



普通高校“十一五”规划教材

高福聚 主编

工程网络计划技术



北京航空航天大学出版社



普通高校“十一五”规划教材

工程网络计划技术

高福聚 主编

北京航空航天大学出版社

内容简介

本书作者根据多年来我国应用工程网络计划技术的成功经验,系统地介绍了工程网络计划技术的基本原理和基本方法。内容主要包括:绪论、网络计划的编制、关键路线法、网络计划的优化、有强制时限的网络计划、搭接流水网络计划、计划评审技术和图示评审技术等。

本书根据工程实际应用而编制,不作繁杂、冗长和深奥的数学推导,以工程实例来分析原理和以实际应用技术为目标,讨论一般网络计划图的绘制和优化方法及其应用。其目的是在广泛的管理基层推行工程网络计划技术的应用,使得广大基层和初级管理人员掌握工程网络计划技术的编制和优化,使之在实际应用中发挥更大的作用和效能。

本书适合工程技术人员、管理人员阅读,可以作为本科、专科学生的教材或辅助教材,也可以作为相关人员的培训教材或参考书。

本书配有教学课件,请发送邮件至 bhkejian@126.com 或致电 010-82317027 申请索取。

图书在版编目(CIP)数据

工程网络计划技术/高福聚主编. —北京:北京航空航天大学出版社,2008.9

ISBN 978-7-81124-392-5

I. 工… II. 高… III. 网络计划技术—中国 IV. F224.33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 093271 号

工程网络计划技术

高福聚 主编

责任编辑 刘晓明

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(100083) 发行部电话:(010)82317024 传真:(010)82328026

http://www.buaapress.com.cn E-mail:bhpress@263.net

北京市媛明印刷厂印装 各地书店经销

*

开本:787×960 1/16 印张:12.75 字数:286 千字

2008 年 9 月第 1 版 2008 年 9 月第 1 次印刷 印数:4 000 册

ISBN 978-7-81124-392-5 定价:19.80 元

编 委 会

主 编：高福聚 中国石油大学建筑工程系

副主编：徐玉平 潍坊宏跃网架钢结构有限责任公司

委 员：张斗斗 天津大学建筑设计研究院

申成军 山东城市建设职业学院

王永新 山东电力建设第一工程公司

张 明 中国石油大学建筑工程系

前 言

工程网络计划技术(简称网络计划技术)是随着现代科学技术和工业生产的发展而产生的,20世纪50年代中期出现于美国,目前在工业发达国家已广泛应用,已成为比较盛行的一种现代生产管理的科学方法,可以运用电子计算机进行网络分析和控制。有的国家将网络计划技术用于投标、签订合同及拨款业务,在资源和成本优化等方面应用也较多。美国、日本、德国和前苏联等国的建筑业公认它是当前最先进的计划管理方法,是工程专业研究、设计、施工管理的先进管理工具。由于这种方法主要用于进行规划、计划和实施控制,因此,在缩短建设周期、提高工效、降低造价以及提高企业管理水平方面取得了显著的效果。我们对国内外应用网络计划技术的现有水平以及发展情况进行了对比分析,找出差距,提出措施。

遗憾的是目前国内网络计划技术的教学始终停留在基本网络计划图的编制和计算的层面,对于网络技术的优化和决策功能的实际应用只有只言片语,大部分都在数学模型的调研和管理软件的开发上。而对于基层实际应用层面,更没有相关的基础教材和自学资料,因而形成了网络计划技术学习和应用的一个断带和空白区。

本教材根据工程实际应用而编制,不作繁杂、冗长和深奥的数学推导,以工程实例来分析原理,以实际应用技术为目标,讨论一般网络计划图的绘制和优化方法及其应用。我们的目的是在广泛的管理基层推行网络计划技术的应用,使得广大基层和初级管理人员掌握网络计划技术的编制和优化,使之在实际应用中发挥更大的作用和效能。

网络计划技术的教学不应仅仅停留在使学生掌握一项新技术的层面,更为重要的是梳理人们的思维模式,使人们的思维更加条理化、逻辑化、严谨化和理性化。思维模式的改善,将有助于我们的学习、工作和生活的各个层面,起到事半功倍的作用,使学习、工作效率更高,生活质量更好。



为了加强教学效果,便于学生学习和相关技术人员参考,我们在积累十多年的教学资料和经验总结的基础上,编写了这本教材。其中参考、引用了一些公开发表或出版的文献和资料,在此谨向这些作者表示诚挚的感谢。

本教材绪论由高福聚和徐玉平编写,第1章由高福聚和张明编写,第2章由高福聚、张斗斗、申成军和王永新编写,第3章~第7章由高福聚编写。全书由高福聚统稿并任主编,徐玉平任副主编。

由于编写时间仓促及水平有限,若书中有不当之处,望广大师生和热心读者批评和斧正,我们将不胜感激,铭记心间。

作 者
2008年5月

目 录

绪 论

0.1 网络计划技术的发展状况	1
0.2 我国应用网络计划技术的发展与现状	4
0.3 系统思想和网络计划技术应用范例	5
0.4 网络计划技术在计算机上的发展过程	14

第 1 章 网络计划的编制

1.1 网络图	16
1.2 工程分解	19
1.3 网络图的绘制	24
1.4 网络节点的编号	27
1.5 网络计划的绘图步骤	32
习 题	39

第 2 章 关键路线法

2.1 活动持续时间的估计	41
2.2 网络计划的时间参数与关键路线	42
2.3 双代号网络图的计算	49
2.4 单代号网络图的计算	51
2.5 横道网络计划图的绘制及其计算	61
2.6 时间坐标网络图	63
2.7 前锋控制线	67
习 题	68

第 3 章 网络计划的优化

3.1 时间优化	70
3.2 资源优化	73
3.3 工期-成本优化	132
习 题	147



第4章 有强制时限的网络计划

4.1 强制时限的概念	150
4.2 有开始时限的网络计划	150
4.3 有结束时限的网络计划	152
4.4 有中断时限的网络计划	155
习 题	158

第5章 搭接流水网络计划

5.1 搭接网络计划	160
5.2 有最大时距的网络计划	164
5.3 流水网络计划	166
习 题	169

第6章 计划评审技术

6.1 计划评审技术与关键路线法	171
6.2 活动持续时间的估计	172
6.3 计划评审技术网络参数的计算	173
习 题	181

第7章 图示评审技术

7.1 图示评审技术网络节点符号表示方法及网络图的画法	183
7.2 随机网络随机变量的分析计算	187
7.3 随机网络的应用与示例	189
7.4 用 GERT 方法评审问题的步骤概述	194
习 题	194

参考文献	196
------------	-----

绪 论

工程网络计划技术(简称网络计划技术)是随着现代科学技术和工业生产的发展而产生的,20 世纪 50 年代中期出现于美国。目前,该技术在工业发达国家已广泛应用,已成为比较盛行的一种现代生产管理的科学方法,可以运用电子计算机进行网络分析和控制。有的国家将网络计划技术用于投标、签订合同及拨款业务,在资源和成本优化等方面应用也较多。美国、日本、德国和前苏联等国的建筑业公认它是当前最先进的计划管理方法。由于这种方法主要用于进行规划、计划和实施控制,因此,在缩短建设周期、提高工效、降低造价以及提高企业管理水平方面取得了显著的效果。我们对国内外应用网络计划技术的现有水平以及发展情况进行了对比分析,找出差距,提出措施。下面从以下几个方面加以叙述。

0.1 网络计划技术的发展状况

当前,世界上工业发达国家都非常重视现代管理科学,网络计划技术已被许多国家认为是当前最为行之有效的、先进的、科学的管理方法。国外多年实践证明,应用网络计划技术组织与管理生产,一般能缩短工期 20 % 左右,降低成本 10 % 左右。美国土木工程协会会刊评论说 CPM(关键路线法)/PERT(计划评审技术)是目前仅有的计划管理新方法。日本建设省确认网络计划技术具有实用价值,前苏联出版的《建筑业的网络计划方法》一书认为网络计划方法在改善建筑业的管理方法、提高建筑业经济效益等方面已经占据了应有的地位并得到公认。美国、日本、德国和前苏联等国都编制了“网络计划技术标准规程”。国外网络计划技术发展概况如图 0.1 所示。

网络计划技术的种类与模式很多,国外有几十种。但以每项活动的持续时间和逻辑关系划分,可归纳为 4 种不同类型,如表 0.1 所列。

表 0.1 网络计划技术的类型

类 型		持续时间	
		肯定型	非肯定型
逻辑关系	肯定型	关键路线法(CPM) 搭接网络	计划评审技术(PERT)
	非肯定型	决策树型网络 决策关键路线法(DCPM)	图示评审技术(GERT) 随机网络计划技术(QGERT) 风险型随机网络计划技术(VERT)

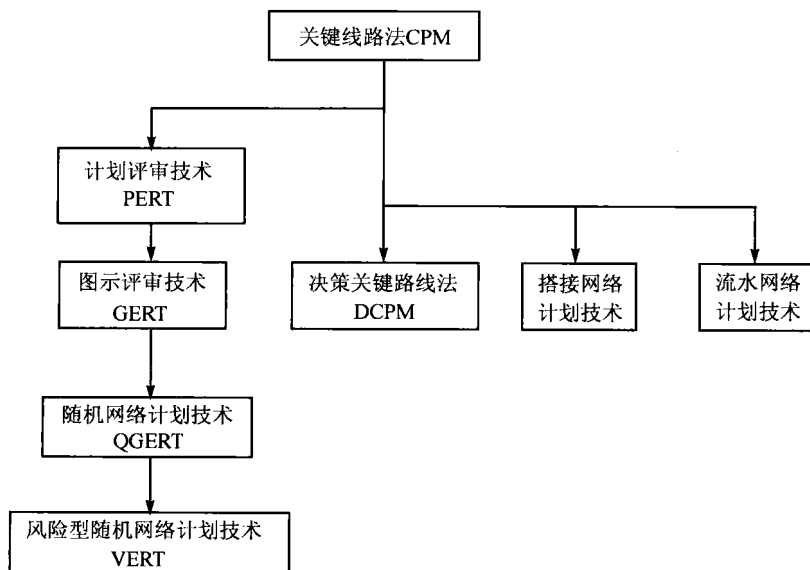


图 0.1 国外网络计划技术发展概况

网络计划技术从 20 世纪 50 年代中期产生后,几乎每两三年就出现一些新的模式。当前建筑业应用最广泛和有代表性的是 CPM/PERT。法国应用梅特拉位势法 MPM(Matra Potential Method),德国是组合网络计划 BKN(Baukasten Netzplan),至于 GERT(图示评审技术)等随机性决策网络,目前还基本上只在一些科研系统和决策层中使用。

美国是网络计划技术的发源地,美国的泰迪建筑公司在 47 个建筑项目上应用此法,平均节省时间 22%,节约资金 15%。美国政府于 1962 年规定:凡与政府签订合同的企业,都必须采用网络计划技术,以保证工程进度和质量。根据美国 400 家最大建筑企业调查,1965 年网络计划技术使用率达 47%,1970 年使用率达到 80%。1974 年麻省理工学院调查指出:“绝大部分美国建筑公司采用网络计划编制施工计划”。美国建筑业普遍认为:“没有一种管理技术像网络计划技术对建筑业产生那样大的影响”。网络计划技术在美国建筑业已经普及了,这门课程在美国学校开设非常广泛,不仅学施工管理的人要学,学结构的、学建筑的几乎都要学。1978 年美国土木工程协会会刊上评论说,CPM/PERT 是目前仅有的计划管理新方法,并且可以预见在将来 5~10 年内不会出现一种新方法代替它,因此,应该学会享有它、使用它、改进它。美国基本上实现了机画、机算、机编、机调,实现了计划工作自动化。

日本于 1961 年从美国引进网络计划技术,1962 年首先由规模较大的建筑公司使用;建设省 1963 年开始确认网络计划技术具有实用价值,并制定出研究课题。1968 年 10 月,日本建筑学会发表了《网络施工进度计划和管理指南》,并在建筑业逐步推广使用。日本政府认为网络计划技术是计划的最优方法,并规定全面采用。据资料记载,日本的超高层建筑,如世界贸

易、神户商工贸易、京王等高层建筑都采用了网络计划技术组织施工。日本比较重视采用新技术提高工业化建筑技术和管理水平。有人在评论网络计划技术时说：“网络计划技术的发源地在美国，出成果在日本”。日本专家在河南平顶山锦纶帘子布厂建设中，帮助河南省五建公司搞网络计划技术时就讲：“时间是金钱，网络计划是专利”。

前苏联政府从 1964 年开始就颁布了一系列有关制定和应用网络计划技术的指示、基本条例等法令性文件，规定所有大的建筑工程都必须采用网络计划技术，同时实行作业管理，加强调度工作。他们认为：在提高基本建设效率方面，网络计划占有重要地位。网络图表在设计过程中和在建筑施工阶段是缩短建设期限、降低建筑造价和提高建筑质量的有效工具。采用网络计划技术，可以使建筑计划建立在可靠的科学基础上。前苏联不仅在单位工程和建筑群中应用网络计划技术，早在 20 世纪 60 年代中，乌克兰加盟共和国建造部就已经能够应用网络计划技术对全国 400 多个重点工程进行计划和控制。

据前苏联统计，第九个五年计划期间（1970—1975 年），网络计划技术推广面达到了 34 %，工业建筑部 1967—1975 年应用网络计划技术完成的建筑安装工作量（1967 年为 100 %）分别为 100 %、198 %、308 %、408 %、469 %、616 %、745 %、818 % 和 849 %。通过大量的实践证明，应用网络计划技术可以缩短工期 20 % 左右，降低成本 10 %，而编制网络计划的费用约为 0.1 %。

在前苏联，网络计划技术不仅用来编制施工进度计划，而且还用于编制包括设计、施工和技术物资供应在内的建设项目进度计划，以及建筑安装机构最优五年计划、年度计划和月、旬作业计划等。因此，前苏联长期以来把网络计划技术作为一项必须推广应用的新技术，而且正式列入国民经济发展计划中，并在总结 60 年来建筑工程组织管理方面的经验时，把网络计划技术的应用，作为划分发展阶段的一个里程碑和建立管理自动化系统的先决条件。

前苏联应用网络计划技术的一个特点是，从应用网络计划技术合理安排单位工程的进度计划，逐步过渡到把整个建筑公司所有工程都纳入网络计划管理系统，从而保证了最合理地利用建筑资源，提高劳动生产率并缩短工期，降低成本，提高计划及管理效果。

前苏联在 1979 年编出了《网络法应用指南》，并建立了网络图的编制和管理的专门分支机构，推广应用标准网络图；近几年开始推广综合扩大网络图，它包括建立生产能力的三个活动范围：设计、施工和材料供应。

德国从 1960 年开始应用网络计划技术，使用比较广泛的是单代号搭接网络。德国将网络计划技术主要应用于工程项目管理，包括设计、施工和资源供应等方面。据统计，应用于工程项目管理的约占 80 %，应用于施工计划的约占 20 %。工程项目管理包括工程计划的协调、监督和控制，主要搞工期和成本优化，用时间和费用来控制工程进度。

德国应用多阶网络系统，有总网络和分网络，有协调网络法和图表网络法。图表网络法有图、有表，应用形式多样。德国有国家统一的网络规范、统一术语、统一符号和画法，并大量使用标准网络图。

德国网络计划一般由咨询事务所编制,然后发至工地进行控制。工地每月报告执行情况,说明已完成和正在进行的项目。如需变更,须填写固定表格,并输入计算机,打印出新的网络计划,并提出保证工期的建议,修改后发至工地。

英国推行网络计划技术较为普遍,不仅施工现场应用,而且在设计、规划和建筑工程管理方面日益受到重视。通过实践,他们认为,网络计划技术在设计和规划阶段显得非常有用,可用于大规模的工程规划和城市规划。

0.2 我国应用网络计划技术的发展与现状

我国从 20 世纪 60 年代初期,在著名数学家华罗庚教授的倡导下,开始在国民经济各部门试点应用网络计划方法。当时为结合我国国情,并根据“统筹兼顾、全面安排”的指导思想,曾将这种方法命名为“统筹方法”。此后,这一方法在工农业生产实践中有成效地推广起来。

近几年,随着国民经济建设的发展,管理科学日益受到重视。1980 年成立了全国性的统筹法研究会,1982 年在中国建筑学会的支持下,成立了建筑统筹管理研究会。随后,各省、市、自治区也相继建立起研究会。为了推行网络计划技术,全国各省市举办网络计划技术学习班上千期,培训在职工程技术及管理人员达几万人;全国近 50 所高等院校的建筑工程和管理工程系都先后开设了网络计划技术课,攻读网络计划技术的研究生近百人。这标志着我国管理科学的发展进入了一个新的阶段。当前网络计划技术的应用范围正在逐步扩大,除西藏外,全国 28 个省、市、自治区都不同程度地推广起来,越来越受到各级领导和工程技术人员的重视。可以预料,随着新技术革命和我国现代化建设的迅速发展,网络计划技术必将在我国建筑业迅速得到普及应用,并取得显著的经济效益。

下面举几个实例说明网络计划技术的应用效果:

① 在上海宝钢炼铁厂 1 号高炉土建工程施工中,应用网络法缩短工期 21 %,降低成本 9.8 %。

② 在广州白天鹅宾馆建设中,用网络计划技术安排计划,工期比外商签订的合同提前 4.5 个月,仅投资利息就节约 1 000 万港元。由于提前营业,多盈利 5 000 000 元。

③ 广州东方宾馆改建工程运用网络计划技术组织施工,结果比港商提出的工期缩短 200 多天,为国家提前创汇 400 多万元。

④ 河南平顶山锦纶帘子布厂工程,运用网络计划技术组织施工,仅用 18.5 个月就建成投产,比原合同工期缩短 40 %,被评为国家引进项目未拖期的工程之一,受到纺织工业部表扬。

⑤ 兰州毛纺厂粗纺车间工程,运用网络法组织施工,工期缩短了 245 天。

⑥ 两淮煤炭十五年开发规划,用统筹法安排建井,工期平均比过去提前两年左右;提前一年就可为国家多生产煤 4 000 万吨。

⑦ 扬子石化公司建设的 20 000 m² 设备仓库,用电子计算机编制网络计划,工效提高近

1 倍。

⑧ 乌鲁木齐新疆化肥厂工程,在组织施工中,主要工程进度按统筹计划“正点到达”的占 92 %,施工进度快,质量好。

⑨ “引进入津”工程用网络计划技术编制工程建设总进度计划,并采取分级网络方法,不仅突出了建设的关键,还大大加强了预见性,仅横河渡槽工程一项就给国家节约 40 多万元。

⑩ 北京市政工程局在市政工程建设中应用网络计划技术编制计划的占 50 % 以上,重点工程基本上全部采用了网络计划技术编制计划,在加速市政建设方面取得了显著的成效。

在实践过程中,广大理论工作者和生产管理技术人员共同努力,通过不断研究和实践,提出了横道网络、分级网络、群体网络、标准和通用网络、流水网络,并开始使用电子计算机编制网络计划,这给推广应用和发展网络计划技术打下了良好的基础。

但是,我们使用网络计划技术的实际情况基本还是停留在编制上,对执行中的管理抓得很不得力,缺少有效的办法。主要问题是工程设计多变,材料供应跟不上,使应用者束手无策。这些牵涉到我们的建筑管理与材料供应体制问题。美国、日本、德国、前苏联等国在应用网络计划技术上都使用电子计算机进行管理,并建立了管理系统,而目前我们是刚刚起步。这几个国家的建筑业都编有“网络计划编制与管理规程”,我们还没有抓好这项工作。为了推广应用网络计划技术,我们采取了普遍培训的方法;而在国外这是专利技术,只是少数专家掌握。美国 and 德国都是委托咨询公司编制和进行管理。从这点来看,我们条件优越。

0.3 系统思想和网络计划技术应用范例

0.3.1 田忌赛马

田忌赛马是一个流传了千年、妇孺皆知的故事。战国时期,在魏国做官的孙臧,受到同僚庞涓的迫害,被齐国使臣救出后,到达齐国国都。齐国使臣将他引见给齐国的大将军田忌,田忌向孙臧请教兵法,孙臧讲了三天三夜,田忌特别佩服,将孙臧待为贵宾,孙臧对田忌也很感激,经常为他献计献策。

赛马是当时最受齐国贵族欢迎的娱乐项目,上至国王,下到大臣,常常以赛马取乐,并以重金赌输赢。田忌多次与国王及其他大臣赌输赢,屡赌屡输。一天他赛马又输了,回家后闷闷不乐。孙臧安慰他说:“下次有机会带我到马场看看,也许我能帮你。”

孙臧随田忌来到赛马场了解到:大家的马按奔跑的速度分为上中下三等,等次不同装饰不同,各家的马依等次比赛,比赛为三赛二胜制。

孙臧仔细观察后发现,田忌的马和其他人的马相差并不远,只是策略运用不当,以致失败。孙臧告诉田忌:“大将军,请放心,我有办法让你获胜。”田忌听后非常高兴,随即以千金作赌注约请国王与他赛马。国王在赛马中从没输过,所以欣然答应了田忌的邀请。

比赛前田忌按照孙臧的主意,用上等马鞍将下等马装饰起来,冒充上等马,与齐王的上等马比赛,结局是必然输掉了第一局。第二场比赛,还是按照孙臧的安排,田忌用自己的上等马与国王的中等马比赛,赢了第二场。关键的第三场,田忌的中等马和国王的下等马比赛,田忌的马又一次冲到国王的马前面,结果二比一,田忌赢了国王。

从未输过比赛的国王目瞪口呆,他不知道田忌从哪里得到了这么好的赛马。这时田忌告诉齐王,他的胜利并不是因为找到了更好的马,而是用了计策。随后,他将孙臧的计策讲了出来,齐王恍然大悟,立刻把孙臧召入王宫。孙臧告诉齐王,在双方条件相当时,对策得当可以战胜对方;在双方条件相差很远时,对策得当也可将损失减低到最低程度。后来,国王任命孙臧为军师,指挥全国的军队。从此,孙臧协助田忌,改善齐军的作战方法,齐军在与别国军队的战争中因此屡屡取胜。

《孙子兵法》中说:“多算胜,少算不胜。”从组织管理角度看,这里的“算”主要包括的是“统筹”。

0.3.2 晋国公修复皇城

宋代沈括在《梦溪笔谈》中记载:“祥符中,禁火。时丁晋公主营复宫室,患取土远,公乃令凿通衢取土,不日皆成巨堑。乃决汴水入堑中,引诸道竹木排筏及船运杂材,尽自堑中入至宫门。事毕,却以斥弃瓦砾灰尘壤实於堑中,复为街衢。一举而三役济,省费以亿万计。”

故事是说:宋真宗大中祥符年间,京城汴梁(河南开封)大火,皇城毁于一旦。宋真宗任命晋国公丁渭主持重建全部宫室殿宇。当时,皇城都是砖木结构的,建筑材料必须从远地经汴水运入。丁渭为修复被大火烧毁的皇宫,深思熟虑,规划并实施了一个至今令人拍案叫绝、“一举三得”的施工方案:

- ① 先把宫前大街挖成沟,取沟中土就地建窖烧砖瓦,用于筑墙;
- ② 同时引河水入沟,用水路运送木料和建筑材料;
- ③ 皇宫修毕后,把碎砖乱瓦填入沟,修复大街。

这样,巧妙地解决了取土之难、运输之难和清场之难,可谓“一石三鸟”、“一举而三役济,省费以亿万计”,使皇城重建工程事半功倍。

0.3.3 都江堰水利工程

战国时,李冰父子修都江堰,为岷江分洪,精心设计了宝瓶口引水、鱼嘴分流、飞沙堰排沙三大主体工程,附属渠堰 120 个,灌溉 14 个县 5 000 000 亩良田,解决了川西平原灌溉问题,造福后世。

都江堰水利工程(见图 0.2)是中国古代战国秦昭王时期,蜀郡守李冰于公元前 227 年创建的,是中国最古老的水利工程,是全世界至今为止年代最久、唯一留存、以无坝引水为特征的宏大水利工程,是我国科技史上的一座丰碑。

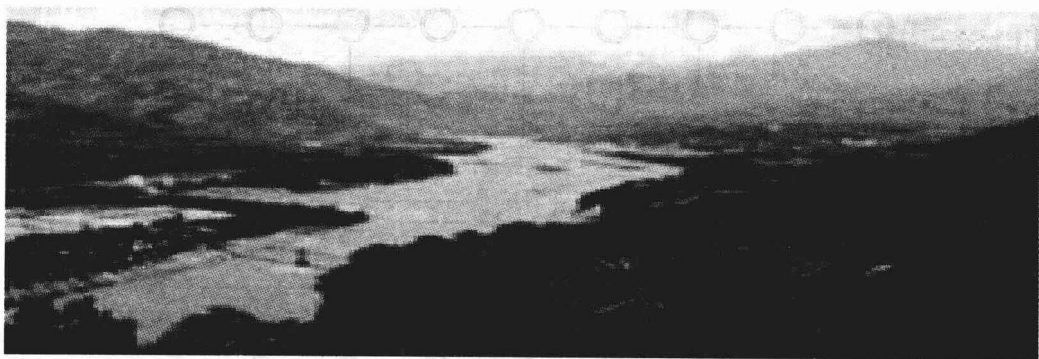


图 0.2 都江堰水利工程

都江堰水利工程最主要的部分为都江堰渠首工程,这是都江堰灌溉系统中的关键设施。渠首主要由鱼嘴分水堤、宝瓶口引水工程和飞沙堰溢洪道三大工程组成。宝瓶口引水口的离堆在开凿宝瓶口以前,是崩山虎头岩的一部分。李冰根据水流及地形特点,在坡度较缓处,凿开一道底宽 17 m 的楔形口子。峡口枯水季节宽 19 m,洪水季节宽 23 m。据《永康军志》记载“春耕之际,需之如金,号曰‘金灌口’”。因此宝瓶口古时又名金灌口。宝瓶口是内江进水咽喉,是内江能够“水旱从人”的关键水利设施。由于宝瓶口自然景观瑰丽,有“离堆锁峡”之称,故属历史上著名的“灌阳十景”之一。

飞沙堰是中段的泄洪道,有排泄洪水和沙石的功能;宝瓶口具有引水和控制进水的作用。因而,都江堰水利工程科学地解决了江水的自动分流、自动排沙、自动排水和引水的难题,收到了“行水灌田,防洪抗灾”的功效,是世界水利工程史上的一大奇观。2 500 多年来,引水灌溉,才使蜀地有“天府之国”的美誉。都江堰是“天府”富庶之源,至今仍发挥着无可替代的巨大作用,灌溉良田 1 000 多万亩。

0.3.4 群炉汇流

明朝永乐年间,需要铸造一个 40 多吨的“万钧铜钟”。而当时最大熔炉高一丈二尺(4 m),可装载 2 000 多斤(约 1 吨)矿砂,也就是说没有一个足够大的熔炉来施工。工匠们采用了“群炉汇流”的工艺(见图 0.3),在铸模周围设置了一系列的熔炉,总容量与铸件质量相等。炉群的位置高,铸模的位置低,各个炉槽道作辐射状通向铸模。准备就绪,各个熔炉同时开火冶炼,炼成时铜水一起流向铸模,连续浇铸,保证铸件的质量。“万钧铜钟”即大功告成。

但上述例子只能算是“系统思想”的应用,真正堪称“系统工程”的是第二次世界大战以来的巨大工程。如:1940 年代曼哈顿工程,费时 4 年,耗资 23 亿美元,用人 12 万,动用美国 1/3 电力,聚集 8 国科学家,5 个方案同时上马,几百个单位统一按计划行动;20 世纪 50 年代北极星导弹潜艇,采用 PERT 计划评审技术,23 个系统网络,每 2 周检查一次,原定 6 年完成,实际

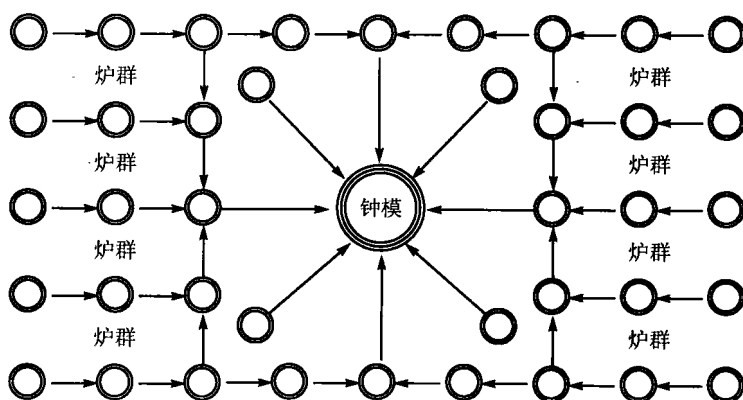


图 0.3 群炉汇流

提前 2 年完成,节约经费 10 %~15 %。

0.3.5 20 世纪 60 年代阿波罗登月

20 世纪 60 年代的阿波罗登月计划,历时 11 年,耗资 3 000 亿美元,42 万人,2 万家公司,120 所大学,600 台计算机,700 万零件,终于在 1969 年 7 月 20 日,阿波罗 11 号船长阿姆斯特朗登上月球。

在 20 世纪 60 年代的美国载人航天活动中,最为辉煌的成就莫过于阿波罗载人登月飞行。

早在 20 世纪 60 年代初,美国宇航局提出了阿波罗登月计划。经过 8 年的艰苦努力,连续发射 10 艘不载人的阿波罗飞船之后,终于在 1969 年 7 月 16 日成功发射载人登月的阿波罗 11 号飞船。

在载人登月的探索过程中,阿波罗 1 号~10 号进行了多次不载人、载人的近地轨道飞行试验或登月预演。1969 年 7 月 16 日,阿波罗 11 号飞船经过长途跋涉,进入月球轨道,人类首次登月行动开始了。表 0.2 为阿波罗 11 号登月计划中预定与实际飞行时间比较。

表 0.2 阿波罗 11 号登月计划中预定与实际飞行时间比较

序 号	登月飞行计划	预定时间			实际时间			误 差	
		日	时	分	日	时	分	时	分
1	发射	16	22	32	16	22	32		0
2	进入地球转移轨道		22	44		22	44		0
3	进入月球轨道	17	01	16	17	01	16		0
4	飞船与登月舱进行轨道对接		2	42		1	57		45

续表 0.2

序 号	登月飞行计划	预定时间			实际时间			误 差	
		日	时	分	日	时	分	时	分
5	进入月球椭圆轨道	20	02	26	20	02	22		4
6	转移到月球近圆轨道		6	41		6	44		3
7	登月舱与飞船分离	21	02	41	21	02	47		6
8	登月舱进入登月轨道		4	10		4	08		2
9	启动登月舱上制动器,登月舱开始向月面降落		5	07		5	05		2
10	登月舱在月面着陆		5	19		5	17		2
11	为在月面上行走,放掉登月舱里的空气		15	02		10	53	4	9
12	宇航员走出登月舱,站在月面上		15	19		11	56	3	23
13	宇航员返回登月舱,并往舱里再充气		17	42		14	11	3	11
14	登月舱离开月面并爬高	22	02	55	22	02	55		0
15	登月舱与飞船进行轨道对接		6	32		6	35		3
16	将登月舱分离		10	25		8	42	1	43
17	返回地球轨道		13	56		13	55		1
18	将动力系统从指令舱里分离出去	25	01	22	25	01	22		0
19	再入大气层		1	37		1	35		2
20	溅落到太平洋中部海域		1	51		1	50		1

注:数据取自日本方面资料,故表内所列时间均系日本时间。

阿波罗飞船由指令舱、服务舱和登月舱三部分组成,每次载3名宇航员。登月飞行结束后,返回地球的只有指令舱和3名宇航员。指令舱呈圆锥形,高3.23 m,底面直径3.1 m,大小像一辆旅行汽车,发射质量约5.9 t,返回地面时要丢弃辅助降落伞等物,这时质量只有5.3 t。服务舱附在指令舱的下端,呈圆筒形,直径3.9 m,高7.37 m,舱重5.2 t,装上燃料和设备后重25 t。登月舱接于服务舱下面第三级火箭顶部的金属罩内,分为下降段和上升段两部分,总长6.79 m,4只底脚延伸时直径为9.45 m,重4.1 t,如果包括燃料则重14.7 t。下降段还装有考察月面的科学仪器,当上升段飞离月面时,下降段起发射架作用。

船长阿姆斯特朗首先走上舱门平台,面对陌生的月球世界凝视几分钟后,挪动右脚,一步三停地爬下扶梯。5 m高的9级台阶,他整整花了3 min。随后,他的左脚小心翼翼地触及月面,而右脚仍然停留在台阶上。当他发现左脚陷入月面很少时,才鼓起勇气将右脚踏上月面。

这时的阿姆斯特朗感慨万千:“对一个人来说这是一小步,但对人类来说却是一个飞跃!”图0.4所示为人类首次在月面行走。