

电动机驱动系统 电磁干扰技术

孙亚秀 编著

HEUP 哈尔滨工程大学出版社

电动机驱动系统电磁干扰技术

孙亚秀 编著

 哈尔滨工程大学出版社

内 容 简 介

本书系统全面地分析了 PWM 驱动电动机系统传导干扰的产生机理、开关器件的静态和瞬态开关过程、传导干扰中单相和三相的共模和差模含义以及滤波器插入损耗与噪声源阻抗和负载阻抗的关系。以“整流-逆变-感应电动机系统”为研究对象,通过建立共模和差模干扰源及耦合通道的等效电路模型来计算干扰的频谱情况。对于干扰源的抑制,在分析传统驱动电路优缺点的基础上,提出了一种新型的多值驱动电路来降低电磁干扰。本书还研究了无源滤波器设计过程中共模和差模噪声分离难的问题,提出了一种软硬件结合的低成本高性能的共模和差模噪声分离方法。针对滤波器设计过程中需要考虑噪声源阻抗的问题,书中还给出了噪声源阻抗的估算方法,为合理设计滤波器的结构和参数提供了理论依据。

本书可供从事电力电子电磁兼容的科研人员、工程技术人员、高等院校师生以及对此领域感兴趣的学习爱好者阅读和参考。

图书在版编目(CIP)数据

电动机驱动系统电磁干扰技术/孙亚秀编著.

—哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2013.6

ISBN 978-7-5661-0595-0

I. ①电… II. ①孙… III. ①电机-驱动
机构-电磁干扰-研究 IV. ①TM303.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 132685 号

出版发行 哈尔滨工程大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区东大直街 124 号
邮政编码 150001
发行电话 0451-82519328
传 真 0451-82519699
经 销 新华书店
印 刷 哈尔滨工业大学印刷厂
开 本 787 mm × 960 mm 1/16
印 张 8.25
字 数 180 千字
版 次 2013 年 6 月第 1 版
印 次 2013 年 6 月第 1 次印刷
定 价 32.00 元
<http://www.hrbeupress.com>
E-mail:heupress@hrbeu.edu.cn

前 言

随着大功率电力电子器件的发展,电力电子装置在国民经济和国防建设的诸多领域中应用越来越广泛,尤其是由电力电子装置构成的各种功率变换系统的使用日趋普及。目前应用较多的功率变换器均采用脉宽调制技术对电能进行变换和控制,使得电动机系统的性能指标得到较大提高。但是,由于功率变换器中的电力电子器件工作在开关状态,具有较大电压和电流变化率的功率脉冲信号产生很强的电磁干扰(EMI),对电动机系统自身和周围环境产生很大影响。

近年来,越来越多的学者和技术人员致力于电力电子装置 EMI 的研究,在许多杂志和学术研讨会上发表了不少与其相关的论文,从不同角度探寻 EMI 的作用机理、影响因素和抑制方法。但专门针对 PWM(脉冲宽度调制)驱动电动机系统产生的传导干扰系统详尽深入的研究还未见有出版的书籍。为了尽早地确认和解决 PWM 驱动电动机系统产生的 EMI 问题,尤其是产生的传导干扰问题,本书系统地总结了作者近些年对 PWM 驱动电动机系统产生的传导干扰的研究成果。

全书内容共分 5 章。第 1 章主要介绍了电磁干扰的相关概念、PWM 驱动变换器传导干扰产生机理的研究现状、预测方法以及常用的抑制措施。第 2 章阐述了 PWM 驱动电机系统中整流桥和逆变器的干扰源模型,建立了传导干扰传播通道的共模和差模等效电路。等效电路由干扰源和耦合通道构成,用干扰源的数学模型代替电力电子器件开关时的非线性环节。耦合通道是根据共模和差模的传播路径的不同给出相应高频模型。第 3 章分析了 PWM 驱动电动机系统中产生干扰的开关电力电子器件的电路模型、静特性及开关的瞬态过程,论述了传统驱动电路的优缺点,最后提出了一种既能降低 EMI 又能比传统驱动电路降低损耗的新型多值驱动电路。第 4 章介绍了电磁干扰中共模和差模的定义,并根据此定义详细讨论了单相和三相共模干扰和差模干扰的含义。由于正确分离共模和差模噪声是合理设计 EMI 滤波器参数的前提,本章针对单相的驱动电路提出了一种软硬件结合的低成本高性能的共模和差模噪声分离方法。第 5 章介绍了滤波器插入损耗的概念,并深入讨论了负载阻抗和噪声源阻抗对插入损耗的影响。EMI 滤波器的性能与噪声源阻抗密切相关,而且噪声源阻抗的估算是选择 EMI 滤波器拓扑的前提,因此本章提出了确定共模噪声源阻抗和差模噪声源阻抗的最大值和最小值的方法,阻抗幅值与相角分别采取不同的方

法得到。

本书的作者多年来一直从事电力电子的电磁兼容、舰船电磁兼容等领域的研究工作,有着丰富的教学和科研实践经验,本书的内容汇集了她多年来的学术研究成果。在编写本书的过程中,得到了许多专家的直接或间接的关怀和帮助。此外,哈尔滨工程大学出版社为本书的出版做了大量细致的工作,在此谨致衷心的感谢。

本书的编写参阅了大量的研究文献和资料,在此对这些文献和资料的作者表示衷心的感谢。

最后感谢中央高校基本科研业务费专项资金(HEUCFR1124)、航空科学基金(201207P6001,由飞行器控制一体化技术重点实验室资助)、国家自然科学基金(51209055)对本书的资助。

由于作者水平有限,书中难免会有疏漏和不妥之处,欢迎广大读者给予批评指正。

编者

2013年3月

目 录

第1章 概 述	1
1.1 电磁兼容基本概念	1
1.2 PWM 驱动变换器传导干扰的研究现状	2
1.3 本书讨论的主要内容	19
第2章 PWM 驱动电动机系统干扰分析及建模	21
2.1 引言	21
2.2 传导干扰的机理分析	21
2.3 等效电路的建立	31
2.4 实验验证	43
2.5 本章小结	51
第3章 PWM 驱动电动机系统干扰源的抑制	52
3.1 引言	52
3.2 开关管的电路模型及静特性	52
3.3 开关管的开关瞬态分析	55
3.4 采用栅极驱动电路抑制干扰源发射	61
3.5 不同驱动电路的实验结果分析	64
3.6 本章小结	69
第4章 共模和差模分离技术的研究	70
4.1 引言	70
4.2 电磁干扰中共模和差模的定义	70
4.3 共模和差模分离技术	79
4.4 本章小结	90
第5章 滤波器插入损耗含义及噪声源阻抗估算	91
5.1 引言	91

5.2 滤波器的插入损耗	91
5.3 噪声源阻抗的估算	97
5.4 本章小结	110
结论	112
参考文献	114

第1章 概述

1.1 电磁兼容基本概念

现代电动机系统由于采用了除电动机本体之外的变流器、控制器对电能进行变换和控制,使其运行特性由自然特性变为可控特性,性能指标得到较大提高。通常称具有电动机本体、变流器和控制器的电动机系统为一体化电动机系统。尽管一体化电动机系统较传统的电动机系统在性能指标上有很大的改进,但是由于采用 PWM 或 PAM 控制方式使其变流器中的电力电子器件工作在开关状态,因此诸如电磁干扰等问题显得十分突出,严重影响到系统的正常工作及安全。在电动机系统电磁干扰中的重要组成部分是传导电磁干扰,与其他一些电气系统的电磁干扰相比,其产生的机理、干扰源的分布及抑制的方法就有很多特殊的地方。目前,国内外针对电动机系统的传导电磁干扰开展了一些研究工作,但是基本停留在定性研究和局部研究阶段,没有找出抑制电动机系统传导电磁干扰问题的有效方法。而另一方面,电动机系统往往是在精密机械加工、国防尖端设备等一些特殊场合应用,其产生的传导电磁干扰既影响到系统本身的稳定运行,又影响到其他系统的安全运行。因此,电动机系统的传导电磁干扰已成为困扰许多系统稳定安全运行的尖锐问题,解决电动机系统的传导电磁干扰不仅要涉及一些应用技术问题,同时涉及电磁场、电力电子变流技术、微电子技术和自动控制等一些理论问题。

由于 EMI 已成为电气设备或系统能否在应用现场正常可靠运行的主要障碍之一,为此世界各国对电气设备的电磁兼容性(ElectroMagnetic Compatibility, EMC)均制定了相应的标准。例如,欧洲已强制执行其相应标准,从 1996 年 1 月起凡不符合欧洲 EMC 标准的电气产品一律不准进入欧洲市场。因此,今天对 EMI 和 EMC 的研究已不再像以前那样,主要局限于通信领域和军用设备与系统,而是已经迅速地扩展到与电子技术应用相关的工业与民用的各个领域。

国家标准和国际电工委员会(International Electrotechnical Commission, IEC)对电磁兼容(ElectroMagnetic Compatibility, EMC)的定义为:设备或系统在其电磁环境中能正常工作且不对该环境中的其他设备或系统构成不能承受的电磁干扰的能力^[1]。根据此定义,电磁兼容应包括两方面的含义:一方面是指设备在运行时对周围环境的电磁干扰(Electromagnetic Disturbance)不能超过一定的限制;另一方面设备对其所在电磁环境中所存在的电磁干扰具有一定的抗扰度,即系统的电磁敏感性(ElectroMagnetic Susceptibility, EMS)。

电磁兼容研究的历史可以追溯到 19 世纪,最早出现的电磁干扰现象是电报信号间的串

扰,后来随着电子技术的发展干扰问题越加严重。电磁干扰问题从一开始就引起研究人员的注意,并且在德国和英国出现了专门研究通信干扰问题的机构。而随着电气与电子技术的迅速发展,电磁兼容问题研究的深度和广度也日益拓展。针对电磁兼容的这些问题,许多国际组织和政府都在做着大量的工作,如国际电工委员会、国际无线电特别委员会(International Special Committee on Radio Interference)、国际电气电子工程师学会电磁兼容专业学会(The Institute of Electrical and Electronics Engineers Electro Magnetic Compatibility Special, IEEE EMCs)等。从1978年起,IEEE开始举办EMC专业年会,更是极大地促进了电磁兼容问题研究的交流和发展。为了规范电器电子产品的电磁兼容性,有关国际组织和各国政府制定了各自的EMC标准,如国际无线电特别委员会的CISPR标准,IEC系列标准,欧盟的EN系列标准,美国联邦通信委员会(Federal Communications Commission, FCC)系列标准,美国军用标准MIL-STD-460系列,以及我国的国标、军标等。在1991年,欧盟规定从1996年开始所有投放欧盟市场的电器电子产品必须符合EMC标准的要求,否则不能进入欧盟市场。这一措施极大地促进了EMC研究的发展。

1.2 PWM驱动变换器传导干扰的研究现状

由于功率变换器中使用的电力电子器件开关频率和系统工作电压的不断提高,使得其产生的传导干扰也日趋严重。随着近几年电磁兼容标准的强制实施,特别是系统可靠性要求的增强,迫使国内外的许多学者从不同角度进行功率变换器电磁干扰问题的研究。归纳起来有以下几个重点研究方向:传导干扰的机理研究、干扰的分析预测及干扰的抑制措施。下面将详细介绍目前国内外在以上几方面研究的现状。

1.2.1 传导干扰的机理研究

1.2.1.1 电磁干扰三要素

为了方便介绍后续内容,在进行传导干扰机理分析前,首先介绍一下形成电磁干扰必须具备的三要素。干扰源发出电磁干扰能量,经过耦合途径将干扰能量传输到敏感设备,敏感设备即接收器,使敏感设备的工作受到干扰,这一作用过程称为电磁干扰效应,图1-1采用传输函数的表示方法详细描述了从干扰源到敏感设备的各种耦合途径,包括远场与近场。

从图1-1可以清晰地看出,要形成电磁干扰,必须具备下列三个基本要素:电磁干扰源、耦合途径和接收器。

1. 电磁干扰源

通常指产生电磁干扰的任何元件、设备、系统或自然现象。按照其来源可分为人为干

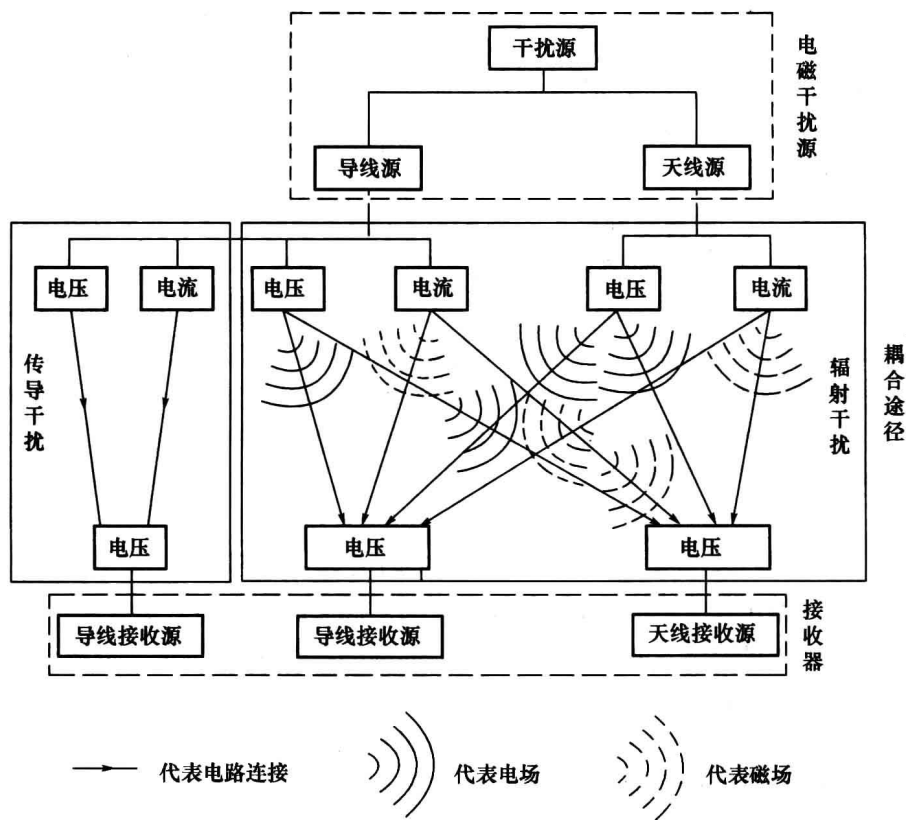


图 1-1 电磁干扰的耦合途径

扰源和自然干扰源。人为干扰源来源于各种电气设备,具体噪声源有高压输配电系统、功率电力电子设备和其他电器设备,而自然干扰源则是指由于自然界的电磁场、电荷积累与释放等^[2-4]。对电磁干扰源的研究,在电磁兼容领域显得十分重要。因为是从干扰源处控制其电磁发射,所以可以从根本上解决问题。本书的第3章提出了抑制变换器干扰源发射的方法。另外对干扰源本身的研究也是制定电磁兼容标准的前提和基础。

2. 耦合途径

指将电磁干扰能量从干扰源传输到接收器(敏感设备)的通路或媒介。按照耦合途径的不同,干扰被分为传导干扰和辐射干扰。传导干扰是指干扰源的能量通过电路连接直接传递到敏感设备,该处所提的电路连接可以包括导线、供电电源、电缆、互感、电容和接地面等^[5]。图1-1耦合途径中左侧的干扰指的是传导耦合,右侧部分指的是辐射干扰。辐射干扰是指干扰源的能量以电磁波的形式通过空间传播到敏感设备。根据天线原理,如果导

线的长度与波长相等,则容易产生电磁波。例如:数米长的电源线会产生 30 MHz ~ 300 MHz 的辐射干扰,在比此频率低的频带内,因波长较长,当电源线中流过同样的电流时,不会辐射太强的电磁波。所以在 30 MHz 以下的低频带主要是传导干扰。超过 30 MHz 以上的干扰一般被认为是辐射干扰。本书主要讨论功率变换器的传导干扰。

3. 接收器

也可称为敏感设备,即指受到电磁干扰的设备,或者说对电磁干扰发生影响的设备。敏感设备受到干扰后会产生性能降级,甚至会全部损坏。表征抗干扰性能的指标是抗扰性或敏感性。敏感设备根据研究层次不同可以是系统内、各分系统内、设备、印制电路板和各种元器件。本书主要研究敏感设备对电磁干扰的响应以及如何提高其抗扰性。为了对敏感设备的抗扰性能给以科学的评价,在测量抗扰度时必须对性能降低给以明确的判据。也就是说,给出在什么样的性能降低条件下的抗扰度电平为多少,电磁兼容的不同标准对其都有明确的规定。

1.2.1.2 传导干扰机理的研究现状

因为系统输入输出导线上的电流为有用信号与不同原因形成的干扰信号的混合,所以使用输入输出导线上的电流不能完全清楚地说明实际的物理现象,为便于分析干扰的耦合机理,根据传导干扰传播耦合通道的不同人为地将传导干扰分为共模干扰和差模干扰。共模干扰是指通过相线、对地寄生电容,再经地形成的回路干扰,它主要是由较高的 du/dt 与寄生电容间的相互作用而产生的高频振荡,也就是寄生电容上的电压发生快速变化,用公式表示为 $i_c = Cdu/dt$,进而形成对地电流;差模干扰是指相线之间的干扰直接通过相线与电源形成回路,它主要是由电力电子设备产生的脉动电流引起的。图 1-2 示出了差模和共模

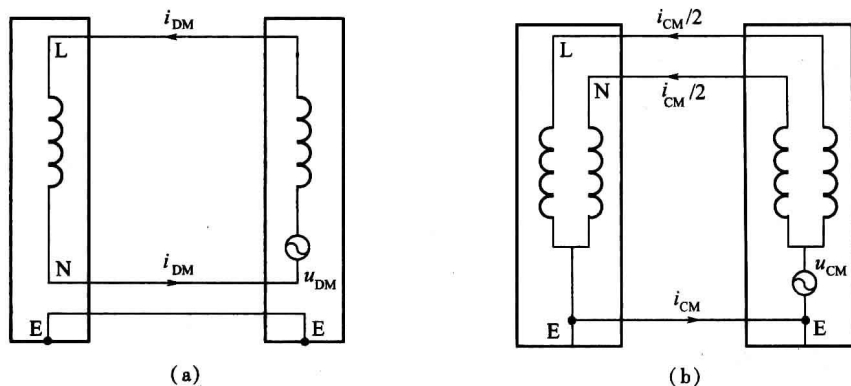


图 1-2 差模和共模干扰回路示意图

(a) 差模干扰回路; (b) 共模干扰回路

干扰各自的回路,差模干扰回路中有一个差模干扰源 u_{DM} ,该差模干扰源通过相线(L)与中线(N)形成差模干扰,差模干扰电流为 i_{DM} ;共模干扰回路中有一个共模干扰源 u_{CM} ,该共模干扰源通过相线(L)、中线(N)与地线(E)形成共模干扰回路,共模干扰电流为 i_{CM} 。差模和共模回路的区别在于,差模电流只在相线和中线之间流动,而共模电流不但流过相线和中线,而且还流过地线。

目前,对 PWM 变换器传导干扰机理分析的文献较多。一般都是按照上述共模和差模的传播路径而进行的原理阐述。由于变换器上的传导干扰主要是由开关管上的电压电流跳变而引起的,故本节按照电路中含开关管数量的不同简单回顾目前国内外对功率变换器机理的研究现状。

对于单管变换器,文献[6]给出共模干扰主要是由开关管的 du/dt 与 MOSFET 的漏极和散热器之间的寄生电容相互作用形成共模电流,进而通过地线同时流过相线和中线,文献[7]指出共模干扰的形成与整流桥的导通状态无关。而对差模干扰,文献[8]详细阐述了反激变换器差模干扰形成的机理,并提出非内在的差模干扰电流,即混合模式干扰。该文提出在整流桥导通时,由于 MOSFET 的快速开关动作在变压器一侧产生的 di/dt 所形成的干扰为本质的差模干扰,而在整流桥关断时,由于 MOSFET 的关断和开通动作引起的单个二极管正向偏置而导通所形成的干扰为混合模式干扰。图 1-3 示出了共模干扰和本质差模干扰的耦合通道,图 1-4 给出了混合模式干扰耦合途径。

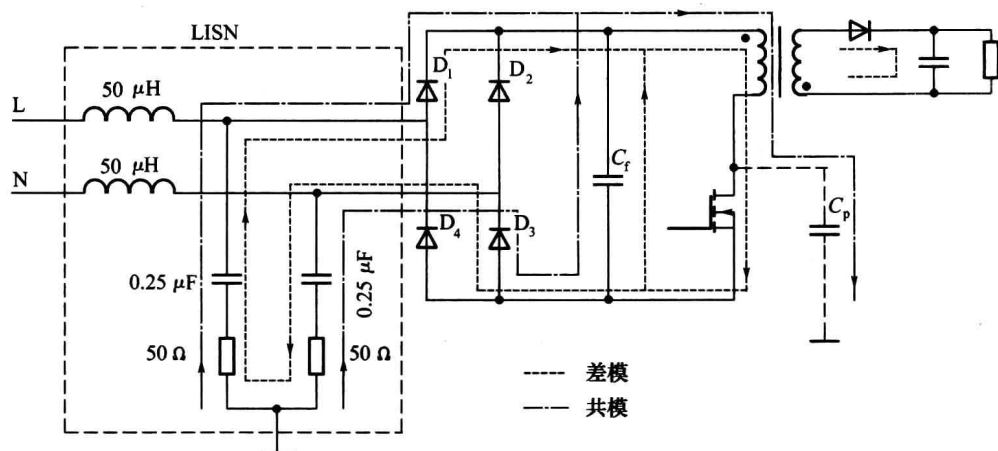


图 1-3 共模干扰和本质差模干扰的耦合通道

对于电路中含两个管子的变换器,文献[7]给出了半桥式开关整流器的共模和差模干扰耦合机理,共模干扰的耦合主要是通过桥臂中点对地的寄生电容,然后根据上下开关管

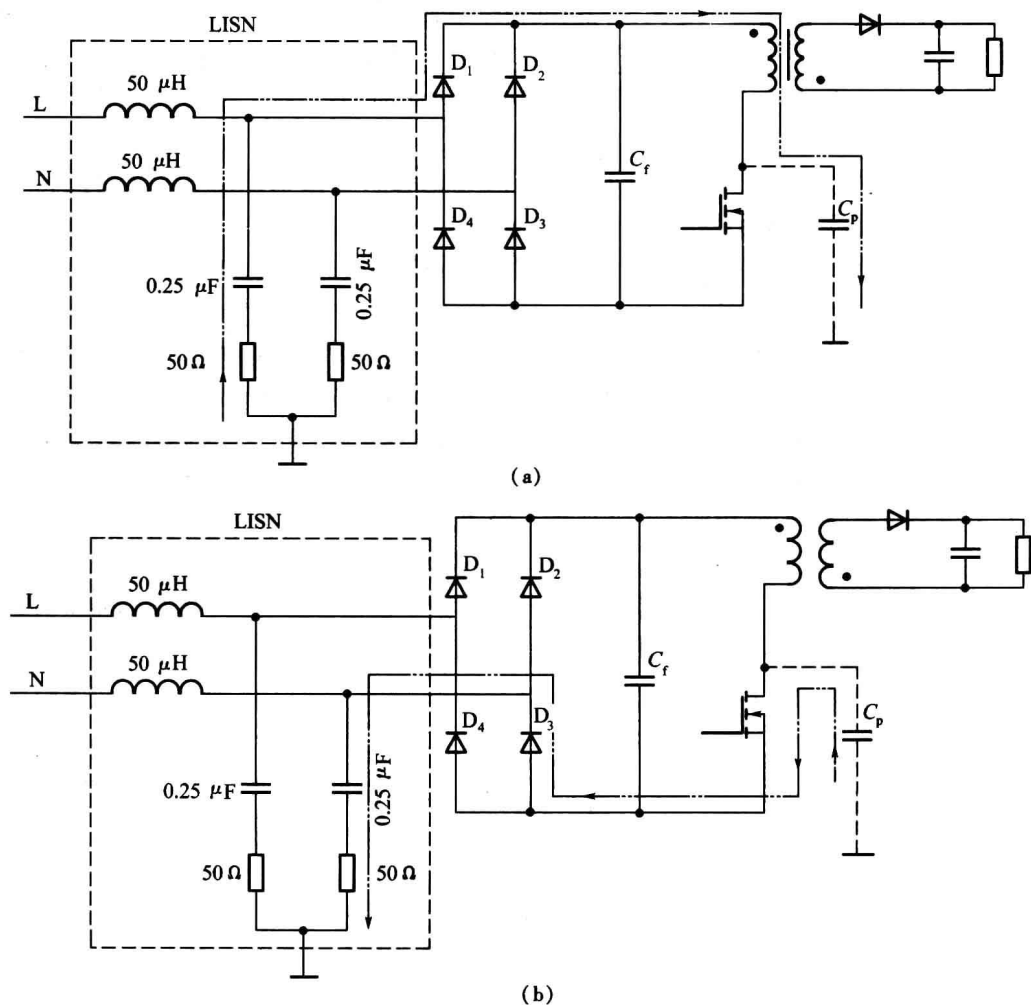


图 1-4 混合模式干扰耦合途径

(a) MOSFET 关断, D_1 开通; (b) MOSFET 开通, D_3 开通

的导通状态流过不同的耦合通路。对差模干扰的分析,也引入了混合干扰模式。其中整流桥导通时的本质差模干扰产生机理与文献[8]相似,不同之处只是因为多了一个开关管而多了一组本质差模耦合通道而已。在整流桥关断时,根据上下桥臂开关管的开关状态,使得直流电容侧上下两点电位瞬间发生变化,从而使整流桥的单个二极管正向偏置而形成混合干扰模式。

对于含四个开关管的单相全桥逆变器,文献[9]对单相 PWM 全桥逆变器的差模干扰机理进行了分析。由于逆变桥采用 PWM 调制,在输出侧产生很好的正弦波的同时会叠加高次谐波,从而引起输出侧差模干扰。而在逆变桥输入侧产生差模干扰的主要原因是开关管的通断使得逆变桥输入电流是一个脉动的电流信号。而文献[9]并没有对单相全桥逆变器共模干扰机理进行深入的分析。对于带有整流桥的单相 PWM 全桥变换器的共、差模干扰机理的深入分析还未见报道,仅有几篇论文对其进行了一般性的原理阐述^[10-12]。

针对三相系统的机理分析,文献[13]和文献[14]阐述了三相整流桥在电网侧差模干扰的产生机理,其主要思想是以整流器件开关引起的电压跳变作为干扰源,该处所提的电压跳变实质上是指线电压在换相重叠角前后的电压变化。其中文献[13]将线电压的变化用公式表示出来,并考虑到时域延时 τ ,等效于频域乘以 $e^{-s\tau}$,将重叠角前后的电压变化在频域加起来,然后计算出落到线路阻抗稳定网络电阻上的差模电压;而文献[14]是根据换相期间的干扰等效电路来列写回路方程组,然后求出落到线路阻抗稳定网络电阻上的差模电压并进行频域分析。文献[15]则论述了三相整流桥直流侧差模干扰的产生机理,文中以直流侧的电压跳变为干扰源,后续分析过程与文献[13]和文献[14]相似。文献[16]则对三相整流桥产生的共模干扰机理进行了分析,该文通过实验验证整流桥交流侧的共模干扰很小,交流侧主要是差模干扰,而直流侧才是共模干扰的主要来源,文中根据整流桥不同时刻下的开关导通情况即可计算出不同时刻下的共模干扰电压,在一个周期内,整流桥的共模电压经历4次跳变,按照频域法给出一个周期内的共模干扰电压的频域表达式,进而可以计算出直流侧的共模干扰。对于三相逆变桥的传导干扰的分析,文献[17]和文献[18]对其共模干扰进行了一般性的原理分析,关于三相整流逆变的整体的传导干扰机理的更深层次的定量分析还未见报道,目前的文献基本都是从定义出发进行的表面研究。

1.2.2 传导干扰的预测

电磁兼容预测主要是通过建立电路的等效模型来实现,准确有效的模型不仅能用来进行 EMI 的预测而且有利于滤波器的设计^[19-22]。目前功率变换器的等效电路模型主要集中在传导干扰频段,传导干扰预测应用中最基本的预测模式是干扰源加干扰耦合通道^[23]。对干扰源的建模主要有时域建模和频域建模两种方法:时域建模就是用物理元件如开关管、电阻、电感和电容器的相关模型来模拟 EMI 发射源,采用时域模型很容易理解系统的 EMI 发射机理^[24];频域建模需要通过傅里叶变换将开关器件波形由时域转化成频域,并且以频域参量表示噪声传播路径的阻抗参数,那么很容易计算得到系统的 EMI 噪声频谱分布,采用频域模型能够快速地预测 EMI 频谱,但模型的电路意义不够直观^[25]。目前建立系统精确时域模型的步骤如下。

(1) 建立功率半导体器件的高频模型

功率变换器的电磁干扰主要由开关器件瞬时切换引起,因此开关器件建模必须能精确

模拟其瞬态特性,如功率二极管的反向恢复电流以及 MOSFET 或 IGBT 开通、关断时的电压、电流变化。建模方法主要是子电路模型和基于半导体物理结构建立的模型。文献[26]建立了 PIN 二极管的子电路模型,但其工作范围有限,而且通用性不好。文献[27]建立了改进的集总电荷 PIN 二极管的高频模型,同时提出了改进的曲线拟合模型参数抽取方法。文献[28]和文献[29]以小信号 LDNOS 为内核,提出了子电路形式的功率 MOSFET 高频模型,能够依据开关管数据手册获得模型参数。文献[30]建立了 IGBT 的高频模型,该文使用实验的方法并结合开关器件的出厂数据来获取高频模型的寄生参数。文献[31]则是利用 Saber 中的 MOSFET、二极管通用模型,通过优化算法使开关管静态、动态特性与实际情况接近。IGBT 模型也是器件建模的重要内容,文献[32]介绍了在电路仿真软件中根据器件供货商提供的参数对 IGBT 模型进行修正的方案。文献[33]根据 IGBT 的行为特性模型,分阶段研究了 IGBT 开通和关断的动态过程,用分段线性化的方法模拟电压和电流的暂态波形,将非线性的开通和关断特征用多段的 du/dt 和 di/dt 组合描述,这种方法提高了电磁干扰预测频谱在高频段的准确度。

(2) 建立无源器件的高频模型^[34-37]

无源器件包括电阻器、电容器、电感器、变压器和电缆等。文献[29]给出了不同阻值的电阻器的等效电路,这是因为对高阻值电阻而言,串联寄生电感的影响较小;而对低阻值的电阻,并联寄生电容的影响不容易体现。而一般用于传导 EMI 分析的电容器高频模型则比较简单,其等效电路为 RLC 串联网络, R 表示等效串联电阻, L 表示引线电感, C 为实际电容值。更为精确的模型要依据电容器物理结构建立,文献[38]据此建立了电容器的传输线模型。磁性元件的高频建模和高频特性研究主要采用基于场分析的理论计算方法^[39]和基于阻抗测量的参数提取法^[40]。文献[41]给出了共模电感的高频模型及模型参数的获取方法,文献[42]讨论了电源引线的 π 型高频模型及参数的获取方法。文献[30]给出了电缆的传输线模型。

(3) 提取 PCB 板的寄生参数并建立高频模型^[43-51]

当电路工作在较高频率下,印刷电路板布线间的分布参数(如电容、电感)就变得相当重要,不但会成为干扰耦合的通道,而且可能会影响电路的正常工作。因此,设法提取分布参数建立线路板高频模型已成为 EMC 设计工作的重要环节。提取印刷电路板间的分布参数有两种基本方法:解析法和数值法。用解析法可以得到一些典型印刷导线的分布参数计算式,针对具体的电路板设计运用这些算式可以估算出线路间的分布参数值。但是,要提取任意形状的印制导线间的分布参数,还必须使用数值算法求解 Maxwell 方程组,如有限元法、有限差分法、矩量法等。这些数值法的基本思想都是通过离散化的方法把连续方程转化为代数方程求解。文献[52]介绍了通过基于有限元算法的电磁分析软件提取 PFC 变流器的 PCB 寄生参数。

提取印刷线路板分布参数建立高频模型,求解单位长度 PUL(Per Unit Length)电感、电容

矩阵是关键,如果考虑线路损耗还必须求解 PUL 电阻、电导矩阵。只有获得 PUL 电感、电容、电阻、电导矩阵,才能利用多导体传输线理论 MTL (Multi-conductor Transmission Line) 或部分元件等效电路理论 PEEC (Partial Element Equivalent Circuit) 建立印刷电路板的高频模型。因此,利用有限元技术求解 PUL 参数矩阵成了问题的关键。InCa (Inductance Calculation) 是法国实验室开发的杂散参数提取软件包,这套基于 PEEC 方法的电磁计算软件可以用来提取印刷线路的分布电阻、电感参数,用户输入几何尺寸和材料参数以后,InCa 能够自动生成任何三维结构的电阻、电感等效电路,该电路可输出为 Pspice 兼容格式,直接以子电路的形式参与电路仿真,但 InCa 不能计算分布电容的大小。StatMod 是德国 SimLab Software GmbH 公司推出的基于有限元方法的印刷电路板电磁分析软件包。该软件能够提取多层印刷电路板间电阻、电导、电容、电感分布参数矩阵,能给出任一参数随频率变化的曲线(显然是考虑了趋肤效应、介质损耗等高频效应),能够生成 Pspice 兼容格式的子电路,能给出电位、电流分布图。该软件最大特点是能够提取印刷导线的自电容,这个参数对分析共模干扰非常关键,因此该软件非常适合作为印刷电路板电磁分析、参数提取工作的软件^[53]。文献[10]则利用 Cadence 软件提取 PCB 分布参数。

(4) 将所抽取到的元器件的寄生参数和 PCB 板的分布参数加入到电路原理图中,构成完整的可以用于仿真传导的 EMI 电路模型。

(5) 使用电路仿真软件对模型电路进行瞬态分析,其中使用的仿真软件有 Saber、Pspice 等。

以上是建立精确时域模型的详细过程,精确的时域模型能够反映真实的干扰情况,对于简单的电路仿真时间也会很长,对于较复杂一些的电路,往往最终得不到仿真结果。为了减少仿真时间,还有一部分文献利用软件抽取 PCB 的寄生参数后,直接利用电路仿真软件中现有的功率半导体器件模型进行仿真,但这些模型不能很好地反映器件真实的高频工作特性,所以仿真出的结果参考价值有限。

除建立时域模型^[54],还有一些文献采用的是频域分析方法^[13-17, 55-57],其主要思想是先推导出干扰源的时域表达式,再得到频域表达式,进而计算出落到线路阻抗稳定网络上的干扰电压频谱。文献[58]则是从电路的角度介绍了变换器传导电磁干扰集中等效电路的建模方法,提出了一种简单易行的方法估算变换器的噪声源和内阻抗,通过共模噪声源和共模内阻抗以及差模噪声源和差模内阻抗来预测滤波器的抑制效果,图 1-5 为传导干扰集中电路模

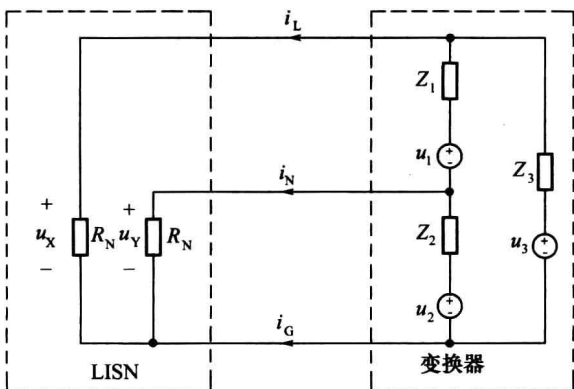


图 1-5 传导干扰集中电路模型

型结构图,其中 R_N 为线路阻抗稳定网络上的两个电阻, u_1 和 Z_1 分别表示差模噪声源和阻抗, u_2 、 u_3 和 Z_2 、 Z_3 分别表示共模噪声源和阻抗,若考虑到多数变换器的电路是对称或近似对称,可以认为 $u_2 = u_3$, $Z_2 = Z_3$ 。

文献[59]的建模思路与文献[58]相似,只是采用不同的方法得出等效电磁干扰源及其等效内阻抗,该文提出一种测量变换器内部电磁干扰特性的新方法,定量地得出了装置内等效电磁干扰源及其等效内阻抗。但上述文献都是对简单的电路进行分析预测,对三相“整流-逆变-电动机”系统的整体传导干扰预测的定量深入分析还未见报道。

1.2.3 传导干扰的抑制措施

因为电磁干扰产生必须具备电磁干扰源、电磁干扰传播途径和敏感设备三要素,所以对于抑制 PWM 驱动电动机系统的传导干扰也必须从三要素入手,即降低干扰源的强度、切断传播途径和提高敏感设备的抗扰度。本书主要讨论前两方面内容。

1.2.3.1 干扰源的抑制

从降低干扰源的强度来看,归纳起来干扰源的抑制有三种具有代表性的方法:改变电路拓扑、改进控制策略和优化驱动电路。

1. 改变电路拓扑

电路拓扑改进的思路主要是通过对称结构来消除变换器输出的共模电压,并且由于开关器件上电压变化率减半而使得装置输入侧传导干扰水平降低。通过改进电路拓扑来消除共模电压的概念最先应用到三相变换器^[60-65]。美国 Wisconsin 大学的 A. L. Julian, T. N. Lipo 和 G. Oriti 则根据“电路平衡”原理提出了一种用于消除三相逆变桥输出共模电压的三相四桥臂功率变换器方案,其实验电路的拓扑结构见图 1-6 所示。该文基本思想是采

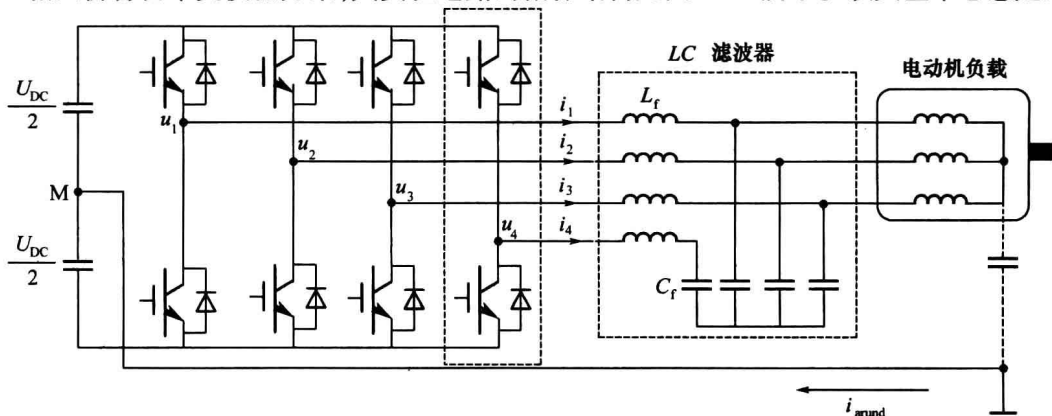


图 1-6 四桥臂结构逆变器