

# 射频能量采集系统的谐波抑制技术

孟祥麟

(武汉大学电气工程学院,湖北武汉 430072)

**摘要:**针对射频能量采集系统中谐波抑制电路存在的效果不佳和效率不高的问题,提出一种基于对称二极管整流电路的扇形带线的谐波抑制电路设计。该设计使用对称二极管整流电路的设计对由非线性电子元件而引发的偶次谐波进行抑制;同时引入3个经过优化设计的扇形带线对3次谐波进行有效抑制,通过利用扇形带线所具有的宽带阻抗特性实现了整流电路对输入信号频率的较好的适应性。试验证明,在测试条件下该电路能够在较宽的输入频段内有效抑制4阶输入谐波,且整流效率最大值达到78.2%。

**关键词:**谐波抑制;扇形带线;整流电路;3次谐波;整流效率

中图分类号:TN31 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2018)04-0060-04

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2018.04.013

## Harmonic Suppression Technology of RF Energy Acquisition System

Meng Xianglin

(School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, Hubei, China)

**Abstract:** Aiming at the problems such as poor effect and low efficiency existing in harmonic suppression circuit in RF energy acquisition system, a design of harmonic suppression circuit with a fan belt line based on symmetric diode rectifier circuit is proposed. The proposed design uses the design of symmetric diode rectifier circuit to suppress even harmonics caused by non-linear electronic components, at the same time three fan belt lines with optimized design are introduced to suppress the third harmonic effectively, and through the use of fan belt line with broadband impedance characteristics the rectifier circuit realizes a good adaptability to the input signal frequency. The experiment proves that the circuit can effectively suppress the fourth-order input harmonics in the wider input band, and the maximum rectifying efficiency reaches 78.2%.

**Key words:** harmonic suppression; fan belt line; rectifier circuit; third harmonics; rectification efficiency

## 0 引言

整流电路作为射频能量采集系统的一个主要的能量转换部分,是能量传输过程中损耗。整流电路中影响变流效率的一个重要因素是谐波<sup>[1]</sup>。由于整流二极管本身所具有的非线性会导致高次谐波的产生,而高次谐波非常容易从耦合天线泄露出去从而降低整流电路的变流效率。所以谐波抑制在射频能量采集系统整流电路的设计中,主要作用除了抑制高次谐波,还有助于提升整流电路的变流效率<sup>[2-3]</sup>。

常用谐波抑制的方法是在天线和整流电路之间设置输入滤波器来抑制谐波,但是不恰当的滤波器设计不仅会导致能量损耗的增加,还会使得系统体

积增大,甚至会削弱射频天线的耦合能力<sup>[4]</sup>。

文献[5]通过对谐波抑制的天线进行优化设计,从而省略了在整流电路前端设置用于谐波抑制的滤波器,但是这种设计增加了天线设计的复杂度,削弱了射频天线的耦合能力。文献[6]提出了一种具有对称结构的整流电路,以此来抵消整流电路在变流过程中产生的偶次谐波,通过仿真实验验证了这种整流电路在2.45 GHz频段的能力传输效率达到60%,但是这种电路对奇次谐波抑制效果有限。

基于上述研究,提出一种在整流电路前端设置扇形枝节实现对3次谐波的抑制,并通过对称整流二极管的设计实现偶次谐波的抑制,从而避免了在整流电路中引入带通滤波器以提升射频能量采集系统的射频耦合效率。

# 1 谐波抑制原理

具有周期性的射频信号可分解为正弦波和余弦波<sup>[7-8]</sup>:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t)] \quad (1)$$

式中  $a_n$  和  $b_n$  的数学表达式分别为

$$\begin{cases} a_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(t) \cos(n\omega t) dt \\ b_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(t) \sin(n\omega t) dt \end{cases} \quad (2)$$

由二极管组成的整流电路中,由于二极管的非线性器,电压和电流被限制在二极管阈值之内,这种电压或电流的时域突变会导致频域谐波的产生<sup>[9-10]</sup>。谐波的抑制可以通过合理的阻抗设计来实现。将谐波发生处的谐波反射系数设计为1,可以有效防止高次谐波通过耦合天线将能量泄漏出去;同时通过控制高次谐波和反射波的相位差,可以最终抵消谐波对输出电流的影响<sup>[11]</sup>。利用谐波产生处的高阻抗设计可实现谐波反射系数  $|\Gamma| = 1$ ,此时谐波电压分量依旧存在,但是电流分量几乎为0,且可通过控制其相位差达到控制波形的目的;利用谐波产生处的低阻抗设计得到谐波反射系数  $|\Gamma| = -1$ ,此时谐波电流分量依旧存在,但是电压分量几乎为0。这两种设计下电压和电流的乘积都几乎为0,这意味着能量消耗都很小,能够达到在获得较小能量消耗的前提下实现谐波抑制的功能<sup>[12-13]</sup>。

# 2 滤波电路设计

## 2.1 电路整体结构

射频能量采集系统采样对称整流电路,电路原理如图1所示。

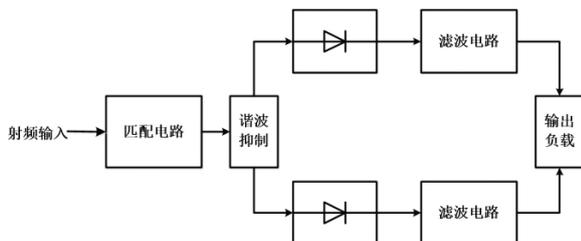


图1 整流原理

图1中的对称整流电路由30Ω匹配电路、前端

谐波抑制电路、反向对称整流二极管以及直通滤波电路组成。

由于图1基于肖特基二极管的整流电路是完全反向对称,因此在输出负载上表现出的直流输出电压基本没有2次、4次等偶次谐波,但是3次谐波的幅值较大,因此无法有效提升变流效率<sup>[14]</sup>。对此需要在匹配电路后端和整流电路前端设置针对3次谐波的电路。

## 2.2 滤波器设计

在图1所示的整流电路后端滤波电路主要是用于削除输出电压的波动分量以及高次谐波。通常这样的滤波电路设计为在整流二极管的输出端并联射频电容和波动分量为0.25波长的电感微带线<sup>[15]</sup>。但是这样的设计不可避免需要使用过孔工艺,从而可能带来较为严重的电路寄生电容,无法保证批量制造过程中的变流效率的稳定性<sup>[16]</sup>。因此提出一种基于0.25波长的扇形带线实现整流电路的前端滤波功能,电路如图2所示。

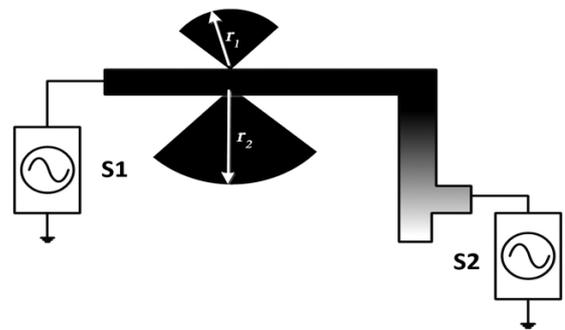


图2 基于扇形带线的滤波器结构

图2中为保持与整流电路的阻抗匹配,S1的内阻设计为50Ω,S2的内阻和负载阻抗保持一致,设计为1.6kΩ。用工作频率分别为5.8GHz和11.6GHz的射频信号对滤波器的扇形带线进行仿真参数优化,经过反复测试得出最优的扇形带线半径为  $r_1 = 3.49 \text{ mm}$   $r_2 = 5.12 \text{ mm}$ ,扇形角为  $120^\circ$ 。

## 2.3 滤波电路的参数整定

对上述原理分析进行总结,得出滤波电路结构如图3所示。

滤波电路的输入射频信号工作频率为5.8GHz,图3中黑色介质板厚度的设计值为0.035mm,真空电容率  $\epsilon$  为2.55,损耗角  $\delta$  为  $\arctan 0.0018$ 。

为获得较好的谐波抑制效果,整流二极管的结电容、工作电压降以及寄生电容需要尽可能的小。基于上述考虑,结合工作可靠性和性价比需求,选用热载

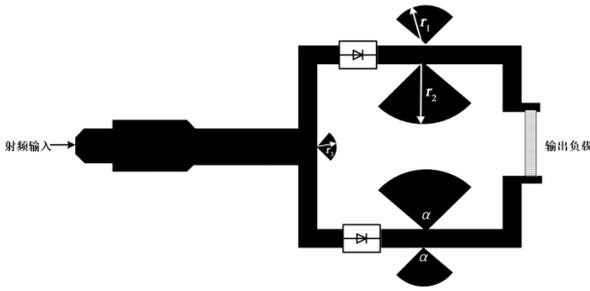


图3 滤波电路结构

流子二极管 MA4E1317 作为整流二极管。此型二极管具有正向导通电压降低、反向击穿电压高以及结电容小等优点。其具体参数为：导通电阻  $4\ \Omega$ 、结电容为  $0.02\ \text{pF}$ 、导通电压降为  $0.7\ \text{V}$ 、击穿电压为  $7\ \text{V}$ 。整流二极管工作时的能量损耗计算公式为

$$E_{\text{loss}} = \frac{V_b}{V_0 + V_b} \quad (3)$$

式中  $V_0$  表示输出负载的端电压。显然在输入功率不变的前提下， $V_0$  和负载的输入阻值成正比关系。由式(3)可以得出能耗与  $V_0$  成反比关系，而与负载没有直接联系。通常情况下二极管的反向电压升为反向击穿电压的  $0.46$  倍便不在随着端电压的升高而继续增大。这导致二极管的反向端电压大于反向击穿电压的  $0.46$  倍时，整流效率会与负载成反比关系。由上述分析，能够量化二极管整流电路在直流输出电压到达最大值  $4.55\ \text{V}$  时获得最高效率  $0.8$ ，此时输出直流电压为  $4.55 \times 2 = 9.1\ \text{V}$ ，此时负载阻值为

$$R_L = \frac{V_{\text{out}}^2}{\eta \times P_{\text{in}}} \approx 1.6\ \text{k}\Omega \quad (4)$$

将输入功率设定为  $18\ \text{dBm}$ ，当负载电阻为  $50\ \Omega$  时，此时变流效率约为  $0.4$ 。当负载电阻为  $1.6\ \text{k}\Omega$  时，输出电压为  $9\ \text{V}$ ，变流效率约为  $0.8$ 。当负载电阻继续增大，由于二极管的端电压不会继续增大，因此负载的端电压会继续维持在  $9.1\ \text{V}$ ，因此变流效率会减小。由此，当负载电阻为  $1.6\ \text{k}\Omega$  时，整流电路的效率最优。

将扇形带线引入整流电路中，针对匹配电路输出的3次谐波，在匹配电路内部设计了半径为  $r_3$  的扇形带线，这样在没有增加电路复杂度的前提下实现对奇次谐波的有效抑制。基于端口阻抗匹配的原则对扇形带线的半径的参数进行局部优化，以期获得最优的谐波抑制效果。得出的电路的主要整定参数如表1所示。

表1 滤波电路最优设计参数

参数类型	参数值
$r_1/\text{mm}$	5
$r_2/\text{mm}$	2.6
$r_3/\text{mm}$	1.4
$\alpha/(\text{ }^\circ)$	120
$R_L/\text{k}\Omega$	1.6

### 3 实验验证

首先基于图3完成实验电路的制作，实物如图4所示。

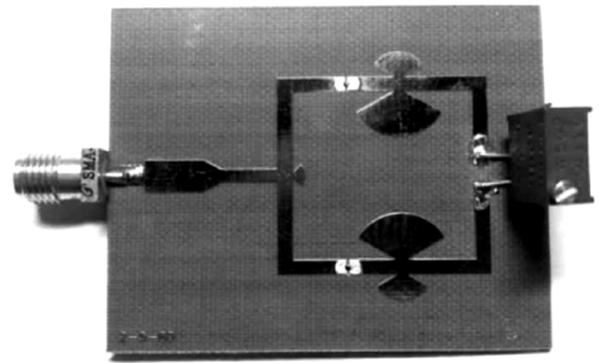


图4 实验电路

首先在输入功率为  $18\ \text{dBm}$ 、以  $5.8\ \text{GHz}$  为中心  $-15\ \text{dB}$  的射频信号输入的条件下，对电路谐波抑制进行仿真和实测对比测试，以验证实验电路的功能有效性。

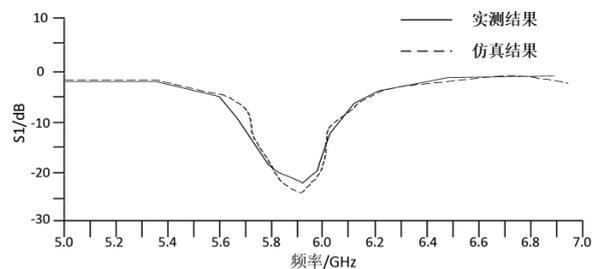


图5 实验电路仿真和实测结果

由图5可以看出实验电路的实测和仿真结果的拟合度较高，说明仿真方法的有效性和电路在  $18\ \text{dBm}$  的输入功率下所具有的谐波抑制性能。对半径为  $r_3$  的扇形带线引入电路前后的谐波抑制性能进行测试，对射频输入直流分量和谐波能量的分布对比仿真测试结果如图6所示。

由图6可以看出，在引入半径为  $r_3$  的扇形带线后，3次谐波的抑制到  $-50\ \text{dB}$ ，比未设置前有了约  $32\ \text{dB}$  的提升，这表明该扇形带线能够较好地3次谐波进行抑制。

对负载输出的基频和谐波能量分布以及输出电压的仿真结果分别如图7和图8所示。

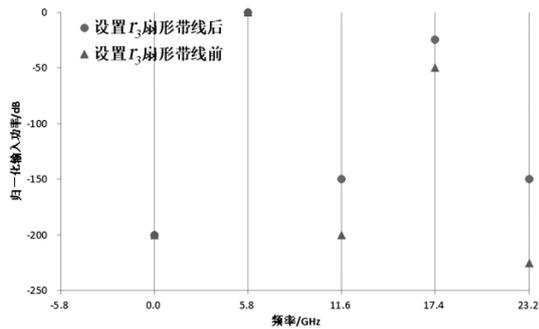


图6 射频输入的谐波能量分布对比

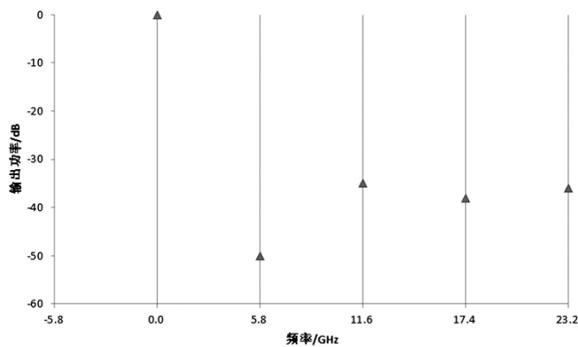


图7 输出信号的谐波能量分布

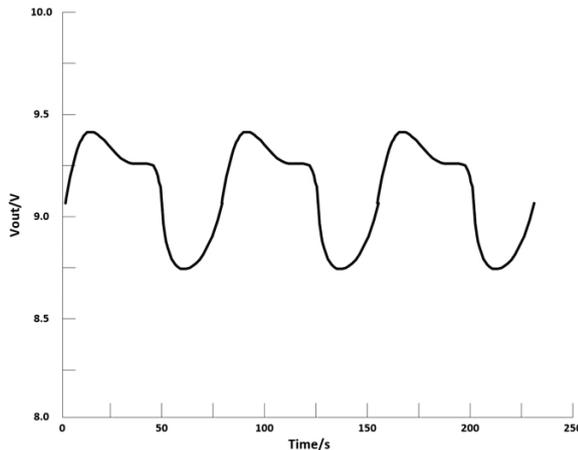


图8 输出电压仿真波形

由图7可以看出输出信号的高次谐波能量都在-35 dB以下,这表明滤波线路地滤波效果较好。图8给出了输出电压的仿真波形,可以得出其波形已经趋于平缓,波动量大约为4%,能够满足设计要求。

在1.6 kΩ负载电阻和5.8 GHz射频输入的实验条件下,对输出功率随输入功率的变化进行仿真测试,结果如图9所示。

对图9进行分析可知,当输入功率不超过18 dBm,仿真结果和实测结果的整流效率基本一致,并在

18 dBm处达到实测最大值0.782,这与理论最优整流效率0.8十分接近。当输入功率超过18 dBm,实测整流效率由于二极管反向电压不再上升而急剧下降。

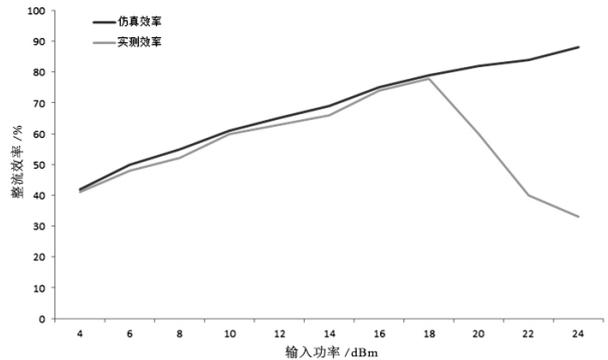


图9 整流效率随输入功率变化的仿真曲线

在5.725~5.875 GHz的范围内改变射频信号的频率,对整流效率进行仿真和实测,结果如图10所示。

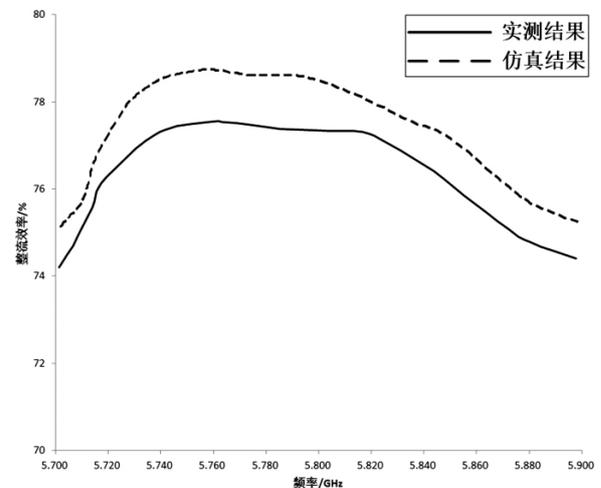


图10 整流效率与输入信号频率关系的仿真结果

由图10可知,在整个实验频段,实测的整流效率不低于74%,在整流过程中的能量损耗较小,满足设计要求。

## 4 结 语

首先对射频采集系统的谐波抑制原理进行阐述,并提出基于对称二极管整流电路的扇形带线的谐波抑制电路设计。该电路利用对称二极管整流电路对偶次谐波进行有效抑制,随后通过优化设计的扇形带线对3次谐波进行高效抑制。该设计的优势在于使得整流电路前端的带通滤波器得以省略,简

(下转第68页)

此四川地区经济未来仍然将不会有明显的复苏迹象。

### 3 结 语

1) 率先提出电力服务经济理念,从电力的视角系统分析区域及行业宏观经济形势,预测经济发展及电量需求走势,拓展了电力企业的服务模式,为在“电改”新形势下的“守土有责、守土负责、守土尽责”提供强有力的信息支撑。

2) 提出以数据驱动的方式,通过机器学习方法深度挖掘多粒度多维度的用电量与经济数据之间的相关关系,发挥了电力大数据应用的先行示范作用。下一步,将采用增量学习方法对预测模型进行迭代优化,促进景气指数准确率反馈机制逐步完善,预测准确率持续提升。

### 参考文献

- [1] 王金明,程建华,杨晓光. SW型先行景气指数建设的实证研究[J]. 中国管理科学, 2007, 15(4): 116-123.
- [2] 韩艾,郑桂环,汪寿阳. 广义动态因子模型在景气指数构建中的应用——中国金融周期景气分析[J]. 系统工程理论与实践, 2010, 30(5): 803-811.
- [3] 徐鑫,谌贻庆. 基于SVAR模型的消费者信心与宏观经济景气关系实证研究[J]. 商业经济研究, 2012(17): 26-27.
- [4] 高铁梅,王金明,陈飞. 中国转轨时期经济增长周期波动特征的实证分析[J]. 财经问题研究, 2009(1): 22-29.

作者简介:

李赋欣(1982),高级工程师,从事电力营销、数据分析工作。

(收稿日期:2018-06-06)

(上接第63页)

化了电路结构,也提高了电路的工作稳定性。实验证明,该电路在试验条件下的整流效率能够达到78.2%,且具有良好的输入信号频率适应性和较好的工程实用价值。

### 参考文献

- [1] 涂春鸣,杨义,肖凡,等. 非线性负载下微电网主逆变器输出侧电能质量控制策略[J/OL]. 电工技术学报, 2017: 1-9. [2017-10-39].
- [2] 刘洋,左涛. 增强超导滤波器谐波抑制能力的方法[J]. 低温与超导, 2017, 45(8): 61-63.
- [3] 袁鼎峰,王建华,夏海平,等. 一种高效率的射频能量收集器[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版), 2017, 31(3): 344-349.
- [4] 龚圣高,任瑾. 针对直流型负载的有源电力滤波技术研究[J]. 自动化应用, 2017, (6): 122-124.
- [5] 徐雷钧,白雪,潘祯雯,等. 传感器节点自主供电的环境混合能量收集系统设计[J]. 农业工程学报, 2017, 33(8): 147-152.
- [6] 池凯凯,林一民,李燕君,等. 射频能量捕获无线传感网中占空比最佳的能量源布置方法[J]. 计算机科学, 2017, 44(3): 128-131.
- [7] 陈奉云,国云川,徐锐敏. 一种宽带无源二倍频器MMIC的研究[J]. 微波学报, 2016, 32(S2): 376-379.
- [8] 徐力翔,张晓红,游彬,等. 环境WiFi能量采集系统的

匹配网络与整流电路设计[J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版), 2017, 9(1): 92-96.

- [9] 池凯凯,朱留栓,程珍,等. 射频能量捕获异构无线传感网的能量源最少化布置方法[J]. 计算机科学, 2017, 44(1): 140-144.
- [10] 许加柱,祁琦,梁崇淦,等. 紧凑式滤波器及其效果分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2016, 28(11): 14-19.
- [11] 李美苓,谢生,毛陆虹. 新型无源UHF RFID双端口标签设计[J]. 传感器与微系统, 2016, 35(8): 90-93.
- [12] 许胜,费树岷,赵剑锋,等. 多模块APF并联系统高频谐波环流分析与控制[J]. 电工技术学报, 2016, 31(5): 60-68.
- [13] 艾明贵,梁显锋. 一种小型化的超宽带微带带通滤波器的设计[J]. 电子设计工程, 2015, 23(24): 113-115.
- [14] 魏海啸,王军,董铁孝. 单调谐滤波器参数设计及其应用[J]. 电子设计工程, 2015, 23(2): 78-80.
- [15] 储江龙,李玉玲,杨仕友. 无接触电能传输系统的高效E类射频功放设计[J]. 电工电能新技术, 2014, 33(4): 1-5.
- [16] 李奥博,耿军平,金荣洪,等. 一种新型双二极管5.8 GHz谐波抑制的整流电路[J]. 中国电子科学研究院学报, 2012, 7(5): 538-543.

作者简介:

孟祥麟(1997),本科,主要研究方向为电气工程及其自动化。

(收稿日期:2018-01-06)