船舶运动姿态预报综述   
   
   
   
   
   
   
   
   
   
   
   
   
   
   
   
   
 总计：毕业设计（论文） 60 页 /root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/c1305b033b124e9587b90eaa19bed879.jpg.sub1.png  
 表格 3 表 /root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/c1305b033b124e9587b90eaa19bed879.jpg.sub2.png  
 插图 10 幅 /root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/c1305b033b124e9587b90eaa19bed879.jpg.sub3.png

船舶运动姿态预报综述 /root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/a2e9197c39974e9fa96d798c6647c6c3.jpg.sub1.png  
   
摘 要   
在实际工程中存在着大量的非线性系统，所以对非线性系统的研究  
有着非常重要的意义，非线性系统的建模预报是其应用的一个重要方面。  
船舶运动预报就是根据历史数据的特点，估计出一段时间后的船舶运动  
状态，提前对船舶姿态做出调整，使船舶尽量保持平衡，有利于船舶的  
适航性和船员的适居性。   
 船舶减摇是船舶与海洋工程的重要课题之一。从国内外的情况来看，  
减横摇的技术已经日趋成熟并逐步走向完善，而减纵摇的问题还没有得  
到很好的解决。如果能够找到有效的减纵摇方法，对于舰载飞机起降、  
船舶安全性等都是十分有意义的。   
 本文针对船舶运动姿态预报做了各种方法的分析研究。   
首先，应用切片理论建立了在随机海浪作用下的船舶纵向运动水动  
力数学模型，分析了运动模型的系统稳定性。应用谱拟合方法，建立了  
海浪扰动成形滤波器，对海浪扰动力及扰动力矩进行了建模。将海浪扰  
动成形滤波器作为船舶纵向运动系统的一部分，建立了船舶增广纵向运  
动方程，求解方程产生了船舶纵向运动，分析了船舶纵向运动潜周期性。   
 由于海浪是典型的平稳随机过程，同时它又具有较强的相关性和周  
期性，受海浪扰动力的船舶运动姿态也有一定的周期性，因此可以用一  
系列的周期序列项来描述船舶运动。采用平滑周期图算法对海浪干扰下  
的船舶纵向运动进行建模预报。   
本文又利用自回归AR法，多层递阶的方法对船舶运动姿态预报做了  
分析。   
   
关键词：船舶运动；成形滤波器；AR法：多层递阶：平滑周期图算法   
   
   
   
I

船舶运动姿态预报综述 /root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/8d891be8bf494711b3684e47f2ace74e.jpg.sub1.png  
   
Abstract   
There are a lot of noulinear systems in practice , so the research of   
noulinear system is very impotant . The modeling and prediction of noulinear   
system one of its applications . According to the characteristics of historical   
data estimate the ship motion after some time. Adjust ship posture ahead to   
keep the ship balance , this is conducive to ship navigation and crew’s   
habitability .   
 The shorted prediction for and control the ship longitudinal movement   
of shipping is essential to safe catapulting and the efficient navigate and curb   
of vessel .Because of action of ocean wave、wind and the other interactions，  
shipping has complex movement in six degrees.so it is very difficult for us to   
predict and control the movement attitude of shipping in a very short period   
and it needs further study whether in theory or real project，the problem   
solved in this paper is the tenth five-year plan national scientific research   
fund subsidization topic，having practical value.   
This paper selected ship longitudinal motion as researching subject ，  
and did research on modeling and prediction of ship motion .   
 Firstly , based on the strip theory , the hydrodynamic mathematical   
model was given for ship longitudinal motion forced by random sea . It was   
analyzed that the system stability of motion model .   
 Applying spectrum fitting , it was given that forming filter of sea   
disturbance , which modeled for the disturbing force and moment of random   
sea . Forming filter of sea disturbance being part of ship longitudinal motion   
system , it was given that the ship augmenting longitudinal motion，analyzed   
latent Periodicity of ship longitudinal motion .   
 Because wave disturbance was typical stationary random process , it   
could be described by a series of periodic sequence term . It studied Smooth   
Periodogram Algorithm modeling and prediction to predict wave disturbance   
   
II

船舶运动姿态预报综述 /root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/9143663969e9413ea8fd214cc22ecb1d.jpg.sub1.png  
   
Key words ： The ship movement ； Forming filtering ；AR；Multi 一   
level recursive theory ； Smooth Periodogram Algorithm   
   
   
III

船舶运动姿态预报综述 /root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/4aa091e14bce4785bd48beb6a14aff26.jpg.sub1.png  
   
目 录   
摘 要 ..............................................   
I   
Abstract ...........................................   
II   
目 录 .............................................   
IV   
第1章 绪论 ........................................   
1   
1.1 课题来源、背景和意义 ................................. 1   
1.2 船舶运动建模预报的研究与发展现状 ..................... 1   
1.3 本文所做主要工作 ..................................... 4   
第2章 船舶运动分析 ................................   
5   
2.l 坐标系 ............................................... 5   
2.2 船舶运动方程及受力分析 ............................... 8   
2.2.1 船舶运动建模简介 ................................ 8   
2.2.2 切片理论与船舶运动建模概念 ...................... 9   
2.2.3 船舶运动受力分析 ............................... 11   
2.3 船舶纵向运动分析 .................................... 11   
2.3.1 船舶纵向运动微分方程 ........................... 12   
2.3.2 船舶纵向运动连续系统状态方程 ................... 13   
2.3.3纵向运动状态空间方程稳定性的判定 ............... 13   
2.4 本章小结 ............................................ 14   
第3章 AR模型建模预报方法及应用 ..................   
15   
3.1 AR模型的数学基础和理论依据 .......................... 15   
3.1.1 自回归（AR）法建模及预报 ....................... 15   
3.1.2 自回归（AR）法的预报模型 ....................... 18   
3.2 自回归（AR）法建模及预报 ............................ 21   
3.2.1 参数的估计 ..................................... 21   
3.2.2 阶数的确定 ..................................... 26   
3.2.3 AR预报方法 .................................... 30   
3.3 船舶姿态运动预报结果分析 ............................ 30   
   
IV

船舶运动姿态预报综述 /root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/06ef29e0af334d198611d622a2d76802.jpg.sub1.png  
   
3.4 本章小结 ............................................ 32   
第4章 周期图及平滑周期图算法 ......................   
33   
4.1 问题的提出 .......................................... 33   
4.2 周期图的引入 ........................................ 33   
4.3 周期图算法 .......................................... 37   
4.4周期图算法的性能分析 ................................. 39   
4.4.1周期图估计的平均值 ............................. 39   
4.4.2 周期图谱估计的方差 ............................. 41   
4.4.3 谱分辨率与“谱泄露” ........................... 43   
4.5 平滑周期图算法 ...................................... 43   
4.5.1窗函数法 ....................................... 44   
4.5.2 平均法 ......................................... 45   
4.5.3 Welch 法 ...................................... 46   
4.6 本章小结 ............................................ 47   
第5章 多层递阶方法预报 ...........................   
49   
5.1 多层递阶预报方法 .................................... 49   
5.1.1 基本多层递阶预报方法 ........................... 49   
5.1.2 多模型多算法综合多层递阶预报方法 ............... 54   
5.2 具有引导变量的预报模式 .............................. 55   
5.3 AR模型与多层递阶预报模型的比较研究 .................. 56   
5.4 本章小结 ............................................ 57   
结 论 ..............................................   
58   
致 谢 .............................................   
59   
参考文献 ...........................................   
60  
   
   
V

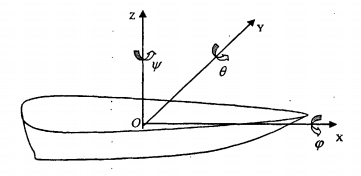
船舶运动姿态预报综述 /root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/1e053e6c3acd4004a5badd571f23e53b.jpg.sub1.png  
   
第1章 绪论   
1.1 课题来源、背景和意义   
船舶在海浪中航行受到海浪、海风等环境因素干扰，不可避免地产  
生摇摆，尤其在恶劣的海况条件下，对船舶的海上作业造成很大的安全  
隐患。如果能提前几秒或十几秒预报出船舶的姿态或运动趋势，从而提  
前对船舶姿态做出调整，使船舶尽量保持平衡，有利于船舶的适航性和  
船员的适居性。船舶运动姿态建模预报是指利用船舶运动姿态的观测数  
据对船舶运动姿态规律建立模型并能预报未来几秒或十几秒钟的船舶姿  
态。这项工作对于舰载机在船舶上的安全起降，武备系统的高精度性能，  
船舶有效航行与控制都是非常重要的。它可以增加舰载机着舰的安全性，  
减少舰载机着舰事故的发生，提高导弹发射精度，从而提高船舶在海上  
的作战能力。在船舶发生的各种事故中，以船舶受恶劣气候及大风浪影  
响并产生剧烈摇荡从而导致船舶受损甚至倾覆沉没的实例最为多见，因  
此为了船舶的有效控制，对船舶进行有效的建模预报是迫切需要的。   
1.2 船舶运动建模预报的研究与发展现状   
对船舶运动的极短期建模预报的研究在国内外已取得不少的研究成  
果，有的已应用于实际，研究方法既有频域分析法，也有时域分析法。  
归纳起来主要有如下几种。   
 （1）统计预报方法   
 Wiener 提出平稳时间序列预报方法，该方法是以积分方程为分析工  
具并使均方误差为最小的最佳线性预报。这种预报方法，应用于实际的  
船舶运动预报显然有诸多的限制因素。   
 (2）卷积方法   
 最早，P . KaPlan 等人利用卷积法对船舶运动进行了预报，即采用  
基于可测量的舶前某处波高作为输入信号，并将其与船舶响应核函数作   
   
1

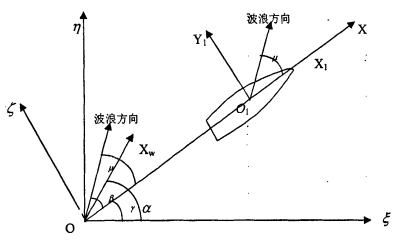
船舶运动姿态预报综述 /root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/3f53c1dbf7004a3b8a5a9e8641629f14.jpg.sub1.png  
   
卷积，得到船舶运动预报。这种方法因需精确的响应核函数和波高测量  
函数，故在实际应用中受到限制。   
 (3）卡尔曼滤波法   
 卡尔曼滤波是一种递推的线性最小方差滤波器，适用于在线的实时  
计算。对于横摇的预报方法还是有效的。由于该方法需知船舶的状态方  
程，当水动力参数和环境发生变化时，状态方程很难准确给出，因此，  
尽管卡尔曼滤波能处理有噪声干扰的情形，而且计算简单，但是在实际  
中直接应用是不恰当的。   
 （4）谱估计方法   
 经典谱估计方法有两种方法，即周期图法和自相关法。周期图法又  
称直接法。自相关法，也就是通常所说的间接法。由这种方法求出的功  
率谱是通过自相关函数间接得到的，所以称为间接法，又称自相关法（或   
BT法）。   
（5）时间序列分析法   
 用时间序列分析法预报船舶运动，避免了用卡尔曼滤波法时须知船  
舶运动准确的状态方程的麻烦，只需利用船舶或海浪的历史数据，建立  
时间序列模型来预报船舶运动未来值。Enochson 最先讨论了由船舶数据  
建立ARMAX 模型的问题，由于在当时缺少对大型矩阵进行处理的设备，  
要处理ARMAX 建模中的大矩阵只能在大型计算机上进行，而且操作很繁  
琐，所以当时没能把该方法应用到实船上。   
 (6）艏前波法   
 艏前波法的基本原理就是利用船舶摇摆观测数据和船舶舷前波浪  
的观测数据，对船舶摇摆建模及预报。利用艏前波法进行预报的步骤一  
般是：首先分析波浪和船舶姿态运动的历史数据，利用递推最小二乘法  
辨识模型的参数，用艾克准则判断模型的阶数，建立预报模型，利用测  
得的舷前波幅数据，根据预报模型来预报。运用艏前波法进行船舶姿态  
预报时遇到的主要麻烦是对距船舶一定距离处的浪高测定很困难。   
 (7）人工神经网络法   
   
2

船舶运动姿态预报综述 /root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/2ccee4c7d71b48b1bf3844985ca4da1c.jpg.sub1.png  
   
 近年来，国际上掀起了一股神经网络的研究热潮，人工神经网络独  
特的结构和处理信息的方法使其在许多实际应用领域中取得了显著成  
效。   
神经网络系统是由大量的、同时也是很简单的处理单元（或称神经  
元）广泛的互相连接而形成的复杂网络系统。其信息处理功能是由网络  
单元的输入输出特性（激活特性）、网络的拓扑结构（神经元的连接方  
式）、连接权的大小（突触联系强度）和神经元的阈值所决定的。利用  
上述不同特性的不同组合，一可获得不同功能的人工神经网络。随着人  
工神经网络在各个领域的广泛应用和研究，国内已经有许多人把这一方  
法用于舰船运动姿态预报研究中。人工神经网络的数学基础是逼近论，  
逼近论的基本问题是用简单表示复杂，例如，用多项式来近似人意的连  
续函数，该方法把过去一段时间内的运动数据作为网络输入，让网络进  
行学习，并通过一些规则，对神经网络的连接权和神经元间的阑值进行  
调整，使得对于给定的一系列网络输入都能得到期望的网络输出，即正  
确的预报值。该方法的优点是只要给网络一定的学习样本，通过训练，  
网络可以自主地找出映射规律，从而给出期望输出。这样可以省去数据  
分析和建模过程，给问题的处理带来很大方便。参考前人所作的工作可  
以得出人工神经网络对舰船运动姿态预报，预报结果可达5-7秒。尽管  
人工神经网络逼近非线性函数的能力己在理论和应用方面得到广泛研  
究，但是，其逼近还存在某些缺陷。例如：在许多情况下，神经网络的  
Sigmoid 函数逼近，需有很多步迭代才能达到所要求的下降量，而且神  
经元的输出接近饱和时，该神经元的输出对权值的调整将不敏感，误差  
曲线往往有局部极小值存在，而且这些局部极小点处的误差还比较高，  
要避免这些局部极小达到全局极小是个复杂的问题。   
除上面介绍的几种方法之外，在国内有人专门研究了AR 建模预报  
法，非线性建模预报法，利用灰色系统理论建模预报法。   
综上所述，在国内外对船舶运动极短期建模预报的研究中，所采用  
的方法既有频域分析法也有时域分析法．在频域分析法中，最有吸引力   
   
3

船舶运动姿态预报综述 /root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/ceaa011e3e8342ccb69d0e67f60d11f0.jpg.sub1.png  
   
的方法是卷积法，在时域分析法中，最有效且最容易实现的方法是时间  
序列分析法。   
1.3 本文所做主要工作   
本课题研究所做的主要工作如下：   
(1）船舶纵向运动分析，应用切片理论得到船舶运动六自由度水动力  
微分方程，建立状态空间模型；   
 (2）AR模型的建模预报方法；   
 (3）基于平滑周期图法完成船舶运动的建模预报工作；   
(4)多层递阶预报方法及其与自回归AR法的对照；   
 通过上述工作，对船舶的运动姿态预报的方法进行了较深入的研究，  
得到相应结论，对于实际应用具有参考指导意义。   
   
   
   
   
   
   
   
   
   
   
   
   
   
   
4

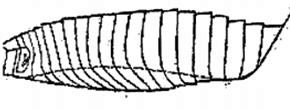
船舶运动姿态预报综述 /root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/69289ec347ce45f090762461b9fdc60a.jpg.sub1.png  
   
第2章 船舶运动分析   
2.l 坐标系   
船舶在航行时，由于会受到多种环境因素的影响，再加上船舶本身  
舵、螺旋桨等各种推动和控制力作用，会产生复杂的运动。由于一般船  
舶的外形设计是很复杂的，故它在水中运动时与流体之间的作用也是复  
杂的，为研究船舶预报控制，必须建立船舶运动模型。   
为研究船舶运动及受力情况，了解船舶在每个时刻的各运动参数的  
方向和大小，需要建立船舶运动的坐标系。船舶在海上航行时，必然受  
环境因素扰动产生振荡运动。如果把船作为刚体，则这种运动一般应有  
六个自由度。图2-1给出振荡运动的示意图。船舶相对于坐标系的六个  
自由度运动是：   
(1）沿三个坐标轴的往复振荡   
X -- 进退运动   
Y -- 横荡运动   
Z -- 升沉（或垂荡）运动   
 (2）绕三个坐标轴的旋转振荡   
φ--横摇，绕x 轴的旋转振荡   
θ--纵摇，绕y 轴的旋转振荡   
ψ--舷摇，绕z 轴的旋转振荡   
这些运动按图2-1中的箭头方向取正值；与箭头方向相反的取负值。  
为了描述船在海浪中的运动，需要对坐标系统结出全面的定义。通常采  
用垂直轴向上的右手坐标系，有如下五个坐标系统：   
 (1）相对于地球是固定的坐标系统  *  
  
OO*  
这是绝对坐标，原点取在海面的某一点，面与静水面 *11  
  
Q*  
重合，轴垂直向上。该坐标系用来描述海浪本身而不考虑船的位置 *1*  
和方向。   
 (2）相对于风是固定的坐标系统   
   
5

船舶运动姿态预报综述 /root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/65657405141a4874b9585926845a0359.jpg.sub1.png  
   
用，表示该坐标系，其原点与（1）相同，X正方向为 *OXYZ*  
w *1www*  
风前进的方向。通常用该坐标系求得海浪谱。   
   
图2-1船舶六自由度运动示意图   
 (3）相对于运动的船舶是固定的坐标系统   
以表示该坐标系，原点也和（1）相同，与静水面 *OXYZoXY  
1111111  
  
oXo*  
重合，的正方向为船首方向。若与轴成γ角（图2-2 ) ， *oX  
111  
11  
*  
则该坐标系与坐标系的关系是：  *O  
1  
  
XcosYsin  
   
11  
   
  
XsinYcos*  
 （2-1）  *  
11  
  
  
Z  
  
1*  
坐标系用来计算船的响应幅值算子。   
 (4）随船移动的平衡坐标系统   
该坐标系与平行，原点常取在船未受波浪扰动时 *OXYZ  
OXYZ  
111*  
的重心G 点，以与船速为U 的同样速度沿OX方向移动。因此，在t = O  *OXYZ*  
时，两坐标原点重合；在时间为t 时，船上任意点相应于坐 *1111  
XXUtYYZZ*  
标系是：，,  *111  
  
O*  
 而相应于。坐标系是：  *1*  
  *  
XcosYsinUtcos  
   
   
  
XsinYcosUtsin*  
 (2-2)  *  
  
  
Z  
*   
   
   
   
6

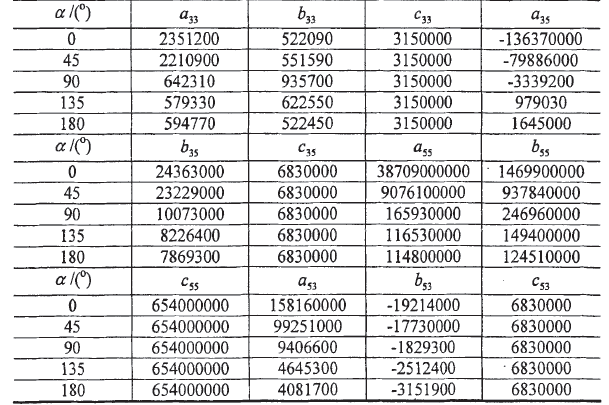
船舶运动姿态预报综述 /root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/49833e2989234ecaa04500fcbfa8b087.jpg.sub1.png  
   
按平衡坐标系给出的任意一波型坐标是：  **  
 (2-3)   
*cos(kXcos**kYsin**t)  
e*  
式中：μ=β-γ---波与船的遭遇角  *=-Ukcos*  
 ωω*μ*---遭遇频率   
e  
   
 图2-2 用于船舶耐波性分析中的坐标系   
该坐标系有波浪与船遭遇的意义，用于得到船的响应幅值算子。   
当μ＝0 时，波浪前进方向和船一致，称为顺浪航行。其遭遇频率为：  *Uw*   
 ω=ω（1-）   
e/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/49833e2989234ecaa04500fcbfa8b087.jpg.sub3.png *g*  
当μ＝π时，波浪和船的前进方向相反，称为迎浪航行。其遭遇频率为：  *Uw*   
 ω=ω（1+）   
e/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/49833e2989234ecaa04500fcbfa8b087.jpg.sub4.png *g   
  
  
3*  
当μ=或时，ω=ω,称为横浪航行；   
e/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/49833e2989234ecaa04500fcbfa8b087.jpg.sub5.png/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/49833e2989234ecaa04500fcbfa8b087.jpg.sub6.png *2  
2  
  
  
4578*  
当≤μ≤或≤μ≤时称为艏斜浪航行； /root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/49833e2989234ecaa04500fcbfa8b087.jpg.sub7.png/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/49833e2989234ecaa04500fcbfa8b087.jpg.sub8.png/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/49833e2989234ecaa04500fcbfa8b087.jpg.sub9.png/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/49833e2989234ecaa04500fcbfa8b087.jpg.sub10.png *6666   
π  
2π10π11π*  
而当≤μ≤或≤μ≤时称为艉斜浪航行。 /root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/49833e2989234ecaa04500fcbfa8b087.jpg.sub11.png *6*/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/49833e2989234ecaa04500fcbfa8b087.jpg.sub12.png/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/49833e2989234ecaa04500fcbfa8b087.jpg.sub13.png/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/49833e2989234ecaa04500fcbfa8b087.jpg.sub14.png *66  
6*   
 ( 5 ）固定在船上的坐标系统  *o-xyz*  
以表示该坐标系，其原点在船重心G 处，与船一齐移动和作振荡  
运动。Gx 轴的正方向是船首方向，Gz 轴垂直向上，Gxy平行于船   
   
7

船舶运动姿态预报综述 /root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/5290a308fc4e48aeab72fab1dd150cdc.jpg.sub1.png  
   
的静水面 。   
2.2 船舶运动方程及受力分析   
2.2.1 船舶运动建模简介   
船舶运动方程的建立对于船舶运动控制是至关重要的。推导一整套  
描述船舶在波浪中运动的微分方程式是由克雷洛夫于1898 年开始的。  
但是一直到1953 年丹尼斯、皮尔逊等人于理论上获得成功，并在几个  
水池建立了耐波性试验设备后，船舶摇摆才变为一个积极的研究领域。  
最初的这些研究是如何确定船在迎浪情况下纵摇和升沉的响应。考锱莱  
探讨了船有一定航速并与波浪成任意方向时，藕合有纵摇升沉的横摇运  
动线性解。   
自从克雷洛夫等建立一整套船舶运动微分方程以来，至今已经一百  
多年了，但是用理论计算方法预报船在海浪中的运动性能，只是近二十  
多年才有突破性发展。主要表现在以下两个方面：   
 (1）运动方程里的水动力（矩）参数的计算   
 (2）海浪的不规则性   
 50 年代初期，纽曼和皮尔逊应用通讯工程中研究不规则讯号理论  
研究了海洋波浪。1953 年，丹尼斯和皮尔逊发表了“不规则海浪中的船  
舶运动”，成功地应用概率统计理论处理海浪及船在波浪中的不规则运  
动问题。关于运动方程中的水动力（矩）参数，目前有多种计算方法，  
比较早期的是50年代中期的考文一克劳科弗斯基用相对运动概念导出  
船舶迎浪纵向运动方程的系数，通常称为普通切片法。后来高木又男、  
田才福造等人应用二因次流体理论计算附加质量与阻尼力的方法，称为  
新切片法，它适用计算任意浪向的情况。还有赛尔维逊等人提出的STF  
法。从力学模型上，它与新切片法是相同的。由于电子计算机的广泛应  
用和发展，目前己能用切片理论预报船舶在迎浪以及斜浪中的运动性能，  
给出满足工程要求的精度。   
   
8

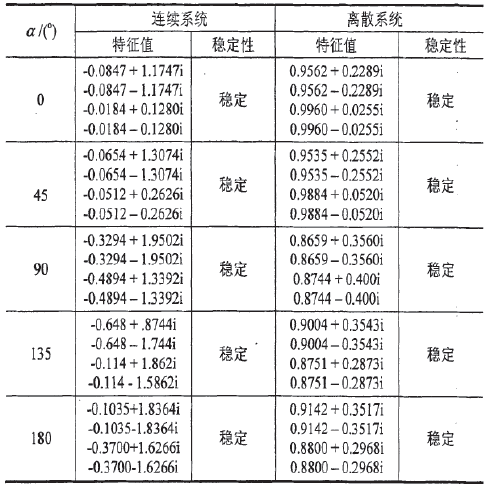
船舶运动姿态预报综述 /root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/9ee162160e6d42dc8263907e54cfb2b0.jpg.sub1.png  
   
2.2.2 切片理论与船舶运动建模概念   
船舶在海浪中的摇摆运动是船舶受到海洋风浪干扰后的一个重要的  
物理现象。它直接影响了船舶在波浪中的航速，甲板上浪和船体弯矩等  
物理现象。研究船舶摇摆运动有三个基本途径：船模实验、实船实验和  
理论的分析方法。这三者都有它自己处理问题的方法，但也不是完全孤  
立的，都有一定的联系。   
理论上研究船舶摇摆的方法主要归结于列出、分析和解出各不同摇  
摆运动的微分方程。要精确地估计船和流体之间的相互作用，将造成数  
学上的很大困难。尽管有人进行了船在斜浪情况下六自由度或五自由度  
祸合的船体摇摆运动的研究，并给出相应的结果，但由于有些祸合项在  
数量上相对的较小，因此实用上总是采取一系列的简化假设，使其针对  
几个最简单的藕合情况的摇摆运动.   
关于船舶摇摆运动的理论研究，有过如下四种理论：   
(1)窄船理论--假定船宽远比船长小，而船的吃水和波长、船长相比  
均属于同一数量级；   
(2)平板船理论--假定船吃水远比船长小，而船宽和波长、船长相比  
均属于同一数量级；   
(3）细长船理论--假定船宽和吃水远较船长小，而波长和船长是同  
一数量级；   
(4）切片理论--假定船宽、吃水和波长等远较船长小。   
上述四种理论都是将船作为刚体来研究。但是，窄船理论和平板船  
理论没能从几何形状上充分的描述船舶；细长船理论和切片理论则克服  
了前两种理论的缺点，而细长船理论和切片理论的差别主要在于船受到  
的波浪扰动不一样。从理论上讲，尽管切片理论较其它几种理论都要粗  
糙，但是通过大量的试验证明，由切片理论给出的船舶摇摆运动的响应  
幅值算子与船模试验结果还是很一致的。特别是切片理论计算相对简单   
方便，因此在工程应用上都是以切片理论来研究船的摇摆运动和耐波性。   
   
9

船舶运动姿态预报综述 /root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/bfeaa2b748fc41b48288273af28577ee.jpg.sub1.png  
   
目前，研究船舶在海浪中的运动性能，仍然基于两个理论：(1）线  
性理论－一波浪是微幅的，因而船舶的摇荡运动也是微幅的；(2）切片  
理论－一把船体摇荡时周围流体运动的空间问题化为平面问题，即平面  
流假设。就是把船体当作一个细长体，取一个微小长度的横剖段来考虑，  
流体在每个横剖段作二因次流动，不考虑流体动力沿船长方向的相互干  
扰。尽管目前在理论上己经能够在线性理论的范围内根据船体运动的边  
界条件求解三维情况下的扰动速度势（包括辐射势和绕射势），从而确  
定船在波浪中运动时的受力和运动特性，但是这些求解过程将十分复杂  
和费时，尤其是有航速情况更甚。即使在高速大容量电子计算机充分发  
展的现在，将三维计算方法应用于工程实际，还是受到某些限制，其中  
最主要的原因是出于经济上的考虑。因此，在实用上，人们仍然倾向于  
使用从五十年代以后发展起来的简化的理论模型，切片理论就是其中应  
用和考虑比较成熟的一种。   
   
 图2-3船体切片近似示意图   
切片理论实质上是一种近似方法，它充分利用船体细长这一特点，  
认为至少在船体的相当部分，流动主要局限于横向截面内，从而把围绕  
船体的本质上的三维流动简化为绕各横截面的二维流动。按二维流动求  
得各横截面遭受的流体作用力后，再沿船长方向迭加（积分）以求得船  
体上总的流体作用力（图2-3 形象地描述了切片理论的基本思想）。由  
图2-3 可见，我们事实上将船体沿纵向划分成若干等截面的切片，对每  
一切片来讲，流动是二维的，即相当于无限长柱体在流场中的绕流问题，  
各切片的流体动力问题可独立求解，最终沿船长方向迭加。   
目前，用切片理论进行船舶在海浪上运动的计算和预估已发展成一  
种常规的实用手段。一方面，固然是因为切片法远较三维计算经济，另   
   
10

船舶运动姿态预报综述 /root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/eac77d2907714f92a152c4b1154e64c3.jpg.sub1.png  
   
一方面，为数众多的试验研究和实践证明，由于船体细长（这对于军用  
船舶更能满足）的特点，在许多情况下切片法的计算结果已足以准确地  
描述船舶的运动。   
2.2.3 船舶运动受力分析   
由于船舶形状的不规则以及它所处环境的复杂性，精确的计算船舶  
所受外力和力矩是相当困难的，通常是在一系列较强的假设条件下作近  
似处理，常见的假设主要有：   
(1)假设船体和它的各种附件（鳍、舵）所受水动力彼此不相关，这  
样一来，整个船舶所受的水动力可以认为是船体所受水动力及各种附件  
所受水动力的线性叠加。   
(2)假设船舶是在无限均匀流场中运动，因此可以不考虑流场边界的  
几何特征以及船舶在水平面内所处位置的影响，并且可以运用势流理论  
进行力的计算。   
(3)假设水动力中的惯性力和粘性力是彼此不相关的，这样，水动力  
可以认为是惯性力和粘性力的线性叠加。   
 基于以上假设，我们把船舶在水中运动中所受的力分为两部分，一  
部分是船舶所受的随机力和力矩，它是由海浪、海流以及海风等随机干  
扰引起的力和力矩，关于这些力和力矩我们可以用实验的方法获得有用  
信息，加以处理，得到拟合出的海浪力和力矩；另一部分是船舶运动时，  
我们所加在舵上的控制力和力矩。   
2.3 船舶纵向运动分析   
在线性范围内，六个自由度的摇荡运动方程可以分解为两组祸合方  
程，即   
(1)纵向运动－一升沉（垂荡），纵摇和纵荡（进退）   
 (2)横向运动－一横荡，横摇和舷摇   
纵向运动和横向运动之间的藕合影响很小，可以忽略。在纵向运动中，   
   
11

船舶运动姿态预报综述 /root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/0261fbc16f484f93afdd5f2de55e4935.jpg.sub1.png  
   
由于进退运动对升沉和纵摇运动的藕合作用较小，通常亦予以忽略。因  
此，又可以把六自由度的摇荡运动分为三组，即   
(1)纵荡运动   
 (2)升沉和纵摇运动   
 (3)横向运动（横荡，横摇和脂摇）   
对于船舶纵向运动分析，由于自由状态下船舶的纵荡运动一般不重  
要，并且上面第二种分类方法中的第二组方程在船模水池中研究起来很  
容易，现已用切片理论的方法分析研究过顶浪状态下的垂荡与纵摇藕合  
运动，并且通过实验已毫无疑义地证实了这种手段的有效性，所以取上  
面第二种分类方法中的第二组方程即可。   
2.3.1 船舶纵向运动微分方程   
在波浪中航行的船舶，根据船舶水动力理论，纵向运动方程可表示  
如下:  **  
(*a**m*)*z**bz**cz**a**b**c**F**F*  
333333353535*RW*3   
 (2-4)  **  
(*I**a*)*b**c**az**bz**cz**FX**M*  
5555555535353*RRws*   
 水动力参数采用切片理论并结合实船测量得出，以3 级海情，18节  
航速为例，水动力参数计算结果如表2-1所示。   
表2-1 3级海情18节航速纵向运动   
   
   
12

船舶运动姿态预报综述 /root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/0698d1cb2d234cfabb9c775f8746f7f9.jpg.sub1.png  
   
水动力参数计算结果   
式中: z ----表示船体的升沉（垂荡）   
θ----表示船体的纵摇   
 m----表示船体质量   
   
 I----表示纵向惯性矩  
5  
 F----水平舵升力   
r  
 F----海浪升沉（垂荡）干扰力   
w3  
 M----海浪纵摇干扰力矩   
w5  
X----舵升力中心至船体重心的纵向距离。   
r  
2.3.2 船舶纵向运动连续系统状态方程  **系统状态方程**  令状态变量为  *  
T T  
   
X**xxxx**z z*  
  *1 23 4  
. ..   
..   
  
  
zz*  
z----升沉，----升沉速度，----升沉加速度，----纵摇角，---- *..   
*  
纵摇角速度，----纵摇角加速度。   
则状态方程如下：  *.   
XAXBucW*  
   
 （2-5）  
令u=F=0，即研究没有控制只存在海浪扰动情况下系统的状态，其状态  
r  
方程如下：   
X=AX+CW   
2.3.3纵向运动状态空间方程稳定性的判定   
在自动控制理论的学习中，我们知道：一个因果连续系统，如果其  
系统函数H(s)的所有极点都位于S 平面的左半开平面上，则该系统是稳  
定的。一个因果离散系统，如果系统函数拭H(z)的所有极点都位于Z 平  
面的单位圆内，则系统是稳定的。   
   
13

船舶运动姿态预报综述 /root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/c78c1a8d57a74dcab284b28fd40cc5c3.jpg.sub1.png  
   
以3级海情，18节航速为例，求得纵向运动方程的连续系统和离散  
系统的特征值如表2-2所示，由表2-2可知，纵向运动方程是系统稳定  
的。   
表2-2 纵向运动方程连续系统和离散系统特征值和稳定性   
   
2.4 本章小结   
应用切片理论建立了船舶运动六自由度水动力微分方程，建立了船   
   
舶运动连续系统和离散系统状态空间模型。船舶运动连续状态空间方程  
中的极点均分布在左半平面或虚轴上，离散化后分布在单位圆内或单位  
圆上，所以它们都是稳定或临界稳定的系统。   
   
14

船舶运动姿态预报综述 /root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/39bfbe5cc7524c7997f6e58f0dc93235.jpg.sub1.png  
   
第3章 AR模型建模预报方法及应用   
3.1 AR模型的数学基础和理论依据   
自回归(AR)法是利用船舶摇摆观测数据，对船舶的横摇进行建模及  
预报的。从广义上讲主要分为两大部分：   
第一部分是数学模型的建立；第二部分是系统模式识别。所谓数学  
模型，可定义为实际过程运动规律的定量表示，数学模型的建立可分为：   
(1) 分析法──纯理论的利用各种定律推演出描述系统的数学模型；   
(2) 实验研究法──“系统辨识”利用观测到的数据，构造数学模型。  
“系统辨识”是通过实验或运用数据来估计控制对象的数学模型和参数  
的理论方法，分为离线和在线辨识。在离线辨识中，计算机对数据处理  
方式多是一次成批处理，采用非递推算法；而在在线辨识中，辨识是在  
在线完成，数据处理可以用两种方法：实时处理或间歇式处理，采用递  
推算法。   
在实际应用中多是将二者结合起来，比如尽量利用对物理过程的认  
识，将系统模型结构分成已知的和未知的两部分，然后用实测数据运用  
数学方法进行辨识，将未知不分估计出来。从而建立起系统或过程的数  
学模型。   
自回归法采用的数学模型是AR模型。   
3.1.1 自回归（AR）法建模及预报   
定义1：为随机序列，如果它满足如下方程：  *pq*   
   
 *  
aXn**j**bn**j  
j j*   
 （3-1）  *j*0 *j*0   
 *  
a  
n*,*n*0,1**  
其中=1，为白噪声序列或时间相关的随机序列，  
0  
则称由方程（3-1）表示的模型为自回归滑动和序列模型，通常用ARMA  
 *  
n*,*n*0,1,**  
表示。可以把随机序列视为模型的输入，把随机序列   
 *Xn*,*n*0,1,**  
作为模型的输出。   
   
15

船舶运动姿态预报综述 /root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/e54d51469a914a7e97d5cff4b11960dd.jpg.sub1.png  
   
当p=0时，（3-1）式变为  *q   
   
  
  
Xn**bn**j  
j*  
 （3-2）  *j*0   
称为滑动和序列模型，即MA序列模型。当q=0时，（3-1）式变为  *p   
   
  
  
aXn**j**bn  
j* 0  *a*1  
  *j*0   
0  
 (3-3)   
称为自回归序列模型，或称为AR序列模型。将p称为自回归序列模 *  
Xn*,*n*0,**1,**  
型的阶，有时称随机函数序列是随机序列  *  
*  
的p阶自回归。  *n*,*n*0,**1,*  
*  
设为已知的测量数据，并假定是零均值平稳序  *Xn*,*n*1,2,**,*N*  
列。如果测量序列非零均值平稳序列，可先估计出均值序列  *  
  
*/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/e54d51469a914a7e97d5cff4b11960dd.jpg.sub2.png/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/e54d51469a914a7e97d5cff4b11960dd.jpg.sub3.png  
，然后讨论序列。进而假  *Xn*,*n*1,2,**,*N  
XnXn*,*n*1,2,**,*N*  
设此序列满足如下自回归模型  *p   
   
  
  
aXn**j**n  
j  
a*1  
  *j*0   
0  
 (3-4)   
其中方程  *p   
  
pj  
a z*0  *j*   
  *j*0  *  
  
n*,*n*0,**1,*N*  
的根均在单位圆内，通常为白色序列，此处为测   
量误差，且  **  
22 *  
En*  
  *  
a*,*j*1,2,**,*p*  
P为模型的阶，是模型中的系数。为此，令（3-4） *j*  
式中的n=p+1,p+2,„,N 则有：  *N2p  
  
  
Xp*1*aXpaXp*1*aX*1*p*1  
   
12*p  
  
  
Xp*2*aXp*1*aXpaX*2*p*2  
   
12*p*  
 „„  *  
  
XnaXN*1*aXN*2*aXNpN*  
 (3-5)   
12*p*  
若定义   
   
16

船舶运动姿态预报综述 /root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/869a368cfdca4d34bc73a9bc7b3d7fb9.jpg.sub1.png  
  *T   
  
  
   
XXp1Xp2XN  
  
   
   
XpXp1X1  
  
  
  
  
Xp1XpX2  
  
  
   
  
  
  
   
  
XN1XN2XNp  
  
   
   
T   
   
aaaa  
12p  
  
  
T  
  
   
p1p2N*  
于是可将式（*3-5*）写成向量方程为 *  
Xa* （*3-6*） *ˆ  
a*  
设是的某一估计，估计的目标函数*J*取为 *a   
  
T  
ˆˆ  
  
JXaXa* （*3-7*） *ˆˆ*  
求使 *aa  
LS  
  
T   
ˆˆ  
JXa Xamin* （*3-8*） *ˆ*  
此时称为系数向量 *a   
a,a,,a  
ˆ*  
的最小二乘估计，通常简记为， *a  
  
LS  
12p  
ˆ  
a*   
可通过求解如下方程 *LS  
J*/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/869a368cfdca4d34bc73a9bc7b3d7fb9.jpg.sub2.png *0   
ˆˆ  
a a  
ˆ  
a   
LS* （*3-9*）  
得到，由（*3-8*）和（*3-9*）式可得 *J  
*/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/869a368cfdca4d34bc73a9bc7b3d7fb9.jpg.sub3.png/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/869a368cfdca4d34bc73a9bc7b3d7fb9.jpg.sub4.png *T   
ˆ  
   
2Xa0  
ˆˆˆˆ  
a aaa  
ˆ  
a   
LSLS*   
即： *TT  
ˆ  
Xa0  
   
LS  
ˆ  
ˆ  
a*  
则的最小二乘估计为 *a  
LS  
   
1   
TT  
ˆˆ  
a aX* （*3-10*） *LS  
  
  
n,n0*  
进一步可证明，当为正态白序列时，则残差序列  *  
  
en,np1,,N*  
为白噪声序列，所谓白噪声即是指由一个无关的随机  *  
st  
Covx,x0*  
变量的序列构成，即对于所有，的平稳随机过程。而  *st*  
且有  
   
17

船舶运动姿态预报综述 /root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/9f075bb82489460eba70306a11f2b4f4.jpg.sub1.png  
  *  
22  
  
EenN*  
  **  
其中定义为  *en*  
  *  
ˆˆˆ  
enXna Xn1aXn2aXnp  
*  
  *12p*  
 （3-11）   
3.1.2 *自回归（*AR*）法的预报模型*   
同理，由式（3.4）可以建立自回归法的预报模型为：  *p   
   
  
  
xnlaxnin  
i*  
 （3-12）  *i0*   
式中为预报步数。此模型即为线性、定常、离散动态模型， *l1,2,  
  
  
n*  
如果不把看作输入，则可认为模型是单输入单输出情况。  **  
令 ，则有  *N2p  
np1,p2,,N  
   
  
Xp1laXp1aXpaXp1aX1p1  
012p  
  
  
Xp2laXp2aXp1aXpaX2p2  
012p*  
„„  *  
  
XNlaXNaXN1aXN2aXNpN*  
  *012p*  
若定义  *  
  
T*   
  *XXp1lXp2lXNl  
   
Xp1XpXp1X1  
  
  
  
  
Xp2Xp1XpX2  
  
*  
  *  
  
  
  
  
XNXN1XN2XNp  
  
   
    
T*   
  *aaaaa  
0 12p  
  
  
T  
*  
  *p1p2N*  
于是向量方程可改写为：  *  
Xa*  
 （3-13）   
由于方程（3.13）是典型的最小二乘结构，所以利用最小二乘估计   
使   
   
18

船舶运动姿态预报综述 /root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/ba231b2b427648eabee7ee28a6267476.jpg.sub1.png  
   
2  *p   
  
n**N n**N   
  
*  
2  *  
kXk1aXkimin  
   
  
i  
   
k**n*1*k**n**li*0 *a*  
可求得 *i*  
令 *   
   
0*/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/ba231b2b427648eabee7ee28a6267476.jpg.sub2.png *a  
i   
ˆ  
a*  
计算可得系数的估计值为 *a   
   
1   
TT  
ˆ  
a X* （*3-14*） *ˆ*  
利用上式值可以求出船舶在未来第秒时的摇摆预报值为： *a   
nl  
p   
ˆ  
  
  
ˆ  
X nlaXni  
i* （*3-15*） *i0  
ˆ*  
从（*3-14*）式可看出参数的估计式形式上与稳态模型参数的最小二 *a*   
乘估计是一样的，但二者有着本质的区别，因为模型矩阵的表示式是 **  
不一样的。 *  
  
n*  
应当特别指出，此处的噪声序列未加任何限定。即是说，无论  *  
  
  
n*是白噪声还是其他形式的噪声，式（*3-14*）均成立，噪声*n*的   
性质仅影响最小二乘估计的统计特性。此外，要求观测次数是为 *N2p  
  
T  
  
  
n*  
了保证非奇异，另外还可以降低过程噪声的影响，从而提高  
参数估计的精度。 *ˆ*  
下面讨论一下的性质，也就是介绍最小二乘估计的统计特性： *a   
  
  
2  
  
  
n*  
因为是平稳白噪声序列，即：。由最小 *En0,Varn*  
二乘估计的统计性质可推出：  
(1) 无偏性 *ˆ  
a*  
是的无偏估计，即： *a   
   
1   
  
TT  
  
ˆ  
   
Ea aE0*  
所以 *ˆ  
   
Ea Eaa*  
(2)估计误差协方差 *ˆˆ  
a  
a a  
N*  
是渐进正态分布的随机向量，即当时的分布趋近于以  
   
19

船舶运动姿态预报综述 /root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/7519205fe3cb4f778adfb22903d32c5a.jpg.sub1.png  
   
为均值的   
正态分布。   
 **  
因为独立，所以  *n*  
 *T   
*  
  *Eij*0,*i**j*  
 *T   
2  
*  
  *Eii**I*  
  
 *T   
ˆ  
ˆˆ*  
=  *Vara   
Ea**aa**a*  
  
      
1 1 1  *TTTT*2 *T   
*  
 =  *E*    
(3) 有效性  *  
ˆ  
a*  
是的任一其它线性无偏估计，则  *a*   
设  
  
    
  *T   
*  
 *T  
ˆˆˆˆ*  
  *Ea* *aa**a**Ea**aa**a  
  
ˆ  
a*  
是的任一其它线性无偏估计，故可表示为  *a*   
这时 *  
ˆ*  
  *a* *LX*  
  
其中为矩阵，且  *p**1**N  
L*  
 *ˆ  
a**Ea**LEX**L**a*  
   
所以  *L**I*  
   
于是   
  
    
 *T   
  
ˆˆˆˆ*  
  
  *Ea EaaEa*  
    
 *T*   
=  *ELX**L**aLX**L**a*  
    
 *T   
T*  
=  *LEX**aX**aL  
2T  
  
LL*  
=   
又因为   
     
     *T*   
1 1 1  *TTTT TT  
0**L* *L* *LL*   
   
所以有   
   
1  *TT*  
  *LL*   
从而   
  
1   
2*T*2*T  
*  
  *LL*  
此式说明最小二乘估计是最小方差估计。   
(4) 渐进性   
   
20

船舶运动姿态预报综述 /root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/ee849d3c18df4192888bf1bf9bc4c242.jpg.sub1.png  
   
ˆ *a*  
是的一致估计量  *a   
1   
2  
  
1   
  
  
ˆ  
T*  
=  *LimVara  
lim  
*/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/ee849d3c18df4192888bf1bf9bc4c242.jpg.sub2.png/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/ee849d3c18df4192888bf1bf9bc4c242.jpg.sub3.png *NN  
   
N  
N  
2  
ˆ  
  
   
*  
=  *limR  
*/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/ee849d3c18df4192888bf1bf9bc4c242.jpg.sub4.png *1  
   
N  
N  
  
=0*   
以上关系表明：当过程噪声为白噪声时，最小二乘估计具有良好的  
统计特性。  *  
*  
应当指出，在许多情况下，是有色噪声，这时最小二乘估计可 *n*  
能是非一致的和有偏估计。为了要准确估计对象的参数，特别是噪声参  
数，尚需采用更复杂的参数估计算法，如辅助变量法、增广最小二乘法、  
极大似然法等。不过在有些控制方案中，参数估计不必满足一致性要求，  
所以这种计算简单的最小二乘估计的应用仍相当广泛。  *3.2 自回归（*AR*）法建模及预报*   
3.2.1 *参数的估计*   
当利用计算机对系统进行实时辨识时，如果采用式（3-14）求解参  *ˆ  
a*  
数向量的最小二乘估计，那么在实用中会产生如下问题：  *a   
  
xn*  
(1) 随着新的观测数据的不断增加，矩阵和向量X的维数随 **  
着观测次数N的增大而增大，占用的计算机内存量就愈来愈多，最好造  
成溢出甚至崩溃。  *TT  
X*  
(2) 与此同时实现矩阵相乘和的运算量也不断增大，最  **  
ˆ *xn*  
后有可能在一个采样周期内尚未算出时，而下一组观测值已采集 *a*   
下来，以致不能实现实时辨识。  *  
xn*  
(3) 计算机每得到一组观测值，都要重新作一次方阵的求逆运  
算，这将更加耗费机时，要解决以上问题，需要采用递推算法。   
递推算法的优点：   
(1) 每一步的计算量比较小，因而能够使用小型计算机进行离线或   
   
21

船舶运动姿态预报综述 /root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/f10d9b20220a495f903041beff3176f8.jpg.sub1.png  
   
在线计算。   
(2) 具有跟踪时变参数的能力，可以不断提供时变参数系统的实时  
模型。   
因此，通常都是由式（3-14）导出递推形式的最小二乘算法。为此，  
先介绍以下引理：  *nm*  
引理 1 设A为阶分块方阵，即  *A A  
*  
1112 *A  
  
AA  
*  
 （3-16）   
2122 *nm  
n  
m*  
其中和分别是阶和阶可逆方阵，为任意阶矩阵， *AAA*  
112212 *mn*  
为任意阶矩阵，则的逆矩阵存在且为：  *A  
A*  
21 *      
*1**1 *   
*1**1**1**1**1**1 *AAAAAAAAAAAAAAA  
1*   
111112222111122111111222211112  *A  
*  
=  *      
*1**1 **1**1**1  *AAAAAAAAAA  
  
*   
22211112211122211112  
 （3-17）  *      
*1**1 *  
*1**1**1**1 *AAAAAAAAAA*  
11122221111222211222  **  
=  *      
*1**1 **1**1**1**1**1**1 *AAAAAAAAAAAAAAA  
  
*  
222111122211222221111222211222  
 （3-18）  *1*  
证明 直接验证可得，引理证毕。  *AAI  
mn*  
引理 2 矩阵反演公式  *nm  
AA*  
对于任意n阶可逆方阵，m阶可逆方阵，阶矩阵   
1122 *mn  
AA*  
,阶矩阵，恒有   
1221 *  
*1 **1  **1**1**1**1**1  *A AAAAAAAAAAAA*  
   
11 122221111112222111122111   
 （3-19）  *  
*1 **1  **1**1**1**1  *A AAAAAAAAAAA*  
   
11 1222211222111222211112  
 （3-20）   
证明 由引理1及逆矩阵的唯一性可知，式（3-17）与（3-18）等号  
右端矩阵的对应分块矩阵相等，于是可得式（3-19）及（3-20）。   
下面在引理1和引理2的基础上，我们由式（3-14）推导出递推最  
小二乘算法。  *  
XN*,*n*1,2,**,*N*,*N*1,**  
设为已知零均值平稳序列且满足式   
   
22

船舶运动姿态预报综述 /root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/38914d0b3528475bab8e5586ba5bdd82.jpg.sub1.png  
  *  
*  
（3-12）的AR模型，由前个观测数据可 *NN*2*p  
XN*,*n*1,2,**,*N*  
得参数，的最小二乘估计为式（3-14）表示，并记作  *a  
i*1,2,**,*p  
i  
   
1   
  
TT  
ˆ  
aNX*  
 （3-21）  *NN NN*   
其中  *   
Xp*1*XpXp*1*X*1 *  
   
  
  
Xp*2*Xp*1*XpX*2 *  
   
  
N  
  
   
    
   
XNXN*1*XN*2*XNp  
  
*  
  *T  
  
  
p*1 *  
T  
  
  
p*2 *  
  
  
  
T  
  
  
*  
 （3-22）  *N  
  
  
T*   
  *XXp*1*lXp*2*lXNl  
N*  
记  *   
*1  *T  
P*  
 （3-23）  *NNN*1  *  
XN*1*l*  
若再增加一次测量以后，由式（3-23）有  *   
*1  *T  
*  
  *P  
N*1*N*1  *N*1 **1  *T  
   
  
  
NN*  
  *  
  
TT  
  
  
  
   
N*1*N*1 *   
*1  **1*T  
  
P*  
  *NN*1*N*1   
由矩阵反演公式令：  **1*T  
  
  
*1  *A  
APA  
A1*  
，，，   
22*N*1  
11*N*21*N*1  
22  
则可得到  *    
*1  **1*T  
  
P  
P*  
  *NN*1*N*1  *N*1 *    
T T   
   
PP1PP*  
  *NNN*1*N*1*N N*1*N*1*N  
T   
  
  
P  
  
NN*1*N*1 *IP  
*/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/38914d0b3528475bab8e5586ba5bdd82.jpg.sub2.png *N   
T  
  
1P  
*  
  *N*1*NN*1  
   
23

船舶运动姿态预报综述 /root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/654ab83f27b2495189a9b458bc9da864.jpg.sub1.png  
   
 （3-24）   
利用上面的结论可以推导出递推最小二乘算法。   
  
定理 1：设为满足式（3-12）的AR模  *XN*,*n*1,2,,*N*,*N*1,  
 *ˆ*  
型序列，则参数的递推最小二乘参数估计 *a*,*i*1,2,**,*pa*,*i*1,2,**,*p  
ii*  
为   
   
 *T   
  
ˆˆˆ*  
  *aN*1*aN**KN*1*XN*1*aN*,*N*2*p  
N*1  
 （3-25）   
  
其中称为时变增益矩阵且  *KN*1 *  
P*  
 *NN*1  *KN*1/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/654ab83f27b2495189a9b458bc9da864.jpg.sub2.png *T   
*  
1*P*  
 （3-26）  *N*1*NN*1 *T*   
 *  
P*  
  
 *NN*1*N*1  *PN*1*I**P*  
/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/654ab83f27b2495189a9b458bc9da864.jpg.sub3.png *N   
T  
*  
1*P*  
  
 （3-27）  *N*1*NN*1  
  
 *T*   
*XN*1*XN**XN*1*XN**p*1 *  
*  
  *N*1   
 （3-28）   
   
 *T  
ˆˆˆˆ  
a NaNaNaN  
*  
 （3-29）   
12*p*  
由式（3-22）可将上述递推公式的初值取为   
  **1  *T  
p*  
   
2*p*2*p*2*p*   
  **1   
 *TT  
ˆ  
a2p**X*  
 （3-30）   
2*p*2*p* 2*p*2*p*   
证明 将式（3-22）及（3-23）中的序号N换成N+1，并考虑到式（3-24），   
于是有   
 *T  
P**X  
ˆ  
aN1*  
=  *N*1*N*1*N*1  
   
 *T   
  
P**X**XN**1*  
 = （3-31）  *N*1*NNN*1  
 *KN*1  
取为（3.26）式，则   
   
 *T  
TT   
  
P**X  
I**KN*1*P**X*  
 =  *N*1*NN  
N*1*NN*1*N*  
 *T   
ˆˆ  
*  
1 *aN**KN**aN*  
 = （3-32）  *N*1  
又  *T*  
 *  
P*  
 *NN*1*N*1 *  
I**PXN*1  
  
/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/654ab83f27b2495189a9b458bc9da864.jpg.sub4.png *NN*1 *T   
  
*  
1*P  
PXN*1  
  
=  *N*1*NN*1 *N*1*N*1  
   
24

船舶运动姿态预报综述 /root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/91cf1e0896ff4c1d84d3b0de45d5c4c1.jpg.sub1.png  
  *T   
  
  
P  
  
N1NN1   
  
P1XN1  
*/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/91cf1e0896ff4c1d84d3b0de45d5c4c1.jpg.sub2.png *NN1  
T   
  
1P  
  
=   
N1NN1  
  
KN1XN1  
 =* （*3-33*）  
将式（*3-33*）及（*3-32*）代入（*3-31*）可得式（*3-35*），而（*3-27*）式  
即为（*3-34*）式，并已得证，初值式（*3-30*）可由式（*3-22*）直接推出。  
于是定理得证。 *ˆ  
  
T  
ˆ  
  
1*  
式（*3.25*）有着明确的直观意义用表示预报值，  *XNaN  
N1  
ˆ  
  
  
ˆ*  
表示预报误差，所以新的估计值是根据预报 *aN1  
XN1X N1  
  
ˆ*  
误差来对原估计值进行修正。通常，我们可以利用逼近的算法对 *a N  
  
T  
ˆ*  
和 *P*  
取初值为： *aN  
N  
  
T  
ˆ  
a 00* （*3-34*） *4  
PI10* （*3-35*） *0*  
这种方法在实际应用中得到了广泛使用，并且在几乎所有的应用中  
都可得到很好的收敛性。但是，里昂等人却给出了这种算法的反例。由 *a*  
式（*3-25*）～（*3-29*）和（*3-34*）、（*3-35*）构成了对参数向量作最小二  
乘估计的递推算法，由于这样在每一步计算中只需要保存上一步的估计  *  
  
T   
ˆ  
ˆ  
  
P  
aN  
XN1aN1*  
结果和，再利用新观测值和即可得出和  *N  
N1*  
，从而大大节省了内存和机时的消耗。 *P  
N1*  
上述递推最小二乘辨识算法，虽然在估计过程中“历史”数据没有  *  
  
ˆ  
a N*  
明显地被保存下来，但“历史”数据的影响却一直在通过和起作 *N*  
用。因此，这种递推辨识算法可称为：无限增长记忆的递推最小二乘估  
计。 *  
ˆ  
aN,i1,2,,p*  
下面讨论*N*的取值，参数估计在一定精度下就达到  
要求，随着观测数*N*的增加，参数估计的置信区间越来越小，也就是说，  
参数估计越来越精确。由试验证明，当时参数效果就比较好了。 *N60*  
在本文中*N*分别取*200*，*250*，*300*。  
   
25

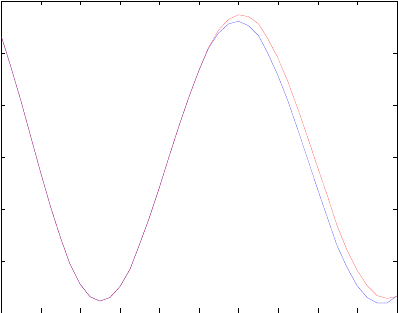
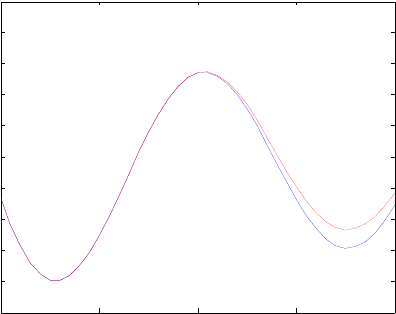
船舶运动姿态预报综述 /root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/538afdc79c8944d38e55aa6010b71c2e.jpg.sub1.png  
   
3.2.2 阶数的确定   
在建模中除了辨识参数值问题外，另一个问题就是如何确定模型的  
阶数，实践表明：一个平稳的随即过程，可以由一个ARMA模型来描  
述．对于船舶运动来说，其运动受很多不确定因素的影响．在不同海况  
下其运动规律也在变化．所以不可能用一个确定的模型来反映所有情况  
下的运动过程．必须实时对模型的阶数和模型参数进行修改．如果模型  
的阶数取得不对，参数模型将产生很大的误差，因此，用某种方法确定  
模型的阶数是系统辨识中极为重要的一环。   
前面对参数的讨论假定自回归模型的阶数p已知，然而事实上这些  
阶数是未知的仍需要被估计出来。P应当根据观测数据来作适当的判定  
从而得出。现在讨论当阶数p未知时，如何由观测序列   
  
拟合出一个比较合理的自回归模型。通常的  *Xn*,*n*1,2,,*N*,*N*1,  
方法是这样：使阶数从零开始逐渐递增，每增加一阶就拟合出一个自 *p*  
  
  
回归模型*ARp*，并计算模型*ARp*的残差平方和。由于一个合 *SN*  
 *p*  
  
  
理的自回归模型应当具有较小的残差平方和，而相邻阶的 *ARp  
SN*  
 *p*  
 *SNSN*  
残差平方和与的变化并不显著。这就是用于模型定阶的  
 *p1p*  
F检验法，但是F检验法判决的结果有很大的人为性，需要人为的选定 **  
风险水平，如果将显著水平人为的变动一下，那么阶数p会有很大  
的变化。正因为存在这样的问题，所以在实际应用中经常采用具有可观  
  
水准（AIC）准则来判决模型的阶数p。  *ARp*  
AIC准则即信息量准则(Akaike’s information criterion，MC)，是由  
此次(H．Akaike)在研究信息论,特别是在解决时间序列定阶问题时提出来  
的。这是一个在统计分析尤其是在统计模型的选择中有着广泛应用的准  
则。AIC定阶准则是一种最佳准则函数法，即确定出一个准则函数，该  
函数既要考虑用某一模型拟合时对原始数据的接近程度，同时又要考虑  
模型中所含待定参数的个数。建模时按照准则函数的取值确定模型的优  
劣，以决定取舍。使准则函数达到极小的是最佳模型。AIC准则的理论  
研究近年来逐渐丰富，但仍主要局限于对自回归模型的定阶的理论研究。   
   
26

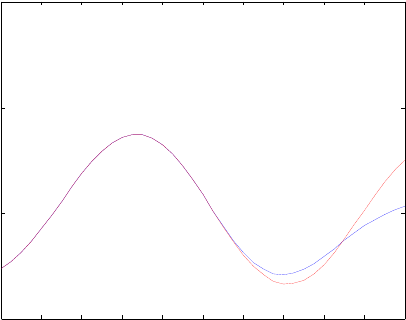
船舶运动姿态预报综述 /root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/5430d101b81541feaa78710f97138312.jpg.sub1.png  
   
也有人试图把AIC准则法应用到回归问题的定阶上，并给出了近似的  
AIC准则，使得这种方法在实际中得到更广泛的应用。   
AIC准则的本质可以说成是在一定的模型结构条件下，对极大似然  
参数估计值来说，寻找模型的阶数，使模型输出的概率分布最大可能的  
  
趋近实际过程输出的概率分布。设为零均值、正态  *xn*,*n*1,2,**,*N*  
  
2 **  
平稳随机序列，其概率密度由模型参数唯一确  *ARp  
a*,*a*,,*a*  
及 **  
12*p*  
定。引入参数向量记号   
   
 *T   
aa*,,*a  
  
TTTT*2  *  
  
a*  
,  
  *1p*  
  
 *T*   
记 *x*,,*x  
Xx*,,*x*  
，则的概率密度为  *  
*  
1*p  
N*1*N  
T*   
  *XMX*  
 *N*/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/5430d101b81541feaa78710f97138312.jpg.sub2.png  
1/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/5430d101b81541feaa78710f97138312.jpg.sub3.png  
  
2  
 *NNN  
  
PX*2*M*exp  
2  
2 /root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/5430d101b81541feaa78710f97138312.jpg.sub4.png  
/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/5430d101b81541feaa78710f97138312.jpg.sub5.png *NN*  
2 **  
2  
   
 （3-36）   
   
2**1*T   
*  
其中，而是的协方差阵。 *x*,*i*1,2,**,*N  
M**RR**EXX  
i  
NNNNN*  
对数似然函数可以写成  *T  
XMX  
N*1*N*  
  
2  *NNN  
*  
log2log*M*log  *Lx*,,*x*  
 /root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/5430d101b81541feaa78710f97138312.jpg.sub6.png/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/5430d101b81541feaa78710f97138312.jpg.sub7.png/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/5430d101b81541feaa78710f97138312.jpg.sub8.png **  
= **/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/5430d101b81541feaa78710f97138312.jpg.sub9.png/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/5430d101b81541feaa78710f97138312.jpg.sub10.png/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/5430d101b81541feaa78710f97138312.jpg.sub11.png/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/5430d101b81541feaa78710f97138312.jpg.sub12.png *N*  
1*N*  
2  **  
222  
2  
由于上式很复杂，无法得出求解极限的解析表示，用数值法求解也  
过于复杂。事实上，很少采用严格的极大似然估计，而是用近似的估计  
值来代替。  **  
由式（3-36）可以看出右边第一项只与N有关，而和参数无关。/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/5430d101b81541feaa78710f97138312.jpg.sub13.png/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/5430d101b81541feaa78710f97138312.jpg.sub14.png *M*  
另外，可以证明，右边第二项中的具有与N无关的上界，而后两项  *N*  
是和N同阶的，因此，只要N充分大时，式（3-36）是否达到极大值取  *T  
XMX  
N*  
  
2  *NNN  
  
*log **/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/5430d101b81541feaa78710f97138312.jpg.sub15.png *Lx*,,*x*  
决于右边后两项：，，换句话说， *  
*/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/5430d101b81541feaa78710f97138312.jpg.sub16.png/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/5430d101b81541feaa78710f97138312.jpg.sub17.png  
1*N*  
2 **  
2  
2  
取极大值的点，当时与  *N* *T  
XMX  
N*  
2  *NNN  
*  
log  
 + （3-37） /root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/5430d101b81541feaa78710f97138312.jpg.sub18.png/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/5430d101b81541feaa78710f97138312.jpg.sub19.png  
2 **   
2  
2  
取极小值的点几乎是一样的。  *T  
XMX  
N*  
2  *NNN  
  
ˆ*  
log  
对+求极小而得到的估计值，就是在给定样本 *a*/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/5430d101b81541feaa78710f97138312.jpg.sub20.png/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/5430d101b81541feaa78710f97138312.jpg.sub21.png  
2  **   
2  
2  
 *x*,,*x  
ARp  
*  
时模型参数的近似极大似然估计。   
1*N  
T   
XMX*  
在给出近似极大似然估计表达式之前，需要对做一点说  *NNN*  
   
27

船舶运动姿态预报综述 /root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/99521b07f847436989a1ad6ed0ff9dd9.jpg.sub1.png  
  *  
2  
T   
  
  
*  
明：仅与参数有关而和无关，通常将之记为，并称  *Q  
XMX  
NNN*  
其为平方和函数，因为 *N   
  
ˆ   
2  
  
  
T   
i   
XMX  
  
Q  
==   
N NN  
i   
ˆ  
*  
其中是在给定参数值和有限样本值的最小方差估 *x,,x*  
下 *  
ii  
1N*  
计。  
由于模型阶数直接取决于估计参数的个数（设为*n*），在比较各种不  
同的阶数时，*AIC*准则是根据下面定义的式子取最小值来确定*n*的。 *  
ˆ  
AICn2La2n* （*3-38*） *  
  
T   
ˆˆˆ  
ˆ*  
其中是模型估计的参数向量 *aa,,a  
a   
ˆ*  
，*La*为对数似然度。 *  
1n*  
这样做的根据是从*Kullback-Leibler*平均信息量极小化导出的。该信息量 *  
px*  
是关于未知的真正概率密度和根据观测数据建模给出的条件概率密  *  
ˆ*  
之间差别大小的量度，*K-L*信息量定义为：/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/99521b07f847436989a1ad6ed0ff9dd9.jpg.sub2.png *pxa*   
度 *a  
  
    
  
  
ˆˆ  
 */root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/99521b07f847436989a1ad6ed0ff9dd9.jpg.sub3.png/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/99521b07f847436989a1ad6ed0ff9dd9.jpg.sub4.png *Ip;ppxlogpxdxpxlogpxdx  
a a   
   
 *   
其基本思想是使得由于采用某种阶书建立的*AR*、*MA*、*ARMA*模型 *  
px*  
而加于时间序列的信息为最小，或者说寻找最接近于的参数密度函  *  
  
ˆ  
px*  
使两者的差异程度为最小。由于是固定和未知的，因此问/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/99521b07f847436989a1ad6ed0ff9dd9.jpg.sub5.png *pxa*   
数 *a  
  
ˆ  
*/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/99521b07f847436989a1ad6ed0ff9dd9.jpg.sub6.png *Ip;p*  
题归结为使构成的第二项达到最大，因此可导出式（*3-38*）， *a  
  
ˆ  
La   
AIC*准则第一项除了比例系数外就是，它随着阶数增高而较快的减  
少，第二项是模型复杂性的代价，它随着阶数增高而线性上升，由使*AIC*  
达到最小的*n*可确定阶数。 *  
ˆ  
La*   
由式（*3-37*）（*3-38*）并考虑到*N*一定的情况下，的极大值和 *N   
2  
  
log*  
的极小值是近似等价的，因此将它代入式（*3-38*）可得/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/99521b07f847436989a1ad6ed0ff9dd9.jpg.sub7.png *2   
  
2  
   
ˆ  
AICnNlog2n*   
或 *  
2n*/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/99521b07f847436989a1ad6ed0ff9dd9.jpg.sub8.png *2  
ˆ  
   
log  
AICn* （*3-39*） *N*   
   
28

船舶运动姿态预报综述 /root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/66a8950ed9b0463081112f76b6c499fa.jpg.sub1.png  
   
为最小作为选择n的标准。   
当我们从开始逐次增加模型的阶数对数据进行自回归模型拟 *n*0 **  
合时，的值有下降趋势，这时起决定作用的是模型参差方差，当 *AICn  
*  
达到某一阶数时，值达到极小。随后，随着模型阶数继续升 *n  
AICn*  
0  
0 **  
高，参差方差改变很小，这样，的值便随着n增大而增大。 *AICn*  
对事  *  
*  
,则取为最佳自回归模型阶  *minAICn  
n  
AICn*  
先给定的最高阶数M,若=  
0  
0 *0nM*   
2 *   
ˆ*  
都是在取不同阶数的情况下得到的参差方差估计  
数。各定义式中的  
值。另外，虽然此时的AIC准则是针对AR模型提出的，但并不意味着  
AIC准则仅局限于此。从理论上看，任何ARMA或MA模型都可以用无  
穷阶的 AR模型逼近。因而有些人认为应尽可能用AR模型来描述时间  
序列，即使真实模型是ARMA或MA模型，也可以用高阶自回归模型来  
近似。因此，此次提出的AIC准则有广泛而深远的意义。这种方法还启  
发我们定义类似的准则函数来解决其它参数估计的问题。   
本文对此的具体应用如下：设一个最大阶数M从开始，且  *p1  
  
ˆ*  
，由式（3-25）-（3-29）和（3-34）（3-35）递推计算*a N*，同 *Np1*  
时计算参差平方和。  *  
T   
ˆˆ*  
  *  
SNXa NXaN  
NNNN  
  
SN*  
记为模型  *p  
p   
ˆ  
  
  
ˆ  
X nlaXni*  
  *i  
i0   
  
SN*,*SN*,,*SN*  
的参差平方和。按以上算法依次计算 **  
并计算   
12*M  
  
I*1,*I*2,**,*IM*  
。其中  **  
2*p* /root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/66a8950ed9b0463081112f76b6c499fa.jpg.sub2.png *  
Ip*log*SNN*/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/66a8950ed9b0463081112f76b6c499fa.jpg.sub3.png *N  
p*  
 （3-40）  *  
ˆ  
Ip*  
N为建模的数据个数，，比较的大小，如果当 *p*1,2,**,*M  
pp*   
时，有   
   
29

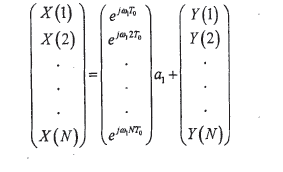
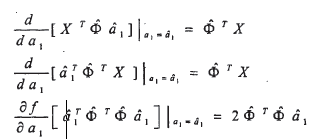
船舶运动姿态预报综述 /root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/d0dfc75d979c444a9cf370b1e3d23eac.jpg.sub1.png  
   
  
ˆ *Ip* min  
 （3-41）   
ˆˆ  
则就是预报模型的阶数。对于不同的预报步数，也可能不同。  *p p*  
3.2.3 AR*预报方法*   
AR预报方法的具体步骤如下：   
首先取且选取最大阶数M.  *l1*  
  
4 *ˆ  
P10I*  
(1)取，  
00  
  *a *  
0  
0*p*,*p*  
  
从，由式（3-25）-（3-29）递推建并依 *AR*1,*AR*2,**,*ARM  
p*1  
  
次计算出参差平方和  *SN*,*p*1,2,**,*M  
N**p**1  
p*  
  
(2)从开始，依次计算出AIC函数值，其中  *Ip*,*p*1,2,**,*M  
p*1  
  
   
 *SN*  
 *p*   
   
  *Ip*log/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/d0dfc75d979c444a9cf370b1e3d23eac.jpg.sub2.png  
2*p*  
 *N*  
 /root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/d0dfc75d979c444a9cf370b1e3d23eac.jpg.sub3.png *N*  
   
ˆ *ˆ*  
(3)求，使得当时有  *p   
p**p*  
  
ˆ *Ip* min  
   
 *ˆ  
ARp*   
则合理的预报模型为  *ˆ  
p*   
  
  
ˆˆ *x n**l**axn**i  
i*  
 （3-42）  *i0*   
 *xi*,*i*1,2,**,*N*,**  
利用测得的船舶姿态角序列，根据 式（3-42）  
可以得出步预报值。  *l*  
后令重新回到步骤1，重复执行1.，2.，3.，可得到1步 *l*1,2,3,**  
预报，2步预报„，以此类推。  
3.3 *船舶姿态运动预报结果分析*   
本文中仿真曲线的数据来源是5级海情航速24节遭遇角为135度不加  
控制船舶横向运动姿态的横摇角角度，样本的数据间隔为0.5秒，预报步  
数为20步（即10秒）。分别令N=200，250，300，用MATLAB进行仿真得   
图1，图2，图3。仿真结果如下：   
   
30

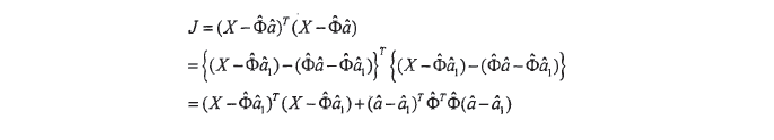
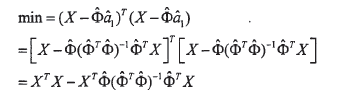
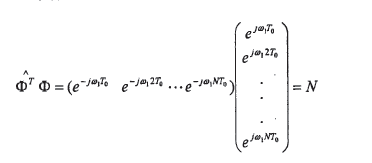
船舶运动姿态预报综述 /root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/6988dedafae345f1a992a2bc10d052e3.jpg.sub1.png  
   
预报结果曲线与真实曲线   
6   
虚线代表估计值，实线代表真值   
4   
2   
)   
度  
0   
(  
)  
t  
(  
x  
-2   
-4   
-6  
90 92949698 100102104106108110   
t(秒)   
   
图3-1 90-110步的预测曲线  
预报结果曲线与真实曲线   
5  
4虚线代表估计值，实线代表真值   
3  
2  
1  
)   
度  
0  
(  
)  
t  
(  
x  
-1  
-2  
-3  
-4  
-5  
115 120 125130 135   
t(秒)   
   
图3-2   
115-135步的预测曲线   
   
31

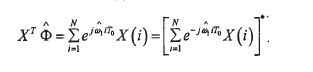
船舶运动姿态预报综述 /root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/739e116d2c934cb0a4ed2ce6aaa2a731.jpg.sub1.png  
   
预报结果曲线与真实曲线   
10   
虚线代表估计值，实线代表真值   
5   
)   
度  
(  
)  
t  
(  
x  
0  
-5  
140 142144146148 150152154156158160   
t(秒)   
   
图3-3   
140-160步的预测曲线  
   
表3-1 预报数据比较 /root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/739e116d2c934cb0a4ed2ce6aaa2a731.jpg.sub3.png  
N=200 N=250 N=300   
预报时间 预报统计   
10s 0.5589 0.4006 0.8481   
均方误差   
由预报曲线及对应均方误差可知数据窗的大小与误差精度没有必然  
的联系，只与数据段选取的好坏有关系。在上面的预报结果中数据窗为  
200的样本的均方预报误差小于0.5,效果最好。   
3.4 本章小结   
本章针对船舶运动预报利用自回归（AR）法进行了精确的计算和预  
警，对船舶姿态运动预报结果也进行了分析得出的了一系列的数据。对  
付船舶在不同环境下进行的运动有了很大的帮助   
   
   
   
   
32

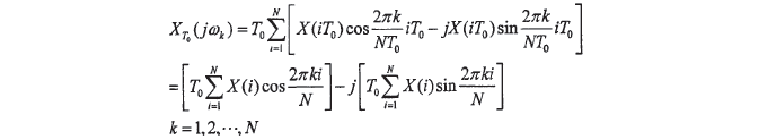
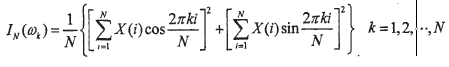
船舶运动姿态预报综述 /root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/044cbbed62f7402784985c7779f31f53.jpg.sub1.png  
   
第4章 周期图及平滑周期图算法   
4.1 问题的提出   
海浪是典型的平稳随机过程，同时它又具有较强的相关性和周期性，  
受海浪扰动力的船舶运动姿态也有一定的周期性，而周期图算法能检测  
出这种潜周期性，我们可以用一系列的主值项和周期序列项来描述它，  
如果事先近似得到它的先验值，就可以用这些先验值估计出它的主值项  
和周期序列项，对它作近似预报。如果能提前几秒或十几秒预报出船舶  
的运动姿态或运动趋势，就可以对船舶发出准确的控制指令。这对船舶  
的平稳航行与有效控制是十分重要的。   
4.2 周期图的引入   
将船舶运动姿态序列记为｛Z(n),n=1,2...N｝假定具有如下形式 /root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/044cbbed62f7402784985c7779f31f53.jpg.sub2.png *Z*(*n*)*Z*(*n*)*Y*(*n*)  *E*[*Y*(*n*)]0   
 (4-1)  *E*[*Y*(*n*)*Y*(*m*)]*B*(*n**m*) *r  
n*1,2,...,*N*,*m*1,2,...,*N*   
其中{**Z**(n),n=1,2„N｝为｛z (n),n=1,2„ N｝的均值序列，它是非  
随机的时间序列。Y (n)为零均值平稳随机序列，通常情况下，它是时间  
相关的，其相关函数为B(t)。 /root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/044cbbed62f7402784985c7779f31f53.jpg.sub3.png  
 进一步，我们还假定均值序列｛**Z** (n),n=1,2„ N｝具有如下形式： /root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/044cbbed62f7402784985c7779f31f53.jpg.sub4.png  
 (4-2)  *Z(n)f(n)p(n)*  
其中称｛f(n),n＝l,2,„.N ｝为主值序列项，它表明船舶运动姿态  
序列{ z(n),n=1,2,„N｝长期变化的趋势。又称｛p(n) = 1,2,„.N｝为  
周期序列项，它表明把Z除去主值序列以后，还有按周期变化的趋势项,   
它表明把z(n)除去主值序列以后，还有按周期变化的趋势项。   
将（4-2）代入（4-1）有：  **  
Z(n) = f(n)+p(n)+Y(n)f(n)+X(n) (4-3) /root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/044cbbed62f7402784985c7779f31f53.jpg.sub5.png  
   
33

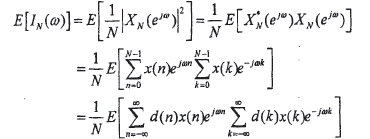
船舶运动姿态预报综述 /root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/3810ab9e782a4b218040a50387608530.jpg.sub1.png  
  *X*(*n*)*p*(*n*)*Y*(*n*),*n*1,2,...*N* /root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/3810ab9e782a4b218040a50387608530.jpg.sub2.png  
且 （4-4）  *EX*(*n*)*p*(*n*)  *EX*(*n*)*X*(*m*)*B*(*n**m*)  *x*  
由于p(n）是周期函数，故X(n）的相关函数Bx（n）也有周期分量，因  
此X（n）的功率谱密度函数在相应的频率上出现尖峰，正是利用这一特  
点，我们才能从X(n)的功率谱密度函数中识别出p（n）。   
 综上所述，我们所讨论的时间序列模型为船舶运动姿态模型，本节的  
任务就是如何估算出主值函数项．F（n）和周期函数项p(n)，进而用来  
预报船舶运动姿态。   
 (1) f(n)的估计   
对于船舶受海浪干扰而言，我们研究的船舶运动姿态模型是零均值模型，  
因而我们不必估计其主值序列项。对零均值模型，可以认为其主值序列  
项为零。因此这里只需要估计其周期序列项．   
 (2)p(n)的估计   
 现在，我们讨论船舶运动姿态序列｛Z(1),Z(2),„Z（n )｝中所含周  
期项可P(n)的估算问题。本文中，可以认为Z（n）中的主值函数项f(n)  
已被估计出来了，并取作  *   
f(n)0,n1,2,...N*  
 （4-5）   
下面讨论如何由  *   
X(n)Z(N)f(n)p(n)Y(n),n1,2,...,N*  
 （4-6）   
估计出周期项p（n）。   
为简单起见，我们假定p（n）只是由一个谐波函数组成，即  *  
fanT  
P(nT)ae,n1,2,...,N  
0*   
 （4-7）  *01  
  
TT*  
其中是谐波的角频率，为采样周期，n为采样时刻，n=1,2,„N,  *1  
00*/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/3810ab9e782a4b218040a50387608530.jpg.sub3.png/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/3810ab9e782a4b218040a50387608530.jpg.sub4.png/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/3810ab9e782a4b218040a50387608530.jpg.sub5.png  
为复数，其模[ ]代表谐波的振幅，相角，角 代表谐波的初始相   
角。于是可写成如下矩阵形式   
   
34

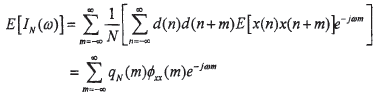
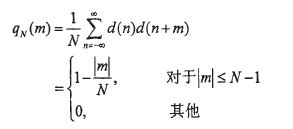
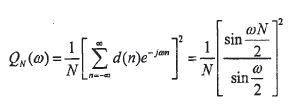
船舶运动姿态预报综述 /root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/e4f8c895d7df46e499bac300039c386f.jpg.sub1.png/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/e4f8c895d7df46e499bac300039c386f.jpg.sub2.png  
   
 （4-8） /root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/e4f8c895d7df46e499bac300039c386f.jpg.sub4.png  
并简记为   
 （4-9） /root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/e4f8c895d7df46e499bac300039c386f.jpg.sub5.png  
其中： /root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/e4f8c895d7df46e499bac300039c386f.jpg.sub6.png/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/e4f8c895d7df46e499bac300039c386f.jpg.sub7.png/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/e4f8c895d7df46e499bac300039c386f.jpg.sub8.png/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/e4f8c895d7df46e499bac300039c386f.jpg.sub9.png  
我们的任务是如何对 和 作出估计和以使目标函数J为最小， /root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/e4f8c895d7df46e499bac300039c386f.jpg.sub10.png  
即有 （4-10） /root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/e4f8c895d7df46e499bac300039c386f.jpg.sub11.png/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/e4f8c895d7df46e499bac300039c386f.jpg.sub12.png/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/e4f8c895d7df46e499bac300039c386f.jpg.sub13.png  
如果 的估计值已知且为，这时也就已知，并可写成 /root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/e4f8c895d7df46e499bac300039c386f.jpg.sub14.png  
 （4-11） /root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/e4f8c895d7df46e499bac300039c386f.jpg.sub15.png/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/e4f8c895d7df46e499bac300039c386f.jpg.sub16.png  
然后根据式（4-10 )，并利用最小二乘估计，计算出的最小二乘估计，   
将式（4-10）展开得 /root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/e4f8c895d7df46e499bac300039c386f.jpg.sub17.png  
 （4-12） /root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/e4f8c895d7df46e499bac300039c386f.jpg.sub18.png/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/e4f8c895d7df46e499bac300039c386f.jpg.sub19.png  
求J 对求导，并令其结果为零，作为确立使J为最小的估计值 的条   
件，即 /root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/e4f8c895d7df46e499bac300039c386f.jpg.sub20.png  
 (4-13)   
由于   
 （4-14）   
   
35

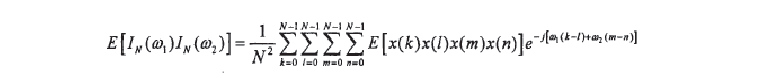
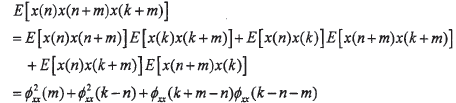
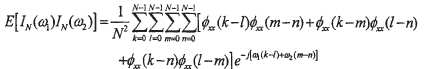
船舶运动姿态预报综述 /root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/fcd66b5ca23642dabb15ce53219c936c.jpg.sub1.png/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/fcd66b5ca23642dabb15ce53219c936c.jpg.sub2.png  
   
由（4 一14 ）式可得 /root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/fcd66b5ca23642dabb15ce53219c936c.jpg.sub3.png  
 (4-15)   
即 /root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/fcd66b5ca23642dabb15ce53219c936c.jpg.sub5.png  
 (4-16)   
又因为（4-10）式所表示的J可以写成   
 (4-17) /root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/fcd66b5ca23642dabb15ce53219c936c.jpg.sub6.png  
其中要考虑   
 （4-18）   
所以，J = min 就等价地有 /root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/fcd66b5ca23642dabb15ce53219c936c.jpg.sub7.png  
 (4-19)   
和 /root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/fcd66b5ca23642dabb15ce53219c936c.jpg.sub8.png  
（4-20）式成立时所具有的特点，为此将   
（4-16）式代入(4-20）式，有   
 (4-21)   
然而由（4-11）式可知   
 (4-22) /root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/fcd66b5ca23642dabb15ce53219c936c.jpg.sub11.png  
 (4-23)   
   
36

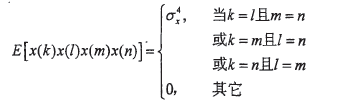
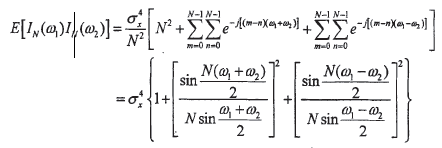
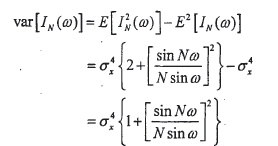
船舶运动姿态预报综述 /root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/916c871ad21f46528152ed68c4537d02.jpg.sub1.png  
   
 (4-24)   
将（4-22）式、（4-23）式及（4-24）式代入（4-21）式，可得 /root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/916c871ad21f46528152ed68c4537d02.jpg.sub3.png  
 (4-25)   
也即有 /root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/916c871ad21f46528152ed68c4537d02.jpg.sub4.png  
 (4-26)   
也就是说，(4-20）式的成立等价地有（4-26）式的成立，通常称 /root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/916c871ad21f46528152ed68c4537d02.jpg.sub5.png  
 (4-27)   
为随机序列｛X (1)， X(2)，„X(N)｝的周期图，从（4-27）式可/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/916c871ad21f46528152ed68c4537d02.jpg.sub6.png  
知，使周期图I（ω）最大的ω的值就是ω的最小二乘估计 .   
N  
4.3 周期图算法   
综上所述，周期图的计算步骤如下： /root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/916c871ad21f46528152ed68c4537d02.jpg.sub7.png  
(1）由获得的N 个数据构成的有限长序列直接求傅立叶变换，   
JW  
得频X（e），即   
N/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/916c871ad21f46528152ed68c4537d02.jpg.sub8.png  
 (4-28)   
(2）按（4-27）式计算随机序列｛X (i),i =1,2 , „N ｝的周期图/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/916c871ad21f46528152ed68c4537d02.jpg.sub9.png/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/916c871ad21f46528152ed68c4537d02.jpg.sub10.png  
I（ω），并求取使 ；   
N/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/916c871ad21f46528152ed68c4537d02.jpg.sub11.png  
 (3）将 代入（4-11）式得到Φ； /root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/916c871ad21f46528152ed68c4537d02.jpg.sub12.png  
 (4）再按（4-16）式求得参数a的最小二乘估计。   
现在讨论周期图I（ω）与离散随机信号的傅氏变换之间的关系，进而  
N  
了解周期图I（ω）的物理意义。我们知道，连续随机信号｛X (t),[t]<｝/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/916c871ad21f46528152ed68c4537d02.jpg.sub13.png  
N  
的傅氏变换形式上可以写成   
   
37

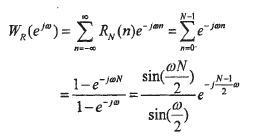
船舶运动姿态预报综述 /root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/d84398ae1eaa411c80daf0089662ecc4.jpg.sub1.png/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/d84398ae1eaa411c80daf0089662ecc4.jpg.sub2.png  
   
 /root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/d84398ae1eaa411c80daf0089662ecc4.jpg.sub3.png  
   
（4-29)   
如果对X (t）采样且为有限序列｛X,X(2)，„X(N)｝时，则把（4-25 ) /root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/d84398ae1eaa411c80daf0089662ecc4.jpg.sub4.png/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/d84398ae1eaa411c80daf0089662ecc4.jpg.sub5.png/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/d84398ae1eaa411c80daf0089662ecc4.jpg.sub6.png  
式离散化就得到有限离散随机信号的傅氏变换为： /root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/d84398ae1eaa411c80daf0089662ecc4.jpg.sub7.png  
 (4-30）   
于是（4-30）就有确定意义并且还有 /root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/d84398ae1eaa411c80daf0089662ecc4.jpg.sub8.png  
 (4-31)   
比较（4-31）式与（4-27）式可得： /root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/d84398ae1eaa411c80daf0089662ecc4.jpg.sub9.png  
 (4-32)   
在实际计算中，我们通常是这样来计算周期图Iω:   
N  
令 /root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/d84398ae1eaa411c80daf0089662ecc4.jpg.sub11.png  
 (4-33)   
于是由（4-30）式有   
 (4-34)   
因而 /root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/d84398ae1eaa411c80daf0089662ecc4.jpg.sub12.png  
 （4-35）   
 (4-36)   
利用上式将I(ω)计算出来之后，对每个ω，k = 1,2,„N 都要比较  
Nkk/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/d84398ae1eaa411c80daf0089662ecc4.jpg.sub14.png  
I（ω）的大小，如果当，时有   
N/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/d84398ae1eaa411c80daf0089662ecc4.jpg.sub15.png  
 (4-37)   
   
38

船舶运动姿态预报综述 /root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/30faecc7429a4a5fb3e283f198b0b47e.jpg.sub1.png/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/30faecc7429a4a5fb3e283f198b0b47e.jpg.sub2.png  
   
则取ω为随机序列｛X(1),„X(N),｝中的周期函数项p(nT)的角频率，  
K10/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/30faecc7429a4a5fb3e283f198b0b47e.jpg.sub3.png/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/30faecc7429a4a5fb3e283f198b0b47e.jpg.sub4.png  
并记作 ,这样一来，由（4-7）式可知第一个周期函数项 可 /root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/30faecc7429a4a5fb3e283f198b0b47e.jpg.sub5.png  
表为,n = l , 2 ，„，其中a，由（4-16）确定。   
1  
 如果随机序列｛X(l),X(2)，„X(N),｝中包含有第二个周期函数项   
p(nT) ，则同样可利用周期图并由   
0/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/30faecc7429a4a5fb3e283f198b0b47e.jpg.sub6.png  
 (4-38) /root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/30faecc7429a4a5fb3e283f198b0b47e.jpg.sub7.png/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/30faecc7429a4a5fb3e283f198b0b47e.jpg.sub8.png/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/30faecc7429a4a5fb3e283f198b0b47e.jpg.sub9.png  
可求出 记作 。于是第二个周期函数项 可表为 /root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/30faecc7429a4a5fb3e283f198b0b47e.jpg.sub10.png  
。依此类推，可求出随机序列｛X(1),X(2)，„，X( N ) ,｝   
中所包含的多个周期函数项。 /root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/30faecc7429a4a5fb3e283f198b0b47e.jpg.sub11.png  
 至此为止，我们可以说把船舶运动姿态序列仿｝ /root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/30faecc7429a4a5fb3e283f198b0b47e.jpg.sub12.png  
的均值序列 估计出来了，并取作 /root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/30faecc7429a4a5fb3e283f198b0b47e.jpg.sub13.png  
 (4-39)   
4.4周期图算法的性能分析   
4.4.1周期图估计的平均值   
周期图的谱估计平均值为：   
 /root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/30faecc7429a4a5fb3e283f198b0b47e.jpg.sub15.png  
 (4-40)   
令m=k-n，代入上式得   
   
39

船舶运动姿态预报综述 /root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/eab659f5fc454ad5a18e384651e3ea7a.jpg.sub1.png/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/eab659f5fc454ad5a18e384651e3ea7a.jpg.sub2.png  
   
(4-41)   
其中   
 (4-42) /root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/eab659f5fc454ad5a18e384651e3ea7a.jpg.sub5.png  
为x(n)的自相关函数   
由于q(m)为二个矩形函数的卷积，因此它是一个三角窗函数，常称  
( Bartlett ）窗函数，其傅立叶变换为   
 (4-43)   
式（4-41）为两个函数相乘的傅立叶变换，等于他们各自傅立叶变换的  
卷积，即 /root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/eab659f5fc454ad5a18e384651e3ea7a.jpg.sub7.png  
   
由式（4-44）可知，除非Q(ω)为函数，否则E[I（ω）]将不等于P(ω), /root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/eab659f5fc454ad5a18e384651e3ea7a.jpg.sub8.png  
NNXX/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/eab659f5fc454ad5a18e384651e3ea7a.jpg.sub9.png  
故周期图作为功率谱的估计是有偏的。当N 时， /root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/eab659f5fc454ad5a18e384651e3ea7a.jpg.sub10.png  
 (4-45)   
故 /root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/eab659f5fc454ad5a18e384651e3ea7a.jpg.sub11.png  
 （4-46）   
此时 /root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/eab659f5fc454ad5a18e384651e3ea7a.jpg.sub12.png  
 （4-47）   
→∞  
因此，周期图作为功率谱的估计，当N 时是无偏的，即渐近无偏。   
   
40

船舶运动姿态预报综述 /root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/52b1565166e74a36983f4b883b3aca06.jpg.sub1.png/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/52b1565166e74a36983f4b883b3aca06.jpg.sub2.png  
   
4.4.2 周期图谱估计的方差   
为了便于用较容易的近似式表示，假定序列x(n) (0<n<N-1）是零均值、   
2  
方差为σ的实高斯白噪声序列按方差的定义应有   
x/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/52b1565166e74a36983f4b883b3aca06.jpg.sub3.png  
 （4-48）   
根据式（4-41) /root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/52b1565166e74a36983f4b883b3aca06.jpg.sub4.png  
 (4-49) /root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/52b1565166e74a36983f4b883b3aca06.jpg.sub5.png  
由于假设x(n）是白色的，所以把 代入上式，得 /root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/52b1565166e74a36983f4b883b3aca06.jpg.sub6.png  
 (4-50 ) /root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/52b1565166e74a36983f4b883b3aca06.jpg.sub7.png/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/52b1565166e74a36983f4b883b3aca06.jpg.sub8.png/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/52b1565166e74a36983f4b883b3aca06.jpg.sub9.png/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/52b1565166e74a36983f4b883b3aca06.jpg.sub10.png  
为了求 ，先求 在两个频率和 处的协方差，即   
   
(4-51)   
由于当随机序列｛x(n)｝是零均值实正态序列时，它的各高阶矩都可以  
用其一阶和二阶矩来表示，有 /root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/52b1565166e74a36983f4b883b3aca06.jpg.sub12.png  
 （4-52）   
所以   
(4-53)   
   
由以上两式将（4-51）式整理得   
   
（4-54）由于x（n）是白色的，故   
   
41

船舶运动姿态预报综述 /root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/6d38989e4dfc4794898b53e73b88bbf7.jpg.sub1.png  
 /root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/6d38989e4dfc4794898b53e73b88bbf7.jpg.sub2.png  
 （4-55）   
所以   
   
（4-56）   
将（4-56）代入式（4-51），可得   
（4-57） /root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/6d38989e4dfc4794898b53e73b88bbf7.jpg.sub5.png  
当 时，上式变为 /root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/6d38989e4dfc4794898b53e73b88bbf7.jpg.sub6.png  
 （4-58） /root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/6d38989e4dfc4794898b53e73b88bbf7.jpg.sub7.png  
于是，周期图 的方差为   
 （4-59） /root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/6d38989e4dfc4794898b53e73b88bbf7.jpg.sub9.png/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/6d38989e4dfc4794898b53e73b88bbf7.jpg.sub10.png  
有上式可见，当N 时，var而且，无论N取何值。Var  
   
4  
总与σ 在同一数量级。显然，周期图不是功率谱的一致估计，   
I（ω）  
N  
x   
所以这种估计不是功率谱最好的估计。   
   
42

船舶运动姿态预报综述 /root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/a025a5efbbe4459eb45b98b515c215a9.jpg.sub1.png  
   
4.4.3 谱分辨率与“谱泄露”   
周期图法是用获得的N 个数据对随机过程进行功率谱估计，它隐含  
着对无限长数据加了一个矩形窗截断。时域中与矩形窗相乘对应于频域  
中与矩形窗频谱相卷积，就这一点来说，估计谱相当于真实谱与矩形窗  
频谱相卷积的结果。矩形窗频谱等于矩形序列R(n)的傅立叶变换，即   
 ( 4-60 )  *   
  
n*  
对功率谱有影响的是矩形窗频谱的幅度谱sin / sin ，该函数与 /root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/a025a5efbbe4459eb45b98b515c215a9.jpg.sub3.png/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/a025a5efbbe4459eb45b98b515c215a9.jpg.sub4.png *22*   
功率谱相卷积必然使所得的估计谱不同于真实的功率谱，因为函数sin  *   
  
n*  
 / sin 不同于δ函数（任何函数与δ函数相卷积形状不变）。 /root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/a025a5efbbe4459eb45b98b515c215a9.jpg.sub5.png/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/a025a5efbbe4459eb45b98b515c215a9.jpg.sub6.png *22*   
 为了使估计谱逼近真实谱，应设法使窗谱幅度函数逼近δ函数。矩  *   
  
n*  
形窗频谱幅度函数为sin / sin ，它与δ函数相比存在两方面的 /root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/a025a5efbbe4459eb45b98b515c215a9.jpg.sub7.png/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/a025a5efbbe4459eb45b98b515c215a9.jpg.sub8.png *22*   
差异，一是主瓣不是无限窄，二是有旁瓣。由于主瓣不是无限窄，真实  
的功率谱与主瓣卷积后将使功率向附近频域扩散，使信号模糊，降低了  
谱分辨率，主瓣越宽分辨率越低。   
 由于存在旁瓣，又会产生两个后果，一是功率谱主瓣内的能量“泄  
露，，到旁瓣使谱估计的方差增大，二是与旁瓣卷积后得到的功率谱完  
全属于干扰。严重情况下，强信号与旁瓣的卷积可能大于弱信号与主瓣  
的卷积，使弱信号淹没在强信号的干扰中，无法检测出来。这是古典谱  
估计的主要缺点。   
4.5 平滑周期图算法   
从上面的分析可知，周期图法作为功率谱的估计不满足一致估计的  
条件，必须进行改进。改进的措施主要是将周期图进行平滑处理（平均  
属于平滑的一种主要方法），使估计方差减少，从而得到一致谱估计。   
   
43

/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/7b2c61267e944807a0acce4d828e271f.png

/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/7b2c61267e944807a0acce4d828e271f.png

/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/7b2c61267e944807a0acce4d828e271f.png

/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/7b2c61267e944807a0acce4d828e271f.png

/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/7b2c61267e944807a0acce4d828e271f.png

/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/7b2c61267e944807a0acce4d828e271f.png

/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/7b2c61267e944807a0acce4d828e271f.png

/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/7b2c61267e944807a0acce4d828e271f.png

/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/7b2c61267e944807a0acce4d828e271f.png

/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/7b2c61267e944807a0acce4d828e271f.png

/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/7b2c61267e944807a0acce4d828e271f.png

/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/7b2c61267e944807a0acce4d828e271f.png

/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/7b2c61267e944807a0acce4d828e271f.png

/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/7b2c61267e944807a0acce4d828e271f.png

/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/7b2c61267e944807a0acce4d828e271f.png

/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/7b2c61267e944807a0acce4d828e271f.png

/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/7b2c61267e944807a0acce4d828e271f.png

/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/7b2c61267e944807a0acce4d828e271f.png

/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/7b2c61267e944807a0acce4d828e271f.png

/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/7b2c61267e944807a0acce4d828e271f.png

/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/7b2c61267e944807a0acce4d828e271f.png

/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/7b2c61267e944807a0acce4d828e271f.png

/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/7b2c61267e944807a0acce4d828e271f.png

/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/7b2c61267e944807a0acce4d828e271f.png

/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/7b2c61267e944807a0acce4d828e271f.png

/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/7b2c61267e944807a0acce4d828e271f.png

/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/7b2c61267e944807a0acce4d828e271f.png

/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/7b2c61267e944807a0acce4d828e271f.png

/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/7b2c61267e944807a0acce4d828e271f.png

/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/7b2c61267e944807a0acce4d828e271f.png

/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/7b2c61267e944807a0acce4d828e271f.png

/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/7b2c61267e944807a0acce4d828e271f.png

/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/7b2c61267e944807a0acce4d828e271f.png

/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/7b2c61267e944807a0acce4d828e271f.png

/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/7b2c61267e944807a0acce4d828e271f.png

/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/7b2c61267e944807a0acce4d828e271f.png

/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/7b2c61267e944807a0acce4d828e271f.png

/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/7b2c61267e944807a0acce4d828e271f.png

/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/7b2c61267e944807a0acce4d828e271f.png

/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/7b2c61267e944807a0acce4d828e271f.png

/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/7b2c61267e944807a0acce4d828e271f.png

/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/7b2c61267e944807a0acce4d828e271f.png

/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/7b2c61267e944807a0acce4d828e271f.png

/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/7b2c61267e944807a0acce4d828e271f.png

/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/7b2c61267e944807a0acce4d828e271f.png

/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/7b2c61267e944807a0acce4d828e271f.png

/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/7b2c61267e944807a0acce4d828e271f.png

/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/7b2c61267e944807a0acce4d828e271f.png

/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/7b2c61267e944807a0acce4d828e271f.png

/root/apache-tomcat-baidu_catch/baiduwenkutmp/6/6da5346eb84ae45c3b358cb1.pc/7b2c61267e944807a0acce4d828e271f.png

版权说明：本文档由用户提供并上传，收益归属内容提供方，若内容存在侵权，请进行举报或认领

**相关推荐**  
基于自回归模型的船舶姿态运动预报\_论文  
  
船舶运动控制综述(2017.11.11)  
  
基于EMD-PSO-LSTM组合模型的船舶运动姿态预测\_论文  
  
一种新型的船舶横摇运动实时预报方法\_论文  
  
船舶横摇运动实时在线预报方法\_论文  
 **猜你想看**  
船舶运动的极短期预报试验\_论文  
  
载液船舶在波浪中的运动预报\_论文  
  
船舶运动安稳期预报技术综述  
  
粘性和航行姿态对高速船运动预报的影响\_论文  
  
改进周期图算法及在船舶运动预报中的应用\_论文  
 **相关好店**  
趋势小屋  
「其它」  
  
  
乐图数据  
「其它」  
  
  
成长之窗  
「其它」  
  
  
北大法宝  
「综合」  
  
  
阿飘故事会  
「文化」  
  
  
悦读文稿  
「综合」  
  
  
  
  
  
店铺  
  
  
工具  
  
  
收藏