

# 心灵即计算:哲学,逻辑和实践

费定舟

(武汉大学哲学学院心理学系 武汉 430072)

**摘要** 论证心灵是可计算的,因而为计算作为一门学科提供更丰富的内涵和实例,使计算不在局限于通常的自然过程而进入到人类心理领域。在哲学上,论述心灵哲学中的物理主义,采用最小立场即以依附(Supervene)来解释心灵现象何以是物理的;在逻辑上,我们首次以 Church-Turing-Deutsch 原理为基础来使 Church-Turing 论题与实际的物理系统联系起来,从而使本文的结论与量子计算相适合,也使可计算概念与物理学理论相协调,而这正是由 Church-Turing 论题所定义的可计算概念所没有的地方。还讨论了认知逻辑在使人类情感、感觉和遗忘和记忆等方面的形式化方面的一些工作,这在知识表达和推理以及分布式计算等领域是一个很重要的方向之一。

**关键词** 心灵哲学,物理主义,Church-Turing-Deutsch 原理,量子可计算性,认知逻辑

**中图分类号** TP30-5 **文献标识码** A

## Mind is Computation: Philosophy, Logic and Practices

FEI Ding-zhou

(Department of Psychology, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract** This paper argued that the mind is computable and then provided a more fruitful instance and implication for the computing as a discipline, which makes the computation not to include only in natural processes but in human psychology. In philosophy, we stated the physicalism of the philosophy of mind in the minimal stand that the Supervene can explain why the human mind is physical. In logic, we associated Church-Turing-Deutsch Principle with actual physical systems in order to this paper claims in consistent way with the quantum computation and current physical theories. This point is not appointed by the Church-Turing Thesis. In practice, this paper discussed the work of cognitive logics: formulating human minds, like human feelings, sensings and in particular, forgetting and memory. These practices now are very important directions in the study of knowledge representation and reasoning and distribution computation.

**Keywords** Philosophy of mind, Physicalism, Church-turing-deutsch principle, Quantum computation, Cognitive logics

## 1 引言

计算作为一门学科(Computing as a discipline)已越来越成为许多相关研究人员的共识,这些人除了来自计算机领域外,还来自其他研究领域,例如哲学、心理学以及逻辑学。从哲学的角度看,心灵哲学提供了功能主义(Functionalism)和物理主义(Physicalism)的研究纲领<sup>[1]</sup>,旨在把人类心灵化归为物理对象及其功能,因此为抽象、理论和设计提供对象域。心理学的重要分支—认知心理学则有信息加工模型<sup>[2]</sup>。逻辑学旨在提供形式化的结构以便于设计。但是,这些研究纲领或模型只不过是涉及到 Turing 可计算意义上的计算概念,它们并没有解答它们如何与实际的物理系统相联系,尤其是量子可计算意义上的联系。本文将论证这些研究纲领或模型是如何与量子可计算性具体地相联系的,逻辑则是计算的形式化结构。我们还结合当前的认知逻辑的进展,介绍几个案例来说明心理过程是如何被计算的。这表明哲学和心理学同样可以成为大计算学科中的分支学科,它们拓展了计算学科的

边界。论证步骤是这样的:首先是关于心灵哲学的背景:物理主义,它把心灵与物理系统联系起来;其次是 Church-Turing-Deutsch(CTD)原理,它把自然界的每一物理系统与可计算性联系起来,是对 Church-Turing 论题的推广和深化。所以结论是心灵是可以计算的。而逻辑是作为心灵的形式结构的表达。本文最后讨论和比较了相关的工作。

## 2 哲学背景:物理主义

计算作为一门学科,我们认为它必须包涵心理学与哲学等领域。一个重要的理由是心理学已经科学化了,哲学也在经历同样的过程。现代分析哲学和心灵哲学是一个很好的例子,数据处理和数学工具的应用,数理逻辑和其它语言分析的引进,是其科学化的标志。既然大量的物理现象可以看成计算的对象,那心理过程为何不同样看待呢?心灵哲学中的物理主义的提出为我们提供了一个有力的理论基础。那么什么是物理主义呢?概括来讲,它是这样一个论题:任何一件事情都是物理的,或者说,任何一件事情都依附(Supervenies)在物

到稿日期:2008-10-30 本文受国家社科基金项目(0601016)和 985 拓展项目—认知科学项目(904273258)资助。

费定舟(1969—),副教授,主要研究方向为认知心理学和人工智能,E-mail: feidingzhou@yahoo.com.cn。本文为作者在 2008 年全国“计算思维与计算机导论”专题学术研讨会上所作的大会报告。

理的东西之上<sup>[3]</sup>。什么样的事情是物理的呢？一个性质是物理的，当且仅当它是一个物理理论可以告诉我们的性质，或者是一个物理理论可以告诉我们的性质的依附。依附在这里是一个重要的概念，一个性质 A 依附另一个性质 B 当且仅当如与性质 B 相同则与性质 A 相同。我们可以用个例子来说明这一点。假定我们有两个从表面上看一摸一样的油画，但一个是原画，一个是仿造，仿造到连在分子物理水平上两者看不出什么差别来，所以我们在画布上看到两者在颜色和形式方面是一样的。这就是说颜色和形式这两个性质被分子物理水平上的排列所决定。我们也可以说颜色和形式这两个性质依附于分子的物理性质。

物理主义有很多变种，像古希腊哲学家泰勒斯的“万物皆水”和唯物主义。但是这些变种太局限于具体的物理对象。物理主义认为世界上存在非物理对象，道德，心灵和社会都是非物理对象。另一个重要的非物理对象是重力，但它们可以用物理理论来说明。本文所讨论的物理主义用依附作为基本点，是各个物理主义变种都承认的。有两种物理主义值得一提：Token 物理主义和 Type 物理主义，它们分别表达如下<sup>[4]</sup>：

Token 物理主义：对于世界上的任何一个特有的对象，事件和过程 X，都存在特别的物理对象，事件和过程 Y 与之对应并且  $X=Y$ 。

Type 物理主义：对于世界上的任何一个特有的心智性质 F，则有一个物理性质 G 与之对应并且  $F=G$ 。

这两种物理主义都把心灵和心理过程还原为物理过程，这与生物学家的研究工作方法是一致的。我们必须指出，物理主义与物理学家眼中的物理世界并不完全相同。首先是方法的不同，物理主义采用语言分析，并且利用现代物理学的理论成果，而物理学家的方法是数学方法与实验的结合。其次物理主义是一种哲学理论，带有思辨意味，而物理学理论则不涉及心理领域。物理主义实际上是把物理学的理论与心理领域联系起来的桥梁。

物理主义是心灵哲学的中心课题。我们采用依附来说明物理主义是最小的研究纲领，她留下了许多工作有待讨论。存在一些反对物理主义的论点。例如，我们人类具有内在的感觉特质 (qualia)，只为经验主体所独有，这样的心理如何用物理学理论来解答，不是很容易回答的问题<sup>[5]</sup>。另一方面我们都有意向性，这遇到了 Kripke 的批驳。本文不打算详谈这些反对物理主义的论点。让我们来讨论赞成物理主义的论证。第一个论证是因果论证：第一个前提是任何一个事件如果有前提，那么它就有一个物理前提；第二个前提是心智事件引起物理事件；第三个前提是这样一个原理：如果事件 a 引起事件 b，那么不存在事件 c 使得 c 不依附在 a 上，但同时引起 b。那么结论是心智事件依附于物理事件。反对物理主义的一个论证针对第二个前提，提出一个相反的论点：心智事件不引起物理事件。但是我们反驳如下：假定疼痛感觉不引起疼痛行为，我如何知道你你说你疼痛是真的？

另一种支持物理主义的论证是通过方法论来进行的。第一个前提是在哲学研究工作中尽量地使用自然科学的方法是理性的；第二个前提是如果我们使用自然科学的方法，那么我们得到的关于世界的描述和解释是一个物理理论（在还原论意义上）。所以相信物理主义是理性的。有人反对说这种还原到目前为止并没有成功地完成，但是物理主义与目前的自

然科学是不矛盾的，而其它竞争理论很少有这个优点。我们支持物理主义的另外一个理由是它消除了在解释人的意向、道德和情感时所笼罩的神秘感：正如 G. Ryle 指出，这些非物理对象可以在人的行动和物理行为上来解释<sup>[6]</sup>。在这里，我们不能把物理主义与行为主义混淆起来。我们的物理主义谈到心灵对物理的事情的依附，但还是承认非物理对象的存在，而行为主义则否认非物理对象的存在。

我们注意到关于物理主义的论证是在心灵哲学范围内讨论的，而物理理论在解释的框架内只作为证据之一。这是因为反对物理主义的论证基本上来自心灵哲学的两个主要理论：特质 (qualia) 理论与二元理论。

物理主义与计算的关系如何？我们从依附的角度来看，物理主义并没有承诺物理的东西一定是可计算的。更重要的是我们必须有一个关于心理可计算的定义。我们提出一个计算的因果关系原理：

一个心理对象、性质和过程是可计算的，当且仅当它所依附的物理对象、性质和过程是可计算的。

这个因果关系原理的辩护基于两个概念：心理事件引起物理事件的因果关系和可计算性概念。论证如下：假定一个心理对象、性质和过程所依附的物理对象、性质和过程是不可计算的，那么根据心理事件和物理事件因果关系知心理事件是不可计算的，否则心理事件可以在有穷步完成，而这必引起依附的物理事件必在有穷步完成。那么如何判断物理对象、性质和过程是可计算的呢？这引出 Church-Turing-Deutsch 原理 (CTD)，它是 Church-Turing 论题的扩充。

### 3 Church-Turing-Deutsch 原理

这个原理是英国物理学家 D. Deutsch 在 Church-Turing 论题的基础上提出来的。大家知道，Church-Turing 论题是不直接涉及物理学和物理系统的。它可以表示如下：每一个可计算的函数可被一个通用 Turing 机所计算<sup>[7]</sup>。Church-Turing 论题把原本直觉上可计算的概念精确化了，它讨论的对象是递归函数，但是完成这些计算过程的物理系统或物理装置并没有涉及。在 1985 年 Deutsch 首次把 Church-Turing 论题与实施计算过程的物理系统联系起来。他注意到，任何计算过程都是在一定的物理系统上进行的，它必须服从物理定律。于是他重新表述 Church-Turing 论题从而得到 Church-Turing-Deutsch 原理：每一个物理系统的过程都能被一个通用 Turing 机所计算（模拟）<sup>[8]</sup>。每一个物理过程是有穷可实现的，即我们可以实施物理实验过程。通用 Turing 机则是一个理想化的计算装置，并且可有穷地规范化。我们都知道，今天的计算机可以模拟很复杂的物理过程，像爆炸、天气演变和宇航登陆，这些都是这个原理的物理演示。Fredkin and Toffoli 曾完成一项弹性桌球实验，以证明经典物理学是满足 Church-Turing-Deutsch 原理<sup>[9]</sup>。另一方面，Deutsch 表明，不管是经典物理学的系统还是量子物理学的系统，只要是可有穷地规范化的系统，都可以被一台通用 Turing 机所计算和模拟<sup>[8]</sup>。这个原理导致量子计算的产生。正如 Church-Turing 论题一样，Church-Turing-Deutsch 原理是不能证明的，但它有大量的证据所支持。其中一个重要原因是这些原理所指的 Turing 机是一个理想化的计算装置，与实际的计算机有很大的不同。特别是，由于量子力学难以在经典的 Church-Turing

机上实现,这似乎违反了 Church-Turing 论题,因此我们必须寻找新的计算机制,而 Church-Turing-Deutsch 原理的提出涵盖了适合于量子力学的物理系统。到目前为止,真正的量子计算机还没有制造出来。我们有一个适合量子计算的计算机的定义:

一台计算机是这样—个装置,它的输出依赖于输入,而这遵循公认的有效量子物理学定律。

这个定义没有强调计算过程一定要一步一步进行。这是与经典计算机不同的地方。我们也有一个量子版的 Church-Turing-Deutsch 原理:

每一个有穷可实现的物理系统可被一个量子通用计算机所完全模拟,且可在多项式时间内完成<sup>[8]</sup>。

Church-Turing-Deutsch 原理的重要意义在于它是一个物理原理,而不仅是一个数学定义。之所以采用量子计算模型,是因为它有 3 个优点:首先它是实际的物理系统中可执行的,其次它的计算能力是非常强大的,是量子并行计算使之成为可能。最后是它的鲁棒性。在这里我们不介绍量子通用计算模型的细节,只知道一事实就够了:在经典计算机中,基本信息单位为比特,运算对象是各种比特序列。与此类似,在量子计算机中,基本信息单位是量子比特,运算对象是量子比特序列。所不同的是,量子比特序列不但可以处于各种正交态的叠加态上,而且还可以处于纠缠态上。因此,量子计算对经典计算作了极大的扩充,在数学形式上,经典计算可看作是一类特殊的量子计算。量子计算机对每一个叠加分量进行变换,所有这些变换同时完成,并按一定的概率幅叠加起来给出结果,这就是量子并行计算的数学原理。除了进行并行计算外,量子计算机的另一重要用途是模拟量子系统,这项工作经典计算机无法胜任的。总之,我们现在所讨论的量子计算是不同于经典的 Turing 式计算模型的,它包涵了 Turing 式计算模型在内。物理对象、性质和过程在 Church-Turing-Deutsch 原理之下是可以计算的。

#### 4 心灵的计算实践

我们现在来总结本文论证后的主要结论:

我们人类的心灵是物理的,即是物理系统的一部分(物理主义);每一个有穷可实现的物理系统可被一个量子通用计算机所完全模拟(Church-Turing-Deutsch 原理);所以,我们人类的心灵是完全可被一个量子通用计算机所完全模拟。这就是说,心灵是可被计算的。这个结论对计算机科学与技术方法论有何重要意义呢?首先它突破了计算机科学领域的界限,人类的心理过程可以作为计算机科学与技术方法论的研究对象;其次,它丰富了计算机科学的主领域,指出了更多的研究方向,特别是量子计算也纳入了我们的视野;也许最重要的是,计算机科学与技术方法论与心灵哲学的结合和互动使它成为新的,范围更大的计算学科。正如文献[10]所指出的:

当前的计算学科已成为—门范围极为宽广的学科,将整个学科划分为若干分支领域有助于我们对计算学科的理解。分支领域的划分一般遵循以下 4 个原则:

- 科目内容基础的协调—致;
- 实质性的理论部分;
- 有意义的抽象;
- 重要的设计和实现。

心灵的计算实践已有很多成果。我们可以列举如下:

(1) 情感 agents<sup>[11]</sup>: 我们人类有很多情感,像爱与恨(love, hate), 喜乐与悲伤(joy, grief), 幸福与忧伤(happiness, sadness)。它们可以抽象地表达为三维坐标图,如图 1 所示。

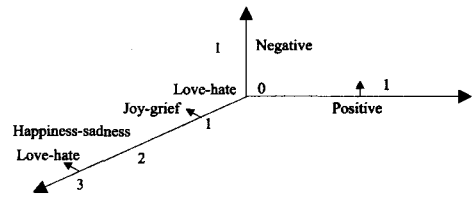


图 1 三维坐标图

其它类型的情感可以看成这 3 个情感维度的组合,如表 1 所列。

表 1

Emotion Vector	Emotion Value
Love	near(1,0,0)
Hate	near(0,1,0)
Indifference	near(0.5,0.5,0)
Joy	near(1,0,1)
Grief	near(0,1,1)
Boredom	near(0.5,0.5,1)
Happiness	near(1,0,2)
Sadness	near(0,1,2)
Conformity	near(0.5,0.5,2)
Ecstasy	near(1,0.5,0.3)
Rage	near(0.4,1,1.5)
Pride	near(1,0,1.5)
Shame	near(0,1,1.5)
Anger	near(0,1,2.5)
Jealousy	near(1,0.8,0)
Lust	near(0.8,0.3,2.7)
Sorrow	near(0,1,0.5)
Revenge	near(0.5,1,0.5)
Tenderness	near(1,0.2,2.3)
Enthusiasm	near(1,0,1.3)
Surprise	near(0.8,0.8,2)

(2) 感知过程:我们人类的感知过程也是人工智能研究的重要对象之一。重要的感知过程有看,听和其它信息处理过程。B. V. Linder 等从模态逻辑的角度研究了看和听,并给出了相应的形式化。设一个模态命题语言  $L$  能表达基于观察的信念公式  $B_i(o)\phi$ , 基于听觉的信念公式  $B_i(c)\phi$  和基于不完全信息的信念公式  $B_i(d)\phi$ , 和基于  $L$  的 Kripke 式的模型  $M = \langle S, R(i) \rangle$ ,  $S$  是一可能世界的非空集合,  $R(i)$  是  $S \times S$  上的关系。则类似于通常的模态逻辑的模型定义,有:

$$M, s \models B_i(o)\phi \Leftrightarrow \forall s' \in S[(s, s') \in B_i(o) \Rightarrow M, s' \models \phi]$$

$$M, s \models B_i(c)\phi \Leftrightarrow \forall s' \in B^c(i, s)[M, s' \models \phi]$$

$$M, s \models B_i(d)\phi \Leftrightarrow \forall s' \in B^d(i, s)[M, s' \models \phi]$$

其中,  $B_i(o)$ ,  $B^c(i, s)$ ,  $B^d(i, s)$  分别是  $R(i)$  上的一个等价关系, Agent  $i$  基于观察和基于不完全信息的且与  $s$  等价的关系的集合。

$$B_i(k)\phi(\text{Agent } i \text{ 知道 } \phi)$$

$$\text{Agn}_i(k)\phi \wedge B_i(o)\phi(\text{Agent } i \text{ 看见 } \phi)$$

$$\text{Agn}_i(o)\phi \wedge B_i(c)\phi(\text{Agent } i \text{ 听见 } \phi)$$

$$\text{Agn}_i(c)\phi \wedge B_i(d)\phi(\text{Agent } i \text{ 缺省推出 } \phi)$$

对于  $x \in \{k, o, c\}$ ,  $\text{Agn}_i(x) \equiv \rightarrow B_i(x)\phi \wedge \rightarrow B_i(x) \rightarrow \phi$

这些形式化刻画了看,听和缺省推理的人的感觉活动<sup>[12]</sup>。

(3) 遗忘与记忆:遗忘与记忆的逻辑刻画大概是比较成功的心理过程,它最初是描写机器人在动态环境中如何使数据库更新而使内存不变的逻辑条件,从而导致 Forgetting 理论的提出<sup>[13]</sup>。它是 Agent 遗忘一个事实这个过程的逻辑抽象。给定一个命题逻辑公式  $\phi$ , 以及一个原子命题  $P$ , 在  $\phi$  中遗忘  $P$  写成  $\text{forget}(\phi, P)$ , 是一个公式:  $\phi(p/\text{true}) \vee \phi(p/\text{false})$ ,  $\phi(p/\text{true})$  是用 true 处处替换在  $\phi$  中的  $P$  的结果,  $\phi(p/\text{false})$  也以类似的方式定义。Agent 遗忘一个关系  $P$  可以这样定义:  $\text{forget}(\phi, P) = \exists R\phi(P/R)$ ,  $R$  是一个二元关系谓词变元,  $\phi(P/R)$  是  $\phi$  中  $P$  的每一出现用  $R$  替换的结果。与遗忘对立的概念是记忆。设  $T$  是一个理论,  $P_1, \dots, P_k$  是出现在  $T$  中的关系谓词,  $P_{k+1}, \dots, P_n$  是余下的出现在  $T$  中的关系谓词, 则定义对  $T$  中的关系谓词  $P_1, \dots, P_k$  的记忆  $\text{remember}(T, P_1, \dots, P_k) = \text{forget}(T, P_{k+1}, \dots, P_n)$ 。林方真在文献<sup>[14]</sup>中提出一个计算遗忘的两个算法, 这里就不详细讨论了。Forgetting 理论在 Abduction 推理和规划理论中有重要的应用<sup>[15]</sup>。

(4) 社会 Agent 与 MAS(Multi-agent System): 对于单个 Agent, 我们有 BDI 模型, 即一个刻画 Agent 的信念(Belief), 愿望(Desire)和目标(Goal)等心理活动的认识逻辑, 它也是 Kripke 式的模型。对于 MAS(Multi-agent System), 社会承诺(Social Commit), 合作(Cooperation)等社会性心理也得到不同方面的形式化<sup>[16,17]</sup>。

**结束语** 我们的论证既有来自心灵哲学的物理主义, 也有来自量子计算的 Church-Turing-Deutsch 原理。心灵哲学的物理主义有很多版本, 我们采用最小的物理主义, 即以依附为基本出发点。我们的论证首次利用量子计算的 Church-Turing-Deutsch 原理, 所以我们的计算概念是与通常的采用经典计算概念的功能主义(Functionalism)是不同的, 我们的计算概念与实际物理系统是密不可分的, 且与量子物理学保持一致, 而这些恰恰是功能主义或心灵的计算理论(Computational Theory of Mind, CTM)所没有的, 因为它们的计算概念是基于 Church-Turing 论题的经典概念。所以我们的论证更可靠、更有力。另外, 心灵的计算理论尽管承认心灵是可计算的, 但这只局限与特定的心理过程, 而我们则认为所有的心理过程是可计算的。值得一提的是, 我们不仅仅论证所有的心理过程是量子可计算的, 而且我们还有大量的计算实践

工作, 从个人感觉心理到社会心理, 都有不同形式的设计和计算实践, 其中有些算法已在知识表达和推理, 机器人学和分布式智能等研究领域中有重要的应用。心灵既计算已得到哲学、逻辑和实践等不同研究学学科的有意义的成果的有力支持。

## 参考文献

- [1] Ravenscroft, Ian. Philosophy of mind: A beginner's guide. Oxford University Press, 2005
- [2] [美] 司马贺. 人类的认知: 思维的信息加工理论[M]. 荆其诚, 张厚粲, 译. 北京: 科学出版社, 1986
- [3] Poland J. Physicalism: The Philosophical Foundations. Oxford: Clarendon, 1994
- [4] Papineau D. Philosophical Naturalism. Oxford: Blackwell, 1996
- [5] Chalmers D. The Conscious Mind. New York: Oxford University Press, 1996
- [6] Ryle G. The Concept of Mind. London: Routledge, 1950
- [7] Cutland N. Computability. An Introduction to Recursive Function Theory. Cambridge University Press, 1980: 48-67
- [8] Deutsch D. Quantum Theory, the Church-Turing Principle and the Universal Quantum Computer // Proceedings of the Royal Society. Series A, 400: 97-117
- [9] Fredkin E, Toffoli T. Conservative Logic. International Journal of Theoretical Physics, 1982, 21: 219-253
- [10] 董荣胜, 计算机科学与技术方法论(ppt), 2008
- [11] Gershenson C. Modelling emotions with multidimensional logic // Fuzzy Information Processing Society, 1999. NAFIPS. 18th International Conference of the North American. Vol. July 1999: 42-46
- [12] van Linder B, van der Hoek W, Meyer J-J C. Seeing is believing (and so are hearing and jumping). Journal of Logic, language, and Information, 1997, 6: 33-61
- [13] Lin F, Reiter R, Forget it! // Proc. of the AAAI Fall Symposium on Relevance. 1994: 154-159
- [14] Lin F. On strongest necessary and weakest sufficient conditions. Artificial Intelligence, 2001, 128: 143-159
- [15] Lin F, Reiter R. How to progress a database. Artificial Intelligence, 1992: 131-167
- [16] Rao A S, Georgeff M P. Modeling rational agents within a BDI-architecture // J. Allen, et al., eds. Proceedings of KR'91. Morgan Kaufman Publishers, 1991: 473-484
- [17] Dignum F, van Linder B. Modelling social agents: Towards deliberate communication. Handbook of Defeasible Reasoning and Uncertainty Management Systems. Kluwer, 2002: 357-380
- [30] 曹顺茂, 叶世伟. 一种在源数据稀疏情况下的流形学习算法研究[J]. 计算机仿真, 2007, 24(3): 104-106
- [31] 曹顺茂, 叶世伟. 一种改进的局部线性嵌入算法[J]. 计算机仿真, 2007, 24(5): 87-90
- [32] 宋欣, 叶世伟. 一种在源数据稀疏情况下的数据降维算法[J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(28): 181-186
- [33] Geng X, Zhan D C, Zhou Z H. Supervised nonlinear dimensionality reduction for visualization and classification. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 2005, 35(6): 1098-1107
- [34] de Ridder D, Kouropteva O, Okun O, et al. Supervised locally linear embedding // Artificial Neural Networks and Neural Information Processing, ICANN/ICONIP 2003 Proceedings. Lecture Notes in Computer Science 2714, Springer, 2003: 333-341
- [35] Belkin M, Niyogi P. Semi-supervised learning on Riemannian manifolds. Machine Learning, 2004, 56(1): 209-239
- [36] Belkin M, Niyogi P, Sindhvani V. On manifold regularization // Proceedings of the International Conference on AI and Statistics. 2005: 17-24
- [37] 何力, 张军平, 周志华. 基于放大因子和延伸方向研究流形学习算法[J]. 计算机学报, 2005, 28(12): 2000-2009
- [38] 杨剑, 李伏欣, 王珏. 一种改进的局部切空间排列算法[J]. 软件学报, 2005, 16(9): 1584-1589
- [39] Bengio Y, Paiemant J F, Vincent P. Out-of-sample extensions for LLE, Isomap, MDS, Eigenmaps and Spectral Clustering // NIPS 16. Cambridge, 2003
- [40] Ham J, Lee D D, Mika S, et al. A kernel view of the dimensionality reduction of manifolds. Technical Report. Tübingen, 2003