

# 一种用于声呐发射机的超级电容 被动均压简易实用电路

文明, 张立强, 董浩

(上海船舶电子设备研究所, 上海 201108)

**摘要:** 超级电容器的性能不一致性会造成处于串联模式的电容组中个别电容器首先发生过压失效, 进而加速整个储能组的失效。现有的均压电路一般工作在线性状态, 电路也较复杂, 不便于调试和生产。介绍了一种仅由 5 个元器件组成的简易、实用、高效的开关型被动均压电路, 分析了其工作原理及均压特性。该电路在声呐发射机的储能电源中可长期使用, 很好地保护了超级电容组。

**关键词:** 均压电路; 超级电容; 声呐发射机; 等效串联内阻; 脉冲功率

中图分类号: TN710

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2015)-06-0562-04

DOI 编码: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2015.06.018

## Practical passive balancing circuit for super capacitor series in sonar transmitter

WEN Ming, ZHANG Li-qiang, DONG Hao

(Shanghai Marine Electronic Equipment Research Institute, Shanghai 201108, China)

**Abstract:** The differences between each super capacitor can result in over-voltage break down of individual capacitor, and then makes whole capacitor series invalid soon. Commonly used equalizing circuits often work in linear mode, and the circuit is complex, and not easy to debug and manufacture. A practical and high efficient circuit is designed for balancing the voltage on each capacitor in a series. This circuit works in switch mode and consists of only 5 components. So, it has been applied in the power supply circuits of sonar transmitter to protect capacitor series for a long time.

**Key words:** voltage equalizing; super capacitor; sonar transmitter; equivalent series resistance; pulse power

## 0 引言

超级电容器是一种新型储能装置, 电极巨大的表面积加上电荷间非常小的距离, 使其有很大的电容量, 可以从 1 F(法拉)至 5000 F。目前超级电容器根据电解液的不同分为水系和有机两种: 水系的超级电容器的额定电压为 1.4 V, 有机体系的为 2.3 V、2.5 V 和 2.7 V 三种。通过改进超级电容器的制造工艺, 改进原材料的品质, 超级电容器的性能正得到逐步改善, 但是没有材料的革命, 其耐压不会有大幅度的提高<sup>[1]</sup>。由于在应用中需要大电流充放电, 常需要将多个超级电容器串联起来形成电容组, 故串联起来的单个电容器上电压是否一致是至关重要的。

超级电容的电压不均衡主要是由容量偏差、漏

电流偏差和等效串联内阻(Equivalent Series Resistance, ESR)偏差等因素造成的。以容量偏差为例, 其差异性永不会趋于消失, 而是逐步恶化的。电容组中每个电容器流过的电流相同, 相对而言, 容量大者总是处于浅充浅放状态, 容量衰减缓慢, 寿命延长, 而容量小者总是处于过充过放状态, 容量衰减加快, 寿命缩短, 两者之间性能参数差异越来越大, 形成正反馈特性, 因小容量者提前失效, 故电容组寿命缩短。同样, 漏电流大的电容长时间静置后保持的电荷明显低于漏电流小的, ESR 大的电容在反复充放电后 ESR 会越来越大, 能放出的电荷越来越少, 这都相当于电容器的等效电容量减小。

作为一种储能部件, 超级电容在单体性能上的参差不齐并不全是缘于电容的生产技术问题, 即使严格控制每一道生产工艺使每只电容的内阻、容量一致, 使用一段时间以后, 也会产生差异, 使得超级电容的使用技术问题显得非常重要。

超级电容的使用寿命受多种因素影响, 如果电容组寿命低于单体平均寿命的一半以下, 可以推断

收稿日期: 2014-11-13; 修回日期: 2015-03-01

作者简介: 文明(1982-), 男, 工程师, 湖北当阳人, 研究方向为水声发射机和水声对抗。

通讯作者: 文明, E-mail: wein1210@sina.com

都是由于使用技术不当造成的，首要原因是过充和过放导致单体电容提前失效<sup>[2]</sup>。

### 1 现有的超级电容均压电路

现有的均压电路有被动均压电路和主动(动态)均压电路两种，前者是在单体电容电压超过设定的阈值电压时对其进行限幅，后者在整个充电过程中都对单体电容电压进行均衡。近年来还出现了一种非能量损耗性均压方法，能实现不同电容器间电荷的转移。

文献[1]介绍了一种实用的 2.5 V 额定电压超级电容的电压均衡电路，电路图如图 1 所示。

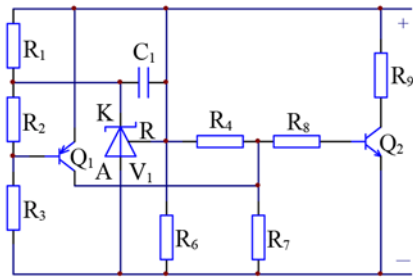


图 1 一种转折电压为 2.5V 的均压电路  
Fig.1 The balancing circuit with a 2.5V threshold

文献[1]指出：该电路的核心器件是 TL431，工作原理为：当电容上的电压小于 2.5 V 时，V<sub>1</sub> 的 K 端相当于开路(有约 400 μA 的漏电流)，基本不影响偏置电路 R<sub>1</sub>、R<sub>2</sub>、R<sub>3</sub> 的分压，该分压不能使 Q<sub>1</sub> 导通，因此 Q<sub>2</sub> 也截止，该电路处于高阻状态。当电容上的电压大于 2.5 V 时，由于 V<sub>1</sub> 内部放大器的作用，使 V<sub>1</sub> 的 K 端和 Q<sub>1</sub> 基极电压下降，Q<sub>1</sub> 进入放大状态，并驱动 Q<sub>2</sub> 导通进入放大状态，使充电电流流经该均压电路，防止电容过充。

该文献给出的电路的伏安特性如图 2 所示。

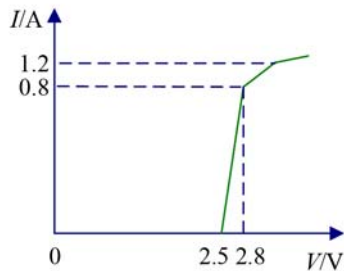


图 2 图 1 电路的伏安特性曲线  
Fig.2 The I-V curve of the circuit in Fig.1

单体电容上的电压超过 2.5 V 后，均压电路的伏安特性类似稳压二极管的特性，在一定程度上将端电压限制在“稳压值”以下。特别注意的是，应

使均压电路有足够的放电电流，防止电路进入 3 V 以上的工作区域。

该电路具有较理想的伏安特性，一般大容量超级电容器几乎全采用这种方式。该电路使用了 14 个元件，三极管 Q<sub>1</sub>、Q<sub>2</sub> 工作在线性状态，应用时电装和调试工作量较大。文献[3]采用运放和稳压二极管代替了 TL431，原理与上述电路相同。

另一种均压电路是主动式均压电路。一般由运放和推挽电路组成。这种电路在充放电过程中实现电容器电压均衡。但是这种电路容易出现振荡而工作不稳定，造成损耗过大的情况。当串联电容数量较多时该均压性能也会有降低。

非能量损耗型均压电路的原理是利用 DC-DC 变换器将电压较高的单体电容器的电荷转移到电压较低的单体电容中，文献[4]是对非能量损耗型均压电路的一个尝试，这种方法需要复杂的检测电路和控制算法，还未见成熟应用。

### 2 一种简易实用的被动均压电路

本文提出了一种简易实用的被动均压电路，只需要 5 个元器件就可实现一定程度上的均压，电路原理如图 3 所示，电路 PCB 如图 4 所示，元器件清单如表 1 所示，图 5 为电路中重要节点的波形图。

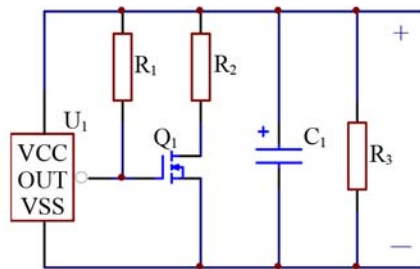


图 3 简易实用的被动均压电路  
Fig.3 A practical passive balancing circuit

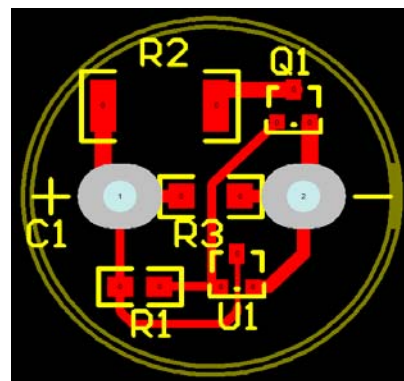
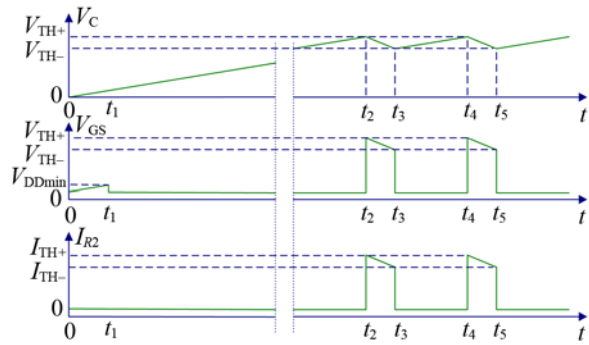


图 4 简易实用的被动均压电路 PCB  
Fig.4 PCB of the practical passive balancing circuit



(1)  $V_C$ 为超级电容上的电压；(2)  $V_{GS}$ 为MOS管栅源极电压；(3)  $I_{R2}$ 为泄放电流

图5 均压电路重要节点波形

Fig.5 Waveforms at some key points of the balancing circuit

表1 简易实用均压电路的元器件清单  
Table 1 BOM of the practical balancing circuit

位号	名称	规格	封装
R <sub>1</sub>	电阻	10 kΩ	0805
R <sub>2</sub>	电阻	2.7 Ω/2 W	2512
R <sub>3</sub>	电阻	1 kΩ	0805
C <sub>1</sub>	超级电容	90 F/2.7 V	Φ22x45
Q <sub>1</sub>	MOS管	IRLML2502	SOT-23
U <sub>1</sub>	IC	STM1061N25WX	SOT-23

电路中，核心器件 U<sub>1</sub> 为意法半导体公司的低功耗电压监控芯片 STM1061N25WX，工作电压范围为 0.7~6 V，下跳变电压  $V_{TH-}=2.5$  V，上跳变电压  $V_{TH+}=2.625$  V。该芯片 V<sub>CC</sub> 脚为供电引脚，V<sub>SS</sub> 脚为地，OUT 脚为漏极开路的监控输出引脚。R<sub>1</sub> 为上拉电阻，R<sub>2</sub> 为超级电容 C<sub>1</sub> 的放电电阻，Q<sub>1</sub> 为放电开关，受 U<sub>1</sub> 输出引脚控制。Q<sub>1</sub> 是逻辑电平的 N 沟道 MOS 管，额定工作电压 20 V，额定电流 4.2 A，阈值电压范围 0.6~1.2 V。

电容充电时，电容电压  $V_C$  从 0 V 逐渐充至满电压的过程中，电路中重要节点波形见图 5。

电路工作过程分析如下：

(a) 0~ $t_1$  时刻， $V_C < V_{CCmin}$  时，U<sub>1</sub> 还未进入工作状态，其输出即  $V_{GS} = V_C$ ，由于此时  $V_{GS} < V_{GS(th)min}$ ，Q<sub>1</sub> 截止， $I_{R2} = 0$ ；

(b)  $t_1 \sim t_2$  时刻前， $V_C \geq V_{CCmin}$  且  $V_C < V_{TH+}$  时，U<sub>1</sub> 输出低电平，Q<sub>1</sub> 仍截止，此时  $I_{R2} = 0$ ；

(c)  $t_2$  时刻时， $V_C = V_{TH+}$ ，U<sub>1</sub> 输出高电平，此时  $V_{GS} > V_{GS(th)max}$ ，Q<sub>1</sub> 导通，电容 C<sub>1</sub> 通过 R<sub>2</sub> 和 Q<sub>1</sub> 放电，放电电流  $I_{R2} = V_C/R_2$ ；

(d)  $t_2 \sim t_3$  时刻前，在  $V_C > V_{TH-}$ ，由于 U<sub>1</sub> 的滞回作用，电容 C<sub>1</sub> 会持续通过 R<sub>2</sub> 和 Q<sub>1</sub> 放电，若充电电流小于此放电电流，就会使  $V_C$  电压下降，确保不超过电容的额定电压；

(e)  $t_3 \sim t_4$  时刻， $V_C \leq V_{TH-}$ ，U<sub>1</sub> 输出低电平，电容继续充电，重复步骤(c)~(e)。

均压电路的伏安特性如图 6 所示。单体电容上的电压超过 2.625 V 后，均压电路的伏安特性呈现理想稳压二极管的特性，在一定程度上能将端电压限制在该阈值电压以下。放电开关导通后，若充电电流小于放电电流，电容器电压逐渐降低。电压低至 2.5 V 时，均压电路停止工作。

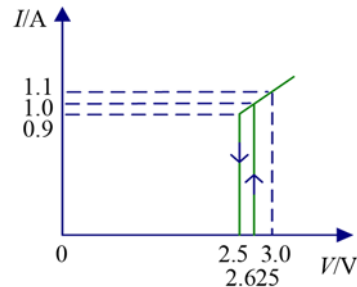


图6 简易实用的被动均压电路的伏安特性

Fig.6 The I-V curve of the practical balancing circuit

可以看出，该超压泄放电路工作在开关状态，具有较高的均压效率，调试也非常方便。

另外，由于电容单体漏电流的差异，也会导致各电容单体电压不均衡。为了减小因漏电流造成的电压不均衡，在 C<sub>1</sub> 两端并联一个电阻 R<sub>3</sub>，通过 R<sub>3</sub> 的泻放电流远大于电容的漏电流。该本文中超级电容的漏电流为 0.2 mA，因此选择了封装为 0805 的 1 kΩ 的电阻作为泻放电阻，其泻放电流约为 2.5 mA，远大于电容的漏电流，可以补偿因电容漏电流的差异而引起的电压不均衡。虽然该电阻产生了一定的损失，但提高了电容组长期工作的可靠性。

### 3 结论

被动均压电路通过检测单体电容电压来控制放电回路，当电压未达到阈值电压时，放电回路处于开路状态；电压超过阈值后放电回路开始导通，使部分或全部充电电流流经放电回路，防止电容过充。

本文设计了一种简易实用的超级电容均压电路，仅由 5 个元器件组成。该电路工作于开关模式，实现了串联电容组的超压泄放和漏电流的补偿，具有损耗小、均压效率高的优点。该电路应用于声呐发射机的储能电源中，24 个单体电容(包括本文介绍的均压电路)串联形成一组，10 组并联起来为发射机的功率放大器供电，总额定容量 37.5 F。储能电容组采用恒流源进行充电，充电电流 25 A，充电电压 55 V，发射机工作时储能组放电电流达到 160 A。多年来储能电容组稳定工作，显示出电路具有

较高的可靠性。

需要注意的是，均压电路都有最大均衡电流的限制，如果充电流大于均压电流，电容上的电压将继续升高，将会损坏均压电路和超级电容器。

### 参 考 文 献

- [1] 陈永真, 李锦. 电容器手册[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 629-630, 661-664.  
CHEN Yongzhen, LI Jin. Capacitor handbook[M]. Beijing: Science Press, 2008: 629-630, 661-664.
- [2] 陈守平, 张军, 方英民, 等. 动力电池组特性分析与均衡管理[J]. 电池工业, 2003, 8(6): 265-271.

- CHEN Shouping, ZHANG Jun, FANG Yingmin, et al. Peculiarity analysis and proportion management of power batteries[J]. Chinese Battery Industry, 2003, 8(6): 265-271.
- [3] 孟丽因, 陈永真, 宁武. 超级电容器串联应用中的均压问题及解决方案[J]. 辽宁工学院学报, 2005, 25(1): 1-2, 22.  
MENG Linan, CHEN Yongzhen, NING Wu. Solution to voltage balance of series ultra capacitor[J]. Journal of Liaoning Institute of Technology, 2005, 25(1): 1-2, 22.
- [4] 杨晶晶, 田永峰, 张晓, 等. 一种超级电容器组均压电路研究[J]. 电子技术与应用, 2013, 39(12): 68-71.  
YANG Jingjing, TIAN Yongfeng, ZHANG Xiao, et al. Study on a voltage balancing circuit for supercapacitor series[J]. Application of Electronic Technique, 2013, 39(12): 68-71.

## 海洋声学技术与水下考古交叉论坛在沪召开

由中国科学院上海交叉科学研究中心主办，中国科学院声学研究所东海研究站承办的第八十期交叉学科论坛——“海洋声学技术与水下考古交叉研究”于 2015 年 11 月 18 日在上海交叉科学研究中心召开。

本次论坛由中国科学院声学研究所张仁和院士，中国科学院声学研究所东海研究站胡长青研究员担任共同执行主席。中国科学院上海交叉学科研究中心章文俊主任，中国国家博物馆杨林研究员、高华光馆员，西北工业大学杨益新教授，国家海洋局第二海洋研究所潘国富研究员、苟争慷高级工程师，中国海洋大学王宁教授，上海海事大学时平教授，中船重工集团第 726 所李颂文研究员，中国科学院声学研究所东海研究站王润田研究员等 50 余位专家、学者和硕博研究生参加了本次论坛。

张仁和院士代表大会致开幕词。他主要向与会专家介绍了论坛主旨、举办目的及中心议题等情况，并希望国内外各学科的专家、学者能加强合作，不断创新，为进一步探索“海底世界”发挥各方力量，实现优势互补，为贯彻、落实“一带一路”战略提供技术保障。

章文俊主任代表主办单位致辞。他对各位专家、学者的到来表示欢迎，对长期以来关心、支持、帮助交叉中心建设的科学家们表示感谢。同时，他就交叉中心的概况及论坛举办情况做了详细的介绍。

本次论坛大致分为三个方向，包括社会科学、自然科学和技术科学等研究方向，集中进行了 8 个学术报告。参会人员进行了广泛的学术交流和讨论，为年轻科研骨干及研究生搭建了一个很好的互动平台。

在水下考古推进方面，与会人员深入探讨沉船区域海底地貌、海底底质特性、海底底质类别等，为发现有价值的古代沉船，提供有力的数据支撑，促进了现代海上丝绸之路经济带的建设，同时增强了中国与海上丝绸之路沿线国家的经济技术合作与交流。

在海洋声学研究方面，本次论坛开展了海底管线探测、高频单波束声呐、海底底质分类、侧扫声呐、声学地层剖面仪、传感器阵列超指向性研究工作的交流，有利于促进我国声学领域的技术发展。

在海洋文化交流方面，以“一带一路”为方针政策，通过与上海海事大学海洋文化研究所、上海郑和研究中心、中国国家博物馆等单位交流探讨，辅以合作和互访，宣传了丝路文化。本次论坛以海洋历史文化、中国水下考古现状、科技考古等主题展开讨论，在了解历史背景的同时增进了各单位之间的文化交流与合作。

在数据共享方面，通过本论坛，各单位共同针对沉船探测所获得的有关海洋数据资料进行深入探讨，为我国水下考古提供有力的线索，对将来各单位协同创新、共赢合作具有十分重要的意义。

在衍生学科交叉探讨方面，各单位以我国水下考古研究为主线，通过历史记载航线分析、探测设备应用研究、各海域海底地质数据统计分析等，使得各相关学科交叉融合。

与会代表认为此次论坛对理清思路、明确重点意义很大。通过交流，为今后各单位开展水下考古的创新突破和技术开发储备了关键思路，为促进各单位声学装备技术攻关积累了实践经验，为推动我国海洋声学技术与水下考古融合发展奠定了良好的基础。