

某桩基承载力不满足要求处理实例及分析

刘金波，张中南，孙 明，李 冰

(中国建筑科学研究院地基基础研究所，北京 100013)

摘要：通过山东某工程灌注桩承载力不满足要求的成功处理实例，介绍了当桩承载力不满足要求时的处理步骤、分析方法、注意事项。对需要补桩的工程，给出了确定补桩位置、桩长和桩数量的原则。对于补桩位置，应考虑对基础沉降的影响，需结合结构形式、荷载分布特点、地质条件等确定补桩位置，使基础沉降尽可能均匀。对于补桩桩长，应根据桩间距和沉降要求确定，当补桩和原设计桩间距满足规范要求且预估基础沉降满足要求时，可同原桩长；当补桩和原设计桩间距不满足规范要求或预估基础沉降不满足要求时，应考虑桩的相互影响和控制沉降要求，补桩的桩长大于原设计桩长。对于补桩数量，在满足承载力和变形要求的情况下，可采用后注浆等措施提高桩的承载力，减小桩的数量。

关键词：桩承载力；补桩位置；补桩桩长；补桩数量

中图分类号：TU473 文献标识码：A 文章编号：1000-4548(2011)S2-0058-06

作者简介：刘金波(1964-)，博士，从事咨询设计和地基基础研究。E-mail: cabrljb@126.com。

Treatment and analysis of pile foundation without satisfying requirements of bearing capacity

LIU Jin-bo, ZHANG Zhong-nan, SUN Ming, LI Bing

(Institute of Foundation Engineering, China Academy of Building Research, Beijing 100013, China)

Abstract: The handling steps, analytical methods and announcements are introduced by means of a successful treatment example of bored concrete piles without satisfying the requirements of bearing capacity in a project of Shandong. The principles to determine the position of supplement pile, pile length and pile quantity are provided. With regard to the position of the supplement pile, the effect on the foundation settlement, structural form, load distribution, geological conditions and so on should be considered in order to make foundation settlement as uniform as possible. The length of supplement pile should be determined by pile spacing and settlement requirements. When the spacings of the supplement pile and the original pile satisfy the code and foundation settlement requirements, the supplement pile can be as long as the original pile; when they do not satisfy the code or foundation settlement requirements, the length of the supplement pile should be greater than that of the original pile. Under the condition that the bearing capacity and the deformation requirements are satisfied, the measures such as post-grouting bored concrete piles can be adopted in order to enhance the bearing capacity of the pile and reduce pile quantity as possible.

Key words: bearing capacity of pile; supplement pile position; supplement pile length; supplement pile quantity

0 引言

桩基作为重要的基础型式在各类工程中广泛应用，在具体设计中，桩基承载力满足设计要求是保证建筑物安全的基本条件之一。但在实际工程中，常常出现桩的承载力达不到设计要求的情况，分析原因是多方面的。如桩型和成桩工艺的选择、工艺参数的确定、施工关键环节的掌握、桩体材料的选用、桩体材料强度存在缺陷和问题等。人为因素对承载力的影响从本质上讲有两方面，一是施工工艺对桩侧、桩端土的

影响，如挤土桩施工工艺在松散土中适度采用可提高桩承载力；二是对桩土结合状态的影响，如泥浆护壁钻孔灌注桩桩侧泥皮、桩底沉渣削弱了桩土结合状态，使承载力降低。目前广泛采用的灌注桩后注浆施工工艺由于能明显改善桩土结合状态，可使承载力提高。

当实测桩的承载力不满足要求时，应首先分析造成承载力不满足要求的原因，分清是地质条件还是人为因素；其次分析承载力不满足要求可能造成的危害，

特别分析对基础沉降的影响, 根据造成承载力不满足要求的原因和危害程度采取补救措施。补救措施除满足承载力和变形要求外, 还应考虑现场施工条件、工期造价等。

1 工程概况

1.1 基本设计情况

该工程位于山东某市, 地上 30 层, 地下一层, 剪力墙结构, 桩筏基础, 筏板厚度 1.5 m, 基础埋深 5.0 m, 使用功能为住宅。桩为泥浆护壁钻孔灌注桩, 桩径 600 mm, 有效桩长 31 m, 桩间距 $1.8 \text{ m} \times 2.0 \text{ m}$ 。设计极限承载力标准值 4400 kN。桩基施工前进行了 3 组场外试桩, 桩径 600 mm, 桩长 32.5 m (从现场室外地坪计算, 相当于有效桩长 28 m), 两组试桩极限承载力达到 4900 kN, 一组达到 4400 kN。为安全起见, 设计院在设计时将有效桩长增加 3 m, 工程实际有效桩长 31 m。

1.2 工程地质概况

工程场地地貌属黄河冲积平原地貌, 在勘察范围内, 场地地层为第四系全新统与更新统黄河冲积层, 主要由粉土、黏性土及粉砂构成, 地层从上至下大致可分为 11 层, 总的来说, 该场地土层分布稳定, 土质均匀性稍差。土层厚度及主要承载力参数见表 1, 地质剖面如图 1。

场地土层中的地下水属于第四系潜水, 稳定水位埋深 1.5~3.00 m。

表 1 各土层承载力参数

Table 1 Results of soil friction of precast piles

土层编号	土层名称	土层厚度/m	承载力特征值 f_{ak}/kPa	极限侧阻力标准值 q_{sk}/kPa
①	杂填土	0.90~2.00		
②-1	粉质黏土	0.40~2.00	110	
②	粉土夹粉砂	3.30~6.00	130	
③	黏土夹粉质黏土	0.80~2.70	90	65
④	黏土夹粉质黏土	1.00~2.10	100	70
⑤	粉 土	0.80~1.60	140	70
⑥	粉质黏土夹黏土	5.50~7.60	120	88
⑥-1	粉 土	0.50~1.40	130	68
⑦	粉土夹粉砂	9.30~11.90	150	74
⑧	粉质黏土	3.10~5.90	140	86
⑨	粉土夹粉质黏土	4.70~9.90	180	78
⑨-1	粉质黏土	0.60~3.00	140	90
⑩	粉质黏土夹粉土	15.00~16.50	210	90
⑪	粉质黏土夹粉土	26.30	230	

1.3 工程桩检测结果

工程桩施工完毕后开槽, 进行工程桩的静载检测, 检测结果如图 2 所示。对图中 $Q-S$ 曲线进行分析, 可得出如下结论:

(1) 桩的极限承载力不满足设计要求, 设计要求极限承载力标准值为 4400 kN, 实测的 6 根桩仅有一根桩的承载力满足设计要求。在静载检测不合格的情况下, 采用大应变进行扩大范围桩的承载力检测, 共检测 30 根桩, 平均极限承载力标准值 3050 kN, 均不满足设计要求。

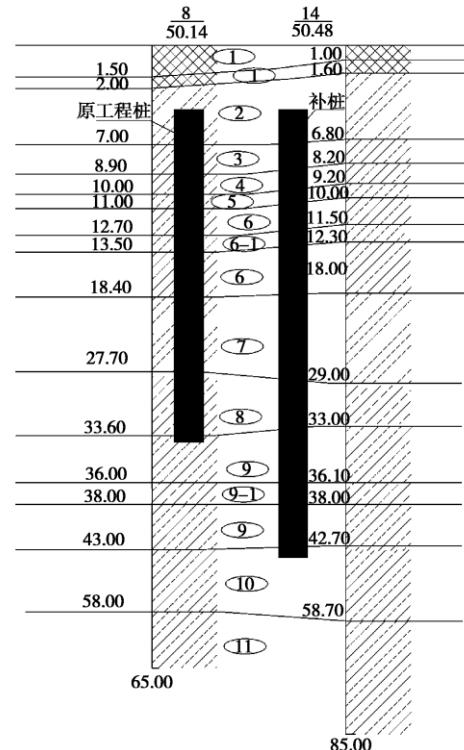


图 1 工程地质剖面与桩的位置关系图

Fig. 1 Geological profile and position of piles

(2) 桩的承载力离散性大, 其中 #03 桩极限承载力 1760 kN, #173 桩 2500 kN, #2 桩 3000 kN, #3 桩达到 4400 kN 时沉降仅 13 mm, 还没有达到极限。

(3) 卸载后桩回弹量小, 卸载后桩的回弹量很小, 仅 3 mm 左右。

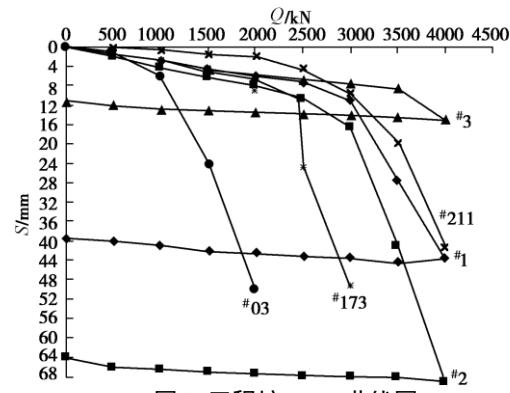


图 2 工程桩 $Q-S$ 曲线图

Fig. 2 $Q-S$ curves of piles

2 事故分析

2.1 事故原因分析

经对勘察报告、施工记录、桩检测记录并结合现场实地考查，事故原因分析如下：

(1) 非桩身质量问题造成承载力不满足要求。对承载力不满足要求的桩进行小应变检测，桩身完整性良好。现场查看没有出现桩头破坏的情况，可排除桩身质量问题对承载力的影响。

(2) 桩侧泥皮过厚是影响桩承载力的主要原因之一。图3为现场实测的桩侧泥皮厚度，从图中可看出，由于桩顶标高处土层为粉土，桩体、泥皮、粉土之间存在明显的界限，其中图3(a)实测泥皮厚度约20 mm，图3(b)泥皮厚度接近70 mm。泥皮过厚影响桩侧摩阻力正常发挥。

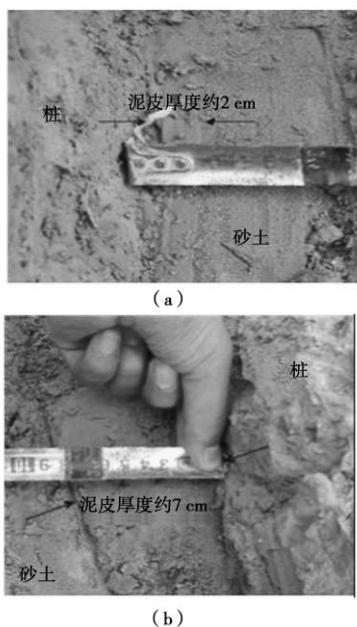


图3 现场实测泥皮厚度

Fig. 3 Thickness of slurry of field tests

(3) 桩底沉渣厚是影响桩承载力的另一个主要原因。从 $Q-S$ 曲线的回弹量分析，卸载后桩的回弹量很小，仅3 mm左右，说明桩的沉降主要是桩端沉渣压缩引起。

(4) 由于桩侧泥皮和桩底沉渣厚薄不均造成桩的承载力离散性大。从土层分布看，在桩长范围内存在粉土和砂土，为避免塌孔，施工单位采用的泥浆比重过大，造成桩侧泥皮过厚，对于泥皮厚度接近70 mm，应是施工过程塌孔，回填黏性土后二次钻孔形成的。

2.2 事故对基础沉降影响分析

由于实测极限承载力平均值约3050 kN，和设计要求的4400 kN相差约30%，且桩的承载力离散性大，分布没有规律，结合结构特点，分析对建筑物基础沉降的影响如下：

(1) 基础最终沉降量大，稳定时间长。由于桩的承载力低，不满足设计要求，会造成建筑物总体沉降量过大和沉降时间过长。

(2) 出现整体倾斜。由于建筑物一侧存在与其相连的地下车库，如图4所示。车库的存在相当于在基础一侧扩大了基础底面积，又由于车库具有一定的刚度，会减小车库一侧的沉降量。若再出现高层建筑另一侧桩大范围沉渣、泥皮过厚，很可能造成一侧沉降大，一侧沉降小，建筑物出现整体倾斜。对于高层建筑，如发生整体倾斜将是灾难性的，因此，在布桩方案中应充分考虑此情况，避免出现整体倾斜的情况。

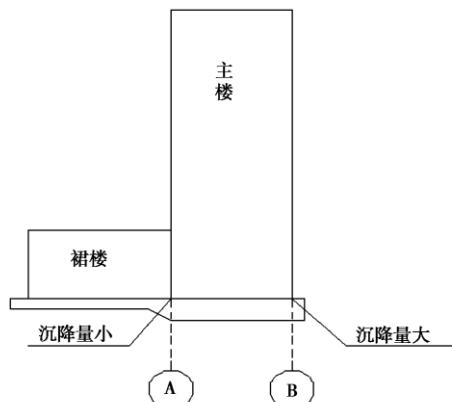


图4 主裙楼连体影响沉降示意图

Fig. 4 Settlement of skirt building

(4) 基础中间不会出现差异沉降。虽然桩的承载力离散性大，但由于建筑物为剪力墙结构，墙体分布均匀，外加1.5 m厚筏板基础，因此整体刚度很大，依靠自身刚度可有效调整基础差异沉降，一般不会出现过大的差异沉降。

3 加固方法

3.1 一般加固方法

对于一般工程，桩承载力不满足设计要求可采用如下几种方法处理：

(1) 打孔注浆法

针对造成承载力不满足要求的原因，即桩底沉渣和桩侧泥皮问题可采用注浆加固，即从桩顶开始竖向打孔，直至桩底，成孔后放置注浆管，然后浇筑混凝土，混凝土凝固后注入水泥浆，加固桩底沉渣和桩侧泥皮，如图5所示。该方法一般适用于地下水位较低，桩较短的情况。对于此工程，此方法可能存在的问题有两方面，一方面桩身的垂直度问题影响钻孔深度，规范要求的桩垂直度小于1%，原工程桩有效桩长31m，即使满足垂直度要求，钻至孔底时也可能出现偏出桩体外情况；另一方面，从勘察报告可知，该工程地下水位很高，如钻到桩底极易造成地下水进入孔

中, 使后期混凝土灌注存在问题。

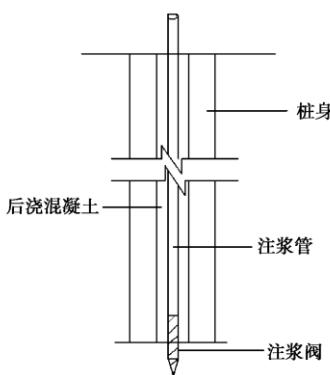


图 5 加固桩底沉渣示意图

Fig. 5 Reinforcement on pile bottom

(2) 预压法

对承载力不满足要求的桩, 采用超过桩极限承载力的荷载进行预压, 此方法一般用于桩的设计承载力较低的情况。对于该工程, 该方法存在的问题有两方面: 一是设计承载力较高, 预压前每根桩需按桩静载检测要求处理桩头, 压桩后每个桩需重新接桩头处理, 所需时间很长; 二是预压后一些桩的承载力可能还不满足要求, 需再补桩。

(3) 复合桩基或复合地基方法

当桩基设计时没有按复合桩基设计、桩的承载力离散性不大、实际承载力和设计值相差不大、桩间土比较好时可采用复合桩基或复合地基方案。采用复合桩基或复合地基方案一般会增大沉降量。对于此工程由于桩承载力离散性大, 主裙楼连体要求控制沉降量, 因此不适合采用此方案。

(4) 补桩加固法

通过补一定数量的桩, 使承载力和变形满足要求。该方案计算分析相对准确, 施工质量容易保证, 造价、工期可控性强。

(5) 综合加固方法

所谓综合加固方法是将以上的一般加固方法中的几种综合利用到同一工程中, 综合加固法牵涉工艺多, 不适合本工程。

3.2 具体加固设计

综合分析以上几种情况后, 最终采用补桩方案, 具体设计方案如下。

(1) 补桩位置的确定

根据现场实际情况, 补桩在原四桩对角线交点, 如图 6 所示。考虑到可能出现的整体倾斜问题, 在靠近图 6 沉降量大的一侧, 补桩数量适当增加。

(2) 桩长的确定

由于补桩后桩间仅 1345 mm, 比规范要求的 3 倍

桩径间距小, 不满足规范要求, 考虑到桩的相互影响的不利因素、控制总沉降量的要求、地质条件的因素等, 最终桩径 600 mm, 桩长取 39 m, 较原桩长增加 8 m。

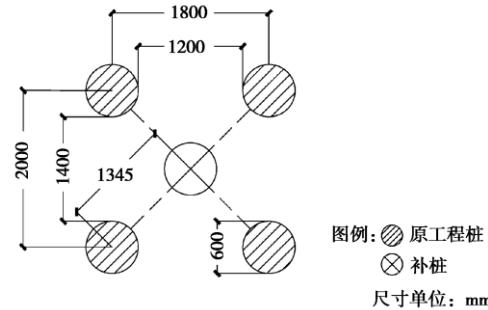


图 6 补桩位置示意图

Fig. 6 Position of supplement pile

(3) 桩的承载力确定

桩的承载力参考前期试桩资料、根据勘察报告和《建筑桩基技术规范》(JGJ94—2008) 的有关规定进行计算, 并考虑工期原因不能进行试桩, 稳妥起见最终确定为 5600 kN。

(4) 补桩数量的确定

补桩的数量综合考虑承载力满足要求、布桩的均匀性要求、沉降控制的要求确定。

(5) 补桩施工工艺的确定

新补的桩采用泥浆护壁钻孔灌注桩, 考虑到地质特点和原工程桩的问题, 为避免塌孔, 采用反循环。为消除桩底沉渣和桩侧泥皮的影响, 对桩进行桩底和桩侧后注浆处理, 具体采用两道桩侧后注浆和两个桩端注浆, 第一道桩侧注浆距桩顶 12 m, 第二道桩侧注浆距桩顶 24 m。图 7 为现场拍摄的桩侧和桩底注浆阀门图。



图7 桩端、桩侧注浆阀

Fig. 7 Grouting valve of pile top and bottom

(6) 新补的桩和原工程桩的共同作用问题

由于新补的桩承载力明显高于原工程桩，对于新旧工程桩的共同作用问题主要依靠基础底板和上部结构的刚度调整。该工程为高层剪力墙结构，剪力墙分布均匀，另加1.5 m厚整体筏板基础，有足够的刚度调整桩顶反力分布，保证筏板下承载力相差较大的桩共同工作。

3.3 本加固设计的特点

本加固设计具有以下两方面特点：

(1) 加固方案在考虑承载力满足要求的情况下，充分考虑了可能出现的基础沉降问题，并在布桩位置、桩长的确定、布桩数量和施工工艺方面具体体现。

(2) 根据该地质条件，对于后注浆施工工艺进行了细化。设计中对后注浆的施工工艺和控制标准做了如下规定：

a) 成桩2d后可进行最上一道侧注浆的施工，控制标准是水泥浆从桩顶溢出，此规定的目的是通过水泥浆的溢出保证最大限度的固化桩侧泥皮。

b) 第一道桩侧注浆完成7d后，进行第二道桩侧注浆，注浆控制标准是水泥浆从桩顶溢出。此规定的目的是让第一次注入的水泥浆固化后，对第二次注浆起到有效封堵作用，避免连续注浆让第二道注浆阀注入的水泥浆从第一道注浆产生的通道溢出，影响桩侧注浆的效果。

c) 第二道桩侧注浆完成7d后，进行桩端注浆。此规定的目的是让桩侧注入的水泥浆固化后，对桩端注浆起到有效封堵作用，避免连续注浆形成的通道降低桩端注浆压力，影响桩端注浆效果。

4 加固效果

4.1 注浆加固效果

(1) 注浆压力

从施工现场情况看，采用此注浆顺序后，注浆压力明显高于常规连续注浆，第一道桩侧注浆压力一般小于1 MPa，同常规注浆；第二道桩侧注浆压力普遍大于3 MPa，桩底注浆压力大于4 MPa，说明间歇注浆的封堵效应得到体现。而在一般软土地区，如天津，连续注浆桩侧注浆压力一般小于1 MPa，桩端注浆压力一般2 MPa左右。借助于调整注浆间隔时间形成的高注浆压力，水泥浆不仅可加固本桩的泥皮沉渣，还可通过劈裂、渗透加固相邻原工程桩的桩底沉渣，提高原工程桩的承载力，因为新旧桩的净距仅745 mm。只是限于现场条件，没有进行此类检测。

(2) 注入水泥量

注入水泥量明显增大。第一道桩侧注浆一般超过1 t就出现桩顶冒浆的现象，不能继续注浆。但第二道桩侧注入水泥量超过2 t，桩端水泥注入量超过3 t。如此多的水泥注入地基中，对于提高桩的承载力，减小建筑物的沉降是非常有益的。

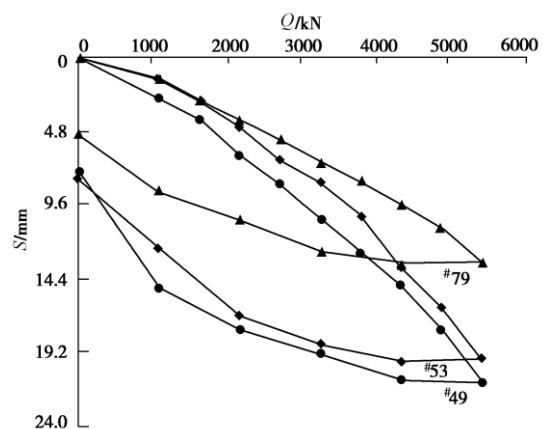
4.2 试桩结果

补桩完成且满足检测要求后，对新补的桩进行静载试验。试验采用堆载反力法，如图8。为确保检测结果具有代表性，被检测的桩为现场随机抽取。实测 $Q-S$ 曲线如图9所示，从曲线可看出桩的承载力满足设计要求且还没有达到极限，根据《建筑基桩检测技术规范》的判定标准，达到设计要求的5600 kN承载力时，桩的承载力还没有达到极限，限于现场堆载的实际情况，没有继续检测，实际承载力应比设计要求的高。



图8 现场静载试验图片

Fig. 8 Picture of field tests

图9 实测补桩 $Q-S$ 曲线Fig. 9 $Q-S$ curves of supplement piles

同原工程桩 $Q-S$ 曲线图比较，可看出两点明显不同：

(1) 桩沉降量比较均匀，离散性小，证明了注浆加固效果；

(2) 卸载后回弹量明显提高，达到10 mm左右，

为总沉降量的 50% 左右, 说明桩端沉降明显减小, 注浆对沉渣的加固效果明显。

4.3 基础沉降

该工程在 2011 年初主体结构封顶, 从结构封顶时实测沉降数据看, 最大沉降仅 20 mm 左右, 且沉降均匀。证明设计对沉降控制的目标得到实现。考虑后期可能发生的沉降, 该工程的总沉降量、地基变形应能满足规范的要求。

5 结论与建议

当桩基承载力不满足设计要求时, 其处理步骤和主要考虑因素如下:

(1) 分析造成承载力不满足要求的原因, 对于灌注桩可从勘察资料的准确性、承载力计算、桩身的完整性、桩身材料强度、成桩工艺的影响、桩侧泥皮、桩底沉渣等分析原因。

(2) 应综合分析承载力不满足要求可能造成的危害, 特别需重视对地基基础变形的影响。

(3) 根据分析的原因和可能造成的危害确定适合本工程的加固方案。

(4) 确定方案时应考虑现场施工条件、工期、经济的因素。

(5) 对于采用补桩加固方案, 确定补桩位置、桩长和桩数量的原则如下: 对于补桩位置, 应考虑对基

础沉降的影响, 需结合结构形式、荷载分布特点、地质条件等确定补桩位置, 目的是使基础沉降尽可能均匀。对于补桩桩长, 应根据桩间距和沉降要求确定, 当补桩和原设计桩间距满足规范要求且预估基础沉降满足要求时, 可同原桩长; 当补桩和原设计桩间距不满足规范要求或预估基础沉降不满足要求时, 应考虑桩的相互影响和控制沉降的需要, 让补桩的桩长大于原设计桩长。对于补桩数量, 在满足承载力和变形要求的情况下, 应尽可能少, 对于灌注桩, 可采用后注浆等措施提高桩的承载力, 减小桩的数量。

(6) 对于采用后注浆工艺进行加固, 应充分理解规范规定的内涵, 在满足规范要求的情况下, 通过注浆顺序、注浆间隔时间的调整, 可使注浆加固效果达到更好。

参考文献:

- [1] 张雁, 刘金波. 桩基手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009. (ZHANG Yan, LIU Jin-bo. Handbook for pile foundation engineering[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2009. (in Chinese))
- [2] JGJ94—2008 建筑桩基技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008. (JGJ94—2008 Technical code for building pile foundation[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2008. (in Chinese))

(本文责编 明经平)