

# Energy Storage Equipment BMS Design of the Mid-Low Altitude Tethered Aerostat

Wendi Liao, Wei He, Yi Duan

Dongguan Institute of Advanced Technology, Dongguan Guangdong

Email: 7586486@qq.com, wei.he@kuang-chi.com, yi.duan@kuang-chi.com

Received: Jan. 9<sup>th</sup>, 2019; accepted: Jan. 24<sup>th</sup>, 2019; published: Jan. 31<sup>st</sup>, 2019

---

## Abstract

Energy storage equipment BMS was one of the most important equipments in the system of UPS system of the tethered aerostat. Because of its applicant environment and high reliability designing requirements, there were many technical difficulties. According to the requirements of the special power supply equipment technology of the tethered aerostat, the BMS for energy storage equipment was developed, using NXP master control chip and LAPIS communication chip as the core hardware architecture. And the control software was developed independently. By fully functional and environmental tests, the high density energy storage equipment which the BMS was fully independent developed in tethered aerostat has being used on line more than 2 years. The various functions of the BMS like online charge/discharge, uninterruptible power supply met the design requirements.

## Keywords

Mid-Low Altitude Tethered Aerostat, Battery Technology, Battery Manage System

---

# 中低空系留浮空器电源智能BMS设计

廖闻迪, 何 为, 段 毅

东莞前沿技术研究, 广东 东莞

Email: 7586486@qq.com, wei.he@kuang-chi.com, yi.duan@kuang-chi.com

收稿日期: 2019年1月9日; 录用日期: 2019年1月24日; 发布日期: 2019年1月31日

---

## 摘 要

智能BMS储能装备BMS是中低空系留浮空器艇上储能装备的重要组成部分, 因其使用环境、高可靠性设

文章引用: 廖闻迪, 何为, 段毅. 中低空系留浮空器电源智能 BMS 设计[J]. 智能电网, 2019, 9(1): 11-22.

DOI: 10.12677/sg.2019.91002

计需求而存在较多设计难点。根据浮空器特种供电装备的技术要求,对储能装备BMS进行研制,采用NXP主控芯片和LAPIS通信芯片为核心硬件架构,并自主研发控制软件。经充分功能和环境测试后,BMS自主研发的高密度储能装备在中低空系留浮空器上稳定使用超过2年,在线充放、不间断供电等各项功能满足设计要求。

## 关键词

中低空系留浮空器, 电池技术, 电池管理系统

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

电池技术日新月异发展的同时,作为电池系统大脑的BMS技术面临着新的挑战,单体电池的能量密度、使用寿命等都得到了飞跃式发展,也对电池管理系统提出了更高的要求,大量单体的监控和管理、单体的均衡管理、电池组热管理、性能控制、安全控制、与充电设备和耗电设备的匹配技术等,都在给电池管理系统的功能及性能带来挑战。智能化是电池管理系统的技术发展方向。

本文研究的对象是中低空系留浮空器的电源管理系统。中低空系留浮空器(图1)[1]-[9]日常工作环境为距离地面1000~1500 m的空中,由高压交直流不间断供电系统为其提供电力能源。为满足“高能量密度、高空适应、大电流输出、高可靠性、不间断供电”的装备要求,“云端号”系留浮空器在国内首次采用高倍率18650三元锂电池作为空中不间断备用储能装备。其电源系统的特点是:在低压低温环境中大量使用材料能量密度最高的三元锂电池,总计达180枚单体电池组成6串30并的电池组;高放电倍率,设计放电倍率为1.5,最大放电电流达120 A;不间断供电设计,储能装备始终挂载于28 V低压直流配电母线上,在主电源电能不足或断电的情况下无缝接入以保障浮空器不间断的电能供给(图2)。

以上储能装备技术特点对其能量管理系统(Battery Manage System, BMS)的研制带来以下技术难点[10][11][12][13]:

1) 该储能装备的实际使用环境在海拔1000~4000 m之间,高空低压低温环境带来的BMS电路芯片与其他电子元件发生击穿的风险不可忽视;2) 采用三元锂电池作为储能元件能有效降低储能装备整备重量,但由于电芯材料活跃度高,在大功率放电造成的高温状态时易发生热分解,引致电池起火、爆炸威胁浮空器安全;3) 采用带有安全阀和钢壳外套的18650电池可以在一定程度上减少电池起火风险,但多个串并联单体组成的电池组在多次循环充放电后,电芯一致性逐渐变差,或因电池组PACK工艺不一致,造成各串联电芯组电压均衡失稳,影响电池组寿命,也同时带来了充电过压等安全隐患;4) 锂电池组有效荷电容量随电池充放电次数的增加、电池组出厂时间的延长逐渐减小,而电芯材料技术正处于飞速发展阶段,更迭换代速度快,在原电池失活后难以找到相同参数(同电压平台、同放电曲线、同容量等)的电芯进行替换。以上问题对中低空系留浮空器储能装备BMS设计提出了以下技术难点和要求:1) 考虑系统环境适应性,BMS电路及元件耐压需进行高海拔修正设计,杜绝或谨慎使用低压低温敏感元件;2) 加强电池热能管理,合理增加电芯及PACK各部位的温度采样传感器数量,有效采集电芯关键位置的温度状态,兼顾高/低温状态下的电池散热和热控,元器件选取时进行降额设计;3) 引入电芯单体均衡环节,以软件主动/硬件被动的方式,在安全工作的前提下,高效设计电芯单体均衡体系;4) 采用弹性设计理念,

针对不同的电芯串联个数、单体容量、平台电压等进行兼容设计，对不同的单体放电曲线，采用软件定制的设计方式，保障 BMS 的通用性；5) 合理管理电池充放电状态，从全局出发整合充/放电电路，兼顾小电流充电/倍率放电和不间断供电的实际需求。



Figure 1. Dongguan Yunduan mooring aerostat  
图 1. 东莞云端号系留浮空器

根据以上技术要求，对中低空系留浮空器储能装备 BMS 进行设计，采用 NXP/Freescale 主控芯片和 LAPIS 通信芯片为核心硬件架构。经充分功能和环境测试后，BMS 自主研发的高密度储能装备在中低空系留浮空器上稳定使用超过 2 年，在线充放、不间断供电等各项功能满足设计要求。

## 2. 储能装备 BMS 硬件设计

中低空系留浮空器储能装备系统如图 2 所示，该储能装备的 BMS，由强电部分和弱电部分组成。在硬件设计方面，针对中低空系留浮空器的应用特点，在设计中，主要研究了低温、低压环境下智能 BMS 设计的方法。1) 低温低压环境下，BMS 的散热情况与常温常压环境区别较大，低压环境下，BMS 内部散热效率降低，BMS 内部更容易出现温度聚集，因此在元器件选择上需要考虑有足够的设计余量，避免电路中出现高温聚集点；2) 低压环境对元器件的电气性能也有影响，尤其需要避免采用以空气作为绝缘介质的产品。

### 2.1. 智能 BMS 强电设计

BMS 强电部分集成了 DC/DC 充电模块、防反模块和强电模块，用于处理储能装备的大电流充放电、电流采集以及充放电控制。储能装备挂载在直接 26 V 直流母线上，在交直流供电装备断电，或母线电压波动时，提供不间断电能。由于交直流供电装备供电电流大，电池直接接入直流母线会造成母线电流倒灌，导致电池充电短路，因此在直流母线和电池母线间串联防反模块，防反模块为 2 枚二极管组成。

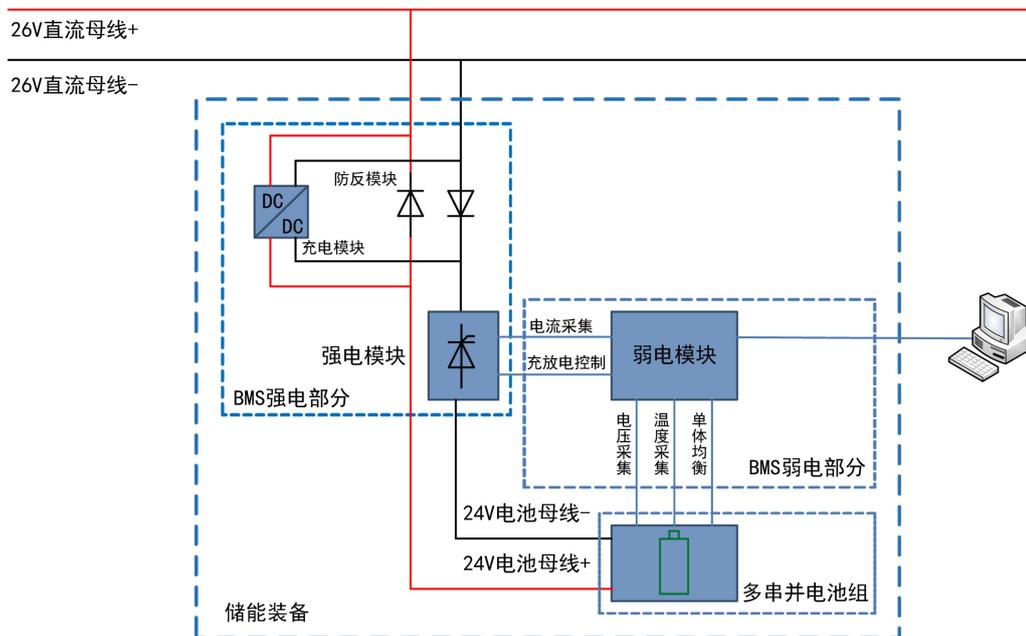


Figure 2. Energy storage equipment system of low and middle altitude tethered aerostat  
图 2. 中低空系留浮空器储能装备系统

单向 DC/DC 限流充电模块直接挂载在 26 V 直流母线上, 参数为: DC500W (25.2 V/19.8 A), 16~32 V 宽电压输入, 25.2 V/19.8 A 限流输出, 可根据锂电池电压动态调整充电电压、电流。DC/DC 充电模块为两段充电的形式, 当电池组端电压低于 25 V 时为 19.8 A 大电流充电, 电池电压高于 25 V 时, 采用涓流充电, 电流由 19.8 A 逐渐减少到 0, 同时电池端电压逐渐增加到 25.2 V。考虑到成本与电路板面积, 强电模块仅接在电池与直流母线负极之间, 用于控制电池与母线的导通和关断, 是由 5 枚 IRFB3077 功率 MOSFET 并联组成的, 单个 MOSFET 可通过最大电流为 210 A, 可对最大 75 V 的电压进行有效关断, 另外将 5 枚 0.005 mΩ 电阻并联后串入强电模块, 通过测量电阻的端电压实现电流采集。

## 2.2. 智能 BMS 弱电设计

弱电部分是 BMS 的核心部分, 与强电部分和电池组相连, 由电池组供电。如图 3 所示, BMS 弱电部分由主控芯片模块、电池管理芯片模块、RS485/RS422 串口通信模块, 电池均衡模块以及外围电路等组成, 用于采集锂电池组电压、温度, 电池充电均衡、实时监控锂电池的工作状态并反馈给上位机。考虑到硬件的广泛兼容性需求, BMS 弱电部分设计为 6~16 串的 18650 电池进行通用管理。

弱电部分的供电选取高效 DC/DC 电源转换芯片 TI TPS54360, 将电池组作为直流电源, 经过稳压滤波电路以后转换为 5 V 的稳定电源供各个弱电模块使用。其供电特点为超宽范围的电压输入(4.5 V~60 V), 宽广的频率调节范围(100 kHz~2.5 MHz)用以提高输出滤波效率。为防止芯片供电电压过高导致烧毁, 并且弱电部分本身耗电量很小, 不影响电池均衡性, 因此对 6~16 串的电池均只取其中 3 串电池进行芯片供电。

主控芯片采用 NXP MC9S08DZ60 芯片, 是弱电部分的核心单元之一。主要功能是数据处理和判断, SOC 计算, 向下发送控制指令向上返回数据, 以及对单体锂电池堆的温度进行采集。为了满足高海拔的使用环境, BMS 弱电部分中摒弃使用电解电容。因此芯片的电源管脚和模拟电源管脚均并联 0.1 μF 陶瓷旁路电容以抑制高频噪声。在 BMS 弱电部分安置 4 枚 I/O 口连接指示灯, 用来指示当前供电系统的电压, 温度告警以及串口通信状态。

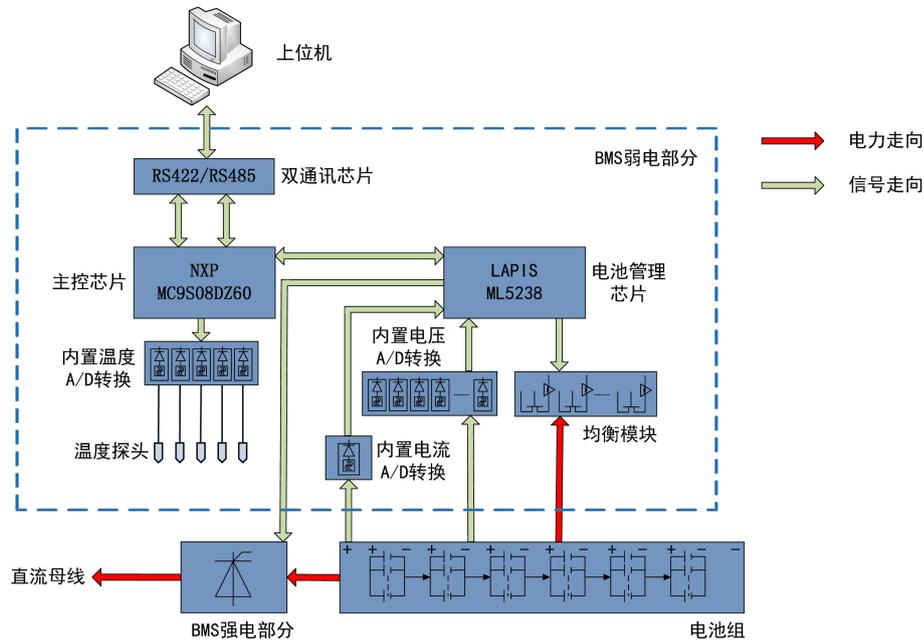


Figure 3. BMS hardware of energy storage equipment  
图 3. 储能装备 BMS 硬件部分

电池管理芯片模块采用的是 LAPIS ML5238 系列芯片，是弱电部分的另一核心单元。主要的功能是电压、电流数据采集，充放电控制、短路保护以及和主芯片进行通信，执行下达指令。电池管理芯片内置 NMOS 驱动，充放电控制是通过接收主芯片指令后，将开关的控制指令写入 FET REGISTER 寄存器中从而实现对锂电池充放电控制。

电压采集模块与电池管理芯片直连，芯片中内置有电压采集 A/D 模块，外围电路只需要将电池的两端的电压通过整流和滤波后直接采集到芯片的 Vmon Register 寄存器中，采集精度为±5 mV。电压采集模块提供电压数据，同时通过监测锂电池的工作状态，结合 BMS 软件部分可以实现对锂电池单体电池的过压和欠压状态进行保护。

电流采集模块的工作原理是：利用电池管理芯片的内置 A/D 转换模块，在电流回路上串联 5 枚并联的 2512R0005 贴片功率电阻器，每枚电阻器的阻值为 0.005 Ω，并联后电阻值为  $R_{tst} = 0.001 \Omega$ 。电流流过电阻器时，通过采集电阻器端电压，换算测量电流值公式为：

$$I_{tst} = G \frac{V_{tst}}{R_{tst}} = 1000GV_{tst} \quad (1)$$

其中  $I_{tst}$  为采样电流， $V_{tst}$  为采样电压， $G$  为内置 A/D 转换增益，可在 [1, 100] 内灵活取值以方便计量。

温度采集模块是由 NTC 温度探头，串接分压电路两部分组成。NTC 的  $R_v$  和测量电阻  $R_m$  (精密电阻) 组成一个简单的串联分压电路，电路中的参考电压  $V_{ref}$  经过分压可以得到一个电压值随着温度值变化而变化的数值，通过主控芯片内置的 ADC 模块采集到芯片寄存器中，这个电压的大小将反映出 NTC 电阻的大小，即相应温度值。采集到的电压值  $V_{adc}$  和 NTC 电阻值的关系表达式为：

$$V_{adc} = V_{ref} \times \frac{R_m}{R_v + R_m} \quad (2)$$

根据式(2)结合温度校准得到温度值  $T$  与测量电压值  $V_{adc}$  之间的对应关系，如图 4 所示，然后采用查表法可以确定当前温度的状态值。

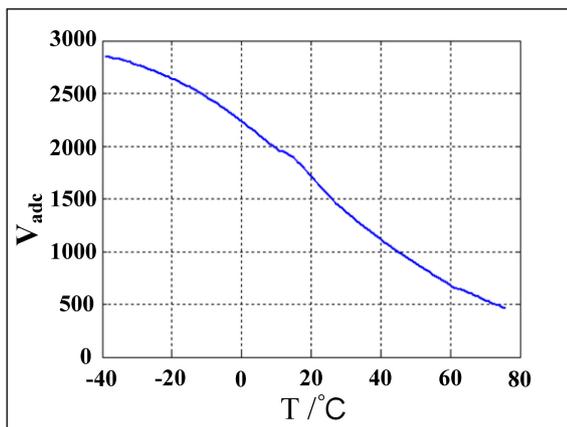


Figure 4. The relationship between measured voltage and temperature  
图 4. 测量电压值与温度对应关系

如图 5 所示，温度探头在电池包中设置在电池 PACK 内的五个温度敏感位置，分别为通信口，充放电口，箱体正中，弱电部分芯片板，强电部分控制板处，以充分了解电池 PACK 的各个敏感位置的温度状态。

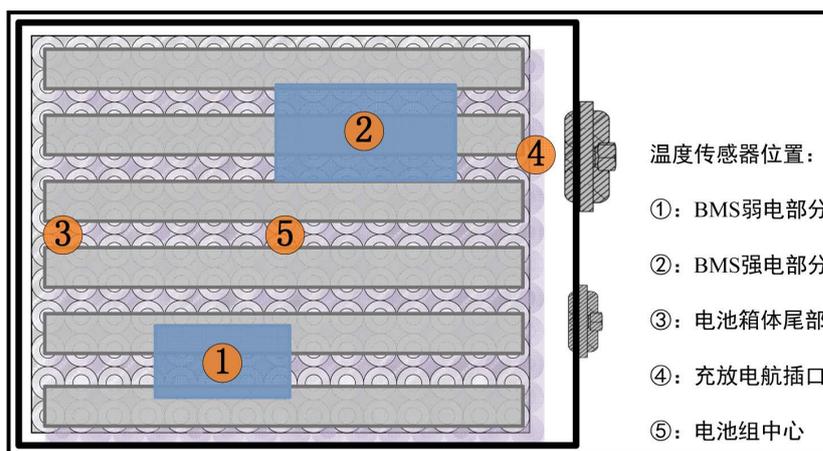


Figure 5. Temperature sensor position  
图 5. 温度传感器位置

均衡模块硬件部分采用的是被动均衡模式(有损均衡)，电路简单，成本较低。在电池堆上并联一个由分流电阻和开关 MOS 管组成的均衡模块；均衡模块的软件部分由主控芯片控制，电源管理芯片执行。当采集到电池的最高电压  $V_{max}$  和最低电压  $V_{min}$  满足：

$$V_{max} - V_{min} \geq 100 \text{ mV} \tag{3}$$

由电池管理芯片将最高电压的电池堆上并联的 MOS 管栅极导通，电流经过分流电阻，起到均衡的作用。均衡电流应合理选择，均衡电流过小则效果不明显，均衡电流过大则系统的能量损耗大，导致均衡效率低。此处设计均衡电流  $I_{blc}$  为 50~100 mA；设计电池最高电压  $V_{max}$  为 4.3 V，最低电压  $V_{min}$  为 2.8 V，在充电时均衡开启，分流电阻  $R_{snt}$  将成为电池的旁路负载，因此有：

$$R_{snt} = \frac{V_{max}}{I_{blc}} = 43 \Omega \tag{4}$$

$$R_{\text{snt}} = \frac{V_{\text{min}}}{I_{\text{blc}}} = 56 \Omega \quad (5)$$

因此有：

$$43 \Omega \leq R_{\text{snt}} \leq 56 \Omega \quad (6)$$

按照元件规格选取分流电阻为 47  $\Omega$ 。

串口通信模块同时支持 RS485 与 RS422 两种通信模式，用于将电池状态数据传输给上位机。对于以上两种通讯方式分别选取 MAXIM 485/488 芯片，均采用半双工的工作模式。电路中采用 NEC R2561 光耦进行光电隔离，增强通信模块的抗干扰能力，通信模块与主控芯片系统不共地，有效抑制高共模电压的产生，降低芯片损坏率，从而提高系统的稳定性。

### 3. 智能 BMS 软件设计

中低空系留浮空器储能装备软件设计方面，主要研究了低温、低压环境下智能 BMS 的工作特性对软件设计的影响：1) 考虑了低温低压环境与常温常压环境下温度控制边界的差异性，在算法当中加入函数进行修正；2) 在软件故障处理模块设计中，预留了低压低温可能引起的绝缘特性下降、局部温度聚集而带来的故障处理流程。

#### 3.1. 软件逻辑

图 6 所示为 BMS 软件逻辑图，BMS 软件的设计目的是完整的储能装备控制系统，实现电池电压、电流、温度采集，电池荷电状态的估算，单体电压均衡，过充过放保护，与上位机通信功能。BMS 的软件设计思想采用模块化和层次化的设计思路。模块化是将要实现的功能综合到一个代码段内部进行统一管理，便于修改。多个软件功能使用单独函数实现，程序得以分割；另外单独函数在一定程度上可以被复用。层次化是在软件运行中将一个工作分成多个环节，分别由不同的硬件和软件模块完成，以便于程序内部各个函数之间进行通讯，调用和维护。BMS 系统在运行主程序时，不断地调用各个独立的子函数，来协同完成对数据的采集和处理。

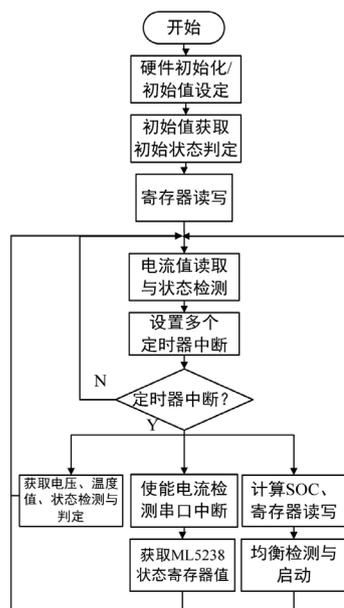


Figure 6. Software logic diagram

图 6. 软件逻辑图

BMS 软件首先进行系统初始化：任务是完成硬件上电检查，各个功能模块的初始化以及应用程序的初始化。初始化模块包含软件定时器、外围通信协议 SPI 初始化、存储器、A/D 模块、串口通信 SCI、总线时钟、指示灯设置等初始化模块；应用程序初始化包含对各个变量初始值的设定、相关变量和数组的申明、通讯协议以及电压、电流及温度保护上限和下限预设值的定义等。其中保护上下限值、电池总安时数等预设值还可以通过 BMS 串口通信进行在线设定，以增加系统的弹性稳定性。第二获取各初始值并进行初始值状态判定，并写入通讯芯片的寄存器中。然后软件进入采集循环，通过调用子程序进入中断，查询、操作与中断返回的方式获取电池多个关键信息，执行多项电池操作。在中断执行完后返回主函数循环。软件通过不断跳出与返回循环，完成系统各项任务。

### 3.2. 中断响应

串口通讯是通过响应串口中断来实现的，程序中除了串口还设置有定时中断和电流检测中断等。对于本系统主芯片 MC9S08DZ60 的中断优先级如表 1 所示。

**Table 1.** Interruption priority

**表 1.** 中断优先级

中断类型	优先级(由高到低)
DOG/BDM/外部管脚	1
TPM	2
SPI	3
SCI	4
端口管脚	5
ADC	6

主程序中采用的是定时中断的处理方法，每个中断响应时，完成不同的任务。中断响应以后，程序主要采集电压、温度、电流值；锂电池状态判定；控制 FET 对电池的充放电开关控制，锂电池单体电压的均衡控制，电池剩余容量 SOC 的估算等。系统和上位机的通信采用的是串口中断通信，上位机以 MODBUS 协议为基础改编，在芯片接收代码并校验以后，读取寄存器中的各项数据值，返回至上位机，供监测人员实时观测状态。通讯协议中支持读取芯片寄存器中的内容，同样也支持修改寄存器中初始化设定的各项预设值，便于根据不同的使用状态来修改上下限值。

### 3.3. 控制与 SOC 估算

储能装备挂载在直流母线上，需要进行全面控制，避免电池组出现失控情况。表 2 所示为电池组控制表，对电池组截止电压、截止电流、高低温以及电池单体均衡进行控制，当控制变量超过限定值时进行控制，待控制变量恢复到限定值内时解除控制。

其中电压控制、充电电流控制由电池单体性能决定；放电过电流控制是为避免母线短路情况下的电池过放采取的控制手段；高低温控制是根据储能装备的实际使用环境确定的 $-10^{\circ}\text{C}$ ~ $50^{\circ}\text{C}$ 的保护值；电池均衡是解决电池单体电压失衡的有效手段。

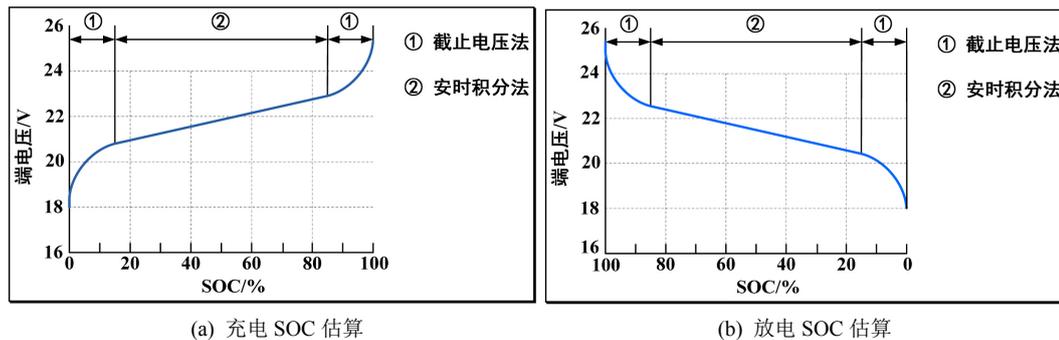
电池荷电状态[13] [14] [15] [16] (State of Charge, SOC)估算是当前电池研究的难点之一。从实用性和定制性的角度出发，储能装备 SOC 计算采取 3 段式估算：对电池组进行多次充放电得到电池充放电特性曲线，根据充放电特性曲线，结合电池端电压将电池端电压分为 3 段，分别进行截止电压法和安时积分法 SOC 估算，如表 3，图 7 所示。

**Table 2.** Battery control table  
**表 2.** 电池组控制表

电池组控制表		
控制变量	限定值	控制手段
过充电压	4.25 V	充电关断
过放电压	2.95 V	放电关断
充电过电流	40 A	充电关断
放电过电流	200 A	放电关断
低温	-10℃	充电关断
低温	-20℃	充放电关断
高温	50℃	充电关断
高温	60℃	充放电关断
电池均衡	100 mV	充电状态下开启均衡

**Table 3.** Estimation of 3-stage SOC  
**表 3.** 3 段式 SOC 估算

3 段式 SOC 估算			
SOC/%	充电端电压/V	放电端电压/V	估算方法
100	(+∞, 25.2]	(+∞, 24.8]	截止电压
(100, 85]	(25.2, 23.4]	(24.8, 23.0]	截止电压
(85, 15]	(23.4, 20.8]	(23.0, 20.4]	安时积分
(15, 0)	(20.8, 18.4]	(20.4, 18.0]	截止电压
0	(18.4, 0]	(18.0, 0]	截止电压



**Figure 7.** 3-stage SOC estimation curve for charging and discharging

**图 7.** 3 段式充放电 SOC 估算曲线

其中充放电 SOC 在 0%~15%，85%~100% 两段区间内，由于电压变化快且基本呈线性变化，采用截止电压法估算 SOC 值；15%~85% 一段区间内，由于放电电压变化缓慢，呈平台状，采用安时积分法估算 SOC 值；充电状态的截止电压较放电状态的截止电压抬升约 0.4 V，故对充、放电两种状态进行单独处理。另外随锂电池寿命衰减产生的 SOC 误差，可通过在线完整充放电进行数据校准，方法为：1) 在线修改电池组充放电最大安时数；2) 在线小幅修改电池组安时积分法 SOC 估算适用范围。

## 4. 测试及实际应用

### 4.1. 储能装备测试

将 BMS 电路板放入老化试验箱 48 h 进行设备老化测试后，与电池组、箱体等进行组装后进行测试，

测试分为环境试验和功能测试两部分。

根据储能装备实际使用环境，结合技术要求进行模拟环境测试。测试条件为(表 4):

**Table 4.** Test conditions for energy storage equipment

**表 4.** 储能装备测试条件

测试条件	
温度/℃	-10~55
气压/kPa	61.5~101.3
振动	低频、随机

其中测试温度-10~55℃，分别取最低与最高的温度进行测试，55℃环境温度下储能装备软件逻辑为放电口开通、充电口关断以保护电池组，储能装备处于不可充电状态；气压取值范围为 0 海拔常压到 4000 m 海拔低气压；振动测试选择符合装备实际使用环境下的低频随机测试。

表 5 所示为储能装备的环境测试结果。由表 5 可知：储能装备在低压低温、低压高温、常压低温、常压高温的 4 类低频随机振动环境下，充放电状态符合软件逻辑，通信状态均正常，装备状态均可正常使用。

**Table 5.** Environmental test results of energy storage equipment

**表 5.** 储能装备环境测试结果

环境测试结果				
测试类型	AMFC	BMFC	ALFC	BLFC
测试时间	8 h	8 h	8 h	8 h
充电状态	可充电	不充电	可充电	不充电
放电状态	可放电	可放电	可放电	可放电
装备状态	正常	正常	正常	正常
通信状态	正常	正常	正常	正常

常温常压下对储能装备进行放电，设计放电倍率为 1.5，但考虑到保护电池组寿命，使用电子直流负载进行单倍率(80 A)电池放电。使用储能装备的 RS422 通信串口进行数据采集，并记录在计算机上。如图 8 所示为储能装备的典型测试放电数据。

由图 8 可知：1) 通过 BMS 记录到的放电电流与直流负载记录的放电电流均为 80 A，其中 BMS 记录的放电电流有±0.5 A 的小幅波动；2) 放电时间约 68 分钟，累计放电容量为 90.6 AH，超过了 80 AH 的设计值，这是由于电池组电芯充放电次数少，性能较好所致，随着使用时间和充放电次数的增加，累计放电容量将逐渐减小；3) 电池组端电压随放电时间逐渐降低，由最初的 24.8 V 降低到 18 V，BMS 截止关断输出，电压在中段呈明显的平台感，首尾两端电压呈快速的线性降低；4) 电池 SOC 波形平滑连续，表明端电压与安时积分法融合的 SOC 算法可信度较高，另外随锂电池寿命衰减产生的 SOC 误差，可通过在线完整充放电进行数据校准；5) 放电开始时，单体最高电压与最低电压差值很小，放电尾端最高电压与最低电压差值逐渐增加至 200 mV 左右，这一差值将在电池充电时进行电池均衡。

另外还对储能装备充电过程进行常温常压测试，充电电流为 20 A，结果基本与放电为逆关系，不再赘述。

## 4.2. 实际应用

储能装备 BMS 研发工作完成后，先后应用于东莞“云端号”、遵义“云端号”中低空系留浮空器分

别连续运行约 1 年，由于外场供电不稳定、市电与发电机切换、雷雨天气以及临时拉闸限电等原因，导致地面至艇上交流供电停电的情况共出现 100 余次。如图 9 所示为因设备检修计划地面停电 1800 秒(30 分钟)情况下，中低空系留浮空器上的直流电源与储能装备的电压、电流波形。

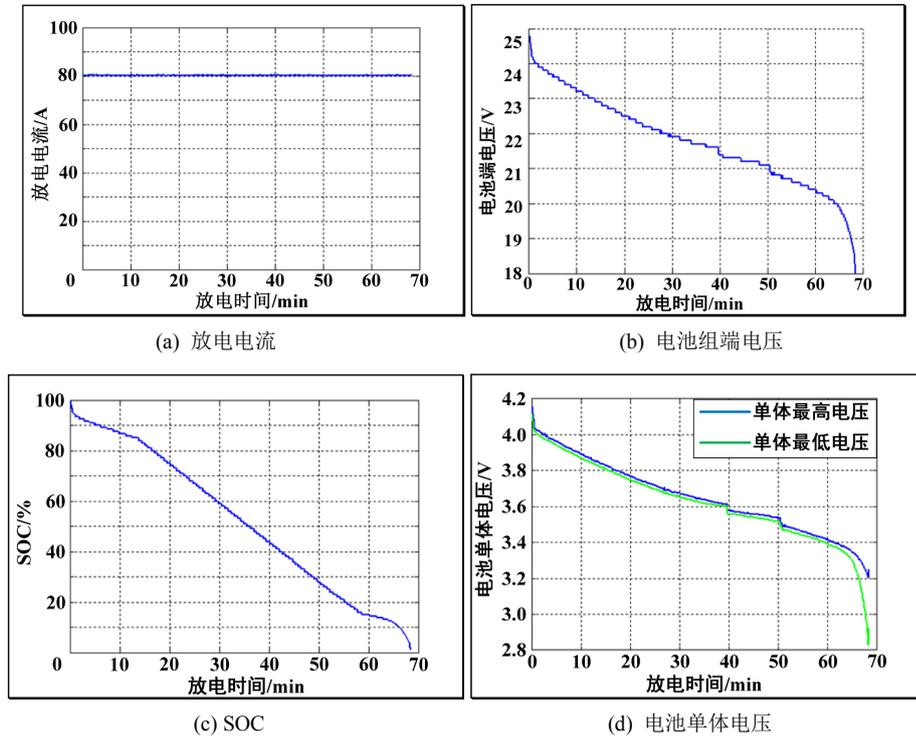


Figure 8. Typical discharge curve of energy storage equipment  
图 8. 储能装备典型放电曲线

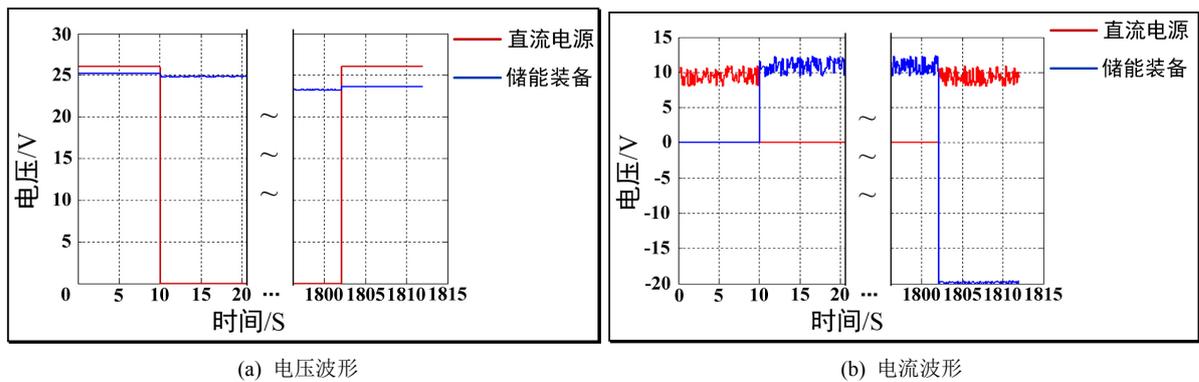


Figure 9. Voltage and current waveforms of DC power supply and energy storage equipment  
图 9. 直流电源与储能装备的电压、电流波形

由图 9 可见，艇上交流停电发生在 10 S，并在 1800 S 左右恢复交流供电；期间直流电源对母线的输出断开，此时储能装备接入直流备电，切换时间为毫秒级，可忽略不计；直流电源电压为 26 V，而储能装备电压在切换后由 25.2 V 降为 24.8 V 左右，并随时间逐渐降低；直流电源断开后，母线电流有 1 A 左右的升高，这是由于储能装备电压较直流电源低造成的，并不影响艇上用电设备正常工作；断电恢复后储能装备以 -20 A 附近进行充电，与内置 DC/DC 充电模块参数是符合的。

中低空系留浮空器电源智能 BMS 及其储能装备经充分环境及功能测试后,在多个中低空系留浮空器放飞外场运行总时间超过 2 年,各项参数稳定可靠,良好的完成了在线通讯、充放电、不间断供电等各项功能。该装备 BMS 具有多种电池通用、可靠性高以及符合运行环境使用要求等特点,表明了该智能 BMS 设计技术合理性。

## 5. 结论

中低空系留浮空器电源智能 BMS 设计研究表明,适合低温低压工作环境的智能 BMS 设计,应充分考虑设备环境适应性,并有如下结论: 1) 元器件选用中需有充足的设计余量,关键元器件及大功率元器件采取降额设计,采用 50%额定功率降额使用关键元器件; 2) 避免使用以空气作为绝缘介质的产品或元器件,系统绝缘设计应充分考虑低压影响,避免出现低压放电或击穿; 3) 软件设计中需针对低温低压特殊工种环境预留故障隔离措施和故障处理程序。

## 基金项目

2017 年东莞市社会科技发展(重点)项目(2017507202101)。

## 参考文献

- [1] Stenzel, R.L. and Urrutia, J.M. (1986) Laboratory Model of a Tethered Balloon-Electron Beam Current System. *Geophysical Research Letters*, **13**, 797-800. <https://doi.org/10.1029/GL013i008p00797>
- [2] Soilemes, A., Helmis, C.G., Papageorgas, P., et al. (1993) A Tethered Balloon Profiler System. *Measurement Science and Technology*, **4**, 1163. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/4/10/022>
- [3] Picos, R., Lopez-Grifol, A., Martinez-Villagrassa, D., et al. (2016) BOU: Development of a Low-Cost Tethered Balloon Sensing System for Monitoring the Lower Atmosphere. *EGU General Assembly Conference Abstracts*, **18**, 12223.
- [4] 卢新来, 罗明强, 孙聪, 等. 系留气球的升空模拟[J]. 航空学报, 2006, 27(5): 768-772.
- [5] 曹洁. 国外系留气球的发展与应用[J]. 科技资讯, 2010(25): 6-7.
- [6] 杨天祥, 曾腾辉, 杨潇文, 等. 系留气球测控系统设计[J]. 测控技术, 2016, 35(3): 79-82.
- [7] 王明建, 黄新生. 平流层飞艇平台的发展及关键技术分析[J]. 兵工自动化, 2007, 26(8): 58-60.
- [8] 施红, 宋保银, 姚秋萍, 等. 平流层飞艇太阳能系统研究[J]. 中国空间科学技术, 2009, 29(1): 26-31, 40.
- [9] 方丽娟. 平流层飞艇多能源管理系统的优化设计[D]: [硕士学位论文]. 上海: 上海交通大学, 2008.
- [10] 唐赟. 高海拔地区电力放线用电动飞艇的设计与研发[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2012.
- [11] 范正航. 锂电池 BMS 系统设计[D]: [硕士学位论文]. 成都: 电子科技大学, 2015.
- [12] 董超. 电动汽车锂电池管理系统的研究和设计[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 青岛大学, 2012.
- [13] 尚丽平, 王顺利, 何明前, 等. 锂电池组在线均衡 BMS 健康管理方法研究[J]. 电源技术, 2015, 39(12): 2590-2592, 2672.
- [14] 刘新天, 孙张驰, 何耀, 等. 基于环境变量建模的锂电池 SOC 估计方法[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2017, 47(2): 306-312.
- [15] 陈息坤, 孙冬, 陈小虎, 等. 锂离子电池建模及其荷电状态鲁棒估计[J]. 电工技术学报, 2015, 30(15): 141-147.
- [16] 薛楠, 孙丙香, 白恺, 等. 基于容量增量分析的复合材料锂电池分区间循环衰退机理[J]. 电工技术学报, 2017, 32(13): 145-152.

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2161-8763，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：[sg@hanspub.org](mailto:sg@hanspub.org)