民用飞机驾驶舱构型快速设计方法

冯昊成 罗明强 刘 虎 武 哲

(北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100191)

摘 要: 为在方案设计阶段提高民用飞机总体方案的设计质量和形成效率,研究了民用飞机驾驶舱构型的设计措施,并在一个开放式的飞机总体设计环境中实现了这一功能. 定义了飞机机身坐标系,研究了确定驾驶员设计眼位、驾驶舱布置和风挡参数化设计与模型构建的方法. 建立了交互式民机驾驶舱构型二、三维快速设计环境. 在此基础上,实现了驾驶舱模型的自动化调整,为总体设计阶段进行多学科设计优化奠定了基础. 通过设计实例证明了该方法的有效性.

关 键 词: 飞机设计; 驾驶舱布置; 风挡设计; 参数化造型; 自动化调整

中图分类号: V 221

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2012)03-0285-06

Rapid cockpit configuration design method research

Feng Haocheng Luo Mingqiang Liu Hu Wu Zhe

(School of Aeronautic Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: In order to improve the efficiency of civil airplane design in conceptual design phase, the design method of civil airplane's cockpit was studied. The functionality was achieved in an open aircraft conceptual/preliminary design system. The coordinate of fuselage was defined. The method of defining eye design position of cockpit was studied. The method of cockpit layout and the parametric design and modeling method of windshield was presented. Based on these methods an interactive rapid design environment of civil airplane's cockpit was constructed. Automatic adjustment for the cockpit was implemented, which was the basis for multidisciplinary design optimization in conceptual design phase. A design instance is given to illustrate the effectiveness of the methods.

Key words: aircraft design; cockpit layout; windshield design; parametric modeling; automated adjustment

总体设计是飞机研发过程中一个非常重要的阶段,尽管占整个飞机研制过程的时间相对较短且费用较少,但在总体设计阶段需要做出大部分对飞机设计工作具有全局性影响的重大决策,并且决定一种飞机约 80% 的全寿命周期成本[1-2]. 驾驶舱是民用飞机飞行控制的人机交互节点[3]. 与许多人机界面的设计一样,飞机驾驶舱设计是一个复杂的设计过程[4],在方案阶段即需要考虑诸多的设计要素. 驾驶舱设计不合理会直接影响飞行员的操作舒适性,引起疲劳和误操作,对飞机驾驶的安全性和飞行员的身体健康非常不利[5]. 因此有必要在设计前期对驾驶舱设计进行尽可能全面的考虑,建立相关辅助设计手段,为后续的驾驶舱详细设计奠定基础.

受飞机设计的数字化、信息化需求驱动,国内外针对计算机辅助飞机概念设计方法与支持手段开展了大量的研究,并产生了若干计算机辅助飞机概念设计系统[6-11],但在这些手段和系统中尚

收稿日期: 2011-02-14; **网络出版时间**: 2012-03-09 10:36

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20120309.1036.001.html

基金项目: 工业和信息化部"民用飞机总体设计支撑软件"基金资助项目

作者简介: 冯昊成(1986 -),男,北京人,博士生,feng_slamdunk@163.com.

缺乏专门针对驾驶舱的设计模块,不能完成驾驶舱构型设计和几何建模工作,所以急需建立相关的计算机辅助支撑手段以降低设计人员的设计难度,进一步提高飞机总体设计质量和效率. 本文针对民机驾驶舱构型的参数化描述和建模、驾驶舱交互式设计环境的开发与实现和驾驶舱设计方案的自动化调整等问题开展了研究,并以北京航空航天大学自主研发的开放式飞机总体设计系统 OpenCADS(Open Conceptual Aircraft Design System)[12] 为基础,提出了民机驾驶舱构型参数化设计和自动化调整方法,进行了系统实现,建立了民机驾驶舱交互式设计环境并完成了驾驶舱设计实例.

1 驾驶舱构型参数化描述及建模

在方案设计阶段,民机驾驶舱构型设计工作的重点是确定驾驶员设计眼位、布置主要部件和风挡构型设计[13]. 下面将从参数化描述、设计方法和几何建模等方面针对各项设计工作进行说明.

1.1 坐标系定义

机身及驾驶舱相关部分的坐标系 $Oxyz$ 定义如图 1 所示,通常情况下将机头最前点设置为坐标原点. Ox 轴沿机身纵向设置,Oy 轴与 Ox 轴垂直沿机翼展向设置,Oz 轴与 Ox、Oy 轴垂直,沿右手坐标系方向设置.

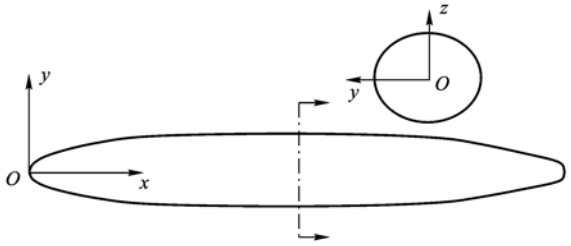


图 1 机身坐标系定义

1.2 驾驶员设计眼位参数确定方法

驾驶员眼位是驾驶员中心线的眼睛位置. 在设计时作为设计人员在驾驶舱内标定的一个特征点,驾驶员眼位是确定外部视界、座椅位置和驾驶舱内部布置的基准和出发点,是方案阶段最重要的设计参数. 在本文所实现的民机驾驶舱交互式设计环境中采用基于标准人的统计方法[3] 给出设计眼位点 $E(x_e, y_e, z_e)$ 的设计参考推荐值,在系统的飞行员标准人体模型库中选择设计所需的标准人即可得到相应的眼位点推荐值,系统中采用的设计计算方法如下:

1) 设计眼位高 z_e 的基准"0"位为驾驶舱地板的上表面. 设计眼位高的计算公式为

$$z_e = H_{50\%} p_e - H_{1g} \tag{1}$$

式中,z_e 表示设计眼位高;$H_{50\%}$ 表示 50% 标准人身高;p_e 表示正坐眼位高与人体高的百分比数;H_{1g} 表示标准人体重统计值在 $1g$ 飞行时的下沉量. 在系统的标准人体库中选择中国人中等身材标准人得到的推荐眼位高尺寸为 1 230 mm.

2) 设计眼位横坐标 Y_e 根据中国人中等身材标准人统计值给出的推荐尺寸为 ± 507. 5 ~ ±533. 4;设计眼位纵向坐标 X_e 综合考虑驾驶舱设备的可达性由设计人员在系统中交互式输入确定.

1.3 驾驶舱参数化布置及几何构建

驾驶舱布置的主要设计任务是以驾驶员设计眼位为中心进行驾驶员布置、座椅布置、仪表板等其他驾驶舱主要设备布置、驾驶舱地板布置和驾驶舱舱段隔板布置. 以下针对各个项目的参数化描述与几何构建方法分别进行说明.

1) 驾驶员参数化布置. 驾驶员布置设计作为座椅布置、设备布置的空间约束和人机工效验证的中心节点对后续的驾驶舱设计评估具有重要作用. 驾驶员布置的参数化描述包括:①驾驶员数量;②驾驶员的几何模型信息和属性信息;③驾驶员人体姿势;④驾驶员布置空间定位点坐标. 驾驶员布置设计方法是将 50% 人体尺寸的坐姿标准人模型以中心线的眼睛位置为参考点布置在设计眼位点上. 在后续的座椅布置和设备布置中有时还需要使用 5% ~95% 人体尺寸范围中的标准人进行验证布置. 在本研究所实现的民机驾驶舱交互式设计环境中,参照 GJB4856—2003[14] 建立了中国运输机飞行员标准人体三维模型库. 这样,通过从库中选择所需的标准人和配置设计眼位点即可在系统中自动化地完成驾驶员布置.

2) 座椅参数化布置. 座椅布置以设计眼位和驾驶员布置为前提,目标是保证 95% 范围内统计尺寸的人的眼位都能调节到设计眼位上,同时满足可达性要求. 座椅布置的参数化描述包括:①座椅数量;②各座椅布置定位点坐标;③座椅的几何模型信息和属性信息. 在民机驾驶舱交互式设计环境中设计者可以以设计眼位和驾驶员布置为约束,交互式完成驾驶舱座椅的参数化布置. 座椅的几何模型可以从外部导入,也可以通过系统的座椅数据库选用已有成品座椅几何模型.

3) 其他驾驶舱主要设备参数化布置. 其他驾驶舱主要设备包括主仪表板,驾驶员中央仪表板,

飞行导引、通信、导航、显示选择控制板,顶板,操纵器件和其他显示装置等. 单个驾驶舱设备布置的参数化描述包括:①设备编号和设备类型;②设备布置定位点坐标;③设备的几何模型和属性信息. 类似座椅布置,系统中允许设计者交互式地布置各种驾驶舱主要设备,布置设计的目标是满足标准人的内部视界和可达性要求.

4) 驾驶舱地板参数化布置. 驾驶舱地板的参数化描述包括:①驾驶舱地板起点相对站位 l_q 和终点相对站位 l_z;②驾驶舱地板厚度 H;③地板上表面 z 向坐标 z_s. 通过定义 l_q 和 l_z,系统可以计算得到地板的实际站位,并根据机头曲面外形计算得出地板平面与机头曲面的相交曲线. 再通过 H 和 z_s,沿 z 向进行拉伸即可完成驾驶舱地板实体模型的几何构建.

5) 驾驶舱舱段隔板参数化布置. 驾驶舱和客舱舱段通过驾驶舱舱段隔板进行分割,隔板的参数化描述包括:①隔板起点相对站位;②相对宽度;③隔板厚度等. 在建模方面隔板以机头曲面为约束且采用拉伸方法构建模型. 当隔板沿翼展方向超出机头曲面范围,多余部分将自动进行布尔减运算,同样,隔板上部将完全与机头曲面自动贴合. 为保证几何合理性,系统自动将驾驶舱舱段隔板下表面和驾驶舱地板上表面进行贴合.

1.4　风挡构型参数化设计及建模

在方案阶段风挡设计的任务是根据标准视界图的视界要求设计出满足多种飞行状态下最小视界要求的风挡合理构型.

在确定了设计眼位点后即可根据外部视界要求开展风挡构型设计. 外部视界要求来自于以多个数据点方式定义在一个以左右和上下视界角度组成的二维坐标系上的标准视界图,典型的如 FAR-25 标准视界图以及美国机动车工程师协会(SAE)所推荐的视界图标准 AS580[13],其中 AS580 为现代民机一般遵循的视界标准.

现代民机风挡一般由 4 块或 6 块风挡玻璃组成. 确定标准视界图后,通过在视界图上绘制涵盖最小视界要求的风挡玻璃外形视界曲线的方法进行风挡构型设计. 这样通过设计眼位点和风挡视界曲线即可确定机头外形曲面上的风挡三维外形曲线,进而完成风挡玻璃的三维几何造型.

为加快方案阶段的风挡设计与评估效率,在本研究中采用以下风挡参数化描述与造型方法:①单块风挡玻璃在视界图上的描述为若干不在一条直线上的二维型值点所确定的直线段和曲线段组成的一封闭二维图形,其中曲线段采用三次参数样条进行拟合,如图 2 所示,直线段 P_1-P_2、曲线段 P_2-P_3-P_4-P_5 和直线段 P_5-P_6 及其他直线和曲线段首尾相连组成单块风挡玻璃的封闭二维图形;②风挡玻璃三维几何外形为曲面,与机头曲面贴合并保持连续. 以上处理对于方案阶段是合理的,后续风挡详细设计可以在方案模型的基础上进行细化设计.

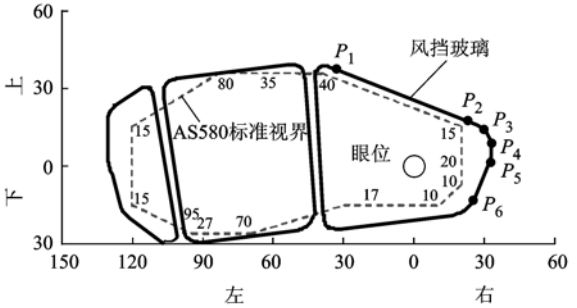


图 2　风挡外形在视界图上的参数化描述方式(°)

基于以上简化处理,风挡构型的描述参数包括:①所遵循的标准视界图;②风挡玻璃数量;③每块风挡玻璃的二维视界图图形. 这样借助于设计眼位点、机头曲面外形和以上风挡构型参数即可完整且唯一地确定风挡外形. 在本文所实现的民机驾驶舱交互式设计环境中风挡构型的设计流程如图 3 所示.

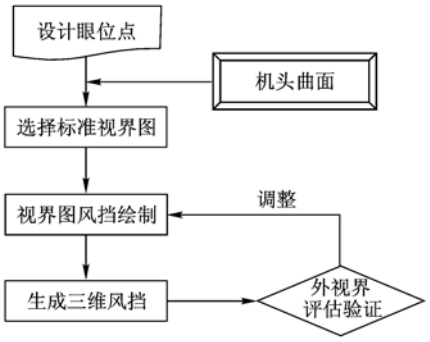


图 3　风挡构型的设计流程

风挡的三维造型方法如下:

1) 确定视界图风挡二维图形型值点在机头曲面上所对应的三维坐标位置. 通过设计眼位点 E 和某块风挡玻璃的视界图二维图形型值点序列 $P_{2D}\{P_1,P_2,\cdots,P_n\}$ 可确定 N 条以设计眼位点 E 为起点的三维空间射线 EP'_1, EP'_2,…, EP'_n. 其中第 M 个视界描述点 P_m 在视界图上的角度坐标为 $P_m(\alpha_m,\beta_m)$,设计眼位点的空间坐标为 $E(x_e,y_e,z_e)$,则在 1.1 节定义的坐标系下第 M 条空间射线 EP'_m 的空间位置如图 4 所示,其空间描述方程为

$$y-y_e=-\tan\alpha_m(x-x_e) \tag{2}$$

$$z-z_e=-\tan\beta_m(x-x_e) \tag{3}$$

用这 M 条射线与机头曲面求交即可得到风

挡二维图形型值点在机头曲面上对应的三维坐标点序列 $P_{3D}\{P'_1,P'_2,\cdots,P'_n\}$.

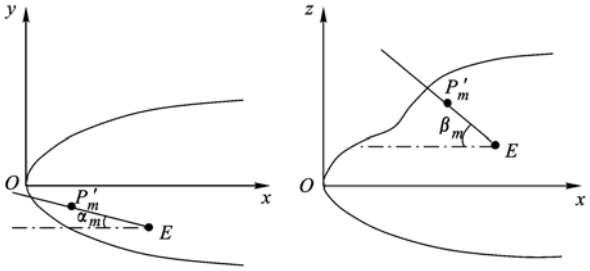


图 4 根据视界描述点确定风挡造型辅助射线

2）根据风挡型值点的三维坐标位置确定风挡二维视界图图形在机头曲面上所对应的三维曲线. 其中风挡二维视界图图形中直线段在机头曲面上所对应的三维曲线段的造型方法如下：设二维直线段两端点所对应的三维坐标为 P'_l 和 P'_{l+1}，以 P'_l、P'_{l+1} 和设计眼位点 E 确定的平面与机头曲面求交，求得的以 P'_l 和 P'_{l+1} 为端点的曲线段 P'_l-P'_{l+1} 即为风挡二维视界图中直线段所对应在机头曲面上的三维风挡轮廓曲线段，如图 5 所示.

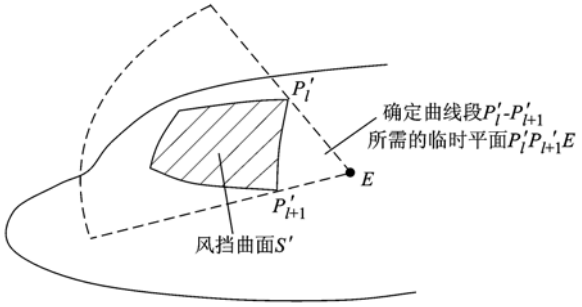


图 5 视界图风挡二维直线段的三维造型方法

而风挡二维视界图图形中曲线段的三维造型采用如下处理办法，二维曲线段型值点所对应的三维坐标为 3 个或 3 个以上不在一个平面上的三维点序列 $P_{3Dh}\{P'_h,P'_{h+1},\cdots,P'_{h+n}\}$，采用最小二乘原理构造一个通过三维点序列 P_{3Dh} 中某 3 个点且与 P_{3Dh} 中其余各三维点距离平方和最小的临时平面 F，即平面 F 由 P'_i、P'_j 和 P'_k（$h\ll i,j,k\ll h+n$）确定，设 P_{3Dh} 中某点 P'_m 到 F 的距离为 e_m，则有

$$\sum_{\substack{m=h\\ m\neq i,j,k}}^{h+n} e_m^2 = \min \tag{4}$$

确定临时平面 F 后，将三维点序列 P_{3Dh} 中的所有点投影到平面 F 上形成新的二维点序列 $P_{2Dh}\{P''_h,P''_{h+1},\cdots,P''_{h+n}\}$，按三次参数样条拟合此二维点序列形成一条二维平面曲线 C_{2Dh}. 将 C_{2Dh} 沿平面 F 的法线方向向机头曲面进行投影，投影的结果即为风挡二维视界图中曲线段所对应在机头曲面上的三维风挡轮廓曲线段 C_{3Dh}，如图 6 所示.

通过以上参数化设计方法可确定一块风挡玻璃在机头曲面上的各段三维轮廓曲线段，将各段三维曲线按各端点首尾相连进行结合即可确定风挡二维视界图图形在机头曲面上所对应的三维曲线轮廓 C_{3Dn}.

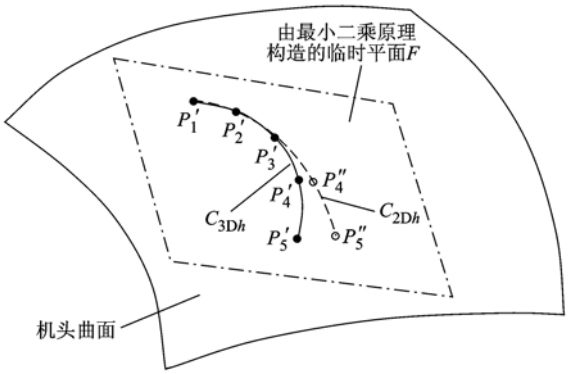


图 6 视界图风挡二维曲线段的三维造型方法

3）根据风挡玻璃三维轮廓曲线和机头曲面进行三维风挡造型. 在参数化造型方面，生成风挡模型的相关建模逻辑如图 7 所示. F_{org} 为机头曲面外形，CUT 是 yz 平面内风挡三维轮廓线 C_{3Dn} 的二维投影形状沿 x 向拉伸所生成的几何实体，通过二者进行求交可获得风挡几何曲面模型 F_{win}，作布尔减运算可获得具有开口的机头曲面模型 F_{cut}，组合 F_{cut} 和 F_{win} 即可完成单块风挡模型的构建. 由于风挡玻璃沿 Oxz 平面是左右对称的，所以按以上参数化建模方法完成一侧所有的风挡模型构建后，以 Oxz 平面为对称面进行镜像即可完成全部风挡的参数化建模.

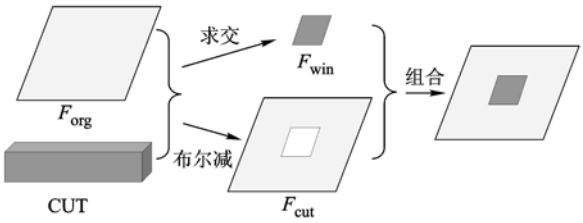


图 7 风挡三维模型构建逻辑

基于以上造型方法，在本文所实现的民机驾驶舱交互式设计环境中可以完成视界图风挡设计到三维风挡造型的双向参数化调整. 一方面调整视界图上的风挡外形二维图形可以改变风挡的三维模型；同时改变风挡三维外形空间曲线的任何型值点，在引起风挡三维模型变化的同时，在视界图上的风挡二维图形也将发生相应改变.

2 驾驶舱交互式设计环境

基于以上所讨论的驾驶舱构型参数化描述和几何造型方法，在开放式飞机总体设计系统

OpenCADS 中实现了交互式驾驶舱快速设计环境,从而使设计人员进行快速参数化地驾驶舱设计与建模成为可能,提高了方案设计阶段驾驶舱设计的质量与效率. 图 8 为所实现的交互式二维、三维驾驶舱快速设计环境.

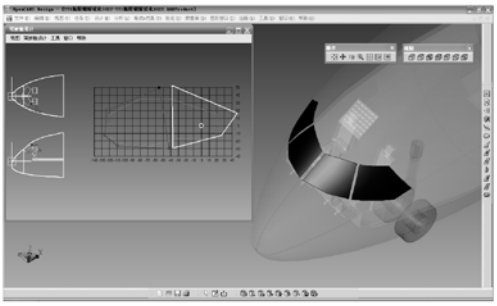


图 8　交互式二维和三维驾驶舱快速设计环境

在交互式驾驶舱设计环境中完成一个驾驶舱方案设计的完整步骤如下:①确定设计眼位点;②进行驾驶员布置、座椅布置和驾驶舱设备布置;③进行风挡构型设计;④进行视界和可达性工效评估;⑤根据评估结果调整设计. 其中视界和可达性工效评估可以通过 OpenCADS 的几何模型导出接口在其他包含人机工效评估模块的软件,如 CATIA、DELMIA 中完成. 图 9 给出了在交互式驾驶舱设计环境中开展驾驶舱方案设计的流程与逻辑.

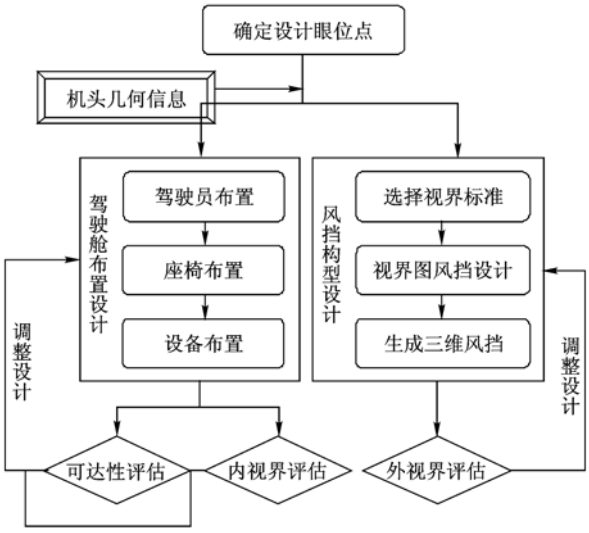


图 9　交互式驾驶舱设计环境中的方案设计流程

3　驾驶舱设计方案的自动化调整

本文所实现的民机驾驶舱交互式设计环境将驾驶舱各个部分相关参数进行了自动化关联,使得修改了驾驶舱某个部分后,其他相关部件可以自动化地进行调整,从而提高了设计效率,减少了模型调整工作量. 为了完成驾驶舱的自动化调整,本研究中采用了相对参数定义的方法. 基准部件的描述参数为 $Q\{Q_1,Q_2,\cdots,Q_i\}$,参数 $Q_1 \sim Q_i$ 为关联部件参数描述的基础项. 关联部件相对描述参数为 $P\{P_1,P_2,\cdots,P_i\}$,其中 $P_1 \sim P_i$ 为关联部件相对描述参数,则关联部件实际描述参数为 $Q_P\{QP_1,QP_2,\cdots,QP_i\}$,此处 QP_i 表示 Q_i 与 P_i 之前的某种参数运算关系. 在部件定义时采用相对描述参数 P,这样在方案调整过程中,当参数 Q 或参数 P 发生变化时,实际模型参数 Q_P 都将会进行自动调整. 图 10 给出了客舱主要部件参数关联关系及自动化调整逻辑.

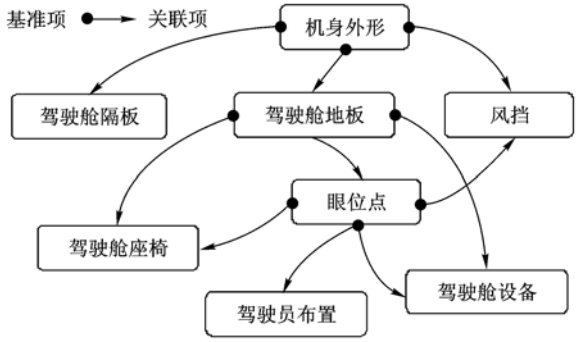


图 10　驾驶舱方案参数自动化调整逻辑

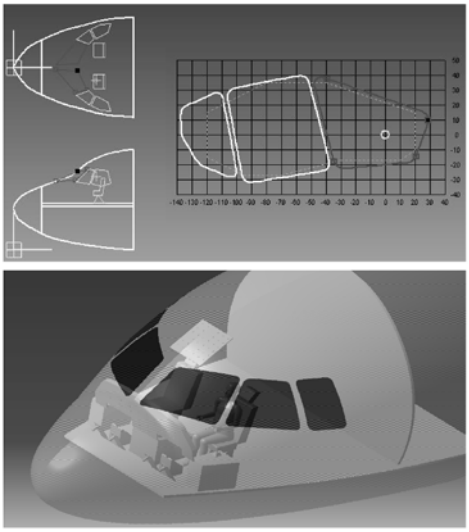
同一个驾驶舱部件可能会接收多个其他部件参数的修改信息,也可能同时向多个部件发出调整信息. 典型的如驾驶舱地板,机头曲面外形的修改将会改变地板俯视轮廓,从而引起地板三维模型的更新. 同时地板的参数变化也将使驾驶舱座椅、驾驶舱舱段隔板和设计眼位点等与之在逻辑上相连接的部件发生参数调整,而设计眼位点的改变又将引起风挡外形和驾驶员布置位置等一系列自动化调整.

4　设计实例

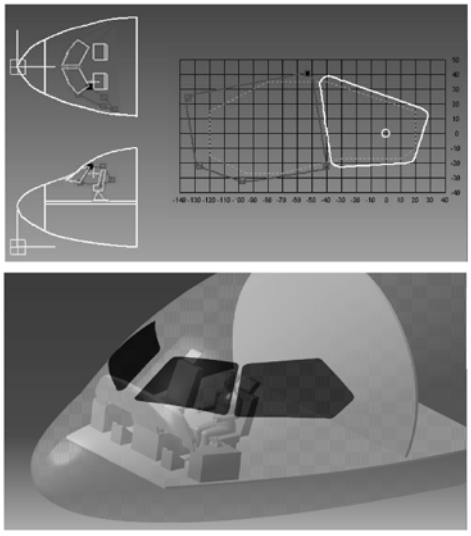
为说明本文方法的有效性,给出了基于系统所实现的某民用飞机驾驶舱设计实例. 针对相同的驾驶舱设计要求以同一个机头曲面外型为约束通过系统完成了某民用飞机两种驾驶舱构型的参数化设计方案,两种设计方案分别采用 4 块和 6 块风挡玻璃. 基于系统完成了两种设计方案的驾驶员、座椅、驾驶舱地板、驾驶舱舱段隔板和驾驶舱设备的参数化布置设计,以及基于标准视界图的风挡构型参数化设计. 图 11 为在民机驾驶舱交互式设计环境中完成的示例飞机两种设计方案的驾驶舱二维布置设计及生成的三维模型.

以设计方案为基础,通过 OpenCADS 的模型导出接口导出了 CATProduct 格式模型,在 CATIA 中进行了示例飞机的视界模拟和可达性验证等人机工效评估. 评估结果证明两种设计方案均能满

足驾驶员视界和可达性要求,方案是合理可行的. 图 12、图 13 分别为 6 块风挡玻璃方案的驾驶员外视界模拟结果和驾驶员可达性验证结果.



a 6 块风挡玻璃方案



b 4 块风挡玻璃方案

图 11 在驾驶舱交互式设计环境中完成的设计实例

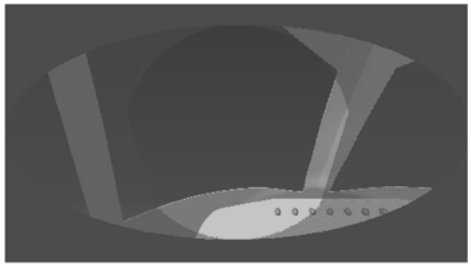


图 12 6 块风挡玻璃方案驾驶员外视界模拟结果

通过以上设计实例可见,通过本文所提出的参数化民用飞机驾驶舱构型设计方法和实现的设计系统与传统设计方法相比较,可以在方案设计阶段短时间内更快速地进行多个方案的参数化设计、模型构建与评估,有效地提高方案设计阶段的驾驶舱设计效率,减轻设计人员的设计负担.

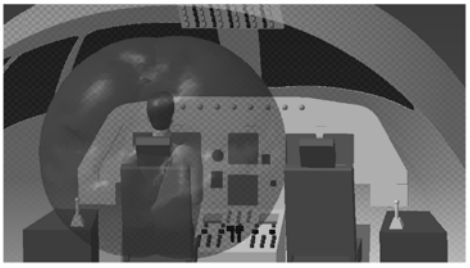


图 13 6 块风挡玻璃方案驾驶员可达性验证结果

5 结 束 语

对民用飞机驾驶舱参数化快速设计进行了研究. 讨论了确定驾驶舱设计眼位点的方法,阐述了驾驶舱布置和风挡构型的参数化描述、设计理论和建模方法. 以开放式飞机总体设计系统 OpenCADS 为基础建立了交互式驾驶舱快速设计环境,实现了基于参数的驾驶舱方案自动化调整. 提高了民用飞机方案阶段驾驶舱设计的质量和效率,也为后续的驾驶舱详细设计奠定了基础. 通过设计实例验证了方法的有效性.

参考文献 (References)

[1] 顾诵芬. 飞机总体设计[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2001
Gu Songfen. Aircraft conceptual/preliminary design[M]. Beijing:Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2001(in Chinese)

[2] Manning V M. Large-scale design of supersonic aircraft via collaborative optimization[D]. Department of Aeronautics and Astronautics, Stanford University, 1999

[3] 《飞机设计手册》总编委会. 飞机设计手册:第 5 册[M]. 北京:航空工业出版社,2005:347 - 367
Editorial Board of Aircraft Design Manual. Aircraft design manual:book 5[M]. Beijing:Aviation Industry Press,2005:347 - 367 (in Chinese)

[4] 李银霞,王黎静,袁修干. 飞机驾驶舱工效评价技术研究[C]// 第七届全国环境控制学术交流会议论文集. 北京:中国航空学会,2002:245 - 249
Li Yinxia, Wang Lijing, Yuan Xiugan. Research of cockpit ergonomics assessment techniques[C]//Conference Proceedings of 7th National Symposium on Environmental Control. Beijing: Aviation Institute of China,2002:245 - 249(in Chinese)

[5] 苏润娥,薛红军,宋笔锋. 基于虚拟设计的民机驾驶舱工效布局评价[J]. 航空计算技术,2008,38(2):69 - 73
Su Rune, Xue Hongjun, Song Bifeng. Ergonomic evaluation of airplane's cockpit layout based on virtual design[J]. Aeronautical Computing Technique,2008,38(2):69 - 73(in Chinese)

[6] Leifsson L T. Multidisciplinary design optimization of low-noise transport aircraft[D]. Virginia: Department of Aerospace and Ocean Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University,2006

(下转第 296 页)

3 结 论

本文提出的降雨情况下的自适应信道分配算法根据不同的降雨情况,采用调整信道带宽补偿比例,动态的为业务分配信道,并采用给话音业务预留信道的方法,保证了语音业务的切换失败率和新呼叫阻塞率. 该算法以新呼叫阻塞率为代价,在保证误码率达到系统要求的同时,又保证了信道中有用信息的传输量,并且满足系统对切换失败率的要求. 本文对该算法进行了详细的理论推导和分析,以铱星系统为背景建立仿真系统,理论分析与仿真结果得到了相互验证. 该算法为低轨卫星系统中多种衰减环境下的信道分配算法研究提供了参考,并且为接下来对雨衰下信道带宽补偿比例的研究奠定了基础.

参考文献(References)

[1] Cakaj S. Rain attenuation impact on performance of satellite ground stations for low earth orbiting (LEO) satellites in Europe [J]. International Journal of Communications, Networks and System Sciences, 2009, 2(6): 480 – 485

[2] Nakazawa S. A method to transform rainfall rate to rain attenuation and its application to 21 GHz band satellite broadcasting [J]. IEICE Transactions on Communications, 2008, E91-B(6): 1806 – 1181

[3] Ronga L S. Resource allocation mechanisms in satellite cooperative systems [C]//5th Advanced Satellite Multimedia Systems Conference and the 11th Signal Processing for Space Communications Workshop. Cagliari, Italy: IEEE, 2010: 301 – 308

[4] Dong Qijia. Channel management realization in MF-TDMA satellite systems[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2009, 31(10): 2378 – 2384

[5] Panagopoulos A D, Arapoglou P D M, Cottis P G. Satellite communications at KU, KA, and V bands: propagation impairments and mitigation techniques [J]. IEEE Surv & Tut, 2004, 6(3): 2 – 14

[6] Yu Jia, Zong Peng. The analysis and simulation of communication network in Iridium system based on OPNET[C]//The 2nd IEEE International Conference on Information Management and Engineering. Chengdu: IEEE Computer Society, 2010: 68 – 72

[7] Panagopoulos A D. On the rain attenuation dynamics: spatial-temporal analysis of rainfall rate and fade duration statistics [J]. Int J Sat Commun Netw, 2003, 21(6): 595 – 611

[8] Michelson D G. Simulation of rain fading and scintillation on Ka-band earth-LEO satellite links[C]//Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. Canada: IEEE, 2009: 635 – 640

(编 辑:张 嵘)

(上接第 290 页)

[7] Wagner T, Valasek J. Comparison of computational methods for stability and control analysis[R]. AIAA Paper 2005-140, 2005

[8] Fidanci M, Miller J R, Strauss D J. Integrating automated multidisciplinary optimization in preliminary design of non-traditional aircraft[R]. ADA380252, 2000

[9] Roskam J, Anemaat W A. General aviation aircraft design methodology in a PC environment[R]. AIAA Paper 96-5520, 1996

[10] 刘虎. 飞机概念设计支持理论与原型系统研究[D]. 北京:北京航空航天大学航空科学与工程学院, 2004
Liu Hu. Research on support theory and prototype system for air-craft conceptual design[D]. Beijing: School of Aeronautic Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2004(in Chinese)

[11] Raymer D P. Aircraft design: a conceptual approach[M]. 3rd ed. Reston: AIAA Inc, 1999

[12] 罗明强, 刘虎, 武哲. 开放式飞机总体设计环境的原型研究[J]. 航空学报, 2008, 29(4): 954 – 959
Luo Mingqiang, Liu Hu, Wu Zhe. Prototype system research on open conceptual aircraft design[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2008, 29(4): 954 – 959(in Chinese)

[13] 《飞机设计手册》总编委会. 飞机设计手册:第 7 册[M]. 北京:航空工业出版社, 2005: 32 – 40
Editorial Board of Aircraft Design Manual. Aircraft design manual: book 7[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2005: 32 – 40 (in Chinese)

[14] GJB4856—2003 中国男性飞行员人体尺寸[S]
GJB4856—2003 Body size of Chinese male pilot[S](in Chinese)

(编 辑:李 晶)