

SCIENCE MASTERS

科学大师佳作系列

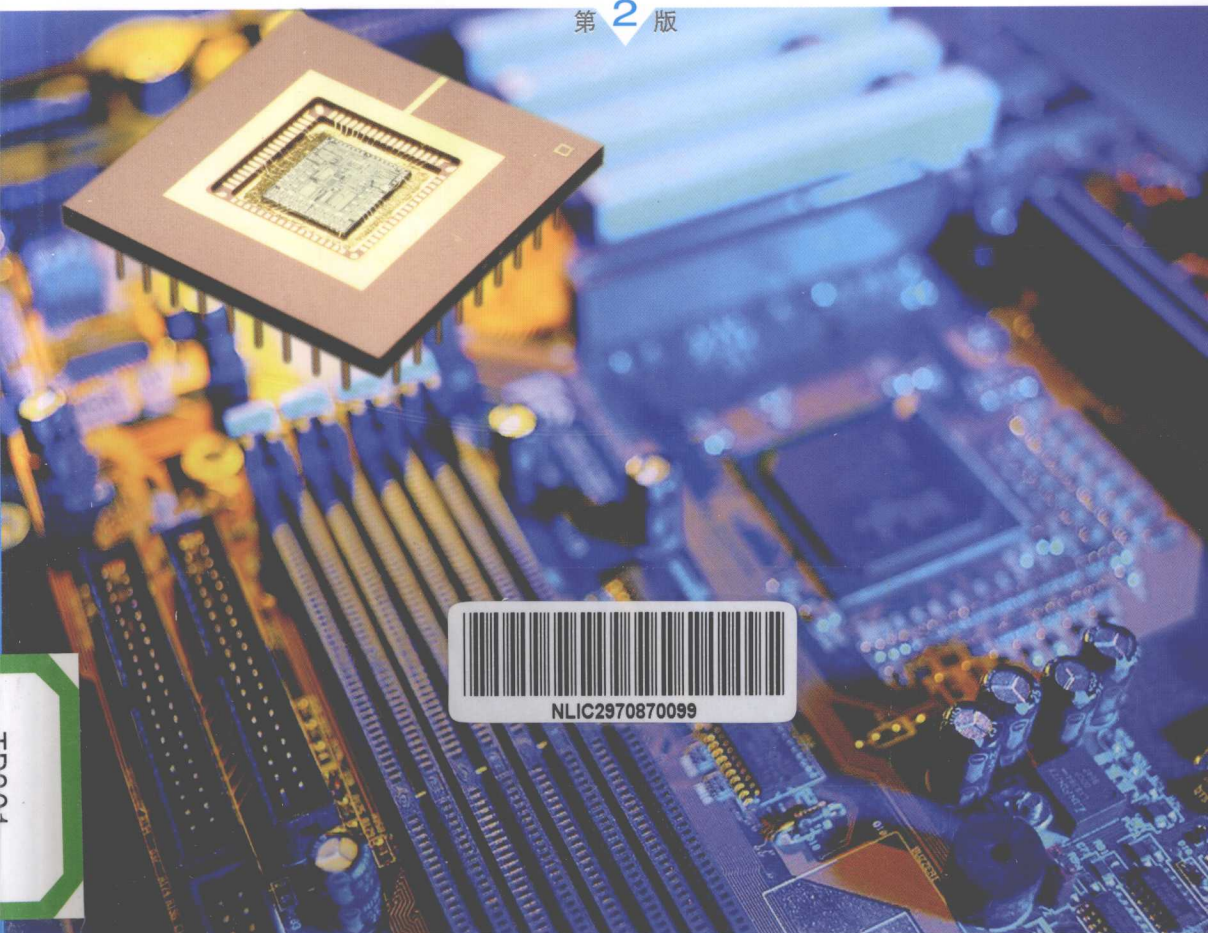
通灵芯片

—— 计算机运作的简单原理

[美] 丹尼尔·希利斯 著

崔良沂 译

第 2 版



NLIC2970870099



上海科学技术出版社

国家一级出版社
全国百佳图书出版单位

 科学大师佳作系列

通灵芯片

——计算机运作的简单原理

(第2版)

[美] 丹尼尔·希利斯 著

崔良沂 译

白英彩 审



NLIC2970870099

上海科学技术出版社

上海世纪出版股份有限公司

图书在版编目(CIP)数据

通灵芯片:计算机运作的简单原理/(美)希利斯(Hillis, W. D.)著;崔良沂译. —2版. —上海:上海科学技术出版社, 2012. 12

(科学大师佳作系列)

ISBN 978-7-5478-1595-3

I. ①通… II. ①希… ②崔… III. ①电子计算机—普及读物 IV. ①TP3-49

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 300132 号

The Pattern on the Stone: The Simple Ideas That Make Computers Work
Copyright © 1998 by W. D. Hillis

Chinese(Simplified Characters) Trade Paperback Copyright © 2008

By Shanghai Scientific & Technical Publishers.

Published by arrangement with Brockman, Inc.

ALL RIGHTS RESERVED.

上海世纪出版股份有限公司 出版、发行
上海科学技术出版社

(上海钦州南路 71 号 邮政编码 200235)

新华书店上海发行所经销

苏州望电印刷有限公司印刷

开本 700×1000 1/16 印张 9.5

字数: 190 千字

2012 年 12 月第 2 版 2012 年 12 月第 2 次印刷

ISBN 978-7-5478-1595-3/N·43

定价: 17.00 元

本书如有缺页、错装或损坏等严重质量问题, 请向工厂联系调换

译者的话

《通灵芯片》是一本科学启蒙书，作者是美国计算机科学家丹尼尔·希利斯(Daniel Hillis)。他以大规模并行超级计算机等先驱性成就闻名于世，现任美国应用头脑公司总裁和首席技术官，兼任《人工生命》、《复杂性》、《复杂系统》、《未来一代计算机》等期刊编辑，曾创立美国思维机器公司，从事过世界上超高速计算机——大规模并行“联接机”的设计，在平行计算领域有重大贡献，曾获霍珀奖、雷梅纽詹奖、美国创造精神奖、美国计算机协会会员奖，目前的研究兴趣是智能与进化。图灵奖得主马文·明斯基(Marvin Minsky)曾这样赞誉他：“丹尼尔·希利斯是我所见到的最富于发明天赋、最深邃的思想家之一。”

希利斯自小便是一个既富于灵感、也富于匠心的神童，曾花掉100多盒名为“大工程师”的积木造过一个计算机(现为麻萨诸塞州波士顿市博物馆展品)。他的可贵之处在于其求知天性和探索精神。知其然，不可不知其所以然；唯知其所以然，方真正知其然。

在本书中，希利斯开门见山地指出：计算机科学是“概念驾驭技术”。他以自己顽童时期的追忆，计算机天才设计家博大精深的积淀，智能和进化领域先驱者的思考，笔走龙蛇，游刃有余地对计算机运作的根本原理作了生动而富有趣味的诠释，可谓思维缜密、说理透彻如高屋建瓴，行文流畅、深入浅出似庖丁解牛，将计算机这一人类神奇发明之奥秘追根究底和盘托出，进而引出机器智能

的联想,探索心中萦绕的未来人工智能的进化和发展,行文涵盖广远,积思深沉,包孕着真和美的智慧闪光。

译者在德国蒂宾根大学任客座教授时,与该书德文版译者塞巴斯蒂安·沃格尔(Sebastian Vogel)博士作过交流,深感该书在计算机科学普及方面,是一本不同寻常的开先声之作。阅读该书,喜欢动脑又动手的读者,特别是青少年,在与科学大师的心智对话中一定会感到一种强烈的精神追求:寻求本真,不断实践,超越常规,极目未来。计算机世界日日在变化,该书之于计算机知识的求知、探索和创新,其意义悠悠之长远矣。

崔良沂

cui_ly@sjtu.edu.cn

序言：石的奇迹

石头上我蚀刻了一幅图案，内有几何图形种种，在不明者眼中，显得神秘而又复杂，但我明白，只要布局正确，这块石头将被赋予一种特殊的能力，即对一种至今无人说过的咒语作出反应。我用这种语言提问，石头会显灵应答：那是一个我用符咒创造的世界，一个在石头图案内想像的世界。

几百年前，在我的新英格兰故乡，我所干的这种事，说出来也许会送我上火刑架上处死。然而我的工作丝毫不涉及巫术。我从事计算机设计和计算机编程。那石头是硅片，那咒语便是软件。刻在石头上的图案，以及指令计算机工作的程序，似乎复杂而又神秘，但根据一些基本的生成原则，便不难将其解释清楚。

计算机是迄今最复杂的人造物，但从本质上说，它又相当简单。我与成员仅数十人的几个小组一起，研制了包含工作元件达几十亿之多的种种计算机。倘若把其中任意一台计算机的线路图画出来，可能相当于一个颇具规模的公共图书馆的藏书量，没有人会有耐心将其浏览一遍。幸好，这样的线路图并无必要，因为计算机的设计存在着规律性。计算机是以组成一个分层体系的部件构造的，每一部件都重复多次。要懂得计算机，你只需理解此分层体系就行了。

还有一个使计算机易于理解的原理，就是其各部件之间交互作用的本质。这些交互作用很简单，并且是明确定义的，通常为一

维,可清晰地排列成一系列因果关系。因此,计算机的内部运作与别的相比,例如汽车引擎或收音机,更容易理解。比起汽车或收音机,计算机的部件要多得多,但计算机部件协同运行的方式却也简单得多。计算机依据的是概念,对技术的依赖性没有那么大。

况且,概念几乎与制造计算机的电子技术无关,当今的计算机由晶体管和导线组成*。但根据同样的原理,亦可采用阀门和水管,或棍杆和绳索来实现。这些原理是计算机能够计算的真谛。关于计算机最值得一提的是:它的本质凌驾于技术之上。本书即旨在阐述计算机的这一本质。

但愿我初涉计算这门学科时便能读到这样一本书。大多数计算机书籍不是关于计算机操作,便是关于计算机制造技术(只读存储器、随机存储器、磁盘驱动器等等)——本书则讲的是概念。本书旨在阐述,至少是介绍,计算机科学领域中的大多数重要概念,包括布尔逻辑、有限自动机、编程语言、编译程序和解释程序、图灵机的普遍性、信息论、算法和算法复杂度、探索法、不可计算的函数、并行计算、量子计算、神经网络、机器学习乃至自组织系统。在读这本书时,对计算机感兴趣的读者可能已接触过其中的许多概念,但若未接受过正规的计算机教育,一般人很难明白这些概念是如何结合在一起的。本书意在融会贯通——从简单的物理过程,例如开关的闭合,一直深入到自组织系统的学习和适应功能。

揭示计算机的本质,有几个基本的主题:首先是**功能抽象原则**,它奠定了如上所述的因果关系分层体系。计算机结构是应用这一原则的范例——有许多层次,一再重复。计算机是容易理解的,因为当你关注分层体系中某一层发生的情况时,无需顾及较低

* 系指超大规模集成电路,说到底,它是将无数晶体管等元件和线路封装在单片晶体硅上而成。——译者注

层次所发生的细节。功能抽象使概念独立于技术。

第二个一致性主题是通用计算机的原则——即,实际上只存在一种计算机,更确切地说,所有类型的计算机在所能和所不能方面是一致的。我们几乎可以这样说,任何类型的计算装置,无论是由晶体管、杆和绳、还是由神经元构成,都可用一种通用计算机来模拟。如我以后阐述的那样,一个重要的假设是:使计算机像人脑一样思维只是一个如何为其正确编程的问题。

本书的第三个主题,将在最后一章充分展开。在某种意义上与第一个主题对立。关于计算机设计和计算机编程,或许会有一种全新的方法——即一种不基于标准的工程设计的方法。这是非常引人入胜的,因为当系统过于复杂时,常规的系统设计方法便变得无能为力。我们目前设计计算机的那些原则最终会导致某种程度的脆弱和低效。但此种弱点与信息处理机器的根本局限性无关——这是分层体系设计方法的局限。但试想我们若采用一种模拟生物进化的设计进程——意即在这种进程中,系统行为的突现,源于许多简单交互作用的累积,而非“自顶向下”的控制,试想那将会怎么样?以这样一种进化进程设计的计算装置,可能会显示生物体的某些健全性和灵活性——至少,这是一种希望。这一途径尚不清楚,到头来也有可能行不通。这是目前我研究的一个课题。

在解释计算机的本质时,必须先弄清某些基本原理,然后再转到翔实的内容。本书前两章介绍的基本原理有:布尔逻辑、二进制位和有限自动机,你在读完第三章后必有所获,将能自顶向下地理解计算机是如何工作的。这时便可进入第四章,学习有关通用计算机的有趣的概念。

哲学家格雷戈里·贝特森(Gregory Bateson)将信息定义为“生异之异(the difference that makes a difference)”。换句话说,信

息寓于我们选择用来表示意义的差异之中。例如,在原始的电气计算器中,信息是以电流流通与否造成的灯亮灯灭来表示的。信号的电压、电流方向是无关的。相关的只是导线载送两种可能的信号之一,其中一种信号是使灯亮起来。我们选来表示意义的差异——按贝特森的定义,生异之异——就是电流的流通与否。贝特森的定义很精辟,但对我来说,一直含有更多的意义。在我四十年的生涯中,世界发生了极大的变化。我们所看到的大部分变化,无论是商业、政治、科学或哲学,无不由信息技术的发展所引起或促成。当今的世界,许多事物都已发生变异,但生异之异者始终是计算机。

近来,人们普遍把计算机看成是一种多媒体装置,能将各种形式的媒体——文本、图象、动画、声音综合或结合在一起。我感到这种肤浅看法大大低估了计算机的潜力。确实,计算机能综合处理各种媒体,但计算机的真正伟力在于它不仅能处理概念的表现形式,而且能处理概念本身。令我惊异的不在于计算机能存储图书馆的浩瀚藏书量,而是计算机能察知本书所述的各种理念之间的关系——不在于计算机能显示飞鸟或星系自旋的照片,而是计算机能想像和预言创造了这些奇迹的物理定律将导致的结果。计算机不只是一台先进的计算器、或一架高级照相机、或一支神奇的画笔,计算机是一种能促进、拓展我们思维进程的工具,计算机是一种具有想像力的机器,可从我们为它输入的概念出发,演绎到我们人脑至今未到过的远方。

目 录

第一章	通用件	1
	布尔逻辑	2
	二进制位和逻辑块	9
	液压计算机	12
	积木	15
	省心的生异之异	17
第二章	万能积木	19
	逻辑功能	20
	有限状态机	28
第三章	程序设计	37
	与计算机对话	39
	连接	47
	翻译语言	53
	分层体系	54
第四章	图灵机的普适性	55
	图灵机	56
	能力的级	58
	随机数	60
	可计算性	61
	量子计算	64

第五章 算法和探索法	69
算法的保证性	70
探索法几乎总是行之有效	75
拟合风景图	79
第六章 存储:信息与密码	83
压缩	86
加密	91
查错	93
第七章 速度:并行计算机	97
并行性	99
并行计算机的认识误区	100
第八章 自学习与自适应的计算机	111
对计算机培训	114
神经网络	116
自组织系统	121
第九章 跨越工程设计	125
人脑	127
模块性的问题	131
模拟进化	132
使思维机器进化	135
致谢	141

小时候,读过一个故事,说的是一个小男孩,在废料场四下寻觅,用捡来的种种零件组装了一个机械人。奇在这个机械人如活人一般,能动、能言、还能思,成了他的同伴。出于某种缘故,我开始心动起来,决定自己也动手做一个。当年收集零件的情景还记忆犹新——用管子作四肢,小马达作肌肉,灯泡作眼睛,头则用了一个大油漆罐——满怀希望一旦组装完毕,给这玩意儿通上电,就大功告成:一个活动的机械人。

有好几次差点给电死,终于我让这些部件动起来了,还会发光发声。我觉得有所长进。我懂得了如何为四肢做活动关节。一个更重要的问题出现了:如何控制马达和灯泡,我是一筹莫展。我发现:对于机械人是如何工作的,我还缺点什么知识。现在,我知道我缺的是什么知识:那叫计算。当时我称之为“思维”。如何让机械人有思维的能力,我心中茫然无知。现在我当然清楚:造一个机械人,最难之处就是计算。但当时我还是一个孩子,难免为此一愕。

布 尔 逻 辑

我很幸运,关于计算这门学科,首次读到的书是一本经典之作。家父是流行病医生。我们那时住在加尔各答,很少见到英文著作。在英国领事馆图书室里,我却发现一本蒙尘的书,作者是 19

世纪的逻辑学家乔治·布尔* (George Boole)。吸引我的是那书名:《思维法则研究》。这激起了我的想像:真有思维法则?在这本书中,布尔试图把人类思维逻辑简化为一些数学运算。虽然他并未真正对人类思维作出解释,但他却向世人展示了简单类型逻辑运算的惊人力量及普遍意义。他还发明了一种语言,用于描写和处理各种逻辑命题和确定其真假与否。这种语言现称为布尔代数。

布尔代数与你在中学学过的代数相似,差别仅在于布尔代数在表示逻辑运算的方程中以变量取代了数字。布尔变量代表非真即假的命题。逻辑运算“与”(And)、“或”(Or)、“非”(Not)分别用符号 $\wedge$ 、 $\vee$ 、 $\neg$ 表示。例如下列的布尔代数方程:

$$\neg(A \vee B) = (\neg A) \wedge (\neg B)$$

此方程称为德·摩根定律,以布尔的同事奥古斯都·德·摩根(Augustus De Morgan)命名,意即:若 A 和 B 皆不为真,则 A 和 B 必皆为假。变量 A 和 B 代表任意二值逻辑(非真即假)的命题。显然,此方程是成立的,但也可用布尔代数写出更加复杂的逻辑命题并加以证明或反证。

麻省理工学院有一位学工程的年轻学子,他的一篇硕士论文将布尔的学说引入了计算机科学领域。这位学生便是后来以创立信息论这门数学分支而闻名的克劳德·香农** (Claude Shannon)。这门分支定义了我们称之为“二进制位”的信息量度。“二进制位”的概念是一个重要的发明。但对计算科学来说,香农利用布尔逻辑

* 乔治·布尔(1815—1864),英国数学家,1847年正式提出逻辑规则系统。——译者注

** 克劳德·香农(1916—),美国应用科学家,信息论创立者,1948年发表署名论文《通信的数学理论》。——译者注

辑所做的工作也同样重要。由于这两点,香农奠定了后五十年计算科学领域内所发生的一切的基础。

香农潜心于造一台下象棋的机器——泛而言之,是制造一台能模拟思维的装置。在1940年,他发表了题为“继电器开关电路之符号分析”的硕士论文。在文中,他表明了可以用电气线路来实现布尔代数表达式的思想。在香农的线路中,按布尔代数逻辑变量值的真或假对应开关的闭合或断开。香农提出了一种方法,可将任意布尔代数表达式转化成一系列开关的布局。若命题为真,线路建立连接;若命题为假,则断开连接。此种结构意味着:任意可用布尔逻辑命题精确描述的功能都可用模拟的开关系统来实现。

与其详述布尔和香农的学说,不如举一个应用的实例,我设计了一个简单的计算装置:会玩井字游戏的机器。虽然比起通用的计算机,此井字游戏机极其简单,但它体现了任何类型计算机的两大重要原则,显示了如何把一个任务简化成一些逻辑功能,又如何将这些功能用连接开关电路来实现。在加尔各答我读了布尔的那本书,不久还真的用灯泡和开关造了个玩井字游戏的机器。这是我对计算机逻辑的初次涉猎。尔后,我在麻省理工学院就学时,克劳德·香农成了我的朋友和老师。我发现,他也曾用灯泡和开关造过一个玩井字游戏的机器。

大多数读者都知道,此游戏在 3×3 方格棋盘上进行。游戏双方依次在方格上画符号,一方画 $\times$,另一方画 $\circ$ 。首先使三个符号成一行(成一横线、竖线或对角线)者获胜。小孩子热衷于玩井字游戏,因为似乎有无限多的取胜策略。但最终他们会悟到总共只会出现为数不多的几种棋面。一旦双方掌握了那些棋面,每次游戏的结局总是不分胜负,游戏也就变得索然无味。井字游戏是计算的一个范例,恰是因为其徘徊于复杂与简单的分界线上。越过

此界线便是计算的领域。计算是关于将看上去复杂的任务(如赢井字游戏)分解成简单的操作(如合上开关)加以执行。

在井字游戏中,各种可能发生的情况为数不多,完全可以将其全部列出来,从而把每种棋面下的正确走法输入机器。我们可用简单的两步法来设计这个机器。首先,将游戏简化为所有可能的棋面,定义每种情况下的正确走法,其次,将这些情况转化成开关连接的电路,使其能识别每种棋面,作出恰当的反应。

接下去是设想并写下由 $\times$ 和 $\bigcirc$ 组成的各种棋面模式,再确定计算机在每种情况下的走法。由于在9个方格中,任何一格皆可为三种状态之一($\times$ 、 $\bigcirc$ 或空格),故共有 3^9 (即19 683)种不同的棋面。但在游戏中,其中的大多数棋面是不会出现的。因此,比起列出所有可能发生的情况,更可取的方法是画一棵博弈树——一张描绘出各种可能发生的棋局的路线图。博弈树从根即一空格出发,展开人机对弈中人的各种可能走法的分支(此树不必展开机器走法的分支,因为机器走法为预先设定)。图1所示为博弈树的一小部分。对于人在各个位置所画的 $\times$,机器按预先设定的走法画 $\bigcirc$ (说来也怪,计算机科学家画树的方式总是“根”在顶部,自顶向下)。

图1中的这棵博弈树,反映了我在井字游戏中一贯采用的策略,即一有可能,便占据中心格。机器的走法看人走什么而定,这样,所需考虑的各种可能的走法数可大大减少。一棵显示机器在每种情况下走法的完整博弈树,分支在500至600,确切的数目取决于所采用的策略。机器循此博弈树便可稳操胜券,至少下成和棋。把游戏规则纳入走法,机器沿这棵树行走自然永远是遵守游戏规则的。依据这棵树,我们可写出机器在所有情况下走法的详细说明。这些说明便构成了机器的布尔逻辑状态描述。

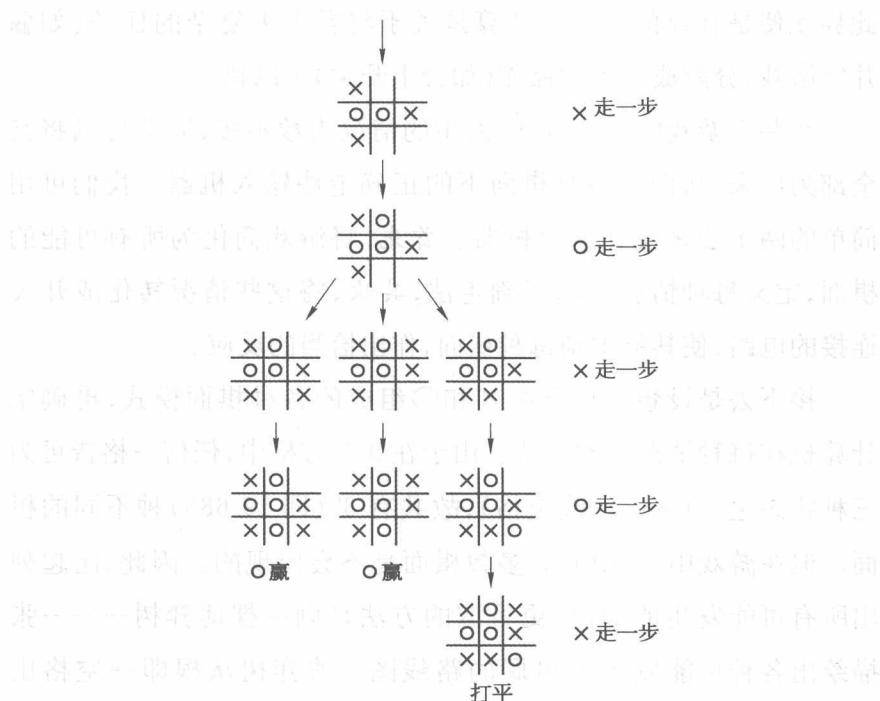


图 1 井字游戏博弈树的一部分

我们定义了欲实现的行为,便可将此行为转化为由电池、电线、开关、灯泡组成的电气线路。机器的基本电路与闪光灯电路原理相同:按下开关——即闭合时——灯亮,因为此时灯泡与电池已形成一条通路(与电池的连接用+和-这两个符号表示)。重要的是:在电路中,这些开关可采用串联。也可采用并联。比如我们可将两个开关串联起来,那么,只有当两个开关都合上时,灯才会亮起来。采用这种电路,可实现计算机的一种基本开关功能——称为“与”功能的“逻辑块”,因为只有当第一个开关与第二个开关都合上时,灯才会亮起来。如开关采用并联方式,则可实现“或”的功能,当其中一个开关或两个开关都合上时,电路才成通路(灯亮),见图 2。