

浅谈基于 IPDT 的 民用飞机重量控制技术

Overview of Civil Aircraft Weight Control Techniques Based on IPDT

张继斌 晨曦 章亮 宋传涛 / Zhang Jibin Chen Xi Zhang Liang Song Chuantao
(中航沈飞民用飞机有限责任公司, 沈阳 110013)
(AVIC SAC Commercial Aircraft Company Ltd., Shenyang 110013, China)

摘要:

在民机研制过程中,有效地实施重量控制对于项目的成功非常关键。飞机超重不仅会导致设计和运营成本的增加,也将无法实现既定的商载和航程等设计指标。从各部门与重量控制工作的联系出发,结合某型民用飞机的设计实践,介绍了产品联合研发团队(IPDT)模式下重量控制的工作内容、工作流程和常用的减重方法,为民机的重量控制工作提供借鉴和参考。

关键词:产品联合研发团队;重量控制;重量优化;减重

中图分类号:V221

文献标识码:A

[Abstract] The implementation of efficient weight control processes and techniques is critical to the success of an aircraft program. An overweight aircraft will increase its cost on design and operating, and it couldn't achieve its specified payload and range performance. Combined the practice of an aircraft program, weight group's responsibilities, weight control process and weight reduction considerations based on IPDT are introduced according to the relationship between weight control and other groups. It can provides references to civil aircraft project.

[Key words] Integrated Product Development Team(IPDT); weight control; weight optimization; weight reduction

0 引言

重量控制是飞机设计中最重要的工作之一。重量直接影响飞机的运营成本,同时对飞行安全、飞机性能、飞机构型以及飞机制造等方面都有重大影响。客户往往会把飞机的运营成本作为选择产品的重要依据。因此,在飞机项目研制过程中,应合理地设计和控制空机重量,在不降低客户各方面期望值的同时把危害重量的不利影响降到最低。一方面能够提高飞机商载的能力,另一方面也能降低运营成本,为客户带来经济效益,提高飞机竞争性。^[1]在国外,飞机研制普遍采用产品联合研发团队(Integrated Product Development Team,简称IPDT)模式。飞机研制的各专业组成项目团队,采用并行设计的工作模式,充分发挥各专业特长,在团队框

架内讨论并解决所有技术问题。本文针对IPDT团队实施重量控制的过程、工作内容以及减重方法进行简要介绍。

1 各部门与重量控制工作的联系

飞机研制是一个从飞机初步构想直至最终交付客户的持续性工作。飞机设计方案的形成是气动设计师、总体设计师、结构工程师和其他专业专家共同努力的结果。在重量控制方面,所有参与飞机项目的设计者都需要为“重量最小化设计”这一目标奋斗。只有飞机设计各专业共同努力才能实现成功的重量设计。图1展示了飞机研制各部门与重量控制工作的联系。

管理部门具有设定飞机项目各专业优先权的权利和责任,同时具有批准项目预算、控制飞机构型

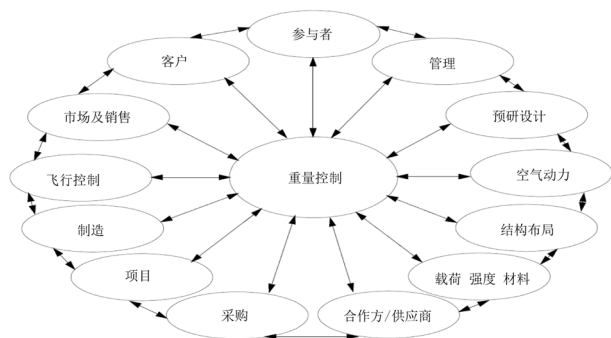


图1 飞机研制各部门与重量控制工作的联系

和确保飞机重量控制体系贯彻到项目的所有参与者的责任。预研设计部门可以通过前期的最优化设计、减少或杜绝可有可无的零件或功能以及采用新技术、新材料辅助重量控制。空气动力部门可以通过优化机翼、尾翼和操纵面的尺寸、减小气动裕度等来辅助重量控制。结构布局设计部门可以通过多种途径来辅助重量控制。例如避免或减少可有可无的结构、优化零件的设计和尺寸、减少结构连接的数量、广泛地应用减轻孔、尽可能地使用搭接来代替对接、减少零件数量、减小电缆及管路长度等措施。载荷、强度和材料部门一般通过使用轻的材料、减少涂层和密封胶的使用、缩小连接件的边距、减少零件数量、降低安全裕度等措施辅助重量控制。合作方/供应商通过执行其重量控制计划和减重计划、控制其合作方/供应商的重量以及在整个项目阶段优化其产品设计等来辅助重量控制。采购部门在采购飞机设备时要挑选有重量意识的供应商,对于交付超重产品的合作方和供应商要执行经济上的处罚。在没有得到重量工程师批准的前提下,不采购超重的产品或设备。项目部门通过在整个项目范围内执行重量控制程序来协助重量控制,他们要确保所有的图纸和相关文件都经重量部门评审,必要时需要重量部门签字批准。制造部门可以通过减小制造公差、避免涂料和密封剂的过度使用等来辅助重量控制。飞行控制部门可以通过对驾驶舱进行优化设计等来辅助重量控制。市场及销售部门通过提供清晰的客户要求、选用标准的飞机构型、减少客户的更改要求等来辅助重量控制。客户通过提供清晰的要求定义以及减少可有可无的一些功能要求等来帮助重量控制。

抛开各个专业,从根本上来说,是项目的每一个参与者在进行重量控制。所以要实现飞机项目的成功,不能忽视个人的力量,要保证团队中每个人都具有重量意识和团队意识,充分发挥个人的智

慧,为降低飞机的每一克重量献计献策。

2 重量部门的主要工作

重量部门是实施和管理重量控制的主要部门,重量控制成功与否依赖于管理部门对重量工作的管理和重视程度,重量工程师对其他工程师及管理部门的影响力决定了重量控制工作能否顺利开展。飞机的重量控制不是重量专业一个部门的工作,需要飞机研制的所有参与者对重量工作给予关注和支持。重量控制工作主要分为三个方面,即重量管理、重量控制和重量报告。

2.1 重量管理

重量管理主要是保证飞机的重量和重心符合合同或设计要求,包括对重量趋势的评估、确定需要执行的更改、必要时执行减重计划。另外,重量部门需要保证项目的所有参与部门遵从重量要求和目标,确保重量控制在时间以及空间上全面渗透到飞机研制的每个细节^[1]。

2.2 重量控制

重量控制的目的是让设计的产品及交付的飞机的重量和重心在规定的范围内,确保所有的零部件都经过优化并符合重量重心要求,使飞机能够达到有效装载指标,且装载在一定范围内可以灵活布置。飞机重量控制贯穿于前期论证到方案设计、详细设计、试制、试飞及营运的整个过程^[2]。目前飞机设计都是采用计算机辅助设计进行,所以重量工程师可以与结构、强度等设计员协同设计和分析,紧密跟随项目进展。通过了解设计要求、强度安全裕度、载荷和气动裕度、系统功能、设计过程、制造方法以及供应商选取过程等来进行重量的优化设计。重量工程师应熟知影响设计的因素如设计参数、环境条件、材料属性、设计约束、设计余量等。只有具备这些背景知识,重量工程师才能找出超重的根本原因,提出新的设计方法,并在飞机设计的整个阶段时刻引导其他设计员进行重量最优化设计。重量控制任务可以分为四个主要部分。

2.2.1 供应商控制

对供应商的控制主要目的在于使供应商最终提交符合重量要求的产品。包括提供给供应商的所有图纸和设备规范要注明目标重量,要求供应商制订重量控制计划,供应商需提供交付产品的重量符合性声明。在供应商的研制过程期间,要求供应商定期提供产品的重量状态报告,并对其产品进行重量优化检查,必要时要求其采取纠正措施。另外需要编制重量控制奖惩文件、在供应商合同中添加

重量方面的奖惩条款等。

2.2.2 构型控制

构型的控制主要体现在对各种更改的控制,这就要求所有的更改申请必须有重量部门的签字,如果更改涉及重量的变化,构型更改委员会需要定义重量控制的权重,在多个更改方案之间权衡时,应倾向于减重的方案。更改后的图纸发放前,同样需要经过重量部门签字。

2.2.3 设计控制

对于起飞总重 25t 级的民用飞机,空机重量每增加 1kg,则为保持飞机的起飞推重比及翼载荷不变,飞机的起飞总重将要增加 2.3kg~2.6kg^[2],研制成本以及后期的运营成本都要加大。这就需要设计进行严格的控制。首先要设定产品及零组件的目标重量,设计过程中监控设计的产品和零件是否重量最优化,必要时启动减重计划。其次要建立重量与成本的对应关系,定义产品每超重 1kg 的设计和运营成本,以便于管理部门权衡利弊,协调各专业实现最优化设计。在图纸发放阶段,重量部门要对所有零件进行审核,确保零件优化并符合重量要求。在某型飞机的设计过程中,由于工作包重量超重并且没有下降的趋势,重量部门启动了减重计划,邀请 IPDT 成员参加减重会议,征求他们的减重意见,所有设计员都可以将减重想法反馈给重量部门。重量部门挑选出合理的方案并跟踪实施,在各方的努力下,工作包重量最终达到了指标要求。

2.2.4 制造控制

制造公差对产品重量有很大影响,在产品设计时应尽可能地缩小制造公差。尽量拒绝使零件重量增加的制造偏离申请。制造部门需要执行零件的称重工作,应保证称重工作已经规划在制造进度计划之中。重量部门需要规定称重的程序和方法,规定对哪些件称重和由谁来执行称重。称重的每个部门都应该依照程序执行称重和报告工作。

2.3 重量报告

重量报告是重量部门基本工作任务之一。重量部门在飞机研制过程中要提供多种报告,包括重量状态报告、用于载荷计算的质量分布报告、重量符合性报告、重量与平衡手册等,为设计部门和管理部门提供重量状态信息,让整个 IPDT 团队及时了解重量状态和贯彻重量控制计划。其中重量状态报告最频繁也最重要,它展示了飞机(或其零部件)的当前重量和重心状态,相对于上一次报告的变化以及未来的发展预测。通过对数值变化的掌握,认真分析飞机重量变化的主要趋势,进而采取

有效的措施控制飞机的重量^[3]。重量状态报告从概念设计阶段就需要定期发放,随着设计的进展,报告的可信度级别也由初定状态向着估算、计算、直至称重状态过渡。

3 不同设计阶段的重量控制

在飞机研制过程的各个阶段,都需要进行严格的重量控制。不同的设计阶段决定了采用何种减重优化形式。

3.1 概念定义阶段

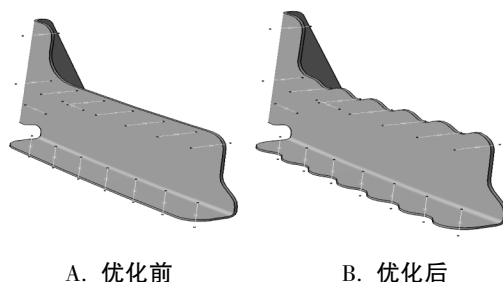
概念定义阶段是新飞机的设想阶段,在这个阶段要确定飞机的几何尺寸、布局和发动机推力以及飞行任务要求和飞行性能。设计初期是减重最有成效的时期,因为此阶段所做的重大更改对成本和进度的影响最小。通过重量的初步估算、有效功率和性能要求,确定新飞机的几何尺寸和总体布局的基本参数。在此阶段将进行大量的权衡研究,要尽最大可能进行减重,但不能盲目追求最小重量,要实现最优的重量设计概念。

3.2 初步定义阶段

在此阶段,减重将被限制到一些小的区域。出于对成本和进度的考虑,减重主要侧重于对结构界面影响最小的部位,如局部结构优化、改善载荷传递路径、采用轻的材料和采购件、设备布局优化、系统管路和电缆的合理布线等,例如通过缩小两个设备之间的距离来缩短设备间线缆的长度达到减重的目的。

3.3 详细定义阶段

到了详细定义阶段,减重的机会变得越来越少,但是仍然存在减重的可能。在此阶段结构设计可以采用组合零件的设计以去除或者减少连接,例如零件设计成带有凸缘的形式与另一个零件进行连接,可避免使用额外的角片,减少零件和紧固件。另外可以去除一些不能用来传递载荷的材料,图 2 为某型飞机普遍采用的剪切角片的重量优化。



A. 优化前 B. 优化后
图 2 剪切角片的重量优化

在设计初期很可能采用了重的但相对便宜的

零件或货架产品,但如果需要减重,就应考虑将这些零件替换成较轻的零件。

4 结构及结构件的重量优化

结构及结构件重量的控制和减重技术可以从许多方面进行考虑。

4.1 结构载荷和安全裕度

飞机的全部外载荷作用到内部结构上,由单个的结构件承担。结构件的几何形状、材料及所承受的载荷决定了它们的重量。结构件的几何尺寸会根据单一载荷情况或它所包含的零件的不同载荷工况来定义。最理想化的重量控制,是要求所有零件的安全裕度为零。重量控制就是要使得载荷和安全裕度的取值合理,这是与其他专业反复协调的过程。最终的安全裕度是设计效率的一个标志,也是重量控制工作成果的反映。

4.2 结构连接

结构件的连接占飞机重量的很大一部分,因此在这一领域应用减重和控制技术将会卓有成效。设计过程中通过减少零件的数量来减少连接的数量是减重设计的主要目标。例如采用复合材料共固化的设计就可以达到既减少零件数量又减少连接的目的。

4.3 连接形式

对接和搭接是两种主要的固定连接方式,如图3所示,搭接在减重方面更有效率。但对于高疲劳和高应力复合作用的区域,一般不采用搭接形式。双剪连接提供的传力路径是对称的,可降低应力集中。在设计时要根据受力情况,选用合理的连接方式。

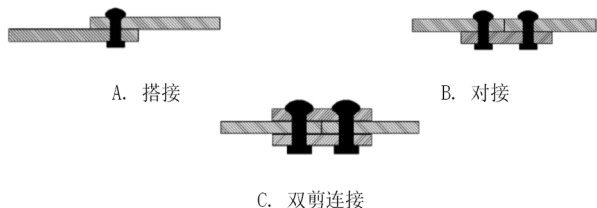


图3 连接类型

4.4 紧固件的选择

紧固件和标准件的选取对重量也会产生影响。在达到使用要求前提下,尽量使用更轻的紧固件和标准件。在某型飞机结构设计中,重量部门就针对地板的连接提出使用重量更轻的托板螺母,由于地板的连接需要2300多个托板螺母,采用了较轻的托板螺母后,地板安装总重量减少了4.5kg,不仅降低了结构重量,同时也降低了零件的采购成本。

凸头和埋头紧固件的应用最为广泛,如图4所示。因为埋头铆钉的埋头孔造成被连接件的连接强度降低,必须将被连接件的铆钉连接区域材料加厚来弥补,所以凸头类型紧固件具有更高的重量效率,设计时要正确的选用。

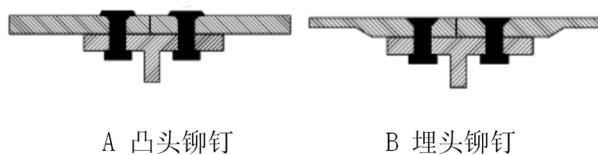


图4 两种类型紧固件连接

4.5 传力路径

传力路径是力在结构中传递的过程,严格意义上讲它是在传力过程中产生的主应力迹线。为了使飞机结构更加合理,传力路径是一个必须考虑的重要问题。最主要的原则是使结构传力保持力流连续性和传力路径最短。任何主应力迹线的偏离和加长将导致主结构增加大量的非优化重量。根据这一原则对结构进行布局优化,以此来减轻结构重量,获得较高的结构刚度和强度,提高结构效率^[4]。

4.6 门和开口

门和开口是飞机结构必须具有的,但是它使得传力路径中断,必须局部增强,这将对重量效率带来不利影响。通过减少门和开口的数量、尺寸以及合理布置门和开口的的位置等设计方法可以把结构开口带来的重量影响最小化。

4.7 复合材料

使用复合材料可以显著地节省重量,在低载荷和次级结构件上应该考虑采用复合材料,如整流罩和口盖等零件,因为这类零件可以制造得非常薄,形状也非常规则。但复合材料也有许多弱点,如抗冲击性能差、电导率差等,因此必须综合考虑。

4.8 其他优化方法

还有许多具体的减重方法,例如减小紧固件的孔边距、采用减轻孔设计、减小钣金件的弯曲半径、使用加强窝代替加强件、减少使用密封剂或使用低密度的密封剂等,需要在具体的设计中加以考虑。例如在某型飞机机身设计中,采用PR-1772无铬酸盐密封胶替换了PR-2001油箱密封胶,共减重5.8kg。

5 系统安装的重量优化

系统安装支架、托盘和托架大约占设备重量的25%甚至更高,所以对系统安装也要考虑重量优化。系统安装的设计原则包括:

(下转第85页)



图4 设计示例

2.3 设计流程

虚拟客舱系统的设计流程为:打开 Virtools 程序后进入设计界面,在设计界面进行模型库的导入,导入行李架、座椅、天花板和地板等等客舱内设备模型,接着对设计界面进行编辑形成和实际客舱一致的界面,继而进行系统的交互设计,达到漫游展示的效果并在交互设计阶段结合用户意见和设计者意见进行修改,最后结束设计流程。设计流程如图5所示。

3 结论

利用相关软件对民机客舱舒适度的实时仿真交互设计进行研究,在民机客舱舒适性设计中可节省人力和物力,并可快速了解、评估设计效果,是一个重要的民机舒适性设计研究方法,此研究方法对飞机的结构设计、系统设计等相关工作可起技术支持作用。

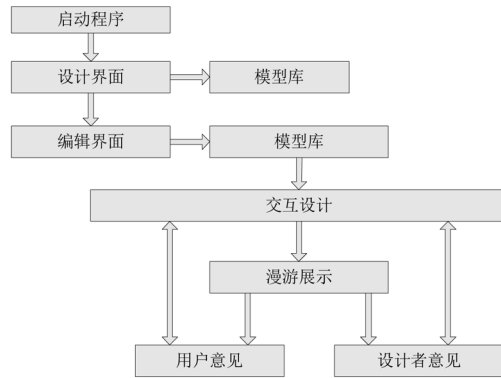


图5 设计流程

参考文献:

- [1] 余清杯, 苟秉寰, 李晓玲. 三维数字化定制设计技术[M]. 北京:北京理工大学出版社,2006.
- [2] ASHRAE ANSI/ASHRAE 55-1992; Thermal environmental conditions for human occupancy[Z]. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Inc. 1992.
- [3] 刘诏书, 肖佩, 李刚英. 基于网络汽车内饰交互设计的系统设计[J]. 汽车研究与开发, 2002, 5: 20-23.
- [4] Cui Q B. A Dynamic Model for Profitability Analysis of Construction Firms: Towards Complexity, Learning and Uncertainty [D]. West Lafayette: Purdue University, 2005.
- [5] 李晓玲, 陆长德, 李小丽. 基于网络的交互式虚拟展示技术研究[J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(3).

(上接第82页)

(1) 合理安排电子设备的位置, 实现一架多用并能减少检修口盖的数量;

(2) 合理安排系统设备的位置, 避免主载荷传递路径的中断;

(3) 使用较轻的材料和设计理念, 例如复合材料托架和蜂窝货架。

在飞机系统中广泛使用作动筒, 为舵面的运动、门的开关、起落架收放等提供机械动力。对于提供集中力的作动筒的安装, 要选择能最大限度发挥机械优势的位置和方法, 减少所需要的力, 从而减少作动筒的尺寸, 同时减少支撑结构的重量。

系统需要动力(电力、液压、气动等)才能工作, 动力分配系统由大量电缆、管路及导管组成, 因此, 除了合理选择材料和规格外, 还要考虑合理的布线。

6 结论

重量控制技术是一项综合性的技术, 涉及到

飞机设计和制造等多个方面, 为了能够有效地实施重量控制, 不仅要求重量工程师有较高的专业知识和能力, 还需要 IPDT 团队良好的协作。因为重量控制不是重量专业一个部门的工作, 需要项目中每一位参与者都把重量意识贯彻到自己的工作中, 把“重量最小化设计”作为共同的奋斗目标。

参考文献:

- [1] 杨苏敏. 浅谈民用飞机的重量控制管理[J]. 科技创新导报, 2012, 2: 51-54.
- [2] 沈可正. 民用飞机的重量设计[J]. 民用飞机设计与研究, 2001, 4: 19-22.
- [3] 晨曦, 宋传涛. 关于民用飞机重量设计的相关探讨[J]. 科协论坛, 2012, 4(下): 34-35.
- [4] 陈磊. 基于传力路径的结构布局优化方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.