第 28卷第 1期
2008年 2月

大地测量与地球动力学
JOURNAL OF GEODESY AND GEODYNAMICS

Vol 28 No. 1
Feb., 2008

文章编号: 1671-5942(2008)01-0096-05

GPS精密单点定位模型及其应用分析*

吴江飞[1)]　黄　城[2)]

1)解放军信息工程大学测绘学院,郑州　450052
2)中国科学院上海天文台,上海　200030

摘　要　讨论了 GPS精密单点定位中的 3种常用模型——传统模型、UofC模型和无模糊度模型。将这 3种模型分别应用到星载 GPS卫星的非差运动学定轨实践中,并对定轨结果进行了比较、分析。结果表明,3种模型在精度和实时性方面各有优点,应用中应根据具体情况进行选择。

关键词　GPS; 精密单点定位; 模型; 非差; 运动学定轨

中图分类号: P227　　**文献标识码**: A

GPS PRECISE POINT POSITIONING MODELS AND THEIR UTILITY ANALYSIS

Wu Jiangfei[1)] and Huang Cheng[2)]

1) *Institute of Surveying and Mapping, PLA Information Engineering University, Zhengzhou* 450052
2) *Shanghai Astronomical Observatory, CAS, Shanghai* 200030

Abstract　Three common models the traditional model for precise point positioning are induced, i.e. the UofC model and the No-ambiguity model and then they are applied them to determine zero-difference kinematic orbit of low earth orbiters based on GPS. Through comparisons and analysis of the orbit determination results, some meaningful conclusions are drawn.

Key words: GPS; Precise Point Positioning (PPP); model; zero-difference; kinematic orbit determination

1　引言

随着 IGS(International GNSS Service)产品的出现和不断的改进,GPS定位技术也进入了一个新时代。精密单点定位(Precise Point Positioning, PPP)技术就是其代表之一[1]。除了 GPS卫星精密星历和卫星钟差改正数据以外,PPP技术不需要参考站或参考网络的参与,只采用单台高精度双频 GPS接收机的非差伪距和载波相位观测值,其目标是用单台 GPS接收机获得精确的坐标解,在一定条件下还可以提供与差分 GPS技术相当的定位精度。PPP技术的主要优点表现在用户端系统的简化和全球一致的定位精度两个方面。这种技术的成功将会极大地提高 GPS精密定位操作上的灵活性,同时也会大大降低野外操作的费用。

经过几年的发展,PPP技术在模型构造和科学应用方面已经取得了很大的进步。在模型构造方

* 收稿日期: 2007-07-12
基金项目:中国科学院知识创新工程重要方向项目(KJCX2 - SW - T1);国家 863计划(2002AA731171)
作者简介:吴江飞,男,1972年生,博士,副教授,主要从事空间飞行器精密定轨及其应用、GPS数据处理等方面的研究. E - mail: wjf015@163.com

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

面,比较常用的主要有 3种,即传统模型[2,3]、UofC模型[4]和无模糊度模型[5,6]。PPP技术已在 GPS地面网的解算、车辆导航、大气探测、时间传递以及星载 GPS精密定轨等领域正在得到了深入的应用[7,8]。通过对 CHAMP卫星实测 GPS数据的处理,对 3种模型的定轨结果进行了比较、分析,以期得出一些有益的结论。

2　3种 PPP模型

GPS伪距和载波相位在频率 L_i ($i=1, 2$)上的观测方程可以表示为:

$$P_i = \rho + c(dt - dT) + d_{orb} + d_{trop} + d_{ion/i} + \varepsilon(P_i) \quad (1)$$

$$\Phi_i = \rho + c(dt - dT) + d_{orb} + d_{trop} - d_{ion/i} + \lambda_i N_i + \varepsilon(\Phi_i) \quad (2)$$

式中, P_i、Φ_i 分别为伪距和载波相位观测值; ρ为 GPS卫星和接收机间的几何距离; c为真空中的光速; dt为接收机钟差; dT为 GPS卫星钟差; d_{orb}为 GPS卫星轨道误差; d_{trop}为对流层延迟; $d_{ion/i}$为 L_i频率 ($i=1, 2$)上的电离层延迟; λ_i为 L_i载波波长; N_i为整周模糊度; $\varepsilon(P_i)$为伪距观测噪声和多路径误差; $\varepsilon(\Phi_i)$为载波相位观测噪声和多路径误差。

需要说明的是,在下面讨论的 3种精密单点定位模型中,都已经将 GPS卫星的精密轨道和钟差产品应用到各自的观测方程中,以消除 GPS卫星轨道误差项和卫星钟差项。

2 1　传统模型

精密单点定位的传统模型,是采用双频 GPS伪距和载波相位观测值的无电离层 (ionospheric-free)组合来构成观测模型。这种无电离层组合是减弱电离层影响最有名的公式, Zumberge[2]、Kouba[3]都采用这种组合作为精密单点定位的函数模型。其观测模型的简化形式如下:

$$P_{IF} = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} P_1 - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} P_2 = \rho + cdt + d_{trop} + \varepsilon(P_{IF}) \quad (3)$$

$$\Phi_{IF} = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} \Phi_1 - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \Phi_2 = \rho + cdt + d_{trop} + B_{IF} + \varepsilon(\Phi_{IF}) \quad (4)$$

式中, P_{IF}为 P_1、P_2无电离层伪距组合观测值; Φ_{IF}为 Φ_1、Φ_2无电离层相位组合观测值 (距离); f_i ($i=1, 2$)为载波频率; $B_{IF} = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2}\lambda_1 N_1 - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2}\lambda_2 N_2$ 为无电离层组合相位观测值 (距离)的模糊度; $\varepsilon(P_{IF})$、$\varepsilon(\Phi_{IF})$分别为两种组合观测值的观测噪声和未被模型化的误差。

2 2　UofC模型

加拿大 Calgary大学的 Gao[4]提出的 UofC模型与传统模型不太一样,除了采用无电离层相位组合外,还分别采用 L_1 和 L_2 频率的码和相位平均形式的组合 (这种组合形式同样也降低了电离层的影响)。其观测模型的简化形式如下:

$$P_{IF,L_1} = \frac{1}{2}(P_1 + \Phi_1) = \rho + cdt + d_{trop} + \frac{1}{2}\lambda_1 N_1 + \varepsilon(P_{IF,L_1}) \quad (5)$$

$$P_{IF,L_2} = \frac{1}{2}(P_2 + \Phi_2) = \rho + cdt + d_{trop} + \frac{1}{2}\lambda_2 N_2 + \varepsilon(P_{IF,L_2}) \quad (6)$$

$$\Phi_{IF} = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2}\Phi_1 - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2}\Phi_2 = \rho + cdt + d_{trop} + B_{IF} + \varepsilon(\Phi_{IF}) \quad (7)$$

式中, P_{IF,L_1}、P_{IF,L_2}分别为 L_1 和 L_2 两个频率上的码与相位的组合观测值; Φ_{IF}为传统的无电离层相位组合观测值 (距离), 与方程 (4)相同; $\varepsilon(P_{IF,L_1})$、$\varepsilon(P_{IF,L_2})$、$\varepsilon(\Phi_{IF})$分别为 3种组合观测值的观测噪声和未被模型化的误差。

2 3　无模糊度模型

与上述两种模型不同,这种模型采用无电离层伪距组合观测值和历元间差分的载波相位观测值 (对前、后历元的无电离层相位组合观测值求差)。由于历元间的差分处理,模型中的模糊度项被消除,不必再考虑模糊度的估计。其观测模型的简化形式如下:

$$P_{IF} = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} P_1 - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} P_2 = \rho + cdt + d_{trop} + \varepsilon(P_{IF}) \quad (8)$$

$$\Delta\Phi_{IF} = \Phi_{IF}(i) - \Phi_{IF}(i-1) = \rho(i) - \rho(i-1) + c(dt(i) - dt(i-1)) + d_{trop}(i) - d_{trop}(i-1) + \varepsilon(\Delta\Phi_{IF}) = \Delta\rho + c\Delta dt + \Delta d_{trop} + \varepsilon(\Delta\Phi_{IF}) \quad (9)$$

式中, $\Delta\Phi_{IF}$为两个历元 i和 $i-1$时刻无电离层相位组合观测值间的差值; $\Delta\rho$、Δdt和 Δd_{trop}分别为两个历元 i和 $i-1$时刻的几何距离之差、接收机钟差之差和对流层延迟之差; $\varepsilon(\Delta\Phi_{IF})$为历元差观测值的观测噪声和未被模型化的误差。

2 4　对 3种模型的讨论

到目前为止,传统模型是 3种模型中应用最为广泛的一种。

传统模型在实际应用中也有不足之处。首先,由方程 (4)得到的无电离层相位组合观测值中的组合模糊度项只能作为实未知参数进行估计。因而不

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

能利用模糊度的整数特性,未知参数的估值只能随着观测量的积累和几何构形的变化逐步地趋于收敛。其次,组合观测值的观测噪声被放大了,方程(3)、(4)中的观测噪声项都是原始的码和载波相位观测噪声项的3倍。噪声越大,则收敛的位置误差也越大,趋于收敛所需的时间也越长。

UofC模型中的码和相位的这种组合,不仅消除了电离层的影响(一阶),它还降低了组合观测值的噪声水平。与原始的码观测噪声相比,组合观测值的噪声只有前者的一半。这一点非常重要,因为,如果观测噪声和未被模型化的残余误差之和越小,则未知参数的估计收敛越快,估值也越精确。UofC模型不同于传统模型,这一模型最大的特点就是可以分别估计 L_1 和 L_2 载波相位的整周模糊度,进行模糊度的伪固定(ambiguity pseudo-fixing)[6],从而可以加速解算的收敛。

无模糊度模型采用前后历元间的相位差来消除初始相位模糊度,这样明显地降低了对计算机资源的要求。相位差观测值只能求解位置差,而不能得到用户的绝对位置解。可以由码观测值确定位置,由相位差观测值确定位置差,将逐个历元的位置和位置差组合起来,就可以得到接收机的运动学轨迹。

历元间相位差是针对同一颗卫星的两个相位观测值来求差的,如果前、后历元有不同的卫星被跟踪到,则这些卫星的相位观测值实际上没有被利用,从而造成观测资料的利用率相对较低。此外,相位差观测值虽然消除了模糊度参数,但却引起了观测值间的数学相关性。在实际应用中,为了数据处理的方便,通常忽略这种数学相关性。

综上所述,3种PPP模型的区别,主要跟载波相位中模糊度的处理方式有关。采用传统模型时,组合模糊度的估计是进行迭代收敛的;采用UofC模型时,两个载波 L_1 和 L_2 上的模糊度分别估计,并进行模糊度的伪固定;采用无模糊度模型时,则不用估计模糊度。

3 应用分析

应用上面讨论的3种精密单点定位模型,采用自主研发的GPS数据处理软件(传统模型、UofC模型)和瑞士伯尔尼大学研发的Bernese 5.0软件(无模糊度模型),对CHAMP卫星所采集到的2003年年积日064这一天的GPS数据分别进行非差处理,以确定CHAMP卫星的运动学轨道,并对有关结果进行比较分析。

非差运动学定轨中,采用了IGS提供的最终轨道和钟差产品(采样间隔分别为15分钟和5分钟),并对它们进行了内插处理。由于低轨卫星的GPS观测值不受中性大气延迟的影响,所以3种精密单点定位模型用于CHAMP卫星非差运动学定轨时,模型中的对流层延迟误差改正项就不存在,不需要再估计。

为便于轨道分析,将3种非差运动学轨道分别与JPL(Jet Propulsion Laboratory)提供的精密轨道进行了比较,得到的残差分别如图1、图2和图3所示。

从图1、图2和图3中可以看出,在有些历元处残差出现了明显的中断,这是因为这些历元没有非差运动学定轨结果,也就不能得到两种轨道比较的残差。这些历元之所以会出现非差运动学定轨失败,主要是因为跟踪到的GPS卫星个数较少、几何强度较弱或观测数据质量较差。

图1为采用传统模型进行非差运动学定轨的结果与JPL精密轨道比较的残差。从图1中可以看出,运动学定轨得到的轨道严重依赖于观测数据的质量,当观测数据质量较好时,残差变化比较平稳;当观测数据质量较差时,残差变化出现了跳跃。径向跳跃变化更频繁一些,这主要是由GPS定位时垂直方向精度较差造成的。

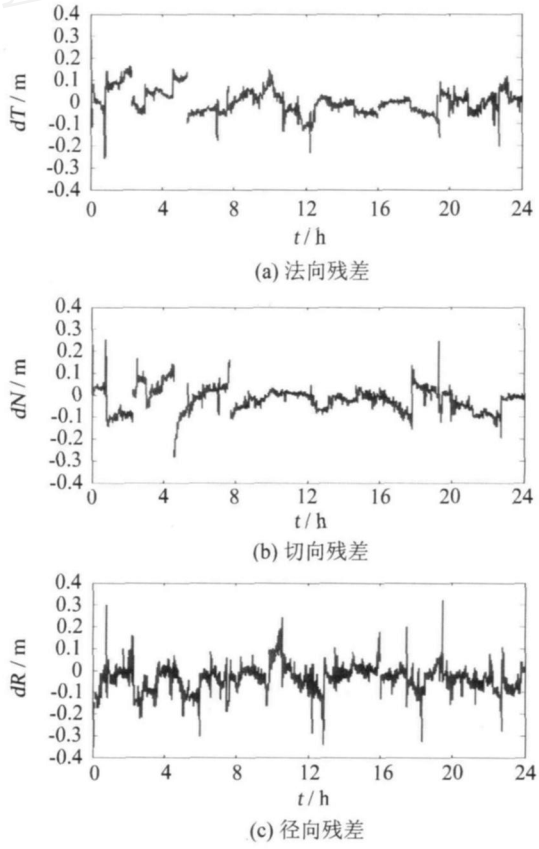


图1 传统模型定轨结果与JPL精密轨道比较的残差

Fig 1 Residuals between results of orbit determination with traditional model and precise orbit of JPL

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 1为采用传统模型进行非差运动学定轨的结果与 JPL精密轨道作比较的统计情况。统计结果表明,两种轨道比较的残差均方差在轨道的法向、切向和径向分别为 6.93 cm、7.26 cm和 8.35cm。径向精度要比法向和切向的精度稍差一些。

表 1　传统模型定轨结果与 JPL精密轨道的比较(单位: cm)

Tab.1　Comparison between results of orbit determination with traditional model and precise orbit of JPL (unit: cm)

	平均偏差	偏差最小值	偏差最大值	残差标准差	残差均方差
法向	0.02	-25.76	28.95	6.93	6.93
切向	-1.90	-28.51	25.35	7.01	7.26
径向	-3.54	-35.66	32.33	7.56	8.35

图 2为采用 UofC模型进行非差运动学定轨的结果与 JPL精密轨道比较的残差。与图 1相比可以看出,UofC模型定轨的结果与传统模型定轨的结果有些差别,但差别不是很大。

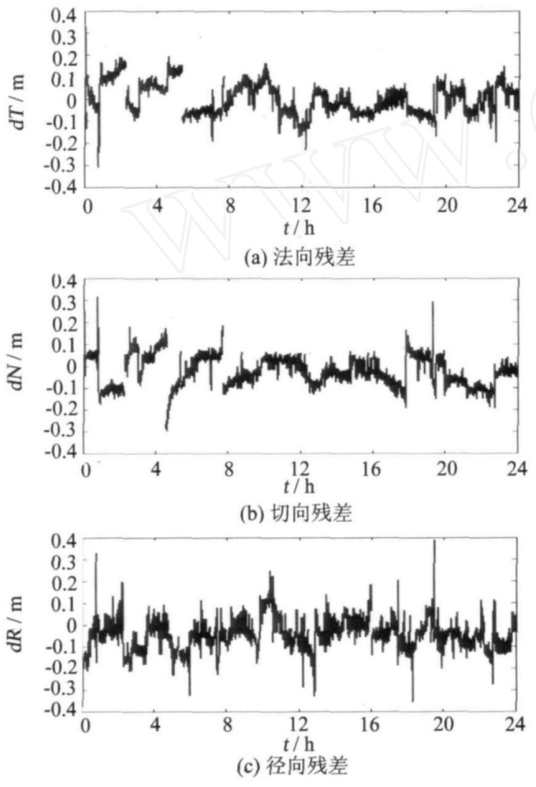


图 2　UofC模型定轨结果与 JPL精密轨道比较的残差

Fig 2　Residuals between results of orbit determination with UofC model and precise orbit of JPL

表 2为采用 UofC模型进行非差运动学定轨的结果与 JPL精密轨道比较的统计情况。统计结果表明,两种轨道比较的残差均方差在轨道的法向、切向和径向分别为 7.58 cm、8.69 cm和 9.54 cm。

图 3为采用无模糊度模型进行非差运动学定轨的结果与 JPL精密轨道比较的残差。从残差图可以看出,在间断处出现了比前两种模型更大的残差,这主要是因为该模型中的相位差值涉及前后两个历元的来自同一颗卫星的相位值,如果一颗卫星只在其中一个历元出现(星载 GPS情形下被跟踪的 GPS卫星的更新率要比地面情形快得多)或者某一历元观测值质量较差或是遇到数据中断时,定轨结果会受到一定的影响。另一方面,无模糊度模型中的观测值是相关的,实际处理时忽略了其相关性,这对结果也会有一些不利影响。

表 2　UofC模型定轨结果与 JPL精密轨道的比较(单位: cm)

Tab.2　Comparison between results of orbit determination with UofC model and precise orbit of JPL (unit: cm)

	平均偏差	偏差最小值	偏差最大值	残差标准差	残差均方差
法向	-0.04	-30.90	33.58	7.58	7.58
切向	-2.28	-29.71	31.59	8.39	8.69
径向	-4.32	-37.95	38.93	8.51	9.54

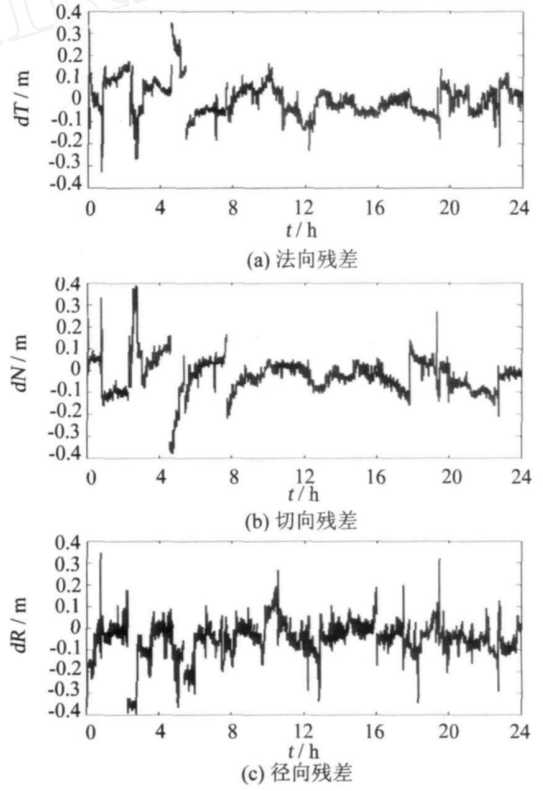


图 3　无模糊度模型定轨结果与 JPL精密轨道比较的残差

Fig 3　Residuals between results of orbit determination with ambiguity-free model and precise orbit of JPL

表 3为采用无模糊度模型进行非差运动学定轨的结果与 JPL精密轨道比较的统计情况。统计结果

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表明,两种轨道比较的残差均方差在轨道的法向、切向和径向分别为 9.52 cm、10.48 cm和 10.82 cm。

从上述表 1、表 2、表 3的比较结果可以看出,3种精密单点定位模型用于非差运动学定轨时,基本上都能达到厘米级的定轨精度。由于 3种模型在组合观测值的构造方式上稍有不同,所以定轨结果也出现了一些差异。从对比结果的统计情况来看,传统模型的残差均方差比 UofC模型的残差均方差和无模糊度模型的残差均方差要小一些。3种模型中,采用无模糊度模型定轨的结果稍微差一点。另外,从 3个表格的平均误差栏可以看出,3种模型所处理的结果在径向上存在明显的系统偏差,这主要是由 GPS系统定位结果在径向上的精度较差引起的。

表 3 无模糊度模型定轨结果与 JPL精密轨道的比较(单位:cm)

Tab.3 Comparison between results of orbit determination with ambiguity-free model and precise orbit of JPL (unit: cm)

	平均偏差	偏差最小值	偏差最大值	残差标准差	残差均方差
法向	0.08	-33.08	34.95	9.52	9.52
切向	-2.22	-38.35	38.85	10.24	10.48
径向	-4.93	-39.94	34.64	9.63	10.82

由于 UofC模型允许模糊度解算,而不必像传统模型那样模糊度需迭代至收敛,所以这种模型解算速度较快,非常适合于实时或准实时动态应用(如导航、大气探测等)。虽然 UofC模型可能更好一些,但是如果将模糊度仅作为实数进行估计,传统模型和 UofC模型的性能是相似的。本例定轨结果的统计情况也正说明了这一点。

在数据质量较好的情况下,无模糊度模型也能获得与传统模型和 UofC模型一样的定轨精度。由于这种模型不需估计模糊度,所以解算速度较快。但当数据质量出现变化,或前后历元间的位置差无法估计时,定轨结果就会出现较大的误差甚至定轨失败。图 3和表 3都在一定程度上说明了这一点。

有必要指出的是,虽然上述实例从定轨精度方面表明了 3种 PPP模型的优劣,但这仅是一种事后处理的结果。如果从处理速度方面考虑,无模糊度模型是最快的,传统模型则是最慢的。所以,对于那些对实时性要求不高,但对定轨精度要求很高的应用,建议采用传统模型;对于那些对定轨精度要求不是很高,但对实时性要求较高的应用,建议采用无模糊度模型或 UofC模型。

4 结语

对 3种常用的 PPP模型进行了较为深入地讨论,并将它们应用到 CHAMP卫星的星载 GPS实测数据处理中,得到了各自的非差运动学定轨结果。轨道比较的情况表明,采用 3种 PPP模型的定轨结果都能达到厘米级的精度。对于 3种 PPP模型,并不能简单地评说孰优孰劣,它们各有优点和不足。实用中应根据具体情况进行选择。

作为一种非常有应用前景的 GPS定位定轨新技术,虽然 PPP技术具有很多优点,并在很多方面也得到了成功的应用,而且精度在一定条件下也能达到厘米级,但是其中的模糊度解算问题仍然限制着 PPP技术在实时或准实时情况下的应用,这方面还需进一步研究。

参 考 文 献

1 陈俊勇,党亚明,程鹏飞. 全球导航卫星系统的进展[J]. 大地测量与地球动力学, 2007, 27(5): 1-4.

1 Chen Junyong, Dang Yaming and Cheng Pengfei. Development and progress in GNSS[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2007, 27(5): 1-4. (in Chinese)

2 Zumberge J F, Watkins M M and Webb F H. Characteristics and application of precise GPS clock solution every 30 seconds[J]. Navigation, 1998, 44(4): 449-456.

3 Kouba J and Heroux P. Precise point positioning using IGS orbit and clock products[J]. GPS Solutions, 2001, 5(2): 12-28.

4 Gao Y and Shen X. A new method of carrier phase based precise point positioning[J]. Navigation, 2002, 49(2): 109-116.

5 Bisnath S and Langley R. High-precision platform-independent positioning with a single GPS receiver[J]. Journal of Navigation, 29(3): 161-169.

6 Bock H. Efficient methods for determining precise orbits of low earth orbiters using the global positioning system[D]. Astronomical Institute University of Berne, 2003.

7 Huang Cheng, Hu Xiaogong and Chen Zhongyi. Solution of regional GPS network using Precise Point Positioning with undifferenced data[J]. Chinese Astronomy and Astrophysics, 2002, 26(1): 69-80.

8 Witchayangkoon B. Elements of GPS precise point positioning[D]. Maine: The University of Maine, 2000, 169-286.

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net