

LC 大厦建设工程现金流控制与优化

1 LC 大厦建设工程概况

(1) 基本情况

LC 大厦建设工程位于高新四路交科技路东北角，总建筑面积 66303m²，为框-剪结构，地下 1 层为停车库及设备用房，地上 26 层为写字楼，建筑总高 108.5m，抗震等级为一级，抗震设防烈度为 8 度，耐火等级为一级。LC 大厦建设工程的开发商为陕西 XDHT 实业有限公司，总承包商为 ZTJS 建设集团有限公司，勘察方为 JX 工业勘察设计研究院，设计方为中国建筑 XB 设计院，监理单位为陕西 JK 监理公司，由西安高新区建设工程质量安全监督站监督实施。该工程的合同造价为 9100 万元，施工合同约定支付方式为里程碑支付，即到某些关键活动结束后，开发商对承包商进行计量支付，支付款为该阶段所完成的活动挣值的 90%，剩余的 10%会在 LC 大厦工程验收完工之后支付 5%，另外 5%在质保期三年满后再行支付。合同规定如未能按目标工期完成 LC 大厦项目，ZTJS 建设集团公司将会受到每天 1 万元的惩罚。ZTJS 建设集团公司承建 LC 大厦项目的预期收益率为 14%，约合 1274 万元。公司在建设 LC 大厦工程的过程中，以 5.94%的贷款利率从银行贷出部分现金，作为建设 LC 大厦项目的流动资金，以保障该工程的顺利实施。

(2) 目标要求

按项目合同规定，工程的允许工期为 22 个月（660 天）。即在在保证工程质量的前提下，承包商可在 660 个日历天内完成施工任务；但工程的目标工期为 20 个月（600 天），即如果工程的完工时间在目标工期和允许工期之间，则会受到每天 1 万元的惩罚。工程的计划开工时间为 2008 年 1 月 1 日，允许的竣工时间为 2009 年 10 月 21 日，目标竣工时间为 2009 年 8 月 22 日。施工过程中的关键时间节点计划如下：基础工程从 2008 年 1 月 1 日开始，争取到 2 月份进展到±0.000；主体工程计划 7 个多月时间，从 2008 年 3 月 1 日开始，到 2008 年 10 月 5 日前完成主体封顶；装饰装修工程计划 10 个月时间，即从 2008 年 10 月 6 日开始，到 2009 年 8 月 22 日竣工交付使用；安装工程贯穿工程建设的始终，即从 2008 年 2 月 1 日开始，到 2009 年 8 月 22 日竣工。

工程的质量目标为争创陕西省优质工程“长安杯”。针对本工程的规模、特点，从抓施工现场管理入手，组织强有力的施工班子，从进场直至竣工的整个施工过程中，认真执行公司的 ISO《综合管理体系程序文件》和《质量保证手册》系列标准，严格按照施工图纸、国家建筑设计、施工验收规范和质量评定标准进行施工，对工程质量实行两级制的管理程序，认真贯彻执行建设部推广应用的十项新技术，保证单位工程合格率 100%、优良品率 92%。

工程的成本目标为总成本降低 5%。工程的安全目标为贯彻 GB/T28001 标准，杜绝重大伤亡事故，轻伤事故控制在 2‰以下，重伤事故控制在 0.1‰以下。消防目标为严格控制火源点，无重大火灾事故。环境保护目标为施工期间严格控制噪声，符合国家规定的限值，垃圾分类、不遗洒。此外，建筑工地进行文明施工，创出自己的品牌工程，从现场办公室、职工生活、材料堆放、机具设备布置、大门围墙、临时用电用水、施工现场的规划布置等方面入手，着眼于高标准、严要求，同时认真贯彻执行公司已推广应用的企业识别视觉形象设计系统，并进一步提高特色及创新意识。同时，为职工的工作生活提供较好的环境，促进安全生产、文明施工，并作为在施工期间一项十分重要的工作由专人来抓，把工作落到实处，做到不扰民，保证周边单位正常的生产生活秩序，做到不损坏绿化，维护周边环境卫生，确保工程的施工

达到省级文明工地。

(3) 工程的特点及难点

工程的特点是施工面积较大，而可以利用的施工场地却比较狭小，给材料制作和物料周转堆放带来很大的困难。另外，在高层结构测量方面，该工程地下一层-8.05m，地上最高标高+108.50m，标高、轴线及整体结构物的垂直度控制是本工程的重中之重。工程的施工难点主要反映在以下三个方面：

- 本工程23~25层有跨度16m、宽度2.4m的钢筋混凝土空中走廊，由于高度过高(为83.27m)，属于高架支模，给模板支设和安全施工带来很大难度。
- 使用C55高强混凝土，对于梁和楼板上的裂缝进行控制有一定难度。
- 旋转楼梯的设计，给施工特别是模板支设带来许多不便，如果支模方法不当，不仅有时构件产生的误差不能满足技术规范的要求，而且也满足不了设计造型等的要求。

2 资源使用、费用与支付安排

2.1 资源使用情况

LC大厦建设工程施工过程中主要使用如下四类资源：设备、原材料、资金和人力资源，而相比与其他三类资源来说，人力资源是制约工程施工的瓶颈资源，因而也是工程进度计划中需要重点考虑和解决的关键问题。现对各类资源具体分析如下。

(1) 设备方面

为了有效地按期完成合同范围内的工程任务，科学有效地组织施工，在LC大厦建设工程实施过程中，采用以下大型设备和模板脚手架进行施工：

- 大型设备：50米臂长塔吊二台，2T两箱施工电梯二台，24米臂长布料机一台。
- 模板：柱、核芯筒剪力墙均采用钢模板，五层以上梁外侧采用钢模板，梁板及其他构件均采用竹胶板模板。
- 外架：四层以下采用双排落地架，四层以上采用工字钢悬挑架，每四层悬挑一次，两部挑架交替上升，悬挑架用密目网进行全封闭，内侧用竹签板围栏。

其中塔吊、施工电梯、布料机在LC大厦建设工程的开工初期就调试安装完成，一直运行至整个项目结束，租金为每天2000元。在整个项目实施过程中，塔吊和施工电梯两种设备的使用次数较为频繁，但每次使用的时间都较短，不超过30分钟，很少发生设备使用的冲突现象。有时即使偶尔出现冲突，也可以通过现场指挥人员的临时协调，快速解决，不会对项目活动的正常施工产生影响。对于布料机，只有在工人做好一切准备活动后，才会用到此种设备，其用途较为单一，不会发生任何使用上的冲突。模板和外架是公司一次性从相应的租赁公司租来的，在LC大厦项目实施过程中，模板和外架能够重复使用，当下层建筑完成之后，会拆卸下来供上层建筑使用，这样随着LC大厦建设工程的进展循环使用，也不会在大厦项目实施过程中发生资源冲突。

(2) 原材料方面

承包商在开展各项施工活动的时候，会提前向材料供应商下订单，而供应商会在需要的时候将材料及时送到施工现场。在LC大厦建设工程的施工过程中，按照这种方法进行材料采购和供应，发生材料短缺的情形仅出现过两次，而且还是由于特殊天气情况延误了材料的运送所造成的。可见，如果合理地安排订货周期，就不会发生材料短缺的情况。当每项活动完成之后，公司会将材料的价款支付给供应商，由此产生现金流出。

(3) 资金方面

承包商与业主在 LC 大厦建设工程的合同中商定，在施工过程中，当公司完成某些特定活动之后，业主会支付对应活动挣值的 90%，剩余的 10%会在 LC 大厦项目交工验收之后分两次支付。在业主支付资金之前，ZTJS 建设集团公司进入施工现场后，需要提前垫付工人的基本生活费、进场的材料费、周转材料的租赁费、大型机械设备的运输和安装费、公司驻工地办公室的临建费、临水临电管道线路铺设费、小型机械的购置费等等，这些费用通常会占到工程造价的 5%左右，既 ZTJS 建设集团公司开工前需垫付 500 万元用来启动该项目。在施工的过程中，每个重要活动完成前，施工单位仍要垫付工人的基本生活费、进场的材料费、周转材料的租赁费、大型机械设备的租赁费等，因而大约需要 300~400 万元的周转资金。这些资金的垫付，既是衡量一个施工企业承揽工程的能力，又是制约施工企业盈利的关键因素之一。为了保证 LC 大厦建设工程能够成为公司的一个标杆项目，承包商在资金方面会完全满足项目的需要，因此，在 LC 大厦实施过程中，资金方面也不会发生瓶颈问题。

（4）人力资源方面

LC 大厦建设工程属于常规的土建项目，除了配备足够的管理人员和技术人员外，还需要大量的劳动工人，工人的工种主要包括木工、钢筋工、砼工、架子工、防水工、电焊工、普工、水工、电工、机械工、瓦工、抹灰工、通风工、油漆涂料工及其他一些杂工。在 LC 大厦建设工程实施过程中的 20 个月期间，公司在每个时期拥有的参加 LC 大厦施工的员工数量如表 1 所示。但由于项目的工期较长，从 2008 年 1 月初到 2009 年 8 月中，长达 20 个月，期间共包含两个春节、两个夏收农忙。在春节期间，由于劳动工人需要返乡过春节，会导致春节期间建筑工人的严重短缺，这种人员短缺的情况最少要持续 22 天左右；在夏收季节，由于劳动工人大都是来自乡村的农民，周边乡镇的工人都会请假回家收麦子，也会导致一线工人的严重短缺，这个情况至少需要持续 40 多天。

表 1 LC 大厦建设工程实施中各期所拥有的员工数量

施工内容	时间	拥有员工数量(人)
基础	2008.01.01—2008.02.29	250
主体	2008.03.01—2008.10.05	230
装修	2008.10.06—2009.08.18	230
安装	2008.02.01—2009.06.01	230
	其他时间	280

一线劳动工人作为建筑项目中的主要操作者，是项目实施过程中的一种重要资源。劳动工人的短缺将直接导致项目的某些活动工期延长，或者延后开工，这些都会对项目的进度产生直接的影响，进而对 ZTJS 建设集团在 LC 大厦建设工程上的收益带来不利影响。此外，当发生劳动工人短缺时，承包商为了保证项目的正常进行，有时不得不以较高的价格（120 元 / 人天）雇用临时工，补齐所缺少的人员，这样就会对增加工程的施工成本，降低公司在该项目上的收益。因此，在 LC 大厦建设工程的施工过程中，特别是在人员短缺的时段中，必须合理地安排活动的进度计划，以使的人力资源能够得到最为有效的使用，确保该工程能够以合理的成本如期完成。

2.2 费用与支付安排

（1）费用情况

LC 大厦建设工程的实施过程主要包含有土建、装修、安装、装饰四个环节，其中土建和安装两个环节是由 ZTJS 建设集团公司负责完成的，而装修和装饰则由甲方分别分包给相应的专业公司，分包公司需要向 ZTJS 建设集团公司负责，并服从 ZTJS 建设集团公司的统一

管理。ZTJS 建设集团在具体实施 LC 大厦建设工程的时候，材料费用以及每个活动所需工人的工资会在每个活动开始时支付 40%做周转金和生活费，活动结束后支付尾款给材料供应商和工人。而机械费以及其他直接费用则是按照自然月进行支付的。其他直接费主要包括工程水电费、临时设施费、办公费、差旅费、低值易耗品摊销、业务招待费，税金等，根据活动的持续时间、材料耗费情况、所需工人数量，分别分摊到各个活动上，这样所有活动的总花费即为整个 LC 大厦建设工程的总造价。

工程包含有 38 个主要活动，各的名称、工期、所需工人数量以及消耗费用见表 2。其中，工期表示在人员充足情况下，完成该活动所需要的时间；所需员工数表示活动正常执行时，所需要的员工数量；消耗费用是指 ZTJS 建设集团公司为了完成该活动，需要花费的费用支出，包括员工工资、原材料价款、设备费用分摊、管理费用分摊等。现金流为 0 表示完成该活动时，不需要付出任何费用，“间隔 1”、“间隔 2”和“间隔 3”是在 LC 大厦建设工程实施过程中，为了保证工程施工质量，某些特定活动完工之后需要通风晾晒一段时间，下一活动才可以开工，所以，这三个活动只消耗时间，不产生费用。

表 2 LC 大厦建设工程活动名称、工期、所需员工数量及费用消耗

序号	活动名称	工期(天)	所需员工数(人)	费用消耗(元)
1	基础筏板、地下一层	60	250	6600000
2	安装工程	480	42	8694000
3	1-4 层主体结构	71	158	9972724.76
4	5 层以下砌体	28	65	770688.51
5	5-9 层主体结构	30	158	9972724.76
6	6-10 层砌体	28	65	810688.51
7	10-14 层主体结构	30	158	9972724.70
8	11-15 层砌体	28	65	810688.51
9	15-19 层主体结构	30	158	9972724.70
10	灰土回填	86	100	634160
11	20-26 层主体结构	45	158	9961814.58
12	16-20 层砌体	28	65	810688.51
13	21-26 层砌体	35	65	972826.21
14	玻璃幕墙	142	80	7880203
15	屋面工程	57	100	6537250
16	5 层以下门窗	28	32	357991.77
17	6-10 层门窗	28	32	331659.81
18	11-15 层门窗	28	32	331659.81
19	16-20 层门窗	28	32	331659.81
20	21-26 层门窗	35	32	357991.77
21	间隔 1	9	0	0
22	5 层以下抹灰	28	42	220306.93
23	间隔 2	9	0	0
24	6-10 层抹灰	28	42	137691.83
25	5 层以下地面	28	40	290418.44

26	间隔 3	9	0	0
27	11-15 层抹灰	28	42	137691.83
28	6-10 层地面	28	40	242015.37
29	5 层以下油漆涂料	28	32	164812.2
30	16-20 层抹灰	28	42	137691.83
31	21-26 层抹灰	35	42	220306.93
32	11-15 层地面	28	40	242015.37
33	16-20 层地面	28	40	242015.37
34	6-15 层油漆涂料	28	32	329624.4
35	21-26 层地面	35	40	290418.44
36	16-26 层油漆涂料	28	32	362586.5
37	室外工程	57	100	2005679
38	交工验收	0	0	0

(2) 支付安排

在 LC 大厦建设工程合同中，承包商和业主约定，将某些特定的活动设置为支付点。当工程进展到这些活动时，由业主向承包商支付已完成活动的 90% 价款。这种支付安排方式导致了如下两方面的结果：一方面，在工程施工前期，业主的支付价款无法保证承包商拥有足够的周转资金，向材料供应商和工人分别支付材料价款和工资；另一方面，业主将剩余的 10% 价款在 LC 大厦建设工程竣工验收合格之后再行支付，对承包商能够产生一定的激励作用，保证其在后续的活动能够继续履行合同中约定的责任和义务。需要特别指出的是，由于活动 2“安装工程”的工期长达 480 天，涉及资金达到 8694000 元，如果只在该活动结束后，业主才向承包商支付的话，那么 ZTJS 建设集团的垫资数量会过大，从而严重影响公司的资金周转，进而危及 LC 大厦建设工程的正常实施；此外，活动 3“1—4 层主体结构”因为层高较高，而且带裙房的非标准层，工程量较标准层大很多，工期亦较长，等到活动完成时再行支付对承包商极为不利。鉴于上述情况，承包商和业主商定，对于活动 2 和活动 3，不必等到其完成时才进行支付，而是随着特定的支付点按其完成的比例一起支付。LC 大厦建设工程的支付点活动，在支付点上需要支付的活动及支付量如表 3 所示。表中，“支付点活动”是指业主会在该活动完成时对承包商进行支付，“需要支付的活动”是指当相应的支付发生时，业主会支付这些活动挣值的 90% 的合同价款，“支付量”是指业主对 ZTJS 建设集团公司所支付的价款金额。

表 3 LC 大厦建设工程实施过程的支付安排相关数据

序号	支付点活动	需要支付的活动	支付量(元)
3	1-4 层主体结构	1	5860000
5	5-9 层主体结构	2,3	10540372.28
7	10-14 层主体结构	2, 5	10540372
9	15-19 层主体结构	2,4,6	2988159
11	20-26 层主体结构	2,7,8	11269992
13	21-26 层砌体	10,11,12,13	11141540
18	11-15 层门窗	15,16,17	6504211
25	5 层以下地面	18,19,20,22,24	1241379

31	21-26 层抹灰	25,27,28,29,30	875366.7
33	16-20 层地面	31,32	416090.1
36	16-26 层油漆涂料	33,34	514475.8
38	交工验收	2,14,35,36,37	11049918

公司与业主在合同中约定，在 LC 大厦交工验收时，业主共需向 ZTJS 建设集团公司支付合同 95% 的价款，共约 8645 万元。在 LC 大厦交付使用后的三年时间为质保期，在此期间如果 LC 大厦发生任何质量问题，由 ZTJS 建设集团公司提供维修，保证 LC 大厦的使用质量。在质保期结束后，由业主向 ZTJS 建设集团公司支付剩余的 5% 合同价款，至此，整个项目彻底完成。

(3) 进度计划

在具体的施工安排方面，项目负责人在安排进度计划的时候，根据关键路径法 CPM (Critical Path Method) 找到 LC 大厦项目实施中的关键活动，并确定出所有活动的最早开工时间。在具体施工时，所有的活动都是根据紧前原则安排，即尽可能早地开工。这样做的好处是可以保证项目尽可能早地完工，可以减少大型设备的租赁费，钢管、扣件等周转材料的租赁费和管理人员的日常办公开支。其不利之处在于，由于在执行活动过程中，有的活动是需要承包商向材料供应商支付材料价款、为工人支付工资，因而会发生负的现金流。如果所有的活动都尽可能早地开始，那么，这些负现金流的发生时间也必然随之提前，从而对承包商的项目净现值产生负面影响，并降低 ZTJS 建设集团公司的收益。此外，活动进度尽可能早地安排，也会增加周转性材料的一次性投入。比如，工字钢悬挑架从四层一直搭设到二十六层，共悬挑六次二十二层，产生巨大的工字钢、密目网、脚手板的购置费，以及钢管、扣件的租赁费。相反，如果放缓活动的进度安排，则完全可以只搭设两挑八层，从四层翻到二十六层，这样只需要两次悬挑架的材料，与前一种方法相比，可以节省材料购置和租赁费用 2 / 3。由于 LC 大厦建设工程的规模较大，活动数目众多且彼此之间的逻辑关系错综复杂，仅凭借项目经理的主观经验和判断，很难科学地确定哪些负现金流活动应该推迟，以及可以推迟多长时间，所以，需要借助一种科学有效的分析方法，帮助项目经理找到这些可以推迟的活动以及应该推迟多久，从而有效地提高 ZTJS 建设集团公司的项目收益。

3 LC 大厦建设工程现金流控制优化模型建立与求解

3.1 LC 大厦建设工程相关数据提炼

在 LC 大厦建设工程实施过程中，业主会在约定的活动（即支付点）完工之后，对承包商 ZTJS 建设集团公司进行支付，支付量等于已完成活动挣值之和的 90%，由此产生正的现金流。而 ZTJS 建设集团公司是在每个活动完工之后，对原材料供应商、员工等支付该活动所发生的费用，从而产生负的现金流。可以看出，正的现金流和负的现金流都在给定活动的结束时刻发生，时间点相同，为了便于计算，将二者合二为一，统一记为活动结束后所发生的现金流。

具体每个活动的现金流以及支付所包含的活动如表 4 所示。表中的“支付点”表示对应活动是否为支付点；如果是支付点，则“需要支付的活动”一栏显示在此支付点上需要支付的活动。注意，第 2 个活动“安装工程”不为支付点，且其现金流为 0。这主要是因为“安装工程”的持续时间过长，不能在该活动结束时再进行支付（如果在该活动结束时再进行支付，则公司需垫资 860 多万，会严重影响公司的现金流周转），而是在其他特定的支付点对其支付，以保证承包商现金流能够正常周转。

表 4 LC 大厦建设工程各活动现金流、支付情况、需用和可用的员工数

序号	活动名称	现金流(元)	是否为 支付点	需要支付 的活动	所需员 工数(人)	可用员 工数(人)
1	基础筏板、地下一层	-6600000			250	280
2	安装工程	-8694000			42	48
3	1-4 层主体结构	5860000	是	1	158	170
4	5 层以下砌体	-770688.51			65	75
5	5-9 层主体结构	10540372.28	是	2,3	158	170
6	6-10 层砌体	-810688.51			65	75
7	10-14 层主体结构	10540372	是	2, 5	158	170
8	11-15 层砌体	-810688.51			65	75
9	15-19 层主体结构	2988159	是	2,4,6	158	170
10	灰土回填	-634160			100	120
11	20-26 层主体结构	11269992	是	2,7,8	158	170
12	16-20 层砌体	-810688.51			65	75
13	21-26 层砌体	11141540	是	10,11,12,13	65	75
14	玻璃幕墙	-7880203			80	90
15	屋面工程	-6537250			100	120
16	5 层以下门窗	-357991.77			32	40
17	6-10 层门窗	-331659.81			32	40
18	11-15 层门窗	6504211	是	15,16,17	32	40
19	16-20 层门窗	-331659.81			32	40
20	21-26 层门窗	-357991.77			32	40
21	间隔 1	0			0	0
22	5 层以下抹灰	-220306.93			42	50
23	间隔 2	0			0	0
24	6-10 层抹灰	-137691.83			42	50
25	5 层以下地面	1241379	是	18,19,20,22,24	40	48
26	间隔 3	0			0	0
27	11-15 层抹灰	-137691.83			42	50
28	6-10 层地面	-242015.37			40	48
29	5 层以下油漆涂料	-164812.2			32	40
30	16-20 层抹灰	-137691.83			42	50
31	21-26 层抹灰	875366.7	是	25,27,28,29,30	42	50
32	11-15 层地面	-242015.37			40	48
33	16-20 层地面	416090.1	是	31,32	40	48
34	6-15 层油漆涂料	-329624.4			32	40
35	21-26 层地面	-290418.44			40	48
36	16-26 层油漆涂料	514475.8	是	33,34	32	40
37	室外工程	-2005679			100	120

38	交工验收	11049918	是	2,14,35,36,37	0	0
----	------	----------	---	---------------	---	---

LC大厦项目网络图如图4。采用AoN（Activity-on-Node）的方式表示活动之间的逻辑关系，图中节点的数字标号对应表1中每个活动的序号，有箭线连接的两个活动表示箭线头端的活动只有在箭线尾端的活动完成之后才可以开工。

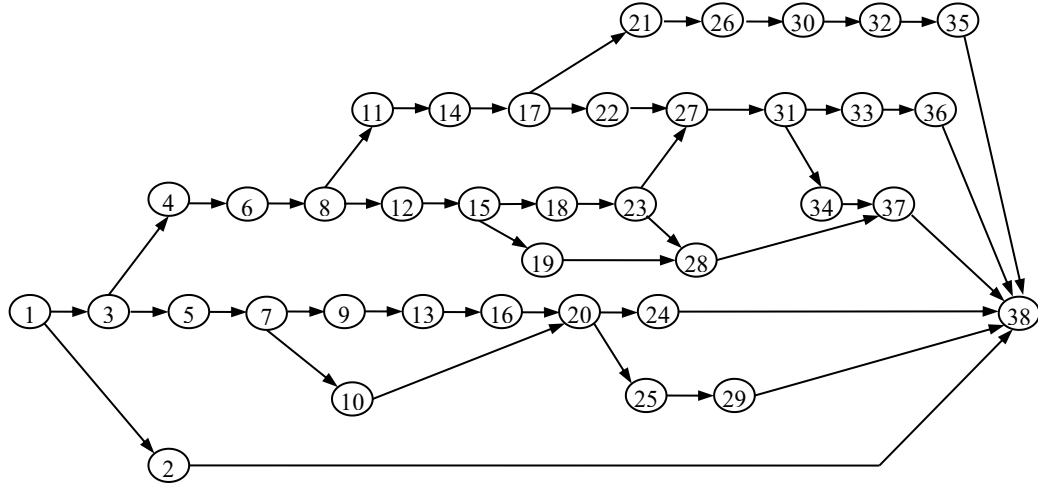


图1 LC大厦建设工程单代号网络图

3.2 优化模型的建立

(1) 问题界定

针对LC大厦建设工程在实施过程中所存在的问题，通过查阅相关文献，将该公司在实施LC大厦建设工程时所遇到的问题界定为，在人力资源约束下，从承包商的视角出发，通过项目进度计划的合理安排对现金流的控制进行优化，以使得项目的净现值能够最大化，从而确保ZTJS建设集团公司的项目收益。针对这一问题，在满足项目进度和质量要求的前提下，通过建立现金流控制优化模型予以解决。在建立优化模型之前，根据LC大厦建设工程的实际情况，首先提炼以下五条基本假设条件：

- 假设条件1：工序间的衔接关系是“结束-开始”型的，即每个活动都必须在其所有的紧前活动结束后才能开始。从LC大厦建设工程的实际情况来看，基本上所有的工序间的关系都是“结束-开始”型的，只有在前面的工序结束后后面的工序才能开始。所以，这条假设是符合整个工程实际情况的。
- 假设条件2：在安排各活动的开始时间时，只考虑人力资源的限制，而且，不考虑资源种类之间的差异，即认为所有的人力资源都是一样的。这是因为对于LC大厦建设工程来说，只有人力资源比较紧张，特别是在春节、麦收等特殊时期，而其他资源相对较为充裕。同时，对于LC大厦建设工程来说，除个别工种之外，绝大多数人力资源具有承担多种工作的能力，可以在不同工种之间调配使用。
- 假设条件3：活动之间的逻辑关系，各活动的工期、资源需求、费用均是确定不变的。LC大厦建设工程的建设环境变化性较低，所以，可以认为项目的网络及相关参数是确定型的。
- 假设条件4：整个工程必须在合同所规定的交付日期之前完成。这是业主方陕西XDHT实业有限公司对承包商的硬性要求，无论承包商ZTJS建设集团公司如何对现金流控制进行优化，都必须遵守这一限制。
- 假设条件5：承包商ZTJS建设集团公司对现金流控制进行优化的目标是其项目收

益最大化，而项目的收益是用净现值进行衡量的。

LC 大厦建设工程现金流控制优化模型，是建立在上述假设条件的基础上的。此外，为了方便优化模型的表述和求解，将 LC 大厦建设工程的时间计算方式进行如下调整：将 2008 年 1 月 1 日的开始时刻记为时刻 0，随着工程实施的向前推进，时刻以天为单位逐渐增加，这样，到合同允许的 2009 年 10 月 21 日的结束时刻，正好为时刻 660。模型构建所用到的符号定义如下：

- N : 表示 LC 大厦建设工程所包含的活动总数， $N=38$ 。
- i : 表示 LC 大厦建设工程的活动序号， i 取值介于 1 到 N 之间。
- t_i : 表示活动 i 完成时间的整数变量，范围介于 0 到 660 之间。
- t_N : 表示活动 N 的完成时间，也就是整个 LC 大厦建设工程最后一个活动的完成时间，即为整个工程的完成时间。
- DD : 合同中规定的 LC 大厦建设工程的完成时间，其值为 660。
- q_i : 表示当活动 i 完成时所发生的现金流，包括工人工资费、材料费、设备费等；如果是支付点，还包括业主的支付，所以，其值可为正，也可为负，还可为零。
- d_i : 表示 LC 大厦建设工程实施过程中，活动 i 的持续时间，亦即为活动 i 的工期，取值为大于零的整数。
- α : 在工程执行过程中，资金的每天折现率。2008 年到 2009 年建设银行的年贷款利率为 5.94%，每年按照 365 天计算，得出其对应的值为 0.0001464 元 / 天。
- r_t : 每个时期活动 i 所需要的劳动人员数量。
- R_u : LC 大厦建设工程执行过程中，在时刻 u 承包商所拥有的可用工人的数量。
- S_u : LC 大厦建设工程执行过程中，在时刻 u 正在进行的活动的集合。
- H : LC 大厦建设工程中活动之间的逻辑关系集合， $H=\{(i,j) | j \text{ 为活动 } i \text{ 的紧后活动}\}$ 。
- NPV : 在实施 LC 大厦建设工程中，ZTJS 建设集团公司所发生的正负现金流折现到工程开始时刻的净现值。

(2) 优化模型

1) 目标函数的建立

根据前面对问题的界定，LC 大厦建设工程实施过程中现金流控制的优化目标，是承包商项目收益的最大化。所以，优化模型的目标函数是最大化 ZTJS 建设集团公司发生在该项目上的现金流的净现值，表示如下：

$$\text{Max} \quad NPV = \sum_{i=1}^N q_i e^{-\alpha t_i}$$

在上述目标函数中，通过将所有活动，即活动 1 到 $N=38$ 的现金流 q_i ，按照折现率 α 折现到时刻 0，便可以得到承包商 ZTJS 建设集团公司在该项目上的净现值。由于正负现金流都发生在活动的完成时刻，因此，通过调整活动的完成时间 t_i ，便可以实现现金流的优化控制，取得承包商项目净现值 NPV 的最大化。

2) 约束条件的确定

根据 LC 大厦建设工程的实际情况，可以确定，优化模型的约束条件包括以下几组：

- 工程开工时间约束。该约束要求在计算的过程中，将工程的开始时间 2008 年 1 月 1 日的开始时刻定义为 0 时刻，表示为：

$$t_0=0$$

注意，活动 0 是为了计算方便，额外添加到工程中的虚开始活动。

- 人力资源约束。由于 ZTJS 建设集团在实施 LC 大厦建设工程的过程中，每个时期的人员可用量是一定的，因此，每个时期所有正在执行的活动对人员的需求

量，不可以超过当期人员的可用量，从而确保不发生资源冲突，使得项目进度为一个资源可行的进度安排。资源约束表示为：

$$\sum_{i \in S_u} r_i \leq R_u \quad u=0,1,\dots,DD$$

- 活动的优先关系约束。承包商在实施 LC 大厦建设工程时，活动的实施次序必须遵从优先关系的限制，亦即每个紧前活动的开工时间加上它的工期，必须小于其紧后活动的开工时间。比如，主体结构施工到五层以上，开始使用悬挑架时才可以实施±0.00 以下的室外回填土工程。活动的优先关系约束表示如下：

$$t_j - t_i \geq d_j \quad (i, j) \in H$$

- 项目工期约束。按照项目合同的约定，LC 大厦建设工程最晚必须在 2009 年 10 月 21 日之前完工。将工程的开始时间 2008 年 1 月 1 日的开始时刻定义为 0 时刻，则其完成时间 2009 年 10 月 21 日的完成时刻即为 660，所以，DD=660。具体地，项目工期约束可以表示为：

$$t_N \leq DD$$

其中，N 为项目的最后一个活动，即活动 38。

3.3 优化模型的求解

(1) 求解思路

由于存在人力资源约束，所以，LC 大厦建设工程现金流控制优化模型为一 NP-hard 问题，直接求解难度较大。因此，本文首先松弛掉人力资源约束，将人力资源约束下 LC 大厦建设工程现金流控制优化模型，转化为无人力资源约束的优化模型，进行求解之后，再考虑人力资源约束，最终求得人力资源约束下现金流控制优化模型的最优解。具体思路如图 2 所示。采用 C++ 语言编写算法程序，在 Windows XP 系统中运行。

从图 2 可以看出，该算法以分枝定界算法为主体，内嵌递归算法，从而达到求解模型的目的。具体步骤为：

- 输入 LC 大厦建设工程的相关数据，如项目活动优先关系、活动持续时间、活动所需人员数量、公司每个时期的人员可用数量。
- 松弛掉人力资源约束，将人力资源约束下的 LC 大厦建设工程现金流控制优化模型，转化为没有人力资源约束的 LC 大厦建设工程现金流控制优化模型。之后，利用递归搜索算法求解该无人力资源约束的优化模型，从而得到每个活动的最佳开工时间，以保证承包商 ZTJS 建设集团公司现金流净现值的最大化。
- 针对松弛掉人力资源约束的问题，重新考虑人力资源约束。即判断按照每个活动的最佳开工时间执行 LC 大厦建设工程时，是否会发生人力资源冲突。如果存在资源冲突，就由分枝定界算法进行计算，确定添加一个额外的优先关系约束以确保资源冲突问题得到解决，然后再求解添加额外优先关系约束后的 LC 大厦建设工程现金流控制优化问题；如果没有发生冲突，就将该解记录下来，作为满意解。
- 判断是否结束分枝定界算法，判断条件是回溯过程完成，或者生成节点数达到 8000 个。如果不结束的话，就继续进行回溯操作；如果结束的话，就在所有的满意解中找到项目净现值最大的解，即为最优解。
- 最后，输出人力资源约束下的 LC 大厦建设工程现金流控制优化问题的最优解，计算结束。

需要指出的是，上文中提到的递归算法只是用来求解当无资源约束的 LC 大厦建设工程

的现金流控制优化问题。下面，讨论在考虑有人力资源约束时，如何求解该工程的现金流控制优化问题。此处，也采用分枝定界算法作为资源约束问题的求解算法，分枝定界树中的每个节点均对应一种具体的活动完成时间安排方案。最初确定的 LC 大厦建设工程活动进度关系，对应根节点（即 0 节点），0 节点对应分枝定界树的 0 层。以 0 节点为初始节点，按照一定的规则，进行分支（branch）和回溯（backtrack）操作，直至找到人力资源不发生冲突时的所有活动进度安排中的净现值最大的活动进度安排。

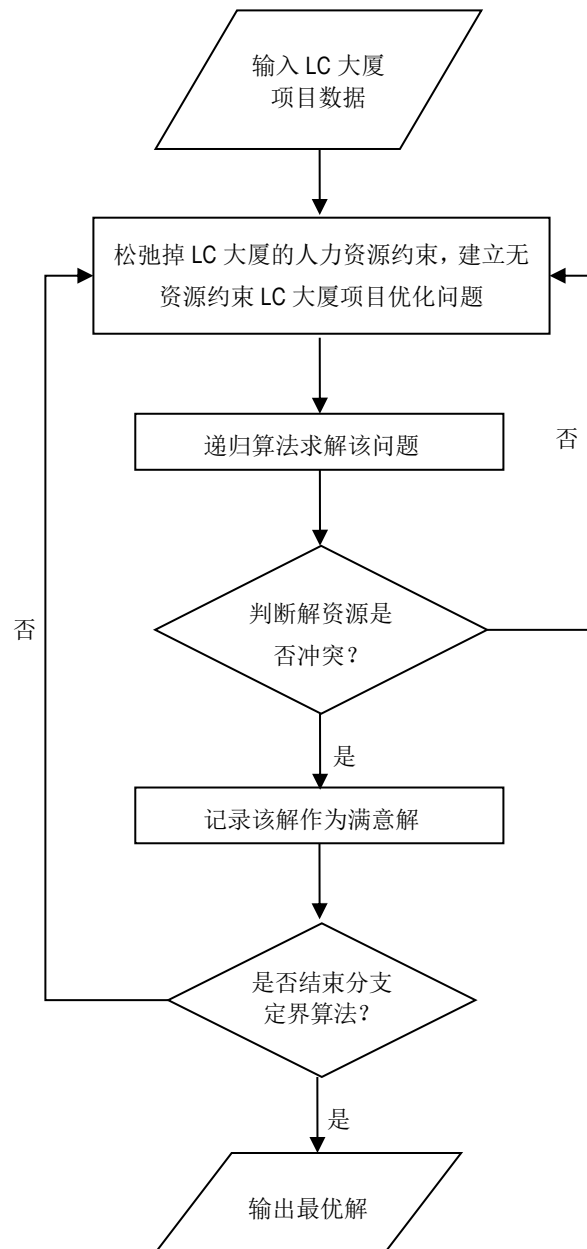


图 2 人力资源约束下的 LC 大厦建设工程进度优化模型求解思路

（2）分支操作

分支操作的流程如图 3 所示。其中， LB 为目标函数的下界； p 为分支层序号； ε 为事先设定的操作精度； NB 为一个节点集合，其中的节点所对应的项目进度安排的工期小于 DD ，且净现值高于下界 LB ； $BX[p]$ 亦为一节点集合，存放 p 层中所有工期小于 DD ，且净现值高于下

界 LB 的节点序号。

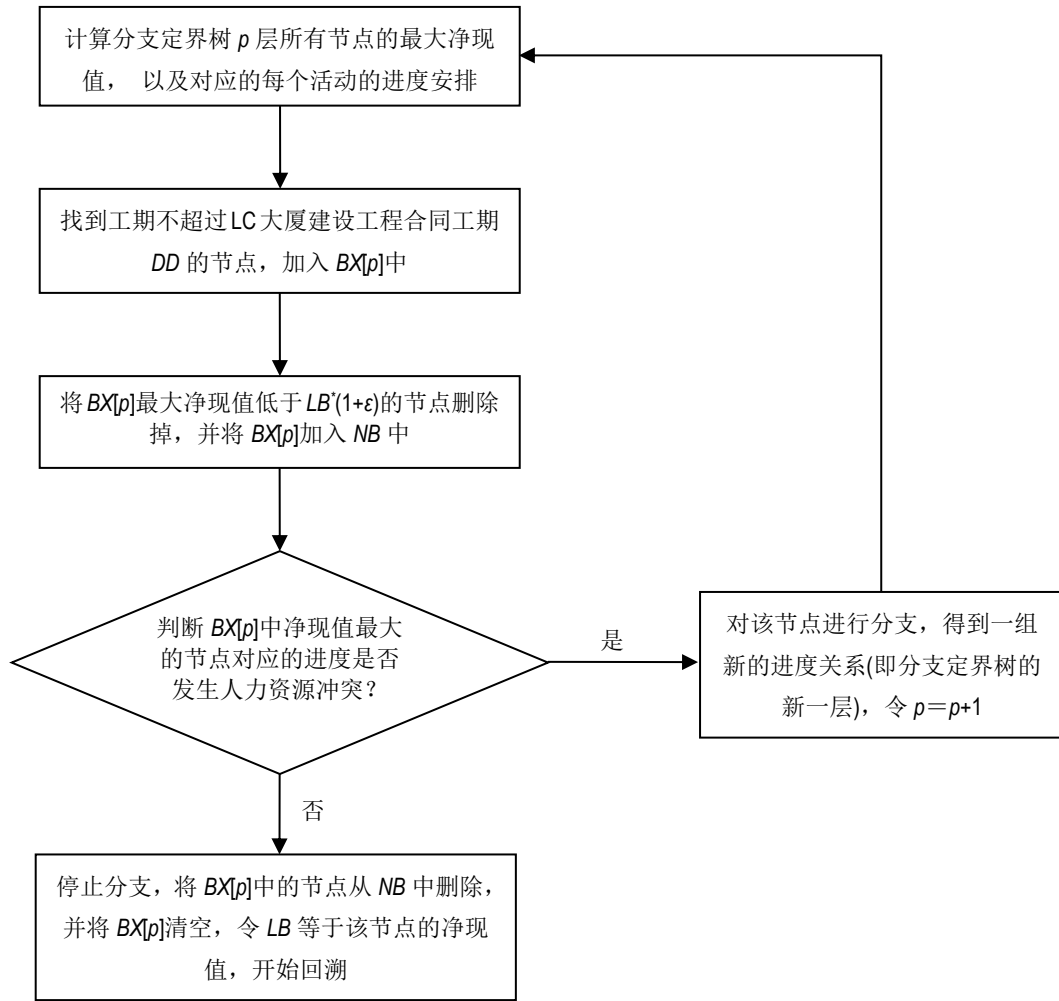


图 3 分枝定界算法的分支操作

在分支操作过程中，当发现 p 层中工期小于 DD 且净现值最大的节点所对应进度安排发生人力资源冲突时，采用深度优先的原则，对其进行分支以解决人力资源冲突问题。在判断是否存在人力资源冲突的过程中，记住人力资源冲突的发生时刻所有正在进行的活动，将其记入到集合 C^k 中。然后，为 C^k 中的活动两两之间添加额外的优先关系约束，每种所添加优先关系约束就作为节点 k 的子节点加入到分枝定界树中，并令 $p=p+1$ 。这些新添加的节点就作为分枝定界树的第 p 层，进行下一次的分支操作。

(3) 回溯操作

回溯操作的流程图如图 4 所示。从图可以看出，分枝定界算法的两个操作，并不是完全独立的，当分支操作找到一个可行解之后，就将该节点的最优净现值赋值给下界，进行回溯操作；而进行回溯操作的时候，如果找到最优净现值低于下界的节点之后，就重新进行分支操作。当分支找到可行解之后，再进行回溯，这样反复操作，直至回溯到 0 层根节点处为止，最后输出找到的最优解。

4 计算结果与实际情形的对比分析

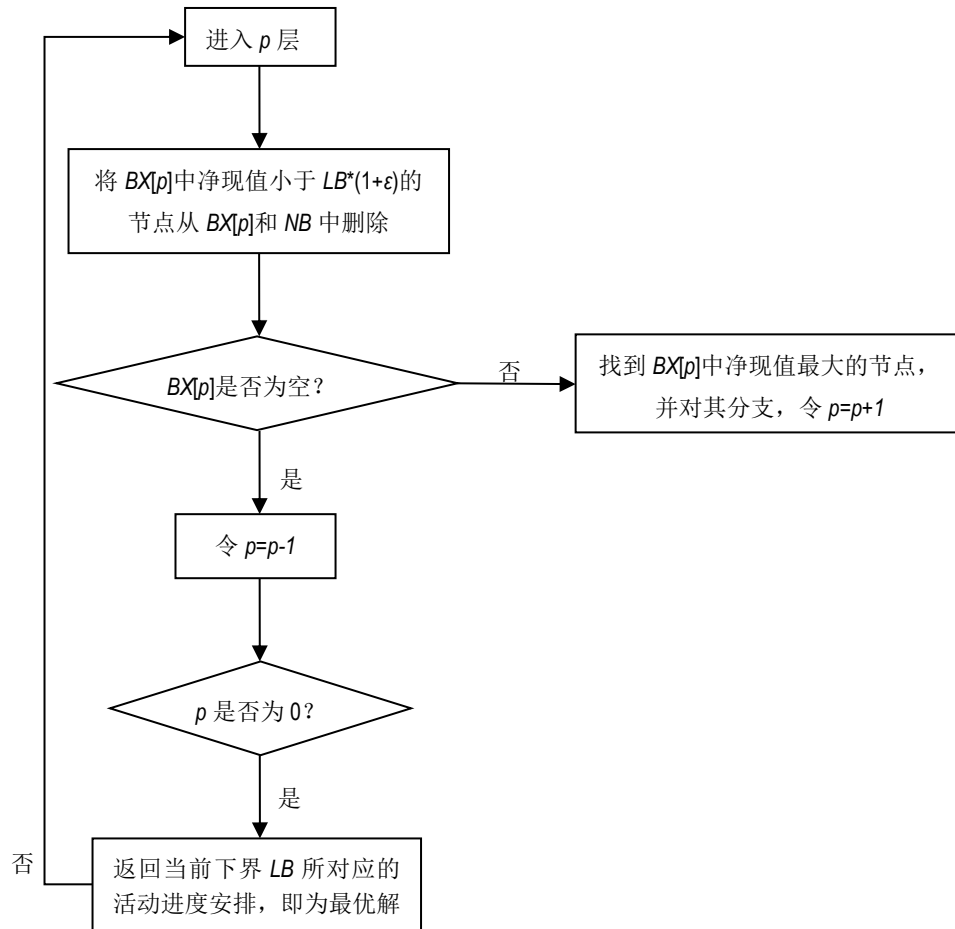


图 4 分枝定界算法的回溯操作

4.1 计算结果与实际情形的对比

采用前文提出的分枝定界算法计算人力资源约束下的 LC 大厦建设工程现金流控制优化模型, 得到的结果如表 5 所示。从表中可见, 在最优的活动开工时间安排下, 承包商 ZTJS 建设集团公司现金流的净现值为 12851434.8 元, 工程的完工时间为 660 天, 即在 2009 年 10 月 21 日完成。在现实中, 工程实际上是按照各活动的最早开始时间安排, 由此得到的结果如表 6 所示。在实际的活动开工时间安排下, 承包商 ZTJS 建设集团公司现金流的净现值为 11523315 元, 工程的完工时间为 640 天。

表 5 LC 大厦建设工程最优活动进度安排

序号	活动名称	最佳开工时间	最佳完工时间
1	基础筏板、地下一层	0	60
2	安装工程	180	660
3	1-4 层主体结构	60	131
4	5 层以下砌体	137	165
5	5-9 层主体结构	131	161
6	6-10 层砌体	165	193

7	10-14 层主体结构	161	191
8	11-15 层砌体	193	221
9	15-19 层主体结构	191	221
10	灰土回填	511	597
11	20-26 层主体结构	221	266
12	16-20 层砌体	390	418
13	21-26 层砌体	221	256
14	玻璃幕墙	314	456
15	屋面工程	418	475
16	5 层以下门窗	597	625
17	6-10 层门窗	456	484
18	11-15 层门窗	475	503
19	16-20 层门窗	519	547
20	21-26 层门窗	625	660
21	间隔 1	484	493
22	5 层以下抹灰	484	512
23	间隔 2	503	512
24	6-10 层抹灰	547	575
25	5 层以下地面	60	88
26	间隔 3	493	502
27	11-15 层抹灰	512	540
28	6-10 层地面	575	603
29	5 层以下油漆涂料	632	660
30	16-20 层抹灰	547	5
31	21-26 层抹灰	540	75
32	11-15 层地面	597	575
33	16-20 层地面	575	625
34	6-15 层油漆涂料	575	603
35	21-26 层地面	625	603
36	16-26 层油漆涂料	603	660
37	室外工程	603	631
38	交工验收	660	660

表 6 LC 大厦建设工程实际活动进度安排

序号	活动名称	最早开工时间	最早完工时间
1	基础筏板、地下一层	0	60
2	安装工程	60	540
3	1-4 层主体结构	60	131
4	5 层以下砌体	131	159
5	5-9 层主体结构	131	161

6	6-10 层砌体	159	187
7	10-14 层主体结构	161	191
8	11-15 层砌体	187	215
9	15-19 层主体结构	191	221
10	灰土回填	191	277
11	20-26 层主体结构	221	266
12	16-20 层砌体	215	243
13	21-26 层砌体	221	256
14	玻璃幕墙	266	408
15	屋面工程	243	300
16	5 层以下门窗	256	284
17	6-10 层门窗	408	436
18	11-15 层门窗	300	328
19	16-20 层门窗	300	328
20	21-26 层门窗	284	319
21	间隔 1	436	445
22	5 层以下抹灰	436	464
23	间隔 2	328	337
24	6-10 层抹灰	328	356
25	5 层以下地面	60	88
26	间隔 3	445	454
27	11-15 层抹灰	464	492
28	6-10 层地面	356	384
29	5 层以下油漆涂料	88	116
30	16-20 层抹灰	454	4
31	21-26 层抹灰	4	82
32	11-15 层地面	92	527
33	16-20 层地面	482	510
34	6-15 层油漆涂料	527	555
35	21-26 层地面	555	583
36	16-26 层油漆涂料	510	545
37	室外工程	555	583
38	交工验收	583	640

将理论上计算出的最优进度安排与实际进度安排进行对比，可以形成表 7。从 5-7 的结果可以看出，通过理论计算得到的活动开工时间安排中，有 28 个活动的开工时间有所推迟，最长的推迟时间达到 544 天。该结果与实际中推迟活动开工，以使费用较晚发生的思路是一致的。对比两种进度安排方案，尽管理论最优方案中的工程完成时间比实际方案晚了 20 天，但承包商现金流得到了有效的优化，从而使得其净现值从 1152.33 万元提升到 1285.14 万元，提升金额 132.81 万元，提升幅度为 11.53%。

而在计算得到的最优方案中，由于要在活动之间添加额外的优先关系约束，以解决资源

冲突问题，这必然会导致整个 LC 大厦建设工程的完成时间相后延迟。从表 7 的计算结果也可以看出这点，人力资源不发生冲突且净现值最大时的工程完成时间为 660 天，比合同约定的目标工期 600 天超出了 60 天，按照合同约定应扣除每天 1 万元，总计承包商需承担 60 万元的罚金；租用的塔吊、布料机、模板等都是按天计算，每多使用一天增加设备租赁费用 1000 元，即 6 万元；另外，计算得到的最优方案不需花费 74.4 万元来雇佣临时工人，考虑到现金流的折现因素，节余的费用和该项目超期 60 天的总支出基本相抵。该项目的净现值仍为 1285.14 万元，提升金额 132.81 万元，提升幅度依然为 11.53%。说明按照这种方法来安排 LC 大厦建设工程的活动进度，是可以有效提高公司的收益，并解决人员短缺的问题。假如合同签署的目标工期为 660 天，该项目收益还可再提升 5.73%。

表 7 实际活动进度与最优活动进度下的结果对比

序号	活动名称	最早开工时间	最佳开工时间	推迟开工时间
1	基础筏板、地下一层	0	0	0
2	安装工程	60	180	120
3	1-4 层主体结构	60	60	0
4	5 层以下砌体	131	137	6
5	5-9 层主体结构	131	131	0
6	6-10 层砌体	159	165	6
7	10-14 层主体结构	161	161	0
8	11-15 层砌体	187	193	6
9	15-19 层主体结构	191	191	0
10	灰土回填	191	511	320
11	20-26 层主体结构	221	221	0
12	16-20 层砌体	215	390	175
13	21-26 层砌体	221	221	0
14	玻璃幕墙	266	314	48
15	屋面工程	243	418	175
16	5 层以下门窗	256	597	341
17	6-10 层门窗	408	456	48
18	11-15 层门窗	300	475	175
19	16-20 层门窗	300	519	219
20	21-26 层门窗	284	625	341
21	间隔 1	436	484	48
22	5 层以下抹灰	436	484	48
23	间隔 2	328	503	175
24	6-10 层抹灰	328	547	219
25	5 层以下地面	60	60	0
26	间隔 3	445	493	48
27	11-15 层抹灰	464	512	48
28	6-10 层地面	356	575	219
29	5 层以下油漆涂料	88	632	544

30	16-20 层抹灰	454	547	93
31	21-26 层抹灰	460	540	80
32	11-15 层地面	92	597	505
33	16-20 层地面	482	575	93
34	6-15 层油漆涂料	527	575	48
35	21-26 层地面	555	625	70
36	16-26 层油漆涂料	510	603	93
37	室外工程	555	603	48
38	交工验收	583	660	77

从具体的活动进度安排来看，两种进度方案都是同一时间开始施工的，即从第 0 时刻开始，第 60 时刻完成施工准备活动的。但是，在理论最优进度安排中，由于考虑正负现金流对项目净现值的不同影响，对各活动的开工时间进行了合理的优化，即将负现金流活动的开始时间延迟到它们的最晚开工时间。所以，与实际活动进度安排相比，理论最优活动进度安排下的承包商收益得到了有效的提升。

4.2 影响因素分析

(1) 工程工期

现假设承包商可以推迟 LC 大厦建设工程的完工时间，即 ZTJS 建设集团公司可以适当增大工程工期 DD ，那么，通过分析 NPV 对 DD 的敏感性，即可得到工程工期对项目收益的影响结果。逐渐增大 DD ，然后求解优化模型，得到对应工期下的净现值，具体如表 8 所示。由表中的结果可以看出，当 LC 大厦建设工程工期缩短时，项目工期的约束变紧，算法生成的节点数增多，耗费的时间变长，承包商的净现值变小。相反，当 LC 大厦建设工程工期延长时，项目工期的约束变松，算法生成的节点数减少，耗费的时间变短，承包商的净现值增加。例如，当 LC 大厦建设工程的工期延长到 680 天时，生成的节点数只有 60 个，算法在 36 秒的时间求得最优解，承包商的净现值增加到 13183544 元。

表 8 不同工期下承包商现金流的净现值

工期(天)	583	600	620	640	660	680
净现值(元)	11523315	11735365	12187415	12409424	12851434	13183544
变化率	0%	1.84%	5.76%	7.69%	11.52%	14.41%

通过计算可知，当允许工期缩短为 600 天时，在现有的人员配置下，该工程便无法如期完成。当工程工期由 620 天逐渐增加到 680 天，从上表可以看出，随着项目工期的增加，承包商的净现值也逐步由 12187415 元增加至 13183544 元。出现这种情况的原因主要是，当项目的工期较长时，承包商便可以将那些需要发生现金支出的活动尽可能地推迟开工，以达到提高自身项目收益的目的。另外，需要说明的是，在算法的计算过程中，为了解决资源冲突，需要添加一些额外的优先关系约束。图 5 和图 6 分别给出了工程工期为 583 天和 660 天时，额外添加活动优先关系的结果。随着额外添加优先关系的增加，工程的工期便会逐渐增大，此时。如果放松工程的工期约束，承包商现金流的净现值便会逐渐增大，即 ZTJS 建设集团公司的项目收益逐渐增大。

(2) 人力资源约束的松紧程度

ZTJS 建设集团公司在实施 LC 大厦建设工程的过程中，所有的活动都按照最早时间开工，其整个工程工期需要 583 天，与合同的规定目标工期 600 天还要提前 17 天。如果减少工程

的影响，现将折现率分别设为 0.00013 元 / 天、0.00014 元 / 天、0.00015 元 / 天、0.00016 元 / 天、0.00017 元 / 天和 0.00018 元 / 天，求解现金流控制优化模型，得到的结果如表 9 所示。对表中的数据进行分析，可以得到如下结论：在其他条件不变的情况下，随着折现率的增加，承包商的项目收益会逐步下降。这一结果的原因比较直接明了，折现率反映了资金使用的成本，所以，折现率越高，承包商使用资金的成本越大，因而承包商现金流的净现值越小。

表 9 不同折现率下承包商现金流的净现值

折现率(元 / 天)	0.00013	0.00014	0.00015	0.00016	0.00017	0.00018
净现值(元)	13183544	12851434	12409424	12187415	11735365	11523315
变化率	0%	-2.52%	-5.87%	-7.56%	-11.00%	-12.59%

4.3 工程管理对策建议

通过对 LC 大厦建设工程的实际调研，获得了工程进度管理和现金流控制的相关数据，在此基础上构建并求解了现金流控制优化模型，获得工程的最优活动进度安排并与实际情况进行了对比分析。根据上述的计算、讨论和分析，针对 ZTJS 建设集团公司的进度管理、支付安排及现金流控制，提出如下的工程管理对策建议：

(1) 从现金流控制优化的视角安排活动进度

ZTJS 建设集团公司应摒弃以前“所有的活动开工时间越早越好”的错误思路，在计算并确定所有活动的现金流之后，应该根据现金流的正负情况及数额大小，合理安排各个活动的开工时间，使得整个现金流的净现值达到最大化。但值得注意的是，延迟负现金流活动有可能导致工程完工时间的滞后。为了避免这种情况的出现，承包商应缩短事先预留的备用时间，并对关键路径上的活动重点进行控制，保证其可以按时完成，从而确保工程能够如期完成。而对于不影响工程完工时间的非关键活动，应从现金流控制优化的视角安排活动的开工时间。通过上述措施，可以保证工程既能如期完工，确保 ZTJS 建设集团公司质量好、进度快的企业形象，又可以实现工程收益的最大化，提高公司的经济效益。

(2) 力争将工程参数调整至合理的范围内

通过对影响承包商净现值的参数进行分析，可以看出，折现率、工程工期、资源可用量等都会对承包商的净现值产生影响。折现率与承包商的净现值呈负相关关系，工程工期与承包商的净现值呈正相关关系，资源的可用量过少或者过多都会降低承包商的净现值。因此，ZTJS 建设集团公司在与业主方进行合同谈判的过程中，应当尽可能地争取较长的工程工期，力争将工程的目标工期延长至 660 天；将折现率维持在一个较低地水平上，如在 LC 大厦建设工程中，就可以将折现率定位在 0.00014 元 / 天，甚至更低；另外，在工程的实施过程中，应当配置适当的资源数量，从而保证承包商的净现值最大化。

(3) 尽可能向业主争取并落实有利的支付安排

在 LC 大厦建设工程的实施过程中，可以通过和业主地充分沟通，将施工合同中里程碑式的支付方式细化，约定将占用资金较大和工期较长的活动结束后支付，改变为按月或按旬支付，或要求业主支付一定数额的施工单位进场费，避免承包商垫资而出现较大的负现金流。总之，ZTJS 建设集团公司应该争取较早的获得业主的支付款，这样，就可以减少自身的融资量，从而降低工程的融资成本，提高工程的净现值。

问题讨论：

1. LC 大厦建设工程的目标要求有哪些？其资源使用和现金流控制有何特点？
2. 解释现金流控制优化模型的目标要求、约束条件和决策变量，5 个假设条件有何作用？

3. 与实际情况相比,最优活动进度安排有何优势和不足?这些优势和不足是怎样产生的?
4. 影响现金流控制优化的主要因素有哪些?针对该工程管理的对策建议是如何提炼出来的?