



本文介绍了混合动力汽车电池内阻特性及其在实验室条件下常用的测试方法，重点讨论在不具备电池实验室条件下通过整车实际工况数据进行混合动力汽车电池内阻的计算方法，并通过实际案例给出计算公式。

□ 宁波吉利罗佑发动机零部件有限公司 刘军奇 李枋珂 王丽君 杨陈 李曙波

混合动力汽车电池内阻测试方法研究

混合动力汽车一般指的是油电混合动力汽车，相比传统汽车，混合动力汽车由于其低油耗、低排放特点成为各大主机厂研究与开发的重点，随着人们对节能减排要求的不断提高，各主机厂都加大了对混合动力汽车的研发投入。

动力电池是混合动力汽车动力系统的核心组成部分，它不仅是电机、电动空调及 DC/DC 等高压负载的电源，还是发电机发电、能量回收时存储电能的载体。

在混合动力汽车中，动力电池一般采用功率型电池，由多节锂电池（或镍氢电池）串联而成，具有充放电功率高、损耗低及瞬时放电电流大的特点。

内阻是动力电池一个非常重要的技术参数，作为衡量电池内部离子和电子传输难易程度的参数，它对电池的充放电功率、充放电电流、电池发热及损耗有着重要的影响，它直接关系着混合动力汽车的动力性、经济性，因此，研究电池内阻及其测试方法对混合动力汽车开发具有重要意义。

电池内阻特性

1. 电池内阻等效电路

电池内阻包括欧姆内阻和极化内阻。欧姆内阻由电极材料、电解液、隔膜电阻及各部分零件的接触电阻组成。极化电阻是指正极与负极进行电化学反应时极化所引起的内阻。

图 1 为电池内阻等效电路示意图。其中， R_1 为电池欧姆内阻， R_2 、 R_3 为极化电阻，电池欧姆内阻可近似理解为一个变化相对较小的常量，它主要与电池的材料体系、内部结构及连接形式等因素有关，相对来说极化电阻受外界因素影响变化较大，

电池的充放电电流、工作环境温度和电池 SOC 状态等因素对它都有影响。

2. 交流内阻

对于电池内阻测试，采用不同的测试方式、不同的测试原理所测试的结果有所差异，根据测试方式及测试原理划分定义，电池内阻又可以分为交流内阻和直流内阻两类。

在图 1 中，如果对电池正负极输入 1kHz 的正弦波交流电流信号，在该频率下电池的 R_2 、 R_3 值一般较小，可以忽略不计，采用此种交流电流信号测试出来的电池内阻与欧姆内阻 R_1 比较接近。

交流内阻测试正是基于这一原理，在电池正负极输入 1 kHz 正弦波交流电流信号，然后通过检测电池正负极两端的电压降及电流信号计算出来的电池阻抗，因此，电池的交流内阻可以近似认为就是欧姆内阻 R_1 。在电池生产线上一般常采用内阻仪来进行单体电池测试，内阻仪测出来的电池内阻是交流内阻。

3. 直流内阻

混合动力汽车用动力电池组（或电池包）由多

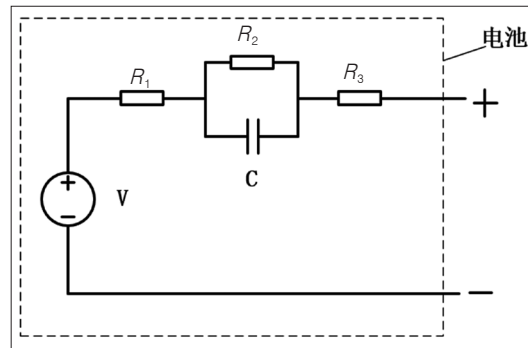


图 1 电池内阻等效电路示意图

节单体电池串联而成，电压一般在 200 ~ 400 V 不等，对于动力电池组来说，由于电压较高，考虑到安全、设备等各种因素，一般采用给电池组输入直流电流信号的测试方式来测试电池内阻，采用这种方式测试出的电池内阻称为直流内阻。

直流内阻测试时输入的直流电流信号一般是一个恒流的脉冲电流，该电流信号一般持续时间较短。

电池直流内阻测试一般在电池实验室条件下，采用专用的充放电设备进行测试。电池直流内阻可以较好地反映电池组在特定条件下的真实内阻状态，它不仅包括了电池欧姆内阻，还包括了电池极化内阻，它不仅反映了电池的充放电能力，还可以反映电池使用过程的老化程度，因此，电池直流内阻是评估电池组的一个重要技术指标。

4. 影响电池内阻的因素

电池的内阻与外界负载及电池的使用环境密切相关，是一个动态变量值，影响电池内阻的因素较多，主要包括：①工作环境温度；②电池的 SOC 状态；③电池充放电电流大小；④充放电持续时间。

对于动力电池组来说，电池内阻一般是在某个条件状态下的内阻，如无特定条件说明，一般指的是室温条件下满电状态时的电池内阻。

直流内阻（DCR）测试方法

混合动力汽车电池为功率型电池，经常工作在大功率、频繁脉冲充放电状态，因此，混合

动力汽车电池在实验室条件下进行电池内阻测试时，充放电电流大小、充放电持续时间、电池 SOC 状态、工作环境温度等这些测试参数的选择需与电池在整车上实际使用工况相似。

混合动力汽车电池内阻测试方法在 GB/T 31467.1-2015 第 7.2 条有详细的介绍，具体的测试方法及步骤如下：

- 1) 充放电脉冲电流采用恒定电流。
- 2) 放电持续 18 s, 充电持续 10 s, 中间静置 40 s。
- 3) 环境温度分别设置为 40℃、室温、0℃、-20℃。
- 4) 电池 SOC 状态分别设置为 80%、50%、20%。
- 5) 记录每一时刻电池组电压及对应的充放电电流。
- 6) 根据放电内阻相关计算公式，得出不同测试持续时间测出的电池内阻，测试持续时间分别为 0.1 s、2 s、10 s。充电内阻计算方法与放电内阻计算方法相似，在此不多做叙述。

基于整车试验的混合动力汽车电池内阻测试方法研究

1. 整车试验可采集的电池工况数据

前面介绍了常用的在实验室条件下进行的混合动力汽车电池内阻测试方法。在实际工程应用中，有时并不具备电池实验室测试条件，例如电池已安装在整车上进行整车试验，如何在整车试验工况下得到电池内阻参数是很多工程师面临的实际问题。

在整车试验中，通过数据采集设备可实时采集整车各系

统（如发动机、电机、电池）的实时工况数据。下面以某款混合动力车整车工况试验为例。该整车试验持续时间为 30 min（1 800 s），经后期数据处理，数据采样频率为 10 Hz，采集的电池的工况数据有电池电压、电流、温度及 SOC 等，该数据反映了电池在整车上实际应用中的充放电状态。试验时采集的电池电压数据曲线如图 2 所示，车速曲线如图 3 所示。

2. 基于工况数据下电池内阻计算公式推导

从以上数据可以看出，混合动力汽车在实际工况下，在大部

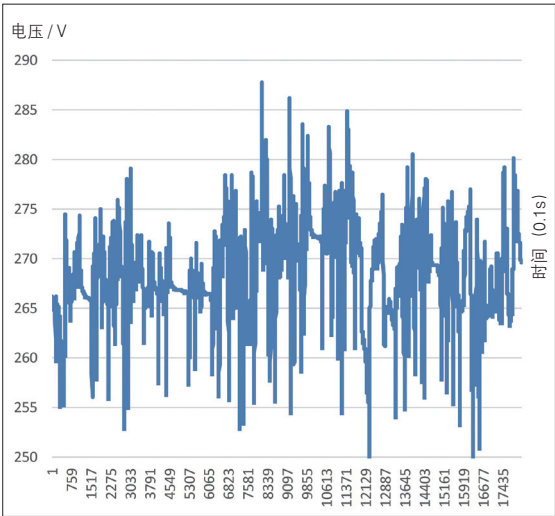


图 2 电池电压曲线

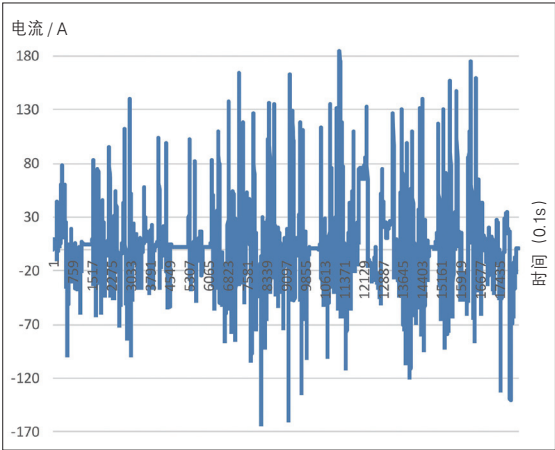


图 3 车速曲线

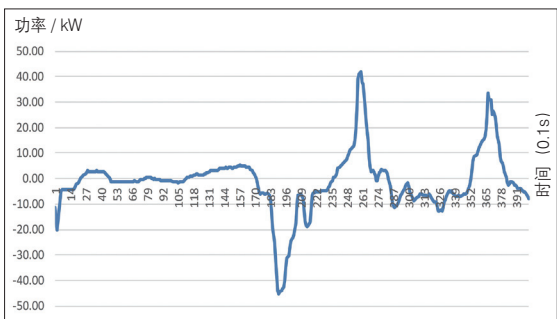


图4 混合动力汽车动力系统连接图(40s)

分时间段电池都是脉冲放电、脉冲充电,脉冲持续时间大部分都是1~2s。混合动力汽车动力系统连接如图4所示,包括动力电池、电机控制、驱动电机、发电机及发动机。

其中,设定电池放电电流方向为正,充电电流方向为负。 V_B 为电池开路电压, V_O 为电池输出至外界负载的端电压, R 为电池内阻。假设 t_1 时刻电池包输出电压、电流分别为 V_1 、 I_1 , t_2 时刻分别为 V_2 、 I_2 ,根据电路原理可得出:

$$V_1 = V_{ocv} - I_1 \times R \quad (1)$$

表 电池1s内阻计算示例

	A	B	C	D	E	F
1	time	'HV_battery soc'	'HV_Battery Voltage'	'HV_Battery Current'	HV_Batt Temp	R 1s
3856	385.4	42.4	264.4	22.8	24	0.083
3857	385.5	42.4	264.4	22.7	24	0.091
3858	385.6	42.4	264.4	22.8	24	0.097
3859	385.7	42.3	264.4	22.3	24	0.100
3860	385.8	42.3	264.4	22.1	24	0.095
3861	385.9	42.2	264.5	21.6	24	0.094
3862	386	42.2	264.5	21.0	24	0.100
3863	386.1	42.2	264.7	19.9	24	0.111
3864	386.2	42.2	264.9	18.0	24	0.109
3865	386.3	42.1	265.0	16.1	24	0.110
3866	386.4	42.1	265.0	15.6	24	0.121
3867	386.5	42.1	265.0	15.8	24	0.102
3868	386.6	42.1	265.2	15.0	24	0.093
3869	386.7	42.1	265.3	13.1	24	0.100
3870	386.8	42.0	265.4	11.6	24	0.113
3871	386.9	42.0	265.5	10.9	24	0.113
3872	387	42.0	265.6	10.5	24	0.125
3873	387.1	42.0	265.9	8.4	24	0.120
3874	387.2	42.0	266.3	4.5	24	0.118
3875	387.3	42.0	266.7	0.5	24	0.115
3876	387.4	42.0	267.7	-6.3	24	0.109

$$V_2 = V_{ocv} - I_2 \times R \quad (2)$$

根据以上公式,可得 $t_1 \sim t_2$ 时间段,电池内阻 R 与电压、电流关系为:

$$R = -(V_1 - V_2) / (I_1 - I_2) \quad (3)$$

式(3)中,如果 t_1 时刻 $I_1=0$,则 $R=(V_1-V_2)/I_2$,这与国标的计算公式是一致的,不同的是国标测试采用恒流放电、恒流充电,起始时刻电流为0。

3. 基于工况数据下电池内阻计算方法

由公式(3),结合在整车测试工况下电池实测数据,可以计算出在某特定条件下(某时间、某温度、某SOC)电池的内阻。

实际工况大部分时间段混合动力汽车电池的充放电持续时间为1~2s,根据这一特征,持续时间1s电池内阻算法如下:

1) 数据选取:先选取某条件下(某温度、某SOC)一段电池充放电工况数据,先计算出这段时间内 n 个1s电池内阻,例

如: R_1 、 R_2 、 $R_3 \cdots R_n$ (n 取值根据实际情况而定),由于数据采集频率为10Hz,1s时间间隔可采集10组数据,所以 $R_1 = -(V_1 - V_{11}) / (I_1 - I_{11})$, $R_2 = -(V_2 - V_{12}) / (I_2 - I_{12})$, $\cdots R_n = -(V_n - V_{n+10}) / (I_n - I_{n+10})$

2) 数据处理时要剔除一些异常的数据,如负值或过大、过小的数据,然后对计算结果取平均值,即可得出某条件(某温度、某SOC)下1s电池内阻。

如果要计算工况数据下电池的2s内阻,上述间隔数据取20。同理,采用这种方法也可以计算工况数据下10s电池内阻,此时可选取0~100km/h加速时的电池工况数据。

4. 示例

某款混合动力汽车实际工况数据的电池内阻的计算示例见表所示。其中,从左至右依次是实时采集的电池工况数据,包括时间、SOC、电池电压、电流和温度,最右一列为按上述方法计算出的1s电池内阻,为了取得较好的精度,剔除异常数据后,计算结果取平均值。

结论

1) 电池内阻对电池性能影响较大,电池内阻测试工作是混合动力汽车开发过程中的一项重要工作,在具备电池实验室条件下,混合动力汽车电池内阻一般按国标GB/T 31467.1-2015进行测试。

2) 在不具备电池实验室条件下,可以通过采集混合动力汽车电池的特定工况数据来计算电池内阻,经过实际应用效果来看,按本文所述方法可以满足一般工程应用需求。 AI