
计算机体系结构设计原理的易经模型

林 闯

(清华大学计算机科学与技术系, 北京 100084)

摘 要 易经是中华民族宝贵文化遗产, 它包含上古时期人们对自然宇宙和人生社会的思想认识、哲学理念和辩证法, 代表了先民哲学地把握宇宙的思维成果。现代科学的许多重大发现和突破, 如二进制、原子结构、生物遗传 DNA 等学科理论, 都可以从八卦和六十四卦模型中发现与之对应的形态和哲学思维。计算机体系结构设计原理 (PPCAD) 应是易经这种形态和思维的一种自然现象和映射对象, 利用八卦和六十四卦哲学思维和策略, 提供 PPCAD 的思路和策略是本文的目标。本文依据 PPCAD 中的基本推演理念, 提炼出 4 对基本对立统一推演关系, 根据 4 对基本关系构造了新的易经八卦及六十四卦。同时, 结合体系结构设计中的层次模型方法, 指出了易经层次模型的特点及动态性。为了便于对 PPCAD 易经模型的理解, 我们选择了 10 个新卦的例子加以说明和表达, 同时也给出了一些 PPCAD 原则和策略的新观察。我们想指出, 我们的新易经模型方法不但可用于计算机体系结构的设计, 也可尝试用于其他复杂系统的设计原理。最后, 对全文进行了总结, 并对下一步的研究进行了展望。

关键词: 计算机体系结构; 设计原理; 易经; 易传; 模型

中图分类号: TP302.1

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(0) C160049

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI :

Philosophical Principles of Computer Architecture Design in the I Ching

LIN Chuang

(Department of Computer Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract The I Ching is one of the most precious cultural heritages of the Chinese nation. It contains ancient people's understanding, philosophy and dialectics of the universe and human society, which represents the philosophical thinking of ancestor about universe. Observing many significant scientific discoveries and breakthroughs such as the theory of binary discipline, atomic structure, DNA, etc., we can find the corresponding form and philosophy in the Eight Diagrams and Sixty-four Diagrams. Thus, Philosophical Principles of Computer Architecture Design (PPCAD) is a natural phenomenon and mapping object of both form and mind of the I Ching. Learning from the Eight Diagrams and Sixty-four Diagrams, we aim to provide ideas and strategies for PPCAD. According to basic concept of PPCAD, this paper refines 4 pairs of the fundamental unity of opposites of deduction and then constructs a new version of the I Ching, the Eight Diagrams and Sixty-four Diagrams. Meanwhile, combining the hierarchical model approach in PPCAD, this paper offers the feature and dynamic nature of hierarchical model for the I Ching. In order to facilitate the I Ching model for PPCAD, we selects 10 new examples of Chinese divinatory symbols to illustrate and express it, and we also share our new

observation on principles and strategies of PPCAD. Finally, this paper makes a conclusion and proposes the research plans for future works.

Key words computer architecture; philosophical principles of design; the I Ching; Yi-Zhuan; model.

1 引言

随着计算机软、硬技术的不断进步和发展, 尤其计算机网络、互联网+和云计算的出现和发展, 计算机体系结构设计成为了目前学术界和工业界的研究核心, 基本设计理念更是核心中的核心。

在初始的计算机体系结构的定义中主要关注指令集的设计, 在如今的计算机体系结构^[1~3]中人们的关注远远超越对指令集的关注。在广泛的意义上, 计算机体系结构是抽象层次的设计, 允许我们使用有效的制造技术来完成信息处理应用。

计算机体系结构设计原理(PPCAD)主要关注计算机系统^[4]的概念结构和功能行为(操作效率和模式)。在PPCAD中, 技术在以不可预测的速度发生着改变, 但层次模型及其设计方法核心理念却依然没有变化。这些理念可以帮助我们更好地管理系统的复杂性, 提高系统设计的效率。

《易经》一书包括《周易》本经^[5~7]和《易传》^[8]两部分。《周易》: 是西周(公元前1046年—前771年)初年作品。据司马迁-史记的记载“伏羲至纯厚, 作易八卦”。据传, 在殷商末年, 周文王写下了六十四卦的卦辞。周易原为算卦(卜筮)书, 但它包含上古时期, 人们对世界和社会的思想认识、朴实哲学理念和辩证法。讲的是理、象、数、占。“以立天之道, 曰阴与阳。立地之道, 曰柔与刚。立人之道, 曰仁与义。”

《易传》: 易经最古的注解和解说, 作于战国时期(公元前475年—公元前221年), 其学说本于孔子, 具体成于孔子后学之手。《易传》使《周易》完成了从占筮之学到哲学的过渡。注重语法(《象》传), 取决语意(《彖》传)和爻辞(言乎变)。占断与所象之间, 往往有哲理与逻辑上的联系, 反映作者的思路、理念和价值观。

《易传·系辞·上》说: “一阴一阳之谓道”。所谓阴阳, 是古代中国人发明的一对哲学概念, 大凡自然界或人类社会中一切相互对立的现象与事物, 都可以用阴阳来表示。它们互相依存、互相为用; 其运动是以彼此消长的形式进行的, 处于动态平衡状态的变化之中。

易经是中华民族宝贵文化遗产, 它包含上古时

期人们对自然宇宙和人生社会的思想认识、哲学理念和辩证法。现代科学的许多重大发现和突破, 如二进制、原子结构、生物遗传DNA等学科理论, 都可以从八卦和六十四卦模型变化中发现与之对应的形态和哲学思维。PPCAD应是易经这种形态和思维的一种自然现象和映射对象, 利用八卦和六十四卦哲学思路和策略, 提供PPCAD的原则和策略是本文的目标。

首先, 本文依据PPCAD推演中的基本理念, 提炼出了4对基本对立统一推演关系, 根据4对基本关系的构造了新的易经八卦及六十四卦。其次, 结合PPCAD中的层次模型方法, 指出了易经的层次模型的特点及动态性。随后, 为了便于对PPCAD易经模型的理解, 我们选择了10个新卦的例子加以说明和表达。最后, 对全文进行了总结, 并对下一步的研究进行了展望。

2 体系结构设计中的基本理念和对立统一关系

在初始的计算机体系结构的定义中主要关注指令集的设计, 在如今的计算机体系结构中人们的关注远远超越对指令集的关注。在广泛的意义上, 计算机体系结构是抽象层次的设计, 允许我们使用有效的制造技术来完成信息处理应用。

计算机体系结构设计主要关系计算机系统的概念结构和功能行为, 不同于数据流和控制的组织、逻辑设计和物理实现^[9]。

计算机体系结构设计的一个核心问题是提高计算机运行和服务的效率问题, 在这个问题上有效的设计理念包括:

(1) 发挥并行的优势

(a) 通过多处理器或多硬盘来增加服务计算机的吞吐量。

(b) 流水线操作: 将一条指令的执行分割成几个步骤, 交叠指令的执行以减少指令序列执行的总时间。

(2) 定位(Locality)原理

(a) 时间定位: 如果一个条目被涉及, 那么它将不久倾向再被涉及。

(b)空间定位：如果一个条目被涉及，那么它地址临近的条目将不久倾向被涉及。

• (3)聚焦常见情况

在做设计折中考虑时，优先考虑常见情况高于非常情况。

老子曰：“大道至简”，计算机体系结构的基础思想理念并没有发生根本性变化，事物发展螺旋式上升，表现出更高级的表达形式。即，“道,可道,非常道;名,可名,非常名。”^[10]

推动计算机体系结构发展进程（螺旋式上升）的 4 个方面所对应的 4 对基本对立统一的推演关系为：

- (1) 空间：集中—分散
- (2) 时间：串行—并行
- (3) 服务：供给—需求
- (4) 结构：刚性—柔性

在计算机体系结构中，基本关系都有具体的表达和含义。具体地，这4种基本对立统一关系及其模型含义如表1中所示。

3 基本对立统一关系的八卦及六十四

卦模型

在第2节中介绍了PPCAD中所抽象的最基本对立统一关系，它们以不同的方式、从不同的角度刻画PPCAD中的多个设计目标及其推演，在本节中将给出4对关系所对应的八卦模型，以及由八卦组合成的六十四卦。

八卦是对宇宙万物相反属性事物推演变化的模型思考，计算机体系结构模型应是这种思考的一种自然现象的模型和映射，利用八卦哲学思路和策略，可以提供计算机体系结构设计的原则和策略。

《系辞上传》曰“生生之谓易，成象之谓乾，效法之谓坤，极数知来之谓占，通变之谓事，阴阳不测之谓神。”“通变和不测”可以对计算机体系结构理解和发展起到指导作用。

3.1 PPCAD基本理念的新八卦和六十四卦

如何给出新八卦模型？PPCAD 的 4 对基本对立统一关系与易经八卦的 4 对基本对立统一关系的一一映射是关键。老子曰：“道法自然”^[10]，按自然法则进行映射。

易传曰“乾知大始，坤作成物。”集中是计算机结构的开始，分散是计算机结构的发展。集中和分散是计算机部件连接形状和位置分布的表达。

《系辞上传》曰“刚柔相摩，八卦相荡。”山为刚，泽为柔，刚柔是系统体系结构性质的主要表达。

表1 4对基本对立统一关系的模型含义

空间	节点、部件的拓扑关系和位置分布	
	集中	常见形状包括：一体、总线、集成等
	分散	常见形状包括：P2P、网状、树状等
时间	操作、行为的执行时序	
	串行	按序执行
	并行	并行执行
服务	系统服务质量的关键要素	
	供给	硬件、软件、策略、操作等
	需求	用户、应用、环境、发展要求等
结构	体系结构及其模块和层次的性质	
	刚性	标准、协议、平台、界面等刚健、孤独之物
	柔性	环境、应用、软件、数据等可变、双两之物

从根本设计理念来看，分布、并行大规模计算机系统，如数据中心和计算机网络都可透视或抽象看作一个计算机^[11]。多个节点和部件地理位置可分散，计算、I/O 与存储可分离，它们可由网络连接，它们的操作模式可并行化执行。系统的组成不论硬、软件都可以看作服务部件^[12]，他们的发展变化的结构性质都可以用刚柔特性来表达。

因此，从PPCAD来看，主要涉及如下4个方面：

- (1) 空间：表示节点、部件的拓扑关系和位置分布。
- (2) 时间：表示系统操作、行为的执行时序。
- (3) 服务：表示系统服务的供给与需求的关键要素。
- (4) 结构：表示体系结构及其模块和层次的刚柔性质。

水在河流中顺序流动，火的燃烧并发而行，且有多个火头。水与火的行进与计算机的串行与并行操作相类似。

雷为实，风为虚。供给与需求的性质同雷与风的性质雷同。

按照易传“天地定位，山泽通气，水火相逮，雷风不相悖。”的关系属性，我们有如表 2 的对应表达。

表2 对应关系表达的比较

原有对应关系	新对应关系	表达
天(君)一地(藏)	集中一分散(集-散)	定位
山(止)一泽(说)	刚性一柔性(刚-柔)	通气
火(离)一水(入)	并行一串行(并-串)	相逮
雷(动)一风(散)	供给一需求(供-需)	不相悖



图 1 PPCAD 基本理念的八卦图

确定了 PPCAD 的 4 对基本对立统一关系及他们与原易经中 4 对基本对立统一关系的对应表达，我们就可得到 PPCAD 的新八卦模型，如图 1 所示。进而可得到 PPCAD 的新六十四卦模型，如图 2 所示。在六十四卦中，每一个别卦由两个经卦组成。它的上经卦叫上卦，或者叫外卦。它的下经卦叫下卦，或者叫内卦。卦义以主题（发展方向）经卦为主，副题经卦为辅。

3.2 新易经的解语

我们在 PPCAD 的新八卦中做了如下映射：集-乾、散-坤、供-震、需-巽、刚-艮、柔-兑，如同易经已有下列映射一样：天-乾、地-坤、雷-震、风-巽、山-艮、泽-兑。本经和易传中一切解语没有变，变化的是经卦的名和对应的计算机系统的物理概

上卦 \ 下卦	集 (乾、天)	柔 (兑、泽)	并 (离、火)	供 (震、雷)	需 (巽、风)	串 (坎、水)	刚 (艮、山)	散 (坤、地)
集 (乾、天)	乾卦 第一卦	天卦 第四十三卦	大有卦 第十四卦	大壮卦 第三十四卦	小畜卦 第九卦	需卦 第五卦	大畜卦 第二十六卦	泰卦 第十一卦
柔 (兑、泽)	履卦 第十卦	兑卦 第五十八卦	睽卦 第三十八卦	归妹卦 第五十四卦	中孚卦 第六十一卦	节卦 第六十卦	损卦 第四十一卦	临卦 第十九卦
并 (离、火)	同人卦 第十三卦	革卦 第四十九卦	离卦 第三十卦	丰卦 第五十五卦	家人卦 第三十七卦	既济卦 第六十三卦	贲卦 第二十二卦	明夷卦 第三十六卦
供 (震、雷)	无妄卦 第二十五卦	随卦 第十七卦	噬嗑卦 第二十卦	震卦 第五十一卦	益卦 第四十二卦	屯卦 第三卦	颐卦 第二十七卦	复卦 第二十四卦
需 (巽、风)	姤卦 第四十四卦	大过卦 第二十八卦	鼎卦 第五十卦	恒卦 第三十二卦	巽卦 第五十七卦	井卦 第四十八卦	蛊卦 第十八卦	升卦 第四十六卦
串 (坎、水)	讼卦 第六卦	困卦 第四十七卦	未济卦 第六十四卦	解卦 第四十卦	涣卦 第五十九卦	坎卦 第二十九卦	蒙卦 第四卦	师卦 第七卦
刚 (艮、山)	遁卦 第三十三卦	咸卦 第三十一卦	旅卦 第五十六卦	小过卦 第六十二卦	渐卦 第五十三卦	蹇卦 第三十九卦	艮卦 第五十二卦	谦卦 第十五卦
散 (坤、地)	否卦 第十二卦	萃卦 第四十五卦	晋卦 第三十五卦	豫卦 第十六卦	观卦 第二十卦	比卦 第八卦	剥卦 第二十三卦	坤卦 第二卦

图 2 计算机体系结构新六十四卦

念。我们的目标是应用易经来模型 PPCAD，并抽象出新的设计原则和思路。

“三十六计^[13]”是易经应用的经典例证，三十六计中的多数解语，是选用易经的思维认识和哲学理念作为依据，即以“易”演兵。

三十六计用易经的阴阳变理，推演战争中的基本对立统一关系的相互转化，使每一计都含有朴实的军事辩证法的色彩。

三十六计分为 6 套计，即，将敌我力量对比强弱和程度分成 6 种情景。每套计中，按基本对立统一关系各给出 1 计。

我们 PPCAD 八卦模型的思路与三十六计有一些相同，也所不同。我们有完整的八卦和六十四卦模型，每一卦都有它的思维认识和哲学理念作为 PPCAD 中理念抽象的依据，以“易”演“算”。

我们的基本对立统一关系可以交叠在一起，如同经卦交叠成别卦一样，可阐述我们多目标多关系的设计理念。

如何读懂易经新的影射，并抽象出我们的设计理念？对易经卦的理解和表达方法可有取义说、取象说、爻位说。

学习三十六计的思路，做到“数中有术，术中有数。”“解语重数不重理。盖理，术语自明；而数则在言外。”

我们注重卦象-哲理-理念的抽象过程，通过对应的卦象观察，经过卦中所阐述的主要思维认识和哲学理念，最后可以抽象得到相应模型的 PPCAD 基本理念表达。

3.3 易经的层次模型

为了表达计算机体系结构的重要层次设计理念，易经模型也要有层次模型的表达。易经本质就是层次模型，我们从两个层面来论述卦的层次关系。

首先，描述易经卦的层次模型：

- (1) 六十四卦的每一卦是由八卦的两个经卦相叠而形成，每个经卦有其独立卦形和卦意。因此，卦象有上下两层，也可说有内外之分。
- (2) 六十四卦的每一卦中有六爻，爻层在经卦层次之间可以跨越。如在第 21 噬嗑卦中：“柔得中而上行”。

现在，描述易经六爻的层次模型：

- (1) 六爻层从下往上数，反映占筮预测未知的特质，表示物体由下而上的位置，或事物渐进、发展的先后与过程。同计算机结构层次过程

的表达方法一样。

- (3) 可明显表达天、地、人之位的三维空间，即初、二为地位，三、四为人位，五、上为天位，既所谓“三才”。《易传》曰“六爻之动，三极之道也”。
- (4) 易经中可有两类爻层。阳爻层代表刚健、粗大、动荡、孤独之物，阴爻层代表柔顺、细小、静止、双两之物。

从对易经层次模型的描述中，我们可以知道易经有如下特点：


- (1) 易经层次模型的变化性：《系辞下传》曰“八卦成列，象在其中矣。因而重之，爻在其中矣。刚柔相推，变在其中矣。”
- (2) 易经模型和推演中的自然可以形成抽象与虚拟概念：六爻的层次由底向上逐层抽象。大多数情况下，五位最尊，阳爻更甚，有谓“九五之尊”。另外，在易经卦的推演中，可以充分表达抽象与虚拟层次模型语意，见下面举例。

从上述论述中，我们可以得出，易经层次模型语意丰富，并超越现有计算机体系结构层次模型语意，尤其是层次相互作用，对将来层次模型设计应有新指引。易经的层次模型是我们迄今所知的最早层次模型，是最富动态变化的层次模型。


4 设计理念与对应卦的举例

为了便于对PPCAD易经模型的理解，也为了说明新易经模型对PPCAD的指导作用，我们选择了10个例子，给出了作者初步的抽象和理解，希望对读者有所帮助，当然读者也可以有自己不同的抽象和理解。

每个例子对应一卦，也对应一个PPCAD理念。10个PPCAD理念涵盖了很多当前PPCAD的基本原则和新发展及新思路，其余新易经卦的理解和PPCAD理念的提出是我们未来的工作。在例子中，我们注重了卦象-哲理-理念的抽象过程，通过对应的卦象观察，经过卦中所阐述的主要思维认识和哲学理念，最后可以抽象得到相应PPCAD理念的表达。


 **例 1 串行供给—动而免险—可计算性**
第 40 卦: 解卦, 卦象: 串行在下供给在上, 串行是阴卦, 供给是阳卦, 为异卦相叠。

本卦描述了一种哲学计算模型, 基本思路是可将一个问题的计算分拆为一系列操作, 按串行序列做。《象》曰: “动而免乎险, 解”是说, 如果能够做下去, 就有解。否则, 就危险, 无解。《象》曰: “解之时大矣哉!”, 可计算性的意义重大, 是计算机重要基础理论模型。1936 年的图灵机^[14](Turing Machine)提出也是基于同样的哲学思想, 随后图灵又提出了图灵机的形式化模型。


 **例 2 集中叠加—集中有散—超算**
第 1 卦: 乾卦, 卦象: 集上集下, 是集中叠加, 集中是阳卦, 为阳卦相叠。

36 计的第 1 计曰: “阴在阳之内, 不在阳之对。太阳, 太阴。”集中之中必有分散连接, 集中与分散可以相互转化; 强化集中, 也要强化分散连接。反之亦然。

集中再集中是超级计算机的思路, 例如: 从超级计算机^[15]、Data Center^[16]到云计算^{[17][18]}等。超算会遇到各种挑战和障碍“墙”, 集中有散是解决之道。《象》曰: “天德, 不可为首也。”集散互换, 没有先后, 没有首领, 集散联合起来可获得更大成功。


 **例 3 需下刚上一柔止于刚—虚拟**
第 18 卦: 蛊卦, 卦象: 需下刚上, 下卦需求为柔, 为阴卦, 上卦刚性, 为阳卦, 阳阴相叠。

柔性可表达为系统的多个不同(或相同)需求的部件, 《象》曰: “巽而止, 蛊。”, 统一在规定的刚性界面下服务。将物理部件可以看作逻辑部件, 部件柔顺而静止。如 36 计的第 21 计所说界面“存其形, 完其势”, 相应于体系结构设计中的虚拟设计策略^[19, 20]。

 **例 4 集中柔性—刚决柔—抽象**
第 43 卦: 夬卦, 卦象: 集中在下, 柔性在上, 柔乘五刚之象。


《象》曰: “夬, 决也, 刚决柔也。”
将柔性多样性, 统一抽象为刚性的一致标准或界面, 如 36 计的第 5 计所说: “就势取利,

刚决柔也”。《象》曰: “健而说, 决而和。”, 抽象的结果系统稳健而和谐。


 **例 5 刚下柔上一刚柔感应—可控制**
第 31 卦: 咸卦, 卦象: 刚性在下, 柔性在上, 阴阳相叠。

本卦所描述的系统, 内部有统一的平台界面或标准为刚, 外部为应用环境或控制程序为柔。《象》曰: “咸, 感也。柔上而刚下, 二气感应以相与。”内外相互感应感知, 紧密结合, 表现为系统设计的可控制性。

以 SDN 网络^[21]为例, 软件定义的控制程序为柔, OpenFlow^[22]标准界面为刚。但 SDN 在控制程序与 OpenFlow 界面互相感应的可控性和系统的可部署性及性能等方面需要进一步的发展。


 **例 6 分散并行—空间换时间—并行效率**
第 35 卦: 晋卦, 卦象: 分散在下, 并行上。阴柔之爻由初位上升至六五爻位, 柔进而上行。

《象》曰: “晋, 进也。明出地上, 顺而丽乎大明。”分散基础之上进行并行操作, 操作执行上等于空间换时间, 充分发挥并行操作的优势, 提高执行效率, 顺而亮丽, 进展可蒸蒸日上。

 **例 7 并下柔上一顺天应人—顺应变革**
第 49 卦: 革卦, 卦象: 并行在下, 柔性在上。并卦主爻是阴爻, 柔卦又是阴卦, 其志不相得。

并行操作与柔性要求会有冲突, 需要变革。《象》曰: “顺乎天而应乎人”, 体系架构设计要顺应变革, 要顺应时代和人们的柔性要求, 变革的意义才能重大。

变革式体系结构设计思路, 又称为“clean-slate”^[23], 其出发点是突破现有限制, 放弃现有的体系结构, 重新设计新一代体系结构, 从根本上解决现有体系结构存在的问题。例如, OpenFlow^[24]、NDN^[25]等网络都是基于这一思路进行的设计。

 **例 8 供给并行—柔得中上行—可管理**
第 21 卦: 噬嗑卦, 卦象: 供给在下, 并行在上。六二居下供给中间, 向上运动成为六五。

《象》曰：“刚柔分，动而明，雷电合而章，柔得中而上行，虽不当位，利用狱也。”供给的刚性要求和并行中的柔性操作本来是分开的，但在系统执行中，供给中的不确定性可以上升为并行中的柔性操作，执行中反馈。供给与并行合起来，得到章法，有利于系统的管理。

例 9 柔性集中—以柔克刚—可演进



第 10 卦：履卦，卦象：柔性在下，集中在上，阴爻的柔踩在阳爻的刚上。

《象》曰：“履，柔履刚也。”柔性在下，从循环关系和规律上说，下柔必冲破上刚，于是出现“柔克刚”之象，柔性变化改变了刚性的规定，即，系统演进的进程。

演进式设计思路，又称为“dirty-slate”^{[26][27]}。其思路是针对现有体系结构存在的不足进行增量式的修补。如解决网络地址问题的 CIDR 协议，解决传输服务质量问题的 CDN 体系结构^[28]等。体系结构的发展会不断地寻求新的平衡点，而任何对技术形态的一种最终预测都是不准确也不必要的。

例 10 需下并上一柔进应刚—可扩展



第 50 卦：鼎卦，卦象：需求在下，并行在上。本卦初爻为阴为柔，可升到六五爻，地位上升。

《象》曰：“柔进而上行；得中而应乎刚。”需并扩展是风火燎原之象，而柔进得中应刚，是说需求的柔性要求不断改进，适用刚性的规定。上九《象》曰：“刚柔节也。”刚柔得到调节，进而达到系统可扩展^[29]。

5 总结与展望

计算机体系结构是计算机科学技术、网络和应用的发展核心，在计算机发展中 PPCAD 起引领作用。到目前为止，PPCAD 虽有一些原则和思想的突破，但亟待需要一个完整有效的设计理念体系和模型。作者认为，易经作为中华民族宝贵文化遗产，代表了先民哲学地把握宇宙的思维成果。PPCAD 可以从易经六十四卦模型变化中发现与之对应的形态和哲学思维，可以提供一个完整有效的 PPCAD 体系和模型。通过我们的初步工作，我们相信读者可以看出一个端倪。通过 PPCAD 与对应卦的举例，可以看到一些 PPCAD 原则和策略的新观察。也可

以看到，易经层次模型语意丰富，尤其是层次相互作用，对将来层次模型设计应有新指引。

本文的研究成果仅是易经在 PPCAD 中应用的初步，以“易”演“算”及对新易经和每一卦的理解和 PPCAD 新理念的提出是我们下一步工作的方向。在六十四卦中，我们认为各卦并不是截然分开，而是相互包含，相互交错，是一个整体。研究各卦之间的相互关系，并抽象出相应的 PPCAD 有效原则，是亟待解决的研究难点之一。

此外，计算机体系结构的设计和分析是一个研究的两个方面。根据新易经模型的 4 个基本对立统一关系，计算机体系结构的分析应有 4 维性能参数与之对应。**如何在多目标评价与优化中根据不同目标之间的关系，建立全面系统的多目标评价与优化理论，设计普适性的数学模型和方法**，是亟待解决的研究难点，也是计算机学科中评价与优化理论的一个发展方向^[30]。

参考文献

- [1] Patterson D A, Hennessy J L. Computer Organization and Design: the Hardware/Software Interface[M]. Newnes, 2013.
- [2] 杨鹏, 吴家皋. 基于交互、面向服务的新一代网络体系结构模型研究[J]. 电子学报, 2005, 33(5): 804-809.
- [3] Shiva S G. Computer Organization, Design, and Architecture[M]. CRC Press, 2013.
- [4] 顾明, 赵曦滨, 郭陟, 等. 现代操作系统的思考[J]. 电子学报, 2002, 12.
- [5] 中华传世名著经典文库. 周易[M]. 新疆: 新疆人民出版社, 2003.
- [6] 高亨. 周易大传今注[M]. 北京: 清华大学出版社, 2010 年.
- [7] 黄懷信. 周易本经汇校新解[M]. 北京: 清华大学出版社, 2014 年.
- [8] 《易传》[Z]. <http://baike.sogou.com/v542272.htm>.
- [9] Amdahl G M, Blaauw G A, Brooks Jr F P. Architecture of the IBM System/360[J]. IBM Journal of Research and Development, 1964, 8(2): 87-101.
- [10] 中华传世名著经典文库. 老子《道德经》[M]. 新疆: 新疆人民出版社, 2003.
- [11] Luiz Andre Barroso, Jimmy Clidaras, Urs Holzle. The Datacenter as a Computer: An Introduction to the Design of Warehouse-Scale Machine[M]. Morgan Claypool Publishers, 2013.

- [12] Zhang L J, Zhang J, Cai H. Services Computing[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2007.
- [13] 中华传世名著经典文库. 三十六计[M]. 新疆: 新疆人民出版社, 2003.
- [14] Turing A M. On computable numbers, with an application to the entscheidungsproblem[J]. J. of Math, 1938, 58: 345-363.
- [15] Hoffman A R, Traub J F. Supercomputers: directions in technology and applications[M]. National Academies, 1989.
- [16] Yan W, Lin C, Pang S. The Optimized Reinforcement Learning Approach to Run-Time Scheduling in Data Center[A]. Grid and Cooperative Computing (GCC), 2010 9th International Conference on[C]. IEEE, 2010. 46-51.
- [17] Armbrust M, Fox A, Griffith R, et al. A view of cloud computing[J]. Communications of the ACM, 2010, 53(4): 50-58.
- [18] 陈康, 郑伟民. 云计算: 系统实例与研究现状[J]. 软件学报, 2009, 20(5): 1337-1348
- [19] Xiangzhen Kong, Chuang Lin, Yixin Jiang, Wei Yan, Xiaowen Chu. Efficient dynamic task scheduling in virtual data centers with fuzzy prediction[J]. Journal of Network and Computer Applications (JNCA), 2011, 34(4): 1068-1077.
- [20] Wei B, Lin C, Kong X. Dependability modeling and analysis for the virtual data center of cloud computing[A]. High Performance Computing and Communications (HPCC), 2011 IEEE 13th International Conference on[C]. IEEE, 2011. 784-789.
- [21] McKeown N. Software-defined networking[J]. INFOCOM keynote talk, 2009, 17(2): 30-32.
- [22] Openflow[Z]. <http://www.openflow.org/>
- [23] A. Feldmann. Internet clean-slate design: what and why?[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2007, 37(3): 59-64.
- [24] McKeown N, Anderson T, Balakrishnan H, et al. OpenFlow: enabling innovation in campus networks[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2008, 38(2): 69-74.
- [25] Zhang L, Afanasyev A, Burke J, et al. Named data networking[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2014, 44(3): 66-73.
- [26] C Dovrolis, J T Streelman. Evolvable network architectures: What can we learn from biology?[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2010, 40(2): 72-77.
- [27] C Dovrolis. What would Darwin Think about Clean-Slate Architectures?[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2008, 38(1): 29-34.
- [28] Buyya, Rajkumar, Mukaddim Pathan, and Athena Vakali, eds. Content Delivery Networks[M]. Springer Science & Business Media, 2008.
- [29] Xiao J, Wu B, Jiang X, et al. Scalable data center network architecture with distributed placement of optical switches and racks[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2014, 6(3): 270-281.
- [30] 林闯, 万剑雄, 向旭东, 等. 计算机系统与计算机网络中的动态优化: 模型, 求解与应用[J]. 计算机学报, 2012, 35(7): 1339-1357.

作者简介



林 闯, 男, 1948 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究领域为计算机网络、系统性能评价、随机 Petri 网和易经模型。

E-mail: chlin@tsinghua.edu.cn.