

计算机体系结构的层次设计:来自易经模型的视角

林 闯^{1,2}

(1. 深圳大学计算机与软件学院, 广东深圳 518060; 2. 清华大学计算机科学与技术系, 北京 100084)

摘 要: 易经是中华民族的宝贵文化遗产,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,代表了先民哲学地认识宇宙模型的思维成果.从易经模型方法来观察计算机体系结构层次设计,对层阴阳性质的分类可以带来层次设计的深化,可以认识层次设计的本质,为层次设计带来模型体系和学说理念.我们建立了层次对立统一和刚柔相应学说,给出了体系结构层次设计的模型和评价,并且可以促进层次部件之间的协调发展.本文论述了经卦分层连接关系和六爻的层次模型与理念学说,拓展了易经层次模型的发展演化,透过 SDN 网络层次模型和云计算层次模型的例子阐明了层次设计的模型方法和演化推理.最后,进行了总结,并对下一步的研究进行了简单展望.

关键词: 计算机体系结构; 层次设计; 易经; 六爻层次; 模型

中图分类号: TP302.1

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2017)11-2569-06

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

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2017.11.001

Hierarchy Design in Computer Architecture: from the Perspective of the I Ching

LIN Chuang^{1,2}

(1. College of Computer Science & Software Engineering, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China;

2. Department of Computer Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

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. We study the hierarchy design in computer architecture from the perspective of the I Ching and classify layers of the hierarchical architecture into yin and yang property, which helps us better understand the essence of hierarchy design and brings design models and theories. In order to give evaluations of the hierarchical model for architecture design, we establish a theory of hierarchical unity of opposites and combination of hardness with softness, which can promote the coordinated development between hierarchical components. By discussing the hierarchical connection relationship of trigrams and the hierarchical model of Six Yao, this paper expands the development and evolution of the I Ching hierarchical model. It also clarifies the approach and reasoning of hierarchical model design by the examples of SDN hierarchical model and cloud computing hierarchical model. Finally, this paper makes a conclusion and proposes the research plans for future works.

Key words: computer architecture; hierarchy design; I Ching; hierarchy of Six Yao; model

1 引言

易经是中华民族的宝贵文化遗产,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,都可以从易经六十四

卦层次模型中发现与之对应的形态和哲学思维.计算机体系结构层次设计应是易经这种形态和思维的一种自然现象和映射对象,利用易经六十四卦层次模型的思维和学说,可以深化层次模型设计,认识其设计的本质,建立层次模型体系.

计算机体系结构描述了计算机系统的整体设计和结

构,整体设计就是不同级别的抽象,隐藏不必要的实现细节.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系统构造技术来完成信息处理应用的设计.结构设计的核心之一就是它的层次设计,并通过一些标识方法来标识系统组件之间的连接和交互.层次设计可以减少设计的复杂性,提高设计和系统的效率,并能使每个层次可以单独有效的设计和发展.

计算机体系结构层次设计已有了很多研究成果,Dijkstra 开创性地将层次模型应用在计算机操作系统的设计中,他将操作系统分为六层.在此层次模型中,上层的设计仅仅依赖于相邻的下层,这样的设计思路可以循序渐进地完成系统的构建与测试,从而简化整个系统的设计过程^[1].国际标准组织 OSI 网络七层协议模型则是将层次模型运用于网络系统互联的设计中.这种层次设计的思想简化了问题的复杂性,并且使得每层可以独立演化,保证整个系统的可演进性^[2].SOA 层次模型^[3]是一种用于创建应用程序的软件架构,这种架构将一些松耦合的、黑盒式的组件进行组合,发布为明确定义的服务,继而实现业务流程或服务.当前 SDN 网络模型将控制层与数据层解耦,使得控制层具有全局的网络视图,增加网络的灵活性与可编程特性,简化网络的管理,并且控制层与数据层可以独立演化以适应网络环境的变化^[4].云计算是一种计算服务的层次模型,它将计算服务分为多个层次,引入虚拟管理机制,提升计算资源的效率,简化资源管理的复杂性^[5].层次模型设计的机制也在不断发展,如组件设计^[6-8]、覆盖网(overlay)^[9]、跨层设计(cross-layer)^[10]等.这些系统模型的发展和进步为计算机体系结构设计带来勃勃生机.但还存在一些普遍性的问题,缺乏层次设计模型体系和全面的层次设计指导学说,这方面的研究和探讨很少见.

易经是由六爻符号组成的哲学推理系统,了解其中六爻层组成规则、经卦间关系,掌握它的推理思维学说,就能更好地解“易”,从而沟通易经六爻层次模型与计算机体系结构设计原理之间的联系.本文重点描述了易经层次模块阴与阳的性质和对应的理念学说,论述了经卦分层连接关系和六爻的层次模型与理念学说,拓展了易经层次模型的发展变化,透过 SDN 网络层次模型和云计算层次模型例子阐明了易经层次模型方法和推理.

2 层次设计的理念

本节从三个方面论述层次设计理念:首先回顾计算机体系结构设计的相关概念和机制;接着从层次的阴阳特性本质出发,来探索易经层次模型所对应的理念学说;最后分成粗细两个层面来观察易经层次,粗为两个经卦

相叠二层模型,细为六爻相叠层次模型,并从层次结构语法上阐述了易经层次模型及相应设计理念学说.

2.1 体系结构设计中的层次模型

在计算机体系结构中,技术在以不可预测的速度发生着改变,但层次模型^[11]及其设计方法的理念却依然少有变化.这些层次模型的概念和机制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.目前层次模型包括如下概念和机制:

(1)模块:将系统部件分组为相互作用的子系统,建立模块之间的边界,简化模块之间的相互作用,使模块具有相对的独立性,可减轻系统的复杂性.

(2)抽象:建立良好的界面,隐藏界面背后部件实现的细节和信息.减少模块之间的相互作用,简化界面背后部件的调用.抽象可辅助挖掘个体部件的一致特性和相互关系,将这类部件特性作为整体表现在界面中.

(3)虚拟:对系统和部件的物理观察转化为逻辑观察的映射过程,相当于有一个可视界面层,部件在这层中实现.它包含映射和隔离 2 种机制:映射将物理部件映射为逻辑部件并提供对逻辑部件调用的接口和简化界面,且存在一对多、多对一等多种映射关系;隔离使得每个逻辑部件能够独立运行和管理.

(4)层次:组织模块进入层次结构,每一个节点标示一组模块,模块仅能沿着层次链接相互作用.

(5)层:模块、虚拟和抽象所使用的组织技术,对现存系统生成不同的观察方法.

计算机系统的结构层次可以观察为几个层的抽象,层次的多少可由层次的划分、抽象和虚拟的粒度以及循环发展来看待,每个层的抽象应提供灵活、可演进的接口和界面,并且为相邻层提供有效的功能实现.

2.2 易经层次模块阴与阳的性质和对应的理念学说

易经可以看作是一套六十四卦和爻象组成的层次结构系统,它的哲学理念和描述内容均寓于“象数”层次结构中.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.阳代表刚健、粗大、动荡、孤独,阴代表柔顺、细小、静止、双多.从层所包含的模块数量、层模型所描述系统部件的实施特性与设计理念两个方面来看,计算机层次设计中也存在着性质相反的层:包含多个模块和仅包含一个模块的层;随着软件和环境可柔性改变的层,由协议、标准和规则刚性定义的,不可随时随地改变的层;描述供给设计的层,描述需求设计的层.

传统的计算机层次设计仅是模块和层次的堆砌和连接,易经层次模型可以给理解计算机层次设计的内涵带来启发.对层阴阳性质的分类可以带来层次模型

设计的深化,认识设计的本质,促进系统设计部件之间的协调发展;通过对立统一和刚柔相应学说,给出体系结构层次设计的模型评价。

卦的评价结论一般在占断辞中体现,主要包括亨和贞两个方面:“亨”即通顺、受用,表达发展态势;“贞”即占断问事,表达占断当前态势。在层次模型的总体评价中,每一卦都同时包含“吉”、“凶”两面,也包含两面发展变化的对立统一。八卦中可分为阳卦和阴卦,阳卦爻画为奇数,阴卦爻画为偶数。关于计算机体系结构设计理念的八卦及六十四卦对应的模型,可见我们论文^[13]。我们考虑八卦的异性相叠或同性相叠层次模型的评价。八卦的异性相叠或同性相叠可以反映经卦之间的相制相克、相和相应关系。同性相叠有 32 卦,满足相制相克关系,有些卦有不利的占断辞。异性相叠满足相和相应关系,有些卦有利的占断辞,进一步根据阴上阳下或阳上阴下又有不同评价。

2.3 易经层次经卦模型和六爻模型的理念学说

易经的层次模型可以粗分为上下两层经卦相叠,细分为六爻层相叠。上下卦是卦名和卦义产生的依据,上下卦的连接关系非常重要。易经层次模型同其他层次模型的区别,不仅体现在层次阴阳特性的区分,还体现在层次连接的语义上。在卦象上两经卦皆处于上下层之位,但在易传的语义解释中有异卦上下、异卦内外、异卦前后、异卦平列、同卦相叠五种语义。这五种模块层次连接的语义可以满足计算机体系结构层次模块在执行时间上前后和同时(平列)的需要,和空间上上下、内外、左右(平列)和相叠结构连接的需要。

六爻是一个卦的整体,六爻的每一爻都有爻辞和爻象,而且六爻所在层位置也有阴阳爻位的区别。自底向上,一、三、五层为奇数层即阳位,二、四、六层为偶数层即阴位。易经中用“九”和“六”表示阳爻和阴爻,用“初”、“二”、“三”、“四”、“五”和“上”表示六爻层自底向上的顺序。易经的《彖传》和《象传》常以八卦六爻爻象与爻位的性质为基础来解释卦名、卦义与卦辞。从而,可建立相应学说,给出体系结构设计细分层次模型的评价判断。易经中可分为 4 种阴阳爻象与爻位结合情况和相应学说:

(1)刚柔相应说:四爻与初爻、五爻与二爻、上爻与三爻刚柔相应为吉利之象。

(2)刚柔当位说:当位为吉利之象。阳爻居一三五阳位,是刚当位。阴爻居二四六阴位,是柔当位。

(3)刚柔得中说:一卦六爻有多种相应情况,特别注意两中位即二爻与五爻位刚柔是否相应,第五爻位又被称为“尊位”。分为刚柔分中、双刚得中、双柔得中 3 种情况。

(4)柔刚从乘说:柔从刚:阴爻在阳爻之下,柔顺从

刚,吉利之象。柔乘刚:阴爻在阳爻之上,柔凌驾刚,不吉利之象。

3 层次的发展变化

目前在计算机层次模型设计中基本没有考虑层次模型之间的变化和相互关系,没有形成完整的层次模型体系。在易经层次模型中,限定了二层经卦模型和六爻层次模型,六十四卦即六十四种层次模型构成了完整的层次模型体系,为计算机层次模型设计提供借鉴。任何计算机层次模型都可采用抽象和虚拟技术,映射为二层经卦模型或六爻层次模型。应注意到,六十四种层次模型是一个完整体系,它们之间存在变换关系,这些关系反映了事物现象的不同观测视角和发展状态。

3.1 卦之间的关系与层次模型的发展变化

易经层次模型具有变化性,六十四卦中的某一个别卦反映的是某一个发展阶段的特点和状况。六十四卦的卦之间变换关系可由层次的性质和位置变换表达,包括 3 种变换卦:错卦、综卦和交互卦。本文中为了便于表达卦中的阴阳变化,阳爻由“1”表示,阴爻由“0”表示。一个卦的卦象可表达为一个由“1”或“0”的字符串,由高位到底位排列。

(1)错卦:两卦同位次爻的阴阳特性相反(0、1 互换)。是从一种从对立面的角度观测事物的状态。

(2)综卦:两卦上下经卦对调,变换从乘关系。是从另一种发展趋势角度观测事物的状态。“物极必反”,与原卦发展逻辑相反。

(3)交互卦:是指在一个六爻卦中,由二三四爻构成交卦,由三四五爻是构成互卦,上互下交形成新别卦。表达事物发展的中间过程,事物变化的中间结果。

3.2 对卦与层次模型的反转变化

六十四卦可分为相邻三十二对卦,从正反两个方面,表达一个完整发展内容,事物向正面发展或向反面转化表达了朴实的对立统一辩证观点。每对卦的卦义往往是对立的。三十二对卦可由综卦或错卦关系描述,但描述的不统一和清晰,本文给出一种统一的新定义方法,叫做对卦。

在对卦的定义中,我们强调卦象的 180 度旋转,但分成整体旋转和局部旋转两种情况:

(1)卦象整体 180 度旋转,这种情况共有二十八对卦。

(2)如果整体 180 度旋转后原卦无变化,则上下经卦分别按八卦图 180 度旋转,这种情况共有四对卦。

对卦是综卦和错卦的完整统一定义,在情况 1 与综卦有交集,在情况 2 与错卦有交集。对卦之间有对立关系,是从一种相邻不同发展阶段角度观测事物的状态。在计算机体系结构设计中,每一对卦可有对应对立统一的设计策略,由于篇幅和研究进程所限,我们仅举例

说明. 例如, 第一卦与第二卦: 分别对应集中计算(超算中心)的设计与分布计算系统(网络系统)的设计, 它们对应对立统一的设计策略与“刚柔相济”相关.

3.3 交互卦与层次模型的腰

层次结构“腰”的概念有特殊意义, 它可以表示系统构件, 作为结构化系统组成部分, 成为构成新系统的基础. 特别在计算机系统中, 有意义的系统构件可以被重复使用并以灵活方式构建新系统. 在 SOA 系统中, 详细定义了软件组件及其系统架构^[6-8].

在 3.1 节中所描述交互卦中的“交卦”和“互卦”, 就是层次模型中的构件或腰. 它们不包含与原系统直接相关联的第一爻, 与原系统没有直接关系; 它们也不包含与原环境直接相关联第六爻, 与原环境没有直接关系; 它们与原卦保持松散耦合, 可以构成独立的经卦, 也可以作为新别卦的组成部分.

我们特别关注三与四爻位情况. 依据当位说和刚柔相应说, 阳爻居于第三爻, 阴爻居于第四爻位, 满足当位情况. 另外, 六爻层从下往上数表示事物渐进和发展的先后与过程, 表达事物状态的各个发展时段: 第三爻表象表达状态发展到一定阶段, 阶段成果突出应为阳; 第四爻表象变革完善阶段, 改变应为阴. 我们可以定义两种腰结构: 由二三四爻位构成交卦, 由爻实体六二、九三和六四(010)组成时为当位之象, 我们可以称为阳腰, 一般构为下卦; 由三四五爻位构成互卦, 由爻实体九三、六四和九五(101)组成时为当位之象, 我们可以称为柔腰, 一般构为上卦.

在计算机网络层次模型中, “沙漏(hourglass)”模型概念主要来自 IP 网络^[12], 在 IP 层下面支持多样技术, 在 IP 层上面支撑多样应用, 都由单一的 IP 网络层完成所有通信功能. 这种沙漏形状结构可以使单一网络层最大化内部操作, 减少内部工作的复杂性和失效的可能性. 另外, 沙漏形状结构可以使高层的应用和底层的通信网络独立有效地发展. 沙漏形状结构本质上就是我们所定义的阳腰, 如图 1 所示.

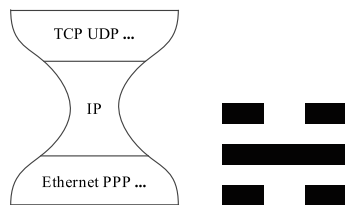


图1 沙漏模型

3.4 跨层设计

在计算机系统和计算机网络层次模型中, 为了提高系统的性能效率, 除了相邻层次间接口通讯外, 又提出了跨层设计机制^[10], 在不相邻层次间, 即跨层之间也可以有信息流动. 当然系统性能的提高是有代价的, 可

能损害模型的抽象特性, 增加系统设计的复杂性. 图 2 是三种典型的跨层设计策略.

在易经的爻象模型中, 爻也有跨层运动. 阳爻是指不可改变的固性事物, 而阴爻是柔顺善变的事物. 因此, 仅有阴爻可以柔进上升, 阴爻可以从底于第五爻位上升至最高第五爻位, 象臣民的地位和事业不断上升.

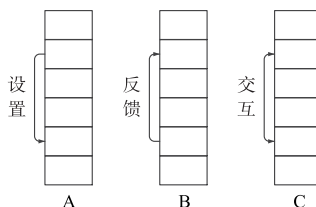


图2 跨层设计

4 例子

我们以 SDN 网络和云计算层次模型作为例子, 表达基于易经模型的计算机系统结构层次设计的方法和理念, 以及系统设计要关注的模型评价和系统进一步完善发展的措施.

4.1 SDN 网络层次模型

SDN 网络是当前研究的热点网络体系结构^[4] 它将网络数据平面与控制平面相分离, 将控制平面设计为集中的、可编程的控制器. 这种设计使网络管理更容易. SDN 网络的层次模型如下三个图所示, 它们分别描述了 SDN 网络两层的模型、六层的模型和相应易经卦的模型. 任何的计算机系统都要考虑给用户和应用提供服务, 因此在系统的顶层都包括一个应用层或用户层, 这一层一般是一系列 API 或用户接口. 在模型的抽象描述中, 这些接口一般都有共性类同的性质. 所以在系统层次模型构建中, 有时可省略应用层或用户层的描述.

仅考虑经卦分层上下相叠, 软件定义的控制层部分为柔卦, OpenFlow 标准界面^[14] 及基础设施层为刚卦, 见图 3. 柔卦为阴卦, 刚卦为阳, 此卦象为异性卦相叠, 满足刚柔相应并当位说.

细致考察 SDN 网络系统的六爻层次模型, 可见图 3. 我们可以模型多个数据包转发网络节点为阴层, 变化的网络操作系统层也为阴层, 全局网络视图层体现为 OpenFlow 标准界面, 此层为阳, 这三层爻象组成柔卦. 网络虚拟化层将物理网络抽象为逻辑网络提供网络服务为阳层, 抽象网络视图层是控制程序提取网络服务的标准界面体现为阳性, 控制程序是变化非标准的, 是阴性的, 这三层爻象组成刚卦.

柔上刚下组成咸卦, 见图 3. 此卦六二居下卦中位, 九五居上卦中位, 满足刚柔得中说, 得中为吉利之象. 阴爻居第一爻位, 阳爻居第四爻位, 初六与九四不满足刚柔当位说. 另外, 阴爻居第六爻, 且有柔乘刚之象, 此爻

象表明处穷困之境。

咸卦的《卦辞》曰:“亨,利贞,取女吉。”给出此卦总评价。《彖传》曰:“咸,感也。柔上而刚下,二气感应以相与。”刚柔相互感应感知,紧密结合,互相协调,表现为系统设计中的可控制性。《杂卦传》曰:“《咸》,速也。”感之效果甚速,控制性的关键是速度。SDN 在控制程序层与基础设施层互相感应与协调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。

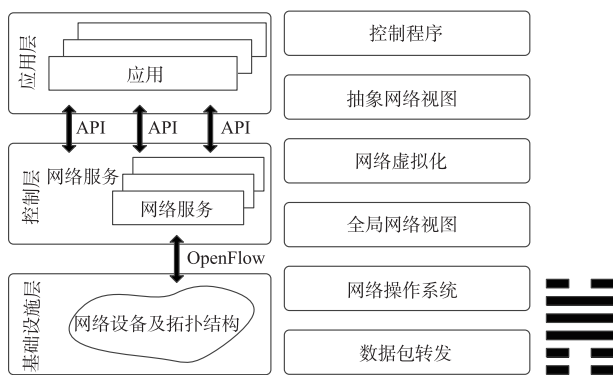


图3 SDN网络层次抽象模型

4.2 云计算层次模型

云计算是一种网络计算模式,能够通过网络以便利的、按需付费的方式获取计算资源并提高其可用性的模式,这些资源来自一个共享的、可配置的资源池,并能够以最省力和无人干预的方式获取和释放^[5,15]。

云计算的设计目标是更好地使用分布的资源,以期获得更高的吞吐量和求解大规模计算问题。云计算也有不同的部署模式,包括私有云、公共云、社区云和混合云^[15]。

云计算常见的层次模型,如图4。这个模型突出了SaaS、PaaS和IaaS三层^[16]。SaaS、PaaS和IaaS三层表现为网络范围的虚拟资源,都要以网络、计算存储等物理资源为基础,我们在IaaS层下面,显式加上物理资源层,这样模型共有六层。每一层基本功能描述如图4所示。

SaaS处于应用传递层,集中设置、管理和运行应用软件,客户可以透过互联网远程存取这些应用。PaaS平台服务层使用云基础设施提供计算平台,包括所有客户开发的典型应用,便于应用程序的部署与管理。IaaS基础设施服务层提供作为服务的基础设施,所传递的计算机基础设施典型地是一个平台虚拟环境。IaaS层下面是网络连接层,提供客户与应用同服务实体之间的通信。服务器层包括计算机、服务器、数据中心等资源,是计算处理的基础。存储层则包含了所有的存储设备及相关技术。

在易经中,云计算可由八卦中分散和集中两卦相

叠,散上集下形成泰卦来模型。集中表达为计算服务实体包括计算机基础设施、服务器和数据中心等。分散集中表达虚拟网连接和应用服务传递等。此卦下三层爻为阳,上三层爻为阴。九二居下卦中位,六五居上卦中位,满足刚柔得中说,得中为吉利之象。阳爻居第二爻位,阴爻居第五爻位,九二与六五刚柔相应,但不满足刚柔当位说。

泰卦的《卦辞》曰:“小往大来,吉,亨。”给出此卦总评价,阴柔在外在上,阳刚在内在下,一切由小而大,符合自然发展规律,于是得到吉利与亨通。《彖传》曰:“内阳而外阴,内健而外顺。”成为通泰之象。《彖传》又曰:“小往大来”,“则是天地交而万物通也,上下交而其志同也。”小往大来是网络计算的基本模式,符合应用计算结构设计的开放规律。《杂卦传》曰:“《否》《泰》,反其类也。”否为闭塞,泰为通达,二者互为计算模式发展的不同形态,可以互相转化,云计算要保持它的通达性和通透性。

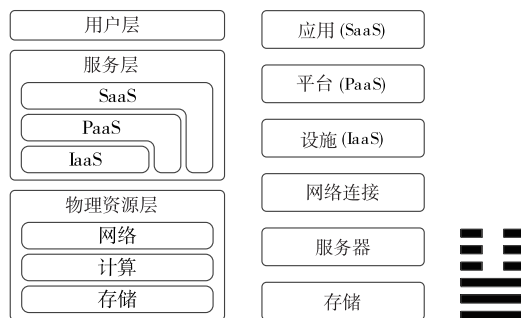


图4 云计算层次抽象模型

5 总结与展望

计算机体系结构层次设计是计算机科学技术、网络和应用的发展核心之一,在计算机科学技术发展中起引领作用。到目前为止,计算机体系结构层次设计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学说和模型体系。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。从易经经卦和六爻层次模型变化中发现与之对应的计算机体系结构形态和哲学思维,可以提供一个完整有效的层次设计体系和模型。

我们建立了层次对立统一和刚柔相应、阴阳当位、柔顺得中和柔顺从刚等学说,给出了一种体系结构设计层次模型的评价方法。我们拓展了层次模型之间的变化和相互关系的新理念,六十四种层次模型不仅是一个完整体系,也是一个发展变化的系统学说。

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SDN网络和云计算与对应卦模型的举例,可以看到一些设计原则和策略的新观察。可以看到,易

经层次模型语法完整语意丰富,尤其是层次相互作用,对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,是最富理念学说和动态变化的层次模型.

本文的研究成果仅是易经在层次模型设计中应用的初步,在六十四卦象中,我们认为各卦象和理念学说并不是截然分开,而是相互包含,相互交错,是一个对立统一的整体.研究各层次模型之间的相互关系,并抽象出相应的层次变化有效原则和相应语义,是亟待解决的研究难点之一,是我们下一步工作的方向.

参考文献

- [1] Dijkstra E W. The Structure of the "THE" Multiprogramming System[M]. Classic Operating Systems. New York: Springer, 2001. 223 - 236.
- [2] Zimmermann H. OSI reference model-the ISO model of architecture for open systems interconnection[J]. Communications, IEEE Transactions on, 1980, 28(4): 425 - 432.
- [3] Arsanjani A. Service-oriented modeling and architecture [J]. IBM Developer Works, 2004. 1 - 15.
- [4] Feamster N, Rexford J, Zegura E. The road to SDN[J]. Queue, 2013, 11(12): 20.
- [5] Armbrust M, Fox A, Griffith R, et al. A view of cloud computing[J]. Communications of the ACM, 2010, 53(4): 50 - 58.
- [6] Erl T. Soa; Principles of Service Design[M]. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2008.
- [7] Erl T. SOA Design Patterns[M]. Pearson Education, 2008.
- [8] Hurwitz J, Bloor R, Baroudi C, et al. Service Oriented Architecture for Dummies[M]. John Wiley & Sons, 2007.
- [9] Lua E K, Crowcroft J, Pias M, et al. A survey and comparison of peer-to-peer overlay network schemes[J]. Communications Surveys & Tutorials, IEEE, 2005, 7(2): 72 - 93.
- [10] Srivastava V, Motani M. Cross-layer design: a survey and the road ahead[J]. Communications Magazine, IEEE, 2005, 43(12): 112 - 119.
- [11] Shiva S G. Computer Organization, Design, and Architecture[M]. CRC Press, 2013.
- [12] Aguiar R L. Some comments on hourglasses[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2008, 38(5): 69 - 72.
- [13] 林闯. 计算机体系结构设计原理的易经模型[J]. 电子学报, 2016, 44(8): 1777 - 1783.
LIN Chuang. Philosophical principles of computer architecture design in the I Ching[J]. Acta Electronica Sinica, 2016, 44(8): 1777 - 1783. (in Chinese)
- [14] 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.
- [15] Hogan M, Liu F, Sokol A, et al. Nist cloud computing standards roadmap [J]. NIST Special Publication, 2011, 35.
- [16] Jadeja Y, Modi K. Cloud computing-concepts, architecture and challenges[A]. Computing, Electronics and Electrical Technologies (ICCEET) [C]. IEEE, 2012. 877 - 880.

作者简介



林 闯 男, 1948 年生, 博士, 深圳大学计算机与软件学院访问教授, 清华大学教授, 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