

超级电容寿命预估

一、影响超级电容寿命的因素

1.1 超级电容电极材料

电极材料的结构稳定性、比表面积与结合强度，是决定循环过程中活性物质脱落、结构疲劳的本征因素，直接影响电容长期循环可靠性。

1.2 电解质

电解质的化学稳定性、耐高温压性与离子传导特性，决定其在高温、高压工况下的分解速率，是日历老化与循环老化的核心诱因。

1.3 温度

温度是超级电容老化的核心加速因子，遵循阿伦尼乌斯老化规律，工作温度越高，电解液分解、电极老化速率呈指数级上升。

1.4 工作电压

工作电压越接近额定上限，电极与电解液界面的副反应越剧烈，电解液氧化分解加速，电容寿命呈倍数级缩短。

1.5 充放电速率

高倍率充放电会产生显著焦耳热与电极极化，加剧离子传输损耗与活性物质疲劳，大幅提升循环老化速率，缩短使用寿命。

二、超级电容寿命预估模型

在能源储存领域，超级电容因其高功率密度和快速充电能力而备受关注。然而，其使用寿命是影响其广泛应用的关键因素。本文将介绍一种超级电容寿命预估模型，并阐述其原理和应用。

本文提出的超级电容寿命预估模型是基于实验数据和数学建模的方法。首先，我们进行了一系列实验，包括在不同充放电速率、不同温度和不同循环次数下的充放电测试。然后，我们对实验数据进行了分析和处理，提取出关键参数，并建立了超级电容寿命预估模型。

该模型考虑了以下因素：

1. 充放电速率：充放电速率对超级电容的使用寿命有很大的影响。实验结果表明，充放电速率越快，超级电容的使用寿命越短。这是因为在高充放电速率下，电解质离子扩散速度加快，导致电解质分解和电极活性物质损失加剧。

2. 温度：温度对超级电容的使用寿命也有重要影响。实验结果表明，温度越高，超级电容的使用寿命越短。这是因为在高温下，电解质分解速度加快，同时电极活性物质损失也加剧。

3. 循环次数：循环次数是衡量超级电容使用寿命的重要指标。实验结果表明，随着循环次数的增加，超级电容的使用寿命逐渐缩短。这是因为在循环过程中，电解质离子不断扩散和嵌入，导致电解质分解和电极活性物质损失。

超级电容器的寿命受工作电压和工作温度的影响，符合以下方程式：

$$L = L_0 \times 3.25^{\frac{T_0 - T}{10}} \times 1.52^{\frac{V_0 - V}{0.1}}$$

L：指在运作温度下的理论寿命；

L₀：指最高工作温度下的工作寿命；

T: 指实际工作时的温度;
 T_0 : 指最高额定工作温度;
V: 指实际工作电压;
 V_0 : 指最高额定工作电压.

三、串联模组（2 串 / 3 串 / 4 串~多串）对寿命的影响

2 串、3 串、4 串~多串超级电容串联模组会显著改变单体老化速率，大幅影响模组整体寿命，串数越多，寿命衰减风险越高，核心影响如下：

1.电压不均衡（核心影响）

单体间容量、ESR、漏电流存在天然离散性，串联后分压不均，部分单体长期超额定电压运行；依据寿命模型，电压每超 0.1V，寿命折减至 1/1.52，超压单体快速老化，形成木桶效应，直接导致模组提前失效。

2.温场分布不均

3 串、4 串~多串模组体积更大、散热路径更长，易出现局部热点；温度每升高 10℃，寿命折减至 1/3.25，热点单体老化速率远高于其他单体，加速模组整体寿命终结。

3.充放电同步性失效

参数薄弱单体先充满、先放完，被迫承受过充、过放应力，电极与电解液损耗速率成倍提升，老化速度远快于独立单体。

4.应力叠加效应

串数越多，电气连接、机械振动带来的应力叠加越明显，密封件老化、电极结构损伤加快，进一步缩短模组寿命。

四、串联模组（2 串 / 3 串 / 4 串~多串）使用注意事项

1.配置均压方案

2 串、3 串、4 串模组可采用被动均压；3 串、4 串或多串模组根据不同使用工况可采用主动均压，确保单体电压差 $\leq 0.02V$ ，从根源消除超压风险。

2.单体严格筛选配对

同模组内单体需满足：容量偏差 $\leq \pm 3\%$ 、ESR 偏差 $\leq \pm 5\%$ 、漏电流偏差 $\leq \pm 10\%$ ，降低一致性差异。

3.模组电压降额使用

模组整体工作电压按额定值降额 5%~10%，预留电压安全裕量，避免单体瞬时超压。

4.保证均匀散热与倍率限制

优化温场设计，避免局部高温；充放电倍率控制在 $\leq 1C$ ，减少焦耳热与极化损耗。

5.定期参数巡检

每 3~6 个月检测单体电压、容量、ESR，及时更换异常单体，阻断短板效应扩大。

五、串联模组寿命预估通用性说明

核心结论

2 串 / 3 串 / 4 串~多串串联模组，不适用原单体寿命预估模型的直接通用计算，仅可将原模型作为基础校正基准，不可直接代入模组平均参数进行寿命评估。

不通用的核心原因

1.模型前提假设不匹配

原单体预估模型基于电压恒定、温度均匀、无参数离散的理想工况构建；串联模组存在分压不均、温场差异、单体离散性，完全打破模型基础假设。

2.寿命判定逻辑不同

单体寿命以自身性能衰减为终点；串联模组寿命以模组内最差单体的衰减为终点，原模型未包含木桶效应，

无法计算模组整体失效时间。

3. 参数代入规则冲突

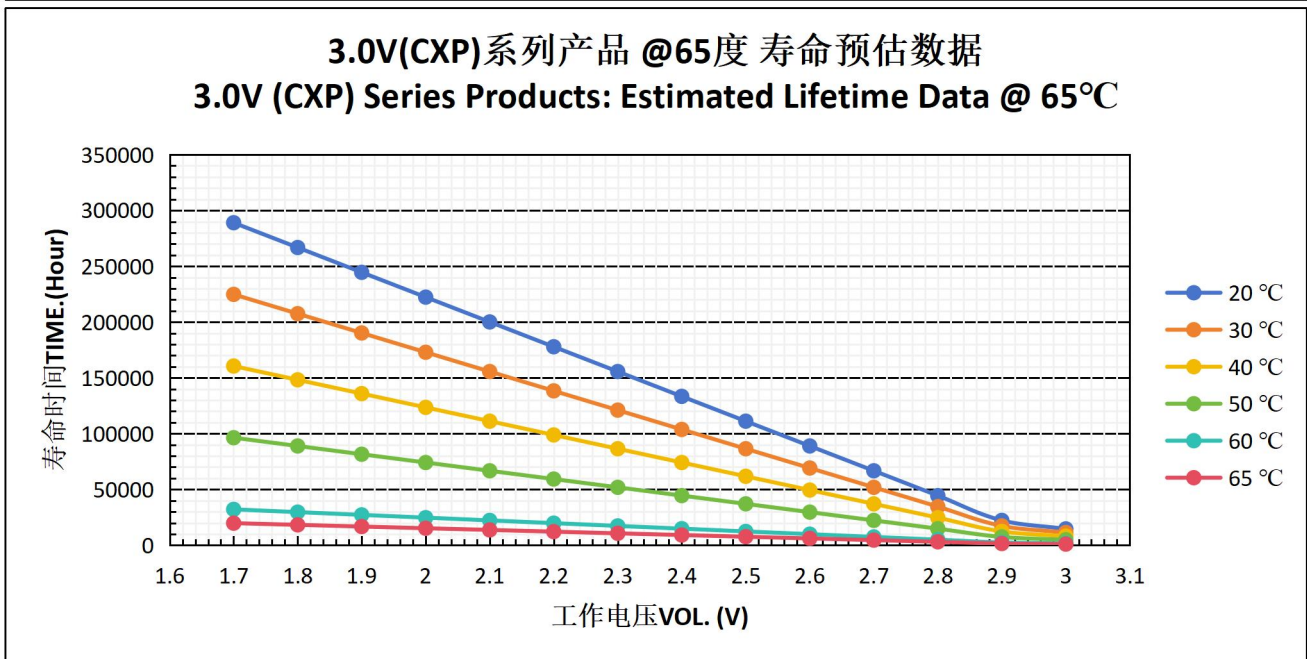
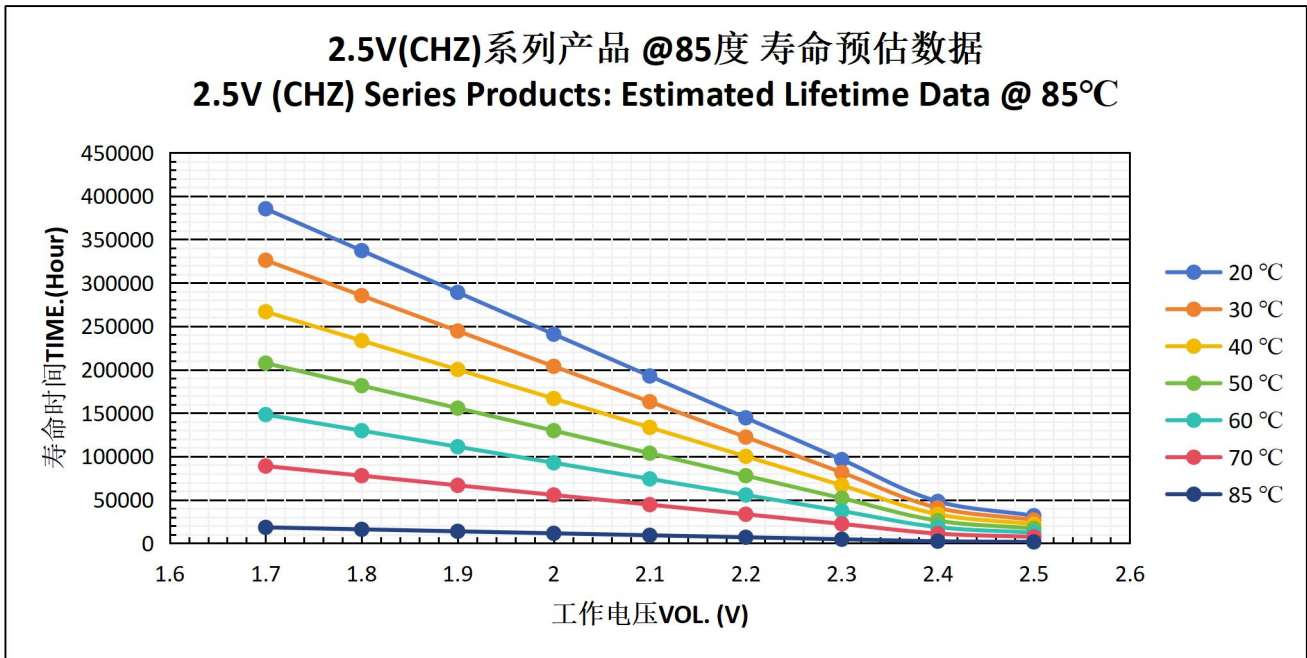
原模型中 v 为单体实际工作电压，而非模组总电压 / 平均电压；串联后单体电压离散，无统一数值可直接代入，直接计算会产生极大偏差。

模组校正使用规则

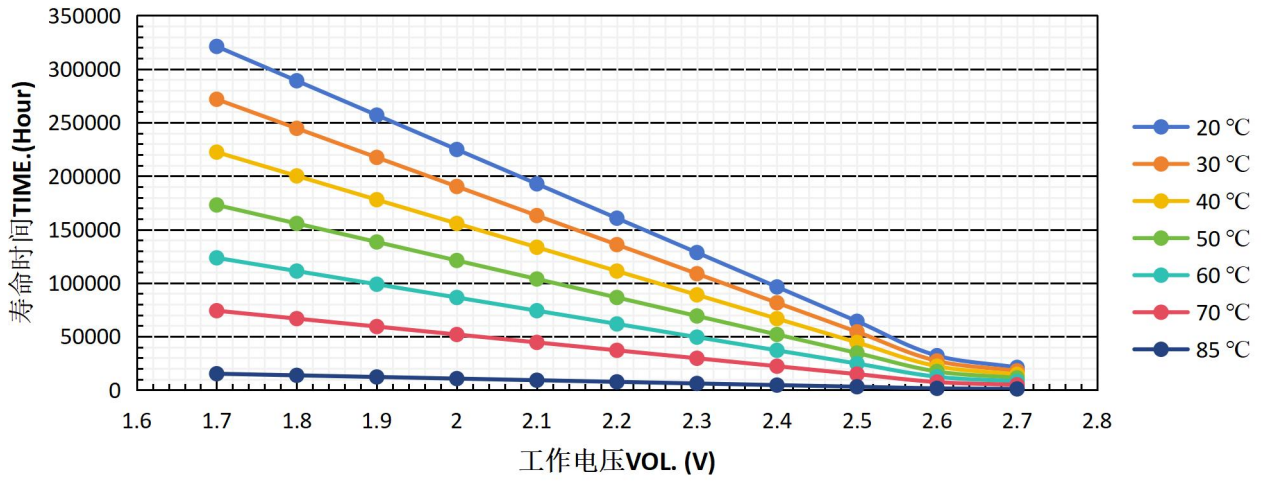
在均压有效、单体配对合格、温场均匀的前提下，可提取模组内最高单体电压、最高工作温度代入原模型，计算最差单体的理论寿命，以此作为模组寿命的参考上限。此时原模型仅为校正工具，不具备直接通用条件。

六、应用示例

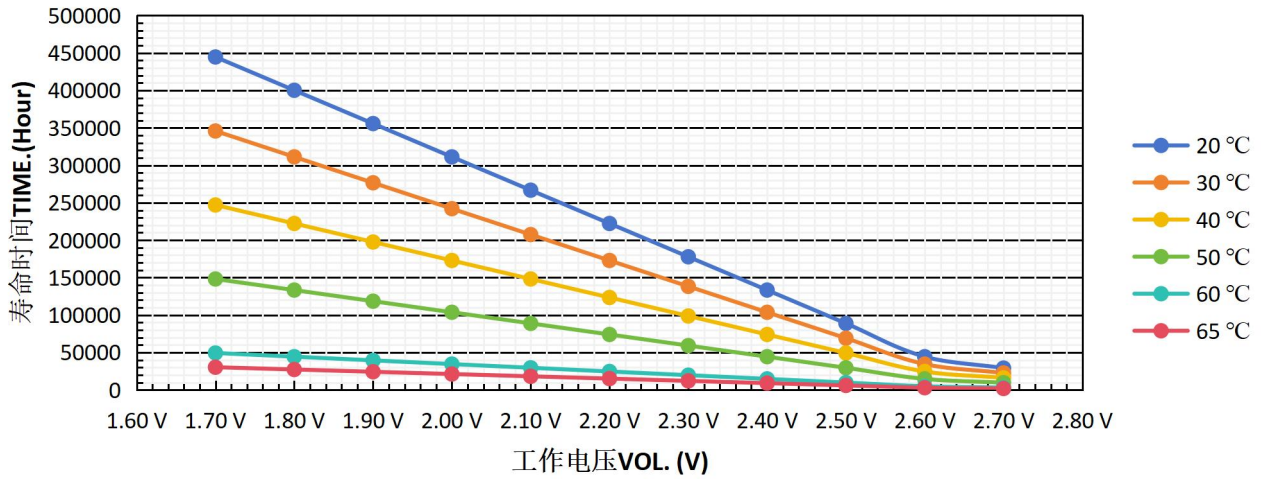
首先，根据该超级电容的技术参数和实际应用场景，设定不同电压、温度和循环时长等条件；然后，利用该模型对条件进行拟合，得到相应的模型参数；最后，利用该模型对超级电容的使用寿命进行预估。请注意，该模型推断的寿命预估结果均为理论参考值，基于实验室标准工况与数学模型推导，不代表实际工作环境下的真实使用寿命。



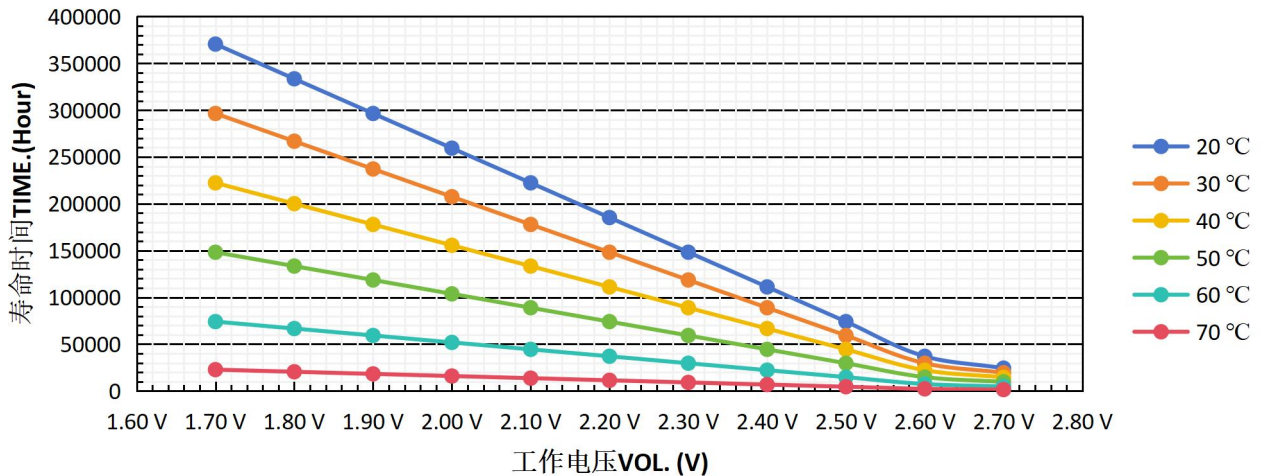
2.7V(CHW)系列产品 @85度 寿命预估数据
2.7V (CHW) Series Products: Estimated Lifetime Data @ 85°C



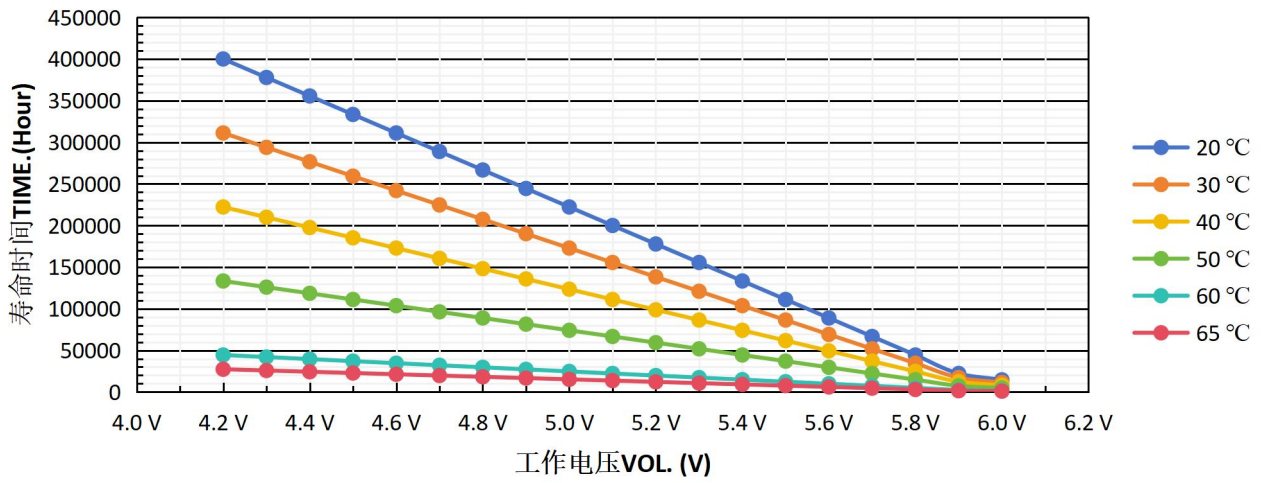
2.7V(CHV)系列产品 @65度 寿命预估数据
2.7V (CHV) Series Products: Estimated Lifetime Data @ 65°C



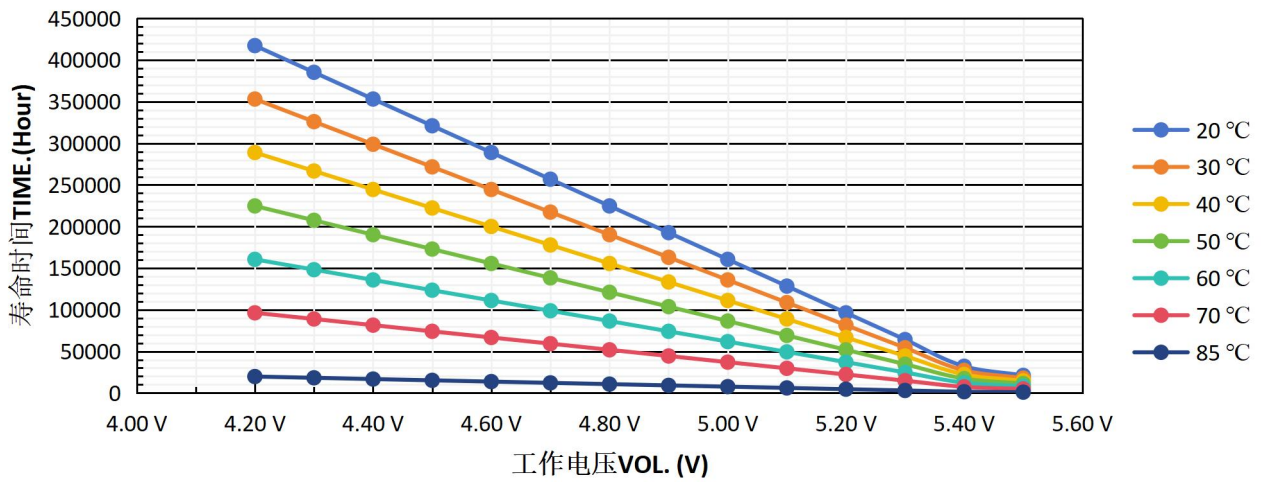
2.7V(CXHP)系列产品 @70度 寿命预估数据
2.7V (CXHP) Series Products: Estimated Lifetime Data @ 70°C



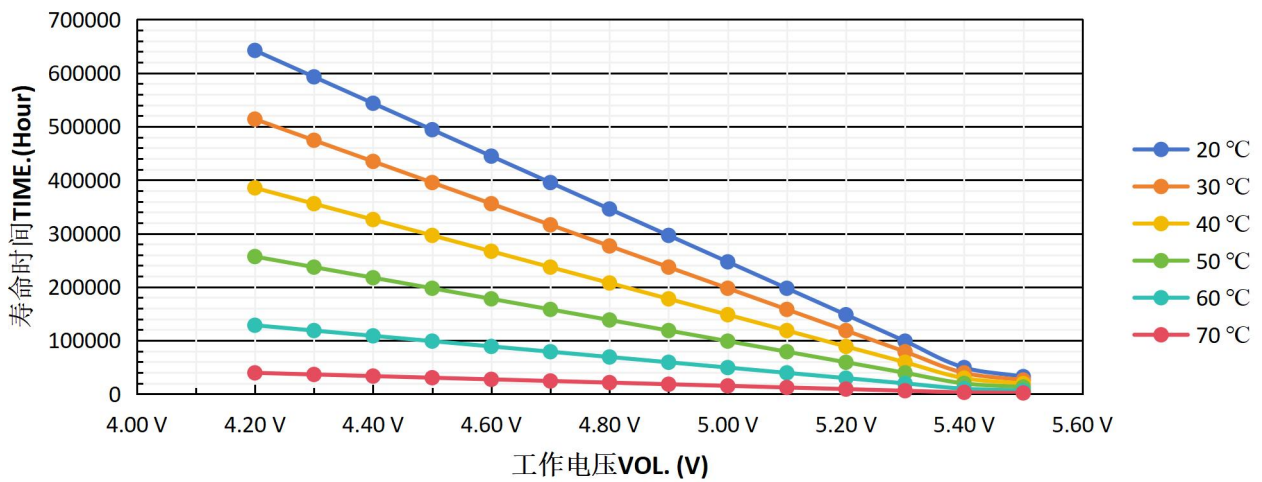
6.0V(CSP)系列产品 @65度 寿命预估数据
6.0V (CSP) Series Products: Estimated Lifetime Data @ 65°C



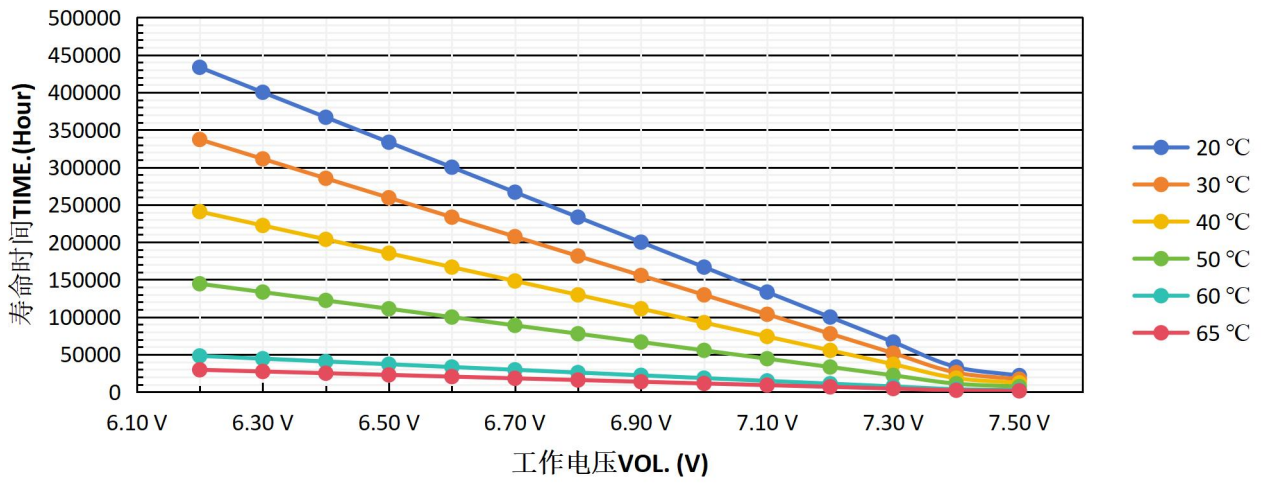
5.5V(HT)系列产品 @85度 寿命预估数据
5.5V (HT) Series Products: Estimated Lifetime Data @ 85°C



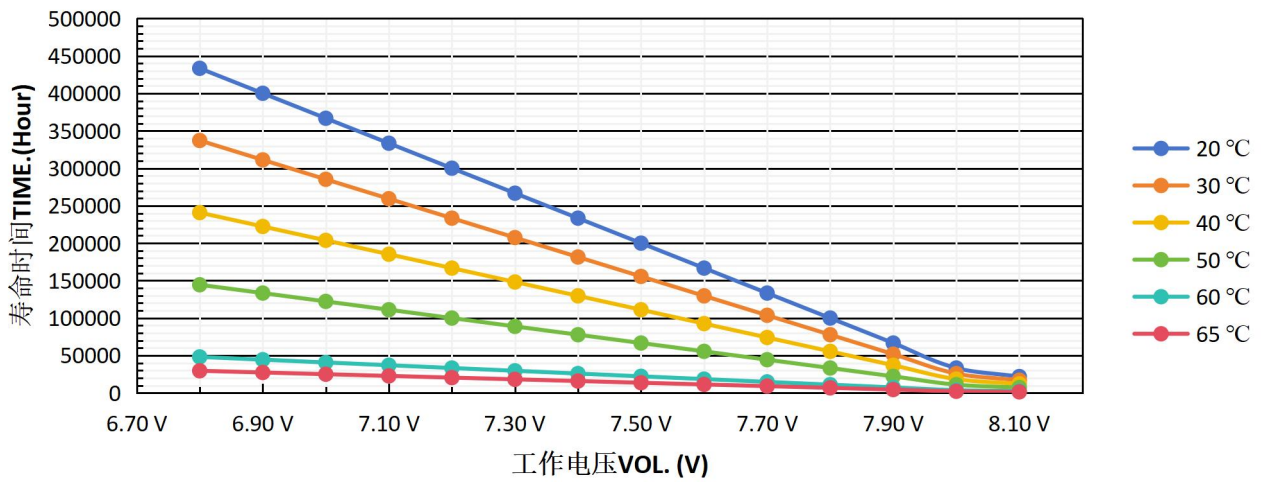
5.5V(CHP)系列产品 @70度 寿命预估数据
5.5V (CHP) Series Products: Estimated Lifetime Data @ 70°C



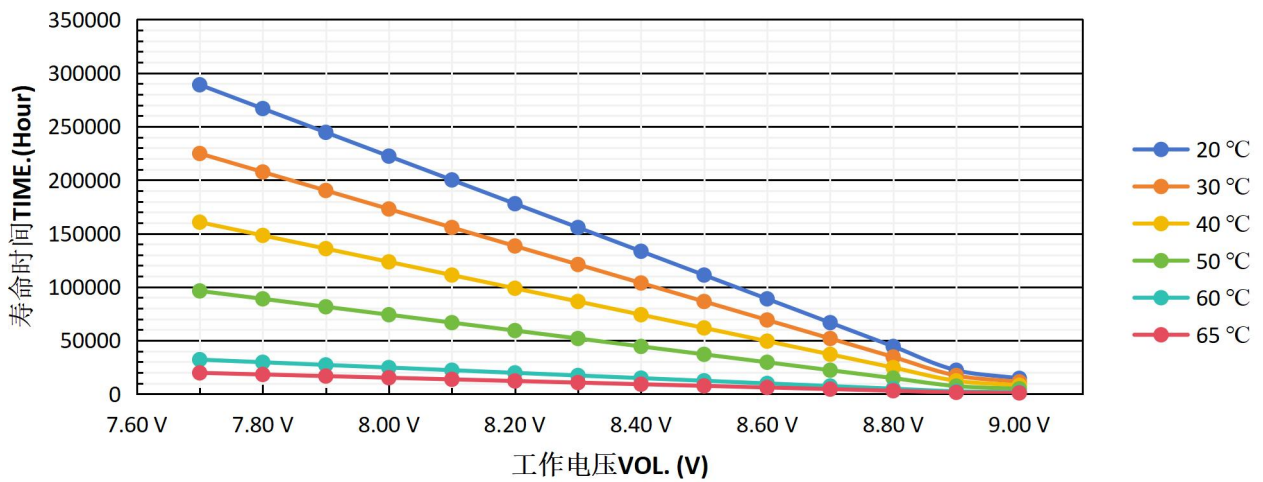
7.5V(CZP)系列产品 @65度 寿命预估数据
7.5V (CZP) Series Products: Estimated Lifetime Data @ 65°C



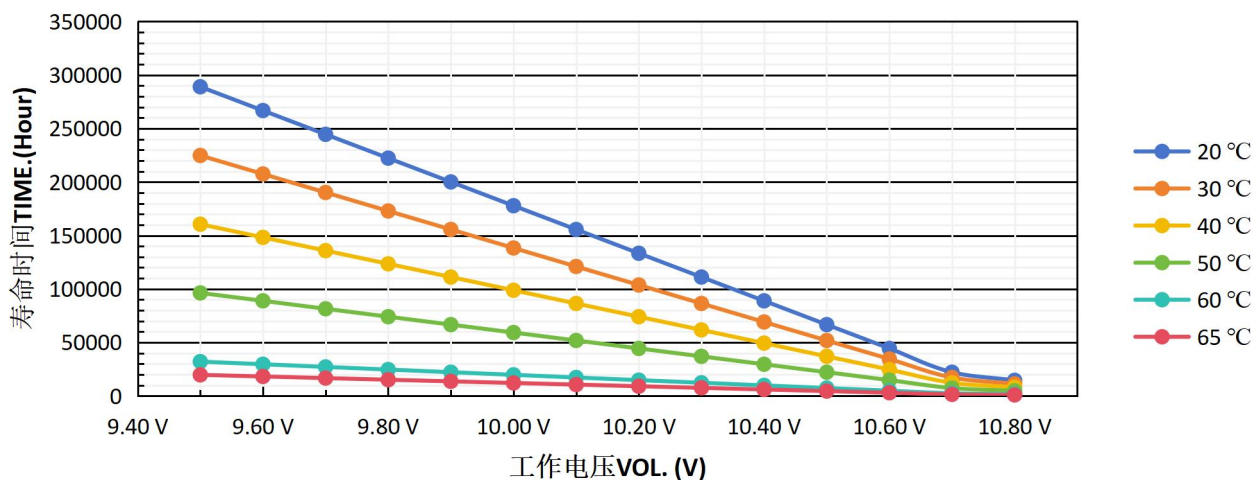
8.1V(CZP)系列产品 @65度 寿命预估数据
8.1V (CZP) Series Products: Estimated Lifetime Data @ 65°C



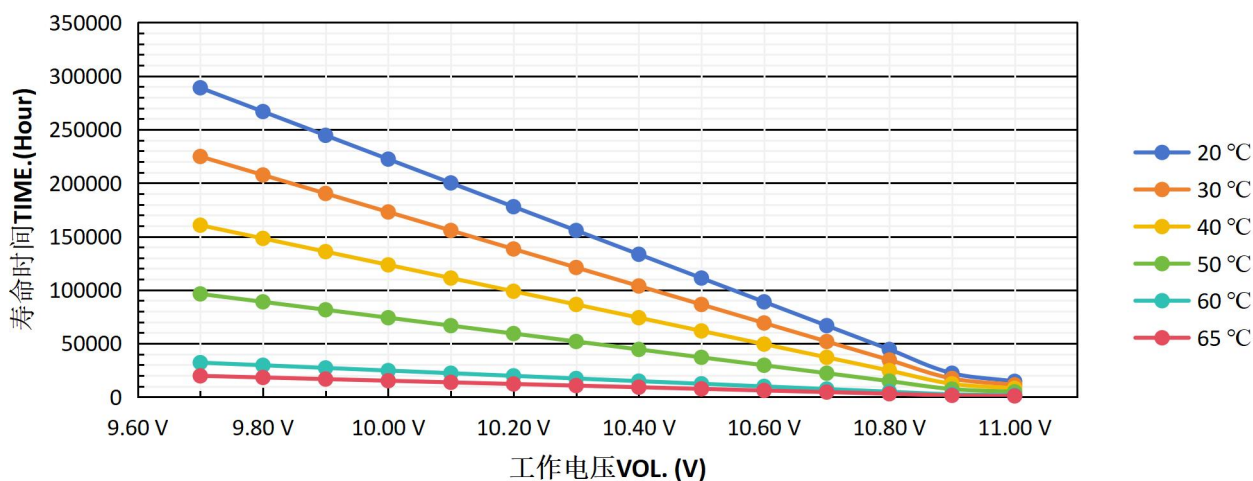
9.0V(CZP)系列产品 @65度 寿命预估数据
9.0V (CZP) Series Products: Estimated Lifetime Data @ 65°C



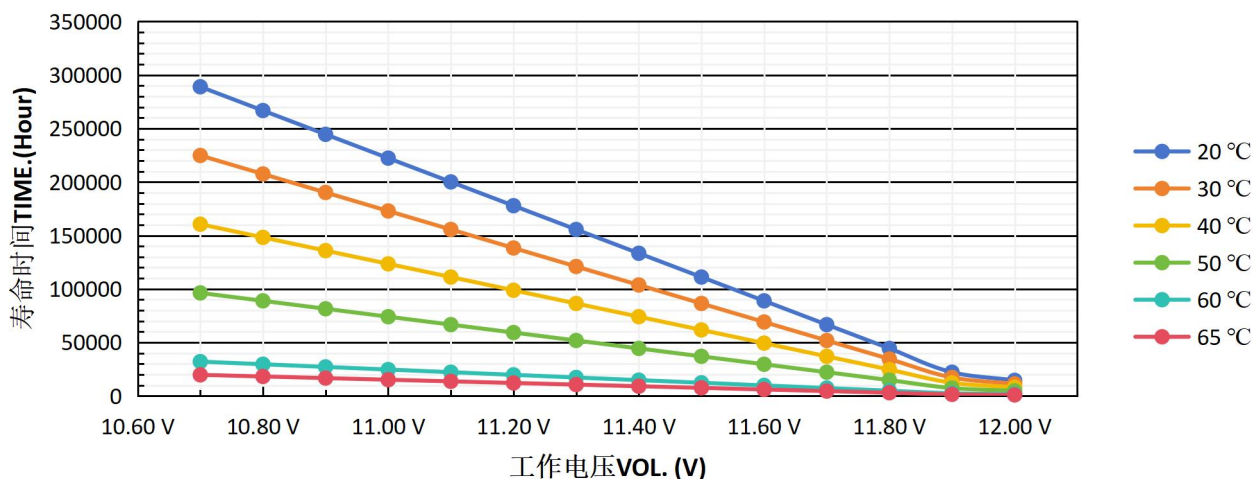
10.8V(CPM)系列产品 @65度 寿命预估数据
10.8V (CPM) Series Products: Estimated Lifetime Data @ 65°C



11.0V(CPM)系列产品 @65度 寿命预估数据
11.0V (CPM) Series Products: Estimated Lifetime Data @ 65°C



12.0V(CPM)系列产品 @65度 寿命预估数据
12.0V (CPM) Series Products: Estimated Lifetime Data @ 65°C



七、结论

本文提出了一种基于实验数据和数学建模的超级电容寿命预估模型，该模型考虑了充放电速率、温度、循环次数、工作电压对寿命的影响。通过实验验证，该模型精度较高、实用性强，可为超级电容设计与应用提供重要参考。

2 串、3 串、4 串~多串串联模组会因电压不均、温场差异、参数离散影响寿命，需通过均压、配对、降额等措施保障寿命；原单体寿命预估模型不可直接通用，需经一致性校正后作为参考基准。

八、未来展望

尽管我们已经建立了较为精确的超级电容寿命预估模型，但是在实际应用中仍然存在一些挑战和需要改进的地方。例如，我们的模型主要基于实验数据，对于新型超级电容材料或制造工艺，可能需要重新实验和验证。此外，模型假设所有超级电容具备相同的充放电速率、温度和循环次数，而实际使用中这些条件往往动态变化。因此，实际使用中应参考超级电容器说明书或咨询智烽维（CDA）以获得准确指导。

除此之外，还可通过以下方式进一步优化模型：

- 1.增加更多工况实验数据，提升模型预测精度与泛化能力；
- 2.引入电极材料、电解质类型、串联一致性等更多影响因素，提升模型全面性；
- 3.建立神经网络、支持向量机等复杂数学模型，提升动态工况下的预测能力。

综上所述，超级电容作为重要的能源储存器件，其寿命预估对实际应用意义重大。我们将持续研究优化，打造更精准、可靠、实用的寿命预估模型，助力能源储存技术发展。

九、重要声明

- 1.本文件所有寿命预估结果均为理论参考值，基于实验室标准工况与数学模型推导，不代表实际工作环境下的真实使用寿命。
- 2.实际寿命受温度波动、电压扰动、充放电策略、机械应力、维护水平、串并联配置、使用环境等多重变量影响，与预估值存在偏差属于正常现象。
- 3.串联模组未按要求配置均压、未筛选配对、超温 / 超压 / 过流使用等违规操作导致的寿命缩短，相关责任由使用方承担。
- 4.本预估仅作为工程选型参考，不构成产品质量承诺、质保依据或运维唯一标准。