

# 车身检具热变形的数值仿真与结构优化研究

□ 洪浩祯 □ 来新民 □ 朱文峰 □ 彭林法

**摘要:** 汽车覆盖件制造中多采用专用检测夹具作为主要检测手段,用于控制工序间产品质量。覆盖件检具对精度要求高,受使用环境温度影响产生的热变形不能忽略。针对某车型后门总成检具设计,运用有限元方法对检具热变形进行数值仿真,并将其与优化技术相结合应用到结构优化中,有效地降低了检具热变形。

**关键词:** 车身检具 热变形 有限元分析 结构优化

中图分类号: TG81

文献标识码: A

文章编号: 1000-4998(2005)06-0065-03

在汽车覆盖件的制造中,无论对具有复杂空间几何形状的大型冲压件、内饰件、焊接分总成等,还是对简单的小型冲压件、内饰件等,多采用专用检测夹具(简称检具)作为主要检测手段,用于控制工序间的产品质量。检具检测具有迅速、准确、直观、方便等优点,尤其适合大批量生产的需要。随着轿车和客车工业的迅速发展,覆盖件检具在国内汽车行业的应用已相当广泛<sup>[1]</sup>。

覆盖件检具对精度要求比较高,因而对使用环境的温度比较敏感,需要放置在专门的恒温检测室中,使用受到较大的限制。由于实际生产的需要或条件限制,部分检具无法放置在恒温检测室中,此时生产环境温度变化引起的检具热变形就会降低检具精度,从而对检测结果造成较大的影响。目前国内对这种影响的研究还不够深入,主要是在经验基础上的定性分析<sup>[2~4]</sup>,还比较缺乏定量的分析和准确的评估。另外,检具设计中也没有充分考虑检具热变形问题或者缺乏理论的指导,影响检具的实际使用效果。

检具热变形的数值分析与结构优化模型对于检具热变形的研究,目前国内主要有以下几种方法:

①实验法 通过对检具不同温度下变形的实际测量,拟合出变形与温度的关系。此种方法数值真实准确,但必须在检具制造出来后才能进行,缺少前瞻性,不能在检具设计阶段提供指导,主要用于为检具测量时提供热变形修正<sup>[5]</sup>。

②数值法 对检具数学模型进行有限元仿真,根据仿真结果得到变形与温度的关系。此种方法虽然数据的真实性和准确度不如前一种,但实施方便,成本低,并可以在检具设计阶段进行,能为检具的设计和 optimization 提供指导。

本文运用有限元(Finite Element Method, FEM)分析方法对检具热变形进行数值仿真,并将有限元分析与优化方法相结合,应用到车身检具的优化设计中去,

有效地降低检具的热变形,提高了检具的精度。

## 1 基于有限元法的检具结构优化

(1)传统优化方法 基本原理是通过优化模型的建立,运用各种优化方法,通过在满足优化设计要求的条件下的迭代计算,求得目标函数的极值,得到最优设计方案。优化问题的数学模型可表示为:

$$\min F(x) = F(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

$$g_i(x) = g_i(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq 0$$

$$h_j(x) = h_j(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0$$

$$x = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$$

$$(i = 1, 2, \dots, m)$$

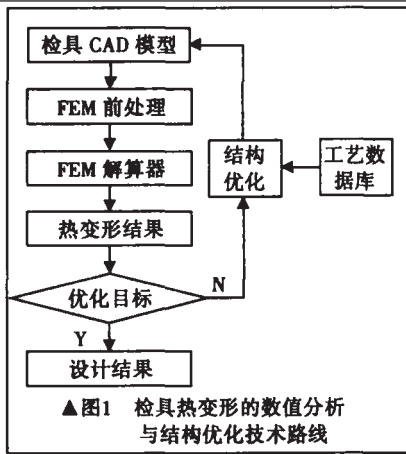
$$(j = 1, 2, \dots, p)$$

$F(x)$ 为目标函数,是设计变量的函数,用来评价设计方案的优劣,优化问题即为求目标函数的极值, $g_i(x)$ 、 $h_j(x)$ 为约束条件,是设计变量取值范围及状态变量空间范围的限制条件。 $x$ 为设计向量,由设计变量形成,是设计中需优选的设计参数,每个设计向量即为一个设计方案,设计向量的集合为设计空间 $R$ ,满足约束条件的设计向量的集合为可行域<sup>[6]</sup>。

(2)结合 FEM 的数值优化法 对于大型复杂结构的有限元模型来说,要想得出目标函数与状态变量的显式解析表达式是十分困难的,难以用传统分析方法来解决。但这类问题我们可以采用优化的数值方法结合有限元方法来求解,即设置一组初始设计变量,其对应的目标函数值可以借助有限元方法来得到,找到一个合适的方向和步长,通过多次迭代,可以逐步逼近目标函数的极值,或者满足设计要求即可,从而大大降低了优化问题的难度<sup>[7]</sup>。

本文采用一种结合有限元法的数值优化方法(如图1所示)。检具初步设计完成得到 CAD 模型以后,首先需要进行 FEM 前处理,将 CAD 模型适当简化、修改,甚至部分重建,然后划分网格,定义材料特性并施

加约束和载荷后转化成有限元模型。将此有限元模型通过 FEM 解算器计算后就得到检具的热变形结果。此结果如果不能达到预先设定的设计目标,则进行结构优化。结构优化中需要充分参考工艺数据库中已积累的信息。结构优化结束后再次进行有限元分析得到新的热变形结果,与设计目标比较后,如果达到则得到最后优化设计,如果没有达到要求需重复以上过程。



▲图1 检具热变形的数值分析与结构优化技术路线

下面以后门总成检具优化设计为实例详细介绍模型的实现过程。

## 2 后门总成检具热变形的数值分析

图2是某国产自主研发7座小客车后门总成检具的 CAD 模型,该检具底座材料是150×100空心方型钢(GB/T6728-1986),底板和支架材料是45钢,检具体材料采用铸铝112。由于底座、底板和支架的热变形比较规则,并且和后门有直接位置关系的仅仅是检具体,所以分析和优化只针对检具体进行。

(1)有限元网格的建立 有限元网格划分采用 Altair Engineering 公司的 HyperMesh 软件,它是一个高效的有限元前后处理器,能够建立各种复杂模型的有限元和有限差分模型,与多种 CAD 和 CAE 软件有良好的接口,并具有高效的网格划分功能。

由于检具体 CAD 模型中的细节影响整个结构的网格分布,增加网格的数量,使模型过于复杂。因此为了减少有限元模型网格划分的复杂程度,加快有限元分析的速度,对检具体 CAD 模型进行了适当简化,去掉那些对分析影响不大的特征(如倒角、圆角等)和

一些小孔。

对检具体 CAD 模型简化处理后,即可进行网格划分。划分网格时选用三维8节点实体单元,手动划分网格,有限元网格模型共有9328个单元和13329个节点(如图3所示)。

有限元网格模型建立以后,通过 HyperMesh 与有限元分析软件 ANSYS 的接口,输入到 ANSYS 中进行后续处理。

(2)材料属性定义 检具体的材料为 ZL112,定义材料的弹性模量  $E = 68 \text{ GPa}$ ,泊松比  $\nu = 0.3$ ,密度  $\rho = 2700 \text{ kg/m}^3$ ,线膨胀系数  $\alpha = 23.5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 。

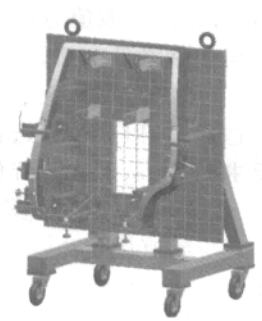
(3)约束和载荷的施加 根据检具体实际安装状况,在与支架的11个连接处施加约束,限制住三个坐标方向的自由度。根据工厂车间的通风及保温条件,检具温度在5~35℃之间,并且温度变化缓慢,检具体各部分温度相同,因此从5~35℃每隔5℃施加一致的温度载荷在所有单元上,参考温度为常温20℃,假设检具体在此温度下制造。另外,考虑检具体的自重在所有节点上施加与重力方向相反的加速度  $a = 9.78 \text{ m/s}^2$ 来模拟重力情况。

(4)计算结果与分析 将上面建立的检具体有限元分析模型,通过 ANSYS 波前法静力求解器,计算了检具体在不同载荷条件下的热应变(如图4所示)检具体在不同的工况载荷条件下最大变形见附表。

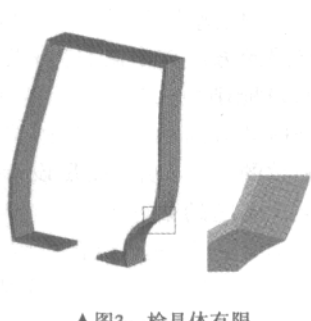
从附表数据可以看到,假设常温20℃下制造的检具体在其他温度下使用时会发生热变形,并且大小超过了设计许可的范围,大大影响了检具的精度和使用效果。并且,检具体热变形的最大值是随着使用温度与制造温度的温差近似线性增长,且正负温差对称,因而保证检具使用环境的恒温可以有效地减小检具的热变形。同时,我们要对针对检具体的热变形进行优化,只要考虑极限工况5℃或35℃就可以了。

## 3 后门总成检具热变形的结构优化

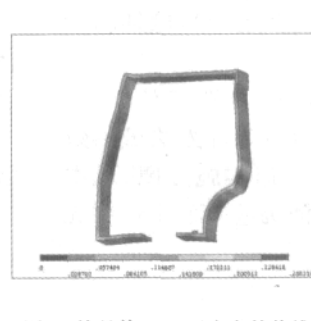
(1)检具热变形的结构优化模型 检具体上与后



▲图2 后门总成检具 CAD 模型



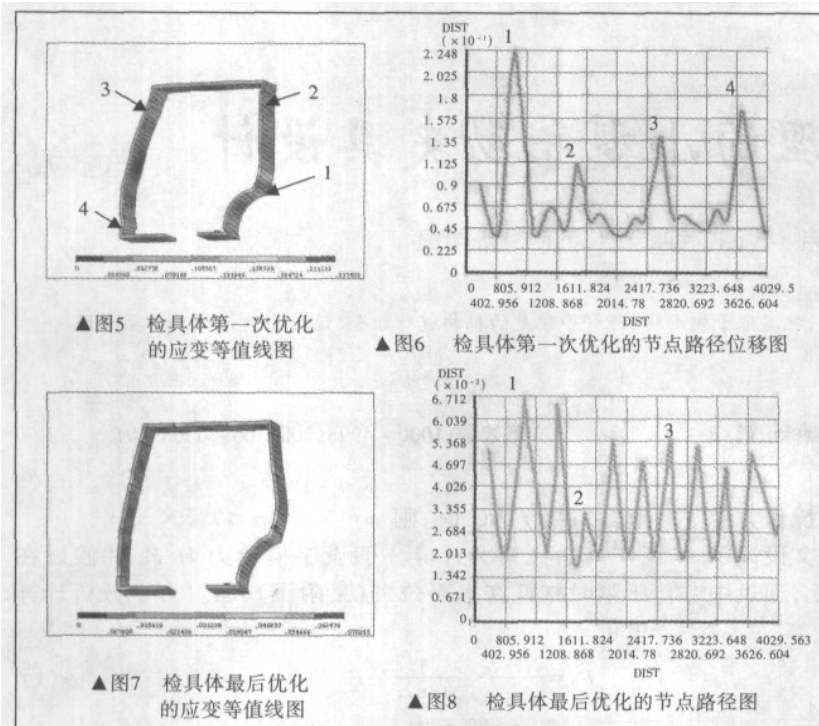
▲图3 检具体有限元网格模型



▲图4 检具体35℃下应变等值线图

附表 检具体不同温度下的最大变形

温度 T/°C	最大位移 DMX/mm
5	-0.2583
10	-0.1722
15	-0.0861
20	0
25	0.0861
30	0.1722
35	0.2583



▲图5 检具体第一次优化的应变等值线图

▲图6 检具体第一次优化的节点路径位移图

▲图7 检具体最后优化的应变等值线图

▲图8 检具体最后优化的节点路径位移图

车门基准点和测点相对应的位置是我们最关心的地方,因为这些位置的变形直接影响检测数据的准确性,因此我们选用检具检测面上的这些对应节点的位移来表征检具变形的程度,同时也是优化的目标:

$$f(x) = \max(D_1, D_2, \dots, D_n)$$

$D_i (1 \leq i \leq n)$  是选取对应节点的位移,  $n = 16$ , 在本实例中,当  $f(x)$  达到设计要求  $0.08 \text{ mm}$ , 而不必得到极小值, 优化就可以完成。

根据检具设计经验,在制造中用伸缩间隙将检具体分段,让热应力在缝隙中得到释放,能够有效地减小热变形,间隙一般为  $3 \text{ mm}$ ,但缝隙的距离和位置如何确定都凭经验,缺乏理论指导。因而,我们选取伸缩的个数作为这个优化问题的设计变量,设计变量的选取受到设计要求、制造工艺的约束。优化迭代方法采用定步长搜索法,设计变量初始值为4,步长值为2。定步长搜索法简单,易于实现,虽然搜索效率不高<sup>[8]</sup>,但对于本实例影响不大。

(2) 优化过程及结果分析 第一次优化方案,在图5所示的4个位置将检具体分段,经有限元计算后所选取节点的位移如图6所示。横坐标是插值点距离初始节点的路径长度,纵坐标是各节点的位移,16点中最大位移为  $0.2248 \text{ mm}$ ,超过设计要求的  $0.08 \text{ mm}$ ,4个峰值点对应图5中的4个位置,分别是检具体伸缩缝的边缘,说明热变形确实可以通过伸缩缝释放出来。然后根据此次优化的结果,将初始设计变量加上步长值进行下一步优化。

经过4次优化后,得到最后的优化方案。在图7所示的位置将检具体分段,经有限元计算后所选取节点的位移如图8所示,16点中最大位移  $0.06712 \text{ mm}$ ,小于设计要求  $0.08 \text{ mm}$ ,第一次优化中的4个峰值点的位移均降到设计要求以下,优化完成。

优化中发现,伸缩间隙均匀地分布在支架两侧能避免热应变集中在某一端。另外增加伸缩间隙,减小检具体分段的长度可以明显地降低检具体的热变形,对于材料铸铝112来说,每隔  $450 \sim 500 \text{ mm}$  布置一个伸缩间隙是比较合适的,大于这个范围,难以将热变形减小到许可范围内,小于这个范围会影响到支架的布置和检具体结构的稳定。

## 4 总结

检具受使用环境温度变化的影响产生热变形在设计中是必须考虑的,本文将有限元分析与优化技术相结合,根据车身覆盖件检具设计实际状况,在检具热变形数值仿真基础上进行结构优化,有效地解决了检具体热变形问题,有助于提高检具的设计水平。

### 参考文献

- 1 朱正德. 汽车覆盖件检具的原理及应用[J]. 工具技术, 2000, 34(1): 30~34
- 2 储军, 陈杰. 车身小型冲压件检具设计的一般方法和步骤[J]. 工具技术, 2004, 38(2): 55~57
- 3 张兴云. 汽车冲压零件检具设计制造技术研究[J]. 四川兵工学报, 2004, 25(1): 40~42
- 4 殷世英. 冲压件检具的设计与制造[J]. 工具技术, 1999, 33(2): 39~40
- 5 孙国美. 发动机缸体用检具变形的探讨与控制[J]. 汽车科技, 2003, 4: 29~30
- 6 R. J. Yangand, C. H. Chuang. Optimal Topology Design Using Linear Programming[J]. Computers and Structures, 1994, (52): 265~275
- 7 Miloslav Riesner, Richard I Devries. Finite Element Analysis and Structural Optimization of Vehicle Wheels[C]. SAE Transactions. USA: Society of Automotive Engineers of USA, 1983: 1~16
- 8 [美]S. S. 雷欧著, 祁载康等译. 工程优化原理及应用[M]. 北京理工大学出版社, 1990: 156~161

(编辑 林 凡)

作者单位: 上海交通大学车身制造中心

邮政编码: 200030

收稿日期: 2005年1月