mounted bidirectional power converter [J]. Journal of Power Supply, 2021, 19 (2): 34-40. (in Chinese)

[43] Tarzamni H, Gohari H S, Sabahi M, et al. Nonisolated high step-up DC-DC converters: Comparative review and metrics applicability [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2024, 39(1): 582-625.

[44] 张洋, 丘东元, 张波, 等. 基于层次分析-熵值法的 DC-DC 变换器拓扑综合评价[J]. 北京航空航天大学学报, 2025, 51(5): 1469-1479.

Zhang Yang, Qiu Dongyuan, Zhang Bo, et al. Comprehensive evaluation of DC-DC converters based on analytic hierarchy process and entropy method [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2025, 51(5): 1469-1479. (in Chinese)

[45] Mo Liping, Jiang Chaoqiang, Wang Xiaosheng, et al. A novel systematic topology derivation method for single-inductor three-port DC-DC converters from separate components [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2025, 40(1): 1376-1388.

[46] Mo Liping, Chen Guipeng, Huang Jiangming, et al. Graph theory-based programmable topology derivation of multiport DC-DC converters with reduced switches [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(6): 5745-5755.

[47] Xiao Zhineng, Chen Yanfeng, Zeng Yangbin, et al. A graph-based methodology for the programmable construction of ZVT cells [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2026, 41(1): 1113-1124.

[48] Dong Mi, Liang Ruijin, Yang Jian, et al. Topology derivation of multiport DC-DC converters based on reinforcement learning [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(4): 5055-5064.



肖轶婷

作者简介：

肖轶婷(2001—)，女，博士研究生。研究方向：电力电子技术。E-mail: epxiaoyt@mail.scut.edu.cn。

丘东元(1972—)，女，中国电源学会高级会员，通信作者，博士，教授。研究方向：电力电子技术。E-mail：epdyqiu@scut.edu.cn。

张波(1962—)，男，中国电源学会会士，博士，教授。研究方向：电力电子与电力传动。E-mail：epbzhang@scut.edu.cn。

曾洋斌(1990—)，男，博士，副教授。研究方向：电力电子技术。E-mail：epybzeng@scut.edu.cn。

李虹(1980—)，女，中国电源学会高级会员，博士，教授。研究方向：电力电子系统非线性建模与控制，并网光伏发电系统，开关电源电磁干扰抑制研究。E-mail：hong_li@zju.edu.cn。

(责任编辑：郭凯凯)