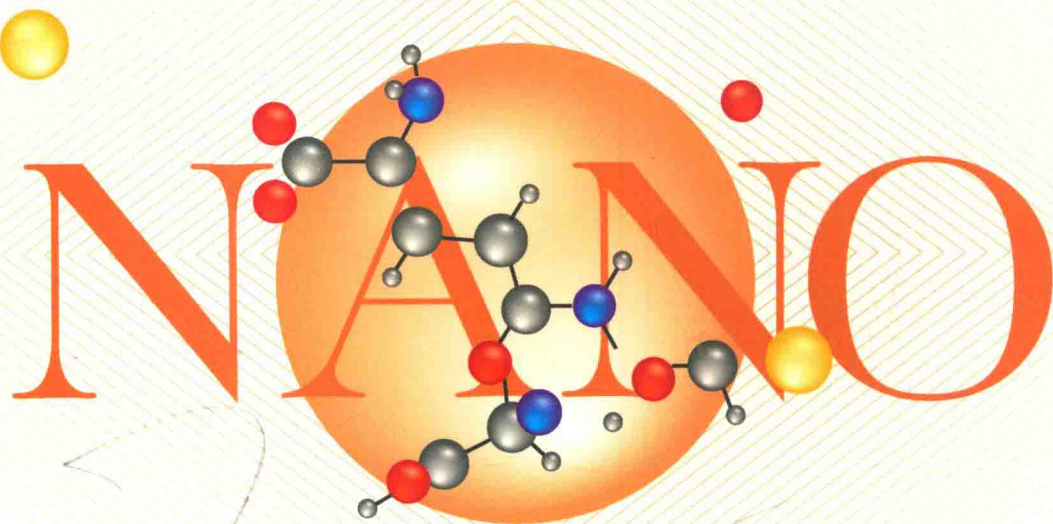


纳米间隙气膜润滑 理论及应用



史宝军 杨廷毅 季家东 著

 科学出版社

纳米间隙气膜润滑理论及应用

史宝军 杨廷毅 季家东 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是一本全面系统地论述纳米间隙气膜润滑理论及应用的专著。在微纳机电系统(MEMS/NEMS)设计、制造和使用过程中,存在的微纳米尺度效应等非常规物理机制,成为制约MEMS/NEMS设计、制造和应用水平提高的重要瓶颈。围绕这些关键共性学术难题,本书深入系统地阐述微纳米气体润滑基本理论、数值方法、气膜润滑静态承载特性等微纳米气体润滑基础理论及其工程应用。全书共8章,内容主要包括绪论、气膜润滑理论、纳米间隙气膜润滑方程的数值计算方法、纳米间隙气膜非线性动力学分析方法、纳米间隙气膜静态特性研究、表面粗糙度和表面容纳系数对气膜静态特性的影响、纳米间隙气膜动态特性研究、磁头/磁盘系统冲击响应分析。

本书可供从事微纳米摩擦学理论及应用、现代设计理论与方法等领域的科研人员和工程技术人员参考使用,也可作为高等院校相关专业研究生“摩擦学原理”与高年级本科生“现代设计理论与方法”等课程的教学参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

纳米间隙气膜润滑理论及应用/史宝军,杨廷毅,季家东著. —北京:科学出版社, 2019.4

ISBN 978-7-03-060986-1

I. ①纳… II. ①史… ②杨… ③季… III. ①气体润滑—研究
IV. ①TH117.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第066321号

责任编辑: 阚 瑞 / 责任校对: 张凤琴
责任印制: 吴兆东 / 封面设计: 迷底书装

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>

北京中石油彩色印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019年4月第 一 版 开本: 720×1000 1/16
2019年4月第一次印刷 印张: 16 1/4 彩插: 4

字数: 312 000

定价: 118.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

微纳机电系统(Micro-Electro-Mechanical System/Nano-Electro-Mechanical System, MEMS/NEMS)具有许多优良特性和广阔的应用前景,由于涉及微纳米尺度效应,在宏观尺度下可以忽略的许多问题,在 MEMS/NEMS 中往往成为至关重要的问题。然而,对于在 MEMS/NEMS 设计、制造和应用过程中存在的非常规物理机制的认识和了解却远远不够,这成为制约 MEMS/NEMS 设计、制造和应用水平提高的重要瓶颈,这些问题的解决对微纳米摩擦学等研究提出了严峻挑战,其中涉及的微纳米间隙气体润滑问题是 MEMS/NEMS 设计制造中的重要基础科学问题之一。MEMS/NEMS 并非传统机械宏观意义下的简单几何缩小,几何尺寸的微小化使很多宏观下的物理现象发生变化,产生尺度效应、表面效应等。对于许多纳米间隙气体润滑问题,需要考虑气体边界的速度滑移,并结合分子动力学模型,对气体的状态方程和能量方程进行修正;然后,利用修正后的状态方程与能量方程对系统进行静态特性、动态特性、稳定性等一系列的研究。由于修正后的系统方程变得十分复杂,其解析解往往不存在或者难以找到。因此,一种比较可行的方法是通过数值方法求解修正后的系统方程,但是,有限元法和有限体积法等传统的数值方法经常遇到计算效率和计算稳定性问题;尤其是 MEMS/NEMS 中的气体润滑容易受到表面力、特征尺寸以及分子力等方面的影响,这些影响因素会增加数值求解气体状态方程和能量方程的难度,这主要体现在计算收敛速度过慢,花费过多的计算机资源甚至计算发散方面,从而导致整个计算失败。通过数值方法高效率地求解极端条件下纳米间隙气膜润滑的状态方程和能量方程,是各种 MEMS/NEMS 设计、结构优化和控制等方面的重要基础与重要手段,深入揭示这些表面/界面行为的规律并寻求其有效的控制方法是 MEMS/NEMS 设计与制造科学亟待研究的重要课题。

围绕上述微纳米气膜润滑中的共性难点问题,本书作者及其课题组成员多年来致力于微纳米气体润滑基本理论、数值方法、气膜润滑静动态承载特性等微纳米气体润滑基础理论及其工程应用研究,其主要内容包括:在气体润滑基本理论方面,提出具有优越性能的 Reynolds 方程修正模型;在数值方法方面,提出改进的最小二乘有限差分法、具有不连续边界的有限体积法、基于压力梯度的自适应网格法和多重网格法等有效的数值解法;在气膜静动态承载特性方面,研究表面粗糙度、表面容纳系数、空气/氢气混合气体等对气膜静动态润滑特性的影响规律;建立气膜润滑与磁头/磁盘系统的流固耦合模型,系统地阐述在冲击载荷作用下磁头/磁盘系统与

纳米间隙气膜润滑流固耦合问题的数值模拟分析方法。本书中介绍的 Reynolds 方程修正模型、数值解法、纳米间隙气膜静动态润滑特性的研究成果,可为各种具有微纳米气体润滑问题的 MEMS/NEMS 设计、结构优化等提供重要的理论基础和有效的数值方法。

书中的内容来自作者及其课题组成员十多年来的研究工作总结,是一本气体润滑领域的参考书。其中,第 1 章、第 4 章、第 7 章由史宝军撰写;第 2 章、第 5 章由杨廷毅、季家东和史宝军撰写;第 3 章、第 8 章由杨廷毅和史宝军撰写;第 6 章由季家东和史宝军撰写;季家东对全书进行编辑排版和部分图表的重新绘制;全书由史宝军统稿。感谢参与本书部分研究工作的研究生李鸿秋、冯玉节、马龙、孙亚茹、郭凯等,他们的创新性工作与讨论对本书的修改和定稿有很大的帮助。

本书的部分研究工作得到了美国国家工程院院士、加利福尼亚大学圣地亚哥分校 F.E.Talke 教授,清华大学摩擦学国家重点实验室主任孟永钢研究员,山东大学葛培琪教授,新加坡南洋理工大学舒东伟副教授等专家学者的指导和帮助。哈尔滨工业大学张传伟博士和贵州大学唐正强博士对书中部分研究工作给予了支持和帮助。本书得到了国家自然科学基金项目(50775132、51275279)、清华大学摩擦学国家重点实验室开放基金重点项目(SKLTkf11A04、SKLTkf16A01)及山东省“泰山学者”建设工程等科研项目和人才计划的资助。在此一并致以衷心的感谢。

尽管慎之又慎,限于作者水平,书中难免存在不足之处,敬请读者给出批评和指正意见或建议,并发送至邮箱 306844562@qq.com,诚致谢意。

作 者

2018 年 12 月 6 日

符 号 表

A : 横截面面积	h_{ful} : 支点飞行高度
A_0 : 节流孔面积	h_{max} : 最大飞行高度
A_m : 冲击载荷振幅	h_{min} : 最小飞行高度
a_z : 浮动块 z 方向加速度	Inode: 计算域中内点
B : 宽度	J_α, J_β : α 、 β 方向转动惯量
C : 系统阻尼矩阵	J_x, J_y : 流体质量变量
C_D : 流量系数	K : 热导率/系统刚度矩阵
C_L : 轴承承载系数	K_g : 表压比(或节流比)
c : 多变过程比热容/气膜阻尼系数	K_N : 解耦刚度矩阵
c_p : 比定压热容	K_n : 克努森数
c_s : 阻尼系数	K_α, K_β : α 、 β 方向刚度系数
c_v : 比定容热容	k : Boltzmann 常量
c_θ : 角阻尼系数	k_s : 弹性刚度/刚度系数
D : 质量扩散系数/修正克努森数 K_n 的倒数	k_θ : 角弹性刚度
D_0 : 最小膜厚处克努森数的倒数	L : 长度/特征长度
d : 直径/位移	M : 质量矩阵/分子质量
d_0 : 支撑域半径	M_N : 解耦正质量矩阵
E : 能量	M_α, M_β : α 、 β 方向外力矩
Er : 相对误差	m : 质量/观察点数目
E_V : 体积弹性模量	N : 供气孔数目/读回线圈数
e : 读回信号电压	n : 常数/多变指数/分子数
F : 摩擦力/外力	P : 无量纲压力
F_d : 尺寸因子	p : 压力/压强
F_g : 气体性能因子	p_a : 环境大气压力
F_i : 第 i 个代数方程的余值	p_i : 供给压力或供气压力
F_p : 压力因子	P_s : 环境压力
F_{pre} : 预紧力	P_{max} : 最大压力幅值
F_t : 浮动块所受合力	Q : 流量因数
f : 频率	Q_p : Poiseuille 流系数
f_1 : 基频	$\tilde{Q}_p$: Poiseuille 流系数比
f_2 : 二阶频率	Q_C : Couette 流系数
G : 质心/轴承因子	Q_{con} : 连续流的 Poiseuille 流系数
G_w : 流体质量	$\tilde{Q}_C$: Couette 流系数比
H : 无量纲飞行高度	q : 热流密度
H_{so} : 膜厚比	q_m : 质量流量
h_c : 浮动块轨道高/几何中心飞行高度	q_v : 体积流量

- R : 取决于气体种类的常数
 Re : 雷诺数
 S : Sutherland 常数
 S_m : 剪切力矩
 T : 温度
 T_0 : 热力学温度参考值
 T_{cair} : 空气临界温度
 T_{cHe} : 氦气临界温度
 T_p : 冲击载荷周期
 t : 时间
 U : 速度
 u : 流度
 u_0 : 初位移
 u_m : 平均流速
 u_{max} : 最大流速
 V : 体积/速度分量
 v : 流速/线速度/磁盘转速
 v_z : 浮动块 z 方向速度
 Wi : 权函数
 w : 气膜承载力
 w_s : 光滑面气膜承载力
 X, Y, Z : 无量纲直角坐标系坐标
 x, y, z : 有量纲直角坐标系坐标
 x_o : 气膜压力中心
 x_{os} : 光滑面气膜压力中心
 x_c : 浮动块长度方向压力中心
 y_h : 磁头和磁盘间距变化值
 y_c : 浮动块宽度方向的压力中心
 Z : 分子碰撞频率
 α : 气膜刚度系数/俯仰角
 α_V : 体膨胀系数
 β : 侧倾角
 β_{eta} : 飞行高度系数
 γ : Peklenik 数
 γ_1 : 磁盘表面 Peklenik 数
 γ_2 : 浮动块表面 Peklenik 数
 Δ : 增量
 δ : 摆角/磁介质厚度
 ε : 收敛标准
 ζ : 等熵指数
 θ : 角位移
 κ : 体积压缩率/体积比/主磁导率
 Λ : 轴承数
 Λ_x : x 方向轴承数
 Λ_y : y 方向轴承数
 λ : 分子平均自由程
 λ_{air} : 空气密度
 λ_{He} : 氦气密度
 λ_{mix} : 混合气体密度
 μ : 动力黏度
 μ_{air} : 空气黏度
 μ_{He} : 氦气黏度
 μ_{mix} : 混合气体黏度
 ξ : 磁头效率
 ξ_w : 高度不连续因子
 ρ : 气体密度
 σ : 分子碰撞截面积/挤压数
 σ_1 : 磁盘表面粗糙度算术平均偏差
 σ_2 : 浮动块表面粗糙度算术平均偏差
 τ : 切应力
 v : 运动黏度/磁记录频率
 φ : 耗散函数/表面容纳系数
 φ_1 : 磁盘表面容纳系数
 φ_2 : 浮动块表面容纳系数
 φ^s : 剪切流因子
 φ_x^p : X 方向压力流因子
 ψ : 相对热交换系数/记录信号波长

目 录

前言

符号表

第一篇 基 本 理 论

第 1 章	绪论	3
1.1	引言	3
1.2	硬盘及其工作原理	4
1.2.1	硬盘的结构	4
1.2.2	硬盘的工作原理	6
1.3	纳米间隙气膜润滑理论研究进展	8
1.3.1	气膜润滑方程及其修正	8
1.3.2	基于表面粗糙度和表面容纳系数的气膜润滑方程	10
1.3.3	气膜润滑方程的数值求解方法	11
1.4	纳米间隙气膜动态特性研究进展	14
1.4.1	纳米间隙气膜非线性动力学分析	14
1.4.2	磁头/磁盘系统冲击响应数值研究	15
1.4.3	磁头/磁盘系统冲击响应实验研究	17
1.5	本书的主要内容	19
第 2 章	气膜润滑理论	21
2.1	润滑气体的基本性质	21
2.1.1	气体的基本定律	21
2.1.2	气体的压缩性	22
2.1.3	气体的膨胀性	23
2.1.4	气体的传输性	23
2.1.5	分子平均自由程	26

2.2	润滑气体的流动特性	28
2.2.1	润滑气体的流动状态	28
2.2.2	气体的薄层流动	28
2.3	气体的润滑机理	33
2.3.1	气体动压润滑机理	33
2.3.2	气体静压润滑机理	36
2.4	气膜润滑方程的一般形式	38
2.4.1	磁头/磁盘界面	38
2.4.2	一般形式 Reynolds 方程的推导	39
2.5	纳米间隙气膜润滑方程及修正	42
2.5.1	稀薄效应	42
2.5.2	Reynolds 方程的修正	43
2.5.3	两种新型修正模型的推导	46

第二篇 研究方法

第 3 章	纳米间隙气膜润滑方程的数值计算方法	55
3.1	最小二乘有限差分法	55
3.1.1	一维泰勒级数公式	55
3.1.2	二维泰勒级数公式	56
3.1.3	LSFD 法求解一维 Reynolds 方程	59
3.1.4	LSFD 法求解二维 Reynolds 方程	61
3.2	有限体积法	63
3.2.1	控制体的质量守恒	64
3.2.2	控制体的边界不连续性	65
3.2.3	线高斯迭代	68
3.3	基于压力梯度的自适应网格技术	70
3.3.1	磁头/磁盘界面自适应网格技术	70
3.3.2	网格密度函数	72
3.3.3	Ω 浮动块自适应网格分布	73
3.4	多重网格法	75
3.4.1	多重网格法各层网格的生成	75

3.4.2	多重网格法的实施	76
3.5	修正的 LSFD 法	77
3.5.1	LSFD 法的修正	77
3.5.2	边界离散点的处理	78
第 4 章	纳米间隙气膜非线性动力学分析方法	79
4.1	纳米间隙气膜动力学分析模型建立	79
4.1.1	物理参数分析模型	79
4.1.2	模态参数分析模型	80
4.1.3	磁头/磁盘系统分析模型	80
4.1.4	磁头/磁盘系统单自由度模型	81
4.1.5	磁头/磁盘系统二自由度模型	81
4.2	单自由度模型非线性动力学分析方法	83
4.2.1	逐步积分法-线性加速度法	83
4.2.2	Wilson- θ 法	86
4.2.3	Newmark- β 法	87
4.2.4	修正 Newmark- β 法求解单自由度磁头/磁盘系统动力平衡方程	88
4.3	二自由度模型非线性动力学分析方法	93
4.3.1	应用模态分析法求解动力平衡方程	94
4.3.2	动力平衡方程的坐标耦合与解耦	94
4.4	基于 Reynolds 方程的磁头/磁盘系统动态特性分析	98
4.4.1	浮动块平衡方程	98
4.4.2	牛顿迭代法	99
4.4.3	数学模型建立	100

第三篇 工程应用

第 5 章	纳米间隙气膜静态特性研究	105
5.1	基于 LSFD 法的气膜压力分布	105
5.1.1	二维平板浮动块	105
5.1.2	IBM3380 浮动块	106
5.1.3	二轨道浮动块	108

5.1.4	三垫式浮动块	110
5.1.5	负压浮动块	112
5.2	基于有限体积法的气膜压力分布	114
5.2.1	IBM3380 浮动块	114
5.2.2	TP1212 浮动块	115
5.2.3	负压浮动块 1	118
5.2.4	负压浮动块 2	120
5.3	基于多重网格法的气膜压力分布	123
5.4	飞行参数对气膜静态特性的影响	125
5.4.1	飞行参数对气膜承载力的影响	125
5.4.2	飞行参数对气膜压力中心的影响	126
第 6 章	表面粗糙度和表面容纳系数对气膜静态特性的影响	129
6.1	基于表面粗糙度的气膜润滑方程	129
6.1.1	基本方程	129
6.1.2	数值求解	130
6.2	表面粗糙度对气膜静态特性的影响	133
6.2.1	表面粗糙度对气膜压力分布的影响	133
6.2.2	表面粗糙度对气膜承载力的影响	137
6.2.3	表面粗糙度对气膜压力中心的影响	140
6.2.4	几种模型的计算效率对比	143
6.3	基于表面容纳系数的分子气膜润滑方程	144
6.3.1	分子气膜润滑方程的多项式对数形式	144
6.3.2	分子气膜润滑方程的修正	145
6.3.3	修正模型精度验证	150
6.4	表面容纳系数对气膜静态特性的影响	151
6.4.1	表面容纳系数对气膜压力分布的影响	151
6.4.2	表面容纳系数对气膜承载力的影响	152
6.4.3	表面容纳系数对气膜压力中心的影响	153
6.4.4	不同磁盘转速时表面容纳系数对气膜压力分布的影响	154
6.5	表面粗糙度和容纳系数对气膜承载特性的复合影响	159
6.5.1	气膜压力分布影响分析	159
6.5.2	气膜承载力影响分析	161
6.5.3	气膜压力中心影响分析	162

第 7 章	纳米间隙气膜动态特性研究	164
7.1	单自由度系统非线性动力学分析	164
7.1.1	单自由度模型求解过程	164
7.1.2	浮动块运动特性的时域分析	164
7.1.3	浮动块运动特性的频域分析	166
7.1.4	磁头/磁盘系统浮动块瞬态动力响应分析	168
7.2	二自由度系统非线性动力学分析	170
7.2.1	求解流程	170
7.2.2	浮动块运动特性的时域分析	171
7.2.3	浮动块运动特性的频域分析	173
7.2.4	不同参数对浮动块运动特性的影响	174
7.3	预紧力和磁盘转速对浮动块飞行特性的影响	178
7.3.1	浮动块及其初始状态	178
7.3.2	预紧力对浮动块飞行特性的影响	179
7.3.3	磁盘转速对浮动块飞行特性的影响	183
7.4	空气/氦气混合气中浮动块的飞行特性	188
7.4.1	相关参数计算	188
7.4.2	飞行高度动态响应	190
7.4.3	飞行角度动态响应	193
7.4.4	浮动块受力分析	194
7.5	浮动块发生触盘时的动态特性分析	199
7.5.1	触盘现象	199
7.5.2	正常环境压力($P_s=1.0\text{atm}$)时的触盘现象分析	200
7.5.3	较低环境压力($P_s=0.5\text{atm}$)时的触盘现象分析	202
第 8 章	磁头/磁盘系统冲击响应分析	205
8.1	磁盘系统有限元模型	205
8.1.1	硬盘系统几何模型	205
8.1.2	硬盘系统有限元模型	208
8.1.3	连接、接触和边界条件设置	212
8.2	磁头/磁盘系统冲击响应计算模型	215
8.2.1	基本流程	215
8.2.2	LS-DYNA 隐式-显式序列计算	216
8.2.3	重启动	219

8.3	磁头/磁盘系统冲击响应分析	220
8.3.1	硬盘在外壳、悬臂和磁盘的冲击响应	220
8.3.2	磁头/磁盘系统冲击响应	224
8.3.3	磁头/磁盘界面接触碰撞分析	230
8.4	磁头/磁盘系统冲击响应实验测量	231
8.4.1	原理和装置	231
8.4.2	测量和分析	235
参考文献		237
彩图		

第一篇 基本理论

第 1 章 绪 论

1.1 引 言

随着现代科学技术的发展,微型器件已经广泛应用于信息、医学、生物、航天航空等领域,对人类的生活产生了革命性的影响,这主要归功于无数科技人员对 MEMS/NEMS 的不断深入研究。MEMS/NEMS 具有许多优良特性:尺寸小、重量轻、响应快;高精度、高速度;高效率、低能耗等。然而,人们被 MEMS/NEMS 巨大的应用前景所吸引,更多关注 MEMS/NEMS 本身的制造和使用,而对于在 MEMS/NEMS 设计、制造和使用过程中存在的非常规物理机制的认识与了解却远远不够,这已成为制约 MEMS/NEMS 设计、制造和应用水平提高的重要瓶颈,这些问题的解决对微纳米摩擦学研究提出了严峻挑战^[1,2]。

由于 MEMS/NEMS 并非传统机械宏观意义下的简单几何缩小,几何尺寸的微小化使很多宏观下的物理现象发生变化,产生尺度效应。Jacobs 等^[3]研究了纳米尺度表面粗糙度对此类表面力的影响,Bhushan^[4]研究了 MEMS/NEMS 中的各种纳米摩擦学和纳米力学问题,Cheng 等^[5]研究了微通道中超疏水表面 Reynolds 数对边界滑移的影响。虽然并非所有 MEMS/NEMS 中都涉及流体(液体或气体)的流动,但只要有流体的流动,在这种微纳尺度下必然要考虑边界滑移的影响^[6]。纳米间隙气体润滑问题是 MEMS/NEMS 设计制造中的重要基础科学问题之一,如何通过数值方法,准确高效率地求解极端条件下(受表面力、分子力、粗糙度等方面的影响)纳米间隙气膜润滑的状态方程,是各种 MEMS/NEMS 设计、结构优化和控制等方面的重要基础与手段,而深入揭示这些表面/界面行为的规律并寻求其有效的控制方法是 MEMS/NEMS 设计与制造科学亟待研究的重要课题。

本书以磁记录硬盘内磁头/磁盘系统为研究对象,对纳米间隙气膜润滑方程及其数值计算方法进行详细研究和论述,系统地研究纳米间隙条件下气膜润滑的承载特性;基于非线性动力学分析方法,探讨不同工作条件下气膜浮动块的飞行特性;通过建立硬盘系统的有限元模型,对磁头/磁盘系统的冲击响应进行模拟分析。力求揭示纳米间隙条件下气膜的表面/界面行为规律和特性,使读者对纳米间隙润滑基本理论及其在磁头/磁盘系统中的应用有一个全面的认识,为具有纳米间隙气体润滑问题的 MEMS/NEMS 设计制造提供理论基础和数值方法。

1.2 硬盘及其工作原理

1.2.1 硬盘的结构

硬盘作为一个数据存储设备,已经有 60 余年的发展历史,由于具有存储容量大、性价比高、携带方便等特点,受到广大用户的喜爱。20 世纪 50 年代,IBM 公司开发出了一款商业用途的计算机磁盘存储系统 RAMAC 305,这款存储系统重达 1t,体积约为两个冰箱的大小,内部采用 50 张直径为 2ft^①的磁盘盘片,工作时磁盘转速达 1200r/min,储存密度是 100B/in^{2②},存储容量为 5MB。20 世纪 70 年代,由 IBM 公司研制的另一款计算机磁盘存储系统 3340 Wenchestr 问世,该存储系统的硬盘驱动器由两个 30MB 的储存单元组成,确立了硬盘的基本架构。

1980 年,希捷公司开发了一款尺寸为 5.25in^③、容量为 5MB 的计算机硬盘。20 世纪 80 年代末期,IBM 公司研发的磁阻技术在很大程度上提升了读写磁头的灵敏度,同时将磁盘存储的密度提高了数十倍,该项技术也为进一步提升硬盘系统的存储容量奠定了坚实的基础。20 世纪 90 年代末期,希捷公司连续推出了转速为 7200r/min 和 15000r/min 的高磁盘转速硬盘。随后,希捷公司又将硬盘存储器的体积缩减至 1in^{3④},将存储容量提高了三倍多。

近年来,为了和固态硬盘(solid state drives, SSD)相抗衡,硬盘行业在超顺磁极限的基础上研发了各种各样的技术以将磁盘的记录密度推至超高级别(>10TB/in²)^[7,8]。其中,热辅助磁记录(heat-assisted magnetic recording, HAMR)技术是极具发展前景的技术之一。HAMR 技术使用激光对铁磁性媒介加热以降低其矫顽力,待媒介冷却下来,矫顽力再次变大,这就做到了在未达到超顺磁极限的前提下记录更小的比特尺寸^[9,10]。HAMR 技术的最大挑战是设计出合理的磁头/磁盘界面以方便地控制加热进程,目前可供选择的方法是位模式媒介记录^[11,12]。位模式媒介通过将单个磁岛的尺寸缩短至约 10nm 来得到更小的比特尺寸,这种技术需要生产制造出 10nm 范围内的产品,目前此技术还未成熟地发展起来。

由于磁记录硬盘具有容量大、成本低、可靠性高等固态硬盘短期内难以赶超的优势,所以目前全球大部分数据的存储仍采用磁记录硬盘。如无特别说明,本书所介绍的硬盘均为磁记录硬盘。

① 1ft = 3.048×10⁻¹m

② 1in² = 6.451600×10⁻⁴m²

③ 1in = 2.54cm

④ 1in³ = 1.63871×10⁻⁵m³