2010年 11月 北京航空航天大学学报 November 2010
第36卷 第11期 Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics Vol. 36 No. 11

飞机设计选材专家系统的开发

蓝元沛 焦起祥 关志东 许广兴

(北京航空航天大学 航空科学与工程学院，北京 100191) (中航工业沈阳飞机设计研究所 结构部材料应用室，沈阳 110035)

摘 要：在对飞机设计选材工作进行分析的基础上，提出基于浏览器/服务器(B/S，Browser/Service)结构的飞机设计选材专家系统总体框架和系统各功能的实现方式，并开发了系统的原型.该系统将基于规则、案例和模型的选材方法结合在一起，通过一个通用的推理机实现推理.该推理机功能通过CLIPS(C Language Integrated Production System)专家系统开发工具实现.该系统主要有3个工作步骤：选材的定性推理，材料检索和材料综合性能排序.用户可以方便地使用浏览器对系统进行访问和操作.该系统飞机机翼大梁选材实例验证了该系统的有效性，可对飞机设计人员的选材工作起指导作用.

关 键 词：飞机结构；飞机结构材料；专家系统

中图分类号：V 25

文献标识码：A **文 章 编 号**：1001-5965(2010)11-1358-07

Development of aircraft-design material-selection expert system

Lan Yuanpei Jiao Qixiang Guan Zhidong

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

Xu Guangxing

(Material Application Office, Structure Department, AVIC Shenyang Aircraft Design Institute, Shenyang 110035, China)

Abstract: Following a discussion on aircraft-design material-selection, a browser/service architecture framework of materials selection expert system, together with its implementation and prototype, was put forward. The system integrated rule-based reasoning, case-based reasoning and model-based method, and it could reason with a general inference engine. The inference engine's function was implemented by a popular expert system development tool—C language integrated production system (CLIPS). When this system functioned, it worked in these three steps: reasoning for qualitative selection results, searching materials from material database and ranking the materials to obtain a selection result. User could access the system with browsers conveniently. Its effectiveness was demonstrated by a case of wing-spar materials-selection.

Key words: airframes; aircraft materials; expert system

工程结构的性能最终要体现在结构所选用材料的性能上.近十几年来，机械设计的材料/工艺选择计算机辅助方法逐渐成为研究热点.随着研究的深入，根据这些方法开发的材料/工艺选择工具也由原先的演示性工具逐渐演变为满足设计人员需求的材料/工艺选择系统[1].这些选材方法主要包括：①基于专家系统理论的选材方法，有基于案例推理[2]、基于知识(规则)的选材系统[3]以及基于神经网络和遗传算法的选材方法[4].这类选材方法建立在专家经验和以往成功选材案例的基础上，是定性的选材方法，往往有多个选材结果[5]；②基于多准则决策(MCDM，Multiple Criteria Decision Making)理论的选材方法，主要有简单加权法[6-9]、TOPSIS法[10-12]、ELECTRE法[12-14]、VIKOR方法[14]、图论法[15]、基于层次分析法的综合选材方法[16-17]以及Ashby

收稿日期：2010-01-18

作者简介：蓝元沛(1982－)，男(壮族)，广西博白人，博士生，lanyuanpei@ase.buaa.edu.cn.

法[18－20]等. 其中，文献[12,14]采用了两种或以上的 MCDM 方法，通过对比不同方法得到的材料综合性能排序，确定最终选择材料. 这类方法通过建立备选材料集，确定材料性能的评价属性和对应权重，对材料的综合性能进行排序得到最优的、唯一的材料，属于定量的选材方法. 由于目前可选材料数量众多，且选材时考虑的因素较复杂，为了提高选材的效率和准确性，这类方法的应用还往往需要参考专家经验和选材案例等信息. 文献[5]对近 20 年来的选材方法进行了比较全面地概述.

材料工作是飞机研制和生产工作的基础，飞机结构所用材料的性能，在很大程度上影响所设计的结构能否满足飞机的战术-技术（使用-技术）要求. 飞机结构设计中的选材工作，是多次综合、权衡、折衷的过程. 在进行飞机结构设计选材时，设计人员需要考虑材料的各种性能，而这些性能往往是矛盾的[21]. 国内飞机设计人员往往是凭积累的经验进行选材，还没有严格统一的方法可供使用，缺乏理论依据和可操作性，工作效率也不高. 此外，设计人员的经验通常都是存在于人的头脑中，没有以固化的形式保存，不能做到企业级设计知识的积累与共享[22].

本文首先对飞机设计选材工作进行系统分析；在此基础上，提出适应于当前我国国内飞机数字化设计环境下选材专家系统的框架结构和实现方式，并建立了飞机设计选材专家系统的原型. 由于金属材料结构的设计与复合材料的结构设计有许多本质的区别[21]，本文只讨论飞机金属结构设计的选材问题.

1　飞机设计选材工作分析

1.1　选材工作概述

新飞机的研制可分成 5 个阶段：论证阶段、方案阶段、工程研制阶段、设计定型阶段、生产定型阶段. 对于飞机结构设计来说，在方案阶段，飞机设计人员在完成全机主承力结构布置后，要根据结构选材要点，完成飞机主承力结构选材；在工程研制阶段，飞机设计人员根据方案阶段确定的飞机总体技术方案进行飞机各部件结构的初步设计和详细设计，完成所有结构件的选材参考[23]. 总的来说，飞机设计的选材工作属于飞机结构设计的范畴.

飞机设计的过程是将新研制飞机的战术-技术（使用-技术）需求转化为该飞机如何制造的具体信息的过程. 飞机结构件功能的实现最终体现在它们所用材料的性能上. 在对飞机结构进行选材时，不仅需要确定材料种类、品种和牌号，而且需确定所选材料的加工和热处理工艺，即对材料和工艺进行选择. 本文所提的材料选择（选材），均指对材料和工艺的选择.

选材工作作为结构优化设计当中的一个方面，需要尽可能地满足设计需求，极大地发挥材料的性能，还要使得成本最小化[21].

1.2　选材的流程

选材的过程是一个材料搜索空间不断缩小、逐步逼近最终结果的过程.

在飞机研制的方案阶段，综合考虑飞机的布局形式、总体设计参数和各主要系统方案，可以确定机体结构特别是主要受力构件复合材料以及其他先进材料的应用水平，从而确定主承力构件的大致种类（金属材料或复合材料）[23].

在飞机研制的详细阶段，选材的步骤可大致分为以下 3 步：

1）将结构设计要求转化为对材料性能的具体属性要求[1]. 根据结构件的生产条件，以及使用环境、几何形状、载荷水平等设计条件，确定可选的材料种类（铝、钛、钢等）、品种（锻材、板材、型材等）、规格、静强度等[24]. 如果该结构件是断裂关键件，还要求所选用材料具有高的抗疲劳、抗裂纹扩展能力. 这个过程需要设计人员按照飞机结构设计中常用的设计规范和方法，根据结构件所受外载荷确定所选用材料的力学性能要求.

为了得到好的结构设计，设计人员需要对飞机结构设计有充分的认识，具有较高的设计水平和丰富的设计经验（包括选材经验），这就需要设计人员学习和掌握飞机结构设计及选材知识，继承以往飞机结构选材的经验积累，借鉴国内外同类机型的成功选材案例.

2）依据第 1）步所掌握的材料性能要求，在选材目录（材料性能数据库或材料手册）中进行检索，得到满足设计要求的若干种备选材料.

3）满足设计要求的材料往往不止一种，因而需要对这些材料进行综合性能的优劣排序，得到唯一的、最优的材料.

具体来讲，需要以结构轻质为目标，综合考虑材料各种性能要求及经济性的要求，对备选材料进行性能的综合评判. 需要注意的是，不同环境条件下的结构件以及采用不同要求设计的零件，对材料的各项性能要求的侧重程度也不同，得视具体情况分析.

1.3 选材时应考虑的因素

文献[1]对影响选材的因素进行了系统地分析,指出结构件所采用的材料、工艺与结构件的功能(在特定环境下承受特定的载荷)和几何尺寸是相互影响的.结构件的功能决定了结构件的材料和形状,而材料的可成形性、机加性能和可焊性等影响着结构件的加工工艺.此外,加工工艺与结构件的形状之间会相互影响——加工工艺决定性能、尺寸、精度以及成本,主要表现为:构件的形状规格限定材料及工艺的选择.同样,加工工艺也会限制所用的材料及结构件的几何形状和尺寸.

以下是具体分析[21]:

1) 结构的受载情况对材料性能的要求.飞机结构必须保证在所受外载下有足够的强度、刚度、寿命和高可靠性,因此首先必须确定结构的受载情况.根据结构受载对结构提出受力特性的要求,进而对选用材料提出具体的性能指标要求.

2) 结构的使用条件对选材的影响.结构的使用条件包括环境条件、飞机着陆条件、维修条件和使用条件等.不同的环境条件会对结构件所选用的材料提出不同的抗腐蚀性能要求.着陆场所、条件的不同会使结构受载和对起落装置的要求不同.而不同类型的飞机、同一类型但性能不同的飞机,其使用条件和维修条件均会有所不同,从而对材料的损伤容限及耐久性设计要求也不同.

3) 工厂生产条件对选材的影响.结构件生产条件主要指飞机的产量和工程的加工与装配能力.产量不同在选择结构的设计和工艺方案时会有所不同.例如只生产几件结构件时,一般不宜采用模锻件和精密铸造件;当大量生产时,就可考虑采用模锻、精密铸造等适合大量生产的工艺方案.

加工能力是指飞机制造工厂所具有的设备、工艺员和工人的技术水平与加工经验,以及采用新材料新工艺的可能性.飞机结构的设计人员应对生产厂的情况很熟悉,这样才能设计出具有良好工艺性的结构.

4) 飞机结构件几何形状对选材的影响.飞机结构的形状通常并不刻意任意选定.在总体设计阶段,一般已确定了各部件的外形、相对位置以及相互间连接交点的位置.因此,设计人员在进行选材时,根据经验判断或参照以往设计实例,可以获得结构件的几何形状信息.

5) 相邻结构件对选材的影响.如:钛合金电位与铝合金以及钢电位差别较大,选材时要考虑防电位腐蚀问题[23].

1.4 小 结

从以上分析可以得出,飞机设计人员在确定若干种备选材料后,从这几种备选材料中选出一种最优材料,这个过程可以看作是一个结构化决策的过程,属于典型的 MCDM 问题,飞机设计人员可以利用 MCDM 理论的方法对选材过程进行建模,根据结构设计的要求和特点,结合以往选材的经验,选出最合适的材料.

对于飞机结构设计人员,特别是对一个经验尚缺的设计人员来说,选定若干种材料作为备选材料并不是一件容易的事情,因为一般的"航空材料选用目录"会包含近 2 000 个牌号材料的基本选用信息[25].要将这 2 000 种不同牌号、品种、规格的材料作为备选材料费时又费力.可以通过参考专家的设计经验、以往成功的案例,将不满足设计要求的材料排除掉,使得备选材料的数目减小到易于决策(选择)的程度.这一步属于非程序化的决策,可以通过专家系统技术实现.

2 系统总体设计

并行工程和数字化设计/制造是航空工业技术的发展趋势.飞机设计选材专家系统需要与飞机数字化设计和制造平台密切协同,实现选材工作和设计/制造的并行与协调,满足异地设计与异构设计系统无缝联结的要求.

在本文第 1 节选材工作分析的基础上,针对我国国内主要飞机设计院所软硬件环境特点,提出基于浏览器/服务器(B/S, Browser/ Service)结构的飞机设计选材专家系统的框架结构,如图 1 所示.

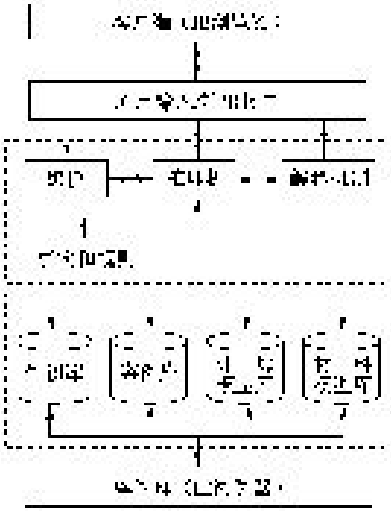

图 1 飞机设计选材专家系统框架结构

基于 B/S 的应用系统,数据及应用可通过不

同平台、不同网络存取，具有易用性好、易于维护、信息共享度高、扩展性好等优点[26]. 设计人员和材料管理人员只需要通过局域网客户端的 IE 浏览器便可以方便地使用本系统.

3　系统的构造与实现

3.1　知识的获取

目前并不存在系统的飞机设计选材知识. 本系统知识的获取，除了采取与专家交谈外，还通过查阅材料学和飞机结构设计相关书籍和文献资料等途径.

搜集国内外已有机种选材案例也是一个重要的手段. 系统开发人员从飞机设计院所的结构设计及强度计算报告中摘取与选材有关的信息，加入选材案例库，并通过案例分析与会谈相结合的方式归纳飞机设计选材知识.

3.2　知识的表示

针对飞机选材知识以及知识来源的特点，本系统采用基于规则和基于案例的知识表达方式，综合二者的优点[27]：①提供一种自然的解决方法：先检查已知选材案例，再进行基于规则的推理；②知识库的选材知识和案例库的选材案例可以相互检验，以保证知识库、案例库内容以及选材结果的质量；③基于规则得到的推理结果记录可作为选材案例库案例，通过保存合适的选材案例，推理程序可以避免重复代价很高的搜索.

基于规则的知识表达方式[28]模拟人类大脑记忆模式中知识之间大量存在的因果关系，以“IF…THEN…”的产生式规则的形式表达知识，即 $P \rightarrow Q$. 其中，P 表示条件，Q 表示结论. 其含义是：“如果条件 P 被满足，则可推出结论 Q”.

基于案例的知识表达方式难点是如何确定用来索引和检索案例的突出特征[27]. 由于飞机设计选材涉及结构设计与强度计算两个方面的工作，且结构件所用材料与其在特定环境下承受特定的载荷和几何尺寸有密切关系. 因此，本系统选材案例库的开发，用下列关键词描述选材案例：①结构件基本特征信息：结构件名称，所属型号、选用材料；②结构设计的考虑因素：基本承载情况分析，几何特征描述，设计图及其分析，强度计算结果，材料许用应力，危险剖面位置；③强度分析信息：载荷描述，受力图及其分析，强度计算结果，材料许用应力，危险剖面位置.

3.3　推理机和解释机制

作为本系统的核心，推理机的功能是协调知识库、模型库和案例库的关系. 具体为：①通过设计人员给定的设计条件，推理机加载知识库，通过从设计人员得到的事实，匹配相关的规则，将中间结果写入“黑板”；②需要建立分析模型时，推理机调用相关的计算模型库模型进行初步分析，并将分析结果返回“黑板”；③需要协调案例知识时，可以调用相关的案例知识，存于“黑板”中，供推理机使用.

为了能够提高选材结果的可信程度，本系统通过显示系统问题求解过程的推理路径和知识库中知识的运用状况对推理过程进行解释，解释推理机是怎样求解问题并得出结论的. 推理路径以表格和图形两种方式显示，便于用户理解.

本系统的推理机和解释机制功能通过 CLIPS(C Language Integrated Production System)专家系统开发工具实现. CLIPS 是美国航空航天局于 1985 年推出的一种专家系统开发工具，具有产生式系统的使用特征和 C 语言的基本语言成分[28].

为了使推理机适应 B/S 软件架构要求，本系统开发了一个通用输入/输出(I/O，Input/Output)接口，以方便推理机与知识库、案例库及计算模型库之间的交互. 该 I/O 接口功能采用 JavaScript 技术易于实现，其实现方式参见文献[29—31].

3.4　知识库和案例库

知识库的组织按飞机部位及结构件的不同进行分块，在问题的求解过程中从相应的子知识库中选择可用知识，便于基于规则和基于案例的推理的实现，并可避免知识的冗余和可能出现的知识之间的相互冲突，保证选材知识的质量. 不同类型的选材知识以单一 CLIPS 软件文件的形式存储在系统服务器中.

本文 3.2 节涉及描述选材案例的关键词信息形式，具体包括文字、数字、图片、表格、曲线以及 3D 模型和强度分析的数据文件，数据库技术很容易实现对这些信息的存储. 本系统采用数据库技术对案例库进行开发. 数据库管理系统(如 SQL Server、ORACLE 等)容易满足对大量案例进行管理的要求. 数据库技术对数据共享性好的优点可以实现多种编程语言对数据的调用.

3.5　计算模型库

选材的过程不仅包括定性推理，还包括数值计算. 前者由推理机实现，而后者则由计算模型库的模型实现.

目前，本系统计算模型库包含的计算模型主要有：具有典型特征的战斗机机身框和壁板、机翼

梁(墙)和蒙皮的材料性能校核与材料屈服强度门槛值计算,受压结构选用材料的性能指标计算,受交变载荷结构件选用材料的性能要求计算,以及有损伤容限要求关键零件选用材料的性能指标计算等.

上述计算模型主要摘自"××飞机强度计算报告",可供设计人员选材及结构件强度初步校核时使用.

计算模型库还包括一个用以实现定量选材的材料综合性能评判模型.该模型的实现采用的是MCDM理论中最为广泛使用的简单加权法.基于MCDM理论的飞机设计选材方法见文献[32].

计算模型库各个模型主要采用基于Web和ASP.NET的封装方式,计算模型均以*.DLL文件的方式实现,便于模型的扩展和维护.

3.6 客户端、库管理及通用输入/输出接口

用户(设计人员)通过IE浏览器可以方便地实现选材的相关功能;管理员(知识工程师)通过IE浏览器对知识库、案例库、计算模型库进行维护,并可对材料数据库相关数据进行浏览.

材料数据库的介绍见文献[33].

4 系统功能介绍

用户打开IE浏览器,在地址栏输入地址即可进入本系统进行选材.本系统的主要功能有:

1)选材的定性推理.用户通过推理机加载知识库和案例库进行选材的定性推理.通过与推理机的交互输入拟设计结构件的受载情况、几何形状、使用环境和生产加工等初始条件,确定可选的材料种类、品种和规格,材料性能综合评价指标以及确定这些指标对应权重大小的原则等.必要时,推理机还调用计算模型,以便根据输入的结构件工作环境和受载情况确定所选材料的性能指标.

2)从材料数据库检索满足定性推理条件和初始设计要求的材料,确定备选材料.用户可以根据推理机的定性推理结果对材料数据库进行检索,得到满足前提条件的材料(或材料集).检索的内容包括:"材料相关信息检索",输入拟选材料的类别和品种;"材料光滑拉伸力学性能检索",输入结构件使用环境下的设计应力;若考虑材料的疲劳性能,还需输入满足结构件使用环境、典型疲劳载荷的应力比及应力集中系数下最大疲劳应力和疲劳载荷循环次数门槛值等检索信息.满足上述条件的检索结果的交集为同时满足材料类别、品种和静力、疲劳性能要求的备选材料.

3)对备选材料综合性能综合评判,得到综合性能最优的、唯一的材料.若备选材料不止一种,则需调用计算模型库中的材料综合性能评判模型对备选材料的综合性能进行排序,得出性能最优的材料.其中,材料综合性能评判指标由推理机推理得出,这些指标对应的权重根据推理机得出的确定权重原则由用户根据实际设计要求确定.

5 应用实例

下面以某型号战斗机机翼大梁选材实例说明系统的有效性.

参照选材案例库以往选材案例,初步确定该大梁的设计条件及典型工况为:翼梁结构形式:整体梁式;使用载荷下结构的工作应力:250 MPa;结构安全系数:1.5;最大疲劳应力 $\sigma_{max}=150$ MPa;疲劳寿命周期门槛值:1.00×10^6 周;应力比 $R=0.5$;应力集中系数 $K_t=1.0$.

用户加载选材知识库文件,运行推理机,推理机开始提问,用户回答推理机所提问题.以下是与推理机的交互信息:

结构件所在部位是否是机翼(Yes/No)?

你的输入数据:Yes

结构件是否是机翼主梁(Yes/No)?

你的输入数据:Yes

结构件是否受疲劳载荷(Yes/No)?

你的输入数据:Yes

选择结构件所受静载荷类型:1.受拉/压载荷;2.受弯(输入1或2).

你的输入数据:2

该结构件是否是梁(Yes/No)?

你的输入数据:Yes

飞机飞行环境是否为潮湿空气环境/海洋大气环境/工业大气环境(Yes/No)?

你的输入数据:Yes

结构件是否考虑材料的经济性(Yes/No)?

你的输入数据:Yes

推理结果输出:

结构件所在部位:机翼

结构件名称:机翼主梁

确定材料种类及品种 #

材料种类:钢/铝/钛

材料品种:厚板/锻件

需要考虑不同试验环境下材料力学性能

试验环境:腐蚀环境

是否考虑材料的光滑拉伸性能:是

是否考虑材料的疲劳性能：是

材料综合性能评价需要考虑的指标

静强度指标：[σ_b^(2/3)/ρ]

刚度指标：[E^(1/2)/ρ]

疲劳性能指标：疲劳载荷循环次数 N_疲劳

抗腐蚀性能指标：[σ_0.2]（成本型属性）

经济性指标：材料成本（成本型属性）

用户输入以下检索条件对材料数据库进行检索：材料类别：钢/铝合金/钛合金；材料品种：锻件/厚板；静力工作环境/温度：空气/室温；使用载荷下结构的工作应力：250 MPa；结构安全系数：1.5；疲劳载荷工作环境/温度：盐雾/室温；最大疲劳应力 $\sigma_{max}=150$ MPa；疲劳寿命周期门槛值：1.00×10^6 周；应力比 $R=0.5$；应力集中系数 $K_t=1.0$

得到的检索结果有：2D70 锻件、7B04-T6 厚板、7B04-T74 锻件等 3 种备选材料.

推理机调用材料综合性能评判模型对上述 3 种材料进行性能的综合评判，其中评判的指标为：$\sigma_b^{2/3}/\rho$、$E^{1/2}/\rho$、$N_{疲劳}$、$\sigma_{0.2}$和材料成本指标，取这些指标的权重大小一致.

最终选材结果为：7B04-T74 锻件，该结果与实际选材结果相符.

6　结 束 语

1）在飞机数字化设计/制造技术不断发展的趋势下，以往翻手册、查文献的飞机设计选材工作方式就显得相对落后，这就需要转变选材的工作方式，以实现飞机研制中选材工作的数字化协同，确保选材质量，提高设计效率.

2）结合基于专家系统理论的选材方法和基于 MCDM 理论的选材方法，以及基于规则和基于案例的选材知识表示方法，提出飞机设计选材专家系统框架结构，并建立基于 B/S 结构的飞机设计选材专家系统原型.

3）专家系统原型的建立仅仅是系统应用的开始，用户还需要对选材知识库进行相当长时间的运行检验，不断对知识库进行改进. 虽然本系统原型已应用于飞机设计部门，但系统的建立仅仅是系统应用的开始，用户还需要对选材知识库和案例库进行不断完善，才能使本系统在飞机设计选材中发挥更大的作用.

参考文献（References）

[1] Ashby M F, Bréchet Y J M, Cebon D, et al. Selection strategies for materials and processes[J]. Materials and Design, 2004, 25(1): 51－67

[2] Amen R, Vomacha P. Case-based reasoning as a tool for materials selection[J]. Materials and Design, 2001, 22(5): 353－358

[3] Sapuan S M. A knowledge-based system for materials selection in mechanical engineering design[J]. Materials and Design, 2001, 22(8): 687－695

[4] Zhou Changchun, Yin Guofu, Hu Xiaobing. Multi-objective optimization of material selection for sustainable products: artificial neural networks and genetic algorithm approach [J]. Materials and Design, 2009, 30(4): 1209－1215

[5] Jahan A, Ismail M Y, Sapuan S M, et al. Material screening and choosing methods: a review[J]. Materials and Design, 2010, 31(2): 696－705

[6] Shyi-Ming Chen. A new method for tool steel materials selection under fuzzy environment[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1997, 92(3): 265－274

[7] Zha X F. A web-based advisory system for process and material selection in concurrent product design for a manufacturing environment[J]. Int J Adv Manuf Technol, 2005, 25(3/4): 233－243

[8] Dehghan-Manshadi B, Mahmudi H, Abedian A, et al. A novel method for materials selection in mechanical design: combination of non-linear normalization and a modified digital logic method[J]. Materials and Design, 2007, 28(1): 8－15

[9] Khabbaz R S, Manshadi B D, Abedian A, et al. A simplified fuzzy logic approach for materials selection in mechanical engineering design[J]. Materials and Design, 2009, 30(3): 687－697

[10] Dong-Hyun Jee, Ki-Ju Kang. A method for optimal material selection aided with decision making theory[J]. Materials and Design, 2000, 21(3): 199－206

[11] 黄海鸿，刘光复，刘志峰，等. 绿色设计中的材料选择多目标决策[J]. 机械工程学报，2006，42(8)：131－136
Huang Haihong, Liu Guangfu, Liu Zhifeng, et al. Multi-objective decision-making of materials selection in green design[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 42(8): 131－136 (in Chinese)

[12] Shanian A, Savadogo O. A methodological concept for material selection of highly sensitive components based on multiple criteria decision analysis[J]. Expert Systems with Applications, 2009, 36(2): 1362－1370

[13] Shanian A, Savadogo O. A material selection model based on the concept of multiple attribute decision making[J]. Materials and Design, 2006, 27(4): 329－337

[14] Chatterjee P, Athawale V M, Chakraborty S. Selection of materials using compromise ranking and outranking methods[J]. Materials and Design, 2009, 30(10): 4043－4053

[15] Rao R V. A material selection model using graph theory and matrix approach[J]. Material Science and Engineering A, 2006, 431(1/2): 248－255

[16] Rao R V, Davim J P. A decision-making framework model for material selection using a combined multiple attribute decision-making method[J]. Int J Adv Manuf Technol, 2008, 35(7/8): 751－760

[17] Rao R V. A decision making methodology for material selection using an improved compromise ranking method[J]. Materials and Design,2008,29(10):1949－1954

[18] Ashby M F. Multi-objective optimization in material design and selection[J]. Acta Mater,2000,48(1):359－69

[19] Ashby M F. Materials selection in mechanical design[M]. 2nd ed. Oxford:Butterworth-Heinemanm,1999

[20] Reddy G P,Gupta N. Material selection for microelectronic heat sinks:an application of the Ashby approach[J]. Materials and Design,2010,31(1):113－117

[21] 《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,2000
General editons of aviaft design manual. Aircraft design brochure (the 10th volume):structure design[M]. Beijing: Aviation Industry Press,2000 (in Chinese)

[22] 梅中义,张丽华,范玉青. 飞机复合材料构件设计知识库的研究[J]. 制造业自动化,2006,28(2):21－26
Mei Zhongyi,Zhang Lihua,Fan Yuqing. Researching knowledge based system for aircraft composite part design[J]. Manufacturing Automation,2006,28(2):21－26 (in Chinese)

[23] 顾诵芬. 飞机总体设计[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2001:2－4,108－111
Gu Songfen. Aircraft design[M]. Beijing:Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press,2001:2－4,108－111 (in Chinese)

[24] 许广兴. 现代战斗机机体结构设计选材(金属材料)分析[D]. 北京:北京航空航天大学飞行器设计与应用力学系,2000
Xu Guangxing. Airframe (metal) materials selection analysis of modern aircraft[D]. Beijing:Department of Flight Vehicle Design and Applied Mechanics,Beijing University of Aeronautics and Astronautics,2000 (in Chinese)

[25] 周洪范. 航空材料数据库现状及其发展[J]. 航空科学技术,1996(5):7－10
Zhou Hongfan. Aeronautical materials database:actuality and development[J]. Aeronautical Science and Technology,1996(5):7－10 (in Chinese)

[26] 任泰明. 基于B/S结构的软件开发技术[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2006:3－4
Ren Taiming. Software development technology based on B/S architecture[M]. Xi'an:Xidian University Press,2006:3－4 (in Chinese)

[27] George F Luger. 人工智能:复杂问题求解的结构和策略[M]. 北京:机械工业出版社,2004:227,232
George F Luger. Artificial intelligence:structures and strategies for complex problem solving[M]. Beijing:China Machine Press,2004:227,232 (in Chinese)

[28] 蔡自兴,约翰·德尔金,龚涛. 高级专家系统:原理、设计及应用[M]. 北京:科学出版社,2005:30－33,111
Cai Zixing,John Durkin,Gong Tao. Advanced expert systems:principles,design and applications[M]. Beijing:Science Press,2005:30－33,111 (in Chinese)

[29] Grove R F. Internet-based expert systems[J]. Expert Systems,2000,17(3):129－136

[30] Duan Y,Edwards J S,Xu M X. Web-based expert systems:benefits and challenges[J]. Information & Management,2005,42(6):799－811

[31] Lan Yuanpei,Guan Zhidong,Jiao Qixiang,et al. A web-based computer-aided material-selection system for aircraft design[C]//Robin Qiu,Hui Zhao. 2010 WASE International conference on Information Engineering. Los Alamitos:IEEE Computer Society,2010:109－113

[32] 蓝元沛,孟庆春,李锋,等. 基于多属性效用理论的飞机设计选材方法[J]. 航空材料学报,2010,30(3):88－94
Lan Yuanpei,Meng Qingchun,Li Feng,et al. Aircraft design material selection method based on MAUT theory[J]. Journal of Aeronautical Materials,2010,30(3):88－94 (in Chinese)

[33] 沈军,朱亦刚,黄新跃,等. 航空材料数据库领域的现状及展望[J]. 航空材料学报,2003,23(增刊):291
Shen Jun,Zhu Yigang,Huang Xinyue,et al. Progress and layout for the database domain of aeronautical materials [J]. Journal of Aeronautical Materials,2003,23(Supplement):291 (in Chinese)

(编 辑:李 晶)