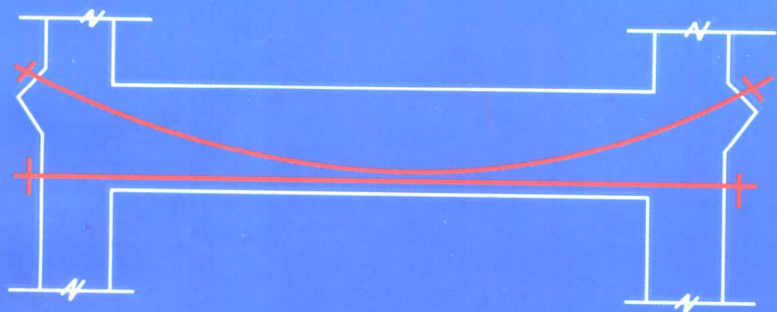


预应力混凝土房屋结构 设计统一方法与实例

郑文忠 王 英 编著



黑龙江科学技术出版社

预应力混凝土房屋结构设计 统一方法与实例

郑文忠 王 英 编著

黑龙江科学技术出版社

中国·哈尔滨

责任编辑 徐晓飞

封面设计 洪 冰

版式设计 关士军

预应力混凝土房屋结构设计统一方法与实例

郑文忠 王 英 编著

出 版 黑龙江科学技术出版社

(150001 哈尔滨市南岗区建设街 41 号)

电话 (0451)3642106 电传 3642143(发行部)

印 刷 哈尔滨市龙江印刷厂

发 行 全国新华书店

开 本 850×1168 1/32

印 张 5.25

字 数 137 000

版 次 1998 年 12 月第 1 版·1998 年 12 月第 1 次印刷

印 数 1—4 000

书 号 ISBN 7-5388-3376-5/TU·252

定 价 10.00 元

前 言

预应力混凝土结构由于其众所周知的优点,已经并正在土木工程中显示出强大的生命力。但工程实践又不断地为预应力混凝土学科的科技工作者提出了一系列问题,其中最为棘手并急需解决的问题有:现行的计算理论引入了主弯矩、次弯矩和综合弯矩的概念,未能很好地把握预应力本质,使原本较为简单的问题复杂化了,给预应力混凝土结构的设计披上了神秘的面纱,不易为结构设计人员所掌握;现行计算理论及设计方法是建立在楼(屋)盖轴向拉压刚度为无穷大的假定基础上的,未考虑侧限对预应力传递的影响,事实上绝大部分超静定预应力混凝土结构为有侧限结构,而且其中有相当一部分结构的侧限是相当明显的;我国《规范》对预应力混凝土结构裂缝控制过严,预应力筋用量过大,其经济指标较差;预应力损失的计算及预应力筋和非预应力筋的选配方法均属试算校核型,较为复杂。带着这些问题,本文作者在综合分析预应力混凝土结构学科在国内外的发展现状之后,认为应建立一套概念清晰、考虑全面、简捷实用、便于推广的预应力混凝土房屋结构设计统一理论,从而开展了如下几个方面的工作:

(1)针对各国规范预应力损失计算均为试算校核型,且较为复杂不便设计这一特点,总结了自 50 年代以来各国学者对总预应力损失近似估算的研究成果,建立了预应力损失计算的简化方法,为快捷合理地进行预应力混凝土结构设计提供了部分依据。

(2)针对我国《规范》对预应力混凝土结构裂缝控制过严,使得预应力筋用量过大,经济指标较差这一问题,分析比较了国内外预应力混凝土结构裂缝控制标准,结合我国近年来的工程实践经验和有关试验结果,给出了既能为工程界所接受,又能满足耐久性要

求的裂缝控制建议及用简单名义拉应力表达的裂缝验算建议, 通过裂缝控制简捷方便地选配预应力筋用量提供了依据。

(3) 针对现行预应力混凝土结构计算理论将问题复杂化, 不能很好地反映预应力本质这一现实, 作者论述了预应力筋的两阶段工作原理, 即第一阶段由张拉到预应力筋有效预应力 σ_{pe} 的建立, 这一阶段预应力筋为能动的作用者, 将张拉引起的端部预加力及结间等效荷载作为外荷载来对待; 第二阶段是当预应力过程结束后, 预应力筋抗拉强度设计值 f_{py} 中高于有效预应力 σ_{pe} 的富余部分 $(f_{py} - \sigma_{pe})$ 又像普通钢筋一样被动地提供抗力, 作为材料来对待。

(4) 基于预应力筋的两阶段工作原理, 建立了能较好地反映预应力本质、概念清晰、简捷实用、便于推广的预应力混凝土结构承载力计算方法。该法一方面不但回避了人们普遍感到棘手, 同时在理论界存在较大争议的次内力问题, 而且为以后在超静定预应力混凝土结构内力重分布与弯矩调幅方面的研究取得进展奠定了理论基础; 另一方面不但实现了静定预应力混凝土结构与超静定预应力混凝土结构设计计算的统一, 而且实现了预应力混凝土结构两类极限状态设计计算的统一。

(5) 针对现行计算理论不易较好地考虑侧限对预应力传递的影响, 而绝大部分超静定预应力混凝土结构又是有侧限结构, 且其中相当一部分结构的侧限又是相当明显的这一客观现实, 建立了有侧限预应力混凝土结构的计算理论及设计方法; 并指出了对于有明显侧限的结构, 若不合理考虑侧限对预应力传递的影响, 不但裂缝控制要求不能得到满足, 而且承载力计算也是明显偏于不安全的。

(6) 以上述工作为基础, 建立了通过裂缝控制计算确定预应力筋用量, 通过承载力及构造要求计算确定非预应力筋用量的实用设计方法, 并提供了典型工程的设计计算实例。

为了突出主题, 同时便于阅读并对预应力混凝土学科有较为

全貌的了解,本书内容分为正文和附录两部分。正文由郑文忠编著;附录由郑文忠和王英主编;参加附录部分编写的还有陈斌(附录一、附录二),曲溪(附录三、附录五),李荣江(附录六、附录七),赵冬梅(附录九、附录十);全书由郑文忠统稿。

在本书出版之际,首先感谢我的硕士导师卫纪德教授,博士生导师吕志涛教授,博士后导师张耀春、计学闰和廉晓飞三位先生,是在各位恩师引导下步入预应力学科的大门并一步一步地走向深入;同时特别感谢哈尔滨建筑大学建筑工程学院及科研处各位领导和老师,是他们始终给予了巨大的支持;衷心感谢预应力学科各位前辈和同仁,是他们的大量资料使我得以进步和提高;真诚地感谢黑龙江科学技术出版社徐晓飞编辑,没有他的大力支持和帮助,本书的及时出版是不可能的。

由于作者水平有限,对书中谬误及不妥之处,敬请各位专家、学者批评指正。

郑文忠

于哈尔滨建筑大学建筑工程学院
1997年10月

目 录

第一章 绪论	(1)
第二章 预应力损失的合理预估与简化计算	(7)
第一节 概述	(7)
第二节 总预应力损失的近似估算	(7)
第三节 预应力损失的简化计算	(10)
第四节 本章小结	(13)
第三章 裂缝控制及验算	(14)
第一节 裂缝控制	(14)
第二节 裂缝验算	(26)
第三节 本章小结	(31)
第四章 承载力极限状态计算	(33)
第一节 概述	(33)
第二节 无侧限结构受弯构件正截面承载力计算	(34)
第三节 有侧限结构受弯构件正截面承载力计算	(48)
第四节 斜截面受剪承载力计算	(49)
第五节 本章小结	(50)
第五章 预应力混凝土结构设计方法与实例	(51)
第一节 概述	(51)
第二节 设计方法的建立	(52)
第三节 设计与计算实例	(57)
第四节 本章小结	(84)
附录一 混凝土材料的选择及力学指标	(85)
附录二 钢筋、钢丝和钢绞线材料的选择及力学指标	(87)

附录三	预应力筋与钢筋横截面面积及其理论质量	(93)
附录四	张拉力取值与预应力损失计算	(97)
附录五	等效荷载计算与预应力筋线型选择.....	(112)
附录六	预应力混凝土受弯构件的挠度控制.....	(121)
附录七	部分预应力混凝土受弯构件无粘结筋的极 限应力.....	(123)
附录八	局部受压设计及端部间接钢筋的若干配置 问题.....	(126)
附录九	预应力混凝土结构构件的构造规定.....	(136)
附录十	锚具、夹具、连接器与机具.....	(140)
主要参考文献		(157)

第一章 绪 论

本章对现行预应力混凝土结构设计方法进行了评述,并明确了本书应论述的问题。

发展和推广预应力混凝土(Prestressed Concrete,简称 PC)结构是改善结构使用性能、节约钢材和能源、提高综合经济效益的重要措施。早在 1993 年李鹏同志就指出:“要在建筑工程中推广预应力混凝土结构的设计方法。”我国国民经济及社会发展十年规划和“八五”、“九五”计划均将发展高效预应力混凝土结构作为我国建筑业的一项基本国策。

自 1928 年预应力技术用于混凝土结构构件的探索取得成功以来,特别是进入 80 年代中后期以来,经过各国学者的努力,预应力混凝土结构的性能研究、计算理论、设计方法及工程实践取得了长足进展。但是目前各国规范及有关论著给出的预应力混凝土结构设计方法仍然存在着若干需要进一步探索、研究和完善的问题,主要表现在:(1)现行计算理论及设计方法,无论是预应力损失计算,还是预应力筋与非预应力筋的选配方法均属于被动的校核型,不便操作;(2)各国规范关于裂缝控制的规定千差万别,我国(GBJ10-89)《混凝土结构设计规范》(以下简称《规范》)对裂缝控制的规定过严,严重阻碍了预应力混凝土结构的推广;(3)现行设计方法承载力计算公式未能从概念上很好地反映预应力混凝土结构的力学行为,影响了对设计方法的理解、沟通和统一;(4)现行设计方法是基于 PC 连续梁结构的工作原理建立起来的,因此它存在着很大局限性,使得有侧限工程的设计缺乏科学性和合理性,有的已建工程甚至可能存在严重隐患。因此,我们认为对现行设计

方法进行评述,从一个全新的角度去认识预应力,指出现行设计方法的不足,建立科学合理的预应力混凝土结构设计统一理论,显得尤为必要。

一、对预应力损失计算方法的评述及应开展的工作

预应力损失计算是预应力混凝土结构设计的重要内容之一。在进行预应力混凝土结构的初步设计时,并不需要也无法精确计算预应力损失,只要知道预应力筋有效预应力 σ_{pe} 的预估值,能大致定出预应力筋和非预应力筋用量即可。在完成初步设计之后,需按预应力筋在结构构件中的布置形式及预应力工艺,按《规范》方法较准确地计算预应力损失,验算结构的使用性能和承载力。目前我国《规范》分项算法在计算预应力收缩徐变损失 σ_{i5} 时,需已知预应力筋和非预应力筋用量,以及结构在外载作用下的内力及张拉引起的端部预加力及结间等效荷载作用下的内力,不但计算工作量非常大,而且对 σ_{i5} 的计算属于被动的校核型,不便设计;在计算有多段曲折线的预应力筋的锚固损失 σ_{i1} 时,需计算多个摩擦损失斜率,反摩擦长度 L_f 的确定十分繁琐。因此,提出总预应力损失近似估算方法和预应力损失的简化计算方法,为合理、快捷地设计预应力混凝土结构提供依据,是本书的重要工作内容之一。

二、对裂缝控制的评述及应开展的工作

预应力混凝土结构构件的裂缝控制是当前工程设计中最有争议和最为棘手的问题之一。关于裂缝宽度的控制方法不外乎两类:一类是通过计算公式验算裂缝宽度或通过限制钢筋应力来控制裂缝宽度;另一类是用混凝土受拉边缘的名义拉应力来控制裂缝宽度。前一类是将预应力筋看成与普通钢筋一样的材料,区别仅在于其存在初始拉应力,而这种预加力荷载被视为内荷载;后一类是将张拉引起的端部预加力及结间等效荷载作为外荷载来看待,认为预应力作用是一种能动作用,我们赞同对预应力的这种看

法。各国规范关于裂缝控制标准千差万别,我国《规范》对裂缝控制过严,计算分析和大量的工程实践表明,若满足我国《规范》对裂缝控制的要求,需配置过多的预应力筋。这些过多的预应力筋,从承载力要求看也是多余的,不利于充分发挥高强钢丝及钢绞线在结构中的作用,已经并正在很大程度上阻碍预应力混凝土结构的发展,这与应大力推广这种具有优良性能的高效预应力混凝土结构的精神是不协调的。所以,本书第二章的首要工作是通过分析比较国内外预应力混凝土结构裂缝控制标准,结合我国的工程实践经验,提出既能为工程界所接受又能满足耐久性要求,有利于推动高效预应力混凝土结构发展的裂缝控制建议;然后,以用名义拉应力控制裂缝宽度的方法为基础,建立用简单名义拉应力表达的、与我们所提出的裂缝控制标准(或建议)相呼应的裂缝验算建议,为通过裂缝控制直接快捷地计算确定预应力筋用量创造条件。

三、对承载力计算公式的评述及应开展的工作

(一)对正截面承载力计算公式的评述

1. 静定 PC 结构构件

各国规范关于静定 PC 受弯结构构件正截面承载力的公式均为

$$\begin{cases} M = f_y A_s (h_{os} - \frac{x}{2}) + f_{py} A_p (h_{op} - \frac{x}{2}) \\ f_{cm} b x = f_g A_s + f_{py} A_p \end{cases} \quad (1-1)$$

式(1-1)中的预应力筋完全被看成与普通钢筋一样的材料,它只能被动地提供抗力。这时的预应力荷载完全被视为内荷载。

2. 超静定 PC 结构构件

超静定 PC 结构设计计算方法是基于 PC 连续梁结构工作原理建立起来的。静定受弯构件与连续梁的区别在于预加力将对连续梁引起支座反力,各国规范为了建立与式(1-1)相协调的计算公式,称在张拉引起的端部预加力及结间等效荷载作用下连续梁的

支座反力为次反力,由次反力引起的结构内力为次内力(次弯矩 M_k 、次剪力 V_k)。因而沿袭式(1-1)计算模式,目前各国规范给出了如下超静定 PC 受弯构件正截面承载力计算公式

$$\begin{cases} M \pm M_k = f_y A_s (h_{os} - \frac{x}{2}) + f_{py} A_p (h_{op} - \frac{x}{2}) \\ f_{cm} b x = f_y A_s + f_{py} A_p \end{cases} \quad (1-2)$$

式(1-2)在考虑预应力效应对设计弯矩的影响(即 M_k)时,将预应力筋作为一个能动的作用者来对待,即将梁端预加力及预应力引起的结间等效荷载作为外载来对待,而在考虑预应力筋对承载力的影响时又将其看成与普通钢筋完全一样的材料来对待,它只被动地提供抗力。

这里需要特别强调指出,对超静定 PC 结构次内力的认识经历了一个漫长的过程,人们曾想出各种办法来排斥次内力。第一种倾向是努力将次反力化为零。人们曾努力寻找一种预应力筋布置方案使得连续梁每一个支座无反力,形同虚设。这种线型布置的预应力筋被称为“吻合束”。在施加预应力时预应力筋的拉力中心与在其作用下截面的压力中心重合。但这种预应力筋的线型确定起来十分困难,无多大工程实用价值。第二种倾向是努力将次弯矩本身化为零。认为在极限荷载作用下,由于塑性铰的出现及塑性内力重分布,次弯矩将消失,可不予计算,但这是与众多试验结果不吻合的。70 年代林同炎曾与美国 ACI(1971) 规范的这一错误进行了公开论战,后来美国规范进行了修改,即在承载力计算中考虑了次弯矩,但该项分项系数取为 1.0,其本质上与式(1-2) 相同。至今人们对通过次内力来考虑预应力效应对设计内力影响的计算方法仍不赞赏,但未找出更科学合理的方法来。现行设计方法未能很好地从概念上反映预应力的本质是预应力混凝土结构未能得到应有发展的重要原因。

这里还需特别强调指出:因为连续梁的支座并不约束梁体轴向变形,因而基于 PC 连续梁结构工作原理建立的设计方法并不能

直接应用于有侧限的超静定 PC 结构的设计,目前不加分析地盲目应用是不正确的,有的工程可能已经产生了严重隐患。

(二) 对斜截面受剪承载力计算公式的评述

我国现行设计方法,对矩形、T形和 I 形截面的受弯构件,当考虑箍筋和弯起钢筋时,其斜截面的受剪承载力计算公式为

$$V \pm V_{\text{sk}} \leq V_{cs} (+ 0.05 N_{po}) + 0.8 f_{yv} A_{sv} \sin \alpha_s + 0.8 f_{py} A_p \sin \alpha_p \quad (1-3)$$

式(1-3)在考虑预应力效应对设计剪力的影响(即 V_{sk})时,将预应力筋作为一种能动的作用者来对待,即将端部预加力及预应力引起的结间等效荷载作为外荷载来对待,在考虑由于预应力作用而使混凝土剪压区承担的剪力提高项 $0.05 N_{po}$ (只 PC 简支梁考虑此项)时,只将梁的端部预加力作为外荷载来对待;而在考虑预应力筋对结构抗力的影响时又将其看成与普通弯起钢筋完全一样的材料来对待,预应力荷载被视为内荷载,预应力筋只被动地提供抗力。

尽管各国规范表达方式不同,但对预应力效应及预应力筋作用的考虑与我国规范公式相同。

(三) 应开展的工作

从上述分析可知,在承载力计算公式中,当考虑预应力效应对设计内力的影响(M_{sk} 或 V_{sk})时,将预应力筋作为一个能动作用者来对待,即将端部预加力及预应力引起的结间等效荷载作为外荷载来对待,在考虑由于预应力的作用而使混凝土剪压区承担的剪力提高项 $0.05 N_{po}$ 时,将梁端部预加力作为外荷载来对待;而在考虑预应力筋对结构抗力的影响时,又将其看成与普通钢筋完全一样的材料来对待,预应力筋只能被动地提供抗力,预应力荷载被视为内荷载。也就是说现行承载力计算公式时而将预应力筋作为能动作用者,把端部预加力及预应力引起的结间等效荷载作为外荷载来对待;时而又将预应力筋看成与普通钢筋完全一样的材料来对待,把预应力荷载视为内荷载,预应力筋只被动地提供抗力。

这样公式规定多,概念多、不能很好地反映预应力混凝土结构的工作机理。所以本书第三章的首要工作是根据我们对预应力混凝土结构力学原理的理解,将预应力筋的作用分成两个阶段:第一阶段是由张拉到预应力筋有效预应力 σ_{pe} 的建立,这一阶段视预应力筋为能动的作用者,将端部预加力及由预应力引起的结间等效荷载作为外荷载来对待;第二阶段是当预应力过程结束后,预应力筋中抗拉强度设计值 f_{py} 中高于有效预应力 σ_{pe} 的富余部分($f_{py} - \sigma_{pe}$)又像普通钢筋一样被动地提供抗力。并以此为基础建立与钢筋混凝土结构相统一的承载力计算公式,同时证明与现行设计方法公式是相互协调的。这样可摒弃人们所不欣赏的次内力的概念,从而揭开预应力混凝土结构设计的神秘面纱;然后针对基于PC连续梁结构工作原理建立的设计方法并不能直接适用于有侧限的超静定PC结构设计的这一客观分析,完善预应力混凝土结构的设计理论,建立一套概念清晰、考虑全面、简捷实用、便于推广的预应力混凝土结构承载力计算公式。

四、对预应力筋与非预应力筋选配方法的评述及应开展的工作

目前进行预应力混凝土结构设计时,常采用荷载平衡法或预应力度法初选预应力筋用量,在设计过程中常出现因平衡荷载大小或预应力度选择不当而需对预应力筋及非预应力筋的选配进行反复试算的现象,不但计算工作量大,且非常复杂。基于此,本书最后在前述工作的基础上,建立了通过裂缝控制计算确定预应力筋用量,通过正截面承载力及构造要求计算确定非预应力筋用量的预应力混凝土结构的实用设计方法,并附有若干算例。

第二章 预应力损失的合理预估与简化计算

本章总结了自 50 年代以来各国学者对总预应力损失近似估算值的研究成果,建立了预应力损失的简化计算方法,为快捷、合理地进行预应力混凝土结构设计提供了依据。

第一节 概 述

预应力损失计算是预应力混凝土结构设计的重要内容之一。在进行预应力混凝土结构的初步设计时,并不需要也无法精确计算预应力损失,只要知道预应力筋有效预应力 σ_{pe} 的预估值,能大致定出预应力筋和非预应力筋用量即可。在完成初步设计之后,需按预应力筋在结构构件中的布置形式及预应力工艺,按分项算法较准确地计算出预应力损失,验算结构的使用性能和承载力。按照我国《规范》分项计算预应力损失,需已知结构在外载作用下的内力及在张拉引起的端部预加力及结间等效荷作用下的内力,计算工作量大,且非常复杂。因此,提出总预应力损失近似估算方法和预应力损失的简化计算方法,是合理、快捷进行预应力混凝土结构设计所迫切需要的,具有重要的工程实践价值。

第二节 总预应力损失的近似估算

自 50 年代以来,对采用高强钢丝和钢绞线作为预应力筋的预应力混凝土结构构件,各国学者进行了大量的试验观测与分析,做出了预应力筋总损失近似估计值的规定。

美国混凝土学会与土木工程学会(ACI-ASCE)第 423 委员会,

于1958年提出的“预应力混凝土结构设计建议”就对混凝土弹性压缩、收缩、徐变和钢材的松弛引起的总损失值(不包括摩擦及锚固损失)规定为:

先张法 241 N/mm^2

后张法 172 N/mm^2

上述总损失值为1963年ACI规范及美国公路桥梁规范(AASHTO)所采纳,并用以设计了大量的房屋结构构件和桥梁结构。实践表明这些结构构件都具有良好的工作性能。

后来感到上述规定值并不能适用于各种设计情况,在一些情况下有可能对总损失估计偏低,也发现早期对高强钢材的松弛值估计低了。因此1975年修定的AASHTO规范和1976年编制的美国后张混凝土协会(PTI)手册都做了适当提高,具体数值分别如表2-1和表2-2所示。

表 2-1 AASHTO 规程总损失值

预应力筋种类	总损失 (N/mm^2)	
	$f'_c = 27.6 (\text{MPa})$	$f'_c = 34.5 (\text{MPa})$
先张钢绞线	—	310
后张钢丝或钢绞线	221	228
钢 筋	152	159

注:表中总损失值不包括摩擦损失; $f'_c = 0.85f_{cu}$

表 2-2 PTI 后张预应力筋的近似总损失值

后张预应力筋用的钢材	总损失 (N/mm^2)	
	板 (Slab)	梁和肋梁 (Joists)
应力消除的 1 862 (MPa) 级钢绞线和 1655 (MPa) 级钢丝	207	241
钢 筋	172	138
低松弛 1 862 (MPa) 级钢绞线	103	138

注:表中数值不包括摩擦损失,适用于中等强度的混凝土、中等预应力水平和中等环境条件的结构和构件。

表中数值仅适用于中等条件下的一般结构和构件。如果混凝土在强度很低时就承受高预压应力,或者混凝土处于非常干燥或非常潮湿的暴露条件下,总损失值会有较大的差别。

要定出一个统一的预应力总损失值是很难的,因为它取决于许多因素:如混凝土和钢材的性能,养护与湿度条件,预加应力的时间和大小以及预应力工艺等。对于一般性能的钢材与混凝土,在一般天气条件下养护的结构,美籍华人林同炎教授提出总损失及各组成因素损失的平均值,用张拉控制应力 σ_{con} 的百分比表示为:

	先张(σ_{con} 的百分数)	后张(σ_{con} 的百分数)
混凝土弹性压缩	4	1
混凝土徐变	6	5
混凝土收缩	7	6
钢材松弛	8	8
总损失	25	20

这些数值已考虑了适当的超张拉以降低松弛和克服摩擦和锚固损失,凡未被克服的摩擦损失必须另加。损失值用张拉控制应力 σ_{con} 的百分率表达有利于显示总损失和它的大致组成。对先张法总预应力损失值取用约 25% σ_{con} 和后张法约 20% σ_{con} , 似乎和预应力梁可能出现的总损失出入不大。但应注意,当条件偏离一般情况时,应根据条件做相应的增减。例如,当构件的平均预应力(P/A)较高时,如大约为 7 N/mm^2 ,则先张法总损失大约增加 30%,后张法增加 25% 左右;当平均预应力(P/A)较低时,如约为 1.7 N/mm^2 ,则先张法和后张法的总损失应分别降低大约 18% 和 15%。上述的总损失率是根据 50 年代到 70 年代长期应用过的数值适当提高而得出的。所用的高强钢材为应力消除的钢绞线与钢丝,极限强度为 1862 N/mm^2 或 1655 N/mm^2 。

我国学者对总预应力损失值也做了一些统计分析,指出在进