

# 螺钉预紧过程数值化模拟探析

谭德强 陈昌中 冯烈

(珠海格力电器股份有限公司 广东 珠海 519070)

**摘要:** 电子产品生产制造过程中, 组件之间往往通过螺钉来连接紧固, 螺钉连接的质量和连接顺序, 决定了产品能否在使用环境中安全工作, 会对电子产品质量产生影响。本文运用仿真技术对螺钉预紧过程进行受力分析, 研究螺钉锁紧的原理以及不同建模方式的差异性。研究表明, 通过简化模型可以得到与详细模型相近的求解结果, 误差在10%; 网格数量对求解结果影响较大, 一定程度上决定了求解精度, 对比网格加密前后, 误差从27.1%降到了7.5%。

**关键词:** 螺钉; 预紧过程; 数值化模拟; 仿真

## 0 引言

工程中的许多构件的连接是通过螺钉完成的。螺钉在连接固定多个构件时, 螺母必须作用一预紧力使螺钉产生预应变, 才能有效地发挥其紧固作用。而预紧力是拧紧螺母时, 由操作人员施加一给定的拧紧力矩时产生的<sup>[1]</sup>。螺纹的预紧有利于增强连接的刚性和紧密性、防松及防滑<sup>[2]</sup>。

电子产品生产制造过程中, 组件之间往往通过螺钉来连接紧固, 而打螺钉也是生产工艺中的受力工序, 会对电子产品质量产生影响。打螺钉工序中应力的测量, 采用应力片测量方式, 即运用电阻效应进行应力的监测。应力片测试方式只能对物体表面的局部应力进行测量, 无法对物体内部以及整体应力分布进行监测分析。韦清芳<sup>[3]</sup>采用 ANSYS 接触分析模块计算得到了螺钉预紧力作用下连接件及螺纹牙型的变形特征, 计算结果具有很强的工程应用价值。

因此, 本文运用仿真技术对螺钉预紧过程进行受力分析, 研究螺钉锁紧的原理以及不同建模方式的差异性。

## 1 螺钉拧紧原理

螺栓插入被连接件, 利用螺母或内螺纹拧紧使螺栓拉伸变形, 这种弹性变形产生了轴向的拉力, 将被夹零件挤压在一起, 被称为预紧力。理论上, 只要产生足够的夹紧力, 完全可以保证被夹零件在震动、高低温等恶劣环境下安全工作, 而不必使用涂胶等辅助方法。

而实际情况中, 对螺栓施加的转矩不像夹紧力那么简单, 对螺栓施加的转矩遵循图1中50-40-10规则,

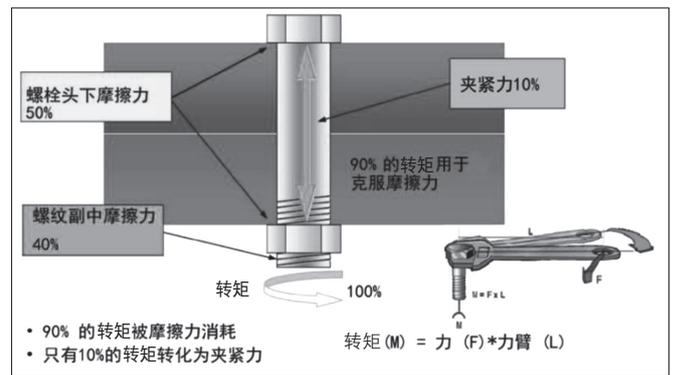


图1 转矩 50-40-10 规则图示

即90%的转矩需要克服摩擦力(50%克服螺栓头下摩擦力, 40%克服螺纹副中摩擦力), 只有10%的转矩转化为夹紧力。

螺钉预紧过程属于静力学分析范畴, 本文采用 ANSYS Workbench 中的 Static Structural 模块进行仿真分析。

## 2 预紧力的计算

根据经典理论, 拧紧力矩 T 是用于克服螺纹副的螺纹阻力矩 T<sub>1</sub> 及头部支撑面的摩擦力矩 T<sub>2</sub> 的, 从而得到预紧力 - 转矩计算公式如下:

$$T = T_1 + T_2 = F \times \tan(\phi + \rho_r) \times \frac{d_2}{2} + F \times \frac{f}{3} \times \frac{d_u^3 - d_o^3}{d_u^2 - d_o^2} = KdF$$

式中: K - 转矩系数, 是反映螺栓连接结构几何、接触等因素的综合性系数;

d - 螺纹公称直径, 即大径。

拧紧力矩是控制预紧力的关键因素。而预紧力的大小直接关系着螺纹连接的可靠性, 过大或过小都会使连接失效。因此需要得到准确的 K 值, 严格控制装配

中的预紧力。转矩系数  $K$  是一个与几何、摩擦等多因素有关的变量，根据螺纹规格、材料、摩擦、装配条件等情况的不同， $K$  值可以在 0.1 ~ 0.3 甚至更大的范围内浮动，而在工程实践中通常取 0.2。我国大部分机械设计手册未给出  $K$  的推荐用值，而有的手册及多数大学教材按材料的表面状态给出相应的  $K$  值。这种给  $K$  值的方法较粗略，同时又存在规格不全、未考虑基体材料等问题。

建模选择的螺钉为标准自攻螺钉 ST2.2 × 5.5PB (ST 指自攻螺钉， $P$  指头型为盘头，螺距 0.8mm，公称长度 5.5mm，大径 2.2mm)，具体尺寸参考 GB 845-85 标准。常规所用力矩为 0.28Nm，取  $K=0.2$ ，可计算得出预紧力  $F=636N$ 。

### 3 仿真模型

本文构建了 PCB 板 - 螺钉 - 螺母的装配模型，模拟施加预紧力作用下，PCB 板 - 螺钉的应力应变分布情况，对比带螺纹的详细模型和不带螺纹的简化模型的受力分布情况，以及对仿真结果与实际安装过程进行对比分析研究。其中，PCB 板选用 FR-4 等级材料，螺钉和螺母选用普通结构钢材料。

本文简化模型基本由可以 sweep 的规则几何构成，通过 slice 分块后，可以划分为规则的六面体网格，见图 2 (a)，网格数量为 14549。而带螺纹的详细模型由于螺纹的存在，不规则的几何体采用四面体网格进行划分，其他规则几何部分采用六面体网格划分。整体混合网格见图 2 (b)，PCB 板采用六面体网格划分，螺钉和螺母主要采用四面体网格划分，既保证了计算结果的精度，也保证了计算速度。

### 4 接触与边界设置

#### 4.1 接触设置

简化模型中原螺纹接触部位由于简化成了圆柱面接触，需要将此处的接触设置为 bonded，表征此处的连接固定；两块 PCB 板子之间的

接触采用 frictional 接触方式，其中 friction coefficient 取 0.2 ( $K$  值)，其他部位默认采用 bonded 连接。而带螺纹的详细模型由于螺纹的存在，可以考虑摩擦的影响，因此设置为 frictional 接触方式，其中 friction coefficient 取 0.2 (即  $K$  值)，两块 PCB 板子之间的接触采用 frictional 接触方式，其他部位默认采用 bonded 连接。

#### 4.2 边界条件

模型中预紧力的施加采用 ANSYS 中专用的 bolt pretension 施加，设置两步分析步，第一步设置为 636N，第二步 lock 设置缺省，表示预紧力的持续施加。其中预紧力需要设置在螺钉中部圆柱部位；而 fixed support 约束施加在螺母底部面，避免施加在螺栓底面造成刚度影响。

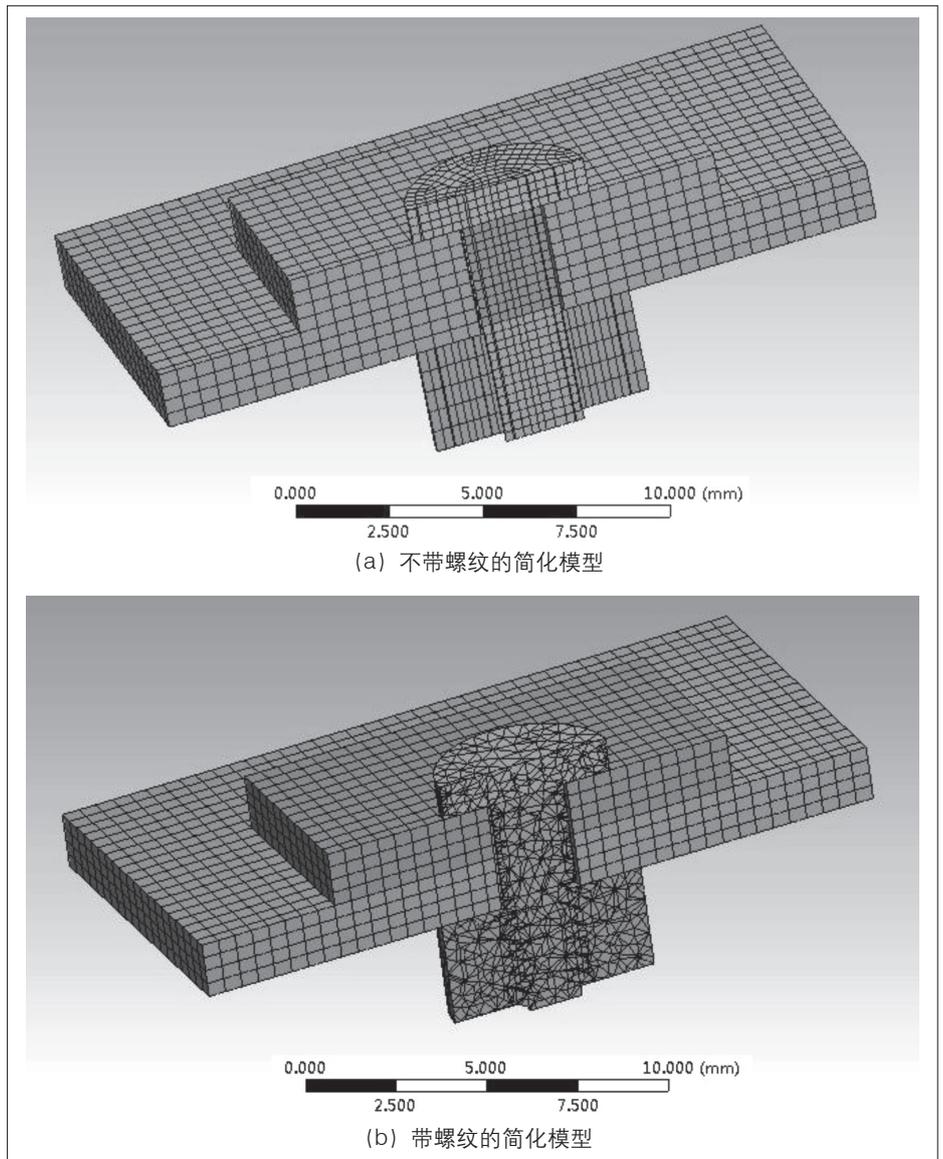


图 2 网格划分

施加预紧力，需要对受力物体的坐标轴进行标定，即建立一个 coordinate system 使得预紧力施加方向与轴向一致。

### 5 仿真结果分析

#### 5.1 形变分析

如图3所示，从整体的形变来看，简化模型和带螺纹模型整体形变分布相近，且形变最大的位置均集中在螺钉头下部，形变量最大值分别为0.01145mm和0.0118mm。

#### 5.2 应力分布

如图4所示，从整体等效应力分布看，简化模型和带螺纹模型整体应变分布相近，且应力最大位置在螺钉头处，最大值分别为705MPa和651MPa，误差为7.6%。

从PCB板等效应力分布看，简化模型和带螺纹模型整体应变分布相近，且应力最大位置在靠近螺钉头底部位置一侧，最大值分别为55.6MPa和70.7MPa，误差为27.1%。

两种模型整体等效应力分布最大值误差较小，而PCB板等效应力分布的最大值误差较大，初步考虑为网格划分问题。为了进一步排除网格的干扰，对网格进行加密，网格数量提升了10倍，网格数量为157885，求解精度大幅提升。网格加密后，整体等效应力最大值分别为859MPa与956MPa，误差为11.2%；PCB板等效应力

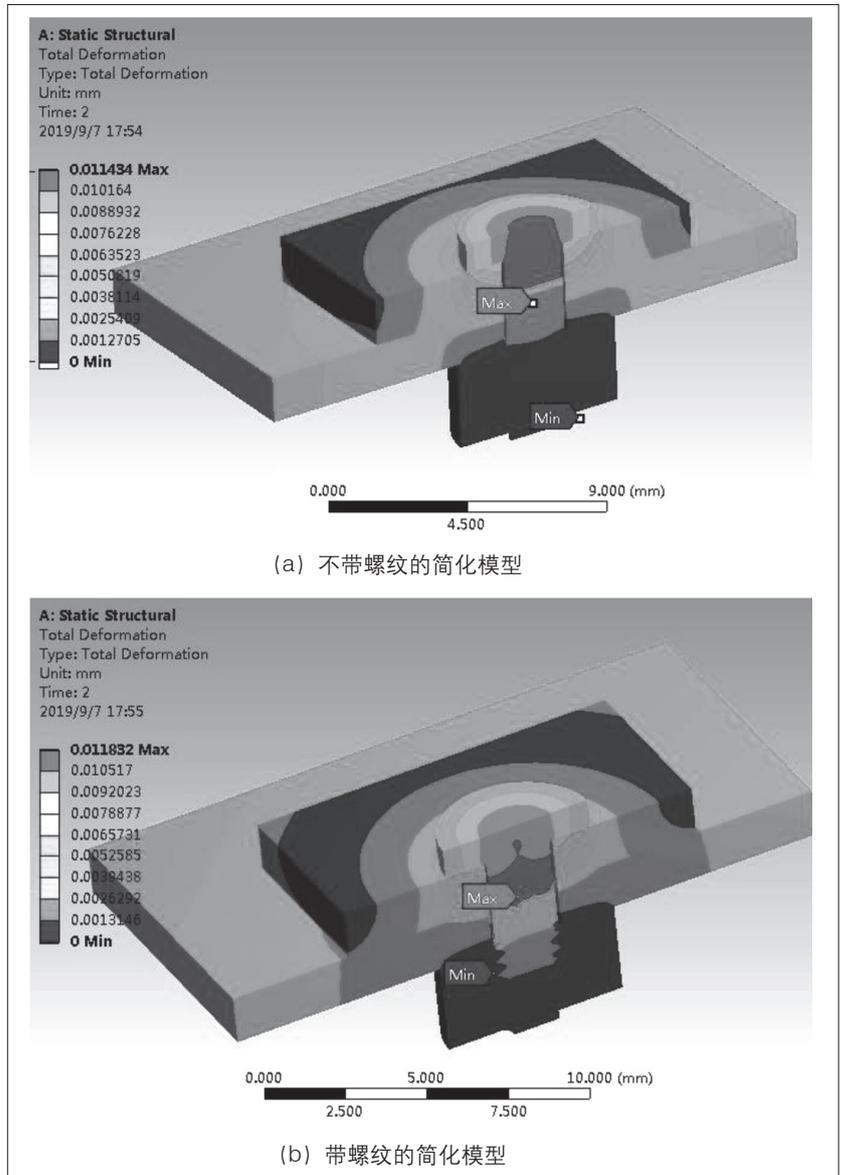


图3 整体形变量

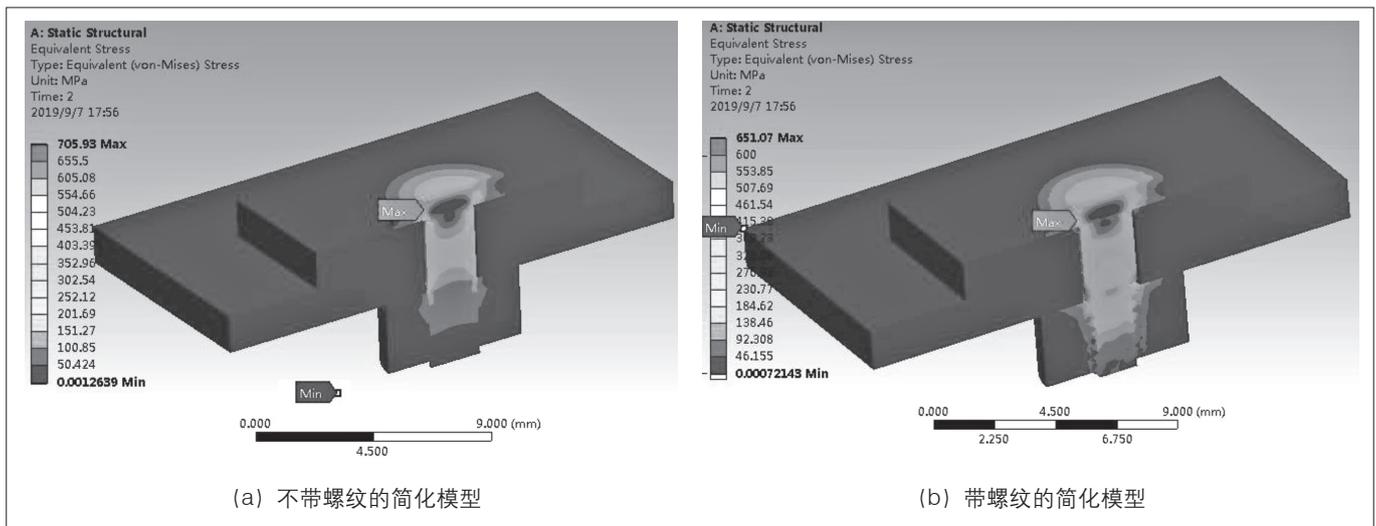


图4 整体等效应力分布

(下转第35页)

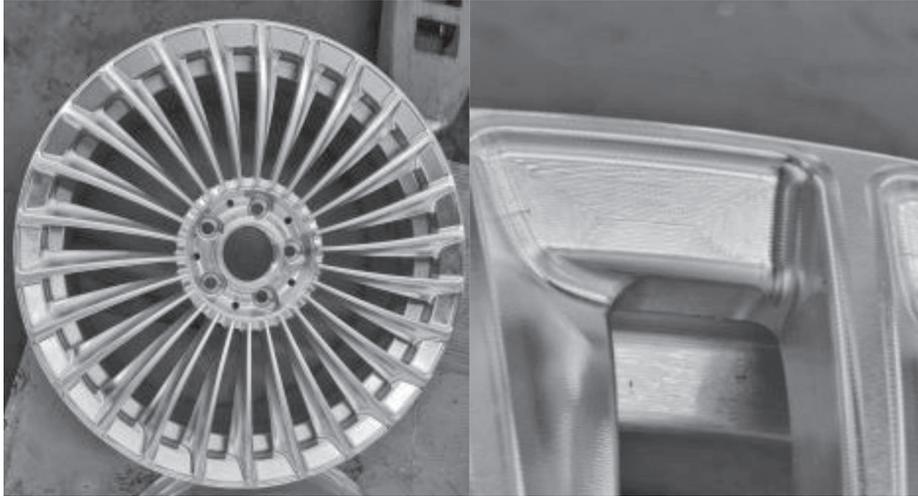


图6 圆弧拐角误差

基金项目：湖南省教育厅科学研究项目——伺服系统动态特性对加工中心切削参数优化影响的研究及应用，课题编号 19C1243。

参考文献：

[1] 袁林, 李海滨, 杨静, 等. 数控机床螺距误差分析与补偿[J]. 航空制造技术, 2011(8): 82-85.

[2] 商鹏, 阮宏慧, 张大卫. 基于球杆仪的三轴数控机床热误差检测方法[J]. 天津大学学报, 2006, 39(11): 1336-1340.

[3] 张虎, 周云飞, 唐小琦, 等. 数控加工中心误差G代码补偿技术[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2002, 30(2): 13-16.

[4] 杜丽, 张信, 王伟, 等. “S”形试件的五轴数控机床综合动态精度检测特性研究[J]. 电子科技大学学报, 2014(4): 629-635.

[5] 杨侠, 邱辽原, 俞九阳. 软件滤波在数控采样系统中的应用[J]. 机械工程与自动化, 2007, 4(143): 136-137.

[6] 杨永生. 机床定位误差测量及补偿[J]. 自动化应用, 2011(3): 58-

59+62.

[7] 金建荣, 张秋菊. 滚珠丝杠在线检测及模糊PID补偿算法研究[J]. 机电工程, 2011(6): 47-50.

[8] 孙兴伟, 董蔚, 王可, 等. 数控机床伺服系统跟随误差对加工轮廓的影响[J]. 制造技术与机床, 2010(6): 76-78.

作者简介：张剑(1979.06-), 女, 汉族, 湖南宁乡人, 硕士研究生, 讲师/工程师, 研究方向: 机电一体化、先进制造。

(上接第31页)

最大值分别为 76.9MPa 与 82.7MPa, 误差为 7.5%。

6 结语

通过对螺钉预紧原理的研究, 螺钉所受夹紧力是螺钉锁紧的关键, 查阅国标, 求得了螺钉所受的预紧力。进一步运用 ANSYS 仿真软件, 构建了 PCB 板 - 螺钉紧固结构静力学分析模型, 求解了 PCB 板 - 螺钉预紧过程中, PCB 板与螺钉所受应力和应变。通过仿真分析, 对比了简化模型和带螺纹的模型所受应力的分布情况, 得到以下结论:

(1) 简化模型和带螺纹的模型应力分布基本一致, 应力最大值也基本相近, 误差在 10% 左右。尤其是 PCB 板所受最大应力的误差为 7.5%, 说明在计算精度要求不高的时候, 可以考虑简化模型, 提升求解速度。

(2) 网格划分数量对求解结果有影响, 尤其是

PCB 板所受应力最大值, 对比网格加密前后, 误差从 27.1% 降到了 7.5%, 说明网格划分数目一定程度上决定了求解精度。

参考文献：

[1] 任钧国, 唐乾刚, 欧阳勇. 螺钉预紧扭矩与其预应变转换方法[J]. 力学与实践, 2001, 23(4): 61-62.

[2] 钟贤栋, 梁飞华, 陈华豪. 控制螺纹联接预紧力的新方法[J]. 煤矿机械, 2002(4): 44-46.

[3] 韦清芳. 螺钉预紧力对精密零件装配变形的影响[J]. 机械设计与制造, 2013(5): 216-218.

作者简介：谭德强(1985.10-), 男, 汉族, 湖南株洲人, 本科, 工程师, 研究方向: 空气能热水器与商用中央空调新产品导入、新材料开发、工艺规划及工艺管理。