

DOI: 10.19416/j.cnki.1674-9804.2017.02.003

一款基于 ICAO 标准计算模型的 民机起落架漂浮特性分析软件的设计

An Engineering Software Development Based on ICAO Standard Calculation Method for Analyzing Civil Jet Landing Gear Floating Characteristics

王 跃 / WANG Yue

(上海飞机设计研究院, 上海 201210)

(Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China)

摘 要:

为了满足民用飞机产品开发过程中对起落架漂浮特性分析的实际需求,设计并开发了一款实用工具软件。该软件是基于国际通用的 ICAO 标准计算模型开发的,实现了国际上通行的民用飞机起落架漂浮特性分析所需的 3 大功能,其计算分析结果的精度和国际主流飞机制造商发布的数据相当,能够很好地满足民机产品开发在设计及手册编制方面的综合要求,工程实用性很强。目前,该软件已成功应用到国产支线 and 单通道民用飞机产品的研发之中,经济效益显著。

关键词:民用飞机;漂浮特性;通用分析方法;软件开发;工程应用

中图分类号:V226

文献标识码:A

[Abstract] An engineering software is developed to meet the needs of civil jet landing gear floating characteristics analysis. Based on ICAO Standard Calculation model, three primary functions on the software were achieved in international civil jet landing gear floating characteristics analysis. The calculation precision of the software has reached the international standard. With high engineering practical value, the software can meet the comprehension requirements of both aircraft development and manual writing. So far, the software has been successfully applied in our country's regional and single aisle civil jet aircraft development.

[Keywords] civil aircraft; floating characteristic; general analysis method; software design; application in project

0 引言

飞机起落架的漂浮特性是指飞机在一定强度的机场道面上使用能力的一种度量,直接反映了飞机与运营机场跑道的使用匹配关系。除机场跑道的固有特性外,飞机起落架的设计参数、使用频率等均会对该特性造成影响。

国外在 20 世纪 60 年代初就对飞机起落架漂浮特性进行了系统地研究,建立了标准的计算分析模型,并陆续形成了国际通用的规范,其中使用

最广泛的是 ICAO 推荐的 ACN - PCN 体系方法。ACN 是表示飞机在给定路基强度道面上的载荷作用下的影响数。PCN 是表示在非限制使用条件下道面承载能力的一个数。两者均为无量纲数,且相互独立,ACN 的计算可以脱离机场来计算,飞机制造商只需提供飞机的 ACN 值,当 $ACN \leq PCN$ 时,即表示飞机可以在指定的道面上无限制运营。一般飞机制造商会在相关机型的《用于机场计划的飞机特性手册》中提供漂浮特性的查询图表。

国内初期由于航空工业起步晚,特别是民用航空发展缓慢,使得关于民用飞机起落架漂浮特性的资料、规范、程序的收集相对迟滞,虽然有部分内容实现了计算机程序化,但总体较为零散,没有形成一款完整、通用的满足民用飞机实际需要的起落架漂浮特性分析软件,不能满足实际工程的需要。20世纪90年代伴随着国内民用航空工业的迅猛发展,特别是喷气式支线、单通道大型客机的研制,各种设计中的需求越来越迫切,要求也越来越细化、具体,这其中就有关于民机起落架漂浮特性分析方面的需求。

因此,在“增强民机核心竞争力”的指导思想下,针对民用飞机产品开发中的实际需要,以国际上通用的ICAO标准模型及算法为基础,采用VB6.0为开发环境,编制了一款用于飞机起落架漂浮特性分析的设计软件。

本文将对该软件的功能、架构、原理、应用等方面进行阐述。

1 软件的功能、架构及操作界面简介

1.1 软件功能简介

本软件主要实现了刚性道面的飞机漂浮特性分析、柔性道面的飞机漂浮特性分析和按ACN-PCN报告体系进行分析的三大功能。其中每个功能均包含了与之相关的若干个子功能,使之能够较为完整地反映飞机起落架漂浮特性设计工作中的各种需求,如图1所示。

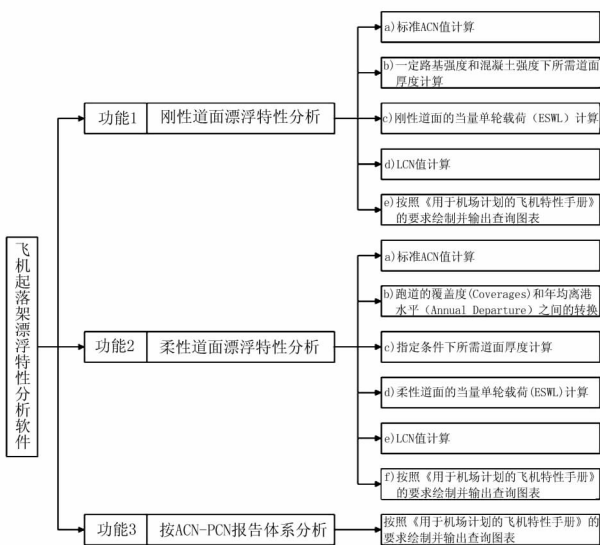


图1 软件实现功能示意图

1.2 软件架构简介

本软件主要分为参数输入、模型计算和结果输出三大模块。其中参数输入模块根据实际计算分析的特点又分为公共参数和局部参数两部分,避免参数重复输入。模型计算模块主要是针对不同的功能需求开发的不同计算模块,是整个分析软件的核心模块。结果输出模块包含两种主要输出模式,一种是在单状态点分析模式中直接在对对应界面的输出窗口中输出,另一种是按照《用于机场计划的飞机特性手册》的要求输出的查询图表。对于第二种输出模式,由于查询图表的构图较为复杂,VB自身开发环境中的绘图功能较弱,因此在开发过程中通过数据接口连接实现了向指定路径下的EXCEL文件进行数据输出,并利用EXCEL绘图功能实现查询图表的绘制。软件架构示意图如图2所示。

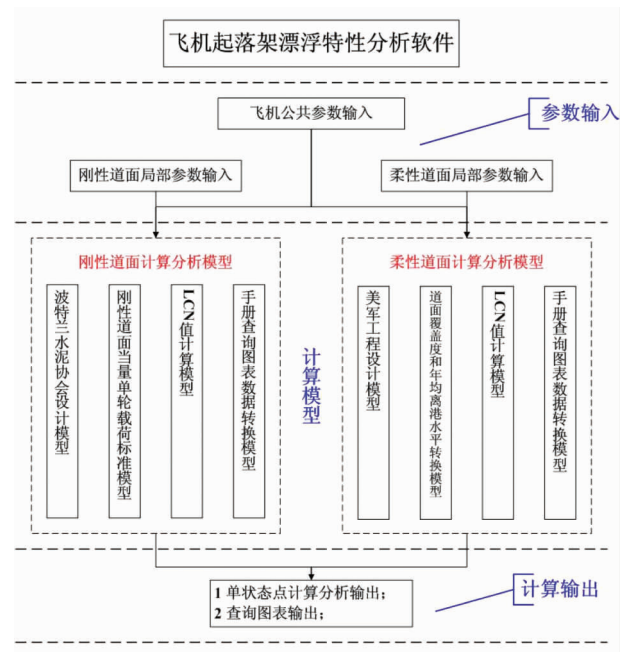


图2 软件架构示意图

1.3 软件界面简介

本软件主要通过三个工作界面来实现1.1节中的所有功能,如图3所示。主界面被划分为4个区域,其中区域1是公共参数设置,区域2是刚性道面需求分析,区域3是柔性道面需求分析,区域4是ACN/PCN报告体系。在区域1中集成了飞机漂浮特性单状态点计算分析模块窗口,点击后可进入到单状态点的设计分析界面,详见图3中的虚线框位置。主界面的区域2、3和4是实现各种不同查询图表输出的功能。

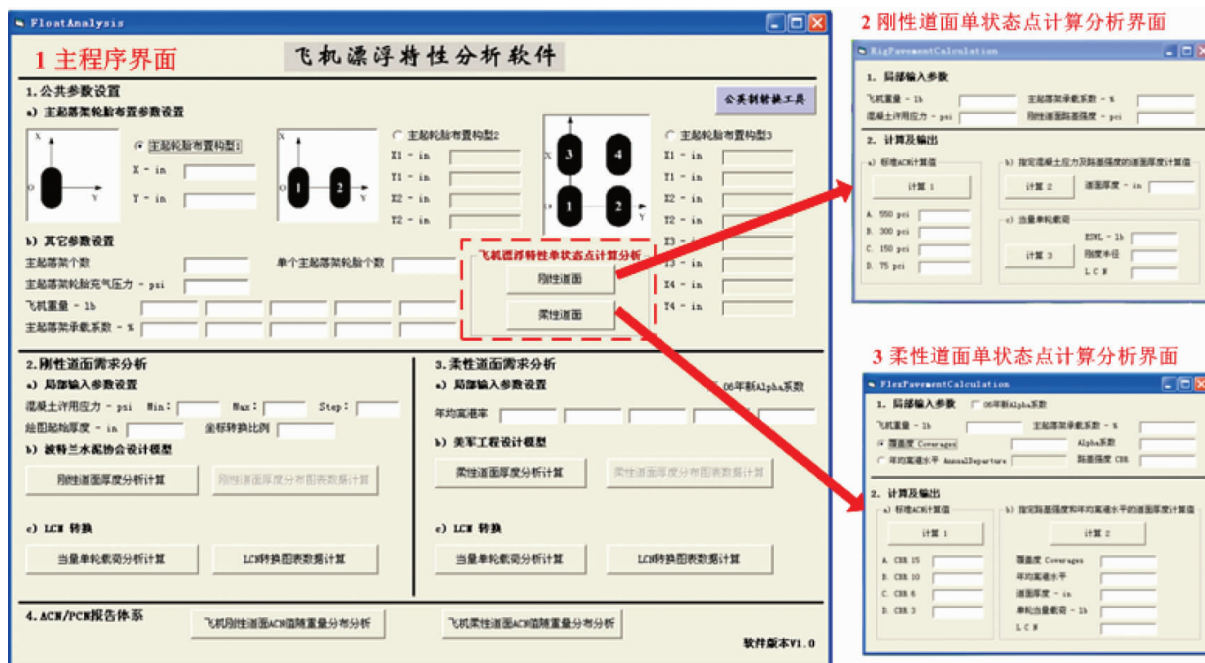


图 3 软件界面示意图

1.3.1 公共参数设置

公共参数设置区域内主要是完成相关计算分析参数的输入,这些参数是刚性道面影响分析和柔性道面影响分析过程中均会用到的参数。主要包括:

- 1) 主起落架机轮布置形式;
- 2) 飞机重量;
- 3) 飞机主起落架承载系数;
- 4) 主起落架个数;
- 5) 单个主起落架机轮个数;
- 6) 轮胎的充气压力。

以上各参数均为英制单位,详见图 3 中的区域 1。其中参数输入 1)项是需要选择主起落架的机轮布置构型并按照图示要求输入各机轮的坐标位置。目前本软件只提供了三种常用的主起落架机轮布置构型,但在程序开发中支持更多种布置形式,已经预留接口,可进行后续开发扩展。

1.3.2 刚性道面需求分析

该模块主要实现刚性道面需求查询图表的绘制功能。主要分为局部设计参数输入和计算绘图输出两部分。在局部设计参数输入模块中,需要输入混凝土许用强度的计算范围、查询图表的铺面起始厚度和查询图表左右度量之比,其中后两项输入是查询图表构图的设计参数,如图 4 所示。计算绘

图输出部分主要包括刚性道面需求查询图表绘制和 LCN 转换查询图表绘制两部分内容,这两张查询图表均需要由飞机制造商提供,并以 ICAO 的标准图表形式反映在《用于机场计划的飞机特性手册》中提交给用户。

1.3.3 柔性道面需求分析

与刚性道面需求分析模块类似,柔性道面需求分析模块主要实现柔性道面需求查询图表的绘制功能。在局部设计参数输入模块中需要输入跑道的年均离港水平及 ALPHA 新旧参数选择。计算绘图输出部分主要包括柔性道面需求查询图表绘制和 LCN 转换查询图表绘制两部分内容,这两张查询图表同样需要由飞机制造商提供,并以 ICAO 的标准图表形式提交给用户。

1.3.4 ACN/PCN 报告体系

该模块主要是实现飞机随重量变化的 ACN 变化查询图表的绘制功能,分为刚性道面 ACN 查询图表和柔性道面 ACN 查询图表。查询图表需要飞机制造商以标准形式提交给用户。

1.3.5 单状态点计算分析模块

该模块主要是实现飞机单状态点的起落架漂浮特性计算分析,快速反应设计状态。主要分为刚性道面单状态点计算模块和柔性道面单状态点计算模块,详见图 3。

2 软件主要分析模型原理简介

2.1 刚性道面

2.1.1 波特兰水泥协会计算模型

波特兰水泥协会分析模型是ICAO发展的ACN-PCN方法中进行刚性道面加载影响分析的一个标准分析模型。其数学原理是针对刚性道面在文克勒(Winkler)原理基础上(内部载荷状态)加载弹性板块对应的韦斯特加德(Westergaard)解。ICAO采用的标准计算机计算程序的基础是来源于美国波特兰水泥协会的R. G. Packard发展的计算程序。

标准模型的求解流程是先根据飞机的重量、起落架参数(包括主起落架承载系数、主起落架个数、机轮配置形式和轮胎充气压力)和路基强度(标准条件下分为高、中、低和超低四类)通过之前提到的数学模型在一定的混凝土工作应力的基础上求解出参考铺面的厚度,然后在1.25 MPa的标准轮胎压力下使用求解出的参考铺面厚度计算出对应的计算单轮载荷,该载荷除以500即是对应路基强度条件下的ACN值。

2.1.2 刚性道面的当量单轮载荷(ESWL)计算模型

对于作用在刚性道面上的多轮起落架载荷的当量单轮载荷是指:该载荷具有和机轮组胎压相同的胎压,当其单独作用在道面上时,在道面中产生如同机轮组作用所产生相同的内力。具体来说,作用在刚性道面上多轮起落架载荷的当量单轮载荷,是根据多轮起落架载荷的各轮载在某一轮迹圆中心下道面中所产生的最大主弯矩(或最大主应力)与具有相同胎压的单轮载荷在其载荷圆中心道面中所产生的弯矩(或应力)相等的方法而计算得出的。

刚性道面的等效单轮载荷的计算是基于韦斯特加德(Westergaard)理论确定的,其关系式为:

$$\sigma_c = 0.31652 \frac{W}{h_2} \left[41g_{10} \frac{L}{b} + 1.0693 \right] \quad (1)$$

其中: σ_c 为板中心应力; W 为施加的载荷; h 为板厚度; L 为相对刚度半径; E 为混凝土弹性模量; μ 为泊松比; k 为路基强度;

$$b = \sqrt{1.6r^2 + h^2} - 0.675h, r \text{ 为加载半径。}$$

对于多轮起落架,各轮载在其居中的轮迹圆圆心处道面所产生的弯矩最大,同时由于轮组的

各机轮载荷在最大弯矩处产生的径向和切向弯矩方向不同,需要按照矢量关系进行叠加后方可求解出多轮起落架距离加载处 L (刚度半径)的最大弯矩值。在解出了整个起落架的总弯矩值后,利用上述公式,求解出在相同加载距离,相同轮胎压力,相同弯矩值条件下的起落架单轮当量载荷(ESWL)^[1]。

2.2 柔性道面

2.2.1 美军工程设计模型

与刚性道面的标准计算模型一样,美军工程设计模型是ICAO发展的ACN-PCN方法中进行柔性道面加载影响分析的一个标准分析模型。其数学模型是针对柔性铺面施加表面载荷而获得的波斯尼斯克(Boussinesq)解。ICAO采用的标准计算机计算程序的基础是来源于美军航道工程经验S-77-1介绍报告。

计算模型中包括柔性道面的当量单轮载荷(ESWL)和ACN计算两个模块。

2.2.2 道面覆盖度与年均离港水平转换模型

道面的覆盖度和年均离港水平均是反映飞机运营频率的参数。当飞机沿跑道运动时,很少会沿着完美的直线或者与之前同一运动路径前进。飞机的前进路径会出现一种符合静态正态分布形式的摆动。当飞机的一个主起落架机轮行驶过跑道的一定区域即记为一次覆盖。由于在前进中机轮的摆动存在随机性,飞机在跑道上前进,其主起落架机轮并不会每次都行驶过某一个特定的区域。

为了有效地表示出跑道的使用频率,经常使用覆盖度(Coverages)和年均离港水平(Annual Departures)两个参数,其转换关系如下:

$$AD = C \times P / C \div 20(\text{years}) \quad (2)$$

其中, P/C 表示经过次数与覆盖度之比(Pass to Coverages)。

2.3 LCN值计算模型

LCN方法起源于英国,也同样是国际民航组织(ICAO)推荐的方法。该方法是在各种厚度和各种地基的刚性和柔性铺面上进行大量加载试验获得数据基础上建立的一种方法,这些试验的目的在于建立铺面破坏载荷与加载接触面积之间的关系。由试验得出的典型加载平均特性如下:

$$\frac{W_1}{W_2} = \left(\frac{A_1}{A_2} \right)^{0.44} \quad (3)$$

其中: W_1, W_2 为破坏载荷; A_1, A_2 为分别对应于 W_1, W_2 的接触面积。

为了将铺面的承载能力表示成一个简单的无量纲数,LCN 方法建立了一张标准载荷分类表,如表 1 所示。

表 1 LCN 标准载荷分类表

机轮载荷/W-lbf	轮胎压力/(lbf/in ²)	LCN
100 000	120	100
90 000	115	90
80 000	110	80
70 000	105	70
60 000	100	60
50 000	95	50
40 000	90	40
30 000	85	30
20 000	80	20
10 000	75	10

LCN 方法的理论基础是韦斯特加德 (Westergaard) 理论的拐角载荷形式,其求解过程与相对刚度半径(l)和当量单轮载荷(ESWL)密切相关。在解出相关解后结合公式和表 1,即可求解出对应 LCN 值。

2.4 手册查询图表数据转换模型

该模块主要是实现《用于机场计划的飞机特性手册》中查询图表的绘制功能,一共有 6 种类型的图表,其中反映刚性道面特性的 3 种,反映柔性道面特性的 3 种。分别是刚性道面需求查询图表、刚性道面 LCN 转换图表、刚性道面 ACN 值随飞机重量变化图表、柔性道面需求查询图表、柔性道面 LCN 转换图表和柔性道面 ACN 值随飞机重量变化图表,这些反映起落架漂浮特性的图表均需要飞机制造商以手册的形式正式提供给营运者使用。上述查询图表中包含的数据量较大,每张图表的构图都有标准形式,因此在绘制图表过程中,其计算出的各种状态的数据集,不能直接使用,需要对其进行相应的转换,以满足查询图表构

图的需要。限于文章的篇幅,本文选取刚性道面需求查询图和柔性道面需求查询图为例进行简单介绍。

2.4.1 刚性道面需求查询图

刚性道面查询图表主要是反映了在一定的飞机起落架载荷条件下,指定路基强度和混凝土许用强度所需的铺面厚度。查询图表中,在最大起落架载荷条件下,查询出的指定路基强度与混凝土许用强度所需的道面厚度参数是精确的。同时在其它起落架载荷条件下,以路基强度 $k = 80\text{MN}/\text{m}^3$ 查询出道面厚度参数也是精确的。其余各种组合条件下查询出的道面厚度存在一定的偏差。如图 4 所示。

刚性道面查询图表绘制模块充分考虑了图表自身的构图特点,在绘图输入设置中,设置了计算区间输入、计算区间步长参数输入、道面厚度起始点参数输入及图表左右坐标比例参数输入,详见图 3 中的区域 2。这些关键参数的选择,使得查询图表的绘制极为方便、灵活,极大的满足了设计中的实际需要。

2.4.2 柔性道面需求查询图

柔性道面查询图表主要是反映了在一定的飞机起落架载荷条件下,指定路基强度和跑道年均离港水平所需的铺面厚度。该查询图表与刚性道面需求的查询图表不同,一个是构图方式的不同(包括图表形式和影响参数),另外一个是从图中查询出的参数均为精确值。如图 5 所示。

在柔性道面需求查询图的绘制模块中,包含了覆盖度与年均离港水平转换模块和美军工程设计模块,此外还增加了新、旧 ALPHA 系数选择模式,较好的实现了设计之初的功能需求和实际工作中的工程需要。

3 计算结果校验

本软件选取了目前航线上运营的 3 种飞机进行了起落架漂浮特性分析计算,并将计算结果与之对应的《用于机场计划的飞机特性手册》内容进行了对比。由于篇幅限制,本节主要以其中的一种单通道飞机的部分内容为例进行说明。

3.1 飞机单状态点 ACN 值计算校验

表2 飞机ACN值计算结果对比表

机型	重量/lb	单个主起 承载系数%	主起胎压/PSI	刚性道面 ACN 值				柔性道面 ACN 值			
				A	B	C	D	A	B	C	D
1	111 000	45.95	157	27	29	31	32	25	26	29	33
				27.20	29.07	30.81	32.27	24.94	25.70	28.88	33.10
2	128 600	45.96	182	34	36	38	39	30	31	35	39
				33.96	35.93	37.76	39.27	29.97	31.10	35.17	39.31
3	140 000	45.43	201	38	40	42	43	33	35	39	43
				38.17	40.14	41.96	43.47	33.04	34.84	38.78	42.80
4	150 500	46.91	185	42	44	47	48	37	39	44	48
				42.26	44.55	46.63	48.34	37.04	39.26	44.02	47.93
5	134 000	46.12	194	37	38	40	42	32	33	37	41
				36.51	38.47	40.29	41.80	31.92	33.33	37.36	41.40
6	145 000	45.83	182	37	39	41	43	33	34	38	44
				37.02	39.31	41.45	43.24	33.18	34.19	38.35	43.61
7	155 000	45.85	197	41	43	46	47	36	38	42	47
				41.11	43.42	45.58	47.39	36.27	37.71	42.07	47.16
8	174 700	46.79	204	49	52	54	56	43	45	50	55
				49.13	51.70	54.06	56.02	42.86	45.27	50.29	55.22
9	317 000	46.15	190	33	39	46	54	37	41	48	66
				33.16	38.97	46.51	53.99	37.25	40.66	47.84	65.80
10	352 000	46.14	195	39	45	54	62	43	47	56	76
				38.37	45.42	54.12	62.51	42.53	46.90	56.07	75.96

表2为飞机ACN值计算结果对比,表中每种飞机ACN值一栏的第二行数据为飞机起落架漂浮特性分析软件的计算值,其余数据则是来源

于对应机型发布的《用于机场计划的飞机特性手册》。

3.2 飞机漂浮特性查询图表校验

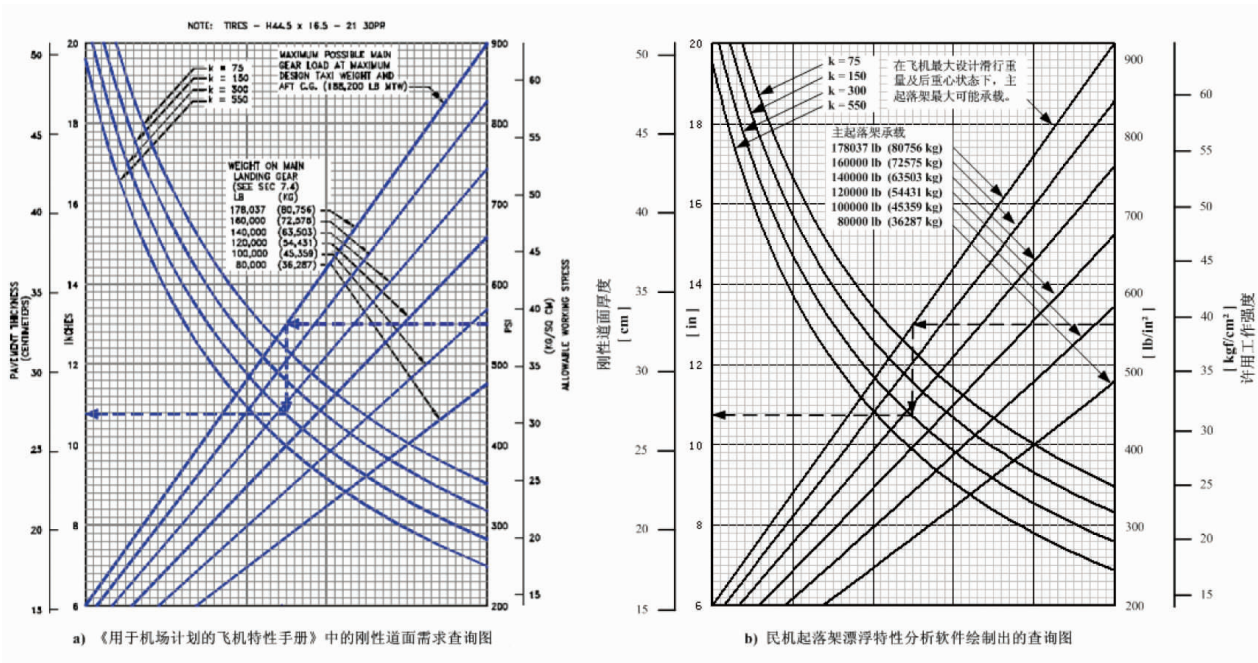


图4 开发软件绘制的刚性道面需求查询图表与出版手册中图表的对比

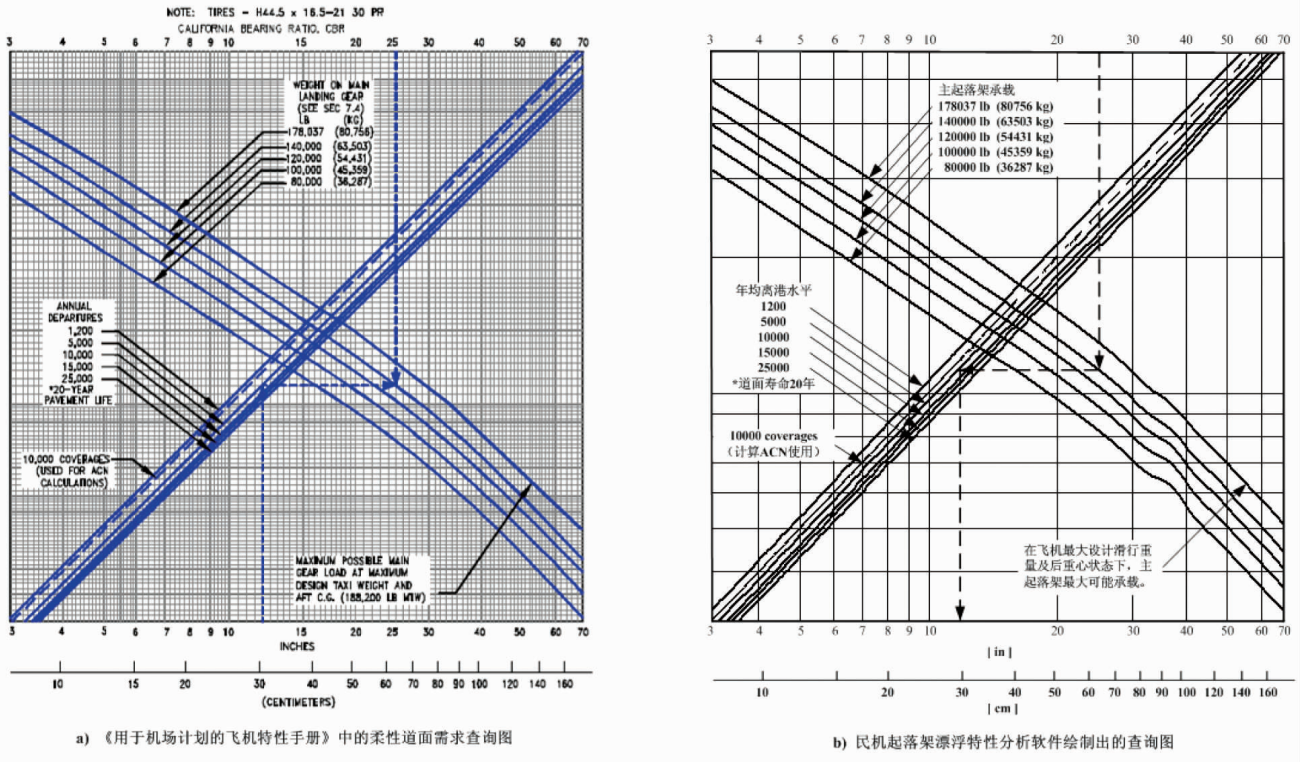


图5 开发软件绘制的柔性道面需求查询图表与出版手册中图表的对比

4 工程应用简介

本软件的开发始终围绕着工程设计工作中的实际需要,经过多轮修改、调试和校验,已经可以

满足实际工作的需要,并成功运用到国内某型支线民用飞机设计和手册编制过程中,同时在国产150座级的单通道民用飞机项目设计中也得到了应用。

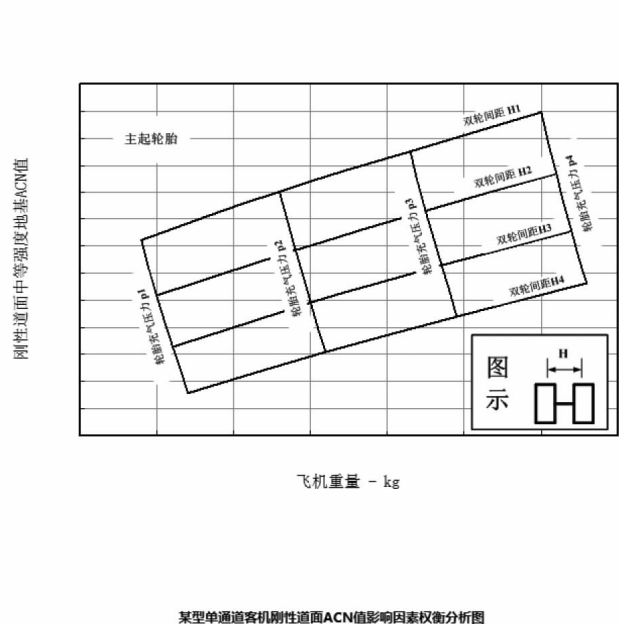
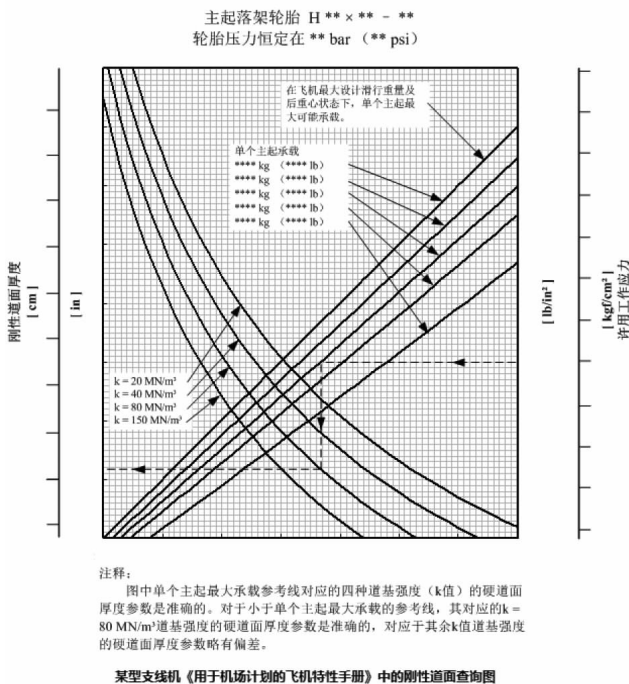


图6 开发软件在工程中的应用情况

5 结论

依据民用飞机产品开发过程中对起落架漂浮特性分析的实际需求,本文介绍了一款基于 ICAO 标准计算模型的起落架漂浮特性分析软件的开发和应用,重点描述了软件的功能、构架及应用情况。该软件实现了国际上通行的民用飞机起落架漂浮特性分析所需的3大功能,其计算分析结果的精度和国际主流飞机制造商发布的数据相当,能够很好地满足民机产品开发在设计及手册编制方面的综合要求,工程实用性很强。同时,软件预留有可扩展的接口,可以根据后续民机型号的研制,拓展支持更多的起落架机轮组数量的分析能力。目前,该软件已成功应用到国产支线和单通道民用飞机产品的研发之中,经济效益显著。

参考文献:

[1] 程不时,李云军,王智宇. 飞机设计手册,第5册,民用

飞机总体设计[M]. 北京:航空工业出版社,2005. 8, 487-534.

[2] 国际民航组织[S]. 附件14,机场,第1卷,机场设计和运营. 2013.

[3] 国际民航组织[S]. 机场设计手册,第3部分,道面. 1983.

[4] 波音民用飞机. 737 用于机场计划的飞机特性手册[M]. 2005.

[5] 波音民用飞机. 767 用于机场计划的飞机特性手册[M]. 2005.

[6] 空中客车. A320 用于机场计划的飞机特性手册[M]. 1995.

[7] 空中客车. A330 用于机场计划的飞机特性手册[M]. 1993.

[8] 巴西航空工业公司. E190 机场计划手册[M]. 2005.

作者简介

王 跃 男,硕士,高工。主要研究方向:飞机起落架布局设计、飞机发动机布局设计和飞机顶层设计要求体系; E-mail: wangyue@comac.cc