DOI: 10.3901/JME.2013.10.077

数字图像相关法测量板料成形应变*

梁 晋 胡 浩 唐正宗 郭 翔 李磊刚
(西安交通大学机械工程学院 西安 710049)

摘要: 针对板料成形极限试验中传统应变测量方法的不足, 提出并实现一种基于数字图像相关法的板料成形极限应变测量方法。对其中涉及的关键技术进行深入研究。针对板料成形中大变形测量的难题, 根据系列变形图像相邻状态变形的连续性, 提出一种大变形分步匹配算法, 并介绍三维坐标重建和三维应变求解的方法。根据测得的试件表面应变分布, 提出一种通过构建应变场截面线来拟合成形极限曲线的方法。基于 Visual Studio 2010 开发环境, 开发用于板料成形极限应变测量的计算软件。为了验证方法的可行性, 结合自研的图像采集装置和改进的板料成形试验机搭建成形极限测量试验平台。对 SPCC 钢板试件的测量结果显示所提出的方法能够快速、有效、直观地测量试件在整个成形过程中的表面应变分布, 为建立成形极限图提供一种有效手段, 且与传统的坐标网格等方法相比优势明显。

关键词: 图像相关法 板料成形 极限应变

中图分类号: TG386 TP391

Digital Image Correlation Method for Strains Measurement of Metal Sheet Forming

LIANG Jin HU Hao TANG Zhengzong GUO Xiang LI Leigang
(School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049)

Abstract: To achieve limit strains measurement of metal sheet forming, a dynamic deformation measurement method is proposed and implemented based on digital image correlation. The applied key technologies are investigated. To solve the problem of large deformation and strain measurement in metal sheet forming, a fractionized matching algorithm based on deformation continuity of adjacent image sequences is proposed, a successful image matching results even in large deformation situation is provided. The algorithms for three-dimensional coordinates reconstruction and strain calculation are discussed separately. Based on section line of the measured strain field, a fitting algorithm for forming limit curve is proposed. Based on these algorithms and the Visual Studio 2010 platform, a forming limit strains measurement system is developed. With our self-developed image acquisition setup and a sheet metal forming machine, a steel cupping test is conducted to validate the performance of our method. Experimental results demonstrate that the proposed method is applicable to the measurement of 3D deformation and limit strain of the sheet metal forming. Compared with the traditional measurement methods, the method can be more comprehensive and more intuitive to achieve the strain measurements during the whole forming processes. It provides a good solution for forming limit prediction.

Key words: Digital image correlation Sheet metal forming Limit strain

0 前言

板料成形是一种非常重要的材料加工技术, 在航空、航天、船舶、汽车等国民经济部门被广泛应用。而板料的成形极限是衡量板料塑性成形性能的重要指标。以极限应变构成的成形极限图(Forming limit

diagram, FLD)^[1-2]常被用于确定指定的材料在受到拉伸、胀形或拉伸胀形结合时能够达到的变形程度, 为评价板料成形性能以及改进成形工艺提供技术基础和实用判据^[3]。测定 FLD 的方法一般分为三种^[4]: ① 理论计算; ② 数值模拟; ③ 试验测定。理论计算成形极限主要利用不同的拉伸失稳准则作为判断发生缩颈与破裂的条件来进行解析的, 但由于每种准则适用范围有限, 使得计算结果与试验结果之间有一定差距。数值模拟可以在一定程度上代替理论计算来获得

* 国家自然科学基金(51275378, 51275389)和江苏省科技创新(SBC201210069)资助项目。20130105 收到初稿, 20130405 收到修改稿

材料的成形极限曲线,但材料特性的获取和摩擦边界条件的确定有较大难度。而在实验室条件下根据标准试验测定极限应变并建立材料 FLD 的试验方法,可以获得较真实、可靠的 FLD,因此,目前应用最为广泛。GB/T 24171.2-2009 和 ISO/ FDIS 12004-2-2008 标准中对于试验法测定成形极限图都有详细说明,然而国内受已有应变测量手段和设备的限制,仍很难获得失稳前的极限变形量。尽管国外已经研制出用于动态应变测量的设备,如德国 GOM 公司的 ARAMIS 系统,美国 CSI 的公司的 VIC-3D 系统等,但价格非常昂贵,特别是对于国内的研究单位很难接受。

极限应变是试验法测定成形极限图的关键。传统的测量手段一般利用单个圆形图案在板料产生变形时近似变成椭圆的性质,采用工业软尺或工具显微镜直接测量椭圆的长轴和短轴长度近似获取单个圆所在区域的最大、最小主应变。1988 年,VOGEL 等^[5]提出一种基于双目立体视觉的钣金件表面应变测量及分析方法。2002 年,魏红芹等^[6]研究采用圆形坐标网格对板料拉伸件进行应变测量。2003 年,HSU^[7]提出结合数字图像处理方法自动计算单个圆变形参数,但由于该方法处理的是在二维平台上经光学投影后的网格图像,所以存在一定的测量误差。2006 年,徐亮等^[8]通过在被测试件表面印制王字标记,针对金属材料进行拉伸试验来测量材料的应变。2011 年,钟敏等^[9]利用圆形坐标网格应变测量方法研究了镁合金在不同温度下的成形极限。尽管上述方法可在一定程度上满足应变测量的要求,但仍存在不足:① 以离线方式(工业软尺、工具显微镜)得到应变数据,对操作者的依赖性较大,精度和效率都不高;② 坐标网格测量法的网格绘制工作量较大,精度一般;③ 能对成形的最终状态进行测量,不能或很难进行变形过程的动态监控,而试验中又很难保证成形的最终状态是试件表面刚好出现局部缩颈的极限状态。

为了克服现有应变测量方法的不足,引入基于数字图相关法的板料成形极限应变的全场动态测量方法。数字图像相关方法(Digital image correlation, DIC)最初由 PETERS 等^[10-11]提出,通过跟踪和匹配变形前后所采集图像的灰度信息,来测量物体在各种载荷作用下表面整体的瞬时位移场和应变场,具有非接触、精度高、受环境影响小、自动化程度高等优点。本文将数字图像相关法和双目立体视觉技术相结合,提出并实现一种板料成形极限应变测量的方法,并研制了测量板料成形极限的试验装置和计算软件。试验结果

表明本文方法可以测量大变形下的极限应变并建立材料的 FLD,与传统方法相比优势明显。

1 试验装置

试验测量装置主要由两个工业电荷耦合元件(Charge-coupled device, CCD)相机、两个 LED 光源、一块标定板、一个控制器(控制相机和光源)以及一台计算机等硬件组成,如图 1 所示。所用相机的分辨率为 1 624 像素×1 236 像素,配置焦距为 35 mm 的 Schneider Kreuznach xenoplan 镜头,两相机被固定在同一水平面,相机间夹角约为 30°,以组成如图 1 所示视场大小为 150 mm×100 mm 的双目视觉测量头。标定板上图案为 15×11 圆形阵列,相邻圆心的距离为 8 mm,其中 17 个为环形编码标志点。

图1 试验装置硬件组成示意图

利用标定板对双目视觉测量头进行相机标定,是重建板料成形过程不同时刻表面三维数据的关键。周富强等^[12-13]和孙军华等^[14]分别提出基于移动靶标的双目视觉相机标定方法,这类方法操作简单,但需要知道标靶(标定板等)精确的物方坐标,这给其加工带来很大困难,从而使标定精度受限于标靶的制造精度。因此,本文采用一种基于光束平差原理的相机自标定方法,该方法全面考虑了标靶的制造误差、镜头畸变误差,具有较高的标定精度,具体标定步骤可参考文献^[15]。

在板料成形过程中,通过计算机经控制器控制两个相机同步采集被测件在整个成形过程中的序列图像。板料成形采用与上海百若实验仪器有限公司合作研发的 BTP-60 型 300kN 板料成形与杯突试验机(窄试件也可采用拉伸试验机),该试验机与目前市场上常用的 60 kN 杯突试验机相比有几点改进:① 冲头直径从 20 mm 增加为 100 mm,冲压力从 60 kN 增加为 300 kN;② 试验机上盖单元开放,可保证被测试件

的图像采集, 适宜于光测法建立 FLD; ③ 执行的标准不同。传统 60 kN 杯突试验机采用 GB4156-2007、GB15825.3 标准, 而新的 300 kN 板料成形试验机在执行 GB4156-2007、GB15825.3 标准的基础上, 重点支持 2009 年最新的 GB/T24171.1、GB/T 24171.2 标准(国家标准为 ISO-FDIS 12004-2-2008)。

本文根据数字图像相关算法及板料变形测量理论, 基于 Visual Studio 2010 开发环境, 借助于 Windows 7 平台开发了板料成形应变测量软件和成形极限曲线计算软件, 将试验采集的图像导入到应变测量软件进行相关计算和处理即可得到板料试件在不同成形状态的表面应变场(图 2)。然后, 将成形极限状态的应变数据导入成形极限曲线拟合软件计算并建立板料的 FLD。

图2 图像采集装置

2 数字图像的成形极限测量

2.1 数字图像相关法原理

引入基于数字图相关法的板料成形表面应变测量方法。数字图像相关法是匹配两幅图像上对应像点的方法, 基本原理如图3所示, 左边一幅为参考图像, 另外一幅为待匹配图像(或称变形图像), 在参考图像中, 取以待匹配点 (x, y) 为中心的 $(2M+1) \times (2M+1)$ 大小的矩形图像子区(参考子区), 在待匹配图像中, 通过一定的搜索方法, 并按照某一相关函数进行相关计算, 寻找与选定的图像子区灰度分布相似程度最大的以 (x', y') 为中心的图像子区(变形子区), 则点 (x', y') 即为点 (x, y) 在待匹配图像中的对应点。

图3 图像相关法原理图

假设图像子区中有 N 个像素点, 像素灰度受到独立同分布的噪声干扰, 则参考图像子区与待匹配图像子区间的相似程度可通过式(1)衡量^[16]

$$C_{SSD}(\mathbf{p}) = \sum_{i=1}^N \left[f(x_i, y_i) - r_0 - r_1 g(x'_i, y'_i) \right]^2 \quad (1)$$

式中, $\mathbf{p} = (u, u_x, u_y, v, v_x, v_y, r_0, r_1)$, 表示相关参数矢量; $f(x_i, y_i)$ 和 $g(x'_i, y'_i)$ 分别为变形前后图像子区中点 (x_i, y_i) 和 (x'_i, y'_i) 的灰度值, r_0 、 r_1 用于补偿由于光照引起的灰度差异。

考虑到待匹配图像子区的变形, 整个图像子区中的点在变形前后的映射关系一般通过一阶位移函数表示

$$x'_i = x_0 + \Delta x + u + u_x \Delta x + u_y \Delta y \quad (2)$$

$$y'_i = y_0 + \Delta y + v + v_x \Delta x + v_y \Delta y \quad (3)$$

式(1)为非线性方程, 可利用最小二乘迭代算法求解。

2.2 大变形分步匹配

数字图像相关法常被用于弹性变形和近似均匀变形的测量, 然而, 当被测物表面变形量较大(胀形、旋转等大变形)时待匹配的变形图像与参考图像之间的相似度会大大降低, 不利于图像的相关计算。因此, 本文根据系列图像相邻状态变形的连续性, 提出一种大变形分步匹配的方法, 即将变形过程中某一个或几个状态对应的图像设置为新的参考图像, 然后将新的参考图像与其变形时刻更接近的图像进行匹配。基本思想如图4所示, (x_0, y_0) 为参考子区的中心坐标。算法步骤如下所述。

(1) 由于待匹配图像变形子区2相对于参考子区变形过大, 因此, 首先利用相对于参考子区变形较小的变形子区1的相关参数根据式(2)和式(3)对参考子区进行变形计算。对于参考子区中某一点 $P(x_i, y_i)$, 利用式(2)及式(3), 可得变形子区1上一点 $P'(x'_i, y'_i)$ 。

(2) 根据相邻状态变形的连续性, 在变形子区2内逐像素地移动变形后的参考子区并进行相关计算。可得变形子区2上与 $P'(x'_i, y'_i)$ 对应(匹配)的点 $P''(x''_i, y''_i)$ 。

(3) 通过步骤(2)、(3), 最后计算得到变形子区2上的点 $P''(x''_i, y''_i)$ 与参考图像子区上点 $P(x_i, y_i)$ 的对应关系。

试验表明通过以上步骤可保证匹配成功。通常, 在变形测量过程中会得到变形量不断增大的一系列图像, 因此, 可根据实际变形情况每隔若干变形状态增设一个新参考子区用于大变形计算。

图 4 大变形多步匹配示意图

图像匹配完成后,对于任意一个变形状态的左右两幅子图像中心点,利用三角测量原理即可重建,对应的三维空间坐标。然后,在变形前的参考状态中,利用某一点 P 及其领域点建立若干(4~8个)三角形,对于每个三角形,根据其变形前后的边长变化求解得到基于柯西-格林张量的拉格朗日应变,取所有三角形的应变平均值作为 P 点的应变。重复这一过程即可得到若干点的应变,拟合这些点就可获得被测件的表面轮廓和应变场。

2.3 成形极限曲线拟合

对测得的试件表面应变场进行分析,在发生破裂的首张图像上设定裂纹路径和截面线方向,然后转到破裂前最后一张图像上,创建 3~5 条间距 2~2.5 mm 的平行截面线,如图 5 所示。截线长度尽量长,但不能到达试件边缘。重复上述过程可以得到多个试件的多组截线数据(试件表面的最大主应变和最小主应变),对每组数据分别进行二次曲线(反抛物线)拟合,并计算对应的最大、最小主应变极值 ε_1 和 ε_2 ,构成 FLD 的 1 个坐标点($\varepsilon_1, \varepsilon_2$)。由每条截面线可计算得到 1 个点,拟合这些点即可建立板料的 FLD。具体过程如下。

(1) 对于最小主应变小于 0 的情况,要求截面线平行于试件平行部方向(主应变方向),反之,则要求截面线垂直于裂纹方向(偏差在 $-25^\circ \sim 25^\circ$)。第一条截面线通过 ε_1 的最大值点,第二、三条截面线在第一条的两侧 2.0~2.5 mm 处,方向与破裂前拍摄的最后一组图像上的最大主应变方向相同。

(2) 利用二次曲线拟合截面线数据,从而确定板料的成形极限点(破裂点)坐标。如图 6 所示的曲线拟合结果通过反抛物线拟合得到

$$f(x) = \frac{1}{ax^2 + bx + c} \quad (4)$$

式中, x 表示截面线的展开线长度, $f(x)$ 表示在截面上 x 节点处对应的试件表面的应变值, a 、 b 、 c 为待求解的常系数。

(3) 对步骤(2)拟合得到的曲线求极值,最大主应

变拟合曲线的极值表示为 ε_1 , 对应的节点在最小主应变拟合曲线上的值为 ε_2 , 则 ε_1 、 ε_2 构成一组极限应变点。应保证: ① 每条截线最多得到一个极限应变点; ② 剔除不满足标准要求的点; ③ 对应于最大主应变和最小主应变极值的两个节点之间的距离应小于 3 倍的试件厚度。

(4) 根据步骤(3)求得的极限应变点,拟合成适当的曲线或构成条带形区域,从而得到板料的成形极限曲线,并剔除不符合要求的极限应变点以进一步修正 FLD。

图 5 截面线创建

图 6 截面线数据拟合

3 试验结果与分析

试验在如图 7 所示的试验环境下进行。试验流程如下: 首先,参考标准制备试件。接着,开启板料成形试验机,同时打开相机采集成形过程各个变形状态的图像。其次,利用变形测量软件对采集的图像进行处理,经过计算区域标记、图像相关匹配、全场应变计算等步骤得到试件在整个成形过程中的表面应变场。然后,在试件破裂前的极限变形状态创建 3~5 截面线(尽量垂直于裂纹方向),并导出对应的截面线数据。最后,将上一步计算得到的截面线数据导入到

图 7 试验现场

所开发的成形极限曲线拟合软件, 计算并建立板料的成形极限图。

试验材料采用 SPCC 薄钢板, 力学性能见下表, 板厚为 0.95 mm, 参考 ISO 12004-2: 2008(或 GB/T 24171.2-2009) 标准制备试件。试件的形状及几何尺寸如图 8 所示, 共 9 种规格, 试件宽度分别为 20 mm、40 mm、60 mm、80 mm、100 mm、140 mm、140 mm(带坡口)、160 mm 和 180 mm。并采用黑、白哑光漆在试件表面喷漆形成近似黑白相间的图案(散斑), 作为数字图像相关法匹配和跟踪被测件表面变形的特征。

表 试验所用 SPCC 钢板的力学性能

材料厚度 /mm	弹性模量 /GPa	屈服强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	伸长率 (%)	硬化指数 n
0.95	196	215	535	66	0.25

图 8 试件外形和尺寸示意图

板料成形采用 Nakazima 试验法, 也就是半球形刚性凸模胀形试验。通过改变试件的宽度, 使其侧向约束改变从而得到从单拉到等双拉的成形极限。另外, 分别在试件与冲头的接触面涂上 KLUBER 润滑脂进行润滑。

将试件安装到成形试验机冲头上方、对中并夹紧后, 启动试验机的同时开启相机(图 2)采集不同宽度试件在成形过程不同时刻的图像。杯突试验冲头速度设为 1 mm/s, 相机的采集频率为 10 帧/s。成形后试件发生了如图 9 所示的变形。对采集的序列变形图像进行处理、计算, 得到不同宽度试件破裂前最后一个状态的表面应变分布。然后, 根据第 2.2 节提出的拟

合方法经进一步计算建立了如图 10 所示的板料成形极限图。

图 9 杯突成形后试件

图10 试验得到的SPCC钢板的成形极限图

选取宽 80 mm 的试件在整个变形过程中 12 个变形状态, 分别生成各变形状态下试件表面三维轮廓和最大主应变分布, 如图 11 所示。从图 11 中可见, 最大主应变的最大值首先出现在试件中部并逐渐向两边发展, 且呈现对称分布, 与试验观察一致, 显示本文方法能够测量试件在整个成形过程中的表面应变分布情况。通过试验和结果分析, 要保证数字图像相关法应变测量结果的可靠性, 在试验中应注意: ① 被测试件表面应具有高对比度的随机特征或纹理; ② 采集的图像具有足够清晰度和分辨率; ③ 采用硬触发模式进行图像采集, 从而保证两相机图像采集的同步性, 并保证被测件在整个变形过程一直在相机视场中; ④ 计算时确保所划分的子图像尺寸大于散斑特征的最大尺寸。

图11 80 mm 宽试件在不同变形状态的表面轮廓及应变分布(%)

为验证本文方法的可行性和准确性, 在相同的试验条件和环境下, 采用坐标网格方法(XJTUSM 系统^[17])测量相同批次 SPCC 钢板应变建立一条 FLC 曲线; 并采用北美深冲研究中心(North American Deep Drawing Research Group, NADDRG)提出的经验公式^[18]和上表计算得到另外一条 FLC 曲线, 与本文方法进行对比, 如图 12 所示。根据经验公式, FLC 曲线的左右分支分别通过两条倾斜角为 45°和 20°的直线表示, 对应的直线方程见式(5)

$$\begin{cases} \varepsilon_1 = -\tan 45^\circ \times \varepsilon_2 + \varepsilon_0 & \varepsilon_2 < 0 \\ \varepsilon_1 = \tan 20^\circ \times \varepsilon_2 + \varepsilon_0 & \varepsilon_2 \geq 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中, ε_1 和 ε_2 表示最大和最小主应变, ε_0 是 FLC 的最低点, 可通过试验材料的厚度 δ 和硬化指数 n 利用

式(6)进行计算

$$\varepsilon_0 = \frac{n}{0.21} (23.3 + 14.13\delta) \quad \delta \leq 2.54 \text{ mm} \quad (6)$$

从图 12 中可见, 本文方法和坐标网格方法测得的两条 FLC 曲线的应变分布趋势比较接近, 但坐标网格法是在已破裂的试件上进行离线测量, 所以测量值比实际临界状态时的实际值偏大; 而经验公式计算得到的 FLC 曲线最高, 明显高估了 SPCC 板材的成形极限。因此, 本文方法更接近实际值。

图12 三种方法对比

4 结论

(1) 提出了一种基于数字图像相关法的板料成形极限应变测量方法, 研制了用于板料成形极限测量的试验装置和计算软件。

(2) 测量非接触, 能够在几分钟内完成一个试样应变数据的测量, 并可一次性获得大量测量数据。

(3) 不仅可以测量板料成形最终状态的应变, 而且能够快速、直观地测量板料试件在整个成形过程中的表面应变分布。

(4) 能够克服传统一些应变测量方法的不足, 如难以重复定位, 使用复杂费时, 不能在线测量等, 为解决板料成形极限应变测量的难题提供了一种有效手段。

参考文献

- [1] KEELER S P, BACKOFEN W A. Plastic instability and fracture in sheets stretched over rigid punches[J]. ASM TRANS Q., 1963, 56(1): 25-48.
 - [2] GOODWIN G M. Application of strain analysis to sheet metal forming problems in the press shop[R]. SAE, 680093, 1968.
 - [3] 曹宏深. 复合变形路径下的板材冲压成形极限应变(I)——冲压成形极限应变的立论与解析[J]. 机械工程学报, 2008, 44(2): 54-61.
- CAO Hongshen. Limit strains of sheet metal forming under

- broken-line strain paths(I)—Proposing and analyzing on the limit strains for sheet metal forming[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(2): 54-61.
- [4] 陈劫实, 周贤宾. 板料成形极限的理论预测与数值模拟研究[J]. 塑性工程学报, 2004, 11(1): 13-17.
- CHEN Jieshi, ZHOU Xianbin. The theoretical prediction and numerical simulation of sheet metal forming limit[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2004, 11(1): 13-17.
- [5] VOGEL J, LEE D. An automated two-view method for determining strain distributions on deformed surfaces[J]. Journal of Materials Shaping Technology, 1988, 6(4): 205-216.
- [6] 魏红芹, 于德弘. 基于立体视觉的坐标网格分析法[J]. 塑性工程学报, 2002, 9(2): 52-55.
- WEI Hongqin, YU Dehong. Coordinate grid analysis method based on stereo vision[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2002, 9(2): 52-55.
- [7] HSU Q C. Comparison of different analysis models to measure plastic strains on sheet metal forming parts by digital image processing[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2003, 43(5): 515-521.
- [8] 徐亮, 李新军, 吕晓东. 基于机器视觉非接触测量金属应变变量[J]. 机械工程与自动化, 2006, 134(1): 72-74.
- XU Liang, LI Xinjun, LÜ Xiaodong. Non-contact measurement of metallic strain based on machine vision[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2006, 134(1): 72-74.
- [9] 钟敏, 唐伟琴, 李大永, 等. AZ31B 镁合金板材温热成形极限实验研究[J]. 塑性工程学报, 2011, 18(5): 59-63.
- ZHONG Min, TANG Weiqin, LI Dayong, et al. Experiment research on forming limit diagram (FLD) of magnesium alloy sheet AZ31B at warm condition[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2011, 18(5): 59-63.
- [10] PETERS W H, RANSON W F. Digital imaging techniques in experimental stress analysis[J]. Optical Engineering, 1982, 21(3): 427-431.
- [11] SUTTON M A, CHENG M, PETERS W H, et al. Application of an optimized digital correlation method to planar deformation analysis[J]. Image Vision Comput., 1986, 4(3): 143-150.
- [12] 周富强, 张广军. 表面视觉传感器模型参数的简易标定方法[J]. 机械工程学报, 2005, 41(3): 175-179.
- ZHOU Fuqiang, ZHANG Guangjun. Facilitated method to calibrate model parameters of vision sensor for surface measurement[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(3): 175-179.
- [13] 周富强, 张广军, 魏振忠, 等. 基于未知运动一维靶标的双目视觉传感器标定[J]. 机械工程学报, 2006, 42(6): 92-96.
- ZHOU Fuqiang, ZHANG Guangjun, WEI Zhenzhong, et al. Calibrating binocular vision sensor with one-dimensional target of unknown motion[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(6): 92-96.
- [14] 孙军华, 吴子彦, 刘谦哲, 等. 大视场双目立体视觉传感器的现场标定[J]. 光学精密工程, 2009, 17(3): 633-640.
- SUN Junhua, WU Ziyang, LIU Qianzhe, et al. Field calibration of stereo vision sensor with large FOV[J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(3): 633-640.
- [15] 胡浩, 梁晋, 唐正宗, 等. 大视场多像机视频测量系统的全局标定[J]. 光学精密工程, 2012, 20(2): 369-378.
- HU Hao, LIANG Jin, TANG Zhengzong, et al. Global calibration for multi-camera videogrammetric system with large-scale field-of-view[J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(2): 369-378.
- [16] 唐正宗, 梁晋, 肖振中, 等. 用于三维变形测量的数字图像相关系统[J]. 光学精密工程, 2010, 18(10): 2244-2253.
- TANG Zhengzong, LIANG Jin, XIAO Zhenzhong, et al. Digital image correlation system for three-dimensional deformation measurement[J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(10): 2244-2253.
- [17] SHI B Q, LIANG J. Circular grid pattern based surface strain measurement system for sheet metal forming[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2012, 50: 1186-1195.
- [18] LEVY S B. A comparison of empirical forming limit curves for low carbon steel with theoretical forming limit curves of Ramaekers and Bongaerts[C]//IDDRG WG3, Ungarn, 13-14 June, 1996.

作者简介: 梁晋, 男, 1968 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为机电控制、机器视觉等。

E-mail: liangjin@mail.xjtu.edu.cn

胡浩(通信作者), 男, 1985 年出生, 博士研究生。主要研究方向为三维光学测量。

E-mail: huhao136@163.com

唐正宗, 男, 1982 年出生, 博士研究生。主要研究方向为三维光学测量。

E-mail: nevret@gmail.com

郭翔, 男, 1984 年出生, 博士研究生。主要研究方向为逆向工程、三维光学检测等。

E-mail: xiang.guo@stu.xjtu.edu.cn

李磊刚, 男, 1987 年出生, 博士研究生。主要研究方向为三维光学测量。

E-mail: liracfe@foxmail.com