

# 涡桨发动机螺旋桨建模与控制系统设计研究

时培燕, 毛宁, 杨恒辉, 常博博

(中航工业西安航空计算技术研究所, 西安 710065)

**摘要:** 针对涡桨发动机全权限数字电子控制技术对螺旋桨控制的计算精度和实时性要求, 建立了某型发动机螺旋桨实时模型并设计了其控制系统; 基于最小二乘辨识方法, 应用试车数据建立了螺旋桨实时动态数学模型; 采用前向拉力控制模式, 设计了螺旋桨转速控制系统, 并对模型和控制系统进行仿真验证; 结果表明, 辨识所得模型满足计算精度和实时性的要求, 控制系统能够保证螺旋桨在各个工作状态下安全稳定工作、满足转速控制的需求, 具有良好的工程应用价值。

**关键词:** 螺旋桨; 建模; 系统辨识; 最小二乘法

## Research on Modeling and Control System Designing of Turboprop Engine Propeller

Shi Peiyan, Mao Ning, Yang Henghui, Chang Bobo

(Xi'an Computing Technique Research Institute AVIC, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** The propeller real-time model and control system were established to satisfy the calculation accuracy and real-time request by turboprop engine FADAC. According to aero-engine test data and computational properties of propeller, model foundation of the high precision real-time propeller was achieved by using the least square identification theory. Applying forward-tension control mode, the propeller rotating speed control system was designed and verified. The results indicated that the modal made a guarantee of propellers working credibility in overall conditions, met the demand of propeller control system and had good engineering application value.

**Keywords:** propeller; modeling; system identification; the least squares theory

### 0 引言

涡桨发动机以其在低亚声速飞行范围内独有的高推进效率、低耗油率, 广泛应用于民用小型飞机、支线客机, 各类军用运输机、预警机等。螺旋桨作为涡桨发动机的核心部分, 是旋翼飞机飞行的动力来源<sup>[1-2]</sup>。目前, 国内螺旋桨控制系统多采用机械液压控制, 数字电子控制技术仍处于起步阶段。研究螺旋桨全权限数字电子控制技术, 对于提高螺旋桨性能、增加可靠性具有重要的意义, 建立螺旋桨实时数学模型是研究螺旋桨数字仿真分析的基础与关键。

早期机理建模基于螺旋桨叶片理论分析叶素受力情况, 计算在不同的高度、马赫数、转速及桨距角等条件下螺旋桨的功率和拉力, 建立螺旋桨机构的特性曲线<sup>[3]</sup>。文献[4-6]采用涡格法、面元法和升力面法计算螺旋桨特性, 通过实验数据验证算法的有效性。上述方法计算过程复杂, 不能实时计算。系统辨识建模无需获得对象的结构、运行特性, 获得的数学模型还具有快速求解的优点<sup>[7]</sup>, 在工程研究中广泛应用。

本文结合试车数据采用系统辨识方法建立某型涡轮螺旋桨实时数学模型, 利用残差分析法进行了模型分析, 并结合前向拉力控制模式开展了仿真验证。

### 1 数据预处理

辨识数据的准确性影响着螺旋桨模型的置信度, 试车数据

通常都含有直流成分或高频成分, 测量噪声较大, 无法真实反映螺旋桨的正常工作状态信息。因此, 为使所辨识的模型不受这些因素的影响, 必须对数据进行筛选、滤波等预处理。

为使系统是可辨识的, 输入信号必须满足一定的条件: 在辨识时间内系统的动态必须被输入信号持续激励。从谱分析角度看, 输入信号的频谱必须足以覆盖系统的频谱<sup>[8]</sup>。通过对试车数据分析和迭代检验, 选取螺旋桨前向拉力模式下, 螺旋桨转速从 100% 降至 88% 的桨叶角和转速数据作为辨识对象, 其中, 以桨叶角  $\beta$  为输入、转速  $NP$  为输出, 进行螺旋桨数学模型的离线辨识。

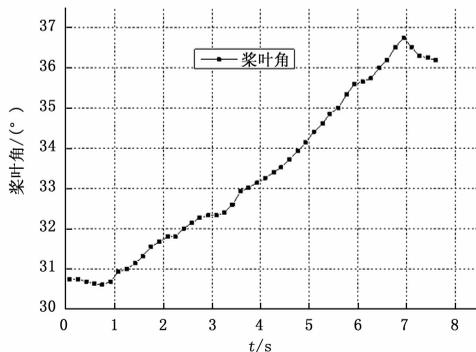


图1 桨叶角随时间变化曲线

根据  $3\sigma$  准则: 数据样本  $x$  服从正态分布, 若有  $|x_i - \mu| > 3\sigma$ , 则认为该点为野点, 其中  $\mu$  和  $\sigma$  分别为样本的数学期望和标准差。由图 1~3 可知, 桨叶角数据在第 7 s 附近存在野点, 这些点不符合桨叶角随时间变化单调递增的趋势, 且超

收稿日期: 2016-02-25; 修回日期: 2016-03-23。

作者简介: 通讯作者: 时培燕(1986-), 女, 山东菏泽人, 硕士, 助理工程师, 主要从事航空发动机控制与仿真技术方向的研究。

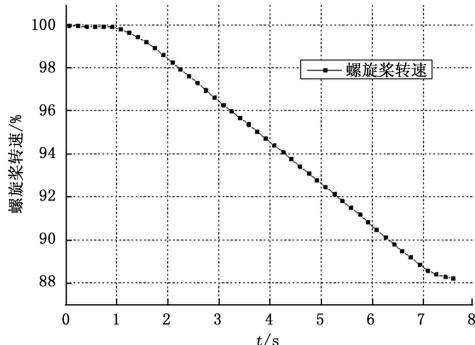


图 2 转速随时间变化曲线

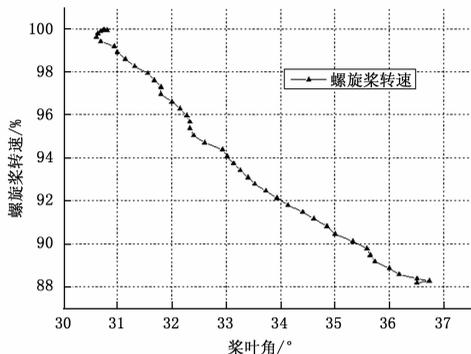


图 3 转速随桨叶角变化曲线

出了随机误差所允许的范围，因而需将这些野点剔除或替换处理。通常，野点的替换处理规则为：

$$\bar{x}_i = \frac{x_{i-1} + x_{i+2}}{2} \quad (1)$$

考虑到试车数据采样时间不等，以 0.01 s 作为辨识系统的采样周期，对输入输出数据进行三次样条插值，结果如图 4 所示。

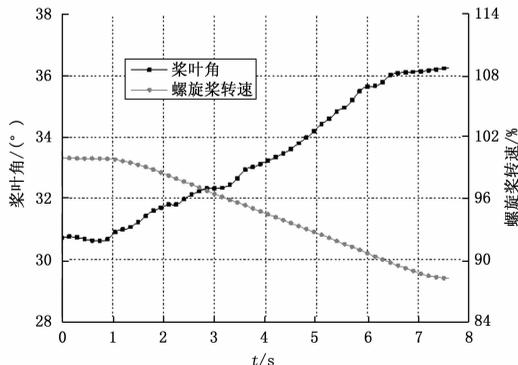


图 4 桨叶角与螺旋桨转速随时间变化曲线图

为了在保留原有数据信息的基础上解决数据漂移和偏离问题，进一步提高辨识精度和辨识模型的可用性，在插值的基础上，对数据进行零均值化处理，结果如图 5、图 6 所示。

## 2 建模分析

### 2.1 辨识方法

系统辨识是一种通用的测试建模方法，即通过分析未知系

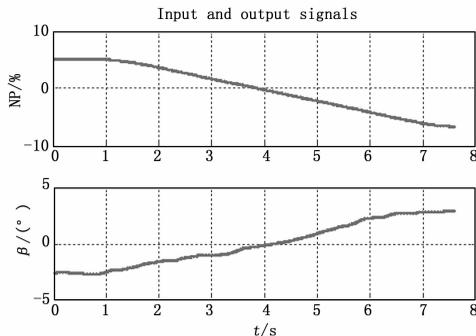


图 5 零均值化后输入输出数据

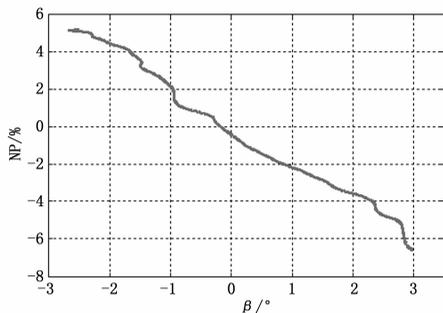


图 6 零均值化后转速随桨叶角变化曲线图

统的输入输出数据，拟合一个与所测系统外特性等价的数学模型<sup>[8]</sup>。即在同一输入下，模型的输出  $\hat{y}(t) = Gu(t) + v(t)$  最接近系统的真实输出  $y(t)$ ，如图 7 所示。

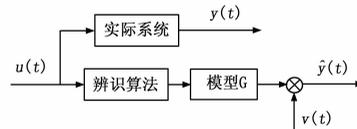


图 7 辨识原理

其中  $u(t)$  和  $y(t)$  为系统的输入和输出， $v(t)$  为随机干扰噪声， $G$  为待辨识系统的等价模型。

最小二乘辨识 (LS) 法是一种基本的参数估计方法。利用最小二乘原理，通过极小化误差准则函数来确定一组系统模型的最佳匹配估计值。它既可用于动态系统也可用于静态系统，既可用于线性系统也可用于非线性系统，既可用于离线估计又可用于在线估计，且在一定条件下，所获得估计是无偏的、一致的和有效的<sup>[9-10,12]</sup>。

设含有噪声的被辨识 SISO 系统的数学模型为：

$$y(k) = G(z)u(k) + e(k)$$

$$G(z) = \frac{Y(z)}{U(z)} = \frac{b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_n z^{-n}}{1 - a_1 z^{-1} - a_2 z^{-2} - \dots - a_n z^{-n}}$$

其差分方程可表示为：

$$y(k) = \sum_{i=1}^n a_i y(k-i) + \sum_{i=1}^n b_i u(k-i) + e(k) \quad (2)$$

其中： $y(k)$ 、 $u(k)$  分别为系统的输出和输入量； $e(k)$  为均值为零的噪声信号； $a_k$  和  $b_k$  分别为未知的向量参数， $k = 1, 2, \dots, n$ 。将式 (2) 写成如下最小二乘形式：

$$y(k) = \varphi(k)\theta + \varepsilon(k, \theta)$$

$$J(\theta) = \sum_{k=0}^n [y(k) - \varphi(k)\theta]^2$$

通过极小化二次误差准则求估计参数  $\hat{\theta}$ , 使得  $J(\theta)$  最小, 从而确定辨识系统的模型参数。

### 2.2 模型辨识

对于去除均值的输入输出数据, 其反映的是  $\Delta\beta$  和  $\Delta NP$  之间相对增量模型的关系, 而不是直接反映桨叶角和螺旋桨转速之间的关系, 但前者可以转化为后者<sup>[8]</sup>。利用系统辨识工具箱配置不同结构模型参数, 分析辨识模型<sup>[11]</sup>。

基于处理后的数据, 分别选择一阶 P1、二阶 P2、P2Z 等不同结构的模型依次执行辨识过程, 辨识结果如图 8 所示。一阶 P1 与二阶 P2 模型的适应度较高, 故选取 P1 模型作为最终辨识的螺旋桨模型:

$$G(s) = \frac{-20.785}{0.038s + 1} \quad (3)$$

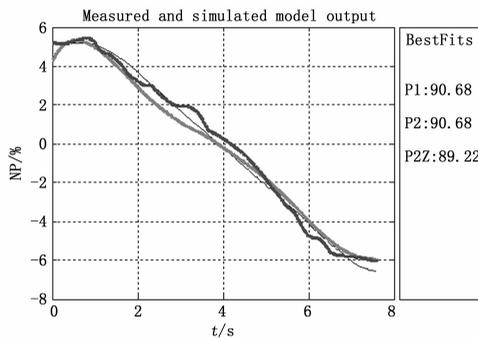


图 8 不同结构模型适应度比较

将模型输出与另外一组实测试车数据进行对比, 由图 9、图 10 可知, 模型输出数据能够快速跟踪实测试车数据的变化趋势, 螺旋桨转速绝对误差  $Er$  不超过 1%, 所辨识模型具有较高的精确度。

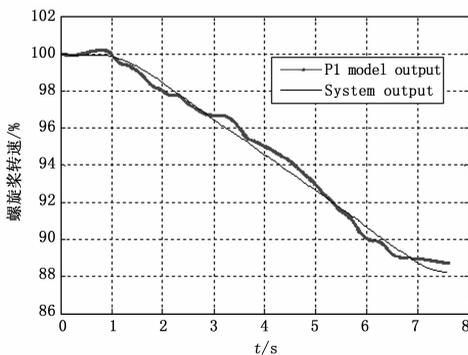


图 9 模型输出与实测转速对比图

### 2.3 模型验证

为进一步验证辨识模型的准确性, 本文采用残差分析法对辨识模型进行分析<sup>[12]</sup>。即检验模型与过程输出残差序列的白色性, 如果残差序列在一个接近于 0 的区间 (置信度  $\alpha$ ) 内波动, 可以视作零均值白噪声序列, 说明所估计的模型参数精度较高。 $\alpha$  常取 99%。

图 11 为模型残差自相关和互相关分析, 它显示残差控制在置信区间内, 且呈均匀分布。即辨识模型能够很好地反映真

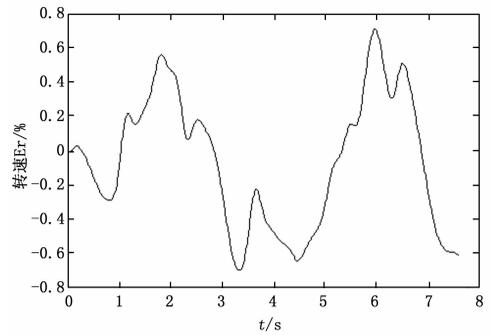


图 10 模型输出与实测转速绝对误差图

实螺旋桨系统的动态特性, 所辨识的模型是可行且有效的。

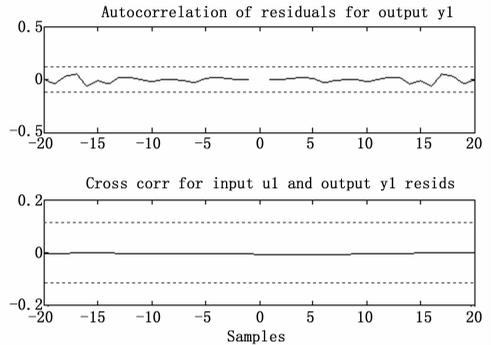


图 11 模型输出残差分析图

## 3 仿真分析

以螺旋桨前向拉力控制模式为对象, 采用 PID 控制算法, 构建螺旋桨转速闭环控制系统, 系统仿真模型如图 12~13 所示。在该控制模式下, 控制量为伺服阀电流, 被控参数为螺旋桨转速, 控制规律为通过改变伺服阀电流使螺旋桨转速达到期望转速。

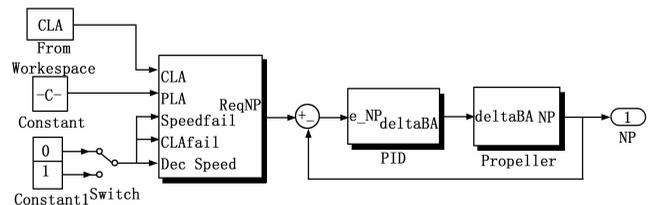


图 12 前向拉力控制模式转速闭环控制仿真图

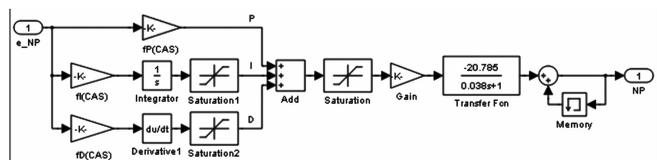


图 13 PID 控制仿真图

图 14 给出了前向拉力模式下, 螺旋桨转速从 100% 降至 88% 的动态过程。由图 14 可知, 螺旋桨实际转速迅速、精确地趋近于期望转速, 超调量小于 1%, 稳态误差小于 1%。仿真表明, 控制系统具有一定的鲁棒性, 能够保证螺旋桨在不同 (下转第 109 页)