

DOI: 10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2017.02.019

印刷机定位故障建模及诊断方法研究

徐卓飞, 张海燕

(西安理工大学 印刷包装与数字媒体学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 针对印刷机定位故障隐蔽性强、诊断难度大等特点,本文提出基于主元分析的定位故障建模与诊断方法。首先,采集计算印刷机连续样张的轴向与周向机械误差数值,通过主元分析将原始数据投影到主元空间和残差空间,并完成故障模型的建立。其次,计算 SPE 控制限并以此判断印刷机定位状态是否发生异常。最后,利用主元载荷图解释各个主元构成,根据主元得分图获取不同故障模式下各个变量的分布特征,以实现故障机理的分析与解释。通过实验证明了所提出方法在故障识别和分析中的有效性,为印刷机定位故障诊断提供了新的技术方法和研究思路。

关键词: 纸张定位; 主元分析; 故障诊断; 印刷机

中图分类号: TH17, TP391

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2017)02-0240-07

Research on modeling and diagnosis method for location in offset printing

XU Zhuofei, ZHANG Haiyan

(School of Printing, Packaging Engineering and Digital Media Technology, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Location faults in offset press always have very strong confidentiality, so it is very difficult to diagnose. A fault modeling and diagnosis method based on the principal component analysis (PCA) was proposed, which consists mainly of three steps First, the feeding deviations of an offset press during printing continuous sheets are obtained in both circumferential and axial directions, and then they are projected into principal component space and residual space, thereby establishing a fault model Second, PSE control limit is calculated to judge whether the locating status is normal or not Finally, the composition of each principal component is determined according to the PCA load diagram, and the distribution feature of each variable under different fault modes is obtained based on the PCA score plot so as to reveal the fault mechanism. The effectiveness of this method in the recognition and analysis of fault was confirmed by experiments. The work can provide a new insight into the diagnosis of location fault in offset press.

Key words: paper location; principal component analysis; fault diagnosis; offset printing

纸张定位是印刷机械的首要工作环节,其正常运行直接决定了后续生产的印刷质量与水平,通常由前规与侧规负责完成^[1-2]。前规与侧规结构复杂且工作耦合严重,导致印刷机定位故障具有隐秘性强、难以准确查找、情况复杂等特点^[3-4]。印刷机在制造和使用过程中,在设备出厂、维护、调节、长时间生产中,都需要对纸张定位状态进行检测。由于缺乏有效的定位故障分析方法,纸张定位调节工作占据大量工时,国内胶印机制造厂商一般花费数十天

甚至数月时间进行设备调节安装,付出巨大的维护成本。

在印刷机输纸单元的制造调节中,大多印机制造企业按照国家标准 GB/T 3264-2013《单张纸平版印刷机四开及对开幅面》进行,其规定了单张纸胶印机的运动状态检测方法。对于纸张定位故障诊断而言,该标准存在以下两点不足:一方面,该方法只能初步判断设备是否符合要求,无法给予明确的维修、调节或安装指导,缺乏故障诊断能力;同时,在检

收稿日期: 2016-05-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51305340,51275406);陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2017JQ5012)

作者简介: 徐卓飞,男,博士,讲师。研究方向为印刷机的设计理论与系统控制,印刷机状态监测方法。E-mail, xuzhuofei@xaut.edu.cn

测过程中需要使用读数显微镜读取偏差量,存在工作量大、测试过程不稳定、可靠性不足、效率偏低等问题^[5]。

纸张定位状态是以套印偏差来体现,相关学者与企业也在印刷机误差、定位故障等方面展开了研究^[6-8]。德国 SID 公司通过印刷专用标识和连续分析数据,得到印刷机输纸与传纸过程中的轴向与周向精度变化规律,从而用于判断设备是否合格。该方法将对单一印张套印误差的观测扩展到了对多个样本的连续统计分析,为解决输纸机构故障提供了新的数据来源。由于采用了图像处理技术,该方法相对于传统方法精度较高,有经验的专家可根据数据规律初步判断故障类别,但由于缺乏故障机理的系统性分析,其诊断可靠性难以保证。

综上所述,基于图像处理技术的误差测量具有较高的精度和速度,若能在此基础上进一步引入有效数据分析方法,对样本偏差进行建模与识别,则可弥补对人工经验的依赖。因此本研究采取图像信息处理方法,结合主成分分析(Principal Component Analysis, PCA),提出建立 PCA 定位故障模型,完成基于数据统计特性的故障检测与机理分析,实现纸张定位故障的自动诊断^[9-10]。

图 1 所示为所提出的技术路线,主要包括印刷图像的获取、印刷机误差的计算、故障模型建立等内容。其中图像获取主要包括制版与印刷,图像的采集则需要借助 CCD 与计算机进行,故障建模通过多元统计过程控制进行。

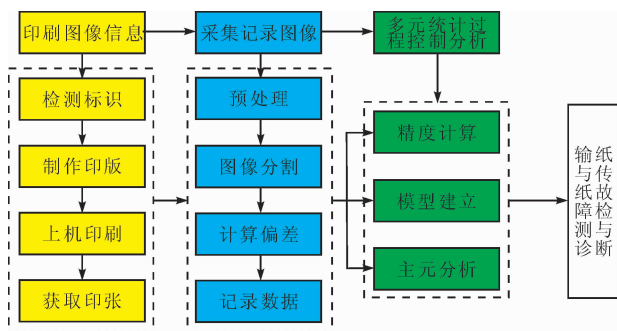


图 1 技术路线

Fig. 1 Technology roadmap

1 印刷机误差的采集及统计特性分析

1.1 印刷机连续误差的获取

本文所指的印刷机误差及精度区别于一般“套印误差”:①印刷机精度及其误差检测的对象是印刷机械本身,而套印误差的对象是印刷品;②精度检测在 0.001 mm 的数量级考虑偏差值,套准往往在

0.01 mm 的数量级考虑且人眼一般可以分辨;③印刷机精度计算需要对多个连续样本进行统计,而套准检测只针对个别印刷产品即可。印刷机误差反映了印刷机纸张进入印刷机第一个印刷单元时的运行状态,前规、侧规等相关部件状态对结果影响占主导。

检测装置包含 CCD 与测试印版。CCD 检测装置由 EC-M55 远心镜头与 ECO655 相机配合组成,配备了同轴光源 CAL-040,通过获取图像分割后的各条直线像素位置关系,计算出印刷机误差的数值。检测印版需要在咬口一侧增添 2~3 个检测标识,以计算不同色组印刷线条间的误差。

1.2 印刷机误差的统计特性分析

PCA 分析变量应服从正态分布^[11-12]。在建立控制模型之前,需要先对印刷机连续机械误差值进行统计特性分析,以检验印刷机误差数据是否符合正态分布假设。数据来自潍坊华光精工设备有限公司生产的 4 开 4 色胶印机 HG58-4,共检测两组定位机械误差量,分别为轴向和周向。

采用卡方拟合优度检验、Jarque-Bera 检验、Kolmogorov-Smirnov 检验和 Lilliefors 检验^[13]。正态检验结果记录在表 1 中,本组数据来自印刷机黑色色组,通常标记为 K(Key Plate)。结合四种检验结果做出较为可靠的综合评价,原假设是“输纸偏差服从其自身均值和方差的正态分布”,显著水平均为 0.05,若 p 大于 0.05 则接受假设。表 1 中仅有周向偏差的 Jarque-Bera 检验方式接近于 0.05,可接受性较差,但综合评定各种检验结果可认为印刷机误差在周向和轴向符合正态分布。

表 1 印刷机误差的检验结果

Tab. 1 Test results of bias for paper location

检验方法	K 轴向偏差		K 周向偏差	
	结论	检验 p 值	结论	检验 p 值
卡方拟合检验	接受	0.216	接受	0.895
Jarque-Bera 检验	接受	0.500	接受	0.089
K-S 检验	接受	0.857	接受	0.786
Lilliefors 检验	接受	0.500	接受	0.389

2 定位故障的 PCA 建模

基于 PCA 分析的故障诊断方法主要包括稳态模型建立、主元计算和故障检测诊断等内容,具体流程如图 2 所示。

X 表示原始数据,其中 n 行代表了 n 组数据, m 列代表了每行有 m 个误差特征值,如式(1)所示:

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nm} \end{bmatrix} \quad (1)$$

对其进行标准化处理,如式(2)所示:

$$\bar{\mathbf{X}} = \frac{(\mathbf{X} - \mathbf{u})}{std(\mathbf{X})} \quad (2)$$

式中, \mathbf{u} 表示均值向量, $std(\mathbf{X})$ 表示标准差向量, $\bar{\mathbf{X}}$ 表示标准化后的结果。

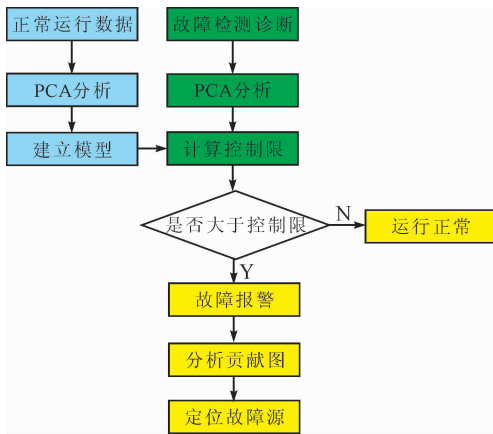


图 2 PCA 故障诊断流程图

Fig. 2 Flow chart of fault diagnosis with PCA

矩阵 $\bar{\mathbf{X}}$ 可以分解为式(3)的形式:

$$\bar{\mathbf{X}} = \mathbf{t}_1 \mathbf{p}_1^T + \mathbf{t}_2 \mathbf{p}_2^T + \cdots + \mathbf{t}_m \mathbf{p}_m^T = \sum_{i=1}^m \mathbf{t}_i \mathbf{p}_i^T \quad (3)$$

其中, $\mathbf{t}_i \in R^n$ 为主元得分向量, $\mathbf{p}_i \in R^m$ 为负载向量, 式(3)也可表示为:

$$\bar{\mathbf{X}} = \mathbf{TP}^T \quad (4)$$

在提取 \mathbf{t}_i 时要求其方差达到最大化。由于各个得分向量间是正交的, 所以对于任何 i 和 j , 当 $i \neq j$ 时应当满足 $\mathbf{t}_i^T \mathbf{t}_j = 0$ 。

若记 $\bar{\mathbf{X}}$ 的协方差矩阵为 Σ , 设 Σ 的特征值为 $\lambda_1, \lambda_2, \cdots, \lambda_m$, 而 $\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2, \cdots, \mathbf{p}_m$ 为 $\lambda_1, \lambda_2, \cdots, \lambda_m$ 相应的单位特征向量, 根据矩阵分解可得式(5):

$$\Sigma = \mathbf{P} \begin{bmatrix} \lambda_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \lambda_m \end{bmatrix} \mathbf{P}^T = \sum_{i=1}^m \lambda_i \mathbf{p}_i \mathbf{p}_i^T \quad (5)$$

式中 $\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2, \cdots, \mathbf{p}_m$ 为单位正交向量, 即有式(6):

$$\mathbf{p}_i^T \mathbf{p}_j = \begin{cases} 0 & i \neq j \\ 1 & i = j \end{cases} \quad (6)$$

将式(3)两侧同时右乘 \mathbf{p}_i , 则有:

$$\bar{\mathbf{X}} \mathbf{p}_i = \mathbf{t}_1 \mathbf{p}_1^T \mathbf{p}_i + \mathbf{t}_2 \mathbf{p}_2^T \mathbf{p}_i + \cdots + \mathbf{t}_i \mathbf{p}_i^T \mathbf{p}_i + \cdots + \mathbf{t}_m \mathbf{p}_m^T \mathbf{p}_i \quad (7)$$

结合式(6)有:

$$\bar{\mathbf{X}} \mathbf{p}_i = \mathbf{t}_i \quad (8)$$

由式(8)可以发现: 得分向量是矩阵 $\bar{\mathbf{X}}$ 在其相应的载荷方向上的投影。

为了便于后续统计检测分析, 将式(3)改写为式(9)形式:

$$\bar{\mathbf{X}} = \mathbf{t}_1 \mathbf{p}_1^T + \mathbf{t}_1 \mathbf{p}_1^T + \cdots + \mathbf{t}_l \mathbf{p}_l^T + \mathbf{t}_{l+1} \mathbf{p}_{l+1}^T + \cdots + \mathbf{t}_m \mathbf{p}_m^T \quad (9)$$

同时定义式(10)和式(11):

$$\hat{\mathbf{X}} = \sum_{i=1}^l \mathbf{t}_i \mathbf{p}_i^T = \hat{\mathbf{T}} \hat{\mathbf{P}}^T \quad (10)$$

$$\mathbf{E} = \sum_{i=l+1}^m \mathbf{t}_i \mathbf{p}_i^T = \tilde{\mathbf{T}} \tilde{\mathbf{P}}^T \quad (11)$$

其中, $\hat{\mathbf{T}}$ 为主元得分矩阵, $\hat{\mathbf{P}}$ 为主元负载矩阵, l 为所选取的主元个数, $\hat{\mathbf{X}}$ 表示主元模型值; \mathbf{E} 表示残差矩阵, $\tilde{\mathbf{T}}$ 为残差得分矩阵, $\tilde{\mathbf{P}}$ 为残差负载矩阵。

通常主元特征选择与样本协方差矩阵特征值密切相关, 定义某一主元特征值和总特征值的比值为这一主元对样本的贡献率(Cumulative Percent Variance, CPV), 如式(11):

$$CPV = 100 \left(\frac{\sum_{i=1}^l \lambda_i}{\sum_{i=1}^m \lambda_i} \right) \times 100\% \quad (12)$$

可根据累计贡献率的数值选择主元个数 l , 计算相应的控制统计量并以此判断数据是否出现异常, 诊断故障是否发生。

实现异常状态检验, 可在主元空间中对 Hotelling 统计量进行检测, 也可以在残差空间中建立平方预测误差(Squared Prediction Error, SPE)统计量进行统计检测。SPE 指标可以实现对具有多变量工业流程的检测, 表现出某一个时刻测量值相对于稳态时的偏离情况, 体现出隐藏于原始数据中的信息。当发生故障时, SPE 值会明显增加。SPE 的定义如式(13)所示:

$$SPE = \|\mathbf{E}\|^2 \quad (13)$$

当 $SPE \leq \delta^2$ 时, 认为系统运行正常; $SPE > \delta^2$ 时, 判定系统出现故障。其中 δ^2 表示 SPE 控制限, 计算如式(14):

$$\delta^2 = \theta_1 \left[\frac{c_\alpha \sqrt{2\theta_2 h_0^2}}{\theta_1} + 1 + \frac{\theta_2 h_0 (h_0 - 1)}{\theta_1^2} \right]^{1/h_0} \quad (14)$$

其中, 参数计算如下:

$$h_0 = 1 - \frac{2\theta_1 \theta_3}{3\theta_2} \quad (15)$$

$$\theta_i = \sum_{j=1+l}^m \lambda_j^i \quad (16)$$

其中 λ_j 是数据 $\bar{\mathbf{X}}$ 的协方差矩阵第 j 个特征值, c_α 是正态分布在检验水平 α 下的临界值。

控制限是判断故障是否发生的依据, 但不能判

断出哪个检测参数出现问题,还需要进一步确认故障源。贡献图是指将每个变量对 SPE 统计量的贡献计算出来并绘制成直方图,反映每个变量对统计模型稳定性的影响程度。利用贡献图可有效确定故障发生环节并进一步明确产生原因^[14-16]。

当 SPE 统计量超出 SPE 控制限后,第 i 个变量在第 j 时刻对 SPE 统计量的贡献率为:

$$SPE_{ij} = e_{ij}^2 = (x_{ij} - \hat{x}_{ij})^2 \quad (17)$$

第 i 个变量对 SPE 统计量的贡献值为:

$$CONTSPE_i = (x_i - \hat{x}_i)^2 \quad (18)$$

当故障发生时,拥有统计量贡献值最大的变量即被视为故障变量,其中 x_i 表示所有时刻内的叠加。

3 实验

3.1 定位故障建模与检测

实验设备为 4 开 4 色胶印机 HG58-4,印刷色序为 KCMY,故障现象发生于设备的实际生产、组装和调试过程。研究采集到 3 种常见的印刷机定位故障样本,主要针对纸张定位规矩,故障类型记录在表 2 中,包含了输纸系统中常见故障。A-C 组故障涉及了侧规、调整垫、螺丝和装配等关键部件,这也是印刷机输纸单元最容易出现故障且较难调节的机构,D 组数据为设备正常时的稳态数据。

表 2 印刷机纸张定位故障样本

Tab. 2 Fault samples in paper location

样本编号	实际故障发生原因
A	侧拉规拉力调节不当,侧规抬起时有左右晃动
B	侧规内部螺丝松动,抬起落下的时间周期不准
C	侧规零件内部磨损,导致本身产生过大振动
D	稳态数据,设备的输纸单元整体处于正常状态

幅面越大,所选取的标识数量就应该越多。例如海德堡对开机 CD102 在检测中用到多个标识;由于 HG58-4 胶印机的幅面较小,设置并检测 2 个标识即可,分别位于印张咬口左右两侧区域,如图 3 所示。

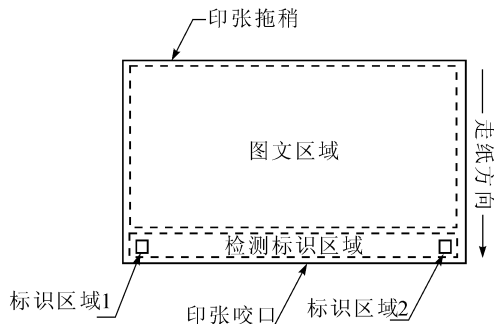


图 3 输纸标识位置示意图

Fig. 3 Position schematic diagram of feeding label

从每个标识中可获取印刷机轴向误差、周向误差两个量,一组输纸误差检测数据包包含 4 个控制变量,A-E 每组数据包包含 4 组变量,每个变量采集 100 幅样张即 100 个测试点。印刷机输纸单元的左右两侧分为传动面和操作面,传动面一侧是主要包含电机、带轮、减速器、传动齿轮等,操作面一侧部件相对较少,但往往包括侧规这一重要部分,因此印张左右误差值存在明显差异。

对采集到的数据按照式(2)进行标准化处理,按照式(3)~(11)进行计算,本研究选取 85% 为阈值进行分析。

利用正常状态数据 D 进行主元模型建立,在 Matlab 环境下进行相关程序的编写和调用。对于正常数据的主元分析结果如表 3 所示,其中记录了主元个数和累计贡献率之间的关系。当选取主元个数为 3 时,累计贡献率接近 90%,故选取前 3 个主元建立模型。

表 3 主元模型的累计贡献率

Tab. 3 Cumulative contribution rate by PCA model

主元号	特征值	累计贡献率/%
1	1.679	41.96
2	1.086	69.12
3	0.813	89.45
4	0.423	100.00

按式(14)计算相应的 SPE 控制限,在显著水平 α 为 0.01 时,SPE 控制限的值为 2.096;按式(17)计算样本 SPE 值,绘制 SPE 控制限和样本 SPE 曲线。图 4(a)所示为 D 组稳态数据 SPE 控制图,从中可以看出稳态数据中各个点都未超过 SPE 控制限。图 4(b)、图 4(c)和图 4(d)对应 3 组故障数据 A、B、C,观察发现 3 组数据中都存在若干 SPE 值大幅超过控制限,超出幅度在 10%~200% 之间,可知故障发生。

3.2 定位故障诊断与分析

上述结果说明 PCA 方法可以实现定位部件的故障检测,但若判断故障原因还需要结合主元得分图进行分析。通过主元得分图,可从原始检测变量中寻找出对于各类故障最为敏感的变量。

图 5 表示各个主元载荷图,变量编号 1~4 依次表示:图 3 中区域 1 周向输纸误差、区域 1 轴向输纸误差、区域 2 周向输纸误差、区域 2 轴向输纸误差。可从中了解主成分的构成:第 1、4 主元主要表征了轴向误差的特性,其中第 1 主元由同向的轴向误差数值组成,第 4 主元由反向的轴向误差数值组成;第

2、3 主元表征了周向误差的特性,其中第 2 主元由同向的周向误差数值组成,第 3 主元由反向的周向误差数值组成。

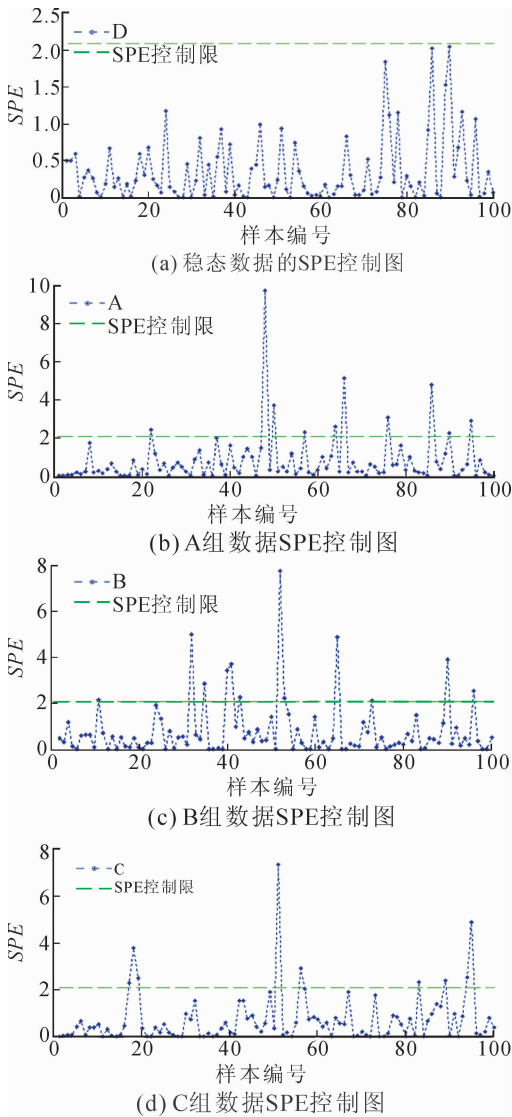


图 4 输纸样本的 SPE 控制图

Fig. 4 SPE control chart of feeding paper data

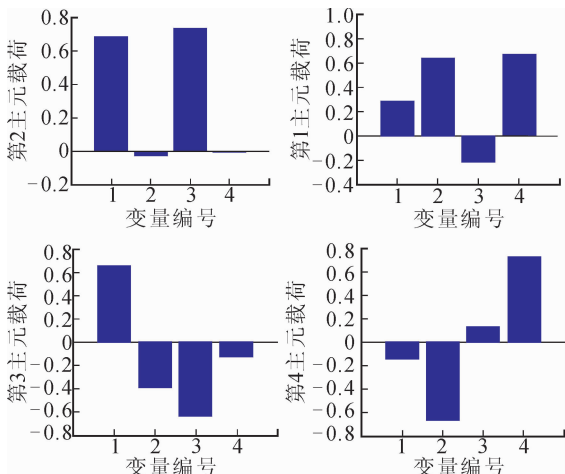


图 5 主元载荷图

Fig. 5 PCA loading plot of principal component

1) 正常状态

当输纸单元的纸张定位正常时,随机选取样本中的 3 个点进行分析,其主元的得分如图 6 所示,可见其中 4 个主元得分较为均匀,没有某个主成分表现出主导地位。说明各个原始检测变量都处于较为平稳的状态,这与故障状态产生了明显对比。

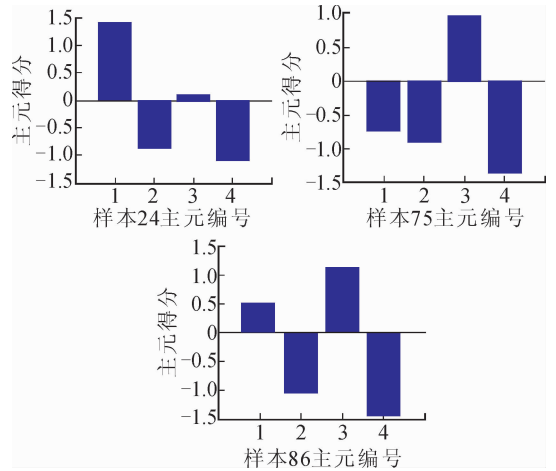


图 6 正常状态样本的得分图

Fig. 6 Score chart of fault point in sample A

2) 侧规拉力调节不当

侧规是输纸单元实现纸张轴向定位的核心部件,当其拉力调节不当时,会出现纸张定位时拉力不足或拉力过度,在惯性力的作用下,导致侧规抬起时出现纸张晃动,以左右摆动为主。

图 4(b)为故障 A 的 SPE 控制图,其中存在故障点 5 个,选取超出控制限幅度较大的故障点 3 个进行分析,编号为 48、66、86,其主元得分图如图 7 所示:故障点分布趋势一致,第 4 主元占据主导地位,结合图 5 可知主元 4 中以轴向反向偏差为主,且第 1 主元数值正常,因此判断这种轴向偏差是由一定的纸张倾斜导致。

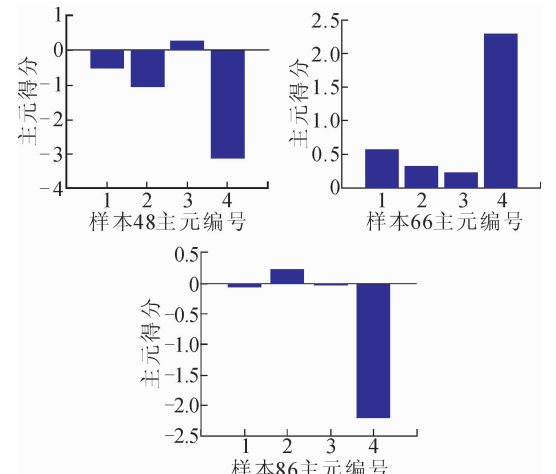


图 7 样本 A 故障点的得分图

Fig. 7 Score chart of fault point in sample A

拉力不当会使纸张在接近侧规区域产生一定的位移,但由于其影响较小,尚未产生稳定的轴向异常现象。

3) 侧规内部螺丝松动

故障 B 表示侧规螺丝松动,由于螺丝松动会改变侧规的工作周期,使得其与前规无法准确配合,在输纸的时候与纸张无法正常交接,引发纸张早到、晚到、双张、卡纸等现象,严重影响生产的正常进行。图 4(c)为故障 B 的 SPE 控制图,存在 6 个故障点,对超过幅度较大的 4 个故障点进行分析,编号为 32、52、65、90,得分图如图 8 所示。

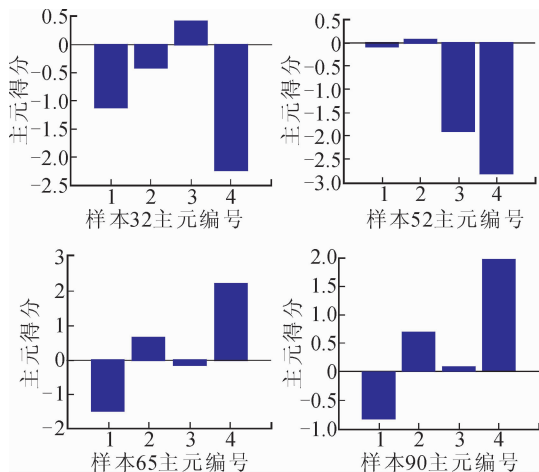


图 8 样本 B 故障点的得分图

Fig. 8 Score chart of fault point in sample B

在 B 类故障的 4 个明显故障点得分图中,除了第 4 主元依然占据主导地位外,故障点中第 1 主元数值大幅上升且为负值,它表示印张整体在轴向上朝着了一侧发生了明显恒定的误差量。分析故障机理可知:内部螺丝松动导致侧规工作周期不再正常,侧规抬起落下时存在周期性振动,使纸张在轴向受到惯性力并产生较大幅度位移;螺丝松动也会导致与前规部件配合不准,从而在一定程度上影响周向精度,例如样本 52 中第 3 主元偏高,数据分析结果与故障原因一致。

4) 定位机构振动过大

故障 C 表示印刷机侧规由于零件磨损发生振动时的输纸状态,该组数据来源于旧设备维修过程中。由于印刷机工作时整机也存在振动,这类故障依靠人工通常难以准确判断,通过偏差统计过程控制计算可检测故障,故障点编号为 18、51、95。对故障点进行贡献值分析,其结果如图 9 所示,可以看到三幅图中,第 4 主元依然占据主导地位,但第 2、3 主元得分和比例都大幅上升,说明周向误差成分对主

元起到了很大影响作用。

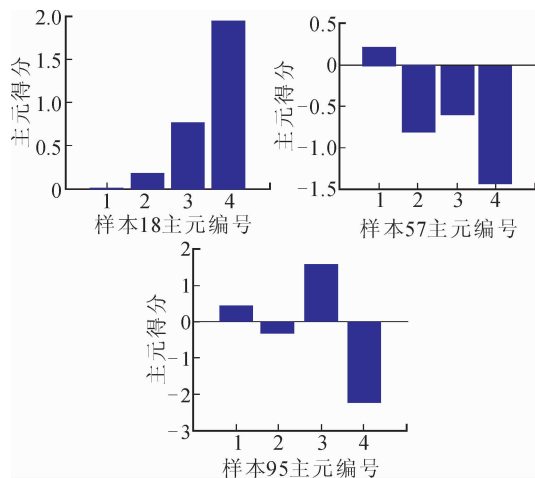


图 9 样本 C 故障点的得分图

Fig. 9 Score chart of fault point in sample C

侧规长期工作导致零件磨损,工作时内部存在振动现象,变量 4 依然占据主导地位,而振动对纸张的影响会使得定位全面发生误差,因此周向和轴向都会产生误差,轴向偏差大于周向误差,由于纸张幅面较大,所以在检测区域 1 影响相对较小,该类故障几乎不受检变量 1 影响。

3.3 实例检测

选取了一组故障未知样本验证所建立模型正确性。将输纸误差经过标准化处理后,输入所建立的稳态 PCA 模型,计算 SPE 值如图 10 所示,存在超过控制限的点,可确定故障发生。

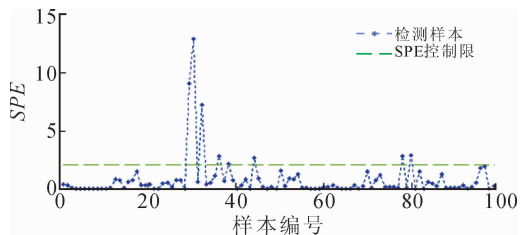


图 10 检测样本的 SPE 控制图

Fig. 10 SPE control chart of test sample

选取故障点 30、31、33 进行主元分析,结果如图 11 所示;第 4 主元占据主导地位,其余主元得分均匀,可知故障导致轴向误差占主导地位,故障源接近操作面一侧,推断故障以侧规拉力调节不当为主,为 A 类故障;由主元载荷分布可知,样本周向不存在明显故障。

按照检测结果对侧规的拉力进行校准检查,发现侧规内部拉簧、压簧等部件由于老化,导致拉力不足,故纸张没有准确到位。按照诊断结果调整拉簧后,可将设备重新恢复正常。

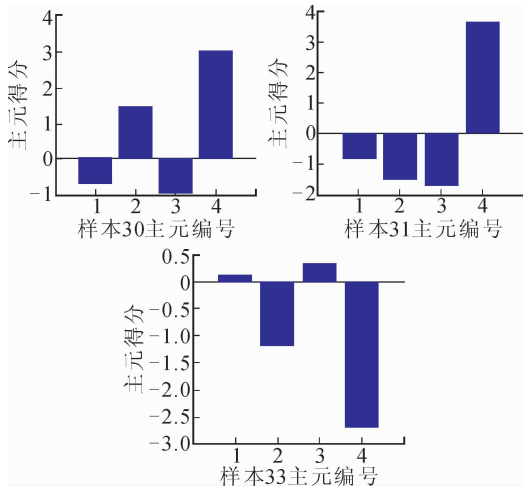


图 11 检测样本故障点的得分图

Fig. 11 Score chart of fault point in test sample

4 结 论

本文提出了基于印刷机误差分析的定位故障诊断方法。首先,构建了基于图象处理的印刷机精度检测系统,获取了印刷机的连续机械定位误差数据。其次,引入主成分分析方法对稳态数据进行建模,结合 SPE 控制限从故障数据中故障点,实现了印刷机输纸单元的故障检测。最后,针对纸张定位故障特点,结合主元得分图、SPE 贡献图对常见故障样本进行机理分析和规律解释。主要结论有:

1) 主元模型对于纸张定位故障有着很好的区分效果,结合 SPE 控制限,成功的检测出了故障样本;

2) 可以利用得分图判断影响故障的关键主元,结合载荷向量判断故障源。

通过工程实践应用说明了方法的正确性。相关研究对印刷机输纸单元的制造、装配、维修、调节具有重要指导作用。

参考文献:

- [1] LUNDSTRÖM J, VERIKAS A, TULLANDER U, et al. Assessing, exploring, and monitoring quality of off-set colour prints [J]. *Measurement*, 2013, 46(4): 1427-1441.
- [2] 张海燕. 印刷机设计 [M]. 北京: 印刷工业出版社, 2006: 15-40.
- [3] DESTREE T M, ORESICK P. 胶印故障排除指南 [M]. 北京: 印刷工业出版社, 2008: 199-210.
- [4] GRANT P W, HARRIS P M, MOSELEY L G. Fault diagnosis for industrial printers using case-based reasoning [J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 1996, 9(2): 163-173.

- [5] 单张纸平版印刷机 四开及对开幅面: GB/T 3264-2013 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2014: 1-9.
- [6] 王跃宗, 刘京会, 李德胜. 套准偏差自动检测方法 [J]. *机械工程学报*, 2009, 45(12): 242-246.
WANG Yuezong, LIU Jinghui, LI Desheng. Automatic detected method of register for color printing [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2009, 45(12): 242-246.
- [7] 何凡, 周见勇. 平版印刷机套印精度检测标准研究 [J]. *印刷质量与标准化*, 2013, (11): 60-64.
- [8] 侯和平, 郭凯铭, 刘凯, 等. 基于 Radon 变换与灰度投影积分极值方法的矩形检测 [J]. *西安理工大学学报*, 2014, 30(2): 133-138.
HOU Heping, GUO Kaiming, LIU Kai, et al. Rectangle detection based on Radon transform and gray projection integral extreme value method [J]. *Journal of Xi'an University of Technology*, 2014, 30(2): 133-138.
- [9] MACGREGOR J F, KOURTI T. Statistical process control of multivariate process [J]. *Control Engineering Practice*, 1995, 3(3): 403-414.
- [10] KRESTA J V, MACGREGOR J F, MARLIN T E. Multivariate statistical monitoring of process operating performance [J]. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 1991, 69(1): 35-47.
- [11] KOURTI, T. Application of latent variable methods to process control and multivariate statistical process control in industry [J]. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 2005, 19(4): 213-246.
- [12] 崔建国, 严雪, 蒲雪萍, 等. 基于动态 PCA 与改进 SVM 的航空发动机故障诊断 [J]. *振动、测试与诊断*, 2015, 35(1): 94-99.
- [13] LILLIEFORS H W. On the Kolmogorov-Smirnov test for the exponential distribution with mean unknown [J]. *Journal of the American Statistical Association*, 1969, 64(325): 387-389.
- [14] 郑新. 基于 EMD 与 PCA 分析的滚动轴承故障特征研究 [J]. *机械传动*, 2016, (1): 54-58.
ZHENG Xin. Fault feature research of rolling bearing based on empirical mode decomposition and principle component analysis [J]. *Journal of Mechanical Transmission*, 2016, (1): 54-58.
- [15] JACKSON J E, MUDHOLKAR, G S. Control procedures for residuals associated with principal component analysis [J]. *Technometrics*, 1979, 21(3): 341-349.
- [16] HU Zhikun, CHEN Zhiwen, GUI Weihua, et al. Adaptive PCA based fault diagnosis scheme in imperial smelting process [C] // 2013 10th IEEE International Conference on Control and Automation (ICCA), Hangzhou, China, 2013: 1447-1453.