

中文摘要

“双碳”战略目标为新时代能源发展指明了方向，同时也促进了储能系统、直流微网、电动汽车等的发展。在储能系统与直流微电网等领域中，双向隔离双有源桥（DAB）直流变换器是关键组成部分，其具有双向能量流动、软开关特性、高功率密度、拓扑结构对称等优点，有很大的应用前景与研究价值。DAB 变换器自身存在诸多优点，但随着 DAB 变换器扮演的角色越来越重要，对输出电压的稳态精度、动态性能、鲁棒性提出了更高的要求。

本文针对 DAB 变换器输出电压的控制进行了研究。首先对 DAB 变换器和滑模控制分别进行了介绍，其次详细分析了 DAB 变换器在单移相控制下开关管状态与工作原理，通过对开关函数进行傅里叶分解，推导出了输出电压的动态模型。

针对传统 PI 控制方法稳态误差大和鲁棒性差的不足，本文提出了一种单积分滑模控制策略（SISMC）。在输出电压动态模型的基础上，将包含积分环节的滑模控制应用到电压控制器中，设计了电压单闭环控制，获得了良好的输出电压精度与鲁棒性，最后在 MATLAB/Simulink 中验证了所提控制方法的良好控制效果。

针对单积分滑模控制策略需要采集扰动量负载电流才可以实现控制输出电压的不足，本文将非线性扰动观测器技术应用到滑模控制器中，提出了一种基于非线性扰动观测器的单积分滑模控制策略（SISMC-NDO），通过非线性扰动观测器对扰动量负载电流进行估计，实现了无需采集负载电流信息控制输出电压。最后在 MATLAB/Simulink 中搭建了模型，从不同角度对所提策略进行了仿真，验证了所提控制方法的可行性和良好控制效果。

关键词：DAB 变换器；动态模型；单积分滑模控制；非线性扰动观测器

ABSTRACT

The “dual carbon” strategic goal points out the direction for energy development in the new era and promotes the development of energy storage systems, DC microgrid, electric vehicles and so on. In the energy storage systems and DC microgrids, bi-directional isolated dual active bridge (DAB) DC converter has played an important role. DAB converter has the advantages of bidirectional power flow, soft switching characteristics, high power density and symmetrical structure. It has great application prospects and research values. In spite of these advantages, with the role of DAB converter becoming more and more important, the better steady-state accuracy, dynamic performance and robustness of output voltage is required in practical applications.

In this thesis, the output voltage control of DAB converter is investigated. Firstly, the DAB converter and sliding mode control are introduced. Secondly, the switching state and operation principles of the DAB converter are analyzed in detail under the single phase shift control. The dynamic model of output voltage is derived by Fourier decomposition of switching function.

Aiming at the shortcomings of traditional PI control method, the single-integral sliding mode control (SISMC) is proposed in this thesis. Based on the dynamic model of output voltage, sliding mode control with integral terms is applied to the voltage controller and voltage single closed loop control is designed. Better output voltage accuracy and robustness are obtained. Finally, the advantages of the proposed control method are verified in the MATLAB/Simulink.

However, adopting the single-integral sliding mode control scheme based on dynamic model of output voltage has the inconvenience of collecting the information of load current considered as disturbance. The nonlinear disturbance observer is applied to the sliding mode controller and the single-integral sliding mode control method based on a nonlinear disturbance observer (SISMC-NDO) is proposed in this thesis. Applying the nonlinear disturbance observer to estimate the load current considered as disturbance, the output voltage control is realized

without collecting the information of load current. Finally, the simulation models are built in the MATLAB/Simulink. Meanwhile, the simulation experiments of proposed method have been carried out from different aspects and the advantages and validity of the proposed control method are verified.

Key words: DAB converter; Dynamic model; The single-integral sliding mode control; The nonlinear disturbance observer

目 录

中 文 摘 要	I
ABSTRACT	III
第一章 绪 论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 DAB 变换器概述	3
1.2.1 DAB 变换器拓扑概述	3
1.2.2 DAB 变换器建模与控制方法概述	6
1.2.3 DAB 变换器控制策略概述	7
1.3 滑模控制概述	7
1.4 研究内容与章节安排	9
第二章 DAB 变换器的工作原理与动态模型	11
2.1 DAB 变换器的工作原理分析	11
2.1.1 单移相控制的原理分析	11
2.1.2 单移相控制的工作模态分析	12
2.1.3 单移相控制的功率传输特性	16
2.2 DAB 变换器的动态模型	18
2.3 本章小结	21
第三章 DAB 变换器的单积分滑模控制器设计	23
3.1 滑模控制的基本理论	23
3.1.1 滑模控制的数学描述	23
3.1.2 滑模控制的三个要素	24
3.2 DAB 变换器的滑模控制	25
3.2.1 基本实现方法	25
3.2.2 滑模面的种类	26
3.2.3 开关频率的控制	26
3.3 单积分滑模控制器的设计理论	27
3.4 输出电压控制器的设计	28
3.5 仿真结果	29

3.5.1 稳态仿真结果	30
3.5.2 动态性能仿真结果	32
3.6 本章小结	38
第四章 非线性扰动观测器与单积分滑模控制的新型控制器设计	39
4.1 扰动观测器概述	39
4.2 非线性扰动观测器基本原理	39
4.3 基于非线性扰动观测器的 DAB 滑模控制	41
4.3.1 非线性扰动观测器的设计	41
4.3.2 基于非线性扰动观测器的 DAB 滑模控制设计	41
4.4 仿真结果	42
4.4.1 稳态仿真结果	42
4.4.2 动态性能仿真结果	43
4.5 本章小结	48
第五章 总结与展望	51
5.1 总结	51
5.2 展望	51
参 考 文 献	53
致 谢	59
攻读硕士期间的学术活动及成果情况	61

第一章 绪论

1.1 研究背景及意义

在工业革命的发展过程中，能源资源与经济、社会的发展始终密不可分。经济、社会的发展，不仅推动了能源发展，而且也导致了能源资源消耗不断攀升，由此带来了传统能源资源短缺、生态环境恶化等诸多资源环境问题。面对日益严峻的资源环境问题，世界各国纷纷通过优化能源结构、大力发展清洁能源等措施来节能减排，缓解能源环境问题。中国作为当今世界第二大经济体，在经济高速发展的过程中，能源资源和生态环境问题越来越突出，诸如大气污染、水环境污染、土地荒漠化等等。为了中华民族永续发展，中国政府积极采取措施，不断地提高环境保护和节能减排意识，推动能源消费结构向清洁低碳加快转变，调整升级工业结构，践行新时代新发展理念。根据国家统计局公布的数据，从 2012 到 2022 年，中国清洁能源消费占能源消费总量的百分比如图 1.1 所示。2022 全年清洁能源消耗量占全年能源消耗总量的 25.9%，同比增长 0.4 个百分点，比 2012 年增加了大约 11.4 个百分点^[1]。

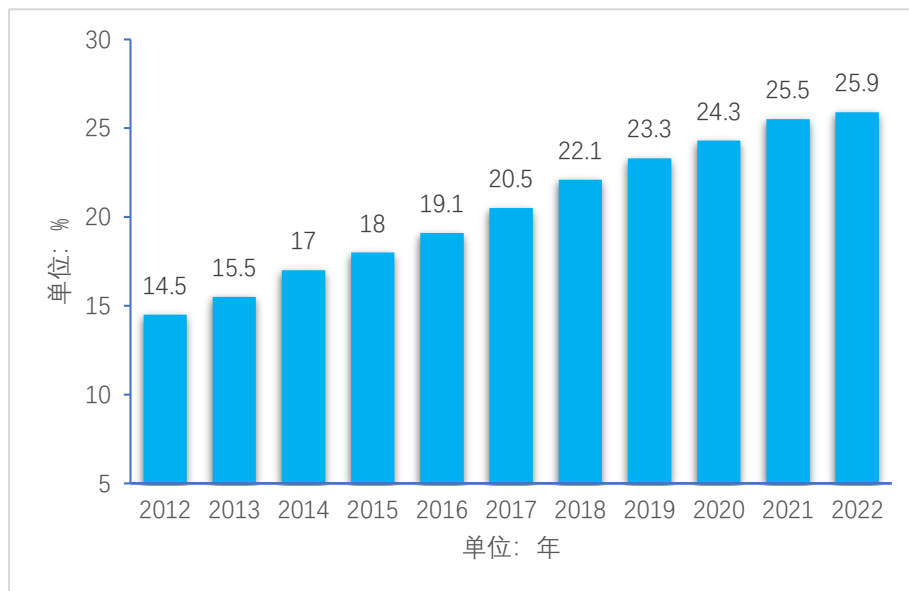


图 1.1 2012 到 2022 年中国清洁能源消费量占能源消费总量

Figure 1.1 From 2012 to 2022, China's clean energy consumption accounted for its total energy consumption

随着“双碳”战略目标的提出，未来中国将持续大力推进能源结构调整，化石能源的消耗将有序减少，可再生能源的开发和利用将推进。图 1.2 为 2015-2022 年中国可再生能源发电量情况。其中，2021 年全国可再生能源发电量为 2.48 万亿千瓦时，占当

年全社会总用电量的 29.8%。预计到 2030 年，全国太阳能发电、风电装机都将突破 8 亿千瓦。2060 年，全国风电装机将超过 20 亿千瓦，其中包含大约 5 亿千瓦的海上风电。太阳能发电装机将突破 25 亿千瓦，其中包含约 2.5 亿千瓦的光热。此外，生物质能发电、生物质能燃料与生物质能热电联产在我国具有广阔的发展前景，预计到 2060 年，生物质能发电装机可达到 2 亿千瓦左右^[2]。

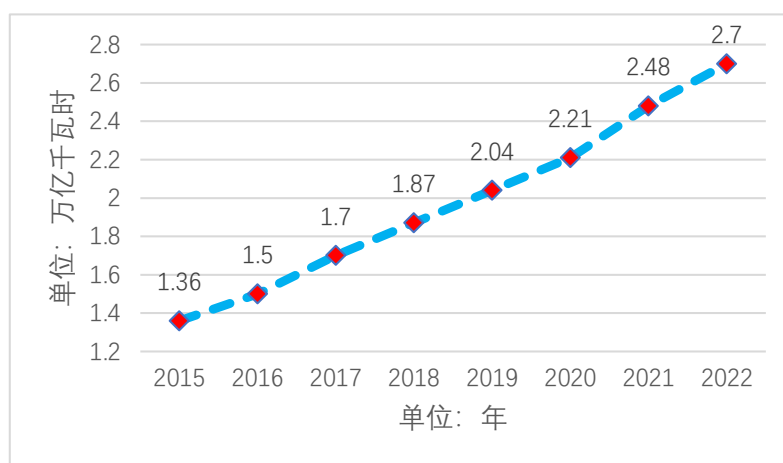


图 1.2 2015-2022 年中国可再生能源发电量

Figure 1.2 China's renewable energy generation capacity from 2015 to 2022

新能源在被大力发展的同时，其自身独有的特点也给电力系统带来了不利的影响。风能、太阳能等新能源发电具有间歇性、随机性、波动性和惯量小缺点，如果直接接入电网，将导致电能质量调控难度加大，严重影响电网的稳定性。目前普遍采取新能源发电和储能系统相结合的措施，构成直流微网系统来解决上述问题^[3]。

在直流微网系统中，储能系统是重要的组成部分，储能系统由储能环节和双向直流变换器两者构成，前者起存储和释放电能作用，后者是为了实现电能可在储能环节和直流母线间双向流动。由于单一储能环节无法同时满足能量密度与功率密度的要求，目前储能环节多为蓄电池和超级电容器的混合形式^[4-6]，这样可以将两种储能元件各自的优势联系到一起。通常储能系统起改善电能质量、抑制功率的波动和备用电源的作用。除储能系统外，在直流微网中还有新能源发电装置，图 1.3 为一个直流微电网系统，AC/DC 整流器作为风力发电的并网接口电路，光伏发电和蓄电池的接口电路为 DC/DC 升压电路，交流电力系统和高压直流母线间的桥梁为双向 AC/DC 变换器，双向 DC/DC 变换器作为直流母线和储能环节间的连接纽带。

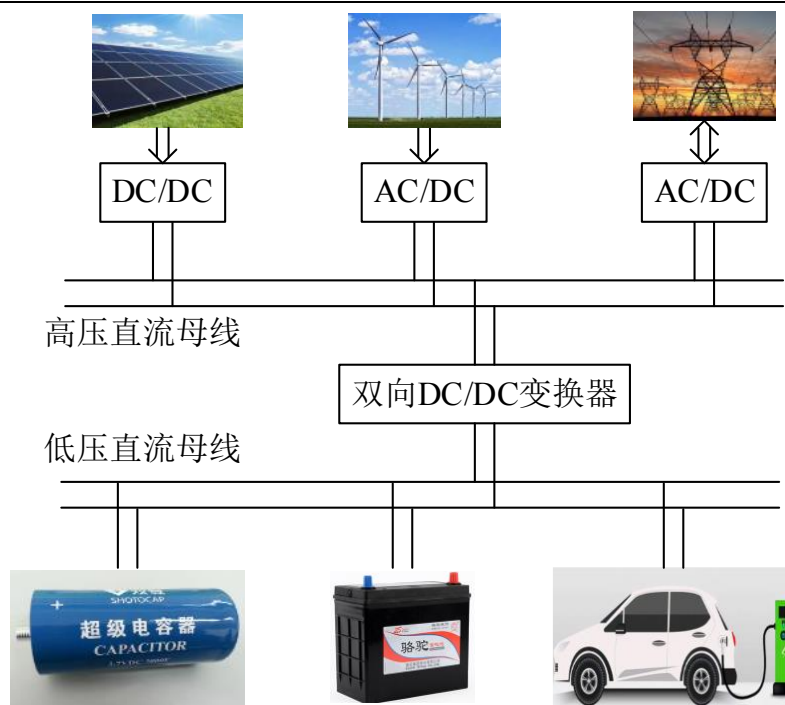


图 1.3 直流微网系统

Figure 1.3 DC microgrid system

双向 DC/DC 变换器拓扑结构主要有隔离型和非隔离型。与非隔离型拓扑结构相比，隔离型拓扑结构中含有变压器，因此隔离型拓扑结构不仅可以改变电压，同时也可以实现电气隔离。根据拓扑结构的不同，隔离型 DC/DC 变换器有推挽、正激、桥式等类型。其中，桥式结构中的双向隔离双有源桥（Dual Active Bridge, DAB）直流变换器不仅能够实现电压等级的变换，而且还具有双向能量流动、软开关特性、高功率密度、拓扑结构简单对称等优点^[7]，因此，被广泛地用于直流微网系统中作为储能环节和直流母线二者间的连接接口。近年来，DAB 变换器受到世界各国学者的重视，并且已经取得了很多研究成果，DAB 变换器的可靠性、工作效率及稳定性等性能得到了提高，促进了直流微网、固态变压器、电动汽车^[8]、航空航天电源等发展^[9]。因此，对 DAB 变换器展开研究具有重要的实际意义。

1.2 DAB 变换器概述

1.2.1 DAB 变换器拓扑概述

DAB 变换器能够实现电压等级的变换，而且还具有双向能量流动、软开关特性、高功率密度、拓扑结构简单对称等优点，该拓扑结构在 1988 年被提出^[10]。随着新功率半导体器件和新型磁性材料的发展，DAB 变换器的性能不断被提高^[11,12]。到目前为止，DAB 变换器的拓扑结构可分为电压源类型、电流源类型与谐振类型^[13]。

电压源型 DAB 变换器拓扑结构是当前研究与应用最广泛的一种，其拓扑结构如图 1.4 所示，主要由原副边两个全桥、两个直流滤波电容、高频变压器和辅助电感构成。文献[14]详细分析了电压源型 DAB 的工作原理，详细推导了输出功率的表达式，分析了死区效应、电压纹波以及安全工作范围。文献[15]分析了死区时间给 DAB 变换器造成的负面影响，当开关频率逐渐提高时，死区时间在一个开关周期内所占比重越来越大，死区时间逐渐不能忽略。当开关频率增大到某一程度时，会导致输出电压极性发生反转与相位漂移，进一步影响输出功率。文献[16]推导了 DAB 变换器小信号模型，分析了零电压开关区间与回流功率的关系。电压源型 DAB 变换器在轻载条件下，会导致 ZVS 范围变小，变换器效率降低，然而在文献[17]中通过自适应电感结构和变频控制方法，就能够随传输功率变化来改变辅助电感的电感值或者开关周期，来确保轻载工况下软开关。文献[18]通过分析开关器件的软开关条件，得出了实现软开关条件所需变压器漏感参数的设计方法和死区时间约束条件。文献[19]提出了 DAB 的安全工作区域和统一离散化设计方法，确保系统参数保持不变。除了图 1.4 的单相结构外，还有三相结构。三相结构虽然可以降低开关管的应力和滤波电容的数值，但是需要更多数量的磁性元件与半导体器件^[19]。

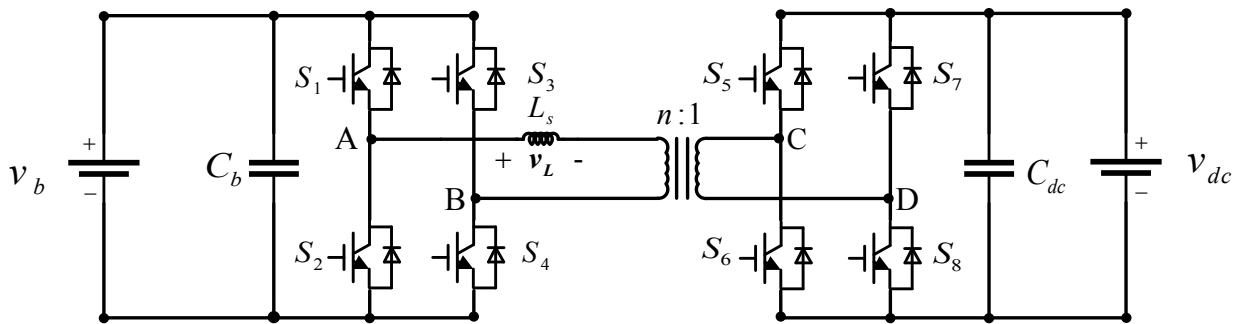


图 1.4 电压源型 DAB 变换器拓扑结构

Figure 1.4 Topology of Voltage-Fed Dual Active Bridge

电流源型 DAB 变换器拓扑结构如图 1.5 所示，可以在电压源型拓扑结构的全桥和电容器之间串接一个电感来实现，该电感可以有效抑制电流纹波。由于开关管的寄生电容和漏感无法忽略，在实际中 DAB 变换器会出现电压尖峰问题，同时电感和开关管的寄生电容会构成谐振，在开关器件开关瞬间产生较大的电压尖峰与电压振荡^[20]，不仅会带来电磁干扰，还会损坏开关器件。针对电压尖峰与震荡现象，文献[21]归纳总结了多种有源箝位电路和无源吸收电路。文献[22]通过分析开关管的结电容、体二极管的反向恢复和电压尖峰、波形振荡的关系，说明了开关器件的参数可以改善该问题。因

为电压尖峰是电流源对寄生电容充电引起的，所以电压尖峰现象制约了电流源型拓扑结构的应用。

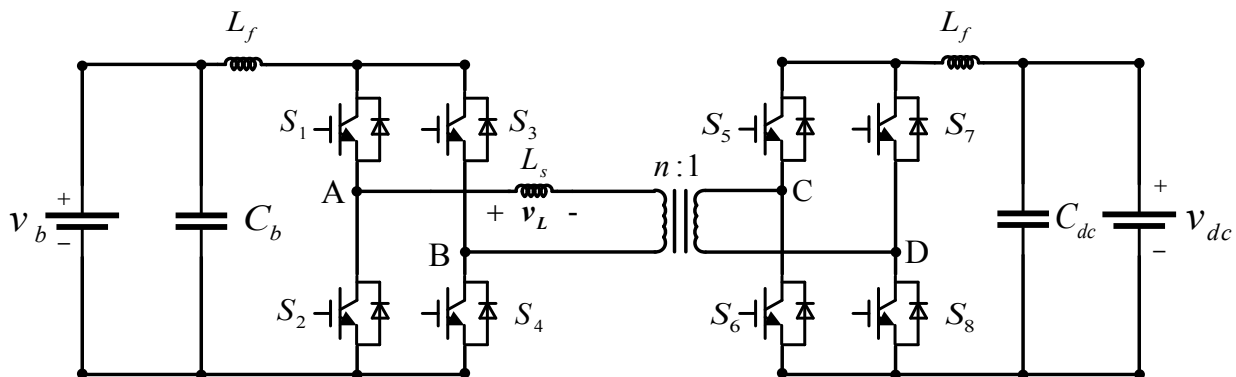


图 1.5 电流源型 DAB 变换器拓扑结构

Figure 1.5 Topology of Current-Fed Dual Active Bridge

谐振型拓扑结构是在电压源型拓扑结构的变压器处加入谐振网络得到的。谐振型拓扑结构有明显的优点，通过 LC 谐振可以让经过变压器的电流波形接近于正弦波。与电压源型拓扑结构的线性电流相比，有利于降低电流谐波和变压器损耗。与其他类型拓扑结构相比，谐振型拓扑结构可以降低开关损耗，增大软开关范围，提高工作频率。同时能够避免直流分量经过变压器，避免直流磁化问题，但是谐振型拓扑结构的缺点是谐振参数设计繁琐复杂。文献[23]归纳了常见的几种谐振型拓扑结构及其控制方式。谐振结构形式有 LC 型、CLLC 不对称型与 LCLC 对称型等形式，后两种形式的软开关范围比第一种大。图 1.6 为 CLLC 不对称谐振型 DAB 拓扑结构，其一次侧全桥开关管采用 180° 互补导通方式，可以实现零电压开关，二次侧全桥开关管采用谐振信号驱动，可以实现零电流开关。

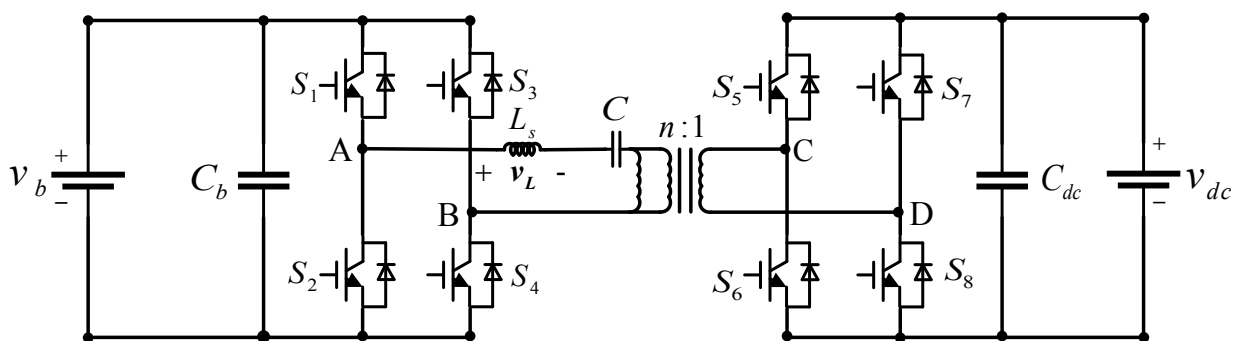


图 1.6 CLLC 不对称谐振型 DAB 拓扑结构

Figure 1.6 Topology of CLLC resonant Dual Active Bridge

1.2.2 DAB 变换器建模与控制方法概述

DAB 变换器中的开关管处于高频开关状态，导致变换器本身为时变非线性电路。DAB 变换器最基本也是最重要的要求是在各种工况下准确、快速地输出期望电压值。实现这一目标则需要设计性能优越的控制器，而性能优越的控制器的设计则需要精确的 DAB 变换器数学模型和控制方法。目前，大量学者对 DAB 变换器的模型和控制方法进行了研究，以实现变换器更好的静态和动态性能。

关于 DAB 变换器的数学模型，当前大部分文献都是基于 DAB 变换器的小信号模型。目前，获得小信号数学模型可以通过降阶模型和基于傅里叶级数的全阶模型。文献[24]提出了基于小信号分析的 PI 控制方法，但是只能在工作点处取得较好的控制性能。文献[25]提出了一种采用反馈线性化手段的非线性控制方案，其局限性在于需要精确的系统模型。当系统模型不精确时，控制效果易受扰动的影响。文献[26]中将模糊逻辑控制策略应用于电池充电电流控制中，但是模糊控制器存在计算量大的缺点。文献[27]基于 DAB 变换器的动态数学模型，提出了一种负荷电流前馈补偿方法，改善了 DAB 变换器在负荷扰动下的瞬态响应性能。虽然文献[27]通过查表法实现了前馈补偿方法，但是其不足是无法实现在线实时修正。文献[28]基于 DAB 变换器的小信号模型，提出了基于模型的移相控制策略，用于提高 DAB 变换器在负载干扰下的动态性能，该控制方法的缺点是需要繁琐的计算，而且还需要较多的传感器，增加了硬件设计成本。文献[29]通过采用电压前馈控制和传统 PI 控制相结合的移相控制，改善了 PI 控制的不足。文献[30]中作者提出了基于自然开关面的边界控制策略，该控制策略具有更好的动态性能。但是，此方法是变频控制，变压器容易趋于饱和。通常情况下，小信号模型的阶数越高，就越能获得更好的控制结果。文献[31,32]中通过状态空间平均法获得了移相控制下的 DAB 变换器的二阶小信号模型。文献[33]中选取三个电流状态量，采用状态空间平均值方法得到了三阶动态小信号模型。然而，当状态变量在一个工作周期内工作波形正负对称时，状态空间平均值算法不再适用。在 DAB 变换器中电感电流的状态平均值为零，为此文献[34]中在文献[33]的基础上通过离散化的方法，从而获得了更精确的动态小信号数学模型。

因为 DAB 变换器是时变非线性系统，当采用传统 PID 控制方法时，系统在各种扰动下很难实现优良的稳态和瞬态性能。滑模控制是一种非线性控制方法，具有很强的鲁棒性、不依赖控制对象的精确模型等优点，被应用到 DAB 变换器中。文献[26]和[35]中提出了基于平均输出电流模型的滑模控制方案，由于滑模控制中没有包含积分环节，

故存在较大的电流超调和稳态误差。为了消除稳态误差，文献[36]基于输出电压的动态模型，采用双积分滑模控制策略对电压和电流进行控制，不足之处在于需要使用电流传感器。

1.2.3 DAB 变换器控制策略概述

DAB 变换器有变频控制、占空比控制、移相控制以及混合控制策略，其中最常用的控制策略是移相控制，即变换器全桥所有桥臂的开关管以 50%占空比互补导通，通过调整开关管驱动信号来调整变压器两侧全桥产生的电压方波间的相位关系，以此来改变 DAB 变换器传输功率方向和大小。根据移相比的数目，移相控制可以分为单移相、双移相与三移相控制。

单移相（Single Phase Shift, SPS）控制是 DAB 变换器最基础的控制方法，只有一个移相比。单移相控制方法具有控制简便、易于实现软开关、动态性能好等优点。然而，单移相控制也存在不足，当变换器两侧电压不匹配时，软开关范围变小，同时变换器回流功率、电感电流有效值和开关管电流应力大幅增加，导致变换器效率降低[37,38]。

为了解决单移相控制策略的不足，又提出了双移相（Dual Phase Shift, DPS）控制和三移相（Triple Phase Shift, TPS）控制。文献[31]提出了双移相控制策略，详细分析了 DAB 变换器在双移相控制策略下各模态工作原理和传输功率特性。与单移相控制相比，双移相控制策略的控制变量增加到两个，在传输一定功率的前提下，回流功率与开关管电流应力显著减小，软开关范围增大，变换器效率得到提高^[29,39]。文献[24]提出了三移相控制策略，该控制策略具有三个控制变量，可以在全负载范围实现软开关，但是变换器工作模态过于繁多，模态分析过于繁琐，控制算法复杂，变换器动态性能较差，不利于在实际中应用。

1.3 滑模控制概述

滑模控制（sliding mode control, SMC），也叫滑模变结构控制、滑动模态控制，在 20 世纪 50 年代末由前苏联学者 S. V. Emelyanov 提出，后经过 V. I. Utkin、U. Itkis 等人对其做了进一步的完善而发展起来^[40]。经过六十多年的发展，滑模控制被用于线性系统、非线性系统、连续系统、非连续系统等控制系统中。

滑模控制理论的发展经历了以下三个发展阶段：

1957 年到 1970 年为第一阶段，该阶段不仅在理论上进行了研究，还对工程应用展开了探索，但是主要针对单输入单输出系统，理论没有得到重视。这个阶段研究的理

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/417050140120006134>