

文章编号: 1673-3851 (2012) 01-0012-06

基于有限元的电脑双针筒袜机成圈机件弹性动力学分析

居婷婷, 方 园, 赵树超

(浙江理工大学材料与纺织学院, 杭州 310018)

摘 要: 针对国产电脑双针筒袜机机械设计缺乏对关键机构的理论研究, 着重对该机成圈机件进行弹性动力学研究。分析成圈机件间接触碰撞时的受力情况, 结合有限元分析软件对成圈机构进行运动仿真, 并通过实验分析方法验证其仿真结果的正确性, 较好地解决了双针筒袜机成圈机件的弹性动力学问题。

关键词: 双针筒袜机; 成圈机件; 弹性动力学; 有限元分析

中图分类号: TS183. 6 **文献标识码:** A

0 引 言

电脑双针筒袜机是生产高档运动棉袜产品的针织设备, 具有较高的技术水平, 自动化程度高。目前, 国内尚缺乏对电脑双针筒袜机的研究, 生产厂家主要是通过样机的简单模仿, 自主研发能力不强, 而且仿制机器也达不到国外的性能和精度, 机械设计技术方法与手段单一^[1]。本文通过对其机成圈编织工艺的深入研究, 运用弹性动力学分析成圈机构的碰撞受力情况; 对成圈编织过程进行有限元分析, 根

据虚拟样机的运动仿真结果, 优化成圈机件的机械结构设计, 以期提高电脑双针筒袜机的编织性能。

1 成圈过程与关键工艺点的分析

成圈系统是电脑双针筒袜机的主要编织机构, 通过电子选针, 对双头舌针和导针片进行选择和控制, 在选针片的作用下织针上升到不同的编织高度, 与各个三角密切配合进行编织。电脑双针筒袜机成圈过程为: 起针—退圈—垫纱—套圈—弯纱—脱圈—成圈^[2], 其织针的走针轨迹见图 1。

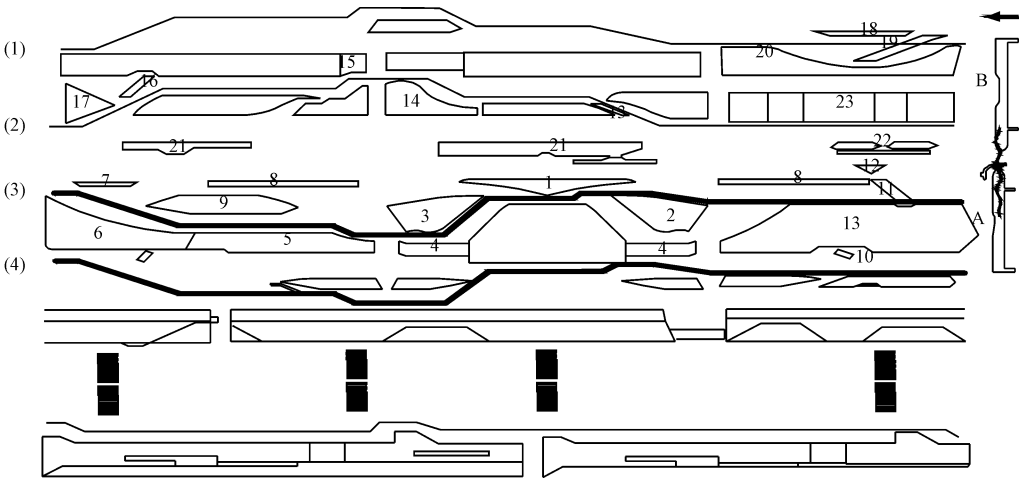


图 1 成圈编织导针片走针轨迹

注: 细实线(1)、(2)为上针筒导针片走针轨迹, 粗实线(3)、(4)为下针筒导针片走针轨迹。

收稿日期: 2011-04-29

作者简介: 居婷婷(1987—), 女, 江苏南通人, 硕士研究生。主要从事针织机械的研究。

通讯作者: 方 园, 电子邮箱: fuyan @126. com

袜子的编织成形主要取决于织针与三角的运动配合,图 2 是电脑双针筒袜机所用的织针和三角工

艺点示意图,筒口线为上下针筒之间的中间线,也为沉降片的握持线,即图中 K-K 线。

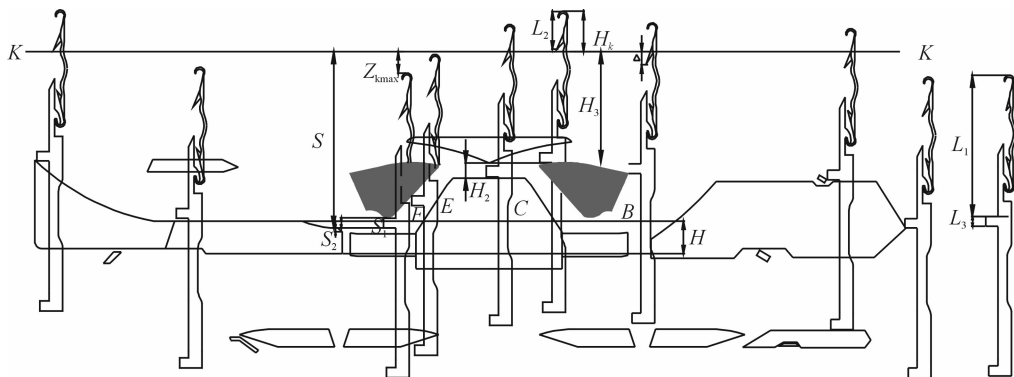


图 2 电脑双针筒袜机关键工艺点

以筒口线为基准,根据织针的主要尺寸和电脑双针筒袜机的主要工艺要求,可以计算得到主要工艺点参数,见表 1。

表 1 电脑袜机主要工艺点参数

工艺点	导针片针踵与筒口线距离/mm	织针上升高度/mm
起针工艺点	48.5	0
集圈工艺点	36.5	12
退圈工艺点	30	18.5

2 成圈机件的弹性动力学分析

2.1 导针片针踵与三角冲击受力分析

编织过程中,三角与导针片工作踵在接触瞬间,会发生较大的冲击。导针片工作踵首先与三角发生碰撞,此后导针片向上运动又与双头舌针再次发生碰撞,成圈机件在碰撞后逐渐恢复平稳运动状态。根据三角与导针片的冲击运动性质,可以把导针片看成是一个单自由度系统^[3],以弯纱三角与导针片的冲击为例,把导针片看作是质量 m 的一个整体,其冲击力学模型如图 3 所示。

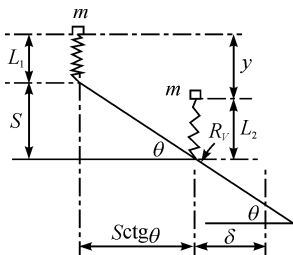


图 3 三角与导针片的冲击力学模型

导针片针踵与三角的冲击是一个弹性碰撞的过程^[4],由胡克定律可以得到三角与导针片工作踵垂直方向上的瞬时冲击力为:

$$R_V = k \tan \theta (v - y \cot \theta) \quad (1)$$

分析图 3 可知,导针片在垂直方向上的受力平衡方程为:

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} + c \frac{dy}{dt} + f - R_V = 0 \quad (2)$$

将(1)式代入(2)式整理得:

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + \frac{c}{m} \frac{dy}{dt} + \frac{k}{m} y + \frac{f}{m} = \frac{k}{m} v t \tan \theta \quad (3)$$

令 $2n = \frac{c}{m}$, $\omega^2 = \frac{k}{m}$, 取边界条件 $t = t_1$, $f = kv(\tan \theta)t_1$ (t_1 为导针片针踵与三角碰撞的起始时刻), 则:

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + 2n \frac{dy}{dt} + \omega^2 y = \omega^2 v t \tan \theta (t - t_1) \quad (4)$$

利用拉普拉斯变换求解方程得:

$$y = v \tan \theta (t - t_1) - \frac{2n v \tan \theta}{\omega^2} + \frac{v \tan \theta}{\sqrt{\omega^2 - n^2}} \exp[-n(t - t_1)] \cos[(t - t_1) \sqrt{\omega^2 - n^2} + \chi] \quad (5)$$

其中 $\chi = \tan^{-1} \left(\frac{\omega^2 - 2n^2}{2n \sqrt{\omega^2 - n^2}} \right)$

将式(5)代入式(1)得到三角对导针片垂直方向上的冲击力为:

$$R_V = f + 2mnv \tan \theta + \frac{vk \tan \theta}{\sqrt{\omega^2 - n^2}} \exp[-n(t - t_1)] \cos[(t - t_1) \sqrt{\omega^2 - n^2} + \chi] \quad (6)$$

式(1~6)中, f 为针槽对导针片的摩擦力; k 为导针片的弹性系数; c 为导针片的粘滞系数; θ 为导针片针踵沿三角运动的角度; v 为导针片针踵运动的速度; t 为导针片针踵沿三角运动的时间; y 为导针片针踵垂直方向上的运动位移。

R_V 是三角对导针片垂直方向上的冲击力,从式(6)可以看出 R_V 随时间的变化关系, R_V 值越大,则织针受到三角的冲击力越大,运动越不稳定,织针的使用寿命也越短。

2.2 导针片与双头舌针的弹性动力学分析

舌针的运动特性是成圈运动分析的关键,电脑双针筒袜机的导针片与双头舌针接触碰撞是一种单边约束,两者的外形边界不能相互浸入。双头舌针是承受高速轴向碰撞的弹性体,在碰撞发生的早期阶段局部屈曲变形发生在碰撞端附近,也就是针钩附近,随后由于应力波的传递效应,在动力屈曲发生的临界时刻 $t = t_{cr}$,无限小的屈曲变形发生会传递到应力波覆盖的部分针杆^[5]。当双头舌针结构设计不合理或者选用的材料刚度不够的情况下,会在应力波的作用下出现针头断裂的现象。

本文将导针片和双头舌针的机构运动看作是弹性体运动和瞬时线性机构变化的叠加。假定受撞击的弹性双头舌针等效为双自由度弹性振动系统^[6],其力学模型如图4所示。设 $y(t)$ 处为导针片带动双头舌针的运动函数, $x_1(t)$ 为质量 m_1 的运动函数, $x_2(t)$ 为质量 m_2 的运动函数。

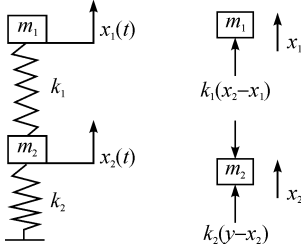


图4 织针的弹性力学模型

双头舌针和导针片是安装在针筒针槽中,针槽与导针片之间有一定的阻尼效果。根据达伦倍尔原理,可以得出 m_1 、 m_2 的动平衡方程:

$$\begin{cases} m_1 x_1'' = k_1(x_2 - x_1) \\ m_2 x_2'' = k_2(y - x_2) - k_1(x_2 - x_1) \end{cases} \quad (7)$$

设导针片带动双头舌针的输入运动为简谐运动,则:

$$y(t) = \frac{h}{2}(1 - \cos pt) \quad (8)$$

式中, $h/2$ 是导针片工作踵使双头舌针上升的高度, p 是运动的特征频率。工作踵的运动如图5,设工作踵从位置1至2转过的角度相当时间 t_0 , $pt_0 = \frac{\pi}{2}$, $p = \frac{\pi}{2t_0}$,则有:

$$y''(t) = \frac{hp^2}{2} \cos pt \quad (9)$$

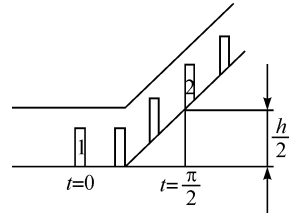


图5 导针片工作踵在针槽内的运动

此微分方程可用拉氏变换法来求解^[7],若 $L\{x_i(t)\} = X_i(s)$, $i = 1, 2$ 。取初始条件, $t = 0$ 时各项的一阶导数为0, $L\{(1 - \cos pt)\} = L(1) - L(\cos pt) = \frac{1}{s} - \frac{s}{s^2 + p^2} = \frac{p^2}{s(s^2 + p^2)}$ 。可解得:

$$L(x) = \frac{hp^2}{2} \cdot \frac{k_1 k_2}{m_1 m_2} \left[\left(\frac{A}{p^2} + \frac{B}{\omega_1^2} + \frac{C}{\omega_2^2} \right) - \frac{A}{p^2} \cos pt - \frac{B}{\omega_1^2} \cos \omega_1 t - \frac{C}{\omega_2^2} \cos \omega_2 t \right] \quad (10)$$

$$\text{其中} \begin{cases} A = \frac{1}{(p^2 - \omega_1^2)(p^2 - \omega_2^2)} \\ B = \frac{1}{(\omega_1^2 - \omega_2^2)(\omega_1^2 - p^2)} \\ C = \frac{1}{(\omega_1^2 - p^2)(\omega_2^2 - \omega_1^2)} \end{cases}$$

最后对 x 求其二次导数可得:

$$\frac{x''}{hp^2/2} = \frac{k_1 k_2}{m_1 m_2} (A \cos pt + B \cos \omega_1 t + C \cos \omega_2 t) \quad (11)$$

使 $\xi = \left[\frac{x''}{hp^2/2} \right]_{\max} = \frac{k_1 k_2}{m_1 m_2} (A + B + C)$, ξ 可以

表示质点 m_1 的最大加速度与最大输入速度的比例,而在质点 m_1 及 m_2 处自然频率的平方值 ω_1^2 、 ω_2^2 是方程(11)中 s^2 的两个解。

$$s^4 + s^2 \left(\frac{k_1 + k_2}{m_2} + \frac{k_1}{m_1} \right) + \frac{k_1 k_2}{m_1 m_2} = 0 \quad (12)$$

式(12)中: m_i 是舌针在 i 段的质量, k_i 是舌针在 i 段的弹性系数。在双针筒袜机的设计中, ξ 值可以衡量双头舌针与导针片进行弹性碰撞过程中的冲击阈值,其值越小则双头舌针在被撞击后的恢复率越高,稳定性也越高。

在编织过程中,导针片与起针三角、固定中三角碰撞的瞬间冲击速度较大,其弹性振动效应也最为明显,在最高机速的编织条件下,这两个碰撞时刻引起速度、加速度值变化也是最大的。已知右菱角、中三角和左菱角三角角度分别为 30° 、 53° 、 51° ,经计算可知,双头舌针经右菱角、中三角和左菱角运动时瞬时速度理论值分别为 0.76 、 -1.73 、 -1.61 m/s。图6为双头舌针在右菱角中的瞬间加速度变化曲线。

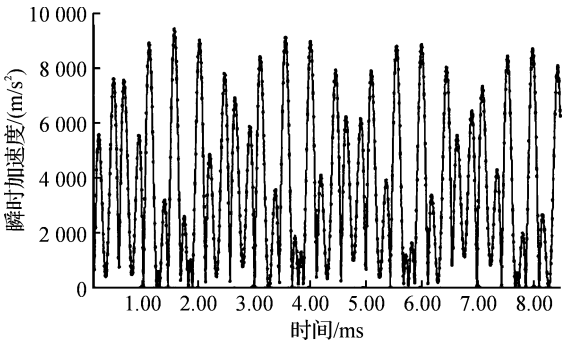


图 6 右菱角中舌针运动瞬间加速度

双头舌针被导针片碰撞带动后,加速度的最大值发生在碰撞的最初时刻,然后随着时间的变化,由于双头舌针的弹性体特征,加速度值明显减小。因此,双头舌针的弹性振动最剧烈阶段为碰撞刚开始时,并且随着速度的增加,双头舌针弹性振动更为显著。在碰撞瞬间加速度达到最大值时,根据瞬时速度 V_y 的理论值计算可以得到双头舌针在右菱角、中三角和左菱角中的三个碰撞瞬间的 ξ 值:

$$\xi_1 = 12.5, \xi_2 = 13.97, \xi_3 = 14.45。$$

ξ 作为衡量舌针的耐冲击程度的指标,其值越小越耐冲击,它可以定性地表示舌针的稳定性, ξ 随着 V_y 理论值的增加而逐渐增大,即舌针随着速度的提高,稳定性有一定程度的下降。

3 导针片与三角的有限元建模分析

应用有限元分析,可以对电脑双针筒袜机的成圈机构进行运动仿真,得到导针片、双头舌针在成圈编织过程中的速度、加速度与位移曲线,并通过仿真结果来优化设计各关键工艺点参数^[8]。成圈机构的实际模型由 Pro/E 里设计建模,使用中性文件 X_T 格式导入 ANSYS/LS-DYNA 分析模块^[9-10],图 7 是双针筒袜机舌针与三角成圈运动过程的有限元模拟。

利用求解器计算成圈编织运动过程的运动参数曲线,结果如图 8 所示。

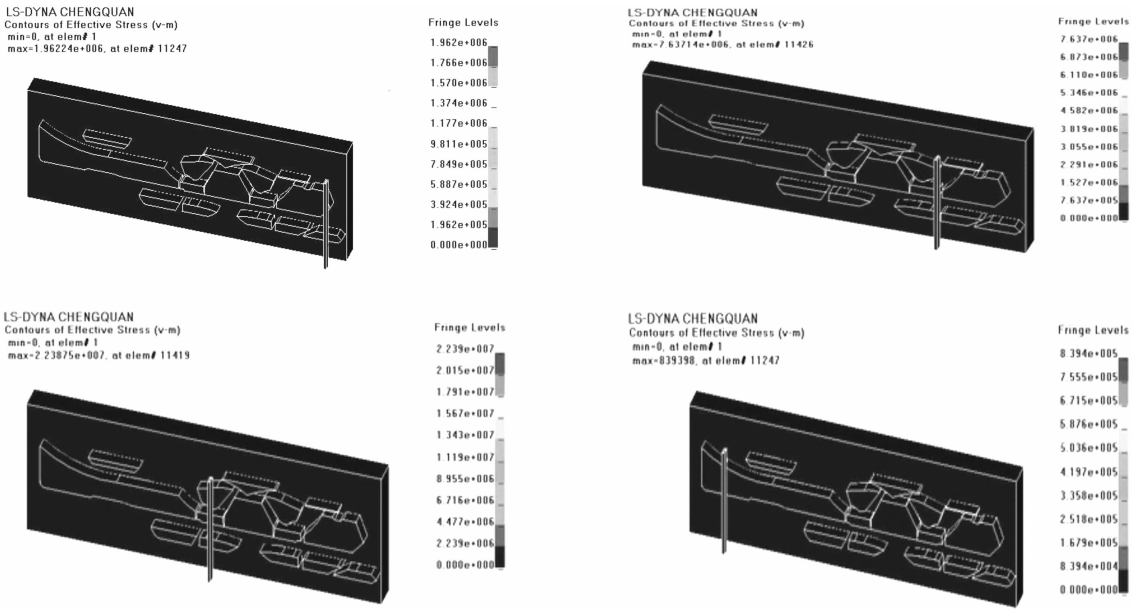


图 7 成圈运动过程的有限元模拟

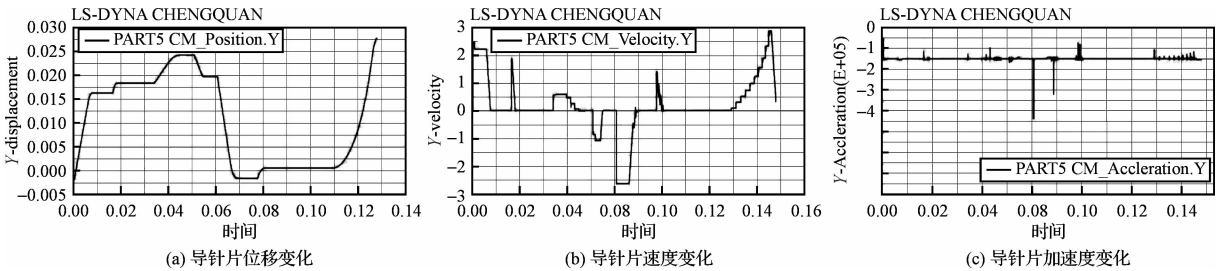


图 8 成圈编织过程结果分析

由图 8 可以看出,导针片工作踵与起针三角、固定中三角、成圈三角接触的瞬间都存在着一一定的冲

击,从而引起速度上的变动。当导针片工作踵稳定地沿三角轨道运行后,导针片的弹性体特征使其速

度的波动保持在很小范围,并非如同刚体没有速度变化。弹性导针片工作踵贴着直线三角运动,加速度变化并不完全等于零,而是以零为中心在一个很小的范围内波动,这种波动是由于三角不断作用于导针片工作踵,三角、导针片、舌针及针槽之间各个力不断协调平衡的一种结果。

有限元分析中织针的初速度设定为机速最大时的速度 1.3 m/s,各三角角度已知的情况下通过式 $V_y = V_x \tan\theta$ 可得织针在各三角部段的最大垂直速度。表 2 是成圈编织过程有限元速度分析结果与理论分析结果的比较。

表 2 织针运动速度对比

	右菱角	中三角	成圈三角
三角角度/(°)	30	53	51
V_y 理论值/(m/s)	0.76	-1.73	-1.61
V_y 实验值/(m/s)	0.778	-1.772	-1.638

4 实验过程与结果分析

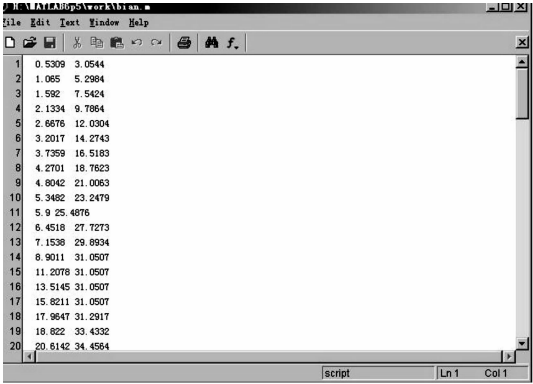
运用有限元分析软件对电脑双针筒袜机成圈机构进行动态仿真,模拟成圈编织过程中导针片和舌针的运动情况,可以得出相关工艺的最优值。就以上理论分析结果的正确性,可以通过实验来加以验证。实验仪器为日本 PHOTRON 公司的 SUPER 100K 高速摄影机,利用高速摄影机结合专业图象处理软件可以准确记录导针片和舌针的位移、速度、加速度等运动参数。实验所拍摄的是在正常机速下无纱线喂入时织针的运动情况,经图象处理后获得相应的导针片和舌针各种运动参数。

根据电脑双针筒袜机编织平纹组织的正常机速 250 r/min,水平速度 $v=1.3$ m/s,针筒筒径 10.16 cm(4 in),针筒针 168 枚,可以算出针距为 $\frac{4 \times 10.16 \times 10}{168} \approx 2.4$ mm,计算得此机速下每枚舌针

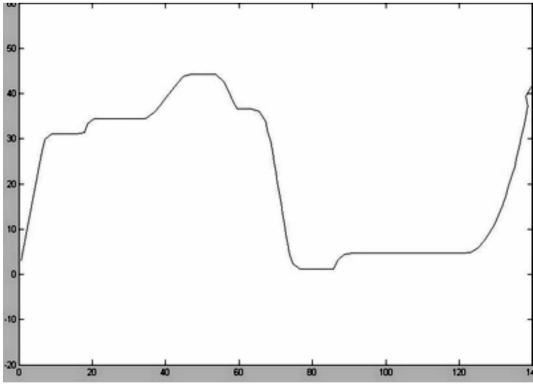
的运动时间为 $\frac{2.4}{1300} \approx \frac{1}{640}$ s。因为弹性体碰撞时间通常为毫秒级,为了达到更好的实验效果,拍摄频率设定为 2 000 帧/s。

经高速摄影系统拍摄舌针的运动状态后,将测试数据导入 MATLAB 形成处理拟合的 M 文件,形成 M 文件后通过 IMPORT DATA 将数据中 X,Y 定义为数组,然后再通过定义命令将数组定义为二维矩阵来进行拟合处理,结果如图 9 所示。

实验得出了导针片位移的实验数据,结合织针位移曲线图(图 8(a)),可以看出位移数据与仿真运动所获得的位移数据基本相符,实验结果与有限元



(a) 位移测试数据



(b) 拟合位移曲线

图 9 位移拟合图

运动仿真的结果误差在 5% 左右,最大速度 $V_y = 1.772$ m/s 发生在中三角工作面上,最大加速度为 6.5×10^7 m/s²,发生在编织开始后 0.15 s 处。

5 结 论

a)研究了导针片针踵与三角碰撞时冲击力大小随时间变化的关系,得到了双头舌针与导针片弹性碰撞过程的冲击阈值 ξ ;

b)通过计算得到双头舌针在右菱角、中三角和左菱角中的三个碰撞瞬间的 ξ 值,可以准确判断舌针运动的稳定性;

c)运用有限元分析软件求解了机成圈机构模型在编织运动过程中的运动参数,得到双头舌针经右菱角、中三角和成圈三角的 V_y 值分别为 0.778、-1.772 m/s 和 -1.638 m/s;

d)通过实验得到织针的最大速度 $V_y = 1.772$ m/s 发生在中三角工作面上,最大加速度为 6.5×10^7 m/s²,发生在编织开始后 0.15 s 处,这与有限元分析的结果相一致。

参考文献:

[1] Millington J. Seamless wear and other challenges to flat

- knitting [J]. Knitting Technology, 2001(6): 14-16.
- [2] 龙海如. 针织学[M]. 上海: 中国纺织出版社, 2008: 131-133.
- [3] 刘正芹. 横机退圈过程的力学分析[J]. 青岛大学学报, 2001, 16(2): 29-31.
- [4] 安雪斌, 潘尚封. 多体系统动力学仿真中的接触碰撞模型分析[J]. 中国科技论文在线, 2008(10): 98-101.
- [5] 兰 鹏, 陆念力, 丁庆勇. 精确运动弹性动力学分析方法的显式表达[J]. 南京理工大学学报, 2005(4): 153-157.
- [6] 杨善同, 瞿履修. 舌针与三角[M]. 北京: 纺织工业出版社, 1987: 49-54.
- [7] Dorogoy A, Riitel D. Numerical validation of the shear compression specimen, part2: dynamic large strain testing[J]. Experimental Mechanics, 2005, 45(4): 178-185.
- [8] 余淑华, 陈新连. 基于 ANSYS/LS-DYNA 的非线性碰撞问题仿真分析[J]. 装备制造技术, 2009(8): 39-41.
- [9] 吴祚宝, 肖田元. 虚拟制造环境下有限元分析的应用[J]. 清华大学学报, 2000, 40(7): 66-69.
- [10] 祝凌云, 李 斌. Pro/Engineer 运动仿真和有限元分析[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2004: 80-89.

Elastic Dynamics Analysis of Computer Double Cylinder Hosiery Machine's Knitting System Based on ANSYS/LS-DYNA

JU Ting-ting, FANG Yuan, ZHAO Shu-chao

(School of Textiles and Materials, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: The level of design for domestic computer double cylinder hosiery machine is imperfect and there is lack of the theory research for the key institutions, the paper uses elastic dynamics to research for the knitting system of computer double cylinder hosiery machine. It analyzes the situation of the knitting system at the time when it comes into contact or impact. The software ANSYS/LS-DYNA dynamics analysis module is used to perform dynamic simulation of the knitting system. With the experimental analysis, it verifies the results are correct and resolves the design problems of the knitting system.

Key words: computer double cylinder hosiery machine; knitting system; elastic dynamics; ANSYS/LS-DYNA

(责任编辑: 张祖尧)