

# 锂离子电池内阻在线监测系统的设计与实现

孟庆刚<sup>1</sup>, 程广运<sup>2</sup>

(1. 黑龙江工程学院 电子工程系, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 哈尔滨市社会劳动保障局, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘 要:**提出了一种锂离子电池内阻采集方法,并设计了可同时采集多节锂离子电池内阻在线监测系统.给出了由数字信号处理器 DSP组成的低功耗系统的具体硬件设计原理图和软件设计算法.测试结果表明,运用锁相环电路和基准电阻补偿技术后,系统的精确度满足了设计要求.

**关键词:**锂离子电池; DSP; 锁相环电路; 在线监测

**中图分类号:** TP274 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007- 2683(2009)01- 0082- 03

## Design and Realization of Online Monitor System for Internal Resistance of Li-ion Battery

Meng Qing-gang, Cheng Guang-yun

(1. School of Electrical Engineering, Heilongjiang Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. Harbin Medical Insurance Administrative Center, Harbin 150001, China)

**Abstract:** This paper puts forward a new method to collect internal resistance of Li-ion battery, at the same time, designs a online system which can monitor internal resistances of a great many Li-ion batteries. It gives a specific hardware schematics and software algorithm of the low-power system which is composed of digital signal processor(DSP). After utilizing the phase lock loop circuit and the benchmark resistance compensating technology, the result of test shows that the accuracy of the system improves evidently, satisfies the general user's requirement and has a vast developing space.

**Key words:** Li-ion battery; DSP; online monitor; phase lock loop circuit

监测精确度.

## 1 引 言

组合电池的整体性能取决于各单体电池电化学性能,尤其是电池内阻的一致性.内阻不仅反映电池当前的荷电状态(SOC),而且反映电池的裂化程度(SOH)<sup>[1]</sup>.所以电池内阻监测就成了电池监测系统中的重要环节.尤其在线监测时电池端存在充电电压纹波和负载变动时的变化,而电池的内阻都在毫欧的数量级,要从电池测出其内阻具有一定的难度.本文介绍了一种监测方法克服了上述难题,提高了

## 2 锂离子电池内阻测量原理

目前,电池内阻的监测采用交流注入法.通过恒流源与 DSP输出的 PWM 波形进行调制后得到的周期方波交流恒流源给电池组激励,由于电池内阻  $r$  中存在容性和感性分量,通过电池的电压信号与注入的电流信号存在着相位差  $\theta$ <sup>[2]</sup>.经过带通滤波后送入差分放大电路的电压信号与采样电阻上的压降输入到相敏检波、低通滤波等电路中,得到电池纯阻

性部分产生的压降,显然,内阻转化为了可由 DSP 直接采样电压信号,然后,用 2 个高精度度纯电阻取代电池,进行同样处理。最后,对电池组进行自动循环监测,完成对整个多节锂离子电池的内阻的统一测量。

### 3 系统硬件设计原理及实现方法

#### 3.1 激励电流源的设计原理

激励电流源是本电路设计的难点,常规设计是由低频交流恒流源  $i(t) = I_s \sin w_1 t$  信号再通过 V/I 转换器转换为交流恒流来激励电池组。

系统采用周期方波激励后,进行带通滤波,可达到同样效果,系统稳定并且降低了设计难度。

恒流源经过 PWM 调制后的周期方波电流为

$$f(t) = \begin{cases} I & 0 < t < \frac{T}{2} \\ -I & \frac{T}{2} < t < T \end{cases}$$

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \sin n w_1 t + b_n \sin n w_1 t)$$

$$\text{其中: } a_0 = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) dt = \frac{2}{T} \left[ \int_0^{\frac{T}{2}} dt - \int_{\frac{T}{2}}^T dt \right] = 0;$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos n w_1 t dt = 0;$$

$$b_n = \frac{2}{T} \left( \int_0^{\frac{T}{2}} I \sin n w_1 t dt - \int_{\frac{T}{2}}^T I \sin n w_1 t dt \right) = \begin{cases} \frac{4I}{n\pi} & n \text{ 为奇数} \\ 0 & n \text{ 为偶数} \end{cases}$$

该方波信号在区间  $(0, T)$  内,可认为注入到电池的激励源信号为

$$f_i(t) = \frac{4I}{\pi} (\sin w_1 t + \frac{1}{3} \sin 3 w_1 t + \frac{1}{5} \sin 5 w_1 t + \dots)$$

则由上述周期方波电流对电池进行激励,其响应经过带通滤波处理,保留频率  $w_1$  部分,实际效果与  $i(t) = I_s \sin w_1 t$  对电池进行激励的响应效果基本一致。由此可以判断周期方波电流激励信号是可以代替  $i(t) = I_s \sin w_1 t$  信号的。

在考虑到电池的容抗和感抗影响,注入到电池的激励源信号为

$$f_i(t) = I \sin(w_1 t + \Phi_i)$$

其中:  $I$  为幅值;  $w_1$  为角频率;  $\Phi_i$  为初相。

电池响应为

$$f_u(t) = U (\sin w_1 t + \Phi_u)$$

其中:  $U$  为幅值;  $w_1$  为角频率;  $\Phi_u$  为初相。

则电池的复阻抗为

$$Z(f) = \frac{U}{I} e^{j\theta} = r + j \frac{U}{I} \sin(\Phi_i - \Phi_u)$$

$$r = \frac{U}{I} \cos(\Phi_i - \Phi_u) \quad (1)$$

其中,  $r$  为电池的内阻。  $\theta = \Phi_i - \Phi_u$ 。

该滤波电路很容易实现。根据此原理该硬件电路也很容易实现,但是必须控制时序,在一个周期内完成,由此改进通过中点激励法可以使电路设计更稳定且容易控制。就是在电池组的正中间引出一条线使电流源为正时激励前半电池组,为负时激励后半电池组。另外,在电路中多处加滤波电路,非常实用于滤除在线监测时纹波和负载变动时的干扰。

#### 3.2 锁相放大电路的设计

锁相放大及滤波电路是整个测试的核心部分,采用具有锁相放大功能的调制解调模块 AD630,如图 1 所示。电路的输入信号分别是取样电阻  $R_f$  上的信号经过带通滤波后的参考信号为

$$S_{\text{ref}}(t) = f_i(t) R_f = I R_f \sin(w_1 t + \Phi_i)$$

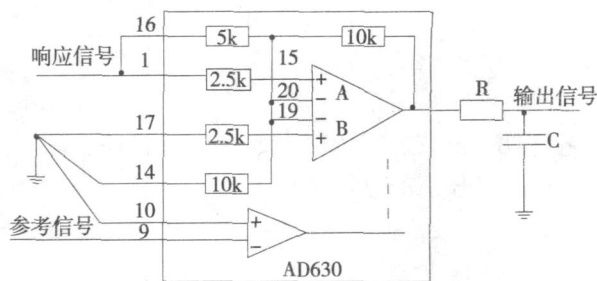


图 1 锁相放大电路

电池的测试信号经过处理后送入锁相放大电路的信号

$$u(t) = f_u(t) + n(t) = U \sin(w_1 t + \Phi_u) + n(t)$$

式中:  $U$  为响应振幅;  $w_1$  为角频率;  $\Phi_u$  为初相;  $n(t)$  为噪声信号。

由于噪声信号  $n(t)$  和参考信号  $S_{\text{ref}}(t)$  互不相关,它们的相关函数  $R_{ns}(\tau) = 0$   $\tau \neq 0$  时,有

$$U_{us}(0) = R_f U I \cos(\Phi_u - \Phi_i) \quad (2)$$

由式 (1) 和 (2),则电池的内阻抗为  $r = \frac{U}{I} \cos(\Phi_i -$

$$\Phi_u) = \frac{U_{us}(0)}{R_f I} = k_1 U_{us}(0) \text{ 其中 } k_1 = \frac{1}{R_f I}.$$

采用两个基准电阻  $R_1$ 、 $R_2$  替换电池。保持恒流源的交流恒流不变 对两个基准电阻进行同样的阻

值测试,得到采样电压  $U_{o1}$ 和  $U_{o2}$ .因此可得

$$r = (R_1 - R_2) (U_0 - U_{o2}) / (U_{o1} - U_{o2}) + R_2$$

其中:  $R_x$  为测量线路的阻抗,直流电压  $U_0$ 、 $U_{o1}$ 和  $U_{o2}$  值可通过 A/D 采样得到,而基准电阻  $R_1$ 、 $R_2$  的阻值已知,

所以电池内阻为

$$r = k_1 U_{us}(0) = \frac{R_b}{U_{us}^0(0)} U_{us}(0)$$

式中,  $R_b$  为已知的标准电阻阻值.  $U_{us}^0(0)$ 和  $U_{us}(0)$  都可通过 DSP 得到.这种测量方法的优点是利用相关原理来测试微弱信号,有效的降低了噪声干扰,采用数字信号处理技术响应时间短,适于在线测量.

3 串联电池组循环监测电路的设计

设计时采用的是 Lattice 公司的两片 M4A5 CPLD,用 VHDL 语言设计.由于 CPLD 的 I/O 口丰富,集成度高,抗干扰能力强,这样既避免了过多的单体电池的选通线间干扰,又节约 DSP I/O 口,有利于系统其他功能的扩展和升级.它主要是通过 CPLD 内设计的电路把单体电池有次序切入闭合回路由 DSP 采样电池内阻.设计时特别要注意 DSP 和 CPLD 的时钟必须一致.

放大电路采用三运算放大器构成,如图 2 所示.该电路具有强共模抑制能力和小输出漂移电压,同时该电路有较高的差模电压增益.采用这种对称电路的方式,有效地抑制了两种信号的共模部分,进一步减小了系统误差.

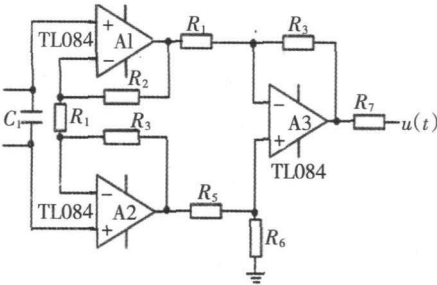


图 2 差分放大电路

4 系统的软件设计及实现方法

系统采用 TI 公司的 TMS320LF2407 DSP 处理器来进行数学运算,DSP 是专门为快速实现各种数字信号处理算法而设计的、具有特殊结构的微处理

器,低成本,低功耗,高性能的处理能力,内部资源丰富等特点<sup>[3]</sup>.

软件包括 DSP 的初始化,外围电路驱动,内阻综合算法,显示,键盘等程序.内阻采集处理的算法如图 3 所示.

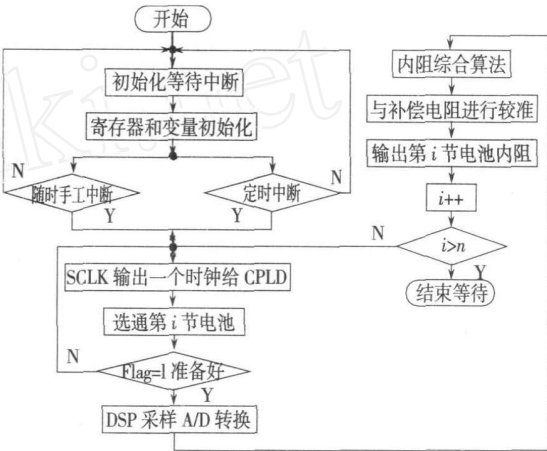


图 3 DSP 软件设计算法

5 结果与分析

实验过程中只接一组 18650 型锂离子电池共 8 个,测量数据如表 1 所示.

表 1 内阻在线监测数据和实际测量数据

| 序号 | 测量值 /mΩ | 实际值 /mΩ | 误差 /(%) |
|----|---------|---------|---------|
| 1  | 68.14   | 69.68   | 2.5     |
| 2  | 65.18   | 66.28   | 1.7     |
| 3  | 62.45   | 64.58   | 3.3     |
| 4  | 66.09   | 63.15   | 4.8     |
| 5  | 68.70   | 71.85   | 4.4     |
| 6  | 80.15   | 84.25   | 4.9     |
| 7  | 70.42   | 73.63   | 4.3     |
| 8  | 75.65   | 76.79   | 1.5     |

误差来源主要有:①由于采用的是交流信号,对监测线路产生纹波干扰,并且监测信号很微弱,因此对测量结果有一定的影响可以对电路板采用抗干扰设计,进一步减小交流信号的干扰;②由于被测电池和基准电阻测量时的接触点不完全相同,存在因接触电阻引起的误差,该因素对测量精确度的影响较大,因此在内阻的测量中需要使用专用的夹具;③由

(下转第 88 页)

$\Phi_{32 \times 5}$ 不变, A点与其它部位相比, 具有最大的水力不均匀性与热偏差, 因此它也是方法二的校核点. 尺寸放大后, 1号管的水力不均匀性有所改善, 但这并不能在方法二的计算中反映出来. 两种方法中热负荷之间的差异是由计算方法的不同引起的. 总体来说, 方法二趋于保守, 以此为依据会使受热面的设计和运行条件变得较为苛刻.

### 3 结 论

1) 建立了锅炉加热器并联管组流量分配的非线性数学模型, 对由  $n-1$  个非线性方程 (根据并联管压力降之间关系得到) 与 1 个线性方程 (质量守恒方程) 组成的方程组进行求解. 与传统方法相比, 本模型所涉及的经验参数较少, 理论依据更为可靠, 计算准确性有所提高.

2) 针对目前动力锅炉对流受热面壁温计算方法中校核点对应的工质流量与管外热负荷并不一定互相对应情况, 提出了一种较为准确的壁温计算方法. 即由流量分配非线性数学模型求出各根管

子的流量后, 根确定需要进行壁温校核的危险部位, 由一维圆管壁稳态导热方程即可求出壁面温度.

3) 利用本文建立的锅炉过热器壁温计算方法与目前常用的电站锅炉壁温计算方法, 采用两种方法分别对某电厂 330MW 塔式燃煤直流锅炉过热器改造方案所涉及的壁温安全性进行了校核. 校核时所选取的锅炉负荷为 100% 与 50%. 结果表明, 所有校核点的壁温都小于管材最高允许温度, 改造方案是可行的.

### 参 考 文 献:

- [1] 益 超, 刘幸拯, 陈之航. 大型电站锅炉烟温与汽温分布理论分析与试验研究 [J]. 中国电机工程学报, 2002, 22 (12): 56 - 61.
- [2] 卢兴江. 关于解非线性方程组的 Newton 型迭代法的若干研究 [J]. 浙江工程学院学报, 1998, (2): 141 - 144.
- [3] 张红飞. 大型燃煤锅炉热偏差的试验与数值研究 [J]. 安徽电气工程职业技术学院学报, 2004, 9 (1): 56 - 60.
- [4] 杨明波, 卢建立. 在 Excel 中实现用牛顿法求解非线性方程组 [J]. 电脑学习, 2006 (4): 62 - 63.

(编辑: 王 萍)

(上接第 84 页)

于电池组测量采用的隔直电容上存在容抗, 在一定程度上影响了内阻的测量精确度. 虽然设计中选择了容值尽可能大的电容, 但其容抗还是远远大于被测电池的内阻值, 使得电池组的内阻测量精确度低于单体电池的内阻测量精确度<sup>[4]</sup>.

### 6 结 语

本文设计的多节锂离子电池组的内阻监测系统, 实现了对电池组内阻的实时在线监测. 该电路易于扩展, 可应用于其他串数的电池组中. 电路采用了锁相环检波电路、基准电阻补偿等设计, 使得内阻采样更加精确. 并由电池的内阻可以准确预测锂离子

电池 SOC 和 SOH.

### 参 考 文 献:

- [1] 李革臣, 江 海. 便携式低功耗电池内阻测试仪的研究 [J]. 电测与仪表, 2007 (3): 22 - 24.
- [2] 李立伟, 邹积岩. 基于交流测量法的蓄电池内阻测量装置的研究 [J]. 计量技术, 2002 (12): 15 - 171.
- [3] 刘和平. TMS320LF240 DSP 结构、原理及应用 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2002.
- [4] 雷 娟, 蒋新华. 锂离子电池内阻检测系统的设计 [J]. 电池, 2007 (4): 130 - 132.

(编辑: 王 萍)