

# 飞机平飞性能计算实践教学研究

冯瑞娜

南昌航空大学民航学院

DOI:10.12238/mef.v8i6.12021

**[摘要]** 本文针对飞行力学课程“以项目为导向”的新型教学改革模式,进行了实践教学环节的研究。建立了平飞性能计算的理论模型,并基于此理论模型提出了简单推力法和无量纲解析法两种方法来计算飞机的平飞性能,开发基于Matlab软件的平飞性能计算逻辑和计算程序,绘制平飞包线,引导学生并比较了两种方法的优缺点和对计算结果的影响。

**[关键词]** 教学实践; 平飞性能; 平飞包线; 简单推力法; 解析法

**中图分类号:** G421 **文献标识码:** A

## Practical teaching research of aircraft level flight performance

Ruina Feng

Civil Aviation College of Nanchang Hangkong University

**[Abstract]** This paper conducts a study on the practical teaching component of the "project-oriented" innovative teaching reform model in the Flight Mechanics course. A theoretical model for level-flight performance calculation was established, based on which two methods – the simple thrust method and the non-dimensional analytical method – were proposed to calculate aircraft level-flight performance. We developed calculation logic and programs for level-flight performance using MATLAB software, plotted level-flight envelopes, and guided students to compare the advantages and disadvantages of both methods and their impacts on calculation results.

**[Key words]** teaching practice; level flight performance; flight envelope; Simple thrust method; Analytic method

## 引言

飞机的平飞性能是飞机最基本且重要的性能指标,是飞行力学课程中学生应该重点掌握的基本知识和能力。飞机性能的好坏用来衡量飞机的各项战术技术指标。计算结果直接影响研发进度及飞行安全,因此,在飞机方案论证和方案设计阶段,对飞机的性能分析这项工作就显得尤为重要。“飞行力学”课程作为飞行技术专业的一门重要专业基础课,其课程内容繁多、概念抽象且知识体系复杂。传统的教学模式容易导致学生学习兴趣缺乏,教学目标完成度低<sup>[1]</sup>。

本着“以项目为导向”的新型教学改革模式,通过课程实践教学使学生掌握飞机平飞性能计算的基本方法,提高学生的知识应用能力、社会实践能力、创新研究能力和科学素养,是巩固和加深对理论认识的有效途径,培养具有创新意识 and 创新能力的高素质技术人才的重要环节,是理论联系实际,培养学生掌握科学方法和提高动手能力的重要平台。教师在教学中更多的应体现在指导方面,引导技能训练,方法训练,开发脑力,学习创新。实践是创新的源泉,实践教学是培养创新能力的渠道,只有具有创新能力的人才能比较好地在社会中立足。因此,在实践教

学过程中要以创新能力培养贯穿实践教学全过程,积极探究科学的教学方法,创新实践教学,培养创新人才<sup>[2]</sup>。

目前研究飞机性能的方法主要通过数值模拟计算和飞机的试飞工作得出。针对平飞性能提出两种工程计算方法:简单推力法和解析法。简单推力法利用MATLAB软件绘制在不同飞行高度下飞机可用推力和平飞需用推力随Ma的变化曲线,根据可用推力和需用推力曲线的交点确定该高度的最小平飞速度和最大平飞速度;解析法使用的前提条件是假设忽略可用推力和极曲线随飞行速度的变化,则在给定高度下,飞机的平飞运动方程可简化为关于速度一元四次方程,可用MATLAB软件求解该方程,得到其数值解,即可得该高度的最小平飞速度和最大平飞速度。最后计算各高度的最小平飞速度和最大平飞速度,即可得到该飞机的平飞包线。

## 1 平飞性能计算的理论教学

### 1.1 简单推力法

飞机上的气动阻力可分为零升阻力和升致阻力,升力系数和阻力系数之间的关系可用极曲线  $C_D = C_{D0} + A C_L^2$  来描述。其

中  $C_{D0}$  为零升阻力系数,  $A$  为升致阻力因子,  $C_L$  为升力系数。

升致阻力与升力系数的平方成正比。在某一给定高度上, 只需绘制出该高度的平飞需用推力和可用推力曲线, 即可得到该高度的受推力限制的最小平飞速度和最大平飞速度。即两条曲线的左交点为受推力限制的最小平飞速度, 右交点为最大平飞速度<sup>[3]</sup>。

以下为需用推力的计算公式:

$$T_R = \frac{1}{2} \rho V^2 S (C_{D0} + AC_L^2) = \frac{1}{2} \rho V^2 SC_{D0} + \frac{2AW^2}{\rho V^2 S} \quad (1)$$

式中第一项为零升阻力, 第二项为升致阻力。零升阻力与速度的平飞成正比, 升致阻力与速度的平飞成反比。低速飞行时升致阻力占主导地位, 高速飞行时零升阻力占主导地位。

此外还需计算出该高度的失速速度, 比较最小平飞速度和失速速度, 取大者, 即为该高度的实际最小平飞速度。

$$V_{stall} = \sqrt{\frac{2W}{\rho S C_{Lmax}}} \quad (2)$$

### 1.2 无量纲解析法

如果忽略(1)式中  $C_{D0}$  和随  $Ma$  的变化情况, 同时忽略可用推力随  $Ma$  的变化情况, 近似任务在给定高度下, 其值近似为常数。则根据可用推力应满足需用推力的要求, 即  $T_a = T_R$

$$T_a - \frac{1}{2} \rho V^2 SC_{D0} + \frac{2AW^2}{\rho V^2 S} = 0 \quad (3)$$

(2)式可写成如下形式

$$X_1 V^4 - T_a V^2 + X_2 = 0 \quad (4)$$

$$\text{式中 } X_1 = \frac{1}{2} \rho S C_{D0} \quad X_2 = \frac{2kW^2}{\rho S}$$

采用无量纲的形式表示:

$$u^4 - 2zu^2 + 1 = 0 \quad (5)$$

继而可解出一元四次方程。

$$u_{max} = \sqrt{z + \sqrt{z^2 - 1}} \quad u_{min} = \sqrt{z - \sqrt{z^2 - 1}} \quad (6)$$

相应的

$$V_{max} = u_{max} V_R \quad V_{min} = u_{min} V_R \quad (7)$$

式中  $z$  为无量纲推力,  $E_m$  为最大升阻比,  $V_R$  为有利速度。

$$z = \frac{T_a E_m}{w} \quad E_m = \frac{1}{2\sqrt{AC_{D0}}} \quad V_R = \sqrt{\frac{2W}{\rho S}} \sqrt{\frac{A}{C_{D0}}} \quad (8)$$

可用Matlab编程绘制不同高度的需用推力曲线。由下图可知, 随着高度的升高, 大气密度不断下降, 故零升阻力减小, 升致阻力增大。

## 2 实践教学平台搭建

### 2.1 主要计算原始数据

飞机平飞重量:  $W=380000N$ , 机翼面积:  $S=78m^2$ , 发动机推力海平面静推力:  $T_0=350000N$   $C_{Lmax}=1.8$ , 极曲线表示为  $C_d = C_{d0} + AC_L^2$ ,  $c_{d0}$  和  $A$  随飞行马赫数的变化而变化, 这种情况在超音速情况下表现得尤为突出。已知  $Cd0$  与  $A$  随  $Ma$  变化的情况如下两个表格所示。

表3.1 零升阻力系数  $Cd0$  随  $Ma$  变化表

Ma	0.25	0.5	0.75	0.875	1	1.05	1.125	1.375	1.5	1.625	1.75	1.875	2
$C_{d0}$	0.017	0.017	0.017	0.019	0.03	0.036	0.034	0.032	0.031	0.03	0.0295	0.029	0.0285

表3.2 升致阻力因子  $A$  随  $Ma$  变化表

Ma	0.25	0.5	0.75	0.875	1	1.05	1.125	1.375	1.5	1.625	1.75	1.875	2
$A$	0.22	0.22	0.22	0.225	0.23	0.235	0.24	0.27	0.29	0.317	0.35	0.382	0.42

因此, 由  $c_{d0}$  和  $A$  随飞行马赫数变化的已知值运用matlab样条差值函数得到不同马赫数下的  $c_{d0}$  和  $A$ 。再将其代入上式求出  $Cd$ 。编程如下

```
m=0.1:0.01:2;
y1=interp1(Ma, Cd0, m, 'spline');
y2=interp1(Ma, A, m, 'spline');
```

### 2.2 大气相关参数的计算

根据大气相关参数工程近似公式, 编程求得不同飞行高度时的大气温度, 大气压强, 大气密度及该高度的音速。编写 GetAir (H) 子程序。该子程序的输入变量是飞行高度, 输出变量分别为大气温度, 大气压强, 大气密度及该高度的音速。

### 2.3 可用推力曲线

考虑可用推力随马赫数变化的方程为:

$$\frac{T_{T0}}{T_{static}} = 0.97 - 0.925M + 0.5M^2$$

公式中引入0.97的因子是因为考虑到一台安装在飞机上的发动机并不能提供与在风洞测试中所得到的推力相当。公式中的线性项考虑了发动机内动量矩的减小而导致输出推力下降的影响, 二次项则考虑了进入发动机的空气密度增加的影响, 也称冲压空气效应。

此外考虑到发动机推力随飞行高度变化而变化, 取

$$\frac{T_a}{T_0} = \left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^{0.9}$$

因此,可以假定不同高度下飞机的可用推力取

$$T_a = T_0 \cdot (0.97 - 0.925M + 0.5M^2) \cdot \left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^{0.9} \quad (9)$$

2.4 需用推力曲线

由公式(1)编程绘制飞机不同高度时的需用推力曲线。给定高度下,小速度飞行时升致阻力占主导地位,其与速度的平飞成反比,故随着速度的增大气动阻力不断减小。大速度飞行时零升阻力占主导地位,其与速度的平方成正比,故随着速度的增大气动阻力不断增大。阻力最小处所对应的平飞速度为有利速度。

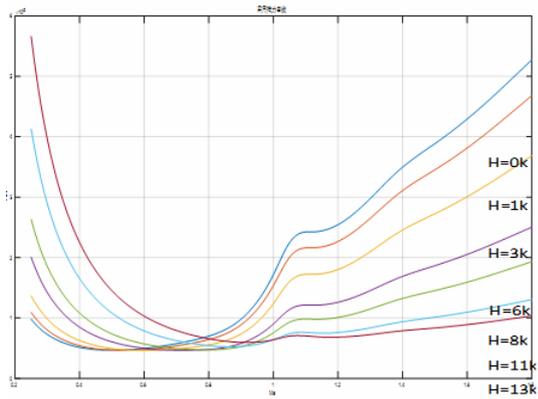


图1 不同高度时的需用推力曲线

2.5 平飞包线的绘制

2.5.1 简单推力法。绘制某一高度的可用推力曲线和需用推力曲线,两条曲线的左、右交点分别是受推力限制的最大平飞速度  $V_{max}$  和最小平飞速度  $V_{min}$ 。以海平面为例,计算该高度的最大平飞速度和最小平飞速度。

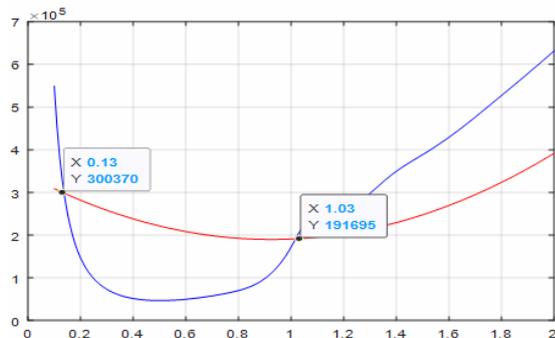


图2 海平面的推力曲线图

由图知海平面受推力限制最小平飞马赫数为  $Ma=0.13$ , 最大平飞马赫数为  $Ma=1.03$ ,

$$V_{min} = 0.13 \times 340 = 44\text{m/s}$$

$$V_{max} = 1.03 \times 340 = 350\text{m/s}$$

考虑海平面的失速速度

$$V_s = \sqrt{\frac{2W}{C_{l_{max}}\rho S}} = 66\text{m/s}$$

与受推力限制的最小平飞速度相比,两者取大者为,即

66m/s 为海平面的最小平飞速度。类似的方法求取各高度的最小平飞速度和最大平飞速度,即得该飞机的平飞包线。

2.5.2 无量纲解析法。忽略零升阻力系数、升致阻力系数和平飞可用推力随马赫数的变化。根据前面解析法的计算公式(6)~(8)编程绘制飞机的飞行包线。

最后根据各高度计算结果,绘制飞机的平飞包线。下图为两种方法绘制的平飞包线,图中虚线为方法2所得包线,实线为方法1所得包线。

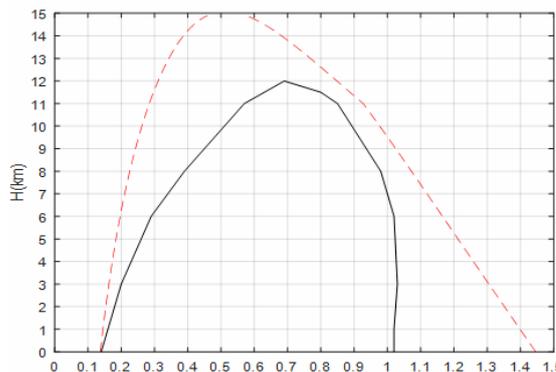


图3 某飞机的平飞包线

3 结果分析

引导学生对实验结果进行分析和比较,分析发现两种方法得到飞行包线不完全相同。因为在用解析法进行计算时,忽略了极曲线和可用推力随马赫数的变化。故用解析法得到的平飞包线范围要大于简单推力法,简单推力法得到的计算结果更为准确。而解析法便于计算,故取点较多,得到的曲线较简单推力法平滑,计算便捷。因此在设计初期可用解析法做粗略估算,缩短设计周期。后期可用简单推力法做更为精确的计算。

4 结束语

建立了“以项目为指导”的新型教学模式。改革课堂教学,着重考虑学生在未来的专业领域可能遇到的情况,通过设计喷气式飞机平飞性能计算实践项目,提高学生的综合素质,培养具有实践能力、创新能力、合作能力的优秀人才。为保证项目的完成度,可以设置学习小组,通过学生的自主探索和小组合作获得解决问题的技能和自主学习的能力。

[基金项目]

南昌航空大学教学改革研究课题(JY23009)。

[参考文献]

[1]文瑞英.民用飞机巡航性能研究[J].飞行力学,2015,8(33):4.  
 [2]冯瑞娜,储琚,何国毅.飞行技术专业“飞行力学”课程教学模式探索[J].南昌航空大学学报(自然科学版),2024,38(1):126-131.  
 [3]方振平,陈万春,张曙光.编.航空飞行器飞行动力学[M].北京:北京航空航天大学出版社,2005.11,ISBN978-7-81077-670-7.

\*通讯作者:

冯瑞娜(1973--),女,汉族,陕西人,硕士,副教授。主要研究方向:飞行力学、适航技术。