

分类号: D918.92

密 级: 公开

U D C:

单位代码: 10041

中国人民公安大学

硕士学位论文

论文题目: 电子签名笔迹动态特征的实验研究



学 号: 2018211212

作 者: 黄飞腾

专 业 名 称: 刑事科学技术

研 究 方 向: 文件检验技术

2021 年 6 月 15 日

中国人民公安大学硕士学位论文

论文题目： 电子签名笔迹动态特征的实验研究

作者： 黄飞腾

指 导 教 师： 郝红光 研究员 单位： 公安部物证鉴定中心

协助指导教师： 单位：

单位：

论文提交日期： 2021 年 6 月 15 日

学位授予单位： 中 国 人 民 公 安 大 学

电子签名笔迹动态特征的实验研究

Experimental Research on Dynamic Characteristics of Electronic Signature Handwriting

研究生姓名：黄飞腾

指导教师姓名：郝红光

中国人民公安大学

北京 100038，中国

Candidate: Feiteng Huang

Supervisor: Hongguang Hao

People's Public Security University of China

#1 Muxidi Nanli, Xicheng District

Beijing 100038, P.R.CHINA

答辩委员会组成				
组 成	姓 名	职 称	所 在 单 位	签 字
主 席	庄京伟	教授	北京警察学院	庄京伟
委 员	韩星周	副研究员	公安部物证鉴定中心	韩星周
	高树辉	教授	中国人民公安大学	高树辉
	陈维娜	副教授	中国人民公安大学	陈维娜
	李开开	副教授	中国人民公安大学	李开开
秘 书	屈音璇	助教	中国人民公安大学	屈音璇

学位论文成绩 87.2 (百分制)

该生以“电子签名笔迹动态特征的实验研究”为题进行毕业设计，具有一定的理论价值与现实意义。论文体现了扎实的理论基础以及对学科领域专业知识的系统的学习，对文献掌握程度较高，表现出较强的学习和科研能力；采用多种分析方法，具有一定创新性与科学性；论文所总结的同一条件下同一人电子签名笔迹动态特征的稳定性、条件变化对其影响、摹仿与摹本签名笔迹的特征差异对后续的相关研究和实践工作具有指导意义。

论文设计方案正确，实验样本量充足，分析充分，层次分明，文字流畅，图表规范，论文格式符合要求。

该生在答辩过程中，思路清晰，表达流畅；回答问题有理论根据，概念清楚，能正确回答答辩委员提出的所有问题。

答辩委员会认为该生已具备硕士学位水平，一致同意通过该生的毕业论文答辩，并建议学位委员会授予硕士学位。

组长签名: 庄京伟
2021 年 6 月 3 日

摘 要

近年来，电子签名的频繁使用使得关于电子签名笔迹的真伪纠纷增多，电子签名笔迹检验对于解决此类纠纷至关重要。在当前的签名笔迹检验实践中，以静态特征检验为主，对动态特征的检验较少。为此，本文对电子签名笔迹的动态特征开展实验研究，旨在启发检验人员在实践中注意对动态特征的利用，为签名笔迹检验提供新的思路。本文利用电子签名设备及其解析软件获取电子签名笔迹的动态特征数据，设计了书写姿势与书写模式两种影响条件、套摹与临摹两种签名摹仿方式，研究了电子签名笔迹的书写时长、平均速度、平均压力、书写速度变化曲线、书写压力分布五个动态特征。

结果表明：（1）同一条件下同一人电子签名笔迹书写时长、平均速度、平均压力具有稳定性；与坐姿签名相比，站姿签名时书写时长相近，平均速度、平均压力较大；与工整签名相比，自然签名时书写时长较小，平均速度、平均压力较大；摹仿与摹本电子签名笔迹的书写时长、平均速度、平均压力均存在明显差异，摹仿签名时书写时长较大，平均速度较小，套摹签名时平均压力较大，临摹签名时平均压力较小。（2）同一条件下同一人电子签名笔迹书写速度变化曲线具有稳定性；不同姿势书写的电子签名笔迹之间的书写速度变化曲线相关系数较大，相似程度较高；不同书写模式的电子签名笔迹之间的书写速度变化曲线相关系数较小，相似程度较低；摹仿与摹本电子签名笔迹的书写速度变化曲线有明显差异，二者之间的相关系数较小，相似程度较低。（3）同一条件下同一人电子签名笔迹书写压力分布具有稳定性；不同姿势书写的电子签名笔迹书写压力分布在整体压力值上存在差异，在压力值为零的部位、多数部位压力值相对大小情况、多数笔画压力值变化规律方面无明显差异；不同书写模式的电子签名笔迹书写压力分布在各个方面均有明显差异；摹仿与摹本电子签名笔迹的书写压力分布存在明显差异，在压力分布的各个方面均有偏差或不一致。

Abstract

In recent years, the frequent use of electronic signature has increased the number of disputes over the authenticity of electronic signature handwriting, and electronic signature handwriting examination is critical to solve such disputes. In the current practice of signature handwriting examination, the mainly used examination was static feature examination, rather than dynamic feature examination. This article conducted experimental research on the dynamic characteristics of electronic signature handwriting in order to inspire forensic handwriting examiners to pay attention to the use of dynamic characteristics in practice and provide new ideas for signature handwriting examination. We used electronic signature equipment and analytical software to obtain dynamic characteristic data of electronic signature handwriting, design two factors, writing posture and style, that may influence dynamic characteristic and two types of forged signatures, simulated signatures and traced forgery. Study five dynamic characteristics of electronic signature handwriting, including writing time, average speed, average pressure, writing speed curve and writing pressure distribution.

The experiment indicates that: (1) Under the same condition, the writing time, average speed and average pressure of the same person's electronic signature handwriting were stable. Compared with sitting, the writing time of signature was similar, and the average speed and average pressure were higher when standing. Compared with text-based signature, the writing time of stylized signature was shorter, and the average speed and average pressure were larger. And there were significant differences on writing time, average speed and average pressure between authentic and imitated electronic signature handwriting. The writing time was larger and the average speed was smaller in the imitated electronic signature handwriting, the average pressure was larger in traced forgery and the average pressure was smaller in simulated signatures. (2) Under the same condition, the writing speed curve of electronic signature handwriting written by the same person was stable. The correlation coefficient of the writing speed curve of electronic signature handwriting between different postures was large and the similarity degree was high. The correlation coefficient of the writing speed curve of electronic signature handwriting between different writing modes was small and the similarity degree was low. There were significant differences on the writing speed curve between authentic and imitated electronic signature handwriting, and the correlation coefficient between the two was small and the similarity degree was low. (3) Under the same condition, the writing pressure distribution of the same person's electronic signature handwriting was stable. The writing pressure distribution of electronic signature handwriting between different postures was different in the overall pressure value, and there was no significant difference in the position where the pressure value was zero, the relative size of the pressure value of most parts, and the

change rule of the pressure value of most strokes. The writing pressure distribution of electronic signature handwriting between different writing styles was significantly different in all aspects. There were noticeable differences in writing pressure distribution between authentic and imitated electronic signature handwriting, and there were deviations or inconsistencies in all aspects of pressure distribution.

Key Words : Forensic science, Handwriting examination, Electronic signature handwriting, Dynamic characteristics of handwriting

目 录

引 言	1
1 概述	2
1.1 电子签名与电子签名笔迹概念辨析	2
1.1.1 电子签名	2
1.1.2 电子签名笔迹	2
1.1.3 电子签名与电子签名笔迹的关系	3
1.2 电子签名笔迹检验研究概述	4
1.2.1 签名笔迹的检验	4
1.2.2 电子签名笔迹的特征	4
1.2.3 电子签名笔迹检验研究现状	5
1.3 研究目的与意义	8
2 实验设计与实施	9
2.1 实验思路	9
2.2 实验对象	10
2.3 实验设备与材料	10
2.3.1 电子签名设备与解析软件	10
2.3.2 数据分析软件	12
2.3.3 实验材料	12
2.4 实验样本采集	12
2.4.1 正常电子签名笔迹样本采集	12
2.4.2 摹仿电子签名笔迹样本采集	14

2.5 实验操作	15
2.5.1 动态特征的选取	15
2.5.2 动态特征原始数据的获取	16
2.5.3 动态特征的研究方法	18
2.6 实验数据分析方法	19
2.6.1 描述性统计	19
2.6.2 假设检验	19
2.6.3 时间序列相似性度量分析	21
3 书写时长、平均速度、平均压力特征的研究	25
3.1 同一条件下同一人的特征稳定性研究	25
3.2 条件变化对特征的影响研究	28
3.2.1 书写时长特征	28
3.2.2 平均速度特征	31
3.2.3 平均压力特征	33
3.3 摹仿与摹本签名笔迹的特征对比研究	35
3.3.1 书写时长特征	35
3.3.2 平均速度特征	38
3.3.3 平均压力特征	40
3.4 实验小结	42
4 书写速度变化曲线特征的研究	44
4.1 同一条件下同一人的特征稳定性研究	44
4.2 条件变化对特征的影响研究	45

4.3 摹仿与摹本签名笔迹的特征对比研究.....	47
4.4 实验小结	48
5 书写压力分布特征的研究.....	49
5.1 同一条件下同一人的特征稳定性研究.....	49
5.1.1 分析过程展示	49
5.1.2 规律总结.....	51
5.2 条件变化对特征的影响研究.....	54
5.2.1 书写姿势对书写压力分布的影响	54
5.2.2 书写模式对书写压力分布的影响	57
5.3 摹仿与摹本签名笔迹的特征对比研究.....	59
5.3.1 套摹与摹本签名笔迹书写压力分布对比.....	59
5.3.2 临摹与摹本签名笔迹书写压力分布对比.....	64
5.4 实验小结	67
结 论	68
参考文献	70
附录 A 各书写组相关数据统计图	75
附录 B 部分志愿者签名笔迹书写压力分布图	80
在学研究成果	84
致 谢	85

引 言

近年来，电子政务、商务不断发展，无纸化办公逐渐普及，作为无纸化办公的重要工具之一——电子签名，在金融、服务、通信等众多领域得到了越来越广泛的应用。关于电子签名笔迹真伪的纠纷随之增多，电子签名笔迹的检验研究对于解决此类纠纷、化解争端具有重要的现实意义，电子签名笔迹的检验已然成为笔迹检验领域的一个“重要课题”。

在当前的笔迹检验实践中，检验人员以静态特征检验为主。当检验电子签名笔迹的静态特征时往往有两大难题，第一是文字内容少，可供选取与检验的笔迹特征少，第二是笔迹图像分辨率低、清晰度低，笔迹特征反映不充分，一定程度上影响了检验人员的判断。若有新的检验方法辅助静态特征的检验将有利于提高检验结果的准确性与可靠性，而电子签名笔迹动态特征数据的可测性正好为我们提供了这样的方法，即动态特征的检验。截至目前为止，关于电子签名笔迹动态特征的检验研究较少，现有的一些也主要是以英文、德文等外文笔迹为主，对中文笔迹的研究较少。

为此，本文以中文电子签名笔迹为研究对象，利用电子签名设备及其解析软件采集电子签名笔迹的动态特征数据，在前人研究的基础上，对动态特征数据进行了深入的分析、研究，选取了时长、速度、压力相关的五种动态特征，探究了各个特征的稳定性、条件变化对各个特征的影响、摹仿与摹本电子签名笔迹各个特征的异同。本文对电子签名笔迹动态特征开展实验研究，旨在启发检验人员在检验实践中注意对动态特征的检验，为签名笔迹检验提供新的思路。

1 概述

1.1 电子签名与电子签名笔迹概念辨析

电子签名与电子签名笔迹，此前许多相关文献未对此作明确区分，有时甚至出现了两个概念混用，将电子签名等同于电子签名笔迹。实际上，二者存在着很大的区别，所涉及的研究领域也大不相同，为了避免引起误解，本文在此对电子签名与电子签名笔迹的概念进行辨析。

1.1.1 电子签名

电子签名是对现代认证技术的泛称。在许多国家、组织的相关法律中均有关于电子签名的定义，这些定义大体相同，但也有一些区别，如：联合国《电子签名示范法》的定义为，在数据电文中以电子形式所含、所附或在逻辑上与数据电文有联系的数据，他可用于鉴别与数据电文相关的签名人和表明签名人认可数据电文所含的信息^[1]；美国《统一电子交易法》的定义为，与电子记录相联的或在逻辑上相联的电子声音、符号或程序，而该电子声音、符号或程序是某人为签署电子记录的目的而签订或采用的^[2]；日本《电子签名法》的定义为，记载于电磁记录中的信息所为的措施，其要件之信息是由为该行为的人做出的且须保证该信息未做任何改变^[3]；欧盟的《电子签名指令》的定义为，与其他电子记录相连的或在逻辑上相连并以此作为认证方法的电子形式数据^[3]。

我国《电子签名法》规定：“本法所称电子签名，是指数据电文中以电子形式所含、所附用于识别签名人身份并表明签名人认可其中内容的数据。本法所称数据电文，是指以电子、光学、磁或者类似手段生成、接收或者储存的信息^[4]。”由此可见，电子签名具有多种多样的形式，依据其所采用的技术手段，大致可分为两大类：一是数字签名，即基于非对称加密原理的密码签名，如向收件人发出证实发送人身份的密码、计算机口令；二是基于人的生理特征的签名，即借助使用者的生物特征、特定的行为特征来辨别用户、证实身份，包括人脸、指纹、眼虹膜、电子签名笔迹等^[5,6]。

1.1.2 电子签名笔迹

笔迹是通过书写活动形成的具有个人特点的文字符号的形象系统，可以反映书写人的书写技能与书写习惯^[7]。签名笔迹是一种特殊的笔迹，是指享有某些权力或应尽有关义务的个人在有关文件上签署自己的姓名所形成的文字，它是手写文字符号的特殊组合方式^[8]。签名笔迹的种类复杂，不同文件对签名笔迹有不同要求。从司法鉴定实际出发，签名笔迹有着不同的分类标准，按照形成情况可分为，正常签名笔迹、条件变化签名笔迹、伪装签名笔迹、摹仿签名笔迹。签名笔迹是一种特殊的书写符号系统，相对于一般笔迹，签名笔迹字数少、模式多样、易被摹仿。签名笔迹也是人们书写实践活动中，出现频率最高、练习最多、最为熟练的一种书写活动。签名笔迹不仅具备一般笔迹的基本属性，如反映性、相对稳定性、总体特殊性，还具有一般笔迹没有的特性，如整体性强、熟练程度高、指向明确、形成过程短暂、模式多样化、多隐形特征等^[9]。

电子签名笔迹属于签名笔迹的范畴，有时也叫动态签名、生物签名、数位板获取签名、在线签名等^[10]，是一种特殊的条件变化签名笔迹，特指书写者以触控笔或者手指等为书写工具，电子屏幕为书写承载物，利用电磁感应、电流感应或者压力感应技术^[11-14]，在屏幕上书写形成的签名笔迹。由于电子签名笔迹是书写人利用特殊书写工具在电子屏幕上书写形成，故无法保留原件，所留存电子签名笔迹可视化图像一般可认为是电子签名笔迹的复制件。

1.1.3 电子签名与电子签名笔迹的关系

由上述内容可知，电子签名与电子签名笔迹的关系属于种属关系，如图 1.1 所示。电子签名所包含的范围比电子签名笔迹要大的多，电子签名笔迹仅仅只是电子签名中生物特征签名的一种，可以与人脸、虹膜、指纹、声纹等并列，包含静态特征和动态特征。本文仅在笔迹检验领域范围内研究电子签名笔迹，不涉及其他领域、其他种类电子签名。

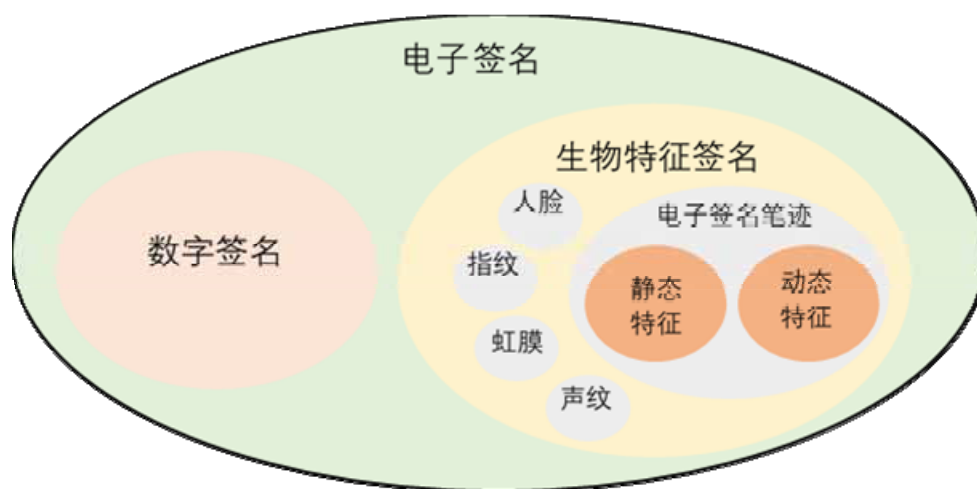


图 1.1 电子签名与电子签名笔迹的概念辨析

1.2 电子签名笔迹检验研究概述

1.2.1 签名笔迹的检验

签名笔迹检验是笔迹检验的一种，是依据笔迹检验的原理、程序、方法进行的，通过对检材与样本签名笔迹进行分别检验、比较检验、综合评断，最后作出鉴定意见。检验的要点有：

全面了解案情及检材的形成。了解案件发生过程、性质、争议的焦点以及其他相关情况；了解检材的制作、发现、提取、保存等过程，记录争议双方对检材过程形成的陈述；了解是否有与文件内容相关的其他证据存在；了解是否初次鉴定，若否，应了解历次鉴定情况。

分别检验检材与样本。对于检材，应甄别多次检材签名的特征是否一致，初步判断检材签名是否正常笔迹，从书写模式、速度、力度、笔画间连接方式与照应等判断；对于样本，应分析样本是否客观充分反映书写习惯、样本与检材的签名模式是否具有可比性、样本与检材签名的各个特征是否呈现出较强的特征关联性，必要时应补充样本。

准确选用签名笔迹特征，进行比较检验。全面寻找检材的笔迹特征，选取一般人难以伪装、稳定性较强、价值较高的笔迹特征，正确把握反映书写习惯的本质特征，系统比较检材和样本特征的异同。

综合评断，作出鉴定意见。评断检材签名是否具备鉴定条件、样本签名是否符合鉴定要求，评断特征异同点，包括符合点的数量与质量、差异点的数量与质量，作出准确的鉴定意见^[7]。

1.2.2 电子签名笔迹的特征

笔迹特征是笔迹学使用的专门术语，指书写人的书写技能、书写水平和书写习惯特点在笔迹中的具体反映^[15]。笔迹特征反映了个人书写习惯的稳定性与特异性，是笔迹鉴定作出肯定或否定意见的重要依据。确定两部分笔迹是否同一人所写，必须从认识、选择、比较两部分的笔迹特征入手。检验时，可以从笔迹的整体到局部、外貌到细节、宏观到微观，去发现和运用笔迹特征。笔迹的特征包括静态特征和动态特征。

笔迹的静态特征主要是指笔迹在书写载体上所反映出的几何结构与形态^[16]。在笔迹检验领域，通常将笔迹的静态特征分为概貌特征、局部安排特征、文字写法特征、搭配比例特征、笔顺特征、运笔特征、错别字特征、笔痕特征，共八大类特征^[17]。电子签名笔迹的静态特征即电子签名笔迹所反映出的几何结构与形态特征，包括上述八大类特征。

笔迹动态特征是指笔迹书写过程中一系列有顺序的、连续的运动变化状态的征象，包括书写时长、速度、压力等物理量的大小和变化^[18]。笔迹的动态特征具有以下特点：有序性，因为笔迹各个部位是按时间顺序依次形成，故动态特征是有序排列的；连续性，动态特征在时间轴上是连续的、不间断的；可测性，笔迹的动态特征可以借助相应的工具加以测量，并以数据的形式反映动态特征的大小与变化^[18]。电子签名笔迹的动态

特征，是指电子签名笔迹书写过程中的书写时长、速度、压力等物理量的大小和变化，可以通过电子签名设备及相应的解析软件获取。

笔迹的静态特征与动态特征不是相互独立、不相关的，实际上二者有着紧密的内在联系，动态特征决定着静态特征，而静态特征是动态特征的直观表达。从信息论的角度看，动态特征所包含的信息远大于静态特征^[19]。因此，从检验的逻辑上讲，既然静态特征可以作为同一认定的依据，动态特征理应也可以作为此依据。

1.2.3 电子签名笔迹检验研究现状

1.2.3.1 笔迹检验领域的研究

通过查阅、整理国内外相关文献发现，当前在笔迹检验领域中，关于电子签名笔迹的检验研究，依据所研究的笔迹特征，可分为静态、动态特征检验研究。

1.2.3.1.1 静态特征检验研究

静态特征检验研究主要是对笔迹的几何结构与形态，包括概貌、局部安排、文字写法、搭配比例、笔顺、运笔、错别字、笔痕特征进行研究，现有的研究成果主要包括两个方面。一是条件变化对静态特征的影响，如：屈音璇对比了坐姿与站姿条件，发现站姿签名笔迹出现书写水平下降、字间距增大、字体增大、连笔增多、收笔拖拉等特征变化，而笔顺、写法等特征较稳定^[20]；A. Thie' ry 对比了四种不同的书写姿势（两种站姿、两种坐姿），发现不同姿势书写的签名笔迹宽高比不同^[21]；郝艳丽对比了 POS 机与其他电子签名屏，发现在不同签名屏上采集的签名笔迹字形、运笔等特征有明显差异^[22]；涂舜对比了不同设备、不同视觉状态书写的签名笔迹，发现使用电磁、电阻式设备书写的签名笔迹的字形、搭配位置及比例、书写风貌、字体、单字的基本写法、笔顺等特征较稳定^[23]，同时与可视相比，不可视状态下书写的签名笔迹出现字间组合改变、字迹变大、结构松散、字形变长、笔画连接错位、连笔增多、运笔紊乱^[24]。二是将电子签名笔迹与纸质签名笔迹对比，总结电子签名笔迹静态特征的变化规律，如：周桂雪发现

在电磁式、电阻式电子签名屏上采集的签名笔迹，其字体、字形、字的大小、笔顺、运笔、搭配比例、笔痕等特征会失真^[25]；涂舜发现在电阻式电子签名屏上采集的签名笔迹，其字体、字形、字的倾斜、笔顺、写法等特征特征较为稳定，字间距、运笔、笔画搭配等特征变化较小，书写水平降低、字体增大，笔痕特征完全消失^[26]；闫龙飞发现在电容式电子签名屏上采集的签名笔迹，其字的倾斜、行笔、连笔、笔顺、笔划搭配、间距等特征较稳定，出现字体增大、书写水平下降、字形变圆润、起收笔特征消失、连笔增多等特征变化^[27]；于彬发现在电磁式电子签名屏采集的签名笔迹出现书写水平降低、整体布局倾斜、字间距增大、字形变大、字形变圆、搭配错位、笔画弯曲抖动、运笔紊乱、收笔拖拉等特征变化^[28]；朱斐发现手指触屏书写的电子签名笔迹出现书写水平下降、连笔特征、笔痕单一等特征变化、笔顺、顿压笔、回转笔等特征消失、字间距特征的改变则因人而异^[29]；邹亦发现使用电容屏书写的签名笔迹，其书写水平降低、易丢失特征，尤其是用手指在 iPad Air 上的签名^[30]。

1.2.3.1.2 动态特征检验研究

动态特征检验研究主要是研究笔迹形成过程中时长、速度、加速度、压力等物理量的大小与变化，包括时长、平均压力、平均速度、平均加速度、平均压力变化、坐标变化等特征^[31-35]，现有的研究成果主要包括三个方面。一是条件变化对动态特征的影响，包括书写间隔时间、书写姿势、书写人心理状态、书写人精神状态等条件，如：Nesma Houmani 结合动态时间规整（DTW）和隐马尔科夫模型（HMM），以个人熵值和类内可变性度量为标准，对比了不同时间间隔下坐标、压力、笔的倾斜角等的变化，发现坐标的变化是最稳定的，笔的倾斜角变化是最不稳定，压力变化在短时间间隔内（30 分钟）是稳定的，长时间间隔（5 个月）则是不稳定的^[36]；A. Thie' ry 结合方差分析和动态时间规整（DTW），对比了三种特殊姿势与标准坐势的签名时长（不包括非接触书写时长），发现书写姿势改变时签名时长的变化与个人书写习惯有关^[20]；E.

Sciacca 研究认为只要书写屏在水平面，不管书写姿势如何改变，动态特征基本稳定^[37,38]；Linton Aphzal Mohammed 结合方差分析，对比了伪装与自然签名笔迹的时长、平均速度、平均压力、平均加速度，发现二者在这些特征上是否存在明显差异与自然签名笔迹的书写模式有关^[39]；Oliver Tucha 对比了成年人（23 岁左右）正常睡眠与 24 小时未睡眠状态下笔迹的书写时长、速度、加速度等，结果未见明显差别^[40]；Phillips J G 对比了成年人（24 岁左右）饮酒前后的笔迹的时长、速度等，发现饮酒前后的这些特征存在差异，且对酒精依赖程度低的人差异更大^[41]。二是对比摹仿与摹本签名笔迹的动态特征，总结相应的规律，如：贾玉文、陈晓红结合数据分析、频谱分析、模板匹配分析，发现了摹仿与摹本签名笔迹在平均速度、加速度、压力变化趋势上存在明显差异^[42]；Linton Aphzal Mohammed 结合方差分析，发现摹仿与摹本签名笔迹在时长、平均速度、平均加速度上是否存在明显差异与摹本签名笔迹的书写模式有关^[43]；Michael P. Caligiuri 依据等时性原则，以斜率系数（笔画的时长与对应垂直距离的比值）作为衡量指标，结合方差分析，发现摹本签名笔迹的斜率系数稳定而临摹的不稳定^[44]；Sharifah Mumtazah Syed Ahmad 结合方差分析，对比了摹仿与摹本签名笔迹平均压力的中位数、提笔次数等，发现二者的平均压力存在明显差异，且平均压力与签名笔迹大小、笔画复杂度、字迹易辨读程度有关^[45]；Chi-Keung 结合动态时间规整算法（DTW）和皮尔逊相关系数计算，发现摹仿与摹本签名笔迹之间的平均压力峰值变化的相关系数远低于摹本签名笔迹之间的^[46]；Michael Caligiuri 结合 t 检验与非参数检验，以笔迹峰值速度、时长、压力等数据平均值与标准差的比值作为衡量标准，发现摹仿与摹本签名笔迹在速度、压力、直线度误差上均存在明显差异^[47]；Jacques Linden 结合动态时间规整、笔画分割算法，发现摹仿与摹本签名笔迹的书写时长、速度存在明显差异，且平均压力特征不可用^[48]；Dewhurst 结合广义线性模型（GLMM）分析，发现摹仿与摹本签名笔迹在非接触书写运动轨迹的时长、尺寸、直线度误差、加速度上存在明显差异^[49]。三是特

殊人群签名笔迹动态特征的特点，包括高龄人群、患有特殊疾病人群，如：Rosenblum S, Werner P 和 Michael P. Caligiuri 分别结合方差分析、皮尔逊相关系数计算，发现 60 岁以上老人的电子签名笔迹中非接触书写时长约占总时长的一半至三分之二，并且年龄越大者，接触书写时长与非接触书写时长均越长，平均速度越慢，平均压力越小^[50,51]；Caligiuri M P 结合 t 检验、非参数检验同时计算了相关系数，对比阿尔茨海默病(AD)痴呆患者与健康个体签名笔迹的书写时长、速度、加速度、压力等，发现二者在这些动态特征上无明显差异，只有在中度和高度个性化签名中 AD 患者笔迹动态特征的变异性才与认知程度成反比^[52]。

1.2.3.2 其他领域的研究

在笔迹检验领域之外的其他领域也有关于电子签名笔迹的研究。在计算机领域中主要是将静态特征^[53,54]、动态特征^[55-58]用于电子签名笔迹的自动识别中；在医学领域将中，如：将动态特征用于分析发育协调障碍儿童书写缓慢的原因^[59]，疾病的早期诊断^[60]，定量评价医疗效果^[61,62]，探究帕金森病人的运动协调性^[63]等；在心理学领域中还将动态特征应用于探究老年人对于视觉监督作用的依赖性^[64]。

总体来看，当前在动态特征的稳定性、条件对动态特征的影响、摹仿与摹本签名笔迹动态特征的差异等方面的研究依然较少。对比国内外研究，可以发现虽然国外对于电子签名笔迹动态特征的研究较多，但主要是以英文、德文等外文签名笔迹为研究对象，缺乏对中文笔迹的研究；而国内的一些对中文电子签名笔迹的研究主要是以静态特征研究为主，动态特征的研究则鲜有。

1.3 研究目的与意义

笔者通过互联网调研、实地调研，发现在国内电子签名设备已经有相当广泛的应用，如：中国电信、中国移动、中国银行、中国建设银行、中国农业银行、平安银行、

招商银行、汇丰银行、香格里拉酒店集团、阿里巴巴仓储管理、浙江大学邵逸夫医学院等单位均有使用，对电子签名笔迹检验的需求亦有不少。

在当前的签名笔迹检验实践中，检验人员主要以静态特征检验为主。由于签名笔迹本身字数较少，检验难度大，且电子签名笔迹图像的分辨率又较低，笔迹特征反映不清晰，如图 1.2 所示，更加大了静态特征检验的难度，使得检验人员难以作出准确结论。因此，在静态特征检验的基础上辅以动态特征检验无疑是一个很好的方法，而电子签名笔迹动态特征的可测性恰好为这种方法提供了必要的条件。

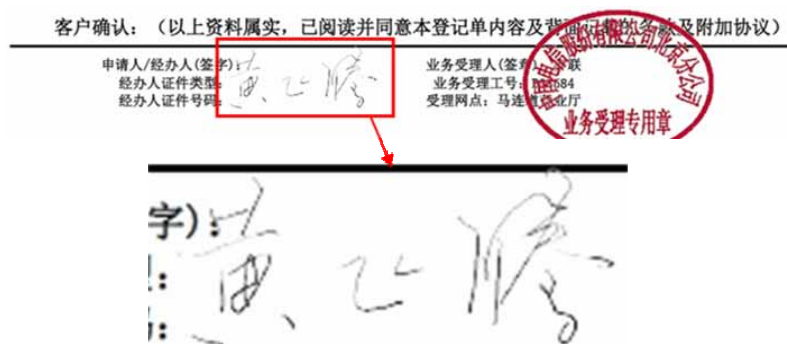


图 1.2 与中国电信公司签订的合同上的电子签名笔迹

为此，本文以中文电子签名笔迹为研究对象，利用电子签名设备以及相应的分析软件获取电子签名笔迹动态特征数据，通过实验探究同一条件下同一人电子签名笔迹动态特征的稳定性，条件变化对电子签名笔迹动态特征的影响，以及摹仿与摹本电子签名笔迹动态特征的异同，以期启发检验人员在电子签名笔迹检验实践中注意对动态特征的检验，为签名笔迹检验提供新的思路。

2 实验设计与实施

2.1 实验思路

本文实验思路如下：（1）选择实验对象、仪器设备、材料，控制条件，获取电子签名笔迹的动态特征数据。（2）确定所研究的动态特征，选取相应的特征数据，深入分析特征数据，制定相应的研究方案。（3）对各个特征分别探究同一条件下同一人电子签名笔迹的特征稳定性、条件变化对特征的影响、摹仿与摹本电子签名笔迹的特征异同。（4）获得实验结论。具体流程，如图 2.1 所示。

本文的实验对象为电子签名笔迹，而非纸质签名笔迹，为了表述方便、语言简练，下文中有四处将电子签名笔迹简写为签名笔迹，为避免引起误解，特此强调本文实验部分所提及的签名笔迹均应视为电子签名笔迹。

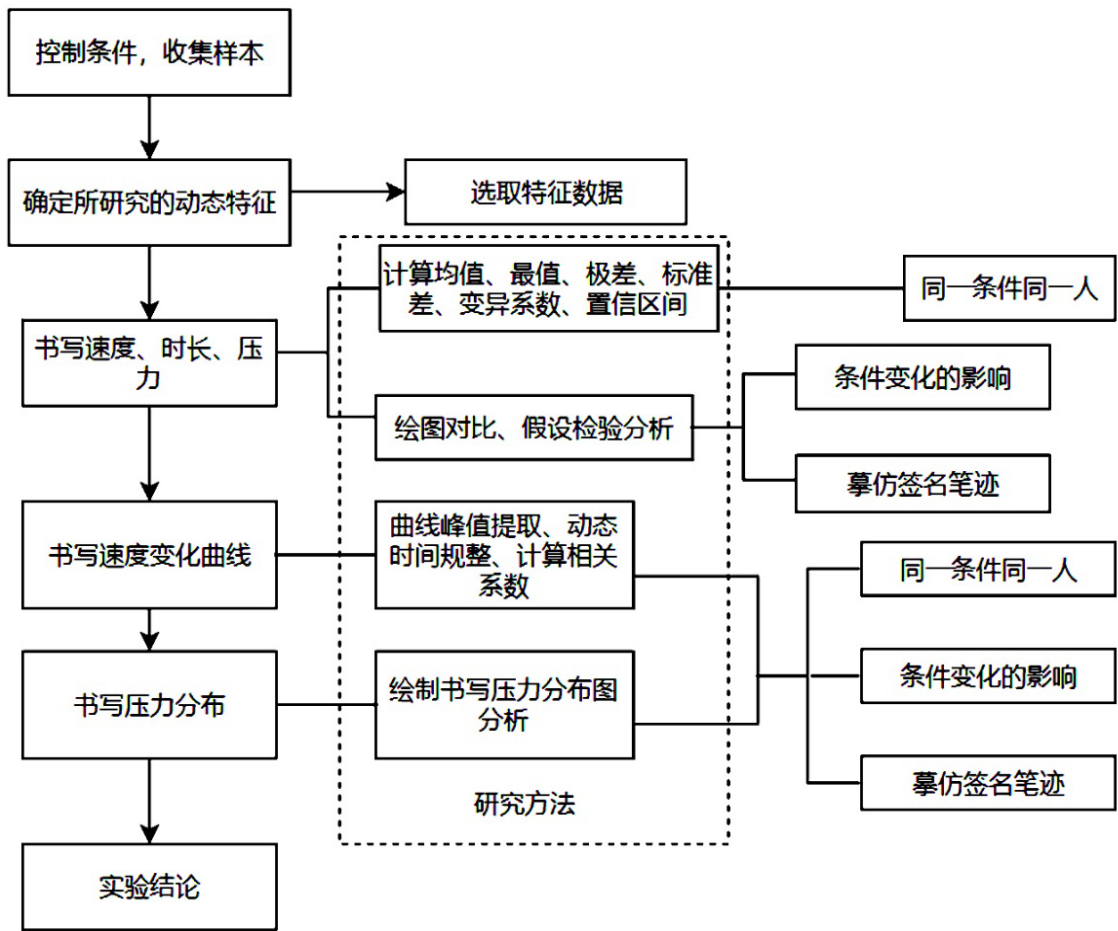


图 2.1 实验流程图

2.2 实验对象

选取 95 名年龄在 21-29 岁之间，签名书写频率较高，身体健康，书写利手为右利手，文化程度均在本科及以上的人作为志愿者。将其分为三组，分别进行编号，详见表 2.1。

表 2.1 志愿者分组、编号、统计信息

书写组	志愿者编号	男	女	合计
书写姿势组	P1, P2, ..., P36	26	10	36
书写模式组	S1, S2, ..., S36	28	8	36

摹仿书写组	M1, M2, ..., M23	14	9	23
合计	—	68	27	95

2.3 实验设备与材料

2.3.1 电子签名设备与解析软件

2.3.1.1 电子签名设备

电子签名设备，通常是由数位屏、配套的数位笔组成。目前市场上使用的数位屏按其工作原理来分，大致可分为三种：电磁屏、电容屏、电阻屏^[65]。电磁屏采用电磁感应技术进行工作，需要配合电磁笔才能书写；电容屏是利用人体的电流感应进行工作，可以使用手指作为书写工具；电阻屏实际上是一种传感器，主要是通过压力感应原理来进行工作，对数位笔无特殊要求。当前绝大部分单位、机构、企业使用的电子签名设备是电磁屏，电容屏相对少见，电阻屏已基本淘汰。笔者通过互联网调研和实地调研了解到，当前市面上主要流通的电子签名设备品牌有：HUION 绘王、汉王、Wacom、森锐、良田、优派、云端、升腾、蒙恬等，均为电磁屏。其中，Wacom 公司成立时间较早，是当前电磁屏的代表生产商，其产品在国内外均有较为广泛的使用。

因此，本实验选用 Wacom 公司的生产的电子签名设备，设备外观，如图 2.2 所示，具体款式、型号如下：Wacom Cintiq16 液晶数位屏及配套使用的 Wacom Pro Pen 2 专业压感笔，感应方式为电磁式，型号为 DTK1661KF0F，外型尺寸为 42.2×28.5cm，分辨率为 5μm，压感等级为 1024 级，采样频率为 200Hz。



图 2.2 Wacom Cintiq16 液晶数位屏与 Wacom Pro Pen 2 专业压感笔

2.3.1.2 解析软件

采集完电子签名笔迹后，欲获取其动态特征数据，需要相应的解析软件。不同品牌的电子签名设备接口不同，需要的解析软件也不同。经查阅相关文献，笔者所了解到的专业 Wacom 签名板解析软件仅有 MovalyzeR，该软件在笔迹检验、医疗等领域已有一定范围的应用，如：美国文检学会前主席 Linton Mohammed 博士、圣地亚哥州立犯罪学实验室专家 Ginea Hunter、加州大学心理学系的专家 Michael Caligiuri 等人均使用该软件进行了相关研究。

因此，本实验所使用的解析软件为 MovalyzeR，该软件由美国 neuroscript 公司设计研发，操作主界面，如图 2.3 所示，可用于解析和获取电子签名笔迹动态特征的原始数据。

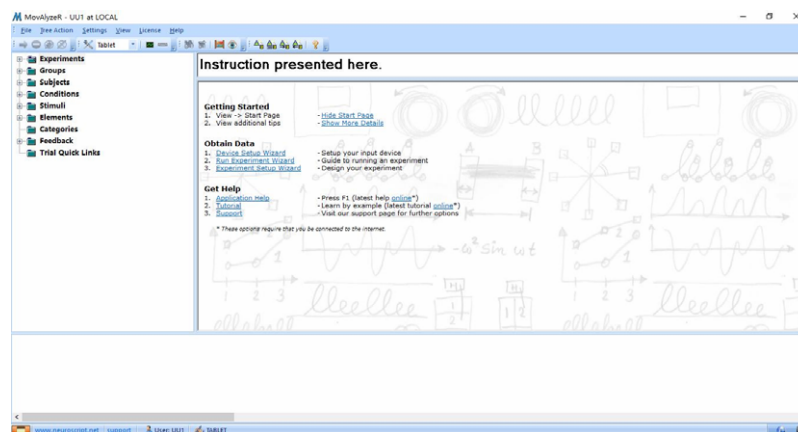


图 2.3 MovalyzeR 软件操作主界面

2.3.2 数据分析软件

Spass 软件，用于数据分析；Matlab 软件、Origin 软件，用于数据统计、计算、绘图。

2.3.3 实验材料

A4 纸、台灯、85cm 高的书桌、座椅。

2.4 实验样本采集

2.4.1 正常电子签名笔迹样本采集

2.4.1.1 不同书写姿势的签名笔迹样本采集

保持数位屏屏幕亮度、室内灯光亮度等条件不变，将数位屏放置在固定高度的桌面上，令书写姿势组 36 名志愿者在数位屏上使用电磁笔，完全依照平时自然书写习惯书写签名，志愿者可根据自己的习惯略微调整坐姿、站姿及电子签名板在水平桌面上的位置，坐姿与站姿大致情形，如图 2.4 所示。

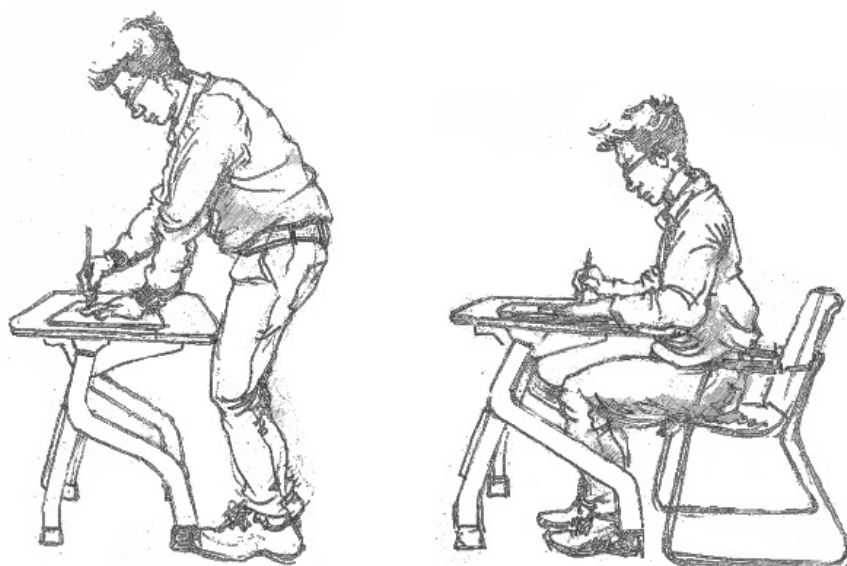
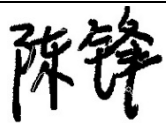
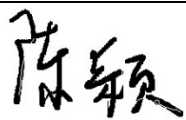
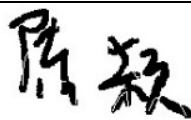
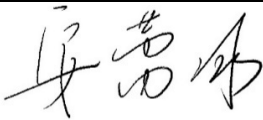


图 2.4 书写姿势（左：站姿，右：坐姿）

先在坐姿条件下连续书写 10 遍签名，然后在站姿条件下连续书写 10 遍签名，共计获取 720 个样本。因篇幅所限，不能一一罗列，随机选取部分样本展示，如表 2.2 所示。

表 2.2 不同姿势书写的电子签名笔迹示例

志愿者编号	坐姿书写的电子签名笔迹	站姿书写的电子签名笔迹
P12		
P16		
P17		

2.4.1.2 不同书写模式的签名笔迹样本采集

保持数位屏屏幕亮度、室内灯光亮度等条件不变，将数位屏放置在固定高度的桌面上，令书写模式组 36 名志愿者在数位屏上使用电磁笔，先连续自然书写 10 遍签名，然后再连续工整书写 10 遍签名，志愿者可根据自己的习惯略微调整坐姿及电子签名板在水平桌面上的位置。自然书写要求志愿者完全依据平时自然书写习惯书写签名，工整书写要求志愿者尽量少使用连笔，保证每个字、每个笔画清晰、可辨识地书写签名，共计获取 720 个样本。因篇幅所限，不能一一罗列，随机选取部分样本展示，如表 2.3 所示。

表 2.3 不同模式的电子签名笔迹示例

志愿者编号	自然书写的电子签名笔迹	工整书写的电子签名笔迹
-------	-------------	-------------

S1	李文杰	李文杰
S14	王丹	王丹
S32	贾国忠	贾国忠

2.4.2 摹仿电子签名笔迹样本采集

为了提高实验的挑战性，本实验以较易摹仿的工整书写电子签名笔迹作为摹本，如图 2.5 所示，为书写模式组志愿者 S6 所写。

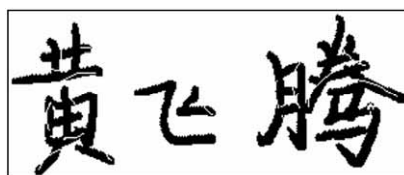


图 2.5 摹本签名笔迹

为了控制单一变量，排除其他因素的干扰，在制备摹仿签名笔迹样本时，保持电子签名板屏幕亮度、灯光亮度等条件不变，要求摹仿书写组 23 名志愿者以坐姿进行摹仿书写，可根据自己的习惯略微调整坐姿及电子签名板在水平桌面上的位置。先进行套摹电子签名笔迹的采集，后进行临摹电子签名笔迹的采集。套摹书写要求将印有摹本签名笔迹图像的 A4 纸放置在数位屏上，然后使用电磁笔在 A4 纸上沿着摹本签名笔迹套摹，先进行一段时间的套摹练习，待志愿者认为练习熟练后，连续套摹 10 遍，共计获取 230 个样本；临摹书写要求先充分观察，并进行一段时间的临摹书写练习，待志愿者认为练习熟练后，连续临摹 10 遍，共计获取 230 个样本。因篇幅所限，不能一一罗列，随机选取部分样本展示，如表 2.4 所示。

表 2.4 套摹、临摹电子签名笔迹示例

志愿者编号	套摹电子签名笔迹	临摹电子签名笔迹
M2		
M3		
M7		

2.5 实验操作

2.5.1 动态特征的选取

2.5.1.1 书写时长、平均速度、平均压力特征

书写时长、平均速度、平均压力分别指书写一次完整签名（包括电磁笔与电子屏幕接触、非接触书写阶段）所耗时长、平均速度大小、平均压力大小，书写时长、平均速度、平均压力的单位分别为 s、 $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 、级。其中，时长与速度均为实际值，压力是利用压力感级来表征的，为虚拟值。

2.5.1.2 书写速度变化曲线、压力分布特征

2.5.1.2.1 特征选取依据

每个人书写签名笔迹的过程中，其书写速度、压力并非恒定不变的，而是会有轻重缓急的变化，结合笔迹检验相关理论分析，书写过程中的速度、压力的变化可能也反映着个体书写习惯，亦值得研究。笔者认为书写速度的变化反映了书写节奏的快慢，与时间的关联性较强，而书写压力的变化反映了用笔力度大小，与签名部位的关联性较强。于是，笔者对速度、压力相关特征数据深入挖掘，结合时间、位置坐标，将书写速度变化曲线、书写压力分布也作为特征进行研究。

2.5.1.2.2 书写速度变化曲线特征

电子签名笔迹的书写速度变化曲线反映了书写签名过程中速度值的大体变化趋势，如图 2.6 所示。其中，横坐标为时间，纵坐标为速度值。

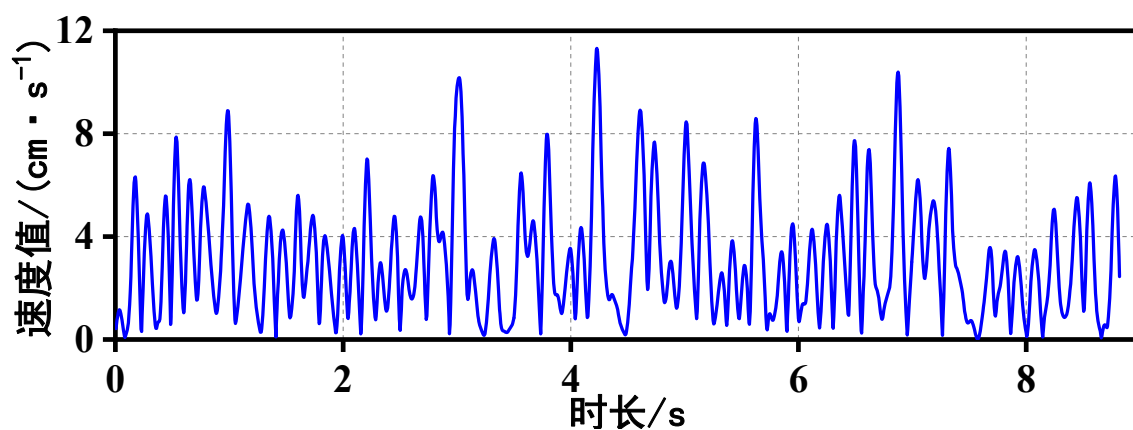


图 2.6 书写速度变化曲线

2.5.1.2.3 书写压力分布特征

电子签名笔迹的书写压力分布反映了签名笔迹各个部位的书写压力大小情况，如图 2.7 所示。

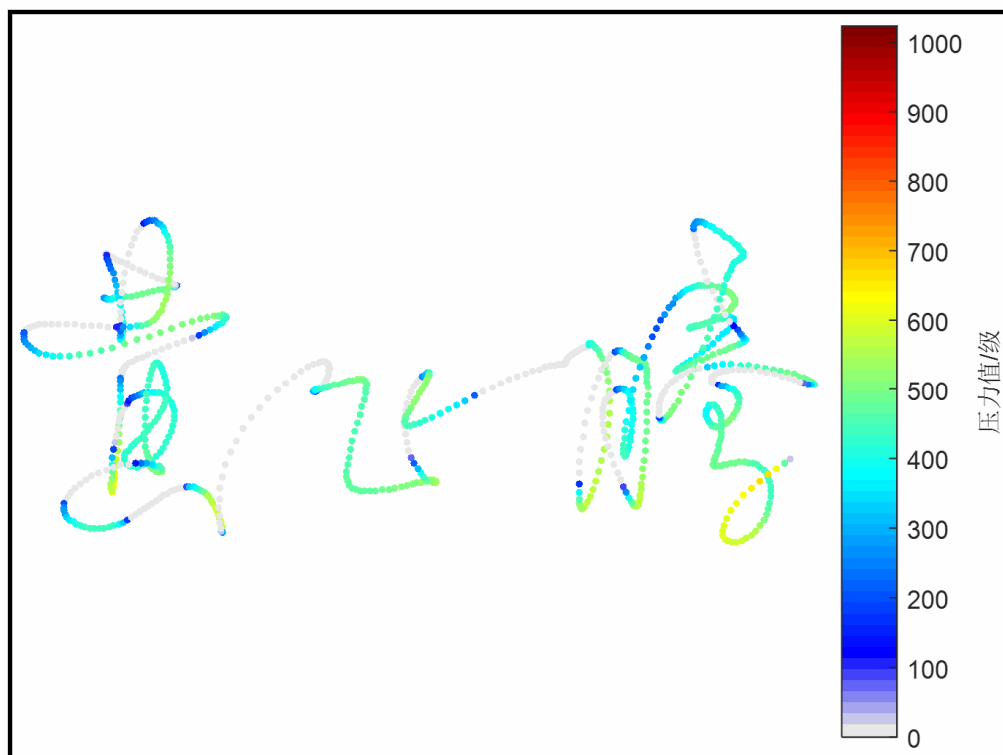


图 2.7 书写压力分布图

右侧的颜色栏用于标示具体颜色所代表的压力值大小，如：深红色表示压力最大，红色、橙色表示压力值较大，绿色表示压力值中等，蓝色表示压力值较小，浅灰色表示压力值最小（压力值为 0），即非接触书写运动轨迹。仪器设备的压力感级是固定的，为 1024 级，因此本实验中所有签名笔迹的压力值范围均在 0 级至 1023 级之间。

2.5.2 动态特征原始数据的获取

本文通过电子签名设备及其解析软件所获取的电子签名笔迹动态特征原始数据为所有签名笔迹的书写时长、平均速度、平均压力及每个签名笔迹的所有位点的序号、坐标、压力值、速度值。

关于电子签名笔迹的书写时长、平均速度、平均压力特征数据，以 S6 为例，其坐姿工整书写的十枚签名笔迹的书写时长、平均速度、平均压力，如表 2.5 所示。

表 2.5 S6 坐姿工整书写签名笔迹书写时长、平均速度、平均压力

次序/次	书写时长/s	平均速度/(cm·s ⁻¹)	平均压力/级
1	8.82	3.11	323.2
2	7.64	3.46	307.5
3	7.48	3.49	301.9
4	7.52	3.55	302.0
5	7.82	3.35	308.3
6	8.58	3.35	315.4
7	8.07	3.37	319.8
8	8.18	3.33	326.1
9	8.36	3.35	323.8
10	7.82	3.54	332.3

电子签名笔迹书写时，电子签名设备会将电磁笔运动的轨迹以一系列位点的方式记录下来，电子签名笔迹实际上是由一连串等时间间隔的位点连接而成的，如图 2.8 所示。

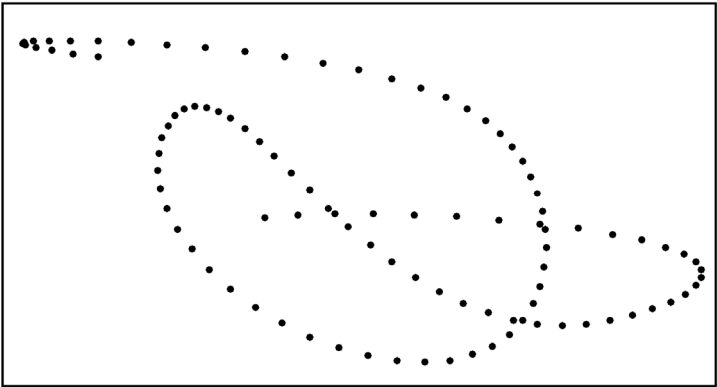


图 2.8 形成笔迹的位点示意图

电子签名设备会同时依序记录电子签名笔迹每个位点的序号、坐标、速度值、压力值等数据，其中序号反映了位点形成的先后顺序，是计算签名时长的依据。以 S6 的一

枚签名笔迹为例，其各个位点的序号、坐标、速度值、压力值，大致如表 2.6 所示。本文所用设备采样频率为 200Hz，每秒可记录 200 位点。

表 2.6 签名笔迹各个位点的序号、坐标、速度值、压力值

序号	X/cm	Y/cm	压力值/级	速度值/(cm·s ⁻¹)
1	6.31	6.05	152.0	0.27
2	6.31	6.05	212.0	0.22
3	6.31	6.05	239.0	0.24
...	...	...	...	...
1086	9.69	5.25	23.0	6.46

2.5.3 动态特征的研究方法

书写时长、平均速度、平均压力的研究。计算所有人签名笔迹的书写时长、平均速度、平均压力的均值、最值、极差、标准差、变异系数，并绘制成图；同时，计算同一条件下签名笔迹的书写时长、平均速度、平均压力变异系数均值的 95%置信区间，以此判断同一条件下同一人签名笔迹书写时长、平均速度、平均压力的稳定性；通过绘图对比，并结合 t 检验、Wilcoxon 带符号秩检验对比不同条件之间、摹仿与摹本签名笔迹之间书写时长、平均速度、平均压力的异同，总结相应的规律。

书写速度变化曲线的研究。依据签名笔迹各个位点的序号、速度值数据，绘制书写速度变化曲线图。先进行曲线峰值提取得到速度变化峰值曲线，然后将签名笔迹两两组合，进行动态时间规整，最后计算书写速度变化曲线的皮尔逊相关系数，以此判断同一条件下同一人签名笔迹书写速度变化曲线的稳定性，不同条件之间、摹仿与摹本签名笔迹之间书写速度变化曲线的异同，总结相应的规律。

书写压力分布的研究。依据签名笔迹各个位点的坐标、压力值数据，绘制签名笔迹书写压力分布图。根据签名笔迹整体压力值大小（签名笔迹接触书写部分压力分布图的

主色调)、压力值为零的部位是否偏移、各部位压力值相对大小情况(各个部位相对于签名笔迹整体的压力值大小,非各部位具体压力值大小)、笔画的压力值变化规律(笔画具体压力值大小的变化情况)四个方面,判断同一条件下同一人签名笔迹书写压力分布的稳定性,不同条件之间、摹仿与摹本签名笔迹之间书写压力分布的异同,总结相应的规律。

2.6 实验数据分析方法

2.6.1 描述性统计

2.6.1.1 均值、最值、标准差、极差、变异系数的计算

计算电子签名笔迹的书写时长、平均速度、平均压力的均值、最值、标准差、极差、变异系数等统计量,结合实验要求进行对比分析。其中,极差反映数据整体波动范围,极差越小,波动范围越小;标准差与变异系数反映数据的波动程度,标准差与变异系数越小,数据波动程度越小,数据越稳定。在统计分析中,通常变异系数在15%以内属于低变异,可以认为数据变异程度较小,稳定性较好。

2.6.1.2 置信区间的计算

在统计学中,计算一个概率样本的置信区间是指对该样本的某个总体参数进行区间估计,其计算出的是被测量参数测量值的可信程度,是一个“概率”^[66]。置信区间的计算由所用的统计量决定,包括置信上限、置信下限。对于一组给定的样本数据,设其均值为 μ ,标准差为 σ ,则其整体数据的均值的 $100(1-\alpha)\%$ 置信区间为 $(\mu-Z_{\alpha/2}\sigma, \mu+Z_{\alpha/2}\sigma)$,此处 α 为显著性水平, $Z_{\alpha/2}$ 即为对应的标准分数。通常将显著性水平设为0.05,即95%的置信水平。样本的置信区间可由Origin软件直接计算得出。

本文先计算下签名笔迹书写时长、平均速度、平均压力的变异系数总体均值的95%置信区间,后以此判断同一条件下同一人签名笔迹各个特征的总体稳定性。

2.6.1.3 绘制图形

为了更加直观、简明地展示数据，便于进行分析比对，本文利用 Origin 软件将正常电子签名笔迹的书写时长、平均速度、平均压力的均值、最值、极差、标准差、变异系数等统计量绘制成散点、折线图进行对比分析，将摹仿签名笔迹的书写时长、平均速度、平均压力绘制成散点图进行对比分析。

提取签名笔迹各个位点的坐标、压力值数据，将压力数据作为颜色轴，用不同的颜色代表不同的压力值，利用 Matlab 软件绘制带颜色的散点图以反映签名笔迹的书写压力分布。

2.6.2 假设检验

假设检验是用来判断样本与样本、样本与总体的差异是由抽样误差引起还是本质差别造成的一种统计推断方法，包括 t 检验、Wilcoxon 带符号秩检验等。

2.6.2.1 t 检验

t 检验有单样本检验、配对样本检验，前提条件是数据需要符合正态分布。

单样本 t 检验是根据一个样本数据来判断样本所来自的总体与另一个已知的总体平均数的差异是否显著。基本思路：设总体 X 服从正态分布 $N(\mu, \sigma^2)$ ，从总体中抽取样本 $(X_1, X_2, \dots, X_N)$ ，令 μ_0 为已知总体均值。第一步，建立检验假设，确定检验水准， $H_0: \mu=\mu_0$ ， $H_1: \mu \neq \mu_0$ ， $\alpha=0.05$ 。第二步，构造 t 统计量：

$$t = \frac{\bar{X} - \mu_0}{s / \sqrt{n-1}} \sim t(n-1) \quad (\text{公式 2.1})$$

式中 s 为标准差，n 为样本量。第三步，SPASS 自动计算 t 值和对应的 P 值。第四步，进行推断，若 P 值 < 0.05 ，则拒绝零假设，应认为两总体均值存在着显著差异，若 P 值 > 0.05 ，则不能拒绝零假设，应认为两总体均值不存在显著差异。

配对样本 t 检验是根据样本数据来判断样本所来自的配对总体均值的差异是否显著，要求两个待检样本观察数目相同、观察值顺序固定^[67]。基本思路：设总体 X_1 服从正态分布 $N(\mu_1, \sigma_1^2)$ ，总体 X_2 服从正态分布 $N(\mu_2, \sigma_2^2)$ ，分别从这两个总体中抽取样本 $(X_{11}, X_{12}, \dots, X_{1N})$ 和 $(X_{21}, X_{22}, \dots, X_{2N})$ ，且两样本是相互配对的，要求检验 μ_1, μ_2 是否具有显著差异。第一步，引入新随机变量 Y ，其对应的样本值为 $(y_1, y_2, \dots, y_n)$ ，令 $Y = X_1 - X_2$ ，则 $y_i = x_{1i} - x_{2i} (i=1, 2, \dots, n)$ ，于是该问题就转化为单样本 t 检验问题，即检验 Y 的均值与 0 是否有显著差异。其余步骤同单样本 t 检验过程。

2.6.2.2 Wilcoxon 带符号秩检验

Wilcoxon 带符号秩检验是非参数检验的一种，也有单样本检验、配对样本检验，与 t 检验不同，其无需成对数据之差 d_i 服从正态分布，满足对称分布便可。

单样本 Wilcoxon 带符号秩检验是根据样本数据来判断样本所来自的总体中位数的差异是否显著。基本思路：从总体 X 中抽取样本 $(X_1, X_2, \dots, X_n)$ ， M_0 为已知总体中位数，差值总体中位数 $M_d = X_i - M_0$ 。第一步，建立假设检验，确定检验水准， H_0 : 差值总体中位数 $M_d = 0$ ， H_1 : $M_d \neq 0$ ， $\alpha = 0.05$ 。第二步，求差值：对 $i=1, \dots, n$ ，计算 $|X_i - M_0|$ 的值，它们表示各样本点到 M_0 的间距；编秩：依差值绝对值大小，从小到大编秩，若差值为 0，则舍去不计， n 相应减少；若差值绝对值相等，则取平均秩次；编秩后，按差值的正负秩次添上符号。第三步，求差值为正或负的秩和：令 T_+ 等于 $X_i - M_0 > 0$ 时 $|X_i - M_0|$ 的秩的和， T_- 等于 $X_i - M_0 < 0$ 时 $|X_i - M_0|$ 的秩的和， $T_+ + T_- = n(n+1)/2$ ；取检验统计量 $T = \min(W_1, W_2)$ 。第四步，根据得到的 W 值，利用 SPASS 自动计算零假设下的 p 值。第五步，进行判断，过程同上述 t 检验。

配对样本的 Wilcoxon 带符号秩检验是根据样本数据来判断样本所来自的配对总体中位数的差异是否显著。基本思路：从总体 X 中抽取样本 $(X_1, X_2, \dots, X_n)$ ，从总体 Y 中抽取样本 $(Y_1, Y_2, \dots, Y_n)$ ，引入变量 M_d ，令 $M_d = X_i - Y_i$ ，即差值总体中位数，同样将问题

转化为单样本 Wilcoxon 带符号秩检验问题。其余步骤同单样本 Wilcoxon 带符号秩检验。

本文利用 t 检验与 Wilcoxon 带符号秩检验，判断条件变化对签名笔迹书写时长、平均速度、平均压力是否有显著影响，及其在摹仿与摹本签名笔迹中是否有明显差异。若数据满足正态性，则使用 t 检验，否则使用 Wilcoxon 带符号秩检验。

2.6.3 时间序列相似性度量分析

2.6.3.1 曲线峰值提取

提取签名笔迹各个位点的序号、速度值数据，先将序号转化为实际时间，作为横坐标，以速度值为纵坐标，绘制书写速度变化曲线图。通过对大量签名笔迹书写速度变化曲线的观察研究，发现其主要特征表现为峰的位置、数量、数值，遂对其峰值进行提取，提取过程如图 2.9、图 2.10 所示。

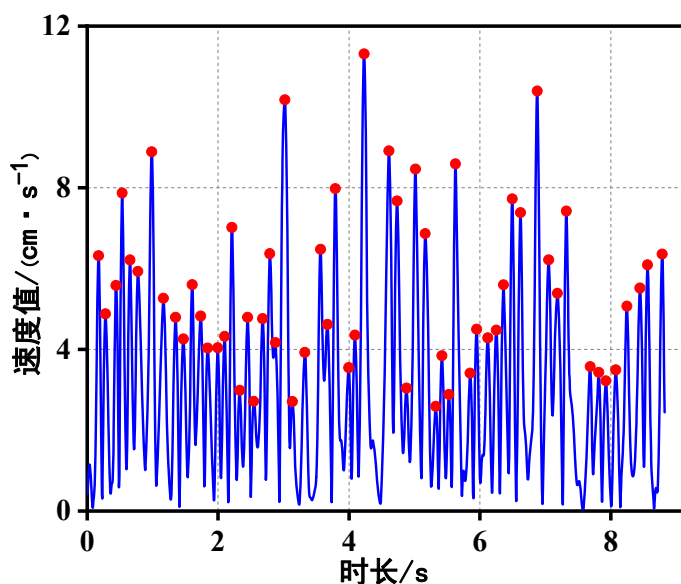


图 2.9 书写速度变化曲线（已标注峰值）

图 2.9 为电子签名笔迹的书写速度变化曲线，其中所有的峰均以红色实心点标记；图 2.10 为将书写速度变化曲线中所有的峰值提取出来后依照时间顺序排列，形成的书写速度变化峰值曲线。

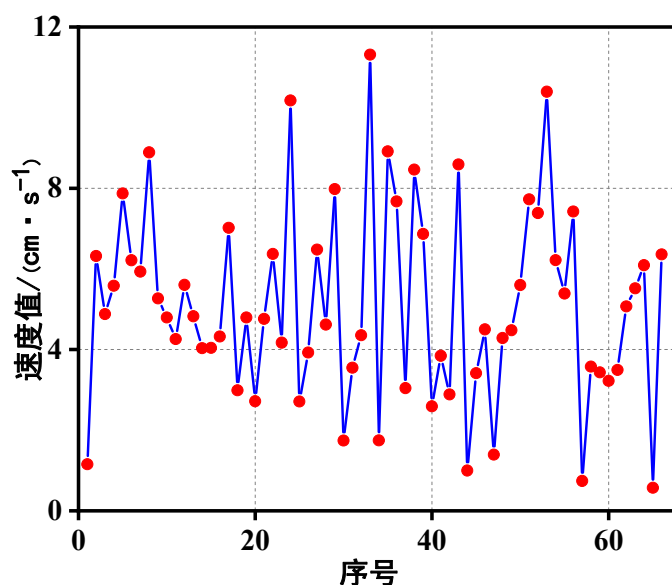


图 2.10 书写速度变化峰值曲线

2.6.3.2 动态时间规整 (DTW)

即便是在同一条件下同一人书写的若干签名笔迹，其书写时长、速度变化也不可能完全相同，故其速度变化峰值曲线长度也不一定会相同，而后续皮尔逊相关系数的计算要求两条曲线的长度必须相同；同时，对于峰的位置发生微小偏移而实际上十分相似的曲线，直接计算相关系数可能会导致计算结果偏低，与实际情况相悖。因此，本文引入了动态时间规整算法(DTW)。

DTW 算法可以将任意两条曲线按照“最大相似原则”进行“对齐”，即使可其长度相同，以便于计算相关系数，又可避免上述与实际情况相悖的问题。DTW 的原理如下：假设有两条曲线 Q 和 C ，他们的长度分别是 n 和 m ， $Q=q_1, q_2, \dots, q_i, \dots, q_n$ ， $C=c_1, c_2, \dots, c_j, \dots, c_m$ ；且 $n \neq m$ 。创建一个 $n \times m$ 阶矩阵，令矩阵元素 (i, j) 为 q_i 和 c_j 两个点的欧式距离

$d(q_i, c_j)$, $d(q_i, c_j) = (q_i - c_j)^2$, 用矩阵元素 (i, j) 表示点 q_i 和 c_j 对齐; 使用 DP 算法算出经过该矩阵中若干个点的—条路径, 其经过的点即为两条曲线对齐的点, 该路径即为规整路径 W ; 设 W 的第 k 个元素为 $w_k = (i, j)_k$, 定义曲线 Q 和 C 的映射为 $W = w_1, w_2, \dots, w_k, \dots, w_K$, $\max(m, n) \leq K < m+n-1$ 。 W 应满足三个前提条件: (1)边界固定, $w_1 = (1, 1)$ 和 $w_K = (m, n)$, 必须以左下角为起点, 以右上角为终点; (2)连续性, 对于 $w_{k-1} = (a', b')$, 则 W 的下一个点 $w_k = (a, b)$ 应满足 $(a-a') \leq 1$ 且 $(b-b') \leq 1$; (3)单调性, 对于 $w_{k-1} = (a', b')$, 则 W 的下一个点 $w_k = (a, b)$ 应满足 $0 \leq (a-a')$ 且 $0 \leq (b-b')$ 。结合连续性和单调性约束, 规整代价最小的路径为:

$$DTW(Q, C) = \min \left\{ \sqrt{\sum_{k=1}^K w_k} / K \right\} \quad (\text{公式 2.2})$$

式中分母处的 K 主要是用来补偿存在长度差异的规整路径。这样就实现了两条曲线之间距离最短、外形最相似。曲线规整前后如图 2.11 所示; 规整路径如图 2.12 所示。

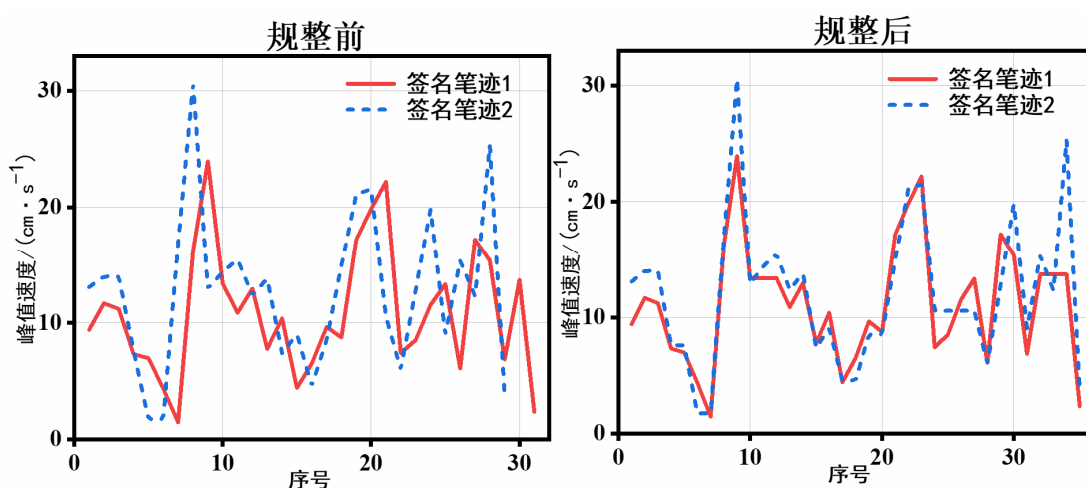


图 2.11 电子签名笔迹书写速度变化峰值曲线规整前后图

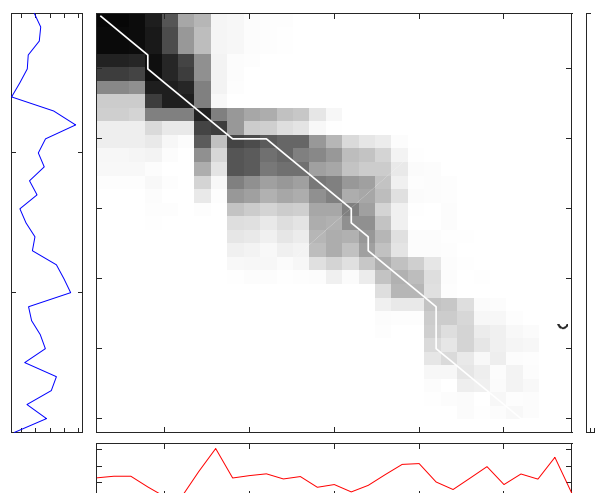


图 2.12 规整路径图

10

本文利用 DTW 算法将需要对比的任意两条书写速度变化峰值曲线进行规整，以便于后续的相关系数计算。

Samples

2.6.3.3 皮尔逊相关系数的计算

0

皮尔逊相关系数(Pearson correlation coefficient)^[13]，是用于度量任意两个长度相同的变量 X 和 Y 之间的线性相关性，其取值范围在-1 至 1 之间。当相关系数为 0 时，说明两变量 X 和 Y 无相关性；当 X 的值增大（减小）时，Y 的值也随之增大（减小）时，说明这两个变量呈正相关性，二者之间的相关系数介于 0 与 1 之间；当 X 的值增大（减小），Y 的值也随之减小（增大）时，说明这两个变量呈负相关性，二者之间的相关系数介于-1 与 0 之间。

10

5 10 15 20 25
X_{avg}

两个变量之间的皮尔逊相关系数的定义为二者之间的协方差和标准差的商^[68]：

5

$$\rho = \frac{\text{cov}(X, Y)}{\sigma_X \sigma_Y} = \frac{E[(X - \mu_X)(Y - \mu_Y)]}{\sigma_X \sigma_Y} \quad (\text{公式 2.3})$$

式中 ρ 为相关系数， E 为数学期望， cov 为协方差， σ 为标准差， μ 为平均值。判断变量相关性强弱，一般可以参考以下几个取值范围：当 $|\rho| \geq 0.8$ 时，可视为高度相关；当 $0.5 \leq |\rho| < 0.8$ 时，视为中度相关；当 $0.3 \leq |\rho| < 0.5$ 时，视为低度相关；当 $|\rho| < 0.3$ 时，说明两个变量之间的线性相关程度极弱，可视为非线性相关^[69-71]。

本文以两签名笔迹之间的书写速度变化曲线的皮尔逊相关系数来判断两签名笔迹书写速度变化曲线的相似程度；若相关系数为正值，二者为正相关，说明书写速度变化曲线的变化方向相同，若相关系数为负值，二者为负相关，说明书写速度变化曲线的变化方向相反；两枚签名笔迹书写速度变化曲线的相关系数越大，即相关度越高，表明两签名笔迹的书写速度变化曲线相似程度越高。

3 书写时长、平均速度、平均压力特征的研究

3.1 同一条件下同一人的特征稳定性研究

计算、统计书写姿势组志愿者坐姿自然书写签名笔迹书写时长、平均速度、平均压力的均值、最值、极差、标准差、变异系数，将上述计算、统计结果绘制成散点图、折线图展示，如图 3.1-3.3 所示。其中三角形表示均值；红色短竖线表示标准差，其长度为两倍标准差；圆点表示最小值与最大值，两圆点的间距为极差；方块表示变异系数，红色长横线为变异系数为 15% 的标示线。

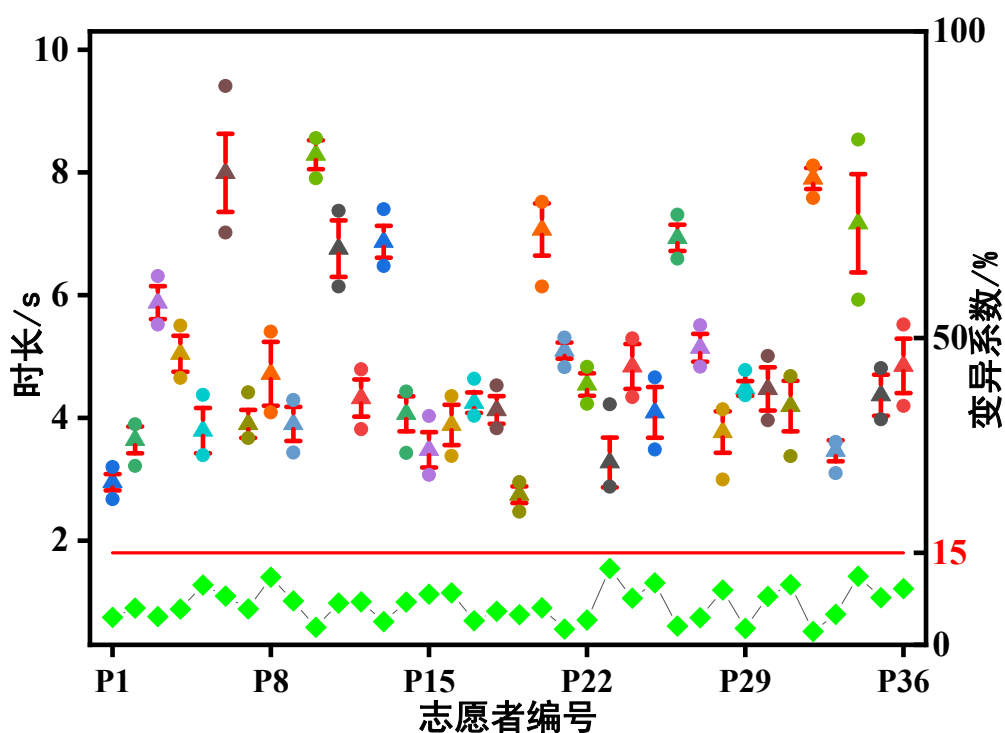


图 3.1 书写姿势组 36 人坐姿自然书写签名笔迹书写时长统计图

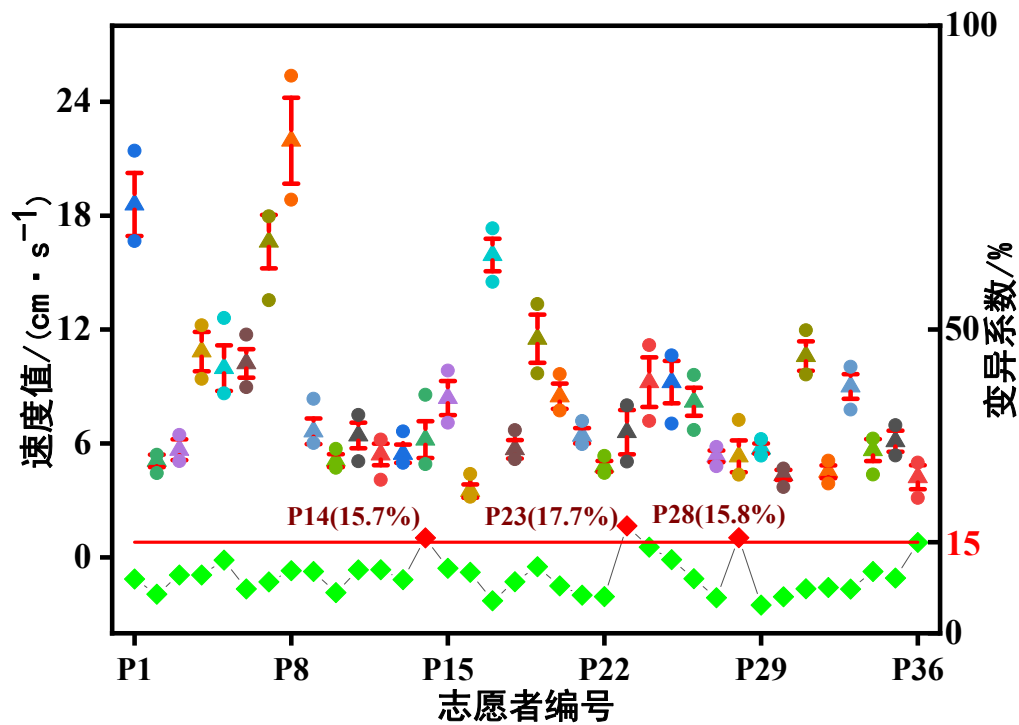


图 3.2 书写姿势组 36 人坐姿自然书写签名笔迹平均速度统计图

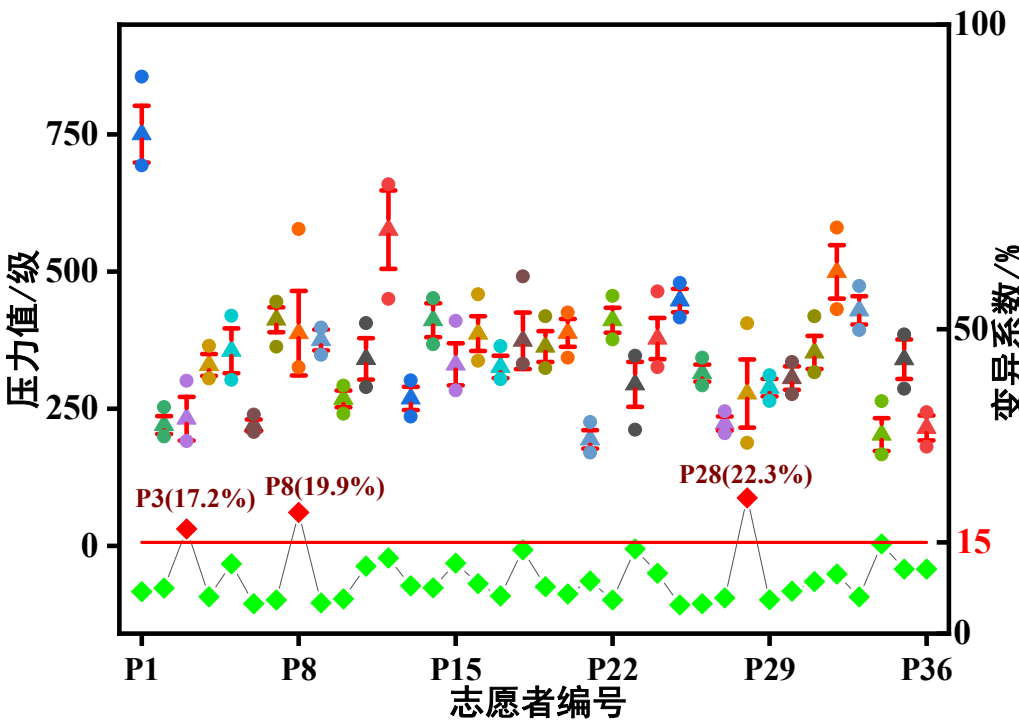


图 3.3 书写姿势组 36 人坐姿自然书写签名笔迹平均压力统计图

由图 3.1-3.3 可知，在坐姿自然书写条件下，书写姿势组 36 人签名笔迹书写时长、平均速度、平均压力的均值、极差、标准差、变异系数各不相同，说明不同志愿者自然书写签名笔迹书写时长、平均速度、平均压力均不同，其波动范围与波动程度亦不同。但相对均值而言，大多数志愿者签名笔迹书写时长、平均速度、平均压力的标准差、极差均较小。所有志愿者坐姿自然书写签名笔迹书写时长的变异系数均在 15%以内；平均速度的变异系数大多在 15%以内，仅有 3 人超过 15%，分别是 P14(15.7%)、P23(17.7%)、P28(15.8%)；平均压力的变异系数，大多在 15%以内，有 3 人超过 15%，分别是 P3(17.2%)、P8(19.9%)、P28(22.3%)。

综合来看，书写姿势组绝大多数人坐姿自然书写签名笔迹书写时长、平均速度、平均压力的标准差、极差、变异系数均较小，说明书写姿势组志愿者自然书写的签名笔迹书写时长、平均速度、平均压力均在均值附近小范围波动，且波动程度较小。

书写姿势组站姿自然书写签名笔迹书写时长、平均速度、平均压力以及书写模式组自然与工整书写签名笔迹书写时长、平均速度、平均压力的研究与上述研究的过程、方法均一致，各个特征数据的均值、最值、极差、标准差、变异系数的计算、统计结果，见附录图 A1-A9。

从中可知，相对于均值而言，所有书写组中大多数志愿者签名笔迹书写时长、平均速度、平均压力的极差、标准差均较小。书写姿势组 36 人站姿自然书写签名笔迹书写时长的变异系数，大多在 15%以内，仅有 1 人超过 15%，P7(17.3%)；平均速度的变异系数，所有人均在 15%以内；平均压力的变异系数，所有人均在 15%以内。书写模式组 36 人坐姿自然书写签名笔迹书写时长的变异系数均在 15%以内；平均速度的变异系数，大多在 15%以内，有 2 人超过 15%，分别是 S24(18.1%)，S31 (15.1%)；平均压力的变异系数，大多在 15%以内，有 3 人超过 15%，分别是 S8(17.9%)、S16(15.2%)、S34(15.8%)。书写模式组 36 人坐姿工整书写签名笔迹书写时长的变异系数，大多在

15%以内, 仅有 1 人超过 15%, S2(19.1%); 平均速度的变异系数, 大多在 15%以内, 有 3 人超过 15%, 分别是 S2(17.4%)、S17(16.1%)、S32(20.9%); 平均压力的变异系数, 大多在 15%以内, 仅有 1 人超过 15%, S16(18.3%)。

综上可知, 同一条件下同一人书写的电子签名笔迹的书写时长、平均速度、平均压力的极差、标准差大多较小, 变异系数大多在 15%以内, 仅有少数人超过 15%, 在数值上较小、在数量上也仅占少数。进一步统计书写姿势组、书写模式组志愿者在同一条件下书写的签名笔迹书写时长、平均速度、平均压力变异系数的最小值、最大值、均值, 并算出 95%置信区间, 结果如表 3.1 所示。

表 3.1 同一条件下同一人签名笔迹书写时长、平均速度、平均压力的变异系数/%

签名条件	书写组	动态特征	最小值	最大值	均值	均值的 95%置信区间
坐姿自然书写	书写姿势组	书写时长	2.1	12.4	6.6	(5.6,7.5)
		平均速度	4.7	17.7	9.5	(8.4,10.6)
		平均压力	4.7	22.2	9.2	(7.8,10.7)
	书写模式组	书写时长	0.9	12.9	6.6	(5.7,7.5)
		平均速度	2.7	18.1	9.3	(8.2,10.4)
		平均压力	2.3	17.9	8.8	(7.5,10.1)
站姿自然书写	书写姿势组	书写时长	2.3	17.2	5.5	(4.5,6.5)
		平均速度	3.0	12.2	7.2	(6.5,8.0)
		平均压力	3.2	13.0	7.3	(6.5,8.1)
坐姿工整书写	书写模式组	书写时长	3.2	19.1	7.4	(6.3,8.6)
		平均速度	3.6	20.9	9.3	(7.9,10.6)
		平均压力	2.5	18.3	7.7	(6.5,8.9)

由表 3.1 可知，坐姿自然书写、站姿自然书写、坐姿工整书写三个条件下签名笔迹的书写时长、平均速度、平均压力的变异系数的均值以及总体均值的 95%置信区间均在 15%以内。由此可推知，在总体上同一条件下同一人电子签名笔迹的书写时长、平均速度、平均压力的波动程度较小，具有稳定性。

然而，从实验结果中也可以看出，在同一条件下同一人电子签名笔迹的书写时长、平均速度、平均压力的变异系数有时也会超过 15%。分析其原因，主要是由于笔迹本身并不具有绝对的稳定性，笔迹的稳定性仅仅只是相对的，而且笔迹的稳定性也存在个体差异，不同人的稳定性不同，同时书写时由于自身的状态或者是对数位屏签名的适应程度较差也可能导致稳定性降低，故少数人书写时长、平均速度、平均压力的变异系数偏高也属正常现象，这并不影响对总体稳定性的判断。所以，依然有充分理由认为同一条件下同一人电子签名笔迹的书写时长、平均速度、平均压力具有稳定性。

3.2 条件变化对特征的影响研究

3.2.1 书写时长特征

3.2.1.1 描述性统计分析

分别计算书写姿势组每名志愿者坐姿与站姿书写的各十枚签名笔迹的书写时长的均值，并绘制折线图进行对比；分别计算书写模式组每名志愿者自然与工整书写的各十枚签名笔迹的书写时长的均值，并绘制折线图进行对比。坐姿与站姿书写、自然与工整书写签名笔迹书写时长对比结果，如图 3.4 所示。

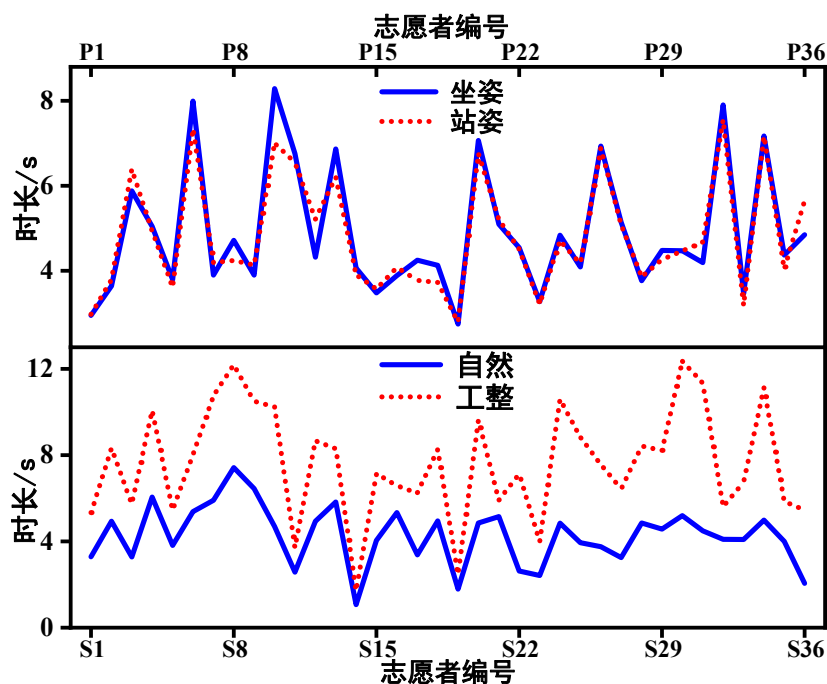


图 3.4 坐姿与站姿、自然与工整书写签名笔迹书写时长对比

由图 3.4 可知，书写姿势组中部分人站姿签名笔迹书写时长略长，部分人坐姿签名笔迹书写时长略长，大多数人坐姿与站姿签名笔迹书写时长基本相近，无明显差异；书写模式组中所有人工整签名笔迹书写时长均较长，不同人自然与工整签名笔迹书写时长差异大小不同，大部分人差异较大。

3.2.1.2 假设检验分析

利用假设检验分析坐姿与站姿、自然与工整签名笔迹书写时长的差异。数据正态性检验结果，如表 3.2 所示。

由于本实验样本量 $=36 < 50$ ，故使用 Shapiro-Wilk 的检验结果。由表 3.2 可知，坐姿签名笔迹书写时长的 P 值 $=0.001 < 0.05$ ，站姿签名笔迹书写时长的 P 值 $=0.010 < 0.05$ ，两者均不满足正态性，故使用 Wilcoxon 带符号秩检验；自然签名笔迹书写时长的 P 值 $=0.869 > 0.05$ ，工整签名笔迹书写时长的 P 值 $=0.724 > 0.05$ ，两者均满足正态性，故使用配对样本 t 检验。

表 3.2 坐姿与站姿、自然与工整签名笔迹书写时长的正态性检验

	Kolmogorov-Smirnova			Shapiro-Wilk		
	统计量	df	P	统计量	df	P
坐姿	0.185	36	0.003	0.886	36	0.001
站姿	0.159	36	0.022	0.917	36	0.010
自然	0.102	36	0.200*	0.984	36	0.869
工整	0.079	36	0.200*	0.979	36	0.724

坐姿与站姿、自然与工整签名笔迹书写时长的检验结果，如表 3.3、表 3.4 所示。

表 3.3 坐姿、站姿签名笔迹书写时长配对样本检验结果

	Z	P
站姿 - 坐姿	-1.171 ^b	0.241

b. 基于正秩。

表 3.4 自然、工整签名笔迹书写时长配对样本检验结果

	成对差分的均值	t	P
自然 - 工整	-3.349	-11.705	0

由表 3.3 可知，P 值=0.241>0.05，故不拒绝零假设，即认为坐姿、站姿签名笔迹书写时长不存在显著差异，说明在总体上书写姿势对电子签名笔迹的书写时长影响较小。

虽然大多数人习惯于坐姿书写，但改变书写姿势并不会很大程度影响手臂肌肉运动，同时由于长期形成的书写动力定型的作用，也不会对书写流畅度、书写动作的熟练程度的产生影响，因此坐姿、站姿签名笔迹书写时长并未表现出明显差异。

由表 3.4 可知，t 值=-11.705，P 值=0<0.05，故拒绝零假设，即认为自然、工整签名笔迹书写时长存在显著差异，说明在总体上书写模式对电子签名笔迹书写时长影响较

大；自然与工整签名笔迹书写时长差分的均值为 $-3.349 < 0$ ，说明自然签名笔迹书写时长小于工整签名笔迹书写时长。

自然书写模式为书写人平时惯用的书写模式，熟练度高，且可以有较多连笔，而工整书写要求每个笔画清晰、分明，连笔极少，必然导致书写时长增加。

3.2.2 平均速度特征

3.2.2.1 描述性统计分析

分别计算书写姿势组每名志愿者坐姿与站姿书写的各十枚签名笔迹的平均速度的均值，并绘制折线图进行对比；分别计算书写模式组每名志愿者自然与工整书写的各十枚签名笔迹平均速度的均值，并绘制折线图进行对比。坐姿与站姿书写、自然与工整书写签名笔迹平均速度对比结果，如图 3.5 所示。

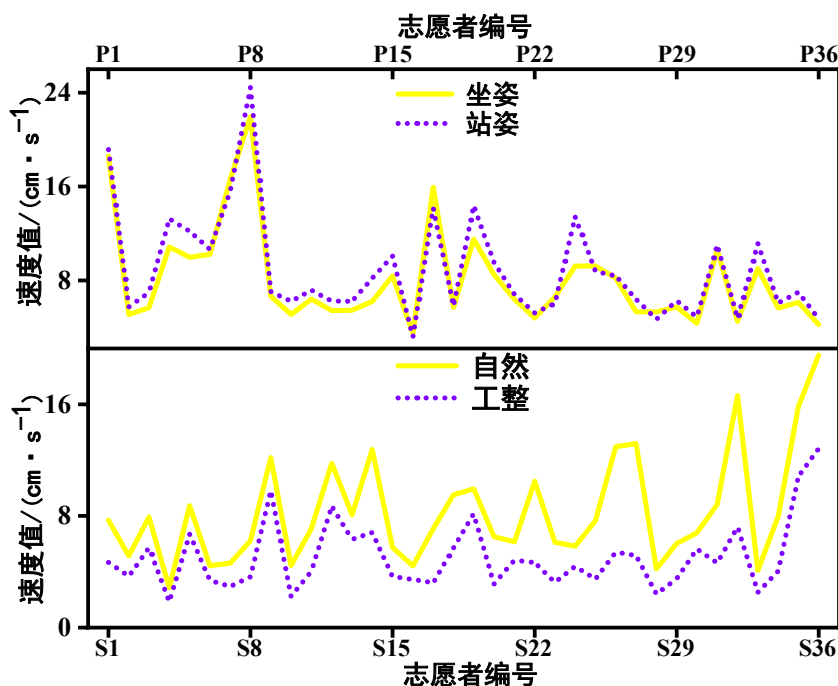


图 3.5 坐姿与站姿、自然与工整书写签名笔迹平均速度对比

由图 3.5 可知，书写姿势组中大部分人坐姿与站姿签名笔迹平均速度差异较小，只有小部分人差异较大；大部分人站姿签名笔迹平均速度略大，坐姿签名笔迹平均速度略大或与站姿签名笔迹平均速度相近的人都只占少数；书写模式组中所有人自然签名笔迹平均速度均较大，不同人自然与工整签名笔迹平均速度差异大小不同，绝大部分人差异较大。

3.2.2.2 假设检验分析

利用假设检验分析坐姿与站姿、自然与工整签名笔迹平均速度的差异。数据正态性检验结果，如表 3.5 所示。

表 3.5 坐姿与站姿、自然与工整签名笔迹平均速度的正态性检验

	Kolmogorov-Smirnova			Shapiro-Wilk		
	统计量	df	P	统计量	df	P
坐姿	0.221	36	0	0.805	36	0
站姿	0.207	36	0	0.852	36	0
自然	0.162	36	0.017	0.908	36	0.006
工整	0.150	36	0.040	0.881	36	0.001

由于本实验样本量=36<50，故使用 Shapiro-Wilk 的检验结果。由表 3.5 可知，坐姿签名笔迹平均速度的 P 值=0<0.05，站姿签名笔迹平均速度的 P 值=0<0.05，两者均不满足正态性，故使用 Wilcoxon 带符号秩检验；自然签名笔迹平均速度的 P 值=0.006<0.05，工整签名笔迹平均速度的 P 值=0.001<0.05，两者均不满足正态性，故使用 Wilcoxon 带符号秩检验。

坐姿与站姿、自然与工整签名笔迹平均速度的检验结果，如表 3.6 所示。

表 3.6 坐姿与站姿、自然与工整签名笔迹平均速度配对样本检验结果

	Z	P
站姿 - 坐姿	-3.669 ^b	0
工整 - 自然	5.232 ^b	0

b. 基于负秩。

由表 3.6 可知，坐姿与站姿签名笔迹平均速度配对样本检验的 P 值=0<0.05，拒绝零假设，即认为坐姿、站姿签名笔迹平均速度存在显著差异，说明在总体上书写姿势对电子签名笔迹平均速度影响较大；基于站姿签名笔迹平均速度小于坐姿签名笔迹平均速度的情况下， Z 值=-3.669<0，说明站姿签名笔迹平均速度大于坐姿签名笔迹平均速度。自然与工整签名笔迹平均速度配对样本的 P 值=0<0.05，拒绝零假设，即认为自然、工整签名笔迹平均速度存在显著差异，说明在总体上书写模式对电子签名笔迹平均速度影响较大；基于工整签名笔迹平均速度小于自然签名笔迹平均速度的情况下， Z 值=5.232>0，说明自然签名笔迹平均速度大于工整签名笔迹平均速度。

由上述对书写时长的研究可知，坐姿与站姿签名笔迹书写时长相近，然而站姿与坐姿签名笔迹平均速度却存在差异。笔者推测其原因可能是由于书写人对于站姿书写感到不适应，故在心理上试图快速写完以结束这种状态，不自觉加快了速度，与此同时站姿也使得书写人视野更加开阔，手臂运动空间增大，书写字体变大。因此，虽然坐姿与站姿签名笔迹书写时长无明显差异，但站姿签名笔迹平均速度却大于坐姿签名笔迹平均速度。

自然书写模式为书写人平时惯用的书写模式，熟练度高，且可以有较多连笔，而工整书写要求每个笔画清晰、分明，连笔极少，必然导致平均速度减小。

3.2.3 平均压力特征

3.2.3.1 描述性统计分析

分别计算书写姿势组每名志愿者坐姿与站姿书写的各十枚签名笔迹的平均压力的均值，并绘制折线图进行对比；分别计算书写模式组每名志愿者自然与工整书写的各十枚签名笔迹的平均压力的均值，并绘制折线图进行对比。坐姿与站姿书写、自然与工整书写签名笔迹平均压力对比结果，如图 3.6 所示。

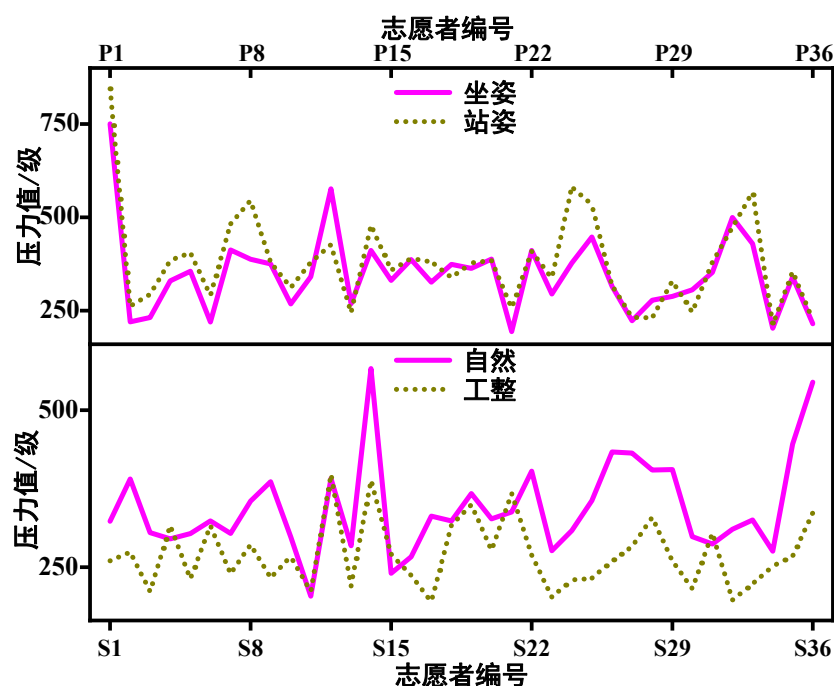


图 3.6 坐姿与站姿、自然与工整书写签名笔迹平均压力对比

由图 3.6 可知，书写姿势组中大部分人站姿签名笔迹平均压力，大多数人坐姿与站姿签名笔迹平均压力差异较小，仅有少数人差异较大；书写模式组中大多数人自然签名笔迹平均压力较大，且与工整签名笔迹平均压力差异较大，自然签名笔迹平均压力小于或接近工整签名笔迹平均压力的人都仅占少数。

3.2.3.2 假设检验分析

利用假设检验分析坐姿与站姿、自然与工整签名笔迹平均压力的差异。数据正态性检验结果，如表 3.7 所示。

表 3.7 坐姿与站姿、自然与工整签名笔迹平均压力的正态性检验

	Kolmogorov-Smirnova			Shapiro-Wilk		
	统计量	df	P	统计量	df	P
坐姿	0.138	36	0.082	0.890	36	0.002
站姿	0.162	36	0.018	0.887	36	0.002
自然	0.156	36	0.026	0.921	36	0.013
工整	0.117	36	0.200	0.941	36	0.053

由于本实验样本量=36<50，故使用 Shapiro-Wilk 的检验结果。由表 3.7 可知，坐姿签名笔迹平均压力的 P 值=0.002<0.05，站姿签名笔迹平均压力的 P 值=0.002<0.05，两者均不满足正态性，故使用 Wilcoxon 带符号秩检验；自然签名笔迹平均压力的 P 值=0.013<0.05，不满足正态性，工整签名笔迹平均压力的 P 值=0.053>0.05，满足正态性，仍然使用 Wilcoxon 带符号秩检验。

坐姿与站姿、自然与工整签名笔迹平均压力的检验结果，如表 3.8 所示。

表 3.8 坐姿与站姿、自然与工整签名笔迹平均压力配对样本检验结果

	Z	P
站姿 - 坐姿	-3.252 ^b	0.001
工整 - 自然	-4.666 ^b	0

b. 基于负秩。

由表 3.8 可知，坐姿与站姿签名笔迹平均压力配对样本检验的 P 值=0.001<0.05，拒

绝零假设，即认为坐姿、站姿签名笔迹平均压力存在显著差异，说明在总体上书写姿势对电子签名笔迹平均压力影响较大；基于站姿签名笔迹平均压力小于坐姿签名笔迹平均压力的情况下， Z 值 $=-3.252<0$ ，说明站姿签名笔迹平均压力大于坐姿签名笔迹平均压力。自然与工整签名笔迹平均压力配对样本检验的 P 值 $=0<0.05$ ，拒绝零假设，即认为自然、工整签名笔迹平均压力存在显著差异，说明在总体上书写模式对电子签名笔迹平均压力影响较大；基于工整签名笔迹平均压力大于自然签名笔迹平均压力的情况下， Z 值 $=-4.666<0$ ，说明自然签名笔迹平均压力大于工整签名笔迹平均压力。

当书写人站姿书写时，桌面对手臂的支撑作用减少，手臂承受的压力增大，可能导致了签名时书写力度的增大，因此多数人站姿书写签名笔迹的平均压力较大。

一般来说，与自然签名相比，工整签名笔迹的书写压力应较大，但是本实验得出的结论却截然相反。由于本实验中所计算的平均压力为整个签名笔迹（包括接触书写与非接触书写部分）的平均压力，笔者认为自然签名笔迹平均压力大于工整签名笔迹平均压力的很大一部分原因在于自然签名笔迹中往往连笔较多、压力值为 0 的非接触书写部分较少，而工整签名笔迹中连笔较少、非接触书写部分较多，拉低了整个签名笔迹的平均压力值。因此，在本实验条件下该结论是合理的。

3.3 摹仿与摹本签名笔迹的特征对比研究

为了便于后续的对比、分析，首先对摹本签名笔迹书写时长、平均速度、平均压力特征进行分析，其原始数据，如本文第二章中表 2.5 所示。通过进一步统计、计算可得，摹本签名笔迹的书写时长最小值为 7.48s，最大值为 8.82s，均值为 8.03s；平均速度最小值为 $3.11\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ ，最大值为 $3.55\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ ，均值为 $3.39\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ ；平均压力最小值为 301.9 级，最大值为 332.3 级，均值为 316.0 级。

3.3.1 书写时长特征

3.3.1.1 描述性统计分析

将摹仿书写组每名志愿者套摹、临摹的各十枚签名笔迹书写时长与摹本签名笔迹书写时长的最小值、最大值、平均值绘制成散点图进行对比，如图 3.7、图 3.8 所示。

由图 3.7、图 3.8 可知，不同人的套摹、临摹签名笔迹的书写时长各不相同，其变化程度、范围也不相同。对比套摹与临摹签名笔迹书写时长，发现多数人临摹签名笔迹的书写时长及其变化范围较大。与摹本签名笔迹相比，本实验中所有人套摹、临摹的所有签名笔迹书写时长均较大，大多数套摹、临摹签名笔迹书写时长的变化范围亦较大。

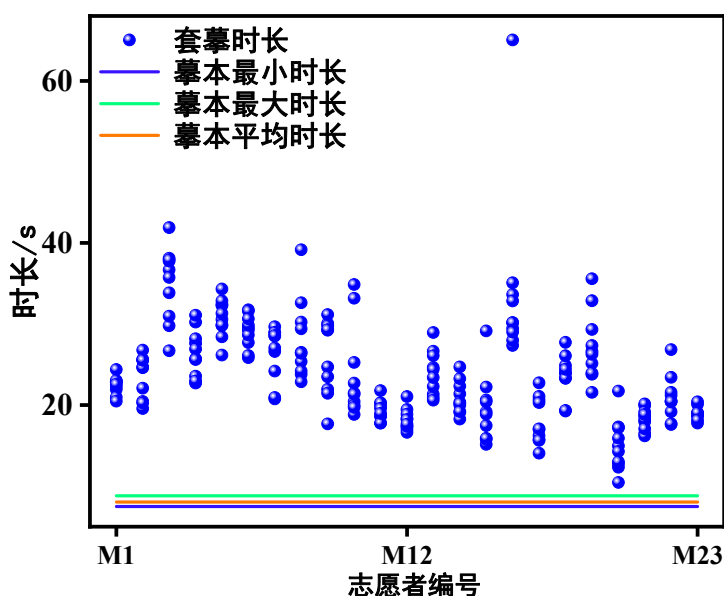


图 3.7 套摹与摹本签名笔迹书写时长对比

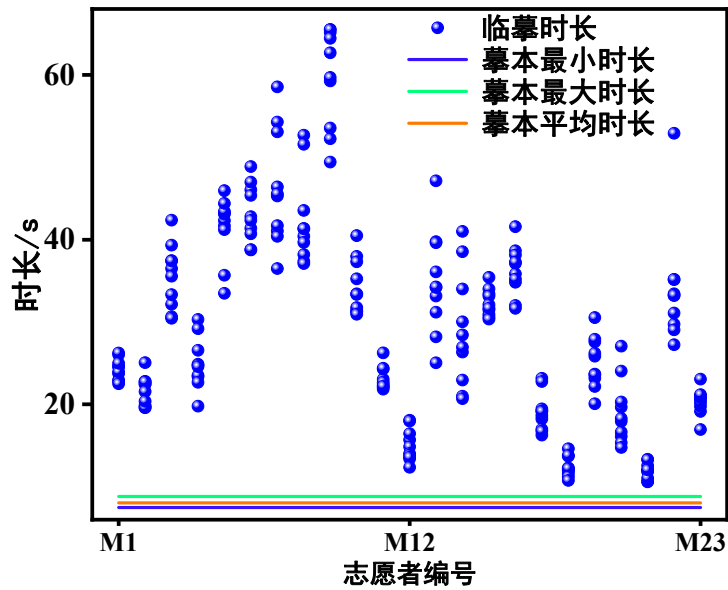


图 3.8 临摹与摹本签名笔迹书写时长对比

3.3.1.2 假设检验分析

利用假设检验分析套摹、临摹与摹本签名笔迹书写时长的差异。数据正态性检验结果，如表 3.9 所示。

表 3.9 套摹、临摹签名笔迹书写时长的正态性检验

摹仿方式	Kolmogorov-Smirnova			Shapiro-Wilk		
	统计量	df	P	统计量	df	P
套摹	0.107	23	0.200	0.962	23	0.506
临摹	0.133	23	0.200	0.962	23	0.509

由于本实验样本量=23<50，故使用 Shapiro-Wilk 的检验结果。由表 3.9 可知，套摹签名笔迹书写时长的 P 值=0.506>0.05,满足正态性，故使用单样本 t 检验；临摹签名笔迹书写时长的 P 值=0.509>0.05，满足正态性，故使用单样本 t 检验。

套摹、临摹签名笔迹书写时长检验结果，如表 3.10 所示。

表 3.10 套摹、临摹签名笔迹书写时长单样本检验结果

检验值 = 8.03			
摹仿方式	t	P	均值差值
套摹	14.456	0	15.852
临摹	8.761	0	21.799

由表 3.10 可知，套摹签名笔迹书写时长的 t 值=14.456， P 值=0<0.05，临摹签名笔迹书写时长的 t 值=8.761， P 值=0<0.05，故拒绝零假设，即认为套摹、临摹与摹本签名笔迹书写时长均存在显著差异。套摹签名笔迹书写时长均值差值为 15.852>0，临摹签名笔迹书写时长均值差值为 21.799>0，说明在总体上套摹、临摹签名笔迹书写时长大于摹本签名笔迹书写时长。

相比于套摹签名，临摹签名的难度较大，短时间内难以熟练掌握，故临摹签名笔迹的书写时长较大，且变化范围也较大。由于书写者的书写习惯与被摹仿者必然存在差异，无论是套摹还是临摹，摹仿者对摹本签名笔迹的书写熟练度远不如被摹仿者，加之练习时间相对较短，摹仿书写必然要花费更多时间。

3.3.2 平均速度特征

3.3.2.1 描述性统计分析

将摹仿书写组每名志愿者套摹、临摹的各十枚签名笔迹平均速度与摹本签名笔迹平均速度的最小值、最大值、平均值绘制成散点图进行对比，如图 3.9、图 3.10 所示。

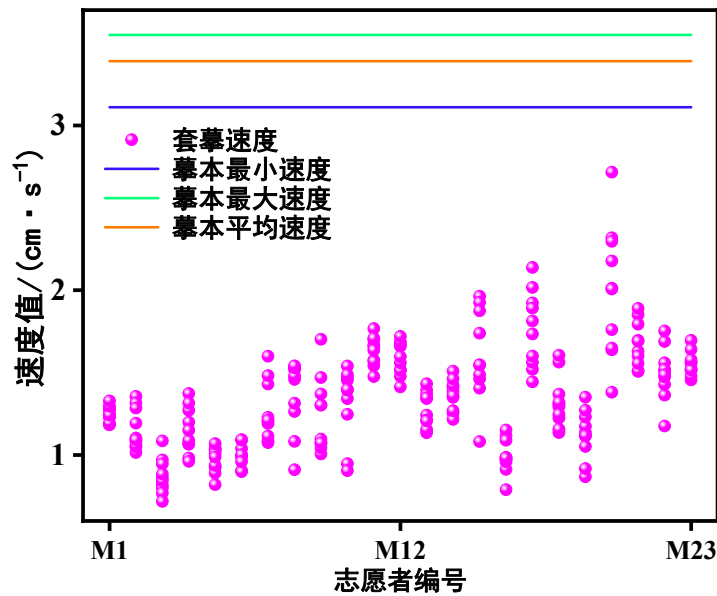


图 3.9 套摹与摹本签名笔迹平均速度对比

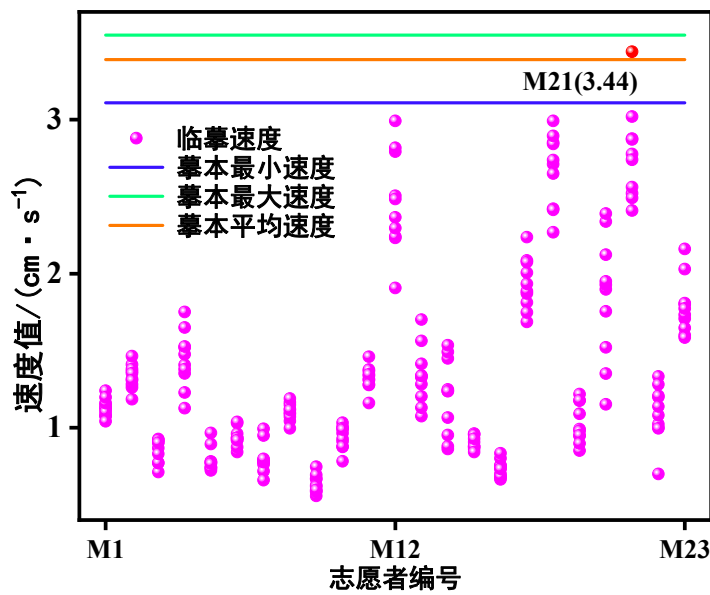


图 3.10 临摹与摹本签名笔迹平均速度对比

由图 3.9、图 3.10 可知，不同人的套摹、临摹签名笔迹的平均速度各不相同，其变化程度、范围也不相同。与摹本签名笔迹相比，本实验中绝大多数人套摹、临摹的所有

签名笔迹的平均速度较小，仅 M21 临摹签名笔迹平均速度的最大值略大于摹本签名笔迹平均速度的平均值，为 $3.44\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

3.3.2.2 假设检验分析

利用假设检验分析套摹、临摹与摹本签名笔迹平均速度的差异。数据正态性检验结果，如表 3.11 所示。

表 3.11 套摹、临摹签名笔迹平均速度的正态性检验

摹仿方式	Kolmogorov-Smirnova			Shapiro-Wilk		
	统计量	df	P	统计量	df	P
套摹	0.131	23	0.200	0.974	23	0.791
临摹	0.202	23	0.016	0.862	23	0.005

由于本实验样本量=23<50，故使用 Shapiro-Wilk 的检验结果。由表 3.11 可知，套摹签名笔迹平均速度的 P 值=0.791>0.05，满足正态性，故使用单样本 t 检验；临摹签名笔迹平均速度的 P=0.005<0.05，不满足正态性，故使用 Wilcoxon 带符号秩检验。

套摹、临摹签名笔迹平均速度检验结果，如表 3.12、表 3.13 所示。

表 3.12 套摹签名笔迹平均速度单样本检验结果

检验值 = 3.39			
摹仿方式	t	P	均值差值
套摹	-34.821	0	-2.045

表 3.13 临摹签名笔迹平均速度单样本检验结果

摹仿方式	Z	P
临摹	-4.198 ^b	0

b. 基于负秩。

由表 3.12 可知，套摹签名笔迹平均速度的 t 值=-34.821， P 值=0<0.05，故拒绝零假设，即认为套摹与摹本签名笔迹平均速度存在显著差异。套摹签名笔迹平均速度均值差值为-2.045<0，说明在总体上套摹签名笔迹平均速度小于摹本签名笔迹平均速度。

由表 3.13 可知，临摹签名笔迹平均速度的 P 值=0<0.05，故拒绝零假设，即认为临摹与摹本签名笔迹平均速度存在显著差异。基于摹本签名笔迹平均速度小于临摹签名笔迹平均速度的情况下， Z 值=-4.198<0，说明在总体上临摹签名笔迹平均速度小于摹本签名笔迹平均速度。

由上述实验可知，摹仿签名笔迹的书写时长要大于摹本签名笔迹的书写时长，在摹仿与摹本签名笔迹形态相近的情况下，无论是套摹还是临摹，摹仿签名笔迹的平均速度必然小于摹本签名笔迹的平均速度。

3.3.3 平均压力特征

3.3.3.1 描述性统计分析

将摹仿书写组每名志愿者套摹、临摹的各十枚签名笔迹平均压力与摹本签名笔迹平均压力的最小值、最大值、平均值绘制成散点图进行对比，如图 3.11、图 3.12 所示。

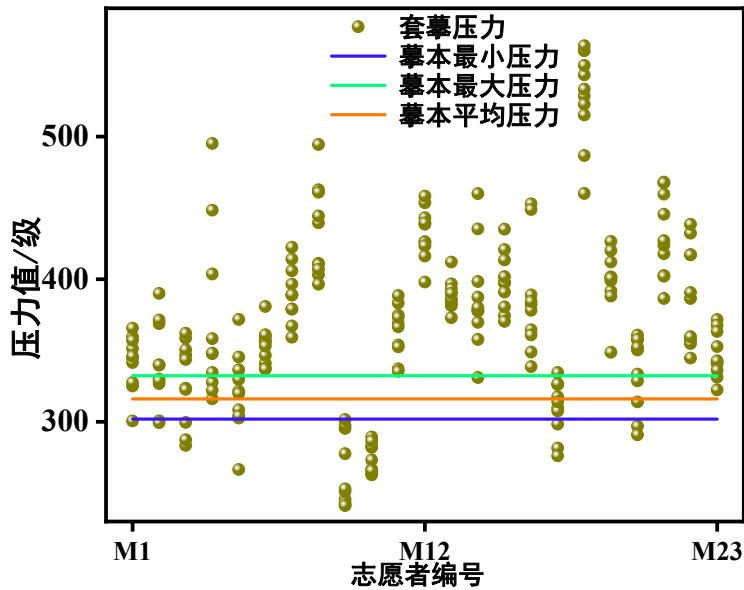


图 3.11 套摹与摹本签名笔迹平均压力对比

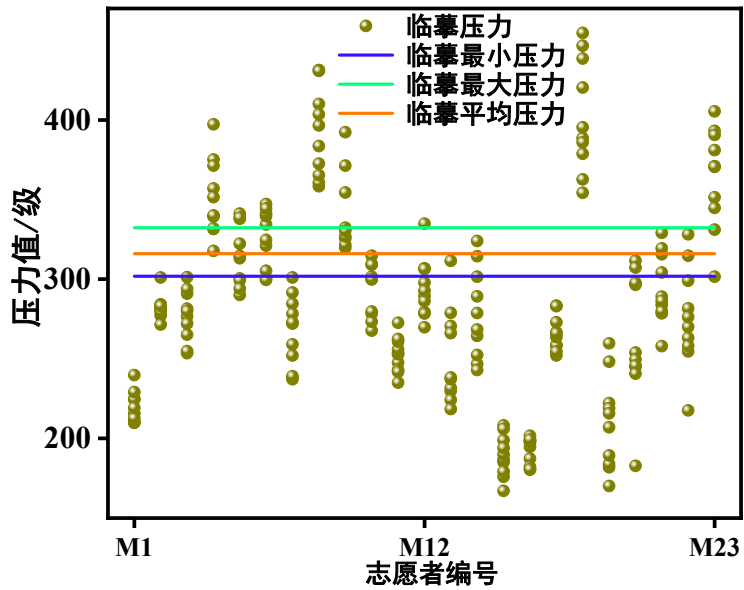


图 3.12 临摹与摹本签名笔迹平均压力对比

由图 3.11、图 3.12 可知，不同人的套摹、临摹签名笔迹的平均压力各不相同，其变化程度、范围也不相同。与摹本签名笔迹相比，本实验中仅有小部分志愿者的部分套

摹、临摹签名笔迹平均压力相近，多数志愿者套摹、临摹签名笔迹的平均压力存在差异，且变化范围较大；多数人套摹签名笔迹的平均压力大于摹本签名笔迹平均压力，而多数人临摹签名笔迹的平均压力小于摹本签名笔迹平均压力。

3.3.3.2 假设检验分析

利用假设检验分析套摹、临摹与摹本签名笔迹平均压力的差异。数据正态性检验结果，如表 3.14 所示。

表 3.14 套摹、临摹签名笔迹平均压力的正态性检验

摹仿方式	Kolmogorov-Smirnova			Shapiro-Wilk		
	统计量	df	P	统计量	df	P
套摹	0.130	23	0.200	0.958	23	0.416
临摹	0.144	23	0.200	0.967	23	0.627

由于本实验样本量 $n=23 < 50$ ，故使用 Shapiro-Wilk 的检验结果。由表 3.14 可知，套摹平均压力的 P 值 $=0.416 > 0.05$ ，满足正态性，故使用单样本 t 检验；临摹签名笔迹平均压力的 P 值 $=0.627 > 0.05$ ，满足正态性，故使用单样本 t 检验。

套摹、临摹签名笔迹平均压力检验结果，如表 3.15 所示。

表 3.15 套摹、临摹签名笔迹平均压力单样本检验结果

检验值 = 8.03			
摹仿方式	t	P	均值差值
套摹	4.545	0	53.839
临摹	-2.429	0.024	-29.153

由表 3.15 可知,套摹平均压力的 t 值=4.545, P 值=0<0.05,临摹签名笔迹平均压力的 t 值=-2.429, P 值=0.024<0.05,故拒绝零假设,即认为套摹、临摹与摹本签名笔迹平均压力均存在显著差异。套摹签名笔迹平均压力均值差值为 53.839>0,临摹签名笔迹平均压力均值差值为-29.153<0,说明在总体上套摹签名笔迹的平均压力大于摹本签名笔迹平均压力,而临摹签名笔迹平均压力小于摹本签名笔迹平均压力。

无论是套摹还是临摹,书写人仅能看到摹本签名笔迹的形态,其书写力度是不可视的,更不易摹仿,因此多数人摹仿与摹本签名笔迹的平均压力均存在明显差异,这一点是可以肯定的。值得一提的是,虽然实验结果表明,套摹签名笔迹平均压力大于摹本签名笔迹平均压力,临摹签名笔迹平均压力小于摹本签名笔迹平均压力,但是实验中仅是对一人工整书写的签名笔迹进行摹仿,该结论仅是在本实验条件下才成立。

笔者认为,摹仿签名笔迹平均压力的大小以及是否大于或小于摹本签名笔迹的平均压力主要还是被摹仿者与摹仿者自身的书写习惯有关,同时也与摹仿者摹仿时的心理状态、摹仿熟练程度相关,且套摹签名笔迹是需要在印有摹本签名笔迹的 A4 纸上摹写,以上种种因素都可能影响压力的大小。总之,对于摹仿与摹本签名笔迹压力的大小关系的影响因素复杂,本实验结论是否能在其他条件下适用还需要更进一步的探究。

3.4 实验小结

同一条件下同一人电子签名笔迹的书写时长、平均速度、平均压力均具有稳定性,变异系数大多低于 15%,变异程度较低。

书写姿势改变对签名笔迹书写时长影响较小,不同姿势书写的签名笔迹书写时长未见明显差异,对签名笔迹平均速度、平均压力影响较大,具体表现为站姿签名笔迹平均速度、平均压力大于坐姿签名笔迹平均速度、平均压力;书写模式改变对签名笔迹书写时长、平均速度、平均压力影响均较大,具体表现为自然签名笔迹书写时长小于工整签

名笔迹书写时长，自然签名笔迹平均速度、平均压力大于工整签名笔迹平均速度、平均压力。

摹仿与摹本签名笔迹的书写时长、平均速度、平均压力均存在明显差异，具体表现为摹仿签名笔迹书写时长大于摹本签名笔迹书写时长，摹仿签名笔迹平均速度小于摹本签名笔迹平均速度，套摹签名笔迹平均压力大于摹本签名笔迹平均压力，临摹签名笔迹平均压力小于摹本签名笔迹平均压力。

4 书写速度变化曲线特征的研究

4.1 同一条件下同一人的特征稳定性研究

对书写姿势组、书写模式组每名志愿者在同一条件下书写的签名笔迹书写速度变化曲线两两组合后，计算每个组合的相关系数，形成相关系数矩阵。由于篇幅所限，无法展示全部志愿者的全部计算结果，以 P6 为例进行展示，其坐姿自然书写的十枚电子签名笔迹书写速度变化曲线相关系数矩阵，如表 4.1 所示。

表 4.1 P6 坐姿自然书写的十枚签名笔迹书写速度变化曲线相关系数矩阵

次序	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1										
2	0.90									
3	0.87	0.93								
4	0.84	0.84	0.83							
5	0.90	0.90	0.92	0.83						
6	0.87	0.87	0.93	0.84	0.93					
7	0.89	0.89	0.90	0.90	0.93	0.91				
8	0.89	0.92	0.93	0.85	0.94	0.93	0.93			
9	0.86	0.85	0.90	0.80	0.90	0.85	0.89	0.91		
10	0.88	0.91	0.95	0.82	0.93	0.91	0.90	0.94	0.91	

由表 4.1 可知，P6 坐姿自然书写的十枚签名笔迹书写速度变化曲线相关系数最小值为 0.80，最大值为 0.95，平均值为 0.89。

计算、统计书写姿势组、书写模式组每名志愿者在同一条件下书写的电子签名笔迹书写速度变化曲线相关系数矩阵的平均值，绘制成折线图进行分析，如图 4.1 所示。

由图 4.1 可知，书写姿势组志愿者坐姿自然书写签名笔迹的书写速度变化曲线平均相关系数在 0.71-0.93 之间，整体平均值为 0.85；书写模式组志愿者坐姿自然书写签名

笔迹的书写速度变化曲线平均相关系数在 0.75-0.93 之间，整体平均值为 0.87；书写姿势组志愿者站姿自然书写签名笔迹的书写速度变化曲线平均相关系数在 0.74-0.95 之间，整体平均值为 0.86；书写模式组志愿者坐姿工整书写签名笔迹的书写速度变化曲线平均相关系数在 0.74-0.92 之间，整体平均值为 0.86。进一步计算可知，同一条件下同一人电子签名笔迹书写速度变化曲线相关系数整体平均值为 0.86，大于 0.8，属于高度相关，相关系数较大，说明书写速度变化曲线相似程度较高。

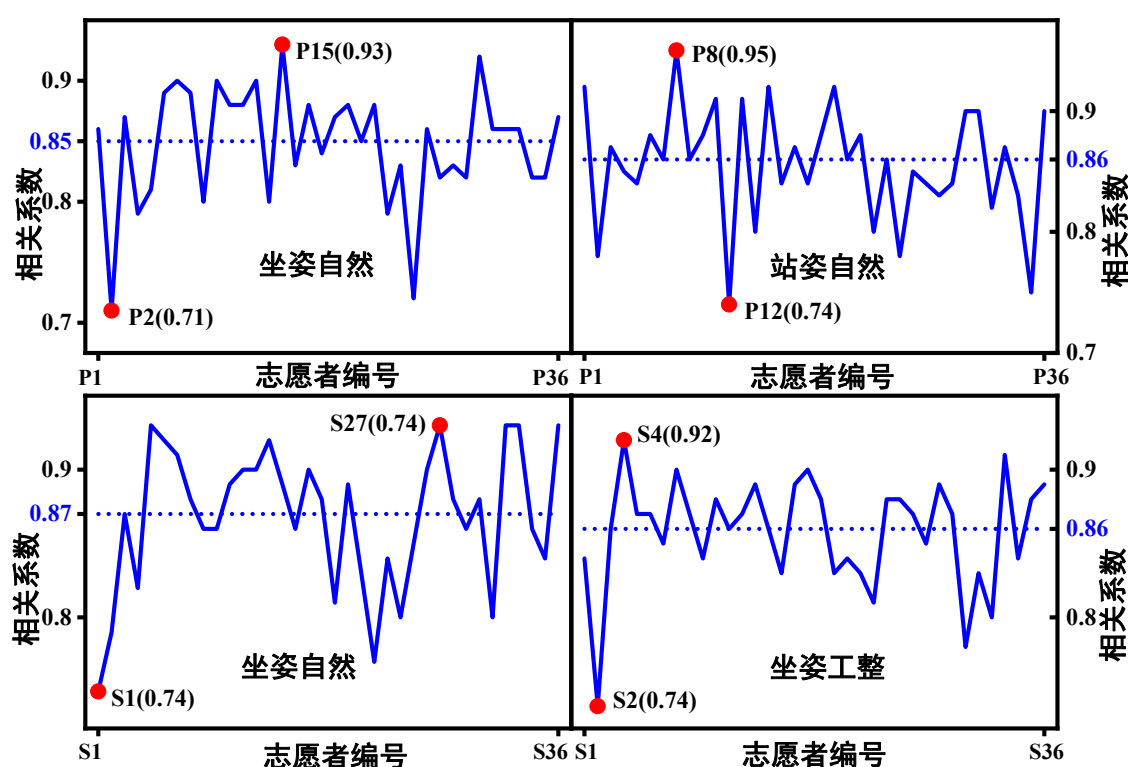


图 4.1 同一条件下同一人签名笔迹书写速度变化曲线相关系数统计

一般来说，在书写习惯的作用下，同一人在同一条件下书写签名笔迹时的节奏、快慢相对稳定。然而，从表中也可以发现个别志愿者的签名笔迹书写速度变化曲线相关系数较低，推测其原因主要在于不同人对电子签名设备的适应程度不同，其书写熟练程度不同，对书写节奏的把控程度不同，书写稳定程度不同，因此某些人的个别签名笔迹的

书写速度变化曲线出现较大差异。但总体来看，同一条件下同一人书写的电子签名笔迹书写速度变化曲线相关系数较大，说明书写速度变化曲线相似，具有一定的稳定性。

4.2 条件变化对特征的影响研究

将书写姿势组每名志愿者坐姿、站姿书写的各十枚电子签名笔迹的书写速度变化曲线两两组合，计算每个组合的相关系数，形成相关系数矩阵，计算、统计其平均值；将书写模式组每名志愿者自然、工整书写的各十枚电子签名笔迹的书写速度变化曲线两两组合，计算每个组合的相关系数，形成相关系数矩阵，计算、统计其平均值。将上述计算、统计结果绘制成折线图进行分析，如图 4.2 所示。

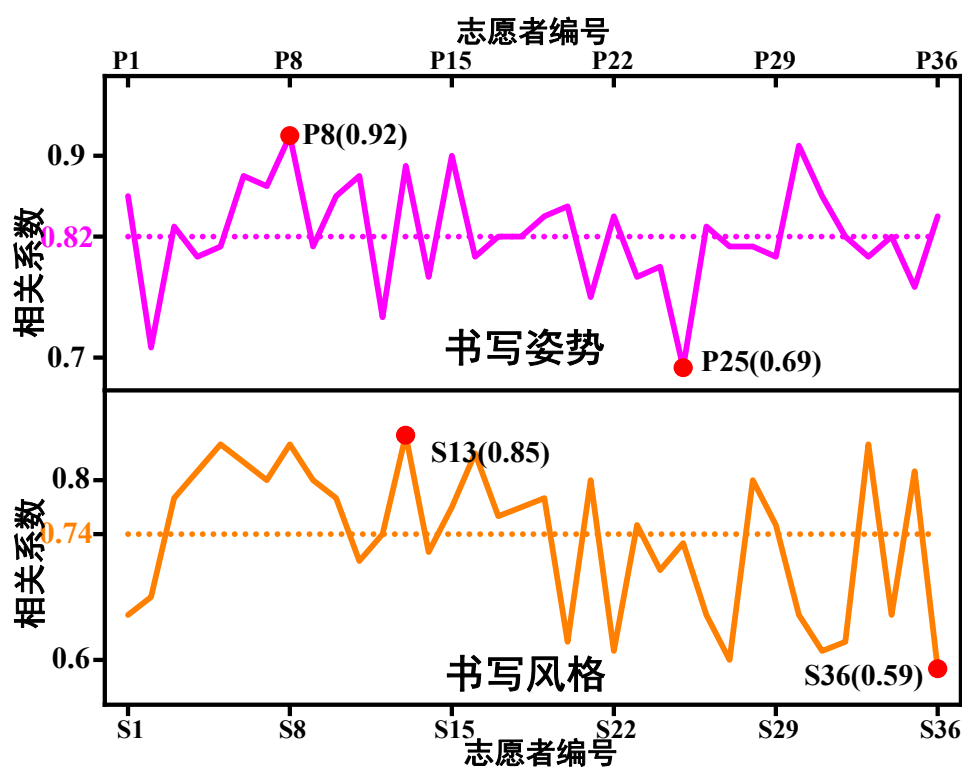


图 4.2 不同条件书写的签名笔迹书写速度变化曲线对比相关系数统计

由图 4.2 可知，书写姿势组志愿者坐姿、站姿签名笔迹之间的书写速度变化曲线平均相关系数在 0.69-0.92 之间，整体平均值为 0.82，大于 0.8，属于高度相关，相关系数

较大，书写速度变化曲线相似程度较高，说明书写姿势的改变对签名笔迹书写速度变化曲线的影响较小。书写模式组志愿者自然、工整签名笔迹之间的书写速度变化曲线平均相关系数在 0.59-0.85 之间，整体平均值为 0.74，在 0.5-0.8 之间，属于中度相关，相关系数较低，书写速度变化曲线相似程度较低，说明书写模式的改变对签名笔迹书写速度变化曲线的影响较大。

不过，从图中也可以发现个别志愿者两种模式的签名笔迹之间的书写速度变化曲线平均相关系数较高，推测其原因主要在于部分人书写个性化程度较低，两种书写模式的签名笔迹之间的差异较小，两种模式的签名书写均较熟练，其书写速度变化曲线本身就十分相似。

4.3 摹仿与摹本签名笔迹的特征对比研究

将摹仿书写组每名志愿者套摹签名笔迹与摹本签名笔迹的书写速度变化曲线两两组合，计算每个组合的相关系数，形成相关系数矩阵，计算、统计其平均值；将摹仿书写组每名志愿者临摹签名笔迹与摹本签名笔迹的书写速度变化曲线两两组合，计算每个组合的相关系数，形成相关系数矩阵，计算、统计其平均值。将上述计算、统计结果绘制成折线图进行分析，如图 4.3 所示。

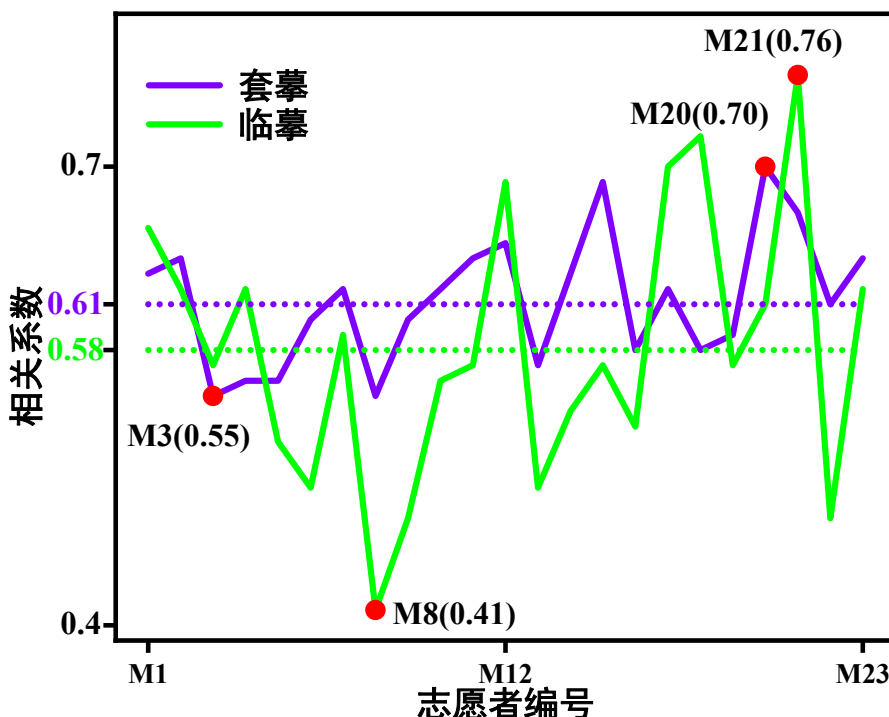


图 4.3 摹仿与摹本签名笔迹书写速度变化曲线对比相关系数统计

由图 4.3 可知，摹仿书写组志愿者套摹签名笔迹与摹本签名笔迹之间的书写速度变化曲线平均相关系数在 0.55-0.70 之间，整体平均值为 0.61，在 0.5-0.8 之间，属于中度相关；摹仿书写组志愿者临摹签名笔迹与摹本签名笔迹之间的书写速度变化曲线平均相关系数在 0.41-0.76 之间，整体平均值为 0.58，在 0.5-0.8 之间，属于中度相关。相较于套摹与摹本签名笔迹，临摹与摹本签名笔迹之间的书写速度变化曲线差异略大，但二者都在 0.5-0.8 之间，相关系数均较小，书写速度变化曲线相似程度均较低，可以推知摹仿与摹本签名笔迹的书写速度变化曲线存在明显差异。

4.4 实验小结

同一条件下同一人电子签名笔迹的书写速度变化曲线具有稳定性，其相关系数整体平均值为 0.86，属于高度相关，相关系数较大，速度变化曲线相似程度较高。

书写姿势改变对签名笔迹书写速度变化曲线的影响较小，坐姿与站姿签名笔迹之间的书写速度变化曲线相关系数整体平均值为 0.82，属于高度相关，相关系数较大，速度变化曲线相似程度较高；书写模式的改变对签名笔迹书写速度变化曲线影响较大，自然与工整签名笔迹之间的书写速度变化曲线相关系数整体平均值为 0.74，属于中度相关，相关系数较小，速度变化曲线的相似程度较低。

摹仿与摹本签名笔迹的书写速度变化曲线存在明显差异，套摹、临摹与摹本签名笔迹之间的书写速度变化曲线相关系数整体平均值分别为 0.61、0.58，均属于中度相关，相关系数均较小，速度变化曲线的相似程度均较低。

5 书写压力分布特征的研究

5.1 同一条件下同一人的特征稳定性研究

5.1.1 分析过程展示

分别对书写姿势组、书写模式组每名志愿者在同一条件下书写的签名笔迹书写压力分布逐一分析研究，由于篇幅所限，无法一一罗列全部分析过程，在此选取 P29 坐姿自然书写、P26 站姿自然书写、S25 坐姿工整书写签名笔迹的书写压力分布的详细分析过程进行展示。

P29 坐姿自然书写十枚签名笔迹的书写压力分布，见附录图 B1，其部分内容，如图 5.1 所示。

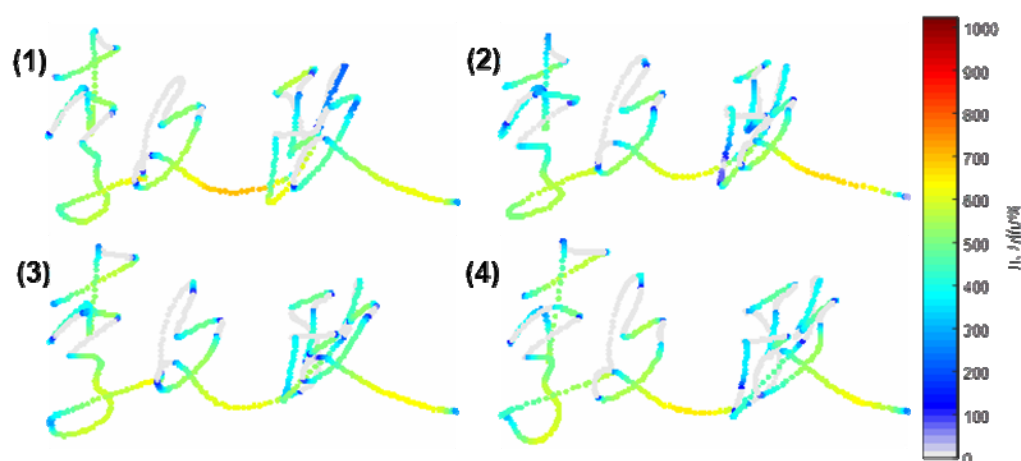


图 5.1 P29 坐姿自然书写部分签名笔迹书写压力分布

P29 坐姿自然书写签名笔迹的书写压力分布有以下特点：1.笔迹整体压力值相近；2.压力值为零的部位大体相同，且过渡自然、无多余动作，与笔画相互呼应，整体节奏感好；3.多数部位压力值相对大小情况相似，如：“李”字“子”部的下部、“文”字捺笔下半部分、“政”字“攵”部的捺笔下半部分等压力值相对大小较大，“李”字“木”部的撇笔、“文”字的点笔等压力值相对大小较小；4.多数笔画压力值变化规律相似，如：“文”字的

捺笔、“政”字“攵”部的捺笔压力值先增大然后缓慢减小收笔，“政”字“攵”部的撇笔压力值先增大后恒定最后缓慢减小收笔；5.存在一些微小差异，如：“李”字“木”部与“子”部的起笔压力值，“政”字“正”部的短竖笔压力值相对大小和压力值变化规律，“正”字下部的横笔压力值相对大小。

P26 站姿自然书写十枚签名笔迹的书写压力分布，见附录图 B2，其部分内容，如图 5.2 所示。

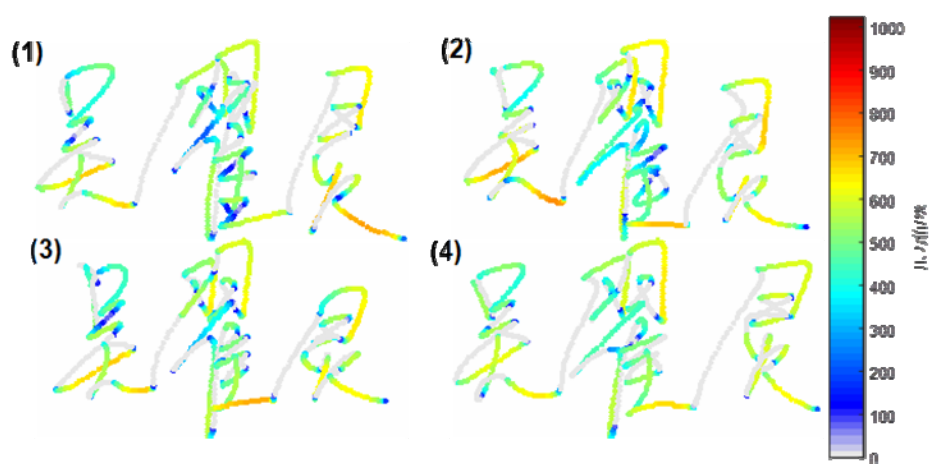


图 5.2 P26 站姿自然书写部分签名笔迹书写压力分布

P26 站姿自然书写签名笔迹的书写压力分布有以下特点：1.笔迹整体压力值相近；2.压力值为零的部位大体相同，且过渡自然、无多余动作，与笔画相互呼应，整体节奏感好；3.多数部位压力值相对大小情况相似，如：“吴”字“天”部较长的横笔与捺笔、“翟”字“羽”部的横折弯钩笔、“翟”字“佳”部下部的横笔、“灵”字“ヨ”部的竖笔、“灵”字“火”部的撇笔与捺笔等压力值相对大小较大，“吴”字的“口”部、“翟”字“佳”部的撇笔等压力值相对大小较小；4.多数笔画压力值变化规律相似，如：“吴”字“天”部中部的横笔压力值先增大后恒定最后缓慢减小至收笔，“吴”字“天”部的捺笔压力值先增大至收笔处迅速减小，“翟”字“羽”部的两个竖钩笔压力值均是先恒定至钩笔处然后缓慢减小收笔，

“灵”字“火”部的捺笔压力值先增大然后缓慢减小收笔；5.存在一些微小差异，如：“翟”字“隹”部中“亻”部的撇笔压力值大小存在差异，“灵”字“ヨ”部下部横笔压力值大小存在差异，“灵”字“火”部撇笔压力值存在差异，“翟”字“隹”下部的横笔压力值存在差异。

S25 坐姿工整书写十枚签名笔迹的书写压力分布，见附录图 B3，其部分内容，如图 5.3 所示。

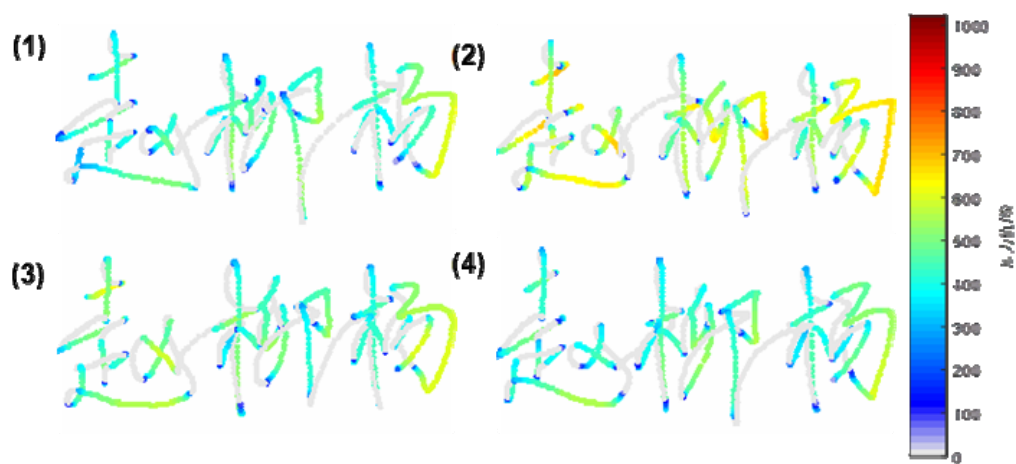


图 5.3 S25 坐姿工整书写部分签名笔迹书写压力分布

S25 坐姿工整书写签名笔迹的书写压力分布有以下特点：1.整体压力值相近；2.压力值为零的部位大体相同，且过渡自然、无多余动作，与笔画相互呼应，整体节奏感好；3.多数部位压力值相对大小情况相似，如：“赵”字“土”部的两个横笔、“赵”字“走”部的平捺笔、“柳”字“卯”部的竖钩笔、横折弯钩笔、“杨”字右部的“丿”部、“杨”字右部下方的撇笔等压力值相对大小较大，“赵”字“走”部的撇笔、“杨”字“木”部的撇笔与捺笔等压力值相对大小较小；4.多数笔画压力值变化规律相似，如：“赵”字“走”部的捺笔压力值先增大后恒定然后逐渐减小收笔，“柳”字“卯”的撇笔压力值先增大后恒定最后缓慢减小收笔，“杨”字右部的“丿”部压力值先增大后恒定再增大后恒定至钩笔处缓慢减小收笔；5.存在一些微小差异，如：“赵”字“土”部较短的横笔压力值相对大小存在差异，

“赵”字的“乂”部的压力值相对大小存在差异，“杨”字右部下方的撇笔压力值相对大小存在差异，（2）签名笔迹的整体压力值较大。

总的来看，P29 坐姿自然书写、P26 站姿自然书写、S25 坐姿工整书写的电子签名笔迹在整体压力值、压力值为零的部位、多数部位压力值相对大小情况、多数笔画压力值变化规律等均表现大体相同或相似，虽然存在一些微小差异，但从整体来看，均是具有稳定性的。

5.1.2 规律总结

对书写姿势组、书写模式组每名志愿者在同一条件下书写的签名笔迹书写压力分布特点进行归纳、总结，发现在同一条件下同一人签名笔迹的书写压力分布有以下规律：

第一，签名笔迹的整体压力值相近。签名笔迹书写压力分布图的主色调基本相近，整体色调所在范围相近。签名笔迹的整体压力值反映了书写压力的主要分布范围，同一人书写的大多数签名笔迹在同一条件下书写的签名笔迹书写压力范围是相对固定的，基本没有发生较大变化。

第二，压力值为零的部位大体相同，且能较好地与各个笔画相互呼应，连贯、自然、流畅、有序、节奏感好。需要特别注意的是，有些人自然书写的签名笔迹连笔书写较多，有时整个签名仅用一两笔便完成，故该部位有时极少甚至不存在而无法利用，如图 5.4 所示。

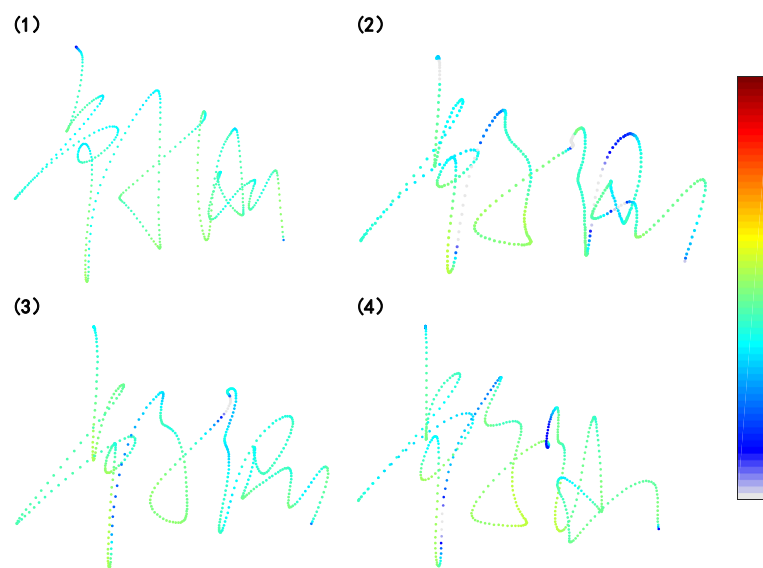


图 5.4 S22 自然书写部分签名笔迹的书写压力分布

第三，多数部位压力值相对大小情况相似。签名笔迹中各个部位的压力值大小不是恒定、一致的，而是会有压力值相对较大、较小的部位，实验结果表明同一条件下同一人签名笔迹中的这些部位是基本固定的，也就是说虽然各部位压力值大小会改变，多数部位压力值相对大小是比较稳定的，这也与书写动力定型理论相符，如图 5.5 所示。图 5.5 中“廖”字“彡”部下部的撇笔、“俊”字“亻”竖笔的下部、“俊”字“厶”部的点笔、“欠”部的捺笔、“帆”字“凡”部的斜钩笔等压力值相对大小较大；“廖”字红色方框内的部分、“俊”字红色方框内的部分、“帆”字“巾”部的横笔、“凡”部的横笔等压力值相对大小较小。

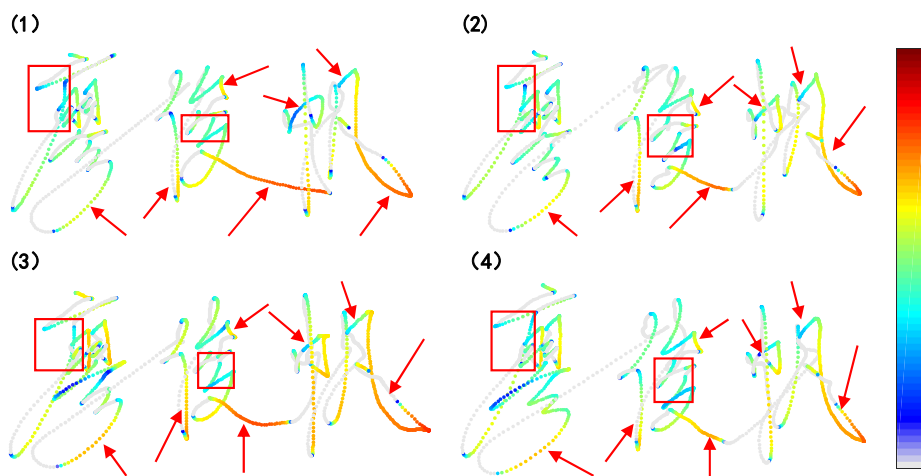


图 5.5 S8 坐姿工整书写部分签名笔迹的书写压力分布

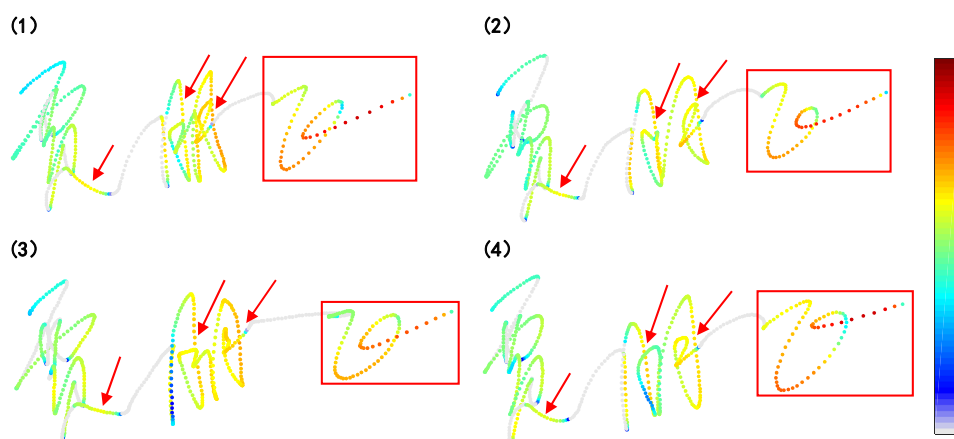


图 5.6 P5 坐姿自然书写部分签名笔迹的书写压力分布

第四，签名笔迹中笔画压力值变化丰富，且变化规律相似。一般而言，签名笔迹的每个笔画从起笔开始，经过行笔、转笔，最后收笔，在这个过程中压力值大小会随之变化，实验结果表明同一条件下同一人所写的签名笔迹中这种变化是比较稳定的，即多数笔画压力值变化规律是相似的，这也与书写动力定型理论相符，如图 5.6 所示。图 5.6 中“贾”字“贝”部的点笔压力值先增大后恒定最后缓慢减小收笔，“朋”字的两个竖钩笔部分压力值均先保持恒定至钩笔处开始缓慢较小收笔，“飞”字压力值从斜钩笔开始先增大

后缓慢减小至第一个转折处达到最小后继续缓慢增大通过第二个转折点后保持稳定最后减小收笔。

综上所述，同一条件下同一人签名笔迹的书写压力分布相似，具有一定的稳定性。然而，即使是同一条件下同一人书写的签名笔迹书写压力分布或多或少也表现出一定程度的差异性，主要表现在以下几个方面：1.签名笔迹的整体压力值可能会偏大或偏小，如图 5.7 所示，(1)签名笔迹的整体压力值略大于(2)、(3)、(4)签名笔迹的；2.少数部位的压力值相对大小存在差异；3.少数笔画压力值变化规律存在差异。

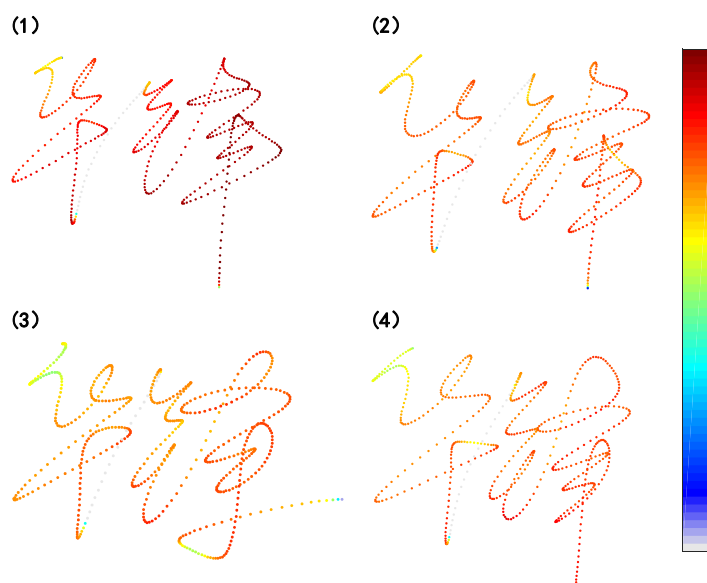


图 5.7 P1 坐姿自然书写部分签名笔迹的书写压力分布

分析其出现差异的原因主要在于书写运动不是机械化的重复运动，书写动力定型只能保证每次签名书压力度的相对稳定，难以使其完全一样，因此这些差异可以认为是书写运动过程中的自然变化所产生的、非本质的差异。

5.2 条件变化对特征的影响研究

5.2.1 书写姿势对书写压力分布的影响

逐一对比分析书写姿势组每名志愿者坐姿、站姿书写的签名笔迹书写压力分布，由于篇幅所限，无法一一罗列全部分析过程，在此选取 P33 坐姿、站姿书写的各十枚签名笔迹书写压力分布的详细对比分析过程进行展示。

P33 坐姿、站姿书写签名笔迹的书写压力分布，见附录图 B4，其部分内容，如图 5.8 所示。其中，(1)、(2)为坐姿书写签名笔迹的书写压力分布，(3)、(4)为站姿书写签名笔迹的书写压力分布。

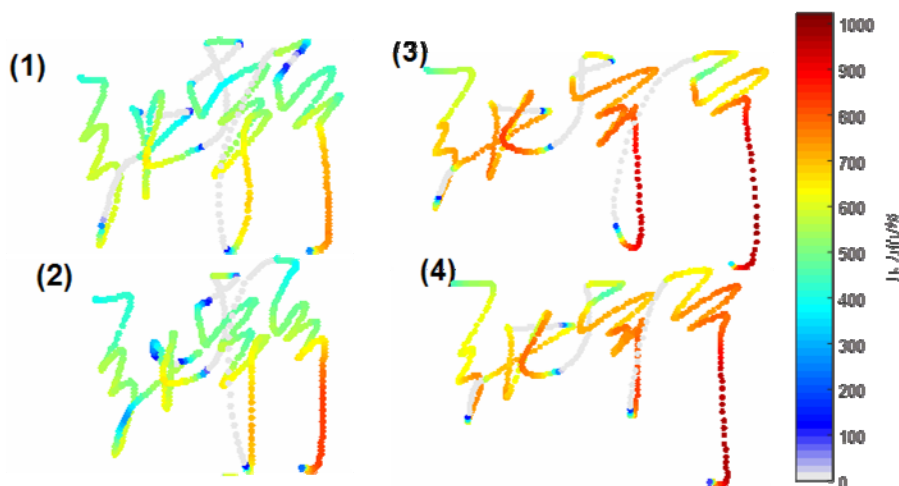


图 5.8 P33 坐姿、站姿书写部分签名笔迹书写压力分布对比

对比 P33 坐姿、站姿书写的签名笔迹压力分布，发现有以下特点：1.站姿书写签名笔迹整体压力值大于坐姿签名笔迹整体压力值；2.压力值为零的部位大体相同，且均过渡自然、无多余动作；3.多数部位压力值相对大小情况基本相似，如：“张”字“弓”部的下部、“长”部的撇捺连笔的中间部位、“宇”字与“宁”字的竖钩笔等压力值相对大小较大，“张”字“弓”部上部的横笔、“宇”字与“宁”字“一”部的横笔与右侧点笔、“宁”字“丁”部的横笔等压力值相对大小较小；4.多数笔画压力值变化规律基本相似，如：“张”字“长”

部竖钩笔压力值起笔后逐渐增大至末端后上提缓慢减小收笔，“宇”字“一”部的点笔压力值先保持恒定最后减小，“宇”字“一”部压力值先增大后恒定至转折处减小后再增大并以恒定压力值完成转折后再逐渐减小至“于”部起笔处，“宁”字“丁”部竖笔压力值起笔后先增大再保持恒定至末端后迅速收笔。

综合来看，P33 坐姿与站姿签名笔迹的书写压力分布，除整体压力值存在明显差异，其他方面基本相似，无明显差异。

对书写姿势组每名志愿者坐姿、站姿书写的签名笔迹书写压力分布的对比分析结果进行归纳、总结，结论如下：

第一，对 36 名志愿者坐姿与站姿书写签名笔迹整体压力值进行对比并统计，结果如下：有 22 人站姿书写签名笔迹整体压力值较大，约占 61%；有 10 人坐姿与站姿书写签名笔迹整体压力值无明显差异，约占 28%；有 4 人坐姿书写签名笔迹整体压力值较大，约占 11%。

第二，压力值为零的部位大体相同，且均过渡自然，整体节奏感好。

第三，无论签名笔迹整体压力值是否存在差异，多数部位压力值相对大小情况基本相似，压力值相对较大、中等、较小的部位基本相同，如图 5.9 所示。

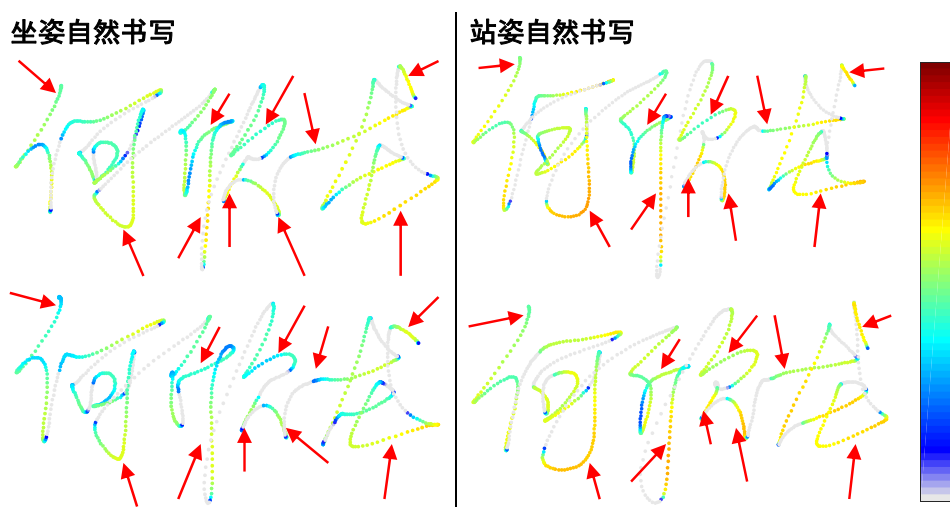


图 5.9 P4 坐姿、站姿书写部分签名笔迹书写压力分布对比

图 5.9 中“何”字“可”部的钩笔、“欣”字“斤”部的竖笔、“欣”字“欠”部的“人”部、“龙”字的点笔等压力值相对大小较大,“何”字“亻”部撇笔的起笔部分、“龙”字横笔的起笔部分、“欣”字“斤”部的横笔、“欣”字“欠”部的横笔压力值相对大小较小。

第四,无论签名笔迹整体压力值是否存在差异,多数笔画压力值变化规律基本相似,如图 5.10 所示。

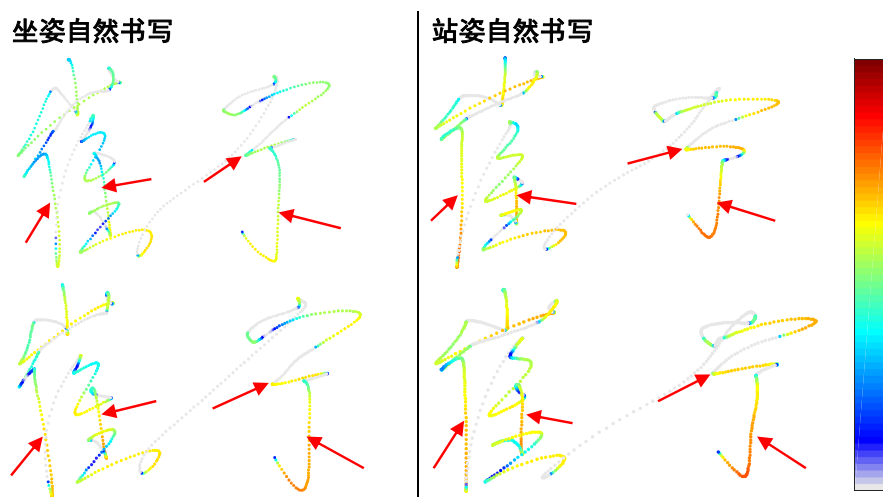


图 5.10 P31 坐姿、站姿书写部分签名笔迹书写压力分布对比

图 5.10 中“崔”字“亻”部竖笔压力值逐渐增大至末端后缓慢减小收笔,“崔”字“佳”部右部竖笔压力值先增大后恒定至末端后突然减小收笔,“宁”字“丁”部横笔压力值基本恒定,“宁”字“丁”部竖钩笔压力值先增大后恒定完成钩笔后逐渐减小收笔。

总的来说,同一条件下同一人坐姿与站姿书写签名笔迹的书写压力分布,除了整体压力值上可能会存在差异外,其他方面基本相同或相似。

5.2.2 书写模式对书写压力分布的影响

逐一对比分析书写模式组每名志愿者自然、工整书写的签名笔迹书写压力分布，由于篇幅所限，无法一一罗列全部分析过程，在此选取 S9 自然、工整书写的各十枚签名笔迹书写压力分布的详细对比分析过程进行展示。

S9 自然、工整书写的签名笔迹书写压力分布，见附录图 B5，其部分内容，如图 5.11 所示。其中，(1)、(2)为自然书写签名笔迹的书写压力分布，(3)、(4)为工整书写签名笔迹的书写压力分布。

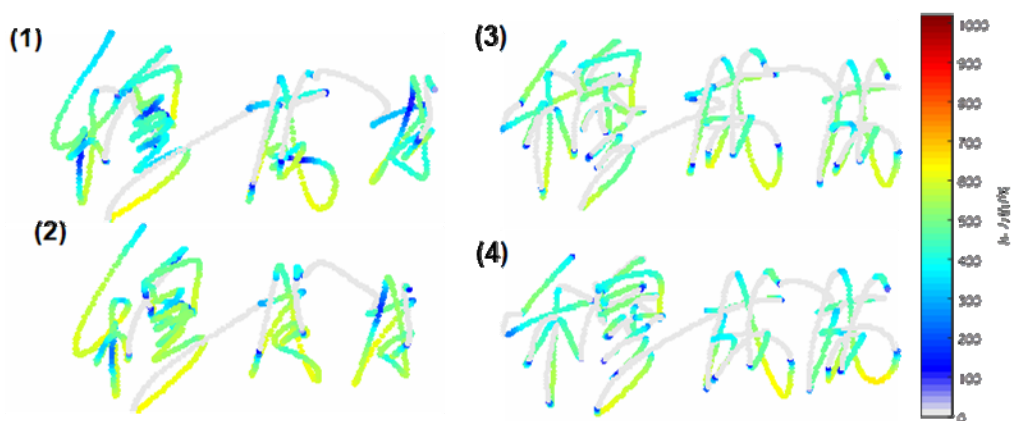


图 5.11 S9 自然、工整书写的部分签名笔迹压力分布对比

对比 S9 自然、工整书写签名笔迹的书写压力分布，发现有以下特点：1. 自然书写的签名笔迹整体压力值略大于工整书写签名笔迹整体压力值；2. 压力值为零的部位存在明显差异，但均自然流畅，无多余动作；3. 多数部位压力值相对大小情况、多数笔画压力值变化规律均存在明显差异。

综合来看，S9 自然书写签名笔迹个性化程度较高，自然与工整书写签名笔迹书写压力分布存在明显偏移，几乎不存在相似之处。

对书写模式组每名志愿者自然、工整书写签名笔迹的书写压力分布的对比分析结果进行归纳、总结，结论如下：

第一，对 36 名志愿者自然与工整书写签名笔迹整体压力值进行对比并统计，结果如下：有 16 人工整书写签名笔迹整体压力值明显较大，约占 44%；有 15 人自然与工整书写签名笔迹整体压力值无明显差异，约占 42%；有 5 人自然书写签名笔迹整体压力值明显较大，约占 14%。

第二，压力值为零的部位存在明显偏移，但均与其他笔画较好地呼应，过渡自然，整体节奏感好。书写模式的改变使得笔画的起笔、行笔、转折、收笔方式改变，压力值为零的部位亦改变，但不影响书写人签名书写的熟练度、书写习惯的表达，故该部位依然能与其他部位较好地对应。

第三，多数部位压力值相对大小情况存在明显差异，具体差异的大小程度则与志愿者自然书写签名笔迹的个性化程度有关。

对于自然书写签名笔迹个性化程度较高的志愿者，其自然与工整书写的签名笔迹的书写压力分布几乎不存在相似之处，如图 5.12 所示，S36 自然与工整书写的签名笔迹几乎不存在相似之处。

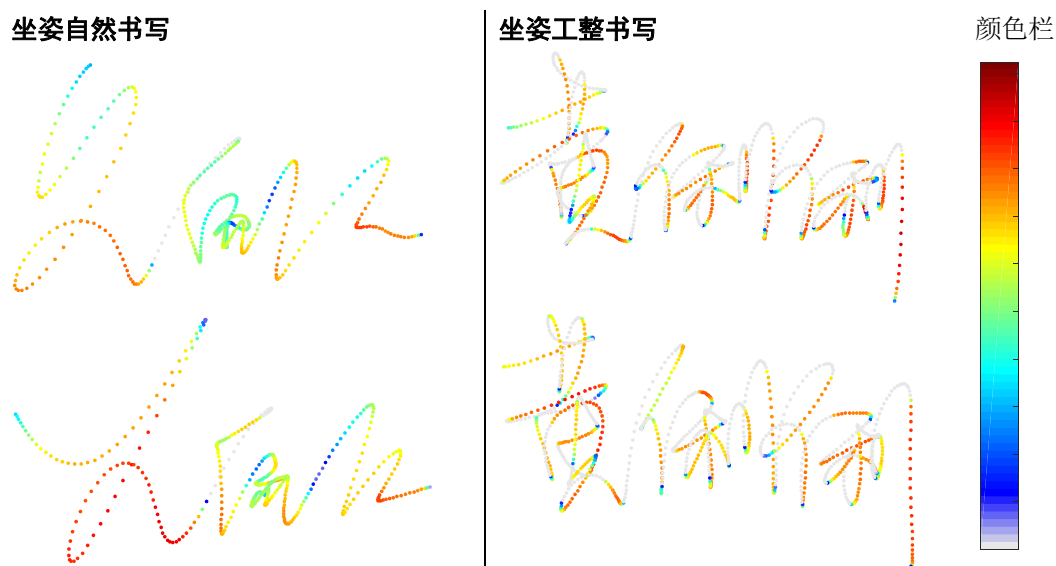


图 5.12 S36 自然、工整书写部分签名笔迹书写压力分布对比

部分人自然书写签名笔迹个性化程度较低，依然存在少数部位压力值相对大小情况相似，如图 5.13 所示，“王”字下部的横笔、“鼎”字下部的两竖笔、“方”字的撇笔、“方”字竖钩笔的钩笔处压力值相对大小较大，“鼎”字“目”部中部的两横笔压力值相对大小较小。

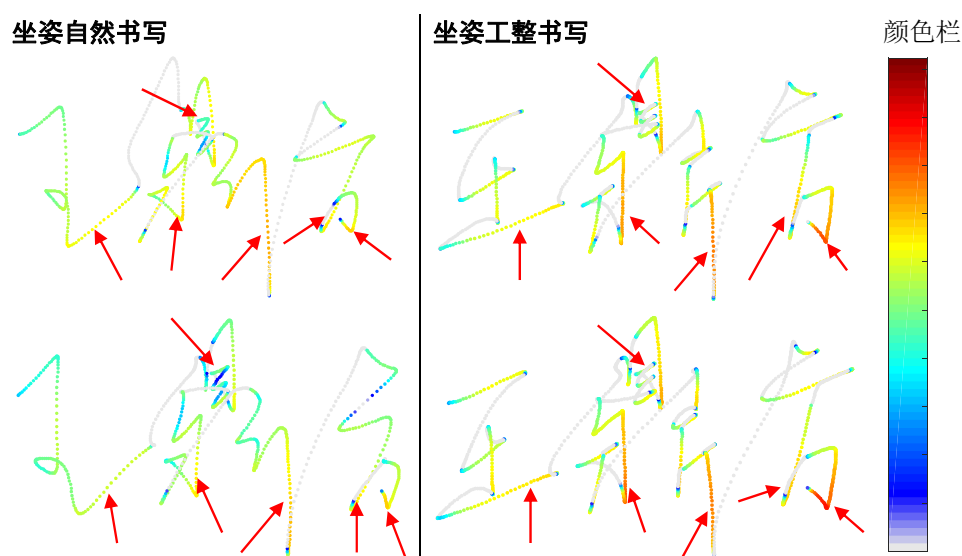


图 5.13 S2 自然、工整书写部分签名笔迹书写压力分布对比

第四，多数笔画压力值变化规律存在明显差异。书写者自然与工整书写签名笔迹的笔画形态差异较大，笔画的起笔、行笔、转折、收笔方式不同，对应的笔力变化自然不同。

总的来说，同一条件下同一人自然与工整书写签名笔迹的书写压力分布大多存在明显差异，但对于自然书写签名个性化程度相对较低的志愿者，也存在一定的相似之处。

5.3 摹仿与摹本签名笔迹的特征对比研究

5.3.1 套摹与摹本签名笔迹书写压力分布对比

将摹仿书写组每名志愿者套摹签名笔迹与摹本签名笔迹的书写压力分布逐一对比分析，由于篇幅所限，无法一一罗列全部分析过程，在此选取 M9 套摹签名笔迹与摹本签名笔迹书写压力分布的详细对比分析过程进行展示。

十枚摹本签名笔迹的书写压力分布，见附录图 B6；M9 的十枚套摹签名笔迹书写压力分布，见附录图 B7，其部分内容，如图 5.14 所示。其中，(1)、(2)为摹本签名笔迹书写压力分布，(3)、(4)为套摹签名笔迹书写压力分布。

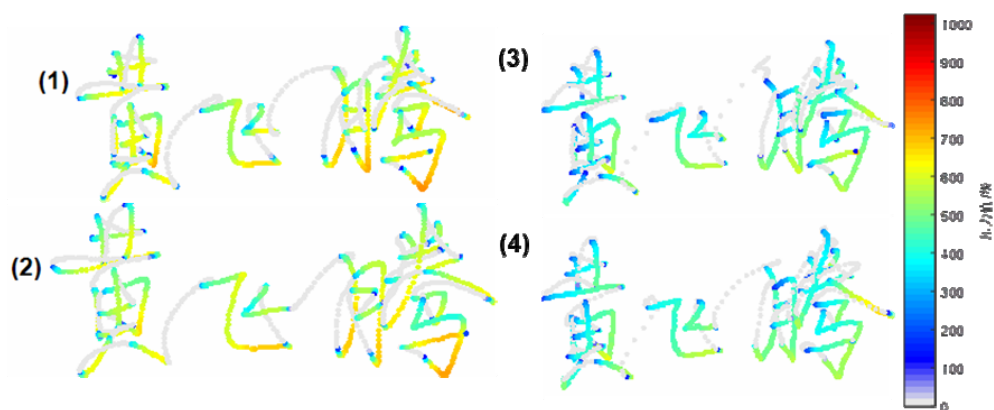


图 5.14 M9 套摹与摹本部分签名笔迹书写压力分布对比

对比 M9 套摹签名笔迹与摹本签名笔迹，发现有以下特点：1. 十枚套摹签名笔迹整体压力值均明显小于摹本签名笔迹整体压力值；2. 压力值为零的部位存在明显偏移，且摹本签名笔迹的该部位自然流畅，整体节奏感较好，而套摹签名笔迹的该部位出现了明显的停顿、抖动、紊乱等不自然的现象，整体节奏感相对较差；3. 多数部位压力值的相对大小情况存在差异，如：“飞”字的撇笔、“腾”字“兴”部的撇笔等在摹本签名笔迹中压力值相对大小较小，而在套摹签名笔迹中较大；“飞”字斜钩笔的下部、“腾”字“马”部的横笔等在摹本签名笔迹中压力值相对大小较大，而在套摹签名笔迹中较大；4. 多数笔画

压力值变化规律存在差异，如：“黄”字“由”部的竖钩笔，“腾”字“月”部的竖钩笔、“腾”字“马”部的横折钩笔在摹本签名笔迹中压力值均逐渐增大，而在套摹签名笔迹中压力值基本恒定。

综合来看，M9 套摹签名笔迹与摹本签名笔迹的书写压力分布存在明显差异。

对摹仿书写组每名志愿者套摹签名笔迹与摹本签名笔迹的书写压力分布的对比分析结果进行归纳、总结，结论如下：

第一，签名笔迹的整体压力值存在差异，主要表现为签名笔迹书写压力分布图主色调差异明显。对摹仿书写组 23 名志愿者套摹签名笔迹与摹本签名笔迹整体压力值差异情况进行统计，结果如下：有 15 人套摹签名笔迹整体压力值较大，占 65%；有 6 人套摹签名笔迹整体压力值较小，占 26%；有 2 人套摹签名笔迹与摹本签名笔迹整体压力值无明显差异，占 9%。

第二，压力值为零的部位存在明显偏移，且套摹签名笔迹的连接部分在节奏感、自然流畅度、连贯性等方面均较差。

尽管套摹书写时，摹仿者不需要过多思考，但对摹本签名笔迹的笔顺、运笔均不熟悉，这种对摹本签名笔迹的“陌生”往往容易在此部位上表现出来。

第三，多数部位压力值的相对大小情况存在偏差，具体表现为压力值相对较大、中等、较小的部位不同，如图 5.15 所示。

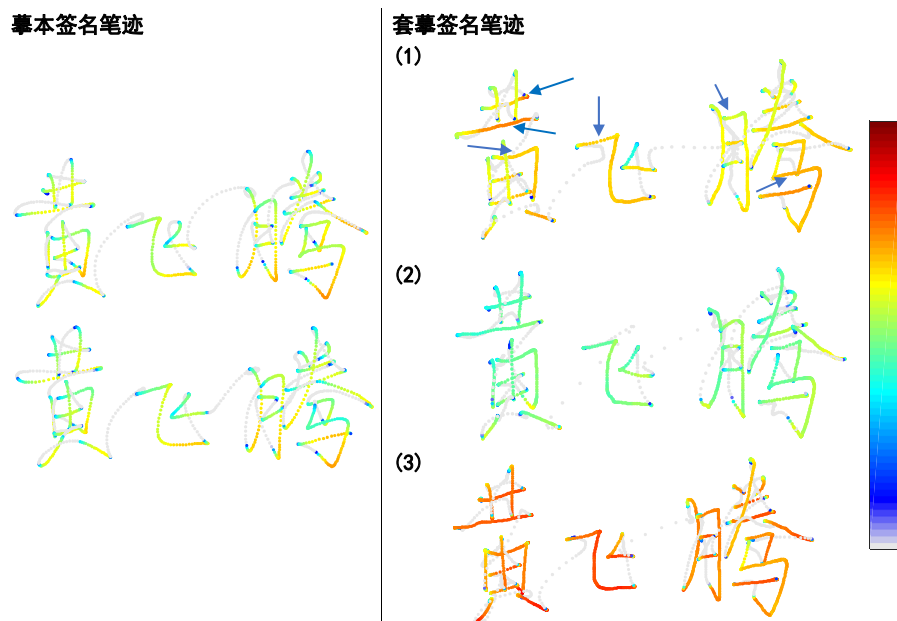


图 5.15 M4 套摹与摹本部分签名笔迹书写压力分布对比

图 5.15 中(1)签名笔迹的“黄”字“艹”部上部的横笔末端与下部横笔、“黄”字“由”部上部的横笔、“飞”字的横笔、“腾”字“月”部上部横笔、“腾”字“马”部中部的横笔等处与摹本签名笔迹中对应部位相比，压力值相对大小均偏大；(2)签名笔迹除了个别部位以外，绝大多数部位压力值的相对大小均偏小；(3)签名笔迹除了个别部位以外，绝大多数部位压力值相对大小情况均偏大。

第四，笔画的压力值变化规律存在差异，具体表现为笔画压力值变化与恒定规律相反、压力值大小变化方向等，如图 5.16 所示。

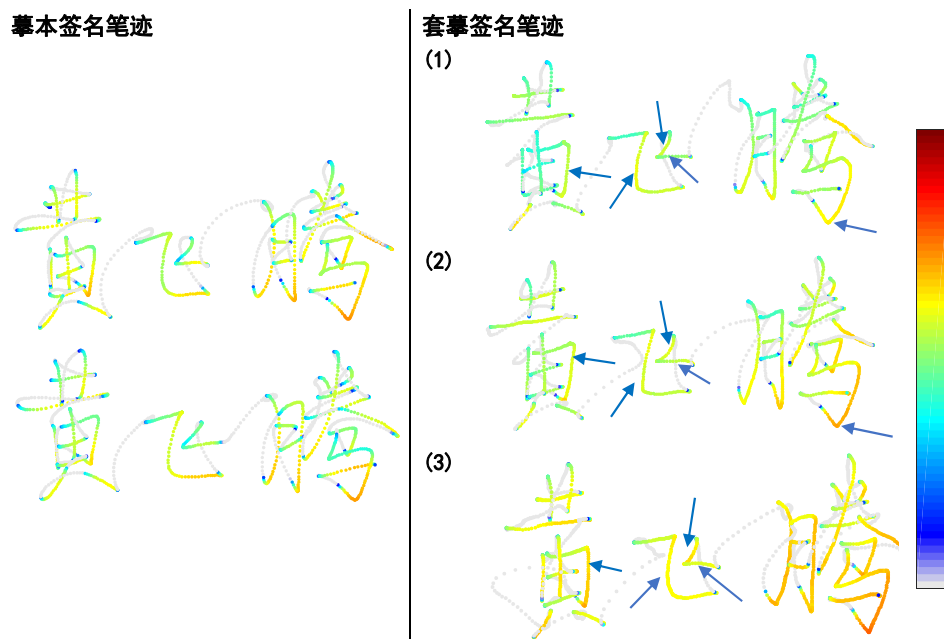


图 5.16 M1 套摹与摹本部分签名笔迹书写压力分布对比

图 5.16 中(1)、(2)、(3)签名笔迹的“黄”字“由”部右部的竖钩笔、“腾”字“马”部的竖钩笔压力值基本恒定、变化极小，而在摹本签名笔迹中对应笔画压力值发生明显变化；(1)、(2)、(3)签名笔迹的“飞”字的撇点连笔压力值由大变小，而在摹本签名笔迹中该笔画压力值由小变大；(1)、(2)签名笔迹的“飞”字斜钩笔压力值由大变小，(3)签名笔迹的“飞”字斜钩笔压力值基本恒定，变化极小，而在摹本签名笔迹中该笔画压力值由小变大。

套摹书写时，摹仿者往往按照自己的书写习惯进行描摹，这仅能使套摹签名笔迹在形态上与摹本签名笔迹相似，然而在各部位、笔画的用笔力度却难相似。有些摹仿者在套摹书写时，直接沿着摹本签名笔迹的轨迹形态进行“描摹”，一定程度上违背了笔迹的运笔规则，忽略了正常运笔过程中的轻重疾徐，使得签名笔迹中大多数笔画压力值基本恒定、变化极少，如图 5.17 所示。

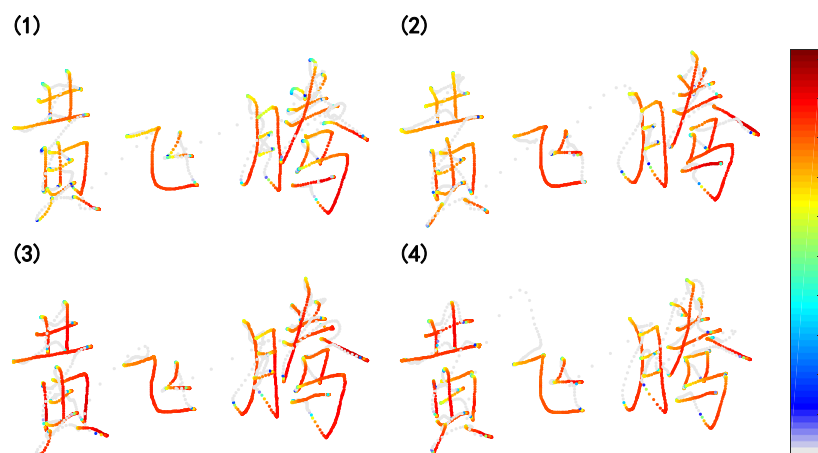


图 5.17 M18 套摹部分签名笔迹书写压力分布

第五，套摹与摹本签名笔迹之间并非在各个方面完全不同，或多或少也会存在一些相似之处，甚至有时候二者书写压力分布的差异并不明显，如图 5.18 所示。M2 的这两枚套摹签名笔迹与摹本签名笔迹除了少数笔画的压力值变化规律、压力值为零的部位存在差异外，其他基本相似。

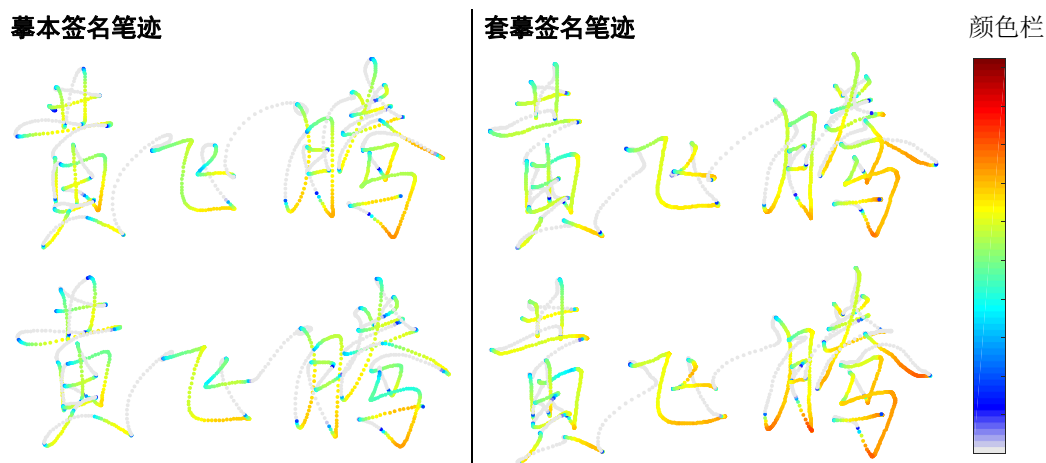


图 5.18 M2 套摹与摹本部分签名笔迹书写压力分布对比

分析其原因主要有：一、虽然不同人的书写习惯不同，但是个人的笔迹书写要受到社会共同书写规范与运笔规则的影响与制约，不同人的签名笔迹也具有一定的相似性；

另一方面，摹仿者与被摹仿者书写笔迹所用的力度本身就相似。因此，这些相似之处不能认为是由于个人书写习惯的差异而产生的本质差异，应该归因为书写运动的共同性或相似性。

5.3.2 临摹与摹本签名笔迹书写压力分布对比

将摹仿书写组每名志愿者临摹签名笔迹与摹本签名笔迹的书写压力分布逐一对比分析，由于篇幅所限，无法一一罗列全部分析过程，在此选取 M7 临摹签名笔迹与摹本签名笔迹书写压力分布的详细对比分析过程进行展示。

M7 的十枚临摹签名笔迹的书写压力分布，见附录图 B8，其部分内容，如图 5.19 所示。其中，(1)、(2)为摹本签名笔迹书写压力分布，(3)、(4)为临摹签名笔迹书写压力分布。

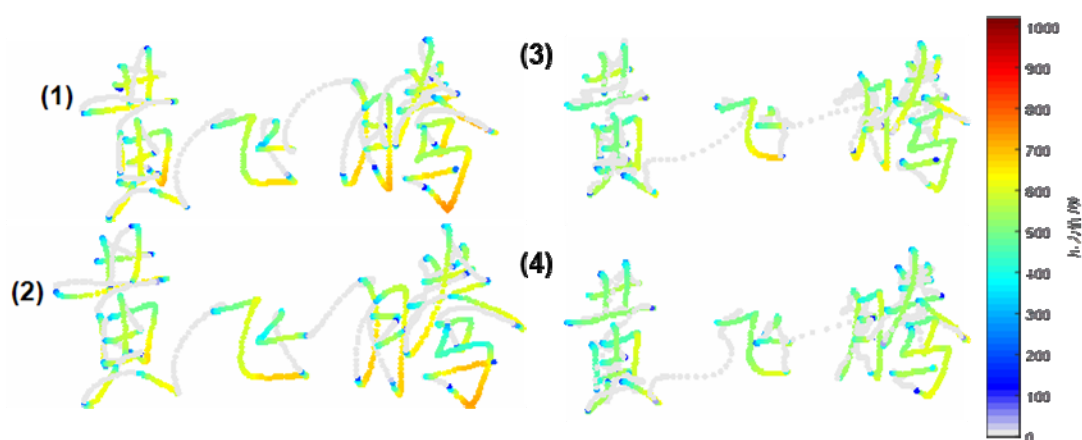


图 5.19 M7 临摹与摹本部分签名笔迹书写压力分布对比

对比 M7 临摹签名笔迹与摹本签名笔迹，发现有以下特点：1. 临摹签名笔迹整体压力值小于摹本签名笔迹整体压力值；2. 压力值为零的部位存在明显偏移，且摹本签名笔迹的该部位自然流畅，无多余动作，整体节奏感较好，而临摹签名笔迹的该部位则显得不自然，出现大量停顿、抖动、紊乱现象，整体节奏感相对较差；3. 多数部位压力值的

相对大小存在差异，如：“黄”字“艹”部下部的横笔、“黄”字右部的点笔、“飞”字点笔、“腾”字“𠂔”部的长撇笔、“腾”字“马”部下部的横笔与竖钩笔等与摹本签名笔迹对应部位相比，压力值相对大小均偏小；4.笔画的压力值变化规律存在差异，如：“黄”字“由”部右部的竖钩笔、“飞”字斜钩笔、“腾”字“𠂔”部的长撇笔、“腾”字“马”部的竖钩笔、“腾”字“月”部的竖钩笔等压力值基本恒定，而摹本签名笔迹中对应笔画压力值发生明显变化。

综合来看，志愿者 M7 临摹签名笔迹与摹本签名笔迹的书写压力分布存在明显差异。

对摹仿书写组每名志愿者临摹签名笔迹与摹本签名笔迹的书写压力分布的对比分析结果进行归纳、总结，结论如下：

第一，签名笔迹的整体压力值存在差异，主要表现为签名笔迹书写压力分布图主色调差异明显。对摹仿书写组 23 名志愿者临摹签名笔迹与摹本签名笔迹整体压力值差异情况进行统计，结果如下：有 8 人临摹签名笔迹整体压力值较大，占 35%；有 12 人临摹签名笔迹整体压力值较小，占 52%；有 3 人临摹签名笔迹与摹本签名笔迹整体压力值无明显差异，占 13%。

第二，压力值为零的部位存在明显偏移，且临摹签名笔迹的多数连接部分在节奏感、自然流畅度、连贯性等方面的均较差。

临摹书写时，摹仿者的运笔过程、笔顺等与被摹仿者的存在差异，而且摹仿者在书写每一笔画时往往需要短暂的“思考”过程，同时该部位容易被摹仿者忽略，往往暴露出明显的摹仿特征。

第三，多数部位压力值的相对大小情况存在偏差，具体表现为压力值相对较大、中等、较小的部位不同，如图 5.20 所示。

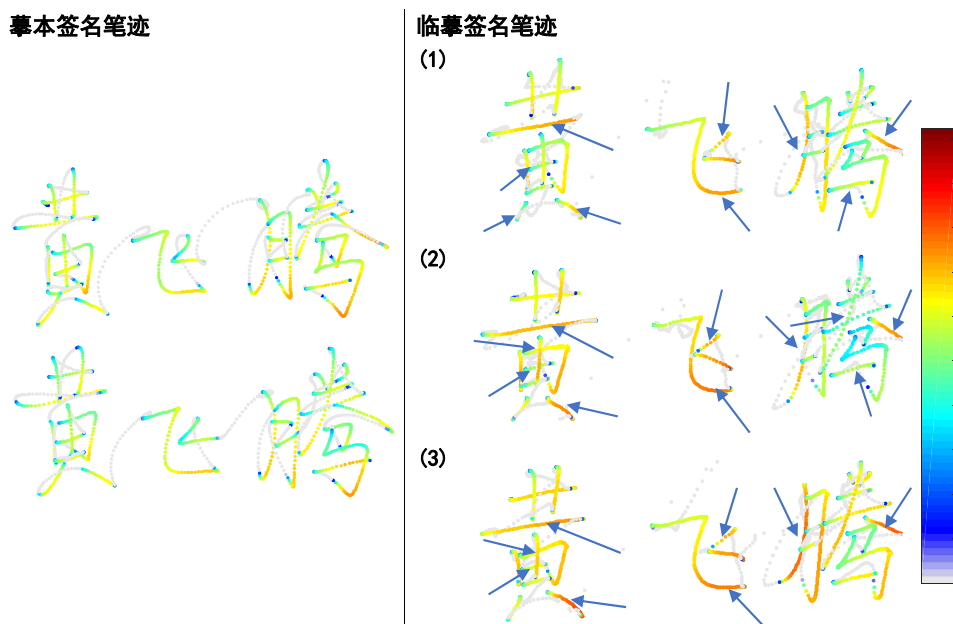


图 5.20 M22 临摹与摹本部分签名笔迹书写压力分布对比

图 5.20 中(1)、(2)、(3)签名笔迹的“黄”字“艹”部下部的横笔、“黄”字右部的点笔、“飞”字的撇笔、“飞”字斜钩笔的下部、“腾”字“月”部的撇笔、“腾”字“𠂔”部的捺笔等与摹本签名笔迹对应的部位相比，压力值相对大小均偏大，“黄”字“由”部内部的横笔压力值相对大小偏小；(1)、(2)签名笔迹的“腾”字“马”部下部的横笔压力值相对大小偏小；(2)、(3)签名笔迹的“黄”字“由”部上部的横笔压力值相对大小偏大；(2)签名笔迹的“腾”字“月”部的竖钩笔、“腾”字“𠂔”部的横笔与长撇笔等压力值相对大小均偏小。

第四，笔画的压力值变化规律存在差异，其差异主要有笔画压力值变化与恒定规律相反、压力值大小变化方向等，如图 5.21 所示。

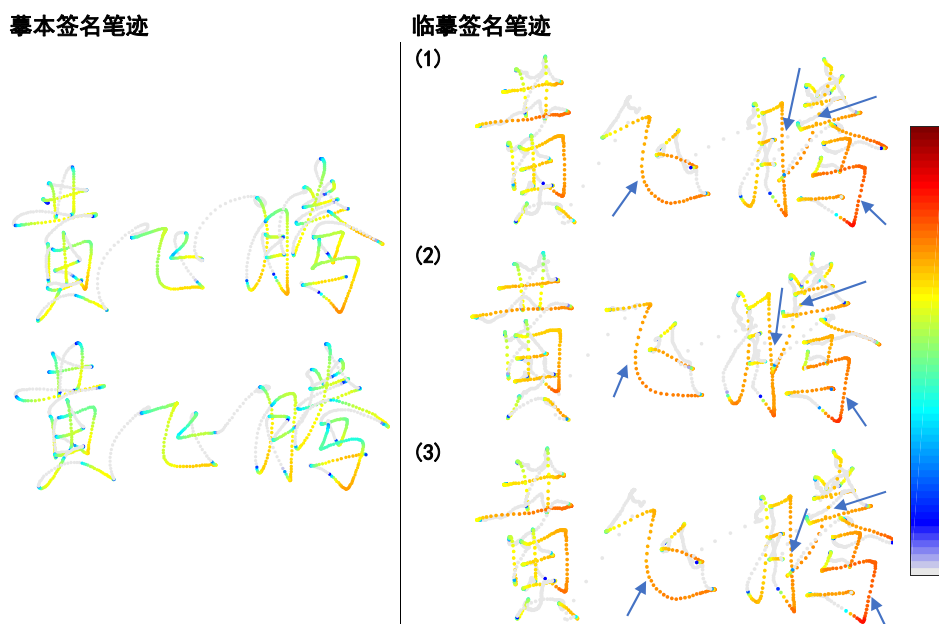


图 5.21 M11 临摹与摹本部分签名笔迹书写压力分布对比

图 5.21 中(1)、(2)、(3)签名笔迹的“飞”字的斜钩笔、“腾”字“月”部的竖钩笔、“腾”字“关”部的撇笔、“腾”字“马”部的横折钩笔等笔画压力值基本恒定，而摹本签名笔迹中的对应笔画压力值均由小变大，变化明显。

临摹书写时，摹仿者往往按照自己的书写习惯进行摹写，不同于套摹的是，临摹签名笔迹中笔画的书写大多符合一般的运笔规则，多数笔画均有较为自然的轻重缓急的变化，但由于摹仿者无法见到摹本签名笔迹的书写压力分布，且该特征不易被摹仿，所以临摹签名笔迹多数部位的的压力值相对大小、笔画压力值变化规律与摹本签名笔迹不相符。

第五，临摹与摹本签名笔迹之间并非在各个方面完全不同，或多或少也会存在一些相似之处，如整体压力值相似、起收笔压力值相似、部分笔画压力变化规律相近等。

分析其原因主要有：一、虽然不同人的书写习惯不同，但是不同人的签名笔迹也具有一定的相似性，个人的笔迹书写要受到社会共同书写规范与运笔规则的影响与制约；

另一方面，摹仿者与被摹仿者书写笔迹所用的力度本身就相似。因此，这些相似之处不能认为是由于个人书写习惯的差异而产生的本质差异，应该归因为书写运动的共同性或相似性。

5.4 实验小结

同一条件下同一人电子签名笔迹的书写压力分布具有稳定性，具体表现为整体压力值相近，压力值为零的部位大体相同，各部位压力值相对大小情况相似，多数笔画压力值变化规律相似。

书写姿势改变对书写压力分布影响较小，不同姿势书写的签名笔迹书写压力分布，除整体压力值存在差异外，其他方面基本稳定；书写模式改变对书写压力分布影响较大，不同书写模式的签名笔迹书写压力分布的整体压力值、压力值为零的部位、多数部位压力值相对大小情况相似、多数笔画压力值变化规律均差异明显，但自然书写个性化程度相对较低者的书写压力分布依然存在部分相似之处。

摹仿与摹本签名笔迹的书写压力分布存在明显差异，与摹本签名笔迹相比，套摹、临摹签名笔迹书写压力分布均存在整体压力值偏大或偏小、压力值为零的部位偏移且不流畅、多数部位压力值相对大小情况不同、多数笔画压力值变化规律不一致。

结 论

本文以中文电子签名笔迹为研究对象，借助电子签名设备及其解析软件，结合描述性统计、假设检验、时间序列相似性度量分析三种方法，研究电子签名笔迹的书写时长、平均速度、平均压力、书写速度变化曲线、书写压力分布五个动态特征，分别探究同一条件下同一人电子签名笔迹动态特征的稳定性、条件变化对电子签名笔迹动态特征的影响、摹仿与摹本电子签名笔迹动态特征的差异，得出以下结论：

一、（1）同一条件下同一人电子签名笔迹的书写时长、平均速度、平均压力具有稳定性，变异系数大多低于 15%，变异程度较低。（2）书写姿势改变对书写时长影响较小，对平均速度、平均压力影响较大。与坐姿签名相比，站姿签名时书写时长相近，平均速度、平均压力较大。（3）书写模式改变对书写时长、平均速度、平均压力影响均较大。与工整签名相比，自然签名时书写时长较小，平均速度、平均压力较大。（4）摹仿与摹本电子签名笔迹的书写时长、平均速度、平均压力均有明显差异。与摹本签名相比，临摹、套摹签名时书写时长均较大，平均速度均较小，套摹签名时平均压力较大，临摹签名时平均压力较小。

二、（1）同一条件下同一人电子签名笔迹的书写速度变化曲线具有稳定性，相关系数较大，速度变化曲线相似程度较高。（2）书写姿势改变对书写速度变化曲线影响较小，不同姿势书写的电子签名笔迹之间的书写速度变化曲线相关系数较大，相似程度较高。（3）书写模式改变对书写速度变化曲线影响较大，不同书写模式的电子签名笔迹之间的书写速度变化曲线相关系数较小，相似程度较低。（4）摹仿与摹本电子签名笔迹的书写速度变化曲线有明显差异，临摹、套摹与摹本签名笔迹之间的速度变化曲线相关系数均较小，相似程度均较低。

三、(1)同一条件下同一人电子签名笔迹的书写压力分布具有稳定性,书写压力分布的整体压力值、压力值为零的部位、多数部位压力值相对大小情况、多数笔画压力值变化规律均相似或一致。(2)书写姿势改变对书写压力分布的影响较小,除整体压力值外,其他方面均相似或一致。(3)书写模式改变对书写压力分布的影响较大,不同书写模式的电子签名笔迹在各个方面均有明显差异。(4)摹仿与摹本电子签名笔迹的书写压力分布有明显差异。与摹本相比,临摹、套摹电子签名笔迹均存在整体压力值偏大或偏小、压力值为零的部位发生偏移、多数部位压力值相对大小情况不同、多数笔画压力值变化规律不一致的情况。

本研究旨在启发检验人员在电子签名笔迹检验实践中注意对动态特征的利用,同时还应注意以下两点:1.书写姿势的改变对电子签名笔迹动态特征产生的影响较小,与检材书写姿势不同的样本亦可使用;书写模式改变对电子签名笔迹动态特征产生的影响较大,所以搜集样本时,应尽量搜集书写模式相近的样本。2.仅凭某一个动态特征不足以作为肯定或否定的依据,应将各个动态特征全面考虑,同时与静态特征检验相结合综合分析、判断。

由于实验时间与条件所限,本研究也存在着一定的不足之处。一是对动态特征数据的挖掘、分析不够深入,仅研究了五个特征,实验样本量也较少;二是仅考虑了书写姿势与书写模式两种条件变化对动态特征的影响;三是未对摹仿者自身书写水平与摹仿水平、摹仿练习时间因素做深入研究。

希望各位同仁们能够在本文研究的基础上,进一步对电子签名笔迹的动态特征展开更为深入的研究。

参考文献

- [1]陈琦. 电子签名认证机构的责任认定机制[D]. 华东政法大学, 2011.
- [2]帅兴国. 电子认证之民事责任与风险防范[D]. 西南政法大学, 2011.
- [3]杜栋. 电子商务合同问题研究[D]. 烟台大学, 2013.
- [4]吕西萍. 浅析电子商务中电子签名的法律效力[J]. 对外经贸实务, 2007(05): 62-64.
- [5]丘彪山. 电子签名法律问题探析[D]. 大连海事大学, 2002.
- [6]涂舜. 数字手写笔迹基础理论探讨——兼与电子签名比较分析[J]. 铁道警察学院学报, 2016, 26(05): 48-53.
- [7]黄建同. 文件检验[M]. 北京: 中国人民公安大学, 2013.
- [8]王小怡. 签名笔迹司法鉴定理论与实务研究[D]. 华东政法大学, 2016.
- [9]汤纪东. 签名笔迹及其检验研究[J]. 犯罪研究, 2011(1): 91-98.
- [10]Heckerroth J, Boywitt C D. Examining authenticity: an initial exploration of the suitability of handwritten electronic signatures[J]. Forensic science international, 2017, 275: 144-154.
- [11]郭晓冰, 张良, 蔡世君, 陈雨露. 触控屏专利技术分析[J]. 河南科技, 2016(09): 80-81.
- [12]赵海增, 刘腾飞. 电容式触摸屏技术综述[J]. 河南科技, 2018(19): 10-12.
- [13]陈康才, 李春茂. 电阻式触摸屏两点触摸原理[J]. 科学技术与工程, 2012, 12(18): 4525-4529.
- [14]韩丽. 电磁式电子签名笔迹鉴定问题的实证研究[D]. 华东政法大学, 2020.
- [15]胡萍. 成人练字前后笔迹特征的实验研究[D]. 中国人民公安大学, 2017.
- [16]于海生. 高水平摹仿签名笔迹动态特征的量化分析[D]. 华东政法大学, 2020.
- [17]贾玉文. 笔迹检验[M]. 北京: 警官教育出版社, 1999.
- [18]陈晓红. 司法笔迹鉴定[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- [19]陈晓红, 贾玉文. 签名笔迹动态特征的理论研究[J]. 中国司法鉴定, 2007(01): 40-43.

- [20]屈音璇,付文波,翟金良.站姿电子屏手写签名笔迹实验研究[J].广东公安科技,2017,25(03):33-35.
- [21]A Thiéry, Marquis R, Montani I. Statistical evaluation of the influence of writing postures on on-line signatures. Study of the impact of time[J]. Forensic science international, 2013, 230(1-3): 107-116.
- [22]郝艳丽,陈艺娟.浅析 POS 机数字手写签名笔迹与其他类型手写签名笔迹的异同[J].法制博览,2017(22):267-269.
- [23]涂舜.不同感应方式的书写设备对电子签名笔迹的影响研究[J].中国人民公安大学学报(自然科学版),2020,26(03):7-13.
- [24]涂舜.不同视觉状态的书写设备对电子签名笔迹的影响研究[J].中国人民公安大学学报(自然科学版),2019,25(04):8-14.
- [25]周桂雪,段海惠,潘自勤.数字化静态手写签名笔迹失真度研究[J].中国刑警学院学报,2019(04):96-103.
- [26]涂舜.电子签名笔迹与普通签名笔迹的笔迹特征比较分析[J].中国刑警学院学报,2019(04):89-95.
- [27]闫龙飞,王立梅.数字手写签名笔迹检验实验研究[J].中国司法鉴定,2016(04):25-29.
- [28]于彬,杜英杰,班智慧.电子触控笔签名与正常签名笔迹特征比较的实验研究[J].中国刑警学院学报,2017(04):72-74.
- [29]朱裴.电子签名鉴定研究[D].华东政法大学,2018.
- [30]邹亦,王相臣,栾仪.不同电容屏上的电子签名笔迹特征规律[J].广东公安科技,2020,28(01):28-30+63.
- [31]Brault J J, Plamondon R. A complexity measure of handwritten curves: Modeling of dynamic signature forgery[J]. IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics, 1993, 23(2): 400-413.

- [32]Impedovo D, Pirlo G. Automatic signature verification: The state of the art[C]. Systems man and cybernetics, 2008, 38(5): 609-635.
- [33]Linden J, Marquis R, Bozza S, et al. Dynamic signatures: A review of dynamic feature variation and forensic methodology[J]. Forensic science international, 2018, 291: 216-229.
- [34]Van Galen G P, Van Gemmert A W A. Kinematic and dynamic features of forging another person's handwriting[J]. Journal of forensic document examination, 1996, 9(1): 1-25.
- [35]Harralson H H. Forensic document examination of electronically captured signatures[J]. Digital evidence and electronic signature law review, 2012, 9: 67-73.
- [36]Houmani N, Garcia-Salicetti S, Dorizzi B. On assessing the robustness of pen coordinates, pen pressure and pen inclination to time variability with personal entropy[C]// IEEE International conference on biometrics: Theory. IEEE Press, 2009:1-6.
- [37]Sciacca E, Langlois-Peter M B, Margot P, et al. Effects of different postural conditions on handwriting variability[J]. Journal of forensic document examination, 2011, 21: 51-60.
- [38]Sciacca E, Langlois-Peter M B, Gilhodes J C, et al. The range of handwriting variability under different writing conditions[J]. J. Forensic doc. exam, 2008, 19: 5-13.
- [39]Mohammed L A. Elucidating dynamic features to discriminate between signature disguise and signature forgery behavior[D]. La Trobe University, 2011.
- [40]Tucha O, Mecklinger L, Walitza S, et al. Attention and movement execution during handwriting[J]. Human movement science, 2006, 25(4-5): 536-552.
- [41]Phillips J G, Ogeil R P, Müller F. Alcohol consumption and handwriting: A kinematic analysis[J]. Human movement science, 2009, 28(5): 619-632.
- [42]贾玉文, 陈晓红. 中文签名笔迹动态特征研究[J]. 证据科学, 2007(Z1): 210-214.
- [43]Mohammed L A, Found B, Caligiuri M, et al. The dynamic character of disguise behavior for text - based, mixed, and stylized signatures[J]. Journal of forensic sciences, 2011, 56: S136-S141.
- [44]Caligiuri M P, Mohammed L A, Found B, et al. Nonadherence to the isochrony principle in forged signatures[J]. Forensic science international, 2012, 223(1-3): 228-232.
- [45]Ahmad S M S, Ling L Y, Anwar R M, et al. Analysis of the effects and relationship of perceived handwritten signature's size, graphical complexity, and legibility with dynamic parameters for forged and genuine samples[J]. Journal of forensic sciences, 2013, 58(3): 724-731.
- [46]Li C K, Wong S K, Chim L C J. A prototype of mathematical treatment of pen pressure data for signature verification[J]. Journal of forensic sciences, 2018, 63(1): 275-284.

- [47]Michael Caligiuri, Linton Mohammed, Kinematic Validation of FDE Determinations about Writership in Handwriting Examination: A Preliminary Study[J]. Journal of the American society of questioned document examiners, 2018, 21(1): 3-12.
- [48]Linden J, Marquis R, Mazzella W. Forensic analysis of digital dynamic signatures: New methods for data treatment and feature evaluation[J]. Journal of forensic sciences, 2017, 62(2): 382-391.
- [49]Dewhurst, Tahnee, N, et al. Empirical investigation of biometric, non-visible, intra-signature features in known and simulated signatures[J]. The Australian journal of forensic sciences, 2016, 48(6): 659-675.
- [50]Caligiuri M P, Mohammed L. Signature dynamics in Alzheimer's disease[J]. Forensic science international, 2019, 302: 109880.
- [51]Rosenblum S, Werner P. Assessing the handwriting process in healthy elderly persons using a computerized system[J]. Aging clinical and experimental research, 2006, 18(5): 433-439.
- [52]Caligiuri M P, Kim C, Landy K M. Kinematics of Signature Writing in Healthy Aging[J]. Journal of forensic sciences, 2014, 59(4): 1020-1024.
- [53]邹杰, 孙宝林, 於俊. 基于笔画特征的在线笔迹匹配算法[J]. 自动化学报, 2016, 42(11): 1744-1757.
- [54]王晶. 基于汉字结构的在线笔迹验证研究[D]. 武汉理工大学, 2016.
- [55]王容霞. 基于 SVM 的在线手写签名认证研究[D]. 武汉理工大学, 2013.
- [56]Muramatsu D, Matsumoto T. Effectiveness of pen pressure, azimuth, and altitude features for online signature verification[C]//International conference on biometrics. Springer, Berlin, Heidelberg, 2007: 503-512.
- [57]Cpałka K, Zalasinski M, Rutkowski L. A new algorithm for identity verification based on the analysis of a handwritten dynamic signature[J]. Applied soft computing, 2016, 43: 47-56.
- [58]黄承杰. 基于动态时间规划的在线签名认证方法研究[D]. 中国科学技术大学, 2009.
- [59]Prunty M M, Barnett A L, Wilmut K, et al. Handwriting speed in children with Developmental Coordination Disorder: Are they really slower? [J]. Research in developmental disabilities, 2013, 34(9): 2927-2936.
- [60]Pirlo G, Diaz M, Ferrer M A, et al. Early diagnosis of neurodegenerative diseases by handwritten signature analysis[C]//International conference on image analysis and processing. Springer, Cham, 2015: 290-297.

- [61]Caligiuri M P, Teulings H L, Dean C E, et al. Handwriting movement analyses for monitoring drug-induced motor side effects in schizophrenia patients treated with risperidone[J]. Hum Mov, 2009, 28(5): 633-642.
- [62]Ambra B, Pedullà Ludovico, Laura B, et al. Evaluation of Handwriting Movement Kinematics: From an Ecological to a Magnetic Resonance Environment[J]. Frontiers in human neuroscience, 2016, 10.
- [63]Teulings H L, José L. Contreras-Vidal, Stelmach G E, et al. Parkinsonism Reduces Coordination of Fingers, Wrist, and Arm in Fine Motor Control[J]. Experimental neurology, 1997, 146(1): 0-170.
- [64]Slavin M J, Phillips J G, Bradshaw J L. Visual cues and the handwriting of older adults: A kinematic analysis[J]. Psychology and aging, 1996, 11(3): 521.
- [65]郑小艳, 王相臣, 于彬. 电子签名笔迹与传统签名笔迹特征的比较研究[J]. 广东公安科技, 2020, 28(04): 18-20.
- [66]崔桂彬, 鞠新华, 孟杨, 尹立新. 基于钢中残留奥氏体定量的 EBSD 扫描面积参数优化[J]. 金属热处理, 2021, 46(01): 225-229.
- [67]黄毅, 胡二琴. 葡萄酒质量评分的统计分析方法研究[J]. 长江大学学报(自科版), 2013, 10(04): 24-26+1.
- [68]陈锦超. 基于近红外高光谱成像技术的小麦粉掺杂检测研究[D]. 浙江理工大学, 2020.
- [69]张婷, 骆希, 蔡海生. 江西省耕地的动态变化及驱动因子[J]. 水土保持通报, 2014, 34(03): 305-310.
- [70]唐仲霞, 马耀峰, 魏颖. 青藏地区入境旅游共生关系检验研究[J]. 干旱区地理, 2012, 35(04): 671-677.
- [71]郭名利. 利用奥博 8000 笔迹量化检验仪对签名笔迹笔画凹痕深度的量化研究[D]. 中国人民公安大学, 2018.

附录A 各书写组相关数据统计图

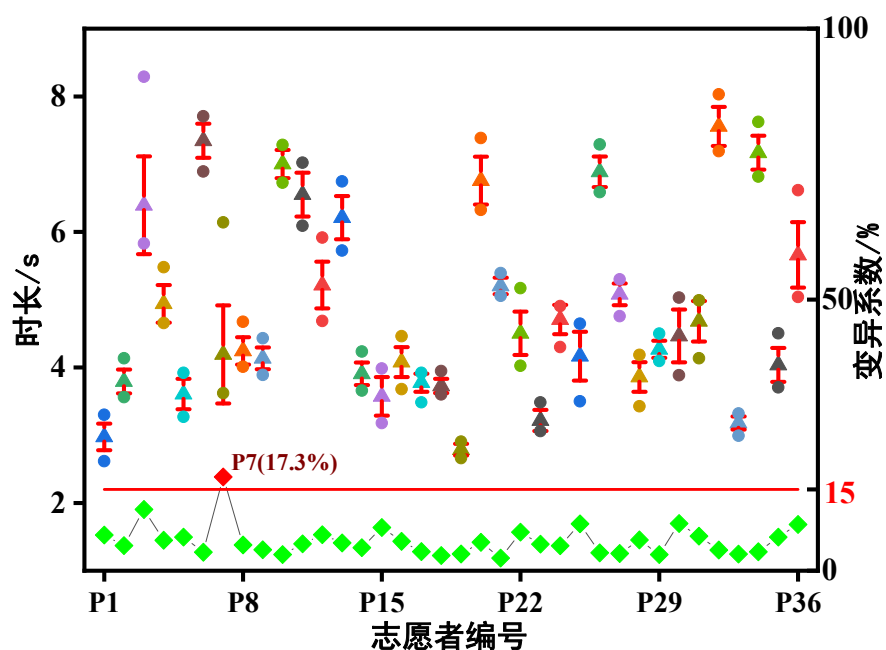


图 A1 书写姿势组 36 人站姿自然书写签名笔迹书写时长统计图

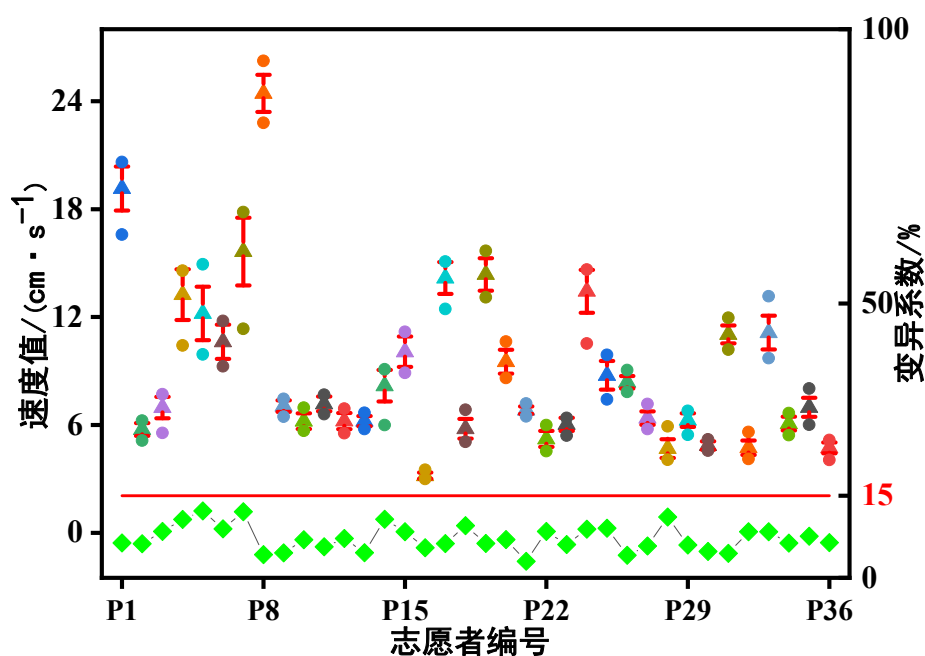


图 A2 书写姿势组 36 人站姿自然书写签名笔迹平均速度统计图

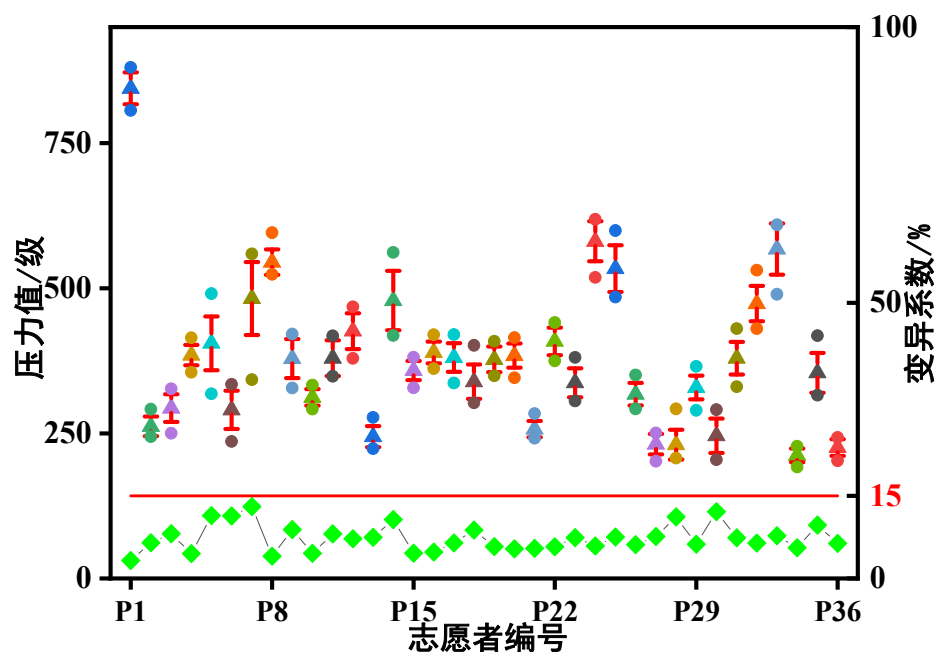


图 A3 书写姿势组 36 人站姿自然书写签名笔迹平均压力统计图

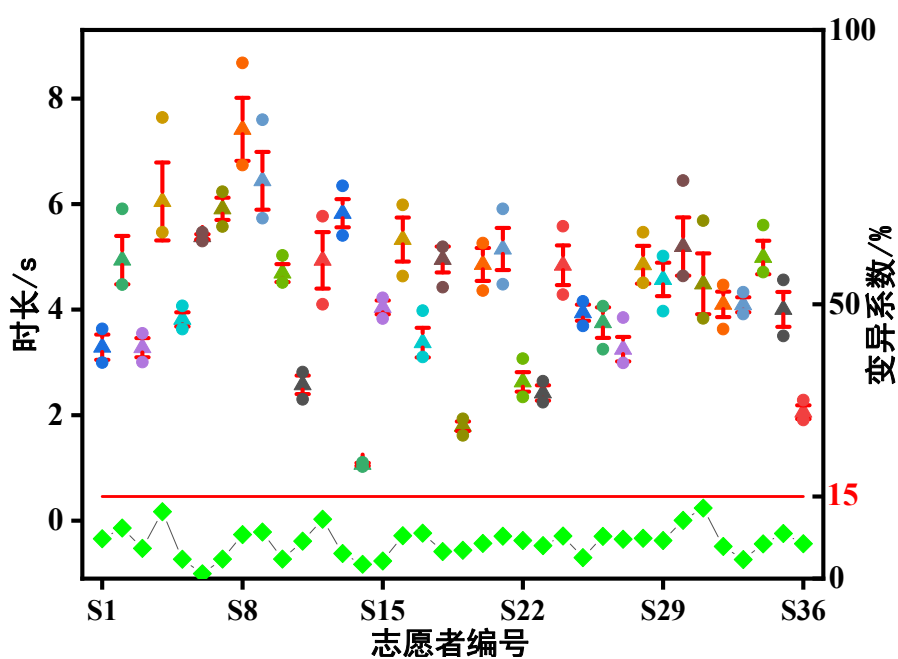


图 A4 书写模式组 36 人坐姿自然书写签名笔迹书写时长统计图

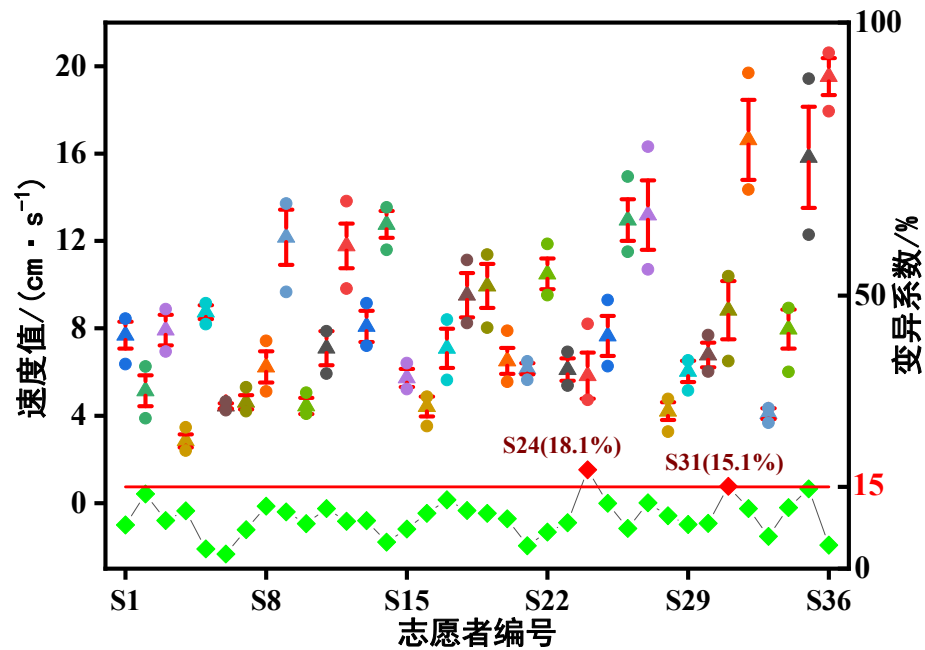


图 A5 书写模式组 36 人坐姿自然书写签名笔迹平均速度统计图

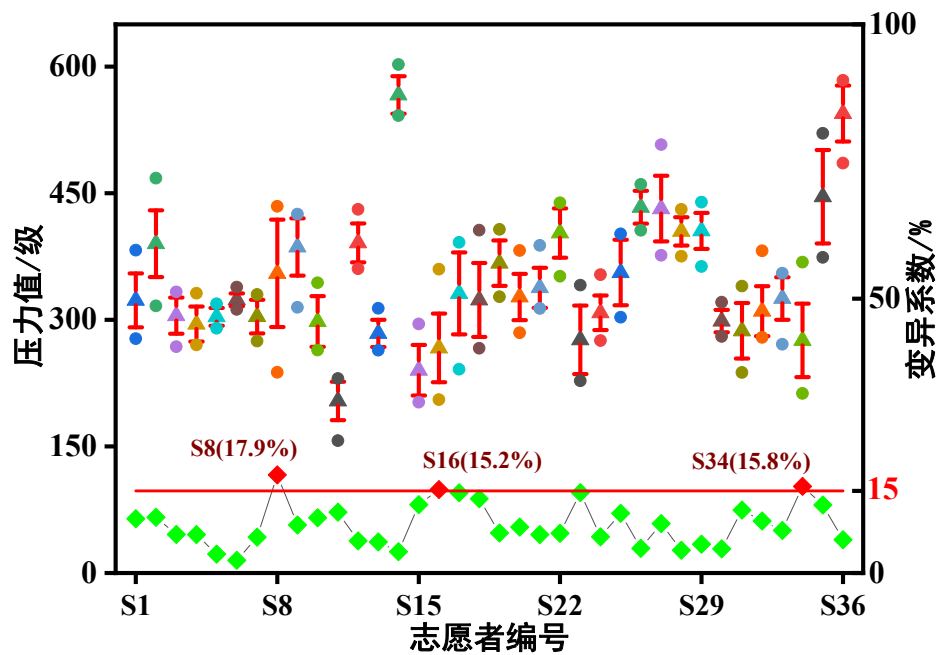


图 A6 书写模式组 36 人坐姿自然书写签名笔迹平均压力统计图

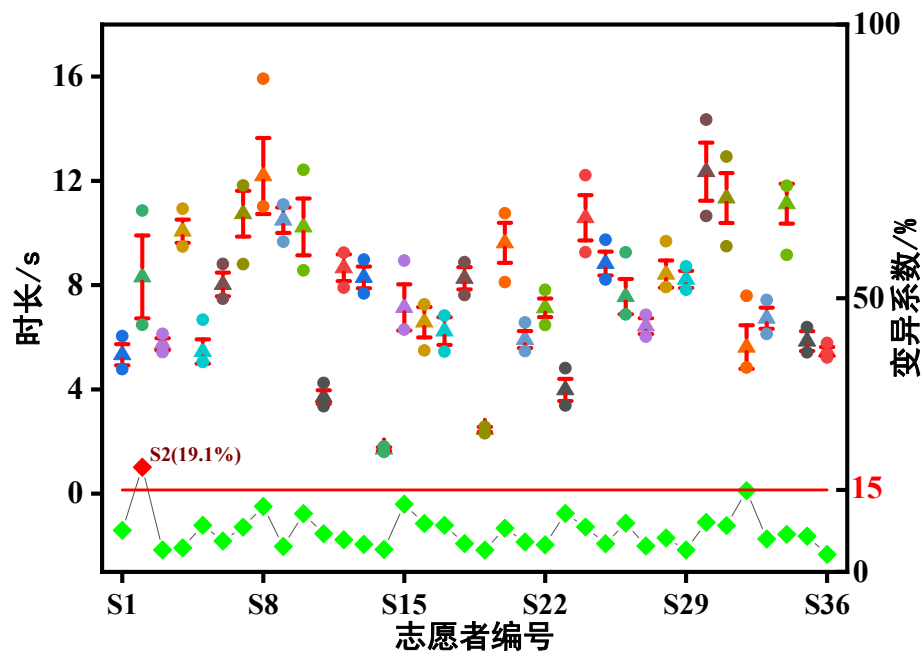


图 A7 书写模式组 36 人坐姿工整书写签名笔迹书写时长统计图

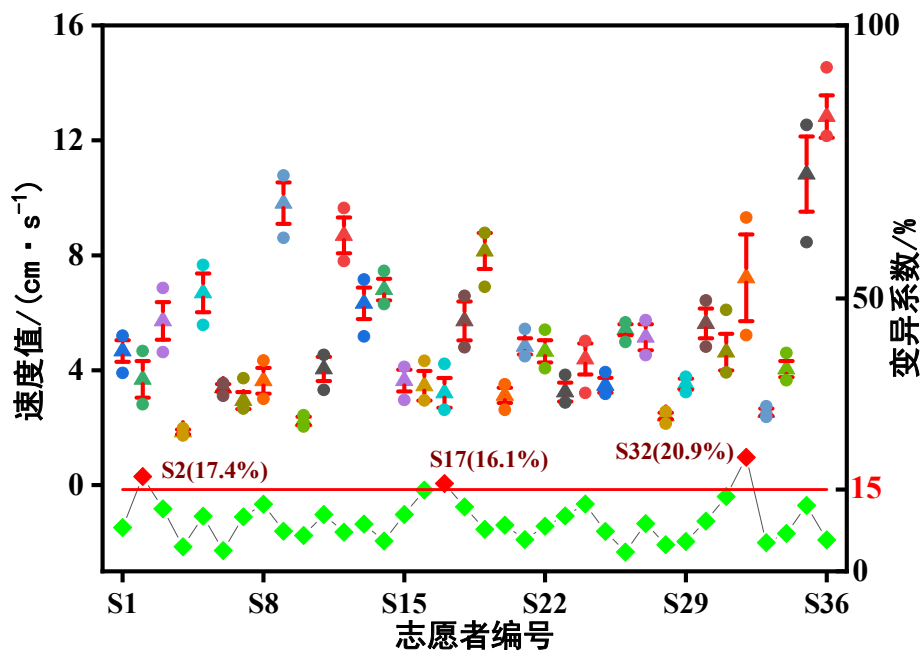


图 A8 书写模式组 36 人坐姿工整书写签名笔迹平均速度统计图

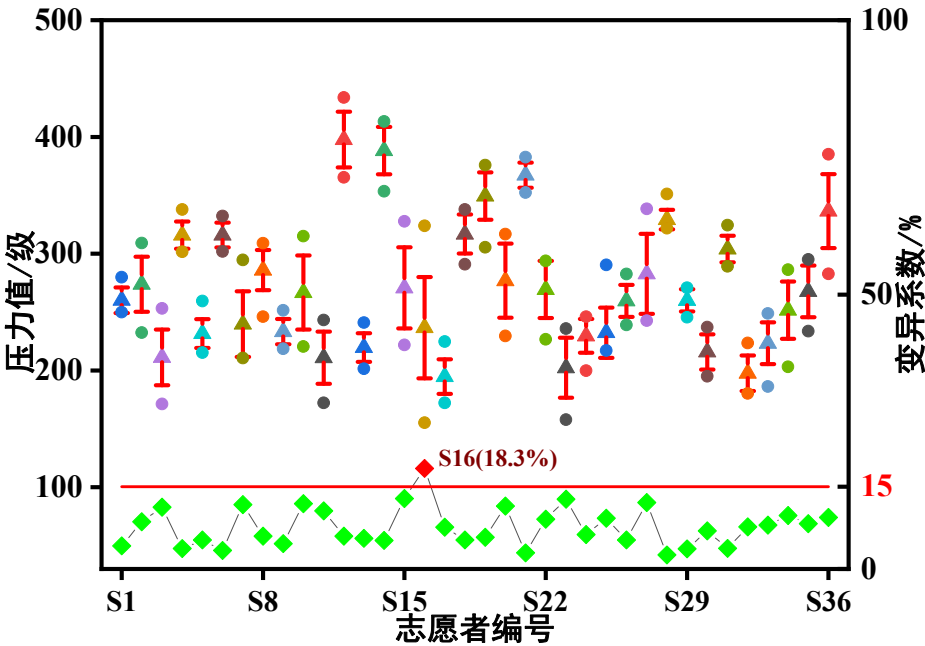


图 A9 书写模式组 36 人坐姿工整书写签名笔迹平均压力统计图

附录B 部分志愿者签名笔迹书写压力分布图

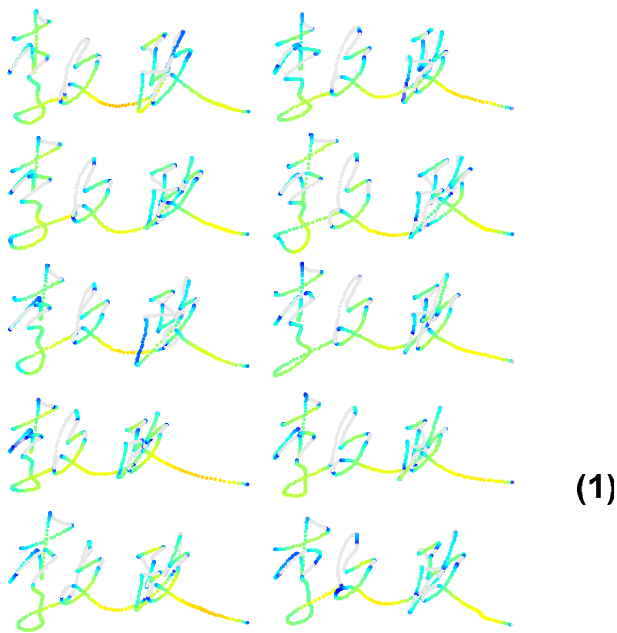


图 B1 P29 坐姿自然书写签名笔迹书写压力分布图 (3)

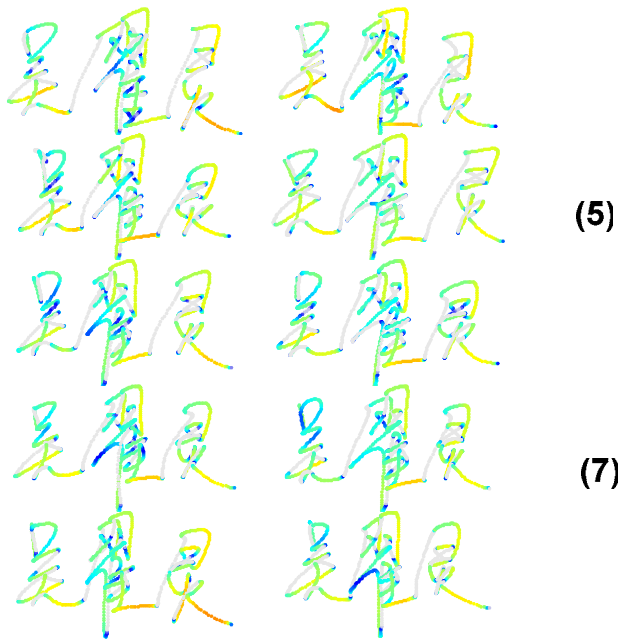


图 B2 P26 站姿自然书写签名笔迹书写压力分布图 (9)

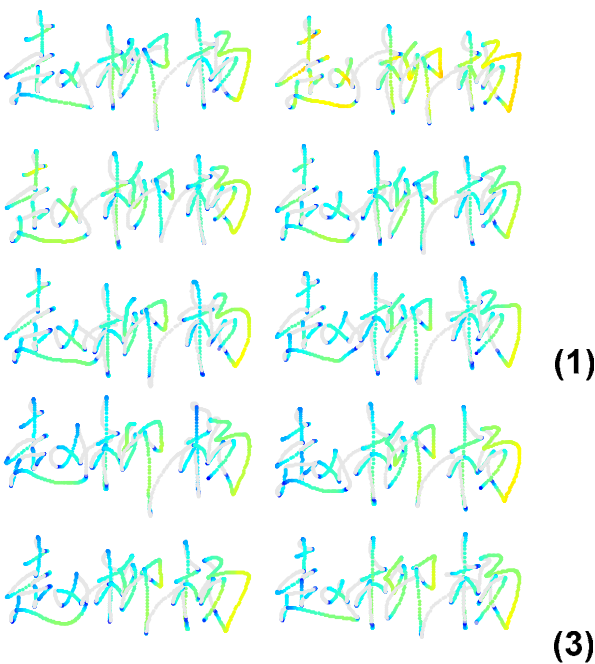


图 B3 S25 坐姿工整书写签名笔迹书写压力分布图

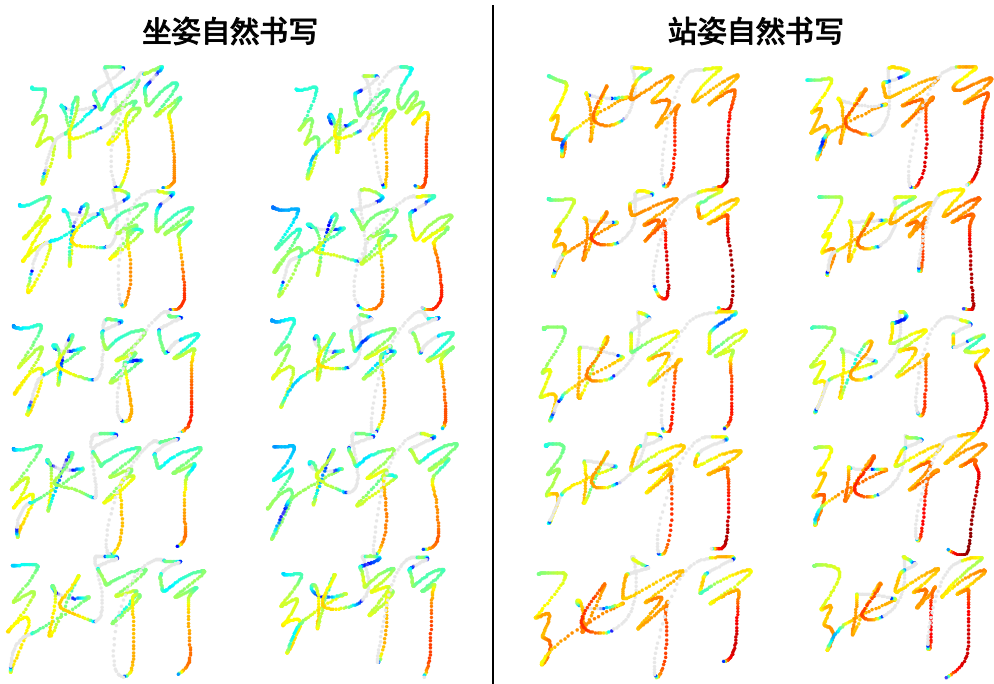


图 B4 P33 坐姿、站姿书写签名笔迹书写压力分布图

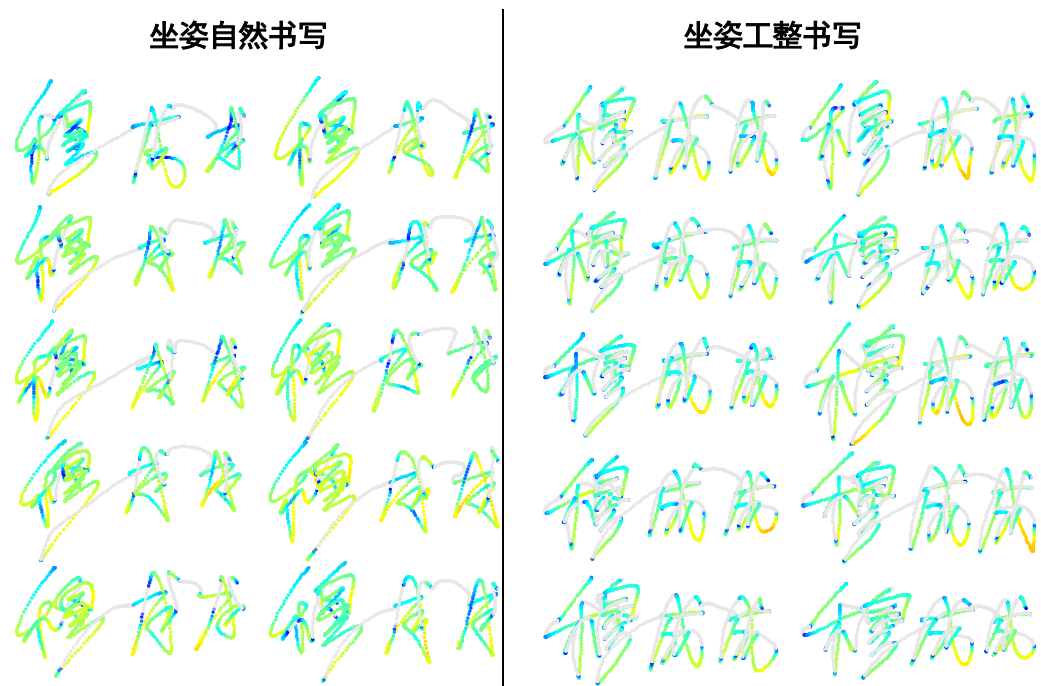


图 B5 S9 自然、工整书写签名笔迹书写压力分布图⁽³⁾⁽⁴⁾

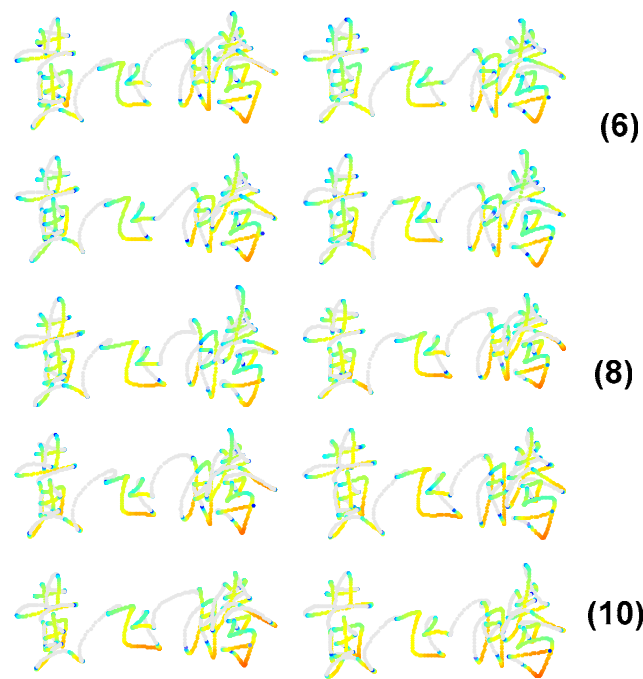


图 B6 摹本签名笔迹书写压力分布图

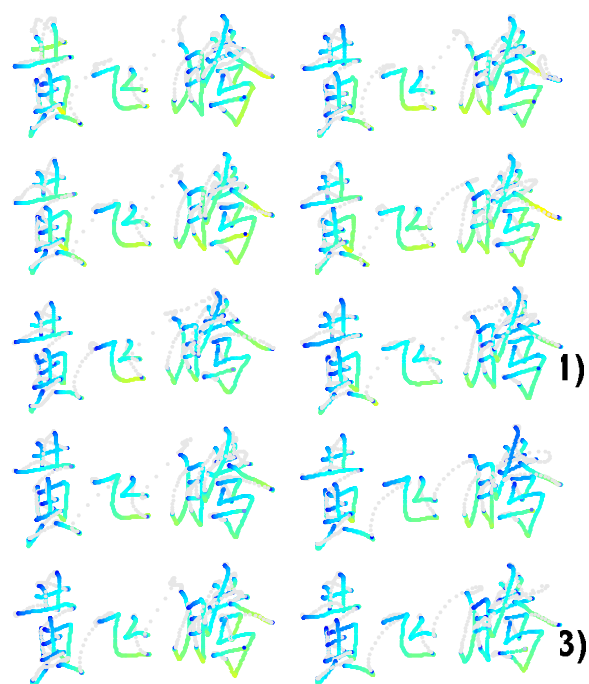


图 B7 M9 套摹签名笔迹书写压力分布图

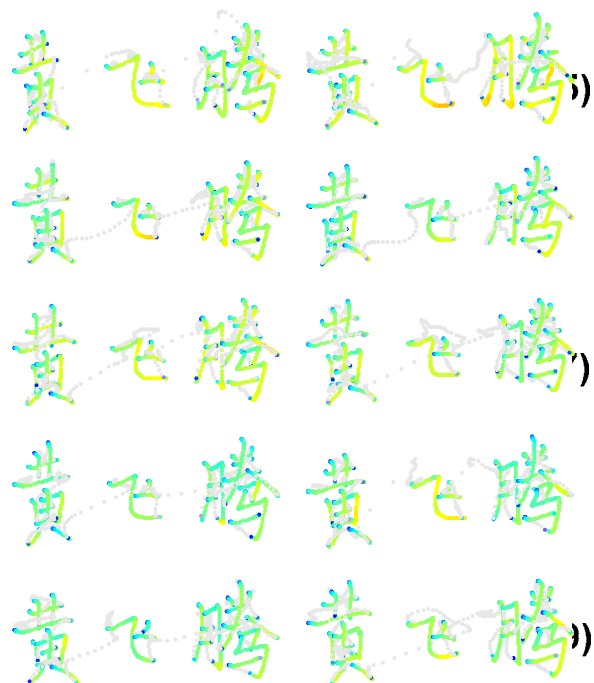


图 B8 M7 临摹签名笔迹书写压力分布图

在学研究成果

一、 在学期间取得的科研成果

参与课题：

[1]2019 中国人民公安大学拔尖创新人才培养经费资助硕士研究生项目《电子签名笔迹动态特征的量化分析及分类识别的研究》 项目编号：2019ssky009，项目负责人结项。

二、 在学期间所获的奖励

[1]2018.10 中国人民公安大学 研究生一等奖学业奖学金

[2]2018.12 中国人民公安大学 “迪安杯”能力验证大赛三等奖

[3]2019.04 中国人民公安大学 研究生三等学业奖学金

[4]2020.04 中国人民公安大学 研究生三等学业奖学金

[5]2015.09 中国人民公安大学 三好学生

[6]2015.09 中国人民公安大学 个人嘉奖

[7]2016.09 国家教育部 国家励志奖学金

三、 在学期间发表的论文

[1]电子签名笔迹的量化检验研究[J]. 辽宁警察学院学报, 2020, 22(02): 70-78.

[2]基于动态特征电子签名笔迹分类识别研究[J]. 现代计算机, 2020(07): 84-88.

致 谢

或许是前世修来的缘分，能让我与公大相识、相遇，时光荏苒，岁月匆匆，从本科到硕士，在这里成长、在这里追逐梦想、也在这里启航开启新的阶段。七年的时间有太多的回忆、太多的不舍、太多的眷恋，也有太多需要感谢的人，他们传授我知识、教我为人处事，为我拨开云雾，领着我一步步往前走，他们陪伴我成长、给我信心与力量，为我带来温馨与感动，让我的旅途不再孤单。

春蚕到死丝方尽，蜡炬成灰泪始干。在此，我由衷地感谢我的研究生导师——郝红光研究员，在学业的指导上总是无微不至、不厌其烦，尤其是对我毕业论文的指导，从论文的选题到实验计划再到撰写，逐字逐句地悉心指导，详细地教我改正每一处细节上的错误，同时老师严谨治学、一丝不苟的态度也深深地感染了我；在日常沟通交流中，老师严肃认真又和蔼可亲，总是关怀备至，让我感动；老师务实的工作作风、豁达的处世态度更使我受益终生。能够来公大求学是一种幸运，能够成为郝老师的学生更是幸运中的幸运。

感谢陈维娜、范琳媛老师，他们就像大姐姐一样关心、关爱着我的成长，帮我在求学的路上答疑解惑，在迷茫的时候为我指点迷津，给增添了许多快乐与阳光；还有李岳松、秦帅队长，他们帮助我历练意志品质，带着我由青涩走向成熟、带着我蜕变、升华，同时他们也像师兄能够与我们打成一片。

感谢瑞源公司的大力支持与帮助，为我提供了良好的实验条件，在我最需要的时候及时为我提供帮助、答疑解惑。

感谢师兄师姐们，他们把我领进了公大，从军训到第一次期末考再到考研、公务员考试、毕业论文，他们都给予了我很大的帮助，让我少走不少的弯路；感谢师弟师妹们，帮助我采集实验样本，不断鼓励支持我，让我得以圆满完成实验。

感谢与我朝夕相处、患难与共的同门、同窗们，我们一起哭过、一起笑过、一起疯狂过、一起憧憬过，让我在公大感受到亲人般的温暖。

感谢我的家人们，默默地守候在我的身边，不断为我打气加油，陪伴我度过那段最难熬的时光，陪我完成学业，稳步向前。

七年的求学生涯即将画上句号，我也将要离开校园走向更远的远方，感恩感谢公大给我的一切，我会永远记住公大“忠诚求实，勤奋创新”的校训，记住老师、队长的谆谆教诲。星光不问赶路人，时光不负有心人，我们踏着光芒离去，定然带着荣耀归来！