

工程系统论

ENGINEERING SYSTEM THEORY

李喜先 等 著



科学出版社
www.sciencep.com

N945/20

2007

工程系统论

ENGINEERING SYSTEM THEORY

李喜先 等 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书主要运用现代系统概念、系统理论和系统观,从普遍存在的种类纷繁的系统中,抽象出一个极其复杂的与科学系统、技术系统紧密相关的工程系统,将其作为认识客体,研究其特性、结构、环境、功能、演化、模式和类型等,从而形成工程系统理论,即一种他组织系统控制自组织系统而形成的人工系统理论,并导致若干推论和应用。

本书可供科学、技术、工程工作的领导者,系统科学、科学哲学、技术哲学、科学社会学、技术社会学和工程哲学等研究者,及其相关的发展战略、政策、管理研究者,以及广大的研究生、大学生参考。

图书在版编目(CIP)数据

工程系统论/李喜先等著. —北京:科学出版社, 2007

ISBN 978-7-03-019929-4

I. 工… II. 李… III. 系统工程—概论 IV. N945

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 139699 号

责任编辑:姚平录 王丽平/责任校对:包志虹

责任印制:白羽/封面设计:高海英

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地书店经销

*

2007年9月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2007年9月第 一 次 印 刷 印张: 17 3/4

印数: 1—2 000 字数: 420 000

定 价: 45.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈科印〉)

本课题研究的资助单位

原 国 家 科 学 技 术 委 员 会
中 国 科 学 院
国 家 自 然 科 学 基 金 委 员 会
中 国 科 学 院 出 版 基 金 专 家 委 员 会

作 者

(按姓氏笔画为序)

刘峰松	李伯聪	李喜先
苗东升	金吾伦	胡作玄
袁向东	董光壁	

前 言

1989年,在中国科学院、国家科学技术委员会、国家自然科学基金委员会和中国科学院出版基金专家委员会的资助下,我们开始本课题的研究,其成果将形成4本专著:《科学系统论》、《技术系统论》、《工程系统论》和《知识系统论》。

本课题由李喜先负责,并进行全书框架构思和统稿。

本书是这4本专著中的《工程系统论》,共分为上、中、下三篇,共16章。各章撰稿人员如下:

刘峰松研究员(中国科学院院士工作局)撰写第15章;

李伯聪教授(中国科学院研究生院)撰写第6、12章;

李喜先研究员(中国科学院原科技政策局)撰写导论、第1、13章;

苗东升教授(中国人民大学哲学系)撰写第2、10章;

金吾伦研究员(中国社会科学院哲学所)撰写第9、14章;

胡作玄研究员(中国科学院系统科学所)撰写第5、16章;

袁向东研究员(中国科学院数学所)撰写第11章;

董光璧研究员(中国科学院自然科学史所)撰写第3、4、7、8章;

同时,苗东升教授审阅了第13章,金吾伦研究员审阅了第15章,董光璧研究员审阅了第11章。

李喜先

2006年11月24日

目 录

前言

导论	1
----------	---

上篇 总 论

1. 工程系统	7
1.1 工程	7
1.2 工程系统的涵义	11
1.3 工程系统的特性	19
1.4 科学系统、技术系统与工程系统	20
1.5 工程系统论与系统工程学的区别	25
2. 工程系统的结构、环境与功能	27
2.1 工程系统的结构	27
2.2 工程系统的环境	35
2.3 工程系统的功能	40
3. 工程系统的演化	46
3.1 权势主导的工程系统	46
3.2 经济主导的工程系统	50
3.3 智力主导的工程系统	55
4. 工程系统的模式	61
4.1 开发生活资源主导的工程系统	61
4.2 扩大生存空间主导的工程系统	65
4.3 保护环境安全主导的工程系统	69
5. 工程分类	74
5.1 价值及其分类	74
5.2 工程的范围	81
5.3 历史上的工程	83
5.4 工程分类系统	90

中篇 分 论

6. 自然工程系统	95
6.1 自然工程系统的性质	96

6.2	自然工程系统的发展	99
6.3	自然工程系统的要素	104
6.4	自然工程系统的过程	107
6.5	自然工程系统的价值	109
7.	社会工程系统	112
7.1	政治工程系统	112
7.2	经济工程系统	117
7.3	社团工程系统	121
8.	思维工程系统	127
8.1	推理工程系统	127
8.2	演算工程系统	131
8.3	确证工程系统	135
9.	学习工程系统	139
9.1	学习工程系统的价值取向	140
9.2	学习工程系统的观念基础	143
9.3	学习工程系统的概念框架	146
9.4	学习工程系统的圣吉模式	151
9.5	学习工程系统的技术支撑	158
9.6	学习工程系统的组织管理	162
10.	复杂工程系统	165
10.1	从简单工程系统到复杂工程系统	165
10.2	工程系统要素的复杂化	168
10.3	工程系统结构的复杂化	172
10.4	工程系统环境的复杂化	175
10.5	复杂适应性工程系统	179
10.6	开放复杂巨型工程系统	182
11.	虚拟工程系统	186
11.1	虚拟工程系统概述	186
11.2	实体虚拟工程系统	190
11.3	要素虚拟工程系统	196

下 篇 应 用

12.	工程系统设计	203
12.1	设计的历史发展	204
12.2	设计的基本性质和特征	206
12.3	现代设计的类型和设计工作流程	213

12.4 设计的作用	215
13. 工程系统管理	219
13.1 一般管理	219
13.2 工程系统管理概述	224
13.3 工程系统的管理系统	227
14. 自然控制工程	236
14.1 自然控制工程系统的内涵	236
14.2 自然控制工程系统的结构与功能	237
14.3 自然控制工程系统的特征	239
14.4 自然控制工程系统的价值	240
14.5 自然控制工程系统尚存的挑战	242
15. 知识创新工程	244
15.1 知识的涵义	244
15.2 一般创新的概念	246
15.3 知识创新的特征	248
15.4 知识创新工程化	250
16. 人类未来文明工程	254
16.1 人类未来的情景	254
16.2 人类未来文明工程的框架	257
16.3 生存基础工程	257
16.4 身心工程	262
16.5 文化工程	264
16.6 理想社会工程	268

李喜先

导 论

我们主要运用现代系统概念、系统理论和系统观,从普遍存在的种类纷繁的系统中,抽象出一个与科学系统、技术系统紧密相关的工程系统作为研究对象——认识客体,并将其视为一个他组织系统,也可作为他组织系统与自组织系统相结合从而具有更高级组织形态的系统。实际上,凡人造事物都是他组织系统,工程系统就是典型的他组织系统。

工程活动的发生在于满足人类生存的需要,由此显露其最大的价值。我们要追溯工程的起源和演变,从中可以看出其构成要素的形成,并发展成为非常复杂的工程系统,以致衍生成自然工程系统、社会工程系统和思维工程系统等。我们将研究其结构、环境、功能、演化、模式和类型等,从而形成相应的工程系统理论。最后,从整体上加深对工程系统的认识,进行系统的反思,从而建立起工程系统观,以引导我们科学地创建现代工程和未来文明工程,特别是理想社会工程。

一、工程系统形成

在生存论的意义上,由于工程的意义要比技术和科学更为根本,由此引申出,工程的发端应早于技术,而技术的发端则早于科学。由于工程的发生和演变都与产业紧密相关,因而我们将工程的发展阶段大体上分为三个时期:农业时代的工程、工业时代的工程和知业时代的工程。特别是,自工业革命以来,构成工程的多种要素也突显出来了,以致发展成为非常复杂的工程系统。在构成工程系统的多种要素中,主要有价值、科学、技术和管理四种:其一,价值在工程系统中是具有核心地位的要素。一般地,价值是指客体的固有属性能满足主体的需求而导致所追求的对象。因此,工程系统所具有包括物质的、精神的价值,就成为主体所追求的对象了。据此,我们可以推断,在构成工程系统的多种要素中,价值自始至终起着支配作用,就类似于哈肯(H. Haken)在《协同学导论》、《高等协同学》等多部著作中论及系统内序参量所起的支配作用。其二,任何工程系统皆蕴含着科学。无论是最早发端的原始工程还是复杂的现代工程,都必须符合科学原理。相反的,凡是违背科学原理的工程,或者不合人意,或者迟早会失败,甚至带来灾难。其三,任何工程系统都将经过选择而集成着众多类技术。就是说,工程系统不但要集成数量众多的技术,而且集成技术的复杂程度、集成密度还存在着递增现象。其四,管理在工程系统中起着他组织作用或控制作用。在概念上,控制与管理基本相同。但

是,在社会系统、有人参与活动的系统中,一般地都称为“管理”。工程系统是有目的的活动系统,凡有目的的系统都必然存在着控制或管理。这样,才能将诸构成要素——价值、科学、技术——聚集齐备,从而整合为能运行起来的工程系统。

工程系统独自具有而其他系统如科学系统和技术系统等所不具有的特殊属性:专一性,是指它满足于特殊用户的需求,从而只能存在专项的工程系统;一次性,是指任何工程系统都要受到时空的限制,因而不可能完全一样;目的性,是指任何工程系统都有明确的目的,并通过控制或管理,使目的具体化,从而达到预定的目标——实现了的目的。同时,工程系统与科学系统、技术系统在研究客体、研究主体、研究方法、研究起点、研究结果、研究目的、评价标准、社会功能和社会价值等方面,既存在着显著的区别,又有着密切的联系。

二、工程系统理论

1. 他组织控制自组织系统原理

工程系统理论与科学系统、技术系统理论一样,都是特殊系统理论,即研究具有特殊系统意义的工程系统所形成的系统理论。凡工程系统都是人工系统,而且是典型的他组织系统。实际上,任何的工程系统,无论是自然的、社会的,还是思维的工程系统,都必须通过控制或管理的作用,即他组织力或强迫力,才能将各构成要素组织起来,形成能运行的人工系统。即使是一个具有自组织机制的自组织系统,也要经过外部的他组织作用,从而形成一个他组织与自组织相结合的具有高级组织形态的系统。因此,可以说,在工程系统理论中,须强调他组织控制自组织系统的原理。

2. 工程系统的结构、环境、功能及其间的关系

在工程系统中,正是通过他组织作用,才能把诸要素“黏合”起来,使经过选择的多类知识发生多种相互作用和联系方式,从而形成知识结构。同时,工程系统还存在着信息结构,即系统各要素之间通过信息交流变换而形成的有机整体;以及过程结构和价值结构等。

工程系统与其他系统一样,都必须在环境系统——外部一切不可忽略的相联系的事物中——生存和发展,并承受环境系统的塑造、限制和压力。而与工程系统最密切联系的环境系统,是由科技环境、文化环境、社会环境和自然环境构成的系统,其间形成必不可少的构成关系。在广义上,工程系统之外还有非系统,也构成它的环境。

凡系统都有其行为、功能和环境。维纳等人把“行为”概念推广到一切系统,并将系统行为定义为“系统相对于它的环境做出的任何变化”。即相对于它的环境,系统自身的变化,是系统自身特性的表现。而系统行为引起环境中的某些事物——功能对象——发生有益的变化,形成系统的功能。由此可见,功能只有在系统行为过程中才能表现出来,并可通过功能对象发生的变化来度量。工程系统的

功能主要包括科技功能、文化功能、社会功能、经济功能等。

系统的结构、功能、环境之间有着复杂的关系：一般地，功能不仅仅由结构决定，而应由系统的元素、环境和结构共同确定，而功能还对结构有反作用；系统的结构必须在环境的支持和制约下才得以建构和维持，系统的状态也必须以环境为参照物才得以显现。

3. 工程系统沿社会中轴演化

我们不仅要认识工程系统的结构、环境和功能，而且还要了解它的演化和模式(pattern)。

一般地，事物的演化是普遍存在的现象。凡现实的系统都因相互作用而导致演化，一种特殊的运动形态，即一种不可逆的、沿着特定路线的有限运动。在人类学的意义上，我们来考察工程系统的演化，特别是在文化母系统这种环境超系统中，考察自然工程系统、社会工程系统和思维工程系统相互作用而不断地演化。同样地，文化系统作为环境系统，自身也在不断地演化，即既有定常性，又有变动性。而文化系统总是沿着价值观所凝聚的社会中轴的转换而演化，依次演化的历史逻辑表征的社会中轴为道德、权势、资本、智力和情感。为了适应环境系统的变迁，工程系统也要沿着不同历史时期的特定社会中轴而演化。我们依次重点论及以权势、资本、智力中轴所主导的工程系统演化形态：

在农业文明时期，权势主导的工程系统受“权力本位”价值观的支配，从而形成象征权势的各类工程系统，如炫耀权力的巨型埃及法老陵墓，国王立法的罗马法律体系，以及知识权力化的中国科举制度等，都是以满足权力需要而追求的对象。

在工业文明时期，资本主导的工程系统受“金钱本位”价值观的支配，从而形成以金钱取代权力为标志的各类工程系统，如为了改变落后的农业经济而发展资本主义的法国大革命——社会工程系统，开凿黄金水道苏伊士运河，建立智力商品化的知识产权制度等，都是以谋求资本、金钱为中心。

在知业文明时期，智力主导的工程系统受“智力本位”价值观的支配，涌现了许多以生产、传播、扩散、储存知识为目的的各类工程系统，如知识与经济结合的科学工业园区、国际互联网、认识自然界的大科学工程等，都是围绕智力而展开的伟业。

特别是，我们还要认识到，工程系统要随时空而不断地沿着复杂性方向演化，这归之于为了适应环境，系统的要素异质而巨大及其相互作用的非线性，以及系统的要素、结构、环境等复杂化，这样就必然引起不可逆地朝着复杂性方向演化。

4. 工程系统总以一定模式存在

凡系统总是以一定的“模式”而存在着。模式概念的引用十分普遍，特别是在计算机科学、心理学、人工智能等领域中有着广泛的应用。正因为其应用的广泛性，就将依语境、目的不同而异。一般地，模式一词又译作“范型”，指可以作为范本、模本的式样，也可以指图像等具体对象或形态、外形、类别等抽象对象，往往区别于以数字形式来描述对象。在此，我们在抽象的意义上利用这一概念来刻

画工程系统的模式。

以开发资源为目的的工程系统,包括农业时代以金属革命、工业时代以能量革命、知业时代以信息革命为标志的各类工程系统,这可归之为资源型工程系统模式。

以扩大空间为目的的工程系统,包括:在农业时期,扩展疆土,如张骞陆上开拓丝绸之路,哥伦布、麦哲伦等远洋航行,开拓海疆;在工业时期,继续扩大疆域,如开垦美洲、澳洲等,进入海洋、大气层,开辟航线;在知业时代,从地球两极、海底,直到月球、行星等近地天体,乃至茫茫太空。这可归之为扩张型工程系统模式。

以保持安全为目的的工程系统,包括:防御安全,如古代构筑万里长城;生存保险,如英国建立劳合会;环境安全,人类建立国际地圈—生物圈计划等。这可归之为安全型工程系统模式。

5. 工程系统衍生出新系统

在逻辑上,我们将工程系统区分为三大类子系统:自然工程系统、社会工程系统和思维工程系统。这几类工程系统对于满足人类生存、发展的需要起着最基本的和永续的作用。但是,随着人类向更高级阶段的发展,就衍生出崭新的工程系统,包括学习工程系统(含教育工程系统等)、知识创新工程系统、文明工程系统和理想社会工程系统等。这必将为人类创建学习型社会、迈向知识社会奠定坚实的基础。

6. 工程系统的虚拟现实

一般而论,工程系统是指真实的工程系统在虚拟环境中的实现。随着现代计算机软硬件技术和网络技术的发展,在一定程度上具备了在计算机及其外部设备和网络中(即虚拟环境中)进行工程活动的可能性。我们可以在真实的工程活动进行前,在这些设备上对工程的全部生命周期内的全部或部分运作进行虚拟,构筑起一个虚拟的工程系统——实体虚拟工程系统。从另一视角,又可定义另一类虚拟工程系统,即工程系统在其要素空间上的投影——要素虚拟工程系统。这样,就构成工程系统的两类虚拟现实系统。

三、工程系统观

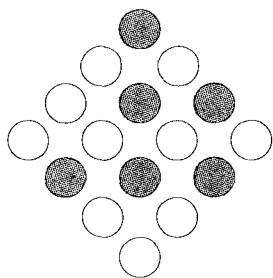
正如科学系统观、技术系统观是对科学系统、技术系统持基本的、总的观点一样,工程系统观就是对工程系统形成基本的、总的观点,也应是对工程系统的反思或再认识。这种认识应是理论化、系统化的高度抽象,即一种认识的“升华”。

在追溯起源中,我们就更能意识到,原初的工程活动对于维系人类的生存进而增进与自然界、人与人之间的社会关系的重大意义。在漫长的历史长河中,工程的演化又总是与人类的发展和命运息息相关,不断地增进人类文明的进程。

坚持工程系统观,就是坚持工程观与系统观的融合,即是系统观透入工程观的全部观点。这样,工程具有的一系列系统特性,如整体性、层次性、开放性等,特别

是他组织系统的特性也就显现出来了。进而可以认识到,工程系统的复杂结构、多种功能、与环境的互塑共生关系,以及如何以不同的模式,沿着社会中轴向复杂性、高层次方向演化。尤其是,在不断地满足人类更高、更多的需要中,即建立高级社会文明过程中,应坚持在工程系统观中渗透着新的伦理观。

坚持工程系统观,就能够发现形成具有系统意义的工程系统的原理:其一,只有遵从自组织原理,才能形成工程系统;其二,必须满足他组织控制自组织原理,才能形成工程系统。因此,我们推崇工程系统观,就是要坚持自组织系统与他组织系统相融合从而达到高级系统形态的观点。



上篇 总 论

李喜先

1. 工 程 系 统

我们运用现代系统概念、系统理论和系统观,从普遍存在着的种类纷繁的系统中,抽象出来的与技术系统和科学系统紧密相关的一个极其复杂的工程系统,并研究其结构、功能、环境和演化等,从而形成工程系统理论。

首先,我们要界定工程和工程系统的含义,研究工程系统的特性,论及工程系统与科学系统和技术系统的区别和联系,并认清工程系统论与系统工程学的区别。

1.1 工 程

1.1.1 工程的含义

“工程”一词的含义泛指一切工作、工事以及有关程式。^① 工事为营造制作之事的总称,而程式是指规程、法式。

在不同历史时期、不同国家和民族中,工程的含义不断地变化着。我国宋代,

^① 辞源(修订本,第二册),商务印书馆,1980年,第0953页。

在欧阳修、宋祁等约始于1044年编撰的《新唐书》(共225卷,历时17年)^①中,“工程”一词已出现了,书中一二六《魏知古传》:“会造金仙、玉真观,虽盛夏,工程严促。”后来,1370年,在宋濂等撰《元史》(210卷)中,也论及了工程一词;1791年(乾隆五十六年),在《红楼梦》十七回中论道:“园内工程,俱已告竣。”18世纪,欧洲创造出了“工程”一词,其本来含义是兵器制造、军事目的的各项劳作,并扩展到许多领域,如建筑屋宇、制造机器、架桥筑路等。后来,凡指改造自然的实践活动,统称为工程,以至将其引申为把自然科学、社会科学原理应用于社会实践中而形成的各种方法、技术的总称。

在英语词类中,“engineering”一词是多义词,其含义主要为“工程(学)、机械、工事、操纵”等,这与汉语中“工程”一词的含义相近。

“工程”一词的含义还有狭义和广义之分:凡人类实践仅作用于物质世界而形成的工程,称为狭义的工程;而广泛地作用于物质世界和精神世界而形成的工程,称为广义的工程。实际上,人类实践不仅限于物质世界,而同时会广泛地涉及社会交往、思维活动等观念形态及其载体符号世界。

本书论及广义的工程,并给出一般定义:工程是以价值取向,整合科学、技术与相关要素,有组织地实现特定目标的实践。

在不同的历史时期,工程的发展有不同的特性,并相应地形成了历史分期。我们在《科学系统论》一书中,将科学区分为古代科学、近代科学和现代科学;在《技术系统论》一书中,将技术区分为古代技术、近代技术和现代技术。

1.1.2 工程分期

在本书中,将工程区分为农业时代工程、工业时代工程和知业时代工程。之所以如此区分,主要是基于工程与生产、产业的紧密关系。

1.1.2.1 农业时代工程

农业时代工程较早地出现在约公元前8000年至新石器时代末与农业、畜牧业密切联系的时期。这时,产生了人类史上一次巨大的农业革命或新石器革命,相继地出现了与生活、定居相关的建筑工程等,如出现了聚居的村落:“土耳其恰塔尔·休于遗址反映了新石器时代早期人类定居公社的建筑情况。这一遗址占地32公顷,住房由土坯砌成,每一房屋由一面积为5米×4米的起居室和一个至几个附属房间组成。”^②同时,由于人类在长期的实践中,积累起经验,能用语言符号交流思想,发展出推理的能力,以至形成了抽象概念,建立起人类社会最初级的组织形式,如自然形成的、以血缘关系为纽带的氏族制,直到担负社会公职、赋有公共权力的国家机构。

① 乔卫平总监纂,中华文明史,河北教育出版社,1994年,第六卷,第632页。

② 吴天璠,齐世荣主编,世界史(古代史编),上卷,高等教育出版社,1994年,第19—20页。

农业文明经历了漫长的过程,一直延续到以工业革命为标志的 18 世纪 60 年代。在这一漫长的时期里,人类创造了古代文明(前 3500—1000)、古典文明(前 1000—公元 500)和中古文明(500—1500),即经历了原始社会、奴隶制社会和封建制社会。

在古代文明时期,人类建造了许多大规模的工程。大约在公元前 6000 年,苏美尔人已经能利用水利、开凿渠道、建造灌溉网、引水肥田。在公元前 3000 年,苏美尔地区已出了 12 个独立的城国家,其中的乌鲁克就占地 1100 英亩;建筑塔庙,其中最著名的乌尔大塔庙共 4 层,底层面积为 61 米 $\times$ 45.7 米,装饰精美。特别是,在公元前 4000 年代末,苏美尔人最早创造了文字,这种书写符号能保存和传达语言,扩大了在时空上的交际作用,促进了人类的文明。因此,苏美尔成了人类最早的文明中心。在公元前 4000 年代以后,在埃及出现了许多巨大的建筑工程,其中举世闻名的金字塔约始于公元前 2686 年,基于经验知识、简单的力学原理,聚集多种简单的技术,如材料技术、运输技术、雕刻技术等,采用手工工具,共建成了大小不同的 70 多座,规模最大的是第四王朝法老胡夫的金字塔,其高达 146.5 米、塔基两边宽 230 米,共用平均重 2.5 吨的石块 230 万块。大约在公元前 2500—1500 年,存在的另一规模宏大的印度河文明,也出现了巨大的建筑工程,如在印度河口以北、以南海岸为底边,朝东北延伸至喜马拉雅山脉的山麓丘陵地带,形成每边长约为 1000 英里的三角区,从中发掘出两座大城市、67 个市镇和村庄,主要是用窑内烧的砖建造的。在公元前 2100 年至公元前 1100 年,是中国夏、商王朝时期,考古发现在此时期,河南偃师县二里头有大型宫殿建筑群遗址,略呈正方形夯土台基,总面积约 1 万平方米,这是中国古代存在巨大的建筑工程的证据。

在古典文明时期,已不同于沿大河流域扩展的古代文明,而是出现了横跨欧亚大陆所形成的不间断的、相互连接起来的整体文明核心区。这主要由希腊、罗马、印度和中国文明所构成,这时的巨大工程对当时的农业、商业、军事、政治、文化、科学和技术等的发展起着重大的作用。希腊的古典时期是人类历史上三个学术发展最惊人的时期(希腊的极盛时期、文艺复兴时期与 20 世纪)之一,给人类留下了光辉的遗产。同时,它还建造了大规模的公共工程,包括灌溉系统、矿山、采石场和陶器工场等,特别是建造出精致、壮观的神庙,以及 200 多艘最新式的三层划桨战舰和大批商船。古罗马人爱好实践活动,因而在工程上作出了重要的贡献,最显著的大型工程包括建造了圆形剧场、竞技场(罗马大竞技场是 6 个赛马场中最大的一个,能容 14 万个座位)、大斗兽场、庙宇、导水管、沟渠、公路和桥梁等。在公元前 221 年,中国秦代修筑了世界闻名的长城,广袤万余里,对北防匈奴起了巨大作用;同时,统一文字,也是一巨大的社会工程,这对国家统一、社会发展起了巨大的作用。

在中古文明时期,中国、印度和阿拉伯世界处在繁荣时期。这时,农业中的商品在不断增加,手工业也很发达,尤其海上贸易十分发达。因而这时的工程主要与