

# 口语对话系统中对话管理方法研究综述

王 玉<sup>1</sup> 任福继<sup>1,2</sup> 全昌勤<sup>1</sup>

(合肥工业大学计算机与信息学院 合肥 230009)<sup>1</sup> (德岛大学工学部 德岛 770-8506)<sup>2</sup>

**摘 要** 口语对话系统是人机交互领域的核心技术,也是实现和谐人机交互的重要途径,具有重大的研究意义和应用价值,其中的各项理论和技术的研究进展一直备受关注。较为全面深入地总结了对话管理及口语对话系统的研究进展和现状。首先阐述了口语对话系统中的主要研究问题,包括系统各模块的研究内容与关键技术、系统的可移植性和鲁棒性设计等;然后从理论模型、研究进展及可用性等角度系统地剖析了现有的多种口语对话管理策略;最后展望了未来可能的研究方向和亟待解决的问题。

**关键词** 口语对话系统,对话管理,对话模型,人机交互

**中图法分类号** TP181 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2015.6.001

## Review of Dialogue Management Methods in Spoken Dialogue System

WANG Yu<sup>1</sup> REN Fu-ji<sup>1,2</sup> QUAN Chang-qin<sup>1</sup>

(School of Computer and Information, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)<sup>1</sup>

(Faculty of Engineering, University of Tokushima, Tokushima 770-8506, Japan)<sup>2</sup>

**Abstract** Spoken dialogue system is the core technology in the field of human-computer interaction, and it is an important way to realize the harmonious human-computer interaction. The research has great theory significance and application value. The advances of theory and technology in spoken dialogue systems have always been greatly concerned. The status and advances of dialogue management and spoken dialogue system were comprehensively summarized in this paper. First, the main research questions of spoken dialogue system were introduced comprehensively, including the research contents of the modules, key technologies, portability and robust design. Then, the various spoken dialogue management strategies were systematically analyzed from the perspective of theoretical models, advances and usability. Finally, several possible directions and problems for further consideration and discussion were also mentioned.

**Keywords** Spoken dialogue system, Dialogue management, Dialogue model, Human-computer interaction

## 1 引言

随着计算机科学技术的不断发展,人机交互的途径从传统的键盘、鼠标到触屏、语音等方式在不断演变,越来越便捷和多元化。众所周知,语言是人类最直接的交流方式,人们很自然地渴望能和智能机器之间进行语言对话,便捷地获取各种信息和服务。基于这一目的,口语对话系统(Spoken Dialogue System, SDS)应运而生,它是一种试图读懂用户的口语语言,并尝试作出有效应答的智能人机交互系统。它是人类和智能机器之间交流沟通的桥梁,是实现人机口语对话的核心技术,具有重大的研究意义和应用价值。

口语对话系统的研究开始于 20 世纪 80 年代末,美国、欧盟、中国等国家和地区的众多研究机构都分别开展了各自的研究,其中比较著名的有美国 MIT 的口语系统小组、CMU 的语音组、AT&T 的 Bell 实验室、法国的 LIMSI、瑞典的 KTH 和我国的中科院自动化所、清华大学语音技术中心等。在各国政府的大力资助下,许多口语对话系统相关的研究项

目,例如美国的 ATIS、Communicator 和欧委会的 IT 计划等都得到了顺利开展,取得了丰富的理论成果并且面向不同领域开发了一些实用的口语对话系统。

口语对话系统有着广阔的应用前景和市场需求。受语音识别和语言理解等关键技术的限制,目前国内外已有的口语对话系统大多是面向特定领域,主要集中在信息(如天气、航班、火车、股票)查询、票务预订、景点导游、电话自动转接拨号、智能教育等商业领域。这些应用不仅给用户带来了便捷高效的生活服务,而且在很大程度上节省了相关部门繁重的人工劳动。口语对话系统的一个重要的应用前景是家庭陪护行业,近年来中国人口的老齡化趋势日益加重,部分自闭症人群的心理健康问题也引发关注,开发出具有智能对话功能的陪护机器人,走进千家万户,陪老年人聊天,与自闭症患者交流,是解决这些重大社会问题的有效方式之一。

本文第 2 节首先全面介绍口语对话系统的主要研究内容,包括系统的模块框架及可移植性与鲁棒性设计等方面;第 3 节重点分析对话管理控制策略的几类主要方法,并从模型

到稿日期:2014-07-21 返修日期:2015-01-15 本文受国家自然科学基金(61432004,61203312,61472117),情感计算与先进智能机器安徽省重点实验室开放课题(ACA1M150107),合肥学院重点建设学科项目(2014XK08)资助。

王 玉(1983-),男,博士生,讲师,主要研究方向为人机交互、情感计算,E-mail:wangyu351@126.com;任福继(1959-),男,博士,教授,主要研究方向为人工智能、自然语言处理、情感计算;全昌勤(1978-),女,博士,教授,主要研究方向为自然语言处理、情感计算。

理论、研究进展、可用性等角度分别进行阐述和剖析;最后的总结部分指出了仍有待进一步研究的几个难题和未来可能的研究方向。

## 2 口语对话系统的主要问题

口语对话系统和问答系统、人机交互系统等概念之间既有内在联系,也有本质区别。具体来说,问答系统(Question Answering System, QAS)较倾向于提供单一的信息检索功能,通常包括问题分析、信息检索、答案抽取和排序等技术环节;口语对话系统则致力于能够正确识别和理解用户话语的意图,并用准确简洁的语言回答用户提出的各种问题;人机交互系统在交互形式上更加丰富,既可以是单一模态的(文本、表情、手势等)交互,也可以是在口语对话系统的基础上融合面部表情、身体姿态、甚至情感<sup>[1]</sup>等信息的多模态对话系统<sup>[2,3]</sup>。

### 2.1 口语对话系统的模块框架

通常一个口语对话系统都是由语音识别、语言理解、对话管理、文本生成和语音合成等 5 部分构成,如图 1 所示。

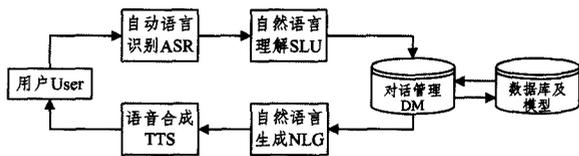


图 1 口语对话系统的模块框架

下面依次简要介绍各模块的研究内容与关键问题。

#### 2.1.1 自动语音识别

自动语音识别(Automatic Speech Recognition, ASR)的任务是将用户语音中的连续时间信号转变为一串离散的音节单元或单词。与常规的语音识别不同,口语对话系统中的用户语音不仅存在着大量的口语现象,如重复、省略、纠正、停顿等,而且通常还伴随有一定的环境噪音。此外,由于使用系统的用户一般并不固定,因此还必须是面向非特定人的连续语音识别,这些都给口语对话系统中的语音识别算法包括特征提取、模型训练、搜索算法等环节增添了更多的难度。毫无疑问,语音识别性能的优劣将直接影响后续的语言理解和对话管理模块的准确性,对系统的整体性能影响重大。如何提高口语语音识别率是研发对话系统的主要难点之一。

#### 2.1.2 自然语言理解

自然语言理解(Natural Language Understanding, NLU)的任务是对语音识别的结果进行解析,利用语义和语法分析将用户的意图转化为对话管理模块能够利用的计算机表示形式。与通用领域的自然语言理解不同,口语对话系统中的语言理解一般都限定在某个固定对话领域。虽然这在一定程度上使得口语语言理解的难度降低,但由于口语灵活多变,往往不符合正常语法,且不同用户的语言习惯不同,加上语音识别的错误不可避免等多重原因,导致口语对话系统中的语言理解模块同样面临着众多的挑战。

#### 2.1.3 对话管理

对话管理(Dialogue Management, DM)的任务是根据语言理解的结果及对话的上下文语境、对话历史信息等进行综合分析,以确定用户的当前意图。它必须判断是否已经从用户那里获取了足够的信息以启动后台数据库查询,并决定系统将要采取的应对动作或策略。对话管理是口语对话系统的

核心模块,其设计的优劣直接关系到对话的效果和用户的满意度,有效的对话管理策略是提升系统应对噪声能力和更正语音识别及语言理解错误的重要保障。一般地,对话管理策略还可以细分为主导策略和控制策略,根据主导策略的类型,口语对话系统可以分为 3 类。

- 系统主导型,指系统通过不断地向用户询问,得到需要的全部信息后再进行回答,系统控制着整个对话流程,用户在对话过程中处于回答的被动地位。由于严格限制了用户的动作,系统的任务完成率较高,在实际操作中易于实现,目前大部分商业领域的口语对话系统都是系统主导型。

- 用户主导型,指用户拥有对话的控制权,可以随意地对系统提问,用户具有很大的自由度。由于新用户往往并不了解系统具备的功能,随意地提问容易导致系统出现不能回答或答非所问的情形,对话效果不理想。

- 混合主导型,指用户和系统都具有对话的主导权,都可以进行提问和回答。用户可以对系统进行提问,系统也可以就某些疑问和用户进行确认。与前两种方式相比较,混合主导更加人性化,对话过程更加灵活有效,是未来主流的对话主导类型。

对话控制策略是对话管理的核心内容,本文将在第 3 节对其进行全面详细的介绍。

#### 2.1.4 自然语言生成

自然语言生成(Natural Language Generation, NLG)的任务是组织适当的应答语句,将系统的动作(对话管理模块输出的询问、确认、查询结果等)转换成用户能够理解的自然语言。通常有两种实现方法,一种是将内部事先存储的文本作为生成的结果直接输出,另一种则是在程序内部存储生成句子的语义信息,通过对信息进行语言学加工来生成用户可以理解的句子。

#### 2.1.5 语音合成

语音合成(Text To Speech, TTS)的任务是将自然语言生成模块生成的文本合成为最终的应答语音并反馈给用户。常见的方法有参数分析合成、规则合成和波形编码合成。语音合成的主要挑战在于如何使生成的语音更加自然生动、需要的语音数据库更小、成本更低。现阶段,国内外有很多语音合成的实用软件,例如科大讯飞的语音合成系统,它以大语料库和语音韵律描述体系为基础,能够提供普通话、英语等多个语种,以及面向任意文本、篇章的连续语音合成功能。

口语对话系统从输入到输出的每个模块都是一个独立的有价值的重要研究课题,综合了多种理论和技术<sup>[4,5]</sup>。这些理论和技术虽然在最近 20 年间取得了很多进展,但远没有达到非常成熟的地步,仍具有广阔的研究空间。在实际开发过程中,整个系统也并不仅仅是上述各模块的简单拼凑,只有将各个部分有效地结合在一起,才能最大程度地提升系统的整体性能。事实上,口语对话系统的开发实践对上述各模块的核心技术也提出了新的挑战,其中领域的可移植性和系统的鲁棒性是设计者必须着重考虑的两个问题。

## 2.2 系统的可移植性和鲁棒性

### 2.2.1 领域的可移植性

在实际开发中,口语对话系统在语音识别、语言理解及对话管理模块都具有高度的领域相关性,一旦移植到新领域,这些模块往往都需要重新设计。由于口语对话系统的设计和开发具有成本高、周期长、集成技术多等特点,因此一个设计优

良的口语对话系统必须是结构清晰、能够重复使用其中大部分组件、便于二次开发的。

为了避免不必要的重复,常见的做法是将系统设计成与领域相关及领域无关的两大部分。与领域相关的部分单独设计,将领域知识存储在脚本和数据库等配置文件中,而与领域无关的部分则可以设计成通用模块,以便于移植到其他类似领域。这方面比较有代表性的工作是 Bohus<sup>[6]</sup>提出的一种基于议程的两层对话管理框架 RavenClaw,它包括与领域相关的对话任务说明层(Dialog Task Specification)及与领域无关的对话引擎层(Dialog Engine)。对话任务说明层通过分层任务树的形式和特定领域任务相结合,对话引擎层则通过执行具体的对话任务说明来控制对话过程。类似地,Nguyen<sup>[7]</sup>将系统用来处理各项具体任务的模块规划分为两大类,即执行领域任务的领域级规划(Domain-level plans)及与领域无关的语篇级规划(Discourse-level plans),并借助这种方法在其智能个人助理领域已实现的邮件管理功能基础上移植了一项日程管理的功能。

### 2.2.2 系统的鲁棒性

影响对话系统鲁棒性的因素有很多,其中首要的是用户的对话自由度。用户在对话过程中并不总是“规规矩矩”的,用户的口语往往存在省略、重复、停顿等不符合语法逻辑的现象,用户还可能会更改先前对话中提供的信息,这些都容易导致语音识别和语言理解模块出现错误,从而做出错误的应答。如果严格限制用户的对话方式,则会造成对话过程机械、交互自然度低的效果。从某种程度来说,用户的对话自由度和系统回答的准确度的确难以兼顾。在合理的对话自由度的前提下,如何提高系统的鲁棒性已经成为口语对话系统的又一项重要研究课题。

对话系统的鲁棒性显然还与内部每个模块的鲁棒性密切相关。具体来说,提高系统的鲁棒性首先要求语音识别模块必须具有良好的噪声鲁棒技术<sup>[8]</sup>。其次,语言理解算法的稳健性也对系统的鲁棒性有着重要的影响。事实证明,良好的语言理解模型在一定程度上可以更正语音识别结果中的一些错误,例如文献<sup>[9]</sup>通过计算原始语音识别结果和候选集中每个元素的文本相似度,对口语句子中由于语音识别错误造成不能理解的部分先进行修正,使得修正后的语音识别文本能有效地提高口语理解的准确率。虽然在语音识别和语音理解的鲁棒性分析方面已经取得了一定的理论研究成果,但由于环境噪声及不确定输入等因素的存在,在实际开发中很难构建出具有完美鲁棒性的语音识别和语言理解模块,出错不可避免。因此,如何在对话管理模块中继续发现和修补这些潜在错误仍是一个重要的研究课题<sup>[10]</sup>。目前较常用的一种方法是在该模块中引入直接或者间接的确认及改述机制<sup>[11]</sup>,直接确认一般是就一些不能确定的槽值直截了当地询问用户,期望得到“是”或“不是”的回答;间接确认则是系统将自己理解的用户之前的说话内容嵌入到下一个问题中,通过用户的回答来判断是否理解正确。间接确认使得对话过程更加自然,但也可能带来新的语音识别和语言理解错误;改述机制就是要求用户更改提问的方式或建议用户以某种便于系统理解的形式进行提问。此外, Lee 等人<sup>[12]</sup>还提出了一种基于议程和实例的混合模型方法来提高对话管理的鲁棒性,该方法利用最优假设(N-best)来决定用户当前的对话状态。

## 3 对话管理的主要方法

对话控制策略是对话管理的核心,其目的是通过一定的控制策略,推进人机对话自然合理地进行。目前应用在对话控制领域的模型有很多,包括有限状态机、填槽法、MDP、POMDP、基于实例的、基于规划的、贝叶斯网络等近 10 种方法。较早的一些文献<sup>[13,14]</sup>对其中的一部分方法进行了初步分析和比较,例如文献<sup>[13]</sup>简介了有限状态机、填槽法及任务树 3 种控制策略,文献<sup>[14]</sup>比较了模式匹配、有限状态机、填槽法 3 种控制模型。随着理论研究的不断深入,这些归纳总结都显得不够完整,尤其是缺乏对近年来兴起的一些统计方法的介绍。

根据各种对话控制策略的应用程度和研究热度,本文将上述众多方法分为 3 大类,分别是基于有限状态机和填槽法、MDP(Markov Decision Process)和 POMDP(Partially Observable MDP)、其它的一些重要方法。

### 3.1 基于有限状态机和框架的对话管理

#### 3.1.1 基于有限状态机的对话管理

有限状态机(Finite State Machine, FSM)又称基于图的(Graph-based),是基于规则的对话控制方法,也是研究最早、应用最广的对话管理方法<sup>[15]</sup>。事实上,有限状态机模型在众多工程领域里都有着广泛应用,又称为有限状态自动机(Finite State Automaton, FSA)或有限自动机(Finite Automata, FA)。一般地,有限状态机模型可以表示成五元组:

$$M = (Q, q_0, \Sigma, \delta, F)$$

其中, $Q$ 为有限状态集; $q_0 \in Q$ 表示初始状态; $\Sigma$ 为有限的事件输入集; $\delta: Q \times \Sigma \rightarrow Q$ 为状态转移函数; $\delta(q, a) = q'$ 表示在状态 $q$ 时若输入事件为 $a$ ,状态机将进入状态 $q'$ ;  $F$ 为终止状态集,  $F \subseteq Q$ 。

在 FSM 模型中,需要预先定义好所有可能的对话状态及状态间的转移条件,组成一个有限状态转移网络。模型的思想是将一次对话过程看成是状态机从初始状态到终止状态的一条状态转移路径。FSM 模型结构清晰,便于实现,能很好地控制人机对话的流程,在理论研究中应用广泛。例如 Lee 等<sup>[16]</sup>利用 FSM 模型搭建了一个基于任务的服务机器人对话系统,即在主状态机的系统框架下,每一项任务由一个子状态机模型负责实现;文献<sup>[2]</sup>也采用了类似的方法,用一个子状态机来负责某一项对话任务;Abe 等<sup>[17]</sup>构建两个独立的状态机模型来分别模拟用户和系统,将对话过程看作是状态机之间信息交换的过程。本文尝试通过用户模拟技术来收集对话语料,获取用户的状态转移模型,有效地降低了用户话语识别的混淆度。Raux 等<sup>[18]</sup>采用有限状态话轮替换机(Finite State Turn Taking Machine, FSTTM)模型,通过设置动作的代价矩阵及最小化动作的期望代价来选择对话策略。

FSM 模型也存在一些缺点,例如设计状态转移条件时必须考虑到用户在对话过程中可能出现的所有状况,且转移路径会随着对话状态数增多而呈指数增长,因此 FSM 模型不适合结构复杂的对话领域及用户主导的对话系统。此外,状态机模型的可移植性普遍较差,当对话主题或任务改变时,系统需要重新设计。

#### 3.1.2 基于框架的对话管理

基于框架(Frame-based)的对话管理又称为填槽法(Slot-Filling)或填表法(Form-based),是另一种早期常用的对话管

理模型,其思想是将系统和用户交互时的行为看作是不断在填写一个多维特征向量或表格。系统通过不断提问,从用户的当前话语信息中获取各个槽值,直到所有槽值都确定时给出相应的回答。

Goddeau 等<sup>[19]</sup>利用填表法建立了一个汽车广告对话系统,设计的电子表格内容包括汽车的制造商、型号、价格、年限、颜色等,这些槽值可以是必填或选填的,每个槽都设有相关的提示性语言来引导用户;袁琰等人<sup>[20]</sup>采用基于框架的管理模型构建了上海市交通信息智能查询系统,查询项包括出发地、目的地、交通工具等,当用户提供的查询项信息完整时,系统通过上网查询生成答句;文献<sup>[21]</sup>则将基于框架的语义表达作为内部的数据结构应用在电子节目指南(EPG)领域,将口语理解的结果解读为槽值对的集合,其中槽包括开始时间、节目名称、类型、演员等,在训练语料的基础上利用增量学习算法来构建对话策略。与 FSM 模型相比,填槽法不需要考虑对话顺序、实现复杂度低,因此适合更多的对话领域,常用来开发商业对话系统。但该方法会导致对话过程机械,交互自然度低,且不能满足多主题对话任务。

为了兼顾彼此的优点,很自然的想法是将 FSM 模型和填槽法相结合,应用在口语对话管理的设计中。常见的结合方式是先利用 FSM 模型构建系统的对话流程,再将填槽结果作为系统状态转移的条件。借助这种思想,陶建华等在文献<sup>[3]</sup>中将有限状态机的状态设置为询问、回答和漫谈,对话过程在 3 种状态间跳转,状态转移的条件是填槽完成、空缺及用户情绪的变化。也存在一些其他的结合方式,例如在文献<sup>[22]</sup>建立的基于 FSA 的多模态用户注册系统中,状态机的状态是根据用户的姓、名、电话及邮箱这 4 个槽值的填充状态来设定的。类似地,黄民烈等<sup>[23]</sup>将对话过程中槽值的未知、已知及确认状态作为自动机的状态,根据识别器的可信度的高低来决定状态转移,并引入了对话代价函数以寻求最佳策略。

总的来说,这两种较早的基于规则的对话管理模型因原理简单、易于实现等优点而一直备受青睐,在当前的理论研究和实际开发中仍被广泛使用。但采用这种控制策略能否取得良好的对话效果,在很大程度上取决于系统语音识别和语音理解模块的准确率。

### 3.2 基于 MDP 和 POMDP 的对话管理

基于强化学习(Reinforcement Learning)的控制策略是近年来对话管理领域的研究热点,特别是马尔可夫决策过程及部分可观察马尔可夫决策过程模型。

#### 3.2.1 MDP 模型

MDP 模型是从一些最优决策问题中抽象出来的数学模型。在基于 MDP 模型的口语对话系统中,对话管理模块被看作是一个 Agent,它负责系统的动作或策略选取。口语对话系统中的 MDP 模型可以形式化地定义为一个四元组:

$$\langle S, A, T, R \rangle$$

其中:

- $S = \{s_1, s_2, \dots\}$  表示有限状态集,由环境或用户的全部状态构成;

- $A = \{a_1, a_2, \dots\}$  是有限动作集,包含了 Agent 或系统可能选取的全部动作;

- $T$  是状态转移函数,  $T(s, a, s') = P(s' | s, a)$  表示当 Agent 采取动作  $a$  后,环境从当前状态  $s$  转移到下一状态  $s'$  的概率;

- $R$  是即时报酬(Reward),  $R(s, a)$  表示用户在当前状态

$s$  的条件下,Agent 采取动作  $a$  将获取的即时奖励值。

在 MDP 模型中,Agent 在每个时刻的决策不仅要考虑当前的效果,还要兼顾长远的效果,累加的、有限或无限阶段的折扣奖励值的和称为回报值(Return),即

$$\sum_{t=0}^{\infty} \gamma^t R(s_t, a_t), 0 < \gamma < 1$$

其中, $\gamma$  为折扣因子。Agent 选取最优策略  $\pi^*$  的目标是能够最大化期望或平均回报值,即

$$\pi^* = \arg \max_{\pi} E[\sum_{t=0}^{\infty} \gamma^t R(s_t, a_t)]$$

最早利用 MDP 模型进行对话管理理论研究的是 AT&T 的 Levin,她在文献<sup>[24]</sup>中通过实验证明了 MDP 模型在一定条件下可以通过强化学习的方式生成有效的对话策略。实验以航空旅行服务(ATIS)为对话任务,用户的话语信息主要包括出发地、目的地、航空公司、起飞时间等属性。除了问候、输出结果和结束对话外,系统的动作还包括 Constraining 和 Relaxing 两类,分别用于就用户话语中的某个属性进行提问及在没有查询结果的情况下建议用户更改某个属性。Levin 的实验存在两个方面的不足:一是假设语音识别和语音理解部分不发生错误;二是模型中的部分转移概率参数由于缺乏对话语料只能凭经验设置。Goddeau<sup>[25]</sup>在这两个方面开展了进一步研究,讨论了语音识别错误条件下的对话策略学习,并提出了一种利用状态空间结构来估计状态转移概率的方法,从而减少了对收集训练语料的要求。

在实际应用中,MDP 模型还存在两个主要问题:第一,随着对话任务复杂度的提高,系统状态空间中的对话状态数会激增,大规模的状态空间不仅需要大量的对话语料,而且给对话策略学习带来很大困难。Goddeau 与 Levin 都注意到了这个问题,但没能提出好的解决办法。第二,MDP 模型要求环境的状态必须是完全可察的,受真实对话中噪声环境和模糊语音输入等不可避免因素的限制,MDP 模型只能应用在一些特定领域,需要改进。POMDP 模型正是在 MDP 模型的基础上增加系统对环境的观察而得到的。

#### 3.2.2 POMDP 模型

POMDP 模型是 MDP 模型的改进和推广,是 MDP 模型和 HMM 模型的有机结合。一般地,POMDP 模型可以形式化定义为一个六元组:

$$\langle S, A, T, R, O, Z \rangle$$

其中, $S, A, T, R$  与 MDP 模型相同,此外,

- $O = \{o_1, o_2, \dots\}$  为观察集,包括了 Agent 可能获取的环境的所有观察值;

- $Z$  为观察函数,  $Z(a, s', o') = P(o' | a, s')$  表示 Agent 选取动作  $a$  后,环境状态为  $s'$  条件下,系统观测到  $o'$  的概率。

在基于 POMDP 模型的对话系统中,环境或用户在任一时刻的状态  $s$  是不确定的,各状态的概率分布向量称为环境的信念状态,记为

$$b = (b(s_1), b(s_2), \dots, b(s_{|S|}))$$

系统根据信念状态进行决策,如图 2 所示。

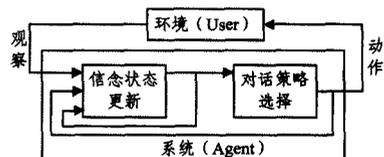


图 2 POMDP 模型

在任一时刻,基于环境的当前信念状态  $b$ ,Agent 或系统

执行一个动作  $a$  后,会收到一个即时奖励:

$$R(\mathbf{b}, a) = \sum_{s \in S} R(s, a) b(s)$$

以及一个观测值  $o'$ , 系统可以通过动作  $a$  和观察值  $o'$  来更新下一时刻的信念状态  $\mathbf{b}'$ , 其中

$$\begin{aligned} \mathbf{b}'(s') &= b'_a(s') = P(s' | \mathbf{b}, a, o') \\ &= \frac{P(o' | a, s') \sum_{s \in S} P(s' | s, a) b(s)}{P(o' | \mathbf{b}, a)} \end{aligned}$$

POMDP 模型实质上就是基于信念状态的 MDP 模型,其最优策略的目标也是能够最大化期望回报值,即

$$E\left[\sum_{t=0}^{\infty} \gamma^t R(\mathbf{b}_t, a_t)\right], 0 < \gamma < 1$$

POMDP 模型的复杂性使其最优策略的求解非常困难,且精确算法不易收敛,因此关于 POMDP 模型的各种近似迭代算法成为研究热点<sup>[26-28]</sup>,其中基于点的值迭代(Point-Based Value Iteration, PBVI)算法 Perseus<sup>[27]</sup>在理论研究中被广泛使用。

Roy 等<sup>[29]</sup>首次利用 POMDP 模型构建了一个家庭护理机器人的口语对话系统,并证明了在一定的噪声环境下 POMDP 模型的表现要优于 MDP 模型。张波等<sup>[30]</sup>构建了基于 POMDP 模型的故宫导游系统,采用两阶段的贝叶斯网络来确定状态转移函数和观察函数,并从值函数、策略质量和反应时间 3 方面对比了 MDP、QMDP、FIB 和格点法 4 类近似算法。剑桥大学的 Young 及 Williams 等人在基于 POMDP 模型的口语对话管理方面做了大量深入而富有成效的工作<sup>[31-35]</sup>。Williams 等<sup>[32]</sup>在 Roy 模型的基础上进一步将用户状态  $s$  分解为用户目标  $s_u$ 、用户动作  $a_u$  和对话历史  $s_d$  3 类,即  $s = (s_u, a_u, s_d)$ ,提出一种分解的 POMDP 模型,并将该模型自动生成的策略与 MDP 模型、手工制定的状态机策略进行了直接比较。实验结果再次表明,在较高的语音识别错误率下, POMDP 模型的表现要优于 MDP 模型,这与 Roy 的结论一致。文献<sup>[33]</sup>进一步将此分解模型与填槽法相结合,其中用户的目标与动作、对话历史都被分为  $W$  个槽值,由此提出了一种改进的基于点的值迭代最优化技术 CSPBVI(Composite Summary PBVI),包含构造、抽样、最优化、执行 4 个阶段,并构建了基于该混合模型旅游对话管理系统。与上述思路不同,Young 在文献<sup>[34]</sup>中假设分解模型中在每个时刻用户目标  $s_u$  可以按类似程度划分为几个等价类  $p$ ,称为分区(Partitions),用树形结构表示。利用基于分区  $(p, a_u, s_d)$  的信念状态替代基于单个目标  $(s_u, a_u, s_d)$  的信念状态,更新观察模型、动作模型、对话历史模型及信念状态更新方式,建立了隐信息状态对话系统。在 Williams 分解模型的基础上,Bui 等<sup>[36]</sup>还在用户状态空间中增加了用户情感项,构建了基于分解的 POMDP 的情感对话系统模型,并试图通过一个单槽的路线导航问题来解释该模型的应用。其中用户的情感分为有压力和无压力两种。

虽然 POMDP 模型被多次证明比 MDP 及基于规则的模型更适合噪声语音条件下的鲁棒对话管理,且可以通过分解状态空间来应对不同的对话任务,具有较强的可移植性,但在实际应用中,该模型也因系统设计复杂、需要大量的训练语料、现有的近似算法都只能求解较小规模的问题等众多原因而很少被使用,目前更多的还是停留在理论研究阶段。

### 3.3 其他重要的对话管理方法

除了实际应用广泛的 FSM 及填槽法模型和理论研究热点的 POMDP 模型,还存在其他一些常用的对话管理方法,下

面简要介绍其中的 3 种。

#### 3.3.1 基于实例的对话管理

基于实例(Example-based)是口语对话系统中一种简单有效、应用广泛的对话管理方法。该方法需要先收集大量人人之间的实例对话语料集  $D = (e_i, r_i), i = 1, 2, \dots$ , 其中  $e_i, r_i$  分别称为例句和相应的答句。当输入用户的话语输入时,系统便会在对话数据库中搜索与其语音识别结果最相似的例句,再通过语音合成相应的答句来回答用户的提问。

基于实例的对话管理本质上是一种模式匹配的策略,可以采用多种形式来计算用户话语与例句之间的相似度。浦项工业大学的研究团队在这方面开展了比较全面的研究<sup>[37-42]</sup>。Lee 等<sup>[37]</sup>首先提出了一种面向单一领域的基于情境(Situation)的实例检索方式,情境是指用户当前的对话状态,包括当前用户话语、用户的意图、语义框架、话语历史,类似于 POMDP 模型中的状态分解。当检索的例句不唯一时,采用词汇语义相似度和话语历史相似度相结合的方式来计算例句相似度;在此基础上,作者又尝试构建一种能同时面向目标和闲聊的多领域通用口语对话系统框架<sup>[38]</sup>,并在后续的研究中将系统应用于汽车导航、天气预报、电视指南和聊天机器人领域<sup>[39]</sup>。该通用系统设置了对话领域识别模块,采用关键词识别和基于特征的分类相结合的方法来对用户的输入进行领域分类,并通过真实和模拟用户在任务完成率等方面进行了系统评价。在相似度排序方面,Noh 等<sup>[42]</sup>还提出一种基于话语相似度(Discourse similarity)、顺序位置(Ordinal position)、个体限制(Entity constraint) 3 个特征的例句统计排名方法。

在基于实例的对话管理模型的鲁棒性分析方面, Lee 等在文献<sup>[40]</sup>中也提出一种基于修改措辞或改述的错误修复策略,将对话管理模块可能出现的错误分为没有例句、没有内容、没有槽 3 类,并根据话语历史为用户提供引导性的改述模板,以便于初用系统者将自己的问题改述为系统容易识别和理解的类型。Kim 等人<sup>[41]</sup>则利用用户当前的对话状态即情境来跟踪用户输入的不确定性,提出一种基于各对话状态槽值可信度的验证机制,其通过计算槽值的可信度及确定一个动态的验证阈值范围来决定系统是否执行验证策略。

基于实例的对话管理方法的缺点之一是人工收集对话语料不仅成本高,而且有些领域很难收集到大量的对话语料。为了解决此类问题,Akinori 等<sup>[43]</sup>提出一种基于数据描述表和模板的自动生成实例的方法,数据描述表包括句子的类型、关键词及关键词以外例句;并通过实验证明,分别使用自动生成和人工收集的对话实例的系统具有同样的效果。姚琳等<sup>[44]</sup>则采用关系数据库模式存储对话实例,允许用户删除和增加新实例,设计了一个辅助英语学习的人机对话系统。

#### 3.3.2 基于规划的对话管理

基于规划(Plan-based)的对话管理认为用户和系统对话是为了获取一些规划或目标,用户话语中总是暗含一定的内在目标,对话的作用则是逐步地实现这些目标,最后得到用户需要的结果。

基于规划的对话管理方法通常是利用基于任务的(Task-based)或基于议程(Agenda-based)的对话模型来实现<sup>[45,46]</sup>,其特点是将特定的对话任务划分为多个小任务或目标,通过与或任务树的形式来实现。每一棵任务树的根节点表示一个对话任务或对话主题,每个子节点表示解决其父节点任务可能需要的信息,子节点之间存在一定的与或逻辑关系,“与”表

示全部子节点的信息都确定才能得到父节点的信息,“或”表示只需要其中一个子节点的信息。在对话过程中,系统首先要识别用户的目标,找到相应的任务树,通过交互获取各节点的信息,并根据当前对话状态和逻辑关系判断用户提供的信息是否充分,若能,则给出结果;若不能,则依据缺少的节点信息对用户进行提问,直到完成整个对话任务。邬晓钧等人<sup>[47,48]</sup>提出一种基于主题森林结构的自组织对话管理规划模型,即将某个特定任务的若干主题都建立与或主题树,并根据存放信息的重要程度将节点分为主属性、次属性和附加属性3类,该模型的优点是考虑了主题间的信息共享,允许用户自由地切换主题。王菁华等<sup>[13]</sup>利用逻辑表达式来表示任务树结构中各信息要素间的关系,尝试将逻辑表达式的灵活性和FSM的快速度相结合,实行双层管理结构。

基于规划的对话管理方法具有对话过程灵活、可移植性强等优点<sup>[6]</sup>,常用在多主题对话领域,在一些混合对话管理模型中也发挥着关键作用<sup>[12]</sup>。

### 3.3.3 基于贝叶斯网络的对话管理

贝叶斯网络(Bayesian Network, BN)是另一种常见的统计对话管理方法,模型的思想一般是在用户的输入 $u_t$ 、对话历史 $s_d$ 和系统动作 $a_t$ 等要素之间构建贝叶斯网络,通过模型训练和最大概率值计算来决定系统的当前动作选取,即

$$a_t = \arg \max_{a_t \in A} P(a_t | u_t, s_d)$$

与MDP及POMDP模型相比,BN方法因参数较少而对大规模语料的依赖程度更低。Fan等<sup>[49]</sup>提出一种基于动态贝叶斯网络的对话管理模型,其中DBN包括系统的状态空间、动作空间、用户的动作空间及DBN的拓扑结构。模型认为任一时刻下系统动作只依赖于该时刻的系统状态及用户的动作,通过模型训练及联合条件概率分布值的计算,输出相应的系统动作。文献<sup>[50]</sup>尝试利用语义框架来记录语音识别和语言理解模块中得到用户话语的主题及属性等信息,并将当前的语义框架的内容作为贝叶斯分类器的输入,来确定系统最有可能的输出动作。文献<sup>[51]</sup>则将用户的目标或意图分为3类,利用语音识别和激光扫描数据训练贝叶斯网络来确定用户话语的意图,从而选取系统的动作。该模型被应用于导游机器人对话系统的开发。

除了上述7种方法外,仍存在一些其他的有效对话管理模型,例如基于Agent的方法<sup>[52,53]</sup>、基于信息状态更新(Information State Update)的方法<sup>[54,55]</sup>等,这些方法也都具有各自的优缺点。在理论研究和实际开发中,我们可以根据对话领域和对话任务的特点来单独选用某一对话管理方法,也可以将多种方法进行有效的结合,例如FSM和填槽法<sup>[3,21,22]</sup>、POMDP和填槽法<sup>[33]</sup>、FSM和MDP<sup>[56]</sup>、POMDP和贝叶斯<sup>[57]</sup>、Agenda与实例<sup>[12]</sup>等,最大程度地发挥出各自的优点,以构建出具有良好鲁棒性和可移植性的实用对话系统。

## 4 亟待解决的问题

综上所述,口语对话管理的研究工作已经取得了丰富的理论成果,但在体系完善及实践应用等方面还存在一些欠缺和不足之处,许多有价值的课题仍有待于进一步研究与探索。

(1)POMDP等统计模型是被理论实验证明了能有效应对噪声环境及语音识别错误等问题,具有良好鲁棒性的对话管理策略,但其在实际应用中却存在诸多困难。如何提高该理想模型的实际效用仍是一个亟待解决的课题。

(2)针对比较复杂的实际对话任务和用户需求(例如陪护机器人的对话系统需要兼具查询和聊天的对话功能),如何设计高效的混合对话管理模型,需要进一步关注和探讨。

(3)以语音为主的多模态人机交互系统已经引起了众多学者的浓厚兴趣并出现了大量的研究工作。如何在对话管理层实现语音、姿态等多模态信息的有效融合,从而进一步提升人机对话的效果,也是一个值得深入研究的问题。

(4)越来越多的研究人员已经意识到用户的情感因素对多模态人机交互的效果有着重要的影响,并由此开展了大量有关各模态情感识别的研究。如何在口语对话管理模型中融入情感信息,形成情感理解与反馈模型,构建既能满足用户对话需求又能响应用户情感需要的情感对话系统,将是一个值得探索的全新课题。

**结束语** 本文主要讨论了口语对话系统中对话管理领域的研究进展,重点介绍和分析了7种口语对话管理方法及模型。事实上,口语对话系统的设计和开发涉及到众多理论和技术,它在理论上是一个复杂深奥的大型课题,在实践上则是一项极富挑战性的创新工程。虽然现阶段的各项理论和技术还不够成熟,但可以预见,随着计算机软硬件设备的迅猛发展,语音识别和语言理解技术的日益成熟及对话管理模型的不断完善,越来越多的口语对话系统会走进我们的日常生活,为我们提供快速便捷的现代化服务。

## 参考文献

- [1] Ren F J. Affective information processing and recognizing human emotion [J]. Electronic notes in theoretical computer science, 2009, 225: 39-50
- [2] Pittermann J, Pittermann A, Minker W. Emotion recognition and adaptation in spoken dialogue systems [J]. Int J Speech Technol, 2010, 13: 49-60
- [3] 陶建华, 杨明浩, 李雅, 等. 多模态融合的人机对话系统[J]. 中国计算机学会通讯, 2011, 7(11): 30-38  
Tao J H, Yang M H, Li Y, et al. Multimodal fusion human computer dialogue system [J]. Communications of CCF, 2011, 7(11): 30-38
- [4] McTear M F. Spoken Dialogue Technology-Toward the Conversational User Interface [M]. Springer-Verlag, 2004
- [5] Minker W, Lee G G, Nakamura S, et al. Spoken Dialogue Systems Technology and Design [M]. Springer-Verlag, New York Inc., 2011
- [6] Bohus D, Rudnicky A I. The RavenClaw dialog management framework: Architecture and systems [J]. Computer Speech & Language, 2009, 23(3): 332-361
- [7] Nguyen A, Wobcke W. Extensibility and Reuse in an Agent-Based Dialogue Model [C]//Proc of IEEE/WIC/ACM International Conference on Web Intelligence and Intelligent Agent Technology Workshops (WI-IAT). 2006: 367-371
- [8] 雷建军, 杨震, 刘刚, 等. 噪声鲁棒语音识别研究综述[J]. 计算机应用研究, 2009, 26(4): 1210-1214  
Lei J J, Yang Z, Liu G, et al. Review of noise robust speech recognition, Application Research of computers [J]. 2009, 26(4): 1210-1214
- [9] 周卫东, 袁保宗, 朱维彬. 一种新的口语对话系统错误处理方法 [C]//第九届全国人机语音通讯学术会议论文集. 2007  
Zhou W D, Yuan B Z, Zhu W B. Research on error handling in spoken dialogue system [C]//Proc of the 9th national conference

- on Man-Machine speech communication(NCMMSC). 2007
- [10] McTear M F, Neill I O, Hanna P, et al. Handling errors and determining confirmation strategies-an objective-based approach [J]. *Speech Communication*, 2005, 45(3): 249-269
- [11] Skantze G. Exploring human error recovery strategies: Implications for spoken dialogue systems [J]. *Speech Communication*, 2005, 45(3): 325-341
- [12] Lee C, Jung S, Kim K, et al. Hybrid approach to robust dialog management using agenda and dialog examples [J]. *Computer Speech & Language*, 2010, 24(4): 609-631
- [13] 王菁华, 钟义信, 王枫, 等. 口语对话管理综述[J]. *计算机应用研究*, 2005(10): 5-8  
Wang J H, Zhong Y X, Wang C, et al. Overview of dialogue management in spoken dialogue system [J]. *Application Research of Computers*, 2005(10): 5-8
- [14] 拜战胜, 蓝岚, 彭佳红, 等. 对话系统中控制模型的比较研究[J]. *郑州大学学报*, 2006, 38(4): 112-116  
Bai Z S, Lan L, Peng J H, et al. Comparison of dialogue control models in question answering systems[J]. *Journal of Zhengzhou University*, 2006, 38(4): 112-116
- [15] McTear M F. Modelling spoken dialogues with state transition diagrams: experiences with the CSLU toolkit[C]//Proc 5th International Conference on Spoken Language Processing. 1998: 5-7
- [16] Lee C, Cha Y S, Kuc T Y. Implementation of dialogue system for intelligence service robots[C]//Proc of International conference on control, Automation and systems (ICCAS). COEX, Seoul, 2008: 2038-2042
- [17] Abe K, Kurokawa K, Taketa K, et al. A new method for dialogue management in an intelligent system for information retrieval[C]//Proc of the 6th international conference on spoken language processing(ICSLP). Beijing, China, 2000: 118-121
- [18] Raux A, Eskenazi M. A Finite-state turn-taking model for spoken dialog systems[C]//Proc of the Annual conference of the north American chapter of the ACL. 2009: 629-637
- [19] Goddeau D, Meng H, Polifroni J, et al. A form-based dialogue manager for spoken language applications[C]//Proc of 4th International Conference on Spoken Language (ICSLP). 1996, 2: 701-704
- [20] 袁琰, 田怀凤, 杜波, 等. 基于框架的对话管理模型的研究与实现 [J]. *计算机工程*, 2005, 31(3): 212-214  
Yuan Y, Tian H F, Du B, et al. Research and implementation of the frame-based dialogue management model [J]. *Computer Engineering*, 2005, 31(3): 212-214
- [21] Oh H J, Lee C H, Jang M G, et al. An intelligent TV interface based on statistical dialogue management [J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2007, 53(4): 1602-1607
- [22] Huang F, Yang J, Waibel A. Dialogue management for multimodel user registration[C]//Proc of the 6th international conference on spoken language processing (ICSLP). Beijing, China, 2000: 37-40
- [23] 黄民烈, 朱小燕. 对话管理中基于槽特征有限状态自动机的方法研究[J]. *计算机学报*, 2004, 27(8): 1092-1101  
Huan M L, Zhu X Y. A finite state automata approach based on slot-feature for dialogue management in spoken dialogue system [J]. *Chinese Journal of Computers*, 2004, 27(8): 1092-1101
- [24] Levin E, Pieraccini R, Eckert W. A stochastic model of human-machine interaction for learning dialog strategies [J]. *IEEE Transactions on Speech and Audio Processing*, 2000, 8: 11-23
- [25] Goddeau D, Pineau J. Fast reinforcement learning of dialog strategies[C]//Proc of IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP). 2000, 2: 1233-1236
- [26] Hauskrecht M. Value-Function Approximations for Partially Observable Markov Decision Processes[J]. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 2000, 13: 33-94
- [27] Spaan M T J, Nikos V. Perseus: Randomized Point-based Value Iteration for POMDPs[J]. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 2005, 24: 195-220
- [28] 孙湧, 仵博, 冯延蓬. 基于策略迭代和值迭代的 POMDP 算法 [J]. *计算机研究与发展*, 2008, 45(10): 1763-1768  
Sun Y, Wu B, Feng Y P. A policy and value iteration algorithm for POMDP [J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2008, 45(10): 1763-1768
- [29] Roy N, Pineau J, Thrun S. Spoken dialogue management using probabilistic reasoning[C]//Proc of the 38th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics (ACL). Hong Kong, 2000: 93-100
- [30] 张波, 蔡庆生, 郭百宁. 口语对话系统的 POMDP 模型及求解 [J]. *计算机研究与发展*, 2002, 39(2): 217-224  
Zhang B, Cai Q S, Guo B N. POMDP model and its solution for spoken dialogue system [J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2002, 39(2): 217-224
- [31] Young S, Gasić M, Thomson B, et al. POMDP-based statistical spoken dialog systems: A review[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2013, 101(5): 1160-1179
- [32] Williams J D, Young S. Partially observable Markov decision processes for spoken dialogue systems [J]. *Computer Speech and Language*, 2007, 21(2): 393-422
- [33] Williams J D, Young S. Scaling POMDPs for spoken dialog management [J]. *IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, 2007, 15(7): 2116-2129
- [34] Young S, Gasić M, Keizer S, et al. The hidden information state model: A practical framework for pomdp-based spoken dialogue management [J]. *Computer Speech and Language*, 2010, 24(2): 150-174
- [35] Williams J D. Challenges and opportunities for state tracking in statistical spoken dialog systems: results from two public deployments [J]. *IEEE Journal of selected topics in signal processing*, 2012, 6(8): 1-12
- [36] Bui T H, Zwiers J, Poel M, et al. Affective Dialogue Management Using Factored POMDPs [M]//Interactive Collaborative Information Systems. 2010: 207-236
- [37] Lee C, Jung S, Eun J, et al. A situation-based dialogue management using dialogue examples[C]//Proc of IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). 2006
- [38] Lee C, Jung S, Jeong M, et al. Chat and goal-oriented dialog together: a unified example-based architecture for multi-domain dialog management [C]//Proc of IEEE Workshop on Spoken Language Technology (SLT). 2006: 194-197
- [39] Lee C, Jung S, Kim S, et al. Example-based dialog modeling for practical multi-domain dialog system [J]. *Speech Communication*, 2009, 51(5): 466-484
- [40] Lee C, Jung S, Lee D, et al. Example-based error recovery strategy for spoken dialog system[C]//Proc of IEEE Workshop on Automatic Speech Recognition & Understanding (ASRU). 2007: 538-543

- 1-13,2006;467-471
- [4] Brandstetter G, Oberleitner W, Pichler M. How to change over heat recovery steam generators after gas turbine trip[C]//Proceedings of the ASME Turbo Expo 2006. Vol 4, 2006;723-730
- [5] Chen T, Xu X L, Wang S H. An Intelligent Prediction Method Based on Information Entropy Weighted Elman Neural Network [J]. *Comm Com Inf Sc.* 2011, 135: 142-147
- [6] Graichen C M, Cheetham W E. Case-based reasoning approaches for gas turbine trip diagnosis[C]//Proceedings of the ASME Turbo Expo 2007. Vol 1, 2007;721-728
- [7] Laohasongkram P, Leeragreephol S. Solving problem of gas turbine and HRSG trip from hydraulic damper closing in Combined Cycle Power Plant[C]//2007 International Conference on Control, Automation and Systems, 2007; 1301-1305
- [8] Ravi Y B, Pandey A, Jammu V. Prediction of Gas Turbine Trip Due to Electro Hydraulic Control Valve System Failures[C]//Proceedings of the ASME Turbo Expo 2010, Vol 3. 2010; 299-306
- [9] Tian X, Song W Y, Bai Y S, et al. Research on Reliability Prediction Based on Weighted Elman Network[C]//2012 International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering (Icqr2mse). 2012;740-743
- [10] Elman J L. Finding Structure in Time[M]. *COGNITIVE SCIENCE.* 1990, 14; 179-211
- [11] Pandey A K, Jammu V B, Zaremba S M. System and Method for Prediction of Gas Turbine Trips Due to Gas Control Valve Failure [OL]. <http://www.freepatentsonline.com/20090055130.pdf>
- [12] Milne R. TIGER™: Knowledge Based Gas Turbine Condition Monitoring[J]. *Ai Communications*, 1999, 9(3): 92-108
- [13] De Wbiryb S, Jammu V B, Pandey A K. Richard John Rucigay, Saratoga Springs, NY (U S). System and Method for Prediction of Gas Turbine Trips Due to Thermocouple Failures[OL]. <http://www.freepatentsonline.com/7734443.html>
- [14] Robert Milne CN. TIGER™; Continuous Diagnosis of Gas Turbines[C]//Proc. of ECAI/PAIS'00. 2000

(上接第 7 页)

- [41] Kim K, Lee C, Lee D, et al. Modeling confirmations for example-based dialog management [C]//Proc of IEEE Workshop on Spoken Language Technology(SLT). 2010;324-329
- [42] Noh H, Ryu S, Lee D, et al. An Example-Based Approach to Ranking Multiple Dialog States for Flexible Dialog Management [J]. *IEEE journal of selected topics in signal processing*, 2012, 6(8); 943-958
- [43] Ito A, Morimoto T, Makino S, et al. A Spoken Dialog System based On Automatically-Generated Example database[C]//Proc of IEEE ICALIP. 2010; 732-736
- [44] 姚琳, 梁春霞, 张德干. 基于实例推理的人机对话系统的设计与实现[J]. *计算机应用*, 2007, 27(3): 765-768  
Yao L, Liang C X, Zhang D G. Design and implementation of case-based reasoning human-machine conversation system [J]. *Journal of Computer Applications*, 2007, 27(3): 765-768
- [45] Rudnicky A, Xu W. An agenda-based dialog management architecture for spoken language systems [C]//Proc of IEEE Automatic Speech Recognition and Understanding Workshop (ASRU). 1999; 1-337
- [46] Xu W, Rudnicky A I. Task-based dialog management using an agenda[C]//Proc of the Workshop on Conversational systems, Association for Computational Linguistics NAACL. 2000; 42-47
- [47] Wu X, Zheng F, Xu M. Topic forest: A plan-based dialog management structure [C]//Proc of IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP). 2001, 1; 617-620
- [48] 邬晓钧, 郑方, 徐明星. 基于主题森林结构的对话管理模型[J]. *自动化学报*, 2003, 29(2): 275-283  
Wu X J, Zheng F, Xu M X. Topic forest based dialog management model [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2003, 29(2): 275-283
- [49] Fan L, Yu D, Peng X, et al. A Spoken Dialogue System Based on FST and DBN [C]//Proc of Natural Language Processing and Chinese Computing (NLPCC). Springer, Berlin Heidelberg, 2012; 34-45
- [50] 邓红, 陈丹, 周方. 基于贝叶斯网络的多主题对话管理方法研究 [C]//第十五届全国青年通信学术会议论文集. 2010  
Deng H, Chen D, Zhou F. A research for multi-topic dialogue management based on Bayesian network[C]//Proc of 15th National Youth Communication Conference of China. 2010
- [51] Prodanov P, Drygajlo A. Bayesian networks for spoken dialogue management in multi-model systems of tour-guide robots[C]//Proc of the 8th European Conference on speech communication and technology. Geneva, Switzerland, 2002; 1332-1337
- [52] Nguyen A, Wobcke W. An agent-based approach to dialogue management in personal assistants[C]//Proc of the 10th international conference on intelligent user interfaces. ACM, 2005; 137-144
- [53] 徐凯华, 张德干, 姚琳. 基于 Agent 的人机对话系统的设计与实现[J]. *计算机工程*, 2007, 33(16): 264-266  
Xu K H, Zhang D G, Yao L. Design and realization of human-computer dialogue system based on agent[J]. *Computer Engineering*, 2007, 33(16): 264-266
- [54] Bos J, Klein E, Lemon O, et al. DIPPER: Description and formalisation of an information-state update dialogue system architecture[C]//Proc of 4th SIGdial Workshop on Discourse and Dialogue. 2003; 115-124
- [55] Larsson S, Traum D R. Information state and dialogue management in the TRINDI dialogue move engine toolkit [J]. *Natural language engineering*, 2000, 6; 323-340
- [56] Cuayáhuitl H, Renals S, Lemon O, et al. Reinforcement learning of dialogue strategies with hierarchical abstract machines[C]//Proc of IEEE Workshop on Spoken Language Technology (SLT). 2006; 182-185
- [57] Png S, Pineau J, Chaib-Draa B. Building adaptive dialogue systems via bayes-adaptive POMDPs[J]. *IEEE Journal of selected topics in signal processing*, 2012, 6(8): 917-927