

军用飞机状态估计与参数辨识软件包研制

邓建华 龙德春 艾剑良 张骏星

(西北工业大学 120 信箱, 西安, 710072)

DEVELOPMENT OF STATE ESTIMATION AND PARAMETER IDENTIFICATION SOFTWARE PACKAGE FOR MILITARY AIRCRAFT

Deng Jian-hua, Long De-chun, Ai Jian-liang, Zhang Jun-sing

(Box 120 Northwestern Polytechnical University, Xi'an, 710072)

摘要 在对最优输入设计、数据协调和数据分析分别进行研究的基础上,应用软件工程化方法研制出相应的软件,再通过管理软件进行统一管理,集成了一个完整的军用飞机状态估计与参数辨识软件包 MASEPI。最后,通过仿真测试和实测数据处理,该软件包的有效性和实用性得到了验证和确认。现已应用于实际工程试验与试飞数据处理。

关键词 飞机状态估计与参数辨识, 试验与飞行试验数据处理, 软件包, 软件工程

Abstract On the basis of study on optimal input signal design, data compatibility checking and data analysis, the corresponding softwares were prepared by way of the software engineering method, and then controlled by the managing software. So, an integral state estimation and parameter identification software package for military aircraft MASEPI was formed. Finally, the efficiency and practicality of the software package were confirmed by simulating, test and flight test data processing. The state estimation and parameter identification software package for military aircraft MASEPI was applied to the practical engineering of test and flight test data processing. This paper is a brief introduction to the development of the above mentioned state estimation and parameter identification software package MASEPI.

Key words state estimation and parameter identification, test and flight test data processing, software package, software engineering

1 MASEPI 软件包的描述

飞机状态估计与参数辨识是当前航空领域广为重视的课题,特别是70年代以来随着科学技术的迅速发展,高效率自动数据采集系统和高速大容量数据处理系统的出现,现代估计理论与先进统计理论研究的突破,以及现代高性能主动控制技术(ACT)、飞机试验与试飞数据分析迫切的需要,使得飞机状态估计与参数辨识技术无论在方法、范围以及工程应用上均得到了迅速的发展^[1]。

在航空航天工业部支持下本课题组历经5年研制出23个软件并集成《军用飞机状态估计与参数软件包 MASEPI》。该软件包基本覆盖了主动控制飞机参数辨识全过程(图1),对参数辨识过程提供软件支持,可以实现飞行试验和地面台架试验最优输入信号

1991年8月19日收到,1992年2月15日收到修改稿

设计、数据预处理与数据协调、测量仪器偏差辨识、气动导数辨识、等效低阶系统辨识、等效高阶系统辨识等。软件包还自带绘图机、打印机和屏幕绘图软件。软件包通过管理软件进行统一管理,为用户提供方便。软件包全部按部颁《软件工程规范》设计^[2],并提供相应的技术文档。软件包是在 IBMPC 系列微机及其兼容机上开发,除了管理绘图软件外全部采用 FORTRAN77 语言,其运行软件可在任何大中小型计算机运行。软件包规模约含 25000 条语句。

MASEPI 软件包均经过数字仿真和实测数据分析验证和确认,可用于实际工程中地面试验和飞行试验数据分析。该软件包部分已在工程上应用于 XX 机飞行试验数据协调与气动导数辨识;XX 机 ACT 模拟电传验证机地面台架试验(频域和时域)飞行品质分析和 XX 机 ACT 单轴数字电传系统验证机飞行试验飞行品质分析等。MASEPI 软件包经专家鉴定已达到国际 80 年代水平,在国内处于领先地位^[3]。

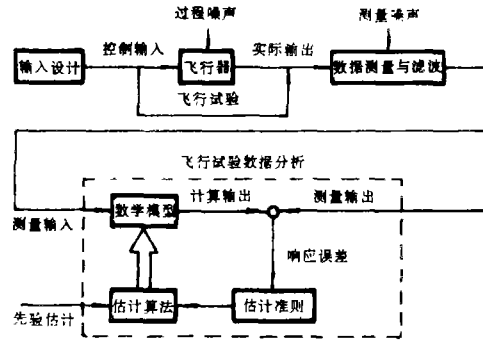


图1 基本的参数辨识过程

2 主要功能实现方法

2.1 最优输入设计

最优输入设计是完整的参数辨识过程中重要的一环,其目的是为了设计出特殊的输入信号以激发出与所辨识参数相关的运动模式。

本软件包在总结了很多人比较实用的输入信号,如阶跃信号、双边信号、方波信号、锯齿波信号、“3211”信号、Schulz 信号、DUT 信号、Mehra 信号、M 序列信号等的基础上提供了可以产生适合不同辨识目的的各种实用的输入信号的输入信号产生软件。该软件产生的输入信号通过数字仿真研究其可辨识性,同时综合考虑驾驶员操纵的可接受性、飞机输出响应对被辨识参数的灵敏性、仪器的测量范围和信噪特性的限制、模型假设(如线性化、拟线性化、非线性化)的限制,以及其他辨识用途等确定出准最优输入信号给用户使用。

2.2 数据协调

所谓数据协调,就是要剔除测量数据的各种误差、高频噪声以及野值,使修正后的数据满足飞机运动微分方程,它是参数辨识全过程中的一个不可缺少的部分。

数据协调方法很多。本软件提供了 3 种数据协调方法及相应的软件——状态重构卡尔曼滤波法(包括单步迭代最优平滑滤波^[5]、拟线性最优平滑滤波^[6]和广义卡尔曼滤波)、状态扩展参数估计卡尔曼滤波法和极大似然法等^[4]。状态重构卡尔曼滤波法并不直接求出测量偏差,而是通过状态估计直接重构出一组协调的观测数据。状态扩展参数估计卡尔曼滤波法则是将测量偏差作为状态矢量一部分,既重构出协调的观测数据,又估计出测量偏差的时间历程。极大似然法则是将测量偏差的辨识,估计出测量偏差后再对测量数据进行修

正补偿使其相互协调。

2.3 数据分析

数据分析, 即参数辨识。参数辨识方法很多, 但基本可分为 4 大类^[1, 4]: 方程误差法、输出误差法、先进统计方法(推广卡尔曼滤波法和极大似然法) 和直接探寻法。本软件包各功能软件除了应用上述基本方法和其改进算法外^[6~8], 还通过快速付里叶变换将实域数据转换为频域数据应用频域极大似然法辨识参数^[9, 10]。方程误差法主要用于线性系统; 输出误差法用于只有测量噪声而无过程噪声的线性或非线性系统; 扩展卡尔曼滤波法是一种统计方法, 具有一致的、渐近无偏和渐近有效的估计, 但它有一个严重的缺点就是需要先验的协方差信息, 而对于参数辨识来说它是未知的; 极大似然法及其改进的算法可用于既含测量噪声又含过程噪声的线性、非线性系统, 其估计也是一致的、渐近无偏、渐近有效的, 是参数辨识中应用最广、最成熟的一种方法; 直接探寻法原理简单, 应用范围广, 但是辨识参数多时计算量大; 快速付里叶变换算法与频域极大似然法辨识参数由于基本属代数运算, 具有快速性, 节省机时。

3 软件包的设计与实现

3.1 参数辨识处理流程

参数辨识的处理流程如图 2 所示。首先对参数辨识要求进行分析, 然后提出飞行方案和机动要求, 即最优输入设计。在最优输入设计过程中可能要通过一系列仿真处理, 以验证这种输入设计的可行性、安全性和有效性。有了输入信号后, 通过试飞、数据采集就得到了原始的实测数据。再通过数据转换可以得到所要求的数据形式。下一步进行数据协调处理, 可以通过绘图检验数据协调效果。有了协调数据就可以用其进行参数辨识, 辨识结果同样可以作绘图分析。这样, 整个参数辨识过程就完成了。本软件包正是基于这个处理过程来设计的, 参数辨识处理流程中凡有数据处理的地方都配有相应的软件, 有些地方为实现某一功能甚至使用几种方法, 以便于比较。

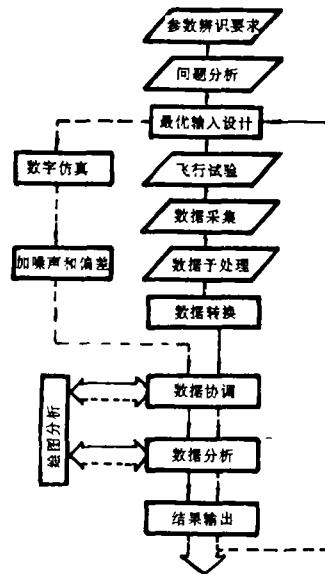


图 2 参数辨识处理流程

图 2 中, 除了斜四边形框所表示的部分外, 各矩形框所组成的部分都是本软件包有关内容, 并且都有相应的软件。图中实线表示对实测数据的处理路线; 虚线表示仿真处理过程。

3.2 软件包总体结构

软件包采用自顶向下分层结构, 其总体结构如图 3 所示。在顶层软件包分为用户库和

处理功能两部分。用户库包括一些功能单一的标准程序块和实现某种算法的通用程序块。处理功能部分分为数据获取、数据协调、数据分析和绘图等 4 个部分。数据获取用于产生仿真数据或对实测数据预处理；数据协调和数据分析用于产生协调数据并提取各功能参数，它们是软件包的核心内容；绘图部分用于前面各部分的数据处理结果作图形分析和比较，以便于直观地分析问题。

3.3 软件设计与实现

本软件包含有近 20 个功能处理软件，这些软件一般都包括数学模型、流程设计、程序语言编码和编译连库等一系列的设计与实现过程，从而产生实现某一功能的运行软件^[8]。

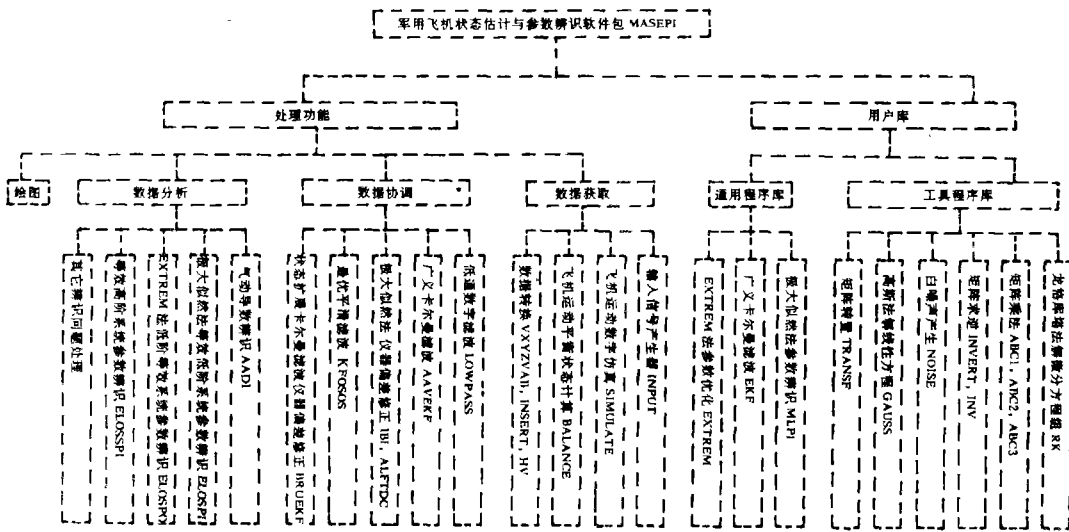


图 3 软件包总体结构图

3.4 菜单翻阅式软件包管理

在完成各具体软件的设计、编码后，通过管理软件对其进行统一管理，形成一个完整有机的软件包。

管理软件采用菜单翻阅式管理方式。即管理软件开始运行后屏幕自动显示一个顶层菜单，在顶层菜单中可能有多个功能供选择，当通过键盘送入选择命令后，屏幕会自动进入到所选功能的子菜单，通过进一步的命令选择可进入更低一级的子菜单即子子菜单，…，如此下去直到最低级的子菜单，这时输入该菜单下的某命令，该命令所对应的功能就会被执行，执行完命令后自动返回命令执行前的菜单，这时还可以选择执行其他命令，也可以返回其上级菜单，而且在各级菜单都可退出管理程序。

本软件包的菜单顶层分为两部分，一个是软件说明部分，另一个是命令处理部分。软件说明部分用于对每个软件的算法原理、功能和用法进行说明，这些说法在屏幕上的翻阅就象翻阅书本一样，使用起来非常方便，其作用相当于“用户手册”。命令处理部分包括 DOS 命令处理、文件编辑、FORTRAN 文件的编译和连库、中文处理和绘图方式。如果要使用软件包的功能软件，只须在软件包管理状态下对该功能软件执行编译和连库命令，然后即可运行了。

软件包处理流程如图 4 所示。

3.5 软件工程化考虑

所谓软件工程化设计, 即把软件设计看作一项工程项目来完成, 对它进行定义、开发和维护一整套完整的过程, 使软件的设计和实现形成系统的工程化方法。本软件包基本采用软件工程化的方法按着软件工程规范^[2]进行设计, 只是由于软件包的规模还不十分大, 所以简化了软件工程化设计的某些环节, 仅在语言选择、编程格式标准、软件配置 (除了程序还给出了软件设计说明书^[11]和用户手册^[12])、程序结构化和模块化设计, 采用流程图作为详细设计工具, 软件测试采用“黑箱测试”作一些集成测试等。

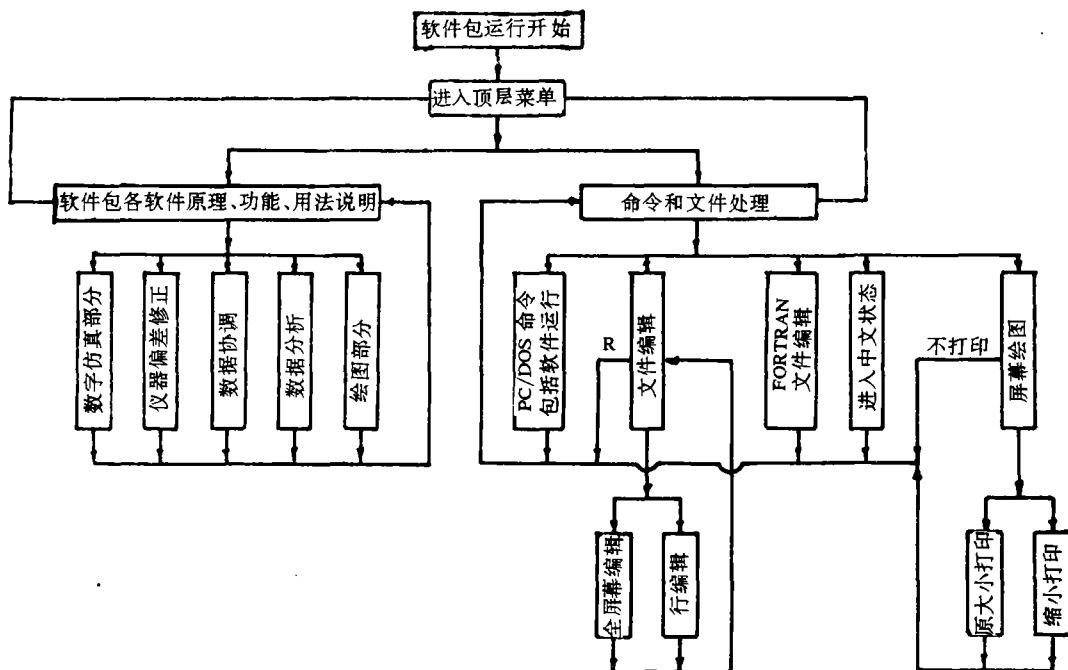


图 4 软件包处理流程

4 仿真测试

使用本软件包所给的数字仿真软件, 在一定的输入信号作用下, 可以得到飞机运动输出响应的仿真数据。有了仿真数据, 就可对各功能软件进行仿真检验, 并对处理结果进行分析, 从而验证方法和软件有效性。

输入设计的仿真处理验证了通过仿真比较确定了准最优输入信号的可行性^[4]。数据协调和参数辨识的仿真测试都取得令人满意的结果, 辨识误差一般都在 5% 以内, 使用参数的辨识值所预测出的飞机输出响应曲线也能较好地拟合输出响应的仿真曲线^[4]。

5 实测数据分析验证和确认与工程应用

本软件包主要功能软件都经过实测数据分析的验证和确认,并且部分软件已应用于工程试验和试飞数据分析。

曾应用单步迭代平滑滤波软件和飞机气动导数辨识软件对XX飞机(带自动驾驶仪)空中飞行试验数据进行数据协调^[5],并辨识出飞机气动导数,包括稳定与操纵静导数和一般风洞不能直接测量的动导数,辨识结果与风洞测量和理论值基本一致^[13]。这不仅验证了理论与风洞实验而且为飞机改进设计提供了充分可靠的数据。应用等效低阶系统参数辨识等软件分别由XX机ACT模拟电传系统地面试验实测的频域和时域数据辨识出飞机动态品质参数,二者一致并且与实际相符^[6, 10]。其意义不单单取得飞机动态品质参数,更重要的是开辟了直接由时域试验数据提取飞行品质的新途径。

某公司还应用低阶等效系统EXTREM参数优化法软件处理XX机ACT验证机单轴数字电传系统飞行试验数据,直接由实测时域数据辨识飞机动态品质参数,取代了过去工程使用的传统的作图法,解决了国内广泛使用的频域拟配法不能处理时域数据的不足,为由实测时域飞行试验数据分析飞行品质提供了一个有效的分析工具^[14, 15]。

参 考 文 献

- 1 Hamel P G Aircraft Parameter Identification Methods and Their Applications - Survey and Future Aspects. AGARDLS-104, 1979.1-1~1-26
- 2 航空部软件工程化工作小组.航空工业部软件工程规范.航空部601研究所印,1987.
- 3 航空航天部科技司.科学技术成果鉴定书及其附件(主动控制飞机参数辨识方法及其软件系统).西北工业大学,1991.
- 4 龙德春.军用飞机状态估计与参数辨识软件包研制.西北工业大学硕士论文,1989.33~36,84~96,96~99,100~123
- 5 郭小勤、邓建华等.利用单步迭代滤波法进行飞行试验数据协调性检验.中国航空学会自动控制专业委员会学术交流会议,1987.
- 6 高民、邓建华.CCV飞机低阶等效系统参数辨识-时域法.中国航空学会主动控制技术暨飞行控制与操纵第三次学术交流会,1988
- 7 邓建华、严东升、刘千刚.非线性极大似然法及其在飞机参数辨识中的应用.数据采集与处理,1989,4(3):46~53
- 8 宋丽娟、邓建华、王连升.主动控制飞机等效高阶系统参数辨识.中国航空学会主动控制技术暨飞行控制与操纵第三次学术交流会,1988.
- 9 李勇.主动控制飞机等效参数系统辨识.西北工业大学硕士论文,1990
- 10 钱国线、邓建华.应用极大似然法由实测数据辨识主动控制飞机动态品质.待发表,1991.
- 11 龙德春.MASEPI软件设计说明书.西北工业大学技术报告,NPU-89-037,1989.
- 12 龙德春.MASEPI用户手册.西北工业大学技术报告,NPU-89-038,1989.
- 13 艾剑良、邓建华等.拟线性最优平滑滤波及其在飞行试验数据一致性检验中的应用.中国航空学会飞行控制与操纵第四次学术交流会,1991.
- 14 艾剑良、邓建华.飞机纵向等效飞行品质参数辨识的参数优化法.中国航空学会飞行控制与操纵第四次学术交流会,1991.
- 15 尹春铭.XX ACT验证机单轴数字电传系统飞行测试与数据处理.内部报告,1991.