

一种全桥式高功率放大器

付继伟, 杜亮

(中国船舶重工集团公司第710研究所, 湖北宜昌 443003)

摘要: 用集成功率放大器驱动大功率三极管构成推挽功率放大器, 两路推挽功率放大单元可以组合构成全桥式功率放大器, 这种放大器大量使用大功率三极管等分立元件, 能够提高电路总的额定功率, 并且使元件布局分散有利于实现散热设计, 工程样机研制证明该方法适用。水库测试结果表明: 驱动某大型双谐振压电陶瓷换能器, 功放样机输出连续信号时, 在 5 kHz 左右输出电功率达到 1600 W 以上。单频信号工作时观察信号波形, 信号畸变与失真较小。根据试验与测试结果分析了末级三极管上的功率耗散情况, 验证了工程样机在散热设计方面的有效性。

关键词: 推挽功率放大器; 全桥式功率放大器; 散热设计

中图分类号: TB533

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2015)-05-0472-05

DOI 编码: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2015.05.017

A kind of high power full bridge amplifier circuit

FU Ji-wei, DU Liang

(Yichang Research institute of Testing Technique, Yichang 443003, Hubei, China)

Abstract: The push-pull power amplifier is formed by integrated power amplifier and high-power transistor. Two push-pull power amplifier circuits can be used to design half bridge amplifier. This kind of amplifiers use lots of power transistors, and this is useful to improve mean power. Layout of the components is also critical to thermal design. Results indicate that the method is available in engineering applications. Test results in reservoir demonstrate that: to drive piezoelectric transducer, the output power of the amplifier reaches 1600 W at 5 kHz. Waveform at a single frequency is slightly distorted. By analyzing the dissipation power of the transistor base on the test result, it is demonstrated that the thermal design is effective.

Key words: push-pull power amplifier, half bridge amplifier, thermal design

0 引言

远程水声通信或水声遥控系统通常要求较大的发射功率。目前常用的功率放大器主要有两种: 开关功放与线性功放。相比较而言, 开关功放工作效率高、功率密集、高频特性好; 线性功放发射电压可调、适应环境方便、工作稳定可靠。而且容易与前级调制电路匹配, 不易因脉冲产生谐波干扰, 能够取得比较纯净的功率信号。因此, 在系统效率限制条件允许的情况下, 为追求信号输出幅度可调, 选择线性功率放大器能获得比较好的适用性, 而且, 若电路采用桥式功放结构, 适当增加相同的功放电路, 同样能实现输出较高的发射功率。

1 结构与工作原理

基本的半桥式功放电路结构如图 1 所示。

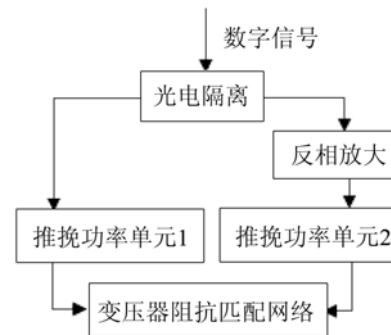


图 1 半桥式功率放大器结构示意图
Fig.1 Half bridge power amplifier

图 1 中所示, 前级数字电路产生的信号经过线性光电隔离电路后, 一路通过反相放大器得到反相信号, 它与另一路信号分别驱动下级各自对应的推挽功率单元, 推挽功率单元 1、2 分别将两路相互反相的信号进行功率放大, 进入变压器构成的阻抗

收稿日期: 2014-09-04; 修回日期: 2014-12-08

基金项目: 国家 863 计划项目(2007AA09Z204)

作者简介: 付继伟(1979-), 男, 山东龙口人, 高级工程师, 研究方向为水声设备研制。

通讯作者: 付继伟, E-mail: bug813@sina.com

匹配网络，构成桥式电路结构，驱动换能器发射声信号。

由于电路采用逐级功率放大的形式，为避免末级强功率信号对前级小信号电路造成干扰，应当谨慎地处理小信号电路与后级强功率电路之间的隔离问题：功放电路的输入级采用光电隔离电路进行信号传输与隔离；前后级电路采用各自独立的直流电源供电；直流电源应当配置完善的电源滤波电路。

2 电路分析

2.1 单元电路分析

2.1.1 光电隔离电路

为了减小后级大功率电路对前级弱信号电路的干扰，输入级采用安捷伦光耦芯片 HCNR201 构成线性光电隔离电路^[1]，如图 2 所示。

图 2 中前部分采用专供数字电路的+5 V 供电，三极管构成的外围电路将发射控制信号进行放大，驱动 HCNR201 内部的发光二极管发光；电路的后部分由供模拟电路的+5 V 供电，HCNR201 内部光敏二极管接收到光信号后使后级电路产生相应的电信号，实现信号的隔离与传输。

2.1.2 推挽功率单元电路

构成其中半边桥路的推挽功率单元如图 3 所示。

构成半边桥路的推挽功率放大器，具体电路结构采用 BB 公司的集成功率放大器 OPA512SM (TI 公司)去驱动 NPN 三极管 MJ14002 与 PNP 三极管 MJ14003，两种极性的三极管各为三个并联以增加输出电流，它们共同构成带有反馈网络的推挽放大器，MJ14002、MJ14003 是安森美公司生产的高电流大功率三极管，额定耗散功率可达 300 W，三管

并联共六个管子总额定耗散功率达到 1800 W。

图 4 是半边桥式功率放大器末级的简化电路，由两个推挽放大器单元与变压器组成，图中省略均流电阻， Q_A 、 Q_B 、 Q_C 、 Q_D 分别代表经过并联的功率管，因此该系统理论上总额定耗散功率可达到 3600 W。

电路设计要保证用作驱动功率放大器的 OPA512SM 在安全线性工作区内的输出电流，足以驱动末级推挽电路。当电路设计为±32 V 供电时，因查得 MJ14002、MJ14003 手册中安全工作曲线，直流安全额定电流约为 9A 左右^[2](单边电源电流)，而这两种功率三极管直流电流增益典型值为 100。可知极限情况下，在每个信号周期内驱动半边三个管子导通时需要的基极电流是：

$$A_{\max} = \frac{9A}{100} \times 3 = 0.27 A \quad (1)$$

而由 OPA512SM 手册安全工作区曲线^[3]可知，±32 V 供电时、通常散热与温度条件下，其输出电流达到 0.8 A 左右是没有问题的，有足够大的设计空间。

由于推挽功率单元电路存在负反馈网络，使推挽电路工作在闭环状态，从而限制了增益倍数，而且 OPA512SM 芯片本身设计的通过外围电阻进行限流保护的功能，保证了电路稳定性：

$$R_{CL} \approx 0.65V_{CL} / I_{CL} \quad (2)$$

其中： R_{CL} 代表限流电阻阻值，单位是 Ω ； I_{CL} 代表集成功放芯片内部电流上限值，单位是 A。

图 3 电路中的限流电阻 R100、R116 采用阻值为 1 Ω 的线绕功率电阻。电路中的均流电阻都采用的是带金属屏蔽散热套的高精度大功率线绕电阻。OPA512SM 与 MJ14002、MJ14003 构成的推挽功率放大器，采用了负反馈的电路结构，稳定性与可靠

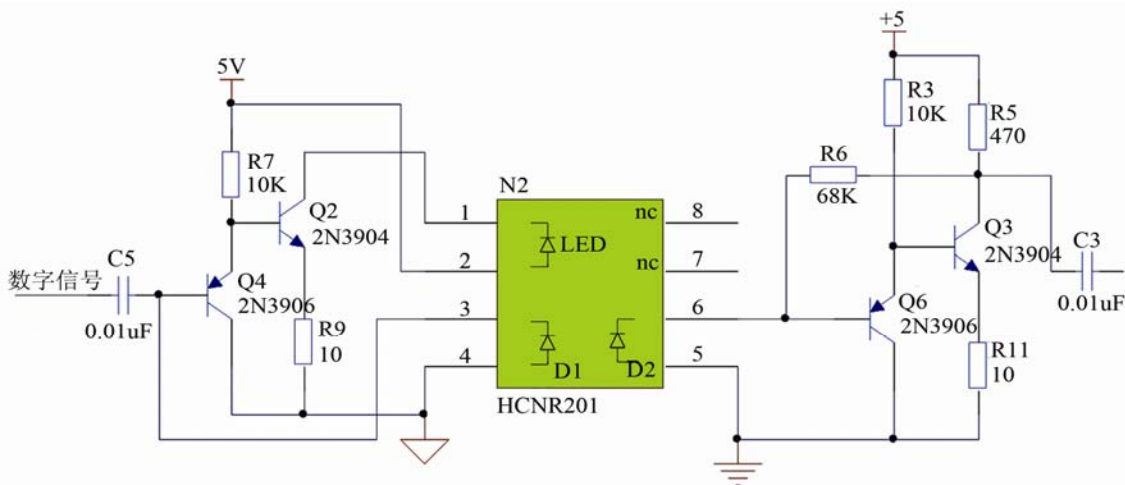


图 2 线性光电隔离电路

Fig.2 Linear optocoupler circuit t

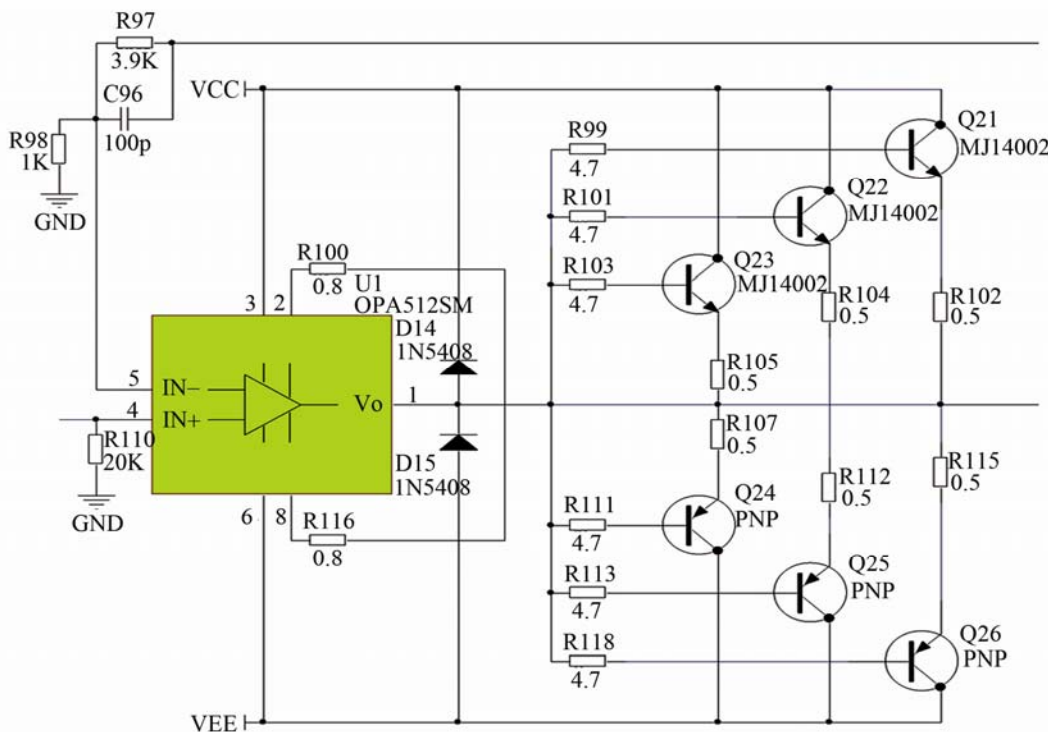


图3 推挽功率单元 1

Fig.3 Push-pull power amplifier circuit 1

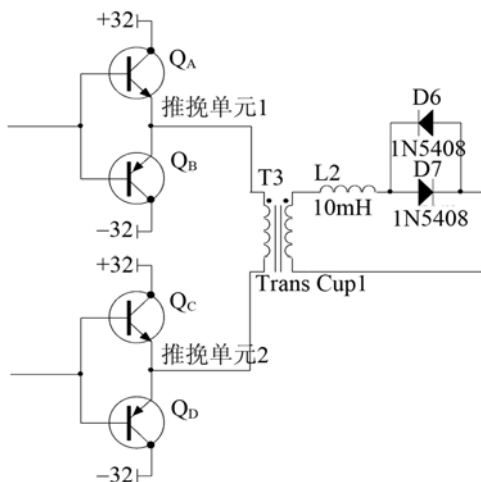


图4 推挽单元构成半桥功放末级的简化电路

Fig.4 Half bridge amplifier formed by push-pull amplifier circuit

性较高。而且由于主要功率输出级采用了分立元件，各功率元件之间布局相对分散，对散热设计是有利的，这样容易实现电路单元的分体模块化设计，且检测维修也方便。

电路板元器件布局安装时，功率管与散热器固定安装在电路板上，可采用空心尼龙或有机玻璃支柱将功率元件与电路板悬空一定的距离，避免功率元件工作时散发的热量引起印制板温度过分升高。有资料^[4]显示：常用的印制板材料，如环氧树脂层压玻璃纤维布板，受热时，在厚度方向上的膨胀比平面的膨胀大七倍左右，这就在多层压板的过孔

和过孔部件的焊接连接上施加了相当大的热应力。经过加热和冷却循环的多次反复，最终这些连接会断开，产生微小间隙。损坏发生在中间层，这种处于不在顶层与底层的中间层^[4]呈现的是“幽灵”故障现象：电路板温升故障出现，当关闭电源想查找故障时，随着板的冷却，变形断裂的触点自动接上，故障又莫名其妙地消失了。因此应当极力避免功率元件与散热件的热量过多地传递到电路板材料上。

2.1.3 变压器阻抗匹配网络

阻抗匹配网络主要由变压器、电感、二极管等构成，其中电感起到调谐的作用，二极管用于收发转换保护。要注意的是变压器的设计，一方面变压器整体设计需要满足大功率传输的要求，避免磁饱和现象出现；另一方面，变压器的低频传输响应特性要好，由等效电路可知变压器的低频截止频率为

$$f_{CL} = \frac{R_s}{2\pi L_p} = \frac{(R_s + r_l)R_L}{2\pi L_p(R_s + r_l + R_L)}$$

式中： R_s 为信号源电阻； r_l 为线圈电阻； R_L 为负载电阻； L_p 为激磁电感，初级线圈的激磁电感 L_p 要达到足够大的要求^[5]。设计中采用国内某公司生产的高磁导率 PM130 型大功率铁氧体磁罐，AL 值为 $10000 \pm 20\%$ nH/N²，外径 ϕ 为 130 mm，组装完毕的变压器如图 5 所示。最大工作温度是励磁导线的唯一限制，励磁导线的标准是由温度标定的，其温

度范围是 105~220 °C，见表 1。励磁导线的绝缘薄膜或绝缘漆敷在铜导线的表面，这个绝缘层是最容易由于过热负荷而破碎^[6]。所以，绝缘薄膜的选择对于导线的寿命是非常关键的。当励磁导线遭受到过热负荷或在额定温度以上的高温时，导线的寿命会大大降低，因此，对于过热点必须非常小心，以便不降低变压器的整体工作寿命。



图 5 单路推挽单元电路板与变压器

Fig.5 Transformer and the front-side of circuit board

表 1 励磁导线表面绝缘材料

Table 1 Insulation materials of conductor surface in field-winding

温度/°C	绝缘类型	介电常数	NEMA 标准
105	聚氨基甲酸酯	6.20	MW-2-C
105	聚醋酸甲基乙烯酯	3.71	MW-15-C
130	聚氨基甲酸酯-尼龙	6.20	MW-28-C
155	聚氨基甲酸酯-155	6.20	MW-79-C
180	可焊接的聚酯	3.95	MW-77-C
200	聚酯酰胺(酰亚胺)	4.55	MW-35-C
220	聚酰亚胺	3.90	MW-16-C

2.1.4 电源滤波电路

功率放大电路，本质上是将直流电源的能量转化为发射信号的能量，要获得干净的发射信号，电源噪声应当得到抑制。因此电源滤波需要引起足够的重视，前述要求输入级的小信号电路与末级的强功率电路部分应当分别由独立的直流电源供电，同时采用共模滤波与差模滤波结合的电路滤波电路。

电路中的共模扼流圈 T1，在高磁导率的环形闭合磁芯上双线并绕并同向连接，使干扰电流流经两个绕组时产生的磁场同向相加，扼流圈对于干扰电流呈现出较大的感性，因此达到阻隔的效果，而且环形磁芯有存储磁能的功能，有利于抑制 LC 滤波器接入稳压电源输出端引起的接通瞬间响应的起伏效应。电源滤波器的接地应当注意，图 6 中扼流圈 T1 左侧的接地线应当与电源地线联接，T1 左侧的接地线应当与交流信号参考地线联接。电源滤波的实际使用效果应当经过具体实验验证。

3 测试情况与结果分析

3.1 水库测试情况

将焊装调试完毕的半桥功率放大器，用安捷伦

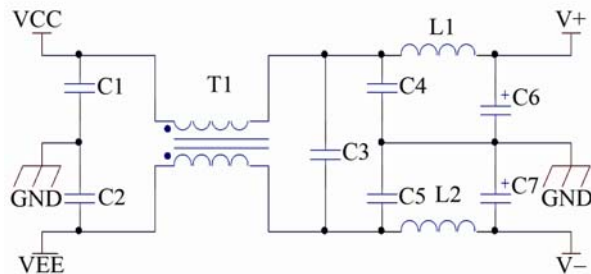


图 6 电源滤波电路原理图
Fig.6 Main power filter circuit

33120 函数发生器作为信号源，采用大规模动力电源(10000 W 直流电源)供电，驱动某大型双谐振压电换能器发射声信号。测量所用的水听器是 B&K 公司 8104 型标准水听器，测量放大器是 B&K2636，滤波器 B&K1617，信号源采用的是安捷伦 33120A 函数信号发生器。2013 年 4 月湖北隔河岩水库(平均水深 90 m，开阔水域半径约 2.5 km)测试发射声源级(此处特指声压级)，使用单频正弦信号，每个频点信号发射持续时间 2 s，得测试结果曲线如图 7 所示。

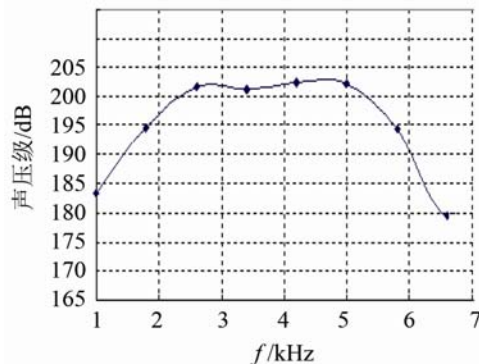


图 7 发射声压级测试曲线
Fig.7 Measured curve of transmitting sound pressure level

由图 7 可见，在 5 kHz 频点左右处的声压级达到 202 dB 左右，由于换能器自身体积较大，考虑其指向性，取指向性系数 DI 为 6，求得发射声功率。声压级与声功率之间的转化公式为

$$SL=10\lg P_a+170.8+DI \quad (3)$$

其中， SL 为声压级， P_a 为声功率。

由式(3)得 $202=10\lg P_a+170.8+6$ ，计算得发射声功率： $P_a=331$ W。

由于换能器的电声转换效率在该频段约为 20%，可知功率放大器发射连续信号的输出功率约为 1655 W。而电源输出显示为 ± 32 V、40 A，可知该半桥功率放大器的效率约为 65%。电路效率不算高，但对输入到换能器的信号进行监视，可发现波形失真与畸变较小、信号纯净且谐波较少。见图 8。

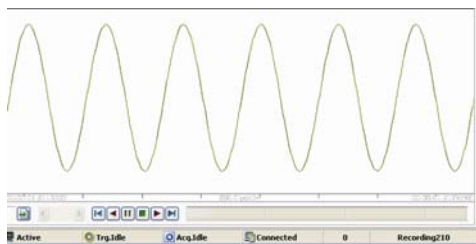


图 8 换能器输入级 5 kHz 信号波形采样
Fig.8 Signal waveform at transducer input(5 kHz)

3.2 关于散热设计的分析与验证

压电陶瓷换能器的系统阻抗并非呈纯阻, 对于电容性负载, 电压与电流的关系是电流超前于负载电压 $\pi/2$, 当电流是峰值时, 负载电压是零, 这就意味着功放必定在导通功率三极管两端的电压是满幅, 对于峰值电流的负半周为 $V_s - V_{ces}$, 其中, V_s 为电源电压, V_{ces} 为功放管的饱和压降, 提供峰值电流。这样功放的输出功率为 0 W, 而来自电源的能量全部加载在功率三极管上, 此时管子上的损耗达到最大值。与电阻性负载相比, 电抗性负载的损耗很大^[7]。因此, 直接测量功率管的实际耗散功率是十分困难的, 而且负载特性不同时, 功率管的具体工作特性也是不同的。

基于这点, 在水库试验中采取的发射信号为单频正弦信号, 发射持续时间为 2 s, 尝试根据试验测试的结果逆向对电路各部分平均功率分配进行估算, 验证散热件的选取与设计能否满足要求。

已知在这种设定的极限试验条件下, 功率晶体管耗散功率与变压器上的功率损失之和为

$$P = P_{\text{supple}} - P_{\text{load}} = VI - 1655 \text{ W} = 64 \text{ V} \cdot 40 \text{ A} - 1655 \text{ W} = 905 \text{ W}$$

变压器的功率转化效率估计值为 90%, 则变压器上的功率损耗(磁心损耗与绕组铜损之和)为

$$P_1 = \frac{P_{\text{load}}}{90\%} - P_{\text{load}} = \frac{1655 \text{ W}}{90\%} - 1655 \text{ W} = 183 \text{ W}$$

功率晶体管上的耗散功率为

$$P_2 = P - P_1 = 905 \text{ W} - 183 \text{ W} = 722 \text{ W}$$

均摊在每个功率管上的平均耗散功率为

$$P_{\text{ave}} = \frac{P_2}{12} = \frac{722 \text{ W}}{12} = 60.2 \text{ W}$$

查阅功率三极管 MJ14002 与 MJ14003 手册, T0-3 封装的热阻典型值 $R_{\theta jc}$ 为 $0.584 \text{ } ^\circ\text{C/W}$, 假定环境温度 T_0 为 $30 \text{ } ^\circ\text{C}$, 功率管上限工作温度 T_{max} 是 $125 \text{ } ^\circ\text{C}$, 而结点和散热器接触面之间的温差 ΔT 是热阻与热流的乘积:

$$\Delta T = R_{\theta jc} \cdot P_{\text{ave}} = 0.584 \text{ } ^\circ\text{C/W} \times 60.2 \text{ W} = 35.2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

散热器接触面上的温度限制为

$$T_h = T_{\text{max}} - \Delta T = 125 \text{ } ^\circ\text{C} - 35.2 \text{ } ^\circ\text{C} = 89.8 \text{ } ^\circ\text{C}$$

从散热器表面到空气环境温度之间的最大温差 ΔT_h 为

$$\Delta T_h = T_h - T_0 = 89.8 \text{ } ^\circ\text{C} - 30 \text{ } ^\circ\text{C} = 59.8 \text{ } ^\circ\text{C}$$

则要求散热器的热阻为

$$R_{\theta} = \frac{\Delta T_h}{Q} = \frac{59.8 \text{ } ^\circ\text{C}}{P_{\text{ave}} \text{ W}} = \frac{59.8 \text{ } ^\circ\text{C}}{60.2} = 0.99 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

满足这样条件的高效率散热器在市场上是有供应的。鉴于试验样机由于对体积尺寸有条件限制, 采用的是热阻标称值为 $0.75 \text{ } ^\circ\text{C/W}$ 的纯铜挤制散热器, 购置回来后自行将表面用石墨涂黑。安装时功率管与散热器的接触面要涂导热硅脂。

由于功率管自身的耗散功率较大, 大功率连续工作时自身结温上升很快, 机箱内单纯依靠散热器与空气自然流动进行散热很难达到理想效果, 为避免机箱温升长时间保持较高值, 应当在内部采用高效散热风扇、机箱侧壁设通风窗提高散热冷却效率。

4 结 论

先通过线性集成功率放大器驱动大功率三极管构成推挽功率放大器, 再将这种推挽功放相同的两路按照桥式电路的形式联接成新的功率放大器, 用其驱动压电换能器发射脉冲信号时的实际功率输出可观, 能达到 330 W 以上, 该放大输出的信号纯净、谐波少, 且电路稳定可靠, 调试维修简便, 也容易实现分体模块化设计。

参 考 文 献

- [1] HCN200/201. Agilent Technologies: 12.
- [2] MJ14002/MJ14003. High-Current Complementary Silicon Power Transistors, ON semiconductor Components Industries: 2.
- [3] OPA512. High Current High Power operational Amplifier, BURR-Brown Coporation (TEXAS INSTRUMENTS): 6.
- [4] (美) J. Michael Jacob 著. 功率电子学——原理与应用[M]. 蒋晓颖译. 1 版. 北京: 清华大学出版社, 2005: 130. Jacob J. Michael. Power electronics--Principles & Applications[M]. JIANG Xiaoying, translated. 1st edition. Beijing: Tsinghua University Press, 2005: 130.
- [5] 远坂俊昭. 测量电子电路设计——滤波器篇[M]. 彭军译. 1 版. 北京: 科学出版社, 155. Toshiaki Enzaka, PENG Jun. Circuit design for electronic measurement-filter[M]. PENG Jun, translated. 1st edition. Beijing: Science Press, 2006: 155.
- [6] (美) Colonel Wm, MCLyMAN T. 变压器与电感器设计手册 [M]. 龚绍文译. 3 版. 北京: 中国电力出版社, 2009: 126. Colonel Wm, MCLyMAN T. Transformer and Inductor Design Handbook[M]. GONG Shaowen, translated. 3rd edition. Beijing: China Electric Power Press, 2009: 126.
- [7] 刘海军, 高天赋, 曾娟. 换能器与功率放大器的最佳负载讨论[J]. 声学技术, 2009, 28(4): 145-148. LIU Haijun, GAO Tianfu, ZENG Juan, The optimal load concerning the power amplifier and the transducer[J]. Technical Acoustics, 2009, 28(4): 145-148.