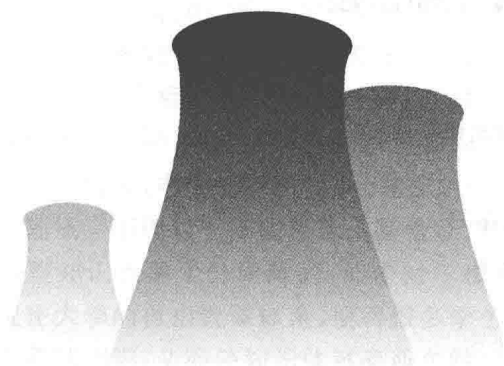


Fundamental Principles of
Nuclear Engineering

核工程 基本原理

⦿ 俞冀阳 编著





核工程 基本原理

☢ 俞冀阳 编著

清华大学出版社
北 京

内 容 简 介

本书第1章是数理基础,介绍高等数学最核心的概念——微分和积分,以及物理学里最基本的单位制。第2章是热力学,介绍热力学所涉及的一些基本物理量和基本定律。第3章是传热学,讨论热传导、对流换热和热辐射的基本原理,以及核反应堆内发热源的特点。第4章是流体流动,介绍流动的一些基本概念,以及伯努利方程的应用和各种流动阻力的计算。第5章是电气学,介绍电磁学的基础、交流电和直流电等基本原理。第6章是仪表与控制,介绍温度、压力、水位、流量、位置和各种放射性的基本测量原理,还讨论了基于PID的过程控制理论。第7章是化学化工,介绍化学基础原理和腐蚀、铀的提取和转化等。第8章是材料学,介绍金属结构、属性、各种应力以及辐照效应、反应堆内使用的各种材料等。第9章是通用机械,介绍内燃机、换热器、泵、阀门、蒸汽发生器、稳压器等设备的原理以及特点。第10章是核物理,介绍原子核、质量亏损、各种放射性衰变以及中子与原子核的相互作用等基本原理。第11章是核反应堆理论,除了基本概念外,还涉及反应堆临界理论和动态的行为、同位素的分离和核燃料的循环等。第12章是辐射防护,介绍辐射防护的基本物理量以及辐射防护的方法和原则。

本书内容全面,讲解深入浅出,既可以作为高等院校高年级本科生或研究生(特别是工程硕士研究生)的教材,也可以作为核电厂员工培训的参考书,还可以作为帮助读者全面了解核工程相关知识的科技读物。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

核工程基本原理/俞冀阳编著.--北京:清华大学出版社,2016

ISBN 978-7-302-43345-3

I. ①核… II. ①俞… III. ①核工程 IV. ①TL

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第062865号

责任编辑:朱红莲

封面设计:傅瑞学

责任校对:赵丽敏

责任印制:李红英

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦A座 邮 编:100084

社总机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:清华大学印刷厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:27.25 字 数:664千字

版 次:2016年6月第1版 印 次:2016年6月第1次印刷

印 数:1~1000

定 价:69.00元

产品编号:067387-01

前言

由于核能是一种清洁、安全、经济的能源,是人类最具希望的未来能源之一。对于经济发展迅速、环境压力较大的中国来说,发展核电为一合适选择。在全世界,约 15% 的电力是由核能供应。核工业的发展是朝向经济性、安全性与防止核扩散的方向迈进。目前中国正在加大能源结构调整力度,积极发展核电、风电、水电等清洁优质能源。到 2050 年,根据不同部门的估算,中国核电装机容量可以分为高、中、低三种方案:高方案为 3.6 亿 kW(相当于 360 台百万千瓦机组),中方案为 2.4 亿 kW,低方案为 1.2 亿 kW。

若如此,在今后的很长一段时间内,对核电人才将保持持续的强烈需求。核工程所涉及的知识面非常宽,知识基础除了数学、物理和化学以外,还涉及热力学、传热、流体、电气、仪控、材料、化工、机械、核物理、反应堆理论、辐射防护等诸多领域。不但对于那些原本从其他领域转入核工程领域的人来说,要全面掌握这些知识点是十分困难的,即便对于那些本科就读于核工程专业的学生,由于现在大学的自由选课体系,使得很多学生没有能够全面修习核工程所涉及的所有基础知识,从而使知识体系有所欠缺。当然读者也可以购买各个领域的专著然后加以研习,获得全面的知识。但是如何快速补充所需的基本知识和基本原理的脉络,全面掌握核工程领域的知识基础,这在当前追求节奏和效率的年代,已经是一个十分突出的问题了。

另一方面,如若大量的知识面不全面的人员进入核工程领域,对核安全无疑是一个重大的隐患。核电厂也在想方设法对人员进行培训,在培训过程中,也凸显了目前高校输送的本科生甚至研究生,知识面不全面的弊端。而对于学生或者刚参加工作的年轻人而言,一方面极需要快速补充核工程方面全面的知识,另外一方面又没有充足的时间进行系统的学习,因此需要有一本通俗易懂的对核工程领域所涉及的基本原理进行全面论述的书,以方便对核工程知识点进行全面系统的梳理,并可以随时翻阅有关的基本概念、基本知识。因此本书的编写无疑是十分必要而且大有益处的。

本书力求用通俗易懂的方式对基本原理进行讲解,尽可能通过图形直观地讲解基本概念和原理,尽量避免复杂的数学推导和计算。本着这样的出发点,本书作者根据在清华大学多年的教学经验,提炼概括出核工程领域所涉及的一些主要的基本概念和知识点,编辑成为《核工程基本原理》一书,供大家阅读和使用。本书围绕着核工程的应用范围,对十分基础的和重要的原理性的知识点

进行全面、系统的介绍,形成一个全面的知识体系。

本书编写过程中尽量采用“零基础”可阅读的理念,当然绝对的“零”基础是做不到的,即具有高中毕业文化程度的读者就可以基本上无障碍阅读本书。本书既可以作为大专院校核工程相关专业的本科生或研究生的教材,也可作为核电厂员工培训的参考书,当然也可以作为帮助读者全面了解核工程相关知识的读物。

俞冀阳

2016年3月

目录

第 1 章 数理基础	1
1.1 微积分	1
1.1.1 微分和导数	2
1.1.2 积分	3
1.1.3 拉普拉斯算符	4
1.2 物理量的单位	6
1.2.1 单位制	6
1.2.2 单位转换	7
1.2.3 物理量的图形表示	7
练习题	10
第 2 章 热力学	11
2.1 热力性质	11
2.2 能量	14
2.2.1 功与热	16
2.2.2 能量和功率	17
2.3 热力系统及过程	17
2.4 相变	19
2.5 热力学性质图	22
2.5.1 压力-温度(p - T)图	23
2.5.2 压力-比体积(p - v)图	23
2.5.3 压力-比焓(p - h)图	23
2.5.4 比焓-温度(h - T)图	24
2.5.5 温度-比熵(T - s)图	24
2.5.6 比焓-比熵(h - s)图	25
2.6 热力学第一定律	25
2.6.1 朗肯循环	27
2.6.2 热力学第一定律在蒸气动力系统中的应用	28
2.7 热力学第二定律	30

2.7.1 熵	30
2.7.2 卡诺定理	31
2.8 核电厂热力循环分析	33
2.8.1 汽轮机效率	34
2.8.2 泵效率	35
2.8.3 理想与实际循环	36
2.9 理想气体定律	39
练习题	40

第3章 传热学 42

3.1 术语介绍	42
3.2 热传导	45
3.2.1 傅里叶定律	46
3.2.2 平板导热	46
3.2.3 等效热阻	46
3.2.4 圆柱形导热	47
3.3 对流换热	48
3.3.1 对流换热计算	48
3.3.2 总体换热系数	49
3.4 辐射换热	50
3.4.1 热辐射	50
3.4.2 黑体辐射	51
3.4.3 辐射角系数	52
3.5 换热器	52
3.6 沸腾传热	53
3.6.1 流动沸腾传热	54
3.6.2 临界热流密度	56
3.7 热源与衰变热	58
3.7.1 堆芯的总热功率	58
3.7.2 功率展平	59
3.7.3 热管因子	60
3.7.4 停堆后反应堆的功率	61
练习题	62

第4章 流体流动 64

4.1 连续方程	64
4.2 层流和湍流	65
4.2.1 雷诺数和水力直径	66
4.2.2 管内流速分布	66

4.2.3	主流平均速度	67
4.2.4	黏度系数	67
4.3	伯努利方程	67
4.3.1	文丘里流量计	69
4.3.2	拓展的伯努利方程	70
4.4	压头损失	70
4.4.1	摩擦压降	70
4.4.2	局部压降	71
4.5	自然循环	72
4.5.1	热驱动头	73
4.5.2	自然循环的条件	73
4.6	两相流动	74
4.6.1	两相压降倍乘系数	74
4.6.2	两相流流型	75
4.6.3	流动不稳定性	75
4.7	一些特殊的流动现象	76
4.7.1	甩管	76
4.7.2	水锤和气锤	77
	练习题	77
第5章	电气学	79
5.1	电学基础	79
5.1.1	原子结构	79
5.1.2	电场力	79
5.1.3	库仑定律	81
5.2	电学基本术语	81
5.3	欧姆定律	83
5.4	电的产生方法	84
5.4.1	电化学法	84
5.4.2	静电	85
5.4.3	磁感应	85
5.4.4	压电效应	86
5.4.5	热电效应	86
5.4.6	光电效应	86
5.4.7	热电子发射	87
5.5	磁	88
5.5.1	磁通量	88
5.5.2	电与磁	89
5.5.3	磁动势	90

5.5.4	磁场强度	90
5.5.5	磁导率与磁阻	91
5.5.6	磁路	91
5.5.7	磁化曲线与磁滞	92
5.5.8	电磁感应	93
5.5.9	法拉第定律	93
5.6	直流电	94
5.6.1	直流电源	94
5.6.2	电阻和电阻率	98
5.6.3	基尔霍夫定律	99
5.6.4	电感器	102
5.6.5	电容器	105
5.6.6	直流发电机	107
5.6.7	直流电动机	110
5.7	交流电	113
5.7.1	交流电的产生	113
5.7.2	交流电路的器件响应	115
5.7.3	交流电路的功率	118
5.7.4	三相电	120
5.7.5	交流发电机	122
5.7.6	交流电动机	124
5.7.7	变压器	128
	练习题	131

第6章 仪表与控制 133

6.1	温度测量	133
6.1.1	电阻温度探测器	133
6.1.2	热电偶	135
6.1.3	测温电路	137
6.2	压力测量	138
6.2.1	波纹管压力传感器	138
6.2.2	弹簧管压力传感器	139
6.2.3	压力变送器	140
6.3	水位测量	142
6.3.1	透明管液位计	142
6.3.2	浮子式液位计	143
6.3.3	电导式液位计	144
6.3.4	差压式液位计	145
6.4	流量测量	147

6.4.1	文丘里式流量计	147
6.4.2	毕托管	148
6.4.3	浮子流量计	148
6.4.4	蒸气流量测量	149
6.5	位置测量	150
6.5.1	位置同步装置	150
6.5.2	限位开关	151
6.5.3	磁簧开关	151
6.5.4	位移传感器	152
6.5.5	线性可变差动变压器	152
6.6	放射性测量	153
6.6.1	射性种类	154
6.6.2	气体电离探测器	156
6.6.3	正比计数器	158
6.6.4	电离室	160
6.6.5	盖革-米勒计数器	165
6.6.6	闪烁计数器	165
6.6.7	伽马谱仪	168
6.6.8	其他探测器	169
6.6.9	核电子信号处理	171
6.6.10	堆芯中子注量率测量	172
6.6.11	核功率测量	174
6.7	过程控制理论	175
6.7.1	控制系统框图	177
6.7.2	双位控制	179
6.7.3	比例控制	180
6.7.4	积分控制	183
6.7.5	比例积分控制	184
6.7.6	比例微分控制	185
6.7.7	比例微分积分控制	186
6.7.8	控制站与阀动器	187
	练习题	190

第7章 化学化工 191

7.1	化学基础	191
7.1.1	原子结构	191
7.1.2	化学元素与分子	192
7.1.3	阿伏伽德罗常数	196
7.1.4	元素周期表	197

7.2	化学键	202
7.2.1	离子键	202
7.2.2	共价键	203
7.2.3	金属键	204
7.2.4	范德华键	204
7.2.5	氢键	205
7.3	有机化学	206
7.4	化学方程式	207
7.4.1	平衡移动原理	208
7.4.2	溶液浓度	209
7.4.3	化学方程式的平衡	209
7.5	酸、碱、盐和 pH 值	209
7.6	腐蚀	211
7.6.1	腐蚀理论	211
7.6.2	常见的腐蚀	214
7.6.3	杂质和电偶腐蚀	216
7.6.4	特殊的腐蚀	217
7.7	反应堆水化学	219
7.7.1	水化学参数与控制	222
7.7.2	水处理	224
7.7.3	溶解气体和悬浮固体的去除	228
7.7.4	水的纯净度	230
7.7.5	水的放射化学	230
7.8	铀的提取和精制	232
7.8.1	铀的浸出	232
7.8.2	铀的提取	232
7.8.3	铀的精制	233
7.9	铀的化学转化	234
7.9.1	二氧化铀制备	234
7.9.2	四氟化铀制备	234
7.9.3	六氟化铀制备	234
7.9.4	金属铀制备	235
	练习题	235
第 8 章	材料学	237
8.1	金属结构	237
8.1.1	晶格类型	237
8.1.2	晶粒与边界	238
8.1.3	多态	239

8.1.4	合金	239
8.1.5	金属内的缺陷	240
8.2	金属属性	241
8.2.1	应力和应变	241
8.2.2	胡克定律	243
8.2.3	应力和应变的关系	244
8.2.4	材料的物理性质	244
8.3	金属热处理	247
8.4	吸氢脆化和辐照效应	247
8.5	热应力	249
8.6	脆性断裂	250
8.6.1	脆性断裂机理	250
8.6.2	最小无延性转变温度	252
8.7	反应堆材料	252
8.7.1	核燃料	253
8.7.2	结构材料	257
8.7.3	冷却剂	261
8.7.4	慢化剂	266
	练习题	269
第 9 章	通用机械	271
9.1	内燃机	271
9.1.1	内燃机的结构	272
9.1.2	内燃机的支持系统	277
9.1.3	内燃机工作原理	279
9.2	换热器	281
9.3	泵	283
9.3.1	离心泵	284
9.3.2	容积泵	287
9.3.3	压水堆核电厂冷却剂泵	290
9.4	阀门	293
9.4.1	阀门类型	293
9.4.2	阀门的基本结构	294
9.4.3	典型的阀门	295
9.4.4	泄压阀和安全阀	302
9.5	其他机械	304
9.5.1	空气压缩机	304
9.5.2	液压机	306
9.5.3	蒸发器	306
9.5.4	蒸汽发生器	307

9.5.5 冷却塔	312
9.5.6 稳压器	313
9.5.7 扩散分离器	315
练习题	316
第 10 章 核物理	317
10.1 原子核	318
10.1.1 原子序数与质量数	319
10.1.2 同位素	319
10.1.3 核素图	320
10.2 质量亏损与结合能	321
10.2.1 质量亏损	321
10.2.2 结合能	322
10.2.3 能级理论	322
10.3 放射性衰变	323
10.3.1 放射性衰变的发现	323
10.3.2 衰变的种类	324
10.3.3 衰变链	326
10.3.4 半衰期	327
10.3.5 放射性活度	328
10.3.6 放射性平衡	328
10.4 中子与物质相互作用	329
10.4.1 散射过程	329
10.4.2 热中子	331
10.4.3 辐射俘获效应	331
10.4.4 粒子发射	332
10.4.5 裂变反应	333
10.5 核裂变	333
10.5.1 核裂变的液滴模型	334
10.5.2 裂变材料	334
10.5.3 比结合能	335
10.5.4 核裂变释放出来的能量	336
练习题	339
第 11 章 核反应堆理论	340
11.1 中子源	341
11.1.1 天然中子源	341
11.1.2 人工中子源	342
11.1.3 压水堆中子源组件	342
11.2 核截面	343

11.2.1	中子核反应截面	343
11.2.2	平均自由程	347
11.2.3	截面的温度效应	347
11.3	中子注量率	348
11.3.1	斐克定律	348
11.3.2	中子扩散方程	349
11.3.3	自屏效应	350
11.4	反应堆功率	350
11.4.1	裂变反应率	350
11.4.2	体积释热率	350
11.4.3	堆芯核功率	351
11.5	中子慢化	351
11.5.1	中子的减速	351
11.5.2	裂变时中子的释放	353
11.5.3	中子代时间	354
11.5.4	中子能谱	355
11.5.5	费米年龄方程	356
11.5.6	中子的最可几速率	356
11.6	中子循环与反应堆临界	357
11.6.1	增殖因数	357
11.6.2	四因子公式	359
11.6.3	有效增殖因数	360
11.6.4	临界大小	360
11.6.5	临界计算	362
11.7	反应性	363
11.7.1	反应性系数	364
11.7.2	温度系数	364
11.7.3	压力系数	366
11.7.4	空泡系数	366
11.7.5	功率系数	367
11.8	中子毒物	367
11.8.1	可燃毒物	368
11.8.2	可溶毒物	368
11.8.3	控制棒	368
11.8.4	氙	370
11.8.5	钐	374
11.9	次临界系统的源倍增	375
11.9.1	次临界系统的源倍增因子	375
11.9.2	反应性变化对源倍增因子的影响	376
11.9.3	用源倍增因子外推临界	377

11.10	反应堆动态学	378
11.10.1	反应堆动态方程	378
11.10.2	倒时方程	379
11.10.3	反应堆周期	379
11.11	核电厂运行	381
11.11.1	反应堆启动	383
11.11.2	核电厂启动	383
11.11.3	核电厂停运	385
11.11.4	核电厂状态	386
11.12	同位素分离	387
11.12.1	分离功和价值函数	387
11.12.2	扩散法同位素分离	389
11.12.3	高速离心法	391
11.12.4	激光法	392
11.12.5	喷嘴分离法	392
11.13	核燃料循环	393
11.13.1	循环方式	393
11.13.2	核燃料循环关键环节	396
11.13.3	核燃料循环成本	397
练习题		399
第 12 章	辐射防护	400
12.1	辐射量和单位	400
12.1.1	描述辐射源和辐射场的量	401
12.1.2	剂量学中常用的辐射量	401
12.1.3	辐射防护中常用的辐射量	402
12.2	辐射防护基本原则和辐射防护标准	405
12.2.1	辐射防护基本原则	405
12.2.2	辐射防护标准	408
12.3	辐射防护方法	410
12.3.1	人的辐射效应	410
12.3.2	确定性效应	410
12.3.3	随机性效应	412
12.4	辐射监测	413
12.5	辐射防护评价	414
12.6	辐射应急	414
练习题		414
符号表		416
参考文献		421

根据我国《民用核设施安全监督管理条例》的规定,民用核设施采取许可证管理制度。核电厂的安全许可证件可分为两大类:设施和人员。其中对人员而言,安全许可证件有操纵员执照和高级操纵员执照。其中关于操纵员执照,法规明确规定:“具备下列条件的,方可批准发给操纵员执照:身体健康,无职业禁忌证;具有大专以上文化程度或同等学力;经过运行操作培训,并经考核合格。”这其中规定了必须具有大专以上的文化程度。一般地,大专生和高中生在知识体系里的一个重要差别就是有没有学过微积分,因此本书从微积分谈起。微积分里面的最重要的三个概念是:微分、导数和积分。微积分的方法和传统的算术、代数一样,也有加、减、乘、除、方程、函数,但是引进了新的微分和积分的操作。

为了引入微积分,我们适当地回顾一下数学的发展也是十分有意义的。数学(mathematics)是研究现实世界的空间形式和数量关系的一门高度抽象的学科。这里的核心关键词是“空间”“数量”和“抽象”。因此数学是从对现实世界的抽象开始的,例如从“一个苹果”的客观事实中抽象出了数量“1”和空间形式“球形”,然后发展出了关于数量的运算:加、减、乘、除和关于空间的基本概念:点、线、面、体。很快数就突破了自然数的范围,人们发现了零和负数、分数、小数、有理数、无理数等。并逐步建立了实数轴的概念。这大体就是从算术到实数分析的过程。进一步就是牛顿和莱布尼茨创立的微积分。微积分引入了两个重要的“量”:无穷小和无穷大。虽然关于无穷小和无穷大到底是不是“数”到目前还有争议,但基于其创立的微积分却无疑成为了现代工业革命的理论基石。

现代数学分支越来越多,包括分析、代数、几何、数理逻辑、集合论等。本章只对理解核工程基本原理必备的一些基本的数学工具进行必要的介绍。

1.1 微积分

很多实际工程问题可以通过算术运算或者代数运算来求解,但也有不少工程问题无法通过算术或者代数求解,需要用到微积分的知识。

例如,当一个物体下落的时候,速度发生连续变化;震荡电路内的电流连续周期性地变化。这两个例子里面的速度和电流,都不再是常数,而是连续变化的量。我们把涉及某个物理量随时间变化的系统称为动力学系统。动力学系统的求解通常要用到微积分的方法。

1.1.1 微分和导数

在数学中,微分(differential)是对函数的局部变化的一种线性描述。设函数 $y=f(x)$ 在某区间内有定义, x_0 和 $x_0+\Delta x$ 都在这区间内,如果函数的增量

$$\Delta y = f(x_0 + \Delta x) - f(x_0) \quad (1-1)$$

可以表示为

$$\Delta y = A \cdot \Delta x + o(\Delta x) \quad (1-2)$$

其中, A 是不依赖于 Δx 的常数, $o(\Delta x)$ 是 Δx 的高阶无穷小。那么称函数 $y=f(x)$ 在点 x_0 是可微的,其中 $A \cdot \Delta x$ 叫做函数 $y=f(x)$ 在点 x_0 相应于自变量增量 Δx 的微分,记作 dy 。自变量 x 的增量 Δx 称为自变量 x 的微分,记为 dx ,因此有

$$dy = A dx \quad (1-3)$$

下面举一个实际例子来理解什么是微分。假如某一物体在 t_1 时刻处于 P_1 点的位置,如图 1-1 所示。该物体作直线运动, t_2 时刻到了 P_2 点,假设 P_1 点离原点 O 的位移是 S_1 , P_2 点离 O 的位移是 S_2 。那么这段时间内物体的平均速度(average velocity)为

$$v_{av} = \frac{S_2 - S_1}{t_2 - t_1} \quad (1-4)$$

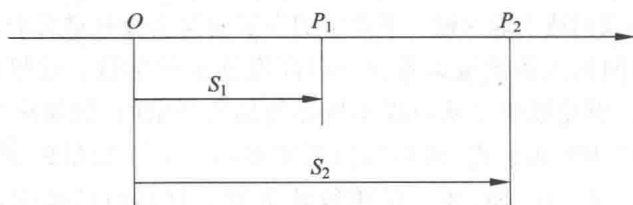


图 1-1 两点之间的运动

如果 P_1 和 P_2 两点十分靠近,平均速度表示为

$$v_{av} = \frac{\Delta S}{\Delta t} = \frac{S_2 - S_1}{t_2 - t_1} \quad (1-5)$$

虽然这样得到的平均速度很有用,但很多时候我们希望得到某一时刻的瞬时速度。瞬时速度和平均速度不同,除非速度不随时间而变化。当速度随时间在变化的时候,瞬时速度不等于平均速度,这是十分显然的事实。如果我们把某一运动的位移和时间画在一个图上,如图 1-2 所示,那么如果我们采用式(1-5)来计算 S_1 到 S_2 之间的平均速度,就会发现得到的实际上是连接两点的直线的斜率。这样得到的平均速度并不能很好地反映两点之间的速度。而如果缩小两点之间的距离,例如 S_3 和 S_4 之间的平均速度却能够比较好地近似这两点之间的速度。这给了我们一个很好的启发,如果缩短两点之间的距离,得到的平均速度会更加接近瞬时速度。那么 we 能不能够设定一个很小的距离来获得瞬时速度呢? 数

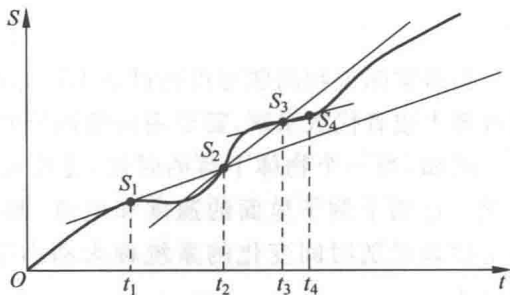


图 1-2 位移-时间图