

大型民用飞机涡扇 发动机采购成本研究

Procurement Cost Analysis of the Turbofan Engine of Large Civil Aircraft

熊华文 王光秋 / Xiong Huawen Wang Guangqiu

(北京民用飞机技术研究中心,北京 102211)

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

摘要:

通过查阅大量国内外相关文献资料和报道,并结合作者的工作经验,首先探索了大型民用飞机发动机的研制和批生产成本的分析方法和计算模型,估算了市场上新型发动机的研制成本和批生产成本。然后提出了大型民用飞机发动机的基本价格计算方法,利用市场上新型涡扇发动机的参数进行计算分析,并结合飞机的基本价格进行了比较分析。在分析发动机成本、基本价格和市场竞争情况的基础上,分析了实际采购价格策略。研究表明,在市场经济条件下,发动机采购成本估算应采用“市场定价”准则。提出的方法合理,计算简便易用,精度能满足实际需要。可以为中国研制大飞机项目提供参考,同时也可以为航空公司在选择和采购发动机时提供参考,以便合理估算大型民用飞机涡扇发动机的采购成本。

关键词:民用飞机;涡扇发动机;采购成本;研制成本;市场研究

中图分类号:F41

文献标识码:A

[Abstract] The purpose of the paper is to improve the method available for estimating the procurement cost of turbofan engines for large civil aircraft. A new approach to analyze the R&D cost and production cost is studied based on the domestic and foreign studies. The newly developed turbofans are used to evaluate the accuracy of the method. Engine list price is the reference to the market price. Procurement price is mainly determined by the market competition situation. Procurement price could be at big discount based on the negotiation between the engine manufacturers and the customers. Launching customers, big leasing companies and big airlines (groups) tend to have big discount. Pricing practice of Rolls-Royce's aero engines is studied as an example of buying big civil turbofan engines. The results show that the estimation methodology of procurement cost is rational; the calculation is simple and practical; the precision of the calculations is accepted for the real requirements.

[Key words] Civil Aircraft; Turbofan Engine; Procurement Cost; R&D Cost; Market Analysis

0 引言

大型民用飞机从研制、生产到市场营销、客户服务已经是全球化。随着国际合作模式的深入开展,世界民用飞机工业逐渐形成了“主制造商-供应商”模式,即以整机制造商为核心,主系统承包商、机体大部件供应商、及其它承包商为支柱的、紧密的产业体系。中国大型民用飞机研制也采用“主制造商-供应商”模式。

发动机是飞机非常重要的核心部件,发动机供应商的能力和绩效对飞机主制造商(如中国商飞)的发展和成功有非常重要的作用,大型民用飞机发动机市场是一个高度集中和垄断的市场。分析、了解和掌握大型民用飞机发动机的研制成本、生产成本和采购成本,对我国飞机制造商、发动机制造商和客户都是很有必要的。

发动机的采购成本在很大程度上影响飞机的采购成本和航空公司的运营成本,进而影响到飞机

的销售。了解发动机的采购成本、挑选合适的发动机供应商和合适的发动机,对主制造商和大型民用飞机项目的成功来说,至关重要。我国对这方面的研究刚起步,还远没有达到应用至型号研制中的程度,需要业界的共同努力。

1 发动机研制和生产成本估算方法概述

由于我国目前还未有自主研发的民用干线飞机发动机,此类发动机的研制、生产成本研究刚起步。国外在过去几十年进行了大量关于发动机成本预测的研究,其中,比较著名的有美国兰德公司(RAND)^[1-2]为美国军方进行的有关飞机研发成本和大型飞机发动机研发成本的计算机估算模型。

估算发动机成本的主要方法有三种:参数法、类比法和工程法^{[2][4]}。本节对这三种方法进行简要的描述,并分析它们的优缺点。

1.1 参数法

参数法是利用同类发动机数据库的技术资料,进行统计分析,找出发动机的成本与有关参数之间的关系,形成估算方程式。与发动机成本有关的参数包括推力、重量、尺寸、排放、油耗、运营环境等。参数法适用于项目在立项论证阶段,用于分析某一种发动机方案的全部成本。参数法是通过统计技术得来的,过去的项目费用都有比较准确的描述,对处于类似技术条件、经济基础和相同任务需求与发展背景下的几种发动机方案进行比较分析,其结果是比较可信的。

参数法的优势体现在:(1)参数法公式定义完成后,使用简便直观;(2)研究人员不一定是发动机技术专家;(3)对有些不确定因素也可以考虑。

参数法的不足在于:(1)生成成本估算公式不容易,需要大量的统计资料,统计资料的分析需要较高的专业知识;(2)对于将来可能要用到的新技术、新材料、新工艺可能估计不足,进而影响估算精度。

1.2 类比法

类比法选择相同或相似的现有发动机,该发动机与新研制发动机具有类似的功能和相同的运行环境。通过对现有发动机的成本进行分析,并根据这两种发动机的异同进行修正,可得到新研制发动机所需的费用。

类比法适用于现有发动机的衍生产品或改进型。类比法只需要分析同原型机不同部分的成本,相比于工程法省去了不少时间。但是类比法需要有原型发动机及其相关技术参数、成本数据等,目前在中国是不现实的。

1.3 工程法

工程法通过对发动机的详细设计、分析和计算来估算发动机成本。应用工程法估算发动机成本,分析人员需要查阅详细的工程图纸、技术资料。工程法通过工作分解结构和成本分解结构,考虑的因素全面周到。工程法估算一般在发动机的概念设计时就介入,有时要一直持续到详细设计阶段。工程法的精度是最高的,国内航空工业企业在国际转包生产时会考虑用工程法估算成本。

工程法的不足之处在于:(1)费时、费力。分析人员要在概念设计时介入,有时要一直持续到详细设计阶段;(2)研究人员要求必须是发动机技术专家,对发动机的设计、工艺、制造、试验都非常了解,并能正确地反映到成本估算中;(3)研究人员必须接触大量的发动机研制相关资料。

工程法适用于发动机制造商开发新的大型民用涡扇发动机,并从概念设计阶段就介入,不适用于发动机厂商之外的非发动机专家分析人员。

综合上述三种方法的分析和利弊比较,本文选择参数法进行发动机研制和生产成本估算,之后再使用兰德公司的分析模型对新型发动机的成本进行估算和分析。

2 发动机研制成本、生产成本研究

现代大型民用飞机的推进系统都是大推力的涡扇发动机,其结构非常复杂,价格非常昂贵。发动机从研制、生产到在使用中的改进花费大约占整个飞机价格的四分之一。因此,在一种新飞机的概念设计过程中,准确地预测发动机研制、生产成本和客户采购发动机的成本对客户和主制造商都非常重要。由于大型民用涡扇发动机市场高度集中,且研发成本的投入虽然由发动机公司投资,但又暗藏了各式各样的政府补贴,因此,外界很难准确了解研制一款新的大型涡扇发动机的真正成本。通过分析发动机的研制成本和生产成本,发动机用户可以跟发动机制造商博弈、讨价还价,以获得最佳的采购成本。

大型民用涡扇发动机的研制和生产成本同发

动机的推力、重量、推重比、工作环境、几何尺寸、油耗、环保要求、制造发动机的材料以及用这些材料来制造相应部件的难度有直接的关系。

发动机的研制和生产成本与发动机的使用要求有直接关系。市场需要发动机具有重量轻、经济性好、可靠性高、可维修性好以及绿色环保等特性。现代大型民用发动机有比以前更为复杂的控制和检测系统,以及目前新材料、新工艺的广泛应用,使得研制发动机越来越昂贵。发动机的研制成本和批生产成本的提高,也将反映到发动机的采购成本中。

兰德公司根据 20 余种美国军用飞机的数据,选定了参考变量,确定了分析准则,形成了估算发动机研制和生产的成本模型。通过进一步分析比较模型中的变量参数及相互关系,形成了应用比较广的 CERs(Cost Estimating Relationships)模型,并被植入到一个飞机成本预测的计算机模型中 DAPCA(Development and Procurement Costs of Aircraft)。兰德模型发动机的成本估算选定的参考变量包括推力、重量、尺寸、马赫数、油耗、产量等。

为了简化计算,本文估算发动机研制和生产成本选择的参数有推力、飞行速度和生产数量。

2.1 发动机研制成本

发动机研制成本包括所有同设计、开发、试验

样机制造以及测试有关的成本。假设所有的发动机都是全新研制的,这些发动机可以用相同的参数进行计算成本。

按照兰德模型,发动机总研制成本估算公式为:

$$C_d = -525.763 + 23 T_{max} + 401.022 M + 0.070 Q_{ty} \quad (1)$$

其中, C_d 是发动机总研制成本(百万美元,1980年), T_{max} 是发动机最大推力(klb), M 是巡航马赫数, Q_{ty} 发动机数量,假设为 1 000 台。

2.2 发动机批生产成本

按照兰德模型,发动机批生产成本估算公式为:

$$C_p = 523.82 + 43 T_{max} + 243.250 M \quad (2)$$

其中, C_p 是发动机的生产成本(千美元), T_{max} 为发动机的最大推力(klb), M 为马赫数,宽体机 $M = 0.85$,窄体机 $M = 0.78$ [2-3]。

2.3 发动机研制成本和批生产成本计算结果

考虑到美元的时间价值,参照空客公司 2008 年至 2013 年间飞机目录价格的平均溢价率(约 3.3%),假设大型民用发动机的成本和价格以这个速度递增。从各公司的官方网站,找到各新型大型民用发动机的最大推力[4-7],通过式(1)、(2)计算研制成本和批生产成本。总成本为研发成本加上批生产成本。计算结果如表 1 所示。

表 1 发动机成本估算

发动机	单台发动机最大推力 / klb	总研发成本 / 百万美元,1980 年	单台批生产成本 / 百万美元,2013 年	单台发动机总成本 / 百万美元,2013 年
Leap	33	614	6.17	7.95
PW1 100G	32	595	6.07	7.80
Trent 1 000	115	2 969	16.46	25.08
Trent 900	74	2 026	11.35	17.23
Trent XWB	97	2 555	14.22	21.63
GEnx	75	2 049	11.47	17.42
SaMI46	18	266	4.29	5.06

2.4 成本估算结果分析

同一种单通道民用飞机的两代发动机,LEAP 和 CFM56 的最大推力相同[4-5],如果按照式(1),这两种发动机的成本差异只跟最大推力有关。而现实是,LEAP 发动机是 CFM56 发动机的衍生型和替代品,技术更先进、油耗更低、可靠性更高、更加安全环保。

兰德公司的这个预测发动机成本模型是在

1980 年代形成的。1980 年代后,大型民机发动机采用“模块化”设计,一款核心机可衍生出一系列不同的发动机,研发成本大幅降低,对于衍生型大型民用飞机涡扇发动机,比如 CFMI 公司的 LEAP 发动机,其设计思路 and 核心机是在原型机 CFM56 发动机的基础上发展而来的。LEAP 发动机研发成本大幅度降低、批生产成本更加昂贵。实际上 LEAP 发动机比 CFM56 发动机销售价格更高。可

见,衍生型发动机的售价应该由市场定价,而不是由成本定价。

对于全新研制发动机,比如中航商发的新研发发动机和未来的开放转子发动机(OPEN ROTOR ENGINE),核心机、技术思路、技术开发都是全新的,并将重新做各类试验和适航申请,研制成本比衍生型发动机高很多。决策研制这一类发动机,既要考虑市场因素,也要考虑成本因素。

3 按推力估算发动机采购成本

按照推力估算大型民用发动机采购成本模型的核心是通过市场调查研究,估算出每一种发动机的目录价格,并与这些发动机的推力比较,得到一个估算民用大飞机所需发动机的采购成本。

经过搜索空客、波音、各发动机厂商公开的近两年的资料^[4-8],作者统计估算出了最新发动机的目录价格。对于有实力的大客户,比如 GECAS 和中航材集团,飞机和发动机几乎没有按目录价成交的。成交价格都是在基本价格的基础上,按市场供需平衡条件下达成的价格。据分析,基本价格一般为目录价格的 60%,如表 2 所示。

表 2 单台发动机基本价格估算
(百万美元,2013 年)

发动机	飞机	发动机单发推力 / klb	单台发动机基本价格 / 百万美元
Leap-1A	A320NEO	25.0	6.0
Leap-1A	A321NEO	33.0	7.5
Genx-1B	B787-10	72.0	15.0
Genx-1B	B787-9	68.0	13.5
Genx-1B	B787-8	64.0	12.0
Trent XWB	A350-900	84.0	16.8
Trent XWB	A350-1000	97.0	19.2
Trent 1000	B787-8	70.0	13.5
Trent 1000	B787-9	74.0	15.0
Trent 900	A380	70.0	13.2

根据表 2 的数据,拟合得到发动机的基本价格估算公式为:

$$P_1 = 0.18 T_{\max} + 1.21 \quad (3)$$

其中, P_1 是基本价格(百万美元,1980 年), T_{\max} 为发动机的最大推力(千磅)。

根据式(3),得到的新型大型民用发动机的基

本价格,如表 3 所示。

表 3 按推力估算单台发动机采购基本价格

发动机	飞机	发动机单发推力 / klb	P1 / 百万美元,2013 年
Leap-1A	A319NEO	22	5.22
Leap-1A	A320NEO	25	5.76
Leap-1A	A321NEO	33	7.22
PW1100G	A319NEO	24	5.49
PW1100G	A320NEO	26	5.99
PW1100G	A321NEO	32	7.05
Leap-1B	B737MAX7	22	5.22
Leap-1B	B737MAX8	27	6.18
GEEx-1b	B787-8	64	12.86
GEEx-1b	B787-9	74	14.68
GEEx-1b	B787-10	78	15.41
Trent XWB	A350-800	75	14.86
Trent XWB	A350-900	84	16.50
Trent1 000	B787-9	74	14.68
Trent1 000	B787-10	76	15.04
Trent900	A380	70	13.95

注 1: P1 是按推力估算单台发动机采购基本价格, A320NEO 系列发动机的推力是技术资料中的名义推力。
注 2: 737MAX 系列发动机的推力是波音公司网站上公布的推力。

4 用飞机价格估算发动机采购成本

在第 3 节中,通过收集市场资料,拟合出了发动机基本价格同推力的关系。为了分析上述公式的精确度,通过下述方法来进行验证。

验证方法的假设是民用飞机推进系统的采购基本价格,是飞机基本价格的四分之一。民用飞机的推进系统包括发动机、发动机短舱等。发动机成本约占推进系统成本的 75%。这个假设的依据是兰德公司美国军用飞机项目的统计结果、中国商飞的实践和笔者的工作经验。通过从波音和空客的网站,得到了波音和空客双发大型民用飞机的目录价格。同样假设飞机基本价格为目录价格的 60%,得到单台发动机的基本价格 P_2 。比较的办法是:

$$\Delta = P_2 / P_1 - 1 \quad (4)$$

计算结果如表 4 所示。

表 4 单台发动机采购基本价格估算与分析

发动机	飞机	飞机目录价格	发动机单发推力 / klb	P1 / 百万美元,2013 年	P2 / 百万美元,2013 年	Δ
Leap-1A	A319NEO	92	22	5.22	5.18	-0.8%
Leap-1A	A320NEO	100.2	25	5.76	5.64	-2.2%
Leap-1A	A321NEO	117.4	33	7.22	6.60	-8.5%
PW1100G	A319NEO	92	24	5.49	5.18	-5.7%
PW1100G	A320NEO	100.2	26	5.99	5.64	-5.9%
PW1100G	A321NEO	117.4	32	7.05	6.60	-6.4%
Leap-1B	B737MAX7	85.1	22	5.22	4.79	-8.2%
Leap-1B	B737MAX8	103.7	27	6.18	5.83	-5.6%
GEnx-1b	B787-8	211.8	64	12.86	11.91	-7.4%
GEnx-1b	B787-9	249.5	74	14.68	14.03	-4.4%
GEnx-1b	B787-10	288.7	78	15.41	16.24	5.4%
Trent XWB	A350-800	254.3	75	14.86	14.30	-3.7%
Trent XWB	A350-900	287.7	84	16.50	16.18	-1.9%
Trent1000	B787-9	249.5	74	14.68	14.03	-4.4%
Trent1000	B787-10	288.7	76	15.04	16.24	8.0%
Trent900	A380	403.9	70	13.95	11.36	-18.6%

注 1:P1 是按推力估算单台发动机采购基本价格。
注 2:P2 是用飞机的目录价格估算得到单台发动机的基本价格。

从表 4 可以看出,按飞机目录价格得到单台发动机的基本价格(P_2)相比按照推力估算模型得到的发动机基本价格(P_1)非常接近,除了 Trent900,其它的相差都不到 10%。由于 A380 飞机的市场容量很小,因此 Trent900 的计算结果影响不大。由此可见,通过推力参数模型估算得到的发动机基本价格(P_1)是比较准确的。

5 发动机的实际采购价格分析

大型民用飞机发动机的价格主要由成本和市场竞争态势决定。成本是决定价格的基础,而市场竞争态势是决定价格的主要因素。

当航空公司打算采购大型民用飞机发动机时,考虑的主要因素是发动机的价格、安全性、可靠性和维护成本。发动机的价格和维护成本是可以量化的参数,现在航空公司采购发动机时往往将采购数量、可靠性和维护成本同价格一同考虑。这也促成了发动机的目录价格居高不下、发动机实际售价有大的折扣,发动机制造商也能获取合理的利润,同时航空公司也能放心购买和使用发动机的双赢

局面。

5.1 发动机供应商市场分析

在大型民用飞机发动机领域,英国罗罗公司、美国普惠公司和通用电气公司处于行业领先地位,几乎垄断了大型宽体客机发动机市场。通用电气公司与斯奈克玛公司合资的 CFMI 公司、美国普惠公司及其控股的合资公司 IAE 公司占据了几乎所有的单通道大型民用飞机发动机市场。

大型民用飞机发动机是一个寡头垄断市场,而不是完全竞争市场,在很多时候发动机的可选择余地很小。经过了 20 多年,在普惠公司的 GTF 发动机和 CFMI 公司的 LEAP-X 出现后,才有 A320 的换发动机型 A320NEO 的出现。737MAX 代替 737NG 也是基于同样的理由。

5.2 采购发动机的维护成本因素

现在,有的客户在选购发动机时,已经开始将购买发动机的成本同发动机的维护成本捆绑在一起^[5-9]。这是因为发动机维护成本是飞机总维护成本的重要组成部分。分析飞机维护成本是航空公司飞机经济性分析中的重要组成部分。维护成本

可分为直接维护成本 (DMC) 和间接维护成本 (IMC)。发动机维护成本受飞行小时、飞行循环次数和日历时间的影响。图 1 以 A320 为例^[10], 显示了直接维护成本的分布情况。

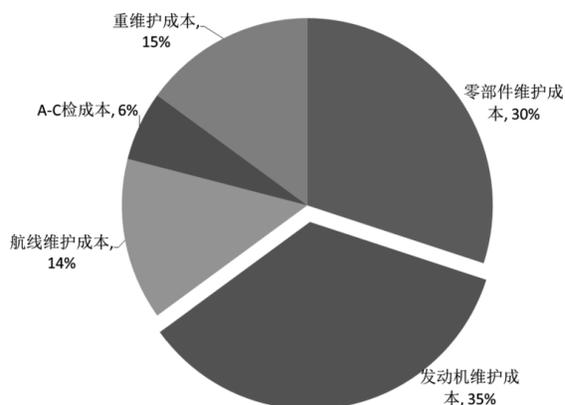


图 1 A320 飞机直接维护成本分布视图

实际上,发动机上有很多昂贵时寿件(LLP),这些部件在到达规定的寿命期限时必须更换。由图 1 可以看出,发动机的直接维护成本占了飞机直接维护成本的很大一块。

5.3 发动机的采购价格分析

市场上大型涡扇发动机的实际采购价格变幻莫测,精确估算价格非常困难。不同客户及同一客户不同订单,价格都可能有很大的差别。对于发动机采购交易来说,发动机订单数同价格折扣紧密相连。对航空公司来说,也希望减少发动机的型号数量。航空公司发动机的型号数量少意味着备用发动机和备用发动机部件减少,直接降低成本。

市场因素对目录价格的影响不大。目录价格只是起到一个价格导向的作用,在实际合同中,飞机制造商完全可以针对不同客户执行灵活的定价策略,最后实际成交价和目录价之间会存在较大差异。所以相比而言,实际合同成交价对市场竞争激烈程度较为敏感。

发动机客户,比如航空公司和飞机租赁公司,获得优惠价格的能力同客户的市场地位、采购量多少有直接的关系。下面以英国罗罗公司的湍达发动机为例,说明售价的折扣情况。经过收集有关罗罗公司的销售信息,得到销售折扣价格与销量的大致关系。通过收集、分析有关罗罗公司和联合技术公司在 2010 年至 2011 年之间有关 A380 发动机叶片的知识产权官司透露出的信息,了解到罗罗公司 Trent900 的实际销售价格可能是 3~6 折(甚至更

低),取决于客户的地位、是否是启动客户以及售后服务合同条款等。详细分析结果如图 2 所示。

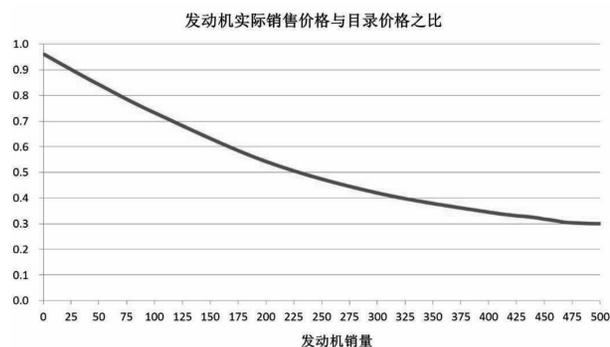


图 2 发动机实际销售价格与销量的关系

大部分情况是,除了启动用户外,大的采购代理(比如中航材集团)、大的航空公司(比如美国航空公司)、飞机租赁公司(比如 GECAS)在采购量足够大时,折扣一般是 3~5 折。研究显示,当发动机的实际销售价格折扣较大时,一般会附带长期的售后服务合同。

6 结论

估算大型民用涡扇飞机发动机采购成本是一个非常复杂、不断变化的动态过程。根据大型新型涡扇发动机的特性,以及采购发动机需要考虑的因素,本文首先探索简便实用的成本估算方法,可以支持全新研制发动机经费估算。然后通过收集市场销售资料,提出了估算实际采购发动机价格的计算模型。将新型涡扇发动机基本价格估算结果进行对比计算分析,表明本文发动机基本价格估算方法满足实际研究需要。在分析发动机成本、基本价格和市场竞争情况的基础上,以罗罗公司为例,分析了实际采购价格策略。研究表明,在市场经济条件下,发动机采购成本估算应采用“市场定价”准则。本文可为我国民用大飞机的研制、生产和销售提供参考,同时也可为航空公司在选择和采购发动机时提供参考。

参考文献:

- [1] Younossi Obaid, Arena Mark V., Moore Richard M., Lorell Mark, Mason Joanna, Graser John C., Military Jet Engine Acquisition: Technology Basics and Cost-Estimating Methodology [R], RAND/MR-1596, 2002.
- [2] Birkler J. L., Garfinkle J. B., Marks K. E., Development and Production Cost Estimating Relationships for Aircraft Turbine Engines [R], N-1882-AF, 1982.
- [3] 李屹东. 战斗机全寿命周期费用估算技术研究[C]. 中国

航空学会飞机总体专业委员会第五次学术交流会,2002.
[4]The Boeing Company, www.boeing.com.
[5]Airbus, www.airbus.com
[6]GE Aviation, www.geaviation.com.
[7]Rolls-Royce, www.rolls-royce.com.
[8]CFM Press Release, http://www.cfmaeroengines.com/press.
[9]Pratt & Whitney, www.pw.utc.com.
[10]保罗·克拉克. 大飞机选购策略(第二版)[M]. 北京: 航空工业出版社,2009.
[11]Ministere de l' Economie et des Finances, The French Tax System [EB/OL]. www.impots.gouv.fr.
[12] Commercial engines 2013 [EB/OL]. www.flightglobal.com/insight , 2013; 23-33.
[13] David Kaminski - Marrow, Size matters for re - engined

twinjets, Flight International, 7-13 Jan. 2014: 11.
[14]Peoples Ryan, Willcox Karen, Value-Based Multidisciplinary Optimization for Commercial Aircraft Design [R]. 45th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, Palm Springs, California, USA, 19-22 April 2004, AIAA 2004-1542.
[15]Markish Jacon, Valuation Techniques for Commercial Aircraft Program Design[D]. Cambridge, MA, USA: Massachusetts Institute of Technology, 2002.
[16]Hans De Ryck, Turbofan design for the commercial aircraft [D]. Warsaw, Poland: Warsaw University of technology, 2008.
[17]陈迎春,宋文滨,刘洪. 民用飞机总体设计[M]. 上海: 上海交通大学出版社,2010.

(上接第 55 页)

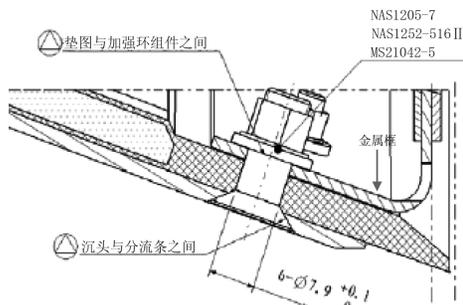


图 3 雷达罩

属铝网的接触面积非常有限,为了增大接触面积,在钉头与金属铝网之间使用铝箔圆片,规格为厚度 0.076 mm 、外半径 $D = 12.7\text{ mm}$ 和内半径 $d = 4.8\text{ mm}$ 。清理带有金属雷击防护层的复合材料蒙皮表面(电搭接表面清理及密封范围为 $\varphi 15\text{ mm}$),把铝箔圆片用导电胶粘结在已清理的蒙皮表面上,并采用钛合金紧固件进行连接,推荐采用的螺栓与孔的配合精度不低于 H8/h7,高锁螺栓与蒙皮采用间隙配合孔,而与长桁采用标准干涉配合孔。由于复材件与金属之间会产生一定的电化腐蚀,而且为了更好地实现复材转载,安装紧固件时采用不导电(防止雷击电流进入层合板内部导致分层)、且对复材性能无影响的密封剂(防腐蚀)进行密封。电气搭接前的贴合面和电气搭接后的填角都需要进行密封。整个后机身雷击强电流路径为:铝网-铝箔圆片-紧固件-金属长桁-尾锥-静电刷,如图 4 所示。

复合材料单层板的最大电流传导能力大约为 0.55 kA/mm^2 ,在雷击 II 区,通过螺栓接触面传导电流所需要的传导截面为 $100\text{ kA} > 1.82\text{ cm}^2$ 。由于复材后机身处于雷击 II A 区,要传导峰值电流 100 kA ,6 号凸头高锁的有效传导面积为 $A_1 = 0.18\text{ cm}^2$,所需要的紧固件数量为 $n = 1.82/0.18 > 10$ (制成头下使

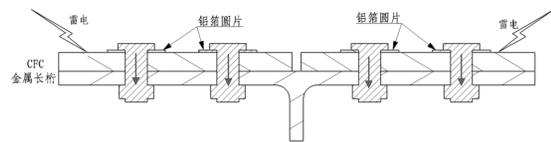


图 4 雷击电流路径

用铝箔圆片)。事实上,连接蒙皮与金属长桁的高锁都用来传导雷击电流,所以不会出现大电流下紧固件过热断裂的问题。其中,当高锁制成头下面不用铝箔圆片时,建议电搭接表面清理及密封范围为 $\varphi 15\text{ mm}$ 。

由于采用凸头紧固件,比较容易吸引雷电,所以对紧固件钉头进行涂胶密封;在蒙皮内侧的高锁螺母和垫片采用耐热聚氨脂涂层进行密封,满足强度条件下采用大的紧固件间距,以防出现电弧和火花。

6 结论^[1]

由于该复材后机身处于雷击 II A 区,采用了 48.8 g/m^2 、直径为 0.1 mm 的铝网做复合材料零件的表面防护层,防护层可以起到有效的闪电防护作用,而且有专门的传输雷电通道,紧固件与金属网接触面积充分且紧固件个数完全满足传输雷电流的需要。因此,该闪电防护设计方案满足适航条款 CCAR 25.581 的要求。

参考文献:

[1]《飞机设计手册》总编委会. 飞机设计手册第 10 册: 结构设计[M]. 北京:航空工业出版社,2001.
[2] 中国航空研究院. 复合材料结构设计手册[M]. 北京: 航空工业出版社,2001.
[3] 牛春匀. 实用飞机复合材料结构与制造[M]. 北京: 航空工业出版社,2010.
[4] 中国民航局. CCAR 25.581 中国民用航空规章第 25 部: 运输类飞机适航标准[S]. 北京:中国民用航空局,2001.