

压盖机凸轮机构性能分析及改进

Performance analysis and improvement of cam mechanism for the capping machine

杨清艳^{1,2}

张魁榜³

YANG Qing-yan^{1,2} ZHANG Kui-bang³

(1. 安徽建筑大学机械与电气工程学院, 安徽 合肥 230601; 2. 安徽省六安恒源机械有限公司博士后工作站,
安徽 六安 237100; 3. 合肥工业大学机械与汽车工程学院, 安徽 合肥 230009)

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei, Anhui 230601, China; 2. The
Postdoctoral Workstation of Anhui Province Lu'an Hengyuan Machinery Co., Ltd., Lu'an, Anhui 237100, China;
3. School of Mechanical and Automotive Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China)

摘要:对啤酒生产线上压盖机上的凸轮机构进行理论分析, 利用 SolidWorks 和 VB 提取凸轮轮廓线, 并结合 MATLAB 对凸轮和滚子从动件进行动力学分析得到其速度、加速度、压力角等数据。分析得出现用的啤酒生产线上凸轮不合理的地方, 为了改善其性能采用了三次样条曲线改善凸轮轮廓, 经分析采用三次样条曲线拟合的凸轮轮廓减小了现用凸轮机构的柔性冲击, 提高了压盖机的性能。

关键词:压盖机; 凸轮机构; 凸轮轮廓线; 动力学分析

Abstract: This paper makes a theoretical analysis of cam mechanism on the capping machine of beer production line, and using SolidWorks and VB to extract the cam contour line, then obtain the speed, acceleration and pressure angle data of cam and roller follower by combining MATLAB with dynamic analysis. The analysis shows that the cam is unreasonable. In order to improve its performance, three spline curves are used to improve the cam profile. After analyzing the cam profile fitted with three spline curves, the flexible impact of the present cam mechanism is reduced and the performance of the capping machine is improved.

Keywords: capping machine; cam mechanism; cam contour line; dynamic analysis

凸轮从动件机构因精确的运动、设计的简单性和相对较低的生命周期成本^[1], 需要以恒定速度运行以指定输出运动的多样性, 因此在机械工业中被广泛使用。此外, 凸轮从动机构最吸引人的特征之一是它可以容易地产生间歇运动, 在该

运动中, 从动件在其周期的部分中保持静止。

凸轮优化设计中的优化方法主要包括凸轮轮廓的表示和优化算法的选择。事实上, 在凸轮设计中, 提出了一些规律性和发展性的曲线来表示凸轮轮廓, 如摆线曲线、修正正弦曲线、修正梯形曲线、多项式曲线和 B 样条^[2-5]。一旦产生上述曲线的轮廓, 就可以检查几何和运动特性的可行性, 并且重复该过程直到实现可行的设计。为了避免凸轮磨损和脉动, Flocker^[6]提出了一种改进的梯形轮廓, 适用于单重置凸轮从动件, 以使凸轮设计者能够容易地选择最大向前或最大向后加速度值。Jiang 等^[7]提出了一种基于广义 Hermite 凸轮位移的组合方法, 以最小化和限制高速凸轮从动件系统在一系列速度范围内的振动。在优化问题中可以形成一个通用的设计环境。Acharyya 等^[8]用分数阶多项式样条曲线代替正弦加速度曲线, 使从动件的冲击和接触应力最小, 并对试验结果进行验证, 以验证加速度和冲击加速度的峰值。另一方面, 凸轮优化设计中采用了许多传统的优化算法。对于传统的优化算法, 在凸轮轮廓优化设计中, 提出了黄金分割法^[9]、拉格朗日乘子法^[10]和克里金法^[11]。而对于凸轮轮廓线的提取、轮廓线数学方程的建立, 以及在此基础上进行凸轮及从动件的运动特性改进的研究较少。

啤酒是人类最古老的酒精饮料, 是水和茶之后世界上消耗量排名第三的饮料。啤酒以大麦芽、酒花、水为主要原料, 经酵母发酵作用酿制而成的富含二氧化碳的低酒精度酒。啤酒生产大致可分为麦芽制造、啤酒酿造、啤酒灌装 3 个主要过程^[12-14]。为了便于销售, 大部分啤酒需要瓶装, 而为了保持啤酒质量, 减少紫外线的影响, 一般采用棕色或深绿色的玻璃瓶。空瓶经浸瓶槽(碱液 2%~5%, 40~70℃)浸泡, 然后通过洗瓶机洗净, 再经灌装机灌入啤酒, 压盖机压上瓶盖。经杀菌机巴氏杀菌后, 检查合格即可装箱出厂。其

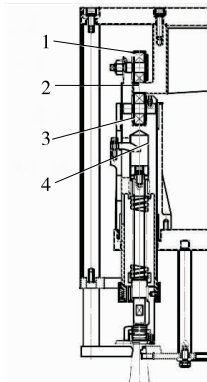
基金项目:安徽省科技重大专项(编号:17030901039); 安徽省科技重大专项(编号:16030901016)

作者简介:杨清艳(1987—), 女, 安徽建筑大学讲师, 博士。

E-mail: 1015271621@qq.com

收稿日期:2018-03-26

中压盖机压盖过程必不可少,并且压盖是否紧密关系到啤酒贮藏的时间长短。因此压盖机性能的优劣很重要。压盖机主要由上滚子、凸轮、下滚子和导向轴组成见图 1。压盖头的上下运动是受凸轮控制的。凸轮安装在机体的不动部分。滚子是沿着凸轮做回转运动,从而带动主要部件上下往复运动。



1. 上滚子 2. 凸轮 3. 下滚子 4. 导向轴

图 1 压盖机主要部分结构图

Figure 1 The main part of the structure diagram for the capping machine

1 压盖凸轮动力学特性分析

1.1 压盖凸轮曲线方程重建

为了分析压盖凸轮的相关特性,需获取凸轮曲线的数学表达式。本机构上凸轮曲线是通过一定数量的位置点进行拟合获取的,位置点较少,因此对曲线的数学表达形式尚不明晰。为了实现该凸轮曲线的数学重建,开发凸轮曲线的离散及离散位置点获取软件,需在获取大量曲线离散数据点的前提下,对数据点进行样条拟合重建。

某压盖机的凸轮及滚子三维图见图 2。根据凸轮轮廓线及滚子半径,获取滚子中心线,在获得滚子中心轨迹曲线的基础上,以该曲线为基础进行动力学特性分析。如图 3 所示,压盖机凸轮的轮廓线是一条分段曲线(曲线方程未知),为了对该曲线进行数学方程重建,需获取该曲线上的离散数据点坐标。在 SolidWorks 软件环境中,以 VBA 语言为工具^[15],开发曲线上的离散点坐标提取软件。首先使凸轮曲线形成封闭轮廓线,然后再在三维环境中将凸轮曲线离散,再经过图 4 所编辑的轮廓线点采集软件获取曲线上离散点,然后点击保存将采集的点导出。

为方便后续的分析计算,将第一列数据转换为凸轮转角 g ,转换方法:

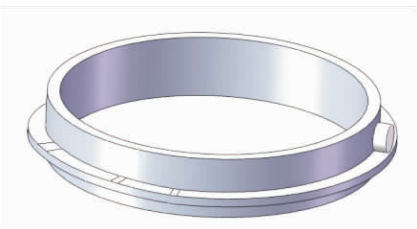


图 2 压盖凸轮滚子示意图

Figure 2 The model diagram of roller and cam

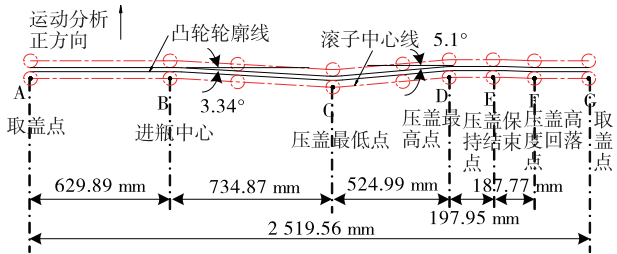


图 3 压盖凸轮滚子中心轨迹曲线展开图

Figure 3 Expansion diagram of center track curve of gland cam and roller

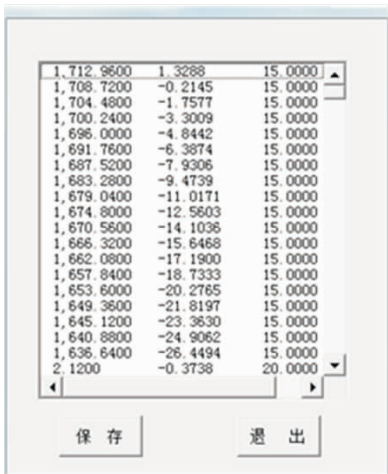


图 4 凸轮曲线离散点坐标采集

Figure 4 Coordinate acquisition of discrete point of cam curve

$$g = \frac{2\pi x}{l}, \tag{1}$$

式中:

g ——凸轮转角,rad;

x ——表示图 4 中横坐标 x ,mm;

l ——以凸轮中径为半径绘制圆的周长,mm。

在凸轮曲线的平面展开图上共采集 803 个坐标点,结合式(1)转化,可得到 803 组滚子位移量 s 与凸轮转角 g 的一一对应关系,现采用分段三次样条对凸轮曲线进行拟合,因此可得 802 段三次样条函数,其具体的滚子位移量 s 与凸轮转角 g 的函数关系,见式(2)。

$$s_i(g) = a_i g^3 + b_i g^2 + c_i g + d_i, i \in [1,802], \tag{2}$$

式中:

a_i, b_i, c_i, d_i ——分别为第 i 段样条的各次项系数。

1.2 压盖凸轮压力角分析

对于圆柱凸轮而言,压力角 α 求解见式(3)^[16]。

$$\alpha = a \tan\left(\frac{2v}{\omega D}\right), \tag{3}$$

式中:

D ——圆柱凸轮平均直径,取 773.5 mm;

v ——从动件线速度,mm/s;

ω ——圆柱凸轮角速度,rad/s。

v/ω 可按式(4)计算:

$$v/\omega = \frac{ds}{dt} / \frac{dg}{dt} = ds/dg \quad (4)$$

式(4) s 的计算结果可根据式(2)得到。

在 MATLAB 中^[17-18] 计算出压盖凸轮的压力角曲线见

图 5。

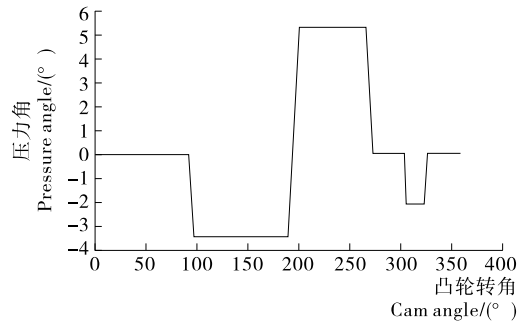


图 5 压盖凸轮压力角变化曲线

Figure 5 Pressure angle curve of original cam contour

由图 5 可知,压盖凸轮压力角变化范围为 $[-3.46^\circ, 5.31^\circ]$,原压盖凸轮的压力角在许用凸轮压力角范围之内。

1.3 压盖凸轮从动件速度分析

压盖机上滚子是与压盖头在一起,从动件滚子的运动特性与压盖头运动特性之间直接相关,因此需要分析滚子的运动特性。对于圆柱凸轮而言,从动件滚子速度可由式(5)求得。

$$v = \frac{ds}{dg}\omega, \quad (5)$$

式中:

ω ——圆柱凸轮转动角速度,根据实际工况为 33 r/min 可以转换求出。

计算求得从动件的速度曲线见图 6。

由图 6 可知,在实际工况下压盖凸轮从动件速度的变化范围为 $-80.9 \sim 124.2$ mm/s,从速度变化趋势可知,在速度转变处,变化较为急促,易引起冲击。

1.4 压盖凸轮从动件加速度分析

对于圆柱凸轮而言,从动件加速度按式(6)计算:

$$a = \frac{d^2s}{dg^2}\omega^2. \quad (6)$$

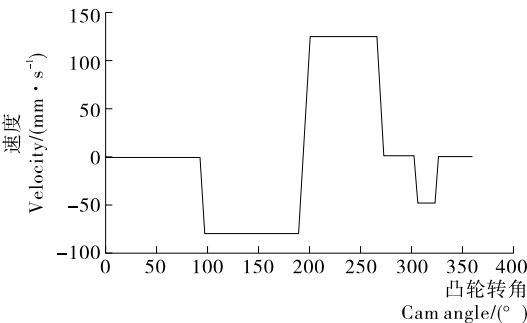


图 6 压盖凸轮从动件速度曲线

Figure 6 Velocity curve of follower on original cam contour

根据式(6),结合具体工况,可获得从动件加速度曲线见图 7。

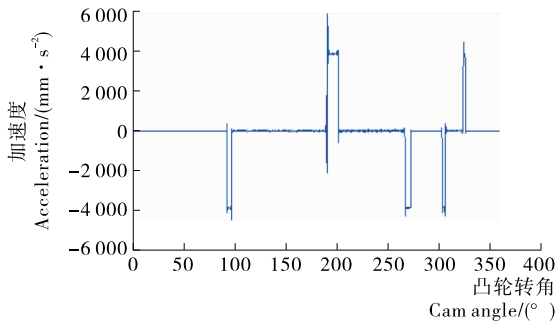


图 7 压盖凸轮从动件加速度曲线

Figure 7 Acceleration curve of cam follower on original cam contour

从图 7 可以看出,在实际工况下压盖凸轮从动件加速度的变化范围为 $-4150 \sim 6000$ mm/s²,从加速度变化趋势可知,在加速度转变处,存在加速度突变,有柔性冲击。

综上分析可知,该压盖凸轮曲线存在设计不合理的地方,其凸轮从动件滚子局部速度变化过于急促,并且局部柔性冲击较大,最终反映到实际工况上啤酒压盖运动中出现震荡,运动出现噪声。分析图 6、7 可知,现用压盖凸轮出现冲击问题的根源在于图 3 中点 B、C、D、E、F 附近的曲线设计不合理,下面采用三次样条拟合对 BC 段、CD 段和 EF 段曲线进行优化处理,以改善运动特性。曲线优化中需保证凸轮轮廓线其他段运动特性曲线。

2 压盖凸轮轮廓线设计

对图 3 中所示的现用压盖凸轮从动轮中心运动轨迹曲线,建立坐标系见图 8,以凸轮从动件中心轨迹线起点 A 为坐标系原点,建立直角坐标系 xAy 。一条三次曲线,可由 4 个点唯一确定,并且它拥有一个拐点。三次曲线是多项式曲线中拥有拐点的最高项次数最小的曲线^[19-20]。在图 8 中该坐标系已知 A、B、C、D、E、F 和 G 点的坐标,分别为(0,0)、(629.889,0)、(1364.76,-40)、(1889.668,5)、(2087.614,0)、(2274.6,0)和(2519.557,0),因此可用三次曲线来拟合。

设 BC 段、CD 段和 EF 段的曲线方程为:

$$y = ax^3 + bx^2 + cx + d, \quad (7)$$

式中:

$a、b、c、d$ ——多项式系数。

根据式(7),结合 BC 段曲线的边界约束,得方程组:

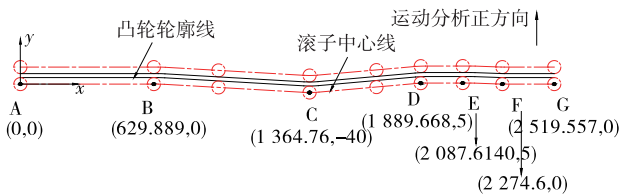


图 8 原压盖凸轮从动件中心轨迹线关键点坐标

Figure 8 Establish coordinate system for original cam follower

$$\begin{cases} ax_B^3 + bx_B^2 + cx_B + d = y_B; \\ 3ax_B^2 + 2bx_B + c = 0; \\ ax_C^3 + bx_C^2 + cx_C + d = y_C; \\ 3ax_C^2 + 2bx_C + c = 0. \end{cases} \tag{8}$$

将点 B、C 的坐标代入式(8),求得 BC 段曲线方程为:

$$y_{BC} = 2.016 \times 10^{-7} \times x^3 - 6.031 \times 10^{-4} \times x^2 + 0.520 \times x - 1.385 \times 10^2. \tag{9}$$

同理,求得 CD 段曲线方程为:

$$y_{CD} = -6.223 \times 10^{-7} \times x^3 + 0.003 \times x^2 - 4.815 \times x + 2.454 \times 10^3. \tag{10}$$

同理,求得 EF 段曲线方程为:

$$y_{EF} = 1.530 \times 10^{-6} \times x^3 - 0.010 \times x^2 + 21.790 \times x - 1.578 \times 10^4. \tag{11}$$

据此,得到用三次样条表示的凸轮从动件中心轨迹线见图 9,凸轮从动件在原始轮廓与三次样条曲线拟合下的位移曲线见图 10,从图 10 可知凸轮轮廓三次样条拟合下的凸轮从动件的位移曲线,在压盖过程中的关键点位置未改变,并且从动件在凸轮轮廓 BC 段、CD 段与 EF 段的位移与凸轮原始轮廓下基本一致,最大不超过 3%,能满足压盖的过程。

根据图 9 所示曲线,结合压盖机凸轮中径尺寸 ($R = 773.5 \text{ mm}$) 及实际工况转速 ($n = 33 \text{ r/min}$),根据式(1)~(6) 可得采用三次样条拟合所产生的压盖机凸轮压力角、速度、加速度曲线见图 11~13。

对比原凸轮(图 5)与三次样条拟合轮廓压力角(图 11)、从动件速度曲线(图6、12)以及从动件加速度曲线(图7、13)

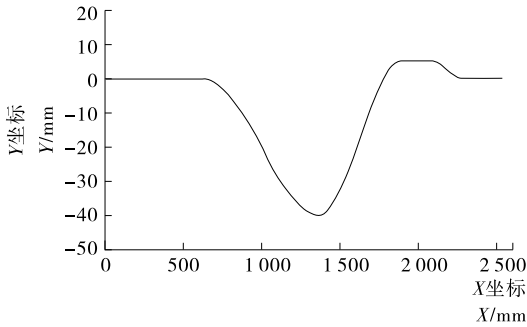


图 9 采用三次样条拟合的从动件中心轨迹线
Figure 9 The center track of follower on cubic spline fitting cam profile

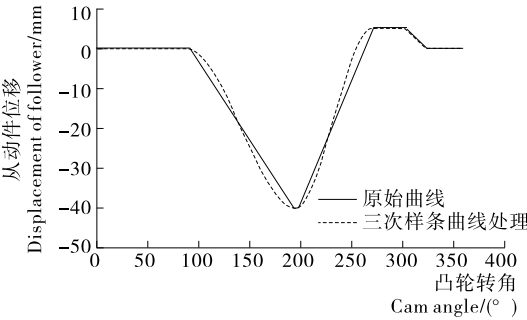


图 10 对比从动件位移曲线
Figure 10 Comparison of displacement curves of cam follower

可知,经由三次样条对凸轮曲线处理之后,最大压力角由之前的 5.31° 升至 7.59° ;从动件速度由 $-80.9 \sim 124.2 \text{ mm/s}$ 调整到 $-113.1 \sim 178.2 \text{ mm/s}$,虽然从动件速度范围有所上升,但上升幅度不大,而其曲线变得平缓过渡;从动件加速度明显降低,由 $-4\ 150 \sim 6\ 000 \text{ mm/s}^2$ 调整到 $-2\ 180 \sim 1\ 950 \text{ mm/s}^2$ 。原凸轮轮廓与三次曲线拟合轮廓在压力角、从动件速度和加速度的比较见表 1。

由表 1 对比可见,现用压盖凸轮两端曲线经三次样条拟合处理后,加速度特性均得到了较大幅度改善,三次样条拟合方法在降低加速度峰值方面均具有较大优势,冲击力相比于现用凸轮曲线降低了 $2/3$,降低了柔性冲击。

3 结论

本研究通过对凸轮轮廓线离散、重构获得了凸轮轮廓线

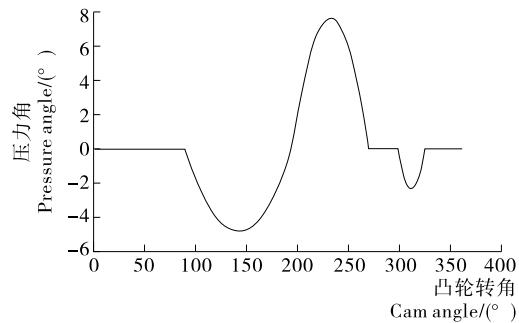


图 11 三次样条拟合所产生的压力角变化曲线
Figure 11 Pressure angle curve of cubic spline fitting cam contour

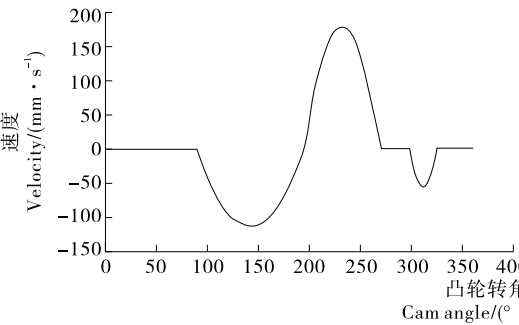


图 12 三次样条拟合所产生的从动件速度变化曲线
Figure 12 Velocity curve of follower on cubic spline fitting cam contour

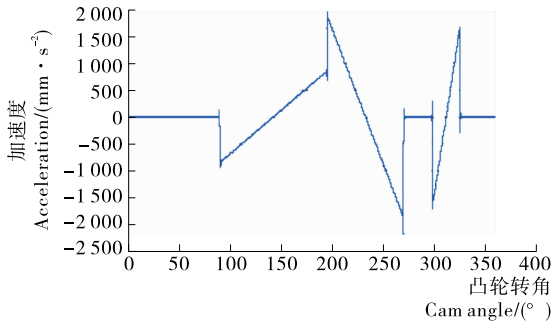


图 13 三次样条拟合所产生的从动件加速度变化曲线
Figure 13 Acceleration curve of cam follower on cubic spline fitting cam contour

表 1 原凸轮与三次样条曲线拟合轮廓性能对比

Table 1 Performance comparison of original cam contour and cubic spline fitting cam contour

对象	压力角/ (°)	从动件速度范围/ (mm·s ⁻¹)	从动件加速度范围/ (mm·s ⁻²)
原凸轮	5.31	—80.9~124.2	—4 150~6 000
三次样条曲线拟合	7.59	—113.1~178.2	—2 180~1 950

曲线方程,在此基础上分析了原凸轮轮廓线上的压力角,以及从动轮速度、加速度等特性、数据得出该压盖凸轮曲线存在设计不合理的地方,从动件滚子局部速度变化过于急促,并且局部柔性冲击较大。对不合理的凸轮轮廓曲线采用三次样条曲线拟合优化设计,并分析了拟合后凸轮轮廓曲线压力角、从动件的速度和加速度性能曲线,对比优化前后运动特性曲线图可知,三次样条拟合方法能有效地降低加速度峰值,并且使得凸轮工作过程中冲击力相比于现用凸轮曲线降低了;优化后的凸轮轮廓线压力角仍在设计的范围之内,其从动件的速度虽有小幅提升,但运动更加平稳;更适用于中低速场合。

参考文献

[1] OUYANG Tian-cheng, WANG Pan, HUANG Hao-zhong, et al. Mathematical modeling and optimization of cam mechanism in delivery system of an offset press[J]. Mechanism & Machine Theory, 2017, 110: 100-114.

[2] TSAY D M, LIN B J. Improving the geometry design of cylindrical cams using nonparametric rational B-splines [J]. Computer-Aided Design, 1996, 28(1): 5-15.

[3] WU L I, LIU C H, CHEN T W. Disc cam mechanisms with concave-faced followers[J]. ARCHIVE Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2009, 223(6): 1 443-1 448.

[4] SATEESH N, RAO C S P, REDDY T A J. Optimisation of cam-follower motion using B-splines[J]. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 2009, 22(6): 515-523.

[5] XIAO Han-song, ZU Jean W. Cam profile optimization for a new cam drive[J]. Journal of Mechanical Science & Technology, 2009, 23(10): 2 592-2 602.

[6] FLOCKER F W. Addressing cam wear and follower jump in single-dwell cam-follower systems with an adjustable modified trap-

ezoidal acceleration cam profile[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines & Power, 2008, 131(3): 327-335.

[7] JIANG J K, IWAI Y R, SU H. Minimizing and restricting vibrations in high-speed cam-follower systems over a range of speeds[J]. Journal of Applied Mechanics, 2007, 74(6): 1 157-1 164.

[8] ACHARYYA S, NASKAR T K. Fractional polynomial mod traps for optimization of jerk and hertzian contact stress in cam surface[J]. Computers & Structures, 2008, 86(3): 322-329.

[9] HWANG W M, YU C Z. Optimal synthesis of the adjustable knock-out cam-follower mechanism of a bolt former[J]. ARCHIVE Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2005, 219(8): 767-774.

[10] KAPLAN H. Mathematical modeling and simulation of high-Speed cam mechanisms to minimize residual vibrations[J]. ARCHIVE Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2014, 228(13): 2 402-2 415.

[11] QIN W J, HE J Q. Optimum design of local cam profile of a valve train[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2010, 224(11): 2 487-2 492.

[12] 张有良, 张国安, 王剑峰, 等. 纯生啤酒冲瓶灌装压盖一体机的技术优势[J]. 包装与食品机械, 2010, 28(2): 31-35.

[13] 郑艳楠. 啤酒灌装压盖机监控系统的研究与改进[J]. 内蒙古石油化工, 2013(1): 4-5.

[14] 肖海蓉, 罗友琴. 啤酒灌装压盖机 PLC 系统升级[J]. 酒·饮料技术装备, 2012(4): 60-62.

[15] 李大柱, 韩江, 夏链. 基于虚拟插削的非圆齿轮齿廓获取研究[C]//上海交通大学第 16 期博士生学术论坛——机械百年·智能制造·智造中国学术论坛. 上海: [出版者不详], 2013: 137-141.

[16] 徐伟. 基于 VB 的凸轮 CAD 系统的研究与开发[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2005(2): 37-39.

[17] 方芳, 黄松和, 林刚. 基于 MatLab 和 SolidWorks 的凸轮轮廓设计及性能分析[J]. 矿山机械, 2010(6): 39-42.

[18] 石全伟, 张迎春, 王金铃. 基于 matlab 的凸轮轮廓曲线的分析与研究[J]. 现代机械, 2006(3): 75-76.

[19] 杜新宇, 孙新国, 胡飞嘉. 三次曲线拟合的一种简便方法[J]. 装备制造技术, 2008, 37(3): 20-21.

[20] 席晓燕. 推料机构凸轮轮廓曲线设计仿真及误差分析[J]. 食品与机械, 2017, 33(2): 77-80.

(上接第 85 页)

[6] 韩丹, 李龙, 程云山, 等. 叶轮式搅拌器的研究进展[J]. 合成橡胶工业, 2005, 28(1): 71-74.

[7] 仪维, 王即武, 廉爱东, 等. 一种智能牛奶加热搅拌器的设计[J]. 机电一体化, 2017(5): 64-67.

[8] 徐峰. 国外企业应用创新方法的经验与启示[J]. 中国科技论坛, 2009(8): 140-144.

[9] 陈敏慧, 蒋艳萍, 吕建秋. TRIZ 国内外研究现状、存在问题及对策研究[J]. 科技管理研究, 2015, 35(1): 24-27.

[10] 高常青, 黄克正, 张勇. TRIZ 理论中问题解决工具的比较与应用[J]. 机械设计与研究, 2006, 22(1): 13-15.

[11] 张简一, 郭艳玲, 杨树财, 等. 基于 TRIZ 理论的产品创新设计[J]. 机械设计, 2009, 26(2): 35-38.

[12] 高国华, 马帅. 基于离散单元分析与物场分析的盆花移栽手爪优化[J]. 农业工程学报, 2017, 33(6): 35-42.

[13] 高国华, 刘群. 盆花筑模成穴机构创新优化设计[J]. 北京工业大学学报, 2017, 43(7): 987-995.

[14] 张丹, 常宏, 娄高翔, 等. 基于 TRIZ 理论的螺纹口食品瓶清洗机创新设计[J]. 食品与机械, 2017, 33(3): 84-87.