

# 大型复材构件自动检测设备中超长梁的结构设计优化及其变形控制

## Structure Design Optimization and Deformation Control of Overlong Beam in Automation Test Equipment for Large Composite Component

中航工业北京航空制造工程研究所 赵林 李初晔

**[摘要]** CUS-6000 大型超声自动扫描成像检测设备是中航工业北京航空制造工程研究所针对大型复合材料构件的高效自动化检测,研制的 20 通道大型超声自动化检测设备。在设备的研制过程中,采用有限元方法,广泛计算了多种结构方案和工况条件,提取扫描头部位的变形值,通过数值插值的方法得到各种变形参数随扫描头移动的关系曲线,计算结果对横梁反变形设计和程序控制提供理论依据。

**关键词:** 超声扫描成像 复合材料 有限元 数值插值 反变形设计

**[ABSTRACT]** CUS-6000 large-scale ultrasonic scanning imaging detect device is a high-performance 20-channel automatic detection equipment which is developed by BAMTRI for testing large-scale composite structural parts. The device development process is described and the analysis of typical aspects of the long light beam design is given. By using finite element method, extensive calculation of a variety of structural alternatives and working conditions is made. The curve which reflects the relation between deformation parameters and the scanner head moving position is observed by using numerical interpolation method. The calculation result provides theoretical foundation for the anti-deformation beam design, assembly and process control.

**Keywords:** Ultrasonic scanning imaging Composite material Finite element Numerical interpolation Anti-deformation design

现代航空制造装备已成为在航空产品制造中的关键技术,是现代航空先进制造技术的核心与支柱。近年来,新一代飞机技术的开发和换代对制造技术提出了新的挑战。为提高飞机的机动性、灵活性和隐身性能,性能优异的先进复合材料在飞机制造中得到广泛应用,在世界范围内推动了高性能复合材料制造和检测设备的

发展。特别是复材的低成本、高效制造技术正在成为近年发展的重点<sup>[1]</sup>。

检测设备的检测范围是由被检测的复材构件大小决定的,由于近年来复材构件向整体化、大型化发展,因此,复材构件相关设备的尺寸也呈大型化趋势。大型检测设备目前有两种结构方式,一是采用机器人手/臂结构方式,另一种是以龙门式或桥式轻型超长梁为结构特点,多用于小曲率的大型翼面类复材构件检测,如大型飞机的垂尾、平尾等。对于此类设备结构而言,其 Y 向行程一般依据被检测复材构件宽度决定,并呈现愈来愈宽的趋势,因此,复材构件相关设备的大型化带来大型检测设备一系列设计、加工和装配的变化。本文重点对具有较典型意义的轻型超长梁结构设计进行分析研究。

### 1 C 扫描检测设备机械系统设计方案

CUS-6000 大型超声自动扫描成像检测设备是中航工业北京航空制造工程研究所针对大型复合材料结构件研制的 20 通道大型超声高效自动化检测设备,具有型面自适应跟踪、边界扫描、自动成像的能力,该设备的研制成功为我国飞机大型复合材料结构件无损检测效率的大幅提高及检测质量的稳定等方面提供了保证。



图1 CUS-6000大型超声自动扫描成像检测设备  
Fig.1 CUS-6000 large-scale ultrasonic scanning imaging detect device

## 1.1 大型检测设备结构的基本要求和设计原则

### (1) 基本要求。

大型检测设备用于大尺寸复合材料蒙皮类结构件和复合材料胶接结构的超声自动扫描成像检测,具有选择超声1~20通道反射法自动扫描成像检测功能,其基本要求为:a.检测范围大(7500mm×6000mm×600mm);b.工作高效;c.系统刚性较高,反应灵敏、移动灵活;d.采用循环喷水膜接触耦合;e.能够根据被测复材构件型面进行型面自动跟踪扫描功能;f.具有探头防撞功能;g.具有蒙皮快速定位、装夹及蒙皮边界自动检测功能;h.由于扫描头工作为区域检测,因此其定位、重复定位精度要求相对不高。

### (2) 特点和设计原则。

大型检测设备是较为典型的轻负载设备,其设计方案应结构简单和轻量化,以大幅度提高机床的动态性能,减少设备动部件运动惯量对运动精度的负面影响。与大型切削机床相比,虽然在整体结构上有很多相似之处,如普遍采用龙门、门架或桥架式整体结构,工作台动作姿态也有三坐标、五坐标等的划分。但是大型检测设备的轻负载特性决定了有其独特的结构特点:

a. 大型检测设备的大行程工作范围要求移动部件——横梁的长度与截面的比值更大,因而它们普遍具有超长轻型横梁特点。

b. 大型检测设备在工作过程中由于不承受切削力,并要求运动更灵活的特点,因此其机械结构设计在满足整体结构具有较高系统刚性的前提下,应具有较好的动态特性,尽可能进行轻量化以减小运动惯量,解决超长横梁刚性及其结构优化问题<sup>[2]</sup>。借助有限元分析对机床构件进行拓扑优化,使其更轻便、更经济。

c. 大型检测设备应具有足够的静刚度和较高的刚度-重量比。同时,因其为单件生产,故而设计中多选择焊接结构件为主承力件,以降低设备造价。

d. 动部件在较大范围移动,应结合具体工况考虑采用:X轴采用同步双驱动技术;Z和Y采用“重心驱动”、“框中框”结构设计。

## 1.2 大型检测设备超长纵梁的设计方案

### (1) 大型整体零件必然提出对设备大型化的要求。

大型检测设备有两种发展趋势。一种类型是采用悬臂机器人方式。另一类型是采用超长横梁结构的龙门式或桥式,此类设备具有长梁结构特点,长度根据零件尺寸及特点而不同,Y向行程一般在3000mm~6000mm,并呈现愈来愈宽的趋势以满足大型整体结构件的加工需求。

### (2) 轻型超长梁的主要类型。

大型检测设备超长横梁有多种结构形式,常见的主

要有:型钢/矩形管等截面双梁、箱体梁、桁架梁等(见图1~图7)。型钢等截面双梁、桁架梁多用于精度要求相对较低,移动灵活的设备;国外穿透法C扫描检测设备多采用型钢双纵梁或桁架梁结构;箱型梁因其结构刚性好一般用于要求控制精度高、移动速度快的复材设备。



图2 轻型箱型梁(复材铺带机)  
Fig.2 Light-weight box beam  
(composite material tap-laying machine)



图3 矩形管等截面双梁(复材缝纫机)  
Fig.3 Rectangular tube constant dimension double beam  
(composite material sewing machine)



图4 穿透法C扫描三角型钢双纵梁  
Fig.4 Through-transmission C-scan triangular steel double beam

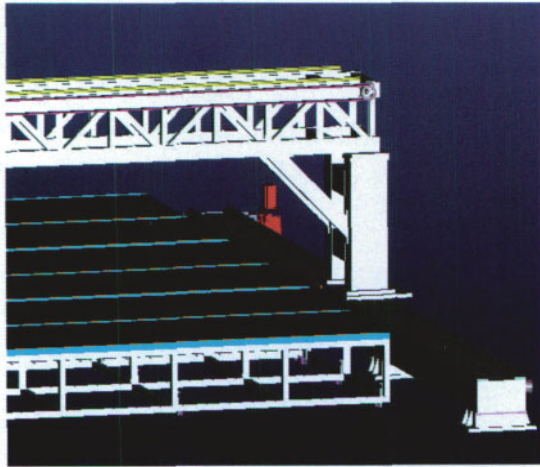


图5 反射法C扫描桁架钢双纵梁  
Fig.5 Reflection C-scan struss steel double beam

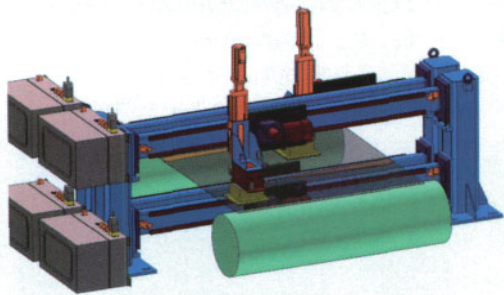


图6 型钢双横梁 (德国的板材在线检测设备)  
Fig.6 Profiled bar double beam  
(Germany plates online ultrasonic testing equipment)

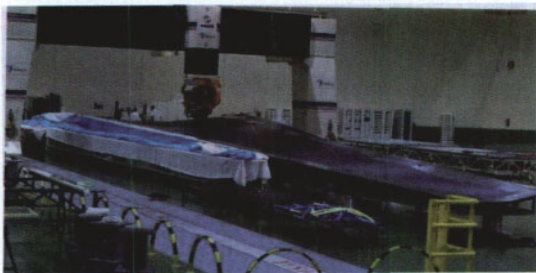


图7 轻型箱型梁 (M-Torres公司铺带机)  
Fig.7 Light-weight box beam (tap-laying machine of M-Torres company)

(3) 总体方案设计要点。

通过对国内已有同类检测设备和其他复材设备进行的调研与比较,以及对国外同类设备进行的资料分析,基于C扫描检测设备轻负载、精度要求相对较低的特点,并综合制造周期、成本等方面因素,CUS-6000大型超声自动扫描成像检测设备采用以下设计方案(参见图8):

a. 设备采用上浮式长梁结构方案。Y向横梁采用

优化的等截面H型钢双纵梁结构形式,即主梁采用两根通长300×200H型钢,每根H型钢两侧对称焊接10mm厚Q235板,形成封闭双梁结构梁(参见图9)。H型材具有翼缘宽与腹板高之比值大,截面分配合理,力学性能好的特点。使用H型钢制作封闭对封闭焊称接结构,具有重量轻、施工快速、抗振性能好和节能降耗等优点。

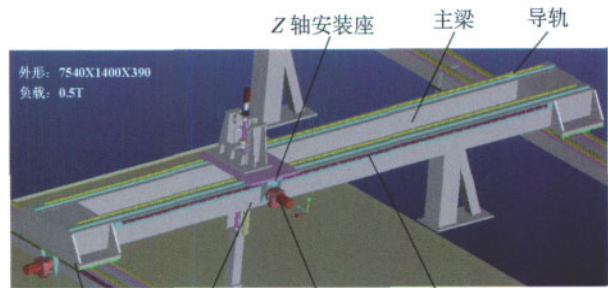


图8 CUS-6000大型超声自动扫描成像检测设备设计方案  
Fig.8 CUS-6000 large-scale ultrasonic scanning imaging detect device design plan

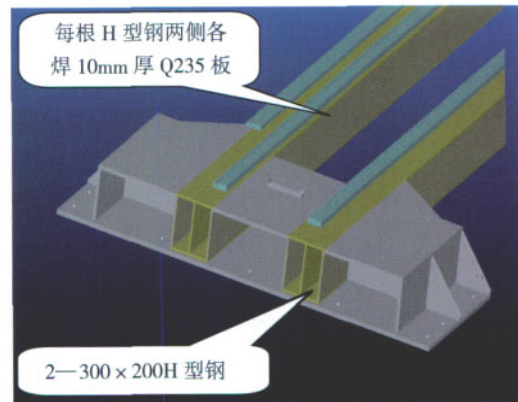


图9 300×200H型钢焊接结构Y梁主梁  
Fig.9 300×200H steel welded structure main beam of Y beam

b. 因超长跨距原因,X梁则采用两边各两根滚动导轨的超静定结构,以提高Y向超长梁的系统刚性;同时,X轴采用独立双伺服电机加双光栅闭环同步驱动,由双电机控制X轴( $X_1, X_2$ )同步精度,以减少 $X_1, X_2$ 同步精度控制对Y梁产生的扭转变形。采取上述优化方案可在保证系统刚性的前提下有效减轻结构重量,提高超长梁的抗弯扭性能。

c. X梁的支撑立柱主体为厚壁矩形管焊接件,为减小X梁跨距增加刚性,单侧立柱数量为5根,采用四拉四顶结构调整高度;X导轨梁亦采用22槽钢对焊为主体的焊接件,安装面加调整垫进一步调整高度。

d. Z向运动部件采用“重心驱动”、“框中框”结构设计。即Z向驱动轴位于箱式Z轴安装座重心的延长

线上。

(4) Y向横梁采用等截面H型钢双梁结构形式的优化。

先后对超长梁多种结构方案,如矩形管等截面梁、桁架梁进行了分析对比。由于支承件的变形主要是弯曲和扭转,并与截面惯性矩密切相关。因此,对矩形管等截面梁、桁架梁进行了有限元分析,结果表明矩形管等截面梁、桁架梁的变形均大于上述所选双H型钢等截面梁。而未选择箱型梁的根本原因则是依据本项目的大型检测设备具备轻负载、运动惯量小的技术特点以及开发周期、成本等综合因素共同决定的。

## 2 C扫描检测设备的有限元计算及优化

采用有限元仿真计算,测量头在横梁全行程内移动,共设计9个位置工况,由于左右对称关系,选取左侧5个位置工况。通过计算掌握测量头Y向运动过程中自重引起的变形,计算结果对横梁反变形设计和程序控制提供理论依据。立柱底面固定,各零件之间采用节点位移耦合技术建立约束关系<sup>[3-4]</sup>。

### 2.1 5种工况条件下的有限元计算

针对前面定义的五种工况,计算整体设备自重下的变形,随着扫描头的Y向运动,横梁弯曲量和扫描头空间位置均发生变化,结构设计过程中要考虑这种变化,根据分析结果采取措施以弥补这种变化对加工精度产生的影响。图10为工况1下设备综合变形。

从设备综合变形图可以看出,工况1下最大变形在横梁(Y梁)的中部,数值为0.377mm。Y梁导轨上的最大变形差为0.35mm。

工况2下机床的最大变形也在横梁的中部,数值为0.407mm,Y梁导轨上的最大变形差为0.38mm。

工况3下机床的最大变形也在横梁的中部,数值为0.431mm,Y梁导轨上的最大变形差为0.40mm。

工况4下机床的最大变形在横梁的中部偏测量头位置,数值为0.448mm,Y梁导轨上的最大变形差为0.42mm。

工况5下机床的最大变形在横梁的中部,数值为0.455mm,Y梁导轨上的最大变形差为0.42mm。

### 2.2 5种工况下计算结果综合

#### ——Y梁全行程移动过程中的变形分析

由于结构左右对称,上面分析的5个工况已经完全覆盖了Y梁全行程移动的范围,通过提取如表1所示的扫描头部位的各方向变形,通过插

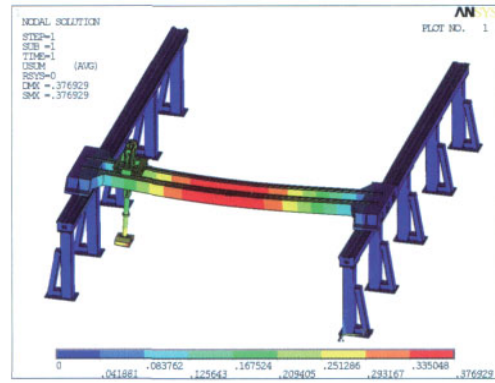


图10 工况1下机床综合变形

Fig.10 Machine comprehensive deformation in work condition 1

值计算得到全行程中的变形曲线,为Y梁的反变形设计和控制程序参数设置提供理论依据<sup>[5]</sup>。

从如图11所示的扫描头的变形曲线得到以下几点结论:

(1)扫描头沿Y梁运动过程中,扫描头X向变形总体波动较小,在-0.015mm~-0.025mm之间变化,而且曲线的凹凸有反复。

(2)扫描头沿Y梁运动过程中,扫描头Y向变形波动剧烈,在-0.24mm~0.0mm之间变化;扫描头沿Y梁运动过程中,扫描头Z向变形波动剧烈,在-0.20mm~-0.45mm之间变化。

(3)扫描头沿Y梁运动过程中,Y梁导轨变形差在0.35mm~0.42mm之间变化,即当扫描头在Y梁的边缘时,导轨弯曲变形为0.35mm,当扫描头处在Y梁中间位置时,导轨弯曲变形0.42mm,随着扫描头的运动,总体来说导轨的变形较为稳定。

## 3 超长双H型钢等截面横梁施工方法

为保证超长轻型梁的装配及使用状态,克服自重所引起的超长轻型梁下挠,克服焊接及加工引起的弯曲及扭曲变形,根据以上超长梁构件的细长特点,以及前文

表1 5种工况条件下扫描头各向变形数据一览表

工况	扫描头 X 向变形	扫描头 Y 向变形	扫描头 Z 向变形	扫描头 综合变形	机床最大 变形	Y 梁导轨 变形差
工况 1	-0.014	-0.237	-0.196	0.310	0.377	0.35
工况 2	-0.017	-0.228	-0.294	0.367	0.407	0.38
工况 3	-0.015	-0.179	-0.372	0.413	0.431	0.40
工况 4	-0.017	-0.092	-0.427	0.445	0.448	0.42
工况 5	-0.025	-0.003	-0.453	0.454	0.455	0.42

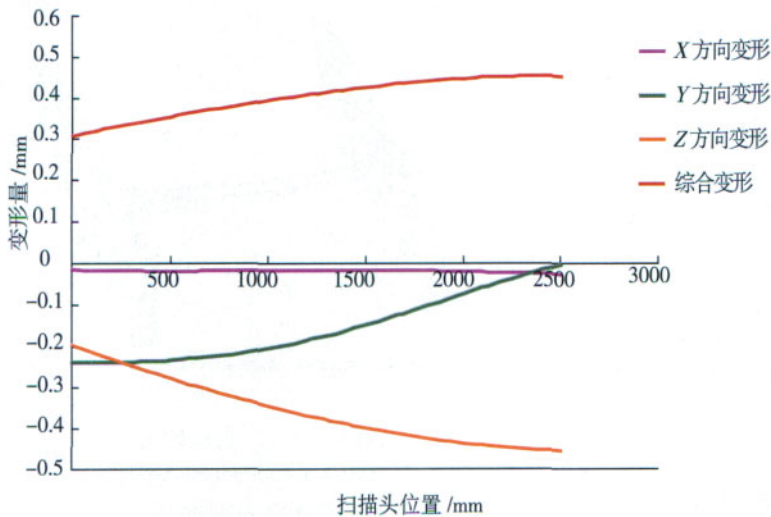


图11 5种工况条件下扫描头变形参数随扫描头位置的变化曲线  
Fig.11 Curves of scanning head deformation with the change of scanning head position in 5 different work conditions

结论,应采取一定工艺措施。控制Y梁焊接及加工过程中的变形,并在装配中控制上拱量。

依据超长轻型梁导轨变形差在0.35mm~0.42mm的变形量,则应在超长轻型梁部件装配后,保证H型钢主梁中心部位控制上拱预变形0.3mm~0.4mm;工艺过程如下:

(1)焊接过程。

a. 编制工艺文件,规定焊接工艺顺序,全部焊缝应采用CO<sub>2</sub>气体保护焊并进行分段及对称焊接,以减少焊接变形。

b. 将能先焊成组合件的零件应先焊在一起,以减少在整体装焊时的工作量和焊接难度,且有利于控制变形及校正。

c. 主梁中的零件应先用间断及对称焊焊接在一起。为此,采用偶数焊工对称分段焊,每名焊工的焊接速度应尽量保持一致,以保证结构能均匀地收缩。将各焊接组件通过夹具定位在超长轻型梁的主体上,再翻身焊接。

d. 采用必要的焊接夹具、长度大于1000mm的焊缝如用手工焊则采用分段退焊法,每段长度大约为400~450mm。

e. 超长梁的焊后热时效应采取相应工艺措施进行变形控制,如热时效中控制其放置位置应垫平,以及时效温度、时间与速度的控制。

f. 检查变形量,必要时进行热校形。

(2)精加工及装配过程。

a. 应编制工艺文件,规定加工工艺顺序适当分开粗精加工序;

b. 精加工应注意控制切削用量,并适时释放压板等。刮削导轨安装面、齿条、光栅等安装面,最终保证其上拱量0.3~0.4mm要求。

经采取上述措施,经检测超长轻型梁部件装配后的实际上拱量是0.2mm。

4 结论

(1)根据有限元分析结果采取相应工艺措施后,大型超声自动扫描成像检测设备的静态检验精度达到:Y向托板运动对水平面的直线度为0.095mm/全长,完全满足了设备的设计指标要求。目前该设备已投入生产。

(2)设计人员在设计过程中应充分使用现代力学分析工具,用于指导主要结构件的设计及优化,用于指导实际工程的实施,同时,加工、装配环节也应严格按照相关规范的规定进行施工,确保设备整体刚性和稳定性要求。

(3)随着数控系统及平台的普及化,具有轻负载的数控系统及平台日益广泛地应用于各类特种工艺装备,设计人员在如大型检测设备等,此类设备结构设计工作中,应特别要重视支撑系统构件的设置和节点构造,保证设备结构及其运动的稳定性,提高结构的整体刚度,防止各构件产生振动、变形,确保设备结构形成独立的空间稳定体系。实践证明,如果没有设备的整体刚性,就没有设备的精度,就没有设备运行的稳定性。

(4)验收结论:设备各项性能指标进行了动态、静态测试,指标合格;设备完成了应用验证;一致认为研制的20通道大型超声自动扫描成像检测设备填补了国内空白,达到了国外先进水平。

参考文献

[1] 张根保,王时龙,徐宗俊.先进制造技术.重庆:重庆大学出版社.1996.  
[2] 王爱玲,白恩远.现代数控机床.北京:国防工业出版社.2003.  
[3] 林有希,高诚辉.大型机床动态特性的整机有限元分析.福州大学学报(自然科学版),2003,31(1):69-72.  
[4] 覃文洁,左正兴.机床整机动态特性分析.机械设计.2000(10),24-26.  
[5] 龙靖宇,吴小珍.基于ANSYS的偏轨箱形主梁参数化建模.武汉科技大学学报,2003,26(1):58-59.

(责编 泰山)