

# 不同布置策略对圆柱形锂离子电池模组均匀性的优化

王兵, 纪常伟, 汪硕峰, 潘帅, 戚朋飞, 张守芹  
1.环境与能源工程学院, 北京工业大学, 北京, 朝阳区

**简介:** 随着世界环境的逐渐恶化, 新能源汽车作为传统汽油车的替代品逐渐发展起来。锂离子电池由于其高比能量, 无记忆性, 环境友好等优点, 逐渐成为了电动汽车动力系统的最佳选择。然而, 为了保证电池可以输出足够的能量, 需要将各个单体电池串联或并联组合起来, 而这也导致了电池之间存在一定的不一致性。本文的主要目的是通过简单的布置来改善电池模组的温度均匀性。具体地, 调节电池组中每个电池之间的间隔, 使得温度高的电池间的间隔大, 而温度低的电池间的间隔小, 从而降低温度不一致性。本文比较了电池模组内电芯的等差数列比和等比数列排布方式, 并考虑了温度不一致对不均匀放电的影响。有限元软件COMSOL Multiphysics 5.3a<sup>®</sup>用于对本文内容进行详细的模拟。

本文采用一种49个18650电芯串联组成的电池模组进行研究。该模型的示意图如图1所示, 基于有限元商业软件COMSOL Multiphysics 5.3a<sup>®</sup>构建了3D传热耦合1D电化学模型。1D电化学模型用于计算放电期间电池模组中每个电池的电化学反应进程和产热, 通过3D传热模型分析电池模组的温度分布。由于电池模组几何结构的对称性, 构建了四分之一模型以减少计算量。通过电化学模型获得每个电池的发热量, 电化学模型中的温度是来自3D热传递模型中每个电池的平均温度。从电池模组的四分之一模型可以看出, 其几何形状是中心线对称的。因此, 温度分布在中心线处是对称的, 如图所示, 只需要建立十个电化学模型来模拟电池模组中所有电池的状态。

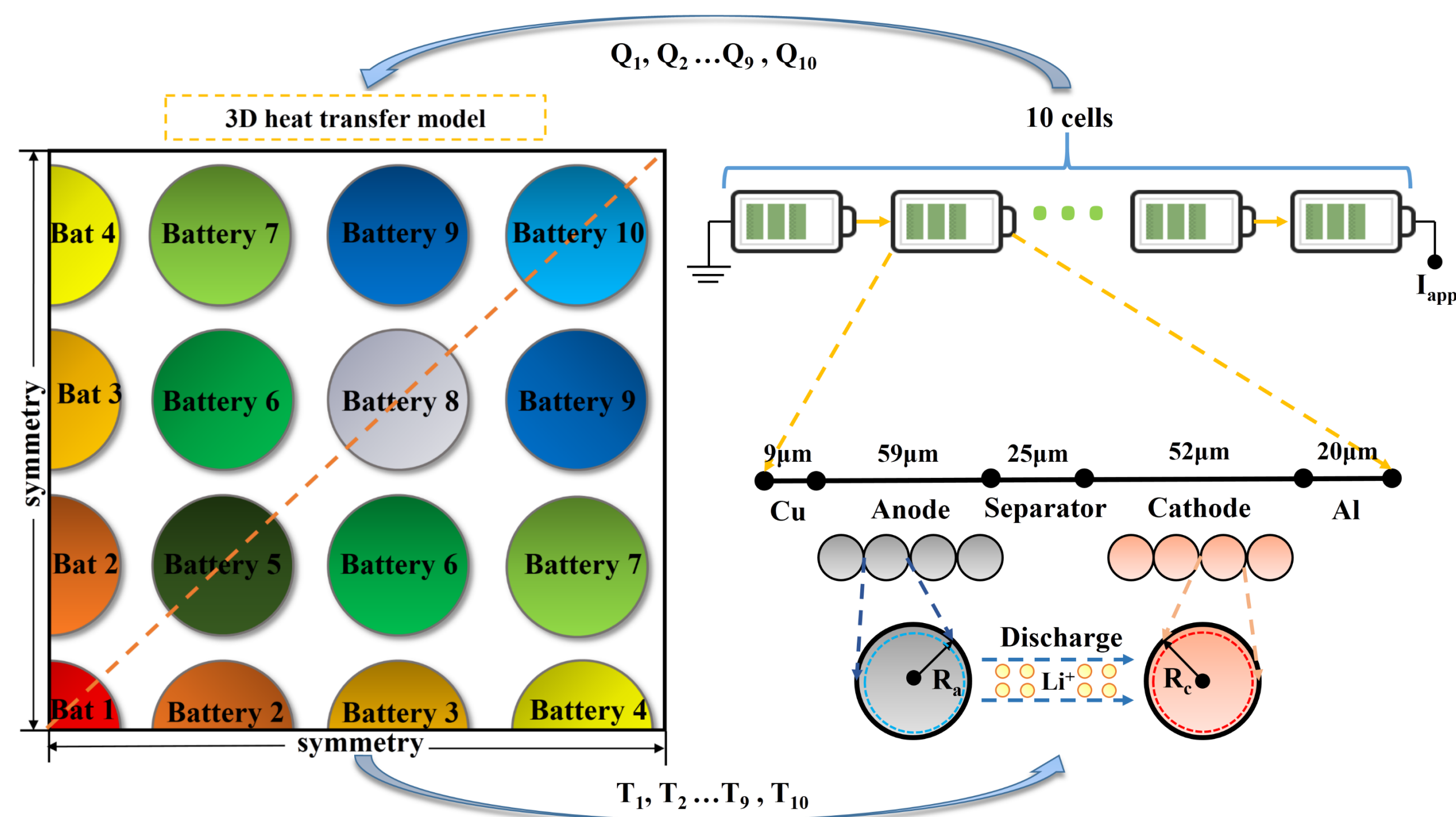


图1.模型构建示意图

**网格划分:** 在一维电化学模型中, 使用均匀的网格分布, 尺寸不超过 $1\mu\text{m}$ , 总网格数为1650。对于额外维度模型, 共划分10个径向网格, 且网格节点坐标满足立方根公式。对于3D热模型, 使用棱柱网格划分。首先, 如图2a所示, 在电池模组的横截面上采用自由三角形网格的划分, 最大尺寸为 $2.55\text{mm}$ , 并产生2,398个网格。另外, 由于该模型考虑了极弱的流场, 在电池表面采用5层边界层网格, 边界层网格总数为1,535 (最大网格增长率为1.2)。最后, 上述二维网格在垂直方向上被拉伸8层, 并且产生总共33,864个网格, 如图2b所示。

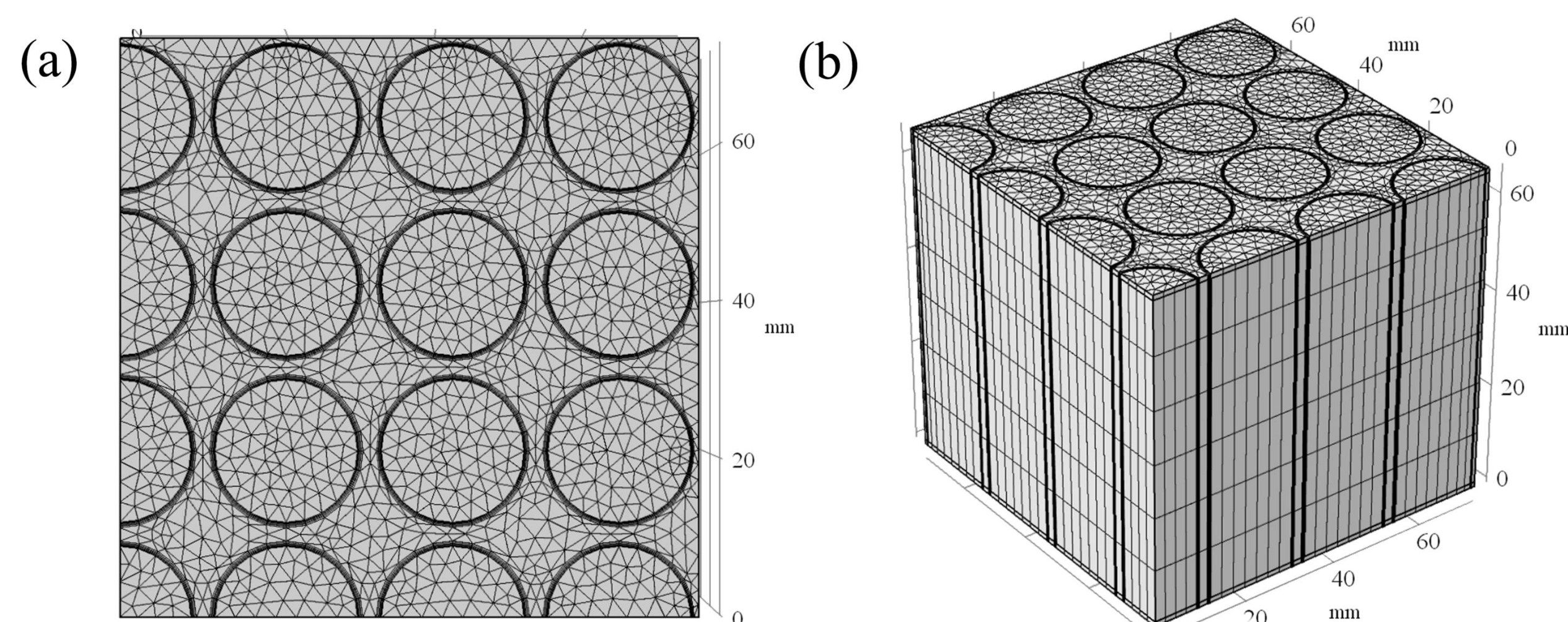


图2.网格模型

**排布策略:** 等差数列排布如图3a所示, 将中心电池与其外围电池之间的间隔设置为 $d$  (也称为初始间隔), 并且从中心电池到最外侧电池的逐渐减小的距离设置为 $r$ 。结果, 从中心电池到最外层电池的电池间隔分别为 $d, d-r, d-2r$ 。最外面的电池之间的间隔总是 $3\text{mm}$ , 并且最外面的电池和内部电池之间的间隔通过均衡策略来划分, 以避免电池之间的间隔太近。当电池在模组内部等间隔时, 电池间隔的总和为 $9\text{mm}$ 。为了确保电池模组的恒定体积, 电池模组中的电池间隔总和始终为 $9\text{mm}$ 。因此, 必须存在 $3d-3r = 9\text{mm}$ 的约束关系, 并且满足:  $3\text{mm} < d < 6\text{mm}$ ,  $0\text{mm} < r < 3\text{mm}$ 。等比数列排布如图3b所示, 将中心电池与其周边电池之间的间隔设置为 $d$ , 并且从中心电池到最外侧电池的间隔的逐渐减小的比例被设置为 $r$ 。因此, 从中心电池到最外层电池的电池间隔分别为 $d, d \cdot r, d \cdot r^2$ 。电池模组的具体布置如图7所示。电池模组中的电池间隔总和始终为 $9\text{mm}$ , 因此必须存在约束关系  $d + dr + dr^2 = 9\text{mm}$ , 并满足:  $3\text{mm} < d < 9\text{mm}$ ,  $0 < r < 1$ 。

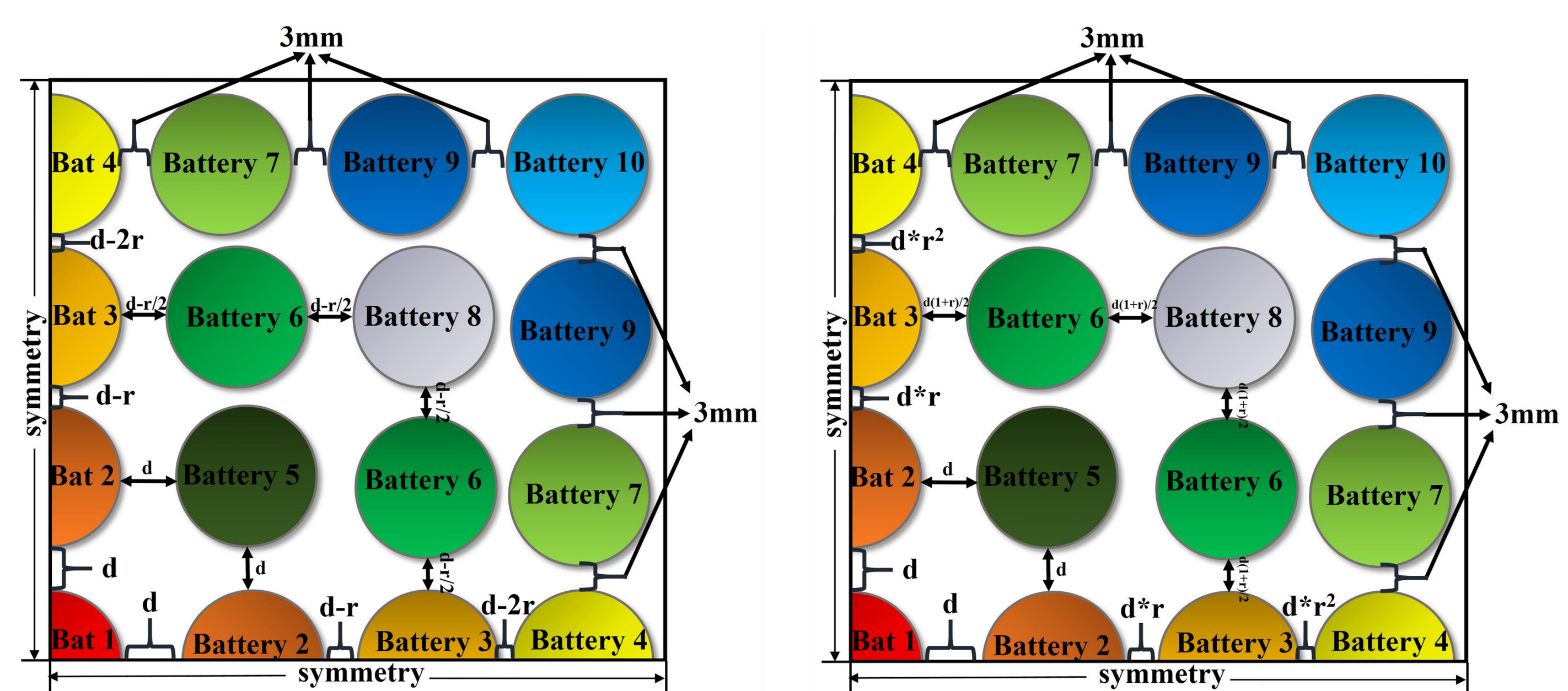


图3.电池模组排布策略: a.等差数列; b.等比数列

**结果分析:** 如图4所示, 随着放电结束时 $d$ 的增加, 等差数列排布的电池模组的最大温差持续减小, 并呈现线性关系。然而, 等比数列布置的电池模组的最大温差显示出二次函数的趋势。因此, 等差数列排列的电池模组的温度均匀性优于在相同 $d$ 下的等比数列排列。电池模组的温差直接影响电池模组内每个电池的放电均匀性, 从而反映到放电结束时的电压差异。图5示出了在放电结束时不同布置下电池模组内的电池间的最大电压差。随着 $d$ 增加, 电池模组内的最大最终电压差逐渐减小。在相同 $d$ 时, 等差数列布置的电池模组的最大电压差小于等比数列排布。电池模组内的最大电压差在放电结束时可以通过等差数列排布降低到 $2.5\text{mV}$ 。

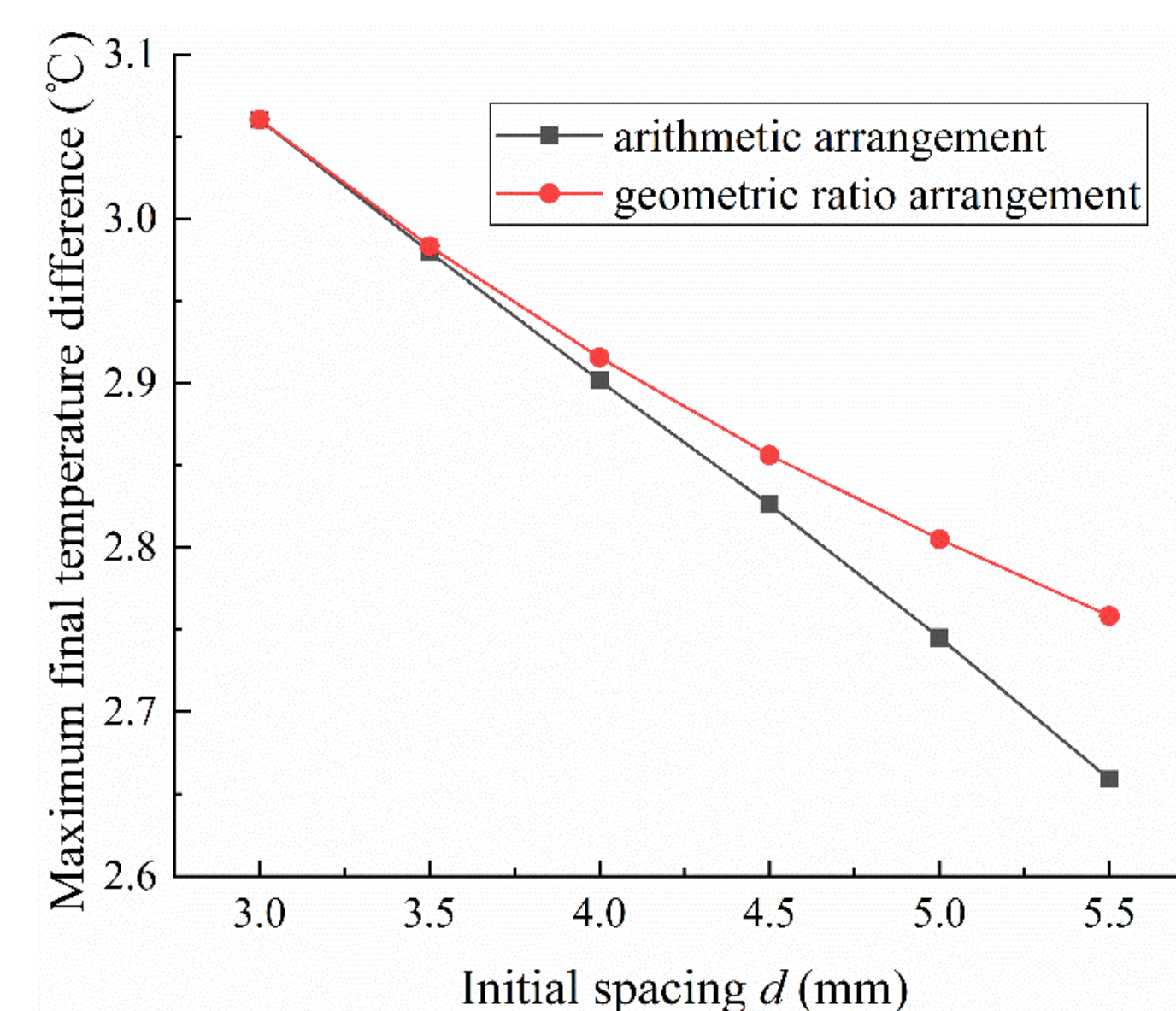


图4.模组内最高温度差

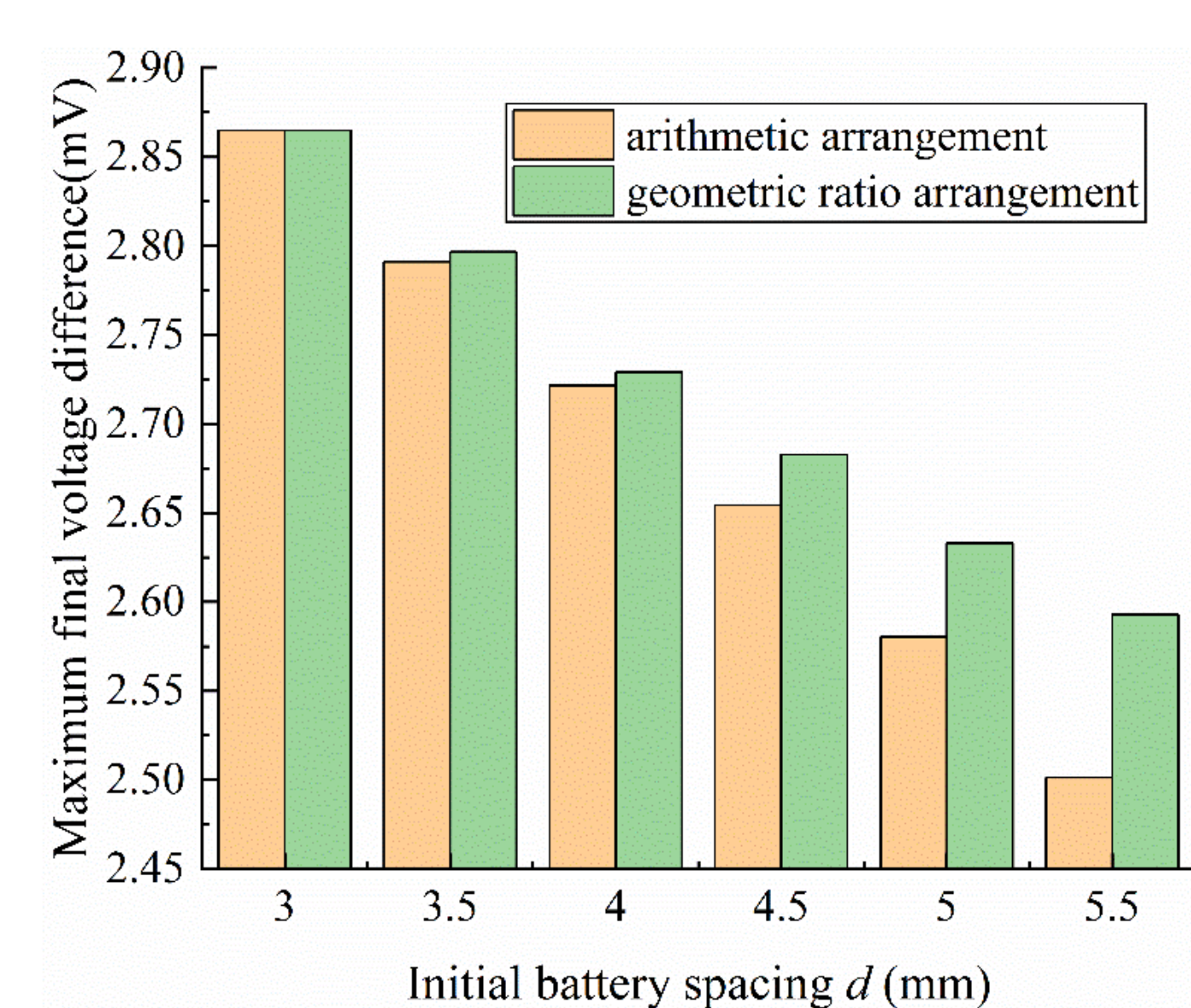


图5.模组内最大电压差

**结论:** 通过改变电池间隔可以有效改善电池模组的均匀性, 尤其是等差数列布置。电池模组的最大温差随着 $d$ 的增加而减小。当 $d$ 达到 $5.5\text{mm}$ 时, 等比数列排布的电池模组的最大温差可以减小13%, 并且放电终止时刻电压差可以减小到 $2.5\text{mV}$ 。通过比较电池等比数列和等差数列, 发现具有等差数列排列的电池模组对于温度和放电的均匀性更好。

## 参考文献:

1. C. Ji, B. Wang, S. Wang, S. Pan, D. Wang, P. Qi, K. Zhang, Optimization on uniformity of lithium-ion cylindrical battery module by different arrangement strategy, Appl. Therm. Eng. 157 (2019) 113683.
2. G. Xia, L. Cao, G. Bi, A review on battery thermal management in electric vehicle application, J. Power Sources. 367 (2017) 90-105.