

## 《星载一体化》文章导读

金光

中国科学院长春光学精密机械与物理研究所新技术研究室

人类对宇宙的探索自古有之,随着科技的不断进步,航天技术也随之取得了飞跃的发展。自前苏联发射了世界上第一颗人造卫星以来,各种用途的卫星层出不穷,并已广泛应用于科学研究、宇宙观测、气象观测、国际通信等许多领域。经过约50余年的发展,卫星及相关技术日趋成熟,功能日趋完善,涵盖了国际卫星电话、GPS导航、电视转播、天气预报、城市规划、防灾与减灾等方面,成为人类不可或缺的重要工具,在人们生产生活中发挥着重要的作用。

传统卫星系统主要可分为两大部分,一部分是有特定用途的载荷,另一部分就是卫星平台。所谓载荷就是装载在卫星中的专用设备,如空间相机等;而卫星平台就是保证有效载荷在轨正常运行的软硬件系统。基于这种结构的卫星一般体积比较大,系统结构相对松散,研制周期长,无法满足卫星低成本、高可靠性、研制周期短、功能密度高等要求。星载一体化的思想可以解决上述问题,它是以载荷为中心而展开设计,设计时兼顾载荷与支撑服务各分系统的有机结合,从而使系统整体性能最优。

本专题的论文均来源于星载一体化课题,涉及星载一体化的电源系统设计,光学载荷的消杂光设计,结构设计,机构设计等多方面的相关内容。

《天上电池的均衡控制》一文,在对电池不均衡特性进行研究的基础上,设计了一种天上电池均衡控制的方法,此方法可对整组电池在串联情况下充电与放电的单体电池进行均衡。实验证明了此种方法可使电池的不均衡度在充电和放电结束后下降到原来的13.42%和9.39%。

《大型离轴三反相机桁架式主支撑结构的设计与优化》一文,根据大型离轴三反空间相机的特点,研究了其主支撑结构的形式。应用Rayleigh法推导了桁架式主支撑结构的基频计算公式,分析了桁架杆间夹角对其基频的影响,并以此为基础研究了其优化方法。据此设计优化了某预研空间相机的桁架式主支撑结构,其基频达到146 Hz。

《空间相机直线调焦机构的设计》一文,分析了空间相机的3种调焦方式及调焦机构设计的基本原则,并针对某空间相机的要求设计了一种直线调焦机构,利用滚珠丝杠将旋转运动转化为直线运动,并结合直线导轨约束运动形式,采用绝对式编码器检测位移,有效地减少过多的传动环节所带来的传动误差。通过对实验数据统计分析及残差分析可以看出,直线调焦机构的开环调焦精度为0.0025 mm,闭环调焦的精度可达到0.0015 mm。

《空间相机调偏流机构的设计与控制》一文,对空间相机像移补偿方法进行了研究。分析了偏流角产生的原因及调整原理,设计了高精密度像移补偿机构。系统采用正弦机构作为传动形式,以80C31作为偏流角控制器,以步进电机为执行元件,以绝对式编码器作为偏流角测量元件,实现了偏流角位置闭环控制。由于偏流角在 $-4^{\circ}\sim+4^{\circ}$ 调整,以 $-4^{\circ}$ 、 $-2^{\circ}$ 、 $0^{\circ}$ 、 $+2^{\circ}$ 、 $+4^{\circ}$ 作为假想偏流角期望值,用编码器测得了10组偏流角调整的实际数据。实验结果表明:偏流角控制系统精度可达到 $2'$ ,满足控制系统精度 $<3'$ 的要求。

《空间相机消杂光设计及仿真》一文,研究了基于同轴三反系统的空间相机,在内外镜筒的设计中参考了卡塞格林系统的设计方法并利用CAD建模进行辅助设计。利用计算机分析得到了空间相机的杂光系数和点源透射比的曲线,子午方向 $+10^{\circ}$ 入射杂光在像面造成的杂光系数在0.35%以下,0~20°的非成像视场点源透射比在 $10^{-6}$ 量级。

文章编号 1004-924X(2009)03-0596-07

## 天上电池的均衡控制

徐拓奇<sup>1,2</sup>,金光<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院,北京 100049)

**摘要:**同组蓄电池中单体电池品质上的不均衡是影响卫星电源系统性能的最重要因素之一。本文针对单体电池的不均衡度建立了数学模型,基于此模型研究了电池的不均衡特性。提出了一种天上电池均衡控制的方法,此方法可在充电与放电状态下,根据每节电池各自的荷电状态对整组串联电池组进行有效均衡。详细说明了基于此种方法的均衡器的硬件电路设计方案和软件设计思想,并且给出了基于51单片机的软件流程图。最后实验证明了通过此种方法可使电池在充电和放电结束后的不均衡度下降到原来的了13.42%和9.39%。实验结果表明此种天上电池均衡控制技术可有效降低同组电池的不均衡度。

**关键词:**卫星;电源系统;电池均衡

**中图分类号:** V474.1; V442.2 **文献标识码:** A

**收稿日期:** 2008-06-14; **修订日期:** 2008-07-12.

**基金项目:** 国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2007AA12Z113)

# Equalization of batteries in satellite

XU Tuo-qi<sup>1,2</sup>, JIN Guang<sup>1</sup>

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The disequality of cells in the same battery team is one of the main factors influencing on the performance of satellite power system. This paper discussed the disequalization of a battery, and established a mathematical model. Based on the model, a new method to control battery equalization was present to counterpoise the energy of in the same battery team in series both for charging state and discharging state. The design ideas and design schemes of the hardware and the software of this equalizer were introduced in detail and the software flow charts of equalizer in charging state and discharging state were given. Finally an experiment was carried out to testify that the method can decrease the inequality of in the same battery team to 13.42 % (charging) and 9.39% (discharging) as compared with those of battery systems without equalization.

**Key words:** power system; satellite; battery equalization

## 1 引言

卫星电源系统是卫星服务系统中重要组成部分之一,它的可靠性和寿命很大程度上决定了整个卫星的可靠性和寿命。卫星电源系统中蓄电池多采用串联方式连接,由于各单块蓄电池在制造过程中,初始容量、电压、内阻以及蓄电池组中各单块蓄电池温度等方面不完全相同<sup>[1]</sup>,当一些单元电池被充满时另一些电池尚需继续充电,这使得被充满电的单元发生过充电现象,从而影响卫星电源系统的寿命。相反,如果蓄电池长期充电不足,会使蓄电池容量下降,内阻增加。如果在星上使用时无法进行补偿,则随着时间的推移,单体之间的差异将会逐渐拉大<sup>[2-3]</sup>,势必造成某块蓄电池的过充电或某块蓄电池的过放电。过充和过放不仅影响电池的使用寿命,损坏电池,而且还可能产生大量的热量引起电池燃烧或爆炸,因此在星上采取均衡技术来补偿电池性能的差异是非常必要的<sup>[3-4]</sup>。

电池的荷电状态 SOC(State of Charge)是性能差异的集中反映,均衡电池的 SOC 是最有效的均衡措施,但是由于 SOC 受放电率、温度、循环次

数等多个因素的影响,其估算精度不高<sup>[5-6]</sup>,而且体积、重量都无法满足星上对电池均衡控制器的要求。简化电池包的均衡电路,可采用简化均衡参数来实现。由于电路中的开路电压与 SOC 有一定的对应关系,由此可通过均衡开路电压来均衡电池的 SOC。

## 2 星上电池均衡控制设计

### 2.1 单体电池不均衡度建模

对于星上蓄电池组来说,单元电池电压不均衡的情况可归纳为以下3种:(1)个别电池电压高;(2)个别电池电压低;(3)部分电压高,部分电压低。从对电池组不一致现象的分析来看,电池组中单体不均衡实际上是一种能量上的不均衡。因此,提出一种“基于电池能量状态的串联组不均衡度”的思想<sup>[1]</sup>来表征星上电池组具有的不一致的特性。基于能量状态的串联电池组不均衡度是在电池组中的单体电池串联工作的前提下,由于单体电池之间能量状态的不同而导致工作能力不一致的程度。公式(1)为其数学表达式,用于描述串联电池组电池不均衡度。

$$\varepsilon_z = \frac{\left( \frac{\sum_{i=1}^m [SOE_i - E(SOE)]^2}{m} \right)^{\frac{1}{2}}}{E(SOE)}, \quad (1)$$

其中,  $\varepsilon_z$  是电池组整体不均衡度; SOE(State of Energy)表示电池所具有的能量,一般可用其两端电压来表征;  $m$  表示电池节数,  $E(x)$  为  $x$  的数学期望。

## 2.2 星上电池能量均衡控制设计

由于星上蓄电池组中的电池单体的不均衡具有很强的随机性,有的电池可能剩余能量过低,有的可能剩余能量过高,因此在星上进行高性能管理的时候,既要具备充电均衡功能,也要具备放电均衡功能。如果不具备充电均衡功能,某些电池在充电过程中会被过充电,与此同时其它电源还没有充满。同理,如果系统不具备放电均衡功能,在放电过程中,某些电池会被过放电而其它电池的能量还没有放完。

基于以上考虑,提出一种用于星上蓄电池中单体电池之间能量均衡管理的模型。如图 1 所示:

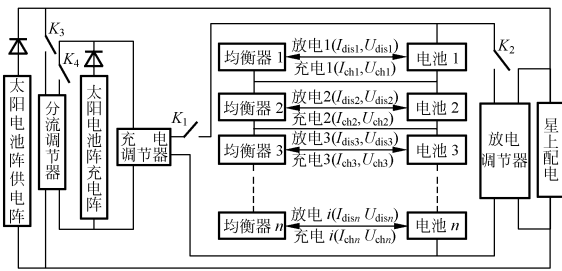


图 1 星上蓄电池能量均衡管理图

Fig. 1 Sketch map of equalization management system of satellite accumulator

星上蓄电池均衡器的工作原理如下:在卫星工作在光照区时,太阳能电池阵供电阵为整个卫星供电,  $K_1$  闭合,  $K_2, K_3, K_4$  打开,太阳能电池阵充电阵为蓄电池充电,均衡器实时监测各单体电池的电压情况。随着蓄电池能量逐渐充满,单体电池  $i$  的电压  $U_i$  已经接近蓄电池充电的截止电压  $U_{std}$ ,而其它电池的电压还没达到蓄电池的截止电压  $U_{std}$ ,则这时均衡器  $i$  进入充电均衡模式,单体电池  $i$  的均衡电流  $I_{chi}$  绕过单体电池  $i$ ,通过均衡器流向其它未充满电的单体电池。当所有单体电池电压都达到蓄电池充电截止电压  $U_{std}$  时,

$K_1$  打开,  $K_4$  闭合,蓄电池充电完毕,分流调节器对太阳能电池阵充电阵的能量进行分流。

当卫星工作在阴影区时,蓄电池组为系统供电。这时  $K_1, K_3, K_4$  打开,  $K_2$  闭合。均衡器实时监测各单体的放电电压。当单体电池  $i$  的电压高于其它电池电压  $U_{nom}$  时,均衡器  $i$  进入放电均衡模式,单体电池  $i$  通过均衡器  $i$ ,增加了均衡电流  $I_{disi}$  为系统供电,当单体电池  $i$  的电压  $U_i$  下降到和其它电池电压  $U_{nom}$  相同时,均衡器停止工作。

这样就实现了星上电池充电与放电的均衡。

## 3 星上电池均衡控制实现

### 3.1 硬件电路实现

从上面的分析可知,星上蓄电池组所用均衡器要具有储能特性,既能够消耗此节电池两端的电能,又能通过某种形式把这种电能传递给其它低能量的单体电池或负载。由此本系统使用电感来作能量储存和传递的工具。具体电路图如图 2,图 3,图 4 所示,图 3 所示电路图为图 4 中均衡器 1 的具体电路图,图 2 所示电路图为图 4 中其它均衡器的电路图。

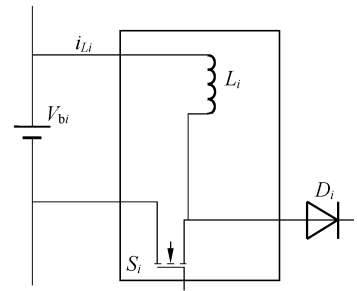


图 2 均衡器原理图 A

Fig. 2 Schematic diagram of satellite accumulator equalization A

在充电模式下,当第  $i$  ( $i=1, 2, \dots, m$ ) 个单体电池充电到接近单体电池充电截止电压  $U_{std}$  后,均衡器开始工作,均衡控制器对开关器件  $S_i$  的门极发出控制信号  $U_{gi}$ ,如果  $U_{gi}=0$ ,则开关  $S_i$  打开;如  $U_{gi}=1$ ,则开关  $S_i$  闭合,当  $S_i$  闭合后,充电电流流过电感  $L_i$ ,电感  $L_i$  储能,电感电流  $i_{Li}$  线性增长如(2)式所示:

$$i_{Li}(t) = i_{Li} + \frac{U_i}{L_i} t \quad (t_0 < t \leq t_1). \quad (2)$$

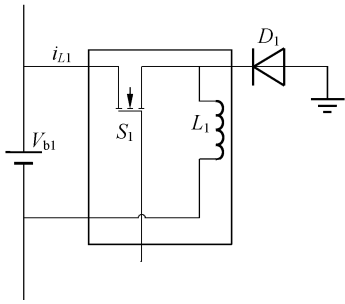


图 3 均衡器原理图 B

Fig. 3 Schematic diagram of satellite accumulator equalization B

电压。

$$i_{L_i}(t) = i_{L_i} - (t - t_1) \cdot \sum_{j=1}^m U_j \quad (t_1 < t \leq t_2) \quad (3)$$

通过以上分析可知这种均衡器在充电均衡模式下, 可以把电势高的蓄电池能量传递回电源, 从而实现充电过程中的电池均衡。

在放电模式下, 具体电路图如图 2, 图 3, 图 6 所示, 图 3 所示电路图为图 6 中均衡器 1 的具体电路图, 图 2 所示电路图为图 6 中其它均衡器的电路图。

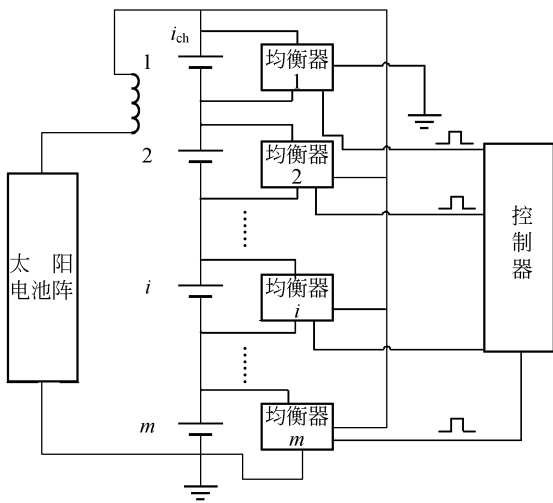


图 4 星上串联充电系统结构框图

Fig. 4 Structure of satellite charging accumulator in series

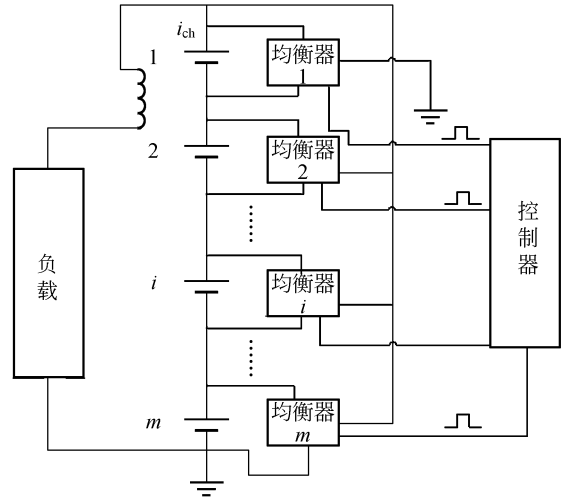


图 6 星上串联放电系统结构框图

Fig. 6 Structure of satellite discharging accumulator in series

在此式中,  $U_i$  为第  $i$  个充足电后蓄电池的电压值, 当再次打开  $S_i$  时, 电感电流  $i_{L_i}$  通过二极管  $D_i$ , 由此将电能回送至电源, 这时, 电感电流线性下降, 如式 (3) 所示, 波型如图 5 所示。式 (3) 中,  $m$  为串联蓄电池的个数,  $U_j$  为第  $j$  个蓄电池的端

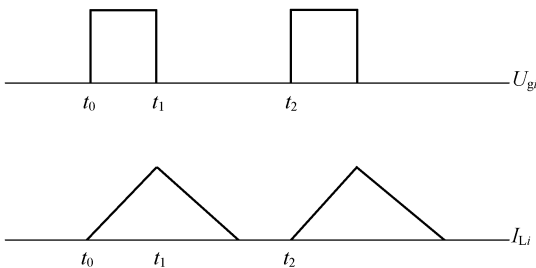


图 5 电流  $i_{L_i}$  波型图

Fig. 5 Oscillogram of  $i_{L_i}$

当第  $i(i=1, 2, \dots, m)$  个单体电池放电电压高于其它单节电池电压  $U_{nom}$  时, 均衡器开始工作, 均衡控制器对开关器件  $S_i$  的门极发出控制信号  $U_{gi}$ , 如果  $U_{gi}=0$ , 则开关  $S_i$  打开; 如  $U_{gi}=1$ , 则开关  $S_i$  闭合, 当  $S_i$  闭合后, 相对于单体电池, 电感相当于和负载并联。通过单体电池  $i$  的电流增大, 流过电感  $L_i$  的电流为放电均衡电流, 这时电感  $L_i$  储能, 电感电流  $i_{L_i}$  变化亦如式 (2), (3) 和图 5 所示。开关管的导通与截止会引入高次谐波, 因此负载端要加电感进行 EMI 滤波。

通过如上分析可知这种均衡器在放电均衡模式下, 可以把电势高的蓄电池的能量更多地传递给负载, 从而实现放电过程中的电池均衡。

### 3.2 软件算法实现

要对蓄电池组中每节单体电池的充电与放电进行均衡, 就必须首先了解单体电池的充电和放

电中电池所处的状态,即电池的 SOE。一般镍镉电池通过测试输出端的电压和温度来确定电池的 SOE。氢镍电池除了用输出端电压和温度外,还可以通过内部压力来确定电池的 SOE。而对于<sup>[6]</sup>控制系统来说,对电压的测试是比较方便的,即通过对蓄电池充电电压的测定即可了解蓄电池的充电情况。因此,本系统也采用此种方法通过 AD 对各路电压进行采样。但不同类型的蓄电池有不同的关系曲线,本文涉及的蓄电池,其充电曲线如图 7 所示,其放电曲线如图 8 所示。

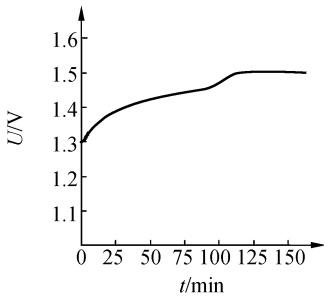


图 7 某氢镍充电电池充电曲线

Fig. 7 Charging character curve of Ni-H cell

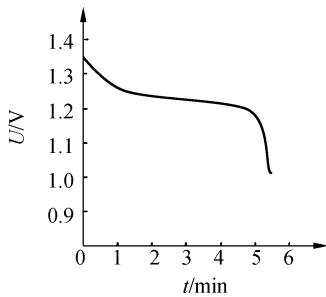


图 8 某氢镍放电电池放电曲线

Fig. 8 Discharging character curve of Ni-H cell

在充电均衡过程中,一组蓄电池组里,第  $i$  个蓄电池接近蓄电池充电的截止电压  $U_{std}$ ,在此之前有  $j$  节电池也已经达到截止电压。其它蓄电池仍需要继续充电时,启动第  $i$  个蓄电池的均衡器,对充电进行均衡。在不考虑损耗的情况下,均衡器工作后,充入蓄电池的能量,等于蓄电池输送到均衡器的能量。蓄电池释放的能量可通过对均衡器中开关器件占空比  $D_i$  的调节实现,下标  $i$  表示第  $i$  个均衡器,均衡器将一个周期内(即  $T_s$  时间内)多充的电量,在  $DT_s$  时间内送到均衡器。在一个周期内流入均衡器  $i$  的平均电流如式(4)所

示:

$$I_{Li} = \frac{1}{T_s} \int_0^{DT_s} \frac{U_i}{L} t dt = \frac{U_i T_s D_i^2}{2L} m. \quad (4)$$

在一个周期内,因能量守恒,流过此单体电池的平均电流为:

$$I_{chi} = I_c \frac{m}{m-j}, \quad (5)$$

式中,  $I_c$  为各单节电池全部充电时的充电电流。

从式(4)、(5)可得(6)式:

$$D_i = \sqrt{\frac{2LI_c m}{U_i T_s (m-j)}}. \quad (6)$$

则根据此方法设计的单片机充电均衡控制程序流程图如图 9 所示。

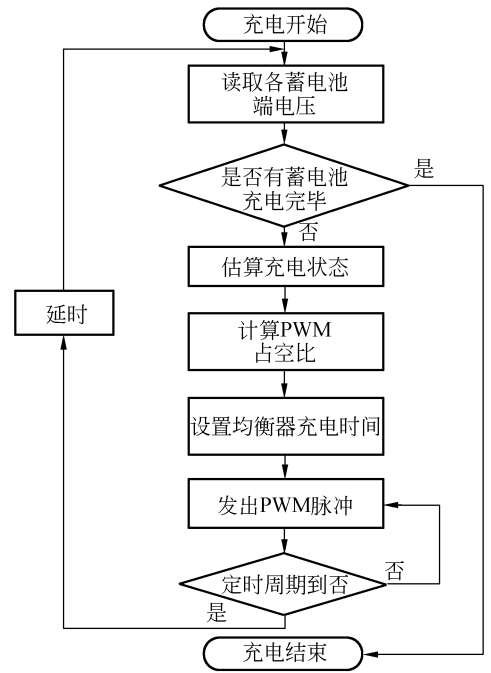


图 9 均衡器充电状态下软件流程图

Fig. 9 Software flow chart of equalization adjuster in charging state

在放电均衡过程中,一组蓄电池组里,第  $i$  个蓄电池高于其它蓄电池的平均放电电压  $U_{nom}$ ,此时第  $i$  个单体电池的储能要大于其它电池的储能。当  $U_{\Delta i}$  大于放电均衡门限电压  $U_{\Delta min}$  时,则启动第  $i$  个蓄电池的均衡器,对充电进行均衡。在不考虑损耗的情况下,均衡器工作后,单体电池  $i$  通过均衡器放出的能量,应等于单体电池  $i$  比其它电池多储存的能量。而在单体电池中储存的能量可以通过放电曲线中电压的变化了解。单体电池通过均衡器释放的能量可通过对均衡器中开关

器件占空比  $D_i$  的调节来实现, 下标  $i$  表示第  $i$  个的均衡器, 均衡器将一个周期内 (即  $T_s$  时间内) 多充的电量, 在  $DT_s$  时间内送到均衡器. 在一个周期内流入均衡器  $i$  的平均电流如式 (7) 所示:

$$I_{Li} = \frac{1}{T_s} \int_0^{DT_s} \frac{U_i}{L} dt = \frac{U_i T_s D_i^2}{2L}. \quad (7)$$

假设单体电池  $i$  所储存的能量  $W_i$  与其电池放电电压  $U_i$  存在这样的函数关系:

$$W_i = f(U_i), \quad (8)$$

此关系可通过放电曲线得出. 假设能量在传递过程中无损失, 单体电池流过均衡器的平均电流为:

$$I_{disi} = I_{nom} \frac{f(U_i) - f(U_{nom})}{f(U_{nom})}, \quad (9)$$

式中,  $I_{nom}$  为其它单体电池串联后接入  $(m-1)/m$  倍负载时的电流.

从式 (7)、(9) 可得式 (10):

$$D_i = \sqrt{\frac{2LI_{nom}[f(U_i) - f(U_{nom})]}{f(U_{nom})U_i T_s}}, \quad (10)$$

则根据此方法设计的单片机放电均衡控制程序流程图如图 10 所示.

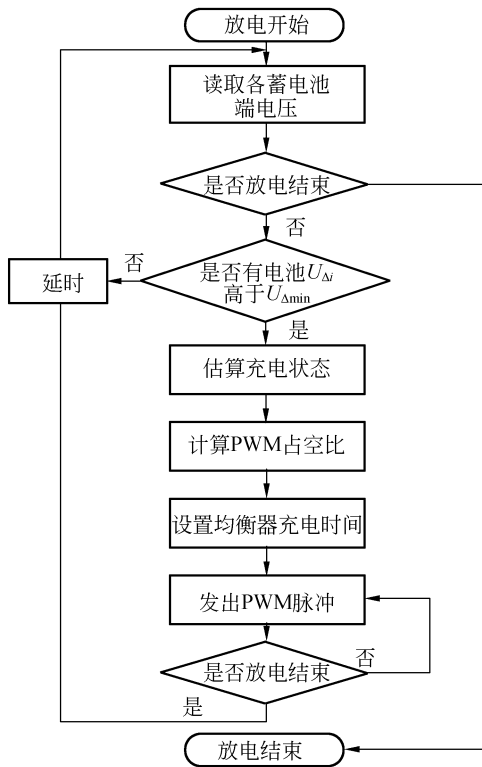


图 10 均衡器放电状态下软件流程图

Fig. 10 Software flow chart of equalization adjuster in discharging state

### 3.3 实验与验证

本实验选用标称电压为 1.2 V, 额定容量为 1 Ah 的氢镍电池 10 节, 模拟星上蓄电池工作.

首先对电池进行放电, 放到电池总容量的 10%, 用普通方式对每组电池充电, 把电池充满, 这时测量各组中每个单体电池的电压, 记为  $T_1$  时刻电压. 用  $72 \Omega$  电阻模拟负载对电池组进行放电. 当电池组电压达到放电截止电压时, 停止放电. 这时测量电池组中每个电池单体的电压, 记为  $T_2$  时刻电压. 再用带均衡器的充电器对其进行充电, 充满后, 测量电池中每个电池单体的电压, 记为  $T_3$  时刻电压. 再用  $72 \Omega$  电阻模拟负载对电池组进行放电, 在放电时加入放电均衡器进行均衡. 当电池组电压达到放电截止电压时, 停止放电. 这时测量各组中每个电池单体电压, 并记为  $T_4$  时刻电压. 实验数据如表 1 和表 2 所示:

表 1 单体电池电压实验测试表 (1)

	1 号 电池	2 号 电池	3 号 电池	4 号 电池	5 号 电池
$T_1$ 时刻	1.19	1.18	1.20	1.20	1.21
$T_2$ 时刻	1.03	0.97	1.00	1.01	1.04
$T_3$ 时刻	1.20	1.20	1.20	1.21	1.21
$T_4$ 时刻	1.01	0.99	1.01	1.00	1.01

表 2 单体电池电压实验测试表 (2)

	6 号 电池	7 号 电池	8 号 电池	9 号 电池	10 号 电池
$T_1$ 时刻	1.18	1.20	1.20	1.18	1.23
$T_2$ 时刻	0.98	0.99	0.98	0.97	1.04
$T_3$ 时刻	1.19	1.20	1.20	1.19	1.20
$T_4$ 时刻	1.00	1.01	1.01	1.00	1.01

通过上面试验数据由式 (1) 可以得到:  $T_1$  时刻  $\epsilon_z = 1.242 \times 10^{-2}$ ,  $T_2$  时刻  $\epsilon_z = 2.610 \times 10^{-2}$ ,  $T_3$  时刻  $\epsilon_z = 1.667 \times 10^{-3}$ ,  $T_4$  时刻  $\epsilon_z = 2.450 \times 10^{-3}$ .

$T_1$  与  $T_3$  时刻比较: 在  $T_1$  时刻, 2 号、6 号、9 号电池还没充满, 但 10 号电池已经有点过充. 在  $T_3$  时刻, 基本上没有明显的过充和充电不足;  $T_3$  时刻不均衡度是  $T_1$  时刻不均衡度的 13.42%.

$T_2$  与  $T_4$  时刻电压比较: 在  $T_2$  时刻, 2 号、9

号、电池已经出现过放,但 5 号、10 号电池还有能量没有放完。在  $T_4$  时刻,基本上没有明显的过放和电池能量没有放完的情况; $T_4$  时刻不均衡度是  $T_2$  时刻不均衡度的 9.39%。

## 4 结 论

通过上面分析和实验,得到以下结论:

(1) 一组电池进行串联充电时,用上述方法进行电池能量均衡,充电完成后串联电池组电池不均衡度降低为原来的 13.42%。

(2) 一组电池进行串联放电时,用上述方法进

行电池能量均衡,放电完成后串联电池组电池不均衡度降低为原来的 9.39%。

(3) 用电感作为储能元件在电池充电和放电时对电池进行均衡,可以有效解决上面问题,而且能量不会损失。

(4) 可以通过控制开关器件的占空比来控制流入均衡器的电流大小,从而控制整个系统均衡的效果。

(5) 在放电时引入均衡器后,星上母线的电压会因均衡器中电感和开关管工作而产生 EMI 噪声。具体使用时应加入滤波器,对噪声进行滤波。

## 参考文献:

- [1] 田锐,秦大同,胡明辉. 电池均衡控制策略研究 [J]. 重庆大学学报 2005,28(7):1-4.  
TIAN R, QIN D T, HU M H. The research of equalization[J]. *Journal of Chongqing University*, 2005,28(7):1-4. (in Chinese)
- [2] 孙逢春,何洪文,陈勇,等. 镍氢电池充放电特性研究 [J]. 汽车技术 2001(6):6-8.  
SUN F CH, HE H W, CHEN Y, et al.. Study on electric charge and discharge character of Ni-H cell [J]. *Automobile Technology*, 2001(6):6-8. (in Chinese)
- [3] 吴友宇,梁红. 电动汽车动力电池均衡方法研究[J]. 汽车工程,2004,26(4):382-385.  
WU Y Y, LIANG H. A study on equalization char-

- ging for EV traction battery[J]. *Automotive Engineering*, 2004,26(4):382-385. (in Chinese)
- [4] CHATZAKIS J, KALAITZAKIS K, VOULGARIS N C, et al.. Designing a new generalized battery management system[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2003,50(5):990-998.
- [5] HE ZH Q, ZHANG CH N, SUN F CH. Design of EV battery management system[C]. *Korea:19th International Evs Conference*, 2002:271-273.
- [6] 孙频东. 串联蓄电池均衡充电系统[J]. 南京师范大学学报(工程技术版),2006,6(1):12-16.  
SUN P D. Charging system for series connected battery[J]. *Journal of Nanjing Normal University(Engineering and Technology)*, 2006,6(1):12-16. (in Chinese)

## 作者简介:



徐拓奇(1980—),男,吉林长春人,博士研究生,主要研究方向为卫星电源系统设计与优化。E-mail: xutuochi001@126.com



金光(1958—),男,吉林长春人,博士生导师,研究员,主要从事空间遥感器的总体设计。E-mail: jing@ciomp.ac.cn