

# 基于 CATIA/CAA 的航空整体结构件温度变形补偿\*

## Temperature Deformation Compensation of Aircraft Integrated Structure Based on CATIA/CAA

山东大学机械工程学院高效洁净机械制造教育部重点实验室 路来晓 孙杰 张阁  
中航工业成都飞机工业(集团)有限责任公司数控加工厂 罗育果 熊青春

**[摘要]** 环境温度变化对铝合金整体结构件尺寸误差有较大影响,实现因环境温度变化引起工件变形的有效补偿可显著提高航空整体结构件制造精度。采用热机械分析仪测量铝合金毛坯 7050-T7451 和 2124-T851 三个方向热膨胀系数值,建立了环境温度与热膨胀系数、缩放系数之间的数学理论模型,采用零件特征遍历算法,实现了 CATIA 环境下零件 CAD 模型的准确尺寸重构,完成了线性变形快速补偿软件开发。

**关键词:** CATIA/CAA 热膨胀系数 航空整体结构件 尺寸重构

**[ABSTRACT]** The temperature variation influences dimensional error of aluminum alloy aircraft integrated structure greatly. Manufacturing precision of aircraft integrated structure could be improved significantly by achieving effective compensation caused by temperature variation. Thermal Mechanical Analysis (TMA) is adopted to measure the CTE(coefficient of thermal expansion) of pre-stretched aluminum alloy sheet 7050-T7451 and 2124-T851 in three vertical directions. The mathematical theoretical model between temperature and CTE, scaling coefficient is established. The exact dimension reconstruction of CAD models in CATIA is achieved by implementing feature traversal algorithm and the linear deformation compensation software system is also developed.

**Keywords:** CATIA/CAA Aircraft integrated structure Dimensional reconstruction

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.03.021

随着现代飞机性能要求的不断提高,飞机主承力构件普遍采用整体化结构设计,如整体的梁、框、壁板等。航空整体结构件因尺寸大、薄壁特征多,在毛坯初始残余应力、切削力、切削热、装夹力、环境温度变化等因素的影响下,加工变形现象十分严重。环境温度变化使工件在尺寸上伸长或缩短,严重制约了整体结构件的尺寸

精度。温度补偿成为解决工件线性变形、提高工件尺寸精度的有效途径。

国内外学者对变形补偿做了大量研究工作,但针对航空整体结构件变形补偿的研究集中于 2000 年以后,研究思路可归纳为在线补偿和离线补偿 2 种方式。在线补偿受在线监测、实时补偿技术的制约,应用十分困难,目前,研究大都集中于离线补偿方式。Law<sup>[1]</sup>研究了基于刀杆变形的腔槽加工过程中误差补偿方法;郑联语<sup>[2]</sup>提出了进给量的局部优化方法,定性地提出了优化补偿过程;王志刚<sup>[3]</sup>研究了切削力作用下侧壁、腹板变形,提出了进给量的局部优化法与刀具偏摆数控补偿技术;Lee<sup>[4]</sup>采用试验手段,对球头立铣刀铣削侧壁时的刀具路径进行了补偿;S.Ratchev<sup>[5]</sup>将工件作为弹性体,建立了柔性切削力预测模型,预测了整体铣刀铣削侧壁时的尺寸误差并给出了误差补偿算法;孙杰<sup>[6]</sup>采用有限元软件对薄壁框进行了加工变形预测,基于加工变形值,在考虑一定回弹量基础上对刀位点进行修正以实现补偿;Philippe De é pince<sup>[7]</sup>将刀具作为弹性体研究了整体立铣刀铣削加工过程零件表面尺寸误差,在不降低生产率与加工精度的前提下,提出了一种考虑工件尺寸公差的补偿算法;康永刚<sup>[8]</sup>给出了基于切削力信号的实际切深计算方法,并基于实际切深进行了最大变形误差的预测,为实现在线误差补偿打下了基础;陈蔚芳<sup>[9]</sup>对多层补偿算法进行了优化,解决了加工变形与补偿量之间耦合问题;武辉<sup>[10]</sup>通过研究薄壁件加工过程中的弹性变形问题,在建立切削力模型基础上,提出了一种基于 APDL 变形预测的补偿方法。

上述研究对变形的预测方法分为:刀具作为弹性体,工件作为刚体;刀具作为刚体,工件作为弹性体;刀具与工件都为弹性体。无论使用何种变形预测方法,对应的补偿方法大都针对局部让刀变形,对整体结构宏观变形补偿研究较少。针对零件局部特征的补偿很难应用于特征复杂、尺寸庞大的整体结构件。

本文针对环境温度变化对整体结构件尺寸误差影响问题,通过测定铝合金毛坯材料热膨胀系数,建立了温度补偿系统,实现了整体结构件在特定温度下的准确

\* 基金项目:国家自然科学基金(51275277)资助。

尺寸重构。

## 1 系统开发工具

### 1.1 CAA 简介

CAA(Component Application Architecture) 组件应用架构是 DS 产品扩展和客户进行二次开发的强有力工具。CAA 建立在面向对象程序设计基础上,使用 COM (Component Object Model)、OLE (Object Linking and Embedding) 技术,强化了开发功能。CAA 使用 RADE(Rapid Application Development Environment) 快速开发平台,以 Visual Studio 2005 为载体,通过加载 RADE 插件,在 C++ 环境下对 CATIA 进行二次开发,实现了与 CATIA 的无缝结合。

### 1.2 CAA 补偿函数

在室温范围内,温度变化对铝合金整体结构件尺寸误差的影响是线性的,借助 CATIA 软件变换特征中缩放命令可以实现对航空整体结构件线性变形的补偿。缩放命令作用为使用点、平面或曲面表面为参考对实体进行放大或缩小操作。

CAA 中缩放函数为: CreateScaling(const CATISpecObject\_var ihToScale, const CATISpecObject\_var ihReference, const CATICkeParm\_var ihRatio)。对缩放函数中各参数具体说明,参数 1 ihToScale 为要进行缩放的对象,该对象类型为 CATISpecObject,系统中缩放操作的对象为工件的所有几何特征;参数 2 ihReference 是缩放的参考元素,温度补偿系统中选取平面作为参考元素;参数 3 ihRatio 是缩放系数,缩放系数类型为

CATICkeParm,在温度补偿系统中为了保证精度,缩放系数精确到小数点后 8 位。

## 2 温度补偿系统总体框架

图 1 是温度补偿系统组成部分说明。温度补偿系统包括:热膨胀系数查询模块、零件重构模块。2 个模块关系如图 1 所示,查询热膨胀系数之后,首先在输出界面将热膨胀系数值返回给用户,随后该值被转化为缩放系数传递到零件重构模块中。

在热膨胀系数查询模块中,将试验测定的铝合金 7050-T7451 和 2124-T851 两种材料热膨胀系数离散值拟合为 6 阶多项式,建立温度与热膨胀系数之间函数关系,用户只需输入温度值、选择材料类型即可查询到特定温度下的热膨胀系数值。

零件重构模块首先获取热膨胀系数查询模块的计算结果,计算缩放系数值,接收输入条件如零件类型、缩放方向等,实现工件在特定温度下的尺寸重构,为数控编程提供准确尺寸的 CAD 模型。

## 3 功能模块实现

### 3.1 热膨胀系数查询模块实现

#### 3.1.1 热膨胀系数表达

在温度  $t$  下,与温度变化  $1^\circ\text{C}$  相应的热膨胀系数值定义为瞬时热膨胀系数,即:

$$\alpha_t = (dL/dt)/L_T(T_1 < t < T_2) \quad (1)$$

式(1)中,  $L_T$  为温度  $t$  时试件的长度。若一定温度范围内热膨胀系数的变化很小,公式(1)还可表示为:

$$\alpha_m = (\Delta L/L_{T_0})/\Delta t \quad (2)$$

式(2)中,  $L_{T_0}$  为工件初始长度,  $\Delta t$  为温度变化量,  $\Delta L$  为尺寸变化量,  $\alpha_m$  为平均热膨胀系数。

为了保证整体结构件尺寸重构的精度,使用瞬时热膨胀系数进行计算。目前,使用瞬时热膨胀系数计算时,无法直接进行积分运算,需将瞬时热膨胀系数转化为多项式进行计算。采用公式(1)建立热膨胀系数与温度的数学理论模型,数据拟合后采用 6 阶多项式的计算精度最高,2124-T851 预拉伸铝合金毛坯在  $0\sim 400^\circ\text{C}$  范围内瞬时热膨胀系数拟合的多项式如表 1 所示:

表 1 中  $X_{CTE}$ 、 $Y_{CTE}$ 、 $Z_{CTE}$  分别为预拉伸方向、宽度方向、高度方向热膨胀系数值,  $t$  为环境温度值。

#### 3.1.2 热膨胀系数查询模块建立

在温度补偿系统中建立热膨胀系数查询模块,以温度值和材料类型为输入条件,按照温度与热膨胀系数的数学理论模型进行计算,输出特定温度下,某种铝合金材料的热膨胀系数值。

新建名为 QueryDialog 的 Module, CAA 中控件的添

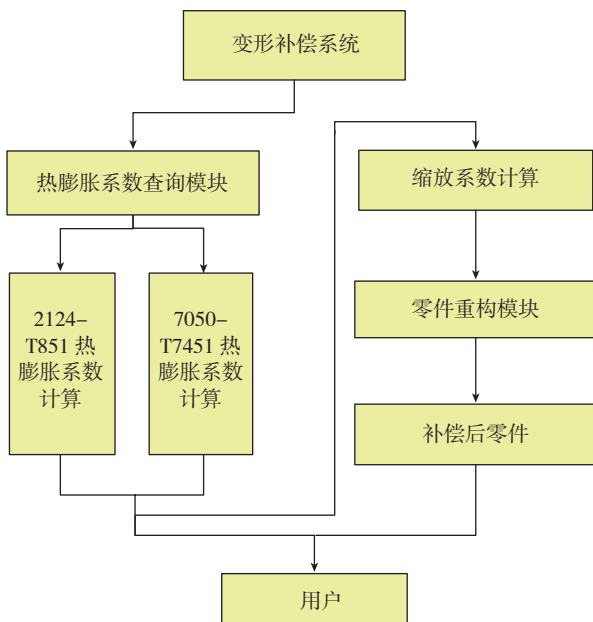


图1 温度补偿系统流程

Fig.1 Process of temperature compensation system

表1 Al2124-T851预拉伸板铝合金板材不同方向热膨胀系数拟合公式

方向	拟合公式(0~400℃)
预拉伸方向	$X_{CTE}=8.01+0.43t-5.52*10^{-3}t^2+3.65*10^{-5}t^3-1.29*10^{-7}t^4+2.32*10^{-10}t^5-1.67*10^{-13}t^6$
宽度方向	$Y_{CTE}=9.36+0.43t-6.24*10^{-3}t^2+4.63*10^{-5}t^3-1.78*10^{-7}t^4+3.36*10^{-10}t^5-2.47*10^{-13}t^6$
高度方向	$Z_{CTE}=9.71+0.43t-6.39*10^{-3}t^2+4.75*10^{-5}t^3-1.82*10^{-7}t^4+3.50*10^{-10}t^5-2.53*10^{-13}t^6$

加方式与 MFC 类似。建立好的热膨胀系数查询模块如图 2 所示,模块中包含 Editor、Radio Button、Pushbutton 控件。其中, Editor 用于接收输入的温度值和输出计算的热膨胀系数值, Radio Button 用于选择材料类型, Pushbutton 用于对热膨胀系数查询模块的响应。



图2 热膨胀系数查询模块  
Fig.2 CTE querying module

### 3.2 零件重构模块实现

#### 3.2.1 缩放系数表达

CATIA 中缩放系数定义为工件在某方向上变形后尺寸与原尺寸的比值,即:

$$b = L_{after}/L_{before} = L_T/L_{T_0} \quad (3)$$

公式可变形为:

$$L_T = L_{T_0}(1 + \alpha_m(T - T_0)) \quad (4)$$

综合公式(3)(4)得温度与缩放系数的数学关系为:

$$\begin{aligned} b &= \alpha_m \times (T - T_0) \times L_0 \\ &= f(t) \times (T - T_0) \times L_0 \end{aligned} \quad (5)$$

式中,  $b$  为缩放系数,  $T$  为环境温度,  $T_0$  为工件设计温度,  $f(t)$  为热膨胀系数值,是温度  $T$  的函数。

#### 3.2.2 零件重构模块建立

零件重构模块流程如图 3 所示,实现零件重构的关键是:功能接口实现和零件特征遍历。

表 2 列出了重构模块中所有使用过的接口及功能,这些接口的实现保证了零件重构功能的实现。功能接口在定义完成后,必须马上查询是否成功得到该接口。如果成功获取该接口,程序继续向下执行;若获取

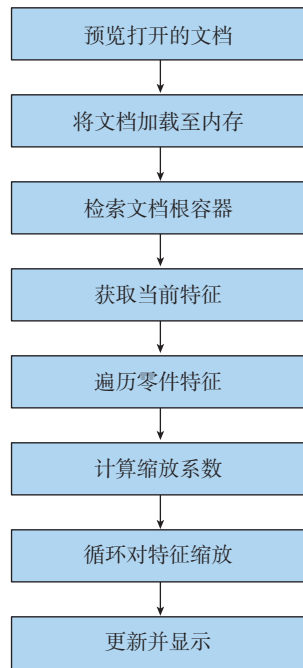


图3 零件重构模块流程图  
Fig.3 Flowchart of dimensional reconstruction module

表2 功能接口表

功能	接口
获取文档指针	CATIIniInteractiveSession
初始化文档数据指针	CATInit
管理组件中特征	CATIDescendants
管理参数与函数关系	CATICkeParmFactory
创建机械设计特征	CATIPrtFactory

接口失败,则输出一个自行定义参数,方便供编程人员查错。以管理参数与函数关系的接口 CATICkeParmFactory 为例,说明实现功能接口的关键代码:

```

CATICkeParmFactory* piFact=NULL;
rc=piContainer->QueryInterface(IID_CATICkeParmFactory,(void**) &piFact);
if (FAILED(rc))
{
    cout << "ERROR in QueryInterface on container for CATICkeParmFactory";
    piContainer->Release();
    piContainer = NULL;
}
else ...
    
```

零件重构是对特征树中所有的几何特征进行重构。对于模型较为简单的零件,手工编写代码也可完成重构;但对于整体结构件,其模型特征非常复杂,某些零件

甚至达到上百个特征,手工编程几乎不可能。为解决此问题,开发了如图4所示的高效遍历算法,提高了编程效率。使用 CATIDescendants 接口获取特征集合,循环对特征赋值,执行缩放操作。关键代码为:

```

CATIDescendants*pPartAsDescendants=0;
rc=spPart->QueryInterface(IID_CATIDescendants,(void-
***)&pPartAsDescendants);
if ( FAILED(rc) )
cout <<" Error in retrieving a QI on CATIDescendants"<<endl;
else
{
CATLISTV(CATISpecObject_var)BodyListDesc;
pPartAsDescendants->GetAllChildren("CATIMechanica-
lTool", BodyListDesc);
for(i=1;i ≤ iSet.size();i++)
{
CATISpecObject_var spElemToTransfor[i] =
BodyListDesc[i];
...}
}
    
```

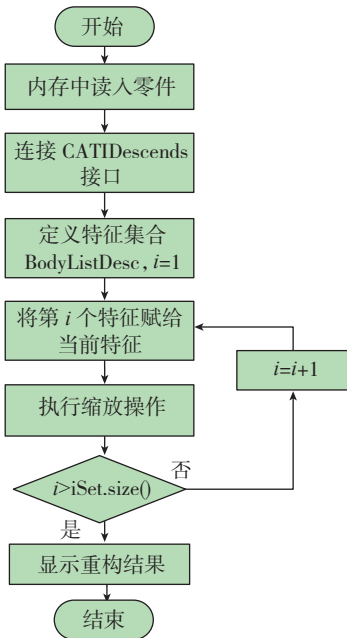


图4 遍历零件特征流程  
Fig.4 Process of traverse part feature

#### 4 应用实例

零件重构模块开发完成后如图5所示,以典型航空整体结构梁为例,演示环境温度为 30.0℃时,2124-T851 铝合金民机梁温度补偿效果。

铝合金民机梁结构如图6所示,工件设计尺寸(20℃

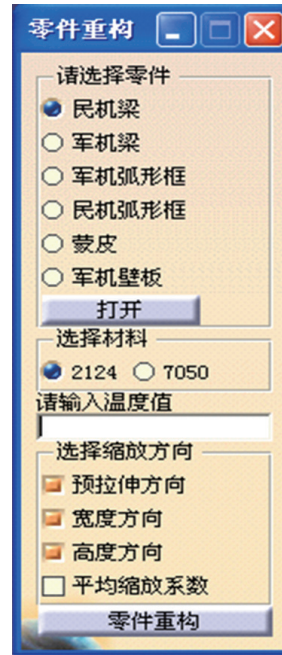


图5 零件重构模块  
Fig.5 Dimensional reconstruction module

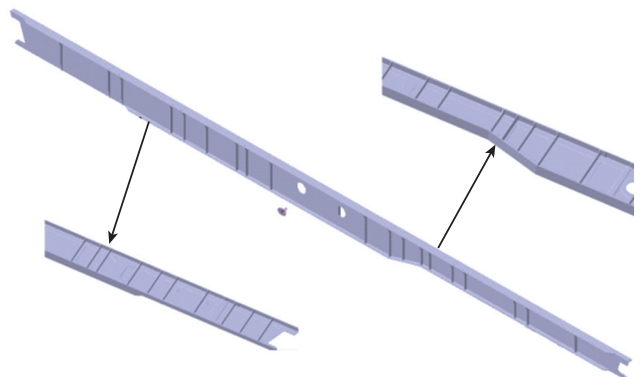


图6 典型航空整体结构梁  
Fig.6 Typical aircraft integrated structure beams

尺寸)为 6216.146 mm × 266.717mm × 63.500mm,长宽比超过了 20 倍。主要结构特点为双面不对称框体结构,一面结构简单框少,一面结构复杂框多,有缘条、筋条、腹板、下陷、腹板孔、外形侧面孔等结构特征。

工件测量室温度恒定在 20℃,但现场加工温度受天气条件影响在 15~30℃范围内变化。在实际生产中,经常会遇到因环境温度变化导致现场加工时零件尺寸合格,但运抵测量室测量时出现变形超差的情况。通过温度变形补偿系统的开发,能够实现对此变形量的预先补偿。

对于该民机梁,如果不进行温度变形补偿,工件从 20℃升高到 30℃后,尺寸变为: 6217.398mm × 266.768mm × 63.512mm。宽度和高度方

(下转第 29 页)

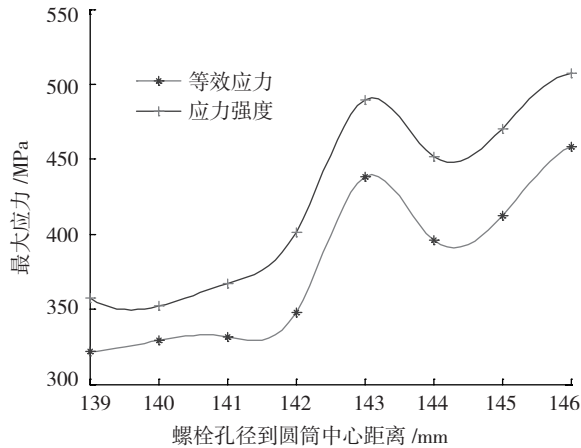


图12 安装边螺栓联接结构最大应力随螺栓位置的变化趋势  
Fig.12 Installation edge bolt coupling structure maximum stress trend along with change of bolt location

## 4 结论

采用有限元方法对受轴向力整体式机匣安装边螺栓联接结构做了改变轴向力、改变安装边几何参数的应力分析计算。

(1) 带预紧力安装边螺栓联接结构只受轴向力作用下,最大等效应力以及最大应力强度出现在安装边螺栓孔附近,并且大于螺栓上受到的最大应力。螺栓上的最大等效应力与最大应力强度出现在螺栓杆受拉一侧。

(2) 预紧力对安装边上的应力和对螺栓上的应力影响截然不同,安装边上无论是最大等效应力还是最大应力强度随着预紧力的增大而增大,而螺栓上则随着预紧力的增大先减小后增大。

(3) 改变安装边几何尺寸(转接圆角、安装边厚度、螺栓孔位置),研究其对螺栓联接结构应力的影响。通过有限元计算,可以得到转接圆角的设计避免了集中应力的出现,可以发现随着转角半径的增大螺栓联接结构的应力逐渐增大;在 3mm~6.5mm 范围内改变安装边厚度,在满足强度要求条件下,随着安装边厚度的增加安装边螺栓联接结构的应力先增加后减小;螺栓孔位置的改变意味着联接螺栓距离圆筒壁的远近,随着螺栓孔远离圆筒壁,螺栓联接结构的应力逐渐增大。

## 参考文献

- [1] 李海. 带纵向安装边机匣的强度研究[D]. 北京:北京航空航天大学, 2004.
- [2] 陈光. 航空燃气涡轮发动机结构设计. 北京:北京航空航天大学出版社, 1994.
- [3] Osman M O M, Mansour W M, Dukkupati R V. On the design of bolted connections with gaskets subjected to fatigue loading, J.Engng Industry, 1977:388-393.
- [4] 霍先华, 杜文军, 龚梦贤. 对开机匣的应力分析. 燃气涡轮

试验与研究, 1994(4):19-22,30.

[5] 董本涵, 高鹏飞, 王振华. 机匣安装边应力分析的混合法. 航空发动机, 1996(2):23-29.

[6] 刘星, 李克安, 唐架时, 等. 重型燃气轮机铸造机匣的强度与刚度分析. 湖南大学力学与航空航天学院. 2011, 53(2):85-88.

[7] 《航空发动机设计手册》总编委会. 《载荷及机匣承力件强度分析》(第17册). 北京:航空工业出版社, 2001.

[8] 王海涛. 带预紧力螺栓连接的机匣刚度分析. 航空发动机, 2010, 36(3):32-35.

(责编 叶枫)

(上接第24页)

向的尺寸误差小于 0.1mm 满足公差范围要求,可以忽略温度变化对宽度和高度方向的尺寸误差;预拉伸方向尺寸误差为 1.252mm 严重超出了误差范围。采用温度补偿之后,对此变形量进行预先补偿,提高了工件的尺寸精度。

## 5 结论

(1) 完成了两种铝合金材料热膨胀系数的精准表达,并建立了热膨胀系数、缩放系数与温度的关系模型。

(2) 采用 CAA 方式对 CATIA 进行二次开发,建立了温度补偿系统,实现了特定温度下工件尺寸重构,为特定环境下数控编程提供精准 CAD 模型。

## 参考文献

- [1] Law K M Y, Geddam A. Prediction of contour accuracy in the end milling of pockets. Journal of Materials Processing Technology, 2001(113):399-405.
- [2] 郑联语, 汪叔淳. 薄壁零件数控加工工艺质量改进方法. 航空学报, 2001, 22(5):424-428.
- [3] 王志刚, 何宁. 薄壁零件加工变形分析及控制方案. 中国机械工程, 2002, 13(2):114-117.
- [4] Lee C M, Kim S W, Lee Y H. The optimal cutter orientation in ball end milling of cantilever shaped thin plate. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 153-154.
- [5] Ratchev S, Liu S, Becker A A. Error Compensation strategy in milling flexible thin-wall parts, Journal of Materials Processing Technology, 2005, 162/163: 673-681.
- [6] 孙杰, 柯映林. 残余应力对航空整体结构件加工变形的影响分析. 机械工程学报, 2005, 41(2):117-122.
- [7] Philippe.Dépincé, Jean-Yves Hascoët. Active intergration of tool deflection effects in end milling. Part 2 Compensation of tool deflection. International Journal of Machine Tools & Manufactu-re, 2005(46):945-956.
- [8] 康永刚, 王仲奇, 吴建军. 基于实际切深的薄壁件加工变形误差的预测. 西北工业大学学报, 2007, 25(2):251-256.
- [9] 陈蔚芳, 楼佩煌, 陈华. 薄壁件加工变形主动补偿方法. 航空学报, 2009, 30(3):570-576.
- [10] 武辉, 刘维伟, 李晓燕, 等. 基于 APDL 的薄壁件加工变形补偿方法. 航空精密制造技术, 2012, 48(4):35-38. (责编 叶枫)