

本书第一次阐述了内燃机设计系统工程方法基础,提出了该系统的基本概念,指出了计算机在内燃机系统设计中的作用,介绍了寻求最优设计方案的数学方法,讲述了计算机辅助设计的方法及创制设计内燃机的自动化系统的原理。

本书适用于与内燃机设计有关的工程技术人员,亦可供大专院校师生参考。

Ю. Э. ИСЕРЛИС
В. В. МИРОШНИКОВ
СИСТЕМНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ДВИГАТЕЛЕЙ
ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ
ЛЕНИНГРАД «МАШИНОСТРОЕНИЕ»

1981

*

内燃机设计系统工程方法基础

[苏] Ю. Э. 伊谢尔里斯
В. В. 米罗施尼柯夫 著

徐天毅, 徐荣达 译 王志达 校

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南里一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

重庆印制一厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本787×1092 1/32·印张9·字数198千字

1986年8月重庆第一版·1986年8月重庆第一次印刷

印数 0,001—2,015·定价2.15元

*

统一书号: 15033·6287

序

从国民经济支出的角度来看，设计通常是研制内燃机的所有阶段中花费最少的一个阶段。但从后果来看，这个阶段可能是最昂贵的。例如，假定在科学研究中出现了及时更正只需要1卢布的错误，如果不加以改正，那么在试验设计阶段更正它，代价就会增加到10卢布；在试制阶段可能增加到100卢布；最后，在批量生产阶段，就会增加到1000卢布^[86]。

发动机制造业的技术进步，一方面表现为发动机功率、经济性和使用寿命的显著提高，另一方面由于发动机结构会过时而要限制设计周期。因而目前如何保证在有限的时间内完成高质量的设计工作，这不但是一个现实的、而且是非常尖锐的问题。

如果委託同一技术水平的两个不同的设计单位，研制一种功率、尺寸和营运费用相同的发动机，那么，设计出的发动机很可能完全不同。显然，采用了比较有效的设计方法进行研制的发动机就比较好。

在发动机制造的全部历史时期，每个从事发动机设计的部门都有一套自己的设计方法。这些方法不久以前还是根据设计工作经验形成的不成文规范。使用这类方法曾使发动机的规格和性能在很大程度上具有随机性、较多地取决于研制者的直觉。

分析现有国内外先进的发动机制造厂的经验以及世界发动机制造的发展趋势表明，不采用以系统方法为基础的，中

等水平的专家们能掌握的新的设计方法,就不可能在规定的期间内研制出形成系列的并能满足所有要求的新型发动机。

系列化内燃机的现代设计方法不仅包括传统的结构分析和绘图以及样机的研究改进,而且还包括制订设计方针、寻求最优解、预测和诊断、计划和管理等方法。设计手段也在改变。显然,以计算技术为基础而建立起的相当完善的自动化系统在近年内将取代算图和算尺。

近来,在科技文献中对设计问题和方法越来越重视。在短期内,出版了大量有关设计方法通论的专著^[12, 48, 70, 105, 108]。然而在内燃机领域,这种文献还很少^[10, 68, 86]。本书的任务就是部分地填补这一空白。

第1章讲述系统方法的基本原理和应用用于内燃机制造的复杂系统理论的一些概念。第2章综述了建立内燃机系统模型所应用的方法。因为目前已有许多优化数学模型和算法,但是并不是所有这些方法对设计内燃机都适用,但又必须学会应用它们,所以作者认为必须单列一章(第3章)专门讲述这些方法。第4章讲述在制定发动机系列型谱时可能用到的原理和一些方法。第5章介绍应用电子计算机进行内燃机自动化设计的原理。

为了将所涉及的大量问题都能安排在本书有限的篇幅内,在讲述材料时,作者不得不在某些情况下只限于讲述概念和提出任务;而在希望能较详细介绍所应用的模型、程序的地方,则给出建模的原理和算法框图。

第1、2、4章由 IO. Э. 伊谢尔里斯编写,第3、5章由 B. B. 米罗施尼柯夫编写,第3.2节由两人合写。

鉴于本书所探讨的很多问题尚处于形成阶段,作者并不认为对所涉及问题的解答是完美无缺的。欢迎读者批评指正。

目 录

序

第1章 内燃机系统设计的基本原理	1
1.1 内燃机设计的系统方法	1
1.2 描述技术系统的方法	6
1.3 系统的质量和目標	16
1.4 内燃机最优系统	19
第2章 内燃机系统的模型化	24
2.1 模型分类	24
2.2 数学模型	26
2.3 物质模型	41
2.4 评价模型一致性的問題和方法	45
第3章 设计内燃机时寻求最优解的数学方法	62
3.1 发动机优化問題的数学表达和分析	62
3.2 解极值問題的数值方法	77
3.3 求最优参数的综合程序	94
3.4 多准则优化方法	119
3.5 最优解稳定性的分析和评定	129
第4章 内燃机型谱系列设计	140
4.1 内燃机型谱系列的基本概念和指标	140
4.2 型谱系列设计方针	153
4.3 型谱系列设计最初几个阶段中的系统分析	163
4.4 型谱系列宏观设计基础	172
4.5 最优结构通用发动机的综合	199
4.6 发动机样机研究改进阶段	210

4.7 新设计内燃机的试验	216
第5章 内燃机设计的自动化系统	226
5.1 向内燃机设计全面自动化过渡	226
5.2 内燃机自动化设计系统的构成	235
5.3 内燃机自动化设计系统的数学保证	242
5.4 内燃机设计的信息保证	250
5.5 用计算机进行内燃机设计的语言	259
5.6 内燃机设计自动化的技术设备	271
参考文献	277

第1章 内燃机系统设计的基本原理

1.1 内燃机设计的系统方法

系统的一般分类 “系统”一词源于希腊文，意为“集合体”、“由分部组成的总体”。这个术语近年来十分流行。首先由于它是一个表达任何事物的反映其组成部分属性的集总属性的词，其次它使人们可以对不同类型的事物进行统一的研究，以便比较和查明它们的共同规律。

自然界中存在的和人造的系统可以分成如下类型：物理系统、生物系统、社会系统、技术系统、控制系统、信息系统和复合系统^[86]。作为行星的地球及其组成部分——河流、山脉、火山可作为物理系统的例子；植物、动物、人类是生物系统的例子；家庭、集体、社会是社会系统的例子；技术系统是人类劳动生产的产物。控制系统和技术系统的区别是前者可以学习（或自学）和改进（或自改进）。控制系统可以是程序控制的、自适应的和自改进的。信息系统与前述不同，它不是物质的，而是一种抽象系统，是信息数据互相联系的总合。它可用来描述其他类型的系统及作为系统间交流信息的手段。复合系统由上述各类系统的分部组合而成。

近年来所谓人机系统得到了很大的发展，如生产或设计的自动控制系统和质量控制系统等。这类系统都是社会、技术、控制和信息系统分部的组合。

根据系统与外界环境的关系不同，通常把它们分为开放

系统和封闭系统^[105]。与外界无关的系统称为封闭系统；与外界有关的称为开放系统。

系统可以是同类的，也可以是不同类的。由具有同一功能及类似或相近基本特性的分部组成的系统是同类的，否则为不同类的。

根据系统状态和特性是否随时间而变，它们又分为动态系统和静态系统。

如果已知系统在某一确定情况下的状态即可确定它在其他任何情况下的状态，则称该系统为确定系统。如果确定系统在某一情况下的状态的参数值只能用来求得系统在其他情况下的性能指标值的概率分布，则称这种系统为概率系统或随机系统。

内燃机——复杂的技术系统 布斯连柯 (Н. Б. Бусленко) 给复杂系统下过一个最简单的定义，如果一个系统由许多相互联系和相互作用的分部组成，它便是复杂系统^[12]。

复杂系统通常有下列特征：所完成功能的多样性；具有大量的组成分部，它们在结构上或在完成功能过程中形成一个整体；在各分部间有多方面的联系；具有复杂的有组织的控制；系统的特性由于和外部环境相互作用而表现出来，外部环境影响到系统的形成；当系统对外部作用反应时，存在随机因素。

申农 (Р. Шеннон)^[114]还提出了几个区别复杂系统的特征：易变性、反直观的行为、性能恶化的倾向和组织性。易变性表现为系统在一段较长时间间隔内并不保持初始状态。其次，若把一系统视为典型，对于复杂系统就会发现，在其进化发展过程中，改变的不仅是此典型的特性，而且还有其结构。反直观行为意味着：系统对于某些作用的反应方

式可能完全不同于遵循最简单的逻辑规律时应该的那样。申农写道：“因果并不总是随时间和空间的变化紧密相联的，某些情况的特征可能在大大落后于其起因开始作用的时间才表现出来。明显的解决办法在实际中可能导致问题的尖锐化，而不是问题的解决”^①。性能恶化是指由于系统组成部件的老化和磨损，使系统性能出现的恶化。这种恶化过程不可能完全消除，只能减慢其速度。组织性是指系统的组成部分互相间保持有组织的关系，其中有一些是隶属关系，有一些则是平行关系。

根据上述特点：有充分的根据认为内燃机是一个复杂的技术系统^②：它具有大量的组成分部，这些分部之间有各种各样的关系，需要复杂的控制系统等。内燃机也能成为控制和复合系统的一部分。

另一方面，在一般情况下可把内燃机归类于开放的、不同类的、动态的和随机的系统。在个别情况下，在解决内燃机的一些科研和实际任务时，可把它看作为同类系统，如系列型谱。在评定稳定工况下的发动机参数时，可将其看作为静态确定系统。

为何一定要把内燃机视为复杂技术系统而引进新的术语和新的概念呢？问题并不在于这些词汇时髦，而是由于利用系统的概念有助于在发动机制造业中，应用在其他先进技术部门中已有效推广的途径、理论和方法。

① Р.Шеннон, Имитационное моделирование систем—искусство и наука, М. Мир, 1978, с. 53.

② 以后我们主要探讨的是技术系统，因此，“技术”两字经常省略。

系统方法 并非是二十世纪后半期的发明。早在需要全面考虑所有因素和情况并仔细评价所采取的措施带来的后果的情况下寻求技术上的解决途径时，就曾应用过这种方法。

早在1824年，沙地·卡诺 (Sadi Carnot) 就在其著作《论火的动力与发出这种动力的机器》中写道：“任何时候都不能指望把燃料的全部热能加以利用。如果忽略其他重要目标而一味追求此点，将有害而无益。燃料的经济性——这只是热机应满足的条件之一。在很多情况下，燃料经济性常常处于第二位，热机首先应当满足可靠性、强度、寿命、尺寸、价格便宜等要求”[⊖]。

当发动机还处于结构简单阶段，由于缺乏相应的试验和计算依据，选择结构方案的灵活余地有限、解决问题的范围狭窄，因而卡诺所述的问题通常是借助于权宜的、非规范的（对每次任务有其自有的）办法来解决的。这些办法往往要经过对样机进行长期的、细致的研究改进才能找到。

发动机品种的增加、结构的复杂化和用户对产品质量的要求的不断提高，以及物力、人力和时间的限制都对研制现代的发动机提出了崭新的要求。

在这些新的条件下，为获得技术方案，需要在有限的时间内高质量地处理大量的情报信息，需要协调大批人员的工作，而技术和组织方案错误的代价多倍地增加，应用传统的设计方法效率就很低了。

⊖ Второе начало термодинамики С. Карно, В. Томсон—Кельвин, Р. Клаузиус и др., под ред. А. К. Тимирязева, Госуд. технико-теоретическое изд-во, М.—Л., 1934, с.61.

计算技术的蓬勃发展、应用数学的巨大成就、控制论和复杂系统理论等科学的问世、实验数学理论的诞生——所有这一切都为一种新的方法的出现创造了条件，这就是设计复杂系统的现代方法，统称系统方法。

同从前一样，在现代发展阶段，系统方法的基础仍是综合研究系统的属性和状态。同时在系统方法表现的新形式中，有许多新的特色，它们在内燃机研制中也有自己的特点。

在内燃机领域中系统方法意味着从为一类用户专门设计发动机转向为满足多类用户需求设计系列机型。内燃机的系列设计与所取方案关系密切，方案不佳往往导致以百万卢布计的损失。这样的巨大损失是不容许的，因此，使发动机类型、结构参数和特性达到优化、使研制时间、人力和物力的消耗达到优化是非常重要的。优化设计方法必须建立在系统方法的基础上。

技术进步的速度决定发动机制造发展的速度，并首先决定发动机结构更新的速度。今天若还用十年或十五年的时间才能研制出新型发动机，那是不能容许的，因为在这段时间内，它们早就过时了。考虑到发动机的研制周期长主要是由它们的样机研究改进周期决定的，现代发动机设计中的重点就不应放在样机研究改进上，而应主要依靠在其各种表现形式下方便和一致的数学模型在设计阶段就把发动机的性能确定下来。

应用电子计算机作为模拟的工具不仅能够降低研究费用和加速数据处理，同时还可在设计方法上来个质的突变，解决传统方法所不能解决的问题。借助电子计算机实现设计自动化是当代技术发展中实现这一突变的高级阶段。

当前，决定内燃机研制、生产和作为动力装置使用是否合理的基本准则是各种形式的经济效率。因此，当前经济分析是系统方法的必要和最重要的组成部分。

使用标准件和通用件与经济性有密切的联系。不采用系统方法就不可能全面实现标准化和通用化，因为这不仅要求在一个企业内部，往往还要在整个行业、甚至在全国范围内把设计、生产和使用问题联系起来。

最后，在各种应用领域内控制系统的分析和综合法，也是系统方法中的新学科。

系统方法的可用范围是无法限定的。可以认为系统方法具有通用性，它既可用于科研探索阶段，也可用于计算和试验研究过程以及结构设计和工艺加工阶段。也可以设想仅在解决特别复杂的问题时才采用系统方法。显然在这里不可能有统一的答案。

同样，要想把不断扩大的系统方法工具库中的全套原则、方法和理论等都提供出来也是困难的。这里还需说明，系统方法这一术语有多种表达方式，但是它们在原则上指的是同一个意思，如：“综合方法”、“系统构成方法”、“规划目标方法”、“系统分析”、“系统工程”等。

1.2 描述技术系统的方法

技术系统的构成 为了研究、设计或制造复杂的技术系统，必须学会描述它，即用这样或那样的信息系统来表示它在空间和时间上的多样性。显然，描述应具有一定程度的一致性、统一性，并便于应用。我们拥有的为达此目的的手段尚不完善，因为不可能用一种语言就把一个复杂系统描述清楚。为此还需要图表、数学公式、文字说明、专门的算法语

言等。在用多种语言描述时，要进行语言间的翻译，还要注意各种描述间的联系，这就造成人力、物力的额外消耗，还常伴有信息和描述统一性的损失。即使我们今日可能用某种新的通用语言（超级语言）描述了一个复杂系统，也不可能有效地利用这种语言，因为研制技术系统的手段的基本部分还仍只适用于现有的信息表示方法。

描述系统的传统方法基于两个手段：将描述对象分解为其组成分部；再从不同的角度，以不同的观点来研究这些对象及其分部。这些手段与工业生产的现有工艺基本原则十分吻合，即先制造零件，然后由零件装配成不同复杂程度的系统部件，再由部件装配成系统本身。

因此，从描述和制造的方法出发，把系统分解为称为子系统的组成分部是合理的。每个子系统同样可以再分解成新的更小的分部，这种分解过程可以进行到必要的程度。

子系统在进一步的分解中，不再被分解或不再由其内部来描述时，则称它为元素^[12]。例如，活塞组、燃油系、曲轴等可以是发动机的子系统。在某些情况下，可以认为活塞销、活塞环是发动机这个系统的元素。另一方面，任何一个系统都可以是称为母系统的一个或几个更高级系统的分部。以发动机或发动机组为动力的运输装置（船舶、内燃机车）可以视为发动机的母系统。

系统组成分部之间的关系由联系链来确定（图1-1）。每个联系链均对应于子系统、系统和母系统的输入和输出参数或参数间的函数关系。联系链可以是单参数链和多参数链、直通链和反馈链、内部链（在系统内）和外部链（由外界或母系统来），也可以分成信息链、能量链、物质链和复合链^[36]。信息链用来传递信息，能量链表示系统间的能量传

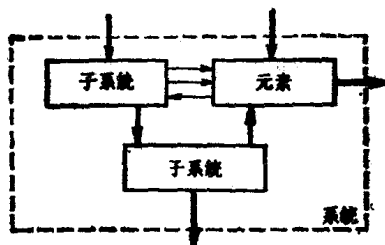


图1-1 系统的内部链和外部链分布图

递，物质链意味着物质（质量）的转移。

可用多种方式将系统分解为分部。把系统分解为多少有些独立性的分部是最合理的，因为这样可以减少需要研究的联系链数。

设系统由 $n=20$ 个元素组成，这些元素间用单参数链连接。链（直通的和反馈的）的总数为 $n(n-1)=380$ 。将该系统按5个元素一组分为4个子系统，目的是使每个子系统与其他子系统之间只有外部链联系。这样，在子系统内元素间的联系链数就等于 $(4 \times 5) \times 4 = 80$ ，而子系统之间的链数为 $4 \times 3 = 12$ 。以这种方式划分时，由于成功地选择了其元素间的外部联系很弱以致可以忽略的子系统，链的总数就等于 $80 + 12 = 92$ ，即比原来减少四分之三强^[12]。既然认为系统的复杂性与其分部间的链数成正比^[12]，则利用上述方法，就得以减少作为被研究系统之模型的信息系统的复杂程度。

系统构成的特点可由系统的组成，即系统中包括的组成分部的名称、数量及其间的联系链来说明。

系统的现有各种构成形式可分为简单型和复杂型、单链型和多链型、单级型和多级型。

在多链和多级的复杂构成中，可分出一种所谓的递阶构成。图1-2是其中的一种。由图可见，递阶构成的特点是具有垂直的联系链，它们表征了子系统在称为递阶的不同级上的垂直分布。此时递阶的高级子系统或者对较低级的子系统给以引导作用（或影响），或者把它们包括在自己的组成

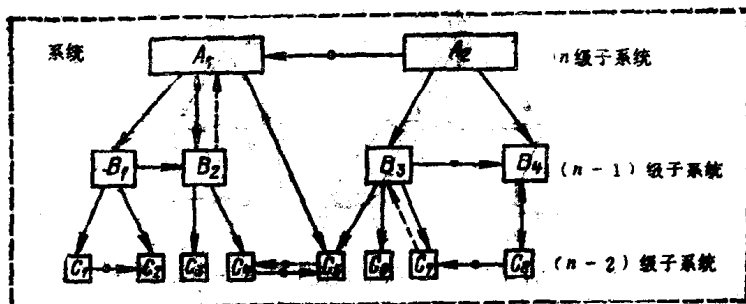


图1-2 系统递阶构成示意图

→垂直链 —→水平链 - - ->反馈链

中^[59]，前者为控制递阶，后者为组成递阶。信息系统也可有描述深度（抽象程度）递阶^[59]。

技术系统中的高级子系统对低级（通常是最邻近的）子系统的控制作用，在系统设计过程中可以影响到后者的结构，在使用过程中可以影响到后者的功能特性。

递阶构成中存在反馈链证明高级系统的参数或功能与低级系统的状态或行为有关。

水平链存在于同级的子系统之间。

根据组成和子系统间联系链恒定的程度，可分为固定（刚性）构成系统及可变（柔性）构成系统。发动机型谱系列属于后者。

图论语言是适合描述系统构成的语言。例如，图1-2所示的递阶构成亦可用流程图（图1-3）表示，其中顶点（用圆圈表示）是子系统，弧线（节点间的连线）是子系统间的联系链。

技术系统的描述形式 如上所述，为了完整地描述一个复杂技术系统，必须从不同角度进行描述。从很多可描述方面最好选出五个基本的也是最常用的方面，这就是：结构、

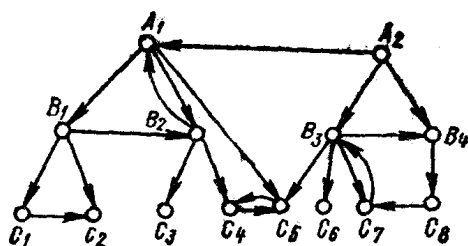


图1-3 以流程图表示的系统递阶构成

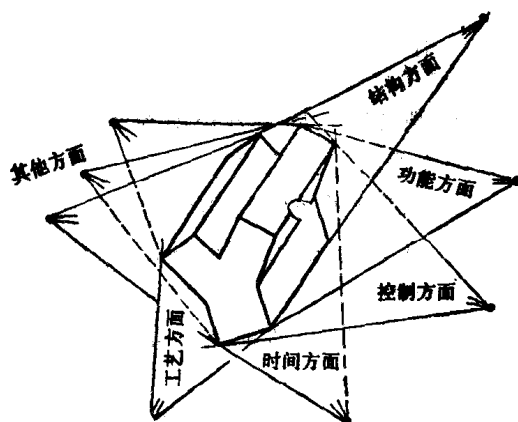


图1-4 描述系统的方面

功能、控制、时间和工艺。其余的方面，例如经济、美观、人类工程等可只用于专门目的的描述。

按照上述的几个方面，我们把描述分成五种基本形式(图1-4)，来研究它们的特点。

结构描述应该说明系统构造(构成)、形状(外形)、制造系统分部的材料、用作工质的物质(图1-5)。

结构描述中所研究的复杂系统的构成一般为组成递阶。描述构成时所用的联系链表征子系统的相互位置以及它们对于递阶的其他级的从属性。可以根据结构上或工艺上的理由

来进行分级，例如，可令发动机所有部件属于某一级，装配组件属于另一级，而零件属于第三级。

草图、图样、文字说明是描述技术系统形状（外形）的基本传统方法。创造自动化的设计系统要求制订适于向计算机输入数据的专门语言和方法，用以对结构元素各种表面几何形状及其相互位置等进行数字描述。

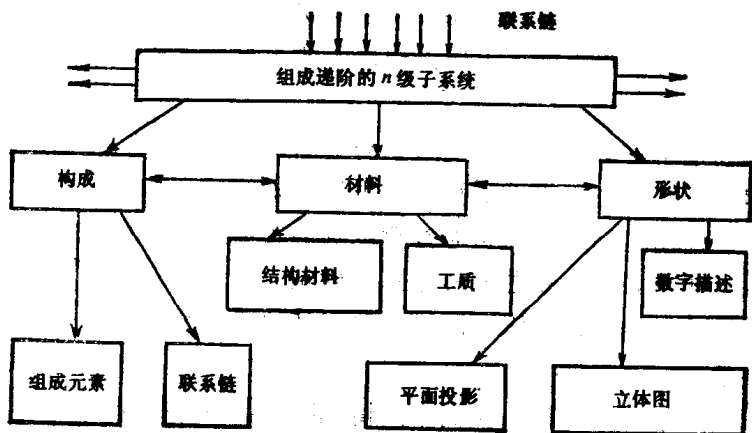


图1-5 系统结构描述构成框图

系统的结构描述方法一般都以某种方式进行标准化。在苏联这种标准化是通过设计文件统一系统（ЕСКД）的规定来实现的。

结构描述并不说明系统在其使用过程中的性能。要想说明性能，还需要功能描述，它描述系统状态在母系统（或外界）影响下变化的情况以及决定这些状态的过程。

描述系统中发生的过程的基本方法是将其分解为子过程，例如服从物理定律的传质和传热过程、能量转换过程，这是功能描述的内部方法。外部方法是用功能特性曲线族或

相应于系统每一状态的参数值总合来表示过程。系统参数的数值与确定系统在功能过程中的状态的指标间的关系称为功能特性。发动机负荷速度特性是功能特性的一个典型例子。

一般情况下，系统在指定时刻 t 的状态由表征它的外部联系链、它在 $t=t_0$ 时的初始状态的参数以及时间间隔 $\Delta t=t-t_0$ 来确定。

发动机在其发挥功能过程中的状态通常称为工况。发动机可以在不同工况下工作：稳定不变工况、不稳定（过渡）工况、反拖等。

在稳定工况下，发动机状态由表征空气、燃料、润滑油和水（水冷时）等工质在发动机进口处的状态参数和外界介质在发动机出口处的状态参数以及确定能量需求者的状态参数（通常为功率和曲轴转速）来确定。对不稳定工况，为确定发动机状态，还需要附加一些表征过渡过程开始和时间的参数。

为了研究系统，预测不同情况 $\ominus$ 下系统的行为以及进行系统之间的比较，需要了解功能特性。也常常采用与作为标准的系统进行比较的办法来确定所研究的系统合乎要求的程度。

功能描述与结构描述，特别是与系统的构成关系密切，尽管构成功能描述的组成部分不一定与构成结构描述的组成部分相对应。

为进行某一子系统的结构描述，必须把它从系统中分出，赋予外部联系链，并确定其状态。其功能描述的构成作为一个信息系统，通常具有递阶特点。可能具有全部三种形

$\ominus$ 此处的“情况”可以理解为包括所研究系统在内的母系统的状态。