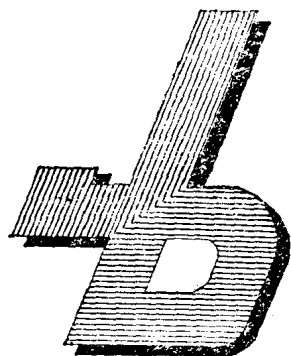


能源利用与开发

王仁辅 蒋斐 编

机电工程
新技术
基础丛书





机电工程新技术基础丛书

王仁辅 蒋斐 编

能源利用与开发

机械工业出版社

本书从能的“质”和“量”两个方面讨论了能源的有效利用和开发。其特点是基于基础理论与工程实践的结合，阐述了基础理论部分：第一章绪理、第二章质量守恒和连续性方程、第三章热力学第一定律和能量守恒、第四章焓和热力学第二定律和第五章质-能守恒和化学反应。工程实践部分按动力学参数温度编排有第六章、第七章的蒸汽、气体动力系统，第八章制冷，第九章低品位热源和热泵开发和第十章节能社会化。

内容的阐述遵循物理模型的建立和解剖、数学模型的物理意义和求解方法，以及模型的工程应用。

在工程实践课题中采用了单元分析法及“流”和“形”(SFP)分析法。

全书采用我国法定计量单位。

本书可作能源、机械动力、化工、轻工和空间技术等专业的学生、研究生、教师和工程科技人员的知识更新与专业教材用。

能源利用与开发

王仁辅 蒋斐 编

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)

中国农业机械出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 $850 \times 1168 \frac{1}{32}$ ·印张 $12 \frac{3}{8}$ ·字数326千字

1986年12月北京第一版·1986年12月北京第一次印刷

印数 0,001—2,197·定价3.10元

统一书号：15033·6384

《机电工程新技术基础丛书》出版说明

科学技术的飞速发展，要求在机械工业部门从事技术和管理工作的干部学习和了解有关专业的新水平、新成就、新技术、新知识。为了贯彻机械工业“上水平、上质量、上品种，提高经济效益”这个总方针，帮助在职工程技术人员学习业务，更新知识，更好地为祖国的四化建设服务，我们特组织编写了这套《机电工程新技术基础丛书》，第一批将陆续出版十七种。这十七种书是：《工程数学方法》、《弹塑性力学》、《机械优化设计》、《电机、电器优化设计》、《机电产品可靠性技术》、《能源利用与开发》、《液压传动与控制》、《测试技术》、《环境污染与治理》、《材料科学及其新技术》、《数控技术》、《微型计算机应用技术》、《电子电路技术》、《自动控制工程》、《系统工程概论》、《管理数学》、《技术经济分析》。

这套丛书的读者对象，主要是六十年代以来的大学和中专毕业生，现在从事机电产品的设计、制造工艺、技术改造、设备维修、质量管理、技术管理等工作的工程技术人员。

丛书内容着重于七十年代以来机电工程和管理工程有关学科的最新发展。重视阐明物理概念的基础上，介绍新技术、新理论的应用，以及如何进行有效管理和提高经济效益。为了适应更多读者的需要，丛书以介绍基础性知识为主，不过多地作专业理论的探讨和论证。使它既可以作为在职技术干部和管理人员的培训教材，又可兼顾自学需要，使具有一般高等数学、普通物理知识的读者能够看懂。

由于条件和水平所限，丛书内容难免有不妥之处，希望读者提出宝贵意见，帮助我们改进提高。

前 言

本书系《机电工程新技术基础丛书》之一。本书可供能源、机械动力、电力、化工、轻工和空间技术等专业的科技人员和工程师们的知识更新用，也可作为学生、研究生和教师的专业教材用。

“能源开发”和通过“有效利用”来控制能量的消耗——节能，已经是一个世界性的综合课题。它需要将热力学、力学、传递过程和反应过程、过程系统分析与综合方法等内容，有机的结合在一起。对于规划、开发、设计、现场指导、革新，热力学的概念、内容和方法是指导性的信息与文件的依据；它不仅是研究物质运动自身的性质和行为，而且是环境的性质和行为统一研究的结果。

在本世纪初期，“物质”和“能”经受了划时代的变化：物质是由粒子组成，能是粒子的观念。这样的新内容有效地开拓了能源和节能的工程含义，继煤炭、石油、水力和电力四大能源之后，节能可称为第五能源。从国家总的方针考察，能源问题应是开发和节约并重。就工程实践来说，大力开展以“节能”为中心的开发、改造和革新等工作，就具有十分重要的地位。这些都要求基础理论的系统化和工程应用的具体化。

物质和能在概念上与内容上的突变，促使经典热力学第一定律演变为质-能守恒这样有益的结果，在内容上完善了热力学第一定律。在工程应用中，将具有化学反应的质-能转换过程和无化学反应的物理传递过程统一起来，获得了在概念上更为清晰和方法上更为简练的结果。

与能源开发和节能有着紧密联系的是热力学第二定律。熵概念和熵内容的开拓，与焓概念焓内容的建立，从另一方面补充了

热力学第一定律的不足。并能够定量地用焓直接地考察能的“质”方面的品位了。

由于建立了“焓”的概念、内容和方法，热力学第一定律和第二定律不仅仅在理论上将力学和热力学有机地结合起来了，而且对工程实践起着具体的指导作用，获得了良好的社会效果。“节能社会化”不仅仅只是个设想，从五十年代被提出后，至今已是具体的工程和社会的基本措施。

随着计算机应用的普及，工程强化和社会效益的最佳化的设想逐步得以实现。这样就迫切要求取行之有效和符合实际的数学模型，随之而生的是系统的研究方法和解题方法。可是这些看起来直接与结果有关的内容和方法，是建立在物理模型的可靠性和正确性的基础上。时代的特征已进入：对实践微小细节的疏忽，往往会导至对未来的预测和计算工作的失败。即使有一天所有实际问题都将可以用计算机进行高度或有限的分析，但毕竟还是被人们的才华和智力所控制。这一主、次问题，六十年代以来愈来愈被科学家和工程师们具体地理解到。本书在编写中，正是基于对建立物理模型、物理模型的解剖、数学模型的建立、数学模型的物理意义、解题方法和计算工具，以及工程应用这样的思路 and 程序进行分析、讨论和展开的。

涉及到工程实践领域时，由于工程专业的多种多样，内容繁冗、复杂和相互交叉，简直是使人眼花缭乱。所以本书在分析和讨论时，采用了单元分析法和“流”与“形”SFFP——Structure of Fluid/Flow and Its Performances) 学说的内容和方法。多年的实践证明，这是基础理论和工程实践的结合以及指导实践是行之有效的方法。本书所涉及的实践开发课题，都是人从工作介质(流体)的性质和运动的开发开始，到系统、循环与设备的开发。

鉴于上述目的，本书的内容作了如下的安排：

第一部分是基础理论部分。它包括第一章绪论、第二章质量守恒和物质流连续性方程、第三章热力学第一定律和能量衡算、第四章热力学第二定律和焓及第五章质-能转换和反应过程。这样

的按排对已经具有初步热力学或物理化学和高等数学的读者和学者，不会带来很大的困难。为了更好的结合工程实践，讨论的重点是流动系统和控制体上的过程。为了达到应用的目的，编入必要的典型的例题，以供参考。

第二部分是典型工业过程的分析。这部分完全是基于节能的观点，按照与能的“质”有密切关系的运动学参数“温度”进行编写的。第六章蒸汽动力装置和第七章气体动力装置属于高温范畴的内容；第八章制冷是属于低温范畴的内容；第九章低品位热源的有效利用和热泵开发是中等温度范畴的内容；最后是第十章的社会化节能。过多的有关的理论探讨，已超出本书的范畴，整个内容限于节能和其开发。

若宇航工程只涉及到有关的部门和其科技人员，那么能源的有效利用和节能几乎涉及到各专业和每个人，所以在内容和应用两方面的广度与深度都是巨大的。

本书由王仁辅、蒋斐编写，浙江大学马元骥教授任主审；在编著过程中，得到了董太和、董大年、柯桂华、江吉甫、程祖球、潘加煜和应进西等大力协助和提供有关资料，谨此表示衷心的感谢。

由于篇幅和个人水平有限，难免会有不妥之处，热诚希望读者提出宝贵批评和建议。

作者

一九八五年二月

目 录

第一章 绪论	1
§ 1-1 能源的开发利用和能的转换	1
§ 1-2 物质流的时间和空间描述法	9
§ 1-3 能的“量”和“质”	12
§ 1-4 不可逆过程与熵、焓和烟	17
第二章 质量守恒和物质流连续性方程	25
§ 2-1 基本概念	25
§ 2-2 单组分、单相系统的连续性方程	28
§ 2-3 可压缩流体流动的连续性方程	37
§ 2-4 通用连续性方程	48
第三章 热力学第一定律和能量衡算	61
§ 3-1 物质和能——热力学第一定律的回顾	61
§ 3-2 控制体能量积分模型	66
§ 3-3 微元体能量(热量)微分模型	75
第四章 热力学第二定律和烟	87
§ 4-1 工业过程	87
§ 4-2 烟的定义和熵增	97
§ 4-3 熵方程和烟方程	100
§ 4-4 烟效率和工程系统的单元分析法	108
第五章 质-能转换与反应过程	117
§ 5-1 简单反应模型(SCRS)分析	117
§ 5-2 燃烧过程的物料衡算	121
§ 5-3 燃烧过程的能量分析和衡算	130
§ 5-4 燃烧过程的能量贬值——热力学第二定律的应用	137
第六章 蒸汽动力装置	146
§ 6-1 历史回顾	146
§ 6-2 工作介质的选择和开发	153
§ 6-3 蒸汽发生器和循环系统的开发——	

工质性质与再热循环和再生循环.....	156
§ 6-4 热-电联合循环系统和热电站——节能社会化的前驱	169
第七章 气体动力装置.....	183
§ 7-1 内燃式发动机.....	183
§ 7-2 燃气轮机装置和循环.....	188
§ 7-3 气体动力系统开发.....	197
§ 7-4 复合循环和核能源开发.....	202
§ 7-5 核能源-磁流体-燃气、蒸汽联合循环.....	208
§ 7-6 过程与设备的组合开发(一)——喷气发动机.....	212
§ 7-7 过程和设备的组合开发(二)——斯特林循环和斯特林 热机的开发.....	213
第八章 制冷.....	233
§ 8-1 工业制冷.....	234
§ 8-2 工作流体——制冷剂的要求和开发.....	236
§ 8-3 制冷过程的焓分析.....	241
§ 8-4 蒸汽压缩式制冷原理和开发.....	245
§ 8-5 工业深冷作业.....	255
§ 8-6 逆向斯特林循环和变质量过程制冷.....	268
§ 8-7 热压缩制冷.....	284
第九章 低品位热源的有效利用和热泵的开发.....	291
§ 9-1 低品位热源分析、泵热循环和热泵.....	298
§ 9-2 工作介质的选择.....	298
§ 9-3 蒸汽压缩式热泵.....	302
§ 9-4 吸收式热泵.....	311
§ 9-5 喷射式热泵和泵热循环.....	319
§ 9-6 工程实践分析.....	322
第十章 社会化节能.....	358
§ 10-1 社会用“能”整体分析	358
§ 10-2 社会污染	363
§ 10-3 热-电整体利用方案(HETS)	365
§ 10-4 温度逐级整体利用方案(TCTS).....	371
参考文献.....	385

第一章 绪 论

§1-1 能源的开发利用和能的转换

一、工业状况简介

观察一个常见的工业动力系统，如图1-1所示。能的转换是这样进行的：具有一定热值的液态或固态燃料（能源）在燃烧室中燃烧放热，部分热量通过传热设备——锅炉的汽包和管子，将热量传递给载热体（工作介质）——水。水受热汽化为具有一定压强的蒸汽，将此蒸汽通入透平机，带动发电机发电，供单位使用。

能源是物质，由于它们自身的物质结构和组成的不同，而具有不同的能量。这些能量是由组成物质的属性所决定的，称为物质的化学能，常用燃料的化学能如表1-1所示：

核燃料也是一种物质的能源。应用核燃料发电时，其闭路热动力工业系统如图1-2所示。开发和利用太阳能发电的闭路动力系统如图1-3所示。比较图1-1、图1-2和图1-3不难发现：组成整个工业动力系统的基本原理和流程是一致的，但由于各种能源本身的性质不同，所以由能源转变成能量所使用的设备和转化过程的系统结构，也就会不同。如上述各图中虚线所示的部分。

核燃料的转化过程的特点是高温、高压，并需有良好的核辐射防护措施。一般的固态、液态或者气态燃料的转化过程，基本上是在常压的燃烧室中进行，所获得载能介质的温度和压强，低于核燃料所得。这些都是由化学反应所获得的能量。太阳能的转化，是辐射能的集中和收集等一系列的物理传递过程所组成，所获得的载能介质的温度和压强，通常比燃料燃烧所得要低得多。

自然界所存在的能源是多种多样的，人类对它们还没有完全

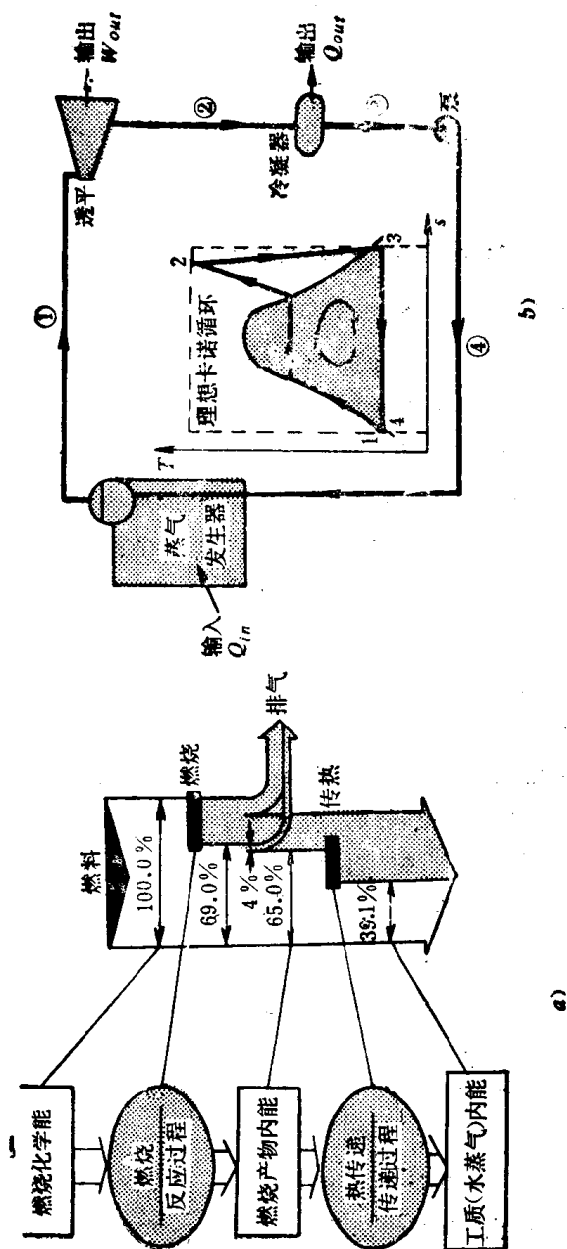


图1-1 简单工业动力系统

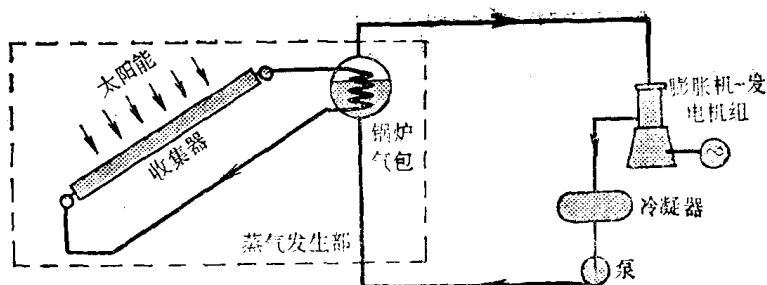


图1-3 太阳能发电动力系统

二、能源和能

能源是物质的，能源经过转化后成为社会所需的能。“能”是不是物质？对这一问题需建立起正确的认识，它对于物质和能源的开发、利用和节能是非常必要的。

在本世纪以前，就已建立起关于物质和能的性质的主要概念。当时，物质的粒子性已由科学手段证实而不再被怀疑了。一定量的物质是由原子和分子所组成，理论上，各个粒子间可看成是各自分立的和可以辨别的实体。电磁辐射的波动学说已被普遍地应用着，但它的粒子性并未被认识到。至本世纪初，能和物质的概念经过了一场意义深远的变革，从辐射线的波、粒两重性到量子力学的建立和能的量子化概念的建立。人们认识到：能量的不同型态，仅仅是辨别粒子所具有能量的一种方法而已，而粒子的能量状态或可能的能量状态取决于粒子的属性和所处的系统的状况。从理论上深入探讨这些内容已超出本书的任务，但这些最基本的概念对于理解：为什么不同型态的能可以相互转换、转换时的必要条件、对能源的分类和开发、以及现状和展望，都会带来很大的帮助。例如，可以按物质的状态和属性将能源进行分类；能源的开发不仅是找到自然界新的物质资源，还要将物质有效地转化成社会所需的各种不同型态的能；而且不仅是能的量的转化，还应该有其质的要求。

能源和能以及它们的转换过程可归纳成如图1-4所示。

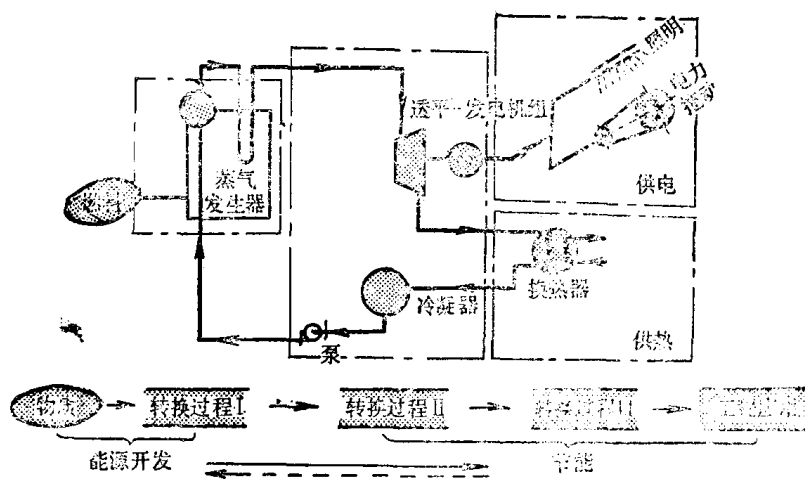


图1-4 能源开发、转换、应用和节能

能源和能都是物质的属性，自然界的能源有固态、液态和气态，例如属于固体燃料的有煤、属于液态燃料的有石油和人工合成燃料、属于气体燃料有天然气和各种不同热值的煤气，其他还有太阳能、风能、地热等等。按能的级别（包括质和量的分析），可按图1-4中自左向右的排列顺序，相对地分别称为一次能源、二次能源等等。

三、能源利用的现状和展望

世界能源的结构、变化和到本世纪九十年代末的趋向可归纳成如图1-5所示；其工业经济效益如图1-6和图1-7所示。从图1-5中可以看到，八十年代是世界能源结构变化具有代表性的转折点。此后，煤和核能占有明显的优势。

核能源主要用于发电，在七十年代约占总发电量的10%，到本世纪末可望超过30%。目前铀的已知储量约为 $5.50 \times 10^3 \text{t}$ ，如使用普通原子反应堆，相当于 $3.50\% 10^6 \text{t}$ 标准煤，约等于1.5倍可采石油的储量；如使用加速增殖反应堆，此数值可高出40倍，这是十分可观的潜在能源。

在本世纪八十年代，煤的地位获得了提高。以煤为原料生产各种不同热值的煤气，已实现工业化。以煤为原料生产油类和甲

醇等合成燃料，也在逐步进入工业化。我国煤的资源丰富，仅次于美国和苏联，居世界第三位。煤的开采成本只有石油重质燃料价格的一半左右。所以对我国而言，既要十分珍惜和合理地利用

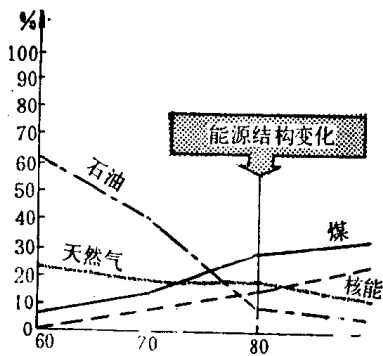


图1-5 世界能源结构变化

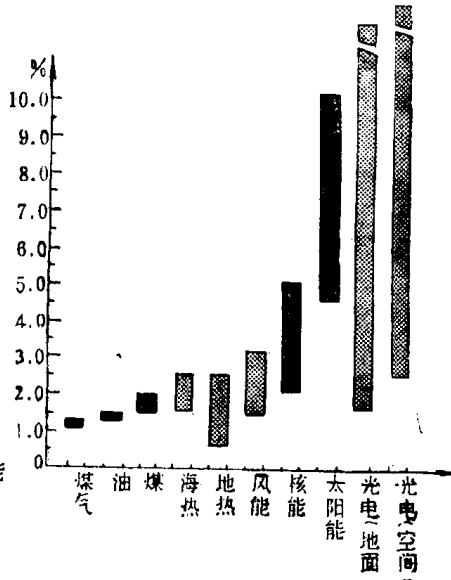


图1-6 设备成本和一次能源的关系

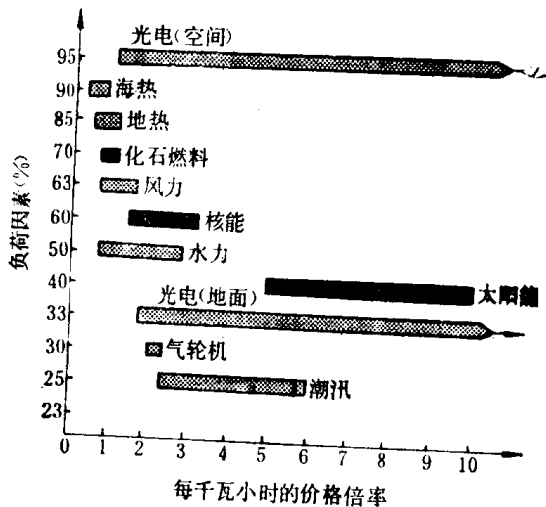


图1-7 功率和一次能源的关系

石油资源，又要以煤的转化和综合开发作为一个主攻目标。

目前，煤主要被用作火力发电的燃料，存在着如何提高发电效率和解决环境污染问题。开发的内容有：能源的综合利用和转化，一次能源转化过程的开发、工业联合循环系统、以及余热的利用等。

煤的综合利用和开发，使世界能源的结构发生了变化。从图1-6可以看到，合成燃料从本世八十年代开始有了很大的增长。

四、能的转换和节能

固体燃料经过燃烧及核燃料经过裂变等转换过程，太阳能经过收集和吸收等传递过程后，转变成具有相当的“质”和“量”的能，供社会应用。工程和生活用能，概括起来有：功、电能、热能和光四种型态，如图1-4中所示。从图中可以看到能源和能是经过多次转换后，才达到应用的目的。分析其过程，可以预测能源的开发和节能的内容。是否可将转换过程进行简化和采用何种措施可提高能的利用率，这就需要根据能源的性质、实际应用的要求、整个工业系统的安排和布置、技术上的可行性和可靠性，以及经济上的合理性等综合分析和具体核算后，才能决定。

工业生产过程和能的转换过程是多种多样的，但不论是动力、机械制造、冶金、化工、石油化工或轻工等，归纳起来总离不开物理传递过程（质量传递、动量传递和热量传递过程）与化学反应过程两大类型，分析时应抓住它们的共性和个性。基础理论都离不开四大自然定律的应用，即

1. 质量守恒定律；
2. 牛顿运动第二定律；
3. 热力学第一定律——能量守恒定律；
4. 热力学第二定律——熵不守恒定律。

结合实际研究对象，由质点向系统发展和系统的状态函数向过程发展，使基础理论和工程实践有机地联系及结合起来，起到指导实践的作用。为此，可以将自然定律、工业过程、求解处理方法和工程应用概括成如图1-8所示。

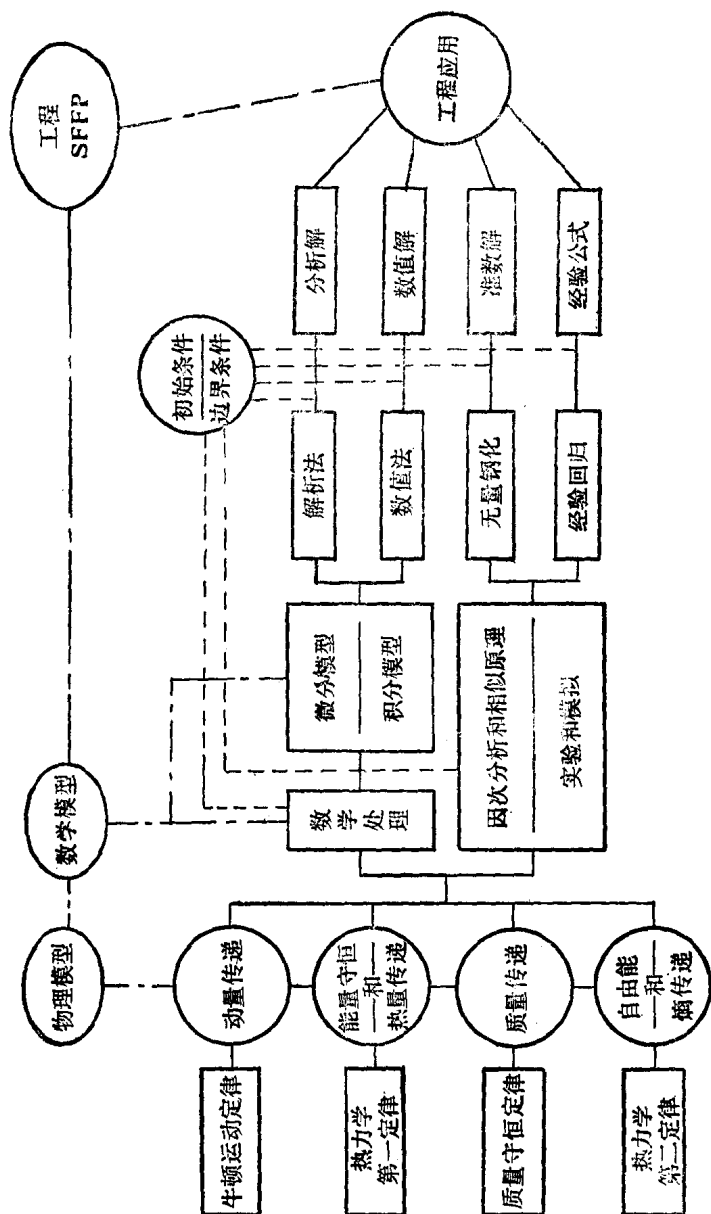


图1-8 自然定律、工业过程、求解处理方法和应用