



交流阻抗技术 (EIS)
用于电池的研发与
性能诊断

Electrochemical Impedance Spectroscopy



Electrochemistry



AC Resistance



Range of Frequency

$$Z = \frac{V_{AC}}{i_{AC}}$$

交流阻抗技术是一种非破坏性且又快速的测试技术，
可以获得丰富的有关电池内部的信息。

交流阻抗技术通常应用于

- 电池测试
- 电池管理
- 电池研发

原始数据



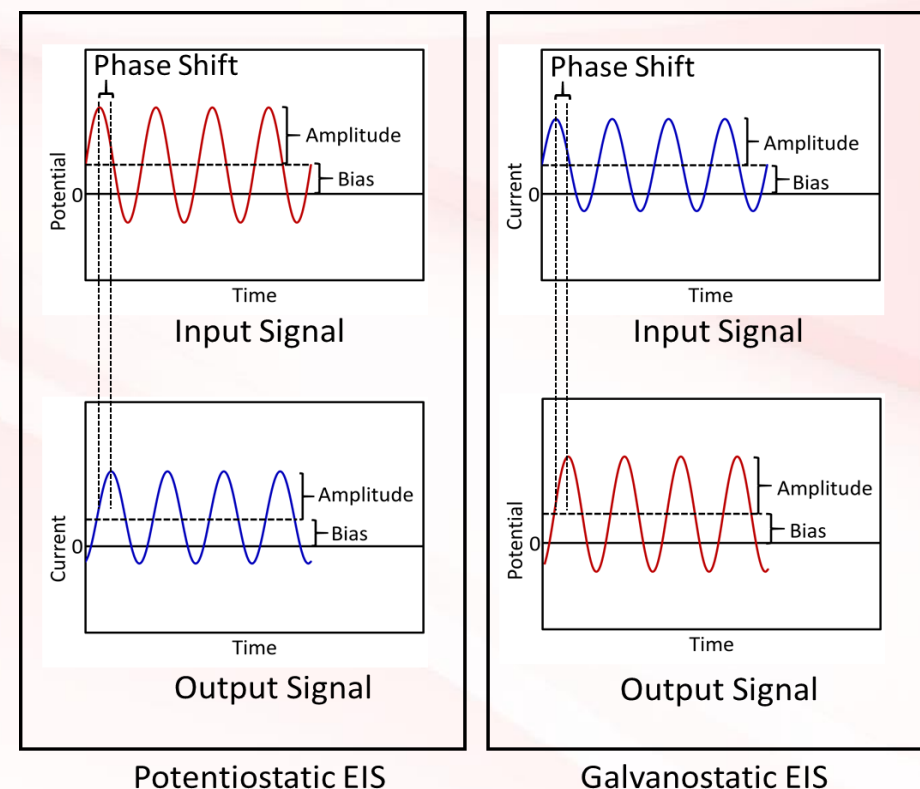
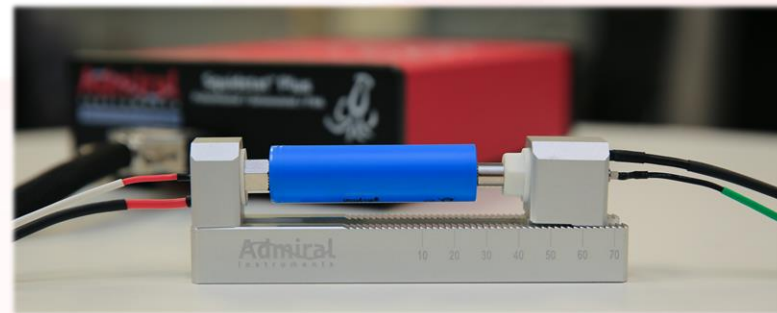
适合的应用

- 电池内阻
- 离子转移阻抗
- 传质阻抗
- 界面阻抗
- 荷电状态 (SOC)
- 健康状态 (SOH)

- 电池定性评价
- 电池管理系统
- 电池开发
- 失效诊断

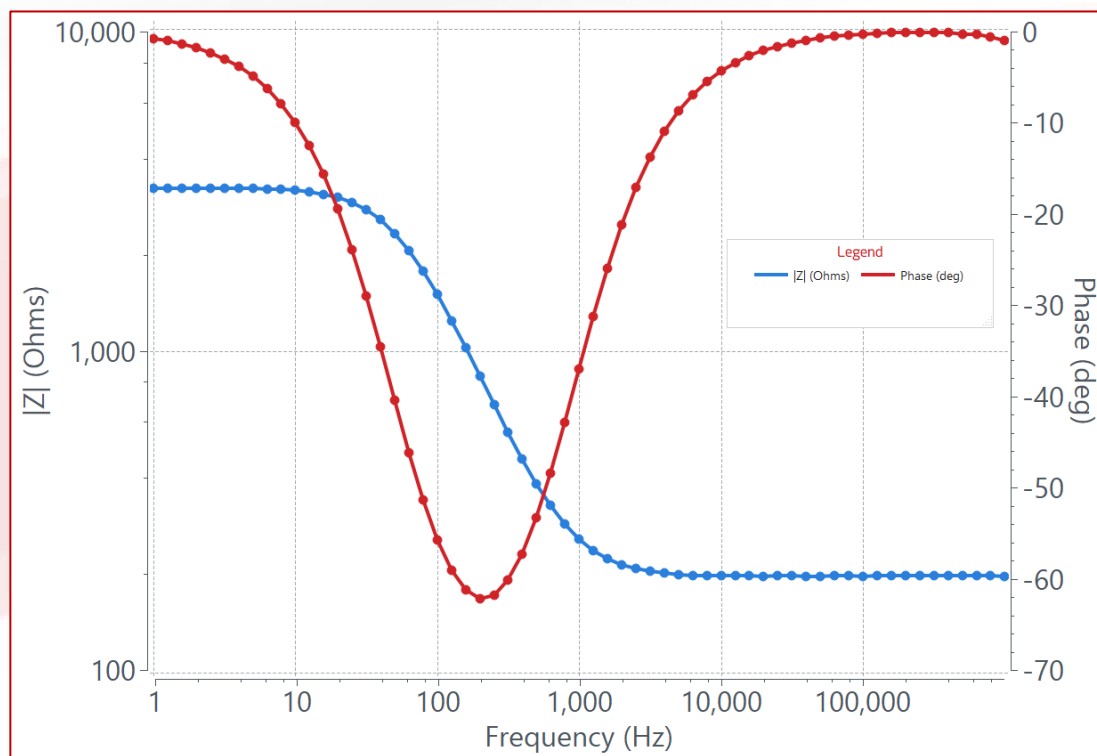
EIS 测试步骤

1. 连接被测电池到具有EIS功能的电化学工作站
2. 确定试用电压扰动还是电流扰动交流阻抗方法
3. 设置相应的测试参数
(频率范围, 扰动幅度, 直流偏置等参数)
4. 电化学工作站开始施加交流扰动和采集响应信号
5. 实时数据处理, 计算交流阻抗数据 (如, 实部虚部, 相位, 直流分量等)
6. 交流阻抗数据分析, 建立等效电路模型, 拟合分析

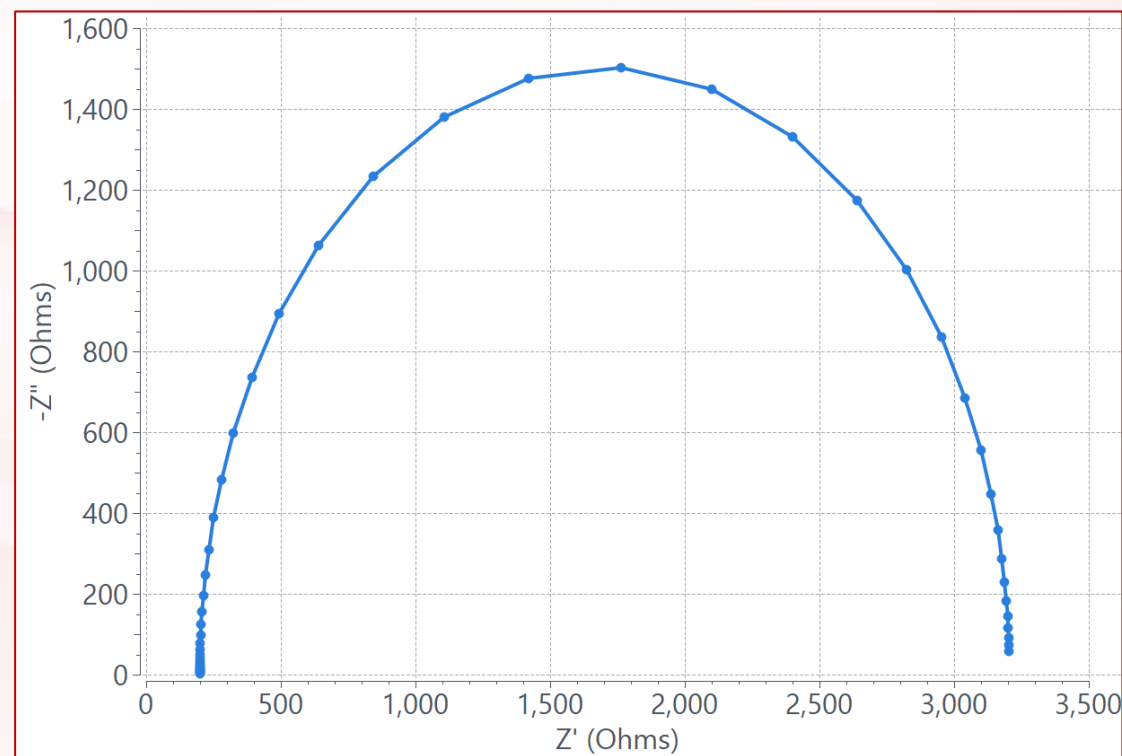


通常使用两种EIS作图方式

Bode 图: Abs(Z) and Phase vs. Frequency



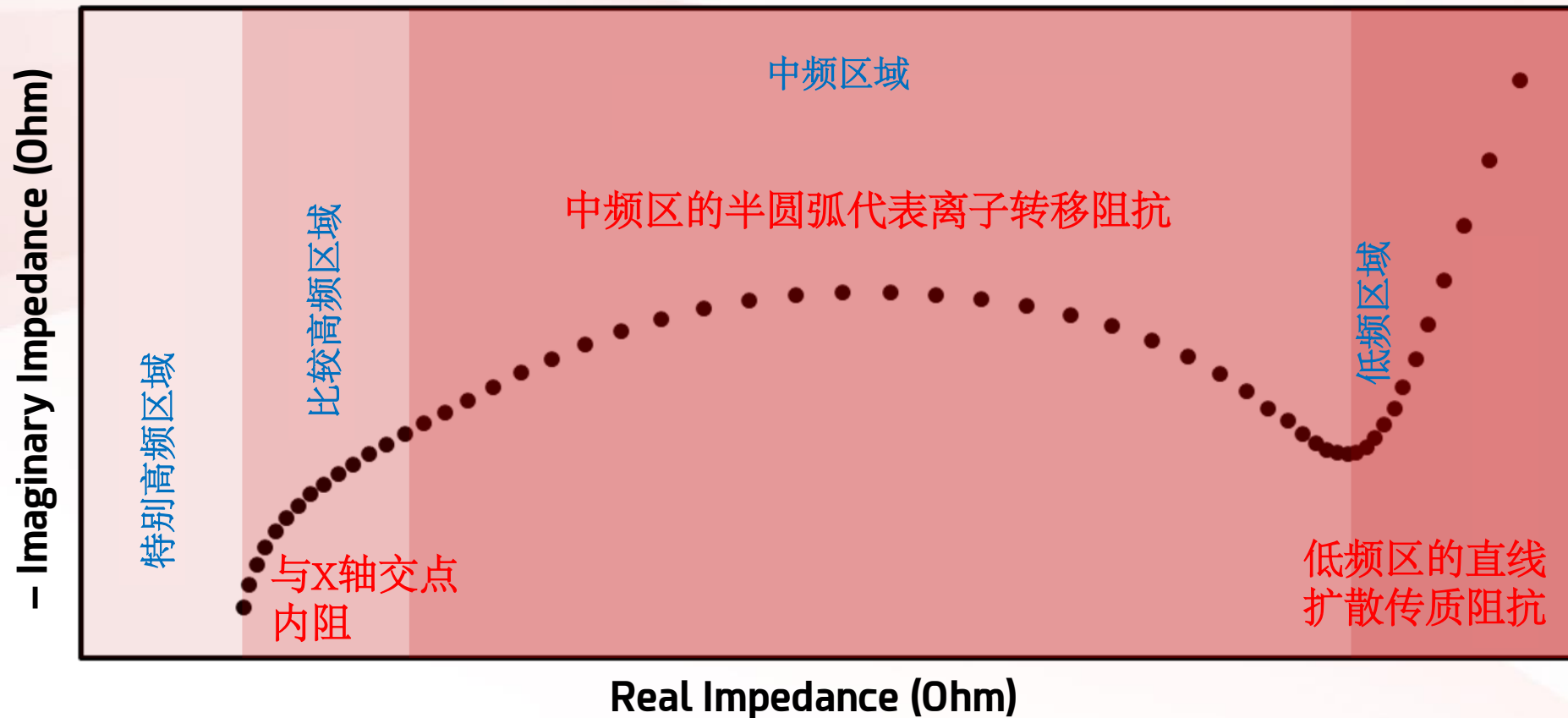
Nyquist 图: -Imaginary Z vs. Real Z



通常使用Nyquist图，从Nyquist图中可以直接获得几个主要参数

典型的锂离子电池测交流阻抗Nyquist曲线

锂离子电池的Nyquist 图中展现四个主要区域



电池内部与频率区域相关的许多现象

特别高频区域
锂离子在电解质中的传输,
电子导电性

比较高频区域
锂离子通过固体电解质界面
的传输

中频区域
电极-电解质界面的
电荷转移

低频区域
锂离子在电极和电解质中的
扩散

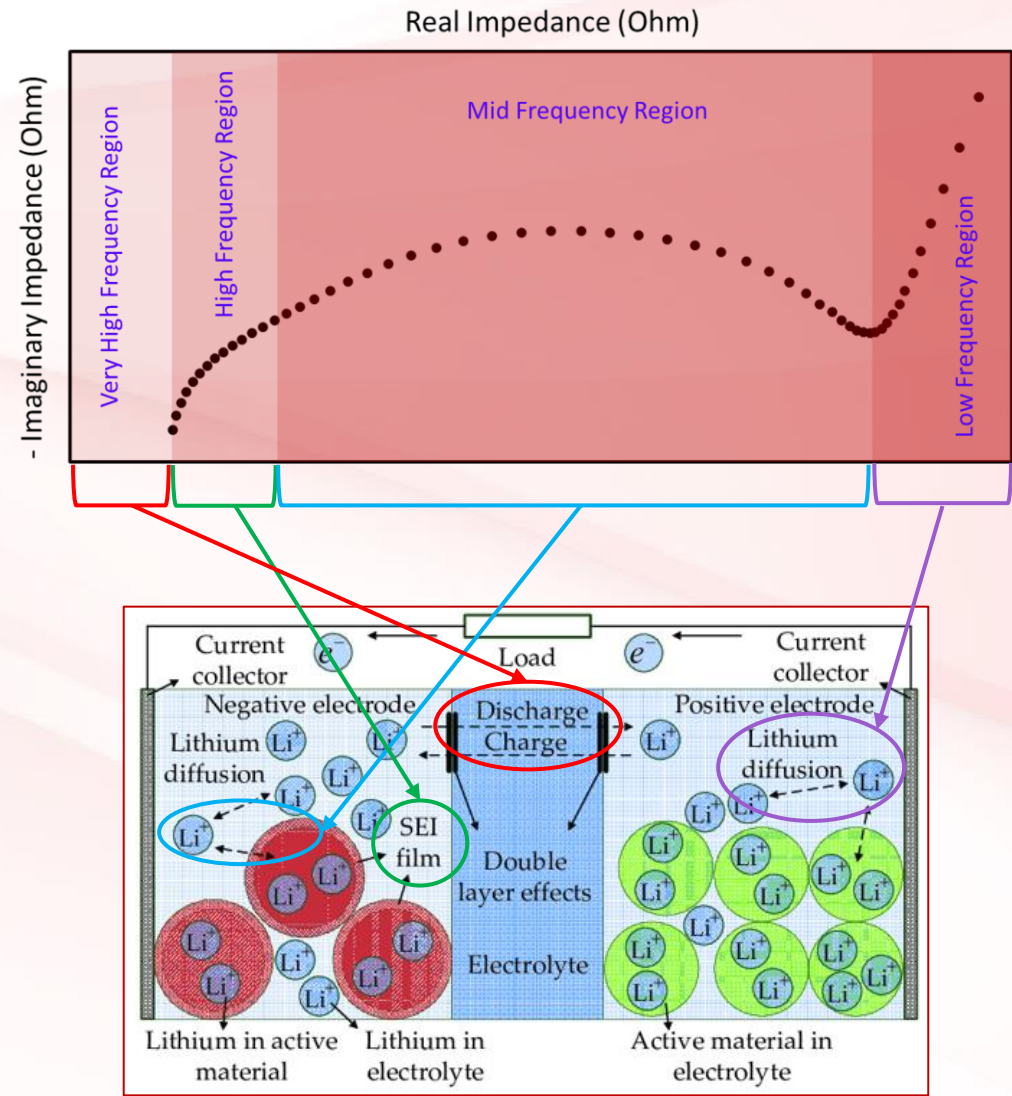
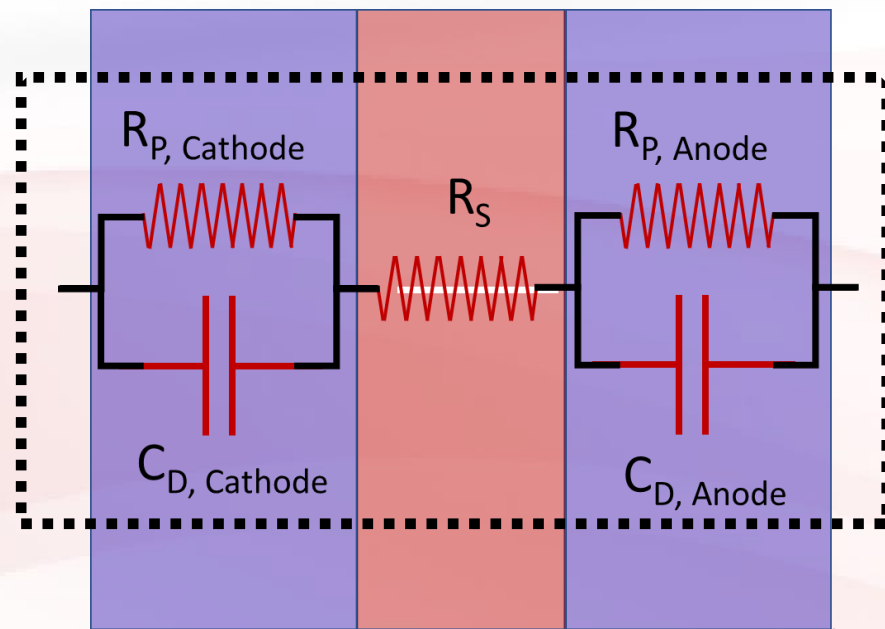


Figure from: Zhou, et al. Energies 9 (3) 123 (2016)

EIS 数据的等效电路模型(ECM)

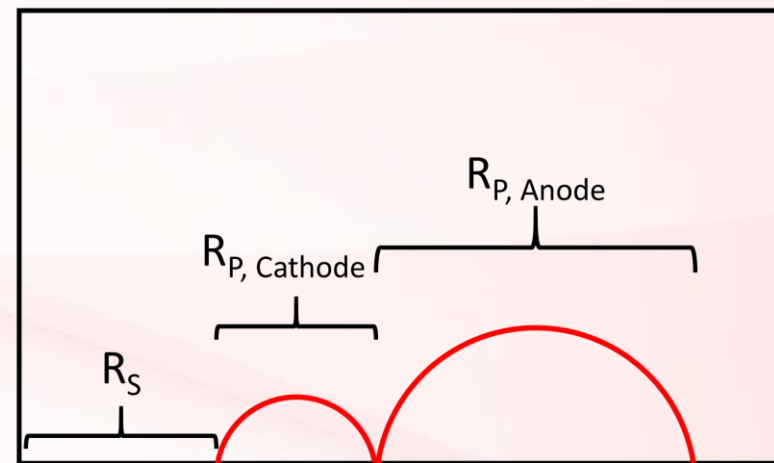
一般的电化学体系

等效电路
模型 (ECM)



Double-layer of Cathode Electrolyte Double-layer of Anode

Imaginary Impedance (Z'')



Real Impedance (Z')

电化学过程的行为可以用电学元件(电阻、电容、电感等)和电化学元件(常相位角、Warburg等)来表征。

通过将 **EIS** 数据拟合为等效电路，可以定量的描述电化学现象

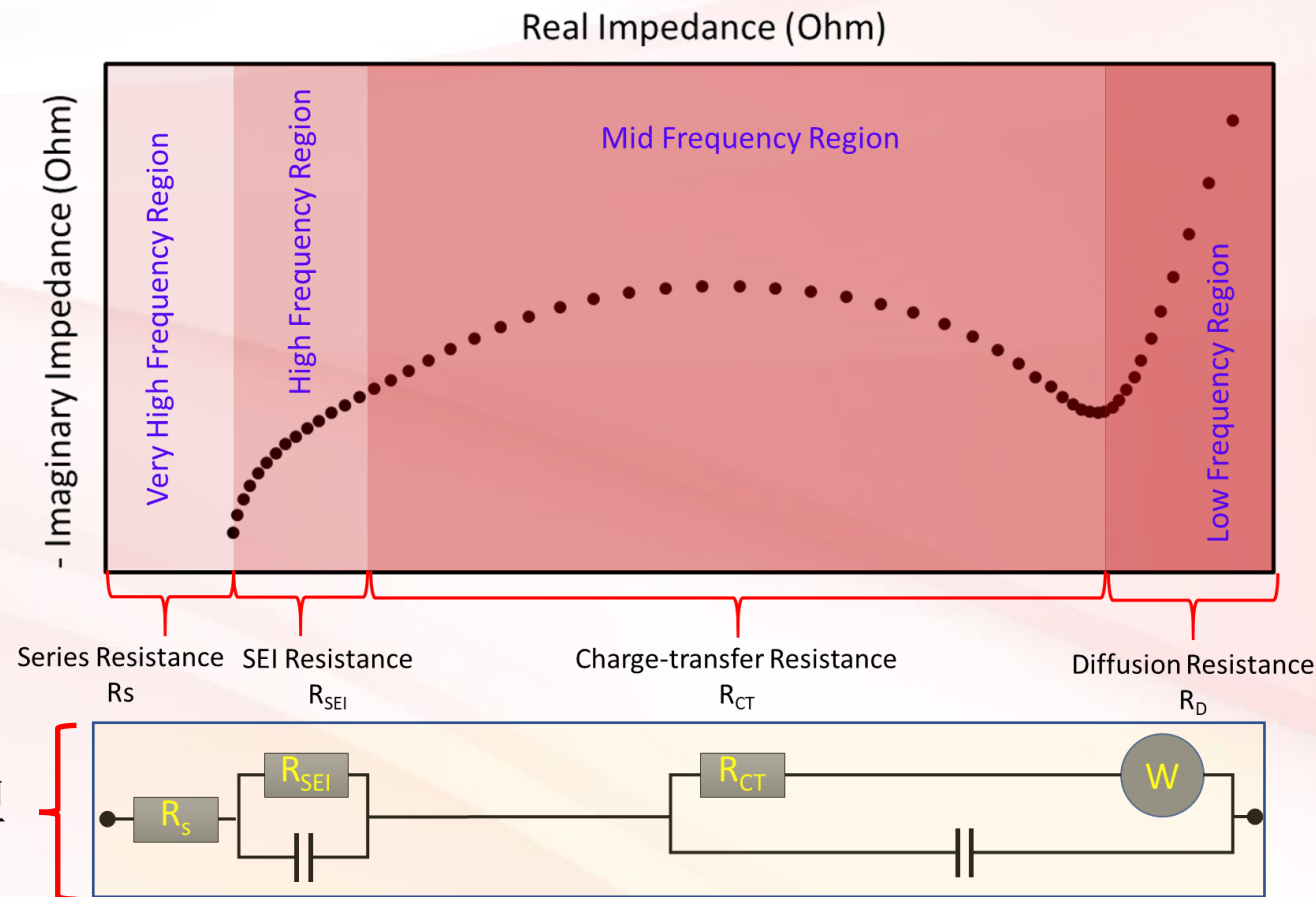
例如:

R_S : 串联电阻

R_{SEI} : 固体电解质界面电阻

R_{CT} : 电荷转移电阻

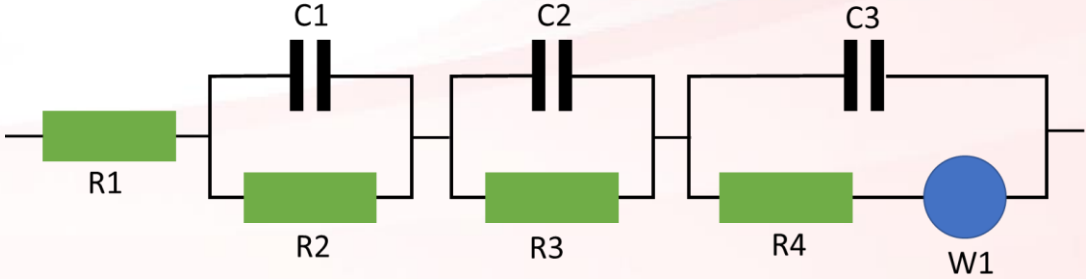
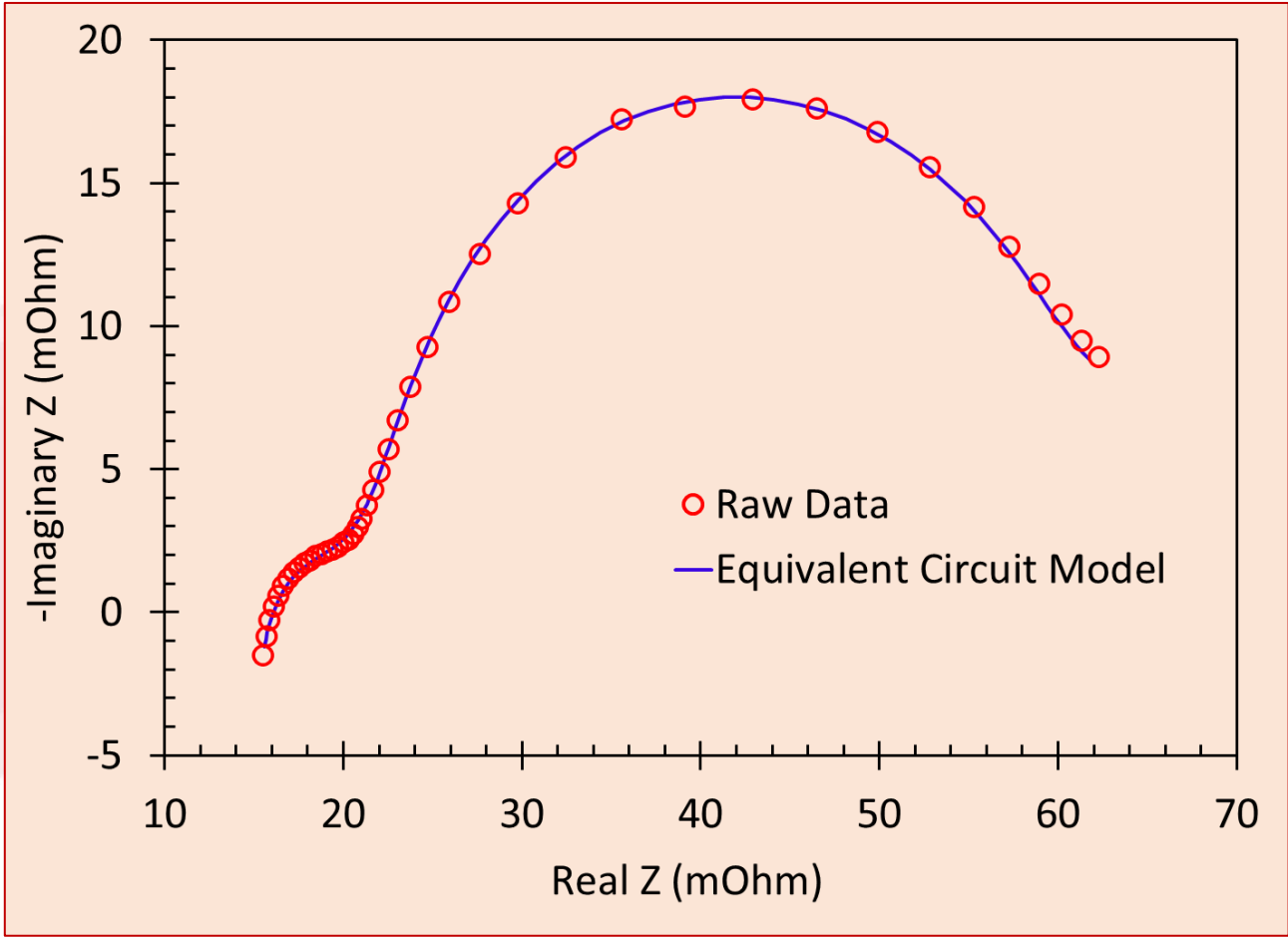
R_D : 扩散电阻



等效电路模型

充电状态 (SOC) 和健康状态 (SOH) 的值可以从等效电路模型算出的常数中推导出来。

计算等效电路常数需要专门的软件



Circuit Elements	Fitted Values
R1	152 mOhm
C1	5.53 F
R2	22.5 mOhm
C2	21.1 F
R3	67.6 mOhm
C3	27.3 F
R4	8.85 mOhm
W1	3.04 mDW

大多数恒电位仪厂家都会提供 ECM 拟合软件来分析数据。

串联电阻(R_s)随着循环次数的增加而增大, 如图所示
循环次数越多的在 x 轴的截距越大

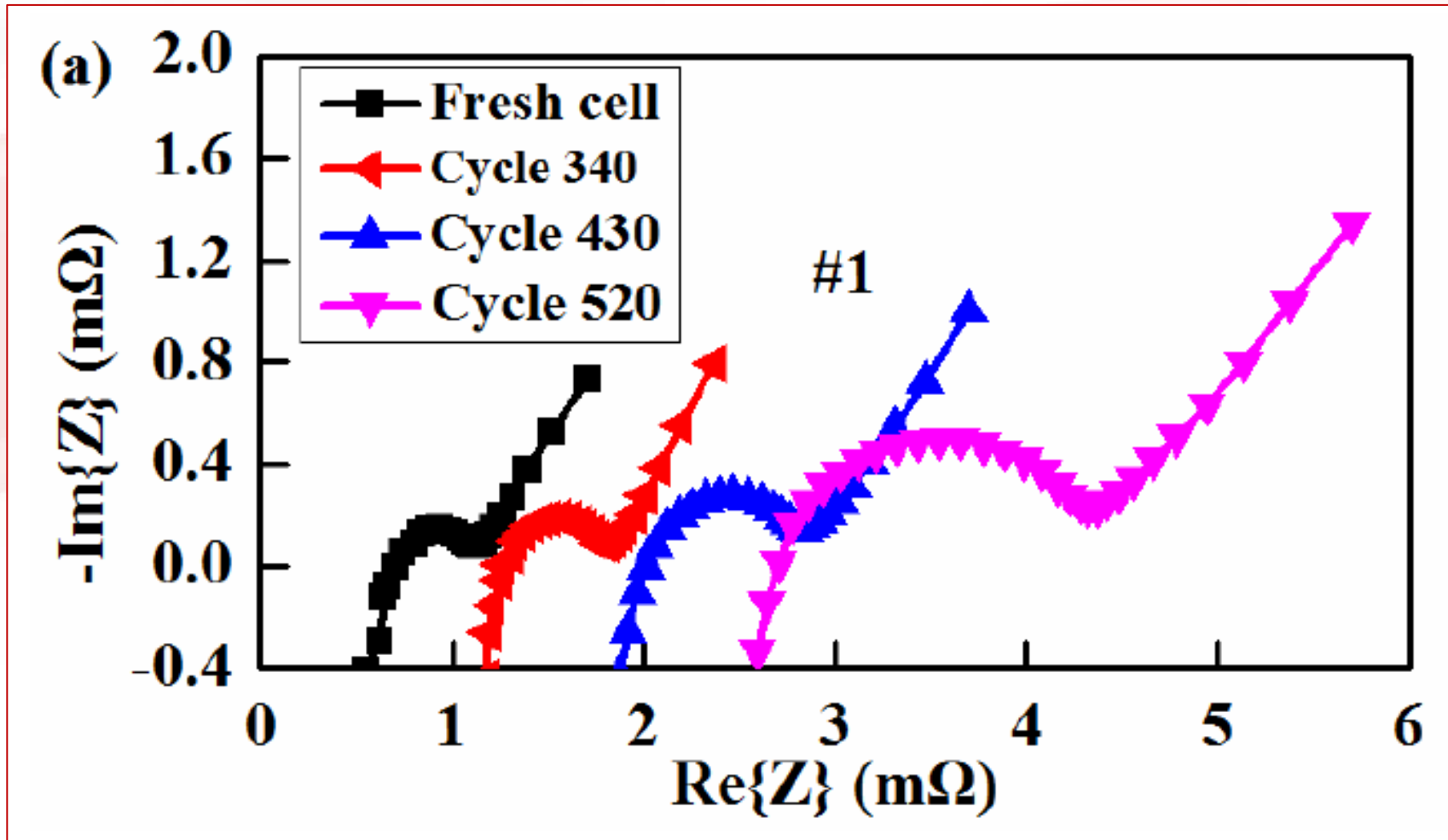


Figure from: Jiang, et al., *Energy Procedia* 105 (2017)844-849

电荷转移电阻 (R_{CT}) 随着 SOC 的变小而增大, 如图所示 SOC 越小, 中间的“驼峰”也越高越长

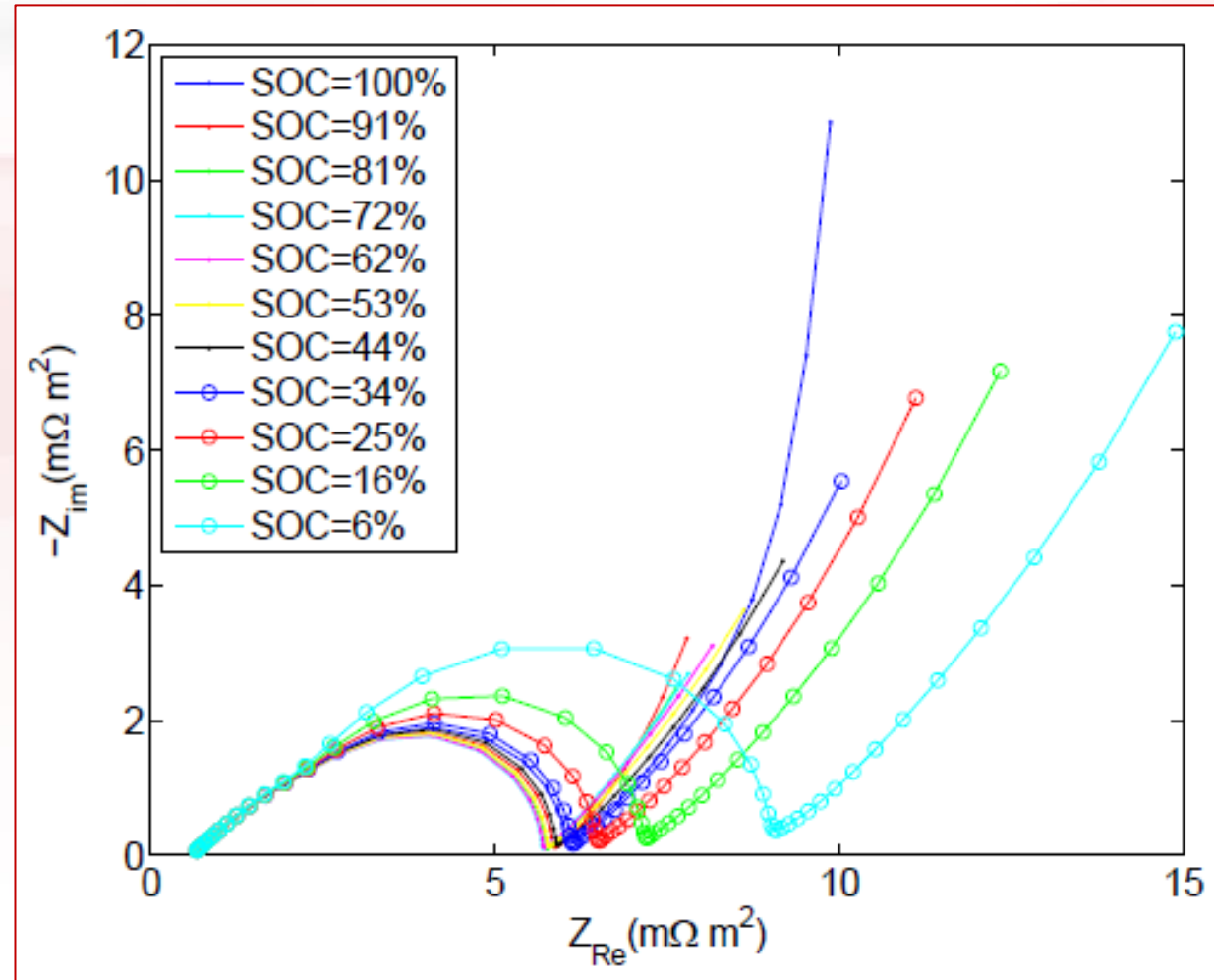


Figure from: M. Li, Renewable Energy 100 (2017) 44-52

EIS 与传统直流技术的优缺点比较

优点

- EIS 是一种非破坏性测试方法（不会像某些 DC 测试，过早地缩短电池寿命）
- EIS 能够在几秒或几分钟内完成，而充放电测试需要数小时或数天
- 与 DC-IR 测试相比，EIS 不要求设备具有很高的功率
- 像 SOH, SOC 等关键性能指标(KPIs)一样，ECM 参数可以“一站式”获得，而不是每次都要运行单独的 DC 测试来一个一个的获得

缺点

- EIS 数据分析通常比解析 DC 数据更复杂
- 如果未正确采集或分析数据，ECM 可能会不准确
- 务必仔细检查 EIS 设备规格，以确保它们与您的电池性能相匹配
- EIS 对外部的测量噪声更敏感

最好的选择是拥有能同时运行 EIS 和 DC 技术的设备，大多数恒电位仪(和某些电池循环仪)都是可以做的。

如何将 EIS 引入到您的测试方案中？

确定电池要测量的
关键性能指标
(KPIs)
(SOH、SOC 等)



用控制条件良好且
已知KPIs的电池作
为参考电池，运行
EIS



使用参考电池的
EIS 数据创建等效
电路模型 (ECM)



通过对未知电池
做 EIS 测试，并
将数据与ECM对
比，来衡量其
KPIs

这些KPI 测量的准确性和灵敏度，取决于用来创建 ECM 的参考样品数据的数量和质量！

给电池做 EIS 测试，但没有合适的设备？

SquidstatTM

NEXT GENERATION

Electrochemical Testing Tools

选择我们的原因？



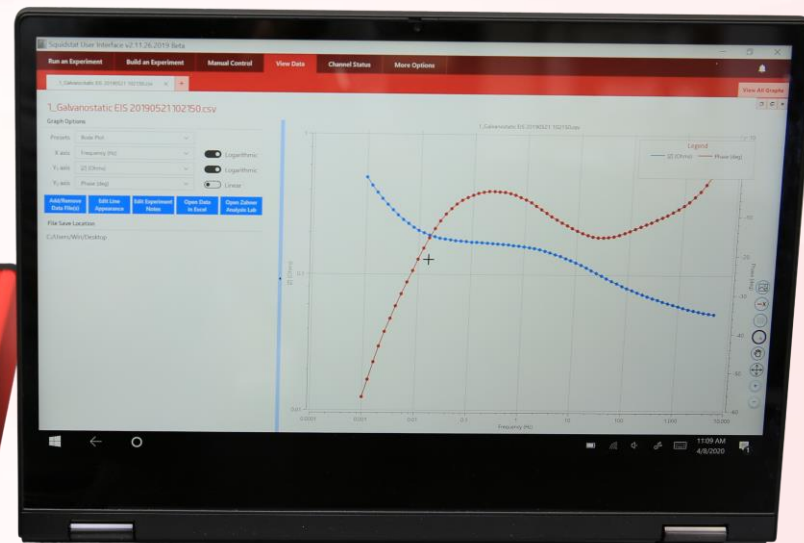
优异的性能价格比



体积小，便携，功能强大



直观、灵活的软件，节约工作流程时间



超前的硬件设计. 直观的软件界面.

我们致力于如何让您的工作更轻松!



我们正在做真正能惠及全球的
新一代电化学仪器!