

Вторичная обработка результатов аэродинамических дренажных испытаний

*Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт»*

Проанализирована проблема автоматизации обработки результатов дренажного эксперимента. Каждый эксперимент сопровождается множеством ошибок, которые необходимо устранить. Этот процесс должен быть максимально автоматизирован.

Ключевые слова: дренажная модель летательного аппарата, технологический цикл, аэродинамическое проектирование, давление по хорде профиля, дренажные испытания, статистика, критерий Кохрена, Бартлетта, t-статистика Стьюдента.

Введение

Дренажные испытания предназначены для определения распределения давления по поверхности модели летательного аппарата (МЛА) или ее элементов [1, 2, 3]. Распределение (эюра) давлений дает возможность понять характер обтекания, определить суммарную аэродинамическую силу и момент, определить наличие скачков уплотнения.

Экспериментальные данные представляют собой показания датчиков измерительной аппаратуры системы, считанные в процессе проведения исследований. Исследования МЛА в аэродинамической трубе (АДТ) связаны с получением и переработкой больших объемов разнородной информации. Каждому эксперименту предшествует продолжительный процесс подготовки МЛА и аппаратуры к испытаниям, который сопровождается множеством ошибок и неточностей. Порой это приводит не только к повторению этапов обработки, но и эксперимента в целом. Названные недостатки приводят к существенному увеличению времени проектирования ЛА.

1. Постановка задачи

Общую структуру существующего технологического цикла экспериментальных исследований МЛА в АДТ можно представить следующей логической схемой на рис.1 [4,5]:

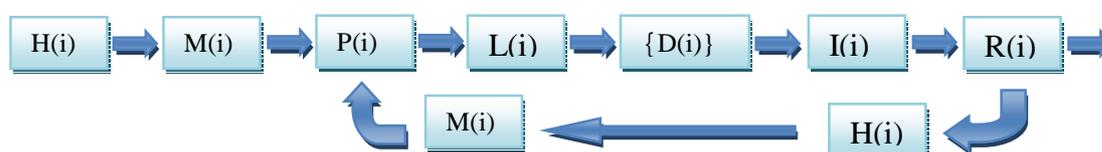


Рис. 1. Структура технологического цикла:

- H(i) - рабочая гипотеза или то, что ждет исследователь от эксперимента;
 - M(i) - вариант МЛА, удовлетворяющий необходимым критериям подобия;
 - P(i) - программа эксперимента; L(i) - алгоритм вычислений;
 - D(i) - процесс формирования экспериментальных данных;
 - I(i) - интерпретация полученных результатов; R(i) - критерий достижения цели,
 - i - порядковый номер технологического цикла
- Сущность приведенного алгоритма:

- Исследователь формирует цель эксперимента (рабочая гипотеза – $H(i)$) или предполагаемый результат. Для этого он использует существующую априорную информацию (отчеты об исследованиях МЛА; научные статьи и т.п.).

- Для достижения цели экспериментальных исследований проектируется и изготавливается первоначальный вариант МЛА – $M(i)$.

- Подготавливаются тематическая и рабочая программы эксперимента – $P(i)$, а также оговаривается или разрабатывается методика обработки экспериментальных данных.

- Для стандартных (промышленных) экспериментальных исследований методика обработки данных известна – $L(i)$.

- Проводится эксперимент, результатом которого являются сформированные данные в стандартной форме $\{D_i\}$. Традиционный способ представления экспериментальных данных - это таблицы, графики.

- таблицы и графики используются исследователем для интерпретации $I(i)$ и анализа данных, а также проверки критерия достижения цели $R(i)$. Если он достигнут, тогда экспериментальные исследования прекращаются, а если нет, тогда уточняется рабочая гипотеза, дорабатывается МЛА – $M(i+1)$ и технологический цикл экспериментальных исследований повторяется.

Результат экспериментальных исследований МЛА в АДТ заключается в достижении поставленной цели на одном из его технологических циклов.

Задачи расчетов можно разделить на четыре группы.

В первую группу входят расчеты технологических параметров управления экспериментом, используемые для оценки их текущего состояния. К таким параметрам относятся: скорость потока (M), углы и расход воздуха, барометрическое давление, температура, угловая скорость вращения вентилятора, опорные напряжения, опорные давления, состояние измерительной аппаратуры. Расчеты данных параметров необходимо производить в реальном времени с заданной периодичностью.

Вторую группу образуют задачи, связанные с обработкой данных, которая может выполняться как в процессе выполнения эксперимента, так и по окончании его.

Третью группу составляют задачи обработки и документирования экспериментальных данных согласно существующим методикам.

Четвертая группа задач связана с осмысливанием результатов экспериментальных исследований при анализе аэродинамических характеристик ЛА с применением средств автоматизации.

Поэтому четвертая группа задач определяет свойства алгоритмов:

- существует алгоритм и есть программный модуль;
- существует алгоритм, но нет программного модуля;
- нет алгоритма, но известно как его реализовать;
- нет алгоритма, и неизвестно как его реализовать.

Далее фиксируется совокупность свойств алгоритмов, которые делают их:

- приемлемыми алгоритмами для реализации на данном комплексе задач;
- неприемлемыми алгоритмами, если алгоритмы слишком сложные и их реализация занимает недопустимо большой объем компьютерной памяти;
- алгоритмы не могут быть реализованы за требуемое время.

Исходя из этого, на данном уровне схемы классификации, можно выделить три качественных признака алгоритма:

- решает все задачи и является приемлемым;

- решает все задачи, но по некоторым признакам требует улучшения;
- не обеспечивает решения всех задач, но является приемлемым.

2. Система вторичной обработки и эффективность ее функционирования

Основы вторичной обработке экспериментальных данных изложены в работах [6, 7]. Этот этап обработки требует диалоговой формы работы пользователя с ЭВМ, что позволяет оперативно контролировать исходные и промежуточные данные, быстро оценивать конечный результат.

Система обработки (СО) обязана обеспечить следующие возможности:

- контроль, редактирование и аппроксимация полученных давлений в точках;
- определение производных функций распределения аэродинамических характеристик;
- визуализация и документирование результатов вторичной обработки в соответствии с требованиями на оформление.

Прежде чем приступить к проведению полномасштабного опыта и обработке данных, необходимо убедиться в том, что принятая технология проведения опыта

воспроизводима. Для определения эффективности функционирования системы обработки предлагается проводить оценку нормируемых параметров на основе априорно известных (эталонных) данных давления.

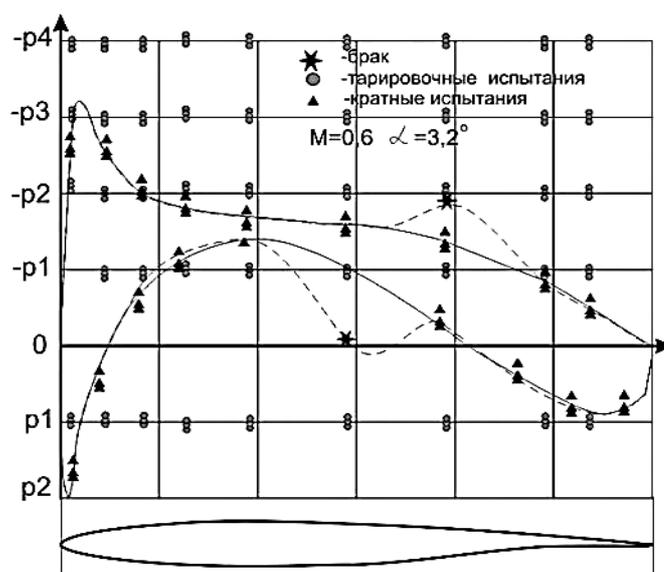


Рис. 2. Профиль №32, сечение 6, $M=0.6, \alpha = 3.2^\circ$

Метод проверки предполагает:

1. Считывание опытных данных (ОД) и формирование матрицы с элементами P_{jt} значений давления в точке t при i -м повторе опыта (кратном опыте) в предполагаемом диапазоне функций отклика для j -й серии опытов.
2. Определение доверительного интервала, на основании которого и выполняется оценка качества ОД.

3. Поиск и исключение "выпавших" точек по ансамблю ОД.

Для каждой серии повторных опытов (рис.2) вычисляют среднее арифметическое значение функции отклика - давления:

$$\bar{p}_{jt} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k p_{ijt} \quad (j = 1, 2, \dots, N; \quad t = 1, 2, \dots, M), \quad (1)$$

где k — количество повторных опытов, проведенных при одинаковых условиях, $2 \leq k \leq 9$,

p_{ijt} — значений давления в точке t при i -ом повторе для j -й серии опытов;
 j — номер серии опытов;
 t — номер точки

Далее вычисляется оценка дисперсии для каждой серии повторных опытов в точке t :

$$s_{jt}^2 = \frac{1}{k-1} \sum_{i=1}^k \left([p_{jit} - \bar{p}_{jt}]^2 \right) \quad (j = 1, 2, \dots, N; \quad t = 1, 2, \dots, M). \quad (2)$$

Для проверки воспроизводимости показаний давлений в точках t находят отношение наибольшей из оценок дисперсий к сумме всех оценок дисперсий:

$$G_{qt} = \frac{\max s_{jt}^2}{\sum_{j=1}^N s_{jt}^2} \quad (3)$$

Этот расчетный критерий Кохрена [8] соответствует доверительной вероятности $P = 0,95$ и сравнивается с табличным значением критериев Кохрена $G[8]$. Критерий определяется по общему количеству оценок дисперсий N (количество серий опытов) и число степеней свободы f , связанных с каждой из них, причем $f = k - 1$, численное значение которых должно быть не меньше трех. Если выполняется условие $G_q < G$, то опыты считаются воспроизводимыми, а оценки дисперсий однородными. Для $N = 3$ и $f = 4$, $G_q < 0,746$.

В тех случаях, когда имеются результаты несколько серий с разным количеством повторных опытов, по уравнению (1) для каждой серии опытов вычисляют среднее арифметическое значение давления в точке. Оценка дисперсии для каждой серии повторных опытов в точке определяют из выражения (2). С каждой из этих оценок связано число степеней свободы $f_{jt} = k_{jt} - 1$ и рассчитывается средневзвешенная оценка дисперсии

$$s_{ct}^2 = \left(\sum_{j=1}^N f_{jt} s_{jt}^2 \right) \left(\sum_{j=1}^N f_{jt} \right)^{-1} \quad (t = 1, 2, \dots, M). \quad (4)$$

Введя обозначение $f_t = \sum_{j=1}^N f_{jt}$ и вспомогательный коэффициент [12]

$$C_t = 1 + \frac{1}{3(N-1)} \left(\sum_{j=1}^N \frac{1}{f_{jt}} - f_t \right), \quad (5)$$

вычисляется значение критерия Бартлетта [8]:

$$B_t = \frac{2.3026}{C_t} \left(f_t \lg s_{ct}^2 - \sum_{j=1}^N f_{jt} \lg s_{jt}^2 \right) \quad (6)$$

и проверяется условие $B_t \leq C_t^2$ для уровня значимости ρ и числа степени свободы $f_t = N - 1$. Если условие выполняется, то воспроизводимость показаний точки принимается и точка допускаяется к работе.

Кроме проверки адекватности проводится проверка значимости показаний давлений.

Учитывая нелинейность функции отклика и зная диапазон исследуемых параметров проводится серия кратных опытов. В процессе работы практически гарантированно появляются «бракованные» показания (рис.2). Такие данные относятся к случайным ошибкам, природа которых определяется свойствами объекта и измерительного инструмента, методами измерений, внешними факторами и личными качествами персонала проводящего измерения.

Исключение «бракованных» точек выполняется с использованием t-статистики Стьюдента:

$$t = (p_{i \min} - p_{i \max}) / (s \cdot \sqrt{f}) ,$$

где $p_{i \min}$ и $p_{i \max}$ – минимальное или максимальное значение давления в группе повтора, которые проверяются на «брак»,

$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k (p_{ji} - \bar{p}_j)^2}{f}}$ – стандарт (среднеквадратичное отклонение) j -й точке при i -м повторе, имеющий размерность давления.

При минимальном числе степеней свободы $f=2$ и уровне значимости $\alpha=0,05$ табличное значение $t=4.303$.

Регрессионный анализ применим при определенных условиях:

1) параметр оптимизации — случайная величина с нормальным законом распределения. Дисперсия воспроизводимости — одна из характеристик этого закона распределения.

2) дисперсия параметра оптимизации не зависит от значений параметра оптимизации. Выполнимость этого условия проверяется с помощью критериев однородности дисперсий в разных точках факторного пространства. Если однородность дисперсий все же отсутствует, то необходимо такое преобразование параметра, которое делает дисперсии однородными.

3) значения факторов — неслучайные величины; Это означает, что установление каждого фактора на заданный уровень и его поддержание существенно точнее, чем ошибка воспроизводимости.

4) факторы не коррелированы.

Такой подход обеспечивает необходимый результат при обработке результатов дренажного эксперимента, если не нарушается нормальный закон распределения.

В практике встречается ситуация когда в процессе проведения опыта давление в точке измерить правильно не удастся, например по причине засорение точки. В данном случае давление в точке близко к нулю или неадекватному значению (рис. 3). Это «бракованная» точка. Такая точка может

удовлетворять всем рассмотренным выше условиям, но за ее показаниями ничего не стоит. Для выбраковки такой точки используются свойства, основанные на непрерывности функции обтекаемой поверхности:

- производная функции распределения в окрестности точки меняет свой знак на противоположный несколько раз. Окрестностью точки считается дистанция по хорде дренированного сечения до ближайших точек слева и справа.

- производная функции распределения выхлтит за границы доверительного интервала производных.

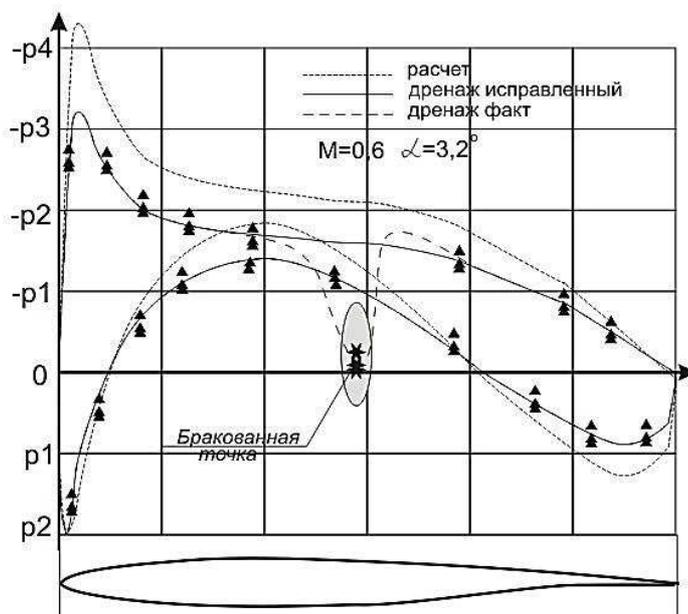


Рис. 3. Выбраковка дренажа, $M=0.6$, $\alpha = 3.2^\circ$

Если эти свойства характерны для дренажной точки, то с очень высокой вероятностью можно говорить о ее «бракованности» на уровне значимости $\alpha=0,05$.

Для построения доверительного интервала определяется дисперсия коэффициента регрессии производных функции распределения давления по хорде:

$$s_{\{b'_{jt}\}}^2 = \frac{s_{y'_t}^2}{N}, \text{ где } s_{y'_t}^2 - \text{дисперсия производных функции распределения давления по хорде дренированного сечения.}$$

Доверительный интервал определяется как:

$$\Delta b'_{jt} = \pm Et \sqrt{s_{\{b'_{jt}\}}^2},$$

где t - табличное значение критерия Стьюдента при числе степеней свободы с которыми определена $s_{\{b'_{jt}\}}^2$ на уровне значимости $\alpha=0,05$. E - параметр регулирования диапазона, $E=1.0$ при $\alpha=0,05$.

$\sqrt{s_{\{b'_{jt}\}}^2}$ - квадратичная ошибка коэффициента регрессии.

Доверительный интервал задается верхней и нижней границами $b_{j\tau} + \Delta b_{j\tau}$ и $b_{j\tau} - \Delta b_{j\tau}$, где $b_{j\tau}$ - базовая функция производных распределения давления по хорде дренированного сечения (рис. 4).

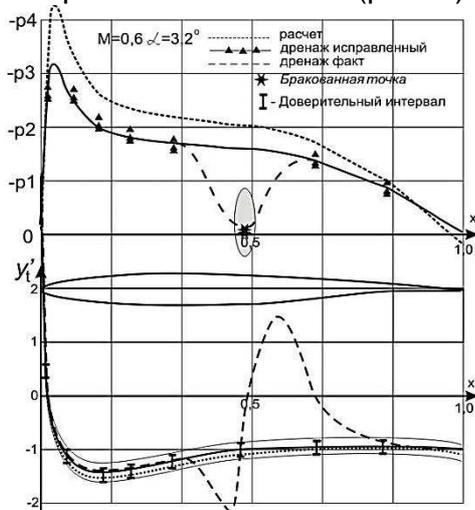


Рис.4. Построение доверительного интервала для верхней поверхности сечения, $M=0.6$, $\alpha = 3.2^\circ$

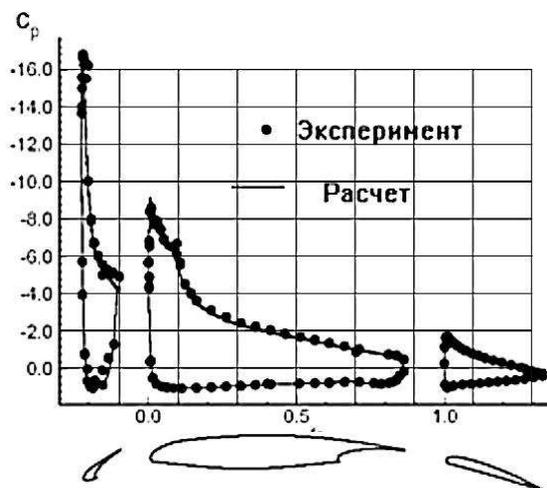


Рис.5. Распределение давления по поверхности элементов механизированного профиля, $M = 0.197$, $Re = 3.52 \cdot 10^6$, $\alpha = 10^\circ$. Компоновка NHL1T2 [9].

В качестве базовой функции производных при отсутствии данных кратных испытаний используется численный панельно-вихревой метод расчета.

Суть метода: по панелям, моделирующим поверхность крыла распределяются слои вихрей, источников и стоков, причем интенсивность вихревого слоя изменяется по линейному закону вдоль хорды панели, а интенсивность слоя источников-стоков постоянна в пределах панели. Интенсивности источников-стоков и вихрей одинаковы на противоположных сторонах крыла в пределах одной полосы панелей. Граничные условия непротекания выполняются в контрольных точках, расположенных в центрах панелей, а условие Чаплыгина - Жуковского выполняется путем приравнивания интенсивности вихревого слоя на задней кромке нулю. Распределение давления по поверхности элементов механизированного суперкритического профиля, полученное расчетным путем в сравнении с экспериментом показано на рис. 4. В данном случае, хорошее совпадение расчета и эксперимента показано при безотрывном обтекании. Это говорит о том, что вторичная обработка дренажного эксперимента может быть максимально автоматизирована с гарантированной точностью.

Выводы

Для решения поставленной задачи необходимы:

1. Формирование статистических характеристик каналов получения опытных данных: дисперсий, стандартных отклонений, средних значений;
2. Исследование характеристик производных функций аппроксимации данных и их реакцию на случайную входную погрешность.

3. Имплантировать производные функций распределения давления, полученные расчетным путем с учетом формирования доверительного интервала.

Мы предполагаем, что при любой сложности и достоверности предлагаемых методов автоматической обработки результатов дренажного эксперимента участие экспериментатора при этом и необходимость визуального контроля выходной информации – неизбежна.

Список литературы

1. Малые ЭВМ и их применение / Под ред. Б.Н.Наумова. - М.: статистика, 1980. - 231 с.

2. Руденко И.В., Нациокс Т.Г., Зинченко В.П. и др. Алгоритм обработки результатов дренажных испытаний моделей с внутримодельными пневмокоммутаторами в аэродинамических трубах малых скоростей. // Третья Всесоюзная школа по методам аэрофизических исследований. Сб. доклад. - Новосибирск: ИТПМ СО АН СССР, 1982. - С. 204-208.

3. Горлин С.М., Слезингер И.И. Аэродинамические измерения. - М.: Наука, 1964. - 720 с.

4. Жук К.Д. Автоматизированная система обработки экспериментальных данных //

Энциклопедия кибернетики. Т.1. - Киев, 1975. - стр.35-36.

5. Зинченко В.П. Автоматизация экспериментальных исследований в аэродинамической трубе // УСиМ, N 1, 1989. – С. 95-99.стр.35-36.

6. Амелкина М.А., Вышинков Ю.М. Системное математическое обеспечение обработки эксперимента // Третье Всесоюзное совещание "Экспериментальные методы и аппаратура для исследования турбулентности". Сб. доклад. - Новосибирск, 1980. - с.183-188.

7. Бородецкий М.Д., Шпак С.И., Харитонов А.М. Программное обеспечение АСНИ ИТПМ. Вторичная обработка результатов аэродинамического эксперимента // Автоматизация аэродинамического эксперимента / Под ред. Н.Н.Яненко,

8. Хеммельблау Д. Анализ процессов статистическими методами. / Пер. с нем. - М.: Мир, 1973. - 975 с.

9. AIAA 2002 – 2939. Validation of Numerical optimization of High-Lift Multi-element airfoils based on Navier-Sokes-Equations.JochenWild.

Рецензент: д-р. техн. наук, проф. Е.П. Ударцев, Национальный аэрокосмический университет, г. Киев.

Поступила в редакцию 21.06.2012.

Вторинне оброблення результатів аеродинамічних дренажних випробувань

Проаналізовано проблему автоматизації оброблення результатів дренажного експерименту. Кожний експеримент супроводжується помилками, які необхідно вилучити. Цей процес має бути максимально автоматизованим.

Ключові слова: дренажна модель літального апарата, технологічний цикл, аеродинамічне проектування, тиск по хорді профілю, дренажні випробування, статистика, критерій Кохрена, Бартлетта, t-статистика Стьюдента.

Secondary processing result aerodynamic test

The Article is dedicated to problem to automations of the processing result drainage of the experiment. Each experiment is accompanied the ensemble a mistake, which necessary to avoid. This process must be is greatly automated.

The Keywords: test model of the flying machine, technological cycle, aerodynamic designing, pressure on chord of the profile, statistics.