

帽形梁先进拉挤热压装置研究*

Research on Hot Pressing Equipment of Advanced Pultrusion Manufactured Hat Stiffener

南京航空航天大学 窦冲 齐俊伟 肖军 肖健 程琨

[摘要] 以加筋壁板应用为背景,研究帽形梁先进拉挤热压装置。提出热压模具长度设计方法,选定了热压模具加压工作方式;以制品成型后各截面厚度一致为原则,给定截面尺寸进行受力分析与有限元验证;优化模具加压点间距,完成加压机构设计;选定预浸料体系,计算所需加热功率,设计加热方案;最后,完成了热压装置研制和帽形梁拉挤试验。

关键词: 先进拉挤成型 有限元 热压装置

[ABSTRACT] With the wider application of the stiffener structure, the hot pressing equipment of advanced pultrusion manufactured hat stiffeners is studied. The length design of the mold is promoted, and the pressing method is chosen. The force analysis of given sectional size and the finite element analysis are performed. The spacing distances between the pressure points are optimized, and the design of pressing equipment are completed. The prepreg material system is determined, the heating power is calculated, and the heating scheme is designed. Finally, the research of the equipment is accomplished and the advanced pultrusion process of hat stiffeners is tested.

Keywords: Advanced pultrusion Finite element Hot pressing equipment

碳纤维/环氧树脂复合材料相比于铝合金可减重 25%,但可能增加 50%~100% 的成本^[1-2]。如何在减轻结构重量的同时有效控制成本成为复合材料应用的关键。复合材料成本主要包括 3 部分:原材料、制造、质量控制与性能检测,分别约为 20%、70%、10%,降低制造成本是控制复合材料成本的关键因素^[3],主要方法包括:(1)设计制造一体化^[1];(2)制造过程自动化,相关自动化成型技术有自动铺丝技术(AFP)、自动铺带技术(ATL)、先进拉挤技术(ADP)等。

加筋壁板可以获得非常好的总体和局部刚度,是飞行器轻质结构的主要形式,如复合材料整体机翼等^[4-5]。加强筋的成型制造成本大于蒙皮,实现其自动化对降低

成本意义重大,发达国家已经采用先进拉挤成型(ADP)和自动加强筋成型(ASF M)等,国内南京航空航天大学齐俊伟等研制出了 C 形梁的 ADP 原理样机^[6],在此基础上进一步研究其他型材的自动化成型很有意义。本文以应用广泛的帽形型材为对象,研制 ADP 热压装置,为工艺研究奠定基础。

1 热压装置压力方案设计

温度、压力、时间是热压工艺的重要参数^[7],制品从热压模具牵引出模时必须达到一定的固化度,ADP 通常为 60%~80%^[8];成型压力取决于所采用预浸料的种类以及制品的结构形状尺寸,热压主模具长度的选择以及制品截面尺寸的设计是关键。

1.1 热压模具长度设计

ADP 热压模具长度直接影响拉挤速度:模具越长,拉挤速度越快,生产效率越高;但加压时模具产生的挠度越大,制品受力相对不均,脱模力也越大。因此应根据所选的预浸料体系,以及制品产量、生产效率、制品性能等方面的要求来综合考虑。

以热压出模的帽形梁各部分平均固化度达到 80%、生产效率不低于 0.5m/h 为目标设计。在图 1 中截取了预浸料坯件的一段进行分析,令 AB 段坯件的长度等于热压模具长度 CD,设为 $l_{\text{模具}}$,坯件在热压模具内总的停留时间即固化时间为 $t_{\text{固化}}$,则将 AB 段坯件完全牵引出模达到所需固化度的时间为 $2t_{\text{固化}}$,令总时间为 $t_{\text{总}}$,最终固化制品的总长度为 $l_{\text{固化}}$,则:

$$\frac{2t_{\text{固化}}}{l_{\text{模具}}} = \frac{t_{\text{总}}}{l_{\text{固化}}},$$

$$l_{\text{模具}} = \frac{2t_{\text{固化}}l_{\text{固化}}}{t_{\text{总}}}. \quad (1)$$

根据前期 ADP 制得 C 形梁的工艺试验^[2],采用树脂体系为双酚-A 环氧树脂的 USN12500 单向碳纤维预浸料和 W3021 碳纤维织物预浸料,固化 25min 时,制品平均固化度可达到 80% 的要求;仍旧选用此种预浸料体系,则式(1)中, $t_{\text{固化}}=25\text{min}$,取生产效率为 0.6m/h, $t_{\text{总}}=1\text{h}$,则 $l_{\text{固化}}=0.6\text{m}$,代入相关数据可得:

* 国家商用飞机制造工程技术研究中心创新基金(SAMC12-JS-15-022)资助。

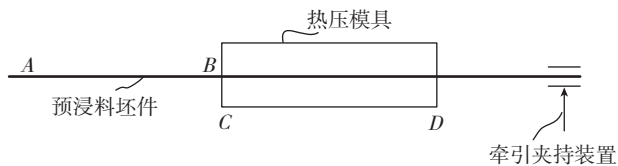


图1 热压简图
Fig.1 Diagram of hot pressing method

$$l_{\text{模具}} = 0.5\text{m} \quad (2)$$

因此,在选定预浸料体系、满足生产效率、制件达到所需固化度的前提下,经综合考虑选用热压模具的长度为0.5m。

1.2 热压模具工作方式分析

从模具分模面的选择、制件各表面厚度一致性的原则出发来选取加压时模具的工作方式。

(1)整体单方向加压式,如图2(a)所示。这种模具没有分模面,可最大限度避免树脂及纤维的挤出,但是模具下压时难以保证制件各表面厚度的一致性,帽顶、帽缘的厚度要薄于帽腰的厚度。

(2)三瓣三方向加压式,如图2(b)所示。这种模具可实现制件各表面厚度的一致性,但是存在2个分模面,在分模面处很容易产生树脂及纤维的挤出,产生缺陷,影响制件的性能;采用此种方式机构会比较复杂,控制难度高。

(3)两瓣两方向加压式,如图2(c)所示,采用这种工作方式,可使制件成型后各个表面厚度一致,分模面只有一个,在制件的上表面,可一定程度避免树脂及纤维的挤出现象,减少缺陷,保证制件性能,并且机构简单紧凑,容易控制。

经过对比分析,热压模具加压工作方式采用如图2(c)所示的两瓣两方向加压。

1.3 施压机构设计

1.3.1 机构构型设计

热压模具的加压工作方式为两瓣两方向,如图2(c)所示。每侧模具采用两个对称加压点,主动力部分采用一个竖直向下安装的气缸,气缸与平板相连,由平板带动连杆机构实现加压加热的功能。平面机构简图如图3所示。杆件1与杆件2固支连接,作为整体提供竖直

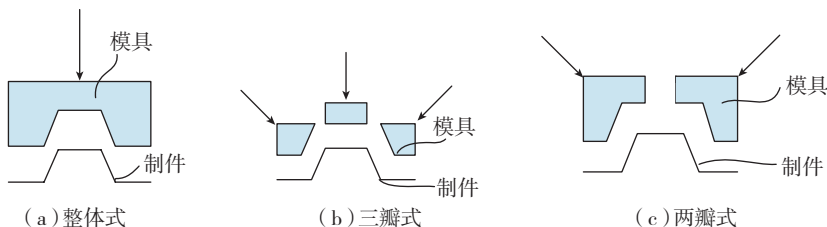
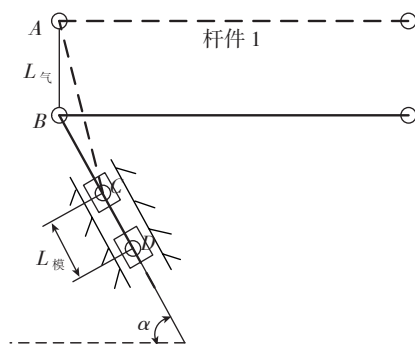
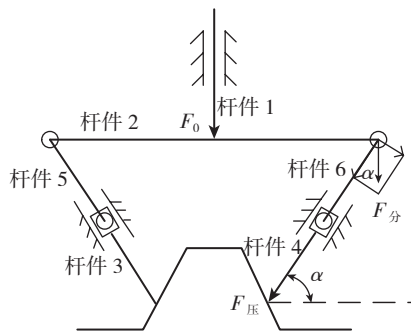


图2 帽形梁热压模具形式
Fig.2 Hot pressing mold of hat stiffeners

向下的力 F_0 ;杆件5、杆件6与杆件2、两个滑块分别转动连接;杆件3、杆件4一端与两滑块固支连接,另一端与模具连接,由杆件5、杆件6带动沿导轨滑动,提供成型压力 $F_{\text{压}}$ 。采用这种加压形式,可以通过较简单的设计实现所需的加压加热功能;结构紧凑,施压稳定;两侧模具易于实现动作的同步性,空间开放性好,清模容易;机构控制简便、精确。



(a) 机构位移关系



(b) 机构受力分析

图3 平面机构简图

Fig.3 Diagram of equipment

图3(a)中,虚线为机构起始状态,实线为模具下压达到平衡时的状态。设杆件1下压的距离即气缸行程为 $L_{\text{气}}$,杆件AC长度为 b ,BC长度为 a ,导轨与水平方向即施力方向为 α , $\angle ABC = (90^\circ + \alpha)$,滑块滑动的距离即点C与点D之间的距离为 $L_{\text{模}}$ 。

在 $\triangle ABC$ 中,根据几何关系可得:

$$b^2 = L_{\text{气}}^2 + a^2 - 2L_{\text{气}}a \cos \angle ABC, \quad (3)$$

$$L_{\text{模}} = b - a, \quad (4)$$

$$\angle ABC = 90^\circ + \alpha \quad (5)$$

由式(3)~(5)可得:

$$L_{\text{模}} = b - \sqrt{b^2 - (L_{\text{气}} \cos \alpha)^2} + L_{\text{气}} \sin \alpha. \quad (6)$$

由式(6)可知,气缸行程 $L_{\text{气}}$ 与滑块沿导轨滑动距离 $L_{\text{模}}$ 之间的关系与杆件AC的长度 b 和加载方向有关。

图3(b)为机构加压达到平衡时的状态,结构对称,取一侧分析。杆件4与杆件6在同一直线上,与水平方向夹角为 α ,帽形梁成型所需压力为 $F_{压}$,通过受力分析可推导出原动件推力 F_0 与成型压力 $F_{压}$ 之间的关系,从而推算出气缸所需出力的大小。

$$F_{压} = F_{原} \sin \alpha, \quad (7)$$

$$F_{分} = 0.5 F_0. \quad (8)$$

由式(7)~(8)可得: $F_0 = 2F_{压} / \sin \alpha$,加压机构对称,气缸所需出力大小为:

$$F_{气} = 2F_0 = 4F_{压} / \sin \alpha. \quad (9)$$

1.3.2 施力载荷大小及方向计算

不同结构、尺寸的制品,对热压装置提出的要求也不一样,因此,机构设计之前需要初步选定制件截面尺寸。本文帽形梁选定的成型压力为1MPa。取帽形梁的一半分析,模具截面如图4所示,A、B、C 3部分分别为帽形梁、电热板、加压模具。

帽形梁各表面成型所需压力为:

$$F_{成型} = pS_1, \quad (10)$$

$$F_1 = 1 \times 5590 = 5590 \text{ N},$$

$$F_2 = 1 \times 16165 = 16165 \text{ N},$$

$$F_3 = 1 \times 10500 = 10500 \text{ N},$$

式中, $F_{成型}$ 为制品成型所需压力,单位N; F_1 为帽顶成型所需压力,单位N; F_2 为帽腰成型所需压力,单位N; F_3 为帽缘成型所需压力,单位为N; p 为成型压力,单位MPa; S_1 为制品受压面积,单位 mm^2 。

将制件成型所受压力等效为集中载荷,分别为图4中的 F_1 、 F_2 、 F_3 ,作用于每条边的中点,垂直向下。取 F_1 、 F_3 两个力为研究对象,将其等效为合力 F_4 。令 F_1 与 F_4 作用线的水平距离为 x_1 , F_3 与 F_4 作用线的水平距离为 x_3 ,制件为平衡状态时,可列得平衡方程为:

$$F_1 x_1 - F_3 x_3 = 0, \quad (11)$$

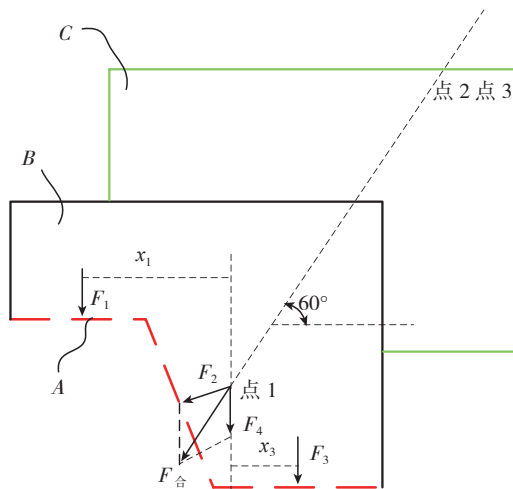


图4 模具截面图

Fig.4 Sectional diagram of mold

$$x_1 + x_3 = 32.33 \text{ mm}. \quad (12)$$

由式(11)、(12)可得: $x_1 = 21.10 \text{ mm}$, $x_3 = 11.23 \text{ mm}$ 。由此可确定 F_4 的作用线及大小。设 F_2 与 F_4 作用线交点为点1,两个力的合力即帽形梁成型所需压力 $F_{合} = 27932 \text{ N}$,与水平方向夹角为 60° ,作用线与模具相交于点2,此交点即为模具加压点的横向位置。

结合式(6)、式(9),取 $b = 100 \text{ mm}$, $L_{模} = 13 \text{ mm}$, $F_{压} = 0.5 F_{合} = 13966 \text{ N}$, $\alpha = 60^\circ$,代入相关数据可得:气缸所需出力大小为 65360 N ,约等于7t,气缸行程为15mm。

1.3.3 分析验证

以上文分析得到的数据为依据,运用ABAQUS对加压部分进行模拟仿真,来验证此种加压方式、受力分析及加压点选取的正确性。

取对称的两个加压点1、2,假定间距为120mm,横向位置由上文得到,1、2两点施加的集中载荷为 $F_1 = F_2 = 0.5 F_{合} = 13966 \text{ N}$,模型由下至上依次为帽形梁、电热板、加压模具;材料属性分别为固化后的树脂、铝、45#钢;帽形制件下表面定义了一个刚性面,作为加压时的刚性支撑;定义边界条件及各个面的接触关系并进行网格划分。

分析结束后,取帽形制件为研究对象,帽顶和帽缘在默认坐标系中Z方向的压应力分布。在帽腰部分建立局部坐标系,得到帽腰在局部坐标系Z方向的压应力分布。在帽顶、帽腰、帽缘3个表面分别提取多个节点压应力值,进行平均值计算,分别为 -1.07 MPa 、 -0.97 MPa 、 -0.96 MPa ,误差在允许的范围内,因此上文的受力分析及加压点、加压方式的选择是正确的。

1.3.4 加载点优化

为保证机构加压时的稳定性,每侧模具采用对称的两个加压点,加压方向、加压点横向位置已由上文确定。选取不同的加压点间距,加热板产生的变形量不同。在上文的有限元分析结果中,取电热板拐角处沿纵向的边为研究对象,建立节点集合,选取加压点间距为290mm、300mm、...、460mm,提取节点位移值,绘制挠度曲线。曲线对称,有两个极小值和一个极大值,取一个极小值和一个极大值进行分析,设为 ω_{min} 、 ω_{max} ,令两者绝对值的和为 $\omega_{合} = -\omega_{min} + \omega_{max}$,绘制 $\omega_{合}$ 的曲线。

加压点间距由290mm增加至320mm时, $\omega_{合}$ 逐渐减小;由320mm增加至460mm时 $\omega_{合}$ 逐渐增大;因此当加压点间距为320mm时, $\omega_{合} = 0.00449 \text{ mm}$ 为最小值,电热板变形量最小,可最大限度保证制件受力均匀。因此,优化选择两个对称加压点间距为320mm。

2 热压装置加热方案设计

2.1 加热功率选取

传统的拉挤成型工艺中根据材料的不同状态:粘流

态、凝胶态、固态,把模具也相应的分为3个区域,预热区、凝胶区和固化区^[7]。先进拉挤固化工艺曲线有3个温度平台,分别对应先进拉挤的预加热温度、热压温度、后固化温度。

本文热压装置的加热部分以前期工艺试验为基础^[9],固化制度为:预加热阶段80℃,保温15min、热压阶段130℃,保温加压25min,采用电加热的方式,将加热板分为两个温区。

电热板功率应满足:

$$Pt_1 = Q_{吸} + Q_{散失}, \quad (13)$$

式中, P 为两块电热板的总功率, t_1 为电热板加热到热压温度所需时间(取 $t_1=1\text{min}$), $Q_{吸}$ 为预浸料坯件从室温升到热压温度所吸收的热量, $Q_{散失}$ 为电热板加热过程中散失的热量。

选取铺层为13层,5层W3021编织物预浸料、8层USN12500单向碳纤维预浸料。取牵引装置牵引距离为0.5m,模具长度为500mm,根据上文确定的制品截面尺寸可知,热压装置里单片预浸料面积为 0.065m^2 。根据预浸料的面密度计算可得,编织物预浸料总质量为114g,单向预浸料总质量为104g。预浸料坯件从室温25℃升高到热压温度130℃所吸收的热量,可由公式(14)求出:

$$Q_{吸} = Cm(T - T_0), \quad (14)$$

式中, C 为碳纤维/环氧预浸料的比热容($C=1.1\text{J/g}\cdot\text{C}$); m 为预浸料坯件的质量,单位g; T 为热压温度,单位K; T_0 为室温,单位K。

先进拉挤属于间歇式工作,热压装置开模时,预浸料坯件散失的热量 $Q_{散失}$ 主要是自然对流传热和辐射传热两种方式,即:

$$Q_{散失} = Q_{对} + Q_{辐}, \quad (15)$$

其中,各部分热量散失分别按以下两式计算:

$$Q_{对} = hS_2(T - T_0)t_{开}, \quad (16)$$

$$Q_{辐} = \varepsilon S_2\sigma(T^4 - T_0^4)t_{开}, \quad (17)$$

式中, h 为自然对流传热的表面传热系数($h=5\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$); S_2 为热压装置里预浸料坯件的表面积,单位 m^2 ; $t_{开}$ 为开模持续时间($t_{开}=5\text{s}$); ε 为预浸料坯件的辐射率($\varepsilon=0.8$); σ 为斯忒藩-波尔兹曼常量($\sigma=5.67\times 10^{-8}\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K}^4)$)。

结合式(13)~(17)可得:

$$P = \frac{[Cm(T - T_0) + \varepsilon S_2\sigma(T^4 - T_0^4)t_{开} + hS_2(T - T_0)t_{开}]}{t_1}. \quad (18)$$

代入相关数据可得电热板总功率不低于1500W,即每块电热板功率不低于750W。

2.2 试验验证

设计铺层为13层,铺层顺序为 $[(0,90)/0_2/(0,90)/0_2/(0,90)]_s$,5层W3021编织物预浸料、8层USN12500单向碳纤维预浸料,按图5所示工艺曲线进行帽形梁的试制,验证机构的可行性。图6为拉挤出帽形梁的一部分,直线度较好,制品表面光滑,截面尺寸满足要求,因此本设计是可行的。

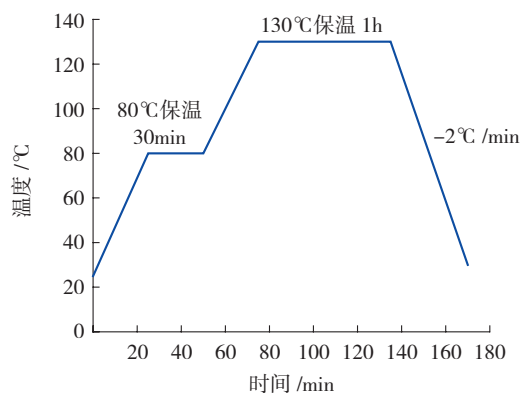


图5 帽形梁热压工艺曲线

Fig.5 Hot pressing processing curve of hat stiffeners

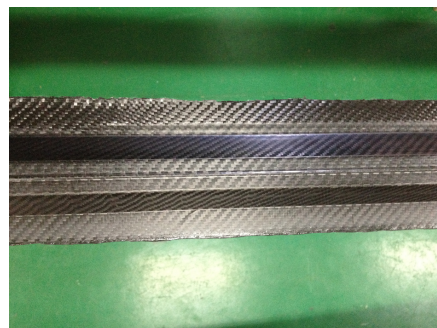


图6 帽形梁样品

Fig.6 Samples of hat stiffeners

3 结论

基于先进拉挤成型工艺,以帽形型材为研究对象,从3个最重要的工艺参数压力、温度、时间出发,完成了ADP帽形梁热压装置及帽形梁的试制。

根据制品固化度及生产效率的要求,通过比例关系确定热压模具长度;以加压结构简单紧凑、空间开放性好,控制简便为原则,确定模具加压工作方式,并完成机构构型设计;对帽形梁进行受力分析,并运用有限元软件ABAQUS进行验证,优化加载点;参考传统拉挤工艺及先进拉挤固化工艺曲线,确定了固化制度;设计铺层及压力,加热温度,试制帽形梁,验证了机构的可行性。为深入研究ADP工艺奠定了基础。

(下转第82页)

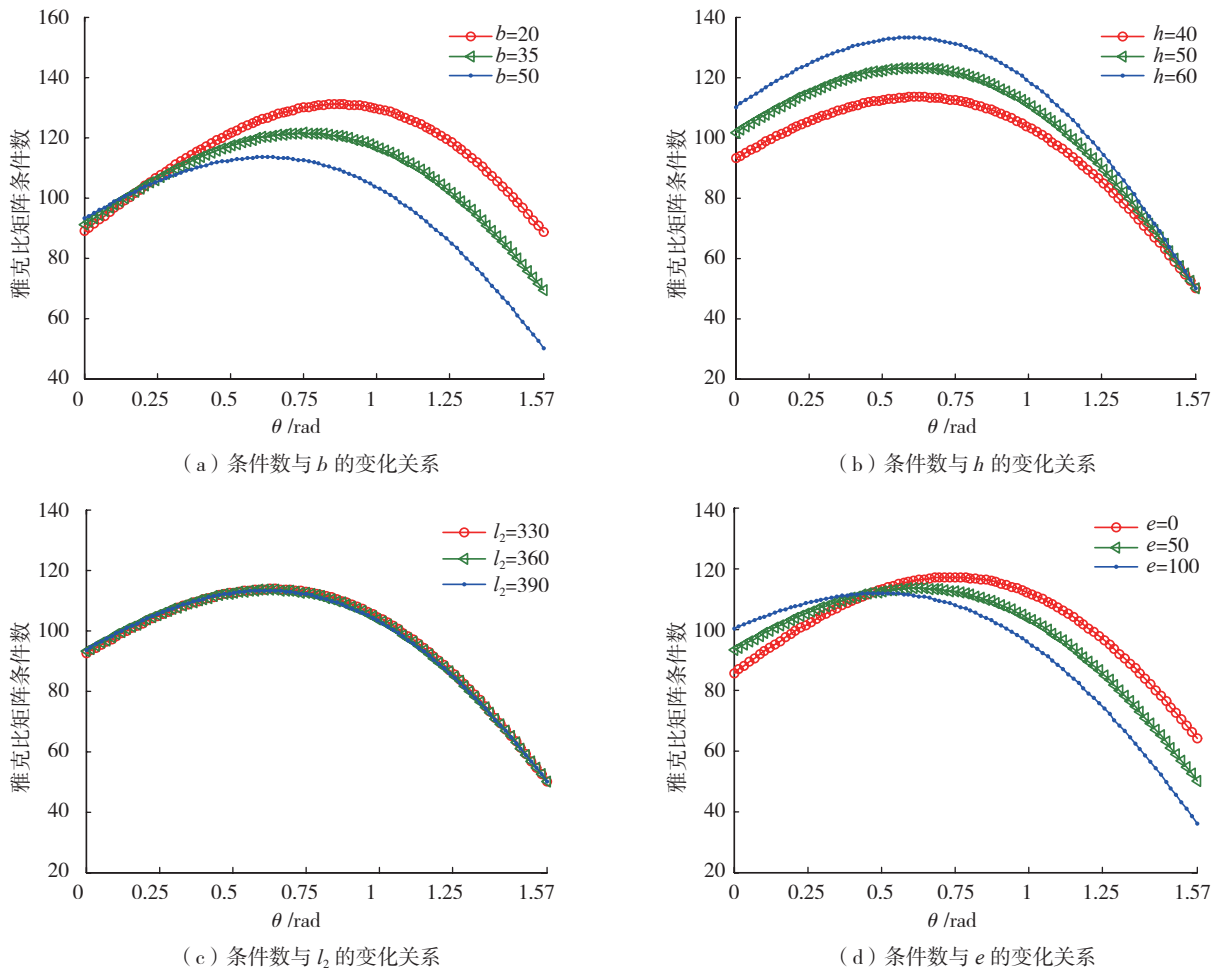


图7 雅克比矩阵条件数与优化变量间的变化关系

Fig.7 Changes in relationship between jacobian matrix condition number and optimization variables

内,优化后的机床主轴操作性较好,且无运动干涉和奇异发生。

参考文献

[1] 张曙, Heisel U. 并联运动机床. 北京: 机械工业出版社, 2003.
 [2] 汪劲松, 李铁民, 段广洪. 并联机构型装备的研究进展及若干关键技术. 中国工程科学, 2002, 4(6): 63-70.
 [3] 李冰, 李剑锋, 费仁元. 基于遗传算法的并联微动机器人的机构优化设计. 中国机械工程, 2007, 18(5): 554-559.
 [4] 安改娣, 李强, 梁丽君. 并联机构智能优化设计方法研究. 内蒙古工业大学学报, 2005, 24(2): 148-153.
 [5] 陈静, 刘强. 基于遗传算法的新型 2-DOF 并联机构优化设计. 机械设计, 2008, 25(2): 21-23.
 [6] 成大先. 机械设计手册 - 机构. 北京: 化学工业出版社, 2004.
 [7] 白志富, 韩先国, 陈五一. 基于冗余驱动的大姿态角并联机构优化设计. 北京航空航天大学学报, 2006, 32(7): 856-859.

(责编 深蓝)

(上接第 77 页)

参考文献

[1] 古托夫斯基 T G. 先进复合材料制造技术. 北京: 化学工业出版社, 2004.
 [2] 邓磊明. 先进拉挤 II 型梁工艺参数控制与性能研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
 [3] 《中国航空材料手册》编辑委员会. 中国航空材料手册·第 6 卷: 复合材料 / 胶黏剂. 北京: 中国标准出版社, 2002: 5-8.
 [4] 杨乃宾, 梁伟. 大型民机机体结构用复合材料分析. 航空制造技术, 2009(5): 68-70.
 [5] Dale B. Advanced pultrusion takes off in commercial aircraft structures. 2003.
 [6] 齐俊伟, 李勇, 肖军. 先进拉挤成形技术及其在大飞机复合材料结构中的应用. 航空制造技术, 2011(15): 58-60.
 [7] 赵渠森, 谢富源, 黎观生, 等. 先进复合材料手册. 北京: 机械工业出版社, 2003.
 [8] Makoto O, Shuntaro K. Method and apparatus for molding thermosetting composite material. US: 20050140045, 2005-06-30.
 [9] 宋伟, 齐俊伟, 肖军, 等. 碳纤维 / 环氧预浸料的热固化工艺研究. 玻璃钢 / 复合材料, 2011(1): 48-51.

(责编 深蓝)