

大型客机目录价格预测研究

List Price Forecast Study on Large-scale Civil Aircraft

赵星辰 / Zhao Xingchen

(北京民用飞机技术研究中心,北京 102211)

(Beijing Aeronautical Science & Technology Research Institute, Beijing 102211, China)

摘要:

大型客机作为一种昂贵的商品,其价格是非常重要的信息,定价合理与否直接关系到市场前景和商业成功。目录价格是大型客机售价的基础,直接影响客户购买意愿以及后续合同谈判。以波音公司和空客公司的主力干线飞机为样本,基于最小二乘回归法(Ordinary Least Squares Regression, OLSR)建立了大型客机目录价格预测模型,模型对价格的解释能力好,预测误差小,为大型客机的目录价格制定提供了相关的理论依据。

关键词:大型客机;最小二乘回归法;价格预测

中图分类号:F407.5

文献标识码:A

[Abstract] As a sophisticated commodity with great value, the price of civil aircraft is extremely critical as it influences the market demand and business success of the product. The list price is the cornerstone of selling strategy as it has great impact on the purchasing willingness and further bargaining. Based on Ordinary Least Squares Regression (OLSR), this paper examines the regression model of list price on civil aircraft, regarding Boeing and Airbus as samples. The result shows a convincing forecast power on list prices, indicating a correlated theory support for potential civil aircraft pricing decision.

[Key words] large-scale civil aircraft; OLSR; price forecast

0 引言

飞机销售价格可以分为四类,分别是销售目录价格、销售基本价格、合同成交价格以及实际交付价格。销售目录价格是客机制造商向公开市场公布的飞机销售价格,销售基本价格是制造商根据飞机基本构型确定的合同谈判基准价格,合同成交价格是在合同签署日期确定的飞机成交价格,实际交付价格是在飞机交付时确定的最终结算价格。这四种价格中,只有目录价格是公开信息,其余三个价格都属于商业机密,难以获取。尽管目录价格不等同于其他三个价格,但是它却是所有价格的基础,其他三种价格都会围绕销售目录价格,依据一定的销售策略和市场情况来制定。所以目录价格是飞机销售中需要首先确定的价格,同时也是向市场展示制造商信心和实力、吸引潜在客户的重要信息,具有很强的实际意义。现有飞机价格预测研究

主要以军机为研究对象^[1-2],但研究样本数量偏少,并且军机的采购和民机存在较大区别。本研究采用的 OLSR 方法是统计学中的一种常用方法,通过最小二乘原理来寻找自变量和因变量之间的最佳函数匹配,被广泛应用于经济学、生物学、化学等领域。本文通过采集波音和空客的产品数据,利用 OLSR 方法寻找影响大型客机目录价格的关键解释变量,并建立大型客机的目录价格预测模型。

1 模型定义和假设条件

1.1 样本选择

本研究的样本均为原厂生产的全新飞机,不包括二手飞机或改装机等。研究样本选取的范围是美国波音公司和欧洲空客公司的 26 款主力干线客机,其中窄体客机 9 款,宽体客机 17 款,所有机型均处于服役期或是即将投入服役,是现在世界民用航空市场的主流机型,已退出航空客运市场或是所采用的技术早于上世纪八十年代的机型不列入考虑

范围。

1.2 参数选择

本研究所采用的数据是横截面数据,指在同一时间,不同计量单位,相同统计指标组成的数据列。此处的“同一时间”是统计学意义上的时间概念,它并不是表示时间上的严格一致,而是指在数据收集过程中,由于时间效应所导致的数据差异可以忽略。本研究所有数据的时间基点均为2012年。

本研究共选取了10个参数,分别是MTOW(最大起飞重量,单位是t)、range(最大航程,单位是km)、seat(座位数)、cabin(最大客舱宽度,单位是m)、fuel(最大载油量,单位是L)、height(全机高度,单位是m)、length(全机长度,单位是m)、wing(翼展,单位是m)、cargo(货舱容积,单位是m³)和pay-

load(最大商载,单位是t)。座位数全部采用官方公布的标准机舱布局所对应的座位数,窄体客机是两舱布局,宽体客机是三舱布局。之所以选取上述10个参数,一是因为它们和飞机性能密切相关,属于飞机的关键性指标,航空公司非常关注;二是因为上述10个参数大部分能够在波音空客的官方网站上找到,可以保证数据来源的权威性。在选取参数时,并没有考虑速度,原因是对于本研究所涉及的客机样本来说,各机型速度相差很小,所以对价格的解释能力也相差不大。另外我们也没有考虑发动机选配,研究所选用的飞机价格数据都是基于官方默认配置,没有考虑应客户自身要求选配不同的发动机型号所导致的飞机价格差异。所有数据可参见表1,价格单位是2012年百万美元。

表1 大型客机样本的性能数据与价格

type	range	seat	MTOWWW	payload	wing	length	height	cabin	fuel	price
A318	5 950	107	59	11	34.1	31.44	12.56	3.7	24 210	67.7
A319	6 850	124	64	13.2	34.1	33.84	11.76	3.7	24 210	80.7
A320	6 100	150	73.5	16.6	34.1	37.57	11.76	3.7	24 210	88.3
A321-100	5 950	185	89	21.2	34.1	44.51	11.76	3.7	24 050	103.6
A330-200	13 400	246	230	36.4	60.3	58.82	17.39	5.28	139 090	208.6
A330-300	11 300	300	230	45.9	60.3	63.69	16.83	5.28	97 530	231.1
A340-300	13 700	295	275	43.5	60.3	63.69	16.91	5.28	140 640	243
A340-500	16 670	313	372	43.3	63.45	67.93	17.28	5.28	215 260	267.2
A340-600	14 600	380	368	55.6	63.45	75.36	17.22	5.28	195 520	281.1
A350-800	15 750	270	245	64.6	64.75	60.54	17.05	5.61	138 000	245.5
A350-900	15 000	314	268	76	64.75	66.8	17.05	5.61	138 000	277.7
A350-1000	15 600	350	308	91.6	64.75	73.78	17.08	5.61	156 000	320.6
A380	15 700	525	560	84	79.75	72.72	24.09	6.54	320 000	389.9
737-600	5 970	110	66	15.6	34.3	31.2	12.6	3.53	26 020	59.2
737-700	6 370	126	70	17.5	34.3	33.6	12.5	3.53	26 020	74.8
737-800	5 765	162	79	21.3	34.3	39.5	12.5	3.53	26 020	89.1
737-900ER	5 083	180	79	23	34.3	42.1	12.5	3.53	29 660	94.6
747-8	14 815	467	447.696	98.16	68.5	76.3	19.4	6.1	242 470	351.4
767-200ER	12 195	181	179.17	35.6	47.6	48.5	15.8	4.7	90 770	160.2
767-300ER	11 070	218	186.88	44.5	47.6	54.9	15.8	4.7	90 770	182.8
767-400ER	10 415	245	204.12	46.5	51.9	61.3	16.8	4.7	90 770	200.8
777-200LR	17 395	301	347.45	48.14	64.8	63.7	18.5	5.86	181 280	291.2
777-200ER	14 305	301	297.55	59.4	60.9	63.7	18.5	5.86	171 170	258.8
777-300ER	14 490	386	351.53	69.9	64.8	73.9	18.5	5.86	181 280	315
787-8	14 816	250	219.55	45.4	60.12	55.91	17.04	5.74	127 368	206.8
787-9	15 927	290	244.95	50.14	63.35	62.03	16.97	5.74	127 368	243.6

1.3 模型选择

本研究采用指数模型进行回归分析,此模型被广泛采用,RAND公司的DAPCA模型也使用了类似方法来拟合飞机研制生产费用和飞机参数的关系^[3]。指数模型的基本形式是:

$$y = a_0 \cdot x_1^{a_1} \cdot x_2^{a_2} \cdots \cdot x_n^{a_n}$$

为了方便进行回归分析,将样本数据取对数,则模型变为线性模型,用OLSR来进行拟合:

$$\ln y = b_0 + b_1 \ln x_1 + b_2 \ln x_2 + \cdots + b_n \ln x_n$$

其中, $b_0 = \ln a_0, \dots, b_n = \ln a_n$

2 变量筛选

在进行预测时,一般遵循吝啬原则(principle of parsimony),也就是用尽可能少的变量对相应变量进行预测,使得模型更加稳健。同时剔除对响应变量没有显著性影响的变量,可以使模型的结构变得更加清晰。

2.1 单变量回归

首先进行单变量回归,也就是单独研究价格和每个自变量之间的关系,所以10个自变量对应10个回归方程。这样做的目的是要分析各变量与目录价格的相关程度,排除和价格关联度不高的变量,所得到的分析结果并不表示价格可以被该单个自变量解释。考虑全部26个样本,单变量回归结果如表2所示。

表2 单变量回归结果

parameter	R ²	equation
MTOW	0.972 687	$\ln(\text{price}) = 0.914 109 + 0.817 476 \ln(\text{mtow})$
range	0.886 021	$\ln(\text{price}) = -6.709 765 + 1.279 915 \ln(\text{range})$
seat	0.939 335	$\ln(\text{price}) = -1.843 331 + 1.283 259 \ln(\text{seat})$
cabin	0.932 913	$\ln(\text{price}) = 1.011 363 + 2.652 678 \ln(\text{cabin})$
fuel	0.945 196	$\ln(\text{price}) = -2.062 240 + 0.637 499 \ln(\text{fuel})$
height	0.881 204	$\ln(\text{price}) = -2.731 525 + 2.872 149 \ln(\text{height})$
length	0.970 573	$\ln(\text{price}) = -2.537 482 + 1.936 408 \ln(\text{length})$
wing	0.950 086	$\ln(\text{price}) = -2.378 045 + 1.921 134 \ln(\text{wing})$
payload	0.922 747	$\ln(\text{price}) = 1.946 538 + 0.887 956 \ln(\text{payload})$
cargo	0.942 146	$\ln(\text{price}) = 2.067 265 + 0.688 356 \ln(\text{cargo})$

R²代表的是回归分析中因变量能够被自变量解释的比例,R²越大,表明自变量对因变量的解释能力越强。R²等于1,表示因变量可以完全被该自变量解释;R²等于0,表示因变量完全不能被该自变量解释。此处选取0.8作为筛选标准,R²小于0.8的情况视为自变量的解释能力弱,不予考虑。根据回归结果,十个变量均通过筛选。

2.2 VIF 筛选

本研究涉及的变量之间具有多重共线性,会对估计回归方程中的单个变量独自的效应造成困难,而且会掩盖一些关键变量的重要性。为了解决这个问题,可以先用全部预测变量拟合模型,利用方差膨胀因子VIF^[4](variance inflation factor,简称VIF)来筛选变量,第*i*个预测变量X_{*i*}的方差膨胀因子VIF_{*i*}定义是:

$$VIF_i = \frac{1}{1 - R_i^2}$$

R_{*i*}²表示预测变量X_{*i*}对其他预测变量做回归得到的复相关系数的平方,根据定义可知,VIF_{*i*}是一个大于1的量,当R_{*i*}²越接近1,即X_{*i*}可被其他预测变量近似线性表出时,VIF_{*i*}就会很大。将VIF控制在一个较小的范围内(VIF ≤ *k*)也就相当于控制了预测变量间的共线性关系。一般来说*k*取10(要求严格)或15(要求较松)^[5],经过实际比较,本文中取*k* = 15作为判断标准。在VIF筛选过程中,需要分别计算每一个自变量对应的VIF值,然后删除VIF最大的那个变量再进行下一轮筛选,直至所有自变量对应的VIF值均小于15为止。表3记录了VIF筛选的过程,最后得到了五个关键变量,分别是货舱容积(cargo)、机身高度(height)、最大商载(payload)、航程(range)和座级(seat)。

利用5个自变量进行回归分析,可以得到如表4所示结果。

根据回归结果,可以发现ln(height)的系数标准差很大,说明此变量对于价格的解释能力存在可疑。为了进一步删除对价格解释能力弱的变量,采用向后删除法^[6-7],此方法需要考察各变量的t-检验值,每次删除t-检验值绝对值最小的一个变量,直到所有变量的t-检验值绝对值大于1为止。根据此方法,可以删除ln(height),剩余4个自变量,再次进行回归计算,得到如表5所示结果。

对比两个结果,可以看到去掉变量ln(height)后,R²几乎保持不变,也就是说用4个自变量ln

(cargo)、 $\ln(\text{payload})$ 、 $\ln(\text{range})$ 、 $\ln(\text{seat})$ 就可以非常好地描述价格变化,所以利用向后删除法,进一步提炼了有效变量。对所得回归结果进行对数变

换后,得到最终指数回归方程是:

$$\text{price} = 0.055 \times \text{cargo}^{0.137} \times \text{payload}^{0.072} \times \text{range}^{0.420} \times \text{seat}^{0.603}$$

表3 VIF 自变量筛选过程

		cabin	cargo	fuel	height	length	MTOW	payload	range	seat	wing
第一轮	R_i^2	0.987 044	0.980 787	0.993 761	0.989 281	0.994 490	0.997 756	0.940 491	0.993 090	0.991 610	0.991 157
	VIF	77.184 32	52.048 09	160.282 1	93.292 28	181.488 2	445.632 8	16.804 18	144.717 8	119.189 5	113.083 8
	结果						删除				
第二轮	R_i^2	0.983 942	0.977 851	0.991 168	0.980 455	0.992 773		0.930 166	0.987 402	0.985 662	0.988 425
	VIF	62.274 26	45.148 77	113.224 6	51.163 98	138.37		14.319 67	79.377 68	69.744 73	86.393 09
	结果					删除					
第三轮	R_i^2	0.983 162	0.931 921	0.990 824	0.978 166			0.926 650	0.987 156	0.964 581	0.988 420
	VIF	59.389 48	14.688 82	108.979 9	45.800 13			13.633 27	77.857 37	28.233 43	86.355 79
	结果			删除							
第四轮	R_i^2	0.978 576	0.930 719		0.942 016			0.924 111	0.967 378	0.942 961	0.988 309
	VIF	46.676 62	14.433 97		17.246 14			13.177 14	30.654 16	17.531 86	85.535 88
	结果										删除
第五轮	R_i^2	0.975 015	0.928 652		0.926 233			0.923 187	0.954 412	0.930 479	
	VIF	40.024 01	14.015 81		13.556 2			13.018 63	21.935 6	14.384 14	
	结果	删除									
第六轮	R_i^2		0.927 603		0.895 805			0.922 448	0.897 114	0.924 406	
	VIF		13.812 73		9.597 39			12.894 57	9.719 495	13.228 56	
	结果		通过		通过			通过	通过	通过	

表4 多变量回归结果

变量	系数	标准差	t-检验值	概率
C	-2.875 080	0.528 078	-5.444 426	0.000 0
$\ln(\text{cargo})$	0.138 259	0.045 390	3.046 006	0.006 4
$\ln(\text{height})$	0.036 854	0.163 236	0.225 771	0.823 7
$\ln(\text{payload})$	0.071 180	0.057164	1.245 186	0.227 5
$\ln(\text{range})$	0.410 528	0.073 005	5.623 310	0.000 0
$\ln(\text{seat})$	0.594 774	0.082 934	7.171 694	0.000 0
R^2	0.994 068			

表5 多变量回归结果

变量	系数	标准差	t-检验值	概率
C	-2.898 880	0.505 621	-5.733 303	0.000 0
$\ln(\text{cargo})$	0.136 958	0.043 994	3.113 124	0.005 3
$\ln(\text{payload})$	0.072 087	0.055 720	1.293 731	0.209 8
$\ln(\text{range})$	0.419 570	0.059 643	7.034 691	0.000 0
$\ln(\text{seat})$	0.602 796	0.073 223	8.232 348	0.000 0
R^2	0.994 053			

3 精度分析

将样本数据代入上述方程进行精度分析,可以得到图1。平均误差是3.40%,最大相对误差样本是737-600,相对误差是12.26%。

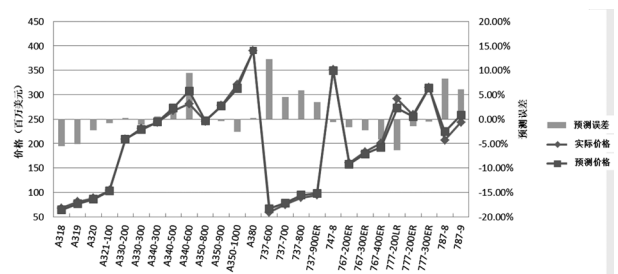


图1 模型预测结果

从分析结果可以看出,737-600的误差相比其他样本点来说,明显偏大,可能是一个异常值(outlier),会对研究结果产生较大影响。为了检验737-600是否是异常值,分别进行了学生化残差(RStu-

dent residual) 检验、DIFFTS 准则检验以及 COVARATIO 准则检验,如图 2 所示,圆圈表示的是 737-600 样本。综合三个检验结果,可以判断 737-600 属于异常值,为了更好地保证回归分析结果的正确性,可以剔除。737-600 属于异常值的原因可能是因为它与其他样本点(737-700、800 和 900ER)相比,它的

技术过于落后。737-600 不属于 737NG 系列,所采用的技术更老,与其他在产或即将投产机型相比,737-600 已不再能满足市场需求,虽然现阶段仍有大量 737-600 客机处于服役状态,但是都属于老旧机队,并且 2006 年停产后,其价格信息不再是现阶段新机价格,而是通过 2006 年的价格折算得到。

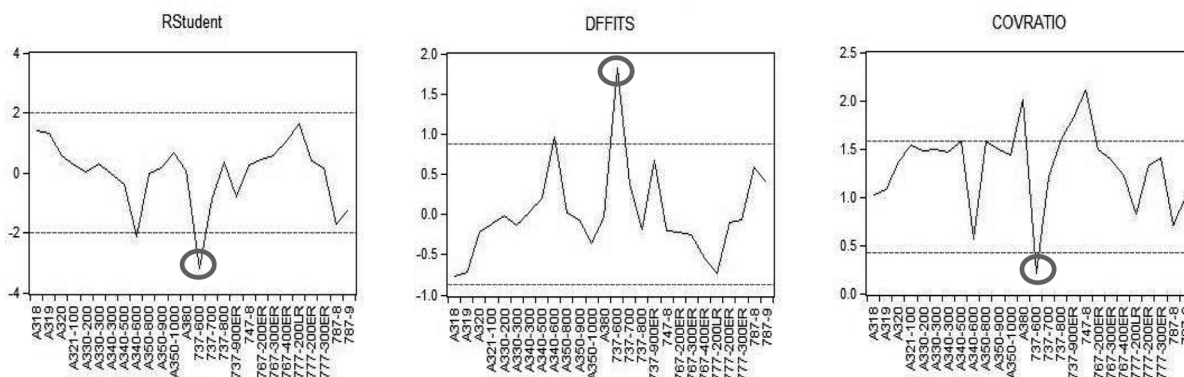


图 2 异常点检测

剔除异常值后,重新进行回归分析,得到的结果是:

$$price = 0.047 \times cargo^{0.095} \times payload^{0.107} \times range^{0.461} \times seat^{0.574}$$

对应的平均预测绝对误差是 3.00%,没有误差超过 10% 的样本,相对误差最大的样本是 787-8,相对误差是 8.43%。可以看出,剔除异常值后,模型的拟合精度得到了进一步提高。

4 结果分析

对于指数模型来说,自变量的系数代表了因变量对该自变量的弹性(elasticity),也就是当自变量变化 1% 时,因变量的百分比变化。由此可得,当座级(seat)增加 1% 时,如果最大商载(payload)、航程(range)和货舱容积(cargo)不变,价格会增加 0.574%;当航程增加 1% 而其他变量不变时,价格增加 0.461%;当最大商载增加 1% 而其他变量不变时,价格上升 0.107%;当货舱容积增大 1% 而其他变量不变时,价格上升 0.095%。从模型结果可以看出,座级对于价格影响最大,然后依次是航程、最大商载和货舱容积。这个结论与航空公司对于利用飞机运营的要求是一致的。机票收入是航空公司利润的最重要来源,座级越大,乘客越多,单趟航班的机票收入也就可以越高,相应单位运营成本也就越低;航程越远,航线安排越灵活,越有利于组建航线网络化,相应单位运营成本也降低;航空货运

是航空公司运营收入的重要部分,所以拥有方便、足够的货运空间对于航空公司而言有重要的意义,故货舱容积也影响着飞机的价值。

值得注意的是,在变量筛选过程中,最大起飞重量(MTOW)被淘汰。鉴于 MTOW 是飞机的一个重要参数,却没有出现在最后的模型中,有点出乎意料。但是经过仔细分析后,可以发现这个结果并非意味着飞机价值与 MTOW 无关,MTOW 的影响只是通过其他变量,以另外一种形式体现在了最终模型中。根据飞机总体设计规定^[8],最大起飞重量由以下几部分组成:

$$W_{mto} = W_{oc} + W_{fuel} + W_{pl}$$

W_{mto} 是最大起飞重量, W_{oc} 是飞机的使用空重, W_{fuel} 为燃油重量, W_{pl} 是乘客和货物的总重量。其中 W_{fuel} 和航程密切相关, W_{pl} 则和座级、最大商载以及货舱容积有关系,故可见最大起飞重量的有效信息有相当一部分已包含在了航程、座级、最大商载和货舱容积等变量中。虽然在飞机设计阶段, MTOW 是一个重要技术参数,但是从航空公司角度来考虑, MTOW 并不直接和运营效益相关,反而是座级、航程、商载等指标更为直接,更为航空公司关心。由此可见,最大起飞重量虽然是飞机初始设计中一个非常重要的参数,但却不是和飞机价格有直接密切关系的一个参数,所以最后的价格模型中并未出现 MTOW 这一变量。

此外,从图 1 可以看出,空客 A320 系列飞机

(A318、A319、A320、A321-100)模型预测误差几乎都是负的或是近乎是负的,而对于波音737系列飞机(737-600、737-700、737-800、737-900ER)来说,模型预测的结果偏向于正的相对误差,这个结果可能预示波音空客在各自产品上的定价策略有所不同,即A320系列的目录价定价较高,而737系列的目录价定价偏低。不同的定价策略各有利弊:较高的目录价可以给后续的合同谈判中留下较大的余地,方便飞机制造商根据客户的具体需求以及偏好制定不同的定价策略,从而获取尽可能高的利润;而较低的价格则是为了争抢市场份额,尽量扩大市场份额。空客在A320系列上偏高的定价和波音在竞争机型波音737系列上偏低的定价也许就体现出了两家公司为了争夺窄体机市场,分别采用了不同的定价策略。

5 结论

本文利用OLSR方法对波音公司和空客公司的大型客机目录价格进行了回归分析,确定了四个对价格具有重要影响的因子,分别是座级、航程、最大商载和货舱容积,并给出了四个解释变量对价格的影响程度。所得到的模型结构清晰,预测精度良

好,结论合理,对大型客机的目录价格定价提供了有力的参考依据,具有很强的实际应用价值。

参考文献:

- [1] 李寿安,张恒喜,等. 偏最小二乘回归在军用飞机价格预测中的应用[J]. 航空学报,2006,27(3):600-604.
- [2] 李寿安,张恒喜,等. 军用飞机采购价格预测研究[J]. 火力与指挥控制,2007,32(1):81.
- [3] Boren HE. DAPCA: a computer program for determining aircraft development and production costs[M]. RAND Cooperation,1967.
- [4] Marquardt D W. Generalized inverse, ridge regression and bias linear estimation [J]. Technometrics, 1970(12):591.
- [5] 贾晨,谢衷洁. 中国福利彩票销售额影响因素分析与基于残差主成分分析的预测[J]. 数理统计与管理,2009,28(2):191-203.
- [6] Catterjee S, Hadi A S. Regression analysis by example [M]. New York: John Wiley & Sons, 2006.
- [7] Mantel N. Why stepdown procedures in variable selection [J]. Technometrics, 1970(12):621.
- [8] 陈迎春,宋文滨,等. 民用飞机总体设计 [M]. 上海:上海交通大学出版社,2010.

(上接第71页)

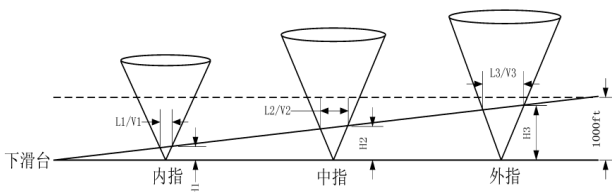


图5 结合试飞符合性判据设计

以外指点信标为例,利用GPS信息和信标台位置获取飞机经过外指点信标台中心时飞机的无线电高度 H_3 ,那么在这个高度指点信标有效距离 $L_3 = \frac{(2\ 000-3\ 000)}{1\ 000} H_3 = (2-3) H_3$ 。结合飞机当时的平均地速 V_3 ,那么理论上经过外指点信标时音频和视频持续的时间为 $t = \frac{L_3}{V_3}$,再将这个时间与理论上的时间相比即可。

4 结论

本文首先介绍了指点信标的功能和基本原理,

并对影响指点信标试飞的信标台发射锥角和信号覆盖范围进行了分析,然后依据AC建议的试飞方法,提出了完整的试飞方案,并分析了存在问题和风险。

结合上述分析,本文提出了一种新的结合试飞方案——从正常着陆中获取需要的参数作为指点信标符合性的分析,并设计了可接受判据,为民机指点信标试飞提供参考。

参考文献:

- [1] 陈高平,邓勇. 航空无线电原理(下册)[M]. 北京:国防工业出版社,2005:430.
- [2] 航空无线电导航设备第1部分:仪表着陆系统(ILS)技术要求[S]. MH/T 4006.1-1998.
- [3] 王世锦. 机载雷达与通信导航设备[M]. 北京:科学出版社,2010:264.
- [4] Lan Moir Allan Seabridge. Civil Avionics Systems [M]. London:St Edmundsbury Press,2003:131.
- [5] 航空无线电导航台站电磁环境要求[S]. GB 6364-86.