

自然语言信息处理的 逻辑语义学研究

Logical Semantics on
Natural Language Processing

邹崇理 等 / 著



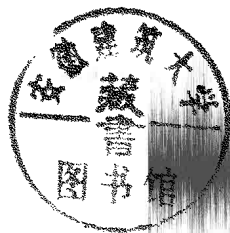
科学出版社

基金重大项目“自然语言信息处理的逻辑语义学研究”
(项目批准号10ZD&073) 研究成果

自然语言信息处理的 逻辑语义学研究

Logical Semantics on
Natural Language Processing

邹崇理 等/著



科学出版社
北京

图书在版编目(CIP)数据

自然语言信息处理的逻辑语义学研究/邹崇理等著. —北京: 科学出版社, 2018. 9

ISBN 978-7-03-056318-7

I. ①自… II. ①邹… III. ①自然语言处理-研究②逻辑-语义学-研究
IV. ①TP391②H030

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 008875 号

责任编辑: 刘 溪 / 责任校对: 王晓茜

责任印制: 张欣秀 / 封面设计: 黄华斌

编辑部电话: 010-64035853

E-mail: houjunlin@mail. sciencep. com

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>

北京教图印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 9 月第 一 版 开本: 720×1000 B5

2018 年 9 月第一次印刷 印张: 33

字数: 558 000

定价: 198.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

本书的名称为“自然语言信息处理的逻辑语义学研究”，研究的对象是自然语言，也就是说，本书的内容和语言学有关；同时，本书的成果涉及信息处理，也跟计算机信息领域有联系；本书的研究方法是逻辑语义学，因此，本书自然就具有浓厚的逻辑学味道。

实质上，本书传播的最重要信息是逻辑、语言和计算的交叉以及跨学科研究。为什么要交叉研究？交叉意味着嫁接融合。生物学往往通过嫁接已有物种培育新物种，获得的新物种具备更优良的品性。当今我国经济发展的转型也大量采用交叉融合的方式，例如，金融保险+互联网平台=众安在线财产保险股份有限公司；中国平安的保险服务融合了阿里巴巴的网络技术诞生了新的行业——网络化的金融保险服务；基于大数据、云计算的互联网技术+传统生产制造业=智能化的制造业（工业4.0）；等等。学术领域的交叉研究导致创新的例证更令人鼓舞！我国著名数学家吴文俊院士认为，中国数学发展的途径、思想方法是算法式的。算法是你做了第一步，就知道第二步该怎么做，做了第二步就知道第三步该怎么做。而西方的现代数学，每一步的证明都要经过思考，走了第一步不知道第二步怎么做。吴院士开创了数学机械化新领域，2000年荣获首届国家最高科学技术奖，其成果是中国古代数学的算法思想嫁接融合了西方数学的逻辑方法的产物。我国著名计算机科学家唐稚松院士，研究生时期师从逻辑学大师金岳霖先生学习逻辑学，后进入中国科学院计算技术研究所，提出了世界上第一个可执行时序逻辑语言XYZ/E。作为可执行命令式编程语言和关注程序语义的规范语言的嫁接融合，XYZ/E是交叉创新的成功案例，荣获国家自然科学奖一等奖。

就逻辑和语言的交叉融合而言，本书的研究涉及范畴语法的两个现代版本——范畴类型逻辑CTL和组合范畴语法CCG；就逻辑和计算机信息处理的交叉研究而言，本书构建了汉语CCG语料库。汉语CCG库之前只有微软和清华大学合作的成果，本书的汉语CCG库与之相比独具特色。本书是国家社科基金重大项目“自然语言信息处理的逻辑语义学研究”（项目批准号10ZD&073）的部分研究成果。该项目的首席专家及其成员均为活跃在我国逻辑学、语言学或计算机科

学领域的研究者，他们中有国家级科研机构的研究人员，也有国内外高校的教研人员、在读的博士研究生和在站的博士后。本项目进行期间，共出版专著3部，翻译英文专著2部，发表论文70篇，其中英文论文9篇，中文论文61篇，多篇论文为中国人民大学复印报刊资料全文转载。本书是在以上阶段性成果的基础上，对逻辑语义学是什么以及逻辑语义学的重要理论——CTL和CCG进行的更加深入细致的探究，也是对汉语CCG语料库的构建进行的有益尝试。

本书具体的写作分工如下：

导 论 邹崇理、李可胜

第一编 第1~2章 李可胜

第二编 第3~5, 7章 贾青；第6、9章 邹崇理；第8章 满海霞

第三编 第10~15章 姚丛军；第16~18章 陈鹏

在书稿的整个撰写阶段，邹崇理研究员与其他作者反复沟通核准论述内容，在后期统稿阶段，满海霞副教授对全书的字体、术语等格式进行了统一并对全书的语言进行了润色。

本书的出版还离不开科学出版社的编辑刘溪先生。从签订合同、提供审稿意见、再审到出版，整个过程中刘溪先生有问必答，认真严谨的态度常常令我们动容。在这里，我们想特别感谢刘溪先生为书稿的编辑和最终出版所付出的辛劳。

中国社会科学院哲学研究所
四川师范大学逻辑与信息研究所

邹崇理

2017年5月

凡 例

为方便读者阅读并了解要点，本书部分文字以**黑体**和仿宋体表示，含义如下：

(1) **黑体**有两种情况：①第一次出现的重要术语；②需要特别强调的名词或表述。

(2) 仿宋体表示对术语、定义等的解释说明、进一步表述以及对理论内容的列举。

下面以节选自本书第1章的三段文字为例说明。

“在众多的逻辑理论中，逻辑语义学侧重于揭示和研究自然语言句法语义的组合特性。按照弗雷格的**组合性原则**，一个复合表达式的意义是其部分的意义和合并这些部分的句法运算的语义形成的函项。”（说明：“组合性原则”为逻辑语义学最重要原则之一，是第一次出现的重要术语，故改为**黑体**，后面的仿宋体部分为对“组合性原则”的解释说明和进一步表述。）

“逻辑语义学以自然语言的意义为研究对象，以现代逻辑为研究工具，探索复合表达式的意义如何由其组成部分的意义组合而来。逻辑语义学还认为，语义不是孤立的，语义与句法之间具有同构关系，语义上由小到大的组合，与句法的组合方式也有关系。这就是逻辑语义学中的组合性原则的内容。在逻辑语义学看来，自然语言本身就是一个由规则和要素构成的表意符号系统，而且这个系统本质上与逻辑系统一样，都具有组合性和句法语义的并行推演。也就是说，对于某种特定自然语言而言，任意一个恰当的表达式及其语义，必然都可以通过递归应用若干规则，分别从初始构成成分和初始语义元组合生成。因此，自然语言可以采取逻辑系统的方式得到表征。”（说明：**黑体**是对为什么可以用逻辑方法研究自然语言语义这一问题的着重概括，是需要特别强调的表述。）

“在索绪尔学说的影响下，诞生了结构主义语言学，在20世纪上半期成为语言学的主流，结构主义语言学以布拉格学派、哥本哈根学派、美国结构语言学派为代表构成三大学派。”（说明：“布拉格学派”“哥本哈根学派”“美国结构语言学派”用仿宋体，表示希望读者了解结构主义语言学三大流派，是对结构主义语言学分类的列举。）

目 录

序 言 / i

凡 例 / iii

导 论	1
0.1 自然语言的逻辑语义学	1
0.2 逻辑语义学研究概述	5
0.3 本书研究内容简述	12
参考文献	18

第一编 逻辑语义学研究概论

1 逻辑语义学——自然语言的逻辑研究	21
1.1 作为形式符号系统的自然语言	21
1.2 自然语言的组合性	25
1.3 逻辑语义和自然语言语义	30
1.4 逻辑语义学的研究方向	48
2 面向自然语言信息处理的逻辑语义学	58
2.1 自然语言的计算	58
2.2 部分语句系统的计算思想	61
2.3 范畴语法 CG 的计算思想	63
2.4 句法语义并行推演的计算思想	68
2.5 结束语	71
参考文献	72

第二编 逻辑语义学的重要理论——范畴类型逻辑 CTL

第一部分 范畴类型逻辑 CTL 梳理

3	CTL 的发展历程	80
3.1	AB 演算	80
3.2	兰贝克的句法演算	82
3.3	蒙太格的语义分析	83
3.4	新近的发展方向	86
4	CTL 的主要理论	90
4.1	传统的 CTL——结合的兰贝克演算	90
4.2	多模态的 CTL	99
4.3	对称范畴语法	102
5	CTL 的其他分支	123
5.1	完全的兰贝克演算	123
5.2	加一元算子的 CTL	132
5.3	准群语法与抽象的 CTL	134
6	CTL 的类型语义学：兰贝克演算匹配 λ 词项	138
6.1	从经典命题逻辑到兰贝克演算	138
6.2	λ 演算	144
6.3	哈里-霍华德对应	147
6.4	匹配 λ 词项的兰贝克演算树模式 ND 表述	159

第二部分 范畴类型逻辑 CTL 应用于汉语的研究

7	传统 CTL 对汉语反身代词的研究	162
7.1	带受限缩并规则的兰贝克演算 LLC	162
7.2	前后搜索的 (Bi)LLC 系统	171
7.3	语言学中的应用	181
8	汉语照应省略的范畴逻辑分析	183
8.1	引言	183

8.2	LLC 系统与汉语照应省略	185
8.3	LLC 系统与空代词	189
8.4	LLCW' 系统	196
8.5	LLCW' 系统的特色及语言学检验	222
8.6	结束语	227
9	基于多分法的 CTL	229
9.1	多分法的逻辑学依据	230
9.2	多分法的语言学依据	235
9.3	基于多分法的 CTL 系统	246
9.4	匹配 λ 项的工作	253
9.5	结束语	256
	参考文献	258

第三编 逻辑语义学的重要应用——组合范畴语法 CCG

第一部分 组合范畴语法 CCG 梳理

10	组合范畴语法 CCG 综述	264
10.1	引言	264
10.2	AB 演算的缺陷	268
10.3	原生态 CCG	272
10.4	多模态 CCG	285
10.5	组合范畴语法与范畴类型逻辑之联系	294
11	CCG 的计算语言学价值与 CCG 树库	317
11.1	CCG 的计算语言学价值	317
11.2	英语 CCG 树库	318
11.3	汉语 CCG 树库	343
12	CCG 处理自然语言存在的困难和问题	349
12.1	CCG 处理自然语言的局限	349
12.2	使用 CCG 分析自然语言语义面临的困境	358

12.3	添加 CCG 句法分析树缺失的语义表述存在的困难	361
------	--------------------------------	-----

第二部分 组合范畴语法 CCG 研究

13	CCG 对汉语非连续结构的处理	367
13.1	概述	367
13.2	CCG 对汉语 NCC 结构的处理	371
13.3	CCG 对汉语话题句的处理	374
13.4	汉语连动句和复杂谓词并列结构的处理尝试	378
14	组合范畴语法对汉语形容词谓语句的处理	381
14.1	汉语形容词谓语句的定义和分类	381
14.2	汉语光杆形容词谓语句的组合范畴语法分析	381
14.3	汉语复杂形容词谓语句的组合范畴语法分析	383
15	组合范畴语法对汉语主谓谓语句的处理	389
15.1	汉语主谓谓语句的语法结构及语法特征	389
15.2	汉语主谓谓语句的组合范畴语法分析	389

第三部分 汉语 CCG 研究的计算机实现 (汉语 CCGbank 的构建)

16	组合范畴语法的计算语言学价值	398
16.1	面向大规模自然语言处理的形式文法综述	398
16.2	CCG 适用于计算语言学的特性	402
16.3	CCG 的应用	412
17	汉语 CCG 研究	420
17.1	范畴的构造与组合规则	420
17.2	与名词短语相关的范畴分析	425
17.3	与动词相关的范畴分析	428
17.4	标点与并列的范畴分析	435
17.5	句子层面的范畴分析	439
18	从宾州汉语树库转汉语 CCGbank	444
18.1	介绍	444
18.2	汉语 CCGbank 转换系统的架构与设计	450
18.3	汉语 CCGbank 核心转换算法	457
18.4	汉语 CCGbank 的统计与分析	475

参考文献	478
附录 1 宾州汉语树库 (PCTB) 的标签集	485
A1.1 词性标签 Part-Of-Speech tags (33)	485
A1.2 句法标记 (23)	486
附录 2 “的” 在汉语 CCGbank 中的范畴	488
汉英术语、人名对照表	491

图 目 录

图 0.1	>B 的推出过程	10
图 0.2	汉语宾语从句循环镶嵌句的推演	10
图 0.3	英语句的句法语义并行推演示例	11
图 0.4	无占位代词直接宾语提取话题句的推演	15
图 0.5	复杂主语修饰成分话题化语句的推演	15
图 0.6	复杂宾语中心成分话题化语句的推演	15
图 0.7	更多规则的应用示例	16
图 (1.) 1.1	自然语言的整体构造	22
图 (1.) 1.2	语词的语义三角	32
图 (1.) 1.3	抽象语句的语义三角	32
图 (1.) 1.4	语言交际的不同层次	34
图 (1.) 1.5	抽象语句的语义关系	35
图 (1.) 1.6	指称方式	37
图 (1.) 1.7	句子“约翰疯狂地喜欢玛丽”的语义分析	44
图 (1.) 1.8	语句 Jones slowly buttered the toast in the bathroom with a knife 的句法生成	50
图 (1.) 2.1	句子“我喜欢逻辑语义学”的结构	59
图 (1.) 2.2	句子 John walks in the park 的范畴运算	64
图 (1.) 2.3	句子 John loves the girls 的 CCG 推演	66
图 (1.) 2.4	句子 sleeps and he talks 的 CCG 推演	67
图 (1.) 2.5	句子 Marcel conjectured and proved completeness 的 CCG 推演	68
图 (1.) 2.6	The tall kid runs 的 TLG 句子推演	70
图 (2.) 3.1	语句 I have set my bow in the cloud 的 爱裘凯维茨推演	81
图 (2.) 3.2	语句 I have set my bow in the cloud 的 AB 演算推演	81

图 (2.) 4.1	框架的结合性	91
图 (2.) 4.2	范畴与语义类型的对应	118
图 (2.) 4.3	NL 和 LG 的句法语义对应	120
图 (2.) 4.4	CPS 翻译图示	121
图 (2.) 5.1	语句 John walks 的内涵兰贝克推演	134
图 (2.) 6.1	斜线算子的消去和引用规则	138
图 (2.) 6.2	积算子的消去和引入规则	139
图 (2.) 6.3	后承式的经典命题逻辑的自然演绎 ND 系统 1	139
图 (2.) 6.4	后承式的经典命题逻辑的自然演绎 ND 系统 2	140
图 (2.) 6.5	$\wedge$ 和 $\rightarrow$ 的择换规则	140
图 (2.) 6.6	后承式的直觉主义逻辑的自然演绎 ND 系统	141
图 (2.) 6.7	两类合取规则	141
图 (2.) 6.8	后承式的相干逻辑的自然演绎 ND 系统	142
图 (2.) 6.9	后承式的线性逻辑的自然演绎 ND 系统	142
图 (2.) 6.10	两类蕴涵规则	143
图 (2.) 6.11	后承式的兰贝克演算的自然演绎 ND 系统 1	143
图 (2.) 6.12	后承格式的兰贝克演算的自然演绎 ND 系统 2	143
图 (2.) 6.13	对合取的 β 范式化	149
图 (2.) 6.14	对合取的 η 范式化	149
图 (2.) 6.15	对蕴涵的 β 范式化	149
图 (2.) 6.16	对蕴涵的 η 范式化	149
图 (2.) 6.17	加标的兰贝克演算 L 的自然演绎系统	150
图 (2.) 6.18	兰贝克后承演算系统	152
图 (2.) 6.19	兰贝克后承演算的语义解读	152
图 (2.) 6.20	John loves Mary 的后承推演	154
图 (2.) 6.21	John loves Mary 的语义解读	154
图 (2.) 6.22	Today it rained amazingly 的后承推演一	155
图 (2.) 6.23	Today it rained amazingly 的后承推演一的语义	155
图 (2.) 6.24	Today it rained amazingly 的后承推演二	155
图 (2.) 6.25	Today it rained amazingly 的后承推演二的语义	155
图 (2.) 6.26	The cat slept 的两个后承推演	156
图 (2.) 6.27	The cat slept 的两个后承推演的语义	156

图 (2.) 6.28	I have set my bow in the cloud 的后承推演	156
图 (2.) 6.29	I have set my bow in the cloud 的语义解读	157
图 (2.) 6.30	John loves Mary 的推演语义	158
图 (2.) 6.31	John loves himself 的推演语义	158
图 (2.) 6.32	匹配了语义的兰贝克演算的树模式 ND 系统	159
图 (2.) 6.33	John loves Mary 的有语义标记的树模式 ND 推演	159
图 (2.) 6.34	The cat slept 的有语义标记的树模式 ND 推演	159
图 (2.) 6.35	John loves himself 的有语义标记的树模式 ND 推演	160
图 (2.) 7.1	语句“张三的自尊心害了自己”的 LLC 生成	182
图 (2.) 8.1	John walks 的类型逻辑推演	184
图 (2.) 8.2	语句 8.1 乙句“他”回指“小张”的生成图	186
图 (2.) 8.3	语句 8.1 乙句“他”的先行词为未知情况的生成图	186
图 (2.) 8.4	“张三喜欢李丽”标注性别下标的类型逻辑生成	188
图 (2.) 8.5	“ <i>e</i> 看见李四了”的第一种类型逻辑生成	190
图 (2.) 8.5' ^a	“张三说 <i>e</i> 看见 <i>e</i> 了”的第一种类型逻辑生成	190
图 (2.) 8.5' ^b	“张三说 <i>e</i> 看见 <i>e</i> 了”引入普通假设的类型逻辑生成	191
图 (2.) 8.6	“张三说 <i>e</i> 看见 <i>e</i> 了”补出空代词的类型逻辑生成	191
图 (2.) 8.7a	使用结合律作语句“小赵送小明礼物了, 妈妈也送了” 的类型逻辑生成	192
图 (2.) 8.7b	引入普通假设为语句“小赵送小明礼物了, 妈妈也送了” 作类型逻辑生成的第一种尝试	192
图 (2.) 8.7c	引入普通假设为语句“小赵送小明礼物了, 妈妈也送了” 作类型逻辑生成的第二种尝试	193
图 (2.) 8.8	引入照应假设为语句“小赵送小明礼物了, 妈妈也送了” 作类型逻辑生成的尝试	193
图 (2.) 8.9a	使用广义布尔合取规则直接作语句“小李走去开门”的类型逻辑 分析	194
图 (2.) 8.9b	使用广义布尔合取规则作语句“妈妈送哥哥参军” 的类型逻辑分析	194
图 (2.) 8.9b'	引入照应假设作语句“妈妈送哥哥参军” 的类型逻辑分析	195
图 (2.) 8.10	受限的强缩并结构规则 W'	197

图 (2.) 8.11	“妈妈送哥哥参军”的推演	200
图 (2.) 8.12	语句“小明不应该来,小赵也是”的加标树模式生成	223
图 (2.) 8.13	John loves himself 在 LLCW' 和 LLC 下的分析	223
图 (2.) 8.14	“张三 _i 认为李四 _j 知道李丽 _k 喜欢他 _i ” 的 类型逻辑生成	224
图 (2.) 8.15	语句“张三说 <i>e</i> 看见李四了”的类型逻辑语法生成图	225
图 (2.) 8.16	语句“妈妈送哥哥参军”使用 W' 规则的加标树模式生成	226
图 (2.) 8.17	语句“小张走去开门”使用 W' 规则的加标树模式生成	226
图 (2.) 8.18	语句“小李送小赵礼物了,妈妈也送了” 使用 W' 规则的加标树模式生成	227
图 (2.) 9.1	合取复合公式的形成图	230
图 (2.) 9.2	多分法与二分法的对比图	230
图 (2.) 9.3	$\langle 1, 1 \rangle$ 类型量词公式的形成图	232
图 (2.) 9.4	Five more... than..., ... 的生成结构	232
图 (2.) 9.5	语句 9.3 的句法分析树	235
图 (2.) 9.6	语句 9.3 的语义翻译树	235
图 (2.) 9.7	语句 John wrote a letter in the room 的格语法底层结构图	236
图 (2.) 9.8	语句 John wrote a letter in the room 的语义结构图	237
图 (2.) 9.9	短语 put the key into the box on the table 的句法二分分析图	237
图 (2.) 9.10	图 (2.) 9.9 的语义翻译	238
图 (2.) 9.11	短语 put the key into the box on the table 基于 格语法的多分句法分析	238
图 (2.) 9.12	图 (2.) 9.11 对应的语义翻译	238
图 (2.) 9.13	语句“张三在餐馆用刀叉吃牛排”的格语法句法分析	242
图 (2.) 9.14	语句“张三在餐馆用刀叉吃牛排”的格语法 多分法语义分析	242
图 (2.) 9.15	“送李四书”的句法多分分析和两分分析	243
图 (2.) 9.16	语句“张三正在干着活”的句法生成	243
图 (2.) 9.17	语句“张三正在干着活”的语义生成	244

图 (2.) 9.18	清华树库中转换 CCG 的例句句法分析树	244
图 (2.) 9.19	语句“上海在北京和广州中间”的多分句法分析树	245
图 (2.) 9.20	语句“钥匙在桌子上的盒子里”的多分句法分析树	245
图 (2.) 9.21	清华树库中转换 CCG 的例句“这种反映论 把认识归结为一种直观”	247
图 (2.) 9.22	语句 every man walks 的句法语义 CTL 推演	254
图 (2.) 9.23	语句 more doctors than lawyers whistle 的句法语义 CTL 推演	254
图 (2.) 9.24	语句“张三在餐馆用大碗吃饭”的句法分析树	255
图 (2.) 9.25	语句“张三在餐馆用大碗吃饭”的句法语义生成	255
图 (3.) 10.1	关系从句的 AB 演算分析	269
图 (3.) 10.2	John loves Mary 的句法与语义并行推演过程	273
图 (3.) 10.3	John met and married Mary 对称合并的 范畴语法分析	275
图 (3.) 10.4	John met and might married Mary 非对称 并列结构的范畴语法分析	275
图 (3.) 10.5	CCG 实现的主语与及物动词毗连的推演	277
图 (3.) 10.6	CCG 实现的宾语提取结构的推演	277
图 (3.) 10.7	CCG 实现的无界依存结构的推演	278
图 (3.) 10.8	CCG 实现的右节点提升语句的推演	278
图 (3.) 10.9	CCG 实现的论元聚点并列组合推演	278
图 (3.) 10.10	CCG 实现的重成分 NP 移位结构的推演	279
图 (3.) 10.11	CCG 实现的非外围提取结构的推演	279
图 (3.) 10.12	CCG 处理离合词结构推演	279
图 (3.) 10.13	CCG 处理寄生语缺结构的推演	281
图 (3.) 10.14	CCG 处理寄生语缺结构的推演	281
图 (3.) 10.15	CCG 推出不合语法的并列句	283
图 (3.) 10.16	CCG 推出不合语法的移位句	283
图 (3.) 10.17	CCG 推出不合语法的双重关系句	283
图 (3.) 10.18	CCG 推出不合语法的加扰词序语句	284
图 (3.) 10.19	CCG 推出不合语法的嵌入主语提取语句	284
图 (3.) 10.20	CCG 推出不合语法的乱序语句	284

图 (3.) 10.21	四种模态算子层级图	286
图 (3.) 10.22	CCG 推出不合语法的并列句	286
图 (3.) 10.23	MMCCG 阻止不合语法的并列结构的生成	287
图 (3.) 10.24	模态算子层级修订图	288
图 (3.) 10.25	MMCCG 阻止非法移位句的推演	289
图 (3.) 10.26	MMCCG 阻止非法双重关系句的推演	290
图 (3.) 10.27	MMCCG 对自然语言的分析	290
图 (3.) 10.28	MMCCG 阻止不合法的爬升语句的推演	291
图 (3.) 10.29	MMCCG 阻止不合法的嵌入主语提取语句的推演	291
图 (3.) 10.30	MMCCG 阻止不合法的乱序语句的推演	291
图 (3.) 10.31	MMCCG 对宾语提取表达式的分析	292
图 (3.) 10.32	不合语法的句子推演失败	293
图 (3.) 10.33	结构模态词允许的非外围提取的推演	305
图 (3.) 10.34	关联规则促成的积联结词之间的转换	307
图 (3.) 10.35	关联规则促成的蕴涵联结词之间的转换	307
图 (3.) 10.36	从非结合层面转换到结合层面的成功推演	308
图 (3.) 10.37	积联结词和蕴涵联结词的关系之证明	309
图 (3.) 10.38	从非交换层面转向交换层面的成功推演	309
图 (3.) 10.39	MMCCG 的复合规则 $\mathbf{>B}$ 与 HCTL 的结构规则 RA 的对应性证明	314
图 (3.) 10.40	MMCCG 的复合规则 $\mathbf{<B}$ 与 HCTL 的结构规则 LA 的对应性证明	315
图 (3.) 10.41	MMCCG 的复合规则 $\mathbf{>B}_\times$ 与 HCTL 的结构规则 RP 的对应性证明	315
图 (3.) 10.42	MMCCG 的复合规则 $\mathbf{<B}_\times$ 与 HCTL 的结构规则 LP 的对应性证明	315
图 (3.) 10.43	多模态 CCG 对自然语言的分析	315
图 (3.) 10.44	HCTL 对自然语言的分析	315
图 (3.) 11.1	宾州树库树例示	322
图 (3.) 11.2	确定成分类型	322
图 (3.) 11.3	构造二叉树	322
图 (3.) 11.4	二叉化解析	323