

动力电池电芯堆垛柔性尺寸链计算方法研究

孔鸣

上汽通用动力科技（上海）有限公司 上海 201209

摘要：电芯堆垛是电池装配过程中的关键步骤，堆垛尺寸不仅直接影响下一步装配工艺，还会影响电池产品整体性能。由于电芯和泡棉在堆垛受力时发生的变形对尺寸公差有显著影响，增加了尺寸链计算的复杂性。为解决这一问题，提出一种电芯堆垛柔性尺寸链计算方法。首先依据蒙特卡洛原理在公差范围内随机模拟零件制造尺寸，参照实际工艺定义零件装配方式和顺序，随机选取零件进行多次模拟装配；每次模拟装配均计算当前尺寸组合下零件的受力变形。通过将变形尺寸与累积的尺寸形位公差耦合，获得多次仿真计算下的柔性变形尺寸公差范围。该方法可仿真不同受力条件下的电芯堆垛的装配尺寸公差，并已通过理论分析和实验验证，证明了其有效性和准确性。

关键词：尺寸公差；雅克比旋量；蒙特卡洛；电芯堆垛；变形耦合

DOI:10.16173/j.cnki.ame.2025.04.006

随着动力总成产品从传统的发动机和变速器逐步向电驱动系统转变，电池装配技术在新能源汽车领域的重要性日益彰显。电芯堆垛工艺作为电池装配过程的关键步骤，直接关系到模组入箱、焊接质量^[1]，甚至影响电池产品的安全性能。电芯堆垛尺寸不仅受到零件自身制造尺寸偏差和形位公差影响，与电芯和泡棉材料在受压状态下的变形也密切相关，这使得电芯堆垛尺寸链计算更加复杂。鉴于电池技术的快速发展和行业兴起历史相对短暂，目前尚未形成成熟的电芯堆

垛尺寸链计算方法，行业内这一领域仍处于研究探索阶段。

为确保工艺和设备尺寸设计的有效性，通常在量产前会进行实物试验。然而由于电池造包成本较高，实物试验抽样数量有限，无法覆盖公差范围内所有样本，零件极限尺寸可能导致堆垛过程中发生电芯掉落、过度受压等失效风险。因此，开展电芯堆垛柔性尺寸链计算方法研究，对提升电池产品质量、减少装配过程失效，具有实际应用价值。

本文提出的电芯堆垛柔性尺寸链计算方法，旨在将尺寸公差仿真方法与受力变形计算结合起来，精确预测不同压力下的电芯堆垛尺寸分布，进而在设计阶段评估产品的可制造性，辅助堆垛工装的设计。

电芯堆垛装配的尺寸公差计算

电芯堆垛装配是指电芯与泡棉间隔串联，通过工装对齐并夹紧的过程。在此过程中，电芯的平面度、尺寸公差以及对齐方式均会影响堆垛装配后的尺寸。本文研究的是基于装配和受力的尺寸公差计算，模拟在设计公差范围内制造的电芯和泡棉，按照既定规则进行装配，进而分析由装配误差引起的零件位置和姿态的变化，并计算累积到各方向的尺寸偏差，最后耦合零件变形，以实现电芯堆垛装配尺寸公差的精准预测。

1. 基于蒙特卡洛的特征点生成

蒙特卡洛 (Monte Carlo) 算法是一类通过随机变量的统计试验、随机模拟，求解数学物理和工程技术问题近似解的数值方法。蒙特卡洛法已成熟应用于三维尺寸公差分析方法中^[2, 3]，与极值法和统计法相比，这种方法计算精度高且更符合实际生产情况。

电芯和泡棉形状相对规整，在零件坐标系中的位姿可使用特征点来代替。特征点参数 x 、 y 、 z 表示特征的位置，参数 i 、 j 、 k 表示特征向量，代表特征在空间中的姿态。为计算准确，对电芯和泡棉进行网格划分如图1所示，每个网格结点作为一个特征点。特征点的活动范围受尺寸公差和形位公差的限制，例如平面的形状公差平面度 T_F ，可定义为一个二维数组 (U_F, L_F) ， U_F 表示形状公差上偏差，即图样平面度要求， L_F 表示形状公差下偏差，对平面度该值为0。

定义特征点所在的公差范围后，便可使用蒙特卡洛法模拟零件制造，对特征点进行随机取值。一般认为特征尺寸在公差范围内满足正态分布，因此特征参数满足

$$x = \mu + \sigma \cdot R \quad (1)$$

式中 μ ——正态分布期望；

σ ——标准差；

R ——随机数的取值。

每个特征点进行 N 次随机取值，获得 N 组位姿，单个特征点向量表示为

$$F_{in} = [x \ y \ z \ n_x \ n_y \ n_z]^T \quad (2)$$

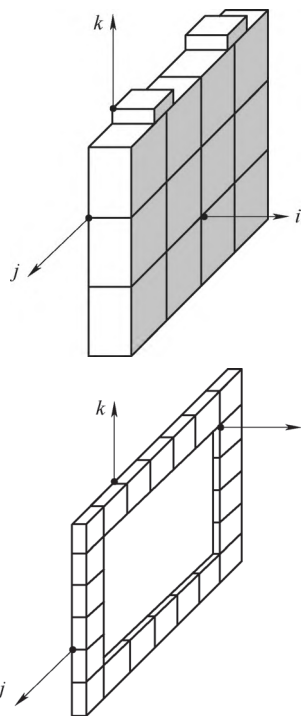


图1 零件位姿表达

如图2所示，平面上每个点均在公差范围内，因此 N 次随机数也同样满足

$$(k-1)t \leq F_{in} \leq kt \quad (3)$$

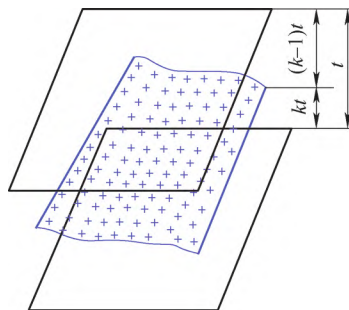


图2 特征随机数分布

同理，其余特征也满足上述计算方法。利用蒙特卡洛法在公差范围内模拟 N 次制造的零件数据，再随机选取零件用于下一步装配。

2. 建立三维尺寸装配模型

零件装配定位过程也是零件方向和位置的变化过程。多个零件装配的方位变化累积，可通过雅克比矩阵来描述和传递。雅克比矩阵的概念源于机器人运动学，原本用于传递各关节的位姿和速度。装配时特征

在公差范围内的转动和移动，同样可以借助雅克比矩阵进行传递^[4]。

常见的装配模型，都可用六点定位进行表示，六点定位的有向装配图如图3所示。

有向图装配模型主要描述相互配合的装配特征之间的定位关系信息^[5]。原始零件经过6个点定位后，位姿进行了旋转和平移，零件坐标由原变为。

雅克比矩阵定义每个定位点的坐标传递关系^[6]

$$J_i = \begin{bmatrix} -n_{ix} & -n_{iy} & -n_{iz} & 2(n_{iz}y_i - n_{iy}z_i) & 2(n_{ix}z_i - n_{iz}x_i) & 2(n_{iy}x_i - n_{ix}y_i) \end{bmatrix} \quad i=1, 2, \dots, 6 \quad (4)$$

式中 x_i, y_i, z_i ——分别表示定位点三个方向坐标；

n_{ix}, n_{iy}, n_{iz} ——分别表示定位点 x, y, z 对应的法向。

零件装配后的偏差可表示为

$$\Delta q = -J^{-1} \cdot \phi \cdot \Delta r \quad (5)$$

其中

$$\phi = \begin{bmatrix} n_1^T & 0 & \dots & 0 \\ 0 & n_2^T & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & n_6^T \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$n_i = \begin{bmatrix} n_{ix} \\ n_{iy} \\ n_{iz} \end{bmatrix}, \quad i = 1, 2, \dots, 6 \quad (7)$$

表示定位点偏差

$$\Delta r_i = \begin{bmatrix} \Delta x_i \\ \Delta y_i \\ \Delta z_i \end{bmatrix}, \quad i = 1, 2, \dots, 6 \quad (8)$$

电芯的堆垛装配模型较简单，定位点分别取自工装和前一装配零件，因此除零件自身尺寸偏差外，还会累积上一步装配偏差，符合实际公差传递原理。

柔性零件变形尺寸耦合

与当前业内研究的尺寸偏差计算方法不同的是，电芯堆垛装配涉及零件较大变形，需将变形耦合到装配尺寸链中。对电芯和泡棉分别做压力实验，发现电芯在屈服应力内，压力与变形呈线性关系，而泡棉受压力面积较小，同等受力范围，压力与变形为非线性关系。因此，对电芯和泡棉的变形尺寸，需分别计算。

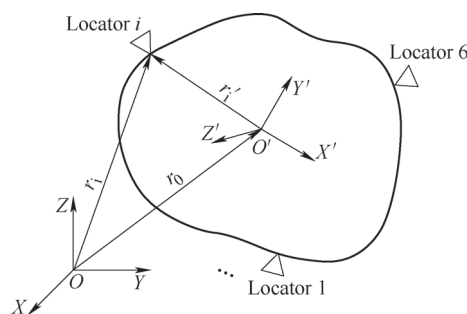


图3 六点定位有向装配

1. 电芯线性材料变形尺寸耦合

电芯是由铝壳包裹卷绕和各类化学物质制成，其弹性模量需通过实验精确获得。单个电芯压力与变形关系如图4所示，整体可视为线性。

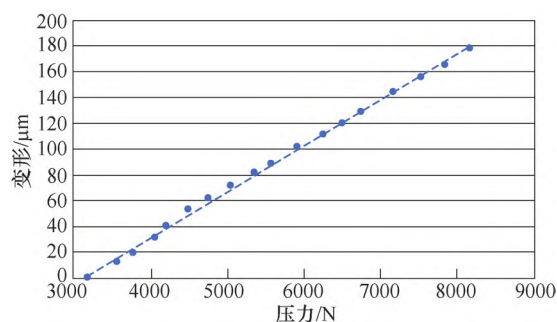


图4 单个电芯压力变形曲线

根据胡克定律

$$F/S = E\Delta L/L_0 \quad (9)$$

式中 F ——压力；

S —— F 的作用面积；

L_0 ——电芯原始厚度；

ΔL ——电芯压缩量；

E ——实验所求的弹性模量。

电芯堆垛模型如图5所示，电芯大面 X 方向受压， X 方向变形满足胡克定律， Y, Z 方向变形可通过实验获得泊松比计算。

由蒙特卡洛获得的每个电芯尺寸不同，各方向受力面积和变形也不同，各电芯单独计算6个方向变形后，再耦合到对应零件的装配尺寸偏差中。

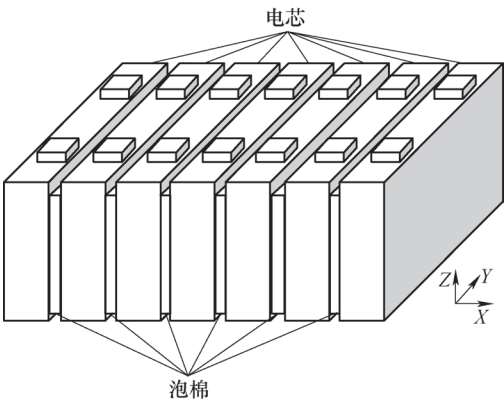


图5 电芯堆垛模型

2.泡棉非线性材料变形尺寸耦合

剪取单位面积泡棉做压力实验，应力应变曲线为非线性。为简化计算，采用分段线性插值法^[7]，将非线性曲线进行网格划分如图6所示，每个网格内可近似认

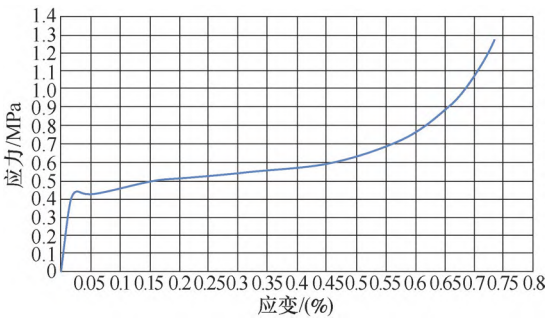


图6 泡棉应力应变曲线

为线性关系。

忽略摩擦力的影响，认为电芯堆垛模型两端施加压力时，内部的力均匀传递。泡棉受力面积为口字形，根据所受压力 F 和泡棉面积 A ，可获得单片泡棉所受应力

$$\sigma = F/A \tag{10}$$

找到应力所在分段范围，代入分段内的线性公式计算对应的应变量

$$S_i(x) = y_i \frac{x - x_{i+1}}{x_i - x_{i+1}} + y_{i+1} \frac{x - x_i}{x_{i+1} - x_i} \tag{11}$$
$$(x_i \leq x \leq x_{i+1})$$

再根据泡棉实际厚度，即可得到当前压力下的泡棉变形量。

结果分析

基于以上原理，开发一套适用于快速建立电芯堆垛模型并计算各方向尺寸偏差的仿真软件。该软件能够实现电芯堆垛装配在受压下的力与尺寸的互算。如，已知电芯堆垛挤压后的整体装配长度，可仿真施加的堆垛压力的范围；或已知施加的堆垛压力，仿真出挤压后电芯各方向的尺寸偏差。

软件的尺寸公差仿真页面如图7所示。输入电芯、泡棉的尺寸公差和形位公差，以及各自的材料参数，设置堆垛施加的压力，经过计算，软件可同时输出X、Y、Z各方向的尺寸公差范围。各方向的尺寸公差仿真



图7 软件尺寸公差仿真结果页面

结果可进一步用于计算堆垛后的极柱位置度、相邻极柱高度差、泡棉压缩率等制造过程关键尺寸，或用于评估下一步装配的可行性。

软件仿真结果的准确性也经过了实物验证。以某产品电芯堆垛为例，一组电芯堆垛装配并压缩到长度603.5mm，实测所需压力为6500N。将电芯和泡棉尺寸形位公差，以及实验获得的材料变形曲线代入，设

置仿真条件压缩到603.5mm，图8为软件的压力仿真结果。

结果显示，在设置的零件尺寸及压缩长度下，堆垛模型可能的受力范围在5971.5~6677.79N，实测压力6500N包含在范围中，认为软件计算结果具有准确性。可作为实验补充，适当减少实物实验，降低物料成本。

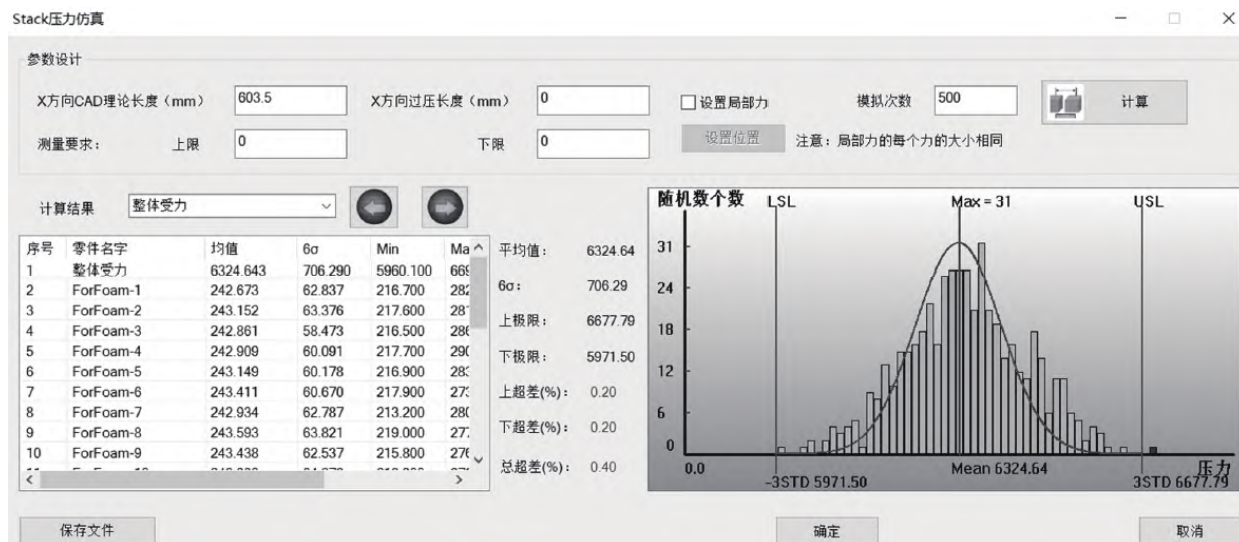


图8 软件压力仿真结果页面

结语

本文提出的电芯堆垛柔性尺寸链计算方法具有一定的先进性，首次将尺寸偏差计算方法与受力变形结合起来，适用于有较大变形的尺寸公差仿真环境。蒙特卡洛方法尽可能覆盖零件公差内的所有装配结果，相较实物抽样验证更加全面。通过尺寸仿真，提前规避风险，在设计阶段校核产品可制造性，避免极端尺寸和压力下的装配质量风险。

参考文献:

- [1] 薛于凡, 周凯航, 和颖凌. HEV电池模组堆垛过程中电芯极柱高度差影响因素研究[J]. 上海汽车, 2024 (2): 51-62.
- [2] Qureshi, A. J., Dantan, J. Y., Sabri, V., et al. A statistical tolerance analysis approach for over-constrained mechanism based on optimization and Monte Carlo simulation[J]. Computer-Aided Design, 2012, 44 (2): 132-142.

- [3] 袁贵星, 王平. 蒙特卡洛模拟及其在公差设计中的应用[J]. 天津科技大学学报, 2008, 23 (6): 60-64.
- [4] 陈华, 唐广辉, 陈志强, 等. 基于雅可比旋量统计法的发动机三维公差分析[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2014, 35 (11): 1397-1402.
- [5] 宜利, 田立中, 董正卫, 等. 装配关系的有向图表达方法研究[J]. 计算机集成制造系统, 2003, 9 (2): 149-153.
- [6] Cai W, Hu SJ, Yuan JX. A variational method of robust fixture configuration design for 3-D workpieces [J]. Manuf Sci Eng, Trans ASME, 1997, 119 (4A): 593-602
- [7] 邢丽. 一维插值算法在实际问题中的应用和比较[J]. 上海第二工业大学学报, 2013, 30 (4): 311-314.

AUTO1950