

国外著名高等院校
信息科学与技术优秀教材



C算法 (第二卷 图算法)

(第三版)

Algorithms THIRD EDITION IN C

[美] Robert Sedgewick 著
周良忠 译

中文版

 人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS



国外著名高等院校信息科学与技术优秀教材

C 算法 (第二卷 图算法)

(第三版)

[美] Robert Sedgewick 著

周良忠 译

人民邮电出版社

MJS106/02

图书在版编目 (CIP) 数据

C 算法. 第 2 卷, 图算法 / (美) 塞奇威克 (Sedgewick, R.) 著; 周良忠译.

—北京: 人民邮电出版社, 2004.4

国外著名高等院校信息科学与技术优秀教材

ISBN 7-115-12074-9

I. C... II. ①塞... ②周... III. ①C 语言—程序设计②计算机图形学—算法设计

IV. ①TP312 ②TP391.41

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 014915 号

版 权 声 明

Simplified Chinese Edition Copyright © 2004 by PEARSON EDUCATION ASIA LIMITED and POSTS & TELECOMMUNICATIONS PRESS.

Algorithms In C: Part 5 Graph Algorithms ISBN: 0-201-31663-3

by Robert Sedgewick

Copyright © 2002.

All Rights Reserved.

Published by arrangement with Addison Wesley Longman, Pearson Education, Inc.

The edition is authorized for sale only in the People's Republic of China (excluding the Special Administrative of Hong Kong and Macau).

本书封面贴有 Pearson Education 出版集团激光防伪标签, 无标签者不得销售。

国外著名高等院校信息科学与技术优秀教材

C 算法 (第二卷 图算法) (第三版)

-
- ◆ 著 [美] Robert Sedgewick
 - 译 周良忠
 - 责任编辑 陈冀康

 - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街 14 号
 - 邮编 100061 电子函件 315@ptpress.com.cn
 - 网址 <http://www.ptpress.com.cn>
 - 读者热线 010-67132705
 - 北京汉魂图文设计有限公司制作
 - 北京朝阳展望印刷厂印刷
 - 新华书店总店北京发行所经销

 - ◆ 开本: 787×1092 1/16
 - 印张: 23.75
 - 字数: 564 千字 2004 年 4 月第 1 版
 - 印数: 1-4 000 册 2004 年 4 月北京第 1 次印刷

著作权合同登记 图字: 01-2002-4130 号

ISBN 7-115-12074-9/TP · 3835

定价: 38.00 元

本书如有印装质量问题, 请与本社联系 电话: (010) 67129223

内 容 提 要

这一套算法系列书介绍了当今最重要的算法，共分3卷，这是第2卷（第五部分），集中讲解图算法。本书共有6章（第17章~第22章）。第17章详细讨论图性质和类型，第18章~第22章分别讲解图搜索、有向图和DAG、最小生成树、最短路径以及网络流。书中提供了用C语言描述的完整算法源程序，并且配有丰富的插图和练习。

本书可作为高等院校计算机相关专业算法与数据结构课程的教材和补充读物，也可供自学之用。

译者的话

将数据结构和算法比作计算机科学的基石毫不为过，追求程序的高效是永恒的主题。Robert Sedgwick 以三卷 *Algorithms in C* 宏大篇幅对算法的意义进行了全新的诠释（第三卷尚未出版）。算法已不再是纯粹的运算实现，它已经发展成一门设计艺术！新版 *Algorithms in C* 不仅浓缩了过去几十年间应用于计算机科学领域的最重要、最高效算法，而且紧紧抓住算法的性能特征进行讨论。权威的资料、层次分明的讲解、丰富的配套练习，正是全世界无数院校将它作为算法首选教科书的原因。

本书为 *Algorithms in C* 的第二卷，主要内容包括图性质和类型、图搜索、有向图、DAG、最小生成树、最短路径以及网络流。为了便于教师因材施教，全书内容安排层次性清晰、重点突出。与传统参考书相比，主要有如下特点：

- 各章内容相对独立，可以单独阅读，或者根据实际教学需要，选择性地组合讲解。
- 为所有重要算法提供了可靠的实现代码。
- 配套插图丰富，并提供了详细的注释，使学习效果事半功倍。
- 提供了大量练习。更重要的是，作者将这些练习按不同层次、不同学习目的进行了分类。
- 详尽的参考文献，供读者进一步学习。

在翻译过程中，我感觉最深刻的还有两点。第一，作者所提供的所有源码尽量保持统一的风格、尽量使用抽象数据类型，因此，用其他高级编程语言来改写这些程序可以轻松实现。第二，全书将算法分析与数据结构的讲解融为一体。这种相得益彰的讲授方式的优势不言而喻。

作为译者，也作为读者，面对这些优秀的算法，我毫不犹豫地将它们运用到我的编程实践中。在应用实践中，有以下几点体会：

- 应用某一算法前，建议先掌握其性能特征，确保选择的算法不一定是最快的，但必须是最优的。
- 要透彻理解文中讲解的算法原理，最好的办法就是完成每一章后面的相关练习。

为了方便读者的学习，中文版提供了英、中文对照的索引，并按字母顺利排列。

在我国，*Algorithms in C* 的影印版已经用作许多高校的算法和数据结构教学的参考书。因此，为广大师生和自学者早日奉上中文版无疑具有重要的意义，也使我感觉到责任的重大。但由于水平有限，且时间仓促，错误在所难免，希望广大读者不吝指正。我的联系 E-mail: web_zhou@21cn.com。

译者
2003年8月

前 言

图和图算法在现代计算机应用中广泛流行。本书所讨论的图算法，都是实际中解决图问题的最重要的已知方法。本书的主要宗旨是让越来越多需要了解这些算法的人能够掌握这些方法及基本原理。书中根据基本原理从基本信息开始循序渐进地讲解，然后再介绍一些经典方法，最后介绍仍在进行研究和发展的现代技术。精心挑选的实例、详尽的图示以及完整的实现代码与正文中的算法和应用描述相辅相成。

算法

这本书是三卷中的第二卷，全书的目的是综述当今程序员使用的最重要的计算机算法。第一卷（第一部分到第四部分）包括基本概念（第一部分）、数据结构（第二部分）、排序算法（第三部分）以及搜索算法（第四部分）。本卷（第五部分）包括图和图算法。第三卷（待出版）（第六部分到第八部分）包括字符串（第六部分）、计算几何学（第七部分）以及高级算法与应用（第八部分）。

这些书可作为计算机科学的前期课程教材，供学生在掌握了基本编程技能并熟悉计算机系统之后、但在选修计算机科学或计算机应用高级领域中的专业课程之前选修。这些书也可以作为从事计算机系统或应用程序开发人员的自学教材或参考书，因为它们包含有用算法的实现以及这些算法性能特征的详细信息。本系列书讲解全面，无疑是非常合适的算法导论书。

在这三卷书中，第一、二卷已是第三版，世界各地的许多学生和程序员多年来一直广泛使用。我全部重写了新版内容，添加了上千个新练习、上百幅新图示以及许多新程序。我还为所有插图和程序添加了详细的注释。这些新材料既包含了一些新主题，还对许多经典算法提供了更全面的解释。整本书还添加了一项重点内容，即抽象数据类型，使得这些程序更加通用、更适应于现代面向对象编程环境。阅读过旧版的读者在新版中可以学到大量新知识；所有读者都可以阅读到丰富的教学材料，通过它们可以快速掌握一些重要概念。

这本书不是只为程序员和计算机科学专业的学生而写。几乎每一位使用计算机的人都希望更快地解决较大的问题。本书中的算法代表过去 50 年的知识发展水平，它们已经成为针对各种不同的应用高效使用计算机不可或缺的武器。从物理学上的 N -体模拟 (N -body simulation) 问题到分子生物学中的遗传序列问题，这里描述的基本方法已成为科学研究中的核心要素；而且从数据库系统到互联网搜索引擎，它们已成为现代软件系统的核心部分。随着计算机的应用范围越来越广泛，一些基本算法的影响也随之增大，尤其是本卷介绍的基本图算法。本书的目标就是作为一种宝贵的资源，让学生和专业人员在所从事的计算机应用中，在需要时可以掌握并巧妙地使用图算法。

讨论范围

本书共 6 章，包括图性质和类型、图搜索、有向图、最小生成树、最短路径和网络。图算法的基本问题涉及范围较广，这里的讨论是为了让读者了解得尽可能广泛。

如果你选修过算法设计和分析基本原理方面的课程，而且具有某种高级语言（如 C、Java 或 C++）的编程经验，则从本书受益最大。无疑，学习 C 算法（第三版，第一卷）后，就能顺利过渡到本卷的学习了。本卷假设读者已具备了数组、链表、ADT 设计、运用优先队列、符号表以及并集-查找 ADT 方面的基本知识，这些知识在第一部分~第四部分中均可找到（在其他很多算法和数据结构导论的书中也可以找到）。

图和图算法的基本性质从基本原理开始逐渐深入进行介绍，但要完全理解算法的性质，则需要深厚且深奥的数学知识。尽管高级数学概念的讨论简短、概括性强而且具有描述性，但在学习第一部分到第四部分的内容相比，要掌握图算法，必定需要更丰富的数学知识。同样，数学知识背景深浅不一的各位读者也可以从本书中汲取营养。本书的内容安排特别适合各层次读者的学习，应当理解且被每个人运用的基本图算法与那些并非每个人都理解的高级算法之间的区别并不大。本书的主要目的是讲解一些重要算法以及其他相关方法，而不是讲授所有数学知识。但严格的数学处理通常会得到优秀的程序，因此，在进行准确的理论分析与实践需求之间，在不失准确性的前提下，我们尽量寻求最佳平衡点。

如何在课程中使用

根据教师在教学方法上的差异以及学生预备知识的多寡，讲授本书的方式可以灵活多变。这里描述的算法多年来得到了广泛的应用，而且代表着在职程序员以及计算机科学学生的核心知识面。本书包含数据结构和算法方面充分的基本材料，因此，可以用于数据结构课程和算法的教学。同时，本书提供了图算法方面的详尽知识，还讨论了一些高级主题，因此可用于图算法的教学。一些老师可能希望重点讲解实现以及实际应用方面的问题，还有一些老师可能希望重点讨论算法分析和理论概念。

对于讲解更全面的课程，本书也可以与第一部分到第四部分一起进行讲授。因此，教师可以按统一的教学方式讲授基础知识、数据结构、排序、搜索和图算法。访问本书的主页，可以找到用于授课的整套幻灯片、示例编程作业布置、学生使用的交互练习以及其他一些教学材料。

书中的练习分为几类（在这一版本中，几乎所有练习都是新添加的）。有些练习是为了测试读者对课文内容的理解，只是要求读者完成一个例子，或者应用正文中描述的概念。有些练习包括实现代码和算法的综合，或者通过试验研究比较算法的变化版本，并学习其性质。还有一些练习提供了许多重要而详细的信息，这些信息不适合于在正文中讲解。每位读者阅读和思

考这些练习都可以得到收获。

算法的实用

任何希望更高效使用计算机的人都可以将本书作为参考书，或者用于自学。具有编程经验的人，在本书各章节都可以找到特定主题的有用信息。在很大程度上，读者可以独立阅读各章节，虽然在某些情况下，某一章中的算法可能用前面章节中介绍的方法。

本书的目标就是学习那些可能运用于实践的算法。它为所有算法提供了足够的信息，读者可以编写有把握的实现代码、有的放矢地调试，并且获得有效算法来解决实际问题，或者为应用程序提供功能。书中提供了所讨论方法的完整实现代码，探讨了一系列相关例程中的运算。因为我们提供的是实际代码，而不是伪码，所以这些程序可以直接运用于实践。从本书的主页可以下载所有程序的源代码。

实际上，整本书为这些算法配制了数百幅说明图示。通过这种直观的演示说明，许多算法变得浅显易懂。

书中详细地讨论了这些算法发挥作用的特征和场合。结合算法分析和理论计算机科学进行讲解虽然不是重点内容，但也安排了适当的篇幅。适当地引用试验和分析结论，来说明优先选择某些算法的原因。必要时，书中还描述所讨论的实际算法与纯理论结论之间的关系。本书综合探讨了算法性能特征以及实现的特定信息。

编程语言

所有实现都使用 C 语言写成。任何语言都各有优缺点，我们选用 C 语言，是因为它得到了广泛应用，而且提供了实现所需要的功能。这些程序很容易转换成其他现代编程语言，因为其中使用的 C 独特结构很少。在适当的时候，我们尽量使用标准 C 约定，但这本书不是一本学习 C 语言编程的参考书。

我们尽量提供雅致、紧凑而且可移植的实现，但要时刻着眼于算法的效率，因此，尽量在编制算法的各阶段留意代码的性能特征。新版中添加了许多新程序，同时重写了许多旧程序，主要是为了让它们更容易用作抽象数据类型实现。针对这些程序，书中讨论了扩展性的比较试验测试。

本书的目的是以尽可能简单、直接的形式讲解算法。尽可能保持一致的风格，让所有程序看起来比较统一。对于本书中的许多算法，不管用何种语言写成，它们均保持相似性。举一个突出的例子，Dijkstra 算法就是 Dijkstra 算法，不管是用 Algol-60、Basic、Fortran、Smalltalk、Ada、Pascal、C、C++、Modula-3、PostScript、Java，还是用其他各种编程语言和环境来表达这一算法，它同样证明是一种高效的图处理方法。

致谢

本书旧版的很多读者为我提供了有用的反馈信息。特别是，普林斯顿大学和布朗大学的数百名学生多年使用本书的初稿，并提出了宝贵意见。特别感谢 Trina Avery 和 Tom Freeman 对初版的付梓给予的帮助；感谢 Janet Incerpi 在利用早期原始数字化计算机排版硬件和软件生成初版样稿时付出的创建性劳动和智慧；感谢 Marc Brown 参与算法形象化表示的研究工作，使得本书能配备如此多的精美插图；感谢 Dave Hanson 尽心解答所有与 C 语言有关的问题；感谢 Kevin Wayne 不厌其烦地解答与网络有关的基本问题。还要感谢为本书的不同版本提供详细评论的诸多读者，他们有：Guy Almes, Jon Bentley, Marc Brown, Jay Gischer, Allan Heydon, Kennedy Lemke, Udi Manber, Dana Richards, John Reif, M. Rosenfeld, Stephen Seidman, Michael Quinn 和 William Ward。

为了新版本的问世，我有幸与 Addison-Wesley 出版社的 Peter Gordon 和 Helen Goldstein 合作，从本书的一般更新到大量重写，他们始终予以耐心的指导。也很荣幸能与 Addison-Wesley 出版社的其他几位专业人士合作。根据这一项目的高定位，对于他们来讲，这本书的编辑工作意味着不同寻常的挑战，我由衷敬佩他们坚韧不拔的精神。

编写此书时，我喜获两位新导师，我尤其要表达对他们的感激之情。第一位是 Steve Summit，他从技术层次上仔细审查了手稿的早期版本，并提出了数千条详细意见，尤其是对程序提出的宝贵意见。Steve 准确理解了我为读者提供雅致、有效以及高效实现的意图，他的意见不仅帮助我在实现代码时保持一致性，而且帮助我切实改进了许多程序。第二位是 Lyn Dupre，他也对原稿提出了数千条详细意见，它们的宝贵价值不仅在于帮助我更正和避免程序上的错误，而且更重要的是，帮助我找到了一种一致、连贯的编写风格，这有助于组织书中的大量技术材料。能有幸聆听 Steve 和 Lyn 的教诲，实在是荣幸之至，他们的付出对本书的顺利编撰至关重要。

我在这里所定的很多内容来自于我在斯坦福大学的导师 Don Knuth 的讲授和著作。虽然 Don 对这本书的写作没有直接影响，但在书中可以处处感受到他的影响，因为正是他推进了算法的研究，才使得编写这样的书成为可能。我的朋友和同事 Philippe Flajolet 在算法分析发展成一门成熟研究科学的过程中是主力军，他对本书也有相似的影响。

深深感谢普林斯顿大学、布朗大学以及法国国家信息与自动化研究院 (INRIA) 的支持，我在这些地方完成了本书的大部分工作。也感谢美国国防部防御分析研究所 (The Institute for Defense Analyses) 和 Xerox Palo Alto 研究中心的支持，我在访问这些单位期间完成了本书的部分工作。本书的许多部分与美国全国科学基金会和美国海军研究办公室的大力支持有关。最后，我要感谢 Bill Bowen、Aaron Lemonick 和 Neil Rudenstine 在普林斯顿大学建立相关学术环境中给予的支持，在完成其他工作职责之外，得以在这样良好的学术环境中为撰写该书作准备。

Robert Sedgewick

法国 Marly-le-Roi 市，1983 年 2 月

美国新泽西州普林斯顿，1990 年 1 月

美国罗德岛州詹姆斯敦，2001 年 5 月

关于书中的练习

对书中练习进行分类充满了不确定因素，因为读者的知识水平和经验参差不齐。尽管如此，提供一定的指导是适宜的，所以许多练习带有 4 种符号中的一种，以帮助读者决定如何使用这些练习。

测试对知识理解程度的练习标有一个空心三角形，如下所示

▷2. 请看下面图：

3-7 1-4 7-8 0-5 5-2 3-8 2-9 0-6 4-9 2-6 6-4

画出它的 DFS 树，并使用它查找图的桥接和边连通分量。

最通常的情况是，这些练习与正文中的示例直接相关。它们没有特殊的难度，但完成这些练习后，可以帮助你进一步掌握正文中没能理解的结论或概念。

为正文中的知识点添加新的、值得进一步思考的信息时，这样的练习标有一个空心圆，如下所示：

○2. 编写一个程序，计算拓扑排序已知 DAG 时，可能出现的不同结果数量。

这种练习鼓励你思考一些与正文中的材料有关的重要概念，或者回答阅读正文时可能碰到的问题。即使你没有时间来完成这些练习，这些练习可能也值得阅读。

对读者来说具有挑战性的练习标有一个黑圆点，如下所示：

●2. 主存储器一次只能容纳 V 条边，请描述如何查找图的最小生成树 (MST)。

这类练习可能需要相当多的时间来完成，根据读者经验的多少而有所不同。一般而言，最佳途径是分成几个不同的阶段来完成。

还有少数相当难的练习（与其他大部分练习相比而言），它们标有两个黑圆点，如下所示：

●●2. 开发一个 V 个顶点、 E 条边随机图的合理生成器，要求 Dijkstra 算法的 PFS 实现的运行时间为非线性。

这些练习与研究文献中解决的问题相似，但根据本书提供的材料，可以尝试解决文献中的那些问题（也许能完美解决）。

根据读者的编程能力和数学背景，这些注释定位适中。那些需要专业编程知识和数学分析的练习提供了自我证明。鼓励所有读者通过实现算法来测试对它们的理解。还有一种类似于此的练习对于实践的程序员或选修编程课程的学生来说简单易懂，但对于未曾从事过编程的人来说，可能工作量相当大：

●2. 编写一个程序在平面上生成 V 个随机点，然后用已知距离 d 内顶点间的（双向）连通边来构建一个网络（参见练习 20），将每条边的权重设置为该边连通的两个顶点的距离。请

判断如何设置 d 才能使边的期望值为 E 。

同理，我也建议所有读者阅读证明算法性质的分析证明过程。对于那些离散数学专业的科学家或学生来说，类似于以上工作的练习并不难，但对于不精通数学分析的人来说，这些练习可能需要较大的工作量：

○2. 与 V 个顶点、 E 条边的所有无向图对应的有向图有多少个？

读者需要消化吸收的练习太多，我希望在这本书中提供足够的练习，激励读者对感兴趣的知识有更宽广的理解，而不只是对正文内容走马观花。

目 录

第五部分 图算法

第 17 章 图性质和类型	2
17.1 术语	4
练习	11
17.2 图 ADT	12
练习	15
17.3 邻接矩阵表达方式	16
练习	19
17.4 邻接表表达方式	20
练习	22
17.5 变体、扩展和开销	23
练习	27
17.6 图生成器	29
练习	36
17.7 简单路径、欧拉路径和哈密顿路径	38
练习	49
17.8 图处理问题	50
练习	56
第 18 章 图搜索	58
18.1 探索迷宫	58
练习	62
18.2 深度优先搜索	63
练习	66
18.3 图搜索 ADT 函数	67
练习	70
18.4 DFS 森林的性质	71
练习	77
18.5 DFS 算法	77

练习	80
18.6 分离性和双连通性	82
练习	88
18.7 广度优先搜索	89
练习	95
18.8 通用图搜索	96
练习	101
18.9 图算法的分析	103
练习	107
第 19 章 有向图和 DAG	108
练习	110
19.1 术语和游戏规则	110
练习	117
19.2 有向图中 DFS 的剖析	118
练习	124
19.3 可达性和传递闭包	125
练习	134
19.4 等价关系和偏序	135
练习	137
19.5 DAG	138
练习	141
19.6 拓扑排序	142
练习	149
19.7 DAG 中的可达性	150
练习	152
19.8 有向图中的强分量	153
练习	159
19.9 再论传递闭包	160
练习	163
19.10 展望	163
练习	165
第 20 章 最小生成树	167
练习	169
20.1 表达方式	169

练习	173
20.2 MST 算法原理	173
练习	179
20.3 普里姆算法和优先级优先搜索	179
练习	187
20.4 Kruskal 算法	188
练习	193
20.5 Boruvka 算法	193
练习	196
20.6 比较与改进	197
练习	200
20.7 欧几米得 MST	201
练习	203
第 21 章 最短路径	204
练习	209
21.1 基本原理	210
练习	215
21.2 Dijkstra 算法	215
练习	221
21.3 所有点对最短路径	223
练习	228
21.4 无环网络中的最短路径	229
练习	235
21.5 欧几米得网络	236
练习	239
21.6 归约	240
练习	251
21.7 负权重	253
练习	265
21.8 展望	267
第 22 章 网络流	269
22.1 流网络	273
练习	281
22.2 增广路径最大流算法	283

练习	301
22.3 前流推进最大流算法	302
练习	312
22.4 最大流归约	314
练习	326
22.5 最小开销流	328
练习	334
22.6 网络单纯形算法	335
练习	348
22.7 最小开销流归约	349
练习	354
22.8 展望	356
第五部分参考文献	359
索引	361

第五部分 图算法

第 17 章 图性质和类型

许多计算应用程序不仅包含项集合，而且包含这些项对之间的连通集合。这些连通关系直接产生大量问题：跟随这些连通，能够从一个项到达另一个项吗？从已知项，可以到达其他多少个项？从此项到彼项的最佳路径是哪一条？

我们使用一种称做图 (graph) 的抽象对象来给这种情形建模。在这一章，将详细地讨论图的基本性质，为学习解决上述问题的各种算法作准备。这些算法有效地使用了第一部分到第四部分介绍的计算工具。它们还是解决一些重要应用问题的基础，如果缺乏优秀的算法技术，这些应用甚至不可能找到解决方案。

图论 (graph theory) 是组合数学 (combinatorial mathematics) 的一个主要分支，它的研究历史已有数百年之久。人们已经证明了图的许多重要而有用的性质，但尚有许多难题未解决。在本书中，在清楚地认识到仍然有很多图论难题有待我们进一步探索的同时，我们汇集了与图有关的知识，这是理解和运用大量有用的基本算法所必需的。

与我们研究的其他很多问题域一样，图的算法研究历史还不长。虽然一些基本算法很古老，但我们感兴趣的主要算法只是最近几十年才得以研究出来。甚至最简单的图算法也能导致有用的计算机程序，而且我们讨论的那些不一般的算法属于最雅致、最有趣的著名算法之列。

为了说明涉及图处理的应用的多样性，下面通过几个实例，在这一广博的知识领域开始我们的算法探索之旅。

地图 一个计划旅行的人可能需要回答这样的问题“从普林斯顿到圣何塞，最经济的是哪一条道路？”对时间而不是对金钱更关心的人可能需要回答如下问题“从普林斯顿到圣何塞，最快的路是哪一条？”要回答这样的问题，就必须处理项之间（即城镇之间）的连通性信息（即旅行路线）。

超文本 浏览 Web 时，会碰到引用（链接）其他文档的文档，点击这些链接，可以从一个文档进入另一个文档。整个 Web 就是一个图，其中的项就是文档，连通就是链接。图处理算法 (graph-processing algorithm) 就是帮助我们定位 Web 上信息的搜索引擎的重要部分。

电路 电路由晶体管、电阻器以及电容器等元件组成，这些元件通过电线错综复杂地连接在一起。我们通过计算机控制生产电路的机器，并检查这些电路是否执行预定的功能。我们需要回答这样的简单问题“存在短路吗？”还需要回答如下复杂问题“在不使电线交叉的情况下，能将该电路布置在一块芯片上吗？”在这种情况下，第一个问题的答案只取决于连通（电线）的性质，而第二个问题的答案需要知道电线的详细信息、电线连通的项以及芯片上的物理限制。

规划 生产过程需要执行不同的任务，还受到一系列的约束，如直到其他某些任务