

从『巨人计算机』到『量子位元』

Computing with Quantum Cats  
From Colossus to Qubits

# 量子计算

约翰·格里宾  
(John Gribbin)【英】/著  
王家银 /译

CS  
湖南科学技术出版社

Q  
U  
A  
N  
T  
U  
M  
C  
O  
M  
P  
U  
T  
I  
N  
G

# Computing with Quantum Cats

From Colossus  
to Qubits

John Gribbin



BANTAM PRESS

LONDON • TORONTO • SYDNEY • AUCKLAND • JOHANNESBURG

## 图书在版编目 (C I P) 数据

量子计算 从“巨人计算机”到“量子位元” / (英) 约翰·格里宾著 ; 王家银译. — 长沙 : 湖南科学技术出版社, 2017.9  
ISBN 978-7-5357-9063-7

I. ①量… II. ①约… ②王… III. ①量子计算机IV. ①TP385

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 220668 号

COMPUTING WITH QUANTUM CATS: From Colossus to Qubits

By John Gribbin

Copyright © 2013 John and Mary Gribbin

Simplified Chinese translation copyright ©2017 by Hunan Science & Technology Press

All Right Reserved.

湖南科学技术出版社获得本书中文简体版中国大陆地区独家出版发行权。

著作权登记号: 18-2013-515

版权所有, 侵权必究

LIANGZI JISUAN CONG JUREN JISUANJI DAO LIANGZI WEIYUAN

### 量子计算 从“巨人计算机”到“量子位元”

著 者: [英] 约翰·格里宾

译 者: 王家银

责任编辑: 孙桂均 刘 英

出版发行: 湖南科学技术出版社

社 址: 长沙市湘雅路 276 号

<http://www.hnstp.com>

邮购联系: 本社直销科 0731-84375808

印 刷: 长沙超峰印刷有限公司  
(印装质量问题请直接与本厂联系)

厂 址: 长沙市金洲新区泉洲北路 100 号

邮 编: 410600

版 次: 2017 年 9 月第 1 版第 1 次

开 本: 710mm×1000mm 1/16

印 张: 15.25

书 号: ISBN 978-7-5357-9063-7

定 价: 48.00 元

(版权所有·翻印必究)

TRANSWORLD PUBLISHERS  
61-63 Uxbridge Road, London W5 5SA  
A Random House Group Company  
[www.transworldbooks.co.uk](http://www.transworldbooks.co.uk)

First published in Great Britain  
in 2013 by Bantam Press  
an imprint of Transworld Publishers

Copyright © 2013 John and Mary Gribbin

John Gribbin has asserted his right under the Copyright,  
Designs and Patents Act 1988 to be identified as the author of this work.

A CIP catalogue record for this book  
is available from the British Library.

ISBNs 9780593071144 (cased)  
9780593071151 (tpb)

This book is sold subject to the condition that it shall not,  
by way of trade or otherwise, be lent, resold, hired out,  
or otherwise circulated without the publisher's prior  
consent in any form of binding or cover other than that  
in which it is published and without a similar condition,  
including this condition, being imposed on the  
subsequent purchaser.

Addresses for Random House Group Ltd companies outside the UK  
can be found at: [www.randomhouse.co.uk](http://www.randomhouse.co.uk)  
The Random House Group Ltd Reg. No. 954009

The Random House Group Limited supports the Forest Stewardship Council®  
(FSC®), the leading international forest-certification organisation. Our books carrying  
the FSC label are printed on FSC®-certified paper. FSC is the only forest-certification  
scheme supported by the leading environmental organisations, including Greenpeace.  
Our paper procurement policy can be found at [www.randomhouse.co.uk/environment](http://www.randomhouse.co.uk/environment)

Typeset in 11.5/16pt Janson by  
Falcon Oast Graphic Art Ltd.  
Printed and bound in Great Britain by  
Clays Ltd, Bungay, Suffolk

2 4 6 8 10 9 7 5 3 1



## 致 谢

此书源于我与萨塞克斯大学 (Sussex University) 量子计算机团队的谈话, 特别是和温弗里德·亨辛格 (Winfried Hensinger) 的谈话, 他让我了解了在几年前还看似深奥想法的实际应用所取得的巨大进步。在牛津大学 (University of Oxford) 的大卫·多伊奇 (David Deutsch) 和伦敦帝国学院 (London's Imperial College) 的特里·鲁道夫 (Terry Rudolph) 的帮助下, 我已经对这些深奥的概念有所了解。我还要感谢布雷契莱庄园 (Bletchley Park), 剑桥大学康韦尔凯斯学院 (Gonville and Caius College) 的热心帮助的人士以及伦敦柏贝克学院 (Birkbeck College) 大卫·玻姆档案部门 (David Bohm Archive) 的协助; 同时, 也感谢约翰·卡尔 (John Carl), 弗兰克·卡特 (Frank Carter), 特里·克拉克 (Terry Clark), 大卫·达林 (David Darling), 阿图尔·埃克特 (Artur Ekert), 卢西恩·哈代 (Lucien Hardy), 马克·霍格思 (Mark Hogarth), 贝蒂·霍顿 (Betty Houghton), 泰罗·凯斯基-瓦尔卡马 (Tero Keski-Valkama), 托尼·莱格特 (Tony Leggett), 劳伦斯·勒纳 (Lawrence Lerner), 伊尔凡·西迪基 (Irfan Siddiqi) 和米歇尔·西蒙斯 (Michelle Simmons)。

## 引言：量子计算

实验和理论物理学家目前都对开发基于量子理论的计算机的前景感到欢欣鼓舞。军方（他们可以提供大量资金）和大公司也对此有着浓厚的兴趣。量子计算是 21 世纪前 20 年最热门的科研课题之一，量子计算主要依靠对量子实体（电子，光子或单原子）的操纵，这些量子实体可以同时处于两种状态，就像薛定谔著名的“既死又活的”猫一样。这是我的题目的由来。

量子计算是计算科学的一个分水岭，原因在于量子计算机不仅仅在运算速度上，在其他方面也远远超过了传统计算机。例如，量子计算机可以用来破解传统计算机完全不可能破解的密码，这也是军方和大公司感兴趣的主要原因之一。几十年前这一点在理论上就已得到了证明（理查德·费曼是第一个对这些问题进行思考的人）；而目前实用的量子计算机已经投入使用了。不可否认的是：迄今为止，如果用量子计算机去解决即使是非常简单的问题，例如，找出 15 的所有因数，都需要大量昂贵又不太可靠的设备。但是，所有见证了传统计算机从昂贵又不太可靠、动辄占据整个实验室、浑身遍布发光的“阀门”的机器发展到个人电脑和 iPad 的整个历程的人都不会怀疑，10 年内量子计算机世界将发生天翻地覆的变化。更神奇的是：这样的机器将使得物理学家可以更好地把握量子世界的本质，在量子世界中，通信的传播速度要超过光速；远程传输成为可能；粒子可以同时位于两个不同的地点。其影响目前尚不可知，但是可以说，量子计算机所代表的进步远远超越了传统计算机，就像传统计算机曾经远远超越了算盘一样。

传统计算机通常被称为“经典”计算机，可以对二进制数字或字节组成的信息进行存储和处理。这就像普通的开关，可以处于两种位置：

开或者关，上或者下。开关的状态是由数字 0 和 1 来表示，计算机所有的操作就是以适当的方式改变这些开关的设置。当我写这些句子时，我的电脑上在运行文字处理程序，同时也在播放音乐，还有一个提醒我收到新邮件的电子邮件程序在后台运行。计算机之所以具有这些以及其他一些功能是因为 0 和 1 的字符串正在计算机的“大脑”内被移动和操纵。<sup>[注1]</sup>

8 个这样的比特（0 或 1）构成一个字节，此外，我们是在按二进制而不是十进制进行运算，乘法运算的步骤不是按照 10，100，1000 等进行递进，而是按照 2，4，8，16 这样进行递进。结果就是： $2^{10}$  表示为 1024，接近 1000，又因为我们习惯于使用十进制，因此，1024 个字节被称为千字节。同样，1024 个千字节构成一个兆字节，而 1024 个兆字节构成一个千兆字节。我的笔记本电脑的硬盘驱动器可存储 160 千兆字节的信息，而“计算机的大脑”——处理器可以同时处理高达 2 千兆字节，这些字节都是以 0 和 1 字符串的形式进行存储的（而这样的计算机已经很落后了；今年的新型号计算机的功能要强大得多）。

相比之下，量子计算机则完全不同。在量子的世界中，电子等实体可以处于一种叠加状态。这意味着量子开关可以同时处于“开”和“关”两种状态，就像薛定谔的“既死又活的”猫一样。电子本身具有一种“自旋”的性质，这与我们日常生活中所指的“旋转”不同，但是可以认为这是指电子在做向上和向下的运动。假设“上”对应于 0，而“下”对应于 1，那我们就有了一个二进制的量子开关。在适当的条件下，量子开关可以同时处于“向上”和“向下”的状态。或者也可以处于“向上”的状态或“向下”的状态，这样就有了三种可能性！

一个处于叠加状态的量子开关可以同时存储数字 0 和 1。借用经典计算机的语言来说，这样的量子开关就叫作量子位元，全称是“quantum bit”，读作“cubit”，和《圣经》中的长度单位“肘”（cubit）同音。量

量子位元就是指本书标题中的“量子猫”。量子位元的存在令人振奋。例如，两个传统的比特可以表示 0 到 3 这四个数字中的任何一个，它们有 4 种不同的组合方式：00，01，10 和 11。要同时表示这 4 个数字（0，1，2 和 3），你就需要 4 对数字，即一个字节。但是只需要两个量子位元就可以同时表示这 4 个数字。作为一个数字像这样进行存储和运算的一组比特（或量子位元）叫作一个寄存器。一个寄存器由 8 个量子位元（等于 1 个量子字节）组成，可以同时表示 28 个数字而不是 4 个数字。那么，一个量子字节中就可以存储 256 个数字。或者，正如牛津物理学家大卫·多伊奇（David Deutsch）所说，量子字节在多重宇宙中表示 256 个不同的宇宙，按某种方式进行着信息的共享。

在一台正在运行的量子计算机中，任何操作都需要同时在所有 256 个宇宙中，对所有由这个量子字节的信息所表示的 256 个数字中的每个数字进行处理，就像我们有 256 台经典计算机，每一台处理我们宇宙中的问题的一个方面，或者说，一台计算机需要运行 256 次，每求一个值都要运行一次。展望更远的未来，基于 30 个量子位元处理器的量子计算机将具有相当于一台传统计算机 10 万亿次浮点运算的能力（可以每秒进行万亿次浮点运算）——这个速度超过今天的传统台式计算机一万倍，今天的计算机可以进行每秒 10 亿次浮点运算。这些数字预示着量子计算机的神奇能力；但是关键之处在于在计算结束后如何获取有用的信息——让不同的宇宙以适当的方式互相干涉以产生一个我们可以理解的“答案”，而不会在这个过程中破坏有用的信息。世界各地的数个研究团队已经掌握了这个方法，其中包括我所在的萨塞克斯大学的一个研究团队。这本书将告诉你，如何在原则上建造一台量子计算机。但是在这样的背景下，我想追溯一下机器计算的起源，如我们所知，要追溯到 20 世纪 30 年代，这个时间比人类的寿命还要短，并且我还要介绍一下启动这一进程的人物的相关研究。





# 目 录

|                  |       |     |
|------------------|-------|-----|
| 第一部分 计算          | ..... | 001 |
| 第一章 图灵和图灵机       | ..... | 003 |
| 第二章 冯·诺依曼和计算机    | ..... | 039 |
| 第一个插曲            | ..... | 069 |
| 第二部分 量子          | ..... | 073 |
| 第三章 费曼和量子        | ..... | 075 |
| 第四章 贝尔侦破纠缠之网     | ..... | 103 |
| 第二个插曲            | ..... | 135 |
| 第三部分 用量子进行运算     | ..... | 139 |
| 第五章 多伊奇和多重宇宙     | ..... | 141 |
| 第六章 图灵的继承者和量子计算机 | ..... | 175 |
| 结尾               | ..... | 207 |

|             |       |     |
|-------------|-------|-----|
| 注释          | ..... | 210 |
| 参考资料和更多阅读材料 | ..... | 222 |
| 图片致谢        | ..... | 229 |

第一部分

# 计 算



基于卡片的人口普查计数机（1890年）。

计算机鼻祖之一。



## 第一章 图灵和图灵机



如果说需要是发明之母，那么计算机就有两个母亲——密码和氢弹。但是，却只有一个父亲。他就是艾伦·麦席森·图灵（Alan Mathison Turing）。

### 帝国之子

图灵孕育于印度，他的父亲朱利叶斯（Julius）是协助管理印度的一名公务员。1912年6月23日，图灵诞生于伦敦的梅达韦尔（Maida Vale），当时，他的父母正在回国度假。他有个哥哥名叫约翰（John），约翰于1908年9月1日出生于印度。朱利叶斯回到印度时，母亲莎拉（Sara）<sup>①</sup>和两个孩子留在了英国。1913年9月，她前往印度和丈夫团聚，将两个孩子留给一个退役陆军上校和他的妻子照顾，他们当时住在萨塞克斯郡的圣伦纳德海（St Leonards-on-Sea）。一个保姆负责照顾这两个男孩子和上校的四个女儿，以及另一个父母在海外的男孩，后来，艾伦

和约翰的三个表亲也来了。他们的母亲于1915年夏回到英国，和两个孩子一起住在圣伦纳德海的出租屋中。1916年，他的父亲也回到了英国，这时，艾伦才真正第一次有机会了解他的父亲。8月，假期结束，朱利叶斯·图灵回到印度继续履行他为期三年的任期。之前，约翰就已经被送往肯特郡（Kent）的黑兹尔赫斯特（Hazelhurst）上学；之前还只是一大群孩子中一员的艾伦现在才实际上成为自己母亲身边的唯一一个孩子，因此，他的母亲到哪里都会带着他，比如，去高圣公会教堂（the High Anglican Church）（他讨厌去这个教堂）做礼拜时以及去艺术班授课时（她是一名画艺精湛的水彩画教师）都会带着他，在那里，他成了班上女孩子的心肝宝贝。

在她们的记忆中，当时的艾伦聪明，不修边幅，偏爱发明新词，如用“qucckling”来描述海鸥的叫声，用“greasicle”来描述一支淌泪的蜡烛。在当时几乎不可能骗到他，有一次下棋时，他的保姆故意走昏招来让他获胜，他看出了其中的门道，非常生气；还有一次，他的母亲在给他读一个故事，然后跳过一段没有意思的内容，他大声叫道：“你在搞什么啊？”<sup>22</sup>他也从来不怀疑他的世界观有什么问题，比如他坚持认为伊甸园中引诱夏娃的水果是李子。但是他分不清左右方向，因此，就在左手大拇指上点了一个红点，这样他就能知道哪边是左，哪边是右了。

经过一段时间的自学后 [主要是看一本叫作《快乐阅读》（*Reading Without Tears*）的书]，艾伦6岁时第一次接受正规教育，她的母亲送他去一家当地的走读学校学习拉丁文。这并没有激起他学习的兴趣，反而使他陷入了不会书写的麻烦，特别是不会用当时通用的墨水笔写字。他写出来的总是乱七八糟潦草的涂鸦，到处是删改的记号和墨水渍，让人不禁想到奈杰尔·莫尔斯沃思（Nigel Molesworth）在杰弗里·威兰斯（Geoffrey Willans）和罗纳德·塞尔（Ronald Searle）的书中的恶搞涂鸦。

艾伦再次见到父亲是在1919年，当时，朱利叶斯在苏格兰度假。在那里，这个7岁的小男孩跟踪野蜂的飞行路径找到蜂巢取到蜂蜜，这给家人留下了深刻的印象。12月，他的父母又一起坐船回到了印度，艾伦只得回到位于圣伦纳德海的上校的家中，约翰则回到黑兹尔赫斯特继续上学。接下来的两年中，艾伦发生了巨大变化。当他的母亲于1921年再次回到英国，她发现原先那个活泼而友好的儿子变得孤僻、喜欢幻想。由于一直没人来管他的教育，到了近9岁他还不会长除法。她带着他前往布里塔尼（Brittany）度假，然后又去了伦敦，在那里她亲自教儿子长除法。她后来回忆称，当教他如何解一个数的平方根后，他自己学会了如何解立方根。

1922年初，艾伦跟着哥哥约翰去了黑兹尔赫斯特，这个小学校里有36个男生，年龄从9岁到13岁不等，只有三个教师以及一个保姆负责照顾这些孩子。兄弟俩在黑兹尔赫斯特一起度过了一个学期，随后，约翰前往伊斯特尔（Easter）的马尔伯勒学院（Marlborough College）上学，这是一个在黑兹尔赫斯特这样的“预备”学校读书的男孩子们毕业后就读的公立学校。同年，有人给了艾伦一本埃德温·布鲁斯特（Edwin Brewster）写的书，书名是《每个孩子都应该知道的自然奇观》（*Natural Wonders Every Child Should Know*）。

与科学的第一次亲密接触给艾伦留下了深刻印象，特别是在书中作者把人体（甚至是大脑）的运作比作一台机器。他对当时年轻的英国绅士们热衷的体育活动不太感兴趣（至少还可以忍受），后来他说，当时他为了躲避曲棍球比赛中的球而选择了快跑（成年后，他很擅长长跑）。他还对某些老师上课的不严谨表示担心，他在给约翰的信中写道，其中有一个老师“使他完全误解了‘x’的意思”。他不是担心他自己的学习，而是担心其他男生会被误导。

1922年夏天，艾伦的父亲再次回国度假，一家人又一起在苏格兰度

过了一个愉快的假期。但到了9月，他的父母把他送回了黑兹尔赫斯特，当载着他的父母的出租车沿着学校的车道缓缓驶离的时候，莎拉看见艾伦拼命地跟在后面跑，想要追上他们。看到这一幕，她只能紧咬着嘴唇。由于对学校没有什么兴趣，艾伦在学习成绩上并没有什么起色，但是却爱上了发明东西，对化学产生了浓厚的兴趣，这只能是业余爱好，因为教会禁止像黑兹尔赫斯特这样的“预备”学校和科学有任何瓜葛。由于大部分公立学校都不开设科学课，因此，1925年秋，艾伦在普通入学考试中的优异表现令大家都感到惊讶。只有通过这个考试，艾伦才可以继续求学。然后，艾伦的未来却让他的父母感到困惑。约翰热切地恳求他们的父母不要把他不寻常的弟弟送到马尔伯勒（Marlborough），称“这会毁了他的生活”，莎拉·图灵则担心，如果她的儿子不能适应公立学校的生活，他会“变成一个科学怪人”。她的一个朋友帮忙解决了如何安置他的难题，这位朋友的丈夫是位于多塞特（Dorset）的舍伯恩学校的一个理科教师。舍伯恩学校建于1550年，于1869年引入了现代公立学校制度。这位朋友向莎拉保证，对于她的儿子来说，这是一个安身之处。1926年艾伦开始在此就读。

## 舍伯恩

根据学校的规定，他应该从布里塔尼动身并于5月3日到校开始夏季学期的学习。（他的父母住在布里塔尼是为了逃避缴纳英国所得税。）在前往南安普顿（Southampton）的渡轮上，艾伦得知，因为发生大罢工，火车停运了；对此，他毫不担心。当时，距离他的14岁生日还有一个半月，他骑行60英里（1英里=1.609千米）抵达了舍伯恩，在布兰福德镇（Blandford Forum）留宿一夜。这一举动惊动了西方公报（Western Gazette），该报在5月14日对此予以了报道。他的这种特立独



行在随后再一次得到展示。当艾伦独立推出被称为格雷戈里 (Gregory) 的反正切级数公式时, 他并没有意识到早在 1668 年, 苏格兰数学家詹姆斯·格雷戈里 (James Gregory) (他发明了一种以他名字命名的望远镜) 就已经发现这一公式, 更早发现这一公式的则是印度数学家玛塔瓦 (Madhava)。

艾伦很快又回到了以前的习惯: 对于他不感兴趣的课基本上置之不理, 但考试却考得不错。同时继续私下里进行他的化学实验, 并拿高等数学来解闷。在舍伯恩, 成绩是由连续评估和考试决定的, 每门课单独打分但是最终给出一个总分。有一次, 艾伦的学期评估在 23 人中排名第 22 位, 考试考了第一, 总分排名第三。但是校长却并不认可这样的表现, 他在给艾伦父亲的信中写道: “我希望他不要一心二用。如果他还想留在公立学校里, 他就必须以接受教育为目标。如果他只是想成为一名科学方面的专家, 留在公立学校就是浪费时间。”但艾伦并没有被开除, 校方极不情愿地让他参加了“学校证书考试”(School Certificate Examination), 只有通过这个考试, 他才能在 1929 年初继续上六年级。但是他在课外生活研究逻辑的同时也开始了谈情说爱。

就像在所有的公立学校里的情况一样, 学校里全是处于青春期的男孩子, 又没有发泄日益强烈的性冲动的渠道。虽然学校对此明文禁止, 但是不可避免地, 年纪较大的男孩子和年纪较小的男孩子之间的关系开始变得暧昧。正是在这种环境中, 艾伦开始意识到自己是同性恋, 但是并没有任何有关他与学校的其他男生有亲密身体接触的记录。然而, 他的确被学校里比他高一个年级的一位男生所吸引, 他的名字叫克里斯托弗·莫科姆 (Christopher Morcom)。

这种吸引既是精神上的也是肉体上的 (事实上, 从莫科姆的角度来说, 完全是精神上的)。莫科姆也是数学迷, 艾伦经常和他探讨科学, 其中包括爱因斯坦的广义相对论、天文学和量子力学。他是学校里公认的