

高 等 学 校 引 进 版 系 列 教 材

■ [以色列] 阿里埃勒·哈瑙尔 著

■ 赵作周 郭红仙 等译校

结构原理

PRINCIPLES OF
STRUCTURES

中国建筑工业出版社

高等学校引进版系列教材

结 构 原 理

[以色列] 阿里埃勒·哈瑙尔 著

赵作周 郭红仙 等译校

中国建筑工业出版社

· 著作权合同登记图字: 01 - 2003 - 5589 号

图书在版编目 (CIP) 数据

结构原理/ (以色列) 哈瑞尔著; 赵作周, 郭红仙等译校.

—北京: 中国建筑工业出版社, 2003

(高等学校引进版系列教材)

ISBN 7 - 112 - 05999 - 2

I. 结... II. ①哈... ②赵... ③郭... III. 建筑

结构 - 理论 - 高等学校 - 教材 IV. TU31

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 085398 号

Principles of Structure, First Edition/Ariel Hanaor

ISBN 0 - 632 - 04262 - 1

©1998 Ariel Hanaor

This edition is published by arrangement with Blackwell Publishing Ltd., Oxford.

Translation Copyright © 2003 China Architecture & Building Press

本书经英国 Blackwell 出版有限公司正式授权我社, 并在该公司协助下在中国
翻译、出版、发行中文版

责任编辑: 王 跃 董苏华

高等学校引进版系列教材

结 构 原 理

[以色列] 阿里埃勒·哈瑞尔 著

赵作周 郭红仙 等译校

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

新 华 书 店 经 销

北京嘉泰利德公司制作

北京市铁成印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 16 字数: 245 千字

2003 年 10 月第一版 2003 年 10 月第一次印刷

印数: 1—2,500 册 定价: 18.00 元

ISBN 7 - 112 - 05999 - 2

TU·5272 (12012)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

本社网址: <http://www.china-abp.com.cn>

网上书店: <http://www.china-building.com.cn>

本书目的在于给没有力学基础的读者，介绍如何理解建筑结构的基本概念和工程的总体概况。全书图文对照讲解。内容分两部分：一是基本概念，包括：设计方法、力的概念、材料性能；二是各种结构的性能，包括梁、板、拱、壳、索和张拉结构。全书贯穿结构与形式之间，几何学与力学之间的关系这一主题。对象是开始学习建筑设计的大学生，对建筑工程从业人员也有很大的参考价值。

作者简介

阿里埃勒·哈瑞尔 (Ariel Hanaor) 于 1943 年出生于以色列，在以色列理工大学先后获得结构工程的第一与第二学位，他的博士学位是在澳大利亚墨尔本大学获得的。作为一名工程师，他曾在四大洲工作过，这些经历使得他在工程实践与理论学术方面积累了丰富的经验。哈瑞尔博士发表了很多篇学术文章，同时，他是《国际空间结构杂志》(Internation Journal of Space Structures) 编辑部的编委之一。他还在几所专业学院兼职任教。哈瑞尔博士对空间结构的特性与设计有浓厚兴趣，同时负责结构设计与分析方面的教学工作。

任何能够被言语表达的，都能用言语清楚地表达出来。

任何不能被言语表达的，一定是非言语能够表达的。

——哲学家，数理逻辑学家
路德维希·维特根斯坦

纪念我的父亲

前 言

编写本书的想法，萌发于给建筑系一年级学生开设一门概论课程“结构理论”。作为一名经验丰富的工程师，当我试图向没有任何力学基础的听众，仅从概念的角度出发，介绍如何理解许多复杂的基本概念和了解结构工程的整体概况时，我感到这一任务非常艰巨。主要困难是如何从中学知识的层次出发阐明这些概念，一方面要避免使用大量复杂的数学公式与专业术语，另一方面又不能罗列相关的繁琐条文，还不能掩盖这些概念的复杂性。

这确实是一项极具高度智慧的工作。我很快意识到工程专业人员所处的层次，在这一层次上，工程师对一些复杂的概念，诸如力、平衡、稳定性、刚度和柔度等，都已经习以为常。如果我们也这样从整体的角度学习这些概念，看似可以避免那些复杂的数学公式、计算推导与设计规范的约束，但我们会失去对这些概念基本意思与重要性的把握。因此，花相当的时间和精力去研究如何摆脱这些束缚，揭示决定结构性能及其发生的原因与途径的基本概念，掌握这些概念的本质与基本意义，是很值得的。因为这不仅是智力的锻炼，更重要的，它是一种强有力的设计工具。设计人员可以从广度与深度两个方面获得对结构的深刻理解，从根本上把握结构设计，开拓思路，解决手边的设计问题，设计出更好的或新型的结构。

为此，本书的使用者主要是刚开始学习建筑与结构课程的学生。希望他们通过学习，对结构工程及设计有一个总体的概念，在大脑中形成一个起导航作用的“地图”，有助于他们今后能涉足本领域更加错综复杂的问题。此外，本书对有实际经验的从业人员也有很大的参考价值，能够帮助他们理清思路，排除固有观念的约束，从全新的角度理解结构工程的本质，解决错综复杂的问题。本书不是专为作教科书而编写的。设计（见本书第1章）光靠课本是学不会的，因为设计需要一个完整的知识结构，设计只能在设计实践中学习。书本（包括本书）只能是创造性设计过程中的辅助工具与促进因素，是供工程人员交流使用的工具书。

本书主要讨论结构设计中的基本概念。除第1章外，很少直接引用设计条文中的相关条款。为了初学者学习方便，第1章介绍了设计过程的基本框图。与任何创造性工作一样，设计是一种非常主观、个性化的活动。有经验的设计人员一般形成了自己特有的处理方法与观点，对任何有关设计主题的观点经常都会有争议。对于初学者，根据设计对象的基本工作原理，建立可靠的、合理的设计方法是非常重要的。知觉，对于掌握了设计原理、有丰富经验的设计人员来说，是一个非常重要的设计工具；而对于初学者而言，却是非常靠不住的。正因如此，才写了第1章。其余各章的内容，是有关结构工程的基本概念与基本原理的，它们是合理进行结构设计的基础。

本书由两部分组成，第一部分介绍了理解结构工作性能所必需的基本概念。第二部分是对各种结构体系及其特征的全面概括。这两部分是相互独立的，对于熟悉结构概念的读

者，无需学习第一部分的基本概念，就可以直接进入第二部分有关结构特性的学习，文中所引用的第一部分的概念与术语，可以直接从本书最后的“关键词英汉对照”中找到它们的定义。

简单清楚是本书撰写时的追求。力争表达简练明了，用最精练的语言表述一个问题，而不是简单堆砌各种题目。为了达到这一目标，在格式上采用了如下的编写形式：

0.0.1 采用简短、分节编号的方式表述各个概念，例如像本节的叙述，可方便查阅（通过“关键词英汉对照”查阅）。在定义时，只列出理解该概念必需的内容，将示例及其他细节的内容放在后面的算例中讲述。

0.0.2 文字与图例在书中分列表述。这样既保持了文字的连贯性，也方便行文中引用和在阅读中查阅图例。文字叙述与图例对理解内容都是必须的，图例更能反映文字不能表述清楚的内容。

0.0.3 在第一次定义或表述的地方，关键词采用黑体字印刷。在第一次定义之前出现的关键词，为了显示区别，以楷体字印刷。在文字与框图中，对概念的定义力求准确易懂，而不希望它是广义的、全面而科学的定义。在保证基本原理不致被曲解的情况下，简练比精确更重要。

在本书中没有编号而用楷体字印刷的内容，包含进一步详尽的细节、解释或更深刻的分析，这些内容超出了本书主题的基本范围，可以跳过，这并不影响叙述的连续性或对基本内容的理解。

本书的中心主题是结构与形式之间、几何学与结构中力的流向之间的密切关系。这种关系以“结构高度”这一基本概念简单形式表达出来。尽管美学是建筑的核心，但本书从头到尾没有直接提到“美学”这一字眼。有意回避这一术语也是为了达到前面所提的简单明了的目的。按照维特根斯坦的观点，“美学”是几个不能用语言表述的概念之一，按本书的作用自然就更不能清楚表达了。不管怎样，本书想说明的是对形式与结构二者间关系的正确表达是一种美学原理，而不想评价这个原理的重要性。

本书中的大多数图例是 Bernardo (Ben) Katz 用手工辛苦绘制的。

我也非常感谢我的朋友、同事 Abraham (Fred) Ben - Arroyo 教授，没有他的不断鼓励，这本书是不能完成的。

阿里埃勒·哈瑞尔

目 录

前 言

第一部分 基本概念 1

第 1 章 设计过程简介 3

1.1 设计 3

1.2 设计手段 3

1.3 设计类型 4

1.4 具体的设计过程 5

1.5 几点综合性评价 8

第 2 章 结构 9

2.1 力和荷载 9

2.2 运动 13

2.3 力偶和力矩 13

2.4 合力 14

2.5 坐标系 15

2.6 分矢量 16

2.7 笛卡儿坐标系中的矢量求和 16

2.8 力矩求和 17

2.9 合力定位 17

第 3 章 结构内力—平衡 19

3.1 平衡 19

3.2 位移分量 20

3.3 支座 21

3.4 内力 23

3.5 平面结构与空间结构 24

3.6 杆系结构 24

3.7 内力分量 26

第 4 章 算例 28

4.1 原理 28

4.2 例 1: 简支梁 28

4.3 例 2: 悬臂梁 33

4.4 评价 34

4.5 弯矩图与剪力图 34

4.6 简支梁内力图 35

4.7 悬臂梁弯矩图 37

4.8 例 3: 桁架 37

第 5 章 结构中的力—位移关系 42

5.1 静力学 42

5.2 运动学 42

5.3 本构关系 43

5.4 分析计算——力法 44

5.5 刚度和柔度的影响因素 46

5.6 结构的效率 50

5.7 应力与应变 51

第 6 章 材料的性能与设计 54

6.1 应力—应变曲线 54

6.2 常用建筑材料性能 56

6.3 设计实例 58

第二部分 各种结构体系的特性 65

第 7 章 结构的稳定性、刚性及其分类 67

7.1 引言 67

7.2 稳定性 67

7.3 刚性和可变形性 68

7.4 对稳定性和刚性的评注 69

7.5 铰接结构 70

7.6 结构体系的分类方法 73

第 8 章 平面杆系结构 75

8.1 受压杆件 75

8.2 受拉杆件(拉杆) 77

8.3 预应力 77

8.4 受弯杆件——梁 78

8.5 连续梁 80

8.6 梁设计中的一些考虑 80

8.7 单向板 81

8.8 平面单向板体系	83	10.8 空间框架	109
8.9 材料的分散——离散化	85	第 11 章 壳体	112
8.10 平面框架	87	11.1 面曲率	112
8.11 轻型平面屋架系统	88	11.2 环状结构	113
第 9 章 索与拱	90	11.3 穹顶	114
9.1 索曲线形状	90	11.4 壳体几何形状	116
9.2 索与拱中的力	91	11.5 双曲抛物面壳	119
9.3 索曲线形状和弯矩图	93	11.6 板壳和网壳	122
9.4 拱和索的支座	95	11.7 网格穹顶	123
9.5 拱的分析——弯矩	96	第 12 章 张拉结构	128
9.6 拱的稳定	97	12.1 索概念的扩展	128
9.7 筒形拱顶	98	12.2 边界构件和锚固处理	130
9.8 拱形桁架	98	12.3 气承结构	133
第 10 章 空间结构介绍	100	12.4 索穹顶	135
10.1 空间结构中的作用	100	12.5 张拉整体结构	136
10.2 空间几何形状	102	参考文献	139
10.3 板	103	一般性读物	139
10.4 折板	103	特殊结构体系	139
10.5 双向板	105	结构参考书目	140
10.6 双向板的进一步演变	107	关键词英汉对照	141
10.7 板的离散——空间桁架	108	译后记	149

第一部分 基本概念

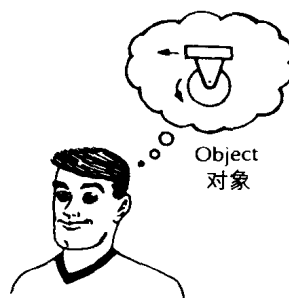
第 1 章 设计过程简介

1.1 设计

设计

应用设计工具、依据设计标准、考虑限制条件，将所提供的设计数据合成一个“对象”（如产品、建筑、城市等）的过程。

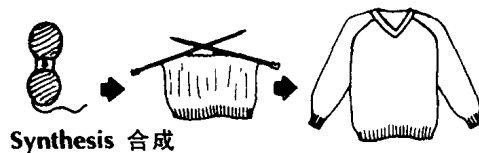
设计过程，如同人类的一切活动、尤其是有创造性的活动一样，是非常复杂的。下面，将尽可能以客观的方式概括设计过程的本质，并给出具体的设计过程。这一过程适用于任何物体的设计，尤其是与结构设计有关的问题，这些问题将在后续章节予以全面评述。



1.1.1 合成

合成

由基本的组成成分或数据，经组装、创造或制造而产生一个对象的过程。在合成过程中，所出现的问题一般有多种解决方法。



1.1.2 分析

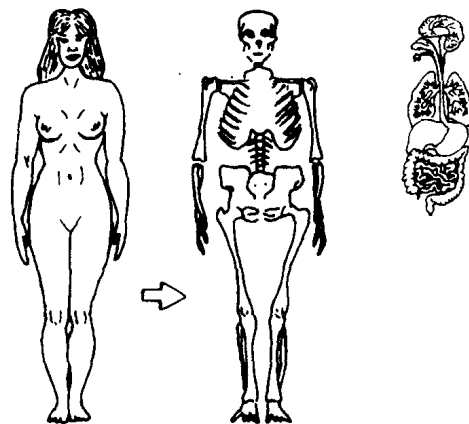
分析

把一个已经存在的实体（如物体、现象、想法等）分解成基本组成成分的过程。分析中的一个问题，一般只有一种解决方法（解决方法可由好几部分组成）。

1.1.3 理论

理论

对一个系统或一类（别）存在的实体（例如此书中的“结构”）进行系统性描述的分析框架。



Analysis 分析

1.2 设计手段

设计手段

设计过程中使用的手段。按重要性与先后

次序排列，主要的设计手段有：

- ☐ “空白纸”（见 1.4.1 设计步骤 1）
- ☐ 常识
- ☐ 经验（通过设计实践而获得的）
- ☐ 理论
- ☐ 设计规范（见第 2 章）
- ☐ 设计工具，如设计指南、产品目录、计算机程序（例如计算机辅助设计）

1.3 设计类型

一个大型项目的设计，如一栋建筑的设计，通常由下述三个阶段组成。这三个阶段适用于任何产品的设计。这里以一栋建筑或其他结构类型作为例子进行介绍。

1.3.1 概念设计

概念设计

指从最初的数据（“概要”）开始，到对产品形成的一系列以概念为结束标志的设计阶段。例如，当设计对象是一栋建筑时，概念设计的结果包括如下几个主要部分：建筑的整体形状、空间布置、结构的主要支承构件类型及其位置，但没有确切的三维尺寸。最能表现出概念设计要点的设计手段，是列于 1.2 节中的前三种（空白纸、常识和经验）。

1.3.2 初步设计

初步设计

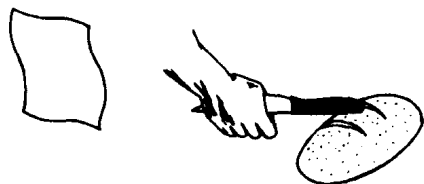
指从概念设计阶段形成的设计概念开始，到完成初步尺寸确定和粗略详图设计，结束时还剩极少数未知量（通常 1 个或 2 个）的设计阶段。

1.3.3 最终设计

最终设计

指从初步设计结果开始，到完成施工详图、加工图和其他工程文件的设计阶段。

最能刻画出初步设计和最终设计阶段特点的设计工具是 1.2 节中列出的后三种（理论、规范和设计辅助物），但常识和经验也起



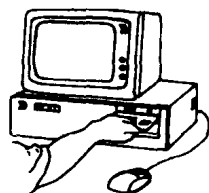
Blank page 空白页 Common sense 常识



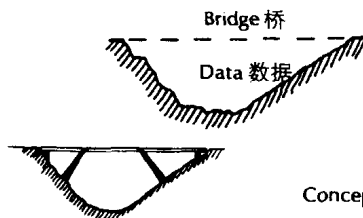
Experience 经验



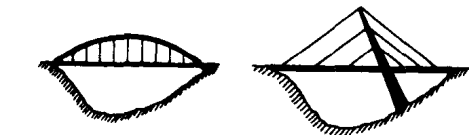
Theory 理论



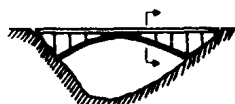
Design aids 设计工具



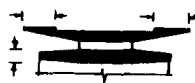
Concepts 概念



Conceptual design
概念设计



Preliminary design 初步设计



着举足轻重的作用。目前讨论的内容主要针对概念设计。

1.4 具体的设计过程

1.4.1 初步设计

1.4.1.1 步骤 1

空白纸

抛去大脑中任何已有的想法、直觉与以前的经验（例如类似的设计），用全新的观点开始一个新的计划，此点非常重要。这一步可能是非常重要的，也是最难完成的一步。不管愿意不愿意，经验和直觉都会自发地起作用，重要的是必须把它们控制在手，服从于所设计问题的约束条件（见后）。

1.4.1.2 步骤 2

表述设计数据和设计目标

设计刚开始时，能提供的数据既不完整，又不准确，大量的次要细节掩盖了重要的内容。所以在此阶段，需要系统地分类数据，使之能够清晰地描述所要解决的主要问题。尤其是确定哪些是主要目标，哪些是次要目标，哪些是约束，哪些是要求。

约束

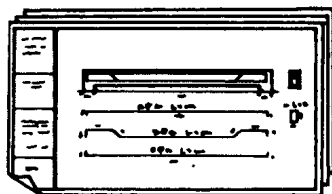
设计对象必须满足的条件。约束，作为数据的一部分，可以明确提出来，也可以包含在设计对象或数据的属性中。

例如：一把椅子，要有经得起人的坐下和站起，坐着要舒适，能起支承作用等功能，就必定会受到尺寸与形状的约束。不同类型的椅子（扶手椅、办公椅等）有与其功能相对应的不同约束。

所有被设计的对象，都必须无一例外地满足所有约束条件。所有数据，包括所有约束条件，构成了设计问题。一个数据项或一项约束条件的改变，都意味着设计问题的改变，必须重新开始设计过程。

1.4.1.3 步骤 3

分析数据和约束条件



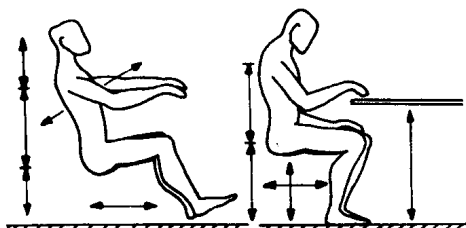
Final design 最终设计

Drawings
图纸

Design example
设计举例



Blank page
空白页



Dimensions, constraints
尺寸,约束条件

*'Art lives by constraints
and dies of freedom'*

Leonardo da Vinci

“艺术存于约
束，死于自由”
——达·芬奇

对数据和约束条件进行重要性评估, 对各项含义进行归纳, 同时常常还会产生进一步的约束 (例如在材料、颜色等方面)。

1.4.2 设计活动: 设计树

1.4.2.1 步骤 4

提出多个设计方案

一个成功的设计, 不能仅仅基于对单一概念性变量的突发奇想, 或光靠感觉, 而应是多个可选方案仔细比较的结果。提出设计方案时, 要基于这样的一个事实, 那就是任何设计问题 (这与分析问题显著不同) 都有多种解决方法, 而且每一种解决方法都会产生新的问题。

其设计过程, 可归纳如下:

- 根据给定的设计数据和约束条件, 至少提出 2 种本质上不同的概念 (见前面概念设计)。就上述椅子为例, 可有软垫椅子与硬面椅子 (如木制椅子) 等 2 种可能的结果。
- 每一种解决方法, 都有其本身问题, 例如构成椅架的材料问题。针对每一个问题, 至少应提出 2 种本质不同的解决方法。例如金属架或木制架、海绵垫或弹性膜等。
- 重复这一过程, 直到获得足够多的具有不同概念的选择方案。在这一过程中方案以几何级数增长, 大量替代性选择方案很快产生。这里所说的“足够”数量将依赖于项目的规模, 并依赖于设计者的偏好。粗略地说, 对一个建筑设计而言, 4~8 种概念设计方案就足够了。

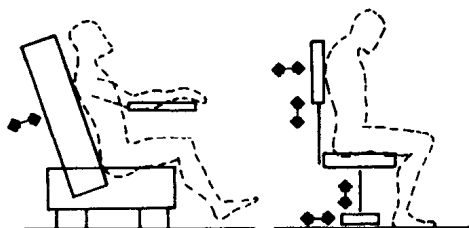
1.4.2.2 步骤 5

确定设计标准

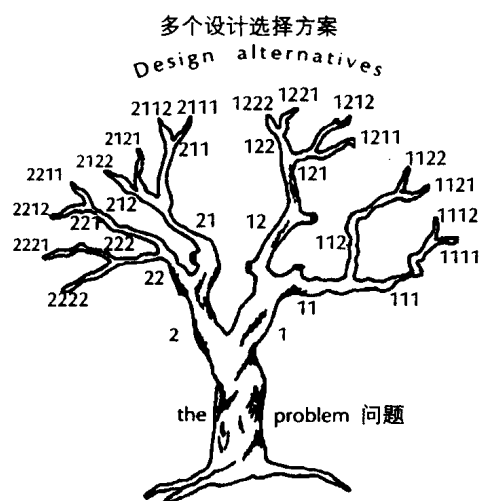
确定设计标准, 可在步骤 1 之后的任一步骤进行。但是, 当需要对多种选择方案进行比较时, 明确设计标准就显得更为必要。

设计标准

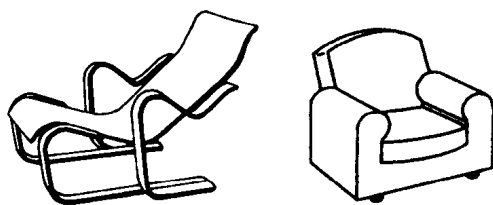
设计标准是用来度量所提设计方案在各方面质量的。例如, 椅子的舒适性、耐用性、面料褪不褪色、使用方便、重量、价格等, 都可作为椅子的设计标准。



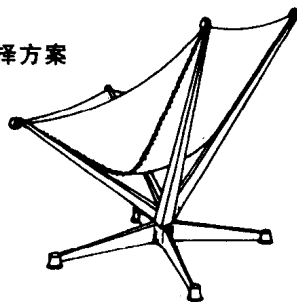
Functional requirements 功能要求



The design tree
设计树
data, constraints 设计数据, 约束



Design
alternatives
多个设计选择方案



区别设计标准和约束条件也很重要。如上所述,如有违背任一约束条件的解决方案,实际上不是一个给定问题的解决方法,其结果或是该方法将被否定,或是该问题被重新定义。与约束条件不同,设计标准只要在不同程度上满足即可。

在文献中,设计标准这一术语,有时被标识成通过或不通过检验标准,如规范要求(例如强度或适用性要求),这些实际上是约束条件而不是标准,因为任何违反约束条件的解决方法,都不能考虑。

1.4.2.3 步骤6

比较不同设计方案

设计方案的比较,可以是定性的,也可以是定量的。即便是数值很明确的定量分析,对于不同标准所给出的权值,不同解决方案的评分标准,都依赖于设计者的个人判断,并且有很高的主观性。

然而,设计者必须尽可能做到:不要为了选中自己喜欢的方案而设置相应的权重。一个诚实、公正的选择过程,有时会得到出乎预料的满意结果。

1.4.2.4 步骤7

选择和更新

选择是基于步骤6中的比较,但易受设计者个人因素的影响。

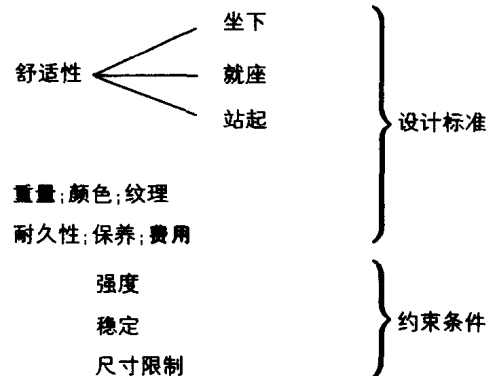
为下一设计阶段提出的供选方案数目,要根据项目的大小和下一阶段的性质而定。就概念设计阶段而言,通常至少要有2种方案供初步设计选择,对于大型工程需要有更多的选择方案。而在最终设计阶段,很少考虑第2种选择方案。

在比较的基础上,有时会提前进入下一个设计阶段,对按设计标准分类的方案中所选中的方案加以改进。例如,对于椅子的设计,可能会在不降低其耐用性的条件下,减轻椅子(结构)的重量。

1.4.2.5 步骤8

更新

如果上述步骤中有要更新的地方,则返回



方案 序号	设计标准(10分制)权重				最后得 分(加 权和)
	1 (1)	2 (3)	3 (1)		
1	5	8	7		36
2	8	5	8		31
⋮					