

新型彩电 电源电路 原理与检修

李卫明 李科峰 编著

12



国防工业出版社

National Defense Industry Press

新型彩电电源电路 原理与检修

李卫明 李科峰 编著

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书以组成彩电开关电源的日本三肯公司 STR 系列厚膜电路为主线,详细介绍了新型彩电(长虹、康佳、夏普、LG、松下、东芝等品牌)开关电源电路组成与特点、工作原理、典型故障表现与检修思路、实测维修数据与检修实例。每个实例都给出了具体机型、故障现象、故障分析、检修步骤与方法。

本书将理论分析与实际修理融为一体,具有实用性、启发性、系统性及新颖性。本书适合于家电维修人员、电子爱好者、电视技术工程人员及职业技术学校师生阅读。

图书在版编目(CIP)数据

新型彩电电源电路原理与检修/李卫明,李科峰编
著. —北京:国防工业出版社,2010.1

ISBN 978-7-118-06540-4

I. ①新... II. ①李...②李... III. ①彩电电视—
电视接收机—开关电源—理论②彩色电视—电视接收机
—开关电源—维修 IV. ①TN949.12

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 178259 号

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 16 $\frac{1}{4}$ 字数 412 千字

2010 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 30.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

前 言

本书以组成彩电开关电源的日本三肯公司 STR 系列厚膜电路为主线,简要介绍电源电路组成与特点,详细讲述新型彩电开关电源电路组成与特点、工作原理与过程分析、典型故障表现与检修思路及要点、实测维修数据、故障分析与检修实例。每个实例都给出了具体机型、故障形成的原因与表现、导致故障的机理与原因、检修的步骤与方法。

本书将理论分析、逻辑推理与实际修理技巧融为一体,具有实用性、启发性、系统性及新颖性。广大家电维修人员和电子技术爱好者若按照本书提供的故障检修思路、方法与技巧,一般均可做到举一反三、手到病除地修复相关新型彩电电源及其控制电路的故障。

在本书的撰写与出版过程中,得到了国防工业出版社的大力支持。参加本书编写工作的还有陈茜、李里程、李学平、陈优亮、梁学功等;文稿的电脑录入由吴良英、李月、刘志强等完成。

由于本书介绍的机型较多,资料收集困难,加之编者水平有限,书中难免存在差错,敬请读者批评指正。

作者

目 录

第一章 由 STR - E1565 和 STR - T2268 厚膜电路组成的开关电源	1
第一节 电路组成与特点	1
第二节 电源电路原理分析	1
一、STR - E1565 电源模块简介	1
二、STR - T2268 电源模块简介	4
三、进线滤波网络及整流滤波电路	4
四、功率因数校正(PFC)电路	4
五、STR - E1565 主开关电源电路	11
六、STR - T2268 副开关电源电路	13
七、开/待机控制电路	15
第三节 检修思路与实测维修数据	15
一、检修思路	15
二、实测维修数据	18
第四节 故障实例分析与检修	19
第二章 由 STR - F6454/ STR - F6456/ STR - F6656/ STR - F6658 厚膜电路组成的开关电源	20
第一节 电路组成与特点	20
第二节 电源电路原理分析	21
一、长虹 HP5188 型背投彩电整机供电系统组成	21
二、功率因数校正电路	24
三、进线滤波、整流滤波和自动升压电路	25
四、主开关电源电路	29
五、副开关电源电路	34
第三节 检修思路与实测维修数据	35
一、检修思路	35
二、实测维修数据	37
第四节 故障实例分析与检修	38
第三章 由 STR - F6553 厚膜电路组成的开关电源	42
第一节 电路组成与特点	42
第二节 电源电路原理分析	42
一、开关电源振荡电路	42

二、主电源稳压控制电路	44
三、主电源的保护电路	44
四、整流及滤波输出电路	45
五、副电源与 ON/OFF 控制电路	45
第三节 检修思路与实测维修数据	47
一、检修思路	47
二、实测维修数据	48
第四节 故障实例分析与检修	49
第四章 由 STR - F6629 厚膜电路组成的开关电源	51
第一节 电路组成与特点	51
第二节 开关电源电路原理分析	51
一、主电源的启动和振荡电路	51
二、开关电源的输出配置与保护电路	53
第三节 检修思路与实测维修数据	56
一、检修思路	56
二、实测维修数据	56
第四节 故障实例分析与检修	57
第五章 由 STR - F6267 和 STR - V152 厚膜电路组成的开关电源	59
第一节 电路组成与特点	59
第二节 开关电源电路原理分析	60
一、进线抗干扰电路	60
二、待机电压形成电路	60
三、功率因数校正电路	62
四、电源热地部分所采用的检测保护电路	65
五、 U_S 电压形成电路	69
六、 U_A 电压形成电路	73
七、低电压形成电路	76
第三节 检修思路与实测维修数据	80
一、检修思路	80
二、实测维修数据	80
第四节 故障实例分析与检修	82
第六章 由 STR - G5623/STR - G5653 / STR - G8656 /STR - G9656	
 系列厚膜电路组成的开关电源	83
第一节 电路组成与特点	83
第二节 开关电源电路原理分析	84
一、整流滤波及消磁电路	84
二、主开关电源电路	84
三、保护电路	86

四、开/待机控制电路	87
五、高频整流、滤波及直流电压输出电路	87
第三节 检修思路与实测维修数据	87
一、检修思路	87
二、实测维修数据	89
第四节 故障实例分析与检修	89
第七章 由 STR - M6821 厚膜电路组成的开关电源	91
第一节 电路组成与特点	91
第二节 开关电源电路原理分析	91
一、交流输入及待机电路	91
二、消磁电路	94
三、主电源电路	94
四、保护电路	95
第三节 检修思路与实测维修数据	98
一、检修思路	98
二、实测维修数据	98
第四节 故障实例分析与检修	99
第八章 由 STR - M6529F04 厚膜电路组成的开关电源	100
第一节 电源电路组成与特点	100
第二节 开关电源电路原理分析	101
一、遥控电源电路	101
二、主开关电源电路	102
三、保护电路	105
第三节 检修思路与实测维修数据	109
一、检修思路	109
二、实测维修数据	114
第四节 故障实例分析与检修	115
第九章 由 STR - M6833BF04 厚膜电路组成的开关电源	118
第一节 电路组成与特点	118
第二节 开关电源电路原理分析	118
一、主开关电源电路	118
二、副开关电源电路	121
三、保护电路	124
第三节 检修思路与实测维修数据	127
一、检修思路	127
二、实测维修数据	129

第四节 故障实例分析与检修·····	130
第十章 由 STR - M6853BF04 厚膜电路组成的开关电源 ·····	135
第一节 电路组成与特点·····	135
第二节 开关电源电路原理分析·····	136
一、遥控电源电路 ·····	136
二、主开关电源电路 ·····	137
三、电源厚膜块 IC801 的保护电路 ·····	142
四、待机控制电路 ·····	142
五、综合待机保护控制电路 ·····	144
第三节 检修思路与实测维修数据·····	146
一、检修思路 ·····	146
二、实测维修数据 ·····	149
第四节 故障实例分析与检修·····	151
第十一章 由 STR - S6709 厚膜电路组成的彩电开关电源 ·····	154
第一节 由 STR - S6909 厚膜电路组成的开关电源·····	154
一、电路组成与特点 ·····	154
二、开关电源电路原理分析 ·····	154
三、检修思路与实测维修数据 ·····	167
四、故障实例分析与检修 ·····	171
第二节 由 STR - S6709 和 HIC1016 厚膜电路组成的开关电源 ·····	175
一、电路组成与特点 ·····	175
二、开关电源电路原理分析 ·····	177
三、检修思路与实测维修数据 ·····	188
四、故障实例分析与检修 ·····	198
第十二章 由 STR - Z3302 和 HIC1016 厚膜电路组成的彩电开关电源 ·····	205
第一节 电路组成与特点·····	205
第二节 开关电源电路原理分析·····	206
一、整流、滤波电路 ·····	206
二、开关振荡电路 ·····	206
三、稳压控制电路 ·····	208
四、直流待机控制电路 ·····	210
五、保护电路 ·····	211
第三节 检修思路与实测维修数据·····	214
一、检修思路 ·····	214
二、实测维修数据 ·····	218

第四节	故障实例分析与检修·····	220
第十三章	由 STR - Z4479 和 HIC1026A 厚膜电路组成的开关电源·····	224
第一节	电路组成与特点·····	224
第二节	开关电源电路原理分析·····	224
一、	主开关电源电路·····	224
二、	副电源和 ON/OFF 电路·····	229
三、	行输出级供电和高压稳定电路·····	230
四、	保护电路·····	230
第三节	检修思路与实例维修数据·····	234
一、	检修思路·····	234
二、	实测维修数据·····	236
第四节	故障实例分析与检修·····	236
第十四章	由 STR - X6759N 和 STR - V152 厚膜电路组成的彩电开关电路·····	239
第一节	电路组成与特点·····	239
第二节	开关电源电路原理分析·····	239
一、	电源进线滤波抗干扰及整流、滤波电路·····	239
二、	STR - V152 副开关电源电路·····	241
三、	STR - X6759N 主开关电源电路·····	242
四、	准谐振及延迟导通电路·····	243
五、	主电源次级输出电路·····	244
第三节	检修思路与实测维修数据·····	244
一、	检修思路·····	244
二、	实测维修数据·····	246
第四节	故障实例分析与检修·····	247

第一章 由 STR - E1565 和 STR - T2268 厚膜电路组成的开关电源

适用机型:长虹 CHD - W370F8/P	长虹 LT3718P	长虹 LT4018/P	长虹 LT4219
长虹 LT3712	长虹 LT3788	长虹 LT3719P	长虹 LT4288
长虹 LT3718H	长虹 LT4219/P/FHD	长虹 LT5520	长虹 LT4619/P
长虹 LT4719FHD	长虹 LT4099	长虹 LT4299	长虹 LT4233
长虹 LT32600	长虹 LT37700	长虹 LT42700	长虹 LT32866
长虹 LT37866	长虹 LT42866	长虹 LT4699	长虹 LT47600
长虹 LT47700	长虹 LT47866FHD 等		
(元器件标注及编号以长虹 LT4219 型液晶彩电为例)			

第一节 电路组成与特点

长虹 LT4219 型液晶彩电开关电源共输出 12V、5V(MCU)、5V(Signal)、24V 四组电压。其中,12V 与 5V(Signal)两组电压供液晶电视信号处理电路使用;5V(MCU)电压供液晶电视 CPU 使用。12V、5V(MCU)、5V(Signal)三组电压由 STR - E1565 及相关组成电路产生,称为主开关电源。24V 电压供液晶电视逆变器使用,由 STR - T2268 及相关组成电路单独产生,称为副开关电源。

电视机由开机状态转为待机状态时,12V、5V (Signal)、24V 三组电压将被关闭,开关电源只输出 5V (MCU) 电压,提供给主板组件 CPU 电路使用。具体电源电路如图 1 - 1 所示。

该电源电路的主要特点如下:

该电源采用两块日本三肯公司最新开发的电源专用模块(STR - E1565 及 STR - T2268)。利用该两块电源模块组成一个组合型开关电源组件,具有输出功率大、带负载能力强、保护功能完善及待机功耗小等优点。

第二节 电源电路原理分析

一、STR - E1565 电源模块简介

STR - E1565 是一个混合开关电源集成电路,采用 21 脚 SLA 封装形式。内含两个变换器,前端是一个用于消除高次谐波的升压斩波型 PFC 控制电路,后端是一个 DC/DC 变换器。主要用于控制芯片内部逻辑处理电路及大功率 MOSFET 开关管。具有多种模式控制功能,协调工作系统及保护功能等。STR - E1565 内部电路框图如图 1 - 2 所示。

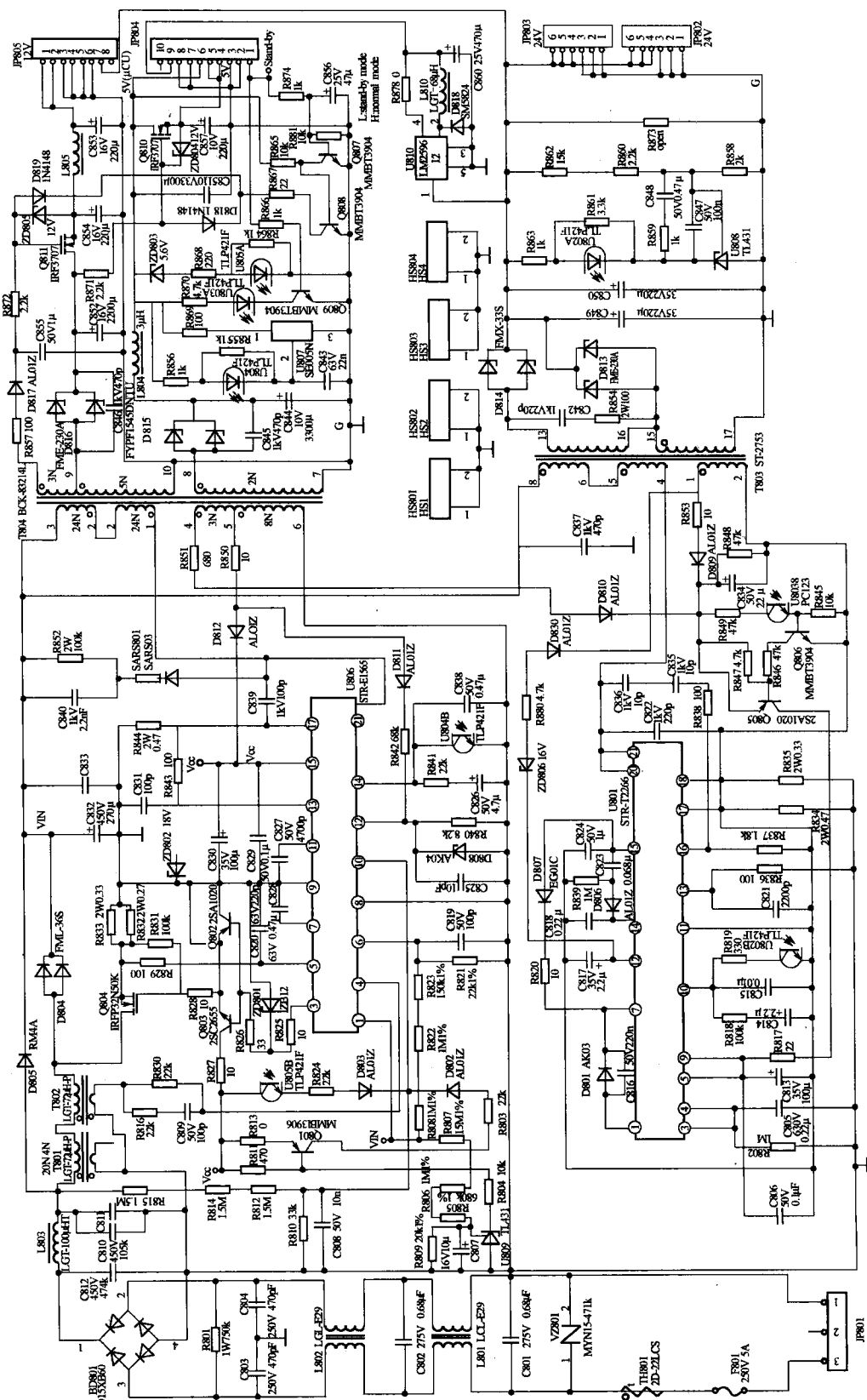


图 1-1 长虹 LT4219 型液晶彩电电源电路

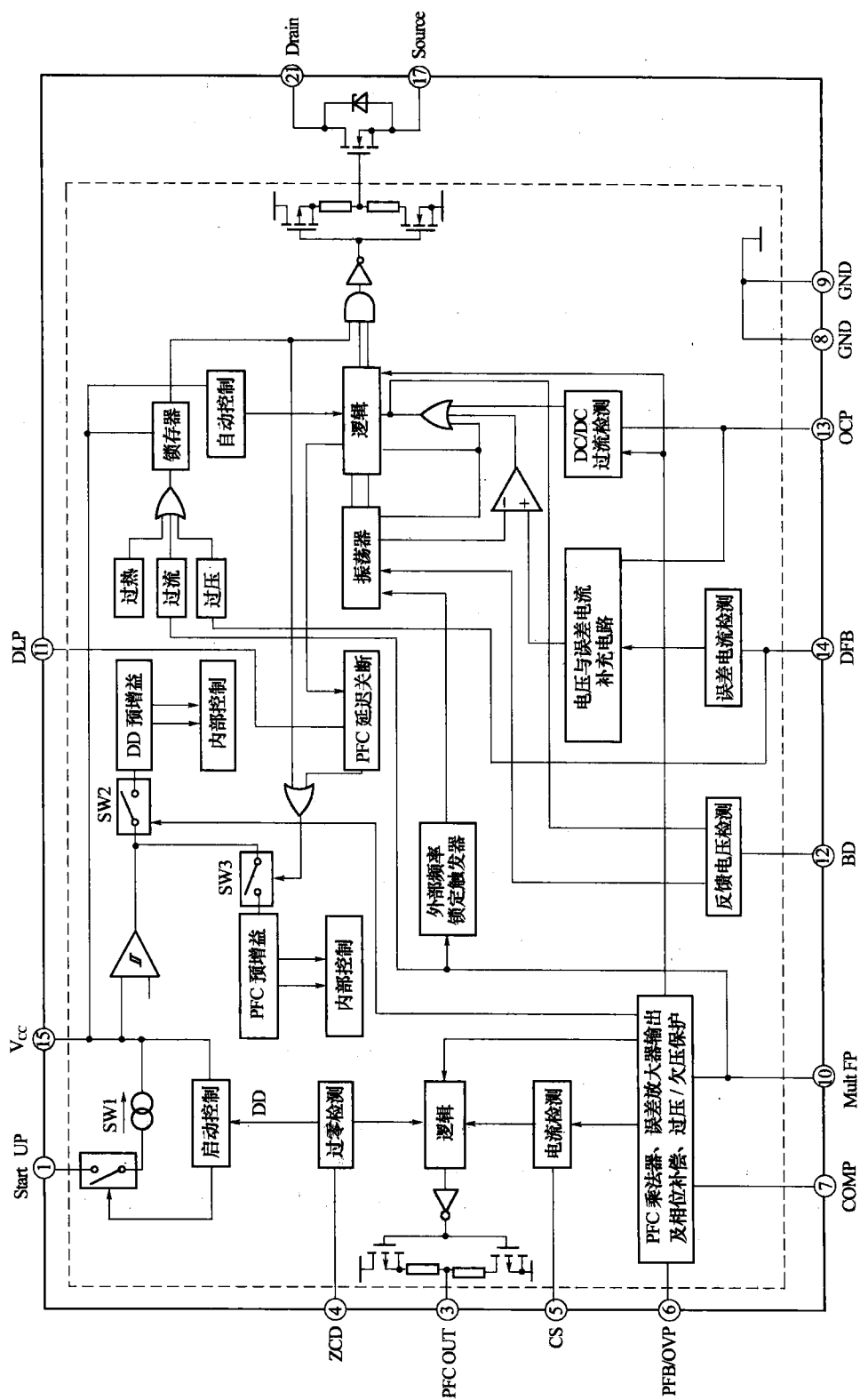


图 1-2 STR-E1565 内部电路框图

二、STR - T2268 电源模块简介

STR - T2268 采用 21 脚 SLA 封装形式。内部采用双(高端与低端)MOSFET 管,作为大功率开关管,主要应用于通信机器、办公自动化、大屏幕 LCD - TV、LCD 背投电视等低电压大电流需求场合,如大屏幕液晶电视逆变器(24V/12A)、小信号处理电路(5V/4A、12V/4A)等。具有自动跟踪、多种模式控制及保护等功能。STR - T2268 内部电路框图如图 1 - 3 所示。

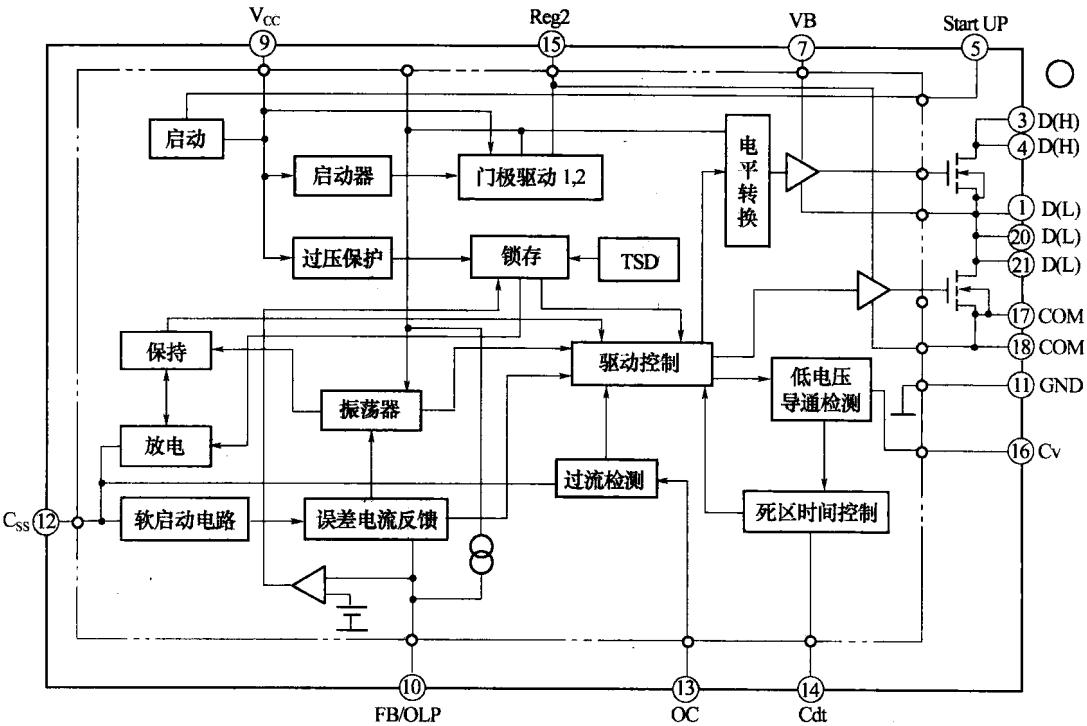


图 1 - 3 STR - T2268 内部电路框图

三、进线滤波网络及整流滤波电路

220V/50Hz 交流电压经 JP801 进入液晶电视开关电源组件,首先进入由 C801、L801、C802、L802、C803、C804、R801 组成的二级低通滤波网络,滤除市电中的高频干扰信号,同时保证开关电源产生的高频信号不会窜入 220V 市电网。

经低通滤波网络滤波后的 220V 交流市电送入由 BD801、C812、L803、C810、C811 组成的整流滤波电路。由于该滤波电路电容储能较小,所以经整流滤波后的电压在液晶电视开机(开关电源负载较重)时,整流滤波后电压为 226V;当液晶电视机由开机转为待机(开关电源负载较轻)时,整流滤波后电压为 290V 左右。

四、功率因数校正(PFC)电路

PFC 电路是插在整流电路与滤波电路之间的一种新型电路。它实际上是一个 AC/DC 变换器。它提取整流后的直流电流中的高次谐波分量,将其校正为正弦波或非常接近正弦波,这样一方面抑制了整流后的高次谐波分量,减少了高次谐波对电源的干扰,另一方面充分利用了电网电能,提高了电源的使用效率。功率因数的大小反映了用电时利用电网电能效率的

高低。

1. 传统整流滤波电路的弊端

大多接入电网的用电设备都是通过把市电整流成直流后供给负载的,而传统常用的是电压型不控整流,也就是二极管桥式整流接大电容滤波的方法。这种整流电路是一种非线性器件和储能元件的组合,虽然输入交流电压是正弦的,但是二极管导通角非常小,输入电流畸变严重,呈脉冲状,造成二极管整流效率下降。传统二极管整流、滤波电路如图 1-4 所示。

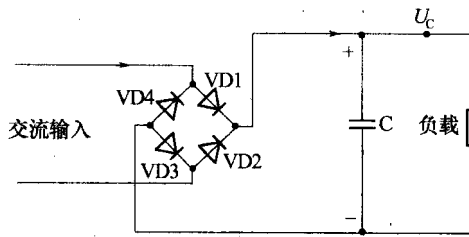


图 1-4 传统二极管整流滤波电路

在交流输入电压的正半周,VD1、VD3 导通,交流电压通过 VD1、VD3 对滤波电容 C 充电,由于二极管的正向电阻和交流电源内阻很小,故电流较大,滤波电容 C 很快被充电到交流输入电压的峰值,当交流电源输入电压小于滤波电容 C 的端电压 U_c 时,VD1、VD3 就处于截止状态;同理,可分析负半周 VD2、VD4 的工作情况。输入的电压波形和电流波形如图 1-5 所示。

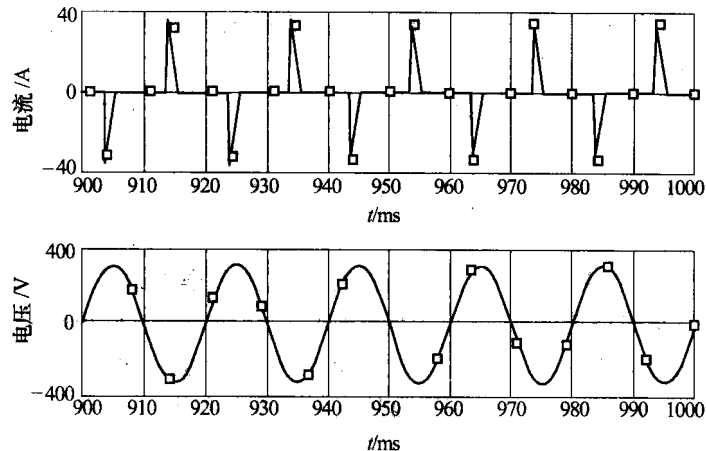


图 1-5 不控整流时输入电压和电流波形

当电路进入稳态工作状态后,只有当交流电压的峰值大于滤波电容上的电压时,二极管才会导通,导通时间很短,大部分时间二极管都处于截止状态,二极管输入的导通角仅约为 $\alpha/3$,信号呈窄脉冲形状,已不是连续输入的正弦波电流,而是产生大量的谐波干扰分量,加上开关电源有高频谐波分量反馈到电网,使视在输入功率远大于有用功率,功率因数降低到 50%~65%,电网利用率严重降低;同时,这种整流滤波电路产生了很大的电流谐波,严重干扰了电网,使其他用电设备工作不稳定,不能达到使用标准。为了使输入电流谐波满足要求,必须引入功率因数校正(PFC)电路。功率因数低的电气设备,不仅不利于电网传输功率的充分利用,而且其输入电流谐波含量较高。实践证明,较高的谐波会沿输电线路产生传导干扰和辐射干扰,影响其他用电设备的安全、经济运行,如对发电机和变压器产生附加功率损耗,对继电器、

自动保护装置、电子计算机及通信设备产生干扰而造成误动作或计算误差。因此,防止和减小电流谐波对电网的污染,抑制电磁干扰,已成为全球普遍关注的问题。国际电工委员会与之相关的电磁兼容法规对电气设备的各次谐波都作出了限制性的要求,世界各国尤其是发达国家已开始实施各项有关标准。随着减小谐波标准的应用和推广,有更多的电源设计结合了功率因数校正功能。许多新型元器件和 PFC 拓扑相继涌现,有助于电网传输功率的充分利用和减少谐波对线路产生的干扰。比较成熟且应用广泛的功率因数校正正是两级方案,它们有各自的功率器件和控制电路。PFC 级使线电流跟随线电压,使线电流正弦化,很容易达到高功率因数,减少谐波含量。

近年来,各国都提出相应的 EMC(电磁兼容)标准,严格规定了接入电网设备的谐波干扰允许水平。我国推行的“3C”认证标准,要求所有电气产品都必须通过该认证才可以出售,其中,该标准很重要的部分就是 EMC 标准。功率因数校正技术就是通过在不控整流电路中加入 DC/DC 开关转换器,应用电流反馈技术,使输入端电流波形能跟踪交流输入电压波形,使输入端电流接近正弦波形,从而达到提高功率因数的目的。

2. 功率因数校正电路的分类

按功率因数校正电路使用的元器件来划分,功率因数校正电路可分为无源(被动)功率因数校正电路和有源(主动)功率因数校正电路。

(1) 无源功率因数校正电路。无源功率因数校正电路是一种利用无源器件使电源的输入电流接近正弦波,从而提高功率因数的电路,一般采用无源器件——电感和电容实现。无源功率因数校正电路成本低,电路简单。但是它的缺点也相当明显,首先巨大的电感限制了它在许多应用中的实用性;其次它的功率因数提高有限,只能达到 80%~90%,适用于低功率开关电源和对功率因数要求不高的电器。

(2) 有源功率因数校正电路。有源功率因数校正电路是利用有源电子器件(如三极管、场效应管等)使电源的输入电流接近正弦波,从而提高功率因数的电路。与无源功率因数校正电路相比,有源功率因数校正电路的优点是:体积小,功率因数高,电流畸变小。但是,它的电路结构复杂,成本较高。下面介绍一下常见的 BOOST 型有源功率因数校正电路。

从原理上说,任何一种 DC/DC 变换器拓扑都可用作功率因数校正的主电路,但是,由于升压型 BOOST 变换器的特殊优点,它更为广泛地应用于功率因数校正电路。BOOST 功率因数校正电路一般由四部分组成:一是 BOOST 储能电感;二是整流滤波电路;三是功率 MOS 开关管;四是控制集成电路。BOOST 功率因数校正电路框图如图 1-6 所示。

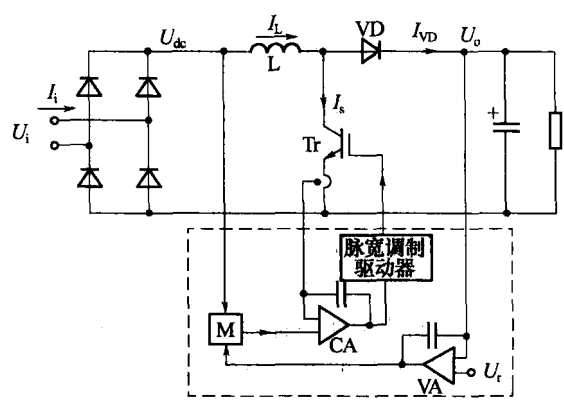


图 1-6 BOOST 功率因数校正电路框图

如图 1-6 所示,主电路由单相桥式整流器 AC/DC 整流桥堆和 BOOST 变换器组成。虚线框内为控制电路,包括电压误差放大器 VA 及基准电压 U_r 、电流误差放大器 CA、乘法器 M、脉宽调制器驱动器等,负载可以是一个开关电源。电路工作原理如下:主电路的输出电压 U_o 和基准电压 U_r 比较后,输入给电压误差放大器 VA;整流电压 U_{dc} 检测值和 VA 输出的误差电压信号共同加到乘法器 M 的输入端,乘法器 M 的输出则作为电流反馈控制的基准信号,与开关电流 I_s 检测值比较后,经误差放大器 CA 加到脉宽调制驱动器,以控制开关 T_r 的通断,从而使输入电流(即电感电流) I_L 的波形与整流电压 U_{dc} 的波形基本一致,提升了电源的转换效率和功率因数。

有源功率因数校正电路虽然结构复杂,但它体积小、效率高(功率因数可达 95%~99%),因此越来越引起人们的注意。理论上,任何一种开关电源拓扑形式都可以作为功率因数校正电路的基本拓扑形式,实际使用中,以 BOOST 升压拓扑开关电源作 PFC 变换器比较常见。PFC 变换器有不同的分类方法,按通过升压电感元件电流的控制方式来分,主要有连续导电模式(CCM)、不连续导电模式(DCM)及介于 CCM 与 DCM 之间的临界或过渡导电模式(TCM,有的叫 CRM 模式)三种类型。不论是哪一种类型的 PFC 升压变换器,都要求其直流输出电压高于最高交流线路电压的峰值。在通用线路输入下,最高交流线路电压往往达 270V,故 PFC 变换器输出直流电压最少是 380V($270V \times 1.4$),通常都设置在 390V 左右的电平上。

① 连续导电模式(CCM)功率因数校正电路。这种方案恒频且峰值电流较小,是较高功率(大于 250W)应用的首选方案。其缺点是控制解决方案较为复杂,牵涉多个环路以及以不精确的模拟乘法器,并需在控制集成电路周围设置许多元器件,控制复杂,制作成本高,并且要求功率器件的余量要大,以防止最坏情况下的功率耗散。其电路结构如图 1-7 所示。

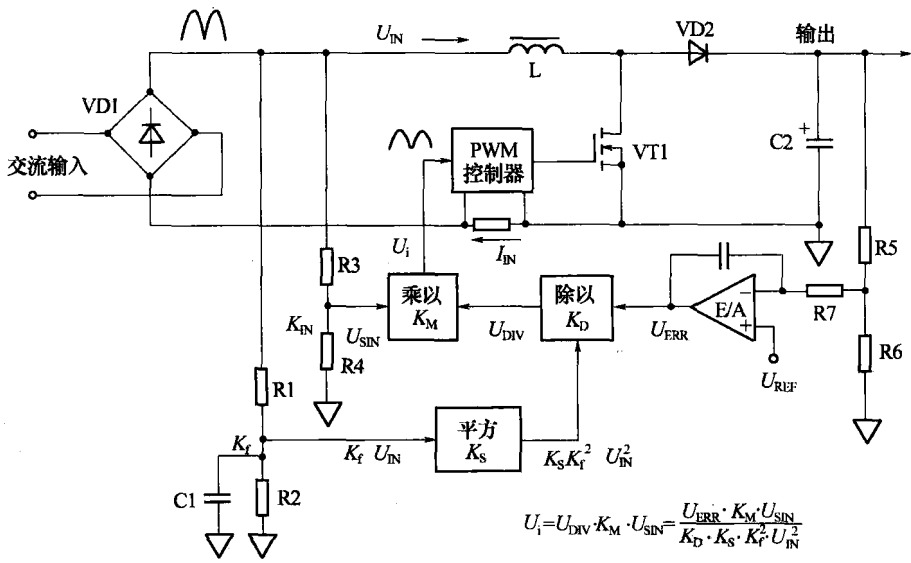


图 1-7 连续导电模式(CCM)功率因数校正电路框图

IC(集成电路)得电工作后,输出图腾柱信号去控制开关管 VT1 进入开关状态,同时,整流桥堆 VD1 整流输出的 100Hz 脉冲经电阻 R3 和 R4 分压后加到 IC 的内部乘法器的一个输入端;PFC 电路整流输出的电压经 R5 和 R6 分压后,加到电压比较器 E/A 的负端,内部基准电压 U_{REF} 加到比较器 E/A 的正端,比较后输出的误差信号与交流输入的电流信号比较后,形成

U_{Div} 信号, 该信号送到乘法器的另一个输入端, 共同去控制 PWM 控制器的占空比时间, 使输出到开关管的图腾柱信号的占空比被输入的交流电压脉冲调制, 达到提高功率因数的目的。当开关管导通时, 整流桥堆 VD1 输出的 100Hz 脉动直流电经 PFC 电感 L、开关管 VT1 回到桥堆 VD1 的负端输出, PFC 整流二极管 VD2 截止 (开关管的工作频率比 100Hz 脉动电压高很多, 在瞬间可以把 100Hz 脉动直流电看成稳定的直流电压)。电感 L 中流过的电流从零沿斜率线性增加, 电感 L 储能。一旦电感中的电流达到峰值, 开关管 VT1 截止。电感 L 中存储的磁能叠加上整流桥堆 VD1 输入的 100Hz 脉动直流电压后, 经整流管 VD2 整流和滤波电容 C2 滤波后, 形成 390V 左右的直流电压。同时, 电感 L 流过的电流逐渐下降, 当电感的电流下降到零时, IC 产生一个驱动信号, 又使开关管再次导通, 开始下一个周期的工作。IC 的控制逻辑电路同时受零电流检测器和交流输入乘法器的控制, 可确保在同一时刻 IC 只输出一种状态的驱动信号。

② 不连续导电模式 (DCM) 功率因数校正电路。该电路的基本组成包括以电压误差放大器为中心的电压控制环路和由一象限乘法器、电流感测比较器及零电流检测器等构成的电流控制环路, 电路如图 1-8 所示。

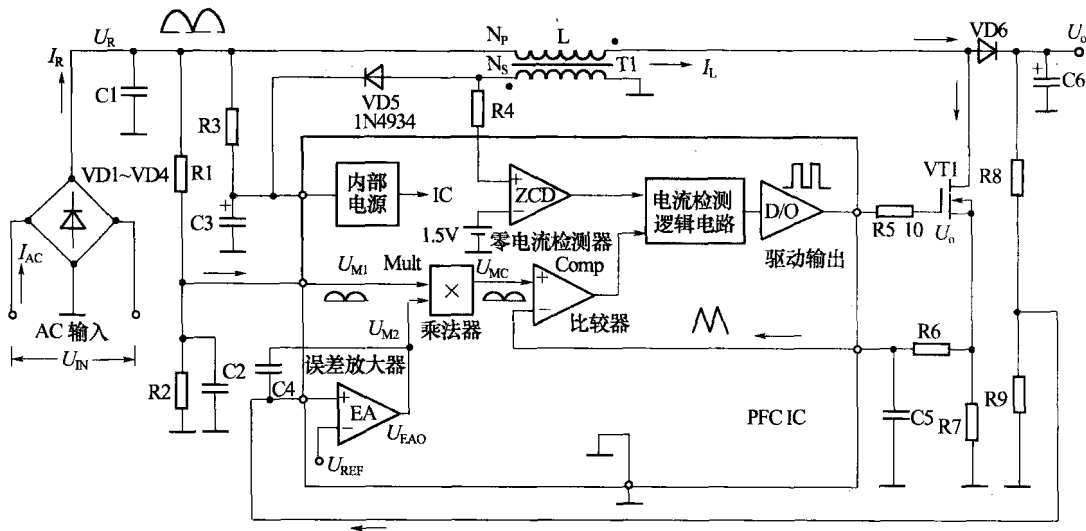


图 1-8 不连续导电模式 (DCM) 功率因数校正电路框图

当接通交流电压后, 由于旁路电容 $C1$ 容值仅为 $0.1\mu F \sim 0.47\mu F$, 只能对功率因数校正电路产生的高频信号和电源输入的高频信号滤波, 故桥式整流器输出为 100Hz 的正弦半波脉动直流电压 (U_R)。 U_R 通过电阻 $R3$ 对电容 $C3$ 充电, 当 $C3$ 上的电压升至 IC 的启动门限以上时, IC 开始工作, 并驱动功率因数校正电路开关管 VT1 工作。一旦 PFC 升压变换器进入正常运行状态, 升压电感器 T1 的次级绕组就感生高频脉冲信号, 经二极管 VD5 整流和电容 $C3$ 滤波, 为 IC 提供正常工作所需的电压和电流。100Hz 脉动直流电压 U_R 经 $R1$ 和 $R2$ 组成的电阻分压器分压, 作为乘法器的一个输入 (U_{M1})。升压变换器的直流输出电压经 $R8$ 和 $R9$ 分压后, 反馈到 IC 误差放大器 EA 的正相输入端, 并与误差放大器反相输入端上的参考电压 U_{REF} 比较, 产生一个误差电压 (U_{M2}), 也输入到乘法器。乘法器的输出 U_{MC} 是两个输入电压 (U_{M1} 和 U_{M2}) 相乘的结果, 作为 IC 电流比较器 Comp 的参考。当 IC 驱动开关管 VT1 导通时, 升压二极管 VD6 截止, 流过 PFC 电感 L 的电流从零沿斜坡线性增加, 并全部通过 VT1 和 $R7$ 回地 (开关管的工作频率比 100Hz 脉动电压高很多, 在瞬间可以把 100Hz 脉动直流电看成稳定的