

Fundamentals of Liquid Crystal Devices

(Second Edition)

液晶器件基础

(原书第二版)

(美) 杨登科 (Deng-Ke Yang)

(美) 吴诗聪 (Shin-Tson Wu)

著

郭太良 周雄图 等 译



科学出版社

Fundamentals of Liquid Crystal Devices
(Second Edition)

液晶器件基础

(原书第二版)

[美] 杨登科 (Deng-Ke Yang) 著

[美] 吴诗聪 (Shin-Tson Wu)

郭太良 周雄图 等 译

科学出版社

北 京

图字: 01-2016-1760 号

内 容 简 介

本书第1章至第7章介绍液晶材料基础以及液晶器件研究和设计的必备技术,包括:液晶物理基础,光在各向异性光学介质中的传播,光学建模方法,液晶的电场效应,弗里德里克斯转变,液晶材料和液晶指向矢排布建模。第8章至第11章介绍液晶显示器件的原理、设计、操作和性能,包括:透射式液晶显示器,反射式和透反式液晶显示器,液晶显示模组、驱动和双稳态显示,液晶/聚合物复合材料。第12章介绍可调谐液晶光子器件。原书第二版对第一版中出现的一些问题进行改进,并主要对液晶器件的新材料、3D液晶显示器件和颇具前景的蓝相液晶显示器件做了补充,蓝相技术有望减少液晶器件的响应时间和简化液晶器件结构。

本书适合从事液晶光学、液晶显示及相关材料的研究、开发和生产的科学工作者,工程技术人员,以及光电、电子、物理和化学专业的院校教师、研究生和高年级学生参考阅读。

图书在版编目(CIP)数据

液晶器件基础:原书第二版/(美)杨登科(Yang D. K.), (美)吴诗聪(Wu S. T.)著;郭太良等译. —北京:科学出版社, 2016.3

书名原文: Fundamentals of Liquid Crystal Devices (Second Edition)

ISBN 978-7-03-047935-8

I. ①液… II. ①杨… ②吴… ③郭… III. ①液晶器件 IV. TN103

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第057715号

责任编辑: 顾英利 李丽娇 / 责任校对: 杜子昂

责任印制: 张 伟 / 封面设计: 铭轩堂

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

*

2016年3月第 一 版 开本: 720×1000 B5

2016年3月第一次印刷 印张: 34 3/4

字数: 620 000

定价: 158.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

版权所有。译本经授权译自威立出版的英文版图书。

All Rights Reserved. Authorized translation from the English language edition, entitled *Fundamentals of Liquid Crystal Devices (Second Edition)*, ISBN 978-1-118-75200-5, by Deng-Ke Yang and Shin-Tson Wu, Published by John Wiley & Sons, Limited. Responsibility for the accuracy of the translation rests solely with China Science Publishing & Media Ltd. (Science Press) and is not the responsibility of John Wiley & Sons, Limited. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyrights holder, John Wiley & Sons, Limited.

Copies of this book sold without a Wiley sticker on the cover are unauthorized and illegal.

译者名单

序 言	林志贤	林金堂
第 1 章	胡海龙	
第 2 章	周雄图	李福山
第 3 章	陈恩果	
第 4 章	周雄图	李福山
第 5 章	杨尊先	
第 6 章	张永爱	
第 7 章	杨尊先	
第 8 章	叶 芸	
第 9 章	叶 芸	
第 10 章	林志贤	徐 胜 姚剑敏
第 11 章	吴朝兴	
第 12 章	陈恩果	
第 13 章	周雄图	
第 14 章	周雄图	
第 15 章	周雄图	
第 16 章	周雄图	
总校阅	郭太良	周雄图

译者序

平板显示作为一种千亿美元级产业，带动作用巨大，我国已经将其定位为后续发展的优势产业，产值以每年两位数增长，2014 年我国平板显示业产值超过 1600 亿元人民币。液晶显示在与 CRT、PDP 等其他显示技术的竞争中屡战屡胜，短短几十年，以 TFT-LCD 为代表的液晶显示器从平板显示器件中脱颖而出，在显示器市场上独占鳌头，其作为主流显示技术的地位至今仍然不可动摇。除了液晶显示器件，其他液晶器件，如液晶光调制器等，也进入了一个飞速发展阶段。

液晶显示器件是多元知识和技能的总汇，无论是研究开发还是产业化，都必须对液晶器件进行深入探讨和系统学习。因此，引入一本既系统介绍液晶基础和液晶器件技术，同时包含液晶器件在科学研究和产业化应用的最新进展的书籍，无论对我国学术界，还是产业界的液晶人才培养都具有重要意义。

美国肯特州立大学液晶研究所杨登科（Deng-Ke Yang）教授与美国中佛罗里达大学光学与光子学学院吴诗聪（Shin-Tson Wu）教授合著的《液晶器件基础（原书第二版）》2014 年年底由威立（Wiley）出版社出版。杨教授和吴教授都是在国际液晶界有重要影响的科学家，杨教授主要从事液晶材料及液晶电光器件的研究，尤其在胆甾相液晶、液晶/聚合物混合材料和电光器件等领域取得了一系列重要研究成果。杨教授还是双稳态胆甾相液晶显示技术的发明人之一，该项技术被认为是世界上到目前为止最具潜力的电子纸技术。吴教授是液晶显示领域知名专家，SID/OSA/IEEE/SPIE 等多个国际著名学会会士（fellow），因其在现代液晶显示技术革新和人才培养方面做出的杰出贡献被授予了多项国际重要奖项。吴教授同时是混合扭曲向列型（MTN）液晶显示模式的发明人，并攻克了多项蓝相液晶领域的关键材料和技术问题，建立完善了蓝相液晶的理论体系。

《液晶器件基础》是杨教授和吴教授两位液晶领域知名专家倾注其心血和情感联合撰写的著作，从液晶物理和化学、光学、材料科学、器件结构、驱动电路等方面，对液晶器件进行系统和深入的阐述。不仅对液晶特性和相关的必备知识做了系统的讲解，而且对 IPS、MVA、OCB、LCPC、PDLC、PSLC 等高端液晶显示器件的工作原理做了详细的介绍。该书还对液晶光子器件做了比较完整的介绍。在原书第二版中，杨教授和吴教授结合他们各自课题组的最新研究成果，增加了液晶器件的新材料、3D 液晶显示器件和蓝相液晶显示器件等液晶领域的最新进展，在保证系统化和指导性的同时，也保证了时新性。毫无疑问，这是国际液晶领域一本高水平的专著，可作为大学本科、研究生应用物理、电子技术和显示工

程等专业教材，并可作为液晶显示器生产厂员工培训教材及供有关工程技术人员阅读参考，具有重要的学习和参考价值。该书的引入对我国人才培养、研发能力提高、产业化推动，对学科发展、科学研究和国民经济发展都具有重大的学术价值。

福州大学平板显示技术国家地方联合工程实验室在吴诗聪教授的帮助下，联系国内科学出版社与威立（Wiley）出版社签订协议，以翻译形式引进该书，并在第一时间组织二十几位多年从事信息显示器件技术方面的教学科研人员和相关专业博士生、硕士生进行翻译。原本希望该书中文版能与英文版同步出版，但为了保证翻译的准确性，译者在翻译过程中及时与著者进行交流请教，部分涉及前沿研究内容的章节边学习边翻译，并组织人员和专家进行多次校阅和审阅。在吴教授 2015 年 4 月 26 日应邀访问福州大学之际对该书翻译过程中遇到的疑问又进行了深入的探讨。历经近两年时间，该书的翻译工作才得以完成。

借此机会，译者向杨登科教授和吴诗聪教授的著作表达崇高敬意，并特别要感谢吴诗聪教授在本书翻译过程中的指导和帮助。本书的翻译和出版得到了上海交通大学 TFT-LCD 关键材料及技术国家工程实验室苏翼凯教授和四川大学电子信息学院王琼华教授的大力支持和帮助，在此向他们表示衷心的感谢。本书各章节主要译者列在译者名单中，在本书的翻译过程中，得到了陈伟、陈知新、褚子航、黄炳乐、林坚普、林木飞、林婷、彭玉颜、孙磊、叶光、曾群英、曾祥耀、张国成等（按拼音顺序）的大力协助，在此对他们的辛苦付出表示感谢。科学出版社的顾英利、李丽娇为本书的翻译、编辑、加工和出版付出了辛勤的劳动，在此深表谢意。由于《液晶器件基础（原书第二版）》内容博大精深，且包含丰富的前沿研究成果，加之译者学识水平有限，译文中难免会有错误、疏漏和欠妥之处，恳请同行专家和广大读者批评指正。

译 者

2016 年 1 月

丛书主编序言

作为研究生和高年级本科生的教材，本书第一版标志着 Wiley-SID 在显示技术方面丛书的开始。虽然第一版很好地满足了读者的需求，但是近八年来，液晶显示技术的持续发展，使得对本书进行增修以保证其时效性变得非常有必要。

因此，本书第二版在以下一些章节进行了补充：第 1 章增加了液晶的弹性形变；第 3 章增加了窄波段和宽波段四分之一波片的偏振转换；第 5 章增加了锚定强度和倾斜角的测量。

本书每一章内容上是独立的，前面几章分别介绍了液晶的基本物理基础、液晶与光和电场的相互作用以及液晶的建模方法。接下来几章分别介绍了采用液晶实现显示的方式。第 12 章，也就是第一版最后一章介绍了光束转向器、可变焦透镜和不依赖偏振的器件等一些光子器件。本书第二版新增加了四章：其中两章分别介绍了学术界新兴研究课题，蓝相和聚合物稳定蓝相液晶，展望其在快速响应液晶显示器和光子器件的前景。还有一章讨论了液晶的组成元件，最后一章讨论了基于液晶显示器的 3D 显示系统。

第二版格式和内容安排上与第一版一样，每一章最后都会设置一些问题和练习，它们的答案或可在 Wiley 网站上找到。

随着电光技术的不断发展，其中一部分也被成功应用于液晶市场。然而，作为继 CRT 之后的另一种在大众市场取得重大突破，以及可以同时实现平板显示和投影显示的显示技术，液晶技术继续保持着其主流显示技术的地位。《液晶器件基础（第二版）》以及里面所列的参考文献，其中一部分是非常新的研究成果，将保证本书能继续为学生和其他一些专业读者提供该领域非常有价值的介绍。

Anthony C. Lowe

2014 年于英国布雷什菲尔德

第二版序言

液晶显示已经成为信息显示工业的主流技术，已被广泛应用于小尺寸显示，如计算器、手机、数码相机和头戴式显示器；中尺寸显示，如笔记本电脑和桌面电脑显示器；大尺寸显示，如直视型电视和投影电视。液晶显示具有高分辨率、高亮度和平板化显示等优点，以及由此带来的重量轻、能耗低、甚至在某些场合可以实现柔性显示。液晶显示的工作模式分为透射式和反射式。液晶同样已被应用于激光光束转向器、可调光衰减器和可变焦透镜等光子器件中。无疑，液晶将继续在信息技术时代扮演重要角色。

目前，关于液晶物理和化学以及液晶器件的书籍已有很多。然而，同时介绍液晶基础和应用的书籍却很少。因此，本书主要目的是为高年级本科生和研究生提供一本教材。本书可供一学期或者两学期的使用，教师可以根据课程时间和学生兴趣选择所教学的章节。同时也可以作为对液晶显示和光子器件感兴趣的学者和工程师的参考书籍。

本书内容是这样安排的：前面几章主要涉及液晶基础以及学习和设计液晶器件所需的一些必要技术。后面的几章介绍液晶器件的原理、设计、工作方式和性能。由于篇幅有限，液晶物理和化学以及液晶器件的方方面面不能在本书全部介绍，但是，我们希望本书能作为读者了解液晶的入门书籍，并为他们的液晶职业生涯提供基础知识和技术。

本书第一版出版以后，我们收到了很多的反馈、建议、校正和鼓励，在此对他们表示感谢，同时也将这些反馈放入到第二版中。同时，液晶技术在近几年取得了诸多新进展，因此，增加了一些章节对这些新进展进行介绍。

非常感谢 A. Lowe 博士的鼓励，感谢为本书提供诸多建议和评论的审阅者。杨登科 (Deng-Ke Yang) 对 E. Landry 女士和 P. Crooker 教授及其研究小组与合作者的校对工作和该书部分章节的撰写致以深深的谢意，也感谢 Q. Li 博士为本书提供插图。吴诗聪 (Shin-Tson Wu) 非常感谢其研究小组成员，尤其是 Xinyu Zhu、Hongwen Ren、Yun-Hsing Fan、Yi-Hsin Lin、Zhibing Ge、Meizi Jiao、Linghui Rao、Hui-Chuan Cheng、Yan Li 和 Jin Yan，在本书完成过程中所提供的帮助。同时感谢 Raytheon 公司的 Terry Dorschner 博士、美国空军研究实验室的 Paul McManamon 博士和富士胶片公司的 Hiroyuki Mori 博士在本书中分享他们的最新研究成果。感谢我们的同事和朋友关于本书的有益讨论，感谢 DARPA、AFOSR、AFRL、ITRI、AUO、Innolux 等机构提供经费支持。最后，我们要感

谢我们的家人 (Xiaojiang Li、Kevin Yang、Steven Yang、Cho-Yan Wu、Janet Wu、Benjamin Wu)，感谢他们在本书完成过程中的精神支持、理解和一如既往的鼓励。

杨登科 (Deng-Ke Yang)

吴诗聪 (Shin-Tson Wu)

第一版序言

液晶显示已经成为信息显示工业的主流技术，已被广泛应用于小尺寸显示，如计算器、手机、数码相机和头戴式显示器；中尺寸显示，如笔记本电脑和桌面电脑显示器；大尺寸显示，如直视型电视和投影电视。液晶显示具有高分辨率、高亮度和平板化显示等优点，以及由此带来的重量轻、能耗低、甚至在某些场合可以实现柔性显示。液晶显示的工作模式分为透射式和反射式。液晶同样已被应用于激光光束转向器、可调光衰减器和可变焦透镜等光子器件中。无疑，液晶将继续在信息技术时代扮演重要角色。

目前，关于液晶物理和化学以及液晶器件的书籍已有很多。然而，同时介绍液晶基础和应用的书籍却很少。因此，本书主要目的是为高年级本科生和研究生提供一本教材。本书可供一学期或者两学期使用，教师可以根据课程时间和学生兴趣选择所教学的章节。同时也可以作为对液晶显示和光子器件感兴趣的学者和工程师的参考书籍。

本书内容是这样安排的：前面几章主要涉及液晶基础以及学习和设计液晶器件所需的一些必要技术。后面的几章介绍液晶器件的原理、设计、工作方式和性能。由于篇幅有限，液晶物理和化学以及液晶器件的方方面面不能在本书全部介绍，但是，我们希望本书能作为读者了解液晶的入门书籍，并为他们的液晶职业生涯提供基础知识和技术。

非常感谢 A. Lowe 博士的鼓励，感谢为本书提供诸多建议和评论的审阅者。杨登科 (Deng-Ke Yang) 对 E. Landry 女士和 J. Kelly 教授对他的书稿的细致校对致以深深的谢意，也感谢 Q. Li 博士为本书提供插图。吴诗聪 (Shin-Tson Wu) 非常感谢其研究小组成员，尤其是 Xinyu Zhu、Hongwen Ren、Yun-Hsing Fan、Yi-Hsin Lin 为本书提供了很多新的研究结果，同时感谢 Zhibing Ge 先生在本书的编排上提供的帮助。吴诗聪同样要感谢 Raytheon 公司的 Terry Dorschner 博士、美国空军研究实验室的 Paul McManamon 博士和富士胶片公司的 Hiroyuki Mori 博士在本书中分享他们的最新研究成果。同时，感谢我们的同事和朋友关于本书的有益讨论，感谢 DARPA、AFOSR、AFRL、Toppoly 等机构提供经费支持。最后，我们要感谢我们的家人 (Xiaojiang Li、Kevin Yang、Steven Yang、Cho-Yan Wu、Janet Wu、Benjamin Wu)，感谢他们在本书完成过程中的精神支持、理解和一如既往的鼓励。

杨登科 (Deng-Ke Yang)

吴诗聪 (Shin-Tson Wu)

目 录

译者序

丛书主编序言

第二版序言

第一版序言

第 1 章 液晶物理	1
1.1 引言	1
1.2 热力学与统计物理学	4
1.2.1 热力学定律	4
1.2.2 玻尔兹曼分布	5
1.2.3 热力学量	6
1.2.4 热力学平衡判据	8
1.3 取向有序性	9
1.3.1 取向有序参数	9
1.3.2 向列相取向有序性的朗道-德让纳理论	12
1.3.3 梅尔-绍珀 (Maier-Saupe) 理论	16
1.4 液晶的弹性	18
1.4.1 向列相液晶的弹性	18
1.4.2 胆甾相液晶的弹性	21
1.4.3 近晶相液晶的弹性	23
1.5 电磁场作用下的液晶响应特性	24
1.5.1 磁化系数	24
1.5.2 介电常数和折射率	26
1.6 向列相液晶表面的锚定作用	33
1.6.1 锚定能	34
1.6.2 取向层	35
1.7 液晶指向矢的弹性形变	36
1.7.1 弹性形变和位错	36
1.7.2 位错中液晶指向矢的变化	38
问题与练习	42
参考文献	44

第2章 光在各向异性光学介质中的传播	46
2.1 电磁波	46
2.2 偏振	48
2.2.1 单色平面波及其偏振态	48
2.2.2 线偏振态	49
2.2.3 圆偏振态	49
2.2.4 椭圆偏振态	49
2.3 光在各向异性均匀光学介质中的传播	53
2.3.1 本征模	53
2.3.2 本征模的正交性	57
2.3.3 能量通量	59
2.3.4 一些特例	59
2.3.5 偏振器	61
2.4 光在胆甾相液晶中的传播	64
2.4.1 本征模	64
2.4.2 胆甾相液晶的反射	72
2.4.3 胆甾相液晶的受激辐射	74
问题与练习	75
参考文献	76
第3章 光学建模方法	78
3.1 琼斯矩阵法	78
3.1.1 琼斯矢量	78
3.1.2 琼斯矩阵	79
3.1.3 非均匀双折射薄膜的琼斯矩阵	81
3.1.4 扭曲向列相液晶的光学特性	82
3.2 米勒矩阵法	88
3.2.1 部分偏振光和非偏振光	88
3.2.2 斯托克斯参数的测量	89
3.2.3 米勒矩阵	91
3.2.4 庞加莱球	93
3.2.5 庞加莱球中偏振态的演化	95
3.2.6 扭曲向列相液晶的米勒矩阵	98
3.2.7 非均匀双折射薄膜的米勒矩阵	101
3.3 Berreman 4×4 法	101
3.3.1 各向同性介质	105

3.3.2 胆甾相液晶	107
问题与练习	110
参考文献	111
第4章 液晶的电场效应	113
4.1 电介质的相互作用	113
4.1.1 介电相互作用下的重新取向	113
4.1.2 场致取向有序性	114
4.2 挠曲电效应	117
4.2.1 向列相液晶的挠曲电效应	117
4.2.2 胆甾相液晶中的挠曲电效应	121
4.3 铁电液晶	123
4.3.1 对称和偏振	123
4.3.2 倾斜角度和极化	124
4.3.3 表面稳定铁电相液晶	125
4.3.4 手性近晶相液晶的电倾斜效应	128
问题与练习	129
参考文献	130
第5章 弗里德里克斯转变	132
5.1 变分法	132
5.1.1 一维和单变量情形	132
5.1.2 一维和多变量情形	135
5.1.3 三维情形	135
5.2 弗里德里克斯转变: 静态	135
5.2.1 展曲几何	136
5.2.2 弯曲几何形变	140
5.2.3 扭曲几何	141
5.2.4 扭曲向列相液晶盒	142
5.2.5 弱锚定作用下的展曲几何	145
5.2.6 具有预倾角的展曲几何	146
5.3 锚定强度的测量	147
5.3.1 极角锚定强度	147
5.3.2 方位角锚定强度	149
5.4 预倾角的测量	151
5.5 弗里德里克斯转变: 动态	155
5.5.1 扭曲几何中的弗里德里克斯转变动力学	155

5.5.2 流体动力学	156
5.5.3 回流	161
问题与练习	165
参考文献	166
第 6 章 液晶材料	168
6.1 引言	168
6.2 折射率	168
6.2.1 扩展柯西 (Cauchy) 方程	169
6.2.2 三带模型	170
6.2.3 温度效应	173
6.2.4 温度梯度	175
6.2.5 分子极化率	176
6.3 介电常数	177
6.3.1 用于 AMLCD 的正 $\Delta\epsilon$ 液晶	178
6.3.2 负 $\Delta\epsilon$ 液晶材料	179
6.3.3 双频液晶	179
6.4 旋转黏度	180
6.5 弹性常数	181
6.6 品质因数	181
6.7 液晶和聚合物的折射率匹配	182
6.7.1 聚合物的折射率	183
6.7.2 匹配折射率	184
问题与练习	186
参考文献	187
第 7 章 液晶指向矢排布建模	190
7.1 液晶的电能	190
7.1.1 电荷恒定	191
7.1.2 电压恒定	192
7.1.3 电场恒定	194
7.2 电场建模	194
7.3 液晶指向矢排布的模拟	196
7.3.1 角度表示	196
7.3.2 矢量表示	200
7.3.3 张量表示	203
问题与练习	206

参考文献	207
第 8 章 透射式液晶显示器	209
8.1 引言	209
8.2 扭曲向列相液晶盒	209
8.2.1 透光率与电压的关系	210
8.2.2 薄膜补偿 TN 液晶盒	212
8.2.3 可视角度	214
8.3 面内切换模式	214
8.3.1 透光率与电压的关系	215
8.3.2 响应时间	217
8.3.3 可视角度	218
8.3.4 补偿膜的分类	219
8.3.5 倾斜角度下单轴介质的相位延迟	220
8.3.6 庞加莱球表示法	221
8.3.7 倾斜角度观看时正交偏振器的漏光	222
8.3.8 采用正 a 膜和正 c 膜的 IPS	228
8.3.9 采用正 a 膜和负 a 膜的 IPS	232
8.3.10 色彩偏差	235
8.4 垂直取向 (VA) 模式	235
8.4.1 透光率与电压的关系	235
8.4.2 光学响应时间	236
8.4.3 过驱动电压和下冲电压方法	237
8.5 多畴垂直取向 (MVA) 液晶盒	238
8.5.1 采用一片正 a 膜和一片负 c 膜的 MVA	241
8.5.2 采用正 a 膜、负 a 膜和负 c 膜的 MVA	245
8.6 光学补偿弯曲液晶盒	249
8.6.1 透光率随电压的变化关系	250
8.6.2 用于 OCB 的光学补偿膜	251
问题与练习	252
参考文献	254
第 9 章 反射式和透反式液晶显示器	258
9.1 引言	258
9.2 反射式 LCD	259
9.2.1 膜补偿均匀取向液晶盒	260
9.2.2 混合模式扭曲向列相 (MTN) 盒	261

9.3 透反器	263
9.3.1 金属开孔透反器	264
9.3.2 半透明金属透反器	265
9.3.3 多层介电膜透反器	265
9.3.4 正交偏振透反器	265
9.4 透反式 LCD 的分类	266
9.4.1 吸收型透反式 LCD	266
9.4.2 散射型透反式 LCD	269
9.4.3 散射和吸收型透反式 LCD	271
9.4.4 反射型透反式 LCD	273
9.4.5 相位延迟型	275
9.5 双盒透反式 LCD	284
9.6 单盒透反式 LCD	286
9.7 透反式 LCD 的性能	287
9.7.1 色彩平衡	287
9.7.2 图像亮度	288
9.7.3 可视角度	288
问题与练习	288
参考文献	289
第 10 章 液晶显示器件、驱动原理和双稳态显示	293
10.1 笔段式显示	293
10.2 无源矩阵显示和驱动原理	293
10.3 有源矩阵显示	297
10.3.1 TFT 结构	300
10.3.2 TFT 工作原理	300
10.4 双稳态铁电液晶显示及驱动原理	302
10.5 双稳态向列相液晶显示器	304
10.5.1 引言	304
10.5.2 扭曲-非扭曲双稳态扭曲向列相液晶显示器	304
10.5.3 表面稳定向列相液晶显示器	310
10.6 双稳态胆甾相反射式显示器	313
10.6.1 引言	313
10.6.2 双稳态胆甾相反射式显示器的光学特性	315
10.6.3 包覆型胆甾相液晶显示器	318
10.6.4 胆甾相状态的转变	319