

结构变形检测的数字图像法

袁向荣◆著



科学出版社

结构变形检测的数字图像法

袁向荣 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书介绍工程结构静、动变形检测的一些数字图像技术,包括结构检测的数字图像技术发展状况,图像采集设备,数字图像、视频的基本处理技术,结构变形检测的整像素方法和亚像素方法。重点介绍亚像素边缘检测方法,同时介绍数字图像和视频技术在结构静动试验检测方面的应用,以及数字图像技术在结构虚实结合施工控制探索方面的应用。图像及视频检测应用包括索、简支梁、连续梁、桁架梁、箱梁、斜拉桥等模型试验及车桥耦合振动模型试验。

本书可作为工程结构检测、试验方面科研及技术人员的自学读物,也可供高等院校师生学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

结构变形检测的数字图像法/袁向荣著. —北京:科学出版社, 2017.8

ISBN 978-7-03-053505-4

I. ①结… II. ①袁… III. ①数字图象—应用—土木工程—变形—检测—研究 IV. ①TU317

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 136343 号

责任编辑:郭勇斌 邓新平 欧晓娟 / 责任校对:彭珍珍

责任印制:张倩 / 封面设计:蔡美宇

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

三河市骏杰印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年8月第一版 开本:720×1000 1/16

2017年8月第一次印刷 印张:12 1/2

字数:241 000

定价:68.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

作者简介

袁向荣 男, 1957年2月15日生。广州大学土木工程学院交通土建工程系教授, 博士生导师。1992年获西南交通大学桥梁及隧道工程专业博士学位。1994年南京航空航天大学机械工程流动站振动冲击与噪声方向博士后出站, 同时评为副教授。1998年11月晋升教授。主持完成国家自然科学基金项目3项, 主研完成2项; 主持完成省部级科研项目4项, 主研完成近10项; 主研完成横向项目数十项。获国家科技进步二等奖1项, 省科技进步一等奖、二等奖各1项。发表学术论文100余篇。

本书的主要研究内容得到国家自然科学基金项目（51078093，51278137）、广州市科技计划项目（12C42011564）资助。

前 言

我从 20 世纪 80 年代开始从事结构分析计算及检测试验方面的工作, 90 年代开始从事模型修正、结构破损检测及健康评估工作, 2005~2007 年参与了 100 余座桥梁的现场试验工作。工作中常与同行学者进行交流, 有的学者认为结构破损检测的工程实用性不理想, 主要原因是结构识别理论研究方面的不足; 目前工程试验的主要难点之一是海量数据的分析处理问题而不是数据采集的问题。对此, 我有不同意见。按照目前的模型修正、参数识别及破损检测理论, 在满足一定条件下, 只要数据是完备的, 即使数据误差较大, 结构状态的识别也是可行的。主要问题是检测数据的完备性欠缺, 虽然研究远说不上完善, 但与检测数据 (尤其是大型结构的检测数据) 采集技术相比, 识别理论的研究进展是明显超前的。现在的一些大型结构在建设时安装了实时监测设备, 日积月累, 检测数据是海量的, 在分析处理过程中的存储量及计算量确实是个大问题。但这种实测数据在完备性方面是有先天不足的, 数据的时间间隔以分钟甚至小时计, 与采样定理要求的秒、亚秒甚至毫秒的要求相差甚远。与分析计算网格密度相比, 检测点仅设置在结构的关键截面, 网格密度很低甚至构不成网格。依据粗放的原始数据追求精细化的识别结果是不现实的。

基于上述想法, 我从 10 年前开始将工作重点放在结构变形检测的数字图像研究方面, 寻找某些完备性数据检测方案, 使结构检测数据在空间和时间上与分析计算数据匹配, 为建立与有限元代表的数字计算模型对应的数字试验模型打基础。本书算是这 10 年相关工作的总结。

第一章简要介绍结构变形检测的研究背景及现状。第二章介绍图像的基础知识、采集设备及相关技术。第三章介绍整像素处理方法, 亚像素处理如形心法及数字图像相关的插值法。第四章介绍一维边缘检测法, 第五章介绍二维边缘检测法。第六章介绍静变形检测, 第一、二节的试验主要由研究生刘敏完成, 他还做了一维边缘的多项式拟合编程工作, 这也是本书有关工作中唯一由学生所做的编程工作。第七章介绍结构振动检测, 该章及以后的内容涉及的所有方案、程序、技术、论文模板及多数设备由我提供。第一、二节的试验及数据处理主要由张盼和任张晨完成, 第三节试验主要由董湘婉完成, 第四节主要由徐旻杰和李昆伦完成。第八章介绍关于车桥耦合振动的同步检测, 相关试验由徐文锋和吴晶完成, 陈琨和廖晓云也做了相关数据处理工作, 分析处理工作由我完成, 学生的工作见

参考文献。第九章介绍结构施工虚实控制方面的探索研究，第二节的计算由郑仰坤完成，第三节的试验主要由胡帮义完成，第四节的试验主要由罗川舟和廖汇完成，第五节的试验主要由刘辉完成。第十章内容是传统方法进行结构振动试验，第二节的试验主要由我和郑仰坤完成，第三节的试验主要由罗川舟完成，第四节的试验主要由胡帮义和任张晨完成，第五和第七节的试验主要由刘辉完成，第六和第八节的试验主要由胡帮义完成，第九节的试验主要由陈尧元完成。

限于作者的学识和研究水平，本书难免有疏漏之处，希望专家、读者指正。

作 者

责任编辑：郭勇斌 邓新平 欧晓娟

封面设计：蔡美宇

目 录

前言	
第一章 概述	1
第一节 传统变形检测	1
第二节 数字图像分析方法及结构变形检测	4
第三节 视频分析方法及结构振动测试	6
参考文献	7
第二章 数字图像及采集设备	12
第一节 数字图像的基本概念	12
第二节 数字图像采集设备	13
第三节 图像分辨率与结构变形检测精度	16
第四节 MATLAB 中数字图像采集及存取	17
第五节 NI 机器视觉系统的图像采集	20
参考文献	22
第三章 数字图像整像素处理方法及结构变形检测	23
第一节 图像分割、形心检测及边缘检测	23
第二节 数字图像相关	25
第三节 边缘变形检测的一维 DIC 法	26
第四节 边缘变形检测的二维 DIC 法	30
参考文献	30
第四章 一维边缘检测法	32
第一节 一维高斯边缘模型	33
一、光强方程	33
二、一维像素灰度	33
三、识别方程	33
第二节 反正切函数边缘模型	35
第三节 多项式边缘拟合法	36
第四节 多项式分段滑动拟合法	37
第五节 正交多项式边缘拟合法	41

第六节 正交多项式拟合脉冲型边缘·····	45
第七节 屋脊型边缘识别·····	47
第八节 函数拟合法讨论·····	49
参考文献·····	52
第五章 二维边缘检测法·····	53
第一节 二维高斯边缘模型·····	53
第二节 二维多项式边缘拟合法·····	54
第三节 二维正交多项式边缘拟合法·····	58
第四节 高斯边缘模型识别法·····	64
参考文献·····	70
第六章 结构静变形检测的数字图像法·····	72
第一节 简支梁模型静载检测试验——一维多项式边缘识别·····	72
第二节 破损识别·····	74
第三节 脉冲型边缘识别及板梁变形检测模型试验——一维正交多项式 边缘检测·····	77
第四节 二维正交多项式边缘识别及简支梁变形检测模型试验·····	79
第五节 屋脊型边缘识别及简支梁变形检测模型试验·····	81
参考文献·····	84
第七章 结构振动检测的数字图像法·····	85
第一节 简支梁模态分析试验·····	85
一、简支梁自由振动视频检测试验·····	86
二、加速度检测与视频检测比较试验·····	90
第二节 二等跨连续梁模态分析试验·····	93
一、二等跨连续梁自由振动视频检测试验·····	94
二、二等跨连续梁振动加速度检测与视频检测比较试验·····	96
第三节 三跨连续梁模态分析试验·····	98
第四节 弦振动模态分析试验·····	102
参考文献·····	105
第八章 车桥耦合振动同步检测的数字图像法·····	106
第一节 车桥耦合振动检测现状分析·····	106
第二节 车桥耦合振动检测模型试验·····	108
参考文献·····	117
第九章 桥梁结构施工虚实结合技术·····	120
第一节 概述·····	120
一、虚实结合施工控制的科学意义·····	120

二、虚实结合施工控制的工程意义及应用前景	121
三、与虚实结合施工控制研究相关的国内外研究现状 及发展动态分析	121
第二节 桁架结构施工控制虚实结合模拟	123
一、虚拟环境中的桁架建模	123
二、有限元建模及施工过程结构分析	124
三、施工控制模拟分析	125
第三节 桁架结构施工控制虚实结合模型试验	126
一、钢桁架施工各阶段有限元建模及结构变形预测计算	127
二、钢桁架悬臂拼装施工虚拟预演	128
三、钢桁架悬臂拼装实施过程	129
第四节 两跨连续梁顶推施工虚实结合模型试验	131
一、实验模型	131
二、计算模型	133
三、第 1 跨顶推施工过程	134
四、第 2 跨顶推施工过程	139
五、两跨连续箱梁虚实结合顶推施工	145
第五节 独塔斜拉桥悬臂拼装施工虚实结合模型试验	147
一、主梁拼装各阶段斜拉桥模型计算	148
二、主梁悬臂拼装施工过程	149
参考文献	153
第十章 梁式结构模态分析试验研究	156
第一节 连续梁固有振动分析	157
第二节 不同跨径组合的二跨连续梁的模态分析试验	161
第三节 不同跨径组合的三跨连续梁的模态分析试验	164
第四节 不同跨径组合的四跨连续梁的模态分析试验	169
第五节 五等跨连续梁的模态分析试验	172
第六节 二等跨连续曲梁的模态分析试验	174
第七节 三等跨连续曲梁的模态分析试验	177
第八节 悬臂钢桁架梁模态分析试验	179
第九节 连续梁顶推施工过程试验模态分析	183
一、试验概述	183
二、计算过程	183
三、连续梁顶推过程及模态分析试验	185
四、顶推施工中二跨连续梁振型 3D 重现	188
参考文献	189

第一章 概 述

工程结构的静态变形包括静位移、转角和应变，主要的动态变形包括动位移、速度、加速度、动应变。

结构变形是反映结构状态的重要指标。结构设计和计算时可以由结构内力和结构变形表征结构的状态。结构检测时，内力检测通常较困难，一般由检测变形推导结构内力。工程结构试验的目的通常是根椐结构变形检测结果评估结构的状态。例如，公路桥梁检测方法规定，按照桥梁最大实测挠度与应变、最大残余挠度与应变满足一定的限值，判断桥梁的承载能力和使用性能。大量关于结构完整性评估和破损检测的研究理论和实践，也是以结构检测变形为基础的。

第一节 传统变形检测

传统的变形检测仪器有机械式测试仪器、电测仪器、光学仪器、声学仪器、复合式仪器和伺服式仪器等。

常规的结构检测方法常用加速度计、速度计、顶杆式或拉线式或吊锤式位移计、电阻式应变计、振弦式应变计、连通式位移测量仪、靶标式光电挠度仪、百分表、千分表或水准仪进行检测。

加速度计和应变计应用最广泛。加速度属于结构的整体动态变形，加速度计属于惯性式传感器，适用于被测结构振动频率远小于传感器固有频率的情况，桥梁结构振动频率一般在数十赫兹以下，传感器选择范围较大，压电式、压阻式和电容式均可。应变属于结构局部变形，常用的应变计有电阻式、电容式、光纤光栅式和振弦式等，电阻式和振弦式属于点式传感器，应用最广；电容式和光纤光栅式已经开发出线状或面状分布式传感器，但在精度、适用、操作及灵敏度方面远不如电阻式和振弦式应变计。

惯性式位移计要求被测结构振动频率远大于传感器的固有频率。中、大型桥梁基频只有几赫兹，甚至低于 1 Hz，传感器做不到远低于此的低频，有时采用悬吊重锤的方式降低传感器的固有频率，但低频检测的效果仍然不好。水准仪只适用于静位移检测且费时费力。百分表只能检测静位移且必须有固定参考点，桥梁检测须搭支架，对跨河、跨线桥实施困难。靶标式光电挠度仪，一仪一靶，一次

测一点,效率不高。顶杆式或拉线式位移计属于点式传感器,可以接多通道采集仪,同时检测多个点,对于跨河、跨线桥,顶杆或拉线要在河底或交通繁忙的路线上固定有困难。倾角仪在精度、灵敏度及操作方面都适合桥梁检测,但倾角检测的需求不足,一般是通过倾角检测间接识别桥梁的挠度。

结构振动检测的速度传感器应用较少,惯性式速度传感器要求被测结构振动频率等于传感器的固有频率,通常很难满足这个条件,检测误差较大。

工程结构检测技术发展过程中,一些结合信息、电子等新技术的手段、设备逐渐普及,其中较成功的有光纤光栅、红外、超声、雷达、激光、GPS、图像和视频等无损检测技术。GPS可以检测结构静、动变形,采样频率最高可达60 Hz,满足桥梁振动检测要求。其水平面精度在亚厘米级,垂直面精度在厘米级,适用于千米级跨径的桥梁跨中部分的检测,其他情况下精度有所不足。

由于如上所述传感器安装方面的局限,桥梁振动试验中常常只采用惯性式传感器,即只检测加速度、动应变或倾角。如果需要了解位移或速度可采用数字积分方法。加速度对时间积分一次得速度,再积分一次得位移,积分需要2个积分常数,第一个可以假定桥梁初始静止,即初始加速度为0,第二个可以假定桥梁挠度在支座处为0间接获得。位移也可以由倾角和应变在空间积分获得,应变积分一次得倾角,倾角积分一次得位移。积分的局限一是数据的完整性,二是信噪比。由积分获得挠度,要求倾角和应变测点沿桥梁纵向有较高的分布密度。检测数据一般都含噪声信号,应按随机过程分析处理。理论角度,通常意义的积分不成立,应采用统计意义上的积分。近似情况下,采用数值积分,效果受噪声的影响较大。

结构静、动变形检测在数据采集设备方面和数据处理方面采用新技术较多,发展较快,但在新型采集手段和新型采集传感器开发方面发展较慢,变形检测主要是点式检测,这些检测手段有共同缺点:①只能检测系统的有限个测点;②传统检测一般是接触式,对于危险、有害和难以接近的部位,如高温、有毒环境及高悬部位,难以设置测点,现有的无线检测设备,仍然需要在测点设置传感器和信号发射装置;③对移动体和固定体检测时,如车辆和道路、轨道、桥梁的检测,车辆是用车载设备进行检测,道路、轨道、桥梁是在结构或地面上固定设备进行检测,难以进行同步检测。

结构理论分析方面,以常微分或偏微分方程描述的结构变形是空间连续的,或者说是无穷个点的变形。计算方面,有限元描述的结构变形与理论分析结构变形同属全域高密度完备性的(Full Field, Intensive, Completeness),计算网格是离散的。与计算网格相比,检测点也是离散的,检测网格极为粗略,甚至不能构成检测网格,检测数据极不完整。

根据检测数据评估结构状态是工程试验的主要任务,如果检测数据相对系统分析数据是完备的或充分多的,对系统的评估无论是理论上还是实践上都可证明

是有效的,但各种传统检测元器件的尺寸相对大型工程来说是非常小的,基本上属于点式检测。一般的工程检测,应变、位移或加速度测点数十个,依据这么少的数据对庞大体积的工程结构进行状态评估是不可能全面的。通过仿真和模型试验,由静应变、位移及频率振型识别如梁、索、板等构件的局部破损,现有的研究成果充分证实了全域空间高密度检测数据对识别工作的重要性^[1,2]。

位移、加速度属于结构的整体变形,如果结构存在局部破损导致刚度下降,结构位移和加速度幅值会增大,由此可以判断结构整体出现问题,但难以直接判断破损位置。理论上,结构局部破损不影响结构整体变形的连续性,局部破损严重时,结构整体变形增大,但在破损处没有明显突变,连续性变形的离散型采集数据直观上较光滑。整体变形只是隐含结构局部异常信息。对位移或加速度数据进行分析处理,如采用奇异值分解或小波分析等方法,在数据完整及信噪比较好的情况下,可以提取破损位置处的突变,获取破损位置及程度的相关信息。这里的数据完整是指在破损位置及其领域有较高空间分布密度的检测数据。整体变形中提取局部异常信息的效果受噪声、数据误差的影响较大,对轻微异常信息的提取效果也不好。

应变属于结构的局部变形,刚度连续的结构其应变也是连续的,结构截面局部突变,对应地应变也发生突变。局部破损导致局部刚度下降,局部应变突然增大,但其邻域应变变化不明显。应变检测可以直接识别破损部位及程度,前提条件是破损部位及邻域的应变检测数据是高密度的。

整体变形与局部变形可以相互转换。如杆的伸缩应变是位移的一阶导数,梁的弯曲应变是位移的二阶导数。实测应变可以采用数值积分得到整体位移,实测位移可以通过差分得到局部应变。两种方法都在结构试验中有应用。

工程实践方面,在一些实验结构及大型工程结构上安装了应变、加速度等监测装置,长期采集数据,日积月累形成海量数据,这些数据是通过结构上有限的、稀疏的测点收集到的,虽然这些测点均设置在结构的关键部位,对所测海量数据进行正确适当有效分析处理,可以在一定程度上了解系统的整体状态,但不能据此对测点以外结构局部状态进行评估。

用于混凝土结构检测的应变片一般不足 10 cm,振弦式应变计约 15 cm,用于钢结构检测的应变片一般约 1 cm,用于工程结构的测量,即使覆盖几米范围的检测都需要设置大量的测点,无论是设备、耗材的花费方面还是人员操作方面,测点数目要求是传统检测手段难以承受的,几乎不可能对结构的全域空间进行高密度检测。

因此,开发应用全域、高密度的变形检测方法,对于工程结构的安全监测和评估至关重要,数字图像技术可以实现这种检测。随着一些关键技术如高精度亚像素变形检测、三维变形立体图像检测、高速高分辨率图像采集等技术的进步,

可以预测:数字图像技术将会在工程结构变形检测中逐渐发展并普及。一般的结构检查与检测的主要任务,如外观检查、裂缝监测等也将逐渐普及数字图像技术。

第二节 数字图像分析方法及结构变形检测

相对于传统检测方法,数字图像分析方法检测结构变形的主要优点在于可对系统进行全域空间高密度检测,可进行非接触式检测,可对移动体和固定体进行同时同步集成检测。

图像工程作为一门系统地研究各种图像理论、技术和应用的新的交叉学科得到学者的广泛认可^[3-5]。各学科由于各自研究重点不同,在图像工程研究的各个领域取得的进展也不同。以工程结构变形检测为背景的研究,在图像变形检测方面成果很多,发展很快,检测精度最高。

利用光源设备进行结构检测的传统方法,如全息干涉、全息云纹、激光散斑干涉、电子散斑干涉等方法,通常采用专用设备在精心准备的试验环境下进行检测,检测精度可达到纳米级,但大多数现场工程检测和部分实验室内检测不适用这些检测方法。与此相比数字照相(Digital Camera, DC)、摄像(Digital Vidual, DV)变形检测技术不需专用设备,可以采用高档专用照相、摄像器材,也可以采用普通常用的照相机、摄像机,对试验环境也没有特殊要求。

数字图像于1982年开始被用于表面位移和应变检测^[6],此后应用数字图像进行结构检测的研究逐渐展开^[7-14],采用的主要方法有数字图像相关(Digital Image Correlation, DIC)法、边缘检测(Edge Detection, ED)法、模板匹配(Pattern Match, PM)法和区域形心(Region Centroid, RC)法等。

DIC法是采用人工或自然表面斑点图案(Speckle Pattern)为信息载体,对被测物体变形前后采集的图像进行相关分析,以获得物体全域位移。一般是在图像上选择兴趣区域(Region of Interest, ROI,也称模板 template)为子区,在变形图像中找到与参考图像子区完全相关或相关性最大的子区,其对应的像素位移值即为该子区对应点的可能位移值。可以取两子区对应矩阵函数差的范数为目标函数^[15],将图像分析问题变成数学上的优化问题,也有采用相关系数为目标函数^[16-20],即取函数差的范数除以参考矩阵的范数为相似系数。人工标记可以是随机分布斑点^[15],可以是规则的或不规则的网格,选择网格的节点为模板的中心。相关研究认为DIC法用于应变检测,检测精度与模板大小等因素有关。应用DIC法识别平面图像位移矢量的平移和转角可以检测结构的面外位移和三维位移^[8, 22]。实验表明DIC法检测结果与传统检测方法的结果高度一致^[23],并且弥补了传统检测方法的一些缺陷,但变形较大时,要匹配到参考图像相应的点较困难。对DIC法进行各种改进并对各种方法进行比较评述应用的研究较多^[24-26]。

ED 法是分别检测参考图像和变形图像中特征区域的边缘,由边缘像素的位移值得到对应部位的结构变形。在数字图像中的边缘处灰度不连续,常采用一阶导数和二阶导数来检测边缘,数字求导是利用差分完成的,由此出现了各种边缘检测的算子,较常用的有 Roberts 算子、Prewitt 算子、Sobel 算子、Kirsch 算子^[27]、Marr-Hildreth 算子^[28]、Canny 算子^[29]等,采用这些方法,边缘检测的精度是像素级的。结构检测对精度要求较高,因此有必要将检测精度提高到亚像素级^[30]。主要的亚像素边缘检测方法有:Tabatabai 提出的基于矩保持的技术^[31],定义一个算子,当它用于实际的边缘时产生一个理想边缘,这两个边缘像素的前 3 阶矩相等,由此可算出边缘的亚像素位置;Fu 提出的拟合法,采用 6 阶多项式函数拟合边缘灰度强度曲线^[32],由灰度的一、二阶导数确定边缘位置;Ye 提出的采用高斯函数与阶跃函数的卷积为边缘灰度强度的估计方法^[33],其中高斯函数的参变量为像素坐标,平面情况下,边缘像素纵坐标与横坐标的关系用抛物线函数描述,估计灰度与图像灰度差的范数为目标函数,采用修正的牛顿方法解优化方程,采用合成图像检验,噪声标准差与边缘对比度的比为 1% 时边缘检测绝对最大误差为 0.0476 像素,平均误差为 0.0058 像素,采用模型试验检验,分辨率为 2048×2048 像素照相机,钢梁模型尺寸为 $1092 \text{ mm} \times 152 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$,与 0.0025 mm 精度千分表检测结果相比误差为 0.3% 和 0.6%;还有的学者采用样条函数、多尺度分析、小波分析、模糊集等方法研究边缘亚像素检测的算法^[34-38]。

笔者通过人工生成图像和静载模型试验图像,研究了多种边缘检测技术,通过比较认为:① 6、7 阶多项式拟合识别结果最好;② 对模型梁边缘检测结果进行处理,有效地识别了梁的局部破损^[1,39];③ 图像检测模型边缘曲线平滑性不好,采用小波分析法对其进行处理,可获得较平滑的边缘曲线^[40,41];④ 采用一维 DIC 法进行边缘检测研究,计算量远小于二维 DIC 法和常用的边缘检测算法^[42];⑤ 为提高边缘识别精度尝试了一种滑动拟合图像灰度的边缘识别方法^[43];⑥ 多项式拟合跨边缘灰度曲线,拟合精度取决于多项式阶数,阶数高于 6 阶以后,因为病态识别方程的缘故,拟合效果不再提高,为此提出了正交多项式拟合方法^[44],利用多项式的正交性将识别方程对角化,可由简单的除法识别多项式系数,可采用高阶多项式,提高拟合精度;⑦ 通过对边缘识别精度较好的高斯边缘法^[33]展开研究,认为二维边缘模型识别效果较好,提出了二维多项式边缘拟合法^[45];⑧ 对于二维正交多项式拟合法^[46],二维方法边缘识别精度优于一维方法,识别精度略逊于高斯边缘模型法,但识别简便,计算量方面优于高斯边缘模型法。

PM 法是指在参考和变形图像中预先选定一个模板(子图像),并对两个模板进行相关运算^[47],根据相关运算结果确定变形量。文献[48]介绍了 PM 法在一座三跨混凝土连续梁桥现场试验中的应用,100 m 距离的静挠度遥测结果与百分表检测结果的误差在 5% 以内。图像处理中的模板匹配法及其他类匹配法,其匹配

都是通过相关计算进行的,可以算作 DIC 法的一种。模板匹配检测的是模板所在点的变形,属于点式检测。

RC 法是选定参考和变形图像中某个或某些区域,计算区域的形心,由区域形心的变化计算变形量。区域识别和形心识别均采用整像素计算,方法简便计算量小,识别的形心位置为亚像素精度^[49]。区域选定一般采用图像分割算法和边缘检测法,如果采用亚像素边缘检测选定区域,形心识别也采用亚像素方法,可以进一步提高检测精度。

图像检测的结构变形一般是位移, DIC 法中,变形图像坐标常采用泰勒级数按位移及其一、二阶导数展开。结构弯曲位移的一阶导数为转角,二阶导数为应变,因此, DIC 法 0 次近似可以识别位移,一次近似可以识别转角,二次近似可以识别应变。边缘检测及形心法识别的是位移,可以在空间一次差分得到转角,二次差分得到应变,对时间一次差分得到速度,二次差分得到加速度。与积分相同,含噪声的函数通常意义的微分在理论上不成立,应采用统计意义的微分。近似计算和差分计算的效果受噪声的影响较大。

第三节 视频分析方法及结构振动测试

常见的视频采集分辨率有:①标清, 640×480 ; ②高清, 1280×720 、 1920×1080 ; ③4K, 3840×2160 、 4096×2160 ; ④8K, 7680×4320 、 8192×4320 。帧率:24, 25, 30, 60, 120, 240 (帧/秒, fps)。工业相机最高帧率可达 1000 fps 或更高。

视频分析第一步是将视频分解为图像,如长度 10 s 帧率为 30 fps 的视频文件,分解为 $10 \times 30 = 300$ 幅图像。以其中一幅图像为参考图像,依次对此图像序列按上一节所述方法进行分析处理,得到各幅图像中特征对象相对参考图像的变形,变形序列时间间隔为 $1/30$ s,例如,采用立体 DIC 法,变形是三维的,变形时间序列是四维的;采用平面 DIC 法,变形是二维的;采用 ED 法,变形是一维的;采用 PM 和 RC 法,检测结果与传统点检测一样,变形是单个标量,变形时间序列是一维的。

结构振动测量方面,目前处理结构振动视频图像的研究大致可分为五类:一是在被测物体上设置标识或特征靶,识别视频各帧图像中标识或特征靶的位置,采用 RC 法计算标识或靶的形心位置,得到物体振动的时间历程,研究成果有电池板^[50]、钢丝绳^[51,52]、带钢^[53]的振动测试,风洞试验模型振动测试^[54]、弹簧摆内共振试验^[55],桥梁模型的主梁、支座及盖梁振动测试^[56],微机械驱动梁的振动测试^[57],火炮振动测试^[58],斜拉桥风洞试验中拉索振动测量^[59],等等。二是采用图像分割或边缘检测技术得到各帧图像中被测物体的轮廓,采用 RC 法计算此轮廓的形心位置得到物体振动时间历程,研究成果有弓网振动检测^[60]、刚体二