

- 初步的电池连续放电模型
- 参数P的确定
 - 屏幕功耗
 - 网络功耗
 - CPU功耗
 - GPS功耗
 - 后台功耗
- 关机判据
- 温度修正
 - OCV-SOC曲线
 - 功率转化效率
 - 温度的连续变化
- 电阻修正

初步的电池连续放电模型

状态变量：电池的荷电状态 $S(t)$ ，即 $SOC(t)$ 。输入变量：电池端的总功率 $P_{\text{total}}(t)$ ，通常放电为正，充电为负。控制方程（基于功率平衡和欧姆内阻假设）：

$$\frac{dS(t)}{dt} = -\frac{I(t)}{Q_{\max}}$$

$$I(t) = \frac{V_{oc}(S(t)) - \sqrt{[V_{oc}(S(t))]^2 - 4R_i \cdot \frac{P_{\text{total}}(t)}{\eta(t)}}}{2R_i}$$

$$\text{其中：} \quad V_{oc}(S(t)) = a_1 e^{b_1 S(t)} + a_2 e^{b_2 S(t)} + c[S(t)]^2$$

在这个模型中我们假定了内阻，最大容量，OCV-SOC曲线，功率，转化效率都是不变的，同时我们使用的欧姆内阻假设

忽略了电池极化效应和扩散效应。而且没有考虑温度变化和老化情况。

但是对于不同的温度情况，我们可以得到不同的OCV-SOC曲线，不过只是几个离散的温度点。

需要在文章中强调的：

- 二次方程保留了符合放电时的现实情况的较小解。
- 欧姆内阻假设。
- $V_{oc}(S(t))$ 的拟合方程依据某某论文，优缺点，拟合程度

- 整个微分方程的求解应用四阶/五阶Runge-Kutta方法

参数P的确定

为了模拟各种实际使用场景下的耗电量，必须确定手机使用情况对功率的函数。最简单的模型是考虑各组件的功率相加 $P_{\text{总功耗}} = P_{\text{屏幕}} + P_{\text{CPU}} + P_{\text{网络模块}} + P_{\text{GPS}} + P_{\text{后台功耗}}$

屏幕功耗

OLED 屏幕总功耗分解：

$$P_{\text{display}} = P_{\text{base}} + P_{\text{OLED}} + P_{\text{TFT}}$$

像素发光的物理模型： 像素功耗基本式：

$$P_{\text{OLED}} = V_{\text{OLED}} \cdot I_{\text{OLED}}$$

亮度与电流的关系：

$$I_{\text{OLED}} = \frac{L}{\eta_{\text{cd/A}}}$$

代入后的像素发光功耗：

$$P_{\text{OLED}} = V_{\text{OLED}} \cdot \frac{L}{\eta_{\text{cd/A}}}$$

加入 APL（平均画面亮度）与屏幕面积：

$$P_{\text{OLED}} = \text{APL} \cdot A \cdot V_{\text{OLED}} \cdot \frac{L}{\eta_{\text{cd/A}}}$$

TFT 背板串联损耗模型： 基本式：

$$P_{\text{TFT}} = \text{APL} \cdot A \cdot R_{\text{TFT}} \cdot I_{\text{OLED}}^2$$

代入电流表达式：

$$P_{\text{TFT}} = \text{APL} \cdot A \cdot R_{\text{TFT}} \cdot \left(\frac{L}{\eta_{\text{cd/A}}} \right)^2$$

工程常用线性简化模型（最重要）：

$$P_{display} = P_{base} + k \cdot APL \cdot L$$

其中：

- (P_{base})：固定驱动功耗
- (k)：等效亮度功耗系数
- (APL)：平均画面亮度
- (L)：亮度 (nits) 用于电池模型的最终时间函数形式：

$$P_{display}(t) = P_{base} + k \cdot APL(t) \cdot L(t)$$

来源：Power Consumption and Temperature Increase in Large Area Active-Matrix OLED Displays以及工程经验模型。数据：APL在不同场景下的系数 白屏（测试）1.0 网页、社交媒体 0.6–0.8 视频（电影）0.2–0.3 游戏 0.4–0.7 深色模式 UI 0.2–0.3 黑色 0 光强L在不同场景下的系数 **环境照度（lux）→ 系统自动亮度 → L** 串起来：

- 室内：100–300 lux → 系统亮度条 \approx 30–50% → $L \approx 150\text{--}250$ nits
- 阴天户外：1000–5000 lux → 系统亮度条 \approx 70–90% → $L \approx 400\text{--}700$ nits
- 强烈阳光：>10000 lux → 触发高亮模式 → $L \approx 800\text{--}1200+$ nits

网络功耗

idle+传输速率 Wi-Fi 功耗模型（工程常用形式）

$$P_{WiFi} = P_{idle} + \alpha_{rx} \cdot R_{rx} + \alpha_{tx} \cdot R_{tx}$$

- P_{idle} ：维持连接功耗（约 50–120 mW）
- R_{rx}, R_{tx} ：上下行速率（Mbps）
- α_{rx}, α_{tx} ：单位速率功耗系数（mW/Mbps） 典型参数（来自论文 + 实测）

参数	典型值
P_{idle}	60–120 mW
α_{rx}	0.5–1.2 mW/Mbps
α_{tx}	1.0–2.0 mW/Mbps

解释：Wi-Fi 的功耗几乎与数据速率线性相关，因为发射功率恒定（20 dBm 左右），主要耗电来自基带处理。

CPU功耗

idle+CPU使用率相关函数 物理模型：

$$P_{\text{dyn}} = \alpha C_{\text{eff}} V^2 f$$

- f : 频率
- V : 电压（随 DVFS 档位变化）
- α : 活动因子（与利用率相关）
- C_{eff} : 等效电容

我们使用

$$P_{\text{cpu}} = P_{\text{idle}} + (P_{\text{max}} - P_{\text{idle}})u(t)$$

其中 $u(t)$ 是CPU使用率

GPS功耗

三种状态

正常跟踪卫星：50–120 mW 低功耗模式（导航不需要高频更新）：20–60 mW 关闭：0 mW

$$P_{\text{GPS}} = \begin{cases} P_{\text{track}}, & \text{tracking} \\ P_{\text{duty}}, & \text{duty cycle} \\ 0, & \text{off} \end{cases}$$

后台功耗

关机判据

在上面的模型中我们简单地用SOC=0作为关机判据，但下面的方法可能更加合适。 1.考虑端电压小于最低电压时关机 **公式 1：电流表达式**

$$I(t) = \frac{V_{oc}(S(t)) - \sqrt{V_{oc}^2(S(t)) - 4R_i \cdot \frac{P_{\text{total}}(t)}{\eta(t)}}}{2R_i}$$

公式 2：端电压定义

$$V_{\text{term}}(t) = V_{oc}(S) - R_i \cdot I(t)$$

代入后得到的表达式（中间形式）：

$$V_{\text{term}}(t) = V_{oc}(S) - \frac{V_{oc}^2(S) - 4R_i \cdot \frac{P}{\eta}}{2}$$

整理后的最终表达式：

$$V_{\text{term}}(t) = \frac{V_{oc}(S) + \sqrt{V_{oc}^2(S) - 4R_i \cdot \frac{P}{\eta}}}{2}$$

2.考虑在最低功耗下，判别式为零时关机。

温度修正

OCV-SOC曲线

首先对OCV-SOC曲线作简单修正，已知该曲线在-20,0,25,45摄氏度的表达式，我们把所有的温度下的表达式用这四个表达式的加权表达。

功率转化效率

其次考虑功率转化效率的影响，公式如下，来源为工程经验式

$$\eta(T) = \begin{cases} 0.70 + 0.0075(T + 20), & -20 \leq T < 0 \\ 0.85 + 0.004T, & 0 \leq T < 25 \\ 0.95 + 0.001(T - 25), & 25 \leq T \leq 45 \end{cases}$$

数据来源： MDPI Energies（2025）：低温效率显著下降，0℃比25℃低10-20%。
IEEE（2019）：-20℃效率下降30-40%，45℃略高于常温。 Springer（2021）：高温效率略升，低温效率显著下降。

温度的连续变化

最常见的一阶热模型：

$$C_{th} \frac{dT}{dt} = P_{loss} - \frac{T - T_{amb}}{R_{th}}$$

其中：

$$P_{\text{loss}} = I^2 R_i T$$

C_{th} : 热容 R_{th} : 热阻

电阻修正

电阻受开路电压和温度的影响很大。可以采用某某论文中的数据进行经验拟合