

基于梯度优化算法的面巾纸包装机抓纸系统弹簧设计

孙银方, 周长江, 张红涛

(湖南大学 国家高效磨削工程技术研究中心, 长沙 410082)

摘要: **目的** 解决弹簧力矩偏小导致抓纸困难的问题。**方法** 在满足使用要求的前提下, 基于梯度优化算法以弹簧质量最小为优化目标, 对面巾纸包装机抓纸系统的弹簧丝直径、中径和工作圈数进行改进设计。通过对抓纸系统进行受力分析, 得到活动板重力矩和优化前后的弹簧力矩。**结果** 优化后的弹簧丝直径、中径和工作圈数分别增加了 13.78%, 23.37% 和 25.28%; 优化后的弹簧力矩显著增加, 在活动板向上旋转 10° 后, 弹簧力矩开始大于活动板重力矩。**结论** 优化后的弹簧满足使用要求, 能够保证抓纸动作较为准确地完成。

关键词: 面巾纸包装机; 抓纸系统; 弹簧; 梯度优化算法

中图分类号: TB486.403 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2014)21-0045-04

Design of the Spring in the Paper-clamping System of the Towel Packaging Machine Based on Gradient Optimization Algorithm

SUN Yin-fang, ZHOU Chang-jiang, ZHANG Hong-tao

(National Engineering Research Centre for High Efficiency Grinding, Hunan University, Changsha 410082, China)

ABSTRACT: **Objective** To solve the paper clamping difficulty caused by the low spring torque. **Methods** In the premise of meeting the using requirements, the parameters of spring in the paper-clamping system of the towel packaging machine, including spring wire diameter, middle diameter and the number of spring effective coils, were optimized by gradient optimal algorithm. Through stress analysis of the paper-clamping system, the gravitational torque of the portable plate and the spring torque before and after optimization were obtained. **Results** After optimization, the spring wire diameter, the middle diameter and the number of spring effective coils were increased by 13.78%, 23.37% and 25.28%, respectively. The optimized spring torque increased significantly. When the portable plate rotated 10 degrees upwards, the optimized spring torque was higher than the gravitational torque of the portable plate. **Conclusion** The optimized helical spring met the requirements of paper clamping and could ensure the accurate completion of paper clamping.

KEY WORDS: towel packaging machine; paper-clamping system; spring; gradient optimization algorithm

弹簧作为基础部件, 在机械装备中应用广泛, 特别是对包装机械的工作性能影响较大。很多学者对弹簧优化设计方法做了大量的研究工作。任尊松等^[1-2]对弹簧载荷动态特性进行了研究; Chen G^[3]等利用弹簧的

基本参数对弹簧误差和刚度系数进行了鲁棒优化; Pan D F 等^[4-7]采用多目标优化算法对弹簧进行了优化; Mehdi B 等^[8-15]采用不同的方法对弹簧进行了结构设计; 李泳鲜等^[16-17]对弹簧进行了稳健设计; 罗凤利^[18]

收稿日期: 2014-07-28

基金项目: 国家自然科学基金(51275160)

作者简介: 孙银方(1988—), 男, 河南周口人, 湖南大学国家高效磨削工程技术研究中心硕士生, 主攻机械动力学。

通讯作者: 周长江(1975—), 男, 湖南溆浦人, 博士, 湖南大学副教授, 主要研究方向为传动摩擦学和机械动力学。

等基于模糊熵理论对弹簧进行了可靠性设计。

目前,面巾纸包装机抓纸系统弹簧存在张力不足,难以克服活动板重力矩、在推杆脱离后活动板下落无法完成抓纸过程等问题。为解决面巾纸包装机抓纸困难问题,在满足抓纸系统工作性能的条件下,基于梯度优化算法对圆柱螺旋弹簧参数进行优化。得到活动板重力矩和优化前后的弹簧力矩,并进行了对比研究。

1 抓纸系统受力分析

面巾纸包装机抓纸系统见图1。其工作原理为:面巾纸传送到活动板上,在顶杆的作用力下活动板向上旋转,到达某一角度后推杆下移,活动板在弹簧拉力的作用下继续向上旋转,直到活动板和固定板夹紧面巾纸,完成抓纸动作。根据抓纸系统的工作原理,得到其机构简图,见图2。其中, O 点为活动板旋转中心, A 点和 O_1 点为弹簧两端挂钩的中心, BC 为活动板长度, D 点为活动板质心。

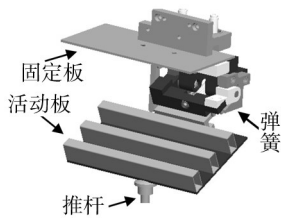


图1 包装机抓纸系统

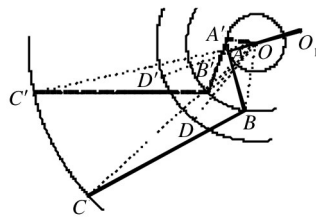


图2 包装机抓纸系统机构简图

Fig.1 Paper-clamping system Fig.2 Diagram of paper-clamping of the towel packaging machine mechanism

活动板的受力主要有重力 G 和弹簧力 F_k , OD 与水平方向的夹角为 41.73° 。在工作范围内,活动板重力矩可表达为:

$$M_G = mgL_{OD} \cos(41.73^\circ - \theta) \quad (1)$$

式中, θ 为活动板自初始位置旋转的角度; M_G 为活动板的重力矩; g 为重力加速度。

OA 与水平方向的夹角为 2.49° ,在活动板运动范围内,弹簧力产生的弹簧力矩为:

$$M_k = kL_{OA} \left(\frac{L_{OA} - L_0}{L_{OA}} \right) L_{OO_1} \sin(2.49^\circ - \theta) \quad (2)$$

式中, L_{OA} 为弹簧伸长后的长度; L_{OO_1} 为弹簧上端点到活动板旋转中心的距离; k 为弹簧的刚度; L_0 为弹

簧的自由长度。

$$L_{OA} = \sqrt{L_{OA}^2 + L_{OO_1}^2 - 2L_{OA}L_{OO_1} \cos(177.51^\circ + \theta)} \quad (3)$$

优化前弹簧力矩较小,推杆脱离后弹簧力不足以拉起活动板向上运动,使得抓纸困难。在满足工作要求的前提下,基于梯度优化算法对抓纸系统弹簧相关参数进行优化设计,以满足实际生产需求。

2 抓纸系统弹簧优化设计

2.1 设计变量与目标函数

圆柱螺旋拉伸弹簧的基本参数主要有弹簧中径 D ,弹簧丝直径 d ,弹簧工作圈数 n ,旋绕比 C ,许用剪应力 $[\tau]$ 等。在此,将 D , d 和 n 作为设计变量,即 $X=[x_1, x_2, x_3]=[d, D, n]$ 。优化前弹簧初始参数 d_0, D_0, n_0 和质量 m_0 见表1。

表1 优化前弹簧初始参数

Tab.1 Spring parameters before optimization

直径 d_0/mm	中径 D_0/mm	工作圈数 n_0	质量 m_0/kg
5	18	10	0.1029

在满足结构性能和工作性能的条件下,以弹簧质量最小作为最优化设计的目标,可得目标函数为:

$$\min F(x) = \frac{1}{4} \pi^2 \rho D d^2 (n + n_0) = \frac{1}{4} \pi^2 \rho x_1^2 x_2^2 (x_3 + n_0) \quad (4)$$

式中, ρ 为弹簧丝密度; n_0 为弹簧支撑圈数。

2.2 约束条件

弹簧材料为65 Mn 油淬火回火碳素弹簧钢,密度 $\rho=7900 \text{ kg/m}^3$,弹性模量 $E=206 \text{ GPa}$,剪切模量 $G=79 \text{ GPa}$,屈服强度 $\sigma_s=1320 \text{ MPa}$,抗拉强度为 $\sigma_b=1569 \text{ MPa}$;弹簧丝直径 $d=2.0\sim 6.0 \text{ mm}$,旋绕比 $C=D/d=4\sim 9$;许用切应力 $\tau_p=(0.32\sim 0.38) \sigma_b=502\sim 596 \text{ MPa}$,取中间值 $\tau_p=550 \text{ MPa}$,试验切应力最大值 $\tau_s=0.44 \sigma_b=690 \text{ MPa}$;弹簧的初始切应力 τ_0 可以用经验公式得出 $\tau_0=G/1000=79 \text{ MPa}$ 。

弹簧的初拉力:

$$F_0 = \frac{\pi d^3}{8D} \tau_0 \quad (5)$$

弹簧的试验载荷:

$$F_s = \frac{\pi d^3}{8D} \tau_s \quad (6)$$

实际工作时弹簧的最大载荷 F_2 定为 600 N, 最小载荷 F_1 定为 450 N。

1) 弹簧的工作载荷约束要求。为保证弹簧特性, 要求工作载荷 F 在试验载荷 F_s 的 20%~80% 之间。则有 $F_1 > 0.2F_s$, $F_2 > 0.8F_s$ 。可建立约束方程:

$$\begin{cases} Y_1 = F_1 - 0.2F_s \geq 0 \\ Y_2 = 0.8F_s - F_2 \geq 0 \end{cases} \quad (7)$$

2) 弹簧中径、弹簧丝直径和工作圈数的约束要求。根据弹簧丝直径范围 $d=2.0\sim6.0$ mm, 旋绕比 $C=D/d=4\sim9$, 工作圈数 n 大于 7, 可得到弹簧丝直径、中径和工作圈数的约束方程:

$$\begin{cases} Y_3 = d - 2 \geq 0 \\ Y_4 = 6 - d \geq 0 \\ Y_5 = D/d - 4 \geq 0 \\ Y_6 = 9 - D/d \geq 0 \\ Y_7 = n - 7 \geq 0 \end{cases} \quad (8)$$

3) 弹簧自由长度约束要求。根据弹簧的自由高度计算公式: $H_0=(n+1)d+2(D-d)$, 可以建立约束方程:

$$Y_8 = H_0 - (n+1)d + 2(D-d) = 0 \quad (9)$$

4) 弹簧刚度约束要求。根据弹簧的刚度公式:

$$k = \frac{Gd^4}{8nD^3}, \text{ 可建立约束方程:}$$

$$Y_9 = k - \frac{Gd^4}{8nD^3} = 0 \quad (10)$$

5) 弹簧的应力约束要求。弹簧的工作切应力计算公式为:

$$\tau = \frac{8KDF}{\pi d^3} \quad (11)$$

$$\tau_{\max} = \frac{8KDF}{\pi d^3} \leq \tau_s = 690 \quad (12)$$

其中, K 为曲度系数, $K \approx \frac{4C-1}{4C-4} + \frac{0.615}{C}$; C 为旋绕比。

可建立约束方程:

$$Y_{10} = \tau_s - \tau_{\max} \geq 0 \quad (13)$$

6) 共振约束要求。承受变载荷的圆柱螺旋弹簧常是在加载频率很高的情况下工作, 为了避免引起弹

簧的谐振而导致弹簧破坏, 需对弹簧进行振动验算, 以保证其临界工作频率(即工作频率的许用值)远低于固有频率。验算公式为:

$$\gamma_n = 3.56 \times 10^5 \times \frac{d}{nD^2} > 10\gamma_r \quad (14)$$

式中, γ_n 为弹簧的自振频率; γ_r 为强迫机械振动频率, 根据实际工作情况可知: $\gamma_r = 0.4$ 。

可建立约束方程:

$$Y_{11} = \gamma_n - 10\gamma_r \geq 0 \quad (15)$$

7) 疲劳强度约束要求。对于循环次数较多、在变应力下工作的重要弹簧, 还应该进一步对弹簧的疲劳强度进行验算。在变应力作用下的圆柱螺旋弹簧, 疲劳强度安全系数计算值 S :

$$S = \frac{\tau_a + 0.75\tau_{\min}}{\tau_{\max}} \geq [S] \quad (16)$$

式中, τ_a 为弹簧材料的脉动循环剪切疲劳极限, 当弹簧材料为碳素钢、不锈钢、铍青铜等材料时, 可根据循环次数 N 由表 2 中查取, 这里取 $\tau_a = 0.35\sigma_b = 549$ MPa; $[S]$ 为弹簧疲劳强度的设计安全系数, 当弹簧的设计计算和材料的力学性能数据精确性较高时, 取 $[S] = 1.3\sim 1.7$, 当精确性较低时, 取 $[S] = 1.8\sim 2.2$, 这里取 $[S] = 1.6$ 。

建立约束方程:

$$Y_{12} = \frac{\tau_a + 0.75\tau_{\min}}{\tau_{\max}} - [S] \geq 0 \quad (17)$$

表 2 弹簧材料的脉动疲劳极限 τ_a

Tab.2 Pulsating fatigue limit of spring material τ_a

循环次数 N	$\leq 10^4$	$\leq 10^5$	$\leq 10^6$	$\leq 10^7$
疲劳极限 τ_a	$0.45 \sigma_b$	$0.35 \sigma_b$	$0.33 \sigma_b$	$0.30 \sigma_b$

8) 静强度约束要求。静应力强度安全系数 S_s 的计算公式及强度条件为:

$$S_s = \frac{\tau_q}{\tau_{\max}} \geq [S_s] \quad (18)$$

式中, τ_q 为弹簧材料的屈服极限, 取 $\tau_q = 0.42\sigma_b = 659$ MPa; $[S_s]$ 为许用安全系数, 其值与 $[S]$ 相同。

建立约束方程:

$$Y_{13} = S_s - [S_s] \geq 0 \quad (19)$$

2.3 优化模型

综上所述得到弹簧优化设计的数学模型为:

$$\begin{cases} \mathbf{X} = [x_1, x_2, x_3]^T \\ \min F(s) \\ \text{满足: } g_i(x) \geq 0 \quad i = 1, 2 \\ \text{满足: } h_i(x) = 0 \quad j = 1, 2, \dots, 11 \end{cases} \quad (20)$$

该优化问题具有非线性、连续等特点, Isight 中梯度优化算法是解决这类问题较为理想的方法。采用梯度优化算法能够利用函数的导数、梯度等数学特征, 实现高效的优化。配置参数: 最大迭代次数为 40, 真实步长为 0.001, 第 1 阶段目标比为 1.0, 收敛迭代数为 3, 组合约束小量为 1.0×10^{-4} , 临界阈值为 1.0×10^{-30} , 临界目标值为 1.0×10^{-30} 。迭代过程结果见图 3。优化后的弹簧丝直径 d 为 5.6889 mm、中径 D 为 22.2062 mm、有效圈数 n 为 12.5283 mm 和质量 m 为 0.2035 mm。

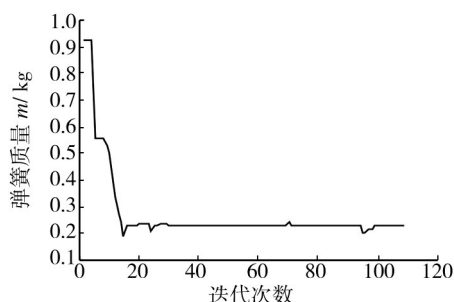


图3 弹簧质量与迭代次数关系

Fig.3 Relationship between spring mass and iterations

由图 3 可知, 弹簧质量在迭代 18 次时收敛于 0.2 kg 左右。此后, 弹簧质量在 0.2 kg 左右波动, 最终得到了最优结果。

3 结果分析

根据式(1)和(2)得到活动板重力矩和优化前后的弹簧力矩变化曲线, 见图 4。由图 4 可知, 在旋转范

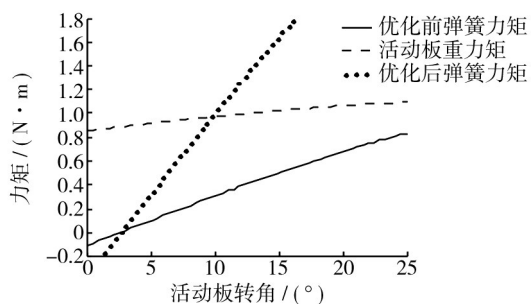


图4 活动板重力矩和优化前后弹簧力矩对比

Fig.4 Gravitational torque of the portable plate and spring torque before and after structure optimization

围内, 优化前的活动板重力矩始终大于弹簧力矩。在推杆脱离后, 弹簧力矩不足以克服活动板重力矩, 使得活动板无法继续向上转动, 不能完成抓纸过程。

弹簧结构优化后, 力矩显著增大。活动板向上旋转 10° 后, 弹簧力矩大于活动板重力矩, 且在活动板旋转 15° 时, 弹簧力矩与优化前相比增加了 226%, 使得顶杆脱离后活动板能继续向上转动, 从而获得较好的抓纸效果。由此可见, 优化后的抓纸系统结构较为合理, 能够确保抓纸过程的顺利进行。

4 结语

1) 建立了面巾包装机抓纸系统中螺旋弹簧的优化设计数学模型。基于梯度优化算法优化得到了结构较为合理的弹簧, 满足了抓纸的要求。

2) 优化后弹簧力矩显著增加, 在活动板向上旋转 10° 后, 弹簧力矩开始大于活动板重力矩, 使得推杆脱离后活动板在弹簧力矩作用下继续向上转动, 保证了抓纸的顺利进行。

参考文献:

- [1] 任尊松, 孙守光, 李强. 高速动车组轴箱弹簧载荷动态特性[J]. 机械工程学报, 2010, 46(10): 109—115.
REN Zun-song, SUN Shou-guang, LI Qiang. Axle Spring Load Test and Dynamic Characteristics Analysis of High Speed EMU [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(10): 109—115.
- [2] 闵建军, 王时龙. 多股螺旋弹簧的动态计算分析[J]. 机械工程学报, 2007, 43(3): 199—203.
MIN Jian-jun, WANG Shi-long. Analysis on Dynamic Calculation of Stranded Wire Helical Spring [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2007, 42(3): 199—203.
- [3] CHEN G, MA Y F. Robust Optimization Design for Spring [C]// Proceedings of the 3rd International Conference on Digital Manufacturing and Automation, Guilin, 2012: 1376—1379.
- [4] PAN D F, WANG M G, ZHU Y N. An Optimization Algorithm for Locomotive Secondary Spring Load Adjustment Based on Artificial Immune [J]. Journal of Central South University, 2013(20): 3497—3503.
- [5] 张静, 刘永均, 李柏林. 圆柱螺旋压缩弹簧的多学科协同优化设计[J]. 机械设计与制造, 2010(3): 46—48.

(下转第 103 页)

- tion of Vehicles on Highways[J]. Applied Mathematical Sciences, 2013, 7(9): 423—434.
- [12] ZHOU M. Research on Adaptive Image Inpainting Approach Based on TV Model[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 416(378): 1262—1266.
- [13] LI S J, YAO Z A. Image Inpainting Algorithm based on Partial Differential Equation Technique[J]. The Imaging Science Journal, 2013, 61(3): 292—300.
- [14] ABDULLAH A H, ENAYATIFAR R, LEE M. A Hybrid Genetic Algorithm and Chaotic Function Model for Image Encryption[J]. AEU: IntJ Electron Commun, 2012, 66 (10): 806—16.
- [15] 王子煜, 孙刘杰, 李孟涛. 强鲁棒性QR码水印技术[J]. 包装工程, 2012, 33(15): 84—87.
- WANG Zi-yi, SUN Liu-jie, LI Meng-tao. QR Code Watermark Technology with Strong Robusness[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(15): 84—87.
-
- (上接第49页)
- ZHANG Jing, LIU Yong-jun, LI Bo-lin. Multidisciplinary Collaborative Optimization Design of Cylinder Helix Compression Spring[J]. Machinery Design and Manufacture, 2010 (3): 46—48.
- [6] 刘仁云, 侯树范, 张义民. 基于多目标优化策略的螺旋弹簧可靠性稳健优化设计[J]. 机械强度, 2012, 34(2): 214—218.
- LIU Ren-yun, HOU Shu-fan, ZHANG Yi-min. Robust Optimization Design for Reliability for Coil Spring Based on Multi-objective Decision Making Methods[J]. Journal of Mechanical Strength, 2012, 34(2): 214—218.
- [7] 贾云海, 张文明. 螺旋弹簧多目标稳健优化设计[J]. 北京科技大学学报, 2009, 31(6): 788—791.
- JIA Yun-hai, ZHANG Wen-ming. Multi-objective Robust Optimal Design for Spiral Springs[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2009, 31(6): 788—791.
- [8] MEHDI B, MAJID B. Optimization of Steel Helical Spring by Composite Spring[J]. International Journal of Multidisciplinary Science and Engineering, 2012, 3(6): 47—51.
- [9] AZZAM B S. An Optimum Design for Composite Helical Springs[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2010, 224 (3): 347—354.
- [10] LIU G, XIE S Q, ZHANG Y. Optimization of Spring-loaded Crutches Via Boundary Value Problem[J]. Neural Systems and Rehabilitation Engineering, 2011, 19(1): 64—70.
- [11] 赵瑞学, 钱林方, 陈龙淼, 等. 某旋转药室火炮卡弹机构弹簧优化设计[J]. 南京理工大学学报: 自然科学版, 2010, 34 (6): 775—779.
- ZHAO Rui-xue, QIAN Lin-fang, CHEN Long-miao, et al. Optimization Design for Cartridge Retaining Mechanism Springs of Gun with Rotating Chamber[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology: Natural Science, 2010, 34(6): 775—779.
- [12] 柳江, 喻凡, 楼乐明. 麦弗逊悬架侧载螺旋弹簧优化设计[J]. 汽车工程, 2006, 28(8): 743—746.
- LIU Jiang, YU Fan, LOU Le-ming. Optimization Design of Side Load Coil Springs for MacPherson Suspension[J]. Automotive Engineering, 2006, 28(8): 743—746.
- [13] 杨峰. 汽车悬架螺旋弹簧的优化设计及CAE研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2009.
- YANG Feng. Optimization Designs and CAE Researches on Helical Spring of Vehicle Suspension System[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2009.
- [14] 张涛. 圆柱螺旋弹簧的参数化设计及分析[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2012.
- ZHANG Tao. Parametric Design and Analysis of Cylindrical Helical Springs[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2012.
- [15] 曹阳, 姜耀华, 王静. 柴油机气门弹簧的优化设计[J]. 煤矿机械, 2008, 29(2): 21—24.
- CAO Yang, JIANG Yao-hua, WANG Jing. Optimization Design of Diesel Engine Valve Spring[J]. Coal Mine Machinery, 2008, 29(2): 21—24.
- [16] 李泳鲜, 孟庆国, 李自贵. 基于三次设计和模糊理论的圆柱螺旋弹簧稳健设计[J]. 机械强度, 2001, 23(2): 198—201.
- LI Yong-xian, MENG Qing-guo, LI Zi-gui. Robust Design Based on Three Stage Design and Fuzzy Theory for Helical Springs[J]. Journal of Mechanical Strength, 2001, 23 (2): 198—201.
- [17] 刘久富, 沈春林, 王宁生. 圆柱螺旋弹簧刚度的稳健性设计[J]. 中国机械工程, 2003, 14(5): 389—391.
- LIU Jiu-fu, SHEN Chun-lin, WANG Ning-sheng. Robust Design for Columned Spiral Spring's Stiffness[J]. Chinese Mechanical Engineering, 2003, 14(5): 389—391.
- [18] 罗凤利, 李光煜, 刘秀莲. 基于模糊熵理论的圆柱螺旋压缩弹簧模糊可靠性设计[J]. 机械设计, 2010, 27(4): 72—74.
- LUO Feng-li, LI Guang-yu, LIU Xiu-lian. Fuzzy Reliability Design of Cylindrical Helical Compression Spring Based on Fuzzy Entropy Theory[J]. Journal of Machine Design, 2010, 27 (4): 72—74.