

团 体 标 准

T/EPTC 008—2025

功率型硬件在环仿真 术语

Power hardware in-the-loop simulation—Terminology

2025 - 12 - 10 发布

2026 - 01 - 01 实施

目 次

前言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 一般术语	1
3.1 基本术语	1
3.2 硬件在环	1
4 接口装置术语	2
4.1 通用接口装置	2
4.2 四象限功率放大器接口装置	2
5 接口算法术语	5
5.1 接口算法	5
5.2 接口模型	6
附录 A (规范性) 功率型硬件在环仿真示意	7
附录 B (规范性) 四象限功率放大器类型	8
B.1 四象限功率放大器分类	8
B.2 开关功率放大器	8
B.3 线性功率放大器	8
B.4 线性-开关混合型功率放大器	9
附录 C (规范性) 接口装置响应延时示意	10
附录 D (规范性) 功率型硬件在环仿真实接口算法	11
D.1 接口算法分类	11
D.2 理想变压器算法 (ITM)	11
D.3 传输线解耦法 (TLM)	12
D.4 部分电路复制法 (PCD)	12
D.5 时变一阶线性近似法 (TFA)	13
D.6 阻尼阻抗算法 (DIM)	14
参考文献	15

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本文件由中关村智能电力产业技术联盟提出并归口。

本文件起草单位：中国电力科学研究院有限公司、上海科梁信息科技股份有限公司、北京博电新力电气股份有限公司、哈尔滨工业大学、山东大学、南京泓帆动力技术有限公司、国网经济技术研究院有限公司、国网冀北电力有限公司电力科学研究院、南方电网科学研究院有限责任公司、贵州电网有限责任公司电力调度控制中心、国网新疆电力有限公司电力科学研究院、国网福建省电力有限公司电力科学研究院、国网青海省电力有限公司电力科学研究院、传麒科技(北京)股份有限公司。

本文件主要起草人：谷怀广、寇龙泽、李彬彬、石林龙、李俊、刘栋、米志伟、丁磊、张侃、徐莹、韩林洁、彭放、别晓玉、习工伟、邓晓洋、罗超、彭逸轩、徐孟龙、马覃峰、李骥、郭梓毅、朱琳、张迪、高毓钦、李琰、赵焕蓓、白羽、于琳、王宝财、姚艳华。

本文件为首次发布。

功率型硬件在环仿真 术语

1 范围

本文件规定了功率型硬件在环仿真技术及其接口装置、接口算法的术语和定义。

本文件适用于功率型硬件在环仿真技术，如电力系统、交通运输、航空航天等领域。控制型硬件在环仿真技术和快速控制原型仿真技术可参照执行。

2 规范性引用文件

本文件没有规范性引用文件。

3 一般术语

3.1 基本术语

3.1.1

实时数字仿真 *real time digital simulation*
与自然世界实际物理过程推进速度一致的数字仿真。
[来源：GB/T 40601—2021, 3.1]

3.1.2

实时数字仿真器 *real time digital simulator*
具备实时数字仿真能力的计算硬件与软件的总称。
[来源：GB/T 40605—2021, 3.3]

3.1.3

实时数字仿真模型 *real time digital simulation model*
在实时数字仿真器中搭建的数字仿真模型。

3.1.4

被测物理装置 *hardware under test, HUT*
硬件在环仿真系统中真实的被测装置。

注：根据硬件在环仿真类型的不同，被测物理装置可以是动态模拟装置、控制保护装置、负载等。

3.1.5

动态模拟装置 *physical dynamic simulation device*
满足等惯性时间常数，按照相似性原理搭建，可真实模拟大功率原型设备物理特性的低压试验装置。

3.1.6

控制保护装置 *control and protection physical device*
实时采集电气量并经过分析处理后对电力系统中的元件执行控制或保护功能的二次自动化装置。

3.2 硬件在环

3.2.1

硬件在环仿真 *hardware in the loop simulation, HIL*
数模混合仿真 *digital-analog hybrid simulation*
半实物仿真

实时数字仿真器和被测物理装置通过信号或功率转换接口连接，构成实时数字仿真模型与被测物理装置联合在一起的闭环系统，实现与物理世界时间同步的一种仿真技术。

[来源：GB/T 40601—2021, 3.5, 有修改]

3.2.2

功率型硬件在环仿真 *power hardware in the loop simulation, PHIL*

通过接口装置和接口算法，将实时数字仿真模型（3.1.3）和被测物理装置（3.1.4）建立电气上的联系，使得二者之间存在真实量级的功率交换，见附图A.1。

3.2.3

控制型硬件在环仿真 control hardware in the loop simulation, CHIL

物理侧为控制保护装置，数字侧为控制对象本体及其所在系统，在实时数字仿真器上通过数字模型进行仿真模拟，物理侧和数字侧之间不存在真实量级的功率交换。

3.2.4

快速控制原型仿真 rapid control prototype simulation, RCP

物理侧为含一次系统的真实物理设备（如开关、电机、阀门等），数字侧为控制器及所连系统，在实时数字仿真器上通过数字模型进行仿真模拟，物理侧和数字侧之间不存在真实量级的功率交换。

3.2.5

硬件在环仿真接口 interface of power hardware in the loop simulation

数模混合仿真接口 interface of digital-analog simulation

用于形成闭环的仿真测试环境，直接连接数字侧与物理侧的硬件和软件，其中硬件为接口装置，软件为接口算法。

[来源：GB/T 40605—2021，3.4，有修改]

3.2.6

数字侧 digital side

硬件在环仿真系统中基于实时数字仿真模型模拟物理系统的部分。

3.2.7

物理侧 physical side

硬件在环仿真系统中由被测物理装置构成的部分。

4 接口装置术语

4.1 通用接口装置

4.1.1

接口装置 interface device

用于连接数字侧和物理侧，实现两侧不同大小电压/电流采集、测量、汇集、转换、通信、保护等数据输入/输出交互的装置。

4.1.2

测量单元 measurement unit

功率型硬件在环仿真接口装置中负责数字侧、物理侧信号采集、测量和汇集的单元。

4.1.3

通信单元 communication unit

功率型硬件在环仿真接口装置中负责与实时数字仿真器进行信息通信的单元。

4.1.4

控制单元 control unit

功率型硬件在环仿真接口装置中负责环路控制、信号放大、功率传输等核心控制的单元。

4.1.5

保护单元 protection unit

功率型硬件在环仿真接口装置中负责过压、过流、过温等故障保护判断与指令执行的单元。

4.1.6

转换单元 conversion unit

功率型硬件在环仿真接口装置中负责实现关键数字量和模拟量相互转换的接口板卡单元。

4.1.7

隔离变压器 power transformer

功率型硬件在环仿真接口装置中与供电电源侧隔离连接的变压器。

4.2 四象限功率放大器接口装置

4.2.1

四象限运行 four quadrant operation

功率放大器或电力电子设备在有功-无功坐标系中可独立运行于四个象限（吸收有功功率、发出有功功率、发出感性无功功率、发出容性无功功率），实现能量的双向流动。

4.2.2

四象限功率放大器 four quadrant power amplifier

用于动力与电气工程领域的试验设备，用于实现功率型硬件在环仿真数字侧和物理侧的电压、电流四象限运行、功率传输及电气信号交互的设备。

4.2.3

电压型功率放大器 voltage type power amplifier

输出跟踪电压指令的功率放大器。

4.2.4

电流型功率放大器 current type power amplifier

输出跟踪电流指令的功率放大器。

4.2.5

开关型功率放大器 switching power amplifier

基于脉宽调制或脉冲频率调制技术，通过高频电力电子开关器件动作实现功率放大的装置，其中电力电子开关器件只工作在导通或截止状态，整体具有四象限运行能力，见图B.1。

4.2.6

线性功率放大器 linear power amplifier

基于线性放大原理（甲类、乙类或甲乙类工作模式），通过连续调节电力电子开关器件的导通状态实现功率放大，其中电力电子开关器件只工作在线性区状态，整体具有四象限运行能力，见图B.2。

4.2.7

线性-开关混合型功率放大器 linear-switch hybrid power amplifier

由线性功率放大器和开关型功率放大器共同组成的四象限功率放大装置，二者可根据功能需要灵活调整拓扑结构、级联方式等，整体具有四象限运行能力，见图B.3。

4.2.8

最大输出电压 maximum output voltage

四象限功率放大器在安全工作条件下，输出连接物理侧的端口电压峰峰值。

4.2.9

输出功率 output power

四象限功率放大器输出电压、电流有效值的乘积，通常以VA为单位。

4.2.10

输入功率 input power

四象限功率放大器输入电压、电流有效值的乘积，通常以VA为单位。

4.2.11

输出效率 output efficiency

四象限功率放大器的功率方向为从电源端口流向输出端口时，四象限功率放大器的输出功率与输入功率的比值。

4.2.12

回馈效率 feedback efficiency

四象限功率放大器的功率方向为从输出端口流向电源端口时，四象限功率放大器的输入功率与输出功率的比值。

4.2.13

输入量 input

四象限功率放大器的输入端口所接收到来自功率型硬件在环仿真数字侧的数字量或模拟量。

4.2.14

输出量 output

四象限功率放大器输出至物理侧动态模拟装置的电气量。

4.2.15

响应延时 response delay

四象限功率放大器输入信号从阶跃时刻 t_1 开始，至输出量第一次达到稳态输出值10%的时刻 t_2 为止的时间间隔，即 t_2-t_1 ，不同时刻物理意义详见附图C.1。

4.2.16

输入输出延时 input/output delay

四象限功率放大器输入信号从阶跃时刻 t_1 开始，至输出量第一次达到稳态输出值90%的时刻 t_3 为止的时间间隔，即 t_3-t_1 ，不同时刻物理意义详见附图C.1。

4.2.17

压摆率 slew rate, SR

用来表征四象限功率放大器输出量响应能力的关键技术指标。一般指输出量从稳态输出值 $U_N*10\%$ 时刻 t_2 开始，升高到稳态输出值 $U_N*90\%$ 时刻 t_3 为止的时间间隔内电压输出的变化率 dV/dt ，详见公式(1)，单位 $V/\mu s$ ，不同时刻物理意义详见附图C.1。

$$SR = \frac{(90\%-10\%)*U_N}{t_3-t_2} \dots\dots\dots (1)$$

式中：

U_N ——输出量稳态值；

t_2 ——输出响应第一次达到稳态输出值10%的时刻；

t_3 ——输出响应第一次达到稳态输出值90%的时刻。

4.2.18

负载调整率 load regulation, LR

在输入条件（如输入电压、温度）恒定的情况下，设备输出量（电压或电流）因负载变化而产生的最大偏移量相对于额定值的百分比。电压模式下，负载调整率可表示为满载输出电压与空载输出电压的差值与额定输出电压的百分比；电流模式下，负载调整率可表示为负载电流最大值与最小值的差值与额定输出电流的百分比。

注：输入电压为额定值，输出电流取最小值，记录最小负载量的输出电压 U_1 ；调节负载为 $50\%P_e$ ，记录对应的输出电压 U_0 ；调节负载为 P_e ，记录对应的输出电压 U_2 ；负载调整率计算见公式(2)。

$$LR = \frac{U - U_0}{U_0} * 100\% \dots\dots\dots (2)$$

式中：

U_0 ——调节负载为 $50\%P_e$ 时对应的输出电压；

U_1 ——输入电压为额定值，输出电流取最小值，即最小负载量下的输出电压；

U_2 ——调节负载为 P_e 时对应的输出电压；

U —— U_1 和 U_2 中相对 U_0 变化较大的值。

4.2.19

电压上升时间 voltage rise time

对于满量程大信号输出模式下，四象限功率放大器的输出从稳态输出值的10%上升到90%所需的时间。

4.2.20

电压下降时间 voltage fall time

对于满量程大信号输出模式下，四象限功率放大器的输出从稳态输出值的90%下降到10%所需的时间。

4.2.21

大信号带宽 large signal bandwidth

四象限功率放大器输出额定电压下的频率带宽响应范围，即输出额定电压响应不小于-3dB的频率范围。

4.2.22

小信号带宽 small signal bandwidth

四象限功率放大器输出10%额定电压下的频率带宽响应范围，即输出10%额定电压响应不小于-3dB的频率范围。

4.2.23

过载能力 overload capacity

在规定的时间内能够供给的，但不超过规定条件下设定限值的最大电流。

4.2.24

增益 gain

输出量与输入量在电压、电流维度上的线性比例关系，通常以绝对值倍数表示。

4.2.25

输入信号真值 true value

四象限功率放大器输入端接收的理想化理论信号，其幅值、频率及波形特性不受外部干扰或系统噪声影响，作为输出信号保真度参考基准的实际值。

注：对于硬件在环仿真系统来说，一般指解耦等值电路数字侧端口电压、回路电流的实际求解值。

4.2.26

输出电压/电流准确度 output voltage/current accuracy

四象限功率放大器的输出端实际电压/电流与理论预期值的偏差。

注：一般通过指定频带内增益偏差与额定电压之比来量化。

4.2.27

放大信号线性度 amplified signal linearity

在稳定状态下四象限功率放大器实际输出曲线与理想拟合直线最大偏差占满量程的百分比。

4.2.28

放大信号失真度 amplified signal distortion

四象限功率放大器输出信号中非线性谐波成分或噪声的占比，用于评估信号波形相对于理想波形的畸变程度。量化标准参考总谐波失真度（THD）。

5 接口算法术语

5.1 接口算法

5.1.1

理想变压器算法 ideal transformer model, ITM

在数字侧采用受控电压源/电流源来等效模拟物理侧电路的一种接口算法。分为电压型理想变压器算法和电流型理想变压器算法，前者采集数字侧端口电压放大输出至物理侧端口，后者采集数字侧回路电流放大输出至物理侧回路，见附录D.1。

5.1.2

传输线解耦法 transmission line model, TLM

将数字侧、物理侧间的连接电感或电容按输电线路模型来处理，根据分布参数传输线Bergeron模型对其进行计算，利用线路行波传输时间实现接口延时补偿的一种接口算法，见附录D.2。

5.1.3

部分电路复制法 partial circuit duplication, PCD

在数字侧采用受控电压源等效模拟另一侧电路，并在数字侧、物理侧同时引入接口连接阻抗 Z_{SH} ，实现接口稳定性提升的一种接口算法，见附录D.3。

5.1.4

时变一阶线性近似法 time-variant first-order approximation, TFA

在假设物理侧可近似为时变的一阶线性系统（RC或RL）的基础上提出的一种接口算法，其在仿真过程采集物理侧端口电压、回路电流，实时估计、并更新物理侧等效模型参数，基于该模型计算实际电流与理想电流的误差，进而实现在数字侧修正接口所带来的误差，见附录D.4。

5.1.5

阻尼阻抗法 damping impedance model, DIM

在数字侧端口并联补偿支路，含受控电压源串联补偿阻抗 Z^* ，采集物理侧端口电压作用在该受控电压源，当 Z^* 等于物理侧阻抗 Z_H 时，系统开环传递函数等于零，实现互联系统绝对稳定的一种接口算法。见附录D.5。

5.2 接口模型

5.2.1

前向通道 forward channel

数字侧信号指向物理侧的传递通道。

5.2.2

回馈通道 feedback channel

物理侧信号指向数字侧的传递通道。

5.2.3

前向通道延时 forward channel delay

由传感测量、数据处理、通信等因素给前向通道带来的总延时。

5.2.4

回馈通道延时 feedback channel delay

由传感测量、数据处理、通信等因素给回馈通道带来的总延时。

5.2.5

功率接口闭环延时 power interface closed-loop delay

前向通道延时和回馈通道延时总和。

5.2.6

数字侧阻抗 digital side impedance

功率硬件在环仿真系统中从物理侧看向数字侧端口戴维南等值电路的等效阻抗。

5.2.7

物理侧阻抗 physical side impedance

功率硬件在环仿真系统中从数字侧看向物理侧端口戴维南等值电路的等效阻抗。

5.2.8

虚拟阻抗 interface virtual impedance

使用接口算法在数字侧插入表征特定电压、电流关系的阻抗，可由电阻、电感、电容等基础元件构建，也可用受控电压源/电流源构建。

附录 A
(规范性)
功率型硬件在环仿真示意

功率型硬件在环仿真示意图见图A.1。

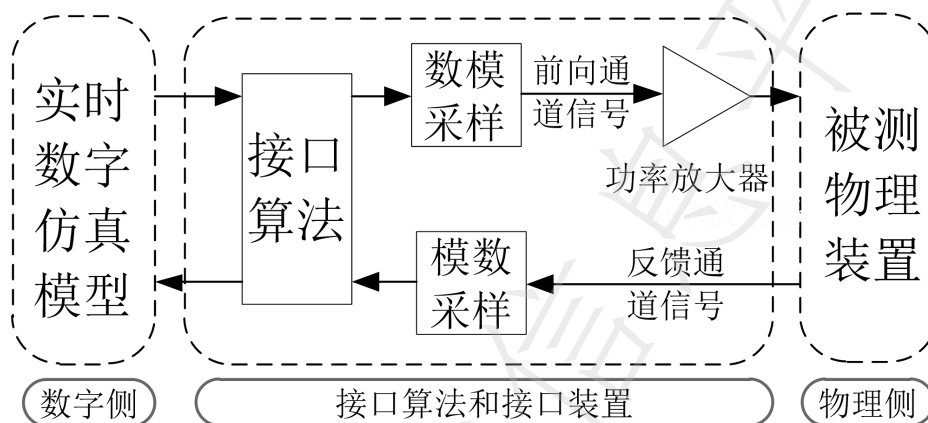


图 A.1 功率型硬件在环仿真示意图

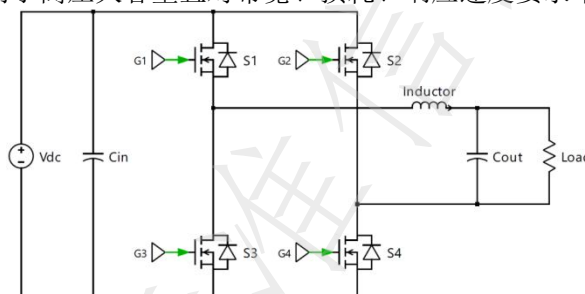
附录 B (规范性) 四象限功率放大器类型

B.1 四象限功率放大器分类

根据四象限功率放大器的工作原理和结构特点,可将其分为开关功率放大器、线性功率放大器、线性-开关混合型功率放大器等。

B.2 开关功率放大器

利用电力电子器件组成的四象限功率放大装置,其中电力电子器件只工作在导通或截止状态,整体具有四象限运行能力,见图B.1。开关功率放大器具有高压大容量输出能力、控制相对简单、成本低、可四象限功率运行,但由于开关器件的频繁动作使得整体相比线性功放带宽较低、响应速度慢、损耗大,因此开关功率放大器多适用于高压大容量且对带宽、损耗、响应速度要求不高的测试场景。



标引序号说明:

Vdc——直流电压源;

Cin——直流侧电容;

Cout——滤波电容;

Inductor——滤波电感;

Load——负载;

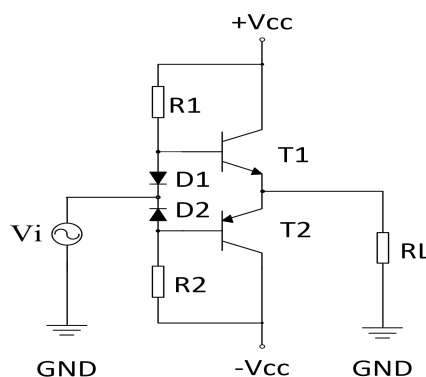
S1、S2、S3、S4——开关管;

G1、G2、G3、G4——驱动信号。

图 B.1 开关功率放大器拓扑示意图

B.3 线性功率放大器

利用电力电子器件组成的四象限功率放大装置,其中电力电子器件只工作在线性区状态,整体具有四象限运行能力,见图B.2。线性功率放大器具有响应速度快、压摆率性能优良、输入输出延时低、大小信号带宽高等优点,同时也存在控制复杂、成本高、功率回馈能力差、发热严重等缺点,因此线性功率放大器多用于低压小容量且对压摆率、延时、响应速度和带宽要求较高的测试场景。



标引序号说明:

+Vcc——双极性电源正极;

-Vcc——双极性电源负极;

V_i ——输入信号;

R1/R2——基极电阻;

D1/D2——二极管;

T1——NPN型三极管;

T2——PNP型三极管;

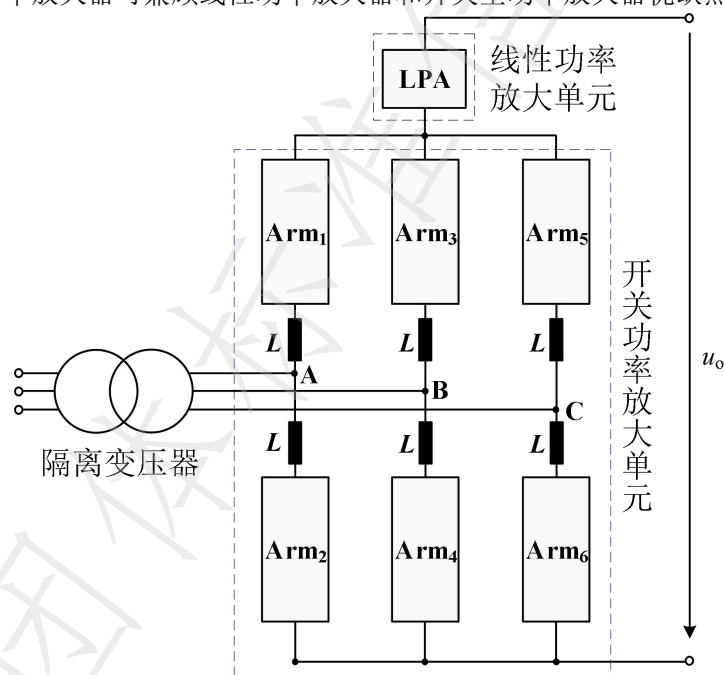
R_L ——负载;

GND——信号地。

图 B.2 线性功率放大器拓扑示意图

B.4 线性-开关混合型功率放大器

线性-开关混合型功率放大器是由线性功率放大器和开关型功率放大器共同组成的四象限功率放大器，二者可根据功能需要灵活调整拓扑结构、级联方式等，整体具有四象限运行能力，见图B.3。由于线性-开关混合型功率放大器可兼顾线性功率放大器和开关型功率放大器优缺点，因此适用场景较广泛。



标引序号说明:

LPA——线性功率放大单元;

Arm_{1-6} ——开关功率放大单元的6个桥臂;

L——开关功率放大单元的桥臂电感;

A——A相;

B——B相;

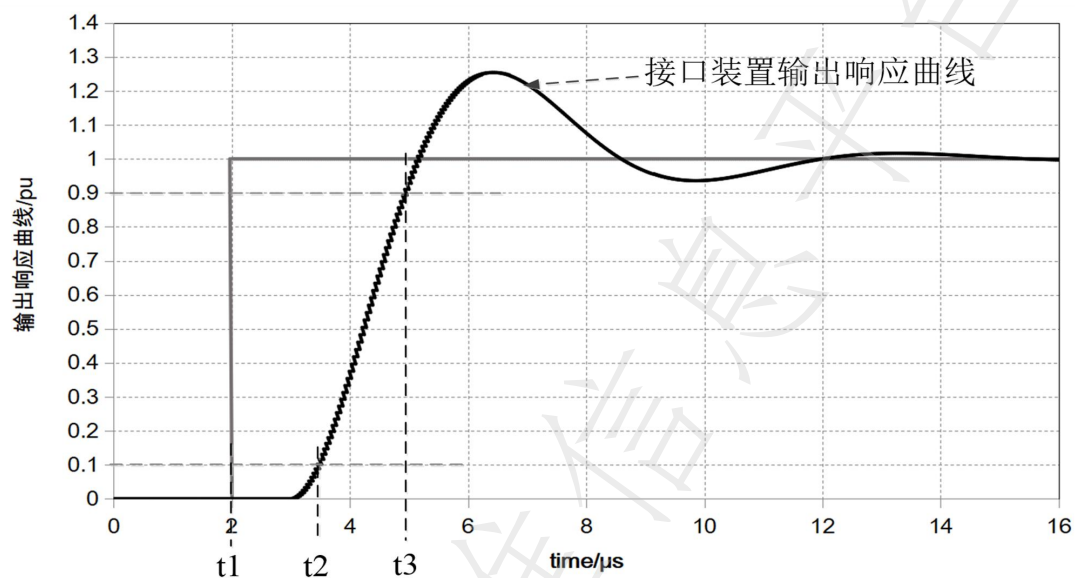
C——C相;

u_0 ——线性-开关混合型功率放大器输出电压。

图 B.3 线性-开关混合型功率放大器拓扑示意图

附录 C
(规范性)
接口装置响应延时示意

接口装置响应延时示意图见图C.1。



标引序号说明：

- t1——输入信号阶跃时刻；
- t2——输出响应第一次达到稳态输出值10%的时刻；
- t3——输出响应第一次达到稳态输出值90%的时刻。

图 C.1 接口装置响应延时示意图

附录 D
(规范性)
功率型硬件在环仿真接口算法

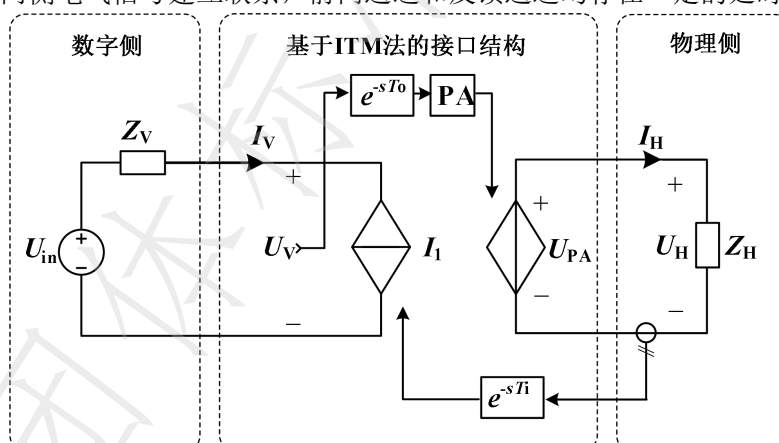
D.1 接口算法分类

接口算法又称功率接口解耦算法,其主要研究的是如何利用解耦机制将网络分割为拓扑上没有直接联系的两个独立部分。用于完成数字侧、物理侧的信息交互,包括信号传输类型和处理方法两方面内容,如信号采集、转换、补偿等,实现数字侧、物理侧的稳定互联,即研究接口等值电路的基本形式。等值电路的具体形式又因解耦元件或接口算法的不同有较大差异,一般都是数字侧通过DA板卡,物理侧通过AD板卡结合电压电流互感器、功率放大器等接口装置将采集到的信号送至对侧。

常见的接口算法主要包含以下5种:理想变压器(ideal transformer model, ITM)法、时变一阶近似(time-variant first-order approximation, TFA)法、传输线模型(transmission line model, TLM)法、部分电路复制(partial circuit duplication, PCD)和阻尼阻抗(damping impedance model, DIM)法。

D.2 理想变压器算法(ITM)

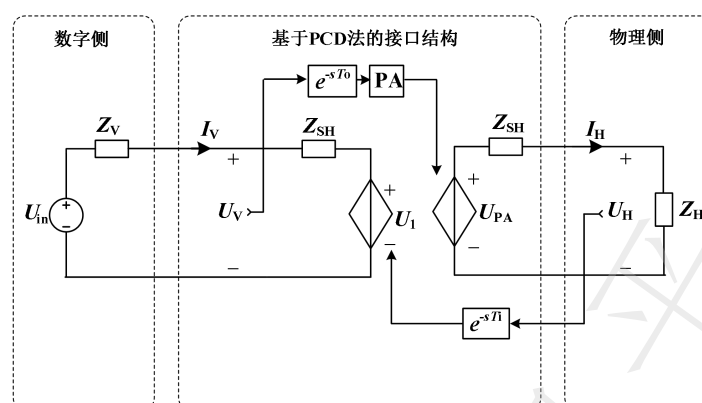
ITM算法是应用在含软硬件混合PHIL仿真中实现功率连接最原始最直接的一种接口算法。根据放大信号的类别不同又可以分为电压型ITM算法和电流型ITM算法。电压型ITM基本原理如图D.1所示。其中采集数字侧端口电压经过功率放大器送给物理侧受控电压源,同时采集物理侧回路电流传递给数字侧受控电流源,从而使得两侧电气信号建立联系,前向通道和反馈通道均存在一定的延时。



标引序号说明:

- U_{in} ——数字侧模型中的等效电源;
- Z_V ——数字侧模型中的等效阻抗;
- I_V ——数字侧模型中等效阻抗的电流;
- U_V ——数字侧运算生成的电压给定信号;
- I_1 ——数字侧用于模拟物理侧的受控电流源;
- e^{-sT_0} ——电压给定信号放大路径延时对应的传函;
- PA——功率放大器;
- U_{PA} ——功率放大器输出电压;
- Z_H ——物理侧等效阻抗;
- U_H ——物理侧电压;
- I_H ——物理侧电流;
- e^{-sT_1} ——电流反馈路径延时对应的传函。

图 D.1 电压型 ITM 算法接口结构原理图



标引序号说明：

U_{in} ——数字侧模型中的等效电源；

Z_V ——数字侧模型中的等效阻抗；

I_V ——数字侧模型中等效阻抗的电流；

U_V ——数字侧运算生成的电压给定信号；

e^{-sT_0} ——电压给定信号放大路径延时对应的传函；

Z_{SH} ——接口连接阻抗；

PA——功率放大器；

U_{PA} ——功率放大器输出电压；

Z_H ——物理侧等效阻抗；

U_H ——物理侧电压；

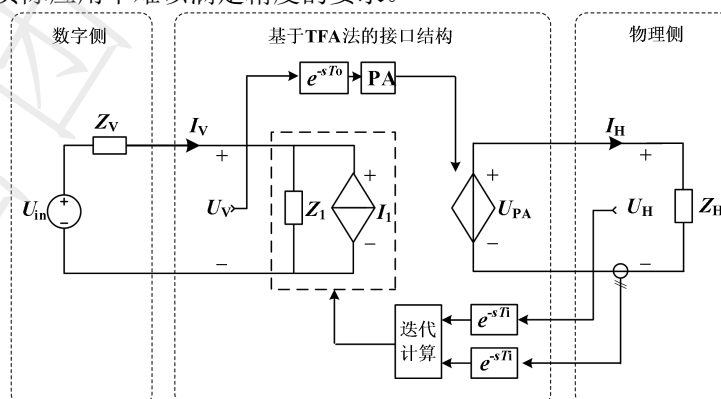
I_H ——物理侧电流；

e^{-sT_1} ——电压反馈路径延时对应的传函。

图 D.3 部分电路复制法接口结构原理图

D.5 时变一阶线性近似法（TFA）

TFA依据一阶线性近似方法对物理侧建模，在仿真过程中利用数值迭代方法，在线确定和更新系统模型的相关参数，以修正接口带来的误差。TFA基本结构如图D.4所示，其本质上是一种线性预测算法，在处理时变的非线性系统时适用性较差，不同的物理侧需要进行单独建模。对于无法简化为一阶线性模型的系统，则不能采用TFA接口。此外，TFA对噪声非常敏感，测量中任何噪声都会给预测反馈带来很大的误差，因此TFA在实际应用中难以满足精度的要求。



标引序号说明：

U_{in} ——数字侧模型中的等效电源；

Z_V ——数字侧模型中的等效阻抗；

I_V ——数字侧模型中等效阻抗的电流；

U_V ——数字侧运算生成的电压给定信号；

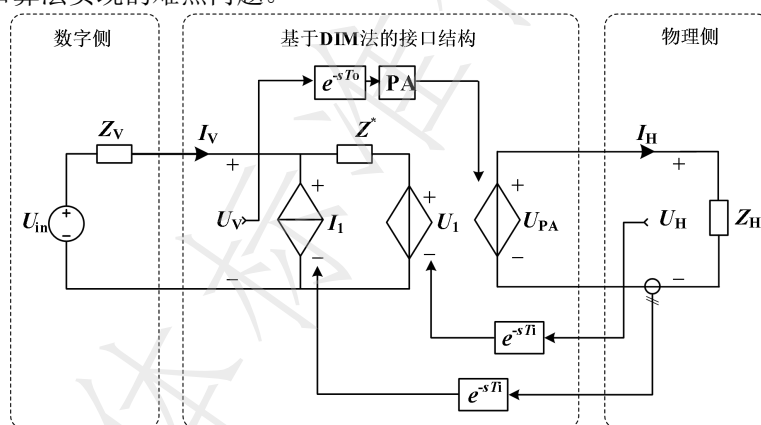
I_1 ——迭代计算得到的用于模拟物理侧的等效受控电流源；

Z_1 ——迭代计算得到的用于模拟物理侧的等效阻抗；
 e^{-sT_0} ——电压给定信号放大路径延时对应的传函；
 Z_{SH} ——接口连接阻抗；
 PA ——功率放大器；
 U_{PA} ——功率放大器输出电压；
 Z_H ——物理侧等效阻抗；
 U_H ——物理侧电压；
 I_H ——物理侧电流；
 e^{-sT_1} ——电压、电流反馈路径延时对应的传函。

图 D.4 时变一阶线性近似法接口结构原理图

D.6 阻尼阻抗算法 (DIM)

DIM接口算法是ITM和PCD算法的结合，在电路中增加了一个补偿阻抗 Z^* ，如图D.5所示。当 $Z^*=0$ 时，DIM转化为PCD；当 Z^* 趋向于无穷大时，补偿阻抗相当于开路，DIM转化为ITM。当补偿阻抗 Z^* 与物理侧等效阻抗匹配时，系统是绝对稳定的，且呈现出良好的精度，从而可以将物理侧的特性真实完整地反映到数字侧中。在物理侧阻抗可以详细获得的情况下，DIM相比于其他接口方法具有明显的优势。但由于物理侧不是理想模型，获取精确的阻抗值较为困难，且其值有可能是变化的，因此实现物理侧等效阻抗的实时匹配是DIM接口算法实现的难点问题。



标引序号说明：

U_{in} ——数字侧模型中的等效电源；
 Z_V ——数字侧模型中的等效阻抗；
 I_V ——数字侧模型中等效阻抗的电流；
 U_V ——数字侧运算生成的电压给定信号；
 I_1 ——数字侧用于模拟物理侧电流的受控电流源；
 U_1 ——数字侧用于模拟物理侧电压的受控电压源；
 Z^* ——补偿阻抗；
 e^{-sT_0} ——电压给定信号放大路径延时对应的传函；
 Z_{SH} ——接口连接阻抗；
 PA ——功率放大器；
 U_{PA} ——功率放大器输出电压；
 Z_H ——物理侧等效阻抗；
 U_H ——物理侧电压；
 I_H ——物理侧电流；
 e^{-sT_1} ——电压、电流反馈路径延时对应的传函。

图 D.5 阻尼阻抗算法接口结构原理图

参 考 文 献

- [1] GB/T 19212.5—2025 变压器、电抗器、电源装置及其组合的安全 第5部分：一般用途隔离变压器和内装隔离变压器的电源装置的特殊要求和试验
- [2] GB/T 40601—2021 电力系统实时数字仿真技术要求
- [3] GB/T 40605—2021 高压直流工程数模混合仿真建模及试验导则
- [4] GB/T 44650—2024 光伏电站逆变器并网性能硬件在环测试规程
- [5] 一种功率接口电路及数模混合仿真系统, 发明专利, ZL201710609247.7
- [6] 一种用于补偿MMC数模混合仿真功率接口系统延时的方法, 发明专利, ZL201510242923.2
- [7] 一种模块化混合型直流功率放大器, 发明专利, 202310334115.3
-