

曲面胶印机步进分度系统建模及有限元分析

袁峰, 王建昊

(郑州大学, 郑州 450001)

摘要: **目的** 建立曲面胶印机步进分度系统的三维模型, 对步进分度系统进行模态分析和谐响应分析。**方法** 根据共轭曲面原理建立弧面分度凸轮机构的三维模型, 利用 Ansys Workbench 对步进分度系统进行有限元分析。**结果** 利用 Pro/E 建立了步进分度系统的三维模型, 其中详细介绍了弧面分度凸轮机构的建模步骤。由模态分析得出步进分度系统的前六阶振型和固有频率, 由谐响应分析得出步进分度系统在冲击载荷下的幅频响应曲线, 为进一步进行步进分度系统的动态优化设计奠定了基础。**结论** 曲面胶印机的步进分度系统工作可靠, 具有良好的动力学特性, 可有效保证印刷质量。

关键词: 曲面胶印机; 步进分度系统; 弧面分度凸轮机构; 模态分析; 谐响应分析

中图分类号: TS803.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2016)23-0191-05

Modeling and Finite Element Analysis of the Stepping Indexing System of Conical Offset Printer

YUAN Feng, WANG Jian-hao

(Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

ABSTRACT: The work aims to build a three-dimensional model of the stepping indexing system of conical offset printer and conduct modal analysis and harmonic response analysis on the stepping indexing system. The three-dimensional model of globoidal indexing cam mechanism was built according to the principle of conjugation surface. The finite element analysis on the stepping indexing system was carried out by Ansys Workbench. The three-dimensional model of stepping indexing system was built by Pro/E, and the modeling steps of globoidal indexing cam mechanism were introduced in detail. The first six-order vibration model and the inherent frequency were obtained through modal analysis, and the amplitude-frequency response curve of stepping indexing system under impact load was obtained by the harmonic response analysis. The foundation for further dynamic optimum design of the stepping indexing system was provided. With reliable working and good dynamic characteristics, the stepping indexing system of conical offset printer can effectively ensure the printing quality.

KEY WORDS: conical offset printer; stepping indexing system; globoidal indexing cam mechanism; modal analysis; harmonic response analysis

随着我国经济的快速发展, 印刷工业取得了长足进步, 印刷工业在我国的国民经济中也占据着越来越重要的地位。为了提高产品的附加值, 吸引消费者的目光, 通常需要印刷精美的包装, 在这种情况下, 曲面胶印机应运而生。曲面胶印机是一种应

用于食品包装容器塑性表面, 可印刷各式彩色文字图案的高速印刷装备。目前国内外对曲面胶印机的研究相对较少, 德国海德堡、日本小森等公司进行了大量胶印机设计和动态特性方面的基础理论和应用研究, 但是胶印机和曲面胶印机在结构上存在

收稿日期: 2016-05-27

作者简介: 袁峰 (1968—), 男, 河南新乡人, 博士, 郑州大学副教授, 主要研究方向为工业装配自动化技术、机械产品创新设计等。

很大差异,因此有必要对曲面胶印机进行研究^[1-2]。

曲面胶印机主要由套色系统、步进分度系统、进出杯系统、控制系统等组成,其中步进分度系统包括弧面分度凸轮机构、模头安装盘、印刷模头、旋杯机构等。对于步进分度系统而言,弧面分度凸轮的分度精度、输出轴的传动精度以及印刷模头的位置精度都会直接影响最终的印刷质量,因此有必要对曲面胶印机的步进分度系统进行分析。

1 工作原理

曲面胶印机的工作原理见图1,输墨单元将UV油墨均匀地传递到印版滚筒的柔性凸版上,进而转印到橡皮滚筒的橡皮布上。橡皮布和步进分度系统采用2台伺服电机独立驱动控制,通过设定2台电机的转速比,实现橡皮滚筒的橡皮布与印刷模头同步接触滚动印刷,将图文套印在承印物表面^[3-4]。

步进分度系统根据曲面胶印机的功能要求要实现8个工位的步进动作,分别包括进杯、顶杯、电晕及检测、顶杯、印刷、次品吹出、UV固化和出杯8个工位,工位见图2。各工位按一定的节拍步进进行,进料系统将承印物逐个连续地装到步进分度系统的印刷模头上,印刷模头随步进分度系统实现快速的步进动作,在出料工位将印好的承印物传送到工作台上。承印物通过真空气体吸附在印刷

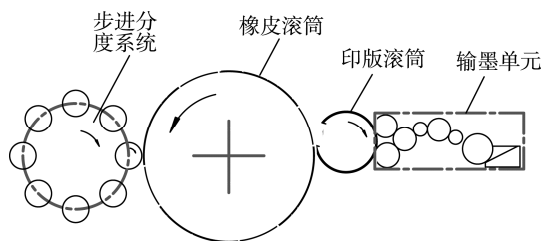


图1 曲面胶印机工作原理

Fig.1 Surface offset press working principle

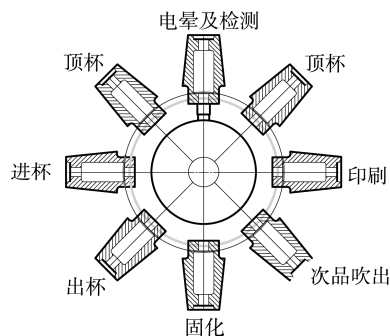


图2 分度盘工位

Fig.2 The station chart of the indexing disc

模头上,橡皮滚筒上的橡皮布与承印物接触进行印刷,因此,系统的分度精度以及印刷模头的定位精度都将直接影响最终的印刷质量^[5-6]。

2 步进分度系统三维模型的建立

2.1 系统组成

步进分度系统主要由凸轮分割器(弧面分度凸轮机构)、模头安装盘、印刷模头、模头支撑轴、旋杯机构和分气机构组成,其结构见图3。凸轮分割器(弧面分度凸轮机构)是一种常用的分度机构,通过弧面凸轮与分度盘无间隙啮合,可以将连续的回转运动转化为间歇的输出运动。根据工位要求,选为8分度,实现印刷时各工位的步进动作。弧面分度凸轮的输出轴通过轴承固定在分割器的机架上,模头安装盘装在输出轴上,模头支撑轴安装在模头安装盘上圆周均布的8个安装孔内,印刷模头通过轴承装在模头支撑轴上,分气装置固定在箱体上并和模头安装盘的左侧贴紧^[7]。在模头安装盘和模头支撑轴内均开有气道,通过分气机构(尼龙压盘)实现印刷模头在每个工位其内部真空气体和压缩气体的转换,从而达到在合适的工位将印刷模头上的承印物吸紧和吹出的目的。旋杯装置可以使印刷模头绕输出轴周向旋转的同时也在模头支撑轴上以一定的速度转动,使承印物在电晕和固化工位能够被完全处理,同时也保证了印刷时承印物和橡皮滚筒以相同的线速度接触,大幅提高了印刷质量。

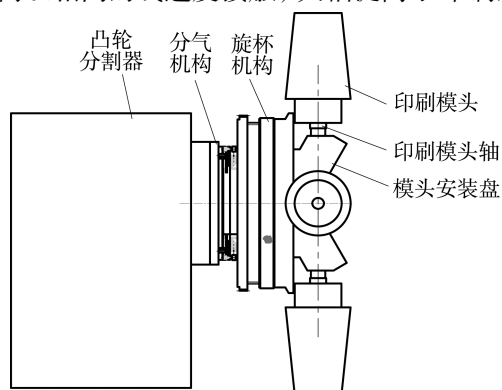


图3 步进分度系统结构

Fig.3 The structural diagram of stepping indexing system

2.2 步进分度系统三维模型的建立

弧面分度凸轮机构包括弧面凸轮、分度盘、输出轴等。主动凸轮具有凸脊状的凸轮轮廓,分度盘上装有轴线沿分度盘圆周分布的滚子。在分度阶段,

弧面凸轮的轮廓推动滚子运动,使分度盘达到分度转位的目的;在停歇阶段,相邻的 2 个滚子跨夹在凸轮凸脊的两侧,使分度盘停止转动^[8-9]。

弧面分度凸轮机构从动件运动规律选为修正正弦运动规律,这种运动规律可以使行程加速度变化更加平稳,具有更好的动力学性能^[10]。弧面分度凸轮机构的凸轮工作面与分度盘滚子的圆柱面是一对共轭曲面^[11]。利用共轭曲面原理来推导弧面凸轮

$$\begin{cases} x_c = d_f \cos \theta_1 \cos \theta_2 + r_f \cos \theta_1 \cos \theta_2 - r \sin \theta_1 \cos \theta_2 \cos \beta_f - c \cos \theta_2 - r \sin \beta_f \sin \theta_2 \\ y_c = -d_f \cos \theta_1 \sin \theta_2 - r_f \cos \theta_1 \sin \theta_2 + r \sin \theta_1 \sin \theta_2 \cos \beta_f + c \sin \theta_2 - r \sin \beta_f \cos \theta_2 \\ z_c = d_f \sin \theta_1 + r_f \sin \theta_1 + r \cos \theta_1 \cos \beta_f \end{cases}$$

式中: θ_1 为分度盘滚子的位置角; θ_2 为弧面凸轮的转角; c 为弧面凸轮与分度盘的中心距。

滚子圆柱面和凸轮轮廓面均为光滑曲面,根据微分几何包络理论,它们的接触方程为:

$$\tan \beta_f = \frac{r_f + d_f}{c - (r_f + d_f) \cos \theta_1} \cdot \frac{\omega_1}{\omega_2}$$

式中: ω_1 为分度盘角速度; ω_2 为弧面凸轮角速度。

根据弧面凸轮轮廓的参数方程、接触方程和修正正弦运动规律,在选定中心距 c 为 160 mm,分度期转角为 120° ,分度数为 8,滚子中心角为 45° ,凸轮单头左旋的情况下,对弧面分度凸轮机构进行建模。建立第 1 个滚子与弧面凸轮轮廓接触的第 1 段曲线的程序为:

```
C=160
X3=62
T1=T/8
H=T1*120
J=45*(PI*T1-1/4*SIN(720*T1))/(4+PI)
K=3*PI*(1-COS(720*T1))/(8*(4+PI))
M=22.5+J
N=ATAN(R*K/(C-R*COS(M)))+180
X2=R
Y2=20*COS(N)
Z2=20*SIN(N)
X=X2*COS(M)*COS(H)-Y2*SIN(M)*COS(H)-Z2*SIN(N(H)-C*COS(H))
Y=-X2*COS(M)*SIN(H)+Y2*SIN(M)*SIN(H)-Z2*COS(H)+C*SIN(H)
Z=X2*SIN(M)+Y2*COS(M)
```

程序中: $X_3=r_f+d_f$, 为分度盘中心距啮合点的距离; $T_1=T/8$, 为第 1 段曲线的运行时间, $0 \leq T_1 \leq 1/8$; H 为弧面凸轮转角; J 为分度盘角位移; K 为分度盘与弧面凸轮的角速度比; M 为第 1 个滚子的位置; N 为滚子的方程参数, 即 d_f 。

取 X_3 的变化量 $\Delta X_3=5$ mm, 依次改变程序段中的 X_3 值, 创建 8 条推程段轮廓面曲线, 形成第 1

工作廓面的坐标方程式, 圆柱滚子的参数方程为:

$$\begin{cases} x_f = r_f + d_f \\ y_f = r \cos \beta_f \\ z_f = r \sin \beta_f \end{cases}$$

式中: 分度盘半径为 r_f ; 滚子半径为 r ; 在任意时刻, 啮合点距滚子上端面的距离为 d_f , 啮合点与 y 轴的夹角为 β_f 。

通过坐标变换求出凸轮轮廓参数方程:

个滚子与弧面凸轮轮廓接触的第 1 段曲线族。第 2 段、第 3 段轮廓曲线只需根据修正正弦的运动规律对上述程序进行修改即可。

根据第 1 个滚子与弧面凸轮轮廓接触的曲线方程, 修改滚子起始角的位置即可得到第 2 个和第 3 个滚子与弧面凸轮轮廓接触的曲线方程。然后将 J 取为 0, K 分别取为 0 和 180, 即可得到与滚子左、右表面接触的凸轮轮廓曲线。在 Pro/E 中对曲线进行边界混合并实体化, 对边界部分进行修剪, 最终可得到弧面凸轮的三维模型, 弧面分度凸轮见图 4。

根据选定的尺寸绘制分度盘并与弧面凸轮进行装配, 可得到弧面分度凸轮机构的装配体, 见图 5。在 Pro/E 中分别建立模头安装盘、输出轴、模头支撑轴、印刷模头、分气装置及旋杯装置的三维模型, 并进行装配, 最终的步进分度系统装配体见图 6。

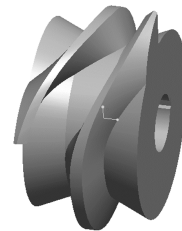


图 4 弧面分度凸轮
Fig.4 Globular indexing cam



图 5 弧面分度凸轮机构
Fig.5 Globular indexing cam mechanism

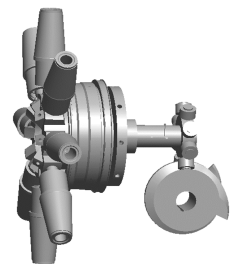


图 6 步进分度系统
Fig.6 The stepping indexing system

3 步进分度系统的有限元分析

3.1 模态分析

为了方便有限元分析时的网格划分能够顺利进行并提高计算速度,忽略步进分度系统上对计算结果影响较小的特征,对模型进行适当的简化处理:弧面凸轮通过轴承固定在机架上,旋杯机构通过轴承与模头安装盘连接,分气机构通过弹簧固定在机架上,相对变形较小,建模时予以忽略;对于步进分度系统中的安装孔、螺纹孔、定位销孔、圆角和倒角等对应变影响较小的特征,建模时予以忽略。

通过设置 Pro/E 和 Ansys 的接口,将简化后的模型导入 Ansys Workbench 中,各构件的接触类型设置为绑定接触。有限元分析模型见图 7。印刷模头和模头安装盘选为铝合金;模头支撑轴选为 45 钢;输出轴和分度盘选为 40Cr 钢。网格的划分直接影响最终的计算精度。采用控制网格尺寸的方法来控制网格精度,单元尺寸设定为 8 mm。步进分度系统的输出轴通过轴承固定在分割器的机架上,采用的轴承大多为滚子轴承或球轴承,由于轴承分为内外圈,中间的滚子或球决定了轴的约束是线接触还是面接触,因此输

出轴的约束可简化为一个弹性梁结构。在 Workbench 中,在输出轴的内圈装配面选取宽为 2 mm 的面添加约束,来模拟滚子轴承^[12-13]。

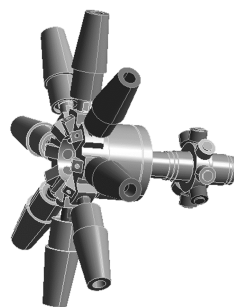


图7 有限元分析模型

Fig.7 Finite element analysis model

求解时定义模态数和扩展模态数均为 6,计算得到的步进分度系统的前 6 阶固有振动频率,一阶固有频率、二阶固有频率、三阶固有频率、四阶固有频率、五阶固有频率、六阶固有频率分别为 146.35, 146.37, 154.25, 330.94, 331.02, 336.64 Hz。各阶振型见图 8,由于输出轴固定在机架上,变形相对较小;模头安装盘及印刷模头质量较大,且印刷模头仅由模头支撑轴支撑,因此印刷模头的相对变形较为严重。

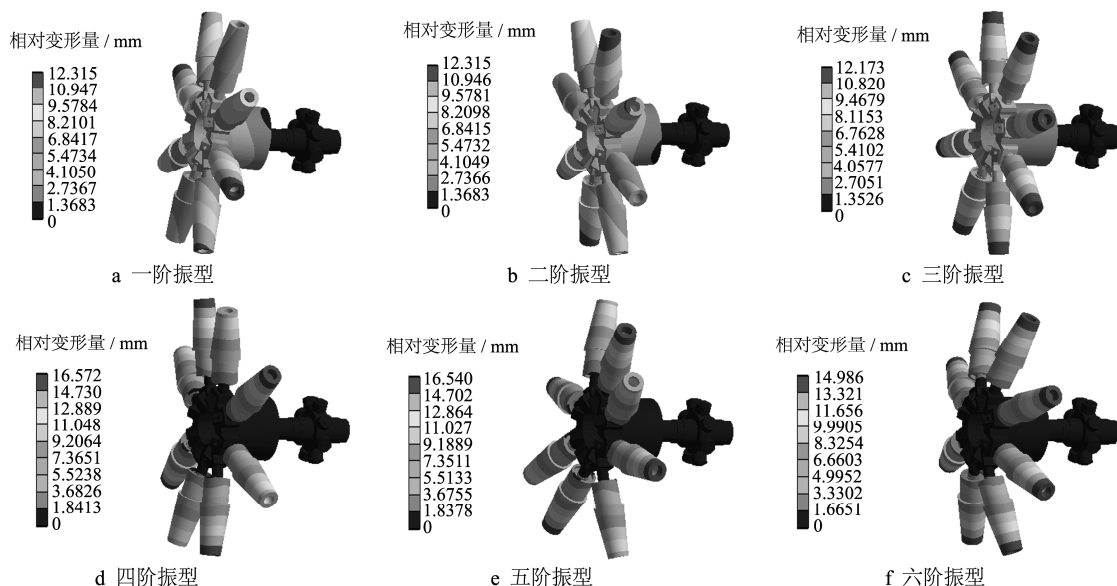


图8 步进分度系统振型

Fig.8 The stepping indexing system modal model

弧面分度凸轮机构的输入运动为回转运动,当系统的转速与固有频率接近时,机构会产生强烈的振动,影响印刷精度。由固有频率的计算结果可知,一阶固有频率对应转速为 8760 r/min,也是临界转速的最小值。由于步进分度系统工作时最大转速为 400 r/min,远小于一阶振型的 8760 r/min,因此该

步进分度系统是可靠的。

3.2 步进分度系统的谐响应分析

该分析选取的印刷压力为 100 N/cm²,压痕宽度为 5 mm×135 mm^[14-15],即在印刷模头法线方向 5 mm×135 mm 的表面区域施加 1 MPa 的激振力,

在 0 ~ 400 Hz 频率范围内, 分 20 步进行谐响应分析, 可以得出, 印刷模头 x , y , z 方向上的位移均在 145 Hz 出现第 1 次位移峰值, x , y , z 方向上的第 1 次位移峰值分别为 0.496, 0.148, 1.39 mm。由此可得, z 方向上的第 1 次位移峰值大于 x 和 y 方向上的第 1 次位移峰值, 这是因为 z 方向上的分力最大, y 方向上的分力最小。在 145 Hz 处出现第 1 次位移峰值, 说明共振对结构的动力性能影响最大, 应避免共振的发生。

4 结语

完成了步进分度系统的三维模型的建立, 详细描述了弧面分度凸轮建模的方法和过程, 为步进分度系统的研究提供了理论参考。由模态分析结果可得, 步进分度系统在分度过程中, 输出轴、模头安装盘及印刷模头都会发生弹性变形, 其中印刷模头的弹性形变最为严重, 振动时的主要变形形式为弯曲和扭转, 会直接影响印刷的精度。前 6 阶模态分析结果中, 一阶和二阶、四阶和五阶的固有频率基本相等, 可视为重根。一阶固有频率为 146 Hz, 且在实际工作频率范围内系统振动幅值较小, 不会发生共振, 具有较好的动态特性。通过谐响应分析得到激振力作用下步进分度系统的幅频变化曲线, 找到发生共振的频率、幅值及主振方向, 第 1 次共振对系统的动态特性影响较大, 应避免共振的发生。由步进分度系统的模态及谐响应分析可以得出, 步进分度系统的工作可靠, 正常工作频率下不会发生共振, 具有良好的动力学特性。由于系统发生共振的临界频率远大于正常工作的频率范围, 且模头安装盘及其安装附件在高速转动时会产生较大的转动惯量, 有必要对步进分度系统进行优化设计。文中的模态及谐响应分析为步进分度系统下一步的结构优化及轻量化设计提供了一定的理论基础。

参考文献:

- [1] 魏卞梅. 中国包装印刷业现状及发展趋势[J]. 包装世界, 2006(6): 20—23.
WEI Bian-mei. Status and Development Trend of Chinese Packaging and Printing Industry[J]. Packaging World, 2006(6): 20—23.
- [2] 袁峰, 张翔. 高速曲面胶印机橡皮滚筒动态特性分析[J]. 包装工程, 2016, 37(7): 166—170.
YUAN Feng, ZHANG Xiang. Dynamic Characteristics of Blanket Cylinder of High Speed Surface Offset Press[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(7): 166—170.
- [3] 王贤淮, 陈忠, 王贤洵, 等. 曲面胶印机传动与调整机构分析[J]. 机械设计与研究, 2013(6): 288—291.
WANG Xian-huai, CHEN Zhong, WANG Xian-xun, et al. Analysis of Driving and Adjusting Mechanism of Conic Surface Offset Printing Device[J]. Machine Design and Research, 2013(6): 288—291.
- [4] 王昌佑, 陈忠, 王贤洵, 等. 曲面胶印机支撑箱体结构的设计与分析[J]. 机电工程技术, 2013(6): 73—75.
WANG Chang-you, CHEN Zhong, WANG Xian-xun, et al. Design and Analysis of Conic Surface Offset Printing Device's Cabinet[J]. Electrical Engineering Technology, 2013(6): 73—75.
- [5] 王贤淮, 陈忠, 王昌佑, 等. 锥形塑杯曲面胶印机印刷差速分析与鼓轮设计[J]. 现代制造工程, 2009(6): 129—131.
WANG Xian-huai, CHEN Zhong, WANG Chang-you, et al. Analysis of Difference of Velocity and Design of Printing Wheel for Conical Plastic Cup Printer[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2009(6): 129—131.
- [6] 王贤淮, 陈忠, 王昌佑, 等. 锥形塑杯曲面胶印机印刷差速致热对印刷精度的影响分析[J]. 机电工程技术, 2009(6): 64—66.
WANG Xian-huai, CHEN Zhong, WANG Chang-you, et al. Analysis of the Influence for Printing Accuracy of the Difference of Velocity for Conical Plastic Cup Printer[J]. Electrical Engineering Technology, 2009(6): 64—66.
- [7] 张翔. 高速曲面胶印机主机架与橡皮滚筒静动态特性研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2016.
ZHANG Xiang. Research on the Static and Dynamic Characteristics of the Main Frame and Blanket Cylinder of High-speed Surface Offset Press[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2016.
- [8] 刘昌祺, 刘庆立, 蔡昌蔚. 自动机械凸轮机构实用设计手册[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
LIU Chang-qi, LIU Qing-li, CAI Chang-wei. Automatic Mechanical Cam Mechanism Practical Design Manual[M]. Beijing: Science Press, 2013.
- [9] 刘昌祺, 牧野洋, 曹西京. 凸轮机构设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
LIU Chang-qi, MU Ye-yang, CAO Xi-jing. Cam Mechanism Design[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2005.
- [10] 刘伟. 间歇分度凸轮机构的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2009.
LIU Wei. Research on the Intermittent Indexing Cam Mechanism[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2009.
- [11] 许致华, 张玉松, 洪振宇. 弧面分度凸轮实体建模研究[J]. 中国民航大学学报, 2008(4): 34—36.
XU Zhi-hua, ZHANG Yu-song, HONG Zhen-yu. Study on Solid Modeling of Globular Indexing Cam[J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2008(4): 34—36.
- [12] 曹巨江, 李龙刚. 基于 Ansys 软件的弧面凸轮分度箱输出轴的模态分析[J]. 轻工机械, 2010(3): 42—47.
CAO Ju-jiang, LI Long-gang. Model Analysis of Output Shaft of Globoid Cam Indexing Drive Unit Based on Ansys Software[J]. Light Industry Machinery, 2010(3): 42—47.
- [13] 李成平, 葛正浩, 张兴钰, 等. 基于 Ansys 的弧面分度凸轮机构从动件的模态分析[J]. 机械传动, 2015(8): 145—148.
LI Cheng-ping, GE Zheng-hao, ZHANG Xing-yu, et al. Modal Analysis of Driven Part of Globoid Indexing Cam Mechanism Based on Ansys[J]. Mechanical Transmission, 2015(8): 145—148.
- [14] AZNAR M, CANELLAS E, NER N C. Quantitative Determination of 22 Primary Aromatic Amines by Cation-exchange Solid-phase Extraction and Liquid Chromatography-mass Spectrometry[J]. Journal of Chromatography A, 2009(7): 176—181.
- [15] LORENZINI R, FISELIER K, BIEDERMANN M, et al. Saturated and Aromatic Mineral Oil Hydrocarbons from Paperboard Food Packaging: Estimation of Long-Term Migration from Contents in the Paperboard and Data on Boxes from the Market[J]. Food Additives & Contaminants: Part A, 2010, 27(12): 1765—1774.