

iDICS

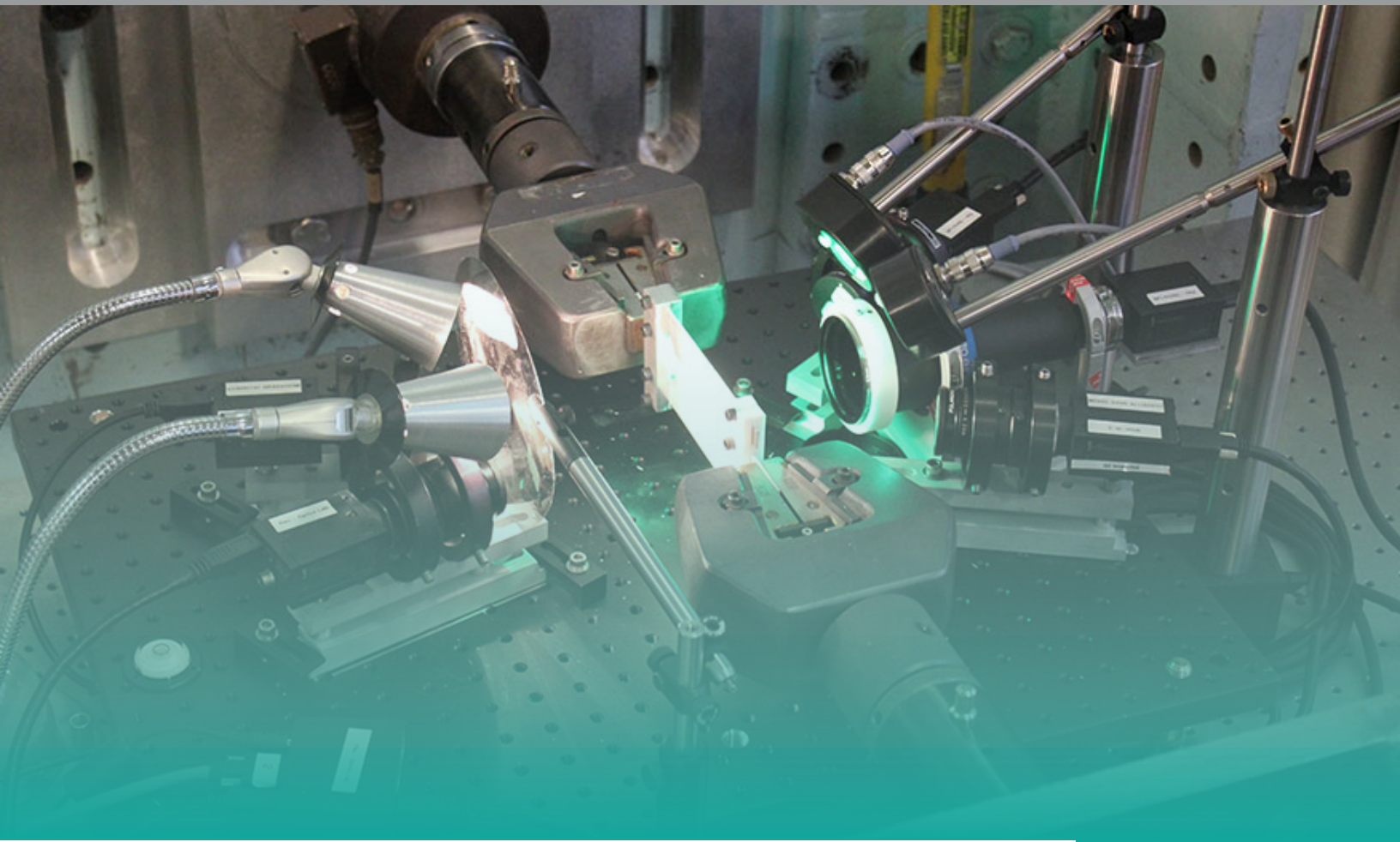
INTERNATIONAL  
DIGITAL IMAGE CORRELATION  
SOCIETY

## 数字图像相关

## 可靠实践指南

标准化、可靠实践与不确定度量化委员会

2018年10月（英文版），2019年7月（中文翻译）



### 安全问题的免责声明

本指南不涉及在力学试验或实验室环境中应用 DIC 操作者的人身安全问题。实验室和相关操作人员有责任满足其相关人身安全要求。

本中文版是国际数字图像相关学会题为“A Good Practices Guide for Digital Image Correlation”的英文翻译版，其 DOI 为 10.32720/idics/gpg.ed1.cn。如果英文原版的任何文本与本译文的文本不一致，应以英文原版为准。

This Chinese edition is a translation of the original work in English by the International Digital Image Correlation Society entitled *A Good Practices Guide for Digital Image Correlation*, with DOI 10.32720/idics/gpg.ed1.cn. If any text of the original edition in English is inconsistent with the text of this translation, the original edition in English shall prevail.

## 中文翻译工作组

### 编辑及中文翻译工作组主席

赵加清，博士，副研究员，清华大学，北京，中国

### 工作组成员

杜鉴昕，硕士生，清华大学，北京，中国

李馨，博士生，清华大学，北京，中国

帅剑光，博士生，清华大学，北京，中国

徐亚东，博士生，清华大学，北京，中国

叶孝森，博士生，清华大学，北京，中国

### 翻译审稿人（技术及语言方面）

李宁，博士，研究员，南卡罗来纳大学，哥伦比亚，美国

蒋震宇，博士，教授，华南理工大学，广州，中国

潘兵，博士，教授，北京航空航天大学，北京，中国

杨锦，博士，博士后研究员，威斯康星大学麦迪逊分校，麦迪逊，美国

原媛，博士，讲师，上海海事大学，上海，中国

张东升，博士，教授，上海大学，上海，中国

张青川，博士，教授，中国科学技术大学，合肥，中国

### 翻译审稿人（语言方面）

成科宇，硕士生，布朗大学，普罗维登斯市，美国

李远哲，博士生，清华大学，北京，中国

杨冠陵，硕士生，圣路易斯华盛顿大学，圣路易斯市，美国



国际数字图像相关学会 (iDICS) 2018 © 版权所有

部分版权所有。本出版物可以以任何形式或通过任何方式（包括影印、记录或其它电子或机械方法）复制、分发或传播，但不得更改，并且版权应完全属于国际数字图像相关学会。作为例外，若其它文件中包含一些本指南的简短引用，其版权仍然完全属于国际数字图像相关学会，但并不表明国际数字图像相关学会认可该文件。如需获得版权许可，请通过 [info@idics.org](mailto:info@idics.org) 联系国际数字图像相关学会。

DOI: 10.32720/idics/gpg.ed1.cn

本指南的电子版可从[www.idics.org](http://www.idics.org)中获得。

中文出版物的引用：国际数字图像相关学会, Jones, E.M.C. and Iadicola, M.A. (编) (2018). 数字图像相关可靠实践指南. [*A Good Practices Guide for Digital Image Correlation*]. (赵加清译) <https://doi.org/10.32720/idics/gpg.ed1.cn>.

英文出版物的推荐引用：International Digital Image Correlation Society, Jones, E.M.C. and Iadicola, M.A. (Eds.) (2018). *A Good Practices Guide for Digital Image Correlation*. <https://doi.org/10.32720/idics/gpg.ed1>.





## 关于本指南

国际数字图像相关学会 (iDICs) 成立于 2015 年, 是一个致力于培训数字图像相关用户的非盈利性科教组织。国际数字图像相关学会由学界、政界和业界的成员组成, 建立世界公认的 DIC 培训和认证, 以改进一般应用场合中的 DIC 工业实践, 重点是研究和建立 DIC 测量技术的标准。若读者需要更多信息, 请访问[www.idics.org](http://www.idics.org)。

为了支持学会宗旨, iDICs 标准化、可靠实践与不确定度量化委员会的部分职能是为 DIC 从业人员制定指南。指南发展和审查过程的细节可以通过 iDICs ([info@idics.org](mailto:info@idics.org)) 获得, 除此以外, 本指南也对这些细节进行了详细的总结。可靠实践、报告要求与术语工作组 (委员会的一个小组) 为 DIC 制定了这一可靠实践指南。工作组由专业的 DIC 从业者组成 (见下文), 包括许多商用 DIC 软件包开发者的代表, 他们在大量的应用中积累了丰富的 DIC 使用经验。

工作组完成指南的最终草案 (英文版) 后, 于 2017 年 11 月至 2018 年 1 月进行公开评议, 在此期间, 任何 DIC 的从业人员都可以参与审查该指南。总共有 100 人参与审查, 其中 56 人做出了正式的投票。在收到的 56 张投票中, 23 人投了“赞成且无意见”, 32 人投了“赞成并建议修改”, 1 人投了“不赞成且有意见 (至少一个技术性的), 并建议修改”。在收到的 500 多条意见中 (其中 130 多条是技术性意见), 工作组通过修订指南或书面反驳的方式处理了每一条意见。修改后, 本指南的最终版本以及工作组对意见的答复由 iDICs 执行委员会部分成员 (未参加过工作组与公开评议) 审查并通过。

## 关于本翻译

中文翻译工作组成立于 2018 年 10 月, 旨在将英文版指南直译为中文版, 遵循不改变原文含义和技术内容这一基本原则。在完成中文版翻译的最终文稿后, 工作组邀请了七位来自中国和美国的中英文流利的 DIC 专家作为审稿人对文稿的技术内容及可读性进行细致的审核。此外, 还邀请了三位中国籍非 DIC 从业人员作为审稿人从语言方面对文稿的可读性作进一步审核。最后, 工作组对所有审稿人的意见和建议进行筛选和整合, 全面修订了最终文稿, 确保了中文翻译的准确性和流畅性。

## 可靠实践、报告要求与术语工作组

### 编辑兼工作组主席

**Elizabeth M. C. Jones, Ph.D.**, Senior Member of Technical Staff, Sandia National Laboratories, United States of America, Email: [guide@idics.org](mailto:guide@idics.org)

### 共同编辑

**Mark A. Iadicola, Ph.D.**, Staff Scientist, National Institute of Standards and Technology, United States of America

### 工作组成员

**Rory P. Bigger**, Senior Research Engineer, Southwest Research Institute, United States of America

**Benoît Blaysat, Ph.D.**, Assistant Professor, Université Clermont Auvergne, France

**Christofer Boo**, Product Manager, Image Systems, Sweden

**Manuel Grewer, Ph.D.**, Product Manager, LaVision GmbH, Germany

**Jun Hu, Ph.D.**, Engineer, AK Steel, United States of America

**Amanda R. Jones, Ph.D.**, Senior Member of Technical Staff, Sandia National Laboratories, United States of America

**Markus Klein**, GOM GmbH, Germany

**Pascal Lava, Ph.D.**, Managing Director, Match ID, Belgium

**Mark Pankow, Ph.D.**, Assistant Professor, North Carolina State University, United States of America

**Kavesary Raghavan, Ph.D., PE**, Senior Staff Engineer, AK Steel Corporation, United States of America

**Phillip L. Reu, Ph.D.**, Principal Member of Technical Staff, Sandia National Laboratories, United States of America

**Timothy Schmidt**, Trillion/GOM, United States of America

**Thorsten Siebert, Ph.D.**, R&D Manager, Dantec Dynamics GmbH, Germany

**Micah Simonsen**, Correlated Solutions, United States of America

**Andrew Trim**, Materials Engineering and Structural Dynamicist, Atomic Weapons Establishment, United Kingdom

**Daniel Z. Turner, Ph.D.**, Center for Computing Research, Sandia National Laboratories, United States of America

**Alessandro F. Vieira**, Senior Instrumentation Engineer, Boeing, United States of America

**Thorsten Weikert**, GOM GmbH, Germany



# 约定

在本指南中，根据以下惯例，某些内容将突出显示、置边或与主体分开标记。

## 推荐

“推荐”是关于 DIC 从业人员应采取的具体行动的建议，或 DIC 从业人员应做出的具体决定。这些建议推荐是基于很多一线 DIC 试验研究组的专家和他们的实际操作经验凝练总结而成，这些建议在绝大多数试验情况下应该是最佳选择。换句话说，对于本文档范围内的理想 DIC 测量，DIC 从业者最好遵循本文中的所有推荐。

## 提示

“提示”提供对 DIC 从业者有用的补充信息，帮助设计和进行 DIC 测量。“提示”通常是背景信息，针对没有经验的 DIC 从业者，或有经验的使用高阶设置的 DIC 从业者。“提示”与“推荐”不同，“提示”并不意味着是 DIC 从业者应遵循的具体行动或决定。

## 警告

“警告”提供了可能对 DIC 测量产生负面影响的事件、决策或功能的信息。“警告”后面通常附有“推荐”来尽可能避免或减轻这些负面事件、决策或功能的影响。

## 脚注

“脚注”提供了使用本版指南范围之外的补充信息。其基本的目的是在本指南中给出的参考不适用时，告知读者以确保能正确使用指南。脚注中的说明很简短，因为脚注中包含的信息不在本指南的范围内。

## 附录

“附录”是为了提供补充信息，避免将这些冗长复杂的文本放入正文后使正文变得杂乱没有重点。



# 目录

<b>前页</b>	<b>ii</b>
免责声明	ii
翻译声明	iii
版权	iv
关于本指南	vi
关于本翻译	vi
约定	viii
目录	xii
图片列表	xii
表格列表	xii
提示列表	xii
推荐列表	xiii
警告列表	xiv
<b>1 前言</b>	<b>1</b>
1.1 DIC 的目标和基本原理	1
1.2 本指南所涉及的范围	2
1.3 使用 DIC 测量方法的一般力学试验范围	2
<b>2 DIC 测量的设计</b>	<b>4</b>
2.1 测量要求	4
2.1.1 感兴趣量	4
2.1.2 感兴趣区域	4
2.1.3 视场	4
2.1.4 硬件占据的空间位置	4
2.1.5 2D-DIC 与 Stereo-DIC 的对比	5
2.1.6 立体角	5
2.1.7 景深	6
2.1.8 空间梯度	6
2.1.9 本底噪声	7
2.1.10 帧率	7
2.1.11 曝光时间	8
2.1.12 同步与触发	8
2.2 设备与硬件	9
2.2.1 相机与镜头的选择	9

2.2.2	相机与镜头的固定	10
2.2.2.1	固定系统的一般特征	10
2.2.2.2	固定系统的类型	14
2.2.3	光圈	14
2.2.4	光照与曝光	15
2.2.4.1	光源类型	15
2.2.4.2	光源的固定	16
2.2.4.3	对比度、光强和增益	16
2.2.5	硬件发热	17
2.3	DIC 散斑	18
2.3.1	DIC 散斑的类型	18
2.3.2	DIC 散斑的总体特征	19
2.3.2.1	尺寸	19
2.3.2.2	随机性	20
2.3.2.3	密度	20
2.3.2.4	质量	21
2.3.2.5	反光	21
2.3.3	人工散斑的特性	21
2.3.3.1	顺应性	22
2.3.3.2	粘附性	22
2.3.3.3	一致性	22
2.3.3.4	厚度	23
2.3.4	散斑制作方法	23
<b>3</b>	<b>DIC 测量准备</b>	<b>25</b>
3.1	标定前的流程	25
3.1.1	试验流程检查	25
3.1.2	设备清洁	25
3.1.3	相机预热	26
3.1.4	同步	26
3.1.5	DIC 散斑制作	27
3.1.6	标定前的系统检查	27
3.1.6.1	定位试件和相机	28
3.1.6.2	检验光学系统	28
3.1.6.3	锁定可调零件	28
3.1.6.4	检查图像	28
3.1.6.5	验收 DIC 系统	29
3.2	标定	29
3.2.1	标定的目标	29
3.2.2	标定的一般步骤	30
3.2.2.1	选择标定板	30
3.2.2.2	整洁的工作空间	30
3.2.2.3	调整光照	31
3.2.2.4	采集标定图像	32
3.2.2.5	标定系统	33
3.2.2.6	检查标定结果	33
3.2.2.7	检查标定参数	34

3.3	标定后的流程	35
3.3.1	用于标定检验和本底噪声分析的图像	35
3.3.1.1	重置系统	36
3.3.1.2	调整光照	36
3.3.1.3	采集静止图像	36
3.3.1.4	检查图像	36
3.3.1.5	采集刚体运动图像	36
3.3.2	检验相机标定结果	37
3.3.2.1	内参数	37
3.3.2.2	外参数	38
3.3.2.3	绝对距离	39
3.3.3	系统标定后的检查	39
3.3.3.1	本底噪声	39
3.3.3.2	热浪	39
3.3.3.3	稳定性	40
3.3.3.4	其他检验	40
<b>4</b>	<b>进行 DIC 测量试验</b>	<b>41</b>
<b>5</b>	<b>DIC 图像处理</b>	<b>42</b>
5.1	DIC 软件	42
5.2	用户自定义参数	42
5.2.1	参考图像	42
5.2.2	图像预滤波	43
5.2.3	子区形函数	43
5.2.4	插值	44
5.2.5	子区大小	44
5.2.6	步长	44
5.2.7	阈值	45
5.3	应变测量	45
5.3.1	虚拟应变片	45
5.3.2	应变计算方法的示例	45
5.3.2.1	子区形函数	45
5.3.2.2	有限元形函数	45
5.3.2.3	应变形函数	46
5.3.2.4	样条拟合	46
5.4	不确定度量化	46
5.4.1	概览	46
5.4.2	随机误差	47
5.4.3	系统误差	48
5.4.4	噪声与偏差之间的权衡	48
5.4.5	虚拟应变片的研究	49

<b>6 报告要求</b>	<b>51</b>
6.1 DIC 硬件参数	51
6.1.1 要求记录的参数	51
6.1.2 推荐记录的参数	52
6.2 DIC 分析参数	52
6.2.1 要求记录的参数	52
6.2.2 推荐记录的参数	53

<b>7 术语及缩写</b>	<b>54</b>
7.1 缩写	54
7.2 术语	54

<b>参考文献</b>	<b>60</b>
-------------	-----------

<b>A DIC 测量和分析的检查表和流程图</b>	<b>64</b>
----------------------------	-----------

<b>B 焦距、视场和靶距</b>	<b>69</b>
-------------------	-----------

<b>笔记</b>	<b>71</b>
-----------	-----------

## 图片列表

2.1 在 Stereo-DIC 中推荐的相机固定姿态	12
A.1 DIC 测量主要步骤流程图 (第 1 部分)	67
A.2 DIC 测量主要步骤流程图 (第 2 部分)	68

## 表格列表

B.1 SOD, 焦距和 FOV 的快速查找表示例	70
---------------------------	----

## 提示列表

提示 2.1	5
提示 2.2	6
提示 2.3	6
提示 2.4	7
提示 2.5	7
提示 2.6	7
提示 2.7	8
提示 2.8	8
提示 2.9	9
提示 2.10	9
提示 2.11	10
提示 2.12	10
提示 2.13	11



提示 2.14	13
提示 2.15	14
提示 2.16	14
提示 2.17	15
提示 2.18	15
提示 2.19	16
提示 2.20	16
提示 2.21	18
提示 2.22	18
提示 2.23	19
提示 2.24	20
提示 2.25	20
提示 2.26	21
提示 2.27	21
提示 2.28	21
提示 2.29	22
提示 2.30	23
提示 2.31	24
提示 3.1	26
提示 3.2	26
提示 3.3	27
提示 3.4	28
提示 3.5	31
提示 3.6	32
提示 3.7	34
提示 3.8	34
提示 3.9	35
提示 3.10	36
提示 3.11	37
提示 3.12	37
提示 3.13	38
提示 3.14	38
提示 3.15	38
提示 5.1	42
提示 5.2	43
提示 5.3	44
提示 5.4	49
提示 5.5	49
提示 6.1	51

## 推荐列表

推荐 2.1	4
推荐 2.2	5
推荐 2.3	5
推荐 2.4	6
推荐 2.5	9



推荐 2.6	10
推荐 2.7	10
推荐 2.8	11
推荐 2.9	13
推荐 2.10	13
推荐 2.11	15
推荐 2.12	16
推荐 2.13	16
推荐 2.14	17
推荐 2.15	18
推荐 2.16	19
推荐 2.17	20
推荐 2.18	21
推荐 2.19	22
推荐 2.20	22
推荐 3.1	25
推荐 3.2	25
推荐 3.3	27
推荐 3.4	28
推荐 3.5	29
推荐 3.6	30
推荐 3.7	30
推荐 3.8	30
推荐 3.9	31
推荐 3.10	32
推荐 3.11	32
推荐 3.12	35
推荐 3.13	36
推荐 3.14	37
推荐 3.15	37
推荐 3.16	37
推荐 3.17	39
推荐 3.18	39
推荐 5.1	43
推荐 5.2	44
推荐 5.3	47
推荐 6.1	52

## 警告列表

警告 2.1	5
警告 2.2	6
警告 2.3	9
警告 2.4	9
警告 2.5	10
警告 2.6	11
警告 2.7	11



警告 2.8	13
警告 2.9	13
警告 2.10	13
警告 2.11	15
警告 2.12	16
警告 2.13	16
警告 2.14	17
警告 2.15	17
警告 2.16	17
警告 2.17	18
警告 2.18	18
警告 2.19	19
警告 2.20	20
警告 2.21	21
警告 2.22	22
警告 2.23	22
警告 2.24	23
警告 2.25	23
警告 3.1	26
警告 3.2	26
警告 3.3	27
警告 3.4	27
警告 3.5	29
警告 3.6	29
警告 3.7	30
警告 3.8	31
警告 3.9	31
警告 3.10	31
警告 3.11	33
警告 3.12	33
警告 3.13	35
警告 3.14	36
警告 3.15	37
警告 3.16	38
警告 3.17	39
警告 4.1	41
警告 5.1	42
警告 5.2	43
警告 5.3	49

# 1 | 前言

## 1.1 DIC 的目标和基本原理

在本指南的范围内，DIC 特指一种光学测量技术，用于在整个力学试验过程中测量试样表面上不断变化的全场二维或三维坐标。测量出的坐标场可用于进一步导出位移、应变、应变率、速度和曲率等感兴趣量（Quantities-of-Interest, QOI）的场。由于 DIC 是一种非接触测量技术，它独立于被测材料或试样尺寸，因此在各种领域中被用于研究和表征固体的变形。一些常见的实验材料包括金属、聚合物、混凝土、地质样品、生物组织、电池电极和炸药等，试样尺寸范围从拉伸试验中使用的小试样到飞机的整个组件。这种多功能性催生了大量自主开发的或商业的分析方法和软件的诞生，用于分析从 DIC 测量中获得的数据。

作为开始，随后将首先介绍 DIC 的一些基本概念。有关 DIC 更完整的介绍，请参阅 [42]。为使本指南比较实用，在开始使用 DIC 之前，读者可以参考 [16] 中的一系列文章。DIC 的核心思想是，基于一系列试样表面的数字散斑图像，通过求解最优化问题（基于典型的传递模型，如光流），估计其全场散斑的坐标和位移。DIC 中的基本假设是，无论是自然的还是人工的，试样表面的散斑图案都应该跟随试样一起变形。因此，试样表面拍摄的散斑图像可以用于相关计算得到其全场坐标，用于表征试样表面的形状、运动和变形。平面试样表面的 2D-坐标可以用单相机系统来测量，这被称为 2D-DIC。三维表面坐标测量除了图像相关（Image Correlation）外，还需要至少两个成一定立体角的相机。<sup>1</sup>这被称为 Stereo-DIC<sup>2</sup>。在进行测量之前，相机/镜头系统通过间距已知的特征图像（即标定板）进行标定。该标定使得 DIC 软件可以校正镜头畸变，对于 Stereo-DIC 来说，还可提供相机之间以及相机与试样之间的相对位置和姿态。

为了实现相关计算，已经开发了许多类软件，但最常见的两类是局部 DIC（Local DIC）方法和全局 DIC（Global DIC）方法。在局部 DIC 方法中，一个感兴趣点（Point-of-Interest, POI）的坐标求解仅依赖于该点附近一小部分图像（即子区），但与其它 POI 的求解无关。在全局方法中，一个 POI 的解与附近其它 POI 的解有一定的依赖性。在大多数情况下，本指南的内容都适用于这两种方法，特别是考虑到 DIC 测量的设计（第2章）、DIC 测量的准备（第3章）以及 DIC 测量试验的进行（第4章）；但是，本指南是从局部 DIC 方法的角度讨论 DIC 图像处理（第5章）的。

简言之，使用软件代码分析图像中用户自定义的感兴趣区域（Region-of-Interest, ROI），其中包含一组计算或测量点。在局部 DIC 中，每个计算点均位于子区的中心。计算点的间距（步长）通常以一定的规则来定义，这样相邻子区可能（或可能不）重叠。

<sup>1</sup>Stereo-DIC 也可以使用单相机立体视觉系统实现，其中成像传感器的左、右半部分别拍摄左、右图像。不过，这是一个更深层次的问题，超出了本版指南的范围。

<sup>2</sup>Stereo-DIC 通常称为 3D-DIC。但是，为了避免与 DVC 混淆，本指南建议使用术语 Stereo-DIC 而不是 3D-DIC。需要有关的更多信息，请参见词汇表条目“[数字图像相关](#)”获取。



从参考图像（在运动/变形之前）到随后的每个图像（在运动/变形期间），都要对相关子区进行相关计算。该相关计算首先使用插值函数对每个子区中的散斑图案进行近似，然后该函数基于子区形函数发生变形。结合子区权重的匹配准则将用于匹配参考图像中的每个子区与变形图像中的相应子区。在 Stereo-DIC 中，匹配准则与立体系统标定参数一起，用于匹配从其中一台相机到另一台相机的子区，图像相关计算的结果即为每个子区中心的测量坐标。

计算导出场（Derived Field）是 DIC 众多处理过程中的最后一步。可从坐标场中导出的最常见量为应变场，尽管 DIC 还提供了获得其它 QOI（如曲率、速度和加速度）的途径。QOI 的最小分辨率（也称为本底噪声）以及潜在的系统误差与测量的设置（如相机选择、图像对比度、DIC 散斑的特征尺寸）以及数据处理参数（如子区尺寸、形函数、虚拟应变片）都有关。因此，DIC 数据处理的最后一步是通过不确定度量化分析来确定 QOI 的分辨率。这将为用户提供试样力学试验的位移和/或导出量以及这些测量值的不确定度的全场描述。

## 1.2 本指南所涉及的范围

本指南的目的是为平面试样力学试验的 DIC 测量提供“可靠实践”的指导。本指南既可成为面向新 DIC 从业人员的初级培训文件（补充基于供应商的或其它正式培训的以及硬件和软件的特定文件），也可为经验丰富的用户提供参考，以更新他们的基本知识和技能，帮助他们解决 DIC 测量中的问题。附录A提供了设计、执行和分析 DIC 测量时要考虑的要点的检查表，而图.A.1描述了采用 DIC 测量的力学试验的典型步骤。本指南各节正文中介绍了检查表和流程图中各步骤的详细信息。本指南的目标是帮助 DIC 的从业人员实现计划周详、执行良好、分析可靠和有据可查的 DIC 测量。请注意，本指南不提供力学试验本身的任何指导，而只关注于完善 DIC 测量过程本身。

在编写本指南时，我们力求提供尽可能多的指导性和诊断性建议，同时保持文档的通用性，并且独立于特定的硬件或软件。由于本文件是一个指南而不是一个标准，因此本指南不是对 DIC 测量的严格要求，而仅仅是对可靠实践的建议。然而，一些指导被认为是实现可靠和可信测量的关键，其它内容则被认为是提高测量可信度的建议。本指南试图阐述关键的和推荐的指导，并对忽略每条指导的后果作出警示性说明。

本指南重点介绍了 DIC 测量装置、图像相关计算和用于应变计算的 DIC 数据后处理的可靠实践。它不包括其它数据（如速度、加速度、曲率等）的处理，也不包括使用 DIC 数据进行特定分析的应用，如有限元模型（FEM）验证、材料识别等。

如在1.3节中所述，本版实践指南的范围仅限于普通实验室试验条件。我们希望在未来版本中纳入复杂试验条件下的可靠实践及其连带的额外挑战。

## 1.3 使用 DIC 测量方法的一般力学试验范围

本指南适用于以下条件下的典型力学试验及其相关 DIC 装置：

- 试样尺寸约为 50mm 至 1m
- 经受名义上的平面运动和/或变形的平面试样
- 等效应变约在 60% 以内
- 在可控环境下的通用实验室进行试验（例如，室温为 15–25°C，基本不存在振动）

- 非特殊环境条件（如无环境箱、无水箱或压力容器、无窗口或观察窗、无爆炸或冲击波）
- 使用光学图像（不包括扫描电子显微镜、原子力显微镜或 X 射线拍摄到的图像）
- 2D-DIC 和 Stereo-DIC<sup>3</sup>
- 单一 DIC 系统：2D-DIC 需要一个相机而 Stereo-DIC 需要两个相机<sup>4 5</sup>
- 标准机器视觉相机和光学镜头（不包括显微镜、体视显微镜或高速相机）
- 基于子区的局部 DIC 算法（与全局算法相对）

本指南未明确规定力学测试的速度范围（准静态的或动态的），因为这里给出的任何指导均将夹头速度或应变率限制在一定范围内。<sup>6</sup>

---

<sup>3</sup>不讨论 DVC (Volumetric DIC) 和其他图像处理技术，如图像拼接、成像数据对齐、点跟踪和目标跟踪等。

<sup>4</sup>在第 1 页脚注 1 中。

<sup>5</sup>不讨论使用多个相机或多个系统去覆盖试样上不同的 ROI 的情况，例如在圆柱体四周布置多套 DIC 系统。

<sup>6</sup>本指南对动态试验的适用性存在一些警告。首先，由于额外的硬件的复杂性，本指南仅限于标准相机，不包括高速相机。这里的高速相机是指将数据快速记录到内存缓冲区上的相机，这些数据必须随后进行下载。第二，当选择 DIC 散斑进行动态试验时，本指南不提供任何指导、提示或推荐，为此在动态试验中 DIC 散斑选择常需要特殊的考虑和注意。第三，对于动态试验而言，无论是 Stereo-DIC 的相机之间，还是相机与其他感兴趣的数据（例如力）之间的同步，通常都更加复杂，本指南仅讨论 Stereo-DIC 相机同步这一最基本需求。关于动态试验的相关内容超出了当前版本指南所讨论的范围。

## 2 | DIC 测量的设计

### 2.1 测量要求

在进行 DIC 测量之前，需要明确定义力学试验的期望和要求，以及 DIC 测量的目标。这些条件将被用来评价得到的分析结果是否位于、接近或者超出了在设计 DIC 测量时所设定的范围。

#### 2.1.1 感兴趣量

选择感兴趣量 (Quantity-of-Interest, QOI)，比如形状、位移、速度、加速度、应变和应变率等。

#### 2.1.2 感兴趣区域

选择试样上的感兴趣区域 (Region-of-Interest, ROI)，并确定在该区域内期望得到的运动和/或变形。ROI 可以是整个试样上特定的部分 (比如单拉试样的标距段和引出板)。

#### 2.1.3 视场

根据试样上的 ROI 和预计的运动和/或变形来确定需要的视场 (Field-of-View, FOV)。

##### 推荐 2.1

为了优化空间分辨率，试样上的 ROI 通常应该基本充满 FOV，并且在整个试验过程中都位于 FOV 中。对于 Stereo-DIC，每个相机的 FOV 并不相同，有效的 FOV 定义为两个相机的公共 FOV，也就是在每个相机中成像空间的相同部分。参见 2.2.2 节了解如何设计相机安装系统以获得期望的 FOV。

#### 2.1.4 硬件占据的空间位置

估计相机、固定硬件和光源可能占据的位置，从而确定可行的靶距 (Stand-of-Distance, SOD) 和布局。确定要使用的标定板的尺寸和类型 (比如使用正面照明 (Front-Lit) 或者背面照明 (Back-Lit) 标定板)，以及试验装置应如何调整以标定光学系统 (3.2.2.2 节)。选择 (购买或加工) 合适的相机支撑结构 (2.2.2 节)。

### 提示 2.1

更多关于 FOV、焦距、成像元件尺寸和 SOD 关系的内容，请参见附录B。

### 推荐 2.2

可以在试样后方放置静止的背景板 (Backdrop)，以防止试样后方任何人或物体的移动对成像造成不利影响。

## 2.1.5 2D-DIC 与 Stereo-DIC 的对比

确定应该采用 2D-DIC 还是 stereo-DIC。

### 警告 2.1

对于 2D-DIC，试样表面应该是平面，并在试验过程中一直保持为平面，且与相机光轴垂直<sup>a</sup>，同时确保 SOD 在试验过程中保持不变。任何未预料到的离面运动（即由于试样的减薄、屈曲和由于夹头未对齐引起的旋转或平移等）将导致 2D-DIC 测量误差 [13, 43, 44]。

### 推荐

如果可能，即使名义上是平面试样且经受平面变形，也强烈推荐所有试验采用 Stereo-DIC 而不是 2D-DIC。只有当试验装置的空间无法容纳下两个相机/镜头（比如两个相机无法安装到试验台架和其他设备所允许的空间内）才推荐采用 2D-DIC，<sup>b,c</sup>

<sup>a</sup>如果二维单相机系统的内外参数已通过3.2节中所述的标定板标定得到，则可确定并进一步校正试样的离面倾斜。然而该更深层次的话题已超出本版指南的范围。

<sup>b</sup>因成本原因无法购买两个相机/镜头也会阻碍 Stereo-DIC 的应用，选用标准的机器视觉相机一般不会出现这一问题，但采用高速或超高速相机时可能出现，这部分内容已超出本版指南的范围。

<sup>c</sup>测量孔隙率极高的泡沫材料时可能会采用 2D-DIC，因为如果采用 Stereo-DIC，孔隙形成的自然散斑在左右相机中成像差异大（由不同的视角、光照和相机拍摄孔隙时的阴影造成），同时在泡沫试样表面制作散斑也十分困难。然而，关于泡沫材料测量的具体细节介绍已超出本版指南的范围。

### 推荐 2.3

如果必须采用 2D-DIC，可采用5.4.3节中的方法估计试样的离面运动/变形（比如因为减薄造成的）和对应的面内测量误差。

对于 2D-DIC，镜头选择推荐参见2.2.1节。

## 2.1.6 立体角

对于 Stereo-DIC，应选择合适的立体角 (Stereo Angle)。

### 提示 2.2

立体角的确定依赖于试验装置的几何尺寸以及最关心的 QOI。立体角越小，面内位移测量精度越高，但离面位移测量的不确定度会增加。同样的，立体角越大，离面位移测量精度越高，但面内位移不确定度也会增加。

立体角和不确定度的关系也受镜头焦距的影响。更短焦距的镜头需要更大的立体角，才能获得与长焦距镜头相同的离面不确定度。

立体角同样也影响可用的 DOF。采用小的立体角时，在大范围离面运动时试样在两个相机内仍成像清晰。相反，采用大的立体角，试样保持成像清晰所允许的离面运动范围将缩小。

### 推荐 2.4

通常，立体角大约在 15–35° 之间 [23]。为降低离面不确定度并使可用的 DOF 最大化，短焦镜头（8–12mm 焦距）的最小立体角应为 35°，中等焦距镜头（17mm 焦距）对应的最小立体角为 25°，而 35mm 及更长焦距的镜头可以采用 15° 立体角 [3]。

### 警告 2.2

经验表明，大的立体角（大约大于 35°）可能导致两个相机的图像难以互相关（Cross-Correlation），这是由于两个相机拍摄到的图像视差（Perspective Difference）过大，在采用广角镜头时尤其如此。

## 2.1.7 景深

对于 Stereo-DIC，考虑到预计的离面运动和相机的立体角，确定需要的景深（Depth-of-Field，DOF）以保证在试验过程中试样的全部 ROI 均成像清晰。

### 提示 2.3

对于 2D-DIC，试样表面应该为平面，在试验中仍保持为平面，同时 SOD 保持不变。因此，DOF 对于 2D-DIC 装置而言不是重要的因素。然而，足够大的 DOF 有助于确保在将试样放入加载台架上时仍然成像清晰，并减小成像系统光轴与试样及试验台架对齐的敏感性。此外，足够大的 DOF 还有助于确保在发生未预料到的离面运动/变形时仍然成像清晰。

## 2.1.8 空间梯度

估计 QOI 的空间梯度（Spatial Gradient）来确定 DIC 系统所需的分辨率，该值由测量系统的设计参数决定，比如相机分辨率、FOV 和 DIC 计算参数（如子区大小和步长）。

#### 提示 2.4

如果 QOI 的空间梯度高于 DIC 系统能够分辨的最大梯度，可考虑通过以下方式增大光学系统的放大倍数（即增大图像尺度），（1）采用更高分辨率的相机，（2）减小 ROI 在试样上的比例。<sup>a</sup>以上提示假设 DIC 系统的空间分辨率是受相机限制的，也就是说，增大 ROI 内的像素点个数将直接提高 DIC 系统的分辨率。然而，在高的放大倍数（小的 FOV）或高的图像分辨率的条件下，系统可能受限于镜头，也就是说，进一步增大放大倍数或图像分辨率将不会提高空间分辨率。

<sup>a</sup>或者，搭建两套 DIC 系统：第一套系统的放大倍数较小，但 FOV 和 DIC 散斑都较大，用来捕捉试样的总体变形；第二套系统的放大倍数更高且聚焦在试样上较小的 ROI 上，对应散斑尺寸也更小，以捕获高梯度的局部区域。该更深层次的话题超出本版指南的范围。

### 2.1.9 本底噪声

为所有 QOI 确定可接受的本底噪声（Noise-Floor）。对用于建立可接受本底噪声阈值的准则进行校验和记录。

#### 提示 2.5

可接受的本底噪声的阈值和应用场景密切相关，常由专题专家（Subject-matter Expert）确定。本底噪声可以在设计试验的过程中评估出来，该值的确定有助于选择 DIC 硬件（也就是相机，镜头，散斑制作方法，光照等）和 DIC 计算参数（即子区大小，步长等）。更多内容参见 5.4 节。

### 2.1.10 帧率

确定满足要求的帧率（Frame Rate）。

#### 提示 2.6

确定所需帧率时，需要考虑几个因素，按照重要性排序如下：

1. 期望得到的 QOI 的时间分辨率是决定一个合适测量频率的最重要因素。因此，DIC 测量帧率的选择应该与 QOI 变化的最高速率相匹配。因为时间分辨率的需求是与应用密切相关的（示例如下），关于帧率和试验过程中采集的图像张数，这里不给出一般性的指导意见。

例如，如果 DIC 测量的目的是为了捕获金属在拉伸试验中的屈服点，那么时间分辨率取决于为了充分捕捉弹塑性转变而需要的图像张数。如果是为了确定韧性试样在颈缩前的最大应变，此时帧率可设置的更小。再如，试样承受循环载荷时，借助针对含噪声信号的 Shannon 采样理论，可确定最小采样帧率，也就是说，图像采集帧率必须是循环载荷频率的 10–15 倍。

2. 帧率选择的第二个考虑因素是帧间位移大小。如果帧间变形太大，DIC 算法可能无法在变形图像上确定出子区的位置。然而，大部分 DIC 软件都允

许用户自己选择变形初值，这通常能很好的补偿在帧间大位移计算中的不足。最大帧间位移的跟踪能力与软件相关，但是，合理的最大帧间位移（作为初值）约为一个子区大小。例如，如果子区大小是 25pixel 且图像尺度为 20pixel·mm<sup>-1</sup>，那么相邻两幅图像间的最大位移应约小于 1.25mm。如果试样运动速度约为 1mm·s<sup>-1</sup>，最小帧率可设为 0.8Hz 左右。

3. 帧率选择考虑的第三个次要因素是力学试验中采集的数据量大小。DIC 测量中很容易采集到数 GB 的数据，因此良好的数据管理也很必要。

### 2.1.11 曝光时间

确定最大曝光时间以限制运动模糊。

#### 提示 2.7

对曝光期间试样最大允许运动的最保守估计就是位移场的本底噪声(2.1.9节)。对于典型的 DIC 系统，该阈值约为 0.01pixel。在一些领域（如机器视觉），该阈值常设为 0.1–0.3pixel，而在一些动态模态测量试验中，在曝光时间内到达 3pixel 也是可接受的 [45]。<sup>a</sup>

每次曝光对应的位移（单位为 pixel）计算如下：

$$\text{每次曝光对应的位移 [pixel]} = \left( \text{速度} \left[ \frac{\text{mm}}{\text{s}} \right] \right) \cdot \left( \text{图像尺度} \left[ \frac{\text{pixel}}{\text{mm}} \right] \right) \cdot (\text{曝光时间 [s]}) \quad (2.1)$$

<sup>a</sup>此处给出的运动模糊的推荐阈值是基于理想的散斑尺寸为 3–5pixel 的假设 (2.3.2节)。也可以认为运动模糊应该低于平均散斑尺寸的一个百分比。例如，如果散斑图像分辨率为 100 万像素，散斑尺寸为 3pixel，那么 0.3pixel 的运动模糊对应 10% 的散斑尺寸。如果相同的散斑用 1600 万像素的相机成像，对应散斑尺寸为 12pixel，10% 的运动模糊即对应 1.2pixel。在第二种情况中，如果子区大小对应增加，运动模糊也会对位移结果有类似的影响。

#### 提示 2.8

由于曝光时间和帧率是独立确定的，曝光时间不能大于帧率 (2.1.10节) 的倒数。

### 2.1.12 同步与触发

确定 DIC 图像与其他测量手段（如施加力或位移的设备、应变片、热电偶等）的同步方式。确定在力学试验开始时如何触发所有的数据采集设备。<sup>7</sup>

<sup>7</sup>将 DIC 图像与其他设备进行同步的方法是与硬件相关的，本指南对此不给出更多信息。



## 2.2 设备与硬件

### 2.2.1 相机与镜头的选择

选择相机和镜头<sup>8</sup>以获得期望的 FOV、DOF、SOD、空间分辨率、时间分辨率和本底噪声（见2.1节）。

#### 提示 2.9

FOV、SOD 和 DOF 三大因素是相互耦合的，必须同时选定。相机和镜头不能独立选择，因为成像元件尺寸和镜头将共同影响图像尺度。关于 FOV、焦距、成像元件尺寸和 SOD 之间关系的更多信息，请参考附录B。此外，关于相机和镜头的相关信息请参考 [21, 22]。

#### 提示 2.10

在大多数情况下，需要根据经验来确定相机（如噪声水平和动态范围）和镜头（如畸变和分辨率）的选择能否充分满足 DIC 测量精度的要求。推荐对新硬件进行性能的验证与评价，如统计利用新硬件测量出的 DIC 结果的基线本底噪声（Baseline Noise-Floor）。通常，对所有硬件的评价工作已由 DIC 设备制造商完成，但是 DIC 用户可以利用5.4.2节中的流程进行独立地评价和验证。

#### 推荐 2.5

和机器视觉领域一致，通常选用单色且每个像素近似为方形的相机进行 DIC 测量。<sup>a</sup>同时推荐采用全局快门（一次读取所有像素的数据）成像元件而不是卷帘快门（一次读取一行像素信息，逐行读取）元件。

<sup>a</sup>使用彩色相机或者像素不为方形的相机也是允许的；然而，使用这些相机需要复杂的分析，这些深层次话题超出了本版指南的范围。

#### 警告 2.3

能自动调整的镜头和/或相机的成像系统，比如自动对焦镜头或每次成像会自动打开/关闭的光圈，均不适合用于 DIC 测量，应避免使用。

#### 警告 2.4

一些相机（尤其是一些老式的数字摄像机）具有“交错（Interlace）”相邻帧的功能，以拍摄出让人看上去更舒服的视频。这些功能将当前帧的奇数行（或偶数行）与上一帧的偶数行（或奇数行）融合形成新的帧，这样的相机完全不适合用于 DIC 测量。

#### 推荐

<sup>8</sup>一些镜头具有防抖动功能，但它对 DIC 测量的影响并未被深入研究。



使用新的或者不熟悉的相机前，建议确认“交错”功能是否已关闭。

#### 提示 2.11

一些相机的成像元件前方内置了低通滤波单元（也称为反走样滤波器）。这些在单反相机（Single-Lens Reflex, SLR）或者数字单反相机（Digital Single-Lens Reflex, DSLR）中十分常见，而在机器视觉相机中很少见。很重要的一点是要明确用于 DIC 的相机是否有内置有低通滤波器，这决定了是否要对图像进行预滤波（Pre-filter）（见5.2.2节）。

#### 提示 2.12

用于 Stereo-DIC（有时也用于 2D-DIC）的镜头主要有两类，即定焦镜头和变焦镜头。对于定焦镜头，主要通过调节 SOD 来调节 FOV 或者图像尺度。对于变焦镜头，可通过调节 SOD 或者焦距来改变 FOV 或者图像尺度。因此，变焦镜头相比于定焦镜头更加灵活。然而，由于变焦镜头更加复杂，其镜头畸变通常更大。此外，很多（尽管不是全部）变焦镜头并没有锁定调焦环的途径，如果无意间移动了相机/镜头，其焦距很容易被改变。

#### 推荐 2.6

如果必须使用 2D-DIC，推荐采用双远心镜头来降低由于离面平移导致的误差，尽管如此，离面旋转和过大的离面位移仍然会造成 2D-DIC 测量误差。双远心镜头所能补偿的离面平移的大小取决于 FOV 大小。

如果无法使用远心镜头，推荐使用长焦镜头以将 SOD 增至最大，从而将离面运动引起的测量误差降至最低。

#### 警告 2.5

尽管对于 2D-DIC 推荐使用远心镜头，但该镜头可能不能用于 Stereo-DIC 测量。

#### 推荐 2.7

推荐采用具有锁定可调零件（如对焦环，光圈调节环，变焦设置（对于变焦镜头））功能的镜头，以降低由于意外而改变零件原有位置的可能性。

## 2.2.2 相机与镜头的固定

### 2.2.2.1 固定系统的一般特征

搭建牢固的相机和镜头固定系统，并使其具备如下特征：

- 具有足够多的自由度以精确调节相机/镜头的位置和姿态（比如移动或旋转平台，三脚架等）。

- 为了进行相机标定 (3.2.2.2节)，如果相机的位置和/或姿态需要调节，在固定系统中需包括适当的调节机构（如用于相机转动的杆或相机平移的移动台）。
- 在确定最终位置和姿态后，锁紧固定系统上的所有可调节零部件。

#### 提示 2.13

正如推荐2.7所述，推荐采用具有锁定可调零件（如对焦环，光圈调节环，变焦设置（对于变焦镜头））功能的镜头。然而，如果所采用的镜头无锁紧功能，可用胶带固定调节环。固定需要在系统标定前、成像系统与试样对齐且对焦后进行。切记在用胶带固定过程中不能改变镜头对焦或者镜头的其它设置。

- 对于 2D-DIC，确保相机和镜头光轴与试样表面垂直。

#### 警告 2.6

关于 2D-DIC 的离面运动的含义参见2.1.5节。

- 对于 Stereo-DIC，固定相机时要确保已得到所需的 FOV、图像 ROI 和立体角。

#### 推荐 2.8

尽管视差必然存在，调节 FOV 时应使得从两个相机中观察到的同一 ROI 的图像尽量接近。调节相机姿态时，应将矩形的成像元件的长轴与 ROI 的长轴对齐（图2.1）。也就是说，如果 ROI 是宽矮形的，应该将相机水平放置，如果 ROI 是瘦高形的，应将相机侧立放置。确保立体平面（Stereo-Plane）与试样表面垂直（图2.1）。<sup>a</sup>如果相机姿态调节不当使得角度（例如相机的立体角，立体平面相对与试样表面的倾角）过大，将增加图像的透视畸变，因此应避免此类情况的发生。大长宽比试样的 ROI 的长轴（与短轴相对）应与立体平面垂直（图2.1）。这种姿态可以减小在 ROI 边缘处的图像视差。

<sup>a</sup>在本版指南中，采用一对相机的 Stereo-DIC 目前只针对名义上的平面试样。几何形状更加复杂的试样、采用多于两个相机的 DIC 系统以及多系统的 DIC 测量的内容超出了本版指南的范围。

- 对于 Stereo-DIC，将两个相机刚性地固定在一起，以防止相机间的相对运动。<sup>9</sup>更多常见固定系统的信息参见2.2.2.2节。

#### 警告 2.7

任何相机间的相对运动都将引入 DIC 测量误差。<sup>a</sup>如果发生相对运动，相机系统必须重新标定。<sup>b</sup>刚性地固定对于避免该问题十分关键！

<sup>a</sup>如果两个相机相对于试样一起刚性移动，只会影响 DIC 刚体位移的测量。对于大部分测量，刚体位移测量并不重要（比如 QOI 为应变时），存在该刚体位移误差并无大碍。

<sup>b</sup>如果在 FOV 中有固定不动的参考点，相机对的刚体运动可以通过后处理进行校正。然而，

<sup>9</sup>在实际测试中，对于两个相机无法刚性地固定在一起的情况，比如在大尺寸测量中两个相机分别安装在独立的三脚架上，本版指南暂不讨论。

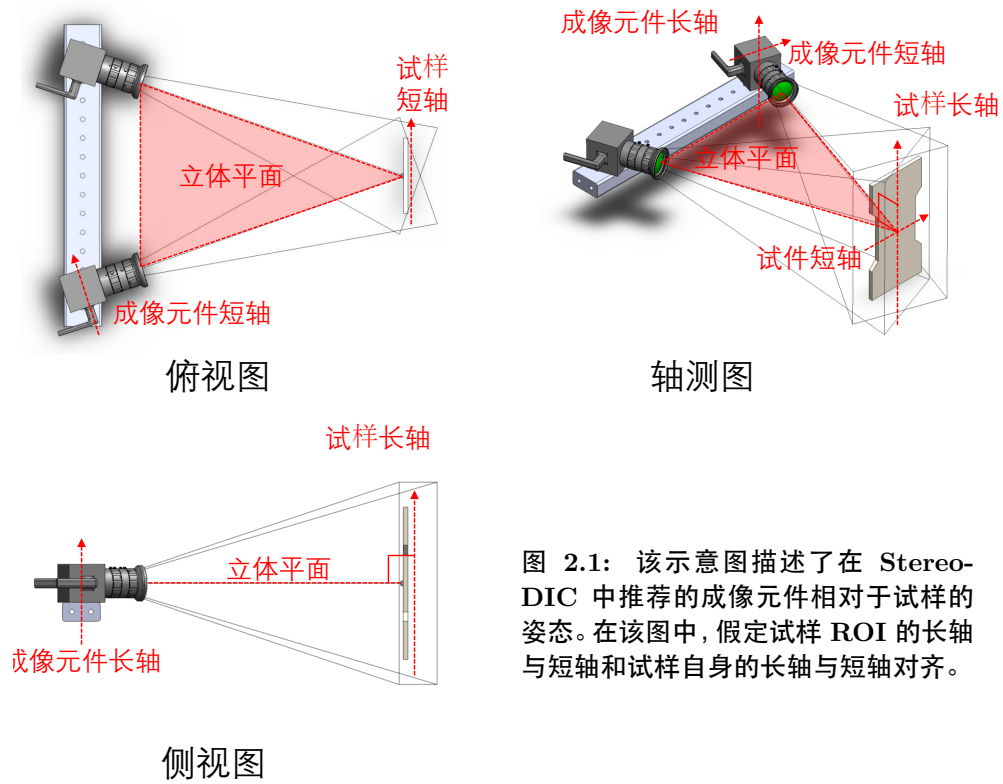


图 2.1: 该示意图描述了在 Stereo-DIC 中推荐的成像元件相对于试样的姿态。在该图中, 假定试样 ROI 的长轴与短轴和试样自身的长轴与短轴对齐。

如果要校正相机之间的相对运动，需要调整标定中的外参数（3.2节）。一些 DIC 软件提供了所谓的“标定校正”功能，主要基于某些假设并极小化极线误差（Epipolar Error）（3.3.2.2节）来校正相机外参数，这类校正方法超出了本版指南的范围。

- 在离相机/镜头系统整体的质量中心较近的位置进行固定。如果镜头和相机重量差很多，应该固定重量更大的一方。考虑在光轴方向上用两点而不是一点进行固定，以减少杠杆效应。

#### 推荐 2.9

大部分的商用相机、镜头和固定装置都针对光轴为水平的工作状态设计。如果光轴方向是竖直的，需要确保固定牢靠。如有必要，应强化在该方向上的固定刚度。此外，确认镜头在该方向性能正常，且对焦或其它设置不发生漂移。

#### 警告 2.8

未平衡固定的相机和镜头系统更容易漂移或者出现不对齐问题，从而引入 DIC 测量误差。

- 稳定相机线缆并消除线缆内的张力，防止线缆牵拉相机或者将周围的振动传递给相机系统。如果标定时需要移动相机（3.2.2.2节），应确保线缆足够松弛以便重新定位相机。
- 确保相机支撑结构足够稳固。可行的话，可以在三脚架或其他底板上增加重物（如沙袋）。
- 尽可能降低传递到相机上的振动。

#### 警告 2.9

任何传递到相机上的振动都将直接增加 DIC 测量的本底噪声。花在减小振动上的时间和工作量，与振动的幅度相关，也取决于期望的 DIC 精度。

#### 提示 2.14

放大图像到可以观察到单个像素的变化时，一些振动（并非所有的）可以通过肉眼观察图像分辨出来。SOD 较大时，相机和镜头的振动更容易被看到，SOD 较小时一般难以发现。

#### 警告 2.10

振动着的 Stereo-DIC 系统中的相机间姿态会随时间发生变化，虽然这样的振动用肉眼可能无法察觉，但它会使标定无效。

#### 推荐 2.10

为了减小振动的影响，推荐预先关注以下问题：

- 确保相机和固定系统不与任何振动部件接触（例如，风扇，压缩机，液

压机，试验机，光源) [20]

- 确认没有从地面传递来的振动。(注意，振动可能来自建筑中其它房间内的设备。)
- 如果有振动传递到相机上，必须加固固定系统且/或增加阻尼。
- 如果 DIC 测量和试验允许采用不同的 SOD 和焦距，应使用更小的 SOD 和更短焦距的镜头。

#### 提示 2.15

在 Stereo-DIC 测量中，极线误差 (Epipolar Error) 是一个很好的指标，它可量化相机/镜头中可能存在的漂移、不对齐或振动。例如，对于一些列静止图像，极线误差在立体系统标定后立即减小，但随着时间增长不断增加，这可能意味着成像系统存在漂移。如果极线误差随着时间是周期性变化的，这可能意味着振动正影响着成像系统。

#### 2.2.2.2 固定系统的类型

有多种相机/镜头的固定系统适合于 DIC，固定系统的选择取决于力学试验装置和在每个实验室中现有的固定组件。在商用“交钥匙”DIC 系统中，一般包括适用于大部分力学试验的标准固定系统。另外，也可根据商用固定系统建立个性化的固定系统。如果力学试验中使用了几何形状复杂、难以获取或不常见的相机和/或镜头，固定系统组件可能需要特殊设计或加工。一些常见的商用固定系统包括，但不限于：

- 标准光学硬件，如通过螺栓固定在光学台上的 1.5 inch (38mm) 杆及相关固定附件。
- 稳固的三脚架。对于 Stereo-DIC，需将一根杆的两端分别固定在两个三脚架上，或者将杆在中部固定在一个三脚架上。随后将两个相机固定在杆上。这样，两个相机将被相对牢牢的固定在一起，而不是分别固定在独立的三脚架上。<sup>10</sup>
- 演播室架 (Studio Stand)。相机固定在演播室架上类似于固定在三脚架上，但是演播室架有两个优点。首先，它采用加重底座，减小使用沙袋或其他配重来稳定整个系统的可能性。其次，其设计有多个可锁定的自由度，方便相机位置和姿态的调节。
- 由预制的不同长度的杆组成的桁架，以及相关固定硬件。

#### 2.2.3 光圈

选择镜头的光圈以获得期望的 DOF (2.1.7节)。对于 Stereo-DIC，两个相机的光圈大小应相同 (或尽量接近)。

#### 提示 2.16

除了控制 DOF，镜头的光圈还控制了进入光学系统的通光量。然而，光圈的选择通常基于期望/要求的 DOF，而调节外部光照 (2.2.4节) 和曝光时间 (2.1.11节)

<sup>10</sup>参见第11页的脚注9。

主要为了限制运动模糊并获得足够的对比度。

#### 提示 2.17

光圈越小 (F 值越大), DOF 越大。

#### 警告 2.11

光圈过小可能产生衍射, 而光圈越大光学像差 (镜头畸变) 越严重。

#### 推荐

推荐采用中等的光圈值, 以避免在极限情况下加重镜头畸变或衍射 [41]。推荐的光圈大小或 F 值取决于镜头和其应用场合, 但推荐设置在  $f/5.6$ – $f/11$  范围内。

## 2.2.4 光照与曝光

对于预先确定的光圈值 (2.2.3 节), 选择光照和曝光时间 (小于等于最大允许曝光时间, 见 2.1.11 节) 以使得 DIC 散斑的最亮 (白色) 和最暗 (黑色) 区域的对比度足够大。对比度在整个图像 ROI 内应该均匀, 在两个相机中应接近 (对于 Stereo-DIC), 且在试验中不随时间变化。对于标准 Stereo-DIC 装置, 两个相机的曝光时间应该相同。<sup>11</sup>

### 2.2.4.1 光源类型

#### 提示 2.18

在一些情况下 (如慢速、准静态测试, 光圈大小适中), 室内光亮度充足。然而在大部分情况下, 需要额外的照明以在设定的光圈和曝光时间下获得好的对比度。此时, 白光或者其他波长或波段的光也可以使用。<sup>a</sup> (然而, 不推荐采用在红外波段强度过高的光, 因为这会增加试样温度, 改变试样的变形行为。) 对光源的主要要求是在整个 FOV 内和试验过程中应保持均匀和恒定。

<sup>a</sup>对于一些 DIC 测量场景, 特殊波长的光会比白光更有优势, 但这方面内容已超出本版指南的范围。

#### 推荐 2.11

推荐采用交叉偏振光 [12] 或者漫射光 (而不是聚焦光源) 来减少镜面反射造成的炫光。<sup>a</sup>更多关于镜面反射的内容参见 2.3.2.5 节。

<sup>a</sup>交叉偏振光源对于曲面试样或者可能产生较大转动的试样尤其有效, 该话题已超出本版指南的范围。

<sup>11</sup>对于 Stereo-DIC, 两个相机的曝光时间并不要求严格相同。例如, 只要曝光时间足够短, 能够限制运动模糊 (2.1.11 节), 每个相机的曝光时间可以根据成像元件的灵敏度不同来单独调节。然而, 该深层次话题已超出本版指南的范围。

围。

#### 警告 2.12

一些光源可能发生闪烁（即光强改变），其频率和交流电频率（通常为 50–60Hz）相同。类似的，一些 LED 光源的光强通过改变光的负荷循环（Duty Cycle）来控制，其频率也通常在 50Hz。对于以上情况，如果成像频率（即帧率）与交流电频率或负荷循环频率接近或者更大，不同图像间的光强（和图像对比度）可能发生变化。

#### 2.2.4.2 光源的固定

##### 提示 2.19

通常，为了均获得好的对比度，拍摄试样和标定板时需要不同的光照和/或曝光时间（DIC 系统标定参见 3.2 节）。在标定时调整光强、位置和/或曝光时间很常见，只要不改变相机和镜头的固定（参见 3.2.2.3 节），且在 DIC 测量前将所有设置恢复原样，这些调整都是允许的。

##### 推荐 2.12

很多厂商都将光源可靠地整合到了相机固定系统中；这些系统在设计上保证调节光源时不会干扰相机。此外，光源也可以独立于相机并固定在单独的结构上，也可以使用遥控光源，以降低调整光源时无意间移动相机的可能性。

#### 2.2.4.3 对比度、光强和增益

##### 推荐 2.13

由于 DIC 的性能严重依赖于图像梯度（即对比度），对比度越高（图像无过曝光或欠曝光），DIC 结果噪声越小。对于 8 位深度相机，如果位移本底噪声在 0.005pixel，图像对比度最小约为 20%（亮暗间的灰度差为 50）[34]，而大于等于 50%（130 灰度）的对比度是首选。<sup>a</sup>

<sup>a</sup>高阶 DIC 使用者会优化对比度，但不局限于亮暗点的灰度差。亮暗灰度服从均匀分布的测量效果会比双峰分布更好。只要对比度仍然足够，使用相机成像元件动态范围的较低部分更加有利，因为相机噪声通常和灰度大小成正比（尽管这可能和相机相关）[1]。

##### 提示 2.20

即使图像用人眼看比较暗，这样的对比度可能对 DIC 计算已经足够大，对于高动态范围的相机尤其如此。

##### 警告 2.13

由于试样的移动和/或变形，测量中图像对比度可能发生变化。因此，要确保在测量开始和整个测量过程中均有足够的对比度。在正式测量前，可用额外的试

样进行预试验，来确认在整个测量中对比度和光照均足够。

#### 推荐

如果在试验过程中，图像的平均对比度发生变化，推荐采用零均值归一化误差平方和（ZNSSD）相关函数，以降低对比度变化带来的影响。

#### 警告 2.14

确保图像的 ROI 里不存在过曝光（即任何像素点的灰度应小于相机的最大灰度）和欠曝光（即任何像素点的灰度应大于相机的最小灰度）区域，且无炫光。在试验开始时以及试样在工作体积内平移和旋转过程中，均应确保满足上述条件 [24]。在 Stereo-DIC 中，要检查两个相机图像是否有炫光，因为炫光通常只会出现在一个相机中。注意，炫光常呈现为点状或线状。

#### 警告 2.15

不要增加相机增益（有时称为曝光指数或 ISO 设置）—成像元件记录的电子数和灰度值间的转换—来试图增加对比度或亮度。增加增益会增加相机噪声，这对 DIC 测量毫无益处。

### 2.2.5 硬件发热

#### 警告 2.16

几乎所有的相机和光源在持续运行后温度都会超过室温，即使是采用 LED 冷光源。硬件发热会在以下几方面（包括但不限于）对 DIC 测量造成负面影响：

- 由于相机和镜头中元件的热膨胀，改变了成像元件和镜头的大小以及位置。
- 在 Stereo-DIC 中，固定结构的发热会改变相机间的相对位置，使得之前的标定结果无效。
- 对流空气（俗称为“热浪”）使得试样和成像系统间的光线发生折射。<sup>a</sup>

<sup>a</sup>高温加热试样也会产生热浪，但高温试样在当前及后续版本的指南中都不进行讨论。

#### 推荐 2.14

为了减轻相机、镜头和固定结构热膨胀的影响，打开相机后应在预定帧率（2.1.10节）下一直拍摄，直到达到稳定的运行温度。只有在相机达到热平衡后才可以拍摄标定图像和 DIC 测量图像。关于相机预热参见3.1.3节。



#### 提示 2.21

即使很小的温度变化也会在试样和成像系统间产生热浪，使得光线发生折射并导致 DIC 测量误差。在位移场和应变场中，这些误差呈现为在空间和时间上变化的“手指”状波动，当用视频播放时可看到类似火苗的跳动 [9]。

#### 推荐 2.15

由于热浪产生的误差难以通过后处理消除 [9]，因此强烈推荐在成像前降低热浪，可采用以下一个或多个预防措施。类似于处理相机振动 (2.2.2节)，热浪产生的误差越大，对 DIC 测量精度要求越高，就越应该花更多时间和精力降低热浪。

- 尽量将光源固定在相机的上方和后方。避免将光源安装在相机和试样之间，尤其避免安装在相机/试样组成的平面下方。
- 如果光源是热浪的主要来源且试验时间短，尽量在试验前关闭光源以防止发热，只在试验时打开。如果试验时间长，可只在采集图像时打开光源，或者在光源上增加风扇进行制冷，使得空气温度均匀。
- 如果热浪由相机引起，用吸热设备或风扇冷却相机。也可以在相机前放置气刀使相机和试样间的空气温度均匀，而不直接将空气吹向相机。

#### 警告 2.17

警惕由于空气冲击导致的相机移动或者由风扇传递到相机固定结构上的振动。如果使用风扇，确保由于降低热浪所减少的误差应大于任何由于相机移动所增加的误差。

## 2.3 DIC 散斑

### 2.3.1 DIC 散斑的类型

DIC 的一个基本假设就是所拍摄到散斑的运动和变形与散斑下方试样的运动和变形相同。有时，试样表面自身带有足够用于 DIC 测量的自然散斑，不需要再制作人工散斑。

#### 提示 2.22

作为第一步，可以先拍摄试样表面的自然散斑，并检查其是否具有2.3.2节中描述的特征。如果是，则不需要再制作人工散斑。

#### 警告 2.18

注意试样上可能存在的表面覆盖层，如易碎的轧屑，氧化物和附加的涂层（如

镀锌层)。这些表面覆盖层可能和其下方的材料变形不同。必须确保表面的散斑能反映所关注材料的变形。

大部分情况下,试样表面必须制作散斑。通常(并不绝对),散斑由大小均匀但位置随机的近似圆形斑点组成。<sup>12</sup>

#### 推荐 2.16

DIC 散斑的质量通常借助肉眼检查来评估,以便 DIC 从业者寻找到与下面描述相符的特征。在研究工作之外做更多的 DIC 散斑的定量评估通常不是必要的,但是可以采用一些指标,例如用于评估对比度的图像梯度,以及用于评估散斑边缘、形状、尺寸和分布的形态学方法 [4, 7]。

## 2.3.2 DIC 散斑的总体特征

自然和人工散斑应具有以下总体特征:

### 2.3.2.1 尺寸

最优的散斑尺寸是 3-5pixel[33]。这条指导对亮(黑底白色)或暗(白底黑色)散斑均适用。

#### 提示 2.23

有很多定义和确定散斑尺寸的方法。一个粗略的手动估计方法是在放大图像后用肉眼估计散斑尺寸,该方法通常能满足要求。

#### 警告 2.19

小于 3pixel 的散斑有引起走样并增加 DIC 误差的风险 [32, 40], 该误差在低信噪比且位移很小时更显著。在压缩试验中,小于推荐尺寸范围的散斑(即 3pixel)可能因为压缩和间距变小而走样。尺寸较大(即大于 5pixel)的散斑需要更大的子区(见 5.2.5 节),这会导致位移和应变空间分辨率的降低,但不会对结果造成负面影响(即不增加噪声)。

#### 推荐

对于很多应用,如果所采用的散斑制作方法制作的散斑尺寸范围很宽,这时,应该采用比最优尺寸更大的散斑,以限制走样特征的数量。也就是说,宁愿由于散斑大而降低空间分辨率,也不要因为走样而增加噪声。

<sup>12</sup>还存在更多优化的散斑设计,这些内容已超出本版指南的范围,相关信息参见 [2, 5, 11]。此外,一些 DIC 厂商需要规则的(不是随机的)散斑,这些内容在此也不涉及。

#### 提示 2.24

散斑的物理尺寸是由图像尺度决定的。比如，如果图像尺度为  $20\text{pixel}\cdot\text{mm}^{-1}$ ，为了得到 5pixel 的散斑，其物理尺寸为  $(5\text{pixel})/(20\text{pixel}\cdot\text{mm}^{-1}) = 0.25\text{mm}$ 。

注意，对于给定的 DIC 测量，散斑物理尺寸取决于 FOV 和图像分辨率。对于给定的 FOV 和镜头，与高分辨率（如 1200 万像素）相机相比，低分辨率（如 100 万像素）相机需要更大的散斑大小和间距。

#### 推荐 2.17

在 Stereo-DIC 中，相机和试样呈一定角度，图像尺度（在试样表面）在每个相机的整个 FOV 内是不同的。在两相机的 ROI 内，为了保证任意位置最小的散斑不走样，要密切关注图像尺度的改变。因此，在两个相机的 ROI 内，需要找到最小图像尺度所在位置，并以此定义最小的 DIC 散斑。<sup>a</sup>

<sup>a</sup>高阶 DIC 用户在设计最优的 DIC 散斑时可能考虑图像尺度的变化，但该深层次话题超出了本版指南的范围。

#### 提示 2.25

在根据图像尺度计算出散斑的物理尺寸后，可以用办公室打印机（如果其分辨率足够的话）打印出散斑图像，并用相同的成像系统拍摄图像，以确保所有的散斑尺寸在 3-5pixel 之间。

### 2.3.2.2 随机性

散斑必须具有足够的随机性，以保证图像不同区域内的子区具有唯一性。

#### 警告 2.20

对很多 DIC 系统而言，取向规则（各向异性）的特征会带来很多问题，应该避免，除非只需要计算某一个方向的运动。比如，对于由周期性的粗细不同的直线组成的“散斑”，在垂直于直线方向可以进行相关计算，而平行于直线方向无法进行相关计算。

#### 推荐

如果采用规则散斑（如重复打印出的特征），应该增加其随机性，比如增加一些随机的标记点，或者不断改变周期性直线的宽度。

### 2.3.2.3 密度

散斑密度应该大致为 50%（即在 ROI 的任意子区内亮（白色）和暗（黑色）像素所占的面积应该大致相同）[36]。如果使用圆形散斑，由于最小间距的要求，其密度应接近 25-40%。

#### 2.3.2.4 质量

不允许出现低质量的散斑（或称为散斑降质（Quality Degradation）），否则会导致相关计算失败。<sup>13</sup>

##### 提示 2.26

对于自然散斑，散斑降质可能包括但不限于显著的形态改变，以及在塑性变形试验中出现滑移带。

对于人工散斑，降质的原因可能包括（但不限于）褪色，开裂和脱落。

##### 提示 2.27

利用额外的试样进行预试验，可检查散斑在整个试验中的适用性。

##### 提示 2.28

对于一些应变范围，即使未出现相关失败的情况，散斑降质也会导致相关质量降低，增加测量不确定度。[7]

#### 2.3.2.5 反光

应采用哑光而不是有光泽的散斑，避免出现炫光或镜面反射。

##### 警告 2.21

在差的 DIC 散斑中经常存在镜面反射现象（也就是在相机中出现看上去很亮的斑点）。镜面反射与试样和光源、相机的相对位置和姿态有关，试样平移或旋转后可能发生变化。此外，在 Stereo-DIC 中，呈现在每个相机中的镜面反射往往有差异，会导致 FOV 中的散斑差异大且匹配困难。因此，应该避免镜面反射出现。

##### 推荐 2.18

为减少镜面反射，可采用交叉偏振光或漫反射光，可参见2.2.4节中的推荐2.11。如果镜面反射无法通过改变光照充分减弱，可在散斑表面喷照相用的消光喷雾，此时应该仔细评价散斑质量是否降低。

### 2.3.3 人工散斑的特性

无论通过何种方式（比如喷漆，背胶箔或贴纸，印章或用墨水画出，喷颗粒，转印等等）制作的人工散斑，应该具备以下附加特性，这些对自然散斑不一定适用：

<sup>13</sup>对于大变形试验（比如测量应变可达百分之几百的合成弹性材料），即使不出现脱落或开裂，与试样粘附良好的散斑也会变形很大，在匹配参考图像和某一张变形图像时也可能失败。在这种情况下，可以使用增量相关（Incremental Correlation）。这种大变形测量超出本指南范围，不再继续讨论。

#### 推荐 2.19

对于拉伸试验，在制作散斑之前应该将试验台架的夹头部分罩住，保证试样的夹持段无散斑。这有助于增加夹持力，降低打滑的可能性，并防止夹头内填塞了用于制作散斑的材料（如油漆）。

#### 2.3.3.1 顺应性

制作的散斑应该很薄，且可顺应试样的变形，确保不改变试样在试验中的变形行为。

#### 警告 2.22

如果制作的散斑太厚且/或与试样相比较刚硬，此时基于散斑图像的 DIC 测量反映出的是散斑的变形，而不是下方试样的变形。

#### 2.3.3.2 粘附性

试样和人工散斑间的粘附应良好。

#### 推荐 2.20

制作散斑前应该清洗试样表面以保证良好的粘附性。比如，对常见材料（如钢或者铝合金），可用丙酮清除表面油渍、切割液和墨迹等。但是，丙酮挥发后会留下残留物，因此用丙酮清洗后的试样必须再用不会有残留物的溶剂（如异丙醇）清洗。

此外，如果表面很光滑，在不影响试样性能的情况下，可考虑用砂纸打磨表面，以增加散斑的粘附性。

#### 警告 2.23

散斑脱落现象有时很隐蔽。在某些情况下，散斑可能已在局部范围内与试样脱落，但看上去仍完好无损，并继续独立于试样进行变形。在这种情况下，散斑脱落难以被发现。

#### 推荐

在试验结束后，仔细检查试样和散斑，观察是否存在脱落的迹象。

#### 2.3.3.3 一致性

散斑的运动和变形应与试样表面相同。

#### 提示 2.29

对于用喷漆制作的散斑，其延展性应与即将测量的变形相匹配。也就是说，

对于变形较大的试样，漆的延展性应足够，这样它才可跟随试样同步拉伸，而不开裂或脱落。为此，必须在喷漆后立即进行试验。另外，也可以直接在试样表面制作单独的斑点，而不预先喷底漆。

相反，如果试样较脆，试验目的是观测裂纹扩展，漆应越脆越好，但不能脱落或独立于试样而自行开裂，这样漆可以和试样同时开裂。在这种情况下，漆应该允许被充分处理，甚至可以被烘烤（如果烘烤不改变试样性能的话）使其变脆。另外，也可以直接在试样表面制作单独的斑点，而不预先喷底漆，这样可以直接观察到试样的开裂。

如果不喷底漆而直接制作斑点，确保对比度足够且不存在镜面反射(参见2.3.2.5)。

#### 警告 2.24

有时，经验不足的 DIC 使用者认为基于干涉的激光散斑图案是很好的 DIC 散斑。然而，这种散斑在试样大位移时会导致相关失败，因此并不推荐用于 DIC 测量。<sup>a</sup>

<sup>a</sup>在一些特定情况下，激光散斑可以用于 DIC 测量，但这些内容超出了本版指南的范围。

#### 2.3.3.4 厚度

散斑厚度应该均匀。

#### 警告 2.25

在 Stereo-DIC 中，如果散斑表面很粗糙，会导致相同的散斑在左右相机中差异过大，使图像互相关难度增大。在 2D-DIC 中，如果散斑厚度不均匀，会导致在厚度的过渡区域内出现虚假的应变梯度。

### 2.3.4 散斑制作方法

目前有多种 DIC 散斑制作方法，比如模板法，印章法，不完整喷涂法（使用自喷漆或喷枪），使用打印机碳粉或其他更细的颗粒，等等。还可以发挥想象力，提出更多的制作方法。通常，散斑制作方法可以从有经验的 DIC 使用者或 DIC 系统制造商的培训中学到，也可以从专题专家的课程中学习。<sup>14</sup>由于散斑制作方法种类繁多，细节繁杂，这里不再针对散斑制作方法给出指导意见。

#### 提示 2.30

为了便于设计 DIC 测量，建议每个 DIC 使用者或实验室制作一张散斑制作方法与散斑尺寸的对照表。此外，可建立一个由各种制斑方法制作出的真实散斑的样品库，这样在设计新的 DIC 测量时，利用初步搭建的相机、镜头和光照系统，可快速地评估不同散斑的对比度和尺寸是否合适。

<sup>14</sup>iDICs 在其年会中都会提供相关课程，更多信息参见[www.idics.org](http://www.idics.org)。

#### 提示 2.31

一旦散斑制作方法确定后，可先在一个废弃试样上制作散斑，拍摄图像以检查散斑的尺寸、形状、分布和密度是否合适。应该在真实系统或模拟系统中拍摄图像，模拟系统中使用的相机、镜头、SOD、立体角等应与真实系统相同。废弃试样的材质应和真实试样相同，因为在不同的材料上制作出的散斑会有差别（比如，用喷漆方法在金属表面制作出的散斑比在硬纸板或纸上更大，因为漆在金属表面上更容易铺展开，而在纸上容易被吸收。）。

## 3 | DIC 测量准备

### 3.1 标定前的流程

#### 3.1.1 试验流程检查

在使用现有的 DIC 测量设备去准备和进行力学试验之前，检查整个试验流程：

- 评估即将进行的预试验（Tentative Test）流程，并确保在试样表面散斑图案制好之后和进行力学试验之前，流程中的任何一个步骤（例如夹紧或安装）都不会破坏试样表面的散斑。如有必要，可以修改试验流程以减小刮伤或污染散斑的可能性（例如在试样表面沾上油）。
- 确保已适当调节和标定试验台架。
- 检查试验流程的时间安排，确保有足够的时间执行所有步骤，如预热相机、预热试验台架（如有必要）、标定 DIC 测量系统、检查标定结果、准备和制作试样散斑、测试试样等。确定应该在试验流程中的哪个时间点制作试样上的散斑（如果使用人工散斑）。
- 确保在 DIC 测量系统标定和力学试验过程中，试验环境条件（如温度）保持稳定。<sup>15</sup>

#### 3.1.2 设备清洁

确保镜头、成像元件和标定板上没有污垢、灰尘或其它异物（例如水渍、标记、油渍、污迹、指纹等）。

##### 推荐 3.1

用镜头滤光片（若在交叉偏振光下，则使用线性偏振片）作为镜头的半永久性附件，以保护镜头、并使清洁过程更容易。不使用镜头和相机时，应该用镜头盖和机身盖来保护设备。将标定板存放在保护盒中，以防止被污染或损坏。

##### 推荐 3.2

使用相机拍摄一张白纸或其它明亮的固定背景，以便寻找可能存在的污迹和模糊点，这些模糊点或污迹预示光学系统里有灰尘。放大图像直到可以看到单个像素。因为纸可能不完全干净，所以可以平移纸张。如果模糊点/污迹随着纸张移

<sup>15</sup>对于室外测试，这种考虑更为重要，尽管室外测试不在本指南的讨论范围内。



动，则灰尘在纸上；如果模糊点/污迹保持静止，则灰尘在光学系统中的某处。旋转镜头以确定灰尘是在镜头还是在成像元件上。如果灰尘随着镜头一起旋转，则灰尘在镜头上；如果镜头旋转时灰尘仍然静止，则灰尘在成像元件上。除此之外，也可以目视检查镜头表面和成像元件（移除镜头后）上是否有灰尘。

#### 提示 3.1

一般来说，加压空气如罐装空气、波纹管式气吹或泡状气吹，都足以除去镜头和成像元件上的灰尘和颗粒。如果使用罐装空气，瓶身应保持直立且不摇晃，以防止推进剂或冷凝物从罐中排出。此外，罐装空气应先远离镜头和成像元件后再进行喷射，以确保不会喷出推进剂和冷凝物。另一种可用于去除灰尘和颗粒的工具是光学清洁刷。

为了去除其它污染物，如油渍、指纹等，可以使用拭镜纸和酒精类镜头清洁方法来清洁镜头。还有一些专门用于清洁成像元件的产品，包括与成像元件尺寸相匹配的棉签和合适的清洁液。不要使用工业酒精（也称为甲基化酒精）来清洁镜头和成像元件；因为工业酒精含水量高达 4%，在蒸发时，灰尘将粘在镜头或成像元件上。请务必按照制造商的说明来清洁镜头和成像元件。

#### 警告 3.1

光学系统暴露在空气中时（例如，取下镜头盖和/或机身盖和/或从相机上取下镜头），需注意防止将灰尘引入光学系统中。清洁镜头或成像元件时要非常小心，因为它们很容易被损坏且损伤不可逆！

### 3.1.3 相机预热

打开相机并设定到目标帧率（2.1.10节），使之被加热到稳定的工作温度。在标定或获得 DIC 测量图像之前，相机应处于稳定的工作温度。有关 DIC 供应商提供的相机的更多信息，请参阅 DIC 供应商手册。

#### 提示 3.2

相机预热至稳定温度所需的时间依赖于相机、实验室环境以及图像的采集帧率。通常预热时间从几分钟到几小时不等。在使用新相机之前，应在预期的（或相似的）实验室环境中，以所需的图像采集帧率监测预热期间的相机温度，并记录温度稳定所需的时间。将来使用该相机并以相同的帧率进行 DIC 测量时，都需要此预热时间。如果更改了图像采集帧率，则需要重新计算预热时间。

#### 警告 3.2

如果相机没有预热，相机和镜头的热膨胀、以及由于相机固定支架的热膨胀引起的漂移，可能会在 DIC 结果中引入误差。更多信息参见2.2.5节。

### 3.1.4 同步

对于 Stereo-DIC 测量，应确保两个相机彼此同步。对于 2D-DIC 或 Stereo-DIC，要检查数据采集方案，并确保任何外部信号（即力、引伸计、应变片等）与 DIC 相机同步。

### 警告 3.3

相机的同步对 Stereo-DIC 至关重要！两个相机之间的延迟将导致 DIC 测量误差。

### 提示 3.3

两台相机的同步可以通过多种方式检验，包括：

- 拍摄具有 DIC 散斑的移动试样，用 DIC 软件计算，并根据 DIC 软件文档以检验是否可接受计算出的极线误差。
- 将频闪灯的频率设置为与图像采集的频率相同。
- 对动态事件进行拍摄，并确保事件在两个相机中的相同帧中出现。（动态事件的速度必须与图像采集的频率大致成比例。）
- 如果频闪或曝光信号是由相机输出的，则应在示波器上测量相机的频闪或曝光信号。<sup>a</sup>

<sup>a</sup>通常只有高速相机输出这类信号，然而这种相机不在本版指南的范围内，因此不作进一步讨论。

## 3.1.5 DIC 散斑制作

如果使用人工 DIC 散斑（与试样的自然表面相比），则将选定的 DIC 散斑制作到试样上。

### 推荐 3.3

在试样 FOV 内、关键 ROI 外，制作两个距离已知的基准标记。评估基准标记之间距离的不确定度。这些基准标记可用于大致检验相机的标定结果，如 3.3.2 节所述。其它基准标记也非常有用。例如，试样中心轴线上的基准标记或标距段中心处的基准标记，可以将 DIC 测量结果旋转到试样坐标系中。

经验表明，在喷制散斑前用某些特定墨水（如红色的、笔尖极细的永久性记号笔）绘制的基准标记或线条，可能从油漆中渗出并肉眼可见，这不会过度降低散斑质量从而影响图像相关计算。除此之外，在散斑图案上画出的点或虚线基准标记也可以在图像上被肉眼观察到，同样不会降低散斑的质量。

## 3.1.6 标定前的系统检查

### 警告 3.4

此时应该调整并解决 DIC 测量装置中的任何问题，以便获得最佳图像。一旦拍摄了标定图像，尽量不要调整 DIC 系统，否则很可能需要重新拍摄标定图像。如果对光学系统硬件（相机或镜头）进行任何调整，则必须放弃先前采集的图像，并且必须重新拍摄标定图像。在整个试验过程中，此阶段花费的时间和精力可以为后续的流程节省大量的时间。

### 3.1.6.1 定位试件和相机

将试样放在试验台架上。定位相机以获得所需的 FOV、图像 ROI 和立体角（对于 Stereo-DIC），并调整镜头的焦距和光圈。

#### 提示 3.4

为了确保试样位于 DOF 的中间，并且焦点始终位于 ROI 上，首先需调大光圈，并调整焦距以确定 DOF 的边界。当光圈调大时，DOF 会受限；这样更容易看出试样是否失焦。调焦结束后，减小光圈以获得所需的 DOF。

### 3.1.6.2 检验光学系统

在预期会移动和变形的 FOV 区域内平移试样，以检验 FOV、焦点和 DOF 无误。

### 3.1.6.3 锁定可调零件

如果使用交叉偏振光，请调整偏振片的方向。如果镜头可锁定，则锁定焦距（对于变焦镜头）、对焦环和光圈调节环。释放任何松散的或悬挂的线缆内的张力。

### 3.1.6.4 检查图像

使用实时图像或采集的静止图像来检查散斑图像。注意查看：

- 炫光
- 太大（即每个预期的子区大小内少于 3 个特征）或太小（即小于 3 pixel 的特征）的 DIC 散斑
- 人工散斑的缺陷（例如划痕、污渍或异物）
- 图像的失焦区域
- 对比度差
- 非均匀光照（在不同时间的 FOV 内，或在 Stereo-DIC 中的两个相机之间）
- 过曝光或欠曝光区域
- 镜头或成像元件上的灰尘或异物
- 振动或其它相机运动（其中一些可以通过放大实时图像并寻找非随机运动而发现）

#### 推荐 3.4

为了更全面地检查 DIC 系统，请对试样的静止图像进行相关计算，因为计算的相关结果通常可以揭示从图像的肉眼检查中难以察觉的问题。对于 2D-DIC 测量，检查顺序排列的静止图像间能否正确相关。对于 Stereo-DIC 测量，由于此时立体系统尚未标定，使用 2D-DIC 软件检查每个相机顺序排列的图像间能否正确相关。

如果图像 ROI 的某个区域显示有局部的高相关残差值，则需在测量之前查

出原因并解决。一些常见的相关性差的原因列举在（但不限于）上面的列表中。作为诊断方法之一，可以平移散斑并采集一些图像。如果相关性差的区域与试样一起移动，则原因可能出在试样上（比如质量差的 DIC 散斑）。如果该区域位于固定的像素位置，则原因可能是镜头或成像元件上存在的灰尘或异物（3.1.2节），或散射到镜头或相机中的光（2.2.4节，2.3.2.5节）。

检查位移场中是否存在热浪。如果存在明显的热浪，则修改试验装置以将热浪最小化。更多信息参见2.2.5节。

### 3.1.6.5 验收 DIC 系统

如果系统可以被接受，则进行后续的标定。如果图像有任何不满意的特征，包括但不限于3.1.6.4节中所列项目，请再次调整 DIC 系统以消除这些不满意的特征。然后在调整系统时重复此过程，直到获得满意的图像。

#### 警告 3.5

一旦获得满意的图像，请勿再改动系统，并注意不要碰撞到相机、镜头或固定系统。即便是盖上或取下镜头盖，也会微小地改变相机位置或镜头焦距。

## 3.2 标定

### 3.2.1 标定的目标

标定 2D-DIC 系统的目标是获得图像尺度，即图像中的像素值与试样上某个实际距离的比值，和校正镜头畸变。<sup>16</sup> Stereo-DIC 标定的目的是确定相机内参数（即图像尺度、焦距、图像中心、镜头畸变等）和 Stereo-DIC 系统的外参数（即立体角、相机间距、相机到测试对象的距离等）。<sup>17</sup>

#### 警告 3.6

如果应变是主要的 QOI，那么二维系统的标定通常被忽略并且被认为是不必要的，因为应变是无量纲量，且不需要图像尺度来计算应变。然而，忽略校正镜头畸变这一步骤，可能会增加测量位移的误差并导致计算应变时的额外误差。

#### 推荐 3.5

使用 2D-DIC 时，将 DIC 散斑在 FOV 内进行面内平移，拍摄图像并计算，据此评估光学系统中镜头畸变的程度。非常重要的一点是，平移需严格保持垂直于光轴；否则，由于离面运动引起的错误应变将与镜头畸变耦合在一起。如果来自镜头畸变的误差可以忽略不计（即与整体本底噪声相比无关紧要（5.4.2节）），则可以省略二维系统标定。但是，如果镜头畸变造成的误差很大，则强烈建议进行标定，以确定相机的内参数并校正镜头畸变。

<sup>16</sup>如果标定了二维单相机系统的内外参数，则可以确定并校正试样的离面倾斜。然而该深层次话题已超出本版指南的范围。

<sup>17</sup>通常，在 Stereo-DIC 系统中会同时标定内参数和外参数。一些软件允许分别标定每个相机镜头内参数和立体系统的外参数，然而该内容已超出本版指南的范围。

对于 2D-DIC，如果未利用完整标定来校正镜头畸变，仍建议进行简化标定以计算图像尺度。可以利用相机分辨率除以 FOV 来计算近似的图像尺度。或者可以利用分辨率标定板的图像来计算图像尺度。建议同时检验在垂直和水平方向上的图像尺度。

### 3.2.2 标定的一般步骤

#### 警告 3.7

在开始标定之前，请确保已完成对 DIC 系统标定前的所有检查（3.1.6节）。

#### 3.2.2.1 选择标定板

选择适当大小的标定板。有关如何选择适当的标定板的建议，请参阅 DIC 软件手册。

#### 推荐 3.6

在理想情况下，标定板应与 FOV 尺寸大致相同或稍小。如果没有与 FOV 尺寸大致相同的标定板，则有其它两种选择。第一种选择是使用办公室标准打印机在打印纸上打印所需尺寸的标定板，并将该纸贴到一块刚性平板上。在这种情况下，标定板上的特征点间距应精确到 0.1pixel 以内 [15]。第二种选择是使用较小的标定板，但是标定板不应小于 FOV 尺寸的一半。<sup>a</sup> 在这种情况下，请确保标定板上的特征仍然足够大，以便能被成像系统解析并被 DIC 软件提取。此外，还需要额外的标定图像，以便在整个光学系统的工作体积（Working Volume）中提取到数量足够且易于提取的特征点，这将在3.2.2.4节中讨论。

<sup>a</sup>小于 FOV 尺寸一半的标定板可能会产生可接受的标定结果，但需要额外的预防措施，这已经超出了本版指南的范围。

#### 推荐 3.7

将 DIC 使用的坐标和位移从 pixel 单位缩放到物理单位（如 mm）完全依赖于对标定板上特征点间距的精确测量。如果试验测量结果希望用物理单位来表示，则建议使用被独立测量过的标定板，其物理单位应可转换到国际单位制（SI）。

#### 3.2.2.2 整洁的工作空间

创造一个整洁的工作空间，在此工作空间中进行标定，以便所选标定板可以根据需要保持静止、旋转、倾斜和平移（2D-DIC 标定和 Stereo-DIC 标定的要求有所不同），标定板的 SOD 与试样的 SOD 大致相同。

#### 推荐 3.8

有两种创造干净整洁工作空间的方法：

1. 从试验台架上取下试样并将夹具向后移动（如有必要的话）。

2. 移动 DIC 系统。如果需要移动 DIC 系统，则建议采用以下方法：

- 仅沿一个自由度移动系统，例如将系统向后平移远离试验台架，或旋转固定有两个相机的杆。沿着两个或更多个自由度（例如旋转和平移，或沿两个方向的平移）移动系统也是允许的，但不是首选。
- 如果可以的话，按照试验期间相机的固定姿态（即水平或垂直）标定相机。如果在标定和试验两个过程之间改变了相机的姿态，镜头内的光学元件可能会轻微移动，进而导致焦点、光圈或焦距等的改变。

#### 警告 3.8

如果移动 DIC 系统，则一对立体相机只能进行整体刚性移动，使两个相机之间没有相对运动。在调整立体系统位置的任何阶段，确保两个相机牢固地锁定在一起。在标定期间或标定后重新布置相机时，两个相机之间的任何相对运动（即使是微米级的微小变化）都会导致 DIC 测量误差。

#### 推荐 3.9

强烈建议在将试样和/或立体系统返回放置于测量时所用的位置后，对标定进行检验（见3.3.2节），以确保在重新定位试样和/或立体系统期间，两台相机之间未发生相对运动。

### 3.2.2.3 调整光照

确保整个标定板的对比度足够大且均匀，并且标定板的所有位置和方向都没有炫光。对于 Stereo-DIC 的两个相机，这些条件都应满足。如有必要，需调整光照和/或曝光时间。

#### 提示 3.5

用于拍摄标定板和实际 DIC 散斑的光照和曝光是完全独立的。例如，一些标定板需要背光源，这与力学测试期间用于试样拍摄的光照不同。而且，可能需要针对标定板的不同位置/姿态调整光照和/或曝光。另外，交叉偏振光可用于消除来自标定板的炫光。

#### 警告 3.9

光照的任何变化都不应干扰相机及其固定。有关固定光源的建议，请参阅2.2.4.2节。

#### 警告 3.10

虽然光照和曝光是可以调整的，但是不要在拍摄标定图像和拍摄 DIC 散斑图像这两个步骤之间调整光圈和焦点。

### 3.2.2.4 采集标定图像

采集标定图像，使在光学系统的整个工作体积（即由 FOV 和 DOF 确定的体积）中有易于提取的特征。<sup>18</sup>

#### 推荐 3.10

虽然不同的软件略有不同，但对于 Stereo-DIC 的标定，典型标定板的位置和姿态建议如下：

1. 围绕图像水平轴旋转。
2. 围绕图像垂直轴旋转。
3. 沿着每个相机的光轴，靠近和远离相机。
4. 如果标定板小于 FOV，则水平和垂直平移标定板，以使标定板的特征填充每个相机的整个 FOV。
5. 围绕光轴旋转 90°，重复上述步骤。<sup>a</sup>
6. 使用上述位置和姿态的组合（即围绕水平轴和垂直轴旋转的同时沿光轴前后移动）。

<sup>a</sup>标定板的制造技术各不相同，但是一些方法可能导致标定板上的特征的单向拉伸。也就是说，与垂直轴相比，特征沿水平轴可能具有略微不同的间距。建议使用已被独立测量过的标定板（详见3.2.2.1节），围绕光轴旋转 90° 是一种额外的预防措施，有助于减小标定板上特征的单向拉伸带来的影响。

#### 提示 3.6

所需或推荐的标定图像的数量依赖于标定板和 DIC 软件，范围从 8 张到 50-100 张不等。三维标定板（在两个不同平面上具有特征的标定板）可能需要比二维标定板（仅在单个平面上具有特征的标定板）更少的图像。与特定软件相关的标定流程，请参阅软件的用户手册。

#### 推荐 3.11

理想情况下，建议使用刚性标定板支架，以确保在采集图像时标定板是静止的。刚性支架可以固定在平移和旋转平台上，或固定在可调节可锁定的球窝关节上，以保证标定板可在不同图像间移动和旋转。

如果刚性标定支架不适用，用手持标定板也是可以接受的。如果用手保持标定板静止不动，则应将手支撑在刚性物体上，并且曝光时间应限制在约 25ms 或

<sup>18</sup>目前，在实验力学学会（Society of Experimental Mechanics）的支持下，Stereo-DIC Challenge 项目正在进行中。项目的目标之一是探索标定板的位置和姿态、标定图像数量等的影响。基于此项目的标定建议可能收录在未来版本的指南中。



更短，以减少运动模糊。对于小于约 50mm 的 FOV，则不建议手持标定板，因为即使标定板的运动很小也会导致图像模糊。

#### 警告 3.11

图像的高质量（即成像清晰、良好的对比度、无炫光、填充光学系统的整个工作体积等）比图像的数量更重要。注意将标定板保持在光学系统的工作体积内，以使标定板保持成像清晰，并确保标定图像具有良好的对比度且无炫光。

#### 推荐

一些软件能实时评估提取到的标定板特征的质量，并且仅在能够很好地提取到特征的时候才采集图像。另一些软件仅在采集到所有标定图像后才提取特征。如果使用遵循第二种方法的软件，则可以采集更多的图像，从而可以剔除一些质量差的图像和/或特征。但是，请注意不要将光学系统工作体积的某个区域内的所有图像都剔除掉。

#### 警告 3.12

对于 Stereo-DIC，标定过程是极小化过程，对于给定一组提取的标定特征，寻找一组最佳的内参数和外参数。不同的软件对于通过极小化获得的最终参数值采用不同的度量或“分数”（分数越低越好）。通常，有可能标定图像越少分数越低，或者标定板的特征所填充的工作体积越小分数越低。这种情况类似于数据的多项式拟合，使用数据点越少，得到的决定系数（ $R^2$  值）越高。然而，如果在极小化过程中使用的数据点过少，最终获得的光学系统参数可能无法确保光学系统具备高置信度。

#### 推荐

拍摄足够多的图像，确保特征点能填充光学系统的更大工作体积，即便此时的标定分数高于用较少图像填充较小工作体积的情形。

### 3.2.2.5 标定系统

选择合适的相机或镜头畸变模型，<sup>19</sup> 并使用选择的 DIC 软件标定系统。有关标定过程的详细信息参见软件手册。

### 3.2.2.6 检查标定结果

检查标定结果。

<sup>19</sup>选择相机和镜头畸变模型是一个深层次话题，并且与硬件和软件相关；因此，本版指南中未提供更详细的信息。有关选择软件和硬件的相应设置的详细信息，请咨询 DIC 供应商。



### 提示 3.7

该检查依赖于所使用的软件；有关 DIC 软件的具体建议，请参阅其用户手册。标定结果中一些可能需要检查的信息（如果软件提供了这些相关信息）包括：

- 检查被剔除的图像或其上面的特征，看看是否有明显的被剔除原因。这对于新用户和/或使用新硬件设置的有经验的用户尤其具有指导意义。通过反面案例（如，光照较差或存在反射，因手指或支架放置不当而遮挡了标定板上的关键特征，图像失焦等）的学习，可提高用户日后拍摄出高质量标定图像的能力。
- 检查剩余的可接受的图像仍然充满了光学系统的工作体积。（也就是说，确保被剔除的图像不是全部来自工作体积的相同区域或来自标定板的相同角度。）
- 检查从接受的图像中提取的特征是否正确。（例如，有时软件提取到的特征实际上是标定板上的污垢或炫光。）
- 将各个图像的标定分数与最终的标定分数进行比较。如果使用 Stereo-DIC，则还要比较每个相机的给定图像的标定分数。考虑手动删除个别分数明显高于总分数的图像，或两个相机之间分数明显不同的图像。或考虑删除单个提取的特征，以使图像的分数与总分数相当。
- 如果可能，除了保存总分数和标定结果外，还要保存各个图像的标定分数。此信息可用于诊断后续计算中产生的问题，或相机和镜头的问题。
- 一些 DIC 软件会在标定过程完成后提醒用户可能存在的信号同步错误。同步错误通常仅在用户使用手持标定板时才会发生，如采集图像时手持标定板仍在运动，或者采集图像时存在振动导致相机显著运动。为了判断是否存在同步错误或相机振动，作为诊断方法，可以尝试单独标定每个相机的内参数。如果每个相机单独标定的分数都可以接受，但此时立体系统的外参数无法标定出来，或者立体系统的标定分数与单个相机的标定分数相比不可接受，那么很可能存在同步错误或相机振动。

### 提示 3.8

标定过程中，用户可控制的参数的量和用户自定义参数的数量因不同 DIC 软件而异。例如，一些软件允许用户选择用于提取标定板上特征的阈值，或定义所使用的镜头畸变模型；另一些软件是一个黑盒子（即封闭系统），标定用的图像作为输入，而相机模型和标定分数作为输出。如果 DIC 软件有任何用户可定义的设置，请研究这些设置对标定结果的影响。

#### 3.2.2.7 检查标定参数

将标定参数的值与其对应的物理值进行比较 [29].<sup>20</sup>

<sup>20</sup>有时，单个标定出的参数与其物理值相比可能完全错误，但所有标定参数组合起来却能提供准确的三角测量和精确的位移结果。因此，标定出一些与实际不符的参数不一定有问题。但是，这种情况通常仅出现在复杂的 DIC 测量装置中，这已超出了本版指南的范围。本版指南仅涵盖标准实验室条件。

### 推荐 3.12

要检查的典型参数包括：

- **图像中心：**对于大多数成像元件和定焦镜头的组合，光轴与成像元件的交点应靠近成像元件的中心（例如，如果使用 2448×2048pixel 的 500 万像素相机，标定的图像中心应该接近 (1224,1024)）。对于立体系统，如果使用相同类型的相机和镜头，两个相机的标定结果都应如此。标定出的图像中心可能略微有些偏离，但是，如果出现不合理的值（例如负值）或极限值（例如，在成像元件边缘附近），应该仔细研究调查并尽可能校正。然而，当使用变焦镜头时，由于变焦镜头内部光学系统的复杂性，光轴通常远离图像中心。
- **镜头焦距：**将标定出的镜头焦距（物理单位）与标称的镜头焦距进行比较。请注意，镜头制造商提供的镜头焦距可能只是实际焦距的近似值（例如，镜头制造商可能将某个镜头称为 50mm 镜头，而实际上焦距为 47.5mm）。如果标定出的焦距单位为 pixel，则可将其乘以每个像素的真实尺寸（物理单位）以转换为物理尺寸。
- **角度：<sup>a</sup>**报告给出的立体角应该与两个相机之间的物理角大致相同。对于 2.2.2 节中所述的立体系统的标准布置，如果立体平面垂直于试样，则另外两个角应该近似为零。
- **两台相机间的距离：<sup>a</sup>**报告给出的两台相机间的直线距离应与两个成像元件间的距离大致相同。

<sup>a</sup>此参数仅适用于 Stereo-DIC，不适用于 2D-DIC。

### 提示 3.9

由于物理值通常难以精确测量，因此该检查只是一项非常泛泛的评估，只要确保标定参数处于正确的范围内即可，而不用精确比较标定参数和相应的物理值。另外，跟踪那些在两次标定间系统未改变或未调整的值，可以增加用户的经验，缩小可接受值的范围。

### 警告 3.13

在某些情况下，软件报告给出的标定分数会产生误导。更多详细信息请参阅 3.2.2.4 节中的警告 3.12。

## 3.3 标定后的流程

本节中描述的标定后的流程有三个目的：检验光学系统的标定，采集用于本底噪声分析的图像（5.4.2节），在利用 DIC 进行力学试验之前对 DIC 系统进行最终检查。

### 3.3.1 用于标定检验和本底噪声分析的图像

### 3.3.1.1 重置系统

如果之前取下了试样以拍摄标定图像，则应将试样放回原位。如果之前移动了立体系统以拍摄标定图像，则应将立体系统放回到原始的位置并查看试样，同时确保已锁定固定系统上的所有可调零件。

### 3.3.1.2 调整光照

如果在拍摄标定图像时调整了光照和/或曝光，则在拍摄试样上 DIC 散斑时应对其重新调整。

### 3.3.1.3 采集静止图像

采集试样的静止图像。

#### 推荐 3.13

理想情况下，静止图像的采集帧率和时长应与真实试验相同，以采集有代表性的噪声或误差。例如，以低帧率采集的图像可能无法反映出高频振动。或者，拍摄时间很短时则可能无法捕捉到诸如热浪或相机漂移之类的低频误差。此外，对于某些相机，相机噪声是与帧率相关的。

然而，以与真实试验相同的帧率和相同的持续时间拍摄采集静止图像，会使储存和处理的数据量加倍，累积的数 GB 的图像和计算数据，这对于许多 DIC 测量来说是不一般的。静止图像的数量和拍摄时间的长短是下面两个因素平衡的结果：1) 表示 DIC 测量中现有噪声的来源，2) 实际的数据量。

为尽量减少分析本底噪声所需的图像数量，并能代表所有噪声的来源，一种可能的方法是在试验的开始和结束时以相同的帧率各拍摄一些图像。这种方法可以在静止图像中捕获到高频和低频误差的来源。

### 3.3.1.4 检查图像

如3.1.6.4节所述，对3.3.1.3节中的图像进行最终检查，并解决发现的任何问题。

#### 警告 3.14

如果对相机或镜头进行了调整，则必须重新标定。然而，建议为了获得可能更好的图像而进行调整，不要因为不想重新标定系统而用低质量的图像甚至无用的 DIC 测量结果。

### 3.3.1.5 采集刚体运动图像

对试样进行刚体平移和旋转，并采集更多的图像。

#### 提示 3.10

可以手动施加平移/旋转，此时施加的位移精确值是未知的，或使用带有千分尺的平移/旋转台，此时在平台的不确定度内，所施加的位移是已知的。

#### 推荐 3.14

至少要在测试期间预期试样移动的工作体积内移动试样。如要更加全面地检查标定结果，则需采集更多的覆盖每个相机的全部 FOV 和 DOF 的图像。

#### 推荐 3.15

对于 2D-DIC，分别拍摄获得面内平移、离面平移和旋转图像。两组图像（面内平移与离面运动）应分开，以便可以独立分析面内与离面运动的影响。面内平移图像将用于检验镜头畸变的校正（3.3.2.1节）和 QOI 的本底噪声的计算。离面运动图像将用于估计力学试验期间由离面运动引起的系统误差（5.4.3节）。

### 3.3.2 检验相机标定结果

计算静止图像和刚体平移图像的相关性，并使用本节中描述的方法检验标定结果。如果基于以下指标确定的标定结果并不令人满意，请在试验之前改进标定。否则，接受标定结果，然后进行标定后的系统检查（3.3.3节）。

#### 提示 3.11

改进标定的途径可包括调整软件中的特定参数，拍摄额外的标定图像，或调整光学系统硬件（相机或镜头）。

#### 警告 3.15

如果对光学系统硬件（相机或镜头）进行了任何调整，则必须丢弃先前采集的标定图像，重新拍摄一组全新的标定图像，并重新进行相机标定。

#### 提示 3.12

完成实际的力学试验和本底噪声分析（5.4节）之后，才能最终确定 DIC 用户自定义的参数，即子区尺寸、步长、虚拟应变片尺寸等（5.2节）。因此，此时可使用软件的默认值或按照专家的判断和经验设定的值，为静止图像和平移图像的相关计算选择合理的参数，以进行相机标定的检验和 DIC 系统的最终检查。

#### 3.3.2.1 内参数

检验内参数的主要目的是检验镜头畸变是否得到了正确校正。计算在3.3.1节中采集的平移图像并移除刚体运动。在位移或应变云图中，镜头畸变将表现为椭圆形。

#### 推荐 3.16

评估镜头畸变是比较主观的。请将镜头畸变误差的大小与位移和应变的总本底噪声进行比较（参见5.4.2节）。如果与本底噪声相比镜头畸变的误差很大，请在标定过程中调整校正畸变的类型和/或幅度。如果无法通过标定过程中的校正

流程消除畸变，此时要么根据实际情况修改校正流程，并考虑重新选择光学系统（镜头和相机），要么将图像 ROI 的尺寸和运动限制在 FOV 中的更小区域，使得畸变达到可以接受的范围。

#### 警告 3.16

对于 2D-DIC，平移图像严格垂直于光轴是很重要的。否则，由于离面运动引起的虚假应变将与镜头畸变耦合在一起，此时平移图像不能再单独用于检验镜头畸变。

#### 3.3.2.2 外参数

外参数仅适用于 Stereo-DIC，不适用于 2D-DIC。检验外参数的主要指标是极线误差。极线误差在不同的 DIC 软件可能叫不同的名字，例如，投影误差（Projection Error），三维残差（Three-dimensional Residuuum），交点误差（Intersection Error）或相关偏差（Correlation Deviation）。这些指标在不同软件中的计算方式略有不同，但基本原理是相通的。要检验外参数，请对在 3.3.1 节中采集的静止图像（或可用的平移图像）进行相关性计算，并根据 DIC 软件文档检验极线误差是否可以接受。<sup>21, 22</sup>

#### 提示 3.13

不存在单一不变的极线误差阈值来区分“好的”和“坏的”标定。当然，极线误差与 DIC 测量误差之间存在直接关系，较大的极线误差会导致较大的 DIC 测量误差。尽管如此，根据经验，极线误差通常应与标定分数处于一个数量级；如果极线误差明显大于标定分数，则应分析原因并校正误差。

#### 提示 3.14

一些 DIC 软件仅报告图像 ROI 上的平均极线误差，而另一些 DIC 软件则会报告每个子区的极线误差。如果 DIC 软件报告了空间可分辨的极线误差，则还可使用极线误差来评估 DIC 散斑和光照，类似于在 3.1.6.4 节中描述的初步相关中使用的相关残差。

#### 提示 3.15

除了外参数之外，未校正的镜头畸变也会影响极线误差。但是，如果镜头畸变得到了适当的校正，并且按照 3.3.2.1 节所述进行了内参数的检验，那么极线误差主要与外参数有关。

<sup>21</sup> 请参阅 11 页上的脚注 b 以采集有关相机标定中校正外参数的相关信息。

<sup>22</sup> 如果标定图像与 DIC 散斑图像（静止的或刚体平移的）分辨率不同，则必须裁剪以调整标定图像；否则，将导致极线误差的增加。然而，对图像裁剪的讨论已超出本版指南的范围。

### 3.3.2.3 绝对距离

检验 DIC 测量获得的绝对距离值是否精确。

#### 推荐 3.17

一些建议的指标包括（但不限于）：

- **基准标记：** 如果已按照3.1.5节的推荐，在试样上制作了距离已知的基准标记，则对静止图像或位移已知的平移图像进行相关性计算后，将 DIC 软件计算出的基准标记之间的距离与已知的基准标记间的距离进行比较。这只是一个近似估计，因为基准标记的中心是人工选择的，且已知距离也存在不确定度，通过三角测量计算出的距离精度最好只能在  $\pm 1$  pixel 以内。但是一个好的明智的检查，可以确保输入给 DIC 软件的（或由 DIC 标定软件识别的）标定板尺寸是正确的。
- **施加的位移：** 如果已知对刚体平移的图像所施加的位移，请将 DIC 结果与施加的位移进行比较。这通常只是近似评估，因为如果使用标准的带千分尺的平移台，DIC 结果的精度通常高于平移台的“已知”位移的精度。

### 3.3.3 系统标定后的检查

对 DIC 系统进行最终检查。根据系统的最终检查，如果 DIC 系统有任何令人不满意的方面，请调整系统并再次检查。

#### 警告 3.17

如果对光学系统硬件（相机或镜头）进行了任何调整，则必须废弃先前采集的标定图像，重新采集一组全新的标定图像，并且必须重新进行标定。

#### 3.3.3.1 本底噪声

进行简化的本底噪声分析并判断 QOI 的本底噪声是否可以接受。

#### 推荐 3.18

完整的本底噪声分析，如5.4.2节中所述，可能非常耗时，并且还需要事先知道试样变形，以便选择用户定义的 DIC 参数，如子区尺寸、步长、虚拟应变片尺寸等（5.2节）。因此，鉴于时间考虑，在进行力学试验之前，建议进行简化的本底噪声分析。

根据之前拍摄的静止图像，计算 QOI 的空间标准偏差（3.3.1.3节）。如果以实际试验的帧率拍摄得到了静态图像，则还需计算时间标准偏差。检验标准偏差（即本底噪声）是否可接受（2.1.9节）。

#### 3.3.3.2 热浪

对静态图像进行相关性计算，从位移场的云图中寻找是否存在热浪。如果明显存在，请修改 DIC 测量装置和/或力学试验装置以将它最小化。更多信息参见2.2.5节。

### 3.3.3.3 稳定性

如果在标定 DIC 系统和使用 DIC 测量进行力学试验两个步骤之间经过了漫长时间，请考虑重新拍摄静止图像并检验相机标定结果。对任何极线误差或本底噪声的增加，都应该认真调查并进行校正。

### 3.3.3.4 其他检验

除了此处列出的指导原则外，个人用户或实验室可能还会使用其他内部程序，包括针对实验室常用的力学试验装置、设备和软件的详细信息。为了得到可靠的测量结果，达到预期的 DIC 测量目标，建议记录内部程序并建立相关标准，以判断标定和/或本底噪声（5.4.2节）是否可接受。这将有助于防止在力学试验的 DIC 测量结束后才意识到图像并不让人满意，从而浪费大量的时间和资源。

## 4 | 进行 DIC 测量试验

在搭建好 DIC 测量系统和力学试验装置，并且标定好相机之后，就可以进行实际的力学试验，并同时为 DIC 测量拍摄图像。在试验之前，需要检查所有数据采集系统，包括：

- 为 DIC 图像设置合适的文件名称、存储位置和存储空间。
- 选择正确的试验步骤和宏命令。
- 记录试验台架中与 DIC 图像同步的力学信号和其他测量信号。
- 试验台架和 DIC 图像的采集已可随时触发。

### 警告 4.1

确保在施加任何力或位移之前采集至少一张图像。

- 打开光源，设置正确的曝光时间和帧率。

本指南不包括力学试验本身，因此这里并未提供有关试验实施的进一步指导。



## 5 | DIC 图像处理

### 5.1 DIC 软件

在完成力学试验并获得 DIC 图像之后，使用 DIC 软件来处理图像。目前，既有商业 DIC 软件（通常是闭源的），也有独立开发的软件（通常是开源的）。软件的选择完全取决于使用者，用户可以通过软件手册来获取使用软件的详细信息。

我们目前已设计并审核了一套用于检验 DIC 软件的图像，它是 DIC Challenge<sup>[14]</sup>的一部分。这些图像可以在<https://sem.org/dic-challenge/>上获得，闭源软件用户可以利用这些图像来探究 DIC 软件中的黑盒封闭系统。此外，十分鼓励那些独立开发 DIC 代码的用户使用这些图像去检验他们的代码，并记录下检验结果。

### 5.2 用户自定义参数

在 DIC 分析过程中，用户需要选择许多自定义参数。这里给出了一些总体介绍，但是强烈推荐参加由更有经验的 DIC 从业者或 DIC 系统制造商提供的培训，也可以参加专题专家讲授的课程<sup>23</sup>。此外，用户可以参考所选 DIC 软件的用户手册来了解软件特有功能的详细信息。

#### 5.2.1 参考图像

从拉格朗日描述的角度来看，DIC 跟踪在参考图像上定义的一系列测量点的运动，有三种方法来选择参考图像：

1. **单个参考图像**：最简单也是使用最多的选取参考图像的方法，是将一系列图像中的第一张图像（施加力或位移之前未变形试样的图像）作为参考图像。然后将后续图像与初始参考图像进行相关，获得测量点随时间变化的运动或位移。

#### 警告 5.1

参考图像一定要在施加力或位移之前采集，否则所有基于参考图像的测量结果都会存在一定的未知偏差。

#### 提示 5.1

一般情况下可以采集几张（10 张左右）未变形的静止图像然后取其平

<sup>23</sup>iDICs 在其年会上提供了 DIC 课程。更多信息请登录[www.idics.org](http://www.idics.org)。

均结果作为参考图像，该图像可以被近似认为无噪声的参考图像。

2. **增量相关：** 在一些情况下，DIC 散斑在试验过程中发生显著的改变，使得变形后试样的 DIC 散斑很难与变形前试样上的参考图像匹配上。在这种情况下，可采用增量相关的方法进行计算，即每一张图像与前一张图像进行相关，而不是与试样变形前的初始参考图像进行相关。增量相关方法给出了每两张图像之间的位移增量，再将各个位移增量求和来得到相对于初始参考图像的总位移。然而这种增量相关方法的缺点是总位移的误差是一直累加的，因此增量相关方法的误差通常随着图像数量的增加而增加。
3. **分段相关：** 将未变形试样的图像作为唯一参考图像的方法与增量相关方法进行折中，可以将一个图像序列划分为很多个子序列（Sub-series），将每个子序列中的图像与子序列的第一张图像进行相关。例如，将图像 1 作为未变形试样的初始参考图像，随后将图像 2-100 与图像 1 相关，图像 101-200 与图像 100 相关，图像 201-300 与图像 200 相关，以此类推。这样第 300 张图像相对于第 1 张的图像总位移可以表示成图像 300 相对于图像 200 的位移加上图像 200 相对于图像 100 的位移，再加上图像 100 相对于图像 1 的位移。通过周期性的更新参考图像而不是一直使用前一张图像来减少累积误差。

### 5.2.2 图像预滤波

在图像灰度的空间梯度比较平滑的情况下，子区插值效果更好。因此在对图像进行相关之前，对图像进行低通滤波（例如高斯滤波）来平滑 DIC 散斑中特别锐利的边缘，会更有益于计算。

#### 提示 5.2

在很多情况下，低通滤波被用来弱化因难以分辨的 DIC 散斑（即小于 3pixel）所带来的影响。但请注意：物理反走样滤波（见提示 2.11）和数字低通滤波本质上是完全不同的。第一种是为了防止模拟信号走样，避免走样信息通过编码引入到图像中，第二种是当走样信息已经通过编码引入到图像中后，尝试减少数字信号走样的影响。

#### 警告 5.2

在某些情况下，低通滤波也会产生不利的影晌（例如，低通滤波会使结果产生偏差（Bias）），因此 DIC 从业者应该判断是否使用低通滤波。<sup>a</sup>

<sup>a</sup>有关数字图像预滤波的更多具体的指导将会包括在本指南的未来版本中。

#### 推荐 5.1

如果在获取图像时使用物理反走样滤波，推荐不再使用数字低通滤波。

### 5.2.3 子区形函数

有些 DIC 软件已固定了子区形函数，而另一些软件允许用户自己选择此参数。在选择形函数的时候，需要在噪声滤波和计算精度之间进行权衡。采用低阶形函数可以

消除很多噪声，但是降低了整体精度。采用高阶形函数（例如，二阶及二阶以上）精度更高，但是其计算结果的噪声也较大。如何保持二者平衡有两种观点：一种是较大的子区搭配高阶形函数使用，第二种观点是较小的子区且减小子区间距搭配低阶形函数使用。用户可以进一步探索该参数的选择与组合，并评估哪一种最适合其应用。请参阅 [10, 17, 42] 来获取更多信息。

## 5.2.4 插值

为了获得 DIC 测量的亚像素精度，需要在像素间进行灰度插值。因此插值质量对 DIC 测量精度有重要影响。大多数商业 DIC 软件已经优化了插值结果，而它的进一步优化则是更深层次的问题，读者可以参考 [18] 和 [42, 5.6.1 节（插值偏差）] 获取更多详细信息。

## 5.2.5 子区大小

广义上而言，一个子区的尺寸应该足够大以包含充足的信息，可以将该子区与 ROI 中所有其他子区区分开来。根据经验，一个子区内至少要包含三个散斑，如果散斑大小范围是 3-5pixel 并且散斑的密度大约为 50%，那么子区尺寸大约是  $15 \times 15 \text{pixel}^2$ （即在每个方向上有至少经历三次散斑亮暗的过渡）如果散斑较大或散斑密度较小，就需要增大子区尺寸。

### 推荐 5.2

对典型 DIC 测量来说，推荐使用大于  $21 \times 21 \text{pixel}^2$  的子区尺寸作为更实用的最小尺寸 [17]。如果 DIC 图案的尺寸和密度是变化的而且在整个 ROI 内不是恒定的，则更应如此。

### 提示 5.3

选取较大的子区通常可以降低位移噪声，但代价是会增加空间平滑度 (Spatial Smoothing)。更加高阶的子区形函数可以补偿子区平滑，不过这是一个深层次的问题。

## 5.2.6 步长

步长控制着 DIC 计算数据点的密度，并且在一定程度上影响着测量的空间分辨率。通常，推荐步长大小在子区尺寸的三分之一到二分之一之间选取，使得相邻子区部分重叠，步长可以根据具体应用而变化。一般来说，如果重叠区域超过了子区大小的三分之一，则认为相邻的数据点不再是相互独立的，继续减小步长将不会改善测量的空间分辨率。尽管重叠区域很大且相邻的子区不是独立的，采用小步长（结合小的子区尺寸）可以在接近边缘区域或试样其他关键点处获得计算结果。此外，如果 QOI 在整个 ROI 中快速变化，则可能需要小步长来获得 QOI 的峰值位置（在不进行插值的情况下）。（但是请注意，由于 DIC 低通滤波的影响，如果空间分辨率不足以得到 QOI 的梯度，随空间变化的 QOI 的峰值仍然可能会被抑制或低估。）如果 QOI 在 ROI 上变化缓慢，可以增大步长来减少计算点，进而缩短计算时间。（即使 QOI 在 ROI 上变化很慢，为了在无插值的情况下生成准连续 (Quasi-continuous) 的位移场，推荐最大步长也不能超过子区大小。）此外步长也会影响虚拟应变片的尺寸 (5.4.5节)。

## 5.2.7 阈值

DIC 软件通常允许用户选择不同的阈值，这些阈值用于确定每个子区位移结果的质量和置信度。软件中可用的阈值取决于该软件本身，其中两个主要的阈值，分别是匹配准则的阈值和极线误差。匹配准则的值是参考图像与变形图像之间（也可以用于 Stereo-DIC 中左右相机之间）每个子区匹配程度的度量。极线误差仅适用于 Stereo-DIC，是用来衡量相关结果（Correlation Result）与立体标定结果一致程度的指标。所有超过阈值的位移结果都要从报告中移除。增大阈值可以保留更多的位移结果，代价是增加结果的不确定度。

## 5.3 应变测量

根据所选的 DIC 软件的不同，有很多通过位移计算应变的方法。对于每一种方法，可以在软件中选择不同的用户自定义参数。有关如何在所选的 DIC 软件中计算应变信息，请查看它的用户手册。在本节中，定义了虚拟应变片，并简要介绍了应变计算中几个具有代表性的例子。

### 5.3.1 虚拟应变片

所有应变计算方法中一个关键因素就是虚拟应变片（VSG），广义上来讲，VSG 是图像中的一个用来计算特定位置处应变的局部区域，它类似于（尽管不直接等于）箔式应变片（Foil Strain Gauge）所覆盖的物理区域，在 DIC 软件中计算的应变是 VSG 内应变的平均值或加权平均值。

VSG 的准确尺寸取决于软件中使用的应变计算方法，即使对于给定的应变计算方法，VSG 的准确尺寸也没有很明确的定义。然而有影响 VSG 尺寸的几个重要参数包括步长、子区大小、子区形函数、应变窗口、应变形函数、位移的预滤波（Pre-filtering）、应变的后滤波（Post-filtering）和滤波窗口。除了其他 DIC 处理参数，应变测量的空间分辨率也与 VSG 的尺寸紧密有关，5.4.5 节中介绍了更多 VSG 尺寸对应变测量的噪声和偏差的影响。

### 5.3.2 应变计算方法的示例

本节中简要介绍了应变计算的四种常用方法（代表在不同 DIC 软件中使用的不同方法），突出了不同的用户自定义参数对 VSG 尺寸的影响。

#### 5.3.2.1 子区形函数

第一种方法是直接根据子区形函数和变形后子区的形状来计算应变，在此方法中，VSG 的尺寸近似等于子区大小，是所有应变计算方法中 VSG 尺寸最小的一种。另外，此方法没有对位移进行预滤波。较小的 VSG 尺寸和不对位移进行预滤波使得应变测量具有较高的空间分辨率，但是也使应变结果中噪声较大。

计算完应变后，可以对结果进行后滤波以降低噪声。常见的后滤波方法是使用高斯加权函数计算局部数据点集的平均值。在这种滤波方法中包含数据点的区域被称为滤波窗口。VSG 的尺寸大小可以由公式 7.2（7.2 节）近似得到。

#### 5.3.2.2 有限元形函数

第二种方法与有限元分析中使用的应变计算相似。在参考图像中定义三角形网格，使用位移数据点（由子区中心所提供的位移）作为网格节点。在每个三角形单元上定义

有限元形函数，根据每个单元的变形来计算应变。此时 VSG 的尺寸很小，大约等于三角形单元的大小（由步长控制）加上子区的大小。如果没有对位移进行预滤波，用此方法得到的应变结果通常包含较大噪声。因此通常需要对应变进行后滤波处理以降低噪声。常见后滤波方法通常使用高斯加权函数计算局部数据点集的平均值，在这种滤波方法中包含数据点的区域被称为滤波窗口。VSG 的尺寸可以通过公式 7.2 (7.2节) 近似得到。

对此方法进行略微变化，不再只使用三角形单元的三个节点单独计算每个单元上的应变，而是在覆盖多个三角形的一个更大的区域（即六边形区域）上使用最小二乘回归的方法计算应变。这个更大的区域被称为应变窗口，VSG 的尺寸可以通过公式 7.2 (7.2节) 来近似表示。在最小二乘回归中，加权函数可用于计算应变窗口内包含的数据点的位移，例如采用以应变窗口的中心向应变窗口边缘衰减的高斯分布。通过使用更多的数据点和更大应变窗口计算应变可以减小应变结果的噪声，而且不再需要对计算的应变进行后滤波。

### 5.3.2.3 应变形函数

第三种方法是利用应变形函数来拟合位移，从而得到了位移场的一个解析解，然后根据解析解的空间梯度来计算应变。用应变形函数来拟合位移也会对位移进行滤波，因此此拟合过程被认为是计算应变前对位移的预滤波或平滑处理。应变形函数通常是多项式或样条拟合，且应变形函数阶次会影响应变测量的空间分辨率。

在拟合中，包含数据点的局部区域被称为应变窗口，通常会计算应变窗口中心的应变。加权函数用于计算在应变窗口内包含的数据点的位移，例如采用以应变窗口的中心向应变窗口的边缘衰减的高斯分布。VSG 的尺寸可以通过公式 7.2 (7.2节) 来近似表示。

### 5.3.2.4 样条拟合

第四种应变计算方法是对整个 ROI 上的位移场进行样条拟合。这种方法与应变形函数方法类似，区别是它的拟合区域是全场而不是局部。这种样条拟合对整个 ROI 上的应变进行解析描述，可以估算 ROI 中任何一点的应变。因此应变测量不局限于只在子区中心处的原始 DIC 数据点。由于没有滤波窗口或应变窗口，VSG 大小没有清晰的定义，但是其大小与步长、子区大小和样条阶次有关。

## 5.4 不确定度量化

### 5.4.1 概览

DIC 测量中有两种类型的误差，即方差和偏差。方差（也称作噪声）是以 QOI 的真值的均值为中心的随机误差。偏差是指均值与真值的偏移量。DIC 测量中主要的噪声来源是相机噪声，以及相关计算过程中的匹配误差。偏差的主要来源有：QOI 的高梯度部分被平滑，未校正镜头的畸变，相机标定不当（例如在标定之后力学试验之前，立体系统中相机间存在相对运动）和 2D-DIC 测量中的离面运动等。在考虑偏差和噪声的情况下，确定 QOI 的不确定度对自动评估 DIC 计算结果十分关键。如果未对不确定度进行量化，就无法知道计算得到的 QOI 是否正确且有意义，或随机噪声或偏差是否会导致毫无意义的结果。

5.4.2节和5.4.3节描述了几种量化 DIC 测量噪声和偏差的方法，然而偏差通常是未知的，并且在试验之前计算静止图像的噪声不能完全代表试验期间存在的噪声。因此 DIC 从业者使用的量化不确定度的指标通常是表示 QOI 不确定度的最小值，而不是真



实的不确定度。本节中提出了几个用来表征不确定度的指标，但是针对特定的应用和不同的 QOI 存在其他不同的选项。尽管如此，关键是对 QOI 不确定度指标进行认证并归档（见第6章）。

### 5.4.2 随机误差

术语“随机误差”和“噪声”是可以互换的，量化噪声的过程一般被称为本底噪声分析。本底噪声分析的基本思想是在与试验过程相同的条件下拍摄静止的 DIC 散斑图像，并对其相关计算。当试样上没有施加任何力或位移的时候，对于那些需要有变形才能获得的 QOI，所有测量到的值都是误差。在实际力学试验中，如果测量到的 QOI 小于静止图像的测量结果，此时没有办法将测量的 QOI 与噪声区分开。

#### 推荐 5.3

DIC 测量中很重要的误差来源是相机噪声。相机成像元件的噪声（即在观察静止物体时，其像素灰度值随着时间的波动），直接导致了 DIC 测量结果的误差。因此，量化相机噪声（独立于量化 DIC 测量结果的噪声）是很有意义的。但这通常在评估新的硬件是否适合 DIC 测量时才有必要（参见 2.2.1 节）。最后，QOI 的本底噪声是一个很关键的指标，因此用户也可以选择忽略相机自身噪声的表征。

在 DIC 测量的设计和执行过程中，评估本底噪声通常是一个多次迭代的过程，逐渐使用更加鲁棒可靠的分析过程和指标。在设计测量的初期可以完成初步评估，以便选择相机、镜头和散斑制作方法等（见第2章）。在进行力学试验之前，可以在 DIC 系统标定前的检查或系统最终检查阶段，进行第二次快速评估。在进行力学试验之后处理 DIC 图像阶段，第三次评估本底噪声，以便评估用户自定义参数的影响并评估噪声与偏差间的折中（见5.4.4节）。

为了撰写报告，最全面的本底噪声的评估必须与力学试验使用相同的物理条件（例如相机与镜头的选择、光源、相机温度、冷却空气或混合空气的风扇和试验机电源状态）和数据处理过程（即图像预滤波、子区尺寸、步长、VSG 尺寸、数据的时域和空域滤波等）。这意味着，用户选择的用于试样运动或变形图像的分析设置也必须被用于图像的本底噪声分析。因此最终的本底噪声分析通常在力学试验图像分析完成之后，但是在力学试验之前就应立即采集静止图像。

用最终的用户自定义参数来分析标定过程（3.3.1节）之后获得的静止图像，使用与力学试验图像分析中相同的方式来计算所有的 QOI。可以从两个角度来量化 QOI 的随机误差：空间标准差和时间标准差。为了量化 QOI 的空间标准差，计算每幅图像 QOI 的（空间）标准差，然后对时域上所有静止图像的空间标准差进行平均；为了量化时间标准差，计算每个子区的 QOI 在时域上的标准差，然后对 ROI 内所有子区的时间标准差取平均值。

虽然两种标准差看上去很相似，但是这两种标准差分别从不同的角度来考察本底噪声，分别强调了随空间变化的噪声和随时间变化的噪声。推荐同时计算空间标准差和时间标准差，并评估其中一个标准差是否明显大于另一个标准差。但是时间标准差和空间标准差通常都是很接近的，可以选择其中一个或两个的平均值来表征本底噪声。

通常来说，水平方向和垂直方向的标准差很接近，但是推荐分别计算每个方向上 QOI 的标准差，并选择二者间的最大值或平均值来进行量化。

在给定了 QOI 的标准差之后，根据专题专家的经验，可将本底噪声视为标准差的一个函数。例如一些应用要求将低于标准差三倍的所有测量到的变化值视为噪声，其他软件可能会降低要求，将只有低于一倍标准差的波动才被视为噪声。

### 5.4.3 系统误差

系统误差通常很难量化，因为 QOI 中的真实值通常是未知的。但是这些误差的来源可以通过如下内容来评估，然而值得注意的是，这些评估是必要的，但是不足以阐明系统误差。换言之，某些系统误差可以通过这些评估来监测，如果监测到系统误差，则应该进行报告，但是即使没有探测到系统误差，仍可能存在未知的系统误差。

一个衡量 QOI 系统误差的指标是静止图像 QOI 的平均值，平均值随时间变化可能是由于相机的漂移，相机发热（即在预热期间还没有达到稳定状态），热浪或振动引起的误差等。

如果刚体运动与实际试验过程中试样的运动或变形大致相同，则可以通过刚体平移来评估由于镜头畸变未校正而引起的系统误差。由未校正镜头畸变引起的系统误差将在应变云图中表现成椭圆形状（如果已从位移场中减去了平均位移或已知的施加位移，在位移云图中也会有类似的椭圆形状）。主要归咎于镜头径向畸变的存在，这种类型的偏差通常在 FOV 的中间区域比较小，边缘区域比较大，这是因为镜头厚度主要是沿径向变化的。

对于 2D-DIC，由于离面运动而产生的偏差需要重新评估。利用刚体的离面平移和旋转图像，计算出 QOI（此时假设 QOI 是面内应变）与施加的平移/旋转的函数关系。对于刚体运动，应变应该是零，因此测量到的任何应变都是噪声和偏差。估计在试验期间可能发生的或确实已发生的离面平移/旋转大小，并记录下来。将离面运动产生的误差与从静止图像计算到的本底噪声（5.4.2节）的底线相比较，如果系统误差大于噪声，那么考虑调整力学试验装置来减少离面运动。

在空域上的低通滤波中，由于用户自定义参数的选择也会在 QOI 中引入偏差，关于这类偏差的详情请见5.4.4节。最后还有一些其他因素，比如插值，走样和噪声，也会导致在空间上产生周期性的系统误差，这种误差在未加载和静止物体的静止图像中或许不可见。<sup>24</sup>

### 5.4.4 噪声与偏差之间的权衡

当选择用户自定义参数（见5.2节和5.3节）时，通常需要在测量噪声和由于过度平滑导致的偏差之间进行权衡。大的子区、低阶子区形函数、大的 VSG 尺寸以及数据的预滤波和后滤波都会降低测量中的噪声，但代价是由于低通滤波而潜在地引起测量结果的偏差。因此，当选择用户自定义参数时，评估它们对于噪声和测量偏差的影响非常重要。通常，最终选择的参数是噪声和偏差之间折中的结果。选择更有噪声的测量结果还是更加平滑的测量结果取决于应用不同，通常需要专家的判断来确定哪一组参数对给定的试验能够产生更加合适的结果。因为应变是 DIC 测量中最常见的 QOI 之一，在5.4.5节中，提出了一种在应变噪声和应变偏差之间折中的方法，该方法也可用于其他 QOI。

噪声与偏差的探讨也与 DIC 测量过程中的空间分辨率有关，定义 DIC 测量的空间分辨率是 iDICs 当前很感兴趣的话题，并且 iDICs 也在积极探索这一概念。更多关于噪声和偏差之间权衡以及定义空间分辨率的相关工作请参见 [14]。

---

<sup>24</sup>对于 2D-DIC，可以通过将平面试样靠近或远离相机来评估由于较差的插值函数或图像走样引起的系统误差。这是一个深层次的话题，超出了本版指南的范围。对于 Stereo-DIC，目前没有标准的流程用于检测或评估此类偏差。

### 5.4.5 虚拟应变片的研究

应变是一个导出量，与位移的空间变化有关，如5.3中的简述，根据所使用的 DIC 软件的不同，有很多不同的基于位移来计算应变的方法。一个常见的情况是需要用户直接或间接选择 VSG 尺寸，虚拟应变片的研究是为了确定一个合适的可接受的 VSG 的尺寸。它还阐明了是否捕获到了试样上的最大空间应变梯度，并且有助于在捕获空间应变梯度（即最小化由于过度平滑引起的偏差）和改善应变分辨率（即最小化噪声）之间达到最佳平衡。此处列出的步骤基于 [38]。有些 DIC 软件会自动执行此过程，而对于其他软件，用户必须手动执行此过程。

1. 根据供应商的默认值或过去的经验和专家的判断，使用默认的 DIC 用户自定义参数对力学试验的所有图像进行初步的 DIC 分析。选择最早计算出最高应变梯度的图像。
2. 选择参考图像，零载荷图像（在参考图像之后采集的）和在前一步骤中确定的应变梯度最高的图像。
3. 用不同的 DIC 设置参数和变化的 VSG 尺寸来分析这些图像。

#### 提示 5.4

影响 VSG 尺寸的三个主要变量是子区大小，步长和应变窗口大小/滤波窗口大小。根据应变计算方法，其他变量也会影响 VSG，包括但不限于子区形函数以及应变形函数等。

4. 基于前一步骤中的分析结果，提取出一条穿过最大应变梯度区域的线，沿着线绘制出相应的应变。

#### 警告 5.3

确保这条线不要穿过裂纹，跨越裂纹计算应变没有实际意义。

5. 当 VSG 减小时，沿着线的最大应变值通常会增加。
  - 如果最大应变值随着 VSG 的减小而收敛，那么就捕获到了实际的最大应变值，此时的 VSG 尺寸为最大尺寸。任何大于最大尺寸的 VSG 将会低估实际的应变值，并会在应变测量结果中引入偏差。
  - 如果使用软件中允许的最小 VSG 尺寸，最大应变值还是不收敛，那么实际的最大应变值是未知的。最多只能说实际应变值大于或等于测量的最大应变值。也就是说，报告得到的应变值是实际应变值的下限。

#### 提示 5.5

如果软件所允许的最小 VSG 尺寸不够小，那么可以用较小的 FOV 或较大的放大倍数重复试验。在给定步长、应变窗口/滤波窗口大小等其他自定义的参数确定的情况下（DIC 软件对它们都以 pixel 为单位），更高的放大倍数将会得到更小的实际 VSG 尺寸。



6. 随着 VSG 尺寸的减小，应变噪声通常会增加，因为此时的空间滤波尺寸也在减小。可以通过先前步骤中的直线扫描的方法来定性评估噪声。为了量化噪声，需要计算先前做过 DIC 分析的零载荷图像应变场的标准差。
7. 最终 VSG 尺寸的选择（以及其他 DIC 参数，如果它们也是变化的）需要经过专家的判断。如果捕获最大应变梯度对于 DIC 分析很关键，那么即使噪声较大，小的 VSG 也可能是最佳选择。另一方面，如果应变梯度不高、或一个平滑的应变场、或减少了的不确定度比获取高应变梯度处最大应变的位置更重要，那么更大的 VSG 将会是最佳选择。或在试验的不同阶段，选择不同的 VSG 尺寸（例如，在试验早期，信噪比很低，应变梯度小，那么此时应选择较大的 VSG 尺寸，在试验后期，应变信噪比较大，应变梯度比较明显，此时应选择较小的 VSG 尺寸）。

## 6 | 报告要求

使用 DIC 测量的力学测试中的所有变量，例如物理系统参数（即相机，镜头，散斑制作方法等）和数据分析过程参数（即子区大小，虚拟应变片尺寸等），阐述变量选择的理由及归档是至关重要的。以下列表列出了最低的报告要求，以及推荐的选择和更详细的报告建议。DIC 数据的所有文档（内部报告和已发表的期刊文章）都应包含此类信息。

### 提示 6.1

某些报告的建议可能不是必须的，然而一些未列出的却可能是很重要的，这完全取决于 DIC 数据应用的场景。记录所有的相关信息永远是最重要的！

### 6.1 DIC 硬件参数

#### 6.1.1 要求记录的参数

- 相机制造商、型号以及图像分辨率
- 镜头制造商、型号和焦距

备注 1: 如果镜头是变焦镜头，记录焦距的变化范围和使用的焦距。

- FOV
- 图像尺度

备注 1: 在 Stereo-DIC 中，相机与试样表面成一定角度，图像尺度在 FOV 上不是恒定的，并且在两个相机中可以是不同的。因此，应该记录图像 ROI 的图像尺度，如果两个相机的图像尺度几乎一样，记录二者图像尺度的平均值；如果两个相机的图像尺度显著不同，则分别记录每个相机的图像尺度。

- 立体角
- SOD
- 图像采集频率
- 散斑制作方法

备注 1: 适用于 Stereo-DIC，不适用于 2D-DIC。

- 近似的散斑特征尺寸

备注 1: 指明用于确定散斑特征尺寸的方法, 注意亮 (白色) 的和暗 (黑色) 的区域都被视为散斑特征。

### 6.1.2 推荐记录的参数

- 光圈
- 图像噪声

## 6.2 DIC 分析参数

### 6.2.1 要求记录的参数

- DIC 软件名称和制造商

备注 1: 如果使用独立开发的(非商业)DIC 代码, 强烈建议使用 DIC Challenge 中的图像验证该代码 [14] (<https://sem.org/dic-challenge/>)。使用该代码进行 DIC 测量后产生的文档都应参考此验证结果。

- 图像滤波 (如果使用的话)
- 子区大小

备注 1: 建议以像素单位和物理单位 (例如 mm, 通过除以图像尺度得到) 两种方式表示子区大小。

- 步长

备注 1: 建议以像素单位和物理单位 (例如 mm, 通过除以图像尺度得到) 两种方式表示步长大小。

- 子区形函数 (例如仿射形函数, 二阶形函数)
- 数据处理和 QOI 滤波

#### 推荐 6.1

应变是最常见的 QOI 之一。应记录的典型参数包括:

- 位移的空域和/或时域预滤波参数 (如果使用了的话)
- 应变的表达方式 (即拉格朗日应变、工程应变和对数应变等)
- 应变窗口
- 虚拟应变片尺寸

备注 1: 建议同时以像素单位和物理单位 (例如 mm, 通过除以图像尺度得到) 两种方式来表示。

- 应变的空域和/或时域后滤波 (如果使用了的话)

- QOI 的本底噪声和偏差

备注 1: 2D-DIC 应该记录离面位移导致的偏差。

## 6.2.2 推荐记录的参数

- DIC 软件版本号
- 标定参数，如后续列表所示。请注意标定参数对应的模型是与软件相关的。此处列出的参数代表一种特定模型；应记录针对所用模型的相关参数。
  - 所用标定板型号和序列号（此信息用于后续查验，且对于阐明可能与特定标定板相关的测量误差非常有用）。
  - 图像中心
    - 备注 1: 如果使用 Stereo-DIC，请记录两个相机的图像中心。
  - 焦距
    - 备注 1: 如果使用 Stereo-DIC，请记录两个相机的焦距。
  - 镜头畸变校正模型和参数
  - 立体角
    - 备注 1: 适用于 Stereo-DIC，不适用于 2D-DIC。
  - 相机间距
    - 备注 1: 适用于 Stereo-DIC，不适用于 2D-DIC。
  - 衡量标定质量的指标
- 插值
- 匹配准则

## 7 | 术语及缩写

### 7.1 缩写

**DIC:** 数字图像相关

**DOF:** 景深

**FOV:** 视场

**iDICs:** 国际数字图像相关学会

**QOI:** 感兴趣量

**ROI:** 感兴趣区域

**SOD:** 靶距

**VSG:** 虚拟应变片

### 7.2 术语

**标定分数:** 标定 DIC 系统时光束平差优化过程的残差。

**数字图像相关:** 在本版指南的范围内，数字图像相关 (DIC) 特指一种基于光学的测量技术，用于测量材料或结构的力学试验中试样表面上不断演变的全场 2D 或 3D 位移。

备注 1: *2D-DIC* 指测量试样表面两个方向上位移的测量方法，该方法仅使用一个相机垂直对准平面试样。

备注 2: *Stereo-DIC* 指测量在试样表面三个方向上形状和位移的测量方法，该方法使用以不同角度的两个（或更多个）相机拍摄试样。*Stereo-DIC* 有时被称为 *3D-DIC*，但不应与 *DVC* (*Volumetric-DIC*) 混淆，后者在整个试样体积内提供形状和位移测量值。

**数据滤波** 对结果进行的后处理，用空域或时域滤波对 DIC 结果（包括高斯滤波，中值滤波等）进行后处理。

**数据点:** 给出 DIC 结果（位移、应变等）的点。通常指的是局部 DIC 的子区中心点。

**成像元件的动态范围 [count 或 gray level]:** 相机成像元件模数转换器的位数（例如 8 位）。

**图像的动态范围 [count 或 gray level]:** 包含在图像数据中灰度的变化范围, 可以从图像灰度直方图中获得。图像动态范围小于等于**成像元件的动态范围**。

**极线误差 [pixel]:** 由立体系统中的两个相机的一对图像的互相关决定的**数据点位置**和极线之间的距离。

备注 1: 根据 DIC 软件, 极线误差也可称为投影误差、三维残差、交点误差或相关偏差。

备注 2: 极线由立体相机标定的外参数 (即立体角, 两个相机间距) 确定。有关极线几何的更多信息, 请参阅 [42, 4.2 节 (三维计算机视觉)]。

**视场 (FOV) [mm×mm]:** 通过镜头系统投射到成像元件上的空间区域。

**图像灰度 [count]:** 图像采集系统记录的图像强度, 用数字转换器的计数个数来表示。

备注 1: 该值与测量的光强度成比例, 但通常与测量强度没有绝对的标定关系。对于 DIC 测量, 缺乏这种标定是可以接受的, 因为图像用于跟踪物体运动, 而不是测量物体上某点的光强度。

备注 2: 通常, 计数的数量与成像模数转换器中的位数 (量化级别) 有关。

**图像数据:** 记录包含与位移场 (包括位移梯度) 相关的编码信息的试样“图像”, 一般为“灰度”的 2 维或 3 维数值阵列, 或用于相关匹配的灰度数据。

**图像滤波:** 在所有修改像素灰度值的图像数据处理方法中, 最常见的是平滑操作。

备注 1: 模拟图像滤波是指以模拟方式修改物理光学系统的滤波。例如使用安装在相机成像元件上的模糊滤波或使镜头散焦。

备注 2: 数字图像滤波是指以数字方式完成的滤波, 作为在获取图像之后的后处理步骤, 例如, 高斯滤波。

**图像噪声 [count 或 gray level 或动态范围百分比]:** 成像系统的像素采集噪声。通常取决于像素灰度、相机温度和光强。

**图像尺度 [pixel/mm]:** 用于记录某一物理长度的图像光学单元 (像素) 的数量。图像尺度可用于将图像像素大小转换为物理单位 (例如 mm)。

备注 1: 图像尺度随图像中位置的变化而变化。2D-DIC 只采用单个垂直于试样表面的相机, 图像尺度变化很小, 如果有变化也主要由镜头畸变造成。Stereo-DIC 的相机与感兴趣区域成一定夹角, 图像尺度的变化会大很多。这是由镜头畸变和透视效应 (该效应在左右相机中是相反的) 共同引起的。对于 Stereo-DIC 系统, 需要报告 ROI 的平均图像尺度。

**插值:** 在相关计算中, 根据匹配准则, 插值函数用于计算在子区形函数转换中的亚像素变化。

**匹配准则:** 用于衡量基于图像数据计算位移场的数学公式。通常也称为“相关准则”。

备注 1: 常见的匹配准则包括 (但不限于) 误差平方和准则 (Sum of Square Differences, SSD), 归一化误差平方和准则 (Normalized Sum of Square Differences, NSSD), 零均值归一化误差平方和准则 (Zero-Normalized Sum of Square Differences, ZNSSD) 以及互相关准则 (Cross-Correlation, CC)。

**本底噪声**： [见感兴趣量的分辨率]。

**散斑特征尺寸 [pixel]**： 图像数据中 DIC 散斑的特征长度，以像素为单位。

备注 1: DIC 特征图像主要由圆形特征点（即散斑）组成，有时特征尺寸也称为“散斑尺寸”。

备注 2: 如果图像中存在一系列特征尺寸，则应报告平均尺寸和可以表征尺寸分布的统计值（例如，最小值，最大值，或标准差）。

备注 3: 可以通过除以**图像尺度**来计算物理特征尺寸。

备注 4: 可以将散斑的空间频率确定为散斑特征尺寸的倒数（例如， $1/$ （散斑特征尺寸））。

**像素**： 图像数据被平均和量化的区域，并由某些输入（通常是光学强度）在每个像素处产生灰度值或计数值。

**感兴趣量 (QOI)**： 用于定性区分和定量确定 [8] 的试样属性或性能，可以通过特定试验获得。

备注 1: QOI 可以是直接测量出或导出的。关于 DIC，常见的 QOI 有形状、曲率、位移、速度、加速度、应变和应变率等。

**像素的位数 (bit)**： 用于记录每个像素灰度值的位数。它可以是光学图像的光强度，计算机断层扫描的 X 射线密度，或者编码为图像对比度（图像数据）的任何其它信息。（原子力显微镜 (Atomic Force Microscope) 中的高度图是“图像数据”的一个特殊例子）。

**试样的感兴趣区域 (ROI) [mm×mm]**： 用于分析的试样表面区域。

备注 1: AOI (Area-of-Interest) 和 ROI (Region-of-Interest) 都可以用来表示感兴趣区域。

备注 2: 感兴趣区域可以是任意形状，也可以在后续图像中改变形状。

备注 3: 术语“感兴趣区域”可以是试样的一部分或者图像上的对应部分，通常可以通过上下文区分该术语描述的意思。

**图像的感兴趣区域 (ROI) [pixel×pixel]**： 与试样感兴趣区域对应的图像区域。

备注 1: AOI (Area-of-Interest) 和 ROI (Region-of-Interest) 都可以用来表示感兴趣区域。

备注 2: 所有的 QOI 都是通过来自 ROI 的图像数据测量或者推算出来的。

备注 3: 术语“感兴趣区域”可以指试样的一部分或者图像上的对应部分，通常可以通过上下文区分该术语描述的意思。

**图像分辨率 [pixel×pixel]**： 图像中包含的像素总数，通常以成像元件的宽度乘高度（均以像素为单位）来表示。

备注 1: 不能把图像分辨率与**光学分辨率**或者**空间分辨率**相混淆。

**光学分辨率 [line pair/mm]**： 成像系统对被成像物体细节进行分辨的能力。



备注 1: 光学分辨率通常由分辨率标定板的图像测量得到。

**空间分辨率 [pixel]:** 两个可独立测量的局部特征点之间的最小距离。

备注 1: 该定义可能与直觉相反, 因为低空间分辨率比高空间分辨率好。图像分辨率和光学分辨率的趋势是相反的。

备注 2: 对于本版指南, 空间分辨率的概念定义如上; 然而, 用于表征 DIC 测量的空间分辨率的统一方法是当前 iDICs 感兴趣的话题, 并且 iDICs 正在积极探索该概念的更多细节。

**分辨率标定板:** 具有固定宽度和/或间距特征的物体, 用于确定成像系统的光学分辨率。

备注 1: 两个常见的分辨率标定板是 1951 USAF 和 Siemens star 分辨率标定板, 二者均可以从大的光学公司购买到。详细信息见[https://en.wikipedia.org/wiki/1951\\_USAF\\_resolution\\_test\\_chart](https://en.wikipedia.org/wiki/1951_USAF_resolution_test_chart) 和 [https://en.wikipedia.org/wiki/Siemens\\_star](https://en.wikipedia.org/wiki/Siemens_star)。

**QOI 分辨率:** 区分 QOI 测量值与噪声的阈值, 低于该阈值时无法区分测量值与噪声, 而高于该阈值时说明测量值是显著的。

备注 1: 在本指南中 QOI 的分辨率可以和本底噪声互换。

备注 2: 本底噪声通常被定义为: 在 QOI 理论值为零的条件下计算出的 QOI 的标准差 (空间或时间) 的倍数。

备注 3: 本底噪声仅反映 QOI 的随机误差, 并不反映 QOI 中可能存在的任何系统误差。有关随机误差和系统误差的更多信息, 请参见 5.4 节。

**应变函数:** 在应变窗口内采用最小二乘拟合位移数据的函数。应变是由该函数的导数计算得到的。

备注 1: 不能混淆应变函数和子区形函数。

备注 2: 不是所有的应变计算方法都用应变函数。

**子区形函数:** 描述子区内位移场的函数。

备注 1: 仿射 (线性) 形函数是最常见的子区形函数, 但更高阶的形函数也可使用。

备注 2: 不能混淆子区形函数和应变函数。

**靶距 [m]:** 镜头光圈与试样之间的距离。

**立体角 [°]:** 在 Stereo-DIC 系统中, 两个相机系统 (即相机和镜头) 光轴之间的夹角。

**立体平面:** 在 Stereo-DIC 系统中, 两个相机系统 (即相机和镜头) 光轴所组成的平面。

**步长,  $L_{step}$  [pixel]:** 计算子区位移的像素网格点的间距。也就是说, ROI 内每一个步长处都有一个位移值。



备注 1: 步长有时也用重叠量来表示。例如 50% 的重叠意味着步长是子区大小的一半。

**子区:** 用于计算一个三维坐标值或位移值的局部图像。

备注 1: 尽管可以通过子区形函数获得其它参数, 但是子区中心点的位移是使用较多的量。

**子区大小,  $L_{subset}$  [pixel]:** 参考图像中子区的长度。

备注 1: 子区通常是正方形或圆形的 (在参考图像中), 因此单个长度足以定义子区的大小。但是, 有些软件允许矩形子区, 在这种情况下, 应给出矩形两边的尺寸以定义子区大小。

**权函数:** 基于像素的空间位置, 采用数学表达式将一些像素对计算结果的影响增大。

备注 1: 常见的权函数有二次函数、常值函数 (对所有元素权重相同) 或高斯函数 (越靠近中心, 权重越大)。

备注 2: 子区权函数用于子区匹配时对子区内像素灰度进行加权。

备注 3: 应变权函数用于计算应变时对应变窗内的应变数据点进行加权。

备注 4: 滤波权函数空间数据滤波时, 用于对滤波窗口内的数据进行加权。

**滤波窗口:** 图像 ROI 内用于 DIC 数据空间滤波的有限个数据点组成的区域。

备注 1: 关于滤波窗口的信息参见窗口尺寸。

**应变窗口:** 图像 ROI 的局部区域, 包含有限个用于计算应变的数据点。

备注 1: 并非所有计算应变的方法都需要应变窗口。

备注 2: 关于应变窗口尺寸的信息, 参见窗口尺寸。

**窗口尺寸,  $L_{window}$  [data point]:** 包含数据点的局部区域的特征长度 (例如滤波窗口或应变窗口)。

备注 1: 应变和滤波窗口通常为正方形, 圆形或六边形, 窗口的大小由窗口的特征长度 (即正方形的一边, 圆的直径或六边形的等效直径) 给出。窗口大小是根据跨越窗口特征长度的数据点数目确定的。窗口通常是对称的, 并以数据点为中心; 因此, 窗口的大小通常是奇数。

备注 2: 以像素为单位的窗口大小,  $L_{window}^*$ , 由公式 7.1 给出, 其中  $L_{window}$  是以数据点表示的窗口大小,  $L_{step}$  是步长。

$$L_{window}^* = (L_{window} - 1) L_{step} \quad (7.1)$$

备注 3: 为了得到以物理单位表示的窗口大小, 必须把以像素表示的窗口大小除以平均的图像尺度。

**虚拟应变片 (VSG):** 影响特定位置处的应变值的图像局部区域。

备注 1: VSG 近似于 (但不完全等同于) 应变片所覆盖的物理区域。



虚拟应变片尺寸,  $L_{VSG}$  [pixel]: 虚拟应变片的特征长度。

备注 1: 虚拟应变片通常是正方形, 圆形或者六边形, VSG 大小由 VSG 的特征长度来确定 (例如: 正方形的边长, 圆的直径, 或者六边形的等效直径), VSG 的大小根据跨越 VSG 特征长度的像素数目来确定。

备注 2: VSG 的大小取决于应变计算方法和用户定义的参数, 例如步长, 子区大小, 应变窗口, 滤波窗口, 应变函数, 权函数和子区形函数。如果  $L_{window} > 0$ , VSG 尺寸的计算由公式 7.2 给出, 其中,  $L_{window}$  为 (应变窗口 或者 滤波窗口) 的窗口大小,  $L_{step}$  为步长,  $L_{subset}$  为子区大小。

$$L_{VSG} = (L_{window} - 1)L_{step} + L_{subset} \quad (7.2)$$

备注 3: 为了得到物理单位下的 VSG 大小, 必须把以像素表示的 VSG 大小除以平均的图像尺度。

## 参考文献

- [1] Blaysat, B., Grédiac, M., Sur, F. (2016) On the Propagation of Camera Sensor Noise to Displacement Maps obtained by DIC — An Experimental Study. *Exp Mech*, 56(6):919–944. <https://doi.org/10.1007/s11340-016-0130-9>.
- [2] Bossuyt, S. (2013) Optimized Patterns for Digital Image Correlation. *Proceedings of the 2012 Annual Conference on Experimental and Applied Mechanics*. Vol 3: Imaging methods for Novel Materials and Challenging Applications, pg 239–248. Springer, New York. [https://doi.org/10.1007/978-1-4614-4235-6\\_34](https://doi.org/10.1007/978-1-4614-4235-6_34).
- [3] Byrne, E., Simonsen, M. (2016) Lens Selection and Stereo Angle. Accessed Sept. 2018. <http://www.correlatedsolutions.com/support/index.php?/Knowledgebase/Article/View/50/1/lens-selection-and-stereo-angle>
- [4] Crammond, G., Boyd, S.W., Dulieu-Barton, J.M. (2013) Speckle Pattern Quality Assessment for Digital Image Correlation. *Optics and Lasers in Engineering* 51(12):1368–1378. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2013.03.014>.
- [5] Dong, Y.L., Pan, B. (2017) A Review of Speckle Pattern Fabrication and Assessment for Digital Image Correlation. *Exp Mech*. 57(8):1161–1181. <https://doi.org/10.1007/s11340-017-0283-1>.
- [6] Grédiac, M., Hild, F., Pineau, A. (2013) Full-Field Measurements and Identification in Solid Mechanics. Wiley Online Library: New York. <https://doi.org/10.1002/9781118578469>.
- [7] Iadicola, M.A. (2016) Uncertainties of Digital Image Correlation due to Pattern Degradation at Large Strain. In: Jin, H., Yoshida, S., Lamberti, L., Lin, M.T. (eds) *Advancement of Optical Methods in Experimental Mechanics*. Vol. 3. *Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics*. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-22446-6\\_31](https://doi.org/10.1007/978-3-319-22446-6_31).
- [8] JCGM Member Organizations (2012) International Vocabulary of Metrology — Basic and General Concepts and Associated Terms (VIM). Edition 3. Vol 200. BIPM. <https://www.bipm.org/en/publications/guides/vim.html>.
- [9] Jones, E.M.C., Reu, P.L. (2017) Distortion of Digital Image Correlation (DIC) Displacements and Strains from Heat Waves. *Exp Mech*. <https://doi.org/10.1007/s11340-017-0354-3>.

- [10] Lava, P., Cooreman, S., Coppieters, S., De Strycker, M., Debruyne, D. (2009) Assessment of Measuring Errors in DIC using Deformation Fields Generated by Plastic FEA. *Optics and Lasers in Engineering* 47(7-8):747–753. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2009.03.007>.
- [11] Lecompte, D., Smits, A., Bossuyt, S., Sol, H., Vantomme, J., Hemelrijck, D.V., Habraken, A. (2006) Quality Assessment of Speckle Patterns for Digital Image Correlation. *Optics and Lasers in Engineering*, 44(11): 1132–1145. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2005.10.004>.
- [12] LePage, W.S., Daly, S.H., Shaw, J.A. (2016) Cross Polarization for Improved Digital Image Correlation. *Exp Mech*, 56(6):1–17. <https://doi.org/10.1007/s11340-016-0129-2>.
- [13] Pan, B., Yu, L., Wu, D. (2014) High-Accuracy 2D Digital Image Correlation Measurements using Low-Cost Imaging Lenses: Implementation of a Generalized Compensation Method. *Meas Sci Technol*, 25(2):025001. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/25/2/025001>.
- [14] Reu, P.L., Toussaint, E., Jones, E.M.C., Bruck, H.A., Iadicola, M., Balcaen, R., Turner, D.Z., Siebert, T., Lava, P., Simonsen, M. (2017) DIC Challenge: Developing Images and Guidelines for Evaluating Accuracy and Resolution of 2D Analyses. *Exp Mech*. <https://doi.org/10.1007/s11340-017-0349-0>.
- [15] Reu, P.L. (2013) A Study of the Influence of Calibration Uncertainty on the Global Uncertainty for Digital Image Correlation Using a Monte Carlo Approach. *Exp Mech*, 53:1661–1680. <https://doi.org/10.1007/s11340-013-9746-1>.
- [16] Reu, P.L. (2012) Introduction to Digital Image Correlation: Best Practices and Applications. In “The Art and Application of DIC” article series. *Exp Techniques*, 36(1):3–4. <https://doi.org/10.1111/j.1747-1567.2011.00798.x>.
- [17] Ibid, (2012) Hidden Components of DIC: Calibration and Shape Function — Part 1. 36(2):3–5. <https://doi.org/10.1111/j.1747-1567.2012.00821.x>.
- [18] Ibid, (2012) Hidden Components of 3D-DIC: Interpolation and Matching — Part 2. 36(3):3–4. <https://doi.org/10.1111/j.1747-1567.2012.00838.x>.
- [19] Ibid, (2012) Hidden Components of 3D-DIC: Triangulation and Post-Processing — Part 3. 36(4):3–5. <https://doi.org/10.1111/j.1747-1567.2012.00853.x>.
- [20] Ibid, (2012) Stereo-Rig Design: Creating the Stereo-Rig Layout — Part 1. 36(5):3–4. <https://doi.org/10.1111/j.1747-1567.2012.00871.x>.
- [21] Ibid, (2012) Stereo-Rig Design: Camera Selection — Part 2. 36(6):3–4. <https://doi.org/10.1111/j.1747-1567.2012.00872.x>.
- [22] Ibid, (2013) Stereo-Rig Design: Lens Selection — Part 3. 37(1):1–3. <https://doi.org/10.1111/ext.12000>.
- [23] Ibid, (2013) Stereo-Rig Design: Stereo-Angle Selection — Part 4. 37(2):1–2. <https://doi.org/10.1111/ext.12006>.

- [24] Ibid, (2013) Stereo-Rig Design: Lighting — Part 5. 37(3):1–2. <https://doi.org/10.1111/ext.12020>.
- [25] Ibid, (2013) Calibration: Pre-Calibration Routines. 37(4):1–2. <https://doi.org/10.1111/ext.12026>.
- [26] Ibid, (2013) Calibration: 2D Calibration. 37(5):1–2. <https://doi.org/10.1111/ext.12027>.
- [27] Ibid, (2013) Calibration: A Good Calibration Image. 37(6):1–3. <https://doi.org/10.1111/ext.12059>.
- [28] Ibid, (2014) Calibration: Stereo Calibration. 38(1):1–2. <https://doi.org/10.1111/ext.12048>.
- [29] Ibid, (2014) Calibration: Sanity Checks. 38(2):1–2. <https://doi.org/10.1111/ext.12077>.
- [30] Ibid, (2014) Calibration: Care and Feeding of a Stereo-Rig. 38(3):1–2. <https://doi.org/10.1111/ext.12083>.
- [31] Ibid, (2014) Speckles and their Relationship to the Digital Camera. 38(4):1–2. <https://doi.org/10.1111/ext.12105>.
- [32] Ibid, (2014) All about Speckles: Aliasing. 38(5):1–3. <https://doi.org/10.1111/ext.12111>.
- [33] Ibid, (2014) All about Speckles: Speckle Size Measurement. 38(6):1–3. <https://doi.org/10.1111/ext.12110>.
- [34] Ibid, (2015) All about Speckles: Contrast. 39(1):1–2. <https://doi.org/10.1111/ext.12126>.
- [35] Ibid, (2015) All about Speckles: Edge Sharpness. 39(2):1–2. <https://doi.org/10.1111/ext.12139>.
- [36] Ibid, (2015) All about Speckles: Speckle Density. 39(3):1–2. <https://doi.org/10.1111/ext.12161>.
- [37] Ibid, (2015) Points on Paint. 39(4):1–2. <https://doi.org/10.1111/ext.12147>.
- [38] Ibid, (2015) Virtual Strain Gauge Size Study. 39(5):1–3. <https://doi.org/10.1111/ext.12172>.
- [39] Ibid, (2015) DIC: A Revolution in Experimental Mechanics. 39(6):1–3. <https://doi.org/10.1111/ext.12173>.
- [40] Reu, P.L. (2018) Using Anti-Aliasing Camera Filters for DIC: Does it Make a Difference?. In: Lamberti, L., Lin, M.T., Furlong, C., Sciammarella, C. (eds) *Advancement of Optical Methods in Experimental Mechanics*. Vol. 3. *Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics*. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-63028-1\\_14](https://doi.org/10.1007/978-3-319-63028-1_14).

- [41] Reu, P.L., Sweatt, W., Miller, T., Fleming, D. (2015) Camera System Resolution and its Influence on Digital Image Correlation. *Exp Mech*, 55:9–25. <https://doi.org/10.1007/s11340-014-9886-y>.
- [42] Sutton, M.A., Orteu, J.J., Schreier, H. (2009) *Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements*. Springer US. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-78747-3>.
- [43] Sutton, M.A., Yan, J.H., Tiwari, V., Schreier, H.W., Orteu, J.J. (2008) The Effect of Out-of-Plane Motion on 2D and 3D Digital Image Correlation Measurements. *Optics and Lasers in Engineering* 46(10)746–757. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2008.05.005>.
- [44] Wittevrongel, L., Badaloni, M., Balcaen, R., Lava, P., Debruyne, D. (2015) Evaluation of Methodologies for Compensation of Out-of-Plane Motions in 2D Digital Image Correlation Setup. *Strain*, 51(5):357–369. <https://doi.org/10.1111/str.12146>.
- [45] Zappa, E., Mazzoleni, P., Matinmanesh, A. (2014) Uncertainty Assessment of Digital Image Correlation Method in Dynamic Applications. *Opt Laser Eng*, 56:140–151. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2013.12.016>.

# A | DIC 测量和分析的检查表和流程图

本附录给出了在平面试样力学试验的设计、执行和分析期间，进行的 DIC 测量时应考虑的检查表和流程图。检查表中列出的每个步骤在指南正文中有详细阐述，流程图（图A.1）的括号内为各章节特定内容的索引。

## 1. DIC 测量的设计 (2)

### (a) 测量要求

- 感兴趣量 (2.1.1)
- 感兴趣区域 (2.1.2)
- 视场 (2.1.3)
- 硬件占据的空间位置 (2.1.4)
- 2D-DIC 与 Stereo-DIC 的对比 (2.1.5)
- 立体角 (2.1.6)
- 景深 (2.1.7)
- 空间梯度 (2.1.8)
- 本底噪声 (2.1.9)
- 帧率 (2.1.10)
- 曝光时间 (2.1.11)
- 同步与触发 (2.1.12)

### (b) 设备与硬件

- 相机与镜头的选择 (2.2.1)
- 相机与镜头的固定 (2.2.2)
- 光圈 (2.2.3)
- 光照与曝光 (2.2.4)
- DIC 散斑 (2.3)

### (c) 模拟试验 (可选)

- 利用额外的试样检查散斑制作方法是否合适
- 评价散斑在整个试验过程中的变形行为
- 评估在整个试验过程中的光照/对比度
- 评价数据同步与触发

## 2. DIC 测量准备 (3)

### (a) 标定前的流程 (3.1)

- 试验流程检查 (3.1.1)
- 检查相机成像元件、镜头和标定板是否清洁 (3.1.2)
- 相机预热 (3.1.3)
- 使相机之间相互同步，并与其它数据采集装置同步 (3.1.4)
- DIC 散斑制作 (3.1.5)

### (b) 标定前的系统检查 (3.1.6)

- 将试样放置在试验台架上 (3.1.6.1)
- 定位相机并获得所需的 FOV 和图像 ROI (3.1.6.1)
- 检查 FOV、焦距和 DOF (3.1.6.2)
- 锁紧相机、镜头和固定系统上的所有可调零件 (3.1.6.3)
- 如使用了交叉偏振光，调整偏振片的方向 (3.1.6.3)
- 检查静止图像 (3.1.6.4)，寻找：
  - 眩光
  - 过大或过小的 DIC 散斑
  - 人工 DIC 散斑中的缺陷
  - 图像中的离焦区域
  - 低对比度
  - 非均匀光照
  - 过曝或欠曝区域
  - 镜头或成像元件上的污垢、污点或异物
  - 振动或其它相机运动
- 调整 DIC 系统直到获得高质量图像

### (c) 标定 (3.2)

- 选择大小合适的标定板 (3.2.2.1)
- 整理出一个进行标定的清洁空间 (3.2.2.2)
- 锁紧相机、镜头和固定系统上的所有可调零件 (3.2.2.2)
- 调整光照/曝光 (3.2.2.3)。
- 确保标定板旋转、倾斜和平移时对比度均匀且无眩光 (3.2.2.3)
- 采集标定图像，确保其位于整个光学系统工作体积内并具有易于提取的特征 (3.2.2.4)
- 标定系统 (3.2.2.5)
- 检查标定结果 (3.2.2.6)
- 检查标定参数 (3.2.2.7)

### (d) 标定后的流程 (3.3)

- 重置系统：将试样放置在试验台架中（若标定前移走了试样）或重新定位立体系统（若标定前已移走）并锁定任何可调零件 (3.3.1.1)
- 调整光照/曝光 (3.3.1.2)
- 采集静止图像 (3.3.1.3)



- 检查静止图像 (3.3.1.4 和 3.1.6.4), 寻找:
  - 眩光
  - 过大或者过小的 DIC 散斑
  - 人工 DIC 散斑中的缺陷
  - 图像中的离焦区域
  - 低对比度
  - 非均匀光照
  - 过曝光或欠曝光区域
  - 镜头或成像元件上的污垢、污点或异物
  - 振动或其它相机运动
- 采集试样的刚体平移图像并进行本底噪声分析 (3.3.1.5)
- 检验相机标定结果 (3.3.2)
  - 内参数 (3.3.2.1)
  - 外参数 (3.3.2.2)
  - 绝对距离 (3.3.2.3)
- 进行简化的本底噪声分析, 确保本底噪声可接受 (3.3.3.1)
- 检查热浪 (3.3.3.2), 系统稳定性 (3.3.3.3) 和任何其他任何实验室所特有的系统检查 (3.3.3.4)

### 3. 进行 DIC 测量试验 (4)

- 检查 DIC 图像的文件名、位置和存储容量。
- 确认选择了正确的试验程序或宏命令。
- 检查力学信号和其它测量信号已设为记录状态, 且与 DIC 图像同步。
- 确认试验台架和 DIC 图像采集可随时触发。
- 确认光源已打开, 曝光时间和帧率设置正确。

### 4. DIC 图像处理 (5)

- 选择初始的相关计算和用户自定义参数。
- 进行图像的初始匹配。
- 使用不同的用户自定义参数重新分析图像。(例如, 如果应变是 QOI, 则进行 VSG 研究。)
- 根据不同的相关结果, 选择最终的用户自定义参数。
- 使用最终参数计算所有图像。
- 使用最终参数计算方差和偏差 (5.4)。

### 5. 报告要求 (6)

- 验证并记录试验和 DIC 分析中的所有选择项。



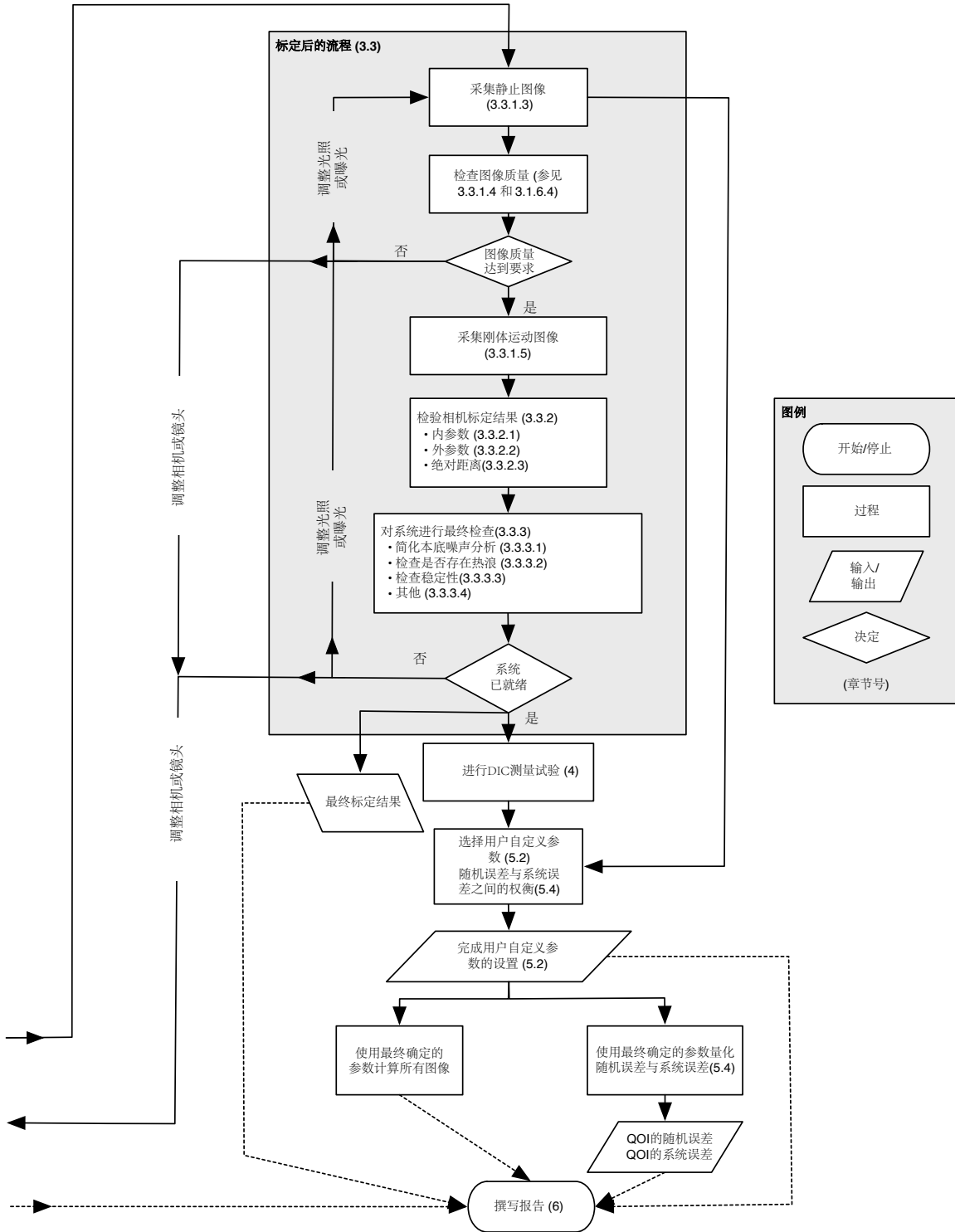


图 A.2: 在平面试样力学试验中进行 DIC 测量所涉及到的主要步骤的流程图 (第 2 部分)

## B | 焦距、视场和靶距

薄透镜理论<sup>25,26,27</sup>对于给定的一组相机和镜头，定义了一系列基本方程，用来估计相机与试样图像之间的 FOV 和 SOD。由于实际光学系统（超出了本版指南的范围）十分复杂，这些方程并不精确，但事实证明，对于真实 DIC 试验这些公式精度已足够。当视场尺寸缩小到传感器尺寸的两倍或更小时，或采用微距镜头测量时情形，这些方程将更加不精确。但总体上看，这些方程对从一套镜头中选择出最合适镜头或大致确定 SOD 是有帮助的。

在许多典型的 DIC 试验中，相机或传感器和试验夹具（包含喷上散斑的试样）之间的相对位置是固定的（即固定的靶距），并且需要计算给定镜头的 FOV，以确定试样上的 ROI 是否能够成像。视场的特征长度 ( $L_{FOV}$ ) 可以使用镜头的焦距 ( $L_{FL}$ )、相机到喷有散斑试样之间的距离（即 SOD,  $L_{SOD}$ ）和成像元件的宽度 ( $L_{CS}$ ) 来近似计算出来：

$$L_{FOV} = L_{CS} \left( \frac{L_{SOD} - L_{FL}}{L_{FL}} \right) \quad (\text{B.1})$$

在线计算器<sup>28</sup>可用于快速求解 FOV，该公式也可推广到矩形成像元件上。相反，在某些试验中，所需 FOV 由试样本身确定，镜头焦距由现有硬件确定，但到试样的距离（即 SOD）可通过移动相机或传感器进行调整。在这种情况下，方程B.1可整理为：

$$L_{SOD} = L_{FL} \left( \frac{L_{FOV}}{L_{CS}} + 1 \right) \quad (\text{B.2})$$

相机成像元件宽度通常可在相机的制造商规格书中找到。有时会用像素大小来代替（通常是 micron）。在后一种情况下， $L_{CS}$  是像素大小乘以图像上的像素数。在使用小于完整图像大小的裁剪图像时也是如此：只需将裁剪图像的宽度（以 pixel 为单位）乘以像素物理大小即可获得  $L_{CS}$ 。如果规格书中只有成像元件的宽度，则可能需要首先将  $L_{CS}$  除以全帧图像像素宽度来计算像素大小。请注意，某些相机的“合并”功能并不会减少  $L_{CS}$ ，因为它仍然使用完整的成像元件，但会将来自多个像素的数据组合在一起，以得到较低分辨率的图像（除非在裁剪图像的同时使用合并功能）。

实际使用公式B.1和公式B.2时，可以为给定硬件组的视场或 SOD 建立快速查找表。例如，考虑一个包含两个相机、一个固定杆和几个定焦（非变焦）镜头的 Photron

<sup>25</sup> Richard Fitzpatrick 教授的薄透镜理论：<http://farside.ph.utexas.edu/teaching/3021/lectures/node140.html>

<sup>26</sup> 镜头（光学）：维基百科上的成像特性：[https://en.wikipedia.org/wiki/Lens\\_\(optics\)#Imaging\\_properties](https://en.wikipedia.org/wiki/Lens_(optics)#Imaging_properties)

<sup>27</sup> Iacopo Giangrandi 的镜头焦距计算器：<http://www.giangrandi.ch/optics/focalcalc/focalcalc.shtml>

<sup>28</sup> Wayne Fulton 的相机和镜头的 FOV 计算器：<http://www.scantips.com/lights/fieldofview.html>

**表 B.1: Photron MH4 立体系统 1.52m (60inch) SOD ( $L_{SOD} = 1.52\text{m}$ )**

焦距 ( $L_{FL}$ )	FOV 宽度 ( $L_{FOV}$ )
6mm	1.22m (48inch)
8.5mm	0.8m (34inch)
12mm	0.61m (24inch)

MH4 硬件组。在这种情况下，立体角被固定，因而将 SOD 固定为  $L_{SOD} = 1.52\text{m}$  (60inch)。硬件组中包括 6、8.5 和 12mm 焦距镜头。通过切换镜头，并使用公式 B.1 和成像元件宽度  $L_{CS} = 4.80\text{mm}$  (考虑到立体重叠，已从 5.12mm 减少到该值)，可以绘制出相应的可测宽度图。结果如表 B.1 所示。对于其它相机组也可以建立类似的测量宽度表，用作快速查找指南。当 FOV 固定时 (例如，受常用试验机中试样尺寸的限制)，为了方便从一组镜头中挑选合适的镜头或者购买合适的镜头，公式 B.2 可用于创建各种镜头对应工作距离的快速查找表。

公式 B.1 和公式 B.2 的另一个实际应用是可以记录下特定镜头和相机的 FOV 和 SOD，然后根据镜头的线性度来快速计算其它镜头的 FOV 和 SOD。例如，如果使用 8mm 焦距镜头，对于常用的 2/3inch 成像元件，其 FOV 略小于 SOD。因此，对于 50mm 焦距镜头 (焦距比 8mm 镜头长约 6 倍)，所需工作距离约为所需 FOV 的 6 倍。

# 笔记







