

制动主缸补偿孔位置检测误差分析与补偿

姜涛, 张桂林, 高俊鹏

引用本文:

姜涛, 张桂林, 高俊鹏. 制动主缸补偿孔位置检测误差分析与补偿[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(5): 1094–1100.

JIANG Tao, ZHANG Gui-lin, GAO Jun-peng. Error analysis and compensation in position measurement of brake master cylinder compensation hole[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(5): 1094–1100.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/OPE.20202805.1094>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

转台-摆头式五轴机床几何误差测量及辨识

Measurement and identification of geometric errors for turntable-tilting head type five-axis machine tools

光学精密工程. 2018, 26(11): 2684–2694 <https://doi.org/10.3788/OPE.20182611.2684>

在机测量激光测头位姿的线性标定

Linear calibration for on-machine measurement of laser probe pose

光学精密工程. 2016, 24(4): 681–689 <https://doi.org/10.3788/OPE.20162404.0681>

转台误差对数字天顶仪轴系误差的影响

Influence of turntable error on axis error in digital zenith camera

光学精密工程. 2015, 23(11): 3090–3096 <https://doi.org/10.3788/OPE.20152311.3090>

基于后验误差拟合的角位移测量误差补偿

Error-compensation of angular displacement measurement based on posteriori error fitting

光学精密工程. 2019, 27(1): 51–57 <https://doi.org/10.3788/OPE.20192701.0051>

飞秒激光跟踪仪光轴与竖轴同轴度的标定

Calibration for coaxiality of optical axis and vertical rotary shaft in femtosecond laser tracker

光学精密工程. 2016, 24(11): 2651–2657 <https://doi.org/10.3788/OPE.20162411.2651>

文章编号 1004-924X(2020)05-1094-07

制动主缸补偿孔位置检测误差分析与补偿

姜 涛, 张桂林*, 高俊鹏

(长春理工大学, 吉林 长春 130022)

摘要:针对当前制动主缸补偿孔检测效率低、精度低、成本高等技术现状,提出了一种集光、机、电于一体的高性能精密检测系统,分析了该系统所涉及的补偿孔几何中心位置检测误差并进行补偿。通过对误差来源的分析,揭示了制动主缸补偿孔位置检测过程的误差解算方法。基于该解算方法,利用增量式误差补偿方法构建了误差补偿模型,并进行补偿孔检测与误差补偿实验。实验结果表明,系统竖轴误差对补偿孔直径检测数据的影响较小,而对补偿孔位置检测数据的影响则由补偿孔与基准面的相对位置决定。补偿孔与基准面距离越远,误差越大。实验数据显示,在型号为 ZDZG-20.64 的被试件中,被测补偿孔位置精度分别提高 0.05 mm 和 0.254 mm;在型号为 ZDZG-22.2 的被试件中,被测补偿孔位置精度分别提高 0.044 mm 和 0.072 mm。该误差模型及补偿方法能够有效提高制动主缸补偿孔的检测精度。

关键词:光电测量;制动主缸;补偿孔位置;竖轴误差;误差补偿

中图分类号: TH39; U463.51 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20202805.1094

Error analysis and compensation in position measurement of brake master cylinder compensation hole

JIANG Tao, ZHANG Gui-lin*, GAO Jun-peng

(Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

* Corresponding author, E-mail: guilin512400@126.com

Abstract: To address the problems regarding low efficiency, low accuracy, and high cost of brake master cylinder compensation hole measurement, a high-performance precision detection scheme based on optomechatronics was developed. After analyzing the error sources, an equation for error calculation with regard to brake master cylinder compensation hole measurement was derived. The analysis of the position measurement error led to the deduction of an incremental error compensation model, and an experiment was conducted for validation of the model. The experimental results show that the influence of vertical axis error on the measurement data for compensation hole diameter is minimal; however, it has significant influence on the position measurement data. The results show that the position accuracy of the compensation hole in ZDZG-20.64 standard part is improved by 0.05 mm and 0.254 mm. For ZDZG-22.2 standard part, the position accuracy is improved by 0.044 mm and 0.072 mm. The error model and compensation method can effectively improve the position detection accuracy of the brake master cylinder compensation hole.

收稿日期:2019-10-22;修订日期:2019-11-26.

基金项目:吉林省科技厅重点科技支撑计划资助项目(No. 20080351)

Key words: optoelectronic measurement; brake master cylinder; vertical axis error; error analysis; incremental error compensation

1 引言

作为汽车制动系统的重要组成部分,制动主缸是汽车制动技术的重点研究器件之一。制动主缸补偿孔以横孔形式存在于制动主缸内,是油液在制动腔与储液室流动的通道。其作用是在解除制动时,向制动腔补偿制动液或把多余制动液返回储液室。其质量是关系制动主缸性能的关键^[1],一般情况下,补偿孔加工质量指标包括位置、圆度及直径、倒角等^[2]。补偿孔检测方法主要有接触测量和非接触测量两种。接触测量包括坐标测量法、震荡扫描测量法、电接触测量法等。非接触测量主要包括光电测量法和气动测量仪^[3-5],其中光电测量法,特别是利用结构光进行图像成像是目前制动主缸补偿孔检测的主要方法。

传统的制动主缸补偿孔光电检测研究,主要集中在补偿孔圆度、直径、倒角等的成像质量上。Duran 提出了一种通过向深孔内表面发射激光光环,根据内壁图像解析内壁形貌特征从而判断内表面质量^[6]。鲁少辉等人在此基础上提出了一种深孔内表面全景视觉检测方法,实现了深孔内表面从点到面的检测^[7]。丁超等人针对深孔视觉成像过程中的图像几何畸变进行校正,使图像检测更为准确^[8]。在制动主缸补偿孔的实际检测过程中,补偿孔间的位置关系、补偿孔与制动主缸的位置关系是制动主缸废品率的关键因素。在高端汽车领域,制动主缸补偿孔的位置加工精度要求高达 0.01 mm,因此补偿孔位置的高精度检测成为当前制动主缸补偿孔检测的迫切需求。

本文依托自研汽车制动主缸补偿孔光电检测台,分析了补偿孔位置检测误差构成,解析了补偿孔检测定位误差,构建了补偿孔增量式误差补偿模型,并经过实测实验,最终获得了较为理想的补偿孔位置检测数据。

2 检测原理

2.1 系统结构

如图 1 所示,制动主缸补偿孔检测系统主要

由计算机图像处理模块、光电检测模块和位移检测模块 3 部分组成。其中,计算机处理模块包括显示器、键盘、工控机及打印机等;光电检测模块包括被测样件、夹具、内窥镜组件及 CCD、旋转伺服电机和竖轴伺服电机等;位移检测模块包括光栅尺组件、刚性导光臂、导向立柱和同步齿形带等。

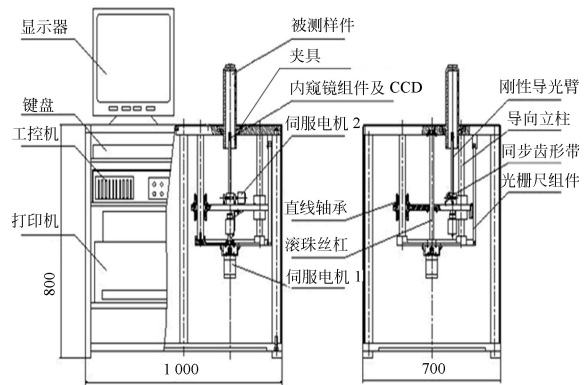


图 1 制动主缸补偿孔测量系统结构示意图

Fig. 1 Sketch of brake master cylinder compensation hole measuring system

检测时,被测件安装在定位夹具上,并使被测件的定位面与定位夹具靠紧,旋转伺服电机带动被测制动主缸及夹具进行旋转运动,竖轴伺服电机驱动内窥镜及 CCD 组件在制动主缸孔内垂直移动,CCD 图像以螺旋状上升。在移动过程中,通过显示器实时观测补偿孔位置。当到达测量点时,通过图像处理技术对补偿孔直径、圆度、倒角等参数进行检测,并利用光栅尺获取补偿孔位置信息,从而实现制动主缸补偿孔的非接触测量。

2.2 误差来源

当补偿孔图像在 CCD 相机中清晰地呈现时,检测系统进行图像处理,从而解析得到补偿孔内孔直径、倒角等数据;同时,光栅传感器以被检制动主缸基准孔心为零位,反馈测得补偿孔相对于零位的位移信息,并传送给计算机作为补偿孔的位置信息,进而完成制动主缸补偿孔的检测。在检测过程中,补偿孔位置信息来源于随内窥镜竖轴运动的光栅传感器位移量,因此在检测过程中补偿孔的位置误差主要来自于竖轴方向^[10]。

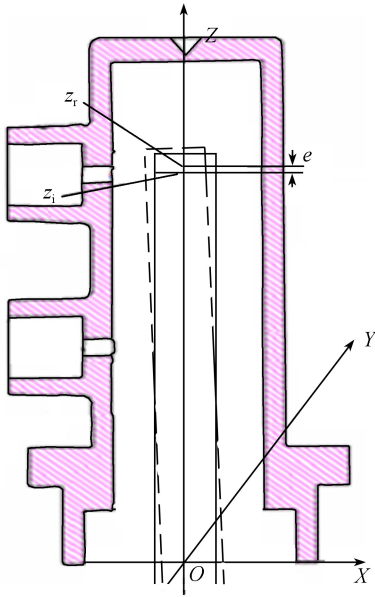


图 2 补偿孔位置误差示意图

Fig. 2 Schematic diagram of position error for compensation hole

以内窥镜为观察对象,以制动主缸轴线为坐标原点建立直角坐标系,如图 2 所示。内窥镜从 O 点开始在 Z 轴方向进行轴向移动的同时制动主缸在 XOY 平面旋转运动,直至到达补偿测量点 z_i 。由于制造精度、安装误差的存在,传动机构存在一定间隙,内窥镜实际测量点位置为 z_r ,二者的差值 $e = z_i - z_r$,即补偿孔位置误差。

3 定位误差

3.1 误差分析

当内窥镜轴向进给时,移动副由内窥镜(滑块)和导轨构成,如图 3 所示。以滑块为参考坐标系,当移动副沿 Z 轴移动 z 后,转角误差^[8-9]包含:绕 Z 轴转角 $\epsilon_z(z)$ 、绕 X 轴转角 $\epsilon_x(z)$ 和绕 Y 轴转角 $\epsilon_y(z)$ 。

根据小误差假设,由转角误差引起的综合变换矩阵为^[11]:

$$\mathbf{T}_R = \begin{bmatrix} 1 & -\epsilon_z(z) & \epsilon_y(z) & 0 \\ \epsilon_z(z) & 1 & -\epsilon_x(z) & 0 \\ -\epsilon_y(z) & \epsilon_x(z) & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

又由于移动副在 X, Y, Z 方向存在移动误差,因此当移动副沿 Z 轴移动 z 后,新坐标系到

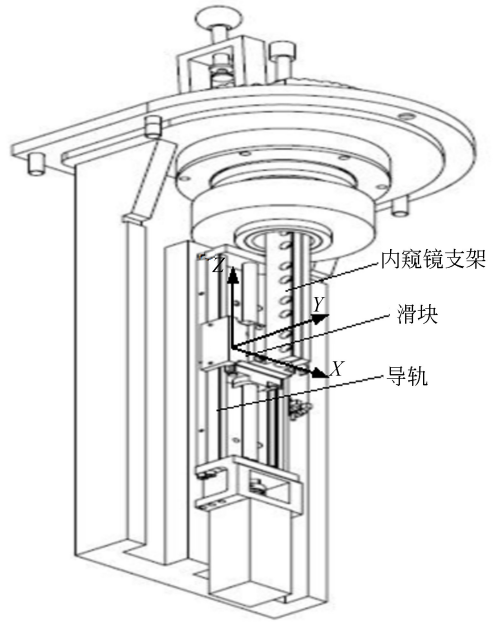


图 3 竖轴误差简图

Fig. 3 Error diagram of vertical axis

光栅尺零点坐标系的齐次变换矩阵为^[12]:

$$\mathbf{T}_R = \begin{bmatrix} 1 & -\epsilon_z(z) & \epsilon_y(z) & \Gamma_{x1}(z) \\ \epsilon_z(z) & 1 & -\epsilon_x(z) & \Gamma_{y1}(z) \\ -\epsilon_y(z) & \epsilon_x(z) & 1 & z + \Delta_{z1}(z) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中: $\Delta_{z1}(z)$ 为 Z 轴方向误差, $\Gamma_{x1}(z)$ 为 X 轴方向误差, $\Gamma_{y1}(z)$ 为 Y 轴方向误差。

假定补偿孔 1 的位置坐标为 (x_1, y_1, z_1) , 当内窥镜从补偿孔 1 向补偿孔 2 移动时,由于误差的存在,以补偿孔 1 位置为原点的坐标系将发生变化,根据式(2)有补偿孔 1 和补偿孔 2 的矩阵关系为:

$$\mathbf{T}_{12} = \begin{bmatrix} 1 & -\epsilon_z(z) & \epsilon_y(z) & \delta_{x1}(z) \\ \epsilon_z(z) & 1 & -\epsilon_x(z) & \delta_{y1}(z) \\ -\epsilon_y(z) & \epsilon_x(z) & 1 & z + \delta_{z1}(z) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中 $\delta_x(z), \delta_y(z), \delta_z(z)$ 为运动副在 X, Y, Z 轴的直线误差。

根据齐次坐标变换原理,有:

$$\mathbf{T}_R = \mathbf{T}_1 \cdot \mathbf{T}_{12} \cdot \mathbf{T}_2, \quad (4)$$

式中: \mathbf{T}_1 为补偿孔 1 相对基准坐标系的转换矩阵, \mathbf{T}_2 为内窥镜相对补偿孔 1 动坐标系转换矩阵。联立式(1)~式(3)可得:

$$\begin{cases} \Gamma_{x_1}(z) = \delta_x(z) + \epsilon_z(z) \cdot y_1 - \epsilon_y(z) \cdot z_1 \\ \Gamma_{y_1}(z) = \epsilon_x(z) \cdot z_1 - \epsilon_z(z) \cdot x_1 - \delta_y(z) \\ \Delta_{z_1}(z) = \delta_z(z) + \epsilon_y(z) \cdot z_1 - \epsilon_x(z) \cdot y_1 \end{cases} \quad (5)$$

同理,若测得补偿孔 2 位置为 (x_2, y_2, z_2) ,基准坐标为 (x_0, y_0, z_0) ,可得 $\Gamma_{x_2}(z), \Gamma_{y_2}(z), \Delta_{z_2}(z), \Gamma_{x_0}(z), \Gamma_{y_0}(z), \Delta_{z_0}(z)$ 与式(4)联立可得 9 个方程。选取其中 6 个方程用于求解,则有:

$$\begin{cases} \Gamma_{x_1}(z) = \delta_x(z) + \epsilon_z(z) \cdot y_1 - \epsilon_y(z) \cdot z_1 \\ \Gamma_{y_1}(z) = \epsilon_x(z) \cdot z_1 - \epsilon_z(z) \cdot x_1 - \delta_y(z) \\ \Delta_{z_1}(z) = \delta_z(z) + \epsilon_y(z) \cdot z_1 - \epsilon_x(z) \cdot y_1 \\ \Gamma_{x_2}(z) = \delta_x(z) + \epsilon_z(z) \cdot y_2 - \epsilon_y(z) \cdot z_2 \\ \Gamma_{y_2}(z) = \epsilon_x(z) \cdot z_2 - \epsilon_z(z) \cdot x_2 - \delta_y(z) \\ \Gamma_{x_0}(z) = \delta_x(z) + \epsilon_z(z) \cdot y_0 - \epsilon_y(z) \cdot z_0 \end{cases}$$

令:

$$\begin{aligned} &\xi_z(z) = \\ &[\Gamma_{x_1}(z) \quad \Gamma_{y_1}(z) \quad \Delta_{z_1}(z) \quad \Gamma_{x_2}(z) \quad \Gamma_{y_2}(z) \quad \Gamma_{x_0}(z)]^T, \\ &\lambda_z = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & -z_1 & y_1 \\ 0 & -1 & 0 & z_1 & 0 & -x_1 \\ 0 & 0 & 1 & -y_1 & -z_1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & -z_2 & y_2 \\ 0 & -1 & 0 & -z_2 & 0 & -x_2 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & z_0 & y_0 \end{bmatrix}, \end{aligned}$$

$$\Delta_z(z) = [\delta_x(z) \quad \delta_y(z) \quad \delta_z(z) \quad \epsilon_x(z) \quad \epsilon_y(z) \quad \epsilon_z(z)]^T.$$

式(5)可用 $\xi_z(z) = \lambda_z \cdot \Delta_z(z)$ 表示。由非齐次方程求解可知,当 λ_z 可逆时, $\Delta_z(z)$ 有且只有一组解,令 $y_1 = x_1 = z_2 = z_0 = y_0 = 0$,解得:

$$\begin{cases} \delta_x(z) = \Delta_{z_0}(z) \\ \delta_y(z) = \Gamma_{y_2}(z) - \frac{x_2}{y_2} [\Delta_{z_3}(z) - \Delta_{z_2}(z)] \\ \delta_z(z) = \Gamma_{z_1}(z) \\ \epsilon_x(z) = \frac{\Gamma_{y_2}(z) - \Gamma_{y_1}(z)}{z_1} - \frac{x_2}{z_1 \cdot y_2} [\Delta_{z_0}(z) - \Delta_{z_2}(z)] \\ \epsilon_y(z) = \frac{\Delta_{z_1}(z) - \Delta_{z_0}(z)}{z_1} \\ \epsilon_z(z) = \frac{\Delta_{z_0}(z) - \Delta_{z_2}(z)}{y_2} \end{cases} \quad (6)$$

该解即为内窥镜竖轴运动产生的 6 项基本误差值。

3.2 误差补偿原理

为获得补偿孔准确位置,需要对误差进行补

偿,其原理如图 4 所示。利用误差模型作为前馈系统,通过光栅尺将当前位置信息与移动位移信息进行解析后与目标位置指令做叠加运算,并将运算结果作为驱动控制系统输入量,实现前瞻性补偿。

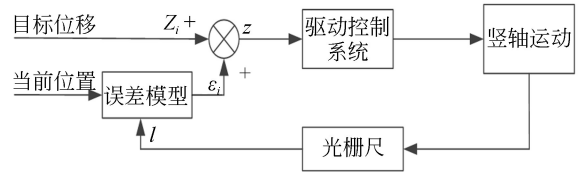


图 4 补偿孔位置误差补偿原理

Fig. 4 Principle for position error compensation of compensation hole

由式(6)可知,系统误差具有线性特征,利用插值原理,有:

$$z = \frac{\epsilon_{i+1} - \epsilon_i}{Z_{i+1} - Z_i} \cdot l + \frac{\epsilon_i \cdot Z_{i+1} - \epsilon_{i+1} \cdot Z_i}{Z_{i+1} - Z_i} \quad (7)$$

式中: Z_i, Z_{i+1} 为基点到极限之间节点位置, $\epsilon_i, \epsilon_{i+1}$ 为对应节点误差。

若测得内窥镜在正方向上任意点位置为 Z_a ,从该位置运动到目标位置 Z_b ,存在误差:

$$\begin{cases} \epsilon_a = \frac{\epsilon_{i+1} \cdot (Z_a - Z_i) - \epsilon_i \cdot (Z_{i+1} - Z_a)}{Z_{i+1} - Z_i} \\ \epsilon_b = \frac{\epsilon_{j+1} \cdot (Z_b - Z_j) - \epsilon_j \cdot (Z_{j+1} - Z_b)}{Z_{j+1} - Z_j} \end{cases} \quad (8)$$

则从当前位置移动到目标位置时,新增误差为: $\epsilon' = \epsilon_b - \epsilon_a$ 。当 $i = j$ 时,可得误差模型:

$$\epsilon' = \frac{(\epsilon_{i+1} + \epsilon_i) \cdot (Z_b - Z_a)}{Z_{i+1} - Z_i} \quad (9)$$

4 实验及分析

4.1 误差补偿实验

基于上述误差补偿原理,以制动主缸端面为基准点,制动主缸盲孔总长为正极限,光栅尺绝对零点为负极限,在基准点和正负极限之间设置若干位置节点 Z_i, Z_{-i} ,使内窥镜定点移动。通过光栅尺读取内窥镜当前位置及移动距离 l 并作为误差模型输入,通过误差模型获得当前误差 ϵ_i ,将该误差与目标位置 Z_i 叠加后作为驱动控制系统的控制量 z ,实现误差补偿。根据 CCD 最佳视场设

置竖轴 Z 等分步长 5 mm, 并测出节点误差, 构建增量式误差模型为:

$$\begin{cases} z = -0.2603l + 12.8349 & [20, 25] \\ z = -0.1169l - 20.4461 & [15, 20] \\ z = -0.1317l + 15.5479 & [10, 15] \\ z = -1.1456l - 28.3208 & [5, 10] \\ z = -0.0391l - 11.3321 & [0, 5] \\ z = -0.2148l - 8.7930 & [-5, 0] \\ z = -1.0863l - 3.8121 & [-10, -5] \\ z = -0.0623l - 3.8121 & [-15, -10] \\ z = -0.0391l - 3.5370 & [-20, -15] \\ z = -0.7856l + 11.7939 & [-25, -20] \end{cases}$$

为使 CCD 成像能够覆盖模型节点, 避免节点与视场边界重合, 设置误差测试点与误差模型节点位置相异, 以 5.5 mm 为测试步长, 进行补偿前后的比较, 由此得到补偿前后的误差关系曲线, 如图 5 所示。

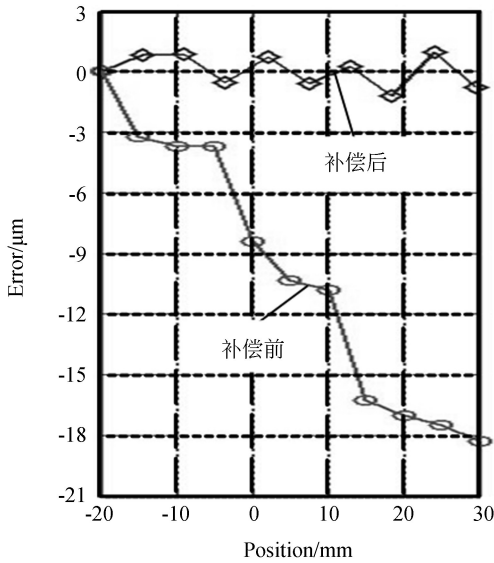


图 5 补偿前后的误差曲线

Fig. 5 Error curves before and after compensation

由补偿前后拟合曲线知: 相比于误差补偿前, 补偿后误差大幅减小, 且补偿后误差数据均在零线上下跳动。

4.2 实验结果分析

针对上述补偿方法, 对如图 6 所示同型号不同尺寸的两个系列制动主缸进行实验检测。补偿孔成像如图 7 所示。制动主缸补偿孔标定及实验数据如表 1 所示。

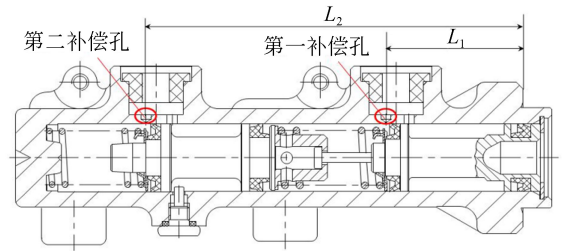


图 6 制动主缸结构

Fig. 6 Structural diagram of brake master cylinder

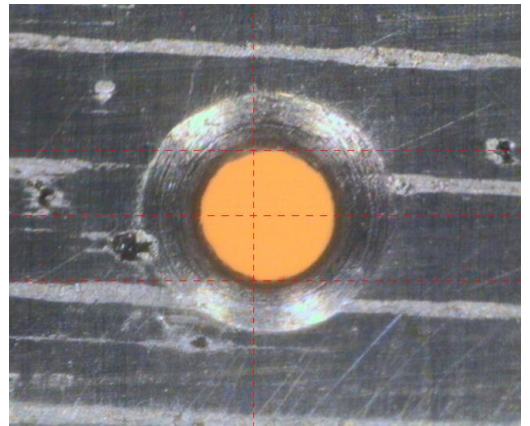


图 7 补偿孔成像图片

Fig. 7 Image of brake master cylinder compensation hole

表 1 制动主缸补偿孔测量实验数据

Tab. 1 Detection data of brake main cylinder compensation hole (mm)

检测项目		ZDZG-20.64 (零件一)	ZDZG-22.2 (零件二)
标定	补偿孔① 直径	0.7±0.125	0.7±0.125
	样品 位置	3.50±0.1	71.03±0.1
数据	补偿孔② 直径	0.7±0.125	0.7±0.125
	位置	12.55±0.1	85.19±0.1
补偿前数	补偿孔① 直径	0.674	0.675
	位置	3.560	71.130
据	补偿孔② 直径	0.711	0.708
	位置	12.354	84.070
补偿后数	补偿孔① 直径	0.674	0.675
	位置	3.510	71.086
据	补偿孔② 直径	0.711	0.708
	位置	12.608	85.142

由表1可知:

(1)针对制动主缸标准样件补偿孔①和补偿孔②的直径数据,补偿孔①、②补偿孔直径在实施误差补偿前后分别为0.674,0.675 mm,补偿前后实际检测数据大小均相同,可见系统竖轴误差存在对补偿孔直径尺寸的检测结果影响较小。

(2)针对不同尺寸制动主缸标准样件补偿孔①位置进行直接测量,测得补偿孔①在零件一中位置为3.560 mm处,在零件二中位置为71.130 mm处,而零件一标定位置为 (3.50 ± 0.1) mm,零件二标定位置为 (71.03 ± 0.1) mm,可见采用直接测量存在测量误差。

(3)针对不同尺寸制动主缸标准样件补偿孔②位置进行直接测量,测得补偿孔②在零件一中位置为12.354 mm处,在零件二中位置为84.070 mm处,该项检测数据已经超出公差范围。对比零件一和零件二补偿孔②标定位置,零件一为 (12.55 ± 0.1) mm,零件二为 (85.19 ± 0.1) mm,可知补偿孔与基准面距离越大,误差越大。

(4)对比零件一和零件二直接测量数据,除零件一补偿孔①在误差允许范围内,其余测量值均存在较大误差。综合两零件测量误差与各自补偿孔标定位置,可知系统测量误差不仅与补偿孔位置有关,还与内窥镜移动距离相关。

(5)对比误差补偿后数据,补偿孔①在零件一中的位置为3.510 mm,在零件二中位置为71.086 mm;补偿孔②在零件一中位置为12.608 mm,在零件二中位置为85.142 mm。相对补偿前,精度分别提高了0.05,0.044,0.254,0.072 mm。测量数据均在标定数据公差范围内,说明本文研究的误差补偿方法可以有效地降低试验样机的误差,从而提高了试验样机的检测精度。

5 结论

本文基于自研汽车制动主缸补偿孔光电检测装置理论分析了检测误差,根据系统误差特性提出了增量式误差补偿方法,并进行补偿孔检测实验。对两个不同尺寸制动主缸标准样件的补偿孔进行误差补偿,实验数据显示,在零件一中补偿孔①、补偿孔②位置精度分别提高0.05 mm和0.254 mm;在零件二中补偿孔①、补偿孔②位置精度分别提高0.044 mm和0.072 mm。实验结果验证了系统误差分析及补偿方法的合理性,表明系统竖轴误差对补偿孔直径检测数据的影响极小,而竖轴误差对补偿孔位置检测数据的影响则由补偿孔与基准面的相对位置决定,补偿孔与基准面位置越远,误差越大。

参考文献:

[1] XU Z Q. Talking about the automobile braking system [J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, 274: 012141.

[2] ANTONIO T, ENRICO G, MAURO V, et al.. Passenger car active braking system; pressure control design and experimental results (part II) [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 2018, 232(5): 786-798.

[3] 高俊鹏,姜涛,张桂林,等. 汽车制动主缸补偿孔形位尺寸检测双远心光学系统研究 [J]. *计量学报*, 2017(3): 262-266.

GAO J P, JIANG T, ZHANG G L, et al.. Research on double telecentric optical system for the form and position detection of automobile brake cylinder compensation hole [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2017(3): 262-266. (in Chinese)

[4] 董传宇. 汽车液压制动主缸缸体补偿孔检测仪的研

究 [D]. 长春: 长春理工大学, 2015.

DONG CH Y. *Research on Compensating Hole Detector of Automobile Hydraulic Break Cylinder* [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2015. (in Chinese)

[5] 彭辉. 汽车制动主缸横孔去毛刺机研制 [D]. 长春: 长春理工大学, 2017.

PENG H. *The research on the Transverse Deburring Machine of Automobile Brake Master Cylinder* [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2017. (in Chinese)

[6] DURAN O, ALTHOEFER K, SENEVIRATNE L D. Automated pipe defect detection and categorization using camera/laser-based profiler and artificial neural network [J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2007, 4(1): 118-126.

[7] 鲁少辉. 基于主动式全景视觉的管道内表面缺陷检测技术的研究 [D]. 杭州: 浙江工业大学, 2017.

LU SH H. *Research on defects detection technolo-*

gy of pipe internal surface based on active stereo omnidirectional vision [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2017. (in Chinese)

- [8] 丁超, 唐力伟, 曹立军, 等. 深孔内表面结构光图像几何畸变校正 [J]. 光学精密工程, 2018, 26(10): 2555-2564.
DING CH, TANG L W, CAO L J, *et al.*. Geometric distortion correction for structured-light image of deep-hole inner-surface [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(10): 2555-2564. (in Chinese)
- [9] 陈赞, 高胜英, 韩庆阳, 等. 多面体塔差及其安装偏心对光电编码器精度检测的影响 [J]. 光学精密工程, 2019, 27(8): 1704-1709.
CHEN Y, GAO SH Y, HAN Q Y, *et al.*. Impact of polyhedron pyramidal error and installation eccentricity on precision detection of photoelectric encoder [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(8): 1704-1709. (in Chinese)
- [10] 王宏志. 在线测量技术的误差分析-以汽车制动主缸补偿孔测量为例 [J]. 内燃机与配件, 2017

(18): 26-28.

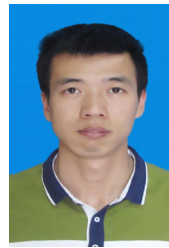
- WANG H ZH. Error analysis of online measurement technology--taking the measurement of compensation shaft of automobile brake master cylinder as an example [J]. *Internal Combustion Engine & Parts*, 2017(18): 26-28. (in Chinese)
- [11] 李林, 王晓燕, 钟俊, 等. 微尺度力敏器件力学特性及随机响应抑制研究 [J]. 光学精密工程, 2019, 27(7): 1561-1568.
LI L, WANG X Y, ZHONG J, *et al.*. Study on mechanical properties and random response suppression of micro-scale mechanical-sensitive component [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(7): 1561-1568. (in Chinese)
- [12] GAJRE M N, JEGADEESHWARAN R, SUGUMARAN V, *et al.*. Vibration based fault diagnosis of automobile hydraulic brake system using fuzzy logic with best first tree rules [J]. *International Journal of Vehicle Structures and Systems*, 2017, 8(4): 214-218.

作者简介:



姜涛(1969—),男,山西大同人,研究员,1992年于长春光学精密机械学院获得学士学位,1998年于沈阳工业学院获得硕士学位,2010年于长春理工大学获得博士学位,主要从事光机电一体化技术、机电系统控制技术等方面的研究。E-mail: jiangtao@cust.edu.cn

通讯作者:



张桂林(1990—),男,广东韶关人,讲师,2010、2017年于长春理工大学分别获得学士、博士学位,主要从事机电系统控制技术方面的研究。E-mail: guilin512400@126.com