《形式综合札记》札记

早期 Christopher Alexander 的初现洞见

Richard P. Gabriel°

° 德国波茨坦大学哈索·普拉特纳研究所（访问研究员）

摘要

这篇文章是一部流浪汉小说——以第一人称叙述一个无赖（我）探寻 Christopher Alexander 心智的历险经历；当时他正逐渐摒弃形式化设计思维，转而采用一种更为直觉、近乎灵性的过程。

Christopher Alexander 的作品为许多计算机科学家所熟悉：有些人想到的是模式，有些人想到的是神秘的无名的品质和《秩序的本质》；更多人想到的则是《形式综合札记》——Alexander 提出的形式化设计方法，以及对软件中内聚与耦合思想的预示。自 Gamma 等人于 1994年出版《设计模式》以来，已有数百本关于设计模式／软件模式的书籍问世，数千种模式语言发表，公开发表的模式更是多达数万种。

《笔记》于 1964年出版，随后很快便有了 Alexander 最重要的论文之一《城市不是一棵树》；在这篇论文中，他否定了《笔记》中描述的形式化方法，而他在 1971年《笔记》平装版序言中再次重申了这一否定。对于许多认真研读 Alexander 作品的人来说，这种转变令人震惊，也令人费解。

2015年我终于读了《笔记》，其中详尽的实例，以及对该方法独特的数学处理方式，还有一个暗示，都令我印象深刻：实例中展示的模块化，是他用自己编写的计算机程序计算得出的——这一切都发生在20世纪50年代末和20世纪60年代初。由于我对元启发式优化着迷，实在忍不住想要复现他的实验结果。

计算机及其程序乐于纠缠于你思维中的缺陷——Alexander 也不例外。通过运用阐释学和软件考古，我得以揭示／发现他在计算机程序遭遇失败与挫折时的思路轨迹。我的复现尝试也失败了，这促使我试着挖掘他编写的五个不同程序，理解它们，并弄清楚一个程序如何引向下一个程序。这些程序并未见诸已发表的论文，只记载于内部报告中。我寻找这些报告的过程，最终促成它们在互联网上公开 उपलब्ध。

我此番探寻的发现，是一段思想链条的早期部分：它始于控制论、数学和一台直白易用的计算机；途经《城市不是一棵树》；停下来“让上帝出现在一片田野中央”；最终以这一根本设计目标作结：我试着让建筑体量承载所有的感受。为了触及这种感受，我试着让建筑物承载我永恒的悲伤。就一座建筑而言，它尽可能地接近泪水涌出的那一刻。

ACM CCS 2012

- **应用计算 → 艺术与人文**;

Ke关键词 Christopher Alexander、HIDECS、内聚、耦合 合

编程的艺术、科学与工程

提交日期： 2022年9月14日

发布 2023年2月15日

DOI 10.22152/programming-journal.org/2023/7 /8

© Richard P. Gabriel 本作品采用“知识共享署名 4.0 国际许可协议”授权。载于编程的艺术、科学与工程，第7卷第3期，2023年，第8篇文章；共79页。

1 一个印度村庄

对于许多接受了模式与模式语言理念的计算机科学家来说，“Christopher Alexander”这个名字家喻户晓，[1] 其中一些人甚至也对他在《秩序的本质》[10, 11, 13, 12]中提出的、较为神秘的“无名的品质”与生命／整体性理念产生了兴趣。

Christopher Alexander职业生涯的开端是《形式综合札记》[5]（下文简称《Notes》[2]）（1964年），随后是《城市不是一棵树》[14]（1965年）。对于具有技术或科学背景的人来说，《Notes》最引人注目之处在于其数学方法：它试图将一个设计问题拆分为互不相交的需求集合，并以树的形式呈现。尤其对于计算机科学家而言，这种方法似乎预示了如今所说的模块化问题——内聚 与耦合。《城市不是一棵树》这篇论文在一些人看来仿佛横空出世：Alexander在文中否定了将复杂设计问题如此明确地划分为互不相交、树状的相互作用与关注点集合的做法。[3] 对我而言，几十年来一直抗拒阅读《Notes》，真正横空出世的反倒是《Notes》——它似乎与他的其他作品并非同类，因此他如何从这些早期想法发展出后来的观点，对我来说一直是个谜。在他后来的大多数作品中，我都能看出，他仍然希望（或需要）为自己的想法找到数学、科学、客观或理性的基础，但这样的基础始终未能如愿，因此——我猜想——他转而依赖精神或直觉层面的基础。在一部远晚于《Notes》拍摄的关于他的纪录片中，他说：“我们正在尝试做一件前所未有人尝试过的事：在 20^{th} 世纪……让上帝出现在一片田野中央。”[25]

这里有一个悖论：回顾自己走过的道路，并将早期作品与后期作品对照时，我怀疑 Alexander 也觉得《笔记》仿佛是凭空出现的。Alexander 在《笔记》的平装版序言中写道：

> 写这本书时，我非常关注“独立性”的形式化定义，也很想用数学方法找出彼此独立的力系统和示意图。但书写完后，我发现，要得到独立的示意图，根本不必采用如此复杂而形式化的方法。

同样是在1971年，他这样谈到由《Notes》部分催生的“设计方法”领域：“……我会说，忘了它吧，把整件事都忘了”[7]。

---

[1] 自《设计模式》于 1994年 出版以来，已有数百本关于设计／软件模式的书籍问世，数千种模式语言发表，数万个模式付诸发表。[2] 这本书源自 Alexander 在哈佛大学撰写的博士学位论文，于 1962年 完成。[3] 若想了解这种否定有多么强烈，请参阅附录 E。[4] 我在 2015年 读到的那本《笔记》——也正是它促使我展开本文所述的调查——是一本保存完好的初版，我在俄勒冈州波特兰的鲍威尔书店买到它。要是我当时读的是 1971年 版，而且读到了这篇序言……

我所揭示的 Alexander 努力以形式化方式探讨设计的故事，是一个不断试错的故事，而错误占了上风。这就是那篇序言背后的故事。这并不是一个“要是当初……”的故事：要是他的算法设计能力更强一些，或者犯的错误更少一些，他或许就能找到一种以算法方式探讨设计的方法。这个故事讲述的是 Alexander 踏出的最初几步：他离开《Notes》的形式主义，走向《城市不是一棵树》所体现的人文关怀，继而走向《模式语言》，并最终作出他最重要的贡献：教会我们，设计需要人的情感。

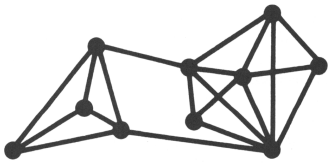
1.1 问题；不适配；稳态

在《笔记》中，Christopher Alexander 提出了一个详尽而全面的问题案例：重新设计印度一座约有 600 人的村庄，使其更好地满足当下和未来的需求。[5] 正如《笔记》所述，设计的本质是尽可能减少不适配。我们可以从最直白的角度来理解这一概念：想象一扇与门框不匹配的门。随后，这个具体概念被引申为一种比喻，让我们得以谈论房屋的某些方面与居住者生活之间的不匹配。Alexander 是这样描述的：

> 房屋设计也是如此。我们几乎不可能描述一栋与其环境相匹配的房屋。然而，要说出妨碍良好契合的具体不适配之处，却是世上最容易的事。[6] 厨房难以清洁、没有停车位、孩子在可能被别人的车撞到的地方玩耍、雨水渗入、过度拥挤和缺乏隐私、齐眼高度的烤架把滚烫的油脂溅进我的眼睛、金色塑料门把手辜负了我的预期，以及我找不到的前门——这些都是房屋与它本应契合的生活和习惯之间的不适配。这些不适配是必须塑造房屋的力量，它们清晰明确。由于它们以否定的形式表达，因此具体而切实，足以供人讨论。

Alexander 运用不匹配变量这一概念来分析设计问题。不匹配变量 是一个可以取0 或1的二元变量。取0表示该变量所代表的条件匹配。取值为1 则表示不匹配。不过，这只是对设计问题描述的一部分；另一部分是，不匹配变量如何——或者更准确地说，是否会——相互作用。不匹配变量之间的连接意味着，对其中一个变量的处理方式（设计、建造、定位等）作出任何改变，都可能影响另一个变量。Alexander 举例阐释分解的基本思想——将一组不匹配变量表示为一个网络，彼此相互作用的节点之间以链接相连：

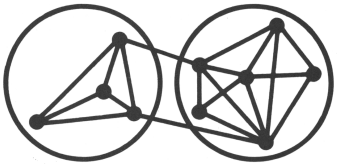
[5]获得博士学位后、出版《Notes》之前，Alexander 曾有机会建造这样一个村庄，但他拒绝了（据他说），因为他不知道如何“调动村庄里人们的力量”，共同协作，真正建成一个村庄 [1]。[6]Alexander 后来关于模式、无名的品质、中心、整体性和生命的研究，试图将“良好契合”的特征系统化。



接下来是这则注释：

> 现在，让我们回到适应这个问题。显然，这些彼此相连的不匹配变量无法各自独立地逐一调整。另一方面，由于并非所有变量的联系都同样紧密（换言之，变量之间不仅存在依赖关系，也存在独立性），因此总会有一些像下图圈出的那样的子系统，原则上可以相当独立地运行。

……以及这张示意图：



看到这些图示，我立刻想到，其中涉及的概念是内聚和耦合。在编程语言和软件领域，这些概念广为人知，是创建良好代码模块化的关键。内聚是指彼此强烈交互的事物被放在一起的程度；耦合则是指事物跨越边界进行交互的程度。其思路是将软件代码划分为模块，每个模块都是一个单元，其中的元素以某种方式共享信息，通常是单元内各元素共同设计所需的信息。跨越模块边界的信息传递应尽可能少，并通过明确规定的显式协议进行。先略作预告，谈谈我稍后会用到的类比：模块就像一个关系紧密的家庭，“彼此之间没有秘密”。一个家庭及其成员可以与另一个家庭互动，但互动方式正式得近乎陌生人之间的交往。

但《笔记》中所述的研究发生在20世纪50年代末，当时这些概念尚未以这些名称为人所知，概念本身或许也只是得到模糊的认识。Alexander 没有诉诸这些概念，而是借助稳态这一概念。W. Ross Ashby 在《大脑的设计》中对这一概念进行了描述和探讨；该书于[18], 1952年首次出版。

稳态是相互依存的元素趋向相对稳定平衡的状态，也是20世纪50年代人们从形式上思考生命系统的基础之一；那是人工智能诞生的年代。Ross Ashby 是一个思想圈的核心人物，该圈还包括控制论领域的学者。

Alexander 请读者设想一组按以下方式运作的灯：

1. 如果一盏灯亮着，那么每过一秒，它都有 50% 的概率熄灭2. 如果一盏灯熄灭了，那么每过一秒，它都有 50% 的概率亮起**如果** 它连接着一盏亮着的灯

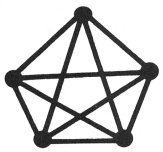
如果所有灯恰好都熄灭了，那么它们就再也无法亮起来。Alexander 解释说，可以把每盏灯看作一个不匹配变量：熄灭 状态对应匹配；亮起 状态对应不匹配。他接着说道：

> 一盏亮着的灯每秒都有 *50%* 的概率熄灭，这对应着每当出现不匹配时，人们就会努力加以纠正这一事实。熄灭的灯可以被与之相连的灯重新点亮，这对应着这样一个事实：由于变量之间存在联系，为纠正其他不匹配而发起的改变，可能会使形式中原本匹配良好的方面脱离原位。所有灯都熄灭时的平衡状态，对应着完美匹配或适应。此时所有不匹配变量的值都为 *0*。灯光系统迟早总会达到这一平衡状态。唯一的问题是，这需要多长时间？不难看出，除偶然因素外，这只取决于灯之间的互连模式。

例如，如果每盏灯都不与其他灯相连，那么每盏灯一旦熄灭，就会一直保持熄灭。如果每盏灯都与其他每盏灯相连，那么只有当它们碰巧（随机地）全部熄灭时，它们才会全部熄灭并保持熄灭。这最终会发生。他认为，在这两个极端之间，如果存在一些彼此连接紧密的灯簇，而簇与簇之间连接稀疏——或者根本没有连接——那么所有灯熄灭所需的时间，就会比灯之间连接紧密时更短。用我们在 21st 世纪第一个四分之一时期的话来说，这就是内聚与耦合。但 Alexander 似乎一开始关注的是这样一个问题：一个由不匹配变量构成的复杂设计问题中，所有变量同时变为0 的可能性有多大；因此，《Notes》中附录 2 的数学论证（在我看来）才显得如此奇怪。

1.2 Alexander 的分解问题

Alexander 通过将集合 S_3 划分为两个子集 S_1 和 S_2的例子，描述了他试图解决的算法问题。首先，S_1中的不适配应当以某种方式相互协调，或“有某种共同之处”；S_2 中的不适配也应如此。他说，判断一个集合中的不适配是否相互协调，最简单的方法是看它们之间的相互作用是否密集，就像这样：[7]



其次，由于必须将S_1 和S_2 的实现组合起来，才能形成S_3 的实现，同时还要考虑它们之间的不匹配联系，因此S_1 和S_2之间的链接应当很少。

[7]从稳态的角度来看，这是最糟糕的选择，因为与由五个彼此隔离的灯组成的集合相比，它需要大约五倍的时间才能稳定下来。

1.3 印度村庄问题解析；划分；数据错误；HIDECS

我对这样一种暗示颇感兴趣：一段大约在1960年编写的程序，竟能解决像印度村庄重新设计／重建这样复杂的问题。核心问题是，将一组设计需求 （共141 项）、它们之间的一组相互作用（约1400 项）划分成若干组，这些组大致代表连贯的设计子任务或组件。Alexander 的方法是创建一个优劣 度量，用数字来判定某种划分有多好。接着，设想生成 不相交的划分，并用这一度量测试 它们——计算机科学家将这种算法搜索技术称为“生成-测试”。《Notes》的附录对这个问题做了相当漂亮的分解。

我尝试复现 Alexander 的结果。附录中的原始数据存在许多笔误类错误，而他采用的优度度量计算方法也颇为奇特，这让我立刻感到困惑。笔误以及含糊不清的术语定义，使得理解这个看似直截了当的优度度量变得十分困难。此外，《笔记》并未直接说明，文中暗示的那个程序实际上确实生成了所呈现的分解。

《笔记》中的参考文献提到了两份似乎能提供解释的研究报告：我将它们称为“HIDECS 2”和“HIDECS 3”。直到调查开始很久以后，我才设法找到这两份报告。

所有需求的完整清单见附录 A。接下来是一张需求之间相互作用的表格。Alexander 写道：

> 这些不匹配变量之间的连接列于下表。为求简便，我只设定了一种连接强度，因此 $v = 1$；对于每一对变量 $v_{ij} = 0, 1,$ 或 -1。此外，连接的正负号并未标出：正如我们将在《笔记》附录 2 [中], 看到的，分解结果与连接符号无关。下表仅列出满足 $v_{ij} = 1$ 或 -1 条件的变量对。

表格开头如下；完整表格见附录 B。

1 与 8、9、12、13、14、21、28、29、48、61、67、68、70、77、86、101、106、113、124、140、1412 与 3、4、6、26、29、32、52、71、98、102、105、123、1333 与 2、12、13、17、26、76、78、79、88、101、103、119

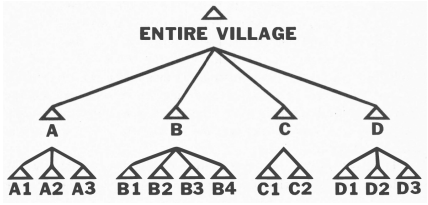
这份相互作用列表中存在笔误类错误；共有50 处，形式如下：“86 interactswith 3”被列入，而“3 interacts with 86”被排除。所有这些错误的1元相互作用都列于附录 B 中。[8] 在相互作用表的50 处错误中，有30 处涉及需求33：“应充分利用肥沃土地。”

[8]附录 F 中有关于这些错误的更多内容。

Alexander 对复杂分解问题的数学分析，以及他所构建的优度度量，其关键在于计算需求集合之间的链接数量。在获得其程序的源代码之前，这些错误使我难以理解他的分析，也因此难以理解他的优度度量。

在《笔记》附录1中，Alexander提出了印度村庄设计问题的分解方案——或者至少是一个方案。Alexander写道：

> 对图 *G*(*M*，*L*) 的分析向我们展示了下图所示的分解，其中*M* 本身分为四个主要子集*A*、*B*、*C*、*D*，而这些集合本身又分成十二个次要子集*A1*、*A2*、*A3*、*B1*、*B2*、*B3*、*B4*、*C1*、*C2*、*D1*、*D2*、*D3*，如下所示：



具体划分如下：

A1包含需求 7, 53, 57,59, 60, 72,125,126,128A2包含需求 31, 34, 36, 52, 54, 80, 94,106, 136A3包含需求 37, 38, 50,55, 77, 91, 103B1包含需求 39,40, 41, 44, 51, 118, 127,131,138B2包含需求 30, 35, 46,47, 61, 97, 98B3包含需求 18, 19, 22, 28, 33, 42, 43, 49,69, 74,107,110B4包含需求 32, 45, 48, 70,71, 73,75,104, 105, 108, 109C1包含需求 8, 10, 11, 14, 15, 58, 63, 64, 65, 66, 93, 95, 96, 99, 100, 112, 121,130, 132, 133, 134, 139,141C2包含需求 5, 6, 20, 21, 24, 84, 89, 102, 111, 115, 116, 117, 120, 129, 135, 137,140D1包含需求 26, 29,56,67,76,85,87,90, 92, 122, 123,124D2包含需求 1, 9, 12, 13, 25,27, 62,68, 81,86, 113, 114D3包含需求 2,3, 4, 16, 17, 23,78,79,82,83, 88, 101,119

（附录 C 包含 A、B、C、D 中的需求——也就是再高一个层级。）

除了尝试解读 Alexander 的方法，我还尝试了几种如今已成为经典的算法：K 均值聚类、轮廓系数聚类、Karger 算法，以及我自己设计的几种算法。在生成-测试方面，我使用了动态规划、贪心算法、模拟退火、遗传编程和一些简单的爬山技术。没有一种方法能接近复现上述《Notes》中的分解。

Alexander 借助程序得出所展示的分解——而事实证明，这也是一个很好的线索——那么这个程序可能是什么？强烈的提示就在《笔记》最后一个附录的最后几段中：

最后，我们来考虑一个实际问题：如何找到集合 M 的划分 π，使函数 $R(\pi)$[9] 取到最小的（代数）值。

为了找到集合 S 的最佳划分，我们采用一种爬山过程：基本上，先将集合划分为单元素子集，计算该划分的 $R(\pi)$ 值，然后将它与所有通过合并其中两个集合而得到的划分进行比较。接着，以这些划分中 $R(\pi)$ 值最低的划分替代原来的划分；这一过程继续进行，直到找到一个划分，其 $R(\pi)$ 值低于通过合并其中两个集合所能得到的任何划分。[10]

另一种爬山过程可以直接找到划分树，其方向恰好相反。它从全集合 S 开始，将其拆分为两个独立性最高的不相交子集：先计算一个随机二分划分的 $R(\pi)$ 值，再通过每次将一个变量从一侧移到另一侧来改进划分，直到无法进一步改进。随后，它对得到的两个子集分别重复这一过程，将每个子集再拆分为两个更小的子集，如此迭代，直到整个集合 S 被分解。[11]

这些方法以及其他方法都已为 *IBM 7090* 编写成程序，并在别处作了完整描述 [3, 16]。值得注意的是，颇令人惊讶的是，这些技术不会遭遇爬山过程常见的采样困难，而且即使计算时间很短，也能得到极其稳定的最优解。

1.4 我重现 Alexander 结果的首次尝试失败了

我最初想到的是尝试重现 Alexander 展示的那十二种划分。我手头有他的优度函数和各种优化算法；而且我一直在试验模拟退火，这是一种用于近似求解给定函数全局最优解的概率技术。下面是 Alexander 的优度函数，$R(\pi)$:

$$R(\pi) = \frac{\frac{1}{2}m(m-1)\sum_{\pi} v_{ij} - l\sum_{\pi} S_\alpha S_\beta}{\left[(\sum_{\pi} S_\alpha S_\beta)(\frac{1}{2}m(m-1) - \sum_{\pi} S_\alpha S_\beta)\right]^{\frac{1}{2}}}$$

对我来说，棘手之处在于：

$$\sum_{\pi} v_{ij}$$

而这是因为所列相互作用中存在错误。如果存在i, j，其中$v_{ij} = 0$和$v_{ji} = 1$，那么对 π 求和时，就需要将这一点考虑在内。

[9] Alexander 的优度度量。[10] 这实际上就是 HIDECS 3 报告中描述的 BLDUP 程序。[11] 这实际上就是 HIDECS 2 报告中描述的程序。

这样一来，π 的排列就会算出相同的R值——或许需要把v_{ij} 和v_{ji} 分别加进去。这看起来很麻烦。经过正文中大量的阐述，Alexander 终于（相当）清楚地说明，必然是$v_{ij} = v_{ji}$，因此，当我们看到$v_{ij} = 0$ 和$v_{ji} = 1$时，可以删去$v_{ji} = 1$ （也就是令$v_{ji} = 0$），或者提升v_{ij}（也就是令$v_{ij} = 1$）。由于我无从判断这种非对称相互作用是否真实存在，我倾向于认为，不小心把88 列入与3相互作用的元素清单，却原本想表达完全没有相互作用，这种情况很奇怪；因此，我通常会补上相互作用，而不是删去它们。也就是说，如果88 出现在3 的相互作用清单中，反之却不然，我的程序就会把3 添加到88的相互作用清单中。后来证明我错了；原因见附录 F。

不过，我当时认为 Alexander 的本意是让 v_{ij} 可以取值 0, 1,2，于是调整并猜测了 $R(\pi)$的各种变体。我得承认，这种用于数学处理的稳态方法让我摸不着头脑——主要是因为，考虑到 Alexander 展示的简单示例，以及如今我们对内聚、耦合和团检测的认识，这种方法显得很不自然。此外，《Notes》附录 2 中的论述并非我所见过的最严谨的，这意味着有些地方我不得不猜测他对某些符号或数学操作的含义。

1.5 寻找 HIDECS 程序；寻找故事

多次尝试复现《Notes》中的结果均告失败后，我终于拿到了两份 HIDECS 报告，以及一个转写为 Python 的 HIDECS 2 程序版本 [28]。与此同时，我还拿到了一篇题为《印度村庄的组件确定》 [4], 的论文，Alexander 在文中展示了一种与《Notes》中略有不同的优度度量。

两份 HIDECS 报告描述了五个不同的程序，每个程序都采用不同的方法来划分一个设计问题。HIDECS 2 报告描述了其中一个，HIDECS 3 报告描述了其中四个；每个程序都是对先前程序中发现的问题的回应。收到新材料后，我用 Common Lisp 编写了其中大多数程序的自有版本，但没有一个程序恰好产生《Notes》中的分解结果。然而，这并不是有趣的结论。

在找到这些报告之前，我一直专注于理解 Alexander 的算法方法，试图重走他的足迹——尽管我这样做时相当盲目。我认为，也许是文书（以及其他？）错误，加上与 20 世纪 60 年代初期的计算机、编程以及尚不成熟的算法基础之间的种种困难，导致他所报告的 Indian Village分解既无法与我生成的任何结果相匹配，也无法与我们将看到的、他的程序实际生成的任何结果相匹配。这种关注一直持续到我终于意识到，我所观察到的是 Alexander 正在应对这样一个问题：尝试使用形式化算法方法来处理现实世界的设计问题存在缺陷；我看到他正从《Notes》版本的 Alexander 转变为《城市不是一棵树》版本的 Alexander。而他之所以进行这一转变，是因为软件并没有

提供帮助——因为它根本无法提供帮助。我在自己的程序中遇到的难题，正是他苦苦应对的难题。

我没想到会这样。

1.6 展开 HIDECS 程序；研究其缺陷

名为 HIDECS 2 的程序旨在将组件划分为若干簇，使簇之间的信息传递尽可能少，也就是说，跨越簇边界的交互链接数很少。Alexander 试图解决内聚／耦合问题中的耦合部分。借助家庭类比，他试图通过在人群中找出一些簇来识别不同的家庭；每个簇中的人都很少与其他簇中的人交往。

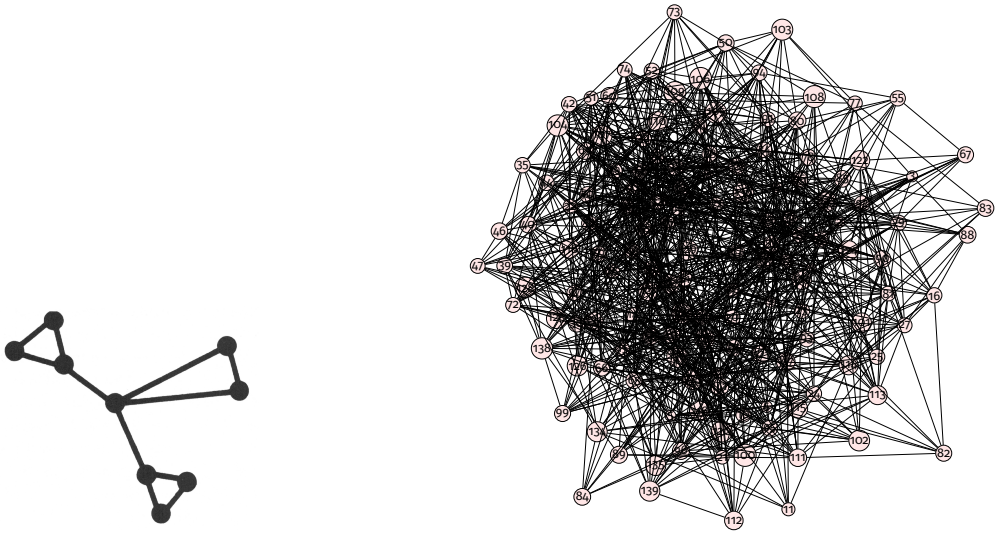
在 HIDECS 报告中，Alexander 将设计要求称为“顶点”或“不匹配变量”，并将它们之间的相互作用称为“链接”。HIDECS 2 首先通过随机选择过程将所有顶点划分为两个不相交子集（划分），通常这两个子集的大小并不相等。接着，程序会系统地尝试一次将一个顶点从一个子集移到另一个子集，并在每一步度量划分的优度，然后选出最佳方案。这样便将顶点集合二元划分为两个不相交子集；随后，程序分别对这两个划分重复相同的过程。最终得到一棵二叉树：树中的每个节点下方恰有两棵子树。计算机科学家将这种策略称为“自顶向下算法”。还要注意，优度度量只需衡量由两个集合构成的划分的优度。

在早期的研究中，我发现，当交互十分稠密时（例如印度村庄问题），通过寻找弱耦合来识别簇并不奏效。我还尝试考察内聚，以及内聚与耦合的组合。在《Notes》的正文中，Alexander 描述如何用他的程序分解设计问题时，展示了他所称的“典型图”：图 1a。

我编写的每个程序，以及 HIDECS 报告中的每个程序，都能对其进行分解。作为对比，图 1b 展示了印度村庄问题的交互网络可视化图。我有时会想，如果 Alexander 能像这样将印度村庄的网络可视化，他是否会更早放弃尝试设计分解方法来解决设计问题。

一旦开始在稠密的交互网络中寻找内聚性强的簇，而非仅仅寻找耦合松散的簇，重叠便会自然出现。我知道 Alexander 也注意到了这一点。首先，玩弄 Alexander 最早期的程序，并发现它表现不佳或表现不一致，自然会让任何好奇的人尝试其他方案。其次，因为他在 HIDECS 3 报告 [16] 中这样说：

> *HIDECS 2* 有三个重要的缺陷：
>
> *1.* 分解是通过一系列二元步骤进行的，这一事实会导致某些“错误”，因为系统与子系统之间的整体关联性未得到恰当考虑。



(a)典型图　　**(b)**印度村庄图

图 1 Alexander 的典型图与印度村庄实际图

2. 分解准则 *INFO*［优度度量］建立在关于系统性质的非常严格的假设之上 $G(M, L)$。具体而言，这些假设认为，M 的元素是二元变量，两个变量之间的相关性非常小，而多个变量之间的相关性则完全消失。这些假设使得我们难以在现实世界中找到能够由 *HIDECS 2* 的形式体系恰当表示的系统。

3. 构成系统中最自然子系统的元素子集并不总是互不相交，而往往会彼此重叠这一事实。

(H3)

正是这段话让我开始思考：在追随 Alexander 的算法之旅时，我发现了一个更重要的故事：一个如此醉心于形式化数学设计方法的人，怎么会背弃它，转而走上直觉、精神与艺术的道路？我也开始相信，Alexander 对自己面对的设计问题只有一个尚未完善的构想，而他在程序及其缺陷上的种种挣扎，正是他逐渐发现自己所追求之物的过程。尽管如此，我仍继续探究他在软件方面的种种挣扎，并努力复现他的成果。

一旦我掌握了理解 HIDECS 程序在做什么所需的全部源代码片段，我对改进结果的兴趣便淡了下来；我猜 Alexander 也是如此。显然，原始程序 HIDECS 2 是一种随机化算法，每次运行都可能输出不同的划分，但根据优度度量，它们所能达到的效果存在上限。此外，据我所知，Alexander 从未报告过印度村庄问题的完整划分。因此，很难判断他最初的程序表现如何。

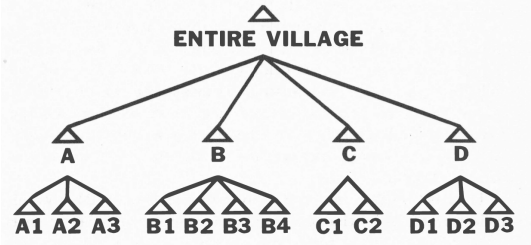
与我在现代硬件上运行的、用现代方式重新编写的他的程序相比。[12] [13]Alexander 在 HIDECS 2 报告中写道：

> . . . 程序需要以下输入……*LATIS*，即从格中选取的、供爬山算法使用的初始集合数量……选定的 *LATIS* 值越大，抽样过程就越有可能找到最优 *TSET*；但随着样本量增加，所需的计算机运行时间也会增加。

在预期计算时长相同的情况下，我的计算机运行的程序所支持的 LATIS 值可比他的程序大50–500 倍。[14] 对于优度度量，我决定采用他在《组件的确定》中描述的度量。这与 HIDECS 2 报告中的度量并不完全相同，但保留了排序——如果G_D 是《组件的确定》中的度量，而G_H 是 HIDECS 2 中的度量，那么[15]

$$G_D(\pi_1) < G_D(\pi_2) \iff G_H(\pi_1) < G_H(\pi_2)$$

总的来说，对于印度村庄，他的程序找到的划分，其优良度度量比我的差。唯一明确提到的、恰好划分为两个集合的例子，是将C 划分为C1 和C2：



位置

$$C1 = 8, 10, 11, 14, 15, 58, 63, 64, 65, 66, 93, 95, 96, 99, 100, 112, 121, 130, 132, 133, 134, 139, 141 \quad (1)$$

$$C2 = 5, 6, 20, 21, 24, 84, 89, 102, 111, 115, 116, 117, 120, 129, 135, 137, 140 \quad (2)$$

Alexander 的划分与我的程序使用多出250 倍的初始集合得出的划分，其优良度度量如下，数值越小越好（−91优于 −89）：

	G_D
CA	−89.60
rpg	−91.60

[12]在 Lispworks Common Lisp 中。[13]在一台 Apple Mac Pro（2013）上：3 吉赫，8核，64 GB内存。[14]尽管我的程序使用的是人类可读的数据结构，而不是 Alexander 的位级数据结构——我选择这种方法，是为了能够以最细的粒度理解程序在做什么。[15]G_H 是 HIDECS2-Actual，而 G_D 是 HIDECS2-Decomp，如下文所述。

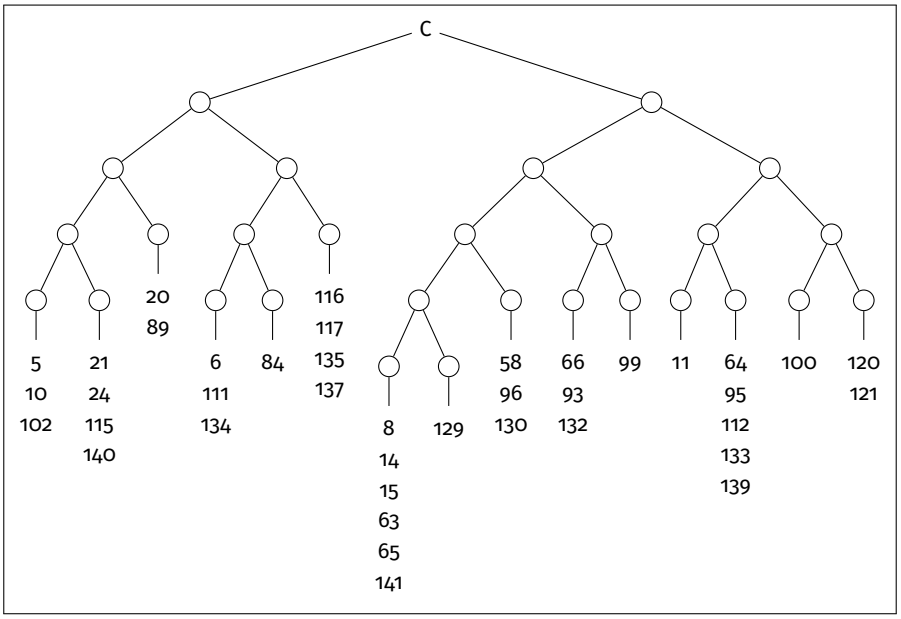


图 2 Alexander 的划分可能的 HIDECS 2 分解 C

如果 HIDECS 2 确实将C 分解为C1 和C2，那么它必定生成了一棵完整的树，如图 2 所示；随后 Alexander 手动合并较低层的节点和叶节点，得到C1 和C2。图 2 实际展示的是我的程序得出的分解；如前所述，其第一层的度量为 −91.60 （相当于C1和C2）。

我运行程序对 C 进行了 100 次分解，得到了 70 种不同的分解；它们的顶层分岔具有相同的度量值（−91.60），而叶节点层级的优良度度量介于 −136.94 和 −144.68之间。图 2 展示了其中一种（共两种）度量值为 −144.68的分解。

继续之前，我们先来看看 Alexander 所描述的各种优度函数。

1.7 优度度量

要理解 Alexander 的探索，就必须同时理解他设计的算法和优良度度量。附录D介绍了这些优良度度量及其直觉依据。

HIDECS2-Actual： 定义见 HIDECS 2 报告。HIDECS2-Decomp： 定义见《Determination of Components for an Indian Vil- lage》 [4]。它似乎曾用于《Notes》的分解。HIDECS2-Notes： 定义见《Notes》。HIDECS2-rpg： 我的内聚／耦合优度度量。HIDECS3-BLDUP： 定义见 HIDECS 3 报告，并用于 BLDUP。HIDECS3-STABL： 定义见 HIDECS 3 报告，并用于 STABL。

1.8 一个明显的异常

Alexander 在 HIDECS 3 中放弃了自顶向下的二叉分解方法，因为他观察到一个异常（参见引文（H3）。我在查看《Notes》中分解的前两层时发现了这个异常。我想看看 Alexander 的程序在划分整个村庄（所有划分中最难的一种）时表现如何，于是尝试弄清楚他向下一层的第一层划分是什么样的。在此过程中，我发现顶层的最佳划分并不能在下一层产生最佳划分。也就是说，自顶向下方法不一定能产生最佳划分。此次探索的详细内容见附录 G。

1.9 研究 Alexander 在《笔记》中难以捉摸的结果

如果 HIDECS 2 的某个版本确实生成了《笔记》中的分解，那么它必定生成的是一棵二叉树，而不是 Alexander 展示的那棵树。我尝试将 Alexander 的分解与我的程序生成的分解进行两种不同的比较：第一种是使用 HIDECS2-Actual 将分解生成到第4层（Alexander 所展示的最低层级），第二种则使用 HIDECS2-rpg。比较结果使用 HIDECS2-Notes进行；没有得出什么有趣的结论：进行更彻底的搜索后，得到的分解略好一些（按度量结果），其中 HIDECS2-rpg 生成的划分比 HIDECS2-Actual更加均衡。结果见附录 I。

1.10 我们如何判断一个分解是否“良好”?

有人可能会认为，通过查看归拢在一起的需求文本，可以观察两个分解的相对优劣。这种比较可以算是一种近距离阅读。而这些归拢在一起的文本能够为直观理解分解奠定基础。对于上面由我编写的程序生成的两个分解——*Entire Village (rpg$_1$)*（图16）和 *EntireVillage (rpg$_2$)*（图17）——我已将比较结果汇总成附录 J 中的一组表格。

关于这三种分解的另一组比较见附录 K。关于内聚与耦合的现代算法，请参阅附录 L。

2 《城市不是一棵树》

HIDESC 2 报告坚定地致力于将问题拆解为一棵由设计关注点的不相交集合构成的二叉树。论文《城市不是一棵树》对此予以否定；对于许多读过 Alexander 早期作品的人来说，这种否定出乎意料。[16] 然而，HIDECS 3 报告展现了 Alexander 如何逐渐发现，

[16]要再次体会这种否定有多么强烈，请参阅附录 E。

他在 HIDECS 2 中追求的编程理念并不能带来清晰的分解。参见引文（H3）。

我们稍微看看 HIDECS 3 中的程序。每个程序都针对早期程序的缺陷。

先说第一个缺陷：自顶向下处理时，HIDECS 2 从未考察二叉树叶节点所呈现的整体细粒度划分。第一个 HIDECS 3 程序（BLDUP）采用的方法，是从将顶点划分为单元素集合开始——对于印度村庄问题，这就是 141 个集合。程序会系统地尝试合并成对的划分，并度量整个划分的优劣；为此，Alexander 将 HIDECS 2 的度量（HIDECS2-Actual）扩展为 HIDECS3-BLDUP （附录D），使其能够处理一个划分中的多个集合。Alexander 对此的解释如下：

> 然而，任何每次将 *M* 划分为两个子集的算法都有一个缺陷：它没有充分关注子系统的格式塔，或整体模式，因此会引入一种偏差，凭借任何合理的直觉，这都算是一个“错误”……在 *BLDUP* 中，分解准则虽然本质上仍与 *HIDECS 2* 所采用的相同，但已经扩展，因此可以比较的不仅有二分划分，还有三分、四分等划分。这意味着，子系统的分解不必逐步定义，而可以一次性定义，从而更好地保留系统的整体性。

Alexander 在附录 H 中对此作了优雅的阐述。

程序 BLDUP 会将系统分解为不相交的集合，而不是一棵树。Alexander 发现，BLDUP 粗糙的收缩方法与基于耦合的优度度量结合后，随着分解变化，该度量的变化极其缓慢，效果并不理想，因此 BLDUP 很快就被弃用了。Alexander 随即转而研究 STABL，它采用了不同的方法和一种新的内聚度量。值得注意的是，Alexander 还写到了实验设置：

> 在 *STABL*、*SIMPX* 和 *EQCLA* 中，系统的元素不再被假定为二元变量，甚至不再被假定为变量。*M* 中的元素可以是任何类型，而元素之间的连接虽然仍只允许一次连接两个元素，却可以是任何形式。在这三种情况下，与 *BLDUP* 一样，子系统都是同时定义的，而非依次定义。

这意味着，他早先认为将设计问题视为稳态问题的直觉并没有帮到他。[17]

第二个程序（STABL）的做法是，先从由单顶点集合构成的划分开始，然后系统地尝试每次将一个顶点从它所在的集合移到其他集合中的某一个。Alexander 还创建了一种新的优度度量，同时考察耦合与内聚（HIDECS3-STABL,

[17]这是否也意味着，通过分解来提高设计和建筑物建造速度的做法岌岌可危？

见附录D）——也就是说，它既考察每个顶点与同一潜在划分中其他顶点的连接有多紧密，也考察有多少信息从一个划分传递到其他划分。使用早期优度度量的算法试图使这些度量最小化——也就是使耦合最小化；而这个算法则试图使优度度量最大化——也就是在使耦合最小化的同时使内聚最大化。请记住，他很可能还不知道内聚和耦合这两个概念。

Alexander 提出了一些有趣的看法。在谈到HIDECS3-STABL（他称之为“EXP”）时，他写道：

> 即使分解只有细微变化，*EXP* 函数也会剧烈波动。因此，*BLDUP* 中采用的、通过连续收缩进行的粗略爬山法并不适用于 *STABL*。事实上，根据经验，即便对于小型且简单的系统，基于收缩的爬山法也未能找到 *EXP* 值最佳的分解。*STABL* 则采用以下程序……

Alexander 在同一页的脚注中写道：

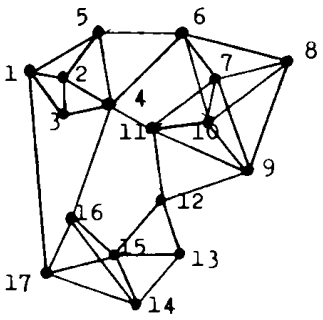
> 实际上，*EXP* 与（*1963*年 *b*）中给出的准则函数略有不同；[18] 这些改动使它在搜索空间中更加连续；原始函数存在严重的不连续性，以至于爬山法根本无法奏效。

EXP（也就是HIDECS3-STABL）似乎确实会计算出很大的值。Alexander 接着描述了程序 STABL，并在描述中无意间触及了一个他似乎未曾察觉的缺陷：

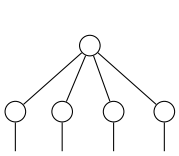
> 像之前一样，从 *SETS* 中的单位分解开始。基本操作是将一个元素从它所在的集合中移出，然后依次将它加入其他每个集合，并为每个由此得到的新分解计算 *EXP*。对每个元素都执行这一操作。这样得到的所有分解中最好的一个，也就是通过移动单个元素所能得到的最佳分解。程序执行这一更改，然后重新开始这一循环。程序会在找到某个分解时终止：该分解的 *EXP* 值高于通过移动其中任一单个元素所能得到的任何分解的 *EXP* 值。

为了理解这一缺陷，我们需要考察 Alexander 引入的一个新例子；见图3。Alexander 写道，他的程序生成了图4a所示的分解。使用HIDECS3-STABL进行度量时，其结果为36,862.235 。然而，我的重新编码／解读得出的最佳分解如图4b所示，其度量结果为265,361.889 （数值越大越好）。

[18]这里引用的文献——（1963 b）——是 Alexander 的一篇论文，题为《系统分解为子系统的最稳定分解》。该文于 1963 年投稿至 Academic Press 出版的期刊 *Informationand Control*（现已更名为 *Informationand Computation*，由 Elsevier 出版），但或许从未发表。我在该期刊 1961 年至 1965 年的任何一期中都没有找到这篇论文，在其他任何地方也没有找到。

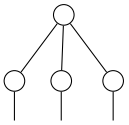


■ **图3** HIDECS3-Graph



1	6	11	14
2	7	12	15
3	8	13	16
4	9		17
5	10		

(a) Alexander 分解



1	6	12
2	7	13
3	8	14
4	9	15
5	10	16
	11	17

(b)rpg 的分解

■ **图4** HIDECS3-图分解

问题在于，Alexander 说“因此，所有如此获得的分解中最优的一个，就是通过移动单个元素所能获得的最佳分解”时，忽略了可能存在并列的情况。因此，他要么必须作出选择并在后续过程中接受这一选择，要么进行树搜索——而不能只是进行爬山搜索。对于这个问题，第一次遍历会产生74 种可能的首次移动，而且它们具有相同的优度度量。在我的程序进行的一次运行中，随后出现的选择点分别有2、42、3、2、20、2和2 种可用选择。

我没有找到任何证据表明他知道这件事。请注意，我的程序会进行穷举搜索，以找出最佳分解（根据HIDECS3-STABL）。

2.1 我的三个谜题得到解答；一个谜题浮现

至此，我的三个谜题已经得到处理。首先，《笔记》中的优度度量似乎并未直接用于创建其中展示的 Indian Village分解。也就是说，HIDECS 2 谈到使用 HIDECS2-Actual，但正如《一个印度村庄的组件判定》 [4]所揭示的，Indian Village分解是使用 HIDECS2-Decomp创建的。这两种优度度量都不是 HIDECS2-Notes，不过，在将集合划分为两个子集时，HIDECS2-Decomp 和 HIDECS2-Notes 计算出的值相同。

其次，尽管 Alexander 在《笔记》中首先介绍了自底向上方法——本质上就是 BLDUP—— 但真正产生所示分解的是将原始问

题逐步拆分为二元划分的自顶向下方法。起初，我之所以放弃自顶向下方法，是因为所示的划分并非二元划分。

第三，将“不匹配变量”视为二元（随机）变量的奇怪做法已被摒弃；这种做法与我如今将问题视为内聚／耦合情形的观点更为相符。

新的疑问是：如果《笔记》中的印度村庄分解本应是一个好的分解——值得展示、剖析并详加讨论——那么 Alexander 为什么会在 HIDECS 3 报告中写道“HIDECS 2 有三个重要缺陷”（参见引文（H3）），随后又着手研究四种程序来纠正这些缺陷?

2.2 Alexander放弃将系统分解为不相交集合

HIDECS 3 报告中的四种程序，最后两种以放弃创建不相交集合划分为基础。Alexander 写道：

> 最后，在 *SIMPX* 和 *EQCLA* 中，子系统的定义方式使它们彼此重叠，而非互不相交。事实上，在这两种情况下，分解不是一棵树，而是一个格。

一旦迈出转向内聚研究的第一步，Alexander 便更加坚定地朝这个方向前进。1957 年，两位研究者改进了最早的一种团检测算法：他们是 Frank Harary 和 Ian Ross [24]；Alexander 直接引用他们的论文，并将这一算法用于 SIMPX。其核心思想是：当一个划分中的每个顶点都与其他所有顶点相互作用时，这个划分就非常紧密——这正是团的定义。例如，如果有三个顶点，每个顶点都与另外两个相互作用；如果有四个，每个顶点都与另外三个相互作用——这就是内聚性最强的团。HIDECS 3 中第三个和第四个程序都是这一算法的变体。在他的典型图（图 1a）中，可以看到三个由顶点构成、相互作用密切的三角形；它们就是团。

Alexander 在 HIDECS 2 的论文和程序中注意到了这种紧密的内聚关系。在将一个集合划分为若干子集时，程序一旦发现这样的完全图，就不会尝试进一步细分它们。

Harary 在其 1969年 著作《《图论》》[23]中指出，Harary-Ross 算法存在缺陷。我没有使用该算法，而是采用了一个更新的算法：Bron-Kerbosch 算法的 Tomita 变体。1967 年，Edward Bierstone 和 Allen Bernholtz 开发了一种半格重组程序，并在报告《HIDECS-RECOMP PROCEDURE》 [19]中对此进行了介绍。我编写了程序来可视化生成的分解。与其尝试描述该算法，不如直接引用 Bierstone 和 Bernholtz 的话：

> 通过构建由设计问题中细微需求及其相互作用组成的系统，并运用数学过程将系统分解为子系统，再以层级方式重新组合这些子系统，我们便能让具体的

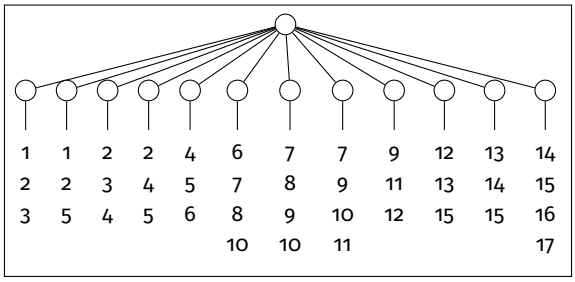


图 5 HIDECS3-Graph 的 Tomita 分解

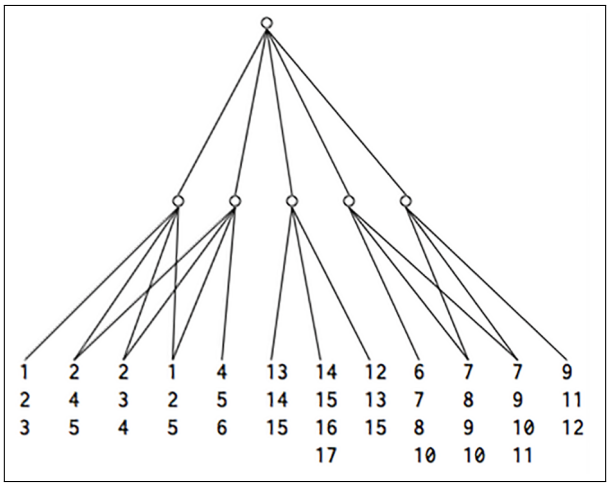


图 6 HIDECS3-Graph 的 Tomita 分解之 Bierstone-Bernholtz 重组

> 问题根据需求之间的内部相互作用生成自身结构，而不是随意将问题划分为声学、分区、流线等方面，也不是从“卧室”之类的形式预设出发。此外，子系统构成的系统采用半格结构（也就是说，层级结构的各个层级都可能出现重叠），从而避免将问题划分为人为树状结构的惯常倾向。在这种树状结构中，子问题可以按层级组合，但在任何层级都不会重叠。问题的半格结构仅基于元素之间的因果交互，因此只有在问题结构确定之后，才会作出形式决策。

本质上，该算法会考察一个集合划分，计算出一组合理的相互作用，并创建一个表示这些相互作用的半格结构。这是一种复杂性可视化。图 5 展示了 Tomita 对 HIDECS3-Graph 进行的分解。图 6 展示了 Bierstone-Bernholtz 得出的重组；它主要呈现重叠复杂性。

Alexander研究过的最后一个设计问题示例见附录 P。

3 逐渐显现的洞见

在我的调查过程中，问题陈述中那种冰冷而抽象的意味令我印象深刻：141 个顶点和将它们连接在一起的 ~1400 链接。然而，这些要求来自真实的人，也反映了真实的问题。Alexander写道：

> 这里列出的所有不匹配变量都采用正面形式表述；也就是说，它们是村庄要正常运作就必须积极满足的需求或要求。然而，它们全都源自对潜在不匹配的陈述：每一项都代表村庄中可能出问题的某个方面，因此属于不匹配变量。……

此外，顶点被划分为 13 个群： 宗教与种姓； 社会力量；农业； 畜牧业； 就业； 水； 物质福利； 交通；森林与土壤； 教育； 健康； 实施； 区域、政治与国家发展；以下是每个群中的部分条目——完整集合见附录 A：

7. 牛被视为神圣的动物，且有素食观念。12. 男子群体聊天、抽烟，甚至深夜仍如此。36. 保护农作物免遭窃贼、牛、山羊、猴子等侵害。53. 改良牛。65. 使乡村经济基础多样化——并非所有职业都是农业相关。67. 饮用水应当优质、甘甜。79. 提供凉风。98. 日常农产品需要以低廉且稳定的价格（季风期间）进入市场。106. 幼树需要防范山羊等动物。112. 能够进入中学就读。125. 预防营养不良。129. 派系拒绝合作或达成共识。133. 与邻近村庄实现社会融合。

Alexander 在《笔记》中写道：

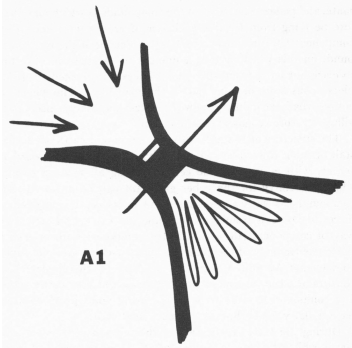
> 最重要的是，设计师必须抵制一种诱惑：不要用众所周知的语言概念来概括树的内容。他不应指望对树的一种划分中的每个 [集合] S [都能看到] 某种语言范式，例如“这一项涉及形式的声学方面”。如果他试图这样做，就会让语言上的先入之见干扰程序呈现给他的模式，从而违背分析的全部目的。设计程序的作用在于，让每一组需求都使他关注一个主要的物理与功能问题，而不是某个语言上或预先设定的问题。这样一来，它就迫使他把心智中如同幼苗般萌生的物理构想整合起来，并由此建立起物理秩序。

在尝试重现《Notes》中的分解时，我曾设想，Alexander 是手工完成这项工作的，而且他考察了需求陈述所表达的现实

。我一些带有猜测性质、尚未受 HIDECS 启发的程序，考虑了13 个群，或根据它们的含义对它们进行的其他各种分组。事实上，Alexander 在描述他的分解时，会讲述这些部分如何相互关联。下面就是其中一个例子，先概述四个主要划分：

> 四个主要图示大致如下：*A* 涉及牛、牛车和燃料；*B* 涉及农业生产、灌溉和分配；*C* 涉及村庄的集体生活，包括社会和工业生活；*D* 涉及村民的私人生活、住所和小规模活动。四者之中，*B* 最大，横跨约一英里；而*A*、*C*、*D*都较为紧凑，彼此匹配在一个横跨约*200*码的区域内。

值得注意的是，这段描述意味着，在印度村庄设计问题中，两个设计关注点可能仅仅因为它们在现实世界中彼此相邻而发生交互。他接着描述A1——他先从一张示意图讲起：



> 牛的神圣性（*7*）往往使人们不愿控制它们，因此除非加以妥善管束，否则它们会四处游荡，啃食并毁坏农作物。同样，提升牛的品质（*53*）需要采取措施，防止母牛接触四处游荡的灌木公牛；还需要某种中心场所，用来饲养纯种公牛（即使只是供其临时配种），并设立一个为灌木公牛阉割的中心。牛病（*57*）主要通过牛蹄间的接触传播，经由污垢传播——如果牛定期经过装有消毒用高锰酸钾的蹄浴池，就能防止这种情况。如果要合作销售牛奶（*59*），就必须（除加工设施外）配备集中挤奶设施；如果母牛在家中挤奶，再将牛奶集中起来，个体农户就会掺假。[19]防止饥荒（*72*）、预防营养不良（*125*）以及保障农作物价格（*128*），都意味着需要某种中心，既提供储存设施，又生产营养食品（牛奶、鸡蛋、花生）。如果村级工作人员（*126*）

[19]这句话或许提供了一个机会，让我们探究Alexander对真实印度村庄的了解在多大程度上影响了他的划分。他似乎不得不指出“个别农民会掺假牛奶”，但A1 中的需求似乎与此毫无关系。事实上，整套需求中没有任何一项与此有关。

要经常来到村庄提供帮助，就必须在这里为他提供住处。畜力（*60*）要求一方面能够往返于牛栏（*A2*），另一方面能够通往道路。

4 对美的探寻

Alexander 在《笔记》之后的职业生涯，并非致力于寻找更好的方法来分解设计问题，而是着眼于理解是什么让美好的事物和地方如此美好。我将这种美好称为美；Alexander 则避开了这个词。我们在《城市不是一棵树》中已能看到这种探寻（强调为我所加）：

> 至关重要的是，我们要发现古老城镇中赋予它们生命的特质。……如今，太多设计师似乎一味追求过去的物质与形态特征，而不是探寻过去城镇恰好拥有、而我们现代城市观念尚未发现的抽象组织原则 。这些设计师未能为城市注入新的生命，……他们未能发掘城市的内在本质。

这种内在本质始于半格结构，以及这类结构所支持的丰富人际互动——它与人的福祉的关系，远大于与艺术之美的关系。《模式语言》 [15] 和《建筑的永恒之道》 [8] 探讨了是什么让城市、城镇和建筑物拥有生命，或者用 Alexander 的说法，拥有无名的品质 （QWAN）。Alexander 和他的团队提出了模式 的概念，并收录了253种在日常生活中支持福祉的空间构型实例。例如，建筑物侧面狭窄的窗台让人觉得不稳妥，大多数人只会在那里晾衣服或放自行车。然而，六英尺阳台（模式 #167）能带来舒适与安全感，为小桌和椅子提供空间，并邀请人们将建筑物内的生活与街道上的生活连接起来，在社会和物理层面上融入城市肌理。在《永恒之道》中，Alexander 曾这样描述 QWAN：

> 在人、城镇、建筑物或荒野中，存在一种核心品质，它是生命与精神的根本准则。这种品质客观而精确，却无法命名……为了界定建筑物和城镇中的这种品质，我们必须先明白，每个地方的特性，都是由那里不断发生的某些事件模式赋予的。这些事件模式总是与空间中的某些几何模式相互交织。事实上，正如我们将看到的，每座建筑物和每座城镇最终都是由空间中的这些模式构成的，除此之外别无他物：它们就是构成建筑物或城镇的原子和分子。

Alexander 在印度的一个村庄居住，并观察那个村庄复杂而极具人情味的自然风貌，由此提出了印度村庄的需求。由于无法理解它，他满怀希望地踏上了寻找自动化分解方法的道路。最终，图 1b 的复杂性挫败了这番探索，也让他认识到丰富结构的必要性，继而提出 QWAN。在《建筑的永恒之道》中，Alexander 继续写道：

> 在一个世界——一栋建筑或一座城镇——中，如果各种模式具有那种无以名状的品质，并且充满生命力，会发生什么？
>
> ... 它的每个部分，在每个层次上，都变得独一无二。支配世界某个局部的模式本身相当简单。但当它们相互作用时，便会在各处形成略有不同的整体构型。这是因为地球上没有两个地方的条件完全相同。而每一个细微的差异，也会进一步造成其他模式所面对的条件有所不同。 . . .
>
> 自然从来不是模块化的。自然中充满了几乎相似的单元（波、雨滴、草叶）——但尽管同一类单元在整体结构上都很相似，却没有两个单元在细节上完全相同。

Alexander 并未止步于 QWAN 和模式；他注意到还有某种更多或不同的东西在发挥作用，使得例如一块土耳其祈祷毯会比另一块“更好”，更有生命，也更完整；这正是诗歌与散文的区别所在。Alexander 在《秩序的本质》 [10]中阐述了一种关于万物深层秩序的理念：

> 我们所说的“生命”，是一种普遍状态，存在于空间的每个部分，程度或多或少：砖、石头、草、河流、绘画、建筑物、黄水仙、人类、森林、城市。进一步说：这一观念的关键在于，空间的每个部分——每个相连的空间区域，无论大小——都具有某种程度的生命；而这种生命程度是明确界定的、客观存在且可测量的。

秩序——无论是自然系统中的几何形态，还是优良人工制品中的几何形态——都可以围绕 Alexander 所说的十五种基本几何属性“中心”来组织，设计便会逐渐展开</style。. ..

但那是另一篇文章.....或者一本书。

5 我，那炽烈的存在

我们能从这些探索中学到什么？Christopher Alexander 的历程，是洞见逐渐显现的过程，而非一次宏大的“啊哈！”时刻。首先是一些细小的洞见，关于分解、内聚与耦合问题的洞见，这些问题是在计算发展的早期被审视的。

虽然他并不具备如今所说的内聚与耦合概念，但他在两者之间游刃有余。他并不避讳使用他人发明的技术和算法：20世纪50年代末，已有一些随机化算法，并且广为人知；团检测算法也已为人所知，Alexander 承认自己使用过其中一种。Alexander 和 Manheim 并非拙劣的程序员——HIDECS 程序以汇编语言编写，并展现出对所谓“bumming”技术的娴熟运用。[20]

[20]Bum：“使效率极高，无论是在时间还是空间方面，往往以牺牲清晰度为代价。”

其次，Alexander 利用自己开发的软件来帮助自己理解他试图解决的问题——随着程序中的缺陷逐渐显现，他对问题的理解也不断加深；有时他会尝试改进程序，有时则会重新表述问题。

最后，也是最重要的一点，Alexander 经历的种种挣扎教会他不再拘泥于形式主义，而是另寻他途，以理解设计。请留意，从这些非常早期的探索，到他职业生涯接近尾声时的探索，思想是如何逐步发展的。这是他的重要洞见：设计需要人的情感。试想一下，这颗心智是如何从《笔记》出发，逐步发展至以下观点的：

> 在本书的框架内，这种分解所形成的集合树，是对由 M 定义的设计问题的完整结构描述；因此，它可作为形式综合的程序，用以解决这一问题……
>
> 任何复杂物体的组织结构都是层级式的。诚然，如果我们愿意，也可以把这一观察视为一种幻觉，认为这是人脑倾向于通过结构和层级来观察世界所造成的。但总的来说，有充分理由相信，世界的层级划分是现实的一种客观特征。[5]

这段话最初出自20世纪60年代初；接下来是《城市不是一棵树》中的内容：

> 对于人类心智而言，树是承载复杂思想最容易的工具。但城市不是、不能也绝不应当是一棵树。城市是生命的容器。如果这个容器因为自身是一棵树，而切断了其中生命脉络的重叠，它就会像一只装满直立剃刀的碗，随时准备割碎交托给它的一切。在这样的容器中，生命会被割得支离破碎。如果我们把城市建成树，它们就会把其中的生命割得支离破碎。[14]

大约在同一时期，在另一篇文章中：

> 我本人，正如你们中的一些人所知，最初是一名数学家；在*20*世纪*60*年代初，我花了几年时间，试图界定一种与科学相结合的设计观，在这种设计观中，价值也能从后门进入。我也尝试过运筹学、线性规划，以及数学和科学能够为我们提供的所有令人着迷的玩具，并试图看看这些东西如何能赋予我们一种全新的设计观：设计什么，以及如何设计。
>
> 然而，最终我认识到，这种观点本质上并无助于产生新的成果；而且，出于数学和科学上的原因——如果你愿意这么说的话——我们必须找到一种理论，使价值与事实合而为一。在这种理论中，我们认识到这里存在一种核心价值，可以通过感受去接近，也可以通过自我消融去接近；它与事实有着深刻的联系，并构成一幅单一而不可分割的世界图景，在其中能够取得富有成效的成果。[6]

Alexander 谈到 1960年代所谓的“设计方法运动”，他被视为这一运动的先驱。1971年，他曾被引述说：

> 我已经与这个领域划清界限了……所谓的“设计方法”几乎没有任何内容能对如何设计建筑物提出有用的见解，所以我现在连相关文献都不读了……我会说，忘了它吧，把整件事都忘掉……[7]

接着，在《秩序的本质》第四卷中：

> 那个炽烈的「我」，是只有当我体验并彰显自己的感受时，才能触及的东西。究竟是什么感受？在建筑物、柱子、房间中，我究竟追求什么？我该如何为自己定义它，才能清晰地感受到它，让它成为指引我日常行动的灯塔？……
>
> 我最具体的追求，是悲伤。我努力让建筑体量承载所有的感受。为了触及这种感受，我努力让建筑物承载我永恒的悲伤。就建筑物所能达到的程度而言，它几乎让我落泪。[12]

我们从他早年的心智中，看到了他的心智后来如何发展。阅读 HIDECS 报告中的背景故事，并仔细阅读他正式出版物中的文字，我们便会明白：计算机的现实，以及编程语言的匮乏，是严厉的老师；它们教会 Alexander，冷抽象需要一双温暖的人类之手和一双历经世事、含着泪水的眼睛；机器可以成为探索的伙伴，而城市不是一棵树。

A 需求

引用 Christopher Alexander 在《笔记》中的话：

> 以下是一个实例，摘自近期发表的一篇论文《确定一个印度村庄的组成部分》[4]。所讨论的问题如下：一个由六百人组成的农业村庄需要重新规划，使其能够匹配印度农村正在形成的当前及未来条件。

以下是该实例中采用的设计考量。

宗教与种姓

1. 哈里जन人被视为仪式上不洁、不可接触等。2. 妥善处理尸体。3. 关于房屋门不得朝向南方的规定。4. 某些水和某些树木被认为是神圣的。5. 为节庆和宗教集会提供场所。6. 建造寺庙的愿望。7. 牛被视为神圣的，并持有素食观念。

8. 各个种姓的成员尽可能从事其种姓职业。9. 同一种姓的成员喜欢聚在一起并与其他人分开，也不会一起吃饭或饮水。10. 铺张婚礼的需求。

社会力量

11. 婚姻对象来自另一个村庄。12. 大家庭住在一所房屋里。13. 即使分居后，家庭团结与邻里和睦依然存在。14. 村庄经济整合采用实物支付方式。15. 现代趋势转向现金支付。16. 女性在沐浴、取水、前往田间厕所的路上等时候会广泛交谈。17. 村庄有固定的男性社交群体。18. 需要将土地分给连续几代人的儿子。19. 人们希望拥有个人土地。20. 不同派系的人都不愿彼此接触。21. 消除不可接触制。22. 废除扎明达尔制度并解决土地分配不均。23. 男子群体聊天、吸烟，甚至熬到深夜。24. 为村庄活动提供场所——舞蹈、戏剧、歌唱等，以及摔跤。25. 为身体残障者、老年人和寡妇提供援助。26. 情感体系：不愿摧毁旧有生活方式；珍视支配沐浴、食物等方面的现有习惯。27. 家庭具有权威主义性质。28. 明确所有权界限和维护责任。29. 提供按性别、种姓和年龄分隔的每日沐浴设施。

农业

30. 从区总部高效、快速地分配种子、肥料等。31. 高效地将肥料、粪肥和种子从村庄仓储分配到田地。32. 开垦并利用未耕地。33. 充分利用肥沃土地。34. 全面收集天然粪肥（动物和人类的）。35. 保护农作物免受昆虫、杂草和疾病侵害。36. 保护农作物免遭窃贼、牛、山羊、猴子等侵害。37. 提供储存设施，以便分配和销售农作物。38. 提供打谷场并保护其免受劫掠者侵扰。39. 优质棉花和经济作物。40. 优质粮食作物。41. 优质蔬菜作物。

42. 高效耕地、除草、收割和平整土地。43. 土地整合。44. 必须将田地里的农作物运回家。45. 发展园艺。46. 尊重传统农业实践。47. 旧农具损坏等情况下，需要添置新农具。48. 土地短缺。49. 合作农业。

畜牧业

50. 饲料的妥善储存。51. 提高现有饲料的质量。52. 增加现有饲料的数量。53. 牛的改良。54. 提供牛只饲喂条件。55. 牛的饮水获取。56. 为牛提供遮蔽住所（用于睡眠、挤奶和喂养）。57. 保护牛免受疾病侵害。58. 发展其他畜牧业。59. 高效利用和销售乳制品。60. 尽量减少畜力的使用，以缓解短缺压力。

就业

61. 为暂时（季节性）失业的劳动者提供充足的灵活就业机会。62. 提供家庭手工业、工匠作坊和培训。63. 发展乡村工业。64. 简化劳动力往返乡村、田地、工业场所和房屋的流动。65. 实现乡村经济基础多元化——并非所有职业都从事农业。66. 高效供应和使用电力。

水

67. 饮用水应甘甜、优质。68. 便于取用饮用水。69. 尽可能充分地从现有水源中获得灌溉效益。70. 充分收集地下水用于灌溉。71. 充分收集季风雨水以供使用。72. 季风雨水不足时防止发生饥荒。73. 为未来保护水资源。74. 维护灌溉设施。75. 排干土地，防止内涝等问题。76. 控制洪水，保护房屋、道路等。

物质福利

77. 村庄和独立住宅必须免受火灾侵害。78. 提供荫凉处，供人坐下和行走。79. 提供凉风。80. 保障牛的安全。81. 保障妇女和儿童的安全。82. 提供儿童在监督下玩耍的场所。83. 夏季人们在户外睡觉。84. 为潘查亚特记录、会议等提供住所。85. 每个人用于坐卧的住所都应免受雨水侵袭。86. 避免过度拥挤。87. 安全储存商品。88. 提供洗涤和晾晒衣物的场所。89. 提供商品以供出售。90. 改善备餐条件。91. 提供并储存燃料。92. 房屋必须清扫、冲洗并排水。93. 照明。

交通

94. 为牲畜交通提供便利。95. 尽可能方便地到达公交车站。96. 方便到达火车站。97. 尽量降低散装农产品（谷物、马铃薯等）的运输成本。98. 日常农产品需要以低廉且稳定的方式（季风期间）运往市场。99. 工业需要强有力的交通支持。100. 到1965年，为每个村庄配备自行车。101. 村庄内的行人交通。102. 为游行队伍提供住所。103. 方便牛车驶至房屋，以运送大量谷物和饲料。

森林与土壤

104. 保持植物生态健康。105. 森林土地不足。106. 幼树需要防范山羊等动物的侵害。107. 土壤保持。108. 道路和住宅侵蚀。109. 侵蚀土地、冲沟等的复垦。110. 防止土地侵蚀。

教育

111. 提供初等教育。112. 能够进入中学就读。113. 保证良好的在校出勤率。114. 发展女性独立活动。115. 提供开展青年活动的机会。116. 提高成人识字率。117. 传播节育、疾病等方面的信息。118. 开展能够以身作则、带动推广的示范项目。119. 高效利用学校；不让学生分心。

健康

120. 村民可获得的疾病治疗措施。121. 分娩、产前和产后护理及节育设施。122. 人体排泄物处置。123. 防止细菌滋生和致病因子。124. 防止通过传播媒介、感染和传染传播人类疾病。125. 防止营养不良。

实施

126. 与村级工作人员密切接触。127. 与区块发展官员和推广官员接触。128. 农作物价格保障。129. 各派系拒绝合作或达成一致。130. 需要增加激励措施并提升抱负。131. 潘查亚特必须拥有更大的权力和更高的威望。132. 需要开发能够获得政府补贴的项目。

区域、政治与国家发展

133. 与邻近村庄实现社会融合。134. 希望跟上邻近村庄的成就。135. 传播有关税收、选举等方面的官方信息。136. 为流动种姓群体、外来劳动力等提供住所。137. 无线电通信。138. 实现经济独立性，以免给国家的交通和资源造成负担。139. 通过桥梁、道路、医院和学校实现适当连接。140. 培养农村社区精神：消除自私和孤立主义。141. 防止年轻人和哈里真人迁往城市。

B 相互作用

附录 A 中列出的印度村庄问题的需求彼此相连；每个连接都代表一种设计相关相互作用。这些就是示例中使用的设计相互作用。

1 与 8、9、12、13、14、21、28、29、48、61、67、68、70、77、86、101、106、113、124、140、141 互动 2 与 3、4、6、26、29、32、52、71、98、102、105、123、133 互动 3 与 2、12、13、17、26、76、78、79、88、101、103、119 互动 4 与 2、5、6、17、29、32、45、56、63、71、74、78、79、88、91、105、106、110、124 互动 5 与 4、6、10、14、17、21、24、46、102、113、116、118、131、133、140 互动 6 与 2、4、5、20、21、53、58、61、63、82、102、111、117、130、134、135 互动 7 与 20、31、34、53、57、58、59、80、85、86、94、105、106、123、124、125 互动 8 与 1、9、14、15、21、22、25、27、48、58、59、61、62、63、64、65、89、95、96、99、111、112、114、115、116、121、129、136、140、141 互动 9 与 1、8、11、12、13、15、17、18、20、21、28、29、36、43、49、56、62、64、80、81、101、113、118、124、129、136、140、141 互动 10 与 5、13、14、15、18、24、26、65、68、93、102、134 互动 11 与 9、12、64、95、96、114、133、134 互动 12 与 1、3、9、11、17、18、19、25、26、28、34、36、41、43、49、56、62、63、76、80、81、85、86、87、90、91、93、121、122、129、140、141 互动 13 与 1、3、9、10、17、20、25、28、33、34、36、37、41、45、56、62、68、79、80、81、83、86、91、94、101、106、108、121、122、129、137、140、141 互动 14 与 1、5、8、10、15、19、20、21、28、30、40、43、44、47、54、62、63、64、65、86、97、121、129、130、133、138、141 互动 15 与 8、9、10、14、18、21、22、37、39、41、44、45、46、58、59、61、62、63、64、65、66、95、96、97、98、112、116、125、127、128、129、130、132、133、135、137、138、141 互动 16 与 27、29、34、68、78、79、82、88、95、101、114、117、119、122 互动 17 与 3、4、5、9、12、13、20、23、27、37、38、43、49、65、69、80、81、86、89、101、110、115、116、117、118、126、129、135 互动 18 与 9、10、12、15、19、26、28、31、33、42、43、44、47、48、49、60、65、69、70、74、77、79、85、97、98、103、110、140、141 互动 19 与 12、14、18、22、26、28、32、33、36、37、38、41、45、49、69、71、86、104、106、107、110、118、126、140 互动 20 与 6、9、13、14、17、24、29、30、36、37、43、54、64、68、80、84、89、102、116、117、129、131、133、140 互动 21 与 1、5、6、8、9、14、15、24、61、63、89、95、96、111、112、113、115、116、137、139、140、141 互动 22 与 8、15、19、31、32、33、36、42、44、47、49、60、61、64、69、71、74、97、98、104、107、110、127、140 互动 23 与 4、17、31、34、62、63、71、76、78、79、82、83、93、95、100、101、105、115、116、119、126、132、137

24 与 5、10、20、21、38、82、93、100、101、102、108、115、130、133、135、140、141 互动 25 与 8、12、13、26、27、36、62、81、90、92、111、114、116、120 互动 26 与 2、3、10、12、18、19、25、29、31、33、34、41、53、56、58、62、67、68、76、85、90、91、92、93、108、113、122、123、124、130 互动 27 与 8、16、17、25、29、62、68、81、86、88、90、92、113、114、122、130 互动 28 与 1、9、12、13、14、18、19、29、31、33、34、35、36、37、38、42、45、49、50、54、55、56、62、74、92、103、106、107、108、109、110、118、127、129、131 互动 29 与 1、2、4、9、16、20、26、27、28、41、67、71、81、85、88、92、101、119、122、124 互动 30 与 7、14、20、31、33、35、40、47、63、95、97、98、107、126、127、129、130、131、132、133、139 互动 31 与 7、18、22、23、26、28、30、33、34、35、37、40、43、44、49、50、52、54、59、60、80、89、94、98、106、107、109、128、131、132 互动 32 与 2、4、19、22、34、42、43、46、48、52、54、60、61、63、65、69、70、71、73、74、75、104、105、107、109、110、122、129 互动 33 与 13、18、19、22、26、28、30、31、34、35、36、41、54、56、59、74、78、80、90、91、92、94、105、107、118、122、123、124、136 互动 34 与 7、12、13、16、23、26、28、31、32、33、41、54、56、59、74、78、80、90、91、92、94、105、107、118、122、123、124、136 互动 35 与 28、30、31、33、39、42、43、46、61、79、104、118、137 互动 36 与 9、12、13、19、20、22、25、28、33、38、40、41、43、45、52、54、61、68、80、81、86、94、106、110、136 互动 37 与 13、15、17、19、20、28、31、38、43、44、49、50、72、76、97、103、128、133、140 互动 38 与 17、19、24、28、36、37、40、42、43、44、50、52、58、61、68、76、78、79、94、97、106、128 互动 39 与 15、33、35、44、48、62、69、70、72、75、97、104、118、127、134、137、138 互动 40 与 14、30、31、33、36、38、42、44、48、69、70、97、104、107、118、125、127、134、137、138 互动 41 与 12、13、15、19、26、29、33、34、36、44、48、51、65、69、70、71、72、92、98、104、107、118、122、125、127、138 互动 42 与 18、22、28、32、33、35、38、40、43、48、49、50、57、69、104、105、107、110、118、137 互动 43 与 9、12、14、17、18、20、31、32、33、35、36、37、38、42、48、51、60、64、69、71、86、101、104、107、109、119、129、140 互动 44 与 14、15、18、22、31、37、38、39、40、41、51、52、60、62、87、97、98、110 互动 45 与 4、13、15、19、28、36、48、54、65、69、70、71、73、74、78、79、91、104、105、106、110、118、125、127、130、138 互动 46 与 5、15、32、33、35、47、66、106、107、118、130 互动 47 与 14、18、22、30、33、46、62、107、118、130 互动 48 与 1、8、18、32、33、39、40、41、42、43、45、52、63、71、75、85、86、97、99、105、107、109、110、119、129、130、141

49 与 9, 12, 17, 18, 19, 22, 28, 31, 37, 42, 51, 64, 68, 86, 97, 107, 110, 117, 118, 128, 129, 130, 132, 133, 138, 140 发生交互 50 与 28, 31, 37, 38, 42, 52, 54, 60, 76, 77, 85, 87, 94, 103 发生交互 51 与 33, 41, 43, 44, 49, 53, 54, 59, 69, 77, 104, 107, 118, 127, 136 发生交互 52 与 2, 31, 32, 36, 38, 44, 48, 50, 53, 54, 59, 71, 91, 104, 106, 107, 136 发生交互 53 与 6, 7, 26, 51, 52, 56, 57, 59, 60, 66, 72, 118, 126, 127, 137 发生交互 54 与 14, 20, 28, 31, 32, 33, 34, 36, 45, 50, 51, 52, 56, 57, 59, 71, 80, 91, 94, 106, 107, 110, 115 发生交互 55 与 28, 67, 68, 71, 80, 119, 123, 124 发生交互 56 与 4, 9, 12, 13, 26, 28, 34, 53, 54, 57, 59, 76, 78, 80, 85, 86, 92, 102, 123, 124 发生交互 57 与 7, 42, 53, 54, 56, 59, 60, 70, 86, 94, 117, 118, 123, 126, 127, 137 发生交互 58 与 6, 7, 8, 15, 26, 38, 65, 72, 76, 78, 93, 96, 98, 99, 125, 127, 130, 138 发生交互 59 与 7, 8, 15, 31, 34, 51, 52, 53, 54, 57, 58, 60, 65, 66, 72, 96, 98, 99, 125, 127, 130, 138 发生交互 60 与 18, 22, 31, 32, 43, 44, 50, 53, 57, 59, 91, 94, 97, 98, 103, 131 发生交互 61 与 1, 6, 8, 15, 21, 22, 32, 35, 36, 38, 63, 74, 86, 95, 96, 97, 98, 99, 105, 108, 109, 110, 119, 120, 127, 131, 139, 140, 141 发生交互 62 与 8, 9, 12, 13, 14, 15, 23, 25, 26, 27, 28, 39, 44, 47, 65, 66, 72, 85, 86, 87, 89, 93, 114, 115, 116, 119, 127, 130, 132, 138, 141 发生交互 63 与 4, 6, 8, 12, 14, 15, 21, 23, 30, 32, 48, 61, 64, 65, 66, 68, 70, 71, 72, 75, 86, 93, 96, 99, 100, 116, 119, 127, 129, 130, 132, 133, 134, 136, 138, 140, 141 发生交互 64 与 8, 9, 11, 14, 15, 20, 22, 43, 49, 63, 81, 85, 86, 95, 99, 100, 101, 109, 112, 113, 127, 130, 133, 136, 139 发生交互 65 与 8, 10, 14, 15, 17, 18, 32, 41, 45, 58,59, 62, 63, 66, 72, 84, 99,111, 114, 116,127, 130, 133, 134, 138, 139, 141 发生交互 66 与 15, 46, 53, 59, 62, 63, 65, 68, 70, 71, 75, 93, 130, 132, 133, 137, 139, 141 发生交互 67 与 1, 26, 29, 55, 76, 86, 92, 122, 123 发生交互 68 与 1, 10, 13, 16, 20, 26, 27, 36, 38, 49, 55, 63, 66, 71, 86, 94, 101, 109, 110, 114, 119, 124, 129, 131, 132, 141 发生交互 69 与 17, 18, 19, 22, 32, 33, 39, 40, 41, 42, 43, 45, 51, 74, 75, 92, 104, 105, 107, 132 发生交互 70 与 1, 18, 32, 33, 39, 40, 41, 45, 57, 63, 66, 71, 72, 73, 86, 104, 110, 131, 132 发生交互 71 与 2, 4, 19, 22, 23, 29, 32, 33, 41, 43, 45, 48, 52, 54, 55, 63, 66, 68, 70, 73, 75, 76, 79, 88, 98, 104, 105, 107, 108, 109, 110, 120, 129, 131, 132, 133 发生交互 72 与 33, 37, 39, 41, 53, 58, 59, 62, 63, 65, 70, 104, 128, 130, 131 发生交互 73 与 32, 45, 70, 71, 78, 91, 104, 105, 108, 109, 110 发生交互 74 与 4, 18, 22, 28, 32, 33, 34, 45, 61, 69, 105, 107, 109, 110, 127 发生交互 75 与 32, 33, 39, 48, 63, 66, 69, 71, 98, 100, 104, 107, 123, 124, 133 发生交互 76 与 3, 12, 23, 26, 37, 38, 50, 56, 58, 67, 71, 85, 87, 90, 91, 92, 95, 98, 101, 108, 113, 120, 122, 123, 124, 127 发生交互 77 与 1, 18, 50, 51, 79, 83, 86, 90, 93, 103 发生交互 78 与 3, 4, 16, 23, 34, 38, 45, 56, 58, 73, 79, 85, 86, 101, 105, 130 发生交互

79 与 3, 4, 13, 16, 18, 23, 35, 38, 45, 71, 77, 78, 86, 88, 90, 104, 105, 111, 116, 124, 127, 130 发生交互 80 与 7, 9, 12, 13, 17, 20, 31, 34, 36, 54, 55, 56, 86, 94, 103, 106, 123, 136 发生交互 81 与 9, 12, 13, 17, 25, 27, 29, 36, 64, 82, 83, 85, 86, 92, 93, 113, 114, 119, 122, 133, 136 发生交互 82 与 6, 16, 23, 24, 81, 111, 113, 115 发生交互 83 与 13, 23, 77, 81, 85, 86, 101 发生交互 84 与 20, 65, 120, 127, 131, 132, 134, 135 发生交互 85 与 7, 12, 18, 26, 29, 48, 50, 56, 62, 64, 76, 78, 81, 83, 86, 87, 93, 108, 136 发生交互 86 与 1, 3, 7, 12, 13, 14, 17, 19, 27, 36, 43, 48, 49, 56, 57, 61, 62, 63, 64, 67, 68, 70, 77, 78, 79, 80, 81, 83, 85, 103, 111, 117, 119, 120, 121, 123, 124, 125, 140, 141 发生交互 87 与 12, 44, 50, 62, 76, 85, 90, 91, 93, 95, 100, 128 发生交互 88 与 4, 16, 27, 29, 71, 79, 114, 123 发生交互 89 与 8, 17, 20, 21, 31, 62, 100, 130, 138, 141 发生交互 90 与 12, 25, 26, 27, 33, 34, 76, 77, 79, 87, 91, 93, 113, 114, 121, 124, 132 发生交互 91 与 4, 12, 13, 26, 33, 34, 45, 52, 54, 60, 73, 76, 87, 90, 103, 105, 121, 132 发生交互 92 与 25, 26, 27, 28, 29, 34, 41, 56, 67, 69, 76, 81, 114, 122, 123, 124, 132 发生交互 93 与 10, 12, 23, 24, 26, 62, 63, 66, 77, 81, 87, 90, 116, 130, 132, 137, 141 发生交互 94 与 13, 31, 34, 36, 38, 50, 54, 55, 57, 60, 68, 80, 103, 106, 119, 136 发生交互 95 与 8, 11, 15, 16, 21, 23, 30, 61, 64, 76, 87, 102, 112, 117, 119, 121, 130, 132, 133, 135, 139, 141 发生交互 96 与 8, 11, 15, 21, 58, 59, 61, 63, 97, 102, 119, 121, 130, 132, 133, 139, 141 发生交互 97 与 14, 15, 18, 22, 30, 37, 38, 39,40,44, 48, 49, 60, 61, 96, 98, 119, 132, 133, 135 发生交互 98 与 2, 15, 18, 22, 30, 31, 41, 44, 58, 59, 60, 61, 71, 75, 76, 97, 109, 110, 119, 120, 121, 132, 133, 139 发生交互 99 与 8, 48, 58, 59, 61, 63, 64, 65, 131, 132, 133, 138 发生交互 100 与 23, 24, 63, 64, 75, 87, 89, 101, 112, 113, 115, 121, 126, 130, 132, 133, 135, 141 发生交互 101 与 1, 3, 9, 13, 16, 17, 23, 24, 29, 43, 64, 68, 76, 78, 83, 100, 102, 112, 113, 117, 119, 122, 133 发生交互 102 与 2, 5, 6, 10, 20, 24, 56, 95, 96, 101, 115 发生交互 103 与 3, 18, 28, 37, 50, 60, 77, 80, 86, 91, 94 发生交互 104 与 19, 22, 32, 33, 35, 39, 40, 41, 42, 43, 45, 51, 52, 69, 70, 71, 72, 73, 75, 79, 105, 107, 109 发生交互 105 与 2, 4, 7, 23, 32, 33, 34, 42, 45, 48, 61, 69, 71, 73, 74, 78, 79, 91, 104, 106, 110, 119, 137 发生交互 106 与 1, 4, 7, 13, 19, 28, 31, 36, 38, 45, 46, 52, 54, 80, 94, 105, 129, 136 发生交互 107 与 19, 22, 28, 30, 31, 32, 33, 34, 40, 41, 42, 43, 46, 47, 48, 49, 51, 52, 54, 69, 71, 74, 75, 104, 110, 122, 136 发生交互 108 与 13, 24, 26, 28, 61, 73, 76, 85, 109, 110 发生交互 109 与 28, 31, 32, 43, 48, 61, 64, 68, 71, 73, 74, 98, 104, 108, 110 发生交互

110 与 4, 17, 18, 19, 22, 28, 32, 33, 36, 42, 43, 44, 45, 48, 49, 54, 61, 68, 70, 71, 73, 74, 98, 105, 107, 108, 109, 137 111 与 6, 8, 21, 25, 65, 79, 82, 86, 113, 115, 116, 117, 120, 130, 132, 134 112 与 8, 15, 21, 64, 95, 100, 101, 130, 133, 139, 141 113 与 1, 5, 9, 21, 26, 27, 64, 76, 81, 82, 90, 100, 101, 111, 114, 117, 119, 124 114 与 8, 11, 16, 25, 27, 62, 65, 68, 81, 88, 90, 92, 113, 117, 123, 127, 130, 132 115 与 8, 17, 21, 23, 24, 54, 62, 82, 100, 102, 111, 127, 132, 137, 140, 141 116 与 5, 8, 15, 17, 20, 21, 23, 25, 62, 63, 65, 79, 111, 117, 121, 127, 128, 131, 132, 135, 137 117 与 6, 16, 17, 20, 49,57, 86, 95, 101, 111, 113, 114, 116, 121, 123, 124, 125, 133, 135, 137 118 与 5, 9, 17, 19, 28, 33, 34, 35, 39, 40, 41, 42, 45, 46, 47, 49, 51, 53, 57, 126, 127, 130, 131, 134 119 与 3, 16, 23, 29, 48, 55, 61, 62, 63, 68, 81, 86, 94, 95, 96, 97, 98, 101, 105, 113, 136 120 与 25, 61, 71, 76, 84, 86, 98, 111, 121, 126, 132, 133, 139 121 与 8, 12, 13, 14, 86, 90, 91, 95, 96, 98, 100, 116, 117, 120, 123, 124, 125, 127, 132, 133, 139 122 与 12, 13, 16, 26, 27, 29, 32, 33, 34, 41, 67, 76, 92, 101, 107, 123 123 与 2, 7, 26, 34, 55, 56, 57, 67, 75, 76, 80, 86, 88, 92, 114, 117, 121, 122, 127, 137 124 与 1, 4, 7, 9, 26, 29, 34, 55, 56, 68, 75, 76, 79, 86, 90, 92, 113, 117, 121, 137 125 与 7, 15, 40, 41, 45, 58, 59, 86, 117, 121 126 与 17, 19, 30, 33, 53, 57, 100, 118, 120, 133 127 与 15, 22, 28, 30, 33, 39, 40, 41, 45, 51, 53, 57, 58, 59, 61, 62, 63, 64, 65, 74, 76, 79, 84, 114, 115, 116, 118, 121, 123, 132, 135 128 与 15, 31, 33, 37, 38, 49, 72, 87, 116, 138, 140 129 与 8, 9, 12, 13, 14, 15, 17, 20, 28, 30, 32, 43, 48, 49, 63, 68, 71, 106, 131, 140 130 与 6, 10, 14, 15, 24, 26, 27, 30, 45, 46, 47, 48, 49, 58, 59, 62, 63, 64, 65, 66, 72, 78, 79, 89, 93, 95, 96, 100, 111, 112, 114, 118, 134, 137, 141 131 与 5, 20, 28, 30, 31, 60, 61, 68, 70, 71, 72, 84, 99, 116, 118, 129, 135 132 与 15, 23, 30, 31, 49, 62, 63, 66, 68, 69, 70, 71, 84, 90, 91, 92, 93, 95, 96, 97, 98, 99, 100, 111, 114, 115, 116, 120, 121, 127 133 与 2, 5, 10, 11, 14, 15, 20, 24, 30, 37, 49, 63, 64, 65, 66, 71, 75, 81, 95, 96, 97, 98, 99, 100, 101, 112, 117, 120, 121, 126, 134, 136, 139, 140 134 与 6, 10, 11, 33, 39, 40, 63, 65, 84, 111, 118, 130, 133 135 与 6, 15, 17, 24, 84, 95, 97, 100, 116, 117, 127, 131, 137 136 与 8, 9, 34, 36, 51, 52, 63, 64, 80, 81, 85, 94, 106, 107, 119, 133, 140 137 与 13, 15, 21, 23, 33, 35, 39, 40, 42, 53, 57, 66, 93, 105, 110, 115, 116, 117, 123, 124, 130, 135, 140 138 与 14, 15, 33, 39, 40, 41, 45, 49, 58, 59, 62, 63, 65, 89, 128, 140, 141 139 与 21, 30, 61, 64, 65, 66, 95, 96, 98, 112, 120, 121, 133

140 与 1, 5, 8, 9, 12, 13, 18, 19, 20, 21, 22, 24, 37, 43, 49, 61, 63, 86, 115, 128, 1 29,133,136,137, 138, 141141 与 1, 8, 9, 12, 13, 14, 15, 18, 21, 24, 48, 61, 62,63, 65, 66, 68, 86, 89,93, 95,96,100, 112,115,130, 138, 140

这张表中有50 处错误，每处都是一种不对称性：对于某些*i* 和*j*，表中包含“*i* 与*j*相互作用”，但未同时包含“*j* 与*i*相互作用”。以下是所有单向相互作用；箭头表示指定的相互作用方向：

3 与以下对象相互作用：86, !88 4 与以下对象相互作用：23 7 与以下对象相互作用：! 20, 30, !9410 与以下对象相互作用：130, 133 23 与以下对象相互作用：!126 33 与以下对象相互作用：39, 40, 42, 43, 46, 47, 48, 51, !56, !59, 69, 70, 71, 72, 75, !78, !80, !92, !94, 104, 110, !123, !124, 126, 127, 128, 134, !136, 137, 138 43 与以下对象相互作用：110, ! 119 55 与以下对象相互作用：94 56 与以下对象相互作用：!59 58 与以下对象相互作用：59, !93 71 与以下对象相互作用：!108 81 与以下对象相互作用：!122 85 与以下对象相互作用：!93 93 与以下对象相互作用：!116 99 与以下对象相互作用：!138

请注意，相互作用表中的50 个错误里，30 个涉及要求33：“充分利用肥沃的土地。”

HIDECS 2 报告指出，这类错误由一致性检查器处理，该检查器会检查穿孔卡片输入，详见附录 F。

C 《笔记》中的Alexander 分解

以下是《笔记》中印度村庄分解的元素。

A 包含需求 7, 31, 34, 36, 37, 38, 50, 52, 53, 54, 55, 57, 59, 60, 72, 77, 80, 91, 94,103, 106, 125, 126,128, 136B 包含需求 18, 19, 22, 28, 30, 32, 33, 35, 39, 40, 41,42, 43,44, 45, 46,47, 48, 49,51, 61, 69, 70, 71, 73, 74, 75, 97, 98, 104, 105, 107,108, 109, 110, 118,127, 131, 138

C 包含需求 5, 6, 8, 10, 11,14, 15, 20, 21, 24, 58,63,64, 65,66, 84, 89,93,95,96,99,100, 102, 111, 112, 115, 116, 117, 120, 121, 129, 130, 132, 133, 134,135, 137,139, 140, 141D 包含需求 1, 2, 3, 4, 9, 12, 13, 16, 17, 23, 25,26,27,29, 56, 62, 67, 68, 76,78, 79,81, 82, 83, 85, 86, 87,88, 90, 92, 101, 113,114,119, 122, 123, 124

A1 包含需求 7, 53, 57,59, 60, 72,125, 126, 128A2 包含需求 31, 34, 36, 52, 54, 80, 94,106, 136A3 包含需求 37, 38, 50,55, 77, 91, 103B1 包含需求 39, 40, 41, 44, 51, 118, 127,131,138B2 包含需求 30, 35, 46,47,61, 97, 98B3 包含需求 18,19, 22, 28, 33, 42, 43,49,69,74, 107, 110B4 包含需求 32,45, 48, 70, 71,73, 75, 104, 105, 108, 109C1 包含需求 8, 10, 11, 14, 15, 58, 63,64, 65, 66, 93, 95, 96, 99,100, 112, 121, 130,132,133, 134, 139, 141C2 包含需求 5, 6, 20, 21, 24, 84, 89, 102,111, 115, 116, 117, 120, 129, 135, 137,140D1 包含需求 26, 29, 56,67,76,85, 87, 90, 92, 122, 123, 124D2 包含需求 1, 9, 12, 13, 25,27,62,68, 81,86, 113, 114D3 包含需求 2, 3, 4, 16, 17, 23, 78, 79,82,83,88, 101,119

D 优良度度量

对于这些优度函数，我尽可能使用 Alexander 为变量和输入所采用的名称。

D.1 HIDECS2-Actual

图7展示了 HIDECS 2 所使用的优度函数，相关描述见《HIDECS 2 报告》 [16]。目前尚不清楚生成《Notes》中分解结果的程序是否实际使用了这一函数，因为在另一篇论文《印度村庄的组件确定》[4], 中，Alexander 展示了一个不同的优度度量（下文的 HIDECS2-Decomp），并声称该度量被用于创建该论文中列出的分解，而该分解与《Notes》中的分解完全相同。

实际需要最小化的量是 STR，但在 1960年，在计算机上求平方根还不够快；因此改用下面这个保持顺序的变体：

给定 初始值 , 总计 , M, N:

$$\text{初始值} = \text{节点数} \tag{3}$$

$$\text{总计} = \text{交互链接数} \tag{4}$$

$$M,\ N = \text{节点划分} \tag{5}$$

$$m = jMj \tag{6}$$

$$n = jNj \tag{7}$$

$$RR = \sum_{i \in M, j \in N} v_{ij} \tag{8}$$

$$nsq1 = \frac{1}{2} nbit(nbit - 1) = \text{可能连接的最大数量} \tag{9}$$

$$\text{STR} = \frac{mn}{\sqrt{mn(nsq1 - mn)}} \tag{10}$$

图7 HIDECS2-Actual

$$nom = RR - \left(\frac{total}{nsq1}\right) mn \tag{11}$$

$$denom = mn(nsq1 - mn) \tag{12}$$

$$\text{INFO} = signum(nom) \frac{nom^2}{denom} \tag{13}$$

结果是 INFO。基本上，就是将这个分数平方，同时保留其符号。正如 Alexander 在 HIDECS 2 报告中所写的，INFO = (STR)(|STR|).[21]

直观理解：HIDECS2-Actual 用于计算给定交互链接集合下节点集划分的优劣；该度量需要最小化。本质上，它计算划分中各集合之间的耦合程度。分子衡量划分切断的实际链接数量与理论预期切断数量之间的差异。乘积 mn 是M 和N之间可能存在的连接数量，且

$$\frac{total}{nsq1}$$

是指定交互链接与可能连接的最大数量之比。因此

$$\left(\frac{total}{nsq1}\right) mn$$

[21]在我收到的扫描复印件第25页（第25页位于附录 N）上，这个方程旁边用铅笔画了一个很大的问号。我把这种表述视为某种黑客式高超技巧的证据，可能出自 Alexander 或 Manheim 之手。

是划分所切断链接数量的期望值。当分子为负时，实际切断的链接少于预期；若为正，则多于预期。分子能达到的最小值出现在 $RR = 0$ 时。

分母校正了 Alexander 想要避免的一种偏差——将集合划分为一个小集合和一个大集合，也就是说，出现 m 较小、n 较大的不平衡情况。对设计师而言，这样的划分并没有多大帮助。在分母中，$nsq1 - mn$是包含在 M 或 N中的可能连接的最大数量。当 mn 较小时，$nsq1 - mn$ 较大；随着 m 从 1 增至最大值，mn呈现凹形，而 $nsq1 - mn$ 则呈现笑脸形。分母的整体作用是重新平衡优度度量：随着 M的大小从 1 增加到 $nbit - 1$，$mn(nsq1 - mn)$ 的形状像一条顶部带有凹点的倒置抛物线：



这会产生偏向大小大致相同的划分的效果。Alexander 在 HIDECS 2（E2 页）中这样表述：

> 然而，度量 [粗略而言，RR] 偏向于强烈不对称的 [原文如此][22] 划分，其中乘积 MN 很小——例如，M 较小而 N 较大的情况。我们通过减去 RR 的期望值，再除以其方差的平方根，对该度量进行归一化。归一化冗余为……

Alexander 注意到某些优良度量会倾向于有利于不平衡划分，这一事实让我觉得，他尝试过几种直观的度量——我也有过同样的经历。

（坦白说：我没弄明白“除以其方差的平方根”是如何得到所示的分母的。“方差”指的是什么？我的困惑见附录 O。）

D.2 HIDECS2-Decomp

图8显示了《一个印度村庄的组件确定》中所示的优良度量 [4]。在那篇论文中，Alexander 写道：

> 按照此函数进行最小化的程序已为 *IBM 7090* 编写。[23]正是这个函数得出了以下村庄问题的分解。

随后进行的分解，正是《Notes》中的那一种。

[22] 拼写。[23]这台 IBM 7090 位于马萨诸塞州剑桥的史密森天体物理台。

$$m = \text{变量总数} \tag{14}$$
$$a = \text{一个子系统中的变量数量} \tag{15}$$
$$b = \text{另一个子系统中的变量数量} \tag{16}$$
$$l = \text{链接总数} \tag{17}$$
$$l_a = \text{完全位于第一个子系统内的链接数量} \tag{18}$$
$$l_b = \text{完全位于另一个子系统内部的链接数量} \tag{19}$$
$$\text{得分} = \frac{(\text{左} - \text{左}_a - \text{左}_b)(\frac{1}{2}\text{中}(\text{中} - 1)) - \text{左}\ a\ b}{\sqrt{a\ b(\frac{1}{2}m(m-1) - a\ b)}} \tag{20}$$

图8 HIDECS2-Decomp

$$m = nbi\ t \tag{21}$$
$$a = m \tag{22}$$
$$b = n \tag{23}$$
$$a\ b = mn \tag{24}$$
$$l = t\ ot\ al \tag{25}$$
$$l - l_a - l_b = RR \tag{26}$$
$$\frac{1}{2}m(m-1) = nsq1 \tag{27}$$
$$\text{得分} = \frac{RR \cdot nsq1 - l \cdot mn}{\sqrt{mn(nsq1 - mn)}} \tag{28}$$
$$= nsq1 \cdot \text{STR} \tag{29}$$

图9 HIDECS2-Decomp 与 HIDECS2-Actual

其中有些内容应该看起来很熟悉。观察HIDECS2-Actual，我们可以看到图9所示的对应关系。

在《Notes》的第190页，Alexander 谈到选择一个常数来简化问题：“划分 π 的 ..... 冗余度是 ”

$$R(\pi) = \frac{\text{constant}(l^\pi - \frac{ll_0^\pi}{l_0})}{\sqrt{\frac{ll_0^\pi(l_0 - l_0^\pi)}{l_0(l_0 - 1)}}}$$

“.....选择常数，使这个”等于

$$\frac{l_0 l^\pi - ll_0^\pi}{\sqrt{l_0^\pi(l_0 - l_0^\pi)}}$$

其中

$$R(\pi) = \frac{\frac{1}{2}m(m-1)\sum_{\pi} v_{ij} - l\sum_{\pi} S_\alpha S_\beta}{\left[(\sum_{\pi} S_\alpha S_\beta)(\frac{1}{2}m(m-1) - \sum_{\pi} S_\alpha S_\beta)\right]^{\frac{1}{2}}}$$

其中

$$m = \text{节点数} \tag{33}$$

$$l = \text{链接总数} \tag{34}$$

$$\sum_{\pi} v_{ij} = \text{被划分切断的链接数量} \tag{35}$$

$$S_x = \text{划分}x\text{中的节点数} \tag{36}$$

$$\frac{1}{2}m(m-1) = \text{可能的最大链接数量} \tag{37}$$

图10 HIDECS2-Notes

$$l_0 = \frac{1}{2}m(m-1) \tag{30}$$

$$l^\pi = \sum_{\pi} v_{ij} \tag{31}$$

$$l_0^\pi = \sum_{\pi} S_\alpha S_\beta \tag{32}$$

请注意，尽管不同变体计算出的值并不相同，但顺序仍然保持不变。

D.3 HIDECS2-Notes

《笔记》中描述的优度度量如图10所示。它是将 HIDECS2-Decomp 直接推广到两个以上集合的结果。

对于将一个集合划分为两部分的划分，HIDECS2-Decomp 和 HIDECS2-Notes 计算出的值相同。

D.4 HIDECS2-rpg

为了探索分解空间，我提出了一种优度度量，似乎正是针对内聚/耦合设计的，如图11所示。

这看起来或许很复杂，但其叙述很简单。

直观理解：变量 f_1 和 f_3 度量内聚，f_2 度量耦合。我们将 RSCORE 最小化。变量 l_a 表示完全位于称为 a 的划分内的链接数量，而 m_a 是这类链接的理论最大值；因此，当完全位于第一个划分内的链接数量达到最大值时，f_1 为 0

$$m = \text{变量总数} \tag{38}$$

$$a = \text{一个子系统中的变量数量} \tag{39}$$

$$b = \text{另一个子系统中的变量数量} \tag{40}$$

$$l = \frac{1}{2}m(m-1) \tag{41}$$

$$l_a = \text{完全位于第一个子系统内的连接数量} \tag{42}$$

$$l_b = \text{完全位于另一个子系统内的链接数量} \tag{43}$$

$$m_a = \frac{a(a-1)}{2} \tag{44}$$

$$m_b = \frac{b(b-1)}{2} \tag{45}$$

$$l_{ab} = l - l_a - l_b \tag{46}$$

$$m_{ab} = m_a m_b \tag{47}$$

$$f_1 = \begin{cases} 0 & \text{如果 } m_a = 0 \\ 1 - \frac{l_a}{m_a} & \text{否则} \end{cases} \tag{48}$$

$$f_2 = \begin{cases} 0 & \text{如果 } m_{ab} = 0 \\ \frac{l_{ab}}{m_{ab}} & \text{否则} \end{cases} \tag{49}$$

$$f_3 = \begin{cases} 0 & \text{如果 } m_b = 0 \\ 1 - \frac{l_b}{m_b} & \text{否则} \end{cases} \tag{50}$$

$$f_4 = 1 - \left(\frac{a-b}{a+b}\right)^2 \tag{51}$$

$$\text{RSCORE} = \frac{f_1 + f_2 + f_3}{f_4} \tag{52}$$

图11 HIDECS2-rpg

$(l = m_a = 1)$是可能的；如果一个也没有，则为 1。f_3的情况也类似。变量 f_2 在两个划分之间没有链接时为 0，如果所有链接都在两个划分之间，则为 1 ——因为 l_{ab}表示两个划分之间的链接数量，而 m_{ab} 是其理论最大值。

因此，当内聚良好且耦合较弱时，$f_1 + f_2 + f_3$ 达到最小值。但正如 Alexander 所提到的，这种度量存在偏向不均衡划分的问题。变量 f_4 则用于度量均衡程度：当各划分大小相同时，它达到最大值；当其中一个划分仅包含1 个元素时，则达到最小值。这是一条倒置的曲线，虽然不像HIDECS2-Actual中的曲线那么尖锐，但形状相似：

D.5 HIDECS3-BLDUP

BLDUP 使用的优度度量（详见 HIDECS 3 报告）由HIDECS2-Actual （方程 10）推导而来：

$$\mathsf{STR} = \frac{RR - \left(\frac{total}{nsq1}\right) mn}{\sqrt{mn(nsq1 - mn)}}$$

如果我们用 RR 替换

$$\sum_{\pi} v_{i,j}$$

并用 mn替换

$$\sum_{\pi} S_{\alpha} S_{\beta}$$

我们得到

$$\mathsf{STR}_2 = \frac{\sum_{\pi} v_{ij} - \left(\frac{total}{nsq1}\right) \sum_{\pi} S_{\alpha} S_{\beta}}{\sqrt{(\sum_{\pi} S_{\alpha} S_{\beta})(nsq1 - \sum_{\pi} S_{\alpha} S_{\beta})}} = \frac{nom}{denom}$$

然后，BLDUP 使用的优度度量为

$$\mathsf{INFO}_2 = signum(nom) \frac{nom^2}{denom}$$

注意，如果我们取

$$l = total = \text{total number of links} \tag{53}$$

$$nsq1 = \frac{1}{2} m(m-1) \tag{54}$$

那么 HIDECS2-Notes 就是 $nsq1 \cdot \mathrm{STR}_2$。

D.6 HIDECS3-STABL

STABL 所用的优度度量在 HIDECS 3 报告中有所描述。它之所以有趣，是因为它标志着基本方法的转变；这种度量称为HIDECS3-STABL。

我们从集合 M 当前的临时划分开始，将其划分为若干不相交集合：$\{S_1, S_2, \ldots\}$。然后，按照图 12 所示定义 EXP。我们的目标是使 EXP 最大化。

直观理解：这个度量颇为微妙。首先要注意，优度度量不需要计算出有意义的结果，它只需体现一种想法：如何区分较好的分解和较差的分解。分子和分母都是对分解中的各个集合求和，因此该度量考察每个集合的优劣，再将相关信息综合起来。

我们先来看分子。分子左侧可以改写如下：

$$\left(\frac{l_i}{l}\right) \frac{m(m-1)}{2}$$

$$m = \text{变量总数} \tag{55}$$

$$l = \text{链接总数} \tag{56}$$

$$l_i = \text{完全位于} S_i \text{内的链接总数} \tag{57}$$

$$s_i = S_i \text{中的元素数量} \tag{58}$$

$$nom = \sum_i \left[l_i \frac{m(m-1)}{2l} - \frac{s_i(s_i-1)+1}{2} \right] \tag{59}$$

$$d\,enom = \sum_i \left(\frac{s_i(s_i-1)+1}{2} \right) 2^{-2s_i} \tag{60}$$

$$\text{EXP} = si\,g\,num(nom) \quad \frac{nom^2}{d\,enom} \tag{61}$$

图 12 HIDECS3-STABL

它是两项之积：集合s_i 中的链接数占链接总数的比例，以及可能链接的数量——后者我们在先前的优良度度量中见过（例如，$nsq1$ 在HIDECS2-Actual中）。右侧是完全位于s_i内部的可能链接数量，只是稍作了调整。让我们把既始于某个集合、又终于该集合内部的链接称为内部链接（对于集合s_i ，有l_i 条内部链接），而把始于某个集合、终于其外部的链接称为交叉。内部链接关系到内聚，交叉关系到耦合。先来看只包含内部链接的集合。当l_i 从0 增加到其可能达到的最大值时，l $_i$$l$ 线性增加，分子左侧也是如此。右侧保持为常数，因此分子增加。这意味着，随着集合的连接愈加稠密，其内聚得到改善，度量值也随之增加。

现在假设存在交叉。在保持l_i 为常数的情况下，随着交叉（起源于s_i）的数量从0 增加到可能达到的最大值，l 会增大，因此l $_i$$l$ 会减小，分子也会随之减小。这意味着，随着集合中的交叉增多，其耦合增强，从而使度量值降低。l 所能达到的最大值是可能连接的数量，这意味着将其用作左侧的上限，可以对分子进行某种归一化。请注意，分子的右侧部分在其分子上加了1 ，因此右侧部分始终为正。总的来说，分子同时考虑了内聚和耦合，并对二者进行平衡。

现在来看分母。当只有两个集合时，随着第一个集合的大小从1 增长到最大值，分母的形状呈现为微笑曲线；这意味着分母会使度量值倾向于集合大小均衡。当集合数量超过两个时，我们也会看到相同的总体趋势：倾向于集合大小均衡。

分子要平方，因为分母有点像方差，正如 HIDECS2-Actual 的说明中所述。

更强的内聚性意味着这一度量会增加，而耦合往往会使其降低；因此，可以说它主要用于寻找未减弱的内聚性。

E Alexander 否定树状结构与形式化设计方法

Christopher Alexander 放弃了《笔记》中提出的两个观点：第一，可以且应当尝试将一个设计“问题”划分为彼此不相交的 关注点集合，并构建树状结构；第二，可以设计出一种方法，将其与设计实践分离开来，以实现此类划分，从而制定设计着手的计划。Alexander 对模式 的概念建立在这样的认识之上：关注点的绝对独立是不可能的，而模式可以且应当从设计师设计真实事物的经验中逐步发展出来。

E.1 反对树状结构

从《城市不是一棵树》开始，Alexander 一再背弃树状结构。为了说明这种否定有多么强烈且持久，我列举几段引文。

引自《城市不是一棵树》：

> 每当我们拥有一种树状结构时，这就意味着，在该结构内部，任何单元的任何部分都不会与其他单元相连接，除非通过该单元作为一个整体这一媒介。
>
> 这种限制的严苛程度很难让人理解。这有点像是说，家庭成员不能自由地与家庭之外的人交朋友，除非整个家庭共同结交了朋友。
>
> 树木结构的简洁，就像一种对整洁和秩序的强迫性渴望，坚持要求壁炉架上的烛台必须摆得笔直，并且相对于中心完全对称。相比之下，半格是复杂织物的结构；它是生物的结构——也是伟大绘画作品和交响乐的结构。
>
> 必须强调的是，免得有条理的心智对任何未以树状形式清晰阐释和分类的事物都感到恐惧，重叠、歧义、多重视角以及半格这些概念，并不比僵硬的树状结构更缺乏秩序，反而更加有序。它们展现的是一种更为厚实、坚韧、微妙而复杂的结构观。 [14]

同样摘自《城市不是一棵树》：

> 树——尽管作为一种思维工具，它如此整齐、美观；尽管它提供了一种简单明了的方式，将复杂实体划分为若干单元——却无法准确描述自然形成的城市的实际结构，也无法描述我们所需要的城市结构。
>
> 那么，为什么这么多设计师都把城市构想成树，而自然结构在所有情况下都是半格呢？他们这样做是有意为之，认为树状结构能更好地服务城市居民吗？还是他们身不由己，因为受困于某种思维习惯，甚至受困于心智的运作方式——因为他们无法用任何便于心智把握的形式来涵盖半格的复杂性，因为

心智有一种压倒性的倾向，无论看向何处都只看到树木，无法摆脱树的观念？

我将试着说服你：提出并建造树状城市，原因在于这第二点——也就是说，设计师必然受限于心智能够直观形成易于理解的结构这一能力，因此无法通过一次心智活动实现半格的复杂性。 [14]

最后，摘自《为地球的生命与美丽而战：两种世界系统的斗争》，这是Alexander 的最后一本书：

复杂构型的主要特征总是由重叠创造的。尽管这种重叠看起来可能微不足道，但当我们审视[一] 张波斯地毯的整体设计时，你会发现，这种重叠与歧义至关重要且无处不在……这是任何整体系统中的黏合剂。整体性本身正是由这种表面上的重叠或歧义直接创造的。重叠的整体越多，构型的结合就越紧密，物体的整体性也就越充分地显现出来。 [17]

E.2 反对形式化设计方法

在1971年《笔记》平装版的序言中，Alexander 为帮助创立一个与设计实践相分离的设计科学领域而道歉：

当时我写这本书时，非常关注“独立性”的形式化定义，以及运用数学方法发现彼此独立的力系统和图示这一想法。但书写完后，我发现，完全没有必要采用如此复杂而形式化的方式来获得这些独立图示。

如果你理解了创建独立图示的必要性——这些图示能够化解或解决相互作用的人类力量所构成的力系统——你会发现，自己可以根据建筑物和设计的经验，只需思考其中出现的各种力量以及这些力量之间的冲突，以最自然的方式逐一、渐进地创建和发展这些图示。

我曾在其他较为近期的著作中讨论过这一实现及其后果。但我觉得，在这里也有必要说明这一点，让你在阅读本书之前就对此有所认识，因为许多读者关注的是引导图示创建的方法，而不是图示本身，甚至将遵循这一方法变成了一种崇拜。

的确，自本书出版以来，围绕“设计方法”这一理念已经发展出一个完整的学术领域，而我也被誉为这些所谓设计方法的领军倡导者之一。对此我深感遗憾，并想公开声明：我反对把设计方法作为研究主题的整个理念，因为我认为，将设计研究与设计实践分开是荒谬的。

F 那些恼人的错误

以印度村庄相互作用表中的50 处错误为例。这些错误列在附录 B 中。起初，看到这么多错误时我很震惊；我过去常在 Alexander 于20世纪60年代初撰写的几篇论文中发现类似错误。但当我看到输入到他那些程序中的相互作用数据，是通过在穿孔卡片的行／列位置上打1来录入时，我就没那么震惊了：不小心多打一个1 或漏掉一个，并非不可思议。你可以在附录M中看到一张此类输入卡片的图片。

以下是 Alexander 在 HIDECS 2 报告中关于他处理这类错误的方法的描述：

> 在该程序中使用的图的连接是无方向的。因此，表示这些连接的矩阵必须关于主对角线对称，即$m^{ij} = m^{ji}$。此外，由于任何顶点都不能与自身相连，主对角线上的元素m_{ii}必须全为零。
>
> 矩阵通过穿孔卡片输入。由于一个错误就会使矩阵不对称 [原文如此],[24] ，或在主对角线上引入 1，从而破坏算法正确运行所需的条件，因此使用子程序 *SYMET* 检查输入并消除上述类型的错误。*SYMET* 会清除主对角线上的 1，并对所有 i 和 j，将m^{ij} 和 m^{ji}都替换为 $(m_{ij} \wedge m_{ji})$，这样只有当二者初始值都为 1 时，它们才会保留 1 。
>
> 顺便说一句，事实证明，*SYMET* 比最初预想的还要有用。对于生成我们输入数据的那类大型设计问题，不仅很难确保打孔准确，也很难确定究竟哪些点对彼此相连。如果对 m^{ij} 的判断与对m^{ji} 的判断彼此独立，那么实际上几乎不可能使所有这些判断都符合所要求的形式对称性。不过，运行 *SYMET* 程序后，就可以在卡片打孔时生成数据，无须人工核对，并确保数据会经过机器检查，而且只有“最确定”的点对——即同时为 m^{ij} 和 m^{ji} 定义了连接的点对——才会被视为相连。

这段描述体现了 Alexander 在早期论文中常见的几个缺点：简单的（通常是微不足道的）错误，以及忽视机会。[25]其中的简单错误在于，在“……单个错误会使矩阵变得对称……”这句话中，“对称”应当是“非对称”或“不对称”。对于一个正在努力理清该程序复杂性的读者来说，这个微不足道的错误可能会造成困惑。被忽视的机会在于，Alexander 没有注意到，与其庆祝 SYMET 通过计算机检查并删除那些可能由卡片打孔员产生的不确定配对，从而变得（更加）有用，

[24]应为“非对称的”。[25]在仔细研读他早期的一篇论文《视觉美学中的一个结果》 [2]时，我注意到其中还有少数类似的错误陈述和数据 [21]。

不如编程让计算机指出这些不一致之处——通过输出警告——这样 SYMET 就能与程序员协作，有效地找出并正确纠正错误。手工检查将大大简化。

HIDECS 2 的 Python 版本证实了 Alexander 的描述，SYMET 的流程图也证实了这一点。

此外，HIDECS 2 程序中包含 SYMET 子程序，这意味着 Alexander 知道错误可能存在；但他没有在《Notes》中纠正这些错误，也没有在《Community and Privacy》中探讨的设计问题的相互作用中纠正它们 [20] （见附录 Q），这让我觉得他有时并不执着于细节——至少在早期论文中是这样。对比一下他在 1993 年的《A Foreshadowing of 21st Century Art》 [9]中对建筑物细节的说法：

> .....如果我们希望建造房间与建筑物整体和谐的建筑物，我们也必须确保结构精确到 $1/8^{th}$ 英寸。任何更粗糙、将这最后八分之一英寸留得粗糙、未经计算或不协调的结构，都必然是粗劣的。

这就留下了一个谜团：这些50 个错误究竟从何而来？它们以文本形式出现在《笔记》中（附录 B 重现了这段文字）。想必这些相互作用是由 Alexander 以某种方式手工确定的。《笔记》中的相互作用文本可能直接源自那个集合，这意味着错误原本就在手工创建的集合中；随后，这些错误或许准确无误地被转录到穿孔卡片上，之后又被 SYMET“纠正”。另一种可能是，手工创建的集合中没有错误，但穿孔卡片上出现了错误，而《笔记》中的文本则源自这些卡片——由一个只负责打印相互作用矩阵的程序生成。我没能找到手工创建的相互作用集合，不过在 HIDECS 2 代码中有一个名为“PTMAT”的子程序，会在 SYMET 对矩阵进行处理后将其打印出来。我没有发现任何证据表明《笔记》中关于相互作用的文本来自 PTMAT。

我不清楚20世纪60年代初在麻省理工学院计算中心使用 IBM 709[26] Alexander 和 Manheim 编程时的操作规程，但十五年后，在斯坦福大学遇到类似情况时，人们会把一叠卡片交给操作员，由操作员将穿孔卡片送入机器，过一段时间后再取回结果打印件——有时要等到第二天。在这种环境下，人们通常会尽量减少此类交互，以处理错误和失误；这也可能包括尝试构建错误恢复机制，例如 SYMET。

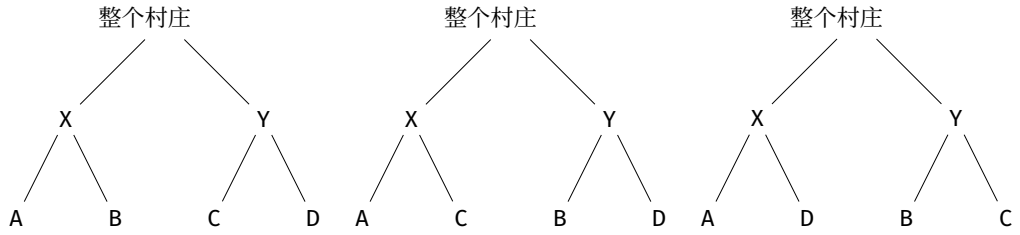
然而，Alexander 的不足并未削弱其研究、思考和写作的力量，许多人（包括我在内）认为，这些对于 20th 和 21st世纪的设计思维至关重要。

[26]他们有些运算也使用 IBM 7090；这台机器位于马萨诸塞州剑桥的史密森天体物理台。

G 一个明显的异常，详情

我想看看 Alexander 的程序在划分整个村庄——所有划分中最困难的一项——方面做得如何。Alexander 将整个问题划分为四个集合：A、B、C、D。如前所述，他的程序实际上先对整个问题进行二元划分 (X、Y)，然后再将其中每一个进一步划分为两个，从而得到四个集合。关于如何得出 Alexander 所展示的四个集合，有两种可能的方法：平衡方法是将整个村庄划分为两个集合 X 和 Y，再将二者分别划分为所展示的四个集合，其中 $X = A \cup B$、$X = A \cup C$ 或 $X = A \cup D$？[27] 均为可能性。不平衡方法则是，例如先将整个村庄划分为 A 和 $X = B \cup C \cup D$，接着再将 X 划分为 B 和 $Y = C \cup D$，然后再将 Y 划分为 C 和 D；这样的不平衡可能性共有十二种。我从平衡可能性入手——我认为 Alexander 采用的就是这种方法——并发现了这一异常；我没有探究不平衡可能性。

以下是平衡后的可能方案：



(a)选项 1　　**(b)**选项 2　　**(c)**选项 3

我们知道A 中有哪些顶点，因为我们知道A_1、A_2和A_3中有哪些顶点：它们列在《笔记》第 151 页：

群	元素
A_1	7、53、57、59、60、72、125、126、128
A_2	31、34、36、52、54、80、94、106、136
A_3	37、38、50、55、77、91、103

同理，对于B、C和D也是如此。因此，例如，如果$X = A \cup B$，那么我们就知道X中会有哪些顶点；如果$Y = C \cup D$，那么我们也知道Y中会有哪些顶点。

为了弄清哪两个来自同一个初始划分，我尝试了所有可能的配对——也就是说，我尝试了选项 1、2 和 3——结果表明，使用度量来评估X 和Y 时，选项1的优度最高。为了具体说明，以下是原始数值（数字越小越好，因此 −645 优于 −562）：

选项	优良性
选项 1	−645.04
选项 2	−434.40
选项 3	−562.65

[27] 请注意，如果$X = A \cup B$，那么$Y = C \cup D$，依此类推。

我猜选项 1 就是 Alexander 的程序所采用的方案。随后，我尝试在整个村庄上运行自己编写的 HIDECS 2 版本；在第一层，结果X_1 和Y_1，的度量值为 −655.12——显然优于从 Alexander 将划分分成四个集合后得出的所有选项。我原以为，如果我的程序采用那个X_1，，就会生成A_1 和B_1 ，其度量结果会优于 Alexander 的A 和B；而采用那个Y_1，，就会生成C_1 和D_1 ，度量结果也会更好。但这想法太天真了：我的程序得出的划分与 Alexander 的差别很大，要进行真正可比的公平比较很棘手。

在尝试弄清楚该如何继续时，我对 Alexander 的 A、B、C 和 D 进行了优度度量的穷举两两计算：

配对	优度
A& B:	−197.83
A与 C:	−257.00
A与 D:	−197.98
B 与C:	−341.70
B &D:	−345.84
C &D:	−297.75

从这张表中，我猜测 Alexander 的程序将整个村庄划分为 $X = A \cup C$和 $Y = B \cup D$。这是三个选项中最差的一个。当我以这些作为起点，推导出我自己的A_2，B_2，C_2，和 D_2，版本时，它们与 Alexander 的版本完全相同。

直截了当地说：总体上最好的划分（针对A、B、C、D），未必能通过从顶层开始向下工作、尽可能做好X 和Y的划分，然后从X 中找出最好的A & B ，并从Y中找出最好的C & D 来获得。这就是 Alexander 在 HIDECS 3 报告中讨论 HIDECS 2 的三项已观察到的弱点中的第一项所指的：“系统与子系统的整体关联性未得到恰当考虑。”他在附录 H 中对此作了说明。

H Alexander反对自上而下方法的论证

在 HIDECS 3 报告中，Alexander 清楚地论证了他在 HIDECS 2 中采用的自上而下（二元）分解方法为何行不通。文章从一个优雅的分解示例（图 14）开始。

假设一个节点集的第一层划分为集合 $L = L_0 \cup L_1 \cup L_2 \cup L_3$和 $R = R_0 \cup R_1 \cup R_2 \cup R_3$，，而节点 x 尚未分配。再假设最终 L 将被分解为集合 $\{L_0, L_1, L_2, L_3\}$，R 将被分解为集合 $\{R_0, R_1, R_2, R_3\}$。节点 x 与 L_2 有三个连接，与 R_0, R_1, R_2, R_3各有一个连接。在第一层，只有 L 和 R 时，x 与 L 有三个连接，与 R 有四个连接，因此 x 会被放入 R。进一步分解 R 时，x 会加入其中一个 R_i，而它与该集合只有一个连接。节点 x 应属于 L_2。若无法预见后续划分，x 就会被错误归类。回到家庭类比，一个人在另一个家庭中有很多朋友，可能会被视为那个家庭的成员，而非自己真正所属家庭的成员。

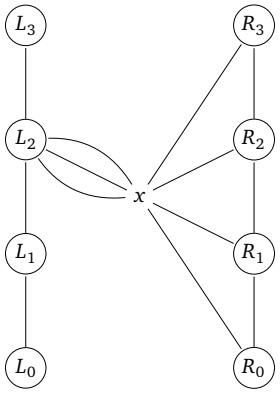


图 14 Alexander 的优雅示例

这促使 Alexander 转向一种更自底向上的分解方法。

I 比较分解

我将 Alexander 的分解与我的程序所完成的分解进行了比较：第一次使用 HIDECS2-Actual生成截至第 4 层的分解（Alexander 的最低层级），第二次使用 HIDECS2-rpg。我重新构建这一可能的树结构的最佳尝试见图15，其中填入了可能的划分 X 和Y 。

I.1 使用我重新编码的 HIDECS2

让我们来看看我的程序在为印度村庄搜索多出50 倍的起始集合时得出了什么结果：图 16。

注意，层级 16 4 有叶组。我们来比较一下这与 Alexander 的分解。首先，给出他所用分解中的一些划分定义：

$$\mathrm{CA}(\pi_1) = \{\mathsf{A} \cup \mathsf{C}, \mathsf{B} \cup \mathsf{D}\} \tag{62}$$

$$\mathrm{CA}(\pi_2) = \{\mathsf{A}, \mathsf{B}, \mathsf{C}, \mathsf{D}\} \tag{63}$$

$$\mathrm{CA}(\pi_4) = \{\mathsf{A1}, \mathsf{A2}, \mathsf{A3}, \mathsf{B1}, \mathsf{B2}, \mathsf{B3}, \mathsf{B4}, \mathsf{C1}, \mathsf{C2}, \mathsf{D1}, \mathsf{D2}, \mathsf{D3}\} \tag{64}$$

现在来看我的分解：

$$Lf(node) = \text{union of all leaves reachable from } node \tag{65}$$

$$Leaves(n) = \{Lf(node) \mid Label(node) = n\} \tag{66}$$

$$\mathrm{rpg}(\pi_1) = Leaves(1) \tag{67}$$

$$\mathrm{rpg}(\pi_2) = Leaves(2) \tag{68}$$

$$\mathrm{rpg}(\pi_4) = Leaves(4) \tag{69}$$

简单来说：例如，要计算 $\mathrm{rpg}(\pi_2)$，找到所有标记为 2 的带圈节点，并收集它们下方叶节点的集合——不要把它们取并集，只需收集起来。

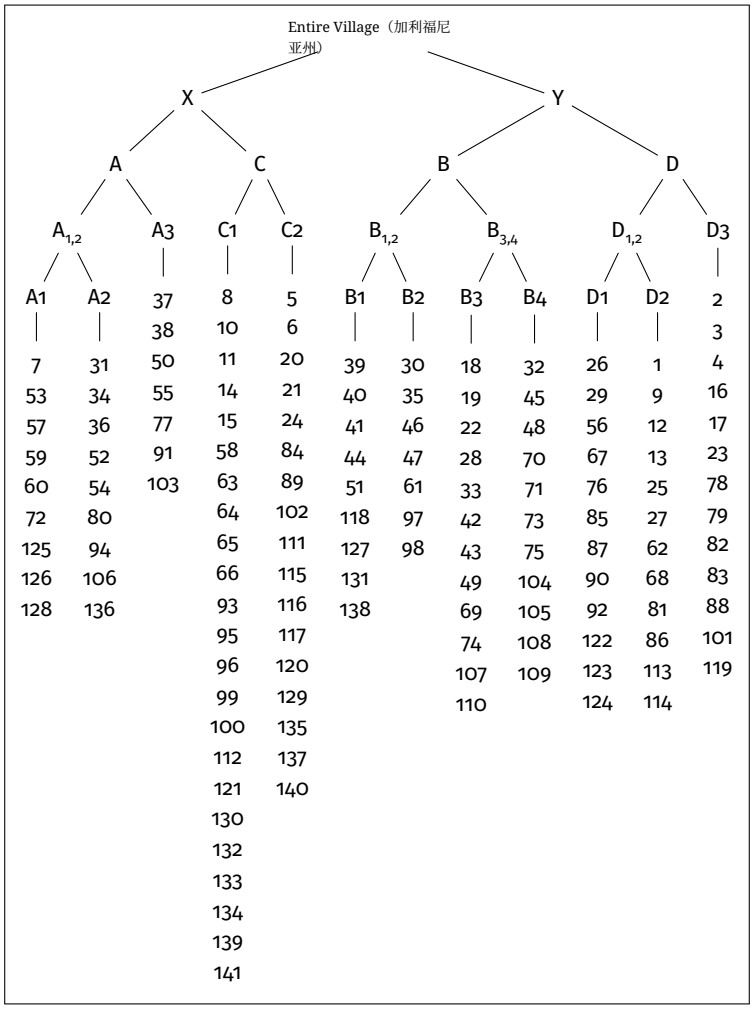
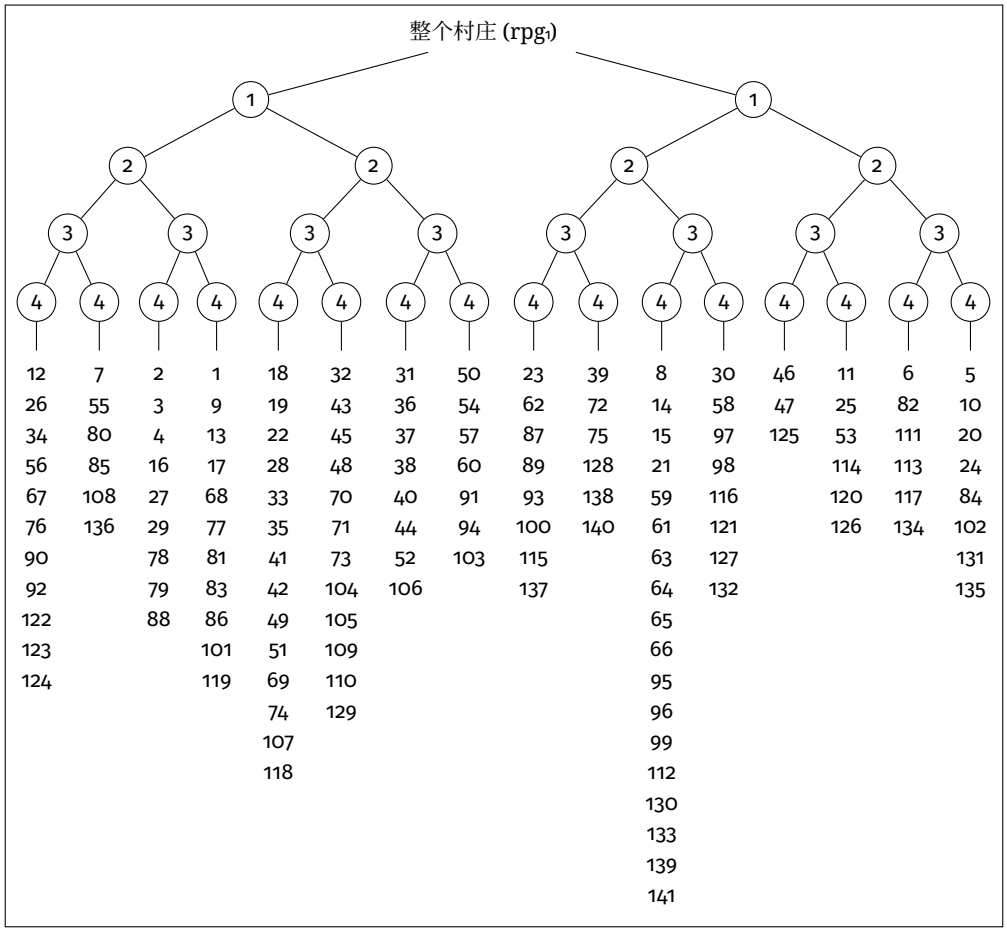


图15 Entire Village（加利福尼亚州）

划分 $\mathrm{rpg}(\pi_4)$ 有 16 个集合。我们将查看树中的各个层级，它们表示将整个印度村庄划分为不同粒度的划分。

我将使用HIDECS2-Notes（也称为$R(\pi)$）作为优度度量。请注意，在标为**CA**的柱子中，显示的值是$R(CA(\pi))$；在标为$\mathbf{rpg}_\pi$的柱子中，显示的值是$R(rpg(\pi))$（绿色表示结果更好）：

划分（π）	CA	$\mathbf{rpg}_\pi$
π_1	−434.40	−655.12
π_2	−945.57	−940.48
π_4	−1072.62	



■ **图 16** 整个村庄 (rpg_I)

I.2 使用我构想的优度度量

我又做了一项实验，构思出自己的内聚/耦合优度度量：HIDECS2-rpg，详见附录D。它得出了图17所示的分解

与上述对分解的比较类似，这一项的度量方式如下：

划分 (π)	CA	rpg_I
π_1	−434.40	−652.82
π_2	−945.57	−891.87
π_4	−1072.62	−1089.22

J 需求文本比较

以下是 Alexander 对印度村庄进行的分解与我的两个程序所进行的分解之间的比较：第一个只是我版本的 Alexander HIDECS2 程序，

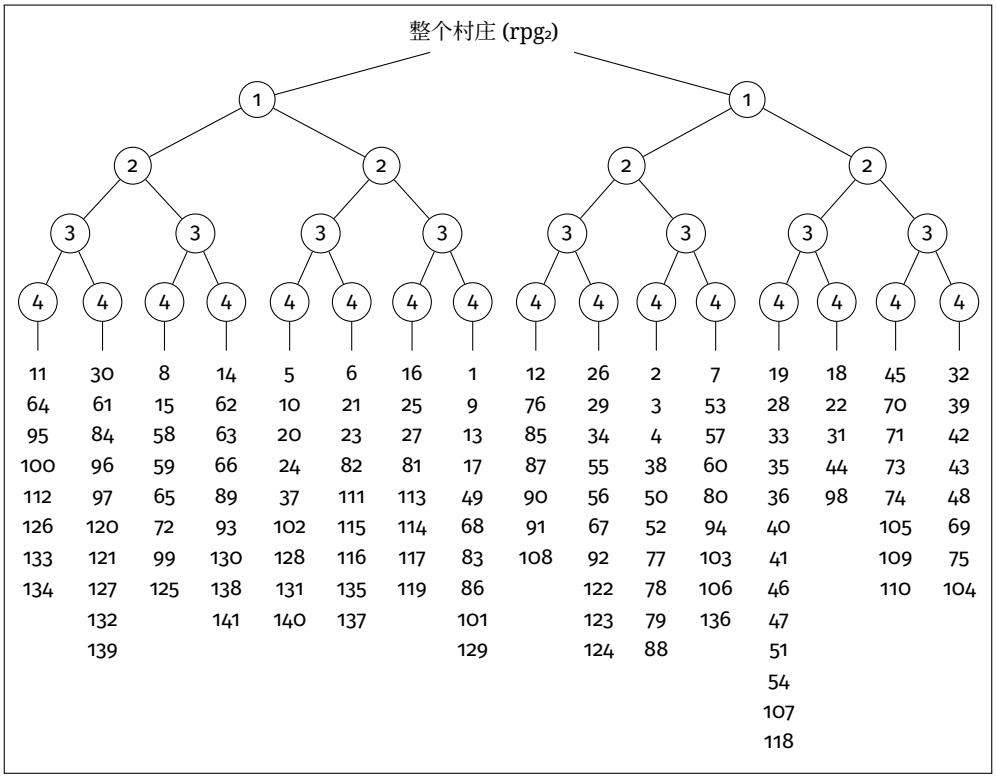


图17 整个村庄 (rpg_2)

但搜索了更多的起始划分；第二个则是使用我的优度度量的同一个程序，HIDECS2-rpg。你可以通过查看这些表格中的连贯性来判断这些分解的优劣。在此过程中，请牢记 Alexander 对该划分所写的内容：

> 我们必须记住，树所定义的集合层级并不总是容易理解。即使在一些仅包含六七个变量的较小集合中，这些变量看起来往往也彼此迥异，将它们并置在一起可能令人惊讶。只有仔细考察集合中每个变量与其他变量之间的功能关系，才能恰当地理解它的相关性。由于这类变量集合潜在的连贯性源自其物理含义，因此只有通过图形方式，借助能够凸显这些含义的构造图，才能把握这种连贯性。 [5]

第一个对应于标记为整个村庄 *(rpg_1)* 的树（图 16）；它使用 HIDECS2-Decomp，并检查数量多50 倍的初始划分。下表（背景为浅绿色）展示了 Alexander 的程序与我的程序所得到的最佳划分配对的文本。请注意，我的程序比 Alexander 报告的多生成了四个集合 —— 这些就是 “ 未配对 rpg 集合 ”。

A1 （共有 2 项）			rpg 第1组 （与 A1 配对）
53	牛的改良。	53	牛的改良。
126	与村级工作人员密切接触。	126	与村级工作人员密切接触。
7	牛被视为神圣的，并持素食态度。	11	婚姻对象来自另一个村庄。
57	保护牛免受疾病侵害。	25	为身体残障者、老年人提供援助，寡妇。
59	高效利用和营销乳制品。	114	发展女性的独立活动。
60	尽量减少畜力的使用，以缓解短缺带来的压力。	120	可用于治疗疾病的治疗措施适用于 vil- 民提供疾病治疗措施。
72	如果季风失常，就预防饥荒。		
125	预防营养不良。		
128	为农作物提供价格保障。		

A2 （4项相同）			rpg 第2组 （与 A2 配对）
31	肥料的高效分配 ，粪肥 ，seed, 从村庄仓储运往田地。	31	肥料的高效分配 ，粪肥 ，seed, 从村庄仓储运往田地。
36	保护农作物免遭窃贼、牛、山羊，猴子等侵害。	36	保护农作物免遭窃贼、牛、山羊，猴子等侵害。
52	增加可用饲料的数量。	52	增加可用饲料的数量。
106	幼树需要防止山羊等动物啃食。	106	幼树需要防止山羊等动物啃食。
34	全面收集天然粪肥（动物和人类）。	37	提供用于分配和销售的储存设施，农作物的销售。
54	为饲喂牛只作准备。	38	提供打谷场及其保护免受劫掠者侵扰。
80	牛的安全保障。	40	最佳粮食作物。
94	牲畜交通的安排。	44	必须将农作物从田地运回家。
136	为流动种姓群体提供住所，以及新来劳动力等。		

A3 （3个共用）			rpg 第3组 （与A3配对）
50	受保护的饲料储存设施。	50	受保护的饲料储存设施。
91	燃料的供应和储存。	91	燃料的供应和储存。
103	牛车可通行至房屋，以运送散装谷物，饲料。	103	牛车可通行至房屋，以运送散装谷物、饲料。
37	提供储存设施，以便分发和销售农作物。	54	提供饲喂牛只的设施。
38	提供打谷场并加以保护免受劫掠者侵扰。	57	保护牛免受疾病侵害。
55	牛的饮水获取。	60	尽量减少使用畜力，以减轻短缺带来的压力。
77	村庄和独立住宅必须受到保免受火灾侵害。	94	为牲畜交通提供便利。

B1（共有 2 项）			rpg 第4组 （与 B1 配对）
39	最适宜种植棉花和经济作物。	39	最适宜种植棉花和经济作物。
138	实现经济独立，以免给国家交通运输和资源造成负担。	138	实现经济独立，以免给国家交通运输和资源造成负担。
40	最佳粮食作物。	72	如果季风失常，就能防止饥荒。
41	良好的蔬菜作物。	75	土地排水以防止内涝等。
44	必须把田地里的农作物运回家。	128	农作物的价格保障。
51	提高现有饲料的质量。	140	弘扬农村社区精神：消除自我- 倾向 ，孤立主义。
118	通过考试传播的示范项目 ple.		
127	与区块发展官员和外部人员接触紧张局势官员。		
131	潘查亚特必须拥有更多电力和威望。		

B2（共有3项）		rpg 第5组 （与 B2 配对）	
30	高效、快速地分配种子、肥料——等物资，从区总部发出。	30	高效、快速地分配种子、肥料——料等，来自区总部。
97	尽量降低散装农产-品（谷物、马铃薯等）的运输成本。	97	尽量降低散装农产-品（谷物、马铃薯等）的运输成本。
98	日常农产品需要廉价且持续的（季风期间）进入市场的途径。	98	日常农产品需要廉价且稳定的（季风期间）进入市场的途径。
35	保护农作物免受昆虫、杂草和疾-病侵害。	58	发展其他畜牧业。
46	尊重传统农业实践。	116	改善成人识字水平。
47	旧农具损坏时对新农具的需求，等等。	121	分娩设施、产前和产后护理，节育。
61	为劳动者提供充足的灵活就业机会，暂时（季节性）暂时（季节性）失业。	127	与区块发展官员及推广官员接触。
		132	需要开发能够受益于政府补贴的项目。

B3（共有10项）		rpg第6组 （与B3配对）	
18	需要在连续几代的儿子之间分配土地。	18	需要在连续几代的儿子之间分配土地。
19	人们希望拥有自己的土地。	19	人们希望拥有自己的土地。
22	废除扎明达尔制度和不平等的土地分配-配。	22	废除扎明达尔制度和不平等的土地分配-配。
28	明确的所有权界限和维护责任。	28	明确的所有权界限和维护责任。
33	充分利用肥沃土地。	33	充分利用肥沃土地。
42	高效耕地、除草、收割、平整-ing.	42	高效耕地、除草、收割、平整-ing.
49	合作农业。	49	合作农业。
69	从中获得尽可能充分的灌溉效益可利用水。	69	所获得的最大灌溉效益可利用水。
74	灌溉设施的维护。	74	灌溉设施的维护。
107	土壤保持。	107	土壤保持。
43	土地整合。	35	保护农作物免受昆虫、杂草和疾病侵害。
110	防止土地侵蚀。	41	优质蔬菜作物。
		51	提高可用饲料的品质。
		118	通过考试推广的示范项目ple.

B4 （共有 9 个）		rpg Set 7 （与 B4 配对）	
32	未耕地的开垦与利用。	32	未耕地的开垦与利用。
45	园艺业的发展。	45	园艺的发展。
48	土地短缺。	48	土地短缺。
70	全面收集地下水用于灌溉-溉。	70	全面收集地下水用于灌溉-tion.
71	全面收集季风雨水以供使用。	71	全面收集季风雨水以供使用。
73	为未来保护水资源。	73	为未来保护水资源。
104	保持植物生态健康。	104	保持植物生态健康。
105	林地不足。	105	林地不足。
109	侵蚀土地、冲沟等的复垦。	109	侵蚀土地、冲沟等的复垦。
75	土地排水以防止内涝等。	43	土地整合。
108	道路和住宅侵蚀。	110	防止土地侵蚀。
		129	派系拒绝合作或达成一致。

C1 （共有 15 项）		rpg Set 8 （与 C1 配对）	
8	种姓成员尽可能维持其种姓职业——尽可能扩展。	8	种姓成员尽可能维持其种姓职业——尽可能地……
14	村庄经济整合，以实物支付为基础。	14	村庄经济整合，以实物支付为基础。
15	向现金支付的现代转变。	15	向现金支付的现代转变。
63	乡村工业的发展。	63	乡村工业的发展。
64	简化劳动力的流动，往返于村-庄，以及田地和工业之间以及房屋之间。	64	简化劳动力往返乡村的流动，以及往返田地、工业和房屋的流动。
65	乡村经济基础多样化——并非所有职业都是农业的。	65	乡村经济基础多样化——并非所有职业均为农业相关。
66	高效的电力供应与使用。	66	高效的电力供应与使用。
95	尽可能靠近公交车站。	95	尽可能靠近公交车站。
96	可通往火车站。	96	可通往火车站。
99	工业需要强大的交通支持。	99	工业需要强大的交通支持。
112	可通往中学。	112	进入中学的途径。
130	需要增加激励措施，提升抱负。	130	需要增加激励措施，提升抱负。
133	与邻近村庄实现社会融合。	133	与邻近村庄实现社会融合。
139	通过桥梁、道路、医院实现适当连接，tals, 学校 ，	139	与桥梁、道路、医院的适当连接-tals, 学校 ，
141	防止年轻人和工匠迁移-到城市。	141	防止年轻人和工匠迁移-迁往城市。
10	铺张婚礼的需求。	21	消除不可接触制。
11	与来自另一个村庄的人结婚。	59	高效利用和销售乳制品。
58	发展其他畜牧业。	61	为暂时（季节性）失业的劳动者提供充足的灵活就业机会暂时（季节性）失业。
93	照明。		
100	为每个村庄规定自行车使用年龄，由1965年。		
121	分娩设施、产前和产后护理，节育。		
132	需要开发能够受益于政府补贴的项目。		
134	希望跟上邻近村庄的成就，这些村庄令人厌烦。		

C2（共有 6 项）			rpg Set 9（与 C2 配对）
5	为节庆和宗教集会提供场地。	5	为节庆和宗教集会提供场地。
20	不同派系的人更愿意不设有接触。	20	不同派系的人更倾向于彼此不接触。
24	地点 用于村庄 活动——舞蹈, 戏剧, 歌唱等、摔跤。	24	场所 供村庄 活动——舞蹈, 戏剧, 歌唱等、摔跤。
84	用于存放村 പഞ്ചായത്ത് 记录、召开会议的住所——等。	84	用于存放村 പഞ്ചായത്ത് 记录、召开会议的住所——等。
102	供游行队伍使用的住所。	102	游行队伍的住所。
135	传播有关税收、选举的官方信息, 举 , etc.	135	传播有关税收、选举的官方信息, 举 , etc.
6	对寺庙的愿望。	10	铺张婚礼的需求。
21	消除不可接触制。	131	潘查亚特必须拥有更大的权力和更高的威望。
89	供应商品供出售。		
111	提供初等教育。		
115	青年活动的机会。		
116	提高成人识字率。		
117	避孕知识的传播, 分—— ease, etc.		
120	为村庄提供疾病治疗措施, 村—— 民。		
129	各派系拒绝合作或达成共识。		
137	无线电通信。		
140	培育农村社区精神：摒弃自我中心主义，孤立主义。		

D1 （9项相同）			rpg 第10组 （与D1配对）
26	情感体系：希望不要摧毁旧有生活方式；对主导现有习惯的热爱沐浴、食物等。	26	情感体系：不愿摧毁旧有的生活方式；对主导现有习惯的热爱沐浴、食物等。
56	牛的遮蔽住所（睡眠, 挤奶、喂养）。	56	牲畜遮蔽住所（睡眠, 挤奶、喂养）。
67	饮用水应洁净、甘甜。	67	饮用水应洁净、甘甜。
76	防洪以保护房屋、道路等。	76	用于保护房屋、道路等的防洪措施。
90	更好地为备餐提供条件。	90	更好地为备餐提供条件。
92	房屋必须清洁、 ，已清洗，排水。	92	房屋必须清洁 ，清洗 ，排水。
122	人体排泄物处置。	122	人体排泄物处置。
123	防止细菌滋生和致病因子传播。	123	防止细菌滋生和致病因子。
124	防止传播媒介传播人类疾病, 感染、传染。	124	防止传播媒介传播人类疾病, 感染、传染。
29	提供按性别分隔的每日沐浴设施, 种姓和年龄。	12	大家庭住在一所房屋里。
85	每个人用于坐卧和睡眠的住所都应免受雨水侵袭。	34	完整收集天然粪肥（动物和人类）。
87	货物安全储存。		

D2 （共有 6 个）		rpg Set 11 （与 D2 配对）	
1	哈里जन人被视为仪式上不洁、不可接触的——able, etc.	1	哈里जन人被视为仪式上不洁、不可接触的——able, etc.
9	同一种姓的成员喜欢聚在一起，并且与其他人分开，不会一起吃饭或喝水。	9	同一种姓的成员喜欢聚在一起，并且与其他人分开，不会一起吃饭或喝水。
13	即使在……之后，家庭团结和邻里和睦仍然分离。	13	即使在分离之后，家庭团结与邻里和睦分离。
68	便于获取饮用水。	68	便于获取饮用水。
81	女性和儿童的安全保障。	81	妇女和儿童的安全保障。
86	没有过度拥挤。	86	没有过度拥挤。
12	大家庭住在同一所房屋里。	17	村庄有固定的男性社交群体。
25	为身体残障者、老年人提供援助，寡妇。	77	村庄和独立住宅必须受到保护，以防火灾。
27	家庭具有专制性。	83	夏季人们露天睡觉。
62	提供家庭手工业和手工艺工商店和培训。	101	村庄内的行人交通。
113	学生出勤率高。	119	高效利用学校；不让学生分心。
114	发展女性的独立活动关系。		

D3 （7 个共同项）		rpg 第12组 （与 D3 配对）	
2	妥善处置死者。	2	妥善处置死者。
3	关于房屋门不得朝向南方的规定。	3	关于房屋门不能朝向南方的规定。
4	某些水和某些树木被视为神圣的。	4	某些水和某些树木被视为神圣的。
16	女性 畅所欲言地闲聊 沐浴时，取水时、去田间厕所的路上等。	16	女性 畅所欲言地闲聊 沐浴时，取水、前往田间厕所的途中等。
78	供人坐下和行走的荫凉处。	78	供人坐下和行走的荫凉处。
79	提供凉风。	79	提供凉风。
88	洗涤和晾晒衣物的地方。	88	洗涤和晾晒衣物的地方。
17	村庄有固定的男性社交群体。	27	家庭实行专制。
23	男子群体聊天、抽烟，甚至一直持续到深夜。	29	提供每日沐浴设施，按性别隔离，种姓和年龄。
82	为儿童提供玩耍场所（由成人监护）。		
83	夏季人们在露天睡觉。		
101	村庄内的行人交通。		
119	高效利用学校；不让学生分心凹痕。		

未配对的 rpg 第 13 组	
23	男子群体聊天、抽烟，甚至直到很晚夜里。
62	提供家庭手工业和工匠作坊以及培训。
87	货物安全储存。
89	提供商品供出售。
93	照明。
100	为每个村庄规定自行车使用年龄，由1965年。
115	青年活动的机会。
137	无线电通信。

未配对 RPG 第14组	
46	尊重传统农业实践。
47	旧农具损坏等情况发生时，需要新的农具损坏等。
125	预防营养不良。

未配对 RPG 集合 15	
6	希望建造寺庙。
82	为儿童提供玩耍的场所（在监督下——督）。
111	提供初等教育。
113	在学校出勤良好。
117	避孕知识的传播，ease, etc.
134	希望跟上邻近村庄的成就庄。

未配对 RPG 第16组	
7	牛被视为神圣的，且持素食态度度。
55	牛的饮水获取。
80	牛的安全保障。
85	每个人用于坐卧和睡眠的住所都应免受雨水侵袭。
108	道路和住宅侵蚀。
136	流动种姓群体的住所，新来的劳动力等。

第二个对应于标记为整个村庄 *(rpg₂)* 的树（图17）；它使用HIDECS2-rpg，并检查数量多出50 倍的初始划分。下表（背景为浅红色）展示了 Alexander 和我的程序所得划分中最佳配对的文本。请注意，我的程序比 Alexander 报告的多生成了四个集合——这些就是“未配对 rpg 集合”。

A1 （共有3项）			rpg 第1组 （与 A1 配对）
59	高效利用和销售乳制品。	59	高效利用和销售乳制品。
72	季风失常时防止饥荒。	72	季风失常时防止饥荒。
125	防止营养不良。	125	防止营养不良。
7	牛被视为神圣的，且素食主义态度——态度。	8	各个种姓的成员尽可能维持其种姓职业——尽可能扩展。
53	牛的改良。	15	现代社会正转向现金支付。
57	保护牛免受疾病侵害。	58	发展其他畜牧业。
60	尽量减少畜力的使用，以减轻短缺带来的压力。	65	乡村经济基础多样化——并非所有职业都属于农业。
126	与村级工作人员密切接触。	99	工业需要强大的交通运输能
128	农作物的价格保障。		力。

A2 （常见的4个）			rpg 第2组 （与A2配对）
80	牛的安全保障。	80	牛的安全保障。
94	为牲畜交通提供便利。	94	为牲畜交通提供便利。
106	幼树需要防范山羊等动物的侵害。	106	幼树需要防范山羊等动物的侵害。
136	流动种姓群体的住所，即将到来的劳动力等。	136	流动种姓群体的住所、即将到来的劳动力等。
31	肥料、粪肥和种子的高效分配，从村庄仓储运往田地。	7	牛被视为神圣，且饮食习惯素食.....度。
34	全面收集天然粪肥（动物和人类）。	53	牛的改良。
36	保护农作物，防止窃贼、牛、山羊、猴子等侵害。	57	保护牛免受疾病侵害。
52	增加可用饲料的数量。	60	尽量减少使用畜力，以缓解短缺造成的压力。
54	为饲喂牛只做好准备。	103	牛车可通往房屋，以便运送大量谷物，饲料。

A3 （共有 1 个）			rpg 第3组 （与 A3 配对）
91	燃料的供应与储存设施。	91	燃料的供应与储存设施。
37	用于分发和销售的储存设施，keting 农作物。	12	大家庭住在一所房屋里。
38	提供打谷场并保护其免受劫掠者侵扰。	76	防洪以保护房屋、道路等。
50	对饲料进行安全储存。	85	每个人用于坐卧和睡眠的住所都应能遮挡雨水。
55	牛的饮水获取。	87	货物安全储存。
77	村庄和独立住宅必须防火灾。	90	改善备餐条件。
103	牛车可通达房屋，运送散装谷物，饲料。	108	道路和住宅侵蚀。

B1（4项相同）			rpg 第4组 （与B1配对）
40	优质粮食作物。	40	优质粮食作物。
41	优质蔬菜作物。	41	优质蔬菜作物。
51	提高现有饲料的质量。	51	提高现有饲料的质量。
118	通过示范项目传播，例如——ple.	118	通过示范项目传播，例如——ple.
39	优质棉花和经济作物。	19	人们想要拥有个人土地。
44	农作物必须从田地里运回家。	28	适当的所有权界限和维护——维护责任。
127	与区块发展官员及前任紧张局势官员接触。	33	充分利用肥沃土地。
131	潘查亚特必须拥有更多电力和更高的威望。	35	保护农作物免受昆虫、杂草、疾病的侵害，轻松。
138	实现经济独立，以免给国家交通运输和资源造成负担。	36	保护农作物免遭窃贼、牛、山羊、猴子等侵害。
		46	尊重传统农业实践。
		47	旧农具损坏时需要新的农具等。
		54	饲喂牛只的供给。
		107	土壤保持。

B2（共有3项）			rpg 第5组 （与B2配对）
30	高效、快速地分配种子、化肥等——由区总部提供。	30	高效、快速地分配种子、化肥等——由区总部提供。
61	为暂时（季节性）失业的劳动者提供充足的灵活就业——暂时（季节性）失业。	61	为暂时（季节性）失业的劳动者提供充足的灵活就业岗位暂时（季节性）失业。
97	尽量降低散装农产品的运输成本，例如谷物、马铃薯等duce（谷物、马铃薯等）。	97	尽量降低散装农产品的运输成本，例如谷物、马铃薯等农产品（谷物、马铃薯等）。
35	保护农作物免受昆虫、杂草、病害侵扰。	84	为村 ಪಂಚಾಯ್ತಿ特记录、会议等提供住所。
46	尊重传统农业实践。	96	可前往火车站。
47	旧农具损坏时需要添置新农具，等等。	120	村民可获得治疗疾病的措施。
98	日常农产品需要以低廉的成本稳定供应（季风期间）前往市场的通道。	121	分娩设施、产前和产后护理，节育。
		127	与区块发展官员及前任紧张局势官员接触。
		132	需要开发能够受益于政府补贴的项目。
		139	与桥梁、道路、医……恰当连接tals, 学校 ，

B3（3个共同项）			**rpg第6组**（与B3配对）
42	高效耕地、除草、收割、平整-ing.	42	高效耕地、除草、收割、平整-ing.
43	土地整合。	43	土地整合。
69	尽可能获得的最大灌溉效益得自可利用水。	69	所获得的最大灌溉效益可利用水。
18	需要在历代儿子之间分配土地世代。	32	土地开垦和未耕地的利用。
19	人们希望拥有自己的土地。	39	最优质的棉花和经济作物。
22	废除扎明达尔制度和不均衡的土地分配——配。	48	土地短缺。
28	明确的所有权界限和维护责任。维护责任。	75	对土地进行排水，以防止内涝等问题。
33	充分利用肥沃土地。	104	保持植物生态健康。
49	合作农业。		
74	灌溉设施维护。		
107	土壤保持。		
110	防止土地侵蚀。		

B4（共有 6 个）			**rpg Set 7**（与 B4 配对）
45	园艺的发展。	45	园艺的发展。
70	全面收集用于灌溉的地下水。	70	全面收集用于灌溉的地下水。
71	全面收集季风雨水以供使用。	71	全面收集季风雨水以供使用。
73	保护水资源，以备将来使用。	73	保护水资源，以备将来使用。
105	林地不足。	105	林地不足。
109	侵蚀土地的复垦、冲沟等。	109	侵蚀土地的复垦、冲沟等。
32	未耕地的开垦与利用。	74	灌溉设施的维护。
48	土地短缺。	110	防止土地侵蚀。
75	土地排水，以防止内涝等。		
104	保持植物生态健康。		
108	道路和住宅侵蚀。		

C1 （共有 7 项）			rpg Set 8 （与 C1 配对）
11	婚姻对象来自另一个村庄。	11	婚姻对象来自另一个村庄。
64	简化劳动力流动，即往返于村- 村庄，以及往返田地和工业区 和房屋。	64	简化劳动力流动，往返于村 庄，以及往返田地和工业区 和房屋。
95	尽可能靠近公交车站。	95	尽可能靠近公交车站。
100	到1965年，每个村庄都应配备自行车使用年龄 1965年。	100	到1965年，每个村庄都应配备自行车使用年龄 1965年。
112	可到达一所中学。	112	能进入中学就读。
133	与邻近村庄实现社会融合。	133	与邻近村庄实现社会融合。
134	希望赶上邻近村庄的成就—— 乏的村庄。	134	希望赶上邻近村庄的成就—— 无聊的乡村。
8	各个种姓的成员尽可能维持其种姓职业—— 尽可能扩展。	126	与村级工作人员密切接触。
10	铺张婚礼的需求。		
14	基于按件计酬的村庄经济整合—— 种类基础。		
15	向现代化转变，采用现金支付。		
58	发展其他畜牧业。		
63	发展乡村工业。		
65	乡村经济基础多样化——并非 所有职业都属于农业。		
66	高效的电力供应与使用。		
93	照明。		
96	前往火车站的交通。		
99	工业需要强大的交通支 持。		
121	分娩设施、产前和产后护理， 节育。		
130	需要加大激励措施，提升抱负。		
132	需要开发能够受益于 政府补贴。		
139	与桥梁、道路、医院的适当连接—— tals, 学校 ，		
141	防止年轻人和哈里— 扬迁移到城市。		

C2（共同项为 7）			rpg Set 9（与 C2 配对）
6	对寺庙的愿望。	6	对寺庙的愿望。
21	消除不可接触制。	21	消除不可接触制。
111	提供初等教育。	111	提供初等教育。
115	开展青年活动的机会。	115	开展青年活动的机会。
116	提高成人识字水平。	116	提高成人识字率。
135	传播有关税收、选举的官方信息，选举，etc.	135	传播有关税收、选举的官方信息，选举，etc.
137	无线电通信。	137	无线电通信。
5	为节庆和宗教集会提供场所。	23	男子群体聊天、抽烟，甚至直到很晚夜里。
20	不同派系的人不愿有任何接触。	82	为儿童提供玩耍的场所（在监督下）。
24	场所 供村庄 活动使用——舞蹈、 戏剧、歌唱等、摔跤。		
84	村 ಪಂಚಾಯ್ತಿ特记录、集会等的住所。		
89	用于销售的商品供应。		
102	供游行队伍使用的住所。		
117	避孕知识的传播、ease, etc.		
120	村民可获得的疾病治疗措施，适用于村民。		
129	派系拒绝合作或达成一致。		
140	培育农村社区精神：消除自私心 ，孤立主义。		

D1 （共有8项）			**rpg 第10组** （与D1配对）
26	情感体系：不愿摧毁旧有生活方式；对支配沐浴、食物等现有习惯的热爱沐浴、食物等。	26	情感体系：不愿摧毁旧有生活方式；对支配现有习惯的热爱沐浴、食物等。
29	提供每日沐浴设施，并按性别划分，种姓和年龄。	29	提供每日沐浴设施，并按性别划分，种姓和年龄。
56	牲畜遮蔽住所（睡眠，挤奶，喂养）。	56	牲畜遮蔽住所（睡眠，挤奶，喂养）。
67	饮用水应清洁、甘甜。	67	饮用水应清洁、甘甜。
92	房屋必须清洁 ，清洗 ，排水。	92	房屋必须清洁 ，清洗 ，排水。
122	人体排泄物处置。	122	人体排泄物处置。
123	防止细菌滋生和致病因子滋生。	123	防止细菌滋生和致病因子滋生。
124	防止传播媒介传播人类疾病，感染、传染。	124	防止传播媒介传播人类疾病，感染、传染。
76	防洪，以保护房屋、道路等。	34	全面收集天然粪肥（动物和人类）。
85	为每个人提供坐下和睡眠应受到雨水的保护。	55	牛的饮水获取。
87	货物安全储存。		
90	更完善的备餐条件。		

D2 （有5个共同点）		rpg Set 11 （与D2配对）	
1	哈里जन人被视为仪式上不洁、不可接触——able, etc.	1	哈里जन人被视为仪式上不洁、不可接触——able, etc.
9	同一种姓的成员喜欢待在一起，并且与他人分开，不会一起吃饭或喝水。	9	同一种姓的成员喜欢聚在一起，并且与他人分开，不会一起吃饭或喝水。
13	即使在……之后，家庭团结与邻里和睦仍然分开。	13	即使分开后，家庭团结、邻里和睦分开。
68	方便取用饮用水。	68	方便取用饮用水。
86	没有过度拥挤。	86	没有过度拥挤。
12	大家庭住在一栋房屋里。	17	村庄有固定的男性社交群体。
25	为身体残障者、老年人提供援助，寡妇。	49	合作农业。
27	家庭是专制的。	83	夏季人们露天睡觉。
62	提供家庭手工业和手工艺作坊——以及培训。	101	村庄内的行人交通。
81	保障妇女和儿童的安全。	129	派系拒绝合作或达成一致。
113	在学校出勤良好。		
114	女性独立活动的发展-关联性。		

D3 （共有 6 项）		rpg Set 12 （与 D3 配对）	
2	妥善处置死者。	2	妥善处置死者。
3	关于房屋门不得朝南的规则。	3	关于房屋门不得朝南的规则。
4	某些水和某些树木被认为是神圣的。	4	某些水和某些树木被视为神圣的。
78	供人坐下和行走的荫凉。	78	供人坐下和行走的荫凉。
79	提供凉风。	79	提供凉风。
88	洗涤和晾晒衣物的地方。	88	洗涤和晾晒衣物的地方。
16	女性 闲聊 广泛地 而 沐浴，取水、前往田间厕所的途中等。	38	提供打谷场并加以保护防范劫掠者。
17	村庄有固定的男性社交群体。	50	受保护的饲料储存设施。
23	男子群体聊天、吸烟，甚至深夜也仍在继续。	52	增加可供使用的饲料数量。
82	为儿童提供玩耍的场所（须有人监护）。	77	村庄和独立住宅必须得到保免受火灾侵害。
83	夏季人们露天睡觉。		
101	村庄内的行人交通。		
119	高效利用学校；不分散学生的注意力。		

未配对的 RPG 第 13 组	
5	为节庆和宗教集会提供场所。
10	铺张婚礼的需求。
20	不同派系的人们更愿意彼此互不接触。
24	场所 供村庄使用 活动——舞蹈， 戏剧，歌唱等、摔跤。
37	提供储存设施，用于分销和销售农作物。
102	为游行队伍提供住所。
128	为农作物提供价格保障。
131	潘查亚特必须拥有更多电力和尊重。
140	培育农村社区精神：消除自私——心 ，孤立主义。

未配对 RPG 第14组	
14	以按件计酬的方式进行村庄经济整合 。
62	提供家庭手工业和工匠作坊 及培训。
63	乡村工业的发展。
66	高效的电力供应与使用。
89	供应商品以供出售。
93	照明。
130	需要更多激励措施和抱负。
138	实现经济独立，以免 加重国家交通运输和资源的负担。
141	防止年轻人和哈里—— 詹迁移到城市。

未配对 RPG 集合 15	
16	女性 广泛传播八卦 在沐浴时， 取水时、前往田间厕所的途中等。
25	为身体残障者、老年人提供援助， 寡妇。
27	家庭实行权威主义。
81	保障妇女和儿童的安全。
113	在学校出勤良好。
114	发展女性的独立活 动。
117	避孕知识的传播，dis- ease, etc.
119	高效利用学校；不让学 生分心。

未配对 RPG 第16组	
18	需要在连续几代的儿子之间分配土地 。
22	废除扎明达尔制度以及土地分配不均— 配。
31	肥料的高效分配 ，粪肥 ，seed, 从村庄仓储运往田地。
44	农作物必须从田地运回家中。
98	日常农产品需要廉价且稳定的 （季风期间）市场通道。

K 内聚与耦合的三个示例

在附录 J 中，我们考察了与 Alexander 对印度村庄的分解相关的需求文本，以及我的两个程序所做的分解：第一个程序只是他的程序，但搜索了更多的起始划分；第二个程序使用了我的优度度量，HIDECS2-rpg。在本附录中，我们将以一种不同的、更具数值性的方式来考察这些划分。

对于这三种分解，我计算了内聚与耦合的强度。结果列于三张表中：Alexander 在《笔记》中报告的分解见图 18；整个村庄 *(rpg₁)*（图 16）的表见图 19；而整个村庄 *(rpg₂)*（图 17）的表见图 20。

内聚度量位于对角线上，耦合位于对角线之外。对于内聚，我展示的是完全位于一个划分集内的交互链接数与理论最大值之比，即 $\overline{|M|\cdot(|M|_2}^{-1)}$，其中 M 是划分集。数值越大越好，范围为 $[0,1]$。

	A1	A2	A3	B1	B2	B3	B4	C1	C2	D1	D2	D3
A1	.444	.173	.095	.210	.063	.056	.061	.092	.052	.074	.037	.009
A2	.173	.778	.238	.123	.079	.231	.131	.029	.046	.111	.176	.077
A3	.095	.238	.381	.063	.061	.179	.052	.037	.025	.155	.095	.099
B1	.210	.123	.063	.500	.222	.231	.172	.116	.098	.065	.083	.017
B2	.063	.079	.061	.222	.476	.226	.130	.193	.084	.012	.036	.055
B3	.056	.231	.179	.231	.226	.682	.341	.058	.059	.076	.125	.051
B4	.061	.131	.052	.172	.130	.341	.618	.087	.032	.068	.061	.133
C1	.092	.029	.037	.116	.193	.058	.087	.447	.184	.058	.174	.064
C2	.052	.046	.025	.098	.084	.059	.032	.184	.353	.034	.142	.113
D1	.074	.111	.155	.065	.012	.076	.068	.058	.034	.576	.292	.141
D2	.037	.176	.095	.083	.036	.125	.061	.174	.142	.292	.576	.205
D3	.009	.077	.099	.017	.055	.051	.133	.064	.113	.141	.205	.385

■ **图 18** Alexander 分解的内聚与耦合强度

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	.709	.258	.222	.182	.149	.045	.057	.143	.136	.045	.025	.125	.000	.167	.091	.023
2	.258	.400	.037	.212	.060	.083	.167	.143	.042	.028	.065	.021	.056	.028	.000	.042
3	.222	.037	.528	.222	.040	.157	.056	.032	.042	.000	.043	.056	.000	.074	.111	.042
4	.182	.212	.222	.564	.104	.144	.125	.104	.159	.061	.146	.068	.030	.106	.152	.125
5	.149	.060	.040	.104	.571	.304	.259	.133	.027	.155	.071	.152	.190	.048	.024	.036
6	.045	.083	.157	.144	.304	.682	.188	.119	.042	.167	.120	.083	.056	.014	.000	.052
7	.057	.167	.056	.125	.259	.188	.643	.286	.078	.146	.062	.172	.083	.042	.021	.062
8	.143	.143	.032	.104	.133	.119	.286	.667	.071	.000	.032	.089	.000	.071	.024	.036
9	.136	.042	.042	.159	.027	.042	.078	.071	.536	.188	.215	.172	.042	.083	.104	.125
10	.045	.028	.000	.061	.155	.167	.146	.000	.188	.467	.194	.125	.000	.028	.028	.083
11	.025	.065	.043	.146	.071	.120	.062	.032	.215	.194	.601	.312	.130	.130	.148	.139
12	.125	.021	.056	.068	.152	.083	.172	.089	.172	.125	.312	.571	.125	.167	.104	.156
13	.000	.056	.000	.030	.190	.056	.083	.000	.042	.000	.130	.125	.333	.000	.056	.042
14	.167	.028	.074	.106	.048	.014	.042	.071	.083	.028	.130	.167	.000	.333	.167	.021
15	.091	.000	.111	.152	.024	.000	.021	.024	.104	.028	.148	.104	.056	.167	.667	.208
16	.023	.042	.042	.125	.036	.052	.062	.036	.125	.083	.139	.156	.042	.021	.208	.536

■ **图 19** 整个村庄 *(rpg_1)* 的内聚与耦合强度（图 16）

对于耦合，我展示的是两个划分集之间的链接数量与理论最大值之比，即 $|M| \cdot |N|$。数值越小越好，范围为 $[0, 1]$。

从表格中可以看出，对角线元素通常比非对角线元素的值更大；这与强内聚、弱耦合的目标是一致的。不过，盯着数字看虽然可能很有说服力，却也会令人费解。两张图以更直观的方式展示了这些数据：一张展示内聚，另一张展示耦合。

它们分别对每项特征（内聚、耦合）采用相应的度量比率——实际值与理论最大值之比——按从高到低排序，并将这些点用直线连接绘制出来。内聚的图示见图 21。“CA”指《笔记》中印度村庄的分解；“rpg1”指整个村庄（rpg_1）（图 16）；“rpg2”指整个村庄（rpg_2）（图17）。在这里我们可以看到，与 rpg1 和 rpg2 相比，Alexander 的分解相当一致地表现出较低的内聚。这是由两个原因造成的：首先，优度度量寻求的是弱耦合，而弱耦合通常与更强的内聚相伴；其次，rpg1 和 rpg2 都进行了更为彻底的搜索。

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	.571	.250	.172	.222	.125	.125	.141	.125	.089	.000	.012	.056	.038	.050	.031	.062
2	.250	.533	.225	.189	.089	.167	.088	.090	.114	.040	.030	.033	.100	.280	.112	.062
3	.172	.225	.679	.389	.125	.153	.078	.088	.018	.025	.038	.111	.077	.225	.062	.094
4	.222	.189	.389	.722	.148	.210	.111	.200	.127	.033	.044	.025	.111	.089	.083	.125
5	.125	.089	.125	.148	.472	.210	.028	.244	.063	.033	.067	.049	.077	.156	.028	.042
6	.125	.167	.153	.210	.210	.556	.181	.111	.016	.033	.067	.037	.026	.022	.056	.028
7	.141	.088	.078	.111	.028	.181	.607	.275	.143	.225	.075	.056	.019	.025	.016	.016
8	.125	.090	.088	.200	.244	.111	.275	.622	.157	.180	.130	.144	.138	.080	.112	.138
9	.089	.114	.018	.127	.063	.016	.143	.157	.714	.286	.157	.079	.088	.114	.125	.036
10	.000	.040	.025	.033	.033	.033	.225	.180	.286	.667	.120	.144	.146	.060	.050	.062
11	.012	.030	.038	.044	.067	.067	.075	.130	.157	.120	.378	.122	.085	.140	.188	.112
12	.056	.033	.111	.025	.049	.037	.056	.144	.079	.144	.122	.500	.145	.222	.056	.042
13	.038	.100	.077	.111	.077	.026	.019	.138	.088	.146	.085	.145	.474	.292	.202	.288
14	.050	.280	.225	.089	.156	.022	.025	.080	.114	.060	.140	.222	.292	.900	.275	.275
15	.031	.112	.062	.083	.028	.056	.016	.112	.125	.050	.188	.056	.202	.275	.750	.422
16	.062	.062	.094	.125	.042	.028	.016	.138	.036	.062	.112	.042	.288	.275	.422	.750

图 20 整个村庄的内聚与耦合强度（整个村庄 (rpg_2) ）（图17）

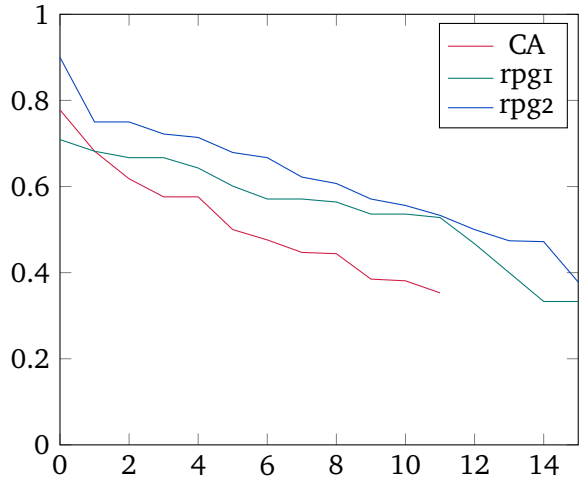


图 21 凝聚图

现在让我们看看耦合：图 22。在这里我们看到，Alexander 的分解总体上具有更好的耦合。根据HIDECS2-Notes，rpg1 的度量结果优于 Alexander，这似乎表明HIDECS2-Notes 在比较大小不同的划分时表现不佳。由于我们看不到 Alexander 的完整分解，因此很难进行推测。

L 一种现代方法

我在 2004 [26, 27] 中 Newman 和 Girvan 的作品里，发现了一种解决 Alexander 试图处理的同一基本问题的现代方法。他们写道：

> 我们提出并研究了一组用于发现网络中社区结构的算法——即将网络节点自然划分为连接紧密的子群……我们还提出了一种用于度量社区结构强度的方法

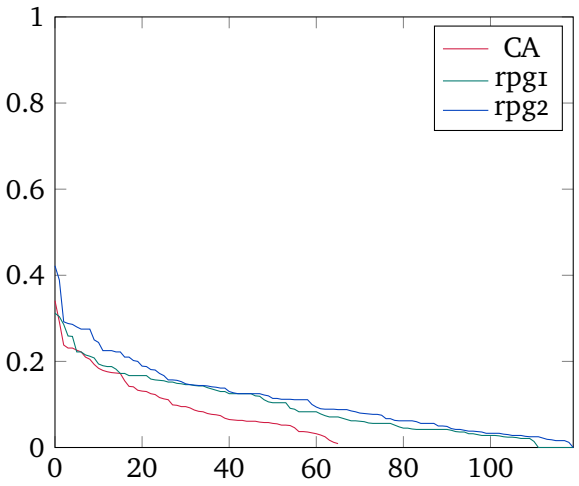


图22 耦合图

该社区结构由我们的算法发现，并为选择应将网络划分为多少个社群提供了客观指标。

它们的优度度量很容易表达，但计算起来稍微有些棘手。假设节点集已被划分为n 个集合（或者他们称之为社群）：

e_{ij} = 连接社群i 中的顶点与社群j中的顶点的所有边所占的比例

(70)

$$a_i = \sum_j e_{ij} \tag{71}$$

$$Q = \sum_i (e_{ii} - a_i^2) \tag{72}$$

棘手之处在于，每条边对e_{ij} 的贡献都只能计入一次，要么在对角线上方，要么在下方，不能两边都计入。例如，可以将每条边的贡献各分一半，分别计入e_{ij} 和e_{ji}；但连接同一群组内部节点的边除外，它们的贡献应全部计入唯一的对角元素e_{ii}。

首先，我们来看看这个度量如何评价我们在附录 I、J 和 K 中考察过的三种分解：印度村庄问题的亚历山大分解、整个村庄（rpg_1）（图 16），以及整个村庄（rpg_2）（图 17）。

分解	Q
CA	.208
rpg1	.193
rpg2	.176

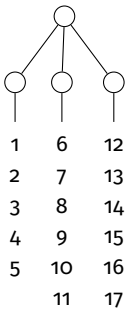
数值越大越好，但 Newman 表示，低于 .3 时，社区结构较弱。请注意，Alexander 的结果最好。但它真的好吗?

Newman 建议使用一种以 Q 作为优度度量的“聚合”算法；他的算法本质上就是 Alexander 在 HIDECS 3 中提出的 BLDUP。我决定改用 STABL，这是 Alexander 从 BLDUP 转用的算法。结果很有意思。Newman 提到，Q 配合聚合算法可以确定社群的最佳数量。这一点与 Karger 算法相似。结果如下：

集合 1： 1, 2, 3, 4, 7, 9, 12, 13, 16, 17, 25, 26,27, 29, 34, 55, 56, 67,68, 76, 77,78, 79,80, 81, 83,85,86, 87,88, 90, 91, 92, 94, 101,103,108, 113, 114, 119,122, 123,124, 136集合 2： 5, 6, 8, 10, 11, 14, 15, 20, 21, 23, 24, 30, 58, 59, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 72, 82, 84, 89, 93,95, 96, 99,100, 102,111, 112,115, 116, 117,120, 121,125, 127,128, 129, 130, 131, 132, 133,134, 135, 137,138, 139,140, 141集合 3： 18, 19, 22, 28, 31, 32, 33, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41,42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52,54, 60, 69, 70, 71, 73, 74, 75, 97, 98, 104, 105, 106, 107, 109, 110,118集合 4： 53, 57,126

其度量值为 Q=.297，这几乎达到了 Newman 所建议的.3 阈值。请注意，这里有四个集合，而不是12 个或16个。

对于 HIDECS3-Graph，该程序生成如下结果：



这与我的程序结果相同；其度量值为 Q=.472，这是一个相当不错的社区结构。

与 Alexander 的程序一样，该程序在处理代表实际社群的网络时表现更好。

最后引用 Newman 和 Girvan 的话，他们二位都是物理学家：

> . . . 我们现在定义一种度量，用于衡量网络特定划分的质量，并将其称为模块化。 [27]

M 图 A 输入

要更好地理解 Alexander 的数据错误以及他的程序如何处理拼写错误（*punchos?*），可以看看 HIDECS 2 报告中的一个示例。它位于**图 A** 第 D3 页：

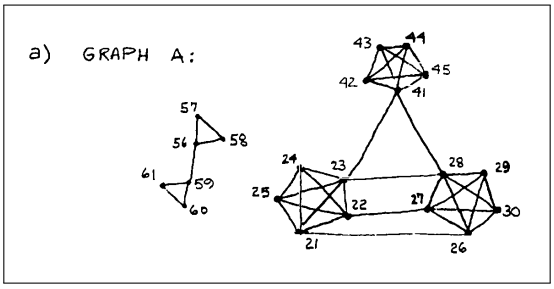
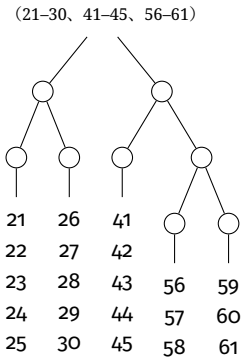


图24是程序输入卡片的打印输出（位于 HIDECS 2 报告第 D4 页）。看到它时，你会像我一样想到 Alexander 对拼写错误的处理：哦。

HIDECS 2 程序使用以下三种优度度量进行分区时，**图 A** 完全相同：

1. HIDECS2-Actual
2. HIDECS2-Decomp
3. HIDECS2-rpg



这正是 Alexander 所说他的程序生成的结果（见图23）。

查看图24中的原始输入时，请注意那些浅淡的铅笔痕迹：有人曾试图解读 1 的位置，将其与**图 A**的示意图联系起来。

N HIDECS 2，第25页

这一页（见图25）是唯一展示HIDECS2-Actual计算的地方（见附录D和图7）——除了尝试复现分解之外，这是我能找到的唯一测试用例。

O 未能理解 HIDECS2-Actual

优度度量HIDECS2-Actual （图7）中至少有一点令人费解，至少对我来说是这样；也许是我自己数学素养不足。如果 VSET 是

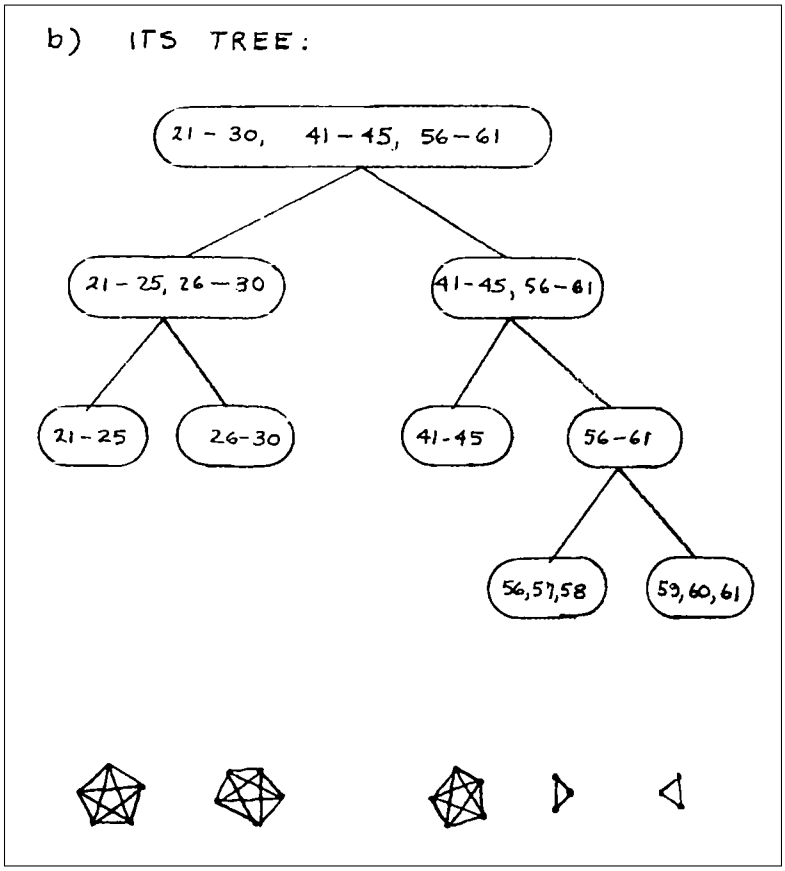


图23 亚历山大的树（适用于）**图 A**

所有待划分节点的集合，而 [*M*、*N*]是一个划分（也就是说，VSET $=M \cup N$），那么 *RR*就是跨越*M* /*N* 划分边界的交互链接数。Alexander 在 HIDECS 2（E2 页）中这样表述:

> 我们通过减去 *RR* 的期望值，再除以其方差的平方根，对该度量进行归一化。归一化冗余为.....

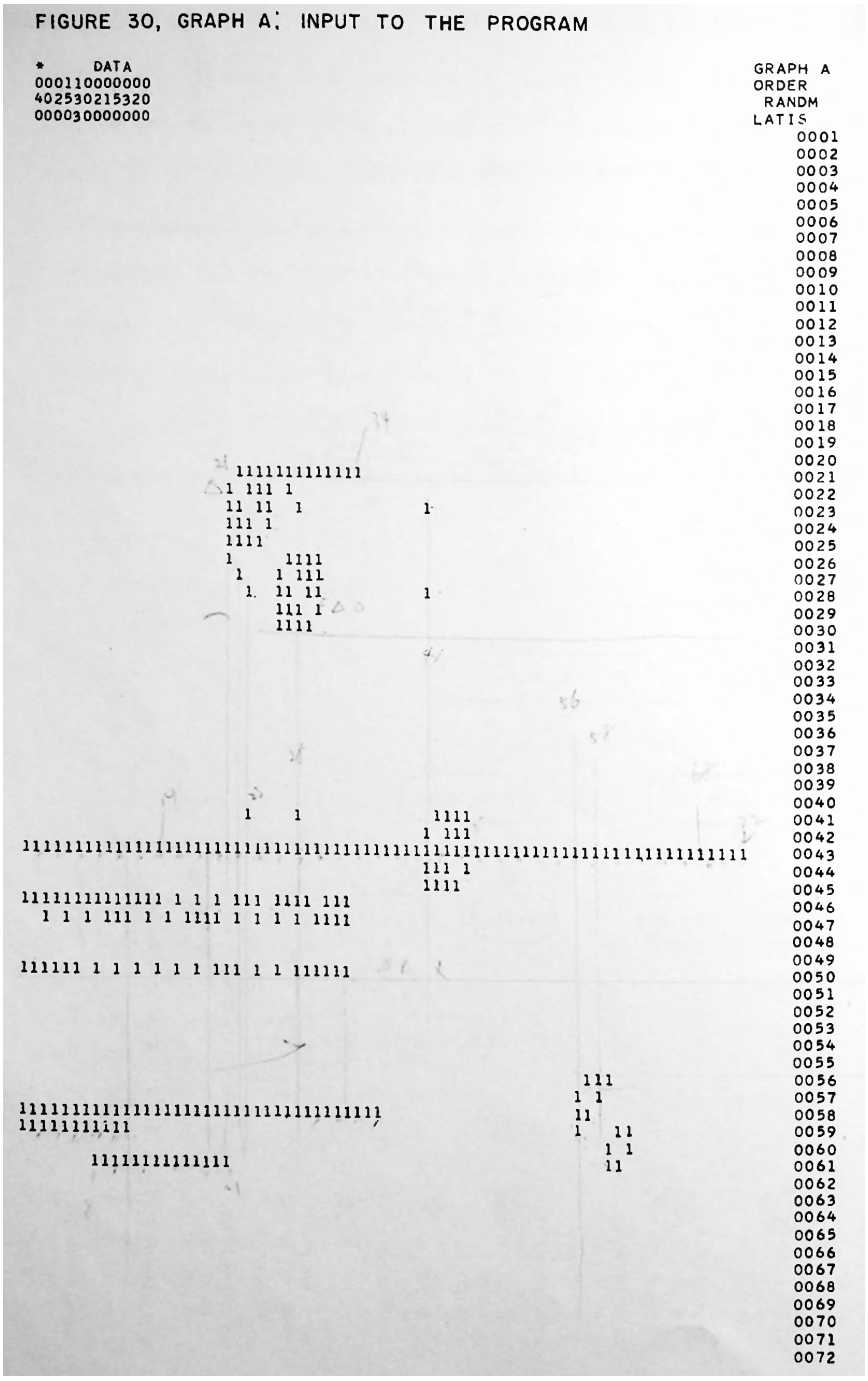
由此我们可以推断／猜测，“RR 的期望值”为 $\left(^{total}{}_{nsq1}\right)mn$。在 HIDECS 2 报告第25页的一个计算INFO 的示例中（HIDECS 2 报告第25页的内容转载于附录 $\overline{\text{N}}$），其中

$$nbit = 9, total = 14, nsq1 = 36, |M| = 5$$

我们有

$$\left(\frac{total}{nsq1}\right)mn = 7.7777777$$

我用自己想出的一种抽样技术估算出它是 7.77771。但“它的方差”是什么意思？也就是说，他是如何得到那个分母的？如果我们把它理解为“RR 的方差”，用同一种抽样技术估算出的结果是 2.60，作为方差这似乎是合理的。然而，$mn(nsq1 - mn)$ 给出的数值是 320。使用


FIGURE 30, GRAPH A: INPUT TO THE PROGRAM
* DATA
000110000000
402530215320
000030000000
GRAPH A
ORDER
RANDM
LATIS

■ **图24** 图 A 的输入卡片

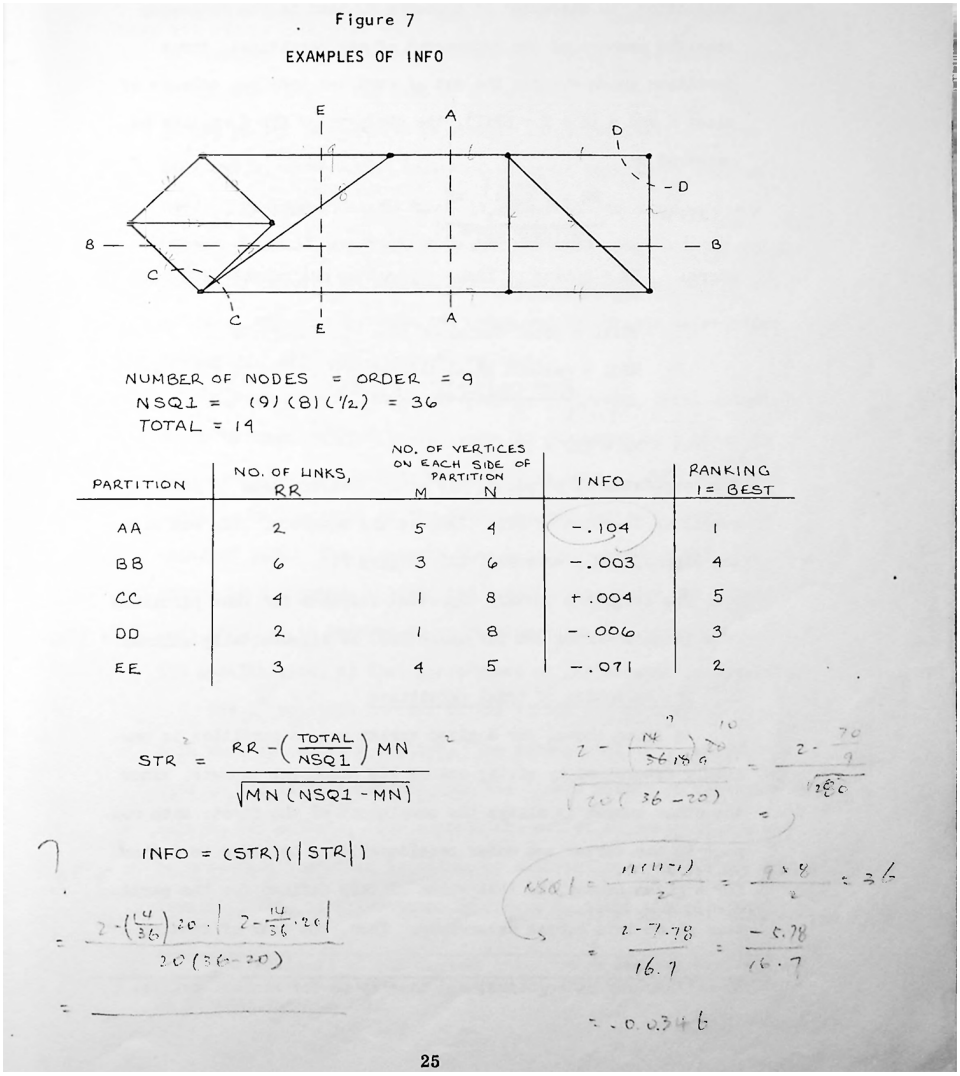


Figure 7

EXAMPLES OF INFO

NUMBER OF NODES = ORDER = 9
NSQ1 = (9)(8)(1/2) = 36
TOTAL = 19

PARTITION	NO. OF LINKS, RR	NO. OF VERTICES ON EACH SIDE OF PARTITION M	N	INFO	RANKING 1= BEST
AA	2	5	4	-.104	1
BB	6	3	6	-.003	4
CC	4	1	8	+.004	5
DD	2	1	8	-.006	3
EE	3	4	5	-.071	2

$$STR = \frac{RR - \left(\frac{TOTAL}{NSQ1}\right) MN}{\sqrt{MN\,(NSQ1 - MN)}}$$

INFO = (STR)(|STR|)

25

■ **图25** HIDECS 2，第25页

采用抽样技术，我还估算了印度村庄问题的方差：141 个节点、1383 条链接，并划分为一个包含75 个节点的集合和一个包含66个节点的集合，$mn(nsq1 - mn)$得出的数值为24,354,000，而估算值约为293.60。

我不确定$mn(nsq1 - mn)$ 代表的是问题中任何相关量的方差，但它很适合用于优先选择平衡分解。

P 探究重叠模块度

最后一个例子出自《社区与隐私》 [20]——该书由 Alexander 与他在麻省理工学院的合作者 Serge Chermayeff 合著，其中还包含另一个分解示例；此例收录于 HIDECS 2 的 Python 软件包中。需求与相互作用列于附录 Q。针对这组需求进行 Tomita 分解后得到的 Bierstone-Bernholtz 重组见图 26。

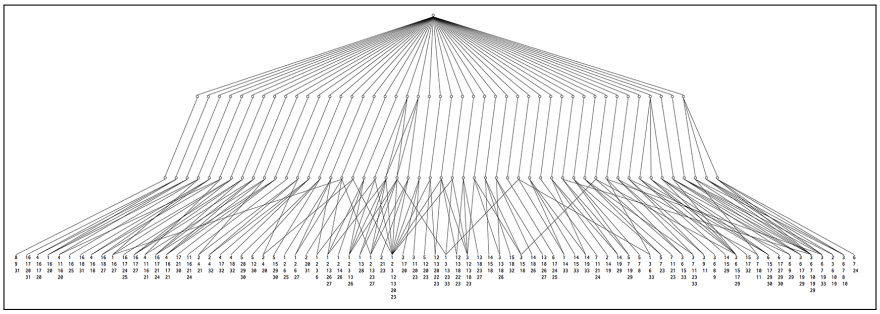


图26 《社区与隐私》问题的 Tomita 分解的 Bierstone-Bernholtz 重组

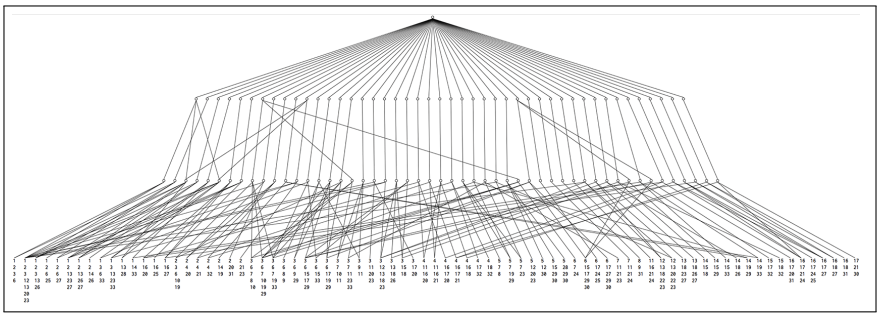


图 27 未优化的图 26

编写 Bierstone-Bernholtz 重组程序时，最有意思的部分无疑是用于减少结果显示中线交叉的代码；未经线交叉优化的原始结果见图 27。

Q 《社区与隐私》需求

Python 版 HIDECS 2 程序中使用的一个示例来自《Community and Privacy》[20]。我没有对它做太多处理。以下是用英文表述的需求：

1. 为业主和来访者提供高效的停车位；提供充足的机动空间。2. 为服务和配送车辆提供临时停靠空间。3. 设置通往群的接待点，并提供有遮蔽的交付与等候空间。配备信息设施、邮件箱、包裹箱和投递箱，并为包裹车提供储存空间。4. 为公共设施的维护和控制提供空间，包括电话、电力、主供水管、排污系统、区域供热、燃气、空调和焚化炉。5. 休息和交谈空间。儿童游戏及监督。6. 住宅的私人入口、受保护的到达空间、有遮蔽的站立空间，以及防尘缓冲区。7. 舒适且宽敞的私人会面空间；洗涤设施；用于存放户外衣物以及可搬运及带轮物品的储存空间。

8. 设置过滤设施，阻隔气味、病毒、细菌和污垢；设置屏障，阻挡飞行昆虫、风吹尘土、垃圾、煤烟和废弃物。9. 阻挡爬行和攀爬昆虫、害虫、爬行动物、鸟类和哺乳动物。10. 能够单向观察来访者，并设置单向可见的出入口空间。11. 设置可牢固封闭的出入口。12. 将儿童和宠物与车辆隔开。13. 将流动的行人与流动的车辆分隔开。14. 在驾驶员从高速行驶的交通流过渡到行人世界时为其提供保护。15. 采取措施，使出入口免受天气影响，包括过热、风、水坑、冰和雪。16. 设置防火屏障。17. 明确半私密领域内的边界，包括邻里之间以及住户与管理方之间的边界。18. 明确半私密领域与公共领域之间的边界。19. 确保照明充足，避免突兀的明暗对比。20. 从源头控制服务卡车、汽车和机械设备产生的噪声。21. 从源头控制公共区域产生的噪声。22. 采取措施保护住宅免受城市噪声影响。23. 采取措施降低公共步行区域的城市背景噪声。24. 采取措施保护住宅免受局部噪声影响。25. 采取措施保护户外空间，使其免受附近户外空间产生的噪声影响。26. 确保高峰时段车辆通行不受阻碍。27. 为紧急通行与疏散提供保障，以应对火灾、救护车通行、重建和维修需求。28. 尽可能缩短从汽车到住宅的行人通行距离，减少疲劳。29. 确保行人通行流线顺畅，避免出现危险或令人困惑的高低或方向上的不连续。30. 提供安全、舒适的步行和轮行路面。31. 将垃圾收集点封闭起来，防止污染环境。32. 高效组织服务接入与分配。33. 在汽车与住宅之间提供部分天气控制。

以下是相互作用。

1 与 2, 3, 6, 12, 13, 14, 16, 20, 23, 25, 26,27, 28, 332 与 1, 3, 4, 6, 10, 12, 13, 14, 19, 20, 21,23, 25,26, 27,31, 323 与 1, 2, 6, 7, 8, 9, 10, 11,12, 13, 15, 17, 18, 19, 20, 23, 26,29,334 与 2, 11, 16, 17, 18, 20, 21, 32

5 与 7, 8, 12, 15, 19, 20, 23, 25,28, 29,30 6 与 1, 2, 3, 7, 8, 9, 10, 15, 17, 19, 24,25, 27,29,30, 33 7 与 3, 5, 6, 8, 10, 11, 19, 21, 23, 24,29, 33 8 与 3, 5, 6, 7, 9, 10, 31 9 与 3, 6, 8, 11, 29, 31 10 与 2, 3, 6, 7, 8, 11, 19, 29 11 与 3, 4, 7, 9, 10, 16, 20, 21, 23,24, 33 12 与 1, 2, 3, 5, 13, 18, 20, 22, 23, 30 13 与 1, 2, 3, 12, 18, 20, 22, 23, 26, 27,28, 33 14 与 1, 2, 15, 18, 19, 26, 29, 33 15 与 3, 5, 6, 14, 17, 18, 29,30, 32, 33 16 与 1, 4, 11, 17, 18, 20, 21,24, 25, 27,31 17 与 3, 4, 6, 15, 16, 19, 20, 21,24,25, 27,29,30, 31, 32 18 与 3, 4, 12, 13, 14, 15, 16, 22, 23, 26,27, 31,32 19 与 2, 3, 5, 6, 7, 10, 14, 17, 29, 33 20 与 1, 2, 3, 4, 5, 11, 12, 13, 16, 17, 22, 23,31 21 与 2, 4, 7, 11, 16, 17, 23, 24,30 22 与 12, 13, 18, 20, 23 23 与 1, 2, 3, 5, 7, 11, 12, 13, 18, 20, 21, 22, 27, 33 24 与 6, 7, 11, 16, 17, 21, 25 25 与 1, 2, 5, 6, 16, 17, 24 26 与 1, 2, 3, 13, 14, 18, 27 27 与 1, 2, 6, 13, 16, 17, 18, 23, 26, 29,30 28 与 1, 5, 13, 29, 30 29 与 3, 5, 6, 7, 9, 10, 14, 15, 17, 19, 27, 28, 30 30 与 5, 6, 12, 15, 17, 27,28, 29 31 与 2, 8, 9, 16, 17, 18, 20, 21 32 与 2, 4, 15, 17, 18 33 与 1, 3, 6, 7, 11, 13, 14, 15, 19, 23 遗憾的是，一如往常，这些需求有两处错误，如下

ws:

21 交互对象：！ 30，←31

参考文献

[1] Christopher Alexander。《Christopher Alexander：模式语言服务于社区》。访问日期：2022年4月13日。URL：https://www.youtube.com/watch?v=VZHb9-Y9r_E。[2] Christopher Alexander。《视觉美学中的一个结果》。《英国心理学杂志》，51(4):357–371，1960年。

[3] Christopher Alexander。《HIDECS 3：用于对具有相关线性图的系统进行层次分解的四个计算机程序》。技术报告，土木工程系统实验室研究报告 R63-27，麻省理工学院，剑桥，马萨诸塞州，1963年。[4] Christopher Alexander。《印度村庄构成要素的确定》。载于 J.C. Jones 和 D. Thornley 编，《设计方法会议》。培格曼，牛津，1963年。[5] Christopher Alexander。《形式综合札记》。哈佛大学出版社，剑桥，马萨诸塞州，1964年。[6] Christopher Alexander。《论价值》。《*Concrete*》，1(8):6–7，1965年。[7] Christopher Alexander。《设计方法的现状》。《*DMG*通讯》，5(3):3–7，1971年。[8] Christopher Alexander。《建筑的永恒之道》。牛津大学出版社，纽约，1979年。[9] Christopher Alexander。《对 *21st* 世纪艺术的预示》。牛津大学出版社，纽约，1993年。[10] Christopher Alexander。《秩序的本质：生命现象》，第1卷。环境结构中心，伯克利，加利福尼亚州，2001年。[11] Christopher Alexander。《秩序的本质：创造生命的过程》，第2卷。环境结构中心，伯克利，加利福尼亚州，2002年。[12] Christopher Alexander。《秩序的本质：光辉的基底》，第4卷。环境结构中心，伯克利，加利福尼亚州，2004年。[13] Christopher Alexander。《秩序的本质：一个生机勃勃世界的愿景》，第3卷。环境结构中心，伯克利，加利福尼亚州，2005年。[14] Christopher Alexander。《城市不是一棵树》。Sustasis基金会，波特兰，俄勒冈州，2015年。（再版，原版于1965年出版）。[15] Christopher Alexander、Sara Ishikawa 和 Murray Silverstein。《模式语言》。牛津大学出版社，纽约，1977年。[16] Christopher Alexander 和 Marvin Manheim。《HIDECS 2：用于对具有相关图的集合进行层次分解的计算机程序》。技术报告，土木工程系统实验室，第160号出版物，麻省理工学院，剑桥，马萨诸塞州，1962年。[17] Christopher Alexander、HansJoachim Neis 和 Maggie Moore-Alexander。《为地球的生命与美丽而战》。牛津大学出版社，纽约，2012年。[18] William Ross Ashby。《大脑的设计：适应性行为的起源》。Chapman，伦敦，第二版，1960年。[19] Edward Bierstone 和 Allen Bernholtz。《HIDECS-RECOMP PROCEDURE》。技术报告，土木工程系统实验室，麻省理工学院，剑桥，马萨诸塞州，1967年3月。[20] Serge Chermayeff 和 Christopher Alexander。《社区与隐私》。Doubleday，纽约，1963年。[21] Richard P. Gabriel。《〈视觉美学中的一个结果〉札记》，2022年4月。 [在线；发布于4月8日-2022]。URL：https://dreamsongs.com/Files/Aesthetics.pdf。

[22] Erich Gamma、Richard Helm、Ralph Johnson 和 John Vlissides。《设计模式：可复用面向对象软件的元素》。Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., 波士顿，1994年。[23] Frank Harary。《图论》。Addison-Wesley，波士顿，1969年。[24] Frank Harary 和 Ian C. Ross。使用群矩阵进行团检测的程序。《社会计量学》，20(3):205–215，1957年9月。[25] Ruth Landy。《心灵之地：一个男人试图通过改变建造方式治愈世界》。（纪录片：Janson Media；导演：Ruth Landy），1989年。[26] Mark Newman。用于检测网络社区结构的快速算法。《物理评论E》，69(6)，2004年6月。doi:10.1103/physreve.69.066133。[27] Mark Newman 和 Michelle Girvan。发现并评估网络中的社区结构。《物理评论E》，69(2)，2004年2月。doi:10.1103/physreve.69.026113。[28] Pablo Miranda Carranza。Hidecs 2 Python。https://gitlab.com/Zenbagailu/hidecs-2-python，2021年。访问日期：2022年4月13日。

关于作者

Richard P. Gabriel 是一位诗人、作家和计算机科学家。他住在加利福尼亚。可通过 rpg@dreamsongs.com 联系他。