

悬索桥锚碇及地基基础中的力学问题研究动态

赵启林, 陈 斌, 卓家寿

(河海大学土木工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要:综述悬索桥在国内外的发展现状与前景,指出对锚碇系统进行详细研究的必要性.在详细介绍锚碇系统传力过程的基础上,分别从锚碇系统的稳定性、变位、强度与温度应力、施工力学、优化等几个方面阐述锚碇系统力学分析的现状,讨论现有分析方法的缺点.文末针对基础失稳的力学机制、长期变位中的蠕变特性、考虑结构与基础相应作用及场耦合的三维有限元模型、施工力学模型、参数确定、反馈设计等方面提出一系列有待解决的问题.

关键词:悬索桥;锚碇;力学分析;地基;基础形式

中图分类号:U448.25;O343

文献标识码:A

文章编号:1006-7647(2001)01-0022-05

1 概 述

悬索桥是目前唯一一种能够跨越1000m、跨越能力最大的桥型^[1].它以1883年美国建造的486m的布鲁克林桥作为现代大跨度悬索桥的起点,在20世纪得到了快速的发展,至20世纪末跨径将接近2000m,表1列出了跨径大于1000m的悬索桥^[2].

表1 20世纪世界范围内悬索桥发展概况

时 期	数 目	最大跨径/m
1883年	1	486
30年代	4	1280
50年代	2	1158
60年代	5	1298
70年代	2	1073
80年代	7	1410
90年代	10	1990

意大利正在计划修建跨径为3300m的墨西哥海峡大桥;日本计划修建2500~3000m的纪淡海峡大桥^[2].根据文献^[3]推算,悬索桥的可能最大跨度为4000~4500m.这样,可以预测悬索桥将能更好地满足我们对跨越大江、大河与海峡的要求.

我国四川省大渡河上由九条铁链组成的泸定桥($L=100\text{m}$)建于1706年,是最早用铁链建成的悬索桥.我国的现代悬索桥虽然起步较晚,但一起步就以空前的规模和速度发展着^[4].根据现有资料统计,到目前为止,已有8座现代悬索桥在我国境内在建或建成(表2).其中江阴大桥主跨跨径为1385m^[5],青马桥主跨跨径为1377m,分别排行世界第4和第5

位.即将兴建的有镇江—扬州大桥(1300m).伶仃洋大桥(1400m),提上议事日程的还有上海的跨江吊桥(1200m)、香港大桥(1400m)、琼州海峡连续吊桥(1200m+2500m+1250m)、杭州湾大桥(1630m)等^[6,7].可见,在21世纪我国悬索桥将以更大的规模和更快的速度发展.

表2 中国悬索桥发展概况

桥 名	跨长/m	锚固方式
江阴长江大桥	1385	重力式
青马桥	1377	端重力,端隧道
宜昌长江大桥	960	重力式
西陵桥	900	重力式
虎门大桥	888	重力式
海沧桥	692	重力式
汕头海湾桥	452	重力式
丰都大桥	450	隧道式

锚碇作为悬索桥主要的承力结构物^[8],一般分为重力锚碇、隧道锚碇和土锚锚碇.重力锚碇有直接基础型,还有沉井、沉箱、地下连续墙等人工基础型.无论是直接基础型,还是人工基础型的重力锚碇,都是以地基的反力来抵抗锚块、基础与索拉压力在竖直方向形成的分量,而索在水平方向的巨大拉力则由锚块与地基或基础与地基的摩阻力抵抗.概括地说,悬索桥的主缆上巨大的水平拉力通过索股与锚碇架分散传到锚块上,再由锚块、基础通过摩阻力传递到地基上(图1).

隧道锚一般在节理较少、岩体性能较好的地方使用.悬索的巨大水平拉力通过索股、锚杆传入隧道

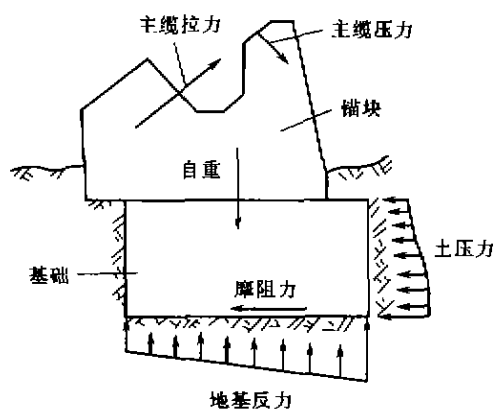


图1 重力锚受力示意图

中填充的混凝土,再通过混凝土与隧道岩体的粘结力传递给周围的岩体^[9](图2)。

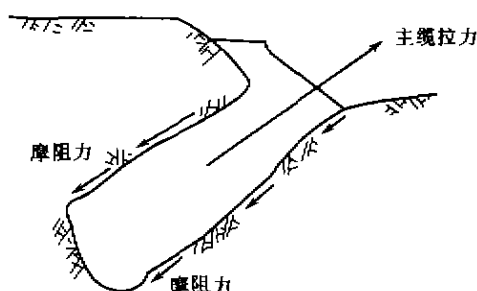


图2 隧道锚受力示意图

2 锚碇系统的稳定性分析

鉴于锚碇系统在悬索桥中的重要性,它的稳定问题也就显得十分重要。为此,本文就锚块的稳定、基础的稳定、基岩的稳定等作一阐述。

2.1 锚块和基础的稳定性分析

无论是直接基础,还是沉井、沉箱等基础,其锚碇自身的滑移、锚块的下沉、锚块在主缆竖向分力作用下发生倾倒,都是绝对不允许的^[1]。一般规定锚碇滑动安全系数取值平时大于2.0,地震时大于1.2^[9]。而锚碇系统的摩阻力是由基岩与锚碇系统接触面的正应力与摩擦系数来决定的,摩擦系数一般都由相似原理进行模型实验或现场测试得到。

目前,对于沉井、沉箱、地下连续墙基础的抗滑与抗倾倒稳定性计算主要有以下两种计算模型^[10,11]:一是日本《道路标示方书》中的刚构计算模型,该模型认为基础是刚性的,基础的竖向分力由地基反力抵抗;倾倒弯矩由基础前侧土压力与地基反力的偏心力共同抵抗;但在进行抗滑移验算时,只考虑地基的摩阻力,不计入基础前侧的土压力作用。最后基础周围可以用8种弹簧模拟进行力的平衡计算。另一是将基础当作地基上的有限长梁处理。地基

的水平抗力、地基水平方向剪切力、基底地基反力及地基剪切力分别以地基抗力系数 K_H , K_F , K_s , K_t 作简化处理。由平衡条件可得到如下微分方程:

$$\begin{cases} EI \frac{d^4 \mu_0}{dy^4} - p = 0 \\ EI \frac{d^4 \mu}{dy^4} + (K_H B + 2K_F \cdot D) \mu = 0 \end{cases} \quad (1)$$

顶板边界条件为

$$\begin{cases} EI \frac{d^2 \mu}{dy^2} \Big|_{y=0} = M_0 \\ EI \frac{d^3 \mu}{dy^3} \Big|_{y=0} = H_0 \end{cases} \quad (2)$$

基底边界条件为

$$\begin{cases} -EI \mu'' \Big|_{y=L} = M_B = K_s J \mu' \Big|_{y=L} \\ -EI \mu''' \Big|_{y=L} = R_S = K_s A \mu \Big|_{y=L} \end{cases} \quad (3)$$

式中: D 为基础侧宽; B 为基础前宽; μ 为水平位移; M_0 , H_0 , M_B , R_S 分别代表相应弯矩与力的边值。

求出 μ 后,即可利用关系式 $\varphi = \frac{d\mu}{dy}$, $M = EI \frac{d^2 \mu}{dy^2}$, $Q = EI \frac{d^3 \mu}{dy^3}$, 求出相应处的转角、弯矩及剪力,再进行抗滑移、抗倾倒安全性验算。

在理论研究的同时,国内外做了部分实验研究,得到了一些初步结论^[12,13]: 倾覆失稳将是锚碇结构的主要破坏特征(对非直接基础而言),其基本破坏过程为锚碇结构在承受锚索拉力后,产生与锚索力作用方向相一致的转动,随着锚索力增大,这一转动趋势进一步发展,最终使得前侧土层中的附加应力增大,后趾处土层首先进入塑性屈服,形成一圆弧漏斗状滑移面。

而对直接基础的重力式锚碇,文献^[9]认为只要满足滑移的安全性要求,抗倾覆要求一般就能满足。而抗滑移安全性的验算一般也是按刚体模式,利用力的平衡来计算。

锚碇的另一稳定性问题,就是锚杆的抗拔稳定性问题,为防止锚杆从混凝土中拔出,大跨径吊桥重力式锚碇的锚固长度一般都大于15m,隧道式锚碇的锚固长度则大于40m^[1]。

2.2 基岩的稳定性

对重力锚的直接基础与隧道锚,由于持力的岩层距地表较浅,着力直接,因而岩体自身的稳定性问题就比较明显。同时锚碇施工常常伴随大量土石方的开挖,护坡的稳定性也将成为大桥施工顺利进行的关键。文献^[13,14]对广东虎门大桥东锚碇的隧道锚进行了现场结构模型试验研究,探讨锚碇结构岩体变形机制和可能的破坏模式,并且进行了具体岩体稳定性

分析.考虑到软弱结构面的最不利组合,认为隧道锚周围的岩体存在两种失稳可能性(图3).

在江阴长江大桥、虎门大桥工程中都存在大量的土石方开挖现象,因而存在许多边坡稳定性问题.文献[15,16]在大量实验基础上反算得出内聚力等参数后,用滑弧稳定分析法证实了边坡的稳定性.

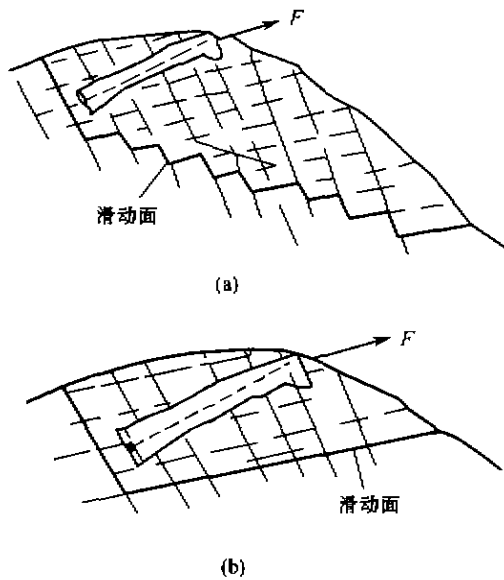


图3 两种可能的破坏模式

2.3 讨论

从现有力学分析技术来看,利用刚构模型进行抗滑移与抗倾覆稳定的设计显得过于粗糙.利用弹性地基梁模式更接近实际情况,但是现有的弹性地基梁模式是建立在基础为方形截面的基础上,对于圆形截面沉井的弹性地基梁计算模式有待建立.同时,现有的计算模型都是将地基反力作用简化成单一确定弹簧常数 K ,但实际上,这些系数是应变 ϵ 与时间 t 的函数 $K(\epsilon, t)$,如何在计算模式中得以反映,也将成为研究的问题之一.

其次就是锚碇倾覆破坏的力学机制研究以及整个破坏过程的仿真,对于防止锚碇倾覆破坏与出现破坏时进行救治都将有重要的参考价值.目前这方面的工作停留在实验仿真上,如果能在计算机上进行过程仿真与机制研究将更有实际意义.地基在基础竖直分力作用下对徐变效应的沉降问题,尤其是其不均匀沉降问题考虑得仍不够.

3 锚碇变位的力学分析

由于悬索桥是一种柔性结构,为满足主塔以及整个桥梁体系的稳定要求,锚碇的最大水平位移与最大垂直位移都必须控制在一定数值范围内^[1].研究锚碇的瞬间变位以及长期变形都显得十分重要.

3.1 锚碇变形的力学分析现状

对于隧道锚而言,由于实际工程应用较少,所以目前对于锚碇与山体整体变形机制的研究也较少,只针对一些具体工程实例进行了结构模型实验,来获得隧道锚在设计荷载作用下山体的变形量值,以及定性说明山体变形的力学机制^[17].

对于沉箱、沉井、地下连续墙类的重力锚,由于施工过程复杂,结构在不断变化,而且外力状况也在不断变化,涉及渗流、蠕变等各种情况,因此需要针对不同情况建立不同的模型来计算长期的变形.目前主要的计算模型有:①刚体模型,即认为基础是刚性,变形主要是发生整体的转动^[18];②弹性地基梁模型,即基础当作地基上的有限长梁处理^[19],根据式(1)、(2)、(3)求解出变形;③有限元模型.前两种方法本身较为成熟,易于计算,但与实际情况相差较大.有限元法能够较好地模拟工程实际,但建模、计算都较复杂,有待进一步研究.文献[20]则针对明石海峡大桥1号锚墩,考虑基础地基的蠕变,采用三元件的线性粘弹性模型,用有限元法计算了整个施工期和使用期间的位移量(表3).

表3 明石海峡大桥位移变化 mm

项 目	水平位移	竖向位移
基础完工时	-4	18
墩身完工时	-24	55
上部结构完工时	4	83
使用100年后	58	82

由表3可见,使用期间的残余位移量还是很大的.文献[21,22]介绍了在有限元建模时考虑由于泥岩间隙水分移动、流失引起压密而产生随时间历程变化的徐变.在设计阶段根据有关试验结果,先假设地基的特性常数,然后用有限元法进行应力与渗透的耦合分析,预测泥岩层长期变位.为提高预测精度,并对施工阶段泥岩层变形等进行动态跟踪观测,利用观测结果修正地基常数,然后再次用有限元修正应力与渗透的耦合作用,进行重分析,来得到锚碇系统的真实变位结果.这些工作说明在锚碇系统的变位计算中都必须考虑岩土体蠕变特性.它对长期变位起着决定性的作用.

3.2 讨论

从现有的部分观测发现,锚块与基础受到巨大索拉力时,并不是发生刚体转动而是有较明显的相对位移,而且在沉井、沉箱等上盖板常出现明显翘曲现象,即局部的相对变形.因此,刚构模型与地基梁模型都不能满足工程需要.有限元模型中存在如下过程:假设→计算→观测→修正→计算的往复.如何在技术上实现这一模拟过程,无论是工程本身还是

在理论上都将成为一个有重要意义的有待解决的问题.因为其中涉及建立正确的本构模型、各种场耦合、实验结果分析、参数反分析、有限元模型等多种问题的组合.

4 锚碇强度和温度应力的力学分析

根据现有资料^[23,24],对锚碇系统而言,由于采取许多施工上的新技术,强度一般都能满足要求.但是无论设计时,还是在安全校核时,对锚碇系统进行应力分析是必要的.它可以为配筋设计提供依据,为安全性评价提供参考,尤其对于一些应力集中处更需要进行应力分析(沉井、沉箱的盖板、鞍座等).主要的分析法有解析法和有限元法.

4.1 锚块与基础的强度分析

最初进行锚块与基础的强度分析时,对锚碇系统不同部位假设成不同的构件,利用不同的解析方法进行计算.例如固定架受拉杆设计时,将它们作为深梁式厚板来考虑其非线性应力分布;对于锚块主体假设为不变形的刚体,利用刚体平衡计算方法计算截面内力、决定主体的配筋量;对沉井的侧壁、外壁所支撑的刚体结构,关键地方分别利用梁理论、刚体平衡方程、板理论等力学模型,计算其截面内力^[22].后来人们利用平面有限元模型分析了锚块的应力流,作为配筋的修正依据.该平面有限元模型是固定了隔墙与侧壁的位置,只考虑各杆件厚度的二维平面模型,而且一般只取顺桥向及横桥向的两个截面,荷载工况取完工后一般情况与发生地震时的两种状态.对于应力集中部分用杆件厚度方向平均应力强度乘以系数进行修正.对于基础部分则运用更为复杂的有限元模型进行分析计算.如对于沉井、沉箱基础,一般情况下用平面有限元分析上盖板的应力分布,并计算集中荷载作用点附近的内部应力,以此进行配筋.用三维有限元分析内隔墙和起吊梁部的应力分布情况,以验证施工的安全性^[25].对于地下连续墙基础,用二维有限元探讨由于边界条件(地下连续墙、侧墙、筒中填充混凝土的连接条件)不同而引起的应力变化,假设了三种情况:①地下连续墙与侧墙分离;②地下连续墙、侧墙、填充混凝土为整体;③侧墙与填充混凝土分离,得到许多有益的结论.

4.2 温度应力的力学分析

由于锚碇部分无论是锚块还是基础部分都伴随大体积混凝土的灌注,因此一方面要在施工技术上减少温度应力^[26,27];另一方面有必要进行温度应力的计算,从设计上控制温度裂缝.文献[15]采用了平面有限元模型对锚块的温度应力进行分析,文献[20]则介绍了采用轴对称模型计算地下连续墙由于

降温引起的拉应力,并进行了配筋设计,以控制裂缝出现.

4.3 讨论

目前在锚碇系统强度设计中,主要是用简化的解析方法作为设计依据,用有限元手段校核.简化计算方法虽然易被工程师接受,但由于存在许多的假设,往往没有考虑结构的整体效应而存在明显的误差,因此有必要对这些简化方法作进一步研究.

现有有限元模型没有充分考虑结构与基础相互作用、施工非线性、岩土蠕变特性、温度场与应力场耦合计算、预应力效应、三维特性等问题,尚待进一步深入研究.

5 锚碇施工全过程的力学分析与优化问题

由于锚碇施工存在明显的阶段性,因而有明显的施工力学问题.由于施工过程中外荷载变化、边界条件变化、结构物变化引起的非线性问题,不仅影响施工过程的安全性,而且直接影响最后结构体应力分布与变形.

5.1 锚碇施工过程力学分析

地下连续墙基础一般适用于地质条件恶劣的情况,如明石大桥、虎门大桥的锚碇结构,其施工顺序一般是:首先构筑地下连续墙井;之后抽水,开挖内部土体,构筑侧墙;逐段反复循环作业,直达持力层;然后构筑基础内部;再构筑锚墩身;最后是上部结构施工.与此同时,持力层的力学参数也在不断变化.因此对于如此复杂的施工步骤,荷载变化频繁的问题,在力学分析中必须充分反映施工过程中的结构、荷载和参数的变化,才能正确地进行强度、稳定性、变位的计算.明石海峡大桥在模拟地下连续墙施工过程中则综合考虑了这些因素^[25].

从现有资料来看,锚碇优化问题还没有引起足够的重视.目前,只有对地下连续墙以造价为目标的函数进行了优化设计^[28],而锚碇系统中存在许多优化设计问题.虽然它们对安全性没有过大的影响,但是对于锚碇这样的大型结构优化设计将产生巨大的经济效益^[29].

5.2 讨论

施工力学问题在锚碇系统较为明显而且相当重要.一方面它影响基础施工中的安全性,另一方面也影响锚碇成型加载后的变位.而施工中的安全性与变位预测控制是悬索桥能否安全施工与使用的重要环节.从现有的研究成果来看,施工力学研究仍不成熟,除了部分有限元模型反映了持力层材料特性的“时效”特点外,大多数计算模型没有考虑材料粘性和非定常系数热传导的“时效”特点,更没有考虑几

何非线性、边界非线性(接触)的“路效”问题,以及它们的相互耦合,而只简单计入几何或边界的时变,在不同阶段不断改变参数进行多次常规分析。这样得到的同一竣工结构、不同施工过程的最终力学状态是一样的。因此有必要建立反映“时效”与“路效”的有限元分析模型,对施工过程进行真实仿真。

6 结 语

本文就锚碇系统的稳定性问题、变形问题、强度与温度应力、施工力学、优化五个方面,总结了以往与目前国内外研究现状,提出有待解决的关键问题:

a. 锚碇的稳定性是锚碇系统的关键问题之一。目前,抗滑移设计基本上能满足工程需要。主要存在的问题是深基础的锚碇在水平力作用下抗倾覆安全性的分析,由于涉及基础与地基的相互作用,其力学机制较为复杂,有必要进行进一步研究和力学仿真,为地基加固提供可靠的参考意见;再就是隧道锚的锚块与岩体在主动拉力作用下的稳定性,尤其应对反倾平面滑动面的岩桥效应、锚块与岩体相互作用的机制等加以研究。

b. 由于悬索桥安全是依靠两个锚碇固定桥的体系,锚碇发生移动将严重影响桥的体系,甚至导致桥体破坏,因此研究锚碇瞬时变位与长期变位是相当重要的。现有的刚构模型与弹性地基梁模式过于粗糙,考虑徐变的线弹粘性模型又过于简单。我们应该建立能真实反映锚碇、基础、地基三者相互作用,施工过程“时效”、“路效”非线性的三维数值仿真模型,对变位进行预测。

c. 在强度分析中主要存在的问题是将有限元模型精确化,例如三维的,考虑施工过程非线性、裂缝影响等。

d. 基础与地基之间摩擦系数是决定锚碇系数是否滑移的关键性力学参数,但是对于非干施工的基础一般难用现有的实验方法确定,探讨确定摩擦系数的新方法成为当前最为迫切的任务之一。

参考文献:

- [1] 刘建新,胡兆同.大跨度吊桥[M].北京:人民交通出版社,1995.
- [2] 万国朝.90年代桥梁工程发展趋势[J].国外公路,1995,15(4):24~28.
- [3] 刘建新.对吊桥可能最大跨度的探讨[J].华东公路,1994,(2):7~9.
- [4] 林长川.现代悬索桥技术的若干进步[J].公路,1996,(8):17~24.
- [5] 周世忠,陆宗林.江阴长江大桥[J].公路,1996,(7):386~389.

- [6] 黄培彦,池田尚治. Construction of large bridges toward the 21st Century in the Chinese coast Route[J]. 桥梁与基础,1998,(7):21~23.
- [7] 伊藤学. Large bridge projects in China. 桥梁与基础,1998,(8):192~194.
- [8] Annmann O H. George Washington Bridge: general conception and development of design[J]. Trans A S C. 1933,9(7):56~62.
- [9] 沈华春. 吊桥设计技术[M]. 北京:人民交通出版社,1995.12.
- [10] 陈开御. 地下连续墙在桥梁工程中的应用[J]. 桥梁建设,1995,(1):48~51.
- [11] 陈平泽. 首都高速公路12号线悬索桥下部结构的设计与施工(上)[J]. 国外桥梁,1993,(2):153~160.
- [12] 李永盛. 江阴长江公路大桥北锚碇模型试验研究[J]. 同济大学学报,1995,23(2):134~140.
- [13] 陈有亮. 虎门大桥东锚碇重力锚及基岩的稳定性[J]. 工程力学,1996(增刊):142~148.
- [14] 程鸿鑫,夏才初,李荣强. 广东虎门大桥东锚碇岩体稳定性分析[J]. 同济大学学报,1995,23(3):131~135.
- [15] 林碧华. 虎门大桥桥塔地基基础类型及锚碇区稳定性分析[J]. 地质灾害与环境保护,1997,8(2):39~43.
- [16] 王志仁. 虎门大桥东锚碇基坑的深开挖及防护[J]. 桥梁建设,1995,(2):48~52.
- [17] 夏才初,程鸿鑫. 广东虎门大桥东锚碇现场结构模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,1997,16(6):19~23.
- [18] 温特科恩 H F. 基础工程手册[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1983.
- [19] 王元战,迟丽华. 沉入式圆筒结构与土相互作用的模式及位移计算方法[J]. 土木工程学报,1997,30(2):68~73.
- [20] 赵杜珍. 明石海峡大桥1号锚墩设计[J]. 国外桥梁,1996,(2):21~24.
- [21] 严国敏译. 世界最大级的遥控操作气压沉箱基础[J]. 桥梁与基础,1992,(7):15~21.
- [22] 陈平泽. 首都高速公路12号线悬索桥下部结构的设计与施工(下)[J]. 国外桥梁,1993,(3):231~239.
- [23] Nobuaki Furuya. Technical innovation for realization of Akashikaikyo Bridge[J]. Proc Instn Civ Engrs Structs & Bridges,1994,104(8):45~54.
- [24] 周建军. 虎门大桥西锚碇大型混合基础的设计与施工[J]. 桥梁建设,1995,(2):44~47.
- [25] 郝育森. 明石海峡大桥1号锚碇的设计与施工[J]. 国外桥梁,1993,(3):31~36.
- [26] 宋世樟译. 日本明石海峡悬索桥西端锚碇基础的施工[J]. 国外公路,1995,(6):31~36.
- [27] 吉川章三. Concrete for Anchorage[J]. 桥梁与基础,1998,(8):124~129.
- [28] 袁勇,田毅. 离散变量优化方法及在地下墙围护设计中的应用[J]. 同济大学学报,1996,24(4):104~111.
- [29] 周念先. 桥梁方案比选[M]. 上海:同济大学出版社,1997.

(收稿日期:1999-01-29 编辑:张志琴)