

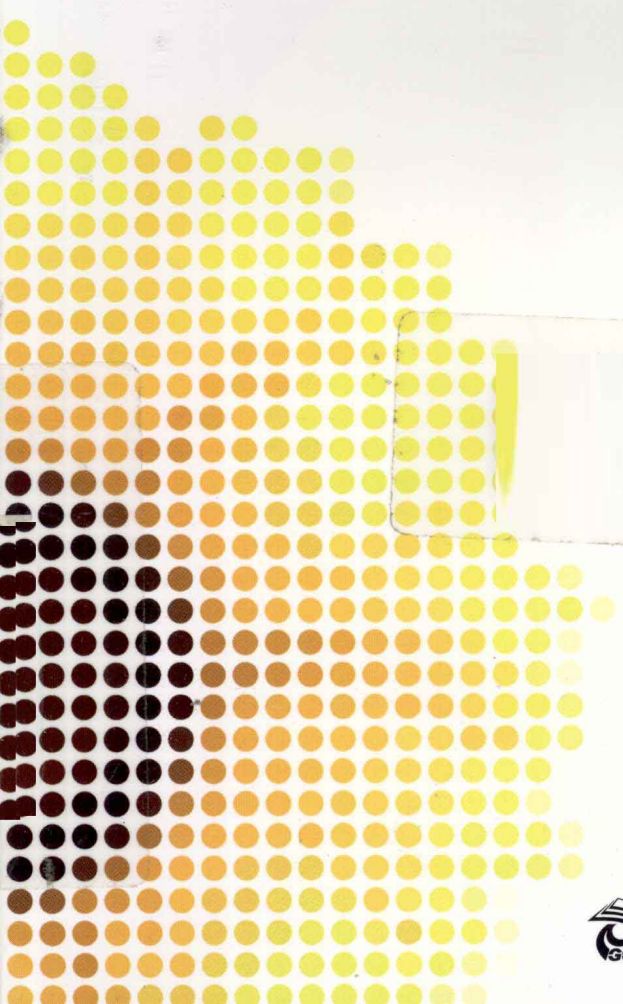
21世纪数字印刷专业教材

喷墨印刷

PENMO
YINSHUA



姚海根 孔玲君 徐 东 姜中敏 © 编著



21世纪数字印刷专业教材

喷墨印刷

姚海根 孔玲君 编 著
徐 东 姜中敏

印刷工业出版社

内容提要

本书针对目前已商业化的喷墨印刷技术展开讨论,主要涉及连续喷墨和按需喷墨技术。各种喷墨技术走过了各自不同的发展道路,这成为第一章讨论的主要内容。喷墨印刷伴随复杂的液固偶联现象,以流体运动为主,为此需要基本的流体力学知识,这是编写第二章的主要目的。第三章提供与连续喷墨和按需喷墨有关的理论基础知识,解释墨滴喷射时发生的重要物理现象。从第四章开始到第九章依次讨论各种喷墨技术,分别为连续喷墨中的Sweet方法和Hertz方法,按需喷墨中的热(气泡)喷墨、压电喷墨、相变喷墨和静电喷墨,涉及这些喷墨技术的发展历史、墨滴生成原理、驱动方法和墨水喷射控制等。第十章讨论设备结构和质量改善措施,分析往复式和全宽打印头喷墨印刷系统的结构特点,引起墨滴喷射误差的主要原因,解释打印模式与印刷质量的关系,介绍喷墨印刷设备的主要性能。

本书深入浅出并全面地分析和讨论各种已成熟的喷墨印刷技术,注重理论联系实际,可供各院校数字印刷专业学生使用,也可作为印刷图文信息处理、印刷工程、包装工程和办公自动化等专业的教学参考书。此外,本书可供数字印刷、商业印刷和包装等相关领域的专业人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

喷墨印刷/姚海根等编著.-北京:印刷工业出版社,2011.8

21世纪数字印刷专业教材

ISBN 978-7-5142-0202-1

I.喷… II.姚… III.特种印刷-技术 IV.TS83

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第107535号

喷墨印刷

编 著:姚海根 孔玲君 徐 东 姜中敏

责任编辑:张宇华

责任校对:郭 平

责任印制:张利君

责任设计:张 羽

出版发行:印刷工业出版社(北京市翠微路2号 邮编:100036)

网 址:www.keyin.cn pprint.keyin.cn

网 店://shop36885379.taobao.com

经 销:各地新华书店

印 刷:河北省高碑店市鑫宏源印刷包装有限公司

开 本:787mm×1092mm 1/16

字 数:400千字

印 张:16

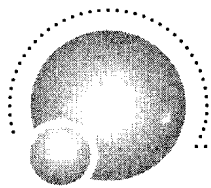
印 数:1~2000

印 次:2011年8月第1版 2011年8月第1次印刷

定 价:36.00元

I S B N : 978-7-5142-0202-1

◆ 如发现印装质量问题请与我社发行部联系 发行部电话:010-88275602



前 言

作为数字印刷的两大主流技术之一，喷墨印刷因直接喷射墨滴而具有独特的优势，油墨从墨滴发生器到承印材料的转移过程不需要任何中间介质的帮助。现有的各种控制技术足以确保墨滴喷射的稳定性，墨滴尺寸和形状的均匀性良好；只要纸张特性与墨水成分匹配合理，就可以转换成尺寸和均匀性良好的记录点，容易实现调频加网技术。

墨水或通过热作用转换成的“墨水”与喷墨印刷设备的墨水通道和喷嘴等部件构成液固偶联系统，其中流体运动对墨滴喷射效果占支配地位。因此，学习喷墨印刷需要掌握最基本的流体力学知识，但并非为了解墨水在通道或喷嘴等零部件内部的流体运动方程和动力学方程，而是注重流体力学的应用价值，直接引用流体力学领域的研究成果，例如层流喷射对喷墨印刷的意义、利用雷诺数和韦伯数估计墨滴扩展等。

本书第三章提供的知识都是理解各种喷墨印刷技术的基础，绝大多数内容不仅仅局限于流体力学，而是与喷墨印刷紧密地联系，例如墨滴扩展、墨水的表面张力与黏弹性、墨水的渗透与吸收、墨水干燥等，这些现象无论对连续喷墨或按需喷墨都普遍存在。

第四章和第五章讨论两种主要的连续喷墨技术，依次为 Sweet 方法和 Hertz 方法。以上两种技术都有成熟的商业产品，目前还在不断地发展，出现相互借鉴的趋势。由于连续喷墨通过外部加压和喷嘴口扰动的方式产生墨滴，因而具有输出速度快的天然优势，某些连续喷墨印刷机的工作速度相当快，几乎可以与传统印刷媲美。

第六章到第九章分别讨论按需喷墨的热（气泡）喷墨、压电喷墨、相变喷墨和静电喷墨，以热喷墨和压电喷墨为主。作为目前商业市场两种最主要的按需喷墨技术，热喷墨和压电喷墨采用完全不同的墨滴生成方法，本书对两者的区别给以足够的重视，热喷墨的重点放在加热和气泡动力特性上，压电喷墨则围绕体积变换原理展开。由于相变喷墨的油墨运用特点，从墨滴生成到定位于纸张经历两次转移过程，对承印材料的限制少，即使普通纸印刷的质量也相当高，因而前景良好。尽管静电喷墨技术在商业化过程遇到不少困难和问题，改善印刷质量的努力收效不大，但仍然有其应有的技术地位，再加上某些新的与射流静电牵引相关的技术正在出现，了解这种技术很有必要。

本书的最后一章讨论设备结构和质量改善措施。按需喷墨技术的快速发展使全宽打印头不再是连续喷墨的“专利”，热喷墨、压电喷墨和相变喷墨

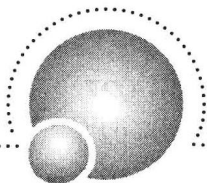
都实现了全宽结构打印头技术。尽管如此，小型喷墨印刷设备仍普遍使用往复式结构，为此有必要讨论与这种结构有关的各种特殊问题，例如打印蒙版和打印模式等，并分析引起墨滴定位误差的主要原因。

本书的出版得到教育部图文信息处理国家级教学团队建设经费的支持，编写本书不仅因为图文信息处理的重点应转移到后端输出技术，也因为与图文信息处理关系极其密切的数字印刷专业建设的需要。此外，在本书的编写过程中，作者所在学校的领导十分关心和支持，与兄弟院校教师的讨论也使作者受益匪浅，在此深表谢忱。

由于作者理论知识和实践经验的局限性，本书不足和疏漏之处在所难免，希望使用本书的广大读者和教师予以指正，作者在此预先对他们表示诚挚的谢意。

姚海报

2011年5月



第一章 概 述	001
1.1 喷墨印刷发展简史	001
1.1.1 喷墨印刷的起源	001
1.1.2 喷墨印刷的近代进展	002
1.1.3 喷墨印刷主要工艺的形成	003
1.1.4 从黑白到彩色	005
1.1.5 现代喷墨印刷技术	006
1.2 喷墨印刷的特点与应用趋势	006
1.2.1 喷墨印刷的独特优势	006
1.2.2 墨滴尺寸	008
1.2.3 打印头结构	009
1.2.4 质量	010
1.2.5 速度	011
1.2.6 喷墨印刷分类	012
1.2.7 喷墨印刷的现代应用趋势	013
第二章 墨水喷射动力学	014
2.1 流体力学的某些基本问题	014
2.1.1 连续介质模型	014
2.1.2 流体的基本物理性质	015
2.1.3 牛顿黏性实验	016
2.1.4 流体黏性	017
2.1.5 流体分类	017
2.1.6 流体静力学与流体运动学	018
2.2 流体力学的研究方法	019
2.2.1 理想流体运动微分方程	019
2.2.2 纳维-斯托克斯方程	020
2.2.3 黏性流体的运动状态	020
2.2.4 圆管的层流运动	021
2.2.5 圆管中的紊流问题	023
2.3 流体运动参数对评价墨水喷射质量的意义	024
2.3.1 典型流体参数	024

2.3.2	雷诺数	024
2.3.3	关于雷诺数的讨论	025
2.3.4	韦伯数	025
第三章 喷墨印刷的理论基础		027
3.1	连续喷射墨水流的断裂问题	027
3.1.1	层流喷射	027
3.1.2	连续喷墨的墨滴形成过程	028
3.1.3	墨滴成形前的射流轮廓	029
3.2	按需喷墨的流体动力特性	030
3.2.1	按需喷墨装置的基本结构与墨滴生成描述	030
3.2.2	墨滴喷射系统简化	031
3.2.3	墨滴正常喷射的模拟结果	032
3.2.4	雷诺数用作流体控制参数的意义	033
3.3	墨滴扩展	034
3.3.1	墨滴扩展现象	034
3.3.2	墨滴撞击纸张的行为特征与扩展比影响参数	035
3.3.3	墨滴扩展比公式	036
3.3.4	记录点直径预测	037
3.3.5	墨水扩散对线条复制效果的影响	038
3.3.6	墨滴扩展和渗透导致的形状误差	038
3.4	表面张力与黏弹性问题	039
3.4.1	墨水与喷射特性	040
3.4.2	流体物理属性与驱动力	040
3.4.3	表面张力对墨水喷射的推动作用	041
3.4.4	流体的黏弹性问题	042
3.5	墨水的渗透与吸收	043
3.5.1	纸张的亲水性与疏水性	044
3.5.2	接触角	044
3.5.3	墨水渗透和吸收的理论描述	045
3.5.4	墨滴形状参数变化规律	046
3.5.5	涂布纸墨滴吸收模型	047
3.5.6	普通纸墨滴扩散模型	048
3.6	干燥时间与喷墨印刷质量的相关性	049
3.6.1	墨水干燥的一般问题	049
3.6.2	吸收干燥	050
3.6.3	蒸发干燥	051
3.6.4	干燥时间	052
3.6.5	墨水吸收速度	053
3.6.6	纸张变形	053

第四章 Sweet 连续喷墨技术	055
4.1 Sweet 连续喷墨概述	055
4.1.1 技术发明	055
4.1.2 技术原型	056
4.1.3 技术分类	057
4.2 Sweet 喷墨工艺	058
4.2.1 墨滴断裂激励与卫星墨滴	058
4.2.2 墨滴充电	059
4.2.3 墨滴静电偏转	060
4.2.4 空气阻力	061
4.2.5 相位控制	062
4.2.6 防止墨滴合并的措施	062
4.2.7 静电交互作用	063
4.3 二值偏转 Sweet 连续喷墨	064
4.3.1 早期二值偏转连续喷墨技术	064
4.3.2 二值偏转连续喷墨的进步	065
4.3.3 二值偏转面临的主要挑战	065
4.3.4 对称模式	066
4.3.5 非对称模式	067
4.4 多值偏转连续喷墨系统	068
4.4.1 早期多值偏转 Sweet 连续喷墨装置	069
4.4.2 墨滴定位误差	069
4.4.3 墨滴定位精度的主要影响因素	070
4.4.4 空气动力与静电交互作用效应	071
4.4.5 合并曲线	071
4.4.6 多值偏转连续喷墨印刷系统	072
4.5 Sweet 连续喷墨的空气动力影响	073
4.5.1 非吸气型静电偏转连续喷墨	073
4.5.2 墨滴交互作用	074
4.5.3 打印畸变	075
4.5.4 空气动力补偿	076
4.5.5 吸气装置	076
4.6 现代 Sweet 连续喷墨印刷技术	077
4.6.1 热激励气流偏转连续喷墨技术	077
4.6.2 墨滴发生器	078
4.6.3 热激励墨滴生成	079
4.6.4 气流偏转控制	080
4.6.5 结构特点	081
4.6.6 墨滴断裂距离	082

第五章 Hertz 连续喷墨	084
5.1 经典 Hertz 连续喷墨技术	084
5.1.1 工作原理简介	084
5.1.2 墨滴喷射的基本特点	085
5.1.3 墨滴喷射控制	086
5.1.4 墨滴断裂位置	087
5.1.5 喷射效果分析	088
5.1.6 两种连续喷墨技术的墨滴生成方法	089
5.1.7 密度调制	089
5.1.8 两种连续喷墨的差异	090
5.2 Hertz 连续喷墨系统	091
5.2.1 电极系统	091
5.2.2 简化偏转电极系统	093
5.2.3 字符与数字输出	094
5.2.4 早期彩色喷绘仪	095
5.2.5 传真系统	096
5.3 墨滴飞行稳定性	097
5.3.1 现代 Hertz 喷墨的结构基础	097
5.3.2 墨滴飞行控制的主要任务	098
5.3.3 墨滴飞行稳定性测量技术	099
5.3.4 墨滴位置分析	100
5.3.5 墨滴飞行稳定性与喷射距离的关系	100
5.3.6 激励源对墨滴飞行稳定性的影响	101
5.3.7 墨滴位置测量结果	102
第六章 热喷墨	104
6.1 热喷墨技术的发展历史	104
6.1.1 热喷墨技术的发明	104
6.1.2 从打印计算器到喷墨打印机	105
6.1.3 快速发展的热喷墨技术	106
6.1.4 热喷墨印刷的十大技术突破	107
6.2 气泡动力与热转移特性	108
6.2.1 围绕气泡的工作循环	108
6.2.2 压力传播	109
6.2.3 气泡成核的统计模型	110
6.2.4 气泡成核质量	112
6.2.5 气泡压力和物理相变化	113
6.2.6 气泡压力积分	114
6.3 加热器与打印头	115

6.3.1	电加热元件	115
6.3.2	薄膜加热器	116
6.3.3	现代热喷墨打印头的结构特点	117
6.3.4	打印头的热转移控制	117
6.3.5	主动热控制	118
6.3.6	打印头内部的温度测量	119
6.3.7	热喷墨打印头的热路径	120
6.3.8	加热器表面的焦化现象	121
6.3.9	热喷墨打印头寿命	122
6.3.10	汽穴问题	123
6.3.11	气泡喷墨的热动力过程分析	124
6.4	墨滴喷射	125
6.4.1	顶喷与侧喷	125
6.4.2	气泡动量与墨滴动量	125
6.4.3	墨滴发生器	126
6.4.4	双脉冲驱动波形	127
6.4.5	密度调制	128
6.4.6	墨滴速度稳定性	129
6.4.7	墨滴定位误差的影响因素	130
第七章	压电喷墨	133
7.1	压电效应	133
7.1.1	压电效应的物理本质	133
7.1.2	压电振子	134
7.1.3	常用压电材料	135
7.1.4	压电陶瓷材料的变形模式	136
7.2	压电喷墨的起源与发展	136
7.2.1	压电喷墨技术的发明	137
7.2.2	四种压电喷墨技术的形成	138
7.2.3	早期压电喷墨	139
7.2.4	现代压电喷墨技术	140
7.3	压电喷墨打印头	141
7.3.1	打印头基本要求	141
7.3.2	推压模式压电喷墨打印头	142
7.3.3	剪切模式压电喷墨打印头	143
7.3.4	共享壁结构	144
7.3.5	共享壁结构加工技术	145
7.3.6	打印头喷嘴交叉排列	146
7.3.7	打印头倾斜技术	148
7.4	墨滴喷射与控制	149

7.4.1	体积变换原理	149
7.4.2	墨滴体积调整参数	150
7.4.3	墨滴体积与墨水通道的依赖关系	150
7.4.4	喷嘴外径对墨滴喷射的影响	151
7.4.5	喷射压力的形成原理	152
7.4.6	多通道墨滴喷射	153
7.4.7	驱动脉冲宽度对墨滴喷射的影响	154
7.4.8	双极驱动波形	155
7.4.9	交叉对话及其副作用	156
7.4.10	声发射及影响因素	158
7.5	墨滴尺寸调制技术	159
7.5.1	墨滴尺寸	159
7.5.2	脉冲宽度对墨滴尺寸的影响	160
7.5.3	墨水灌入水平和预作用墨滴尺寸调制	161
7.5.4	墨滴破裂法	161
7.5.5	破裂脉冲调制技术	162
7.5.6	卫星墨滴对尺寸调制的意义	162
7.5.7	弯月面和墨滴成形振荡的有效利用	163
7.6	密度调制	164
7.6.1	墨滴发生器	164
7.6.2	共享壁墨水通道驱动波形	165
7.6.3	灰度等级打印的含义	166
7.6.4	共享壁结构压电喷墨灰度等级打印	167
7.6.5	二值复制系统与灰度等级系统	168
7.6.6	两种灰度等级技术	169
第八章	相变喷墨	171
8.1	早期相变喷墨	171
8.1.1	相变喷墨技术的出现	171
8.1.2	冷熔化工艺	172
8.1.3	相变油墨	172
8.1.4	打印头与驱动波形	173
8.1.5	墨滴处理措施	174
8.2	相变喷墨技术的发展	175
8.2.1	固体油墨胶印工艺	175
8.2.2	墨滴间接喷射和转移过程	176
8.2.3	墨滴固化模型	177
8.2.4	墨滴固化模型的有效性验证	178
8.2.5	转印和定像过程	179
8.3	墨滴尺寸调制	180

8.3.1	关于墨滴尺寸调制	180
8.3.2	墨滴成形与喷射模式	181
8.3.3	墨滴尺寸调制的理论基础	182
8.3.4	压力波振荡模式	183
8.3.5	相变喷墨驱动波形	184
8.3.6	二次喷射模式	184
8.4	相变喷墨的现代进展	185
8.4.1	现代相变喷墨印刷设备	186
8.4.2	打印头基本结构	186
8.4.3	喷射堆栈板	187
8.4.4	打印头结构类型与应用	188
8.4.5	多打印头相变喷墨印刷系统	189
8.4.6	多打印头系统的驱动波形	190
第九章	静电喷墨	192
9.1	常规静电喷墨原理	192
9.1.1	泰勒效应与泰勒锥	192
9.1.2	泰勒效应的实验验证	193
9.1.3	打破液柱稳定性的最低电压	193
9.1.4	从毛细管抽出流体的最低电压	194
9.1.5	非导电液体静电牵引	195
9.1.6	稳定射流实验	196
9.1.7	黏性射流的不稳定性	196
9.2	泰勒效应静电喷墨技术	197
9.2.1	静电喷墨发展简史	197
9.2.2	静电喷墨的一般描述	198
9.2.3	单板静电喷墨与喷嘴	199
9.2.4	泰勒效应墨滴喷射过程	199
9.2.5	墨滴喷射控制方法	200
9.2.6	单通道运转静电喷墨	201
9.2.7	多通道泰勒效应静电喷墨	202
9.3	墨滴飞行稳定性	204
9.3.1	墨滴飞行条件	204
9.3.2	静电排斥与空气动力交互作用	205
9.3.3	墨滴飞行状态的典型观察结果	206
9.3.4	电荷误差与墨滴位置关系	207
9.4	超声波墨雾喷射	208
9.4.1	技术简介	208
9.4.2	打印头结构	209
9.4.3	驱动信号与复制层次控制	210

9.4.4	墨雾喷射特征	211
9.4.5	超声波墨雾喷射打印头实际结构	212
第十章	设备结构与质量改善措施	214
10.1	往复式喷墨打印机	214
10.1.1	往复式结构	214
10.1.2	打印头套件	215
10.1.3	拖板传动机构	216
10.1.4	输纸套件与传动机构	216
10.1.5	打印头套件的墨滴直线度	217
10.1.6	打印头对位误差	218
10.1.7	拖板运动对位误差	219
10.1.8	拖板波浪运动	220
10.1.9	交叉打印与加网	220
10.2	全宽喷墨印刷设备	221
10.2.1	一般概念	222
10.2.2	页面宽度连续喷墨印刷机	222
10.2.3	行排列整体性压电喷墨打印头	223
10.2.4	热喷墨全宽打印头	224
10.2.5	集流腔形式相变喷墨全宽打印头	224
10.3	打印模式和质量改善措施	226
10.3.1	记录点的不规则性	226
10.3.2	一次通过打印模式	227
10.3.3	打印头结构与喷嘴位置误差	228
10.3.4	多次通过打印模式	229
10.3.5	打印蒙版	230
10.3.6	分辨率增强技术	230
10.3.7	彩色分辨率增强技术	231
10.4	喷墨印刷设备的工作能力与相关因素	233
10.4.1	往复式打印机生产效率	233
10.4.2	全宽打印头效率	234
10.4.3	干燥处理功率要求	235
10.4.4	喷嘴、墨水与网目调技术	235
10.4.5	设备的可靠性问题	237
10.4.6	表层流技术	237
	符号释义	239
	参考文献	242

1

第一章

概述

喷墨印刷已成为当前两大主流数字印刷技术之一。从 1873 年世界上第一台基于墨水喷射原理的图形花样（图案）输出设备付诸使用开始算起，已经有 100 多年的发展历史，比人们想象中的喷墨印刷更古老；如果上溯到 1858 年出现的类似于喷墨印刷的 Siphon 记录装置，则喷墨印刷的发展历史更悠久。喷墨印刷既不同于传统印刷方法，也不同于其他数字印刷技术，液态油墨既要求喷墨印刷解决许多困难问题，但也带给喷墨印刷许多“先天”的优势。从 20 世纪 80 年代开始，喷墨印刷以超乎人们想象的速度发展，应用领域十分广泛，例如工业标记、办公室和家庭文档输出、数字打样、大幅面广告和纺织品印刷等。只有喷墨印刷才是严格意义上的非接触复制工艺，成像结果直接在承印材料表面完成，无须借助于任何中间载体，因而不存在中间转印过程。

1.1 喷墨印刷发展简史

经过科研人员、工程技术人员、计算机专家和工艺技术人员的不懈努力，终于使喷墨印刷逐步演变为数字印刷的主流技术，渗透到各种领域。液体形态的墨水使喷墨印刷成为具有“极端”特性的标记技术，许多必须解决的难题曾一度限制了喷墨印刷的发展，导致这种数字印刷技术起步比静电照相数字印刷早，发展历史更长。

1.1.1 喷墨印刷的起源

喷墨印刷是一种非撞击的“点阵”打印技术，墨滴从小型器械中喷射而出，根据控制条件飞行到记录介质表面，直接在规定位置建立印刷图像。讨论喷墨印刷的起源不能不提到 Lord Kelvin（洛德·开尔文）、Lord Rayleigh（洛德·瑞利）、Joseph Plateau（约瑟夫·普拉托）和 Savart（萨伐尔）四人，他们是喷墨印刷技术的先驱。

连续的液体流动是自然界中的常见现象，容易引起科学家的注意，所以喷墨印刷开始于对连续喷射液体运动特性的研究。然而，由于连续喷射的流体必须通过特定的控制技术才能形成记录结果，人们的兴趣便转移到了设法按需要喷射墨滴。因此，喷墨印刷走过了从连续喷墨到按需喷墨的发展历程，形成多种技术并存的局面。

世界上首台工作原理类似于喷墨印刷的装置由 William Thomson（威廉·汤姆森）发明于 1858 年，并于 1867 年获得英国专利授权。上面提到的 William Thomson 和许多文章中出现的 Lord Kelvin 其实是同一人，由于威廉·汤姆森同意接受英国授予他的拉格斯·开尔文世袭爵位，再加上他是第一位通过选举进入英国上议院（House of Lords）的科学家，因而许多人称他为洛德·开尔文。

Siphon 设备建立在静电作用力的基础上，由于用到了日常生活中常见的虹吸原理而取名为 Siphon 记录装置（图 1-1 中左图），用于早期通信领域，即电报信息的自动记录。

通过虹吸效应产生的连续墨水喷射到行进中的卷筒纸上，来自控制系统的驱动信号使虹吸管沿水平方向来回摆动，与纸张运动组合起来便形成预期的记录结果。据说 Siphon 记录装置难得可靠地运转，虽然发明者认为利用 Siphon 装置记录信息几乎不需要什么操作技巧，但即使受过训练的报务员也要求他们仔细阅读和理解操作说明。从时间概念看 Siphon 记录装置产生于 19 世纪 50 年代后期，但处理墨滴流的实验时间却更早些，甚至可追溯到 1749 年，那时 Abbé Nollet（阿贝·诺伦特）发表了他对于液滴流静电效应的研究成果（实验装置如图 1-1 中右图所示），只是未诞生与喷墨相关的设备。

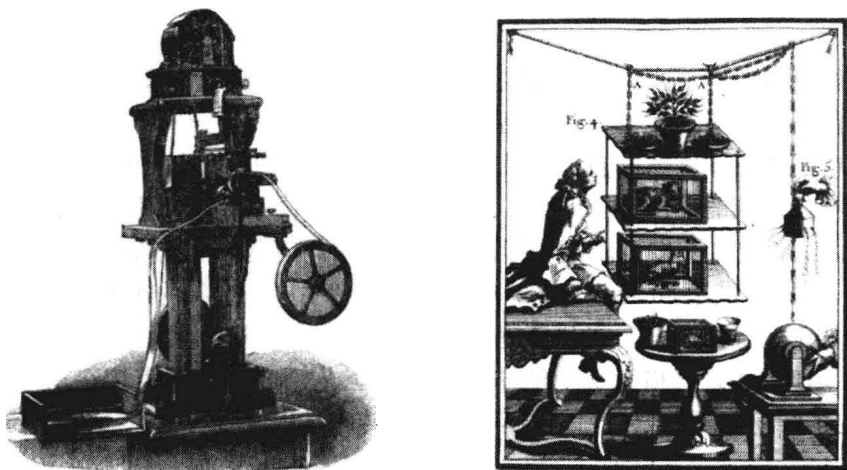


图 1-1 Siphon 记录装置与阿贝·诺伦特实验装置

世界上首台工作原理类似于现代喷墨打印机的商业输出设备称为图形花样打印机，这种设备的工作原理离不开开尔文的研究成果，离开尔文发明 Siphon 记录装置大约 15 年的时间。开尔文对于喷墨印刷技术的贡献主要表现在两方面：首先，他描述了墨滴充电技术，是连续喷墨系统墨滴偏转控制不可缺少的关键步骤；其次是开尔文勾勒出的第一代喷墨打印机原型，既为后来的研究奠定了基础，也从系统构成角度提出了喷墨打印机的物理模型。

1.1.2 喷墨印刷的近代进展

整个 20 世纪初期是喷墨印刷技术的孕育阶段，尤其是在 1930 年前后出现了一批研究工作者，例如美国无线电公司的 Richard Ranger（理查德·兰杰）和 Clarence Hansell（克拉伦斯·汉萨尔）、德国人 Diekmann（迪克曼）和 Schroter（施罗德）以及 Richards（理查德）等，他们致力于利用细窄墨水流的连续喷射记录各种信号（以波形信号最为典型）或图片。德国学者施罗德完整地总结了喷墨印刷的早期研究成果，他的德文著作由 Springer-Verlag 出版社于 1932 年出版，或许是人类历史上最早的喷墨印刷专著。尽管 20 世纪初期对喷墨印刷的学术研究颇为活跃，但那时生产的喷墨印刷设备却没有留下多少历史记载，主要原因是使用方面受到较多限制，不能实现大批量复制。

20 世纪 30 年代已经有多种喷墨记录装置取得专利技术授权，大多是建立在喷墨记录原理基础上的传真机输出部分，比如 1931 年授予兰杰和 Smith（史密斯）的美国专利“彩色传真系统”，以及 Shore 在 1933 年取得的美国专利“传真系统”等，这些连续喷墨设备通过偏转连续墨水射流的方法在承印材料上形成记录轨迹。第一台商业喷墨记录装置是基

于 Elmqvist 技术的示波器记录部分，喷墨打印机是这种示波器的主要部件，由西门子公司推向市场，命名为 Oscillmink，图 1-2 给出了 Oscillmink 打印机的工作原理示意图，虽然结构很简单，控制原理甚至很“原始”，但毕竟是喷墨打印技术的历史见证。

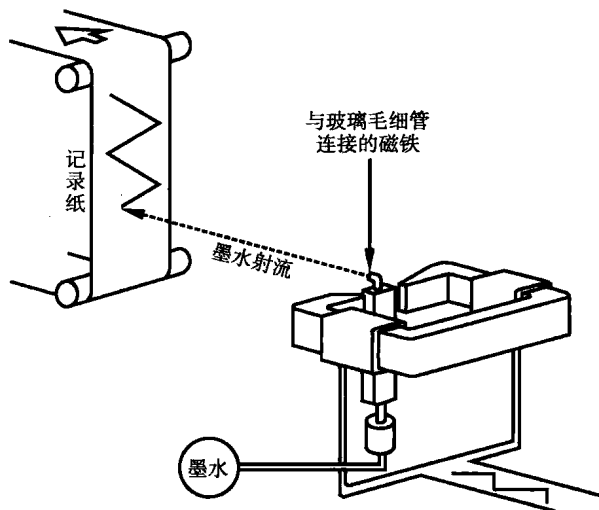


图 1-2 第一台喷墨记录装置工作原理示意图

图 1-2 所示的打印机喷嘴由精致的玻璃毛细管组成，与小尺寸磁铁相连接，而该小尺寸磁铁则放置在一对电磁极之间，玻璃毛细管与小尺寸磁铁的组合类似于现代喷墨打印机的喷墨头，而玻璃毛细管的作用则相当于喷嘴。待记录的波形信号来自示波管，以电信号的形式加到电磁极上，产生与波形信号同步的打印控制信号。由于玻璃毛细管与小尺寸的磁铁相连，且位置在一对电磁极之间，因而控制信号通过磁场作用到与玻璃毛细管连接的小尺寸磁铁上，驱动玻璃毛细管产生偏转，导致墨水喷射路径改变。示波器的记录部分与玻璃毛细管离开一段距离，相当于对波形起放大作用，即来自玻璃毛细管的墨水射流形成的记录轨迹是波形信号的放大表示。由于纸张沿垂直方向移动，因此纸张运动与墨水射流的角度偏转组合有能力产生波形的记录轨迹。

1.1.3 喷墨印刷主要工艺的形成

1.1.3 喷墨印刷主要工艺的形成

世界上首台成功应用喷墨印刷原理的设备诞生于 1951 年，即前面提到的西门子字符喷墨打印机，由瑞典医生和工程师 Elmqvist 研制成功。这种连续喷墨设备开发成功的实际时间在 1948 年，称为 ECG 或 Mingograph 喷墨打印机，医学领域称之为多导喷墨生理记录器，其中缩写 ECG 来自专业词汇 Electrocardiography，心电描述术之意。由于 Elmqvist 原来是瑞典 Karolinska 大学医院的一名医生，后来为西门子公司的前身 Elema-Schönander 工作，所以才有此发明。该喷墨印刷设备的专业名称为记录型测量仪器，从 Elmqvist 当时使用的 Measuring Instrument of the Recording Type 这一专利名称上可以看出来，命名为测量仪器的原因在于喷墨印刷装置作为示波器的主要部件使用。Elmqvist 用墨水喷射代替记录笔，代替此前人们用记录笔直接书写示波器测量内容的传统工作方式。由于 Elmqvist 设法降低了墨水（墨滴）的运动惯性，导致喷墨印刷的记录频率上限提高到 1 000Hz，达到同时期喷墨印刷设备工作速度的 10 倍。由 Elmqvist 发明的这种连续喷墨技术沿用了相当长的时间，即使到现在，医疗领域还可以见到以 Mingograph 命名的心电图记录仪。

1963 年，美国斯坦福大学的 Richard Sweet（理查德·斯威特）博士在 Mingograph 喷墨装置的基础上开展对连续喷墨的实验研究，提出了不同于 Elmqvist 技术的连续喷墨印刷原理。实验成功的确切时间很难确定，学术界普遍认为大约形成于 1964~1965 年之间，因为 Sweet 为斯坦福大学电子实验室撰写的技术报告“静电偏转喷墨高频记录”成文于 1964 年。后来证明，由于 Sweet 采用静电偏转法控制墨滴是否喷射到纸张，因而工作原理更有普遍意义，是两大连续喷墨技术之一，习惯上称为 Sweet 喷墨技术。

Sweet 通过将压力波加到喷嘴小孔的方法演示了墨滴形成特征，设法使喷嘴挤压出的

墨水射流分离为尺寸和间距均匀的墨滴。如果墨滴的形成机制能加以控制，则可以有选择地对墨滴充电，组成可靠的连续墨水射流。电压加到由平行板组成的偏转电极上，充电墨滴通过该平行板形成的电场时将发生偏转而进入墨水回收槽，未充电墨滴则直接喷射到记录介质表面。到 20 世纪 60 年代末期时（1969 年），在 Sweet 博士发明的基础上研制成以行扫描方式工作的连续喷墨工艺，并形成 Dick VideoJet 9500 打印机，每秒钟能打印由 5×7 点阵组成的 750 个字符。美国的 Recognition Equipment 公司根据 Sweet 喷墨原理推出条形码和字符喷墨打印机，为邮政、信用卡和银行等应用领域采纳。从 1970 年开始，美国商用机器公司（IBM）取得了 Sweet 连续喷墨成像的专利授权，开始设立大量研究项目，以将连续喷墨技术引入计算机用打印机（计算机外围设备），并在 1976 年推出了 IBM 4640 喷墨打印机，用作文字处理结果的硬拷贝输出设备。

Richards 和 Winston 两人致力于通过静电牵引力产生墨滴的喷墨打印技术，方法明显不同于由 Sweet 提出的墨滴静电偏转控制技术。学术界普遍认为 Richards 是静电牵引喷墨打印技术的奠基者，他在 1952 年取得美国专利“多分子充电颗粒流发生器械”，后来由 Winston 加以完善，在 1962 年时形成完整的静电牵引喷墨打印技术并取得美国专利“墨水转移方法与器具”，设备定名为喷墨打字机（Ink-Jet Typewriter），属按需喷墨技术。参与生产静电脉冲牵引喷墨打印机的企业包括瑞士的 Paillard/Hermes Precisa 公司、美国的 Teletype Corporation 公司和日本的 Casio 公司。

瑞典罗德理工学院罗德技术研究所（Lund Institute of Technology）以 Carl H. Hertz 教授为首的工作组，从 20 世纪 50 年代开始研究另一种连续喷墨方法，尽管早期研究并未取得成功，但为后来开发成基于 Hertz 喷墨原理的高分辨率打印机奠定了基础，例如 20 世纪 80 年代进入数字打样领域的 Iris 彩色连续喷墨打印机。十多年以后的 1967 年，他们提出通过控制墨滴喷射数量实现密度调制的设想，分别在 1973 年和 1980 年两次获得美国专利。学术界认为 Hertz 喷墨是 Elmqvist 喷墨技术的继承和发展，通常称为 Hertz 连续喷墨技术。Hertz 喷墨以调制墨水的流动特征为基础复制不同的色调等级，发明者将这些打印技术称为灰度层次喷墨打印（Grayscale InkJet Printing）。尽管 Hertz 喷墨与 Sweet 喷墨有不少相似之处，例如 Hertz 方法也使用连续喷墨原理，同样用控制电极对墨滴充电等，但工作原理上又不同于 Sweet 喷墨，主要区别表现在以墨水射流的密度调制代替偏转控制，喷射出的墨水射流分裂成细小的墨滴而形成墨雾，且 Hertz 方法使用的喷嘴直径更小，在 $10 \sim 20 \mu\text{m}$ 间，而墨滴飞行速度却更高，约为 40m/s 。

瑞典人 Stemme 和 Larsson 称得上是压电按需喷墨的先驱者，两人于 1973 年在 IEEE（国际电子和电气工程师协会）的电子设备杂志上发表文章，说明如何利用压电喷射器产生墨滴的方法，从流体动力学角度解释压电喷墨工作原理，并于同年取得美国专利“彩色液体的纸张记录机制”，但专利权却属于 Stemme 一人。

综上所述，大约在 20 世纪 60 年代末期到 70 年代初期时，已经出现了四种工作原理互不相同的喷墨印刷技术，连续喷墨和按需喷墨各两种，这些技术在此后通过不断的完善和改进，成为今天仍然在使用的主要喷墨印刷方法。

人们对早期喷墨技术总结出来的主要优点包括：打印速度快，设备运转时没有噪声而显得相当安静，非接触的复制工艺，所有记录点按次序寻址。然而，大多数喷墨打印机的使用者也不得不面对设备的可靠性和维修问题，但产生这些问题的原因大体上都源于对打印机部件和墨水生产工艺缺乏了解，事实上并不在于喷墨技术本身。此外，点阵打印机在