

# 基于维修性工程研究方法的 航材工程应用

## Application of Spares Engineering Based on the Research Method of Maintainability Engineering

晏青 吕骏 刘伟 / Yan Qing Lv Jun Liu Wei

(上海飞机客户服务有限公司, 上海 200241)

(Shanghai Aircraft Customer Service Co. Ltd., Shanghai 200241, China)

### 摘要:

民用航空业的蓬勃发展对民机客户服务工作提出了新的要求,在提供优质产品的同时,如何高效保障机队正常运营成为了当前研究的重点课题。维修工程和航材支援是民机客户服务的重要组成部分,从工程实际应用出发,介绍了航材工程清单的编制流程,基于民机航线可维修性原则,着重探讨了维修性工程研究方法,并通过实例验证了航材推荐清单的有效性和实用性,可满足航材保障的要求。

**关键词:**维修工程;航材工程;民用飞机;RSPL;客户服务

**中图分类号:**V267

**文献标识码:**A

[Abstract] New requirements have been put forward for the civil aircraft customer service with the civil aviation industry booming. While providing the high quality products, how to efficiently guarantee the normal operation of the fleet becomes a focus of the current research topics. Both the maintenance engineering and spares engineering are the significant components of the civil aircraft customer service. From the practical engineering application, this paper introduced the preparation process of spares engineering. Based on the principle of the flight serviceability, the research method of the maintainability engineering was emphatically discussed. The verification examples are demonstrated that the method presented is effective and practical for RSPL to meet the requirements of the spares support.

[Key words] maintainability engineering; spare engineering; civil aircraft; RSPL; customer service

## 0 引言

进入 21 世纪以来,民用航空业飞速发展,已成为全球经济发展的引擎之一,在带动经济发展的同时,也加剧了各大飞机制造厂商和航空公司的竞争压力。如何有效降低运营成本,不断提高利润,优质的客户服务及运营保障是关键。航材作为航空公司开展运营的必要资源,一直是航空公司的一项重要管理活动,其所占用的企业流动资金是一项非常可观的数额。因此,做好航材的管理工作,对航空公司控制成本具有重大的意义。

民用航空业是一个资金、技术密集型的行业。根据已知文献,中国航空公司的航材库存占用资金

高达一百多亿,其中大型航空公司约为十几亿元至几十亿元人民币。航材储备占用了航空公司 75% 左右的存货资产,25% 左右的流动资金,库存备件中有接近 30% 的航材从未发出过<sup>[1]</sup>。由于航材工程所制定的备件计划不尽合理,导致航空公司成本居高不下。因此,作为整个航材支援保障的源头,如何改善和优化航材工程内容可谓重中之重。

近几年来,随着国产大飞机研制进程的不断加快,后续飞机交付运营所需要的支持性服务和保障性工程也迫在眉睫。民用飞机在交付航空公司或其他用户之后,围绕民机本身以及飞机客户服务将会开展一系列的服务,包括适航管理、维修服务、航材支援、飞行训练等。为保障航材支援,欧美发达

国家早已对此开展了航材工程及相关产品研究,中国民机项目刚刚起步不久,为方便国内外客户使用及采购航材,降低采购成本和周期,因此,在国内开展航材工程及相关研究就具有十分重要的现实意义。

另一方面,随着国内机队使用的增加,机队规模的扩大及飞机老龄化日渐增长,这种趋势要求必须提高保障飞机安全运行的维修工程能力。维修工程既包括维修大纲和维修任务的制定,也包括对整架飞机的系统件和机体件进行可拆性分析。从运营的角度来讲,维修工程可分为航线维修与内场维修,其效果直接影响着航空公司的经济效益。

民机安全是永恒的主题,安全飞行是所有航空公司正常运营的共同基础。维修工程作为确保飞行安全、实现运营平衡的重要方面,成为了世界各大航空公司关注的重要课题<sup>[2-3]</sup>。在保证安全飞行的前提下,民机航材工程与维修工程共同保障着航空公司机队的正常运营,是民机客户服务与支援中最重要的两个组成部分,其作用日益凸显。

在此背景下,为确保某型民用飞机正常运营,本文以该型号民机航材工程为研究对象,详细阐述了初始航材推荐清单的编制和应用,并基于飞机交付后航线维护保障的原则,探讨了维修性工程研究方法,通过查询维修工程文件,同时参照供应商RSPL及维修技术文件,应用实例验证了航材推荐清单的可靠性和合理性,以满足航材保障要求。

## 1 航材工程清单

航材支援与管理是一个非常复杂的技术性和管理性工作。整个工作贯穿于飞机的设计、试飞、使用直到报废的全过程,在各个过程中航材支援工作的内容又各有侧重。但是对航材工程和支援保障方面而言,却有许多共性的技术,涉及到维修工程、管理科学、库存理论、供应链管理、物流学、预测学、计算机与信息科学、商务管理等多学科领域,因此,可以说航材支援管理是一个复杂的系统工程,涉及的内容非常广泛。

航材支援是指为保证飞机正常运行所必须提供的外场维护所需要的备件及原材料的供应,其工作内容包括:制定备件计划(航材工程),采购备件,建立科学合理的备件库,随时处理飞机紧急订货,迅速、准确地提供给用户所需要的各种资料、部件、设备等。其中,航材工程作为航材支援与保障工作

的重要源头,为航材保障工作提供技术支持输入,处于整个航材支援和保障体系的上游,具有非常重要的地位和作用。

航材工程是指飞机制造商为了编制航空公司飞机运营所需的各类航材供应资料而开展的研究工作。航材供应资料(Spares Provisioning Products),是飞机主制造商在飞机交付前和交付后,向航空公司提供的一系列航材相关的支援文件,是支持航空公司新购飞机后航材首批采购、航线维护、维修、改装等工作所需的航材相关信息<sup>[4]</sup>。这里主要介绍与本文相关的飞机潜在航材集与初始航材推荐清单(RSPL)。

### 1.1 潜在航材集

民用飞机航材是指为保持和恢复飞机主机、机载设备、地面保障设备设计性能所必须的零、部件及修理更换用的成品替换件等,包括飞机维护修理中所需的零、部件及耗材。航材通常包括发动机、起落架、襟缝翼、APU等高价值的部件,也包括活门、封圈、螺钉螺帽等装机零件,以及滑油滑脂,油漆、清洗剂等非装机耗材件。

航材是保证飞机正常营运的重要物质基础,分类方法众多,大的方面来讲,通常分为发动机备件、机体备件和系统备件三大类。按装机位置及系统分,有电子件、机械件、发动机件、灭火设备、照明设备、标准件,化工品等;按价值分,有高价周转件,消耗件。波音公司对此作了更为详细的划分,如:LRU、LMP、STANDARD、BULK&RAW等。

潜在航材集是指飞机航线中维护、修理所需的所有潜在备件,是制定备件数据库、确定备件库存、制定RSPL的基础工作。潜在航材集的编制工作是一项基础性工作,由设计人员和航材工程人员共同完成,也是开展航材支援工作的基础。完整、准确的潜在航材集作为编制航材供应资料的输入依据之一,为建立航材数据库奠定了基础<sup>[5]</sup>。

潜在航材集的制定是以飞机全机零部件的可拆性分析为基础,根据飞机数模、装配关系、零件层次关系、相互连接方式和安装位置分析出所有可拆的结构件、系统件、组件的所属组件,直至基本零组件等信息,把分析结果汇总整理。潜在航材集的编制以航材工程师通过民用飞机全集可拆性原则分析为主要判断依据,并根据维修大纲、各类手册进行人工修正。

### 1.2 航材推荐清单(RSPL)

航材推荐清单(Recommended Spare Parts List,

简称 RSPL)是飞机制造商为了客户能够顺利运营新飞机,而向客户推荐的航材清单,是根据客户的飞机数量、飞机利用率、保障水平等信息制定的客户化文件,满足客户机队在未来一段时间内日常航线维修所需的各种航材。其范围主要包括各主要系统的 LRU、LMP 等部件,也包括活门、封圈、螺钉、螺帽等通用件和标准件、散装/原材料、过滤器套件、灯具等。飞机制造商通过制定航材推荐清单,用于指导客户的初始备件采购,最终确定备件的采购、存贮计划<sup>[6]</sup>。

RSPL 的编制是飞机研制阶段备件支援工作的重要内容之一,也是航空公司进行备件采购和贮备的重要依据。RSPL 工作一般开始于飞机 EIS 前一年,飞机 EIS 前半年发布 RSPL 正式版,之后平均每三个月更新换代一次,直到最后一架飞机 EIS 后三个月为止。

RSPL 的主要参数包括:件号、ATA 章号、名称、供应商代码、航材类型、重要性、平均非计划拆换间隔、装机数量、推荐数量、有效性、价格等。

在前期制定的潜在航材集基础上,按照如图 1 所示流程编制 RSPL 清单。



图 1 航材推荐清单编制流程图

(1) 在潜在航材集的基础上,根据 AIPC、AMM、CMM 等工程技术文件确定航材需求项目,并结合可靠性参数、航材支援类型码等,确定列入 RSPL 的航材项目;

(2) 根据以上确定的航材项目,由客户化的条件,包括机队规模、每机年平均飞行小时、消耗供应期、平均周转时间及保障率要求等,通过航材需求预测数学模型(附录 A)计算、经验测算和人工修正等方法确定推荐数量,并形成航材推荐清单(RSPL);

(3) 根据飞机型号的工程设计更改及客户运营参数的变化、消耗情况等,发布并更新航材推荐清单。航材推荐清单平均每三个月更新一次,并持续更新。

初始交付飞机由于没有历史航材消耗经验数据,一般采用数学模型计算航材数量,并通过航材工程师人工修正。经过航材数学模型计算得出的航材数量并不总是能满足实际需求,需要不断优化,尽可能满足实际需求。新机型的 MTBUR 值在

运营的并不准确,因而需要进行人工修正。对于 ESS 为 1 的件,其 MTBUR 较高会导致数学模型计算所得的需求量为 0,而运营中一旦缺少此类件会直接导致飞机不能放飞,因此,对于此类件须酌情增加推荐数量。而 ESS 为 3 的件,视其功能及易损程度可适当减少推荐数量。

## 2 维修性工程研究方法

维修性工程是一个大型的综合性工程,应由使用方、设计方、工艺制造和试飞单位共同承担。这项工程通常是由使用部门和研制部门协商,根据当前和未来的实际要求和现有技术水平提出的。国内外的经验表明,飞机维修水平受飞机自身的制约。例如,飞机固有的可靠性、维修性、经济性等指标所达到的水平,决定了使用时期维修所能达到的最高水平。在新型飞机研制阶段,机体的总体布局、结构形式,以及可靠性和维修性,决定了飞机维修的工作量、费用和难易程度。国外航空界已普遍将维修工程纳入航空飞行器研制的全过程,这是因为现代飞机不仅应具有良好的飞行性能,而且还应具有优良的维修性能<sup>[7-9]</sup>。

维修性工程是飞机保障性分析中的一个重要环节,其目的是保障飞机正常运营,且反过来对飞机设计产生重要影响。目前,维修性工程分析已成为民机的研究热点,国内外对此展开了大量研究。近年来,随着民用维修业务的发展,如何确定合理的维修解决方案已引起飞机制造厂商和航空公司的高度关注,并会对航材采购和保障产生巨大影响。其中,航材备件的可拆性分析与维修性工程分析直接相关。例如,制定机体件可拆性分析原则时,可参照 MPD 文件,对结构维修性分析中的可达性、设计简化、互换性、标准化等内容进行分析,优化航材备件编制流程,使备件的选取更加准确,同时具有较强的可操作性。

飞机维修计划文件(Maintenance Planning Document,简称 MPD),可以为每个飞机用户提供制定维修方案和完成预定维修大纲所必须的维修计划信息,适用于对飞机进行维护和维修时使用。同时,通过参考 MPD 维修任务条目及检查门槛值,可对比找到飞机维修手册(Aircraft Maintenance Manual,简称 AMM)中的任务号,通过勤务描述并分析具体维修任务,从中判断可靠性低,需要经常维修更换的易损航材件,并通过技术文件比对出相应航材件

号,以此来验证该航材项目列入航材推荐清单(简称 RSPL)的可靠性和合理性。

基于此,本文从维修性工程角度,通过查询相关 MPD,来确认和分析对航材保障工程的影响,并基于航线可维修性原则,通过实例验证航材推荐清单的有效性和实用性。文中具体以某型民用飞机的起落架系统的航材推荐清单为例,根据航空公司对清单准确性的反馈要求,从民航航线可维修性的角度出发,通过维修性工程研究方法,对 RSPL 中的部分航材项目进行了验证与修订。维修性工程验证方法流程如图 2 所示。

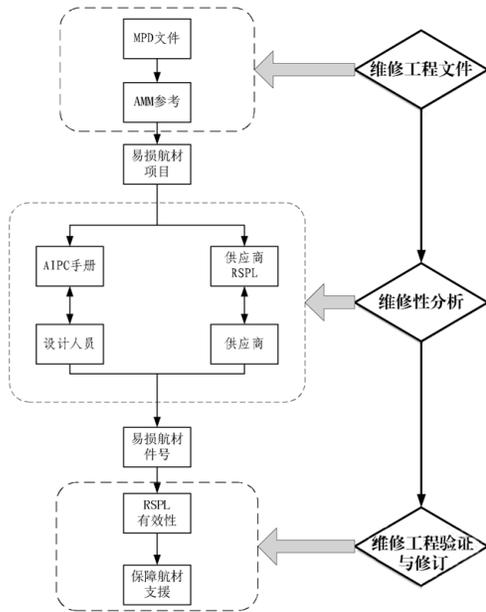


图 2 维修性工程验证方法流程图

### 3 工程应用实例

按照某型民用飞机起落架系统 MPD 维修计划文件,以检查门槛值/重复检查间隔为筛选标准,查得以下 MPD 维修任务的检查门槛值/重复检查间隔仅为 48H,见表 1。根据 MPD 文件说明,该型号飞机平均每天为 8 个飞行小时,见表 2。48H 即平均每 6 天就要进行检查维护,属于日常检查和维修项目,维护频率较高,须重点关注;且这些维修任务号影响类别为 5,即明显影响飞行安全性级别,极易影响飞机正常运营,见表 3。

根据表 1 中提及的维修任务号,对比参照某型飞机维修手册,通过查找 AMM 参考序号,找到维修任务中需及时检查和更换的航材项目,再通过对比飞机图解零件手册(AIPC),明确对比的航材件号,最终确认该航材项目是否已列入 RSPL 清单。

表 1 起落架系统 MPD 维修任务(检查门槛值=48H)

MPD 任务号	故障影响类别	任务描述	检查门槛值	重复检查间隔	任务来源	AMM 参考
32-45-00-01-01	5	一般目视检查刹车盘磨损指示杆和刹车装置	48H	48H	MRBR	32-45-10-700-801
32-45-00-02-01	5	一般目视检查主起落架机轮明显的裂纹与损伤	48H	48H	MRBR	32-45-00-200-801
32-45-00-03-01	5	检查主起落架轮胎充气压力	48H	48H	MRBR	12-15-51-200-801
32-45-00-04-01	5	一般目视检查主起落架轮胎	48H	48H	MRBR	32-45-30-200-801
32-45-00-05-01	5	一般目视检查前起落架机轮明显的裂纹与损伤	48H	48H	MRBR	32-45-00-200-801
32-45-00-06-01	5	检查前起落架轮胎充气压力	48H	48H	MRBR	12-15-51-200-801
32-45-00-07-01	5	一般目视检查前起落架轮胎	48H	48H	MRBR	32-45-50-200-801

注:MRBR —— Maintenance Review Board Report,维修审查委员会报告。

表 2 某型飞机设计利用率

平均	飞行小时/年	飞行循环/年
	2 720	2 091
平均	飞行小时/天	飞行循环/天
	8	6.15
平均	1.3	飞行小时/飞行循环
最低	1 500	飞行小时/年

表 3 故障影响类别

级别	是否影响	故障类别
5	明显的	安全性
6	明显的	运行性
7	明显的	经济性
8	隐蔽的	安全性
9	隐蔽的	非安全性

经比对查找 AMM 手册,其中检查门槛值/重复检查间隔为 48H 的 7 条维修任务中(见表 4)仅有序号为 1、4、7 的三条任务号涉及更换航材项目,分别

为检查刹车磨损并更换刹车盘、检查轮胎磨损并更换主起轮胎和检查轮胎磨损并更换前起轮胎。由此说明,刹车盘、主起与前起轮胎均属于起落架日常勤务经常更换的航材 LRU 项目,三者均为易磨损件,与航线日常维护的实际情况相符。而序号 2、5 仅涉及机轮外部损伤检查,序号 3、6 仅涉及起落架胎压检查,属机务日常勤务内容,均不涉及航材项目更换。

表 4 MPD 对比 AMM 维修内容(检查门槛值=48H)

序号	MPD 任务号	AMM 参考序号	维修检查内容	涉及航材项
1	32-45-00-01-01	32-45-10-700-801	刹车磨损的检查	视情更换刹车盘
2	32-45-00-02-01	32-45-00-200-801	机轮快速检查(机轮安装在飞机上)	检查机轮外部损伤
3	32-45-00-03-01	12-15-51-200-801	起落架轮胎压力检查	勤务
4	32-45-00-04-01	32-45-30-200-801	主起落架轮胎目视检查	检查轮胎磨损并更换主起轮胎
5	32-45-00-05-01	32-45-00-200-801	机轮快速检查(机轮安装在飞机上)	检查机轮外部损伤
6	32-45-00-06-01	12-15-51-200-801	起落架轮胎压力检查	勤务
7	32-45-00-07-01	32-45-50-200-801	前起落架轮胎目视检查	检查轮胎磨损并更换前起轮胎

根据 MPD 维修任务分析结果,在 AIPC 中对比查找刹车盘、主起轮胎与前起轮胎相应的航材件号。经查对,在飞机图解零件手册中,起落架主起机轮件号为 90004162(不含胎皮),前起机轮件号为 90000581(不含胎皮),由于航线一般不单独拆换刹车盘,其上级组件刹车装置件号为 90004163。这三种航材易损件件号都已列入航材推荐清单,故通过维修性工程验证方法,通过查找 MPD 维修任务号,验证了 RSPL 清单的合理性和准确性。

值得注意的是,目前,由于某型飞机尚未正式运营,MPD 及 AMM 手册中的维修计划尚不够完善,不能涵盖所有的维修计划项目,AMM 中的维修流程较为粗略,维修准备和更换程序不够细致,且 AIPC 手册中部分 LRU 项目分解不够完全,部分航材未按照航线可维修的最小件号进行拆分,从而导致根据 RSPL 清单采购的航材件号无法满足维修要求,例如当更换 LMP 时,由于上级 LRU 未进一步分解,则必

须更换整个 LRU 组件。

因此,在此基础上,根据上一步确定的 AIPC 件号,对照供应商提供的 RSPL 文件及 CMM 手册,对尚未拆分的 LRU 组件进行进一步细化,以配合航线维修。通过对比查找供应商 RSPL 文件和 CMM 手册,得到主起机轮最新件号为 90004162-1(不含胎皮),前起机轮件号为 90000581-1(不含胎皮),刹车装置组件号为 90004163-1PR,三者件号均与主制造商 AIPC 手册的查询结果不太一致,现将三种航材项目件号对比,如表 5 所示。

表 5 起落架航材 LRU 件号对比

航材项目	AIPC 件号	供应商 RSPL	CMM 号
主起机轮	90004162	90004162-1	32-41-38
前起机轮	90000581	90000581-1	32-49-19
刹车装置	90004163	90004163-1PR	32-44-88

根据以上对比结果,可以看出主制造商 AIPC 件号与供应商 RSPL/CMM 件号存在差异,同时,这也是航空公司维修工程部门多次就完善清单提出的意见之一。为解决件号差异问题,保障飞机交付后正常运营,本文参照航线可维修性来确定所需的航材件号。为此,经与供应商航材部门及型号相关设计人员多方交流,确定该型号装机件号如表 6 所示。

表 6 起落架航材对比结果及装机件号

航材项目	AIPC 件号	供应商 RSPL	胎皮/探针件号	装机件号
主起机轮	90004162	90004162-1(不含胎皮)	409K02-2	装机件号为 90004162-1
前起机轮	90000581	90000581-1(不含胎皮)	247F22T1	装机件号为 90000581-1
刹车装置	90004163	90004163-1PR	6007300	装机件号为 90004163-1PR

其中,主起、前起机轮装机件号分别为 90004162-1 与 90000581-1,AIPC 件号 90004162 与 90000581 已不再生产。两种机轮件号仅指机轮轮毂,均不含胎皮,经咨询机轮刹车厂商,胎皮须向轮胎厂商单独进行采购。其中,主起与前起胎皮件号分别为 409K02-2 与 247F22T1,所采购的机轮轮毂与胎皮须自行组装。而刹车装置装机件号为 90004163-1PR,PR 指 PROBE 探针,牌号为 6007300,AIPC 件号 90004163 也已不再生产。

到此,根据维修性工程研究方法,确认了航材推荐清单 RSPL 的可靠性和实用性,并基于航线可

维修性原则,通过比对供应商 RSPL/CMM 文件,并向供应商与设计方沟通核对,最终明确了航线保障所需的航材件号,及时满足航材保障需求。

## 4 结论

近年来,民用航空产业迅速发展,已逐渐演变成民机产品和综合保障服务的双重竞争,因此,飞机厂商除了提供优质的产品之外,还必须为客户提供高效卓越的服务,这也是民机产业普遍的共识之一。维修工程和航材支援是民机综合保障服务的重要组成部分,完善的航材保障体系对航空公司的运营至关重要。本文基于工程实际应用,介绍了航材工程潜在航材集的制定和航材推荐清单的编制过程,并从民机航线可维修性的原则出发,以维修性工程方法验证了航材推荐清单的有效性和实用性,以满足航材保障要求。同时,经过维修工程对比验证,也发现了有很多环节需要细化和完善,以逐步提高航材工程研究水平。

(上接第 13 页)

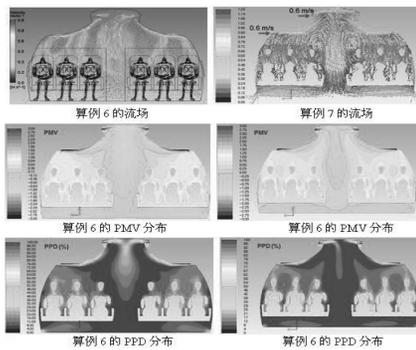


图4 算例6和7的第三排座椅位置处的流场、PMV及PPD分布

## 3 结论

通过对不同送风角度、不同送风速度以及不同的上下送风比例情况下客舱气流组织进行了数值仿真研究,通过对各算例结果中第三排座椅位置处温度场、流场、预期不满意百分率 PPD、预测平均反应 PMV、吹风感所引起的不满意率 DR 及其垂直温差导致的不满意率 PD 等进行了分析,结果表明:

- (1) 送风角度、送风速度及不同送风口送风比例对客舱热舒适性有较大影响,飞机设计时应考虑;
- (2) 对于送风角度,水平送风较为合理,该结论和波音公司、空客公司单通道飞机设计一致;

## 参考文献:

- [1]侯甲凯. 我国航材管理现状及发展趋势研究[J]. 现代商贸工业,2013,14:91-92.
- [2]刘巧云,苏茂根. 民用飞机修理级别分析方法研究[J]. 航空维修与工程,2014,1:87-89.
- [3]李纲. 维修工程——飞机安全的保证[J]. 中国民用航空,2008,12:64-67.
- [4]王文龙. 基于飞机客户需求的航材工程及产品研究[J]. 科技与企业,2012,15:316-319.
- [5]张琦. 现代航材供应系统的成本控制研究[D]. 西安:西北工业大学,2006.
- [6]常玉,同姗姗. 航材管理发展方向研究[J]. 航空制造技术,2012,9:87-89.
- [7]吕川. 维修性设计与验证[M]. 北京:国防工业出版社,2012.
- [8]左洪福. 航空维修工程学[M]. 北京:科学出版社,2011.
- [9]康锐. 可靠性、维修性、保障性工程基础[M]. 北京:国防工业出版社,2012.

(3)对于送风速度,下风口较大风速和上风口较低风速的热舒适性较好;

(4)对于送风量比例,由于上风口的风量带走的热负荷较少,上送风口风量少,下送风口风量多的热舒适性较好。

## 参考文献:

- [1]Fred A, Mathew J. W and Dipankar C. Numerical Analysis of Airflow in Aircraft Cabins[R]. SAE-911411.
- [2]T. Mizuno and M. J. Warfield. Development of Three-dimensional Thermal Airflow Analysis Computer Program and Verification Test[J]. ASHRAE Journal, 1992,98(2):329 - 338.
- [3]A. Singh, M. H. Hosni, and R. H. Horstman. Numerical Simulation of Airflow in an Aircraft Cabin Section[J]. ASHRAE Journal, 2002,108(1):1005 - 1013.
- [4]John D, Anderson, JR. Computational Fluid Dynamics The Basics with Applications[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.
- [5]http://www.ansys.com/Products/Simulation+Technology/Fluid+Dynamics/ANSYS+Fluent.
- [6]American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. ANSI/ASHRAE Standard 161 - 2007 Air Quality within Commercial Aircraft[S]. Atlanta; 2007.
- [7]American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. ANSI/ASHRAE Standard 55-2004 Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy[S]. Atlanta;2004.