



应用札记

ANC202412001

开关电源架构及控制

通信作者：成红玉

校阅：谭磊 姚若亚

圣邦微电子（北京）股份有限公司

2024 年 12 月 26 日

商标

SGMICRO 是圣邦微电子（北京）股份有限公司的商标。本文档中的所有商标均为其各自所有者的财产。

© 2024 圣邦微电子（北京）股份有限公司 版权所有。

未经 SGMICRO 事先书面许可，任何单位或个人不得摘抄、复制或改编本文档的部分或全部内容。

欲了解更多关于 SGMICRO 的信息，请访问网站 www.sg-micro.com。

摘要

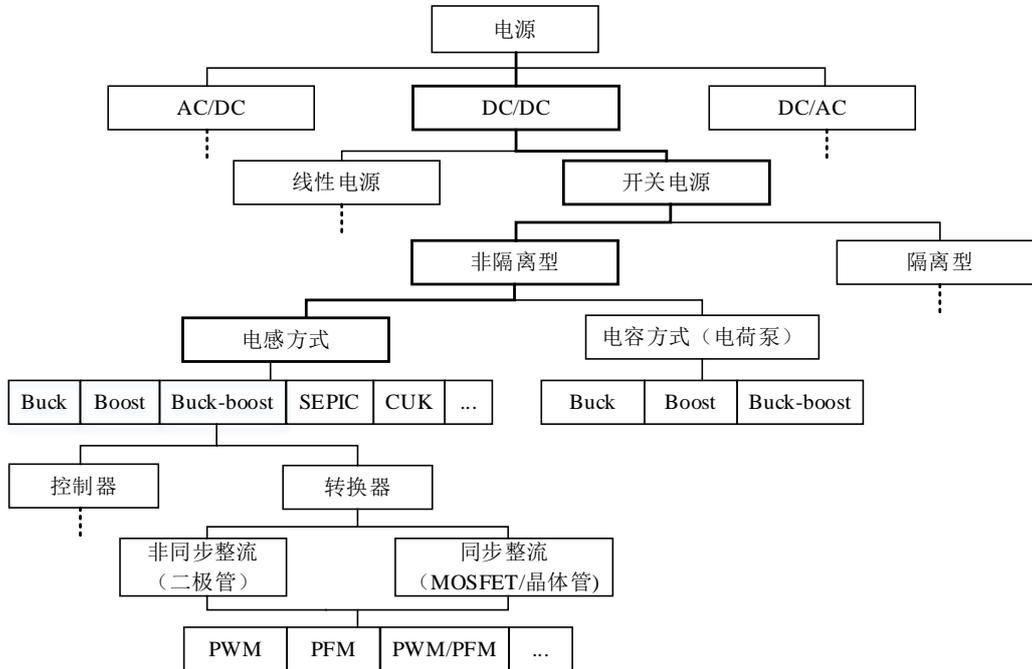
本文从电源分类出发，聚焦于非隔离型电感开关电源的一般电路结构，并简要分类讨论了稳定控制的关键要素，如小信号环路、附加控制、稳态拉入和行为改善、不同结构变种、启动行为，以及保护机制和其动作方式。本文旨在提供一个关于非隔离开关电源架构及控制的概览性框架，为相关领域的研究人员和技术工程师提供参考。

目录

1 电源分类.....	2
2 非隔离型电感开关电源的一般电路结构.....	2
3 稳定控制.....	3
3.1 小信号环路.....	3
3.2 附加控制、稳态拉入和行为改善.....	4
3.3 结构变种.....	4
3.4 启动行为.....	4
3.5 保护.....	5
3.6 保护动作.....	5

1 电源分类

随着技术的进步，电源的分类越来越精细，以适应各种复杂的应用场景。图 1 是电源的一种分类，其中非隔离型电感开关方式电源应用最为广泛。



注：图中短虚线表示该类电源还可进一步细分，但由于本文不关注这些细分类型，故在此省略。

图 1 电源分类

2 非隔离型电感开关电源的一般电路结构

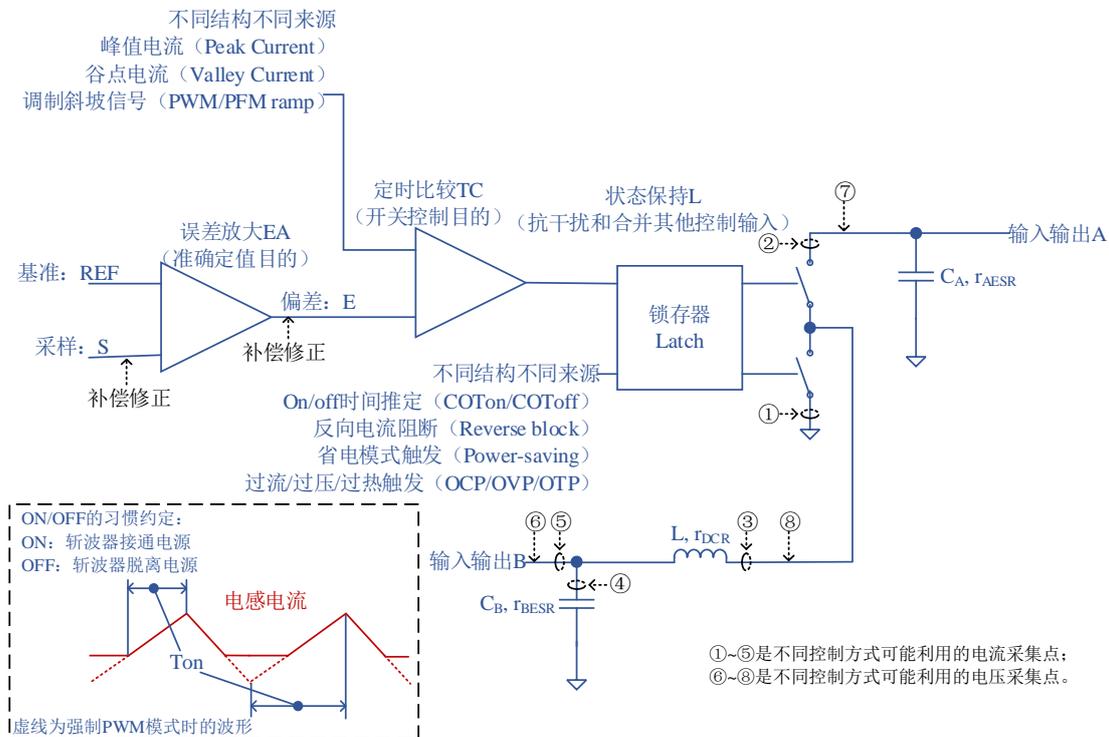


图 2 非隔离电感开关电源的一般电路结构

开关电源产品从 1955 年应航天工程需要出现发展到今天，外部电路越来越简单，内部电路则日趋复杂完善。良好的性能和应用适用性由一系列功能集合协同实现。图 2 所示为非隔离电感开关电源电路的一般结构，其中包括了多种不同稳压结构采用的信号量和控制量。

3 稳定控制

开关稳定电源，包括稳压电源和稳流电源，稳定控制通过控制开关过程调节输出电压或电流，响应输入和负载的变化、维持稳定的输出电压或电流。稳定控制分为线性控制和非线性控制，这取决于它们如何响应输入和负载的变化。线性控制是指从其观察到偏差至所做出的调整之间成线性比例关系；非线性控制则不遵循这种比例关系并相应导致复杂响应行为，包括时间上不连续的变化和非线性比例。

根据输出与整定目标的偏差来调整开关过程从而影响输出与整定目标间的偏差，形成相互影响的闭环，即控制环或者负反馈控制环。通常利用控制环保证输出值与整定目标间的关系。无论是线性控制还是非线性控制，都有在环内作用和环外作用的形式。

3.1 小信号环路¹

小信号环路是指状态变量围绕稳态值波动时，通过局部线性化得到的环路模型。小信号环路是一种线性化等效，适用于稳定性分析²。图 3 所示为从实现方法和行为过程两个维度对小信号环路的分类。



- 滞环振荡 (Hysteretic)
- 脉冲频率调制 (PFM)
- 脉冲宽度调制 (PWM)
- 电流模式脉宽调制 (Current Mode PWM)
- 跳脉冲脉冲调频 (PS-PFM)
- 导通时间推定 (COT, i.e., D-cap/SWIFT, QPWM)
- 断开时间推定 (COToff, Turbo/SG Micro)
- 峰值电流控制 (Peak Current Control)
- 谷点电流控制 (Valley Current Control)
- 电感直流电阻纹波检测 (DCR Inductor Ripple Control i.e., D-cap 2, D-cap 3/SWIFT)
- 纹波注入 (Ripple Injection)
- 输入前馈 (Vin Feed-forward)
- 输出前馈 (Vout Feed-forward)
- 纹波电流前馈 (Ripple Current Feed-forward, i.e. DCS/SWIFT, ESR)
- 电流前馈 (Feed-forward Current Loop)
- 微脉冲群 δ - Σ 控制

图 3 两个维度下的小信号环路分类

¹ 开关电源调制环节涉及“导通”和“续流”两个不一致的过程。利用“平均状态”法可以把这两个不一致的过程合并为一个，用其平均效果当作连续、单一的传递过程来处理。在接近开关频率的高频和系统状态处于变化的临界点时，平均状态法可能无法有效反映系统行为。

² 小信号条件下稳定是系统稳定的先决条件。

3.2 附加控制、稳态拉入和行为改善

开关电源中的附加控制和稳态拉入技术多为非线性控制，这些方法用来提高电源系统的动态响应、稳定性和效率。非线性控制策略，可以更有效地应对系统中的非线性扰动³，实现精确的控制和快速的稳态响应。

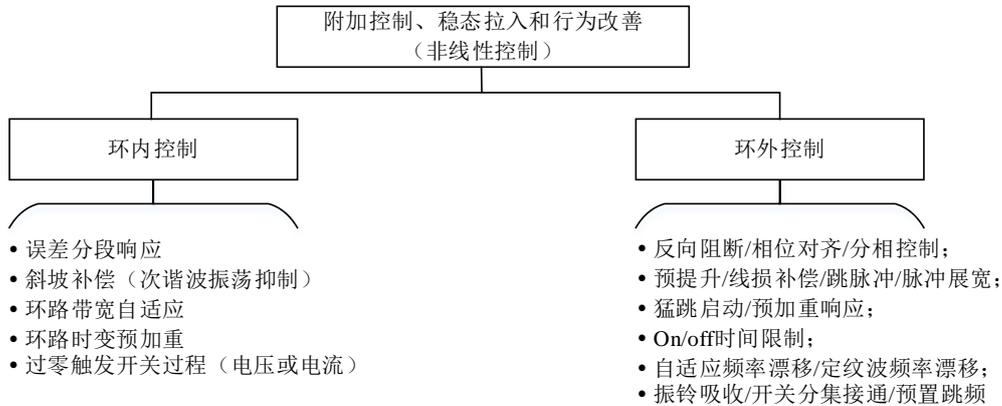


图 4 附加控制、稳态拉入和行为改善

3.3 结构变种

由图 2 所示的非隔离开关电源一般电路结构可以演变出变种结构。这些变种为设计者提供了广泛灵活的选择，适应不同应用场景。

- 浮地输出（用降压开关电源产生负压）；
- 双向电源（调平电源，在两个供电域间实现能量互传）；
- 电荷泵（ L 接近 0，仅有 r_{DCR} 起作用）；
- 预调整电荷泵（减少电感开关的工作应力，提高效率和减小开关成本预算）；
- 升压电源；
- 升降压电源（电感近 B 端增加斩波开关）；
- 四象限输出电源；
- SEPIC/CIK 电路（配合电荷泵作业）；
- 全谐振开关/准谐振开关；
- 多相协同/堆叠；
- 并联谐振泵/串联谐振泵；
- 谐振脉冲群。

3.4 启动行为

设计良好的启动行为对于增强电源的可靠性和延长其组件寿命至关重要，是开关电源设计的重要环节。启动行为设计用于解决启动阶段中的问题，例如启动过应力（启动浪涌）、启动导致输入过载和启动关联电磁干扰，是电源功能完整性的一部分。以下是一些常规启动行为：

- 输出电压缓起；

³ 负载的变化等效为电阻变化，是典型的非线性扰动。

- 限输出电流缓起；
- 对容性负载预充；
- 带预偏启动，即向之前已有其它供电来源的负载供电；
- 电压单调启动，即避免在启动过程中因负载突然增加引起输出电压回钩；
- 过载启动，即短时间承受超过正常工作应力启动；
- 输出能力回退启动，限制在负载异常时强行启动。

3.5 保护

为了应对各种潜在的故障和异常情况，开关电源设计需要考虑保护自身或/和其所处的系统。保护功能监测和响应电源在运行过程中可能遇到的过应力状况，通常包括：

- 输入/输出过压；
- 输入/输出欠压；
- 输入输出反置；
- 输出过流；
- 片芯过热；
- 输出失控。

3.6 保护动作

当电源检测到异常情况发生时，可能以不同行为应对。这些行为包括：

- 限制输出电流；
- 降低输出电压；
- 停止工作并保持在关机状态；
- 以一定频次尝试再启动（打嗝）；
- 下调工作频率或开关限流值（回退再启动⁴）；
- 转入回滞方式工作；
- 接近保护临界告警；
- 记录触发进入保护状态的条件（供系统查询）；
- 可能影响系统安全而自熔断断开对系统的连接。

本文限于分类介绍，以分类对开关电源产品及其特性做宽泛概括。

⁴ 因过载触发保护时立即调低开关频率或者开关限流值形成正反馈，会立即导致输出电压进一步下跌。以频率或者开关限流回退对尽可能维持系统工作不利。回退仅适用于以较低输出能力安全重启动。

修订记录

注意:历史版本的页码可能与当前版本的页码不同。

日期	版本	描述
2024-12-26	REV.A	首次发布

重要声明

本文中如涉及本公司具体产品型号,SGMICRO 保留其更改电路设计、产品规格和产品描述的权利,恕不另行通知。本文档内容仅供参考。本文档中的所有陈述、信息和建议不构成任何承诺。对于本文中可能出现的错误,以及因本文档提供的信息和使用本文档而造成的任何附带或间接损失,本公司不作任何明示或暗示的陈述和保证。此文档未授予任何知识产权许可。除了 SGMICRO 在其产品的销售条款和条件中声明的责任外,本公司概不承担任何其他责任。

www.sg-micro.com

联系方式

圣邦微电子(北京)股份有限公司

地址:北京市海淀区西三环北路 87 号国际财经中心 D 座
1106 室
邮编: 100089
电话: 010-88825716/17
传真: 010-88825736

深圳办事处

地址: 深圳市南山区科技园高新南六道 6 号迈科龙大厦
15 楼
邮编: 518063
电话: 0755-26715323/26715619
传真: 0755-26748460

上海办事处

地址: 上海市徐汇区漕溪北路 88 号圣爱大厦 1706 室
邮编: 200030
电话: 021-64396434
传真: 021-64396434-804

台湾办事处

地址: 台北市信义区基隆路二段 7 号 5 楼之 2
邮编: 11052
电话: 886-2-27583383