

锂电池特性对充电站参数设计的影响研究^①刘秋降^② 姜久春^③ 张彩萍 张维戈 张 帝

(北京交通大学电气工程学院 北京 100044)

摘 要 针对更换式充电站参数设计问题,研究了不同条件(充电倍率、电池老化、温度)下,电池特性对充电站参数设计的影响。采用理论推导与奥运电动客车实际运行数据、电池充放电实验数据分析相结合的方法,研究了转折荷电状态(SOC_c)、回站荷电状态(SOC_e)、恒压阶段充电时间(t_{cv})的变化规律。建立了充电站设计参数优化模型,优化了充电站设计关键参数充电时间(T_c)、备用电池组数(N_b)、配电功率(P)。将优化模型参数与充电站实际配置参数进行了对比,结果表明,备用电池数减少 14 组,减少 25%;配电容量减少 1.9MW,减少 47.5%,验证了优化模型更符合实际运行情况。

关键词 锂电池,特性,更换式充电站,因素,参数设计

0 引 言

电动汽车以其高效、环保的特点,适应可持续发展的要求,有很大的发展潜力^[1,2]。纯电动汽车主要采用锂离子电池作为动力源。充电站作为配套基础设施,对电动汽车产业发展举足轻重,发展前景广阔。目前充电站充电模式有普通充电模式、快速充电模式及更换式充电模式^[3,4]。更换式充电模式综合考虑了电动汽车能源补给的简便快捷性和电池寿命影响,是广泛应用的方式之一。现在充电站建设还处于起步阶段,国内相关标准不够完善。由于对电池使用过程中性能变化的认识不明确,在充电站设计上,存在冗余系数过大,成本增大、资源浪费的情况。

充电时间 T_c ,备用电池组数 N_b ,配电功率 P 是与电池性能相关的参数,在充电站设计中应予以考虑。根据文献[5]提出的参数设计基本模型,总充电时间等于恒流充电时间与恒压充电时间之和,且与电池容量、转折荷电状态(state of charge at turning point, SOC_c)、回站荷电状态(state of charge back to a station, SOC_e)、充电电流相关。备用电池数与总充电时间和车辆发车间隔相关;在恒流与恒压两个阶

段内,配电功率随 SOC 的变化规律近似为线性。

本文基于以上基本参数设计模型进行了车辆实际运行数据和电池充放电实验分析,考虑了多因素(电池老化、充电倍率、温度)影响下的参数设计模型优化。最后研究了关键参数冗余度。

N_b 模型中与电池性能相关的参数为 T_c 。因此研究 T_c 变化规律,相当于同时研究了 N_b 变化规律。所以本文从 T_c 和 P 两个角度分析研究,最后再对 3 个参数做优化。

1 实验平台

本研究所用数据来源于北京奥运电动客车 2009 年全年运行统计及相关电池充放电实验。实验样本为与电动客车所用同型号锰酸锂(LiMn₂O₄, LMO)电池。额定容量 90Ah,充电截止电压 4.2V,放电截止电压 3V。实验平台示意图如图 1 所示。PC 机通过上位机程序控制 Arbin 充放电测试设备,对电池样本进行充放电测试。电池样本可以是单体电池也可以是电池组。电池样本放在恒温箱中,保证整个测试过程环境温度恒定。电池的电压、电流等数据信息通过数据采集模块传给上位机。在此平台上所做实验有两组:实验 I 对额定容量 90Ah

① 863 计划(2011AA05A108)资助项目。

② 男,1989 年生,博士生;研究方向:电动汽车充电技术,E-mail:08292014@bjtu.edu.cn

③ 通讯作者,E-mail:jecjiang@bjtu.edu.cn

(收稿日期:2012-12-28)

LMO 电池用不同倍率 (charge rate, F), 包括 $C/3$ 、 $C/2$ 、 $C/1.54$ 、 $C/1.25$ 、 $C/1$ 恒流—恒压 (CC-CV) 充电 (充电截止倍率 $C/20$); 实验 II 是 10 支同型号旧电池 $C/3$ CC-CV 充电。 C/n 中 n 表示以相应电流恒流充电满充所需小时数。以上实验, 温度都设定为 25°C , 且初始 10% SOC 内, 采用较小电流 $C/3$ 预充电, 防止初始阶段电流太大造成电池极化过大^[6-8]。

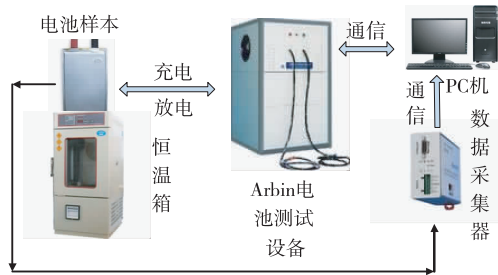


图 1 电池测试系统示意图

2 充电时间影响因素分析

充电时间的公式为

$$T_c = t_{cc} + t_{cv} = \frac{Q \times (SOC_c - SOC_e)}{I_c} + t_{cv} \quad (1)$$

其中 t_{cc} 为恒流阶段充电时间, t_{cv} 为恒压阶段充电时间, I_c 为充电电流, SOC_c 为转折荷电状态, SOC_e 为加站荷电状态。从式(1)^[5]中看出, 影响 T_c 的因素包括 SOC_c 、 SOC_e 、 t_{cv} 。但式(1)是基于 90Ah 新电池在 25°C 采用 $C/3$ CC-CV 充电条件下的计算模型, 考虑条件单一, 具有一定局限性。下面就针对影响 T_c 的因素展开研究讨论。

2.1 不同充电倍率下的 SOC_c

SOC_c 是电池采用恒流恒压充电法充电时, 恒流阶段与恒压阶段分界点处电池的 SOC。 SOC_c 表征了恒流阶段充入的容量占电池容量的百分比, 与充电倍率密切相关。实验 I 充电统计数据如表 1 所示。

表 1 不同倍率充电数据统计

充电倍率 (C)	总充电容量 (Ah)	恒流阶段充 电容量(Ah)	实验 SOC_c (%)	SOC_c 坐标 (time/s, i/A)
0.33	90.44	83.21	92.00	(10015, 30)
0.50	91.98	82.11	89.27	(6947, 45)
0.65	92.71	78.89	85.09	(5393, 58.4)
0.80	91.93	74.79	81.36	(4378, 71.5)
1.00	92.50	71.17	76.94	(3574, 90)

随着充电倍率的增大, 恒流阶段充电容量降低, 造成 SOC_c 降低。这是因为充电电流越大, 电池直流内阻压降和电池极化越大^[9], 在充电上限电压 4.2V 一定条件下, 电池越早达到转折点。

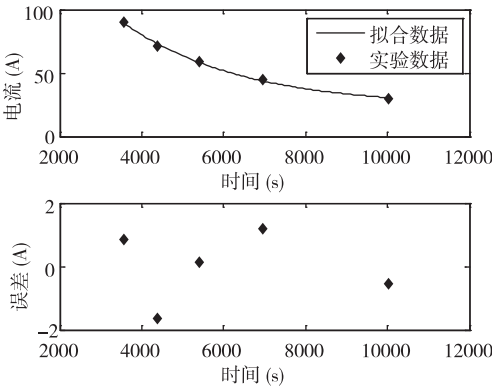


图 2 转折点拟合及误差分析

以 SOC_c 坐标的时间为自变量, 电流为变量, 对数据拟合分析如图 2 所示。发现曲线具有指数变化规律, 拟合函数原型为 $i = i_0 + \alpha e^{-t_{cc}/\beta}$ 。解出 t_{cc} 得

$$t_{cc} = -\beta \times \ln \frac{i - i_0}{\alpha} \quad (2)$$

进而求得 SOC_c 关于充电倍率表达式

$$SOC_c = \frac{L \times \left[-\beta \times \ln \frac{Q(L - L_0)}{\alpha} - t_0 \right]}{3600} + SOC_{e0} \quad (3)$$

其中 $\alpha = 227.87$, $\beta = 2868.89$, $L_0 = 0.26$, $SOC_{e0} = 0.1$, $t_0 = 1080$ 。

充电电流除以充电容量 (charge capacity, Q) 归一化, 以充电倍率为自变量, 并用 MATLAB 仿真, 结果如图 3 所示。

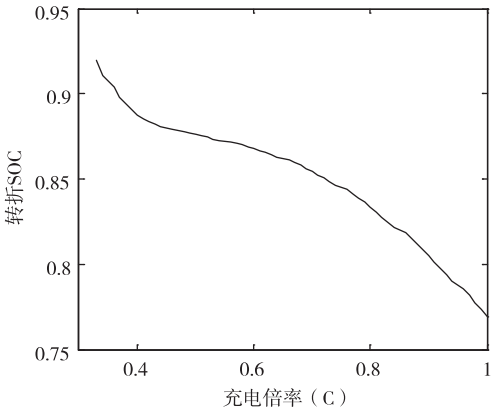


图 3 SOC_c 随充电倍率变化关系曲线

发现随着充电倍率提高, SOC_c 逐渐减小。在减小的过程中速率是不断变化的,有一个先降低再增加的过程。在 C/2 左右出现拐点,整个曲线呈现 S 型。仿真计算得到 SOC_c 与实验测得 SOC_c 对比如表 2 所示。

表 2 实验 SOC_c 与仿真 SOC_c 误差分析

倍率(C)	实验 SOC_c (%)	仿真 SOC_c (%)	误差(%)
0.33	92.00	91.99	-0.01
0.5	89.27	87.59	-1.88
0.65	85.09	86.28	1.40
0.8	81.36	83.35	2.46
1	76.94	76.89	-0.07

抽取两只 LMO 旧电池 CC-CV 充电实验数据带入上述分析过程,进行验证,验证结果见表 3。结果表明,上述 SOC_c 模型最大误差在 3% 以内,对老化电池同样适用。

表 3 旧电池 SOC_c 验证

编号	充电电流 (A)	实际充电 倍率(F)	总容量 (Ah)	实际 SOC_c (%)	理论 SOC_c (%)	误差 (%)
1	30	0.63	47.62	85.61	86.42	0.95
2	17.5	0.43	40.29	89.39	88.18	-1.35

2.2 环境温度与电池老化影响下的 SOC_e

电动客车在固定线路上运行,一个线路周期的能耗等于单位公里能耗(Energy consumption per kilometer, E_k)乘以线路公里数。根据运营数据发现, E_k 受电池老化状态和四季温度变化影响,以至于电动客车的 SOC_e 不同。

2.2.1 环境温度对 SOC_e 的影响

图 4 是对奥运会电动客车 2009 年全年运行统计数据的分析。一年中电动客车电池工作环境温度在 $-5^{\circ}\text{C} \sim 27^{\circ}\text{C}$ 范围内, E_k 在 $1.15 \sim 1.45\text{kWh/km}$ 范围内波动。可以发现, E_k 随温度的散点分布呈现两头翘中间低的“碗状”分布。温度低和温度高的时候 E_k 都会增大,“碗底”分布在 $5 \sim 20^{\circ}\text{C}$ 范围内。原因是在温度低和温度高时,空调开始工作,电动客车能耗增加。电动客车运行的线路是固定的,所以,不同温度下,行驶相同里程,电池 SOC_e 不同。因此,春季和秋季电动客车 SOC_e 高于夏季和冬季。把温度分为 $5 \sim 20^{\circ}\text{C}$ 区间 1 和其他温度区间 2 两个

区间。分别对两个区间的 E_k 统计分析,区间 1 E_k 平均为 1.21kWh/km ,区间 2 E_k 平均为 1.3kWh/km ,增加了 7.69%。世博会越江线运行数据表明,室温条件下 SOC_e 为 0.4 左右,由温度带来 SOC_e 差异可达 $(1 - 0.4) \times 7.69\% = 4.61\%$ 。

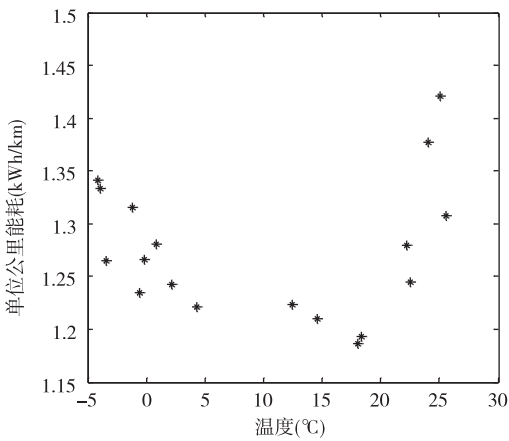


图 4 单位公里能耗随温度变化关系

2.2.2 电池老化对 SOC_e 的影响

电池在使用过程中,可用容量逐渐降低而内阻逐渐增加^[10]。在计算 SOC_e 时要以电池实际容量为依据。同时假设,电动客车线路固定,工况相同。则实际运行一个线路周期输出相同的有功能耗(active energy consumption, E_a),这是电动客车运行一段线路必须消耗的能量。同时,由于电池内阻热损失,有内阻能耗(resistance energy consumption, E_R)。电动客车总能耗 $E = E_a + E_R$ 。分析时, E_a 等效为电池以相同功率放电,放电相同时间所消耗的能量。不同老化电池 E_a 相同,因此,不同老化状态电池的能耗的差异就是电池 E_R 的差异,进而可得到对 SOC_e 的影响。

电池简化模型^[11,12]如图 5 所示,开路电压—荷电状态(OCV-SOC)曲线如图 6 所示,对应分段线性化的 OCV-SOC 曲线如下式表示:

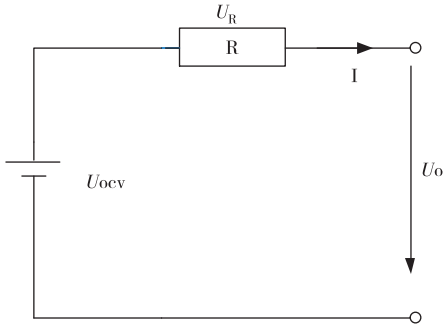


图 5 电池简化模型

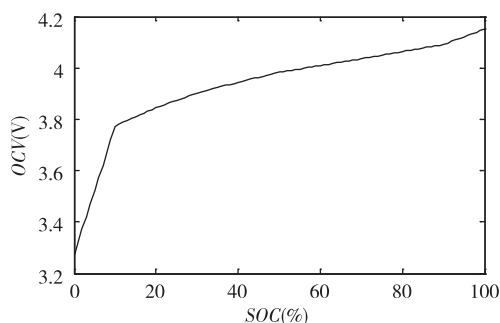


图 6 OCV-SOC 曲线

$$U_{ocv}(SOC) = \begin{cases} k1 \times SOC + b1 (0 \leq SOC < 0.1) \\ k2 \times SOC + b2 (0.1 \leq SOC < 0.9) \\ k3 \times SOC + b3 (0.9 \leq SOC \leq 1) \end{cases} \quad (4)$$

其中 k 、 b 为 OCV-SOC 曲线线性化拟合系数。

根据电池简化电路模型,放电条件下有

$$\begin{cases} U_{ocv} = U_o + i \times R \\ P = U_o \times i \end{cases} \quad (5)$$

对放电电流安时积分,除以电池实际容量,得到电池一定时间内放电深度 (depth of discharge, DOD)。求得 $SOC = 1 - DOD$ 代入分段 OCV - SOC 曲线中,联立式(5)最终得到电池在恒定功率放电条件下的电路方程如下:

$$\frac{P}{i(t)} = k \times \left(1 - \frac{\int_0^t i(t) dt}{Q}\right) + b - i(t) \times R \quad (6)$$

式中 P 为放电功率, $i(t)$ 为放电电流, k 、 b 为 OCV-SOC 曲线线性化拟合系数。

求解这个方程,可得 $i(t)$ 。对放电电流积分可以得到放电深度 (DOD), SOC_e 即放电停止时的 SOC ($SOC_e = SOC = 1 - DOD$)。

解法: 由于此方程是隐函数方程,求不出显函数表达式。所以有以下两种方法求出近似解。

(1) 级数展开法

$$i(t) = \sum_{i=0}^{\infty} a_i t^i \quad (7)$$

代入式(6)得

$$\frac{P}{\sum_{i=0}^{\infty} a_i t^i} = \left(k \int_0^t \sum_{i=0}^{\infty} a_i t^i dt\right) / c + b - \sum_{i=0}^{\infty} a_i t^i \times r \quad (8)$$

最后得:

— 1202 —

$$\sum_{i=0}^{\infty} a_i t^i \times \left[(b + a_0 r) + \left(\frac{k}{c} a_0 + a_1 r\right) t + \left(\frac{k}{c} \frac{a_1}{2} + r a_2\right) t^2 + \dots \right] - P = 0 \quad (9)$$

展开,对应项系数为 0,可以得到一个方程组。进而求得 a_i 各项系数,得到 $i(t)$ 的多项式表达式,根据精度保留需要的项数,其余舍去。其中第一项为

$$a_0 = \frac{-b + \sqrt{b^2 + 4rp}}{2r} \quad (10)$$

(2) 递推法

$$Q(k) = \sum_{t=0}^k i(t) \quad (11)$$

代入式(6)得

$$\frac{P}{i(k+1)} = kQ(k)/c + b - i(k+1) \times r \quad (12)$$

初始条件:

$$i(0) = P/OCV(0) \quad (13)$$

递推算法便于计算机编程。设定步长为 1s,通过递推计算可以得到 $i(t)$ 随时间变化规律。

下面是用 MATLAB 编程并采用递推法的具体实例计算结果,参数见表 4。电池 1 参数是统计 10 支新电池的平均值,电池 2 参数是统计 10 支旧电池的平均值。仿真计算结果如图 7 和图 8 所示。

表 4 电池参数

	内阻 (mΩ)	容量 (Ah)
电池 1	1.65	86
电池 2	2.66	51

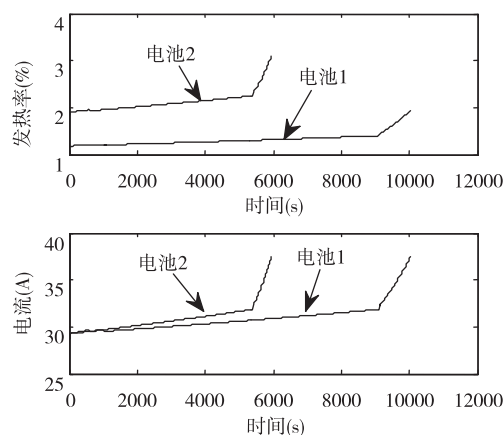


图 7 新旧电池能量损失率和电流随时间变化

从图 7 中看出,电池 2 放电电流大于电池 1。因为电池老化后,直流内阻增大,内阻压降增大,端

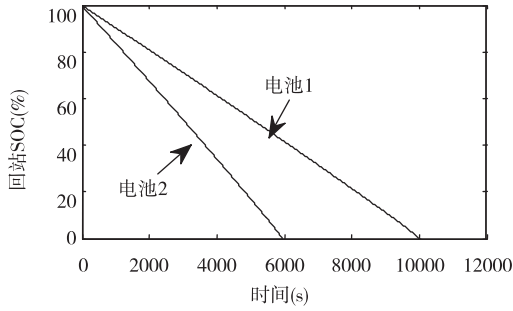


图8 电池回站 SOC 随时间变化

电压偏低,放电功率相同,则放电电流增大。同时,直流内阻发热率大于新电池。旧电池发热率为新电池的两倍,电池效率相差1%~2%。

图8显示,在相同放电功率条件下,经过相等时间,旧电池的SOCe小于新电池。时间越长差异性越大。这主要是因为旧电池容量衰退造成的,旧电池实际容量降低,单位时间内DOD偏大,SOCe降低。

可见,电池老化后,内阻增加造成 E_K 增加,容量衰退造成DOD速度加快,两者共同造成回站SOCe降低。经过上述分析可知,温度对电池 E_K 影响比电池老化后内阻增加带来的影响大。综合考虑两者影响,单位公里能耗增加幅度为8.69%~10.69%。而SOCe最终值还受到电池实际容量的影响。

2.3 电池在不同充电倍率下的 t_{cv}

在CC-CV模式下,恒压阶段充电时间 t_{cv} 受充电倍率 F 的影响。充电倍率越高,SOCc越低, t_{cv} 越长。由实验II,统计 t_{cv} 与SOCc之间关系拟合分析发现,两变量之间成线性关系 $t_{cv} = A \times SOCc + B$,如图9所示。如2.1所述,SOCc受 L 影响,因此 t_{cv} 最终可表示 F 的函数: $t_{cv}(L) = A \times SOCc(F) + B$ 。

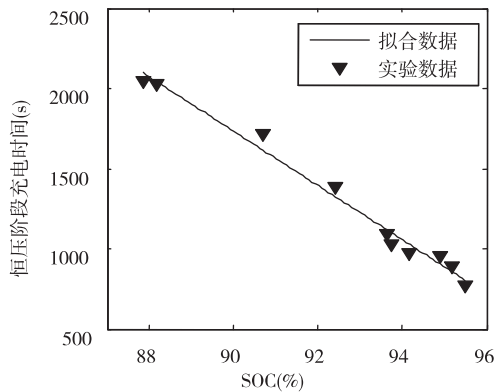


图9 恒压充电时间拟合曲线

3 充电功率影响因素分析

如图10所示,电池充电分为两个阶段,即恒流阶段 t_1 和恒压阶段 t_2 。这两个阶段的功率曲线用线性函数来表示。充电有三个关键功率点:充电初始功率 P_1 ,充电最大功率 P_2 ,充电截止功率 P_3 。

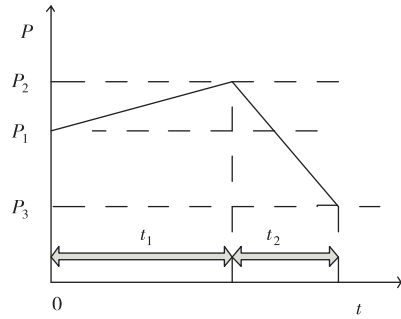


图10 电池充电功率变化示意图

(1) 充电起始功率 P_1 :

P_1 与电池初始电动势和充电模式有关,充电模式一定的条件下,初始电动势与电池的SOCe有关。SOCe越高,相应OCV越高, P_1 越高。实际中SOCe=0时,电池初始充电电压为3V, P_1 最小;SOCe=SOCc时,充电电压为4.2V, P_1 最大。 P_1 变化幅值范围较小。

(2) 最大功率 P_2 :

P_2 在恒流恒压充电转折点处取得,在此之前电池电压逐渐上升,电池充电功率上升,在此之后电池充电电流逐渐下降,充电功率下降。由于截止电压和充电模式相同,所以 P_2 相同。由于SOCe变化,充电过程 t_1 时间变化,所以不同电池 P_2 出现时间点不同。对于充电站设计来说,要保证所有电池能够在同一点取得最大充电功率即: $P > nP_{\max}$ 。

(3) 截止功率 P_3 :

P_3 与充电截止电流有关。充电模式相同条件下, P_3 相同。

(4) 平均功率 P_M :

P_M 对于预测充电站的能耗水平和负荷水平有重要意义,也是衡量充电站的规模的一个指标。如图10电池充电功率曲线示意图所示, t_1 时间段内为恒流充电, t_2 时间段内为恒压充电。不同电池 P_1 、 P_3 近似相等。下面推导 P_M 和 t_1 、 t_2 之间的关系。

$$P_M = \frac{\frac{1}{2}(P_1 + P_2) \times t_1 + \frac{1}{2}(P_2 + P_3) \times t_2}{t_1 + t_2}$$

$$= \frac{1}{2} \times \frac{(t_1 \times P_1 + t_2 \times P_3)}{t_1 + t_2} + \frac{P_2}{2}$$

$$\frac{\partial P_m}{\partial t_1} = \frac{1}{2} \frac{(P_1 - P_3) \times t_2}{(t_1 + t_2)^2} > 0 \quad (14)$$

$$\frac{\partial P_m}{\partial t_2} = \frac{1}{2} \frac{(P_3 - P_1) \times t_1}{(t_1 + t_2)^2} < 0 \quad (15)$$

据式(14)、(15),随着 t_1 增长, P_m 增加;随着 t_2 增长, P_m 降低。电池老化后, t_1 缩短 t_2 增长, P_m 降低。因此充电站设计时,只要保证功率冗余度满足新电池电动客车要求即可。

4 充电站参数冗余设计

第 2、3 节分析了环境温度、电池老化、充电倍率对充电时间和充电功率影响,从而为模型参数优化提供了依据。优化后的模型参数如下:

(1) 总充电时间 T_c'

$$T_c' = \frac{\kappa \times Q \times [SOC_c(F) - \lambda \times SOC_e]}{I_c} + A \times SOC_c(F) + B \quad (16)$$

κ 为容量衰减系数, λ 为回站 SOC 修正系数, SOC_e 以 25℃90Ah 电池为基准。

(2) 备用电池数 N_b'

$T_c' > T_h$ 时

$$N_b' = \frac{T_h}{T_{hr}} + \frac{T_c' - T_h}{T_{cr}} \quad (17)$$

$T_c' < T_h$ 时

$$N_b' = \frac{T_h}{T_{hr}} \quad (18)$$

(3) 配电功率 P'

$$P' = P$$

根据世博会实际运行统计数据,按照上述优化模型计算,得到多因素影响(电池容量衰退后按 80% 计)下充电站设计参数。其中 P 的冗余度按 10% 计。

表 5 是充电站优化模型参数与实际参数对比,实际运营参数是充电站实际运行过程中的数据,实际配置参数为充电站初始设计时的设计参数,优化模型参数是根据前文的优化模型计算所得,冗余配置参数为根据优化模型参数附加 10% 裕量后所得。从表中数据可以发现,实际配置参数远超过了实际运营的需要,充电时间和配电功率为实际的 2 倍,备用电池数为实际需求的 1.4 倍。优化模型参数考虑了电池整个使用过程中的性能变化,涵盖了实际运

营参数范围,符合实际运行情况。充电站建设中,备用电池、配电功率是投资主要方面之一。考虑冗余之后合理配置参数,备用电池数减少 14 组,减少 25%,配电容量减少 1.9MW,减少 47.5%。就锂电池而言,价格大概在 3500 元/kWh^[13],一组电池约为 20kWh,电池总成本降低 100 万元左右。充电机功率平均价格每千瓦 2000 元,则成本降低 380 万元左右。照此设计,能够大大优化资源配置节约成本,取得良好经济效益和社会效益。

表 5 充电站优化模型参数与实际参数对比

	T_c (h)	N_b (组)	P (MW)
实际运营参数	1.85 ~ 2.1	40	1.9
实际配置参数	3	56	4
优化模型参数	1.72 ~ 2.13	35 ~ 42	< 1.9
冗余配置参数	2.2	42	2.1

5 结 论

本文研究了 SOC_c 、 SOC_e 、 t_{cv} 、 P 的变化规律: SOC_c 特性表明恒流阶段充电电流大小和充电时间成指数关系, SOC_e 同时受到工作环境温度 and 电池老化的影响; t_{cv} 与 SOC_c 成线性关系; 电池老化后配电功率不会增加。基于此,建立了充电站设计参数充电时间、备用电池数、配电成功率优化模型。与实际运行数据和充电站实际配置对比,验证了模型有效性。考虑了一定冗余度,给出了充电站参数设计合理范围,备用电池数减少 14 组,减少 25%,配电容量减少 1.9MW,减少 47.5%,有效节约成本,优化资源配置。以上研究结果说明,充电站设计时,电池性能的影响不容忽视,只有充分考虑了整个运行过程电池特性变化,才能有效地配置各项参数。

但是本文基于电动客车运行线路不变的条件,未能考虑特殊节假日时的高峰运行状况。因此下一步要结合电动客车实际调度情况,考虑电动客车发车间隔、高峰运行时间、平峰运行时间等参数,进一步优化充电站设计参数。

参考文献

- [1] 郭春林,甄子健,武力等. 电动汽车发展前景与关键因素分析. 汽车工程, 2012, 34(9): 852-858
- [2] 高敏. 电动汽车的特点与发展趋势. 能源研究与利用,

- 2011,(4):24-26
- [3] 康继光,卫振林,程丹明等. 电动汽车充电模式与充电站建设研究. 电力需求侧管理,2009,11(5):64-66
- [4] 郝娟,李强,岳建华. 电动汽车充电站充电模式探讨. 内蒙古电力技术,2010,28(S2):7-9
- [5] 张维戈,张帝,温家鹏等. 电动公交更换充电站的优化设计. 北京交通大学学报,2012,36(2):100-104
- [6] Zhang S S. The effect of the charging protocol on the cycle life of a Li-ion battery. *Journal of Power Sources*,2006,161(2):1385-1391
- [7] Shi Y, Wen L, Li F, et al. Nanosized $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ /graphene hybrid materials with low polarization for high rate lithium ion batteries. *Journal of Power Sources*,2011,196(20):8610-8617
- [8] 温家鹏. 纯电动汽车用锂离子动力电池优化充电研究:[博士学位论文]. 北京:北京交通大学电气工程学院,2011. 72-73
- [9] Matthieu D, Liaw B Y. Identify capacity fading mechanism in a commercial LiFePO_4 cell. *Journal of Power Sources*,2009,194(1):541-549
- [10] Vetter J, Novak P, Wagner M R, et al. Ageing mechanisms in lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources*,2005,147(1-2):269-281
- [11] 文锋. 纯电动汽车用锂离子电池组管理技术基础问题研究:[博士学位论文]. 北京:北京交通大学电气工程学院,2009. 15-16
- [12] 张彩萍,姜久春. 用基于遗传优化的扩展卡尔曼滤波算法辨识电池模型参数. 吉林大学学报(工学版),2012,42(3):732-737
- [13] 巩俊强,邓浩,谢莹华等. 储能技术分类及国内大容量蓄电池储能技术比较. 中国科技信息,2012,(9):139-140

Influence of li-ion battery characteristics on charging station parameter design

Liu Qiujiang, Jiang Jiuchun, Zhang Caiping, Zhang Weige, Zhang Di
(School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044)

Abstract

For the parameters design of a replacement battery charging station, a study of li-ion battery properties was conducted under the consideration of the factors of charging ratio, battery aging, temperature. Through the combination of the theoretical derivation with the analysis of the data obtained from Olympic bus actual operation and battery charging-discharging experiments, the state of charge at turning point (SOC_c), the state of charge back to a station (SOC_e), and the constant voltage charge time (t_{cv}) were studied. Key parameters of charging stations, such as the charging time (T_c), the spare battery number (N_b) and distribution power (P) were optimized by the proposed parameter optimization model. The comparison between the improved model parameters and actual application parameters was performed, and the result indicated that the the proposed model performed better because N_b and P were decreased by 25% and 47.5%, respectively.

Key Words: Li-ion battery, characteristics, replacement battery charging station, factors; parameters design