

# 人工智能研究的物理学途径\*

郦全民<sup>1)</sup>

(上海东华大学科技哲学研究室 上海 200051)

**摘要** 近年来,人工智能研究的物理学途径已越来越受到人们的关注.这一途径的实现方式主要有两种:一是把已有的物理理论和方法直接用于研究计算系统,以达到对计算系统的性质和规律的认识;另一是依据某些计算系统与物理系统的相似性,把计算问题转换为对应的物理问题,再用物理方法建构有效的算法加以求解.文章着重介绍运用物理学途径研究计算系统的相变和解决多自主体系统的目标满足问题所取得的进展,并指出了这一途径的优点和应该注意的问题.

**关键词** 计算系统,相变,多自主体系统,目标满足

## THE PHYSICAL APPROACH TO ARTIFICIAL INTELLIGENCE

LI Quan Min

(Group of Philosophy of Science, Donghua University, Shanghai 200051, China)

**Abstract** The physical approach to artificial intelligence has attracted increasing attention in recent years. This approach is implemented in two ways: the first is by using physics directly as a framework for understanding the behavior of computational systems, the second is by using physics-oriented methods to construct effective algorithms for resolving computational problems according to the similarities between computational and physical problems. In this paper we describe and analyze the advantages of the application of the physical approach to phase transitions in computational systems and cooperative goal-satisfaction in multi-agent systems.

**Key words** computational systems, phase transitions, multi-agent systems, goal-satisfaction

### 1 引言

在人工智能领域,从20世纪80年代以来,鉴于以符号处理为特征的传统方法在实现基本目标上步履维艰,加之计算机技术的迅速发展和普及,结果出现了研究途径日趋多样化的局面.其中,运用物理学中业已成熟的理论和方法来解决人工智能所遇到的诸多问题颇为令人关注.这种结合的趋势,不仅为人工智能的研究提供了新途径,而且为物理学在当代信息科学和技术中的应用开辟了新方向.

自从1982年美国加州理工学院的物理学家Hopfield开创性地把统计物理学的思想用于人工神经网络的研究后,物理学方法在解决人工智能的优化问题、搜索问题和设计有效算法等方面已经取得了很大的成功.概括地说,目前在人工智能的研究中运用物理学途径主要通过以下两种方式来实现:一是对计算系统中所呈现的与物理系统相同或相似的现象用已有的物理理论和方法加以研究,以达到对

计算系统的性质和规律的认识和理解,如用物理学的相变理论分析搜索问题中出现的相变现象;二是依据计算系统与物理系统在结构和变化规律等方面的相似性,把计算问题转换为对应的物理问题,并用物理理论建立有效算法加以求解,再把解答反演到计算系统中,以获得所需的结果,如运用物理方法求解优化问题就是基于这样的思路.

本文主要介绍近年来物理学方法用于研究计算系统的相变和解决多自主体系统的目标满足问题所取得的进展,并希望通过这两个实例来说明物理学途径在人工智能研究中能够发挥积极有效的作用.

### 2 计算系统的相变

#### 2.1 计算系统的相变现象

相变是普遍存在于自然界中的一种突变现象.

\* 2000-06-26收到初稿,2000-09-05修回

1) E-mail: soccol @ dhu .edu .cn

对相变的实验和理论研究是现代物理学的重要内容之一.有趣的是,近 20 年来在人工智能和计算机科学领域,人们陆续发现一些计算系统在某些控制参数达到一定值时其整体行为会出现突然变化的现象,且与物理系统中所遇到的相变具有惊人的相似性.这一结果促使人工智能研究者开始从物理学中寻求解决问题的思想和方法,同时也引起了一些物理学家的兴趣.

迄今,已在人工智能的许多不同分支中证实了相变现象的存在<sup>[1]</sup>.例如,在搜索问题中,依赖于启发式剪枝的有效性,平均搜索成本会经历一个从多项式到指数增长的突变;在约束满足问题(如图着色)中,随着某个参数值的变化,问题实例会出现从低约束到超约束的突变.另外,在优化组合、联想记忆模型、自动规划和各种模式匹配和分类等问题中,也发现了类似的相变现象.鉴于不同计算问题的相变具有许多普遍的特征,并且这些相变与发生在物理系统渗流过程中的几何相变尤为相似,故不妨在此列举一个与几何相变类似的简单实例<sup>[2]</sup>,以说明计算系统的相变是如何呈现的.

考虑一个具有分层激活结构的突触模型,它可用包含节点的树结构表示.树的尺度由所能激活的突触数确定.所求解的问题是确定在森林里树的平均尺度,该尺度的数值表明节点之间因果相互作用的范围.为简单起见,假定激活从树根开始且只直接激活下层,而树的平均分枝率为  $z$ .这样,与根距离为  $d$  的平均节点数  $N(d)$  能够容易地计数.在这种情形下,一个节点与其后代之间的距离恰好就是它们之间的连线数或步数,故  $N(d)$  是从初始节点出发  $d$  步后其后代的平均数.

在树中,从根节点到任何节点的路径是唯一的,因为每个节点平均有  $N(1)$  个儿子,且它们各不相同.既然  $N(1)$  是从一个节点出发的连线数,它等于  $z$ ,所以  $N(d)$  为

$$N(d) = z^d. \quad (1)$$

利用(1)式,能够计算树的所有平均性质.例如,对趋于无限大( $d \rightarrow \infty$ )的树  $A$ ,它的平均节点数由下式给出:

$$A = \sum_{d=0}^{\infty} N(d) = \frac{1}{1-z} \quad (\text{当 } z < 1). \quad (2)$$

该值在达到  $z_c = 1$  时发散.这表明依赖于  $z$  的实际值,存在着两种性质不同的情形,在平均分枝率  $z_c = 1$  的临界值处具有明显的相变把它们分开:在第一种情形,  $z < z_c$ , 树的平均尺度是有限的,意味着

激活是局域的;在第二种情形,  $z > z_c$ , 树的平均尺度是无限的,意味着激活是全域的.对于一个实际的计算系统要考虑到有限尺度和统计涨落效应,不过,只要系统的尺度大于典型的关联长度,相变的奇异点同样能够观察到.

这个简单模型的一个应用实例是具有深度为  $d$  和有效的平均分枝率为  $z$  的树结构的启发式搜索求解问题.经过简单的计算可以求得平均的搜索成本(整体性质)与局部的启发式效率之间的关系,从中可以发现平均搜索成本在  $z_c = 1$  处具有一个从线性到指数增长的突变.这样,在相变点附近,启发式的局部效率的一个微小变化可以对大尺度搜索问题的整体性质产生重要影响.

## 2.2 计算机实验研究

我们知道,在物理学中,相变现象的研究是从实验和理论两个方面展开的.对计算系统相变的研究亦是如此.不过,与物理实验不同,计算问题的相变实验是在计算机上进行的.利用计算机强大的计算能力,可以确定相变点的位置,并分析在临界点附近参数值的变化和系统的整体行为.

迄今,对人工智能中的相变现象研究得较多较透的是 SAT 问题(即可满足性问题).SAT 问题是命题逻辑中的一个判定问题,它与人工智能中逻辑演绎和定理证明的许多方法相关,故对其的复杂性分析和算法设计一直是人工智能领域中关注的焦点之一.所以,这里主要就 SAT 问题的相变实验研究作些介绍.

SAT 问题可以简述如下.首先设  $Q = \{Q_1, Q_2, \dots, Q_N\}$  表示命题变量集.SAT 问题及算法通常是针对合取范式(简称 CNF)而展开的.所谓合取范式是指由单式( $Q_i$  或否定  $\neg Q_i$ )以析取(“或”运算  $\vee$ )连接成子式,而子式又以合取(“与”运算  $\wedge$ )连接成的合式公式.由于任何合式公式都可以转换成等价的合取范式,所以只探讨这类表达式不失一般性.另外需要定义的是真假赋值:关于  $Q$  的真假赋值是一个函数  $U: Q \rightarrow \{T, F\}$ ,若  $U(Q) = T$ ,则称在赋值  $U$  下取真值,若  $U(Q) = F$ ,则称在赋值  $U$  下取假值.这样,SAT 问题可以表述为:给定变量集  $Q$  以及  $Q$  上的 CNF 公式,是否存在赋值  $U$  使该公式取真值  $T$ ,即是否在赋值  $U$  下可满足?

为便于理解,我们不妨来看一个 SAT 问题的实例:假定甲乙丙三人打算共同组织一次晚会,甲希望邀请张三或者不邀请李四,乙希望邀请李四或者王五或者他俩一起参加,而丙则希望不邀请王五或者

不邀请张三或者他俩都不被邀请,问该如何安排才能满足甲乙丙三人的要求?如果用  $Q_1$  表示邀请张三,  $Q_2$  表示邀请李四,  $Q_3$  表示邀请王五,则根据命题逻辑的基本知识,该问题可用命题公式表示为

$$(Q_1 \vee \neg Q_2) \wedge (Q_2 \vee Q_3) \wedge (\neg Q_3 \vee \neg Q_1), \quad (3)$$

这里命题变量  $Q_1$ ,  $Q_2$  和  $Q_3$  可取值为真 ( $T$ ) 或假 ( $F$ ),非符号  $\neg$  表示若  $Q_1$  为真,则  $\neg Q_1$  为假 ( $Q_2$  和  $Q_3$  同样).可以看出,该命题公式恰好是一个合取范式:子式(如  $Q_1 \vee \neg Q_2$ )由单式(如  $Q_1$  和  $\neg Q_2$ )通过析取符号  $\vee$  连接而成,若要子式为真,则至少有一个单式为真;子式之间通过合取符合  $\wedge$  连接而成,只有当每个子式都为真时,整个合取范式的值才真(即公式被满足).这样,现在的问题是能否找到使(3)式为真的真假赋值.因为只有 3 个变量,而每个变量只可能取真假二值,故对该公式一共有  $2^3 = 8$  种可能的真假值指派(赋值)方式.逐个检验每一种指派,可以发现,当  $Q_1$  和  $Q_2$  取  $T$  且  $Q_3$  取  $F$  或者  $Q_1$  和  $Q_2$  取  $F$  且  $Q_3$  取  $T$  时,该公式的值为  $T$ ,表明它是可满足的.换句话说,甲乙丙三人可以邀请张三和李四,或者只单独邀请王五.

显然,用上例中逐个检点的算法来确定是否存在命题公式可满足的赋值一般并不实用,因为如果一个公式有  $N$  个变量,则可能的赋值方式将有  $2^N$  种,结果计算的任务将随指数而增长.这就涉及到计算复杂性问题.我们知道,算法可解的问题在实践上不一定可解,因为求解该问题的算法可能需要极长的运行时间和极大的存贮空间,以至根本不可能在任何现有的计算机上实现.在计算复杂性理论中,已经发现多项式时间算法[运行时间与多项式(如  $N^2$ )成比例]和指数时间算法[运行时间与指数(如  $2^N$ )成比例]之间的边界是一个分水岭.对于足够大的  $N$  值,所有指数时间算法都比所有多项式算法慢得多.由于这个原因,多项式时间算法被认为是有效和实用的,而指数时间算法则是无效的.这种评价算法有效性的方式同样可用于估计问题的难度.如果一个问题有多项式时间求解的算法,则称该问题属于  $P$  类;如果一个问题就目前所知没有多项式时间求解的算法,但如果能猜出答案,却可以有效地检验其准确性,则属于  $NP$  类. SAT 问题不仅属于  $NP$  类,而且还是第一个被证明的  $NP$  完全问题.所谓  $NP$  完全问题是  $NP$  类中关键的问题,其涵义是只要有一个  $NP$  完全问题存在多项式时间算法,则整个  $NP$  类问题都存在多项式时间算法,即只要能找到其中

任何一个的多项式时间算法,那么它对所有  $NP$  问题都适用.现已确认的  $NP$  完全问题有上千个,尚没有找到任一问题的多项式时间算法,但也未能给出否定的证明.不过,这种分类完全是基于最坏情况分析,即只要有一个问题实例需要指数解的时间,就从  $P$  类中排除出去.

然而,对 SAT 问题的实例研究表明,虽然最难的问题实例非常难解,但绝大多数却容易解决.如果随机地构筑成千上万个 SAT 问题实例,则除了其中很小的一部分外,简单的算法便能迅速有效地求解.显然,平均的情况也是重要的.正是基于这种考虑才导致对 SAT 问题的统计研究.结果表明, SAT 问题中难和易的实例并非是偶然的混合,当某个参数发生改变时,问题实例经历了从易突变到难又转向易的相变过程.

随机  $k$ -SAT 问题是 SAT 问题中的一个子类,它的实例中的子式都是随机独立产生的,并且每个子式都由  $k$  个互不相同的变量形成的单式所组成,如在上面的实例中  $k = 2$ .目前, SAT 问题的计算机实验研究主要是针对这一子类而展开的. Cheese man 等人<sup>[3]</sup>运用一个简单的回溯搜索算法求解随机  $k$ -SAT 问题实例,发现随着每个变量平均约束的增加,可解的概率在达到某个临界值后陡然下降,而在临界点附近解的成本却急剧上升,从而首先证实了  $k$ -SAT 问题中相变现象的存在. Mitchell 等人<sup>[4]</sup>的工作进一步讨论了这一现象,并且说明了困难的实例集中在相变点附近. Selman 等人<sup>[5]</sup>对  $k$ -SAT 问题的不同相及其计算成本的临界行为作了实验分析,发现在穿越相变区时平均计算成本遵循一个普遍的形式;他们还通过对计算成本分布的实验研究探讨了复杂性的来源.另外,我国学者卜东波等人<sup>[6]</sup>着重对 3-SAT 问题的相变现象作了实验研究,获得了类似的结果.

下面,我们以 3-SAT 问题为例来简要地说明相变的实验研究是如何进行的.一般的方法是先生成数千个随机的 CNF(即合取范式)公式,然后设计一个算法对它们进行处理,收集有多少个公式能满足和找到解需要花多少时间的信息.对 3-SAT 问题而言,产生随机的 CNF 公式的过程是这样的:从  $N$  个变量集中随机地选择 3 个不同的变量,以  $1/2$  的概率取其单式(肯定或否定)组成子式;重复这个过程  $M$  次,即可构成一个具有  $M$  个子式的 3-SAT 公式.分析表明,子式和变量之比  $M/N$  是描述 3-SAT 问题相变的关键参量.实验时通常取  $N$

为定值(如  $N = 50$ ),随机地选取变量并取不同的  $M$  值构筑数千个 CNF 公式,然后设计一个算法求解,把满足或不满足的实例分类,再把这些结果作为  $M/N$  的函数作图.例如,在下东波等人所做的实验中, $N = 50$ ,  $M = 1 - 600$ .从他们的结果可以看出,当  $M/N$  很小时,几乎所有的公式都能满足;当  $M/N$  很大时,几乎没有公式能满足;而在  $M/N = 4.3$  附近,可满足概率急剧地由 1 变为 0,相应地求解的计算成本急剧地上式.这表明,在  $M/N$  很小和很大时,问题都容易求解(满足和不满足),而难题集中在两者之间对应于求解成本曲线尖峰的区域.

### 2.3 基于相变理论的分析

与对计算系统中的相变现象作数值实验研究相对应,运用来自物理学中的相变理论研究各种计算相变问题的的工作也已经展开.

随着对 SAT 问题和图着色等各种约束满足问题进行实验研究的深入,已经发现在运用不同算法求解不同问题时,在计算成本方面普遍存在着从低到高再到低的模式.这就预示着需要对约束满足问题的深层结构作出分析,以定性解释实验观察中所出现的结果,并对诸如相变点的位置和可解的概率等方面作出定量的估计和预测.

Williams 等人<sup>[7]</sup>在这方面已经做了开创性的工作.他们撇开对算法的具体分析,而直接在搜索空间上建立一个抽象模型,并以此作为问题的深层结构;然后借助平均场理论的基本思想对其进行分析,获得了计算相变点的公式.例如,对于随机 3-SAT 问题,他们依据基本公式并考虑到修正因素,推算出在参数  $M/N = 4.5$  时将发生相变.可见,这与通过实验独立得到的结果十分接近.

另外, Kirkpatrick 等人<sup>[8]</sup>已经把统计力学中的标度理论用于研究 SAT 问题相变的临界行为.他们描述了在相变点附近的尺度依赖效应,并分析了相变点与计算复杂性之间的关系.同时,他们的工作也说明了如何对大而有限的搜索问题的相变行为进行处理.

显然,对计算相变的理论研究有助于揭示存在于许多不同问题和不同算法中的普遍规律,这样就能够对已知问题使用的算法类型的选择提供理论基础.不过,鉴于目前这方面的理论研究还不深入,加上计算系统与物理系统之间存在差异,如何更好地利用物理学中的相变理论来展开对计算相变的研究尚有待进一步探索.

## 3 多自主体系统与经典力学

### 3.1 MAS 问题

90 年代以来,随着计算机网络和通信等技术的发展,特别是互联网的迅速普及,对于自主体以及多自主体系统的研究已成为人工智能研究的一个热点.所谓自主体(Agent)是指物理世界中的移动机器人(广义地还包括人类)和信息世界中的软件机器人,它能在一定的环境中代表用户以主动服务的方式完成某些任务.多自主体系统(Multi-Agent System,即 MAS)是由一些自主体通过协作完成某些任务或达到某些目标的计算系统.

为了在多自主体和多目标(相应的多任务)的动态系统中达到目标满足, MAS 应该具有一种任务分配机制,这就要求在自主体之间进行协作和协调.然而,如果自主体的数目大幅度增长(几百个以上),那么它们之间进行协作的过程就会变成非常复杂和耗时,同时成百上千个自主体之间建立直接通信联系也变得无法实现或者费用太昂贵.因此,有必要寻求在不太增加复杂性的前提下能够实现有效的协作方法.正是基于这种考虑,人工智能研究者开始在物理学中探寻解决问题的途径<sup>[9]</sup>.他们发现,在运用经典力学处理多粒子系统的方法中,以模型化大尺度的 MAS 能够为自主体之间的任务满足建立体现协作的任务分配算法.这种算法在系统内由单个自主体所运用,并且能在没有谈判和只有有限通信的条件下达到协调.业已证明,尽管粒子系统和计算系统之间存在许多差异,但在大的 MAS 中,这种方法能够以低复杂性有效地协调任务分配和执行.

### 3.2 MAS 与多粒子系统的对应

运用经典力学的方法求解计算系统问题,关键是要在计算系统和多粒子系统之间建立合适的对应关系,把计算问题映射为相应的力学问题,然后用求解力学问题的方法建立有效的算法.

Shehory 等人<sup>[10]</sup>在对多自主体协作中每个自主体的感知和行为能力作了一些假定以后,提出了一个用粒子表示 MAS 中自主体和目标的力学模型,并建立了一种分布协作的目标满足机制.下面主要介绍他们所用的方法.

为确立 MAS 与多粒子系统之间的对应关系,须做的基本步骤包括:(1)在粒子及其性质与自主体及其能力、目标及其性质之间建立匹配;(2)确定为模型化自主体和目标的最合适的物态,以便能把描

述和预言处于该物态的粒子的性质和变化的数学公式用于自主体行为的算法设计。

匹配的具体过程如下:MAS中的实体用多粒子系统的粒子表示,其中动态粒子模拟自主体,静态粒子模拟目标,并以动态粒子和静态粒子的碰撞模拟目标满足;一个粒子*i*的质量  $m_i$ 、位移  $r_i$ 、动量  $p_i$ 、势  $V_i$  和动能  $k_i$  则分别模拟自主体和目标的有关性质,如动态粒子的质量(以及势)表示自主体满足目标的能力,静态粒子的质量表示其所模拟的目标的大小,而力学空间中粒子的位移则模拟计算空间中自主体的位移(可以是在抽象的意义上)。

在MAS中,一个自主体在行动时所处的势场由环境中的目标、障碍物和其他自主体决定。为了确定表示自主体环境的适当势场,需要检查物态的性质并选择合适的态。一种合适的物态必须是能使自主体达到有效的目标分配和满足。考虑到在各自主体之间应当存在协作和冲突,故选择物质的液态模型已被认为是恰当的。Shehory等人经过分析,发现用于描述非离子液体中粒子的Lennard-Jones势对于求解MAS中的许多问题是合适的。对于一个与粒子*j*的距离为  $r_{ij}$  的粒子*i*来说,该势为

$$V(r) = 4\epsilon\left(\frac{1}{r_{ij}^{12}} - \frac{1}{6r_{ij}^6}\right), \quad (4)$$

其中  $\epsilon$  是一个描述势依赖于质量的系数。

非离子液体的性质,尤其是势的短程性,使其适合于作为大尺度MAS的模型。在该模型中,由于势的大小依赖于粒子的质量,所以自主体满足目标的能力也可用粒子的势表示,这样势能越大的粒子模拟能满足更大或更困难目标或子目标的自主体。

### 3.3 求解问题的算法

为了获得求解自主体目标满足和任务分配的算法,需要知道物理系统中粒子所遵循的运动方程。对于经典粒子*i*,运动方程为

$$F_i = m_i \frac{d^2 r}{dt^2} = m_i a_i, \quad (5)$$

$$p_i = m_i \frac{dr}{dt} = m_i v_i. \quad (6)$$

一个粒子的运动依赖于其所处的势,这种依赖性由下式给出:

$$F_i = -m_i \nabla_{r_i} V(r). \quad (7)$$

在MAS中,为了引起系统朝目标满足方向演化,每个自主体要使用从邻近自主体、目标和以前状态中获得的信息。根据这些信息,自主体确定一个局部的势场并解运动方程。从运动方程中得到的结果

能使自主体决定趋向目标满足的下一步该如何执行。这样,借助于经典力学中已有的解法,就能够预言自主体的行为。

对单个自主体*i*而言,可以通过分成目标到达和目标满足两个步骤来建立算法。基本思路如下:(1)目标到达过程:首先确定有效范围内的自主体和目标以及它们离自主体*i*的距离;接着根据(4)式计算势并求和,由(7)式算出力  $F_i$ ,利用  $F_i$  和  $r_i(t-dt)$ ,  $p_i(t-dt)$  解运动方程(5)式和(6)式,并运动到一个对应于新解的新态;然后根据新位移接近目标的程度来决定是否到达目标还是重复上述过程。(2)目标满足过程:到达目标后,进入模拟目标的势阱,实现目标;如果模拟自主体的粒子的质量  $m_a$  小于模拟目标的粒子  $m_g$ ,那么从  $m_g$  中减去  $m_a$ ,否则  $m_g = 0$ ,在消耗资源的情况下,  $m_a$  以类似的方式减小;返回目标到达过程。

由此可见,解决多自主体目标满足问题算法中的计算是通过运用相应物理模型中的物理性质及状态来实现的,即先把自主体和目标的性质及状态转换为物理性质及状态并进行计算,再把计算结果解释为自主体和目标的性质及状态。

Shehory等人已经运用上述方法成功地解决了一些MAS的实际问题,并通过计算机模拟说明了运用这种方法的有效性和广阔的应用前景。例如,在解决货物运输问题时,他们就运用这种方法。每种货物用静态粒子模拟,每个搬运者用动态粒子模拟,而搬运者和货物之间的相互作用则由粒子之间的势函数来模拟:这样,在低成本计算且无需明确通信的情况下,就能获得货运任务分配的算法并接近最优。

## 4 几点启示

第一,从上述两个实例中,我们可以看到,物理学的理论和方法在解决人工智能的问题中可以发挥有效的作用,运用物理学途径于计算系统具有一些突出的优点,主要表现在:(1)人工智能中通常需要对其中所采用的算法或解,通过形式证明或模拟来检验其有效性,而如果运用基于物理学方法的模型,则能够利用对物理学已知的理论和实验的结果作为检验的依据;(2)物理学的模型可以在只考虑局域相互作用下而导出系统的全域行为,因而在许多场合可以降低计算的复杂性;(3)计算系统的整体性质可以运用统计力学的概念和方法加以分析,这使得人们能借助系统的部分性质来导出一个系统的整体性

质.

第二,物理学与人工智能之间的作用方式可以是双向的,即不仅物理学的理论和方法可以用于解决人工智能问题,而且人工智能的研究反过来也可以推动物理学的进一步发展.例如,对物理系统的相变研究受到物理定律和实验条件的限制,而在计算领域,却能够在任何变量之间施加任何强度的耦合,故对计算系统中的相变现象的研究很有可能导致相应的物理学领域取得新进展.

最后,物理系统与计算系统毕竟存在着不少差异,因此,当试图用物理学的方法解决计算问题时,很有必要对两类系统之间的差异和问题本身作认真研究,并在此基础上对所运用的物理学方法作出相

应的调整和改进.只有这样,才能取得真正有效的结果.

### 参 考 文 献

- [ 1 ] Hogg T *et al.* Artificial Intelligence, 1996, 81 :1
- [ 2 ] Huberman B A *et al.* Artificial Intelligence, 1987, 33 :155
- [ 3 ] Cheeseman P *et al.* Proc. IJCAI' 91, 1991 :331
- [ 4 ] Mitchell D *et al.* Proc. AAAI' 92, 1992 :459
- [ 5 ] Selman B *et al.* Artificial Intelligence, 1996, 81 :273
- [ 6 ] 卜东波等. 模式识别与人工智能, 1997, 10 :286 [ BU Dong-Bo *et al.* Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 1997, 10 :286 (in Chinese) ]
- [ 7 ] Williams C P *et al.* Artificial Intelligence, 1994, 70 :73
- [ 8 ] Kirpatrick S *et al.* Science, 1994, 264 :1297
- [ 9 ] Kraus S. Artificial Intelligence, 1997, 94 :79
- [ 10 ] Shehory O *et al.* Artificial Intelligence, 1999, 110 :1

## 正电子慢化体的研究和进展\*

郁伟中<sup>1)</sup> 袁佳平

(清华大学物理系 北京 100084)

**摘 要** 正电子湮没技术是一种研究材料的微观缺陷和相变的灵敏工具,在通常的正电子谱仪中,正电子能量为 MeV 量级,在样品中注入深度比较深( ~100 $\mu$ m ),主要研究材料体内的平均缺陷密度.慢正电子束方法把正电子的能量降低为 keV 量级(而且可以调节),注入比较浅( ~ $\mu$ m ),所以是研究表面缺陷的探测手段.正电子慢化体是产生慢正电子的关键设备,对其研究有重要意义.文章综述了慢化体研究的历史和现状,从物理概念出发介绍使正电子慢化的四种可能方法和当今慢化体的五种几何排列方式.其中应用最广泛的是钨慢化体和百叶窗式的排列方式,效率最高的是惰性气体固体慢化体,而加电场慢化体是有待开发的高效慢化体.

**关键词** 慢化体,慢正电子束

### THE GENERATION AND DEVELOPMENT OF THE MODERATORS FOR SLOW POSITRON BEAM

YU Wei Zhong YUAN Jia Ping

( Department of Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China )

**Abstract** The positron annihilation technique is a sensitive tool for studying microdefects and phase transitions in various materials. Usually the energy of positrons is on the order of MeV and the implantation depth about 100 microns, so the bulk average defect density can be studied. In a slow positron beam the positron energy is about keV and the implantation depth a few microns, so surface defects can be detected. Positron moderator is the key device for obtaining a slow positron beam. We review the history and development of the positron moderator, including four methods that convert fast positrons into slow monoenergetic positrons and five array types. The tungsten moderator is the most widely used one while the inert gas solid moderator is the most efficient. Field-enhanced

\* 国家自然科学基金(批准号:19775027)资助项目

1999 - 12 - 23 收到初稿, 2000 - 09 - 11 修回

1) E-mail: yuweizhong @ chinaren.com