

不平衡基坑支护结构有限元分析及优化设计

陈金友¹, 俞小光², 吴剑锋³, 蔡袁强^{4,†}

- (1. 杭州市钱江新城建设指挥部, 浙江杭州 310012; 2. 浙江中医药大学, 浙江杭州 310053;
3. 浙江大学岩土工程研究所, 浙江杭州 310027; 4. 温州大学
岩土工程研究所, 浙江温州 325035)

摘要: 针对目前工程实际中存在的大量的基坑不平衡开挖现象, 提出了基于通用有限元程序 ANSYS 的二维分析模型. 分别计算分析了开挖深度不同、外加荷载不同、两侧土质不同等三种情况下支护结构的内力和变形, 并总结出了一些基本规律. 最后对一工程实例进行了优化设计计算. 其计算结果表明, 其计算分析及优化设计是可行的, 在实际工程有一定的应用价值.

关键词: ANSYS 软件; 不平衡基坑; 开挖深度; 优化设计

中图分类号: TU43 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-0375(2007)05-0030-06

随着社会的发展, 城市建设发展很快, 特别是各类用途的地下空间已在世界各大、中城市中得到开发利用, 需要基坑开挖. 同时基坑的深度和范围也在不断扩大, 且城市基坑工程往往处于房屋和生命线工程的密集地区. 如果对基坑开挖组织不好, 定会给人们的生命财产带来威胁. 所以, 加强对基坑开挖的研究和探讨十分必要.

基坑开挖的数目众多, 各个条件也互不相同, 主要可分为平衡开挖和不平衡开挖两种. 但当前的理论研究主要集中在平衡开挖这一部分, 可以说平衡开挖的理论已经很成熟了, 其中有传统的平面分析法如等值梁法、弹性法、山肩邦男法等^[1]. 近年来, 采用有限元软件来模拟分析基坑开挖也被广泛采用, 张丙强^[2]2006 年采用弹塑性有限元理论模拟内撑式支护软土基坑的施工过程, 并分析了内支撑的层数、围护桩的插入深度、初始应力场对基坑开挖后围护桩的受力状态和基坑土层的位移分布的影响. 陆新征等人^[3]2003 年对某深基坑进行了施工全过程的三维有限元弹塑性分析和模拟, 并详细说明了其具体实现方法. 有限元分析中分别考虑了支护结构和土体之间的相互作用问题, 以及各种开挖方案、降水方案对基坑变形的影响, 并对各种关键参数进行了参数敏感性分析和讨论. 俞晓等人^[4]2003 年运用 ANSYS 弹塑性有限元应用软件, 对深基坑支护工程的板桩墙支护体系模型进行了分析探讨, 得到了悬臂板桩墙支护模型的土体位移等值线图、主动土压力云图、墙土接触处的裂缝深度、不同土体材料的沉降影响区域半径. 并求证了拉锚式支护结构的锚固力 F 对控制支护土体变形的有利影响. 曾律弦等人^[5]2006 年结合弹性地基梁法和深基坑支护结构中的环梁支护结构体系的特点, 运用 ANSYS 的空间分析模型来进行环梁支护结构体系的计算分析. 但这些都是针对一般的平衡开挖问题而提出的. 而在工程实践中, 很大一部分是基坑的不平衡开挖问题, 目前对它的研究还很少. 基坑的不平衡开挖主要有三方面的内容: (1) 由于地下室层数等的不同而导致的基坑的开挖深度不同; (2) 由于周边环境堆载的不同而导致基

收稿日期: 2007-05-29

作者简介: 陈金友(1970-), 男, 浙江杭州人, 工程师, 研究方向: 工程管理. † 通讯作者, caiyq@zju.edu.cn

坑的外加荷载不同; (3) 基坑周边的土质情况也经常会有很大的差别。

如采用传统的基坑的平衡开挖理论进行设计计算, 就会出现两种极端: (1) 若采用土质好、外加荷载小或开挖深度浅的一边进行计算, 必将引起工程的不安全; (2) 采用土质差、外加荷载大或开挖深度大的方案进行设计, 则会偏于保守, 对人力、物力资源造成了一定的浪费。因此, 在确保整个不平衡基坑安全的情况下, 找到最优的设计方案, 具有极大社会效益和经济效益。

本文提出了基于大型通用有限元程序 ANSYS 来计算此类问题的方法。

1 有限元分析理论

计算软件采用美国 ANSYS 公司开发的 ANSYS 大型有限元计算软件。本文的分析模型为二维模型, 故采用 BEAM3 单元和 PLANE42 单元来分析, 都假设为线弹性材料^①。具体的分析模型为 (见图 1): (1) 用 BEAM3 单元来模拟围护桩、内支撑等; (2) 用 PLANE42 单元来模拟土体; (3) 荷载部分考虑基坑底以上的水压力和地面超载等问题; (4) 边界条件的设置: 将模型两侧水平约束, 模型的底面水平向和垂直向约束^[2]; (5) 边界范围的选取: 围护桩两侧土体所取范围 L 和桩的长度 H 都由有限元网格划分试算来求, 直到满足精度要求为止。

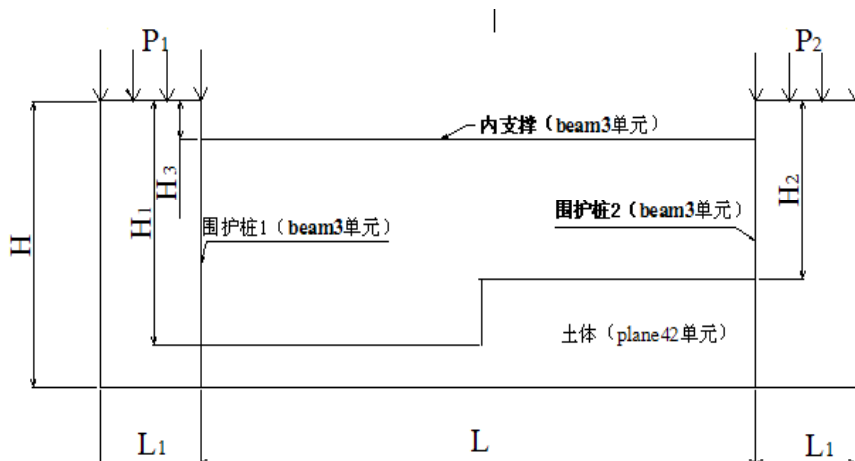


图 1 ANSYS 分析模型

Fig 1 The analysis model of ANSYS

为了真实地模拟支护结构和土体之间的共同作用以及开挖的过程, 本文使用了 ANSYS 的单元“生死”功能来模拟土体开挖和支护施工。所谓“杀死”单元, 就是将该单元的刚度和质量都乘以一个很小的数, 相当于该单元不再发挥作用。而“激活”单元, 就是让已经“杀死”的单元恢复到它原先的刚度和质量, 这时单元既没有初始应变, 也没有初始应力。此外, 还应用了材料的转换功能。例如, 在本模型中, 在第一层土体开挖完后, 将原本材料属性设置成土体的属性的内支撑, 转换成混凝土的属性, 然后“激活”内支撑的梁单元, 这样就很好地模拟了浇筑混凝土支撑这一过程, 且与工程实际是相符合的。基坑开挖完成后的二维网格参见图 2。

具体实现步骤为: (1) 建立整个场地土体及支护结构模型; (2) “杀死”所有的支护结构单元, 并施加重力荷载, 模拟土体在自重作用下的自由沉降; (3) “激活”两侧维护桩单元, “杀死”第一层土体单元, 模拟第一层土体的开挖过程; (4) “激活”内支撑单元, 并将其单元材料属性转换为混凝土, 模拟浇筑混凝土支撑的过程; (5) 继续“杀死”第二层土体单元, 模拟第二层土

① ANSYS 公司. ANSYS 分析指南[R]. 北京: ANSYS 公司北京办事处, 1999.

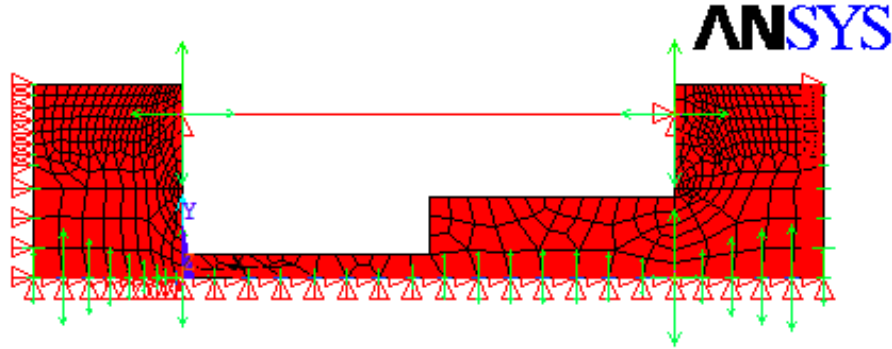


图 2 单元网格及支撑

Fig 2 Mesh and supports

体的开挖过程；(6) 重复步骤，直至开挖到底。

2 计算结果与分析

下面就基坑不平衡开挖的三种情况进行分析计算，其计算步骤为：(1) 土体自由沉降；(2) 第一层土体的开挖；(3) 浇筑混凝土支撑；(4) 第二层土体开挖；(5) 第二层土体不均匀开挖。其中，围护桩采用钻孔灌注桩，桩径 800 mm， $EA = 2.0 \times 10^6$ KN/m， $EI = 1.068 \times 10^5$ KN/m，内支撑尺寸为 500mm×500mm，内支撑参数 $EA = 2.0 \times 10^5$ KN/m。

2.1 堆载 P_1 和 P_2 不同，基坑的开挖深度相同，两侧土质也相同的情况

取 $L = 40\text{m}$ ， $H = 12\text{m}$ ， $H_1 = H_2 = 8.0\text{m}$ ， $H_3 = 2.0\text{m}$ ， $P_1 = 15\text{ kN}$ ， $P_2 = 30\text{ kN}$ ，按 $c = 1.0\text{ kPa}$ ， $\Phi = 32^\circ$ ， $E = 4\ 000\text{ kPa}$ 的土进行计算。经计算分析，围护桩 1 和围护桩 2 中的最大应力值随着基坑的开挖的变化如图 3 所示。由图可看出，在基坑的开挖深度和两侧土质都相同，外加荷载 P_1 与 P_2 相差 15 kN 的情况下，相同刚度和尺寸下的围护桩 1 的最大应力值 ($\text{sig}1$) 和围护桩 2 最大应力值 ($\text{sig}2$) 中相差很大。显而易见， $\text{sig}2$ 大于 $\text{sig}1$ ，且两者差距达到 10% 左右，这与实际情况是相符合的。

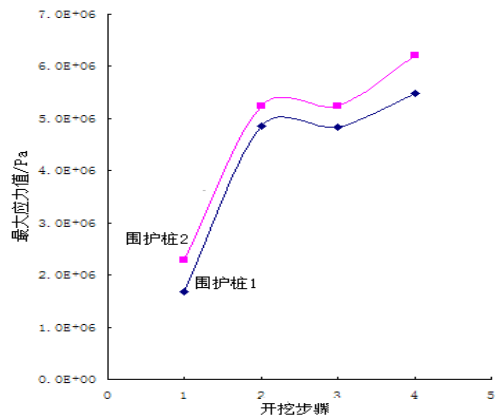


图 3 基坑开挖中围护桩内最大应力值变化图

Fig 3 Excavation envelope largest pile stress map changes

2.2 两侧土质不相同，基坑的开挖深度相同，堆载 P_1 和 P_2 相同的情况

取 $L = 40\text{ m}$ ， $H = 12\text{ m}$ ， $H_1 = H_2 = 8.0\text{ m}$ ， $H_3 = 2.0\text{ m}$ ， P_1 和 P_2 都为零，地质剖面图如图 4 所示。断面 1-2-3-4 为两层土体的分界面，上层土体 1 的参数为： $c=10.2\text{ kPa}$ ， $\Phi=12.6^\circ$ ， $E=1\ 000\text{ kPa}$ ；下层土体 2 的参数为 $c=1.0\text{ kPa}$ ， $\Phi=32^\circ$ ， $E=4\ 000\text{ kPa}$ 。经计算分析，围

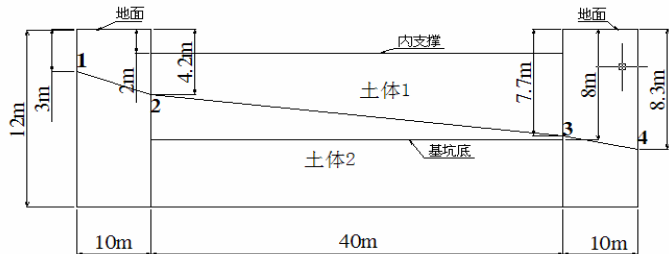


图 4 工程地质剖面图

Fig 4 Engineering geological profiles

护桩 1 和围护桩 2 中的最大应力值随着基坑的开挖的变化如图 5 所示。由图可看出，在基坑的开挖深度和外加荷载 P_1 与 P_2 都相同的条件下，由于同一断面土质的不同，引起两侧围护桩内的最大应力值有很大差别，随着开挖的进行，sig1 一直大于 sig2，当开挖到第二步时，两者相差最大，达 20%左右，当基坑开挖到底时，sig2 超过 sig1。

2.3 基坑的开挖深度不同，堆载 P_1 和 P_2 相同，两侧土质也相同的情况

取 $L = 40\text{ m}$, $H = 13\text{ m}$, $H_1 = 10\text{ m}$, $H_2 = 8.0\text{ m}$, $H_3 = 2.0\text{ m}$, P_1 和 P_2 都为零，仍然按 $c = 1.0\text{ kPa}$, $\Phi = 32^\circ$, $E = 4\ 000\text{ kPa}$ 的土进行计算。经计算分析，围护桩 1 和围护桩 2 中的最大应力值随着基坑的开挖的变化如图 6 所示。由图可看出，在基坑的两侧土质和外加荷载 P_1 与 P_2 都相同的条件下，围护桩 1 和围护桩 2 的刚度和尺寸都相同，围护桩的最大应力值 sig1 和 sig2 在均匀开挖时基本相同（前 4 步），在第 5 步中，由于左侧基坑继续向下开挖了 2 m，可以看到这时 sig1 与 sig2 值就相差很大，达到 6%左右。

由上面计算可知，无论哪种单独情况，支护结构的力场和位移场都不对称，这就造成了设计时的复杂性和困难性。而在实际工程中，往往是几种单独情况的聚集，要想达到支护结构的稳定和经济，就更为复杂。而要达到支护结构的稳定和经济的目的，就必须针对该问题建立优化模型，进行优化设计。

ANSYS 强大的建模和后处理能力很好地解决这类问题，以下用一工程实例展示其具体算法。

3 工程实例计算分析及优化设计

某深基坑占地面积为 $33\text{ m} \times 43\text{ m}$ 。其剖面图见图 7。该基坑采用钻孔灌注桩和混凝土内支撑的支护形式。A 区开挖深度为 11.55 m，B 区开挖深度为 7.70 m。基坑所处场地土体如表 1 所示。而原设计方案中，围护桩 1 和围护桩 2 的桩径都为 800 mm，内支撑的尺寸为 $800\text{ mm} \times 800\text{ mm}$ 。

本文使用了 ANSYS 高级分析技术-优化设计功能。首先应用二维梁单元 BEAM3 的单元表属性，提取出所用的支护材料的总体积 VOLUME，然后分别求出支护桩 1、支护桩 2 和内支撑的最

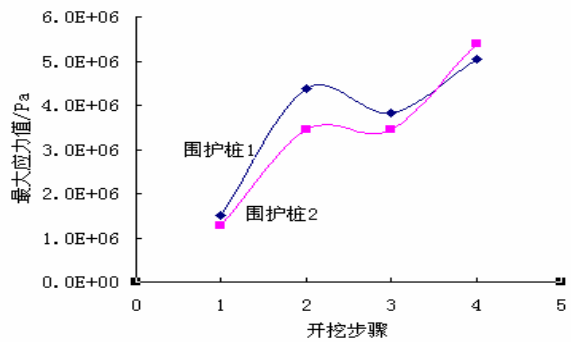


图 5 基坑开挖中围护桩内最大应力值变化图
Fig 5 Excavation envelope largest pile stress map changes

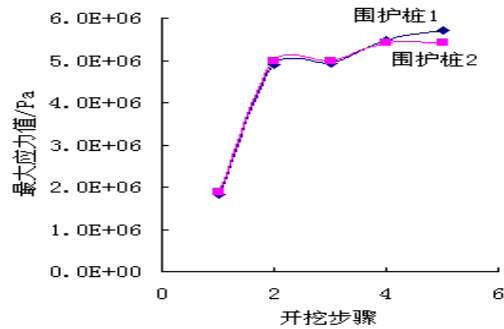


图 6 基坑开挖中围护桩内最大应力值变化图
Fig 6 Excavation envelope largest pile stress map changes

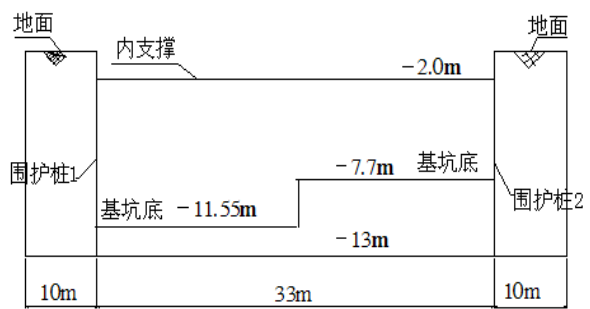


图 7 基坑支护剖面

Fig 7 The section plane of retaining structure

表1 土的力学参数

Table 1 Parameters of the soil

土层编号	土体密度 / kg m^{-3}	变形模量 / kPa	泊松比	C / kPa	$\Phi / ^\circ$	深度 / m
1	1 810	3 000	0.35	13	5	0~7
2	1 790	8 000	0.30	10	9	-7~13

大应力 $\text{sig}1$ 、 $\text{sig}2$ 、和 $\text{sig}3$ ，找出桩 1、桩 2 和内支撑材料的强度值，最后应用 ANSYS 的优化设计功能，使每根梁的最大应力都不超过其强度的情况下，求出所使用的支护材料的总体积 VOLUME 最小，达到优化，实现基坑的安全和造价的经济。

在分析初设定围护桩 1 的半径 $B_1=0.4\text{m}$ ，围护桩 2 的半径 $B_2=0.35\text{m}$ ，内支撑的尺寸为 $B_3 \times B_3$ （其中 $B_3=0.3\text{m}$ ），计算得围护结构的总体积 VOLUME 为 14.502m^3 。又可得桩 1 中的最大应力值 $\text{sig}1=0.63779 \times 10^7\text{Pa}$ ，桩 2 中的最大应力值 $\text{sig}2=0.83647 \times 10^7\text{Pa}$ ，内撑中的最大应力值 $\text{sig}3=0.28898 \times 10^8\text{Pa}$ ，这其中 $\text{sig}3$ 值超过了内支撑混凝土的强度，故处于不安全的状态，要对支撑进行更替。其中有增加其刚度和加大其尺寸两种方法。在不改变其刚度的条件下，改变其尺寸 B_3 的值，以达到安全；另外，又要保证围护结构的总体积 VOLUME 的值最小，以保证经济，故同时也需改变 B_1 、 B_2 的值，这又会引起 $\text{sig}1$ 、 $\text{sig}2$ 值的改变。所以这是一个较复杂的优化过程。其优化结果序列如下所示：

表2 优化结果序列

Table 2 Optimization results sequence

项 目	SET 1 (INFEASIBLE)	SET 2 (FEASIBLE)	SET 3 (FEASIBLE)	SET 4 (FEASIBLE)	*SET 5* (FEASIBLE)
SIG1 (SV)	0.637 79E+07	0.641 19E+07	0.109 86E+08	0.122 24E+08	0.135 43E+08
SIG2 (SV)	0.836 47E+07	0.793 84E+07	0.124 33E+08	0.125 70E+08	0.128 43E+08
SIG3 (SV)	>0.288 98E+08	0.192 03E+08	0.191 79E+08	0.193 46E+08	0.195 55E+08
B1 (DV)	0.400 00	0.399 28	0.330 47	0.317 63	0.305 50
B2 (DV)	0.350 00	0.357 15	0.296 00	0.294 49	0.291 51
B3 (DV)	0.300 00	0.681 81	0.682 83	0.676 02	0.667 61
VOLUME (OBJ)	14.502	27.057	23.423	22.741	21.989

由表 2 可知，序列 5 为最优结果，当 $B_1=0.3055$ ， $B_2=0.29151$ ， $B_3=0.66761$ 时，基坑安全且所耗支护材料 VOLUME 最少，为最经济。显而易见，两边围护桩所需的半径是不同的。

本支护工程的监测利用埋设测斜管来测量支护桩的位移，图 8 为围护桩 1 和围护桩 2 的测斜管位移值（按原设计方案）和按本文优化设计模型的计算值之间的对比情况。

可以看到，原设计方案下实际监测的位移值和优化后的 ANSYS 计算位移值相差并不大，都在保证基坑稳定的安全位移范围之内。而在同样保证基坑安全的情况下，采用经优化计算所得结果，围护桩 1 和围护桩 2 的桩径分别取 700 mm 和 600 mm，内支撑的尺寸取 700 mm \times 700 mm，所耗支护材料 VOLUME = 24.8m^3 。与原设计方案（VOLUME = 34.2m^3 ）相比，节约了 27% 的材料，经济效益是相当显著的。

4 结 语

从本文的分析结果我们可以看出，有限元软件 ANSYS 建模通用性好，具有强大的后处理能力。对于不平衡开挖的基坑，用 ANSYS 来进行模拟分析是切实可行的，而且经过优化设计，能

能够在保证基坑稳定的条件下, 节省大量的支护材料, 具有很大的经济效益. 还可以将本方法应用到其它较为复杂的不平衡开挖基坑支护体系的分析中. 它在实际工程也有很大的应用价值.

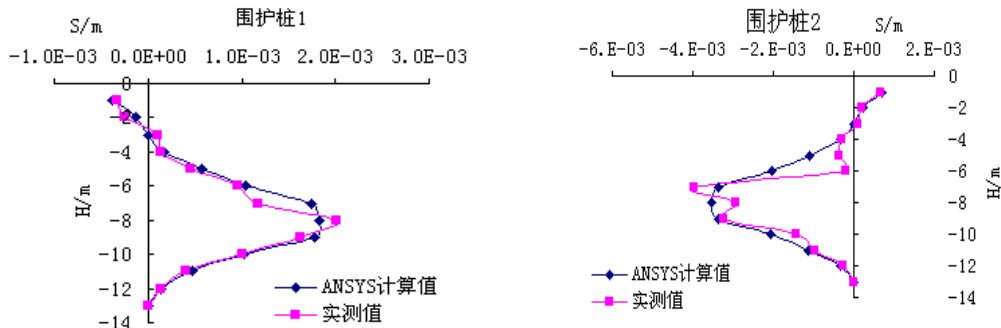


图8 桩位移对比

Fig 8 The comparison graph of pile displacement

参考文献

- [1] 陈忠汉, 程丽萍. 深基坑工程[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999. 10-12.
- [2] 张丙强. 内撑式支护软土基坑有限元分析[J]. 岩土工程界, 2006, 9(3): 49-51.
- [3] 陆新征, 宋二祥, 吉林, 等. 某特深基坑考虑支护结构与土体共同作用的三维有限元分析[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(4): 488-491.
- [4] 俞晓, 杨泰华. 运用 ANSYS 对板桩墙支护模型的计算分析[J]. 岩土力学, 2003, 24(S2): 57-60.
- [5] 曾律弦, 潘泓. ANSYS 在环梁支护结构体系中的应用[J]. 四川建筑科学研究, 2006, 32(4): 88-90.

Finite Element Analysis and Design Optimization of Unbalanced Excavations

CHENG Jingyou¹, YU Xiaoguang², WU Jianfeng³, CAI Yuanqiang⁴

(1. The Construction Headquarters of Qianjiang New City, Hangzhou, China 310012; 2. Zhejiang Chinese Medical University, Hangzhou, China 310053; 3. Institute of Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, China 310027; 4. Institute of Geotechnical Engineering, Wenzhou University, Wenzhou, China 325035)

Abstract: In view of the large numbers of unbalanced excavation in the current engineering, a 2D finite element analysis model built on ANSYS is proposed in the paper. The stress and strain of the supporting structure have been calculated in the conditions of different depth of excavation, over loading and soil distribution, and also some basic rules are summed up. Finally, a project is under the optimization of design. The calculated results show that both the analysis and design optimization are feasible, so it's valuable to the practice.

Key words: ANSYS; Pit imbalance; Excavation depths; Design optimization

(编辑: 赵肖为)