# 机组工作负荷评价新方法及其应用

王黎静 向 维 何雪丽 李润山

(北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100191) (中国国际航空公司飞行总队, 北京 100621)

**摘 要**: 评估机组工作负荷是适航审核的重要指标之一,FAA(Federal Aviation Administration)适航标准 CFR-25.1523 和中国适航标准 CCAR-25.1523 中都对机组工作负荷的审核提出了要求. 研究了适航标准、波音 737 和空客 320 机组操作手册及其他相关文献,通过与飞行员面谈建立评价体系基本框架. 应用德尔菲法进行咨询确定评价体系指标,应用序关系分析法进行指标权重系数调查,最终建立机组工作负荷综合评价体系. 基于所建立的评价体系,应用模糊综合评价法对 B737 和 A320 机组工作负荷进行了综合评价,评价结果表明:研究所建立的民机机组工作负荷评价体系合理,具有实用性. 所获得的机组工作负荷评估体系及评价结果可为 C919 等同类机型的机组工作负荷设计提供参考.

**关 键 词**: 机组工作负荷; 评价指标; 权重系数; 模糊综合评价; 适航

**中图分类号**: V 221

**文献标识码**: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2012)07-0915-05

## New method to evaluate crew workload and application

Wang Lijing Xiang Wei He Xueli

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

Li Runshan

(Flying Corps of Air China, Beijing 100621, China)

**Abstract**: Crew workload assessment is an important index of airworthiness certification. Wokload assessment is required by both CFR-25.1523 of federal aviation administration(FAA) airworthiness certification and CCAR-25.1523 of Chinese airworthiness certification. The basic frame of evaluation index system was established by studying airworthiness certification, crew operation manual of Boeing 737 and Airbus 320, other correlated references and interviewing with pilots. The crew workload comprehensive evaluation index system was established by consultation with Delphi method, and index weight coefficients questionnaire with order relation analysis method. The crew workload of Boeing 737 and Airbus 320 was evaluated with fuzzy comprehensive evaluation method based on the built evaluation index. The result shows that this index is reasonable and practicable. The evaluation index system and evaluation results can provide design reference on crew workload for C919.

**Key words**: crew workload; evaluation index; weight coefficients; fuzzy comprehensive evaluation; airworthiness

1981 年,美国出台了关于指导飞行机组定员任务的建议,即关于新一代商用运输机的两人制机组操作是否安全,其验证是否与秘书处的规定(1958 年联邦航空局法令中用来促进飞行安全的验证条款)一致的建议[1]. 过去 30 年里,研究者们研究了大量的机组工作负荷的评价方法,但大多数方法和 AC25.1523 中的方法一样仅仅被谨慎地应用于可控的飞行模拟实验[2-3]. 就目前检

**收稿日期**: 2011-04-18; **网络出版时间**: 2012-05-22 15:36

**网络出版地址**: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20120522.1536.002.html

**基金项目**: 国家 973 计划资助项目(2010CB734103)

**作者简介**: 王黎静(1965 - ),女,山东郓城人,副教授,wanglijing@buaa.edu.cn.

索的资料,能用于驾驶舱早期设计的负荷评估方法和工具少之又少. 本文从早期介入设计的观点出发,研究一个基于A320、B737(C919竞争机型)机组工作负荷评估体系,之后基于所建立的评价体系,应用模糊综合评价法对B737和A320机组工作负荷进行了综合评价,在此基础上提出了C919驾驶舱机组工作负荷设计中应该关注的设计系统及设计参考原则. 基于本文提出的机组工作负荷评价体系,设计人员可在驾驶舱设计的各个阶段方便、清晰地评价驾驶舱机组工作负荷,使机组工作负荷的设计更合理.

# 1 机组工作负荷综合评价体系

## 1.1 建立民机机组工作负荷综合评价指标体系

通过对FAA(Federal Aviation Administration)适航标准CFR-25.1523、中国适航标准CCAR-25.1523[4]、B737及A320现有飞行员机组使用手册[5-6]和文献[7]的研究,并与这两种机型现役飞行员多次面谈,从以下11个因素对机组工作负荷进行了细化. 评估体系的部分内容如表1所示:

1)操纵装置的可达性及操纵的简易程度;

2)仪表及警告装置的可视性及醒目程度;

3)燃油非正常操作程序;

4)消耗的负荷大小和持续的时间;

5)系统监控程度;

6)需机组成员离开原定职能岗位才能完成的动作;

7)飞机系统的自动化程度;

8)通讯工作量;

9)导航工作量;

10)应急程序;

11)一名驾驶员丧失能力的操作程序.

**表1 民机机组工作负荷综合评价指标体系模型**

| 总目标层 | 子目标层 | 子子目标层 | 指标层 |
|---|---|---|---|
| 民机机组工作负荷 | $O_1$:操纵装置的可达性及操纵的简易程度 | $O_{11}(U_1)$:飞行操纵系统(人工飞行) | $u_{11}$:基本飞行操纵装置 |
| | | $O_{12}(U_2)$:发动机系统 | …… |
| | | $O_{13}(U_3)$:自动飞行系统 | …… |
| | | $O_{14}(U_4)$:指示/记录系统 | $u_{41}$:电子飞行仪表系统面板和中央监控控制面板 |
| | | | …… |
| | | $O_{15}(U_5)$:通讯系统 | …… |
| | | $O_{16}(U_6)$:导航系统 | …… |
| | | $O_{17}(U_7)$:电气系统 | …… |
| | | $O_{18}(U_8)$:燃油系统 | …… |
| | | $O_{19}(U_9)$:液压系统 | …… |
| | | $O_{110}(U_{10})$:气源系统 | $u_{101}$:引气控制 |
| | | | $u_{102}$:空调控制/通风控制 |
| | | | $u_{103}$:增压控制 |
| | | $O_{111}(U_{11})$:防冰、防雨系统 | …… |
| | | $O_{112}(U_{12})$:防火系统(发动机/APU防火操纵) | …… |
| | | $O_{113}(U_{13})$:灯光系统 | …… |
| | | $O_{114}(U_{14})$:起落架系统 | $u_{141}$:起落架收放控制 |
| | | | ····· |
| | $O_2$:仪表及警告装置的可视性及醒目程度 | $O_{21}(U_{15})$:仪表 | $u_{151}$:主飞行显示器 |
| | | | $u_{152}$:导航显示器 |
| | | | …… |
| | | $O_{22}(U_{16})$:警告装置 | …… |
| | | | $u_{164}$:引导机组快速辨明故障类型的显示 |
| | $O_3(U_{17})$:燃油非正常操作程序 | | …… |
| | $O_4(U_{18})$:消耗的负荷大小和持续的时间 | | $u_{181}$:非正常情况下消耗体力负荷的大小和持续的时间 |
| | | | $u_{182}$:非正常情况下消耗脑力负荷的大小和持续的时间 |
| | $O_5(U_{19})$:系统监控程度 | | …… |
| | | | $u_{193}$:监控增压系统信息 |
| | | | $u_{194}$:监控飞行操纵系统信息 |
| | | | …… |
| | $O_6(U_{20})$:需机组成员离开原定职能岗位才能完成的动作 | | …… |
| | $O_7(U_{21})$:飞机系统的自动化程度 | | …… |
| | $O_8(U_{22})$:通讯工作量 | | …… |
| | $O_9(U_{23})$:导航工作量 | | …… |
| | $O_{10}(U_{24})$:应急程序 | | …… |
| | $O_{11}(U_{25})$:一名驾驶员丧失能力的操作程序 | | …… |

### 1.2　德尔菲法筛选指标

初步确定机组工作负荷评价指标体系后,采用改进德尔菲法[8]筛选指标确定了机组工作负荷的评价体系. 两次接受咨询的专家都来自某航空公司飞行总队的现役飞行员,且均飞过 A320 系列及 B737 系列机型. 论文参考文献[8],把专家一致意见定义为:不少于 2/3(或 67%)的专家判断等级为"大"及"大"以上的判断结果,即 Likert 量表等级≥3.

### 1.3　确定机组工作负荷评价指标权重系数

研究中采用序关系分析法[9]确定各指标的权重系数,接受指标权重系数咨询的专家组同前. 权重系数调查共送出 25 份调查表,收回 22 份有效问卷. 对不同专家人数下 11 个一级指标中的部分权重系数的计算如图 1 所示. 图中随着专家人数逐渐增加,权重系数趋于稳定. 研究中人数达 12 个以后,11 个一级指标的权重系数未再出现大的起伏,与文献[9]中所述"专家人数以 10 ~ 30 人为宜"是吻合的. 计算所得的一级指标权重系数如表 2 所示.

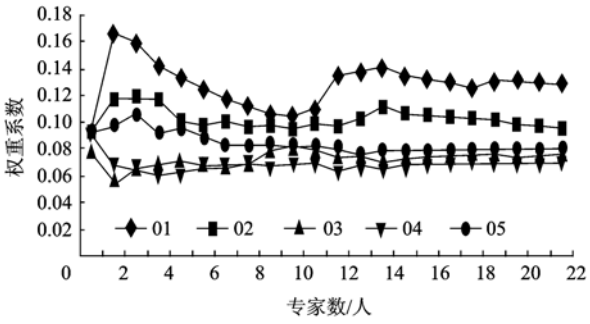



图 1　不同专家人数的指标权重系数比较

**表 2　子目标层权重系数**

| 子目标集 | 权重系数 |
|---|---|
| $\{w_{O_1}, w_{O_2}, w_{O_3}, w_{O_4}, w_{O_5}, w_{O_6}, w_{O_7}, w_{O_8}, w_{O_9}, w_{O_{10}}, w_{O_{11}}\}$ | {0.13,0.1,0.08,0.07,0.08,0.07,0.09,0.06,0.07,0.13,0.12} |

## 2　机组工作负荷模糊综合评价

### 2.1　机组工作负荷的主观评价

利用主观评价法[10]对 B737 和 A320 机型的机组工作负荷评价体系中的指标进行了评价,评价专家组同前,调查中的评价等级及其含义如表 3 所示. 发送 A320 机型、B737 机型机组工作负荷综合评价调查问卷各 25 份,分别收回有效问卷 23 份和 17 份.

主观综合评价值:按有界和、有界积算子计算原则 $\boldsymbol{X} = \boldsymbol{R}_t \cdot \boldsymbol{V}^{\mathrm{T}}$,其中 $\boldsymbol{V}^{\mathrm{T}}$ = (0.9　0.7　0.5　0.3　0.1).

矩阵 $\boldsymbol{R}$ 中的元素 $r_{ij}$ 的公式为

$$r_{ij} = d_{ij}/d \tag{1}$$

式中,$d$ 表示参加评价的专家人数;$d_{ij}$ 表示第 $i$ 个评价因素做出第 $j$ 评价等级的专家人数.

**表 3　民机机组工作负荷评价等级及其含义**

| 评价等级 | 分值 | 评语含义 |
|---|---|---|
| 很大 | 0.9 | 给飞行机组带来极高的工作负荷 |
| 大 | 0.7 | 给飞行机组带来较高的工作负荷 |
| 一般 | 0.5 | 给飞行机组带来一般的工作负荷 |
| 小 | 0.3 | 给飞行机组带来较低的工作负荷 |
| 很小 | 0.1 | 给飞行机组带来忽略不计的工作负荷 |

### 2.2　机组工作负荷模糊综合评价

论文以指标体系中的子目标"操纵装置的可达性及操纵的简易程度"($O_1$)为例,展示所进行的机组工作负荷模糊综合评价步骤:

1)评价对象:$u_{10}$ 气源系统(A320). 评价指标集:$u_{10} = \{u_{101}, u_{102}, u_{103}\}$,指标具体名称见表 1.

2)拟定评语级:$V$ = {很大($v_1$),大($v_2$),一般($v_3$),小($v_4$),很小($v_5$)}.

3)指标权重系数

$$\boldsymbol{W} = \{w_{u_{101}}, w_{u_{102}}, w_{u_{103}}\} = \{0.33, 0.29, 0.38\}$$

4)模糊评价矩阵:

$$\boldsymbol{R} = \begin{pmatrix} r_{1011} & r_{1012} & r_{1013} & r_{1014} & r_{1015} \\ r_{1021} & r_{1022} & r_{1023} & r_{1024} & r_{1025} \\ r_{1031} & r_{1032} & r_{1033} & r_{1034} & r_{1035} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0.18 & 0.70 & 0.06 & 0.06 \\ 0 & 0.12 & 0.65 & 0.17 & 0.06 \\ 0 & 0.41 & 0.41 & 0.12 & 0.06 \end{pmatrix} \tag{2}$$

式中 $r_{ij}$ 表示第 $i$ 个评价指标对 $j$ 个评价等级的隶属度,它反映了各评价指标与评价等级之间用隶属度表示的模糊关系.

5)模糊综合评价结果:利用权重系数和评价矩阵进行模糊复合运算可得到 $U \times V$ 上的模糊综合评价结果为

$$B = \boldsymbol{W} \circ \boldsymbol{R} = \{0, 0.25, 0.58, 0.11, 0.06\} \tag{3}$$

式中,"∘"为模糊算子.

6)模糊综合评价等级:按模糊综合判定的最大隶属度原则

$$B = \max_{1 \leqslant i \leqslant m} B_i \tag{4}$$

可得 $B = B_3 = 0.58$,该值位于评价矩阵的第 3 列,因此,指标集"气源系统"的评价等级为"一般".

7)模糊综合评价值:按有界和、有界积算子计算原则

$$Y = B \circ \boldsymbol{V}^{\mathrm{T}} = (0 \quad 0.25 \quad 0.58 \quad 0.11) \circ$$

(0.9 0.7 0.5 0.3 0.1) (5)

可得 $Y=0.503$,因此,指标集"气源系统"的评价值为 0.503. 对每个指标及子子目标、子目标集重复上述步骤,可获得 A320 子目标模糊综合评价矩阵.

$$\boldsymbol{R}=\begin{bmatrix}0.07 & 0.28 & 0.46 & 0.17 & 0.02\\ 0.03 & 0.31 & 0.52 & 0.13 & 0.01\\ 0.04 & 0.54 & 0.36 & 0.06 & 0\\ 0.09 & 0.54 & 0.37 & 0 & 0\\ 0.03 & 0.28 & 0.47 & 0.22 & 0\\ 0.12 & 0.36 & 0.44 & 0.06 & 0.02\\ 0.01 & 0.29 & 0.56 & 0.12 & 0.02\\ 0.05 & 0.33 & 0.43 & 0.15 & 0.04\\ 0 & 0.12 & 0.65 & 0.23 & 0\\ 0.12 & 0.70 & 0.18 & 0 & 0\\ 0.29 & 0.42 & 0.29 & 0 & 0\end{bmatrix} \quad (6)$$

由式(6)和子目标的权重系数 $\{w_{o_1},w_{o_2},w_{o_3},w_{o_4},w_{o_5},w_{o_6},w_{o_7},w_{o_8},w_{o_9},w_{o_{10}},w_{o_{11}}\}$ 进行模糊运算,可得总目标的模糊综合评价结果为

$$B=\boldsymbol{W}\circ\boldsymbol{R}=\{0.09,0.39,0.41,0.10,0.01\} \quad (7)$$

$$Y=B\circ\boldsymbol{V}^{\mathrm{T}}(0.09\quad 0.39\quad 0.41\quad 0.10\quad 0.01)\circ(0.9\quad 0.7\quad 0.5\quad 0.3\quad 0.1) \quad (8)$$

可得,A320 机组工作负荷模糊评价等级为"一般",评价值 $Y=0.590$.

同样的方法可计算出 B737 机组工作负荷评价值 $Y=0.597$.

## 3 结果分析及讨论

用模糊综合评价方法对 B737 和 A320 机组工作负荷进行评价后,可获得如表 4 ~ 表 6 所示的系列评价结果.

**表 4 A320 和 B737 总目标层的模糊综合评价结果**

| 指标名称 | A320 模糊综合评价结果 | 评价等级 | 评价值 | B737 模糊综合评价结果 | 评价等级 | 评价值 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $O$ | {0.09,0.39,0.41,0.10,0.01} | 一般 | 0.590 | {0.10,0.41,0.38,0.09,0.02} | 大 | 0.597 |

表 4 反映了总目标层的模糊综合评价结果,尽管表中 A320 机组工作负荷评价等级为"一般",B737 机组工作负荷评价等级为"大",但是二者模糊综合的评价值相差不大,A320 是0.590,B737 是 0.597,由此可见 A320 的机组负荷与 B737 的机组负荷差异不大.

表 5 反映了部分指标层的评价结果. 这些评价结果反映了系统设计对机组工作负荷的影响.

**表 5 部分 A320 和 B737 指标层的模糊综合评价结果**

| 指标名称 | | A320 模糊综合评价结果 | 评价等级 | B737 模糊综合评价结果 | 评价等级 |
|---|---|---|---|---|---|
| $O_{11}$ | $U_1$ | {0.12,0.59,0.24,0.06,0.00} | 大 | {0.29,0.41,0.29,0.00,0.00} | 大 |
| $O_{14}$ | $U_4$ | {0.00,0.06,0.47,0.29,0.18} | 一般 | {0.00,0.24,0.24,0.53,0.00} | 小 |
| $O_{15}$ | $U_5$ | {0.04,0.10,0.61,0.23,0.02} | 一般 | {0.11,0.45,0.31,0.10,0.04} | 大 |
| $O_{114}$ | $U_{14}$ | {0.00,0.22,0.54,0.24,0.00} | 一般 | {0.12,0.35,0.34,0.11,0.05} | 大 |
| $O_{21}$ | $U_{15}$ | {0.04,0.31,0.46,0.17,0.02} | 一般 | {0.00,0.47,0.44,0.09,0.00} | 大 |

飞行操纵系统 $O_{11}$ 和基本飞行操纵装置 $u_{11}$,在 A320 和 B737 中负荷评价等级均为"大",原因是在飞行中经常使用,而且飞行操纵与气压、温度、飞机重量、重心等诸多因素相关,在起飞和着陆时操纵尤为重要.

$O_{14}$ 为指示/记录系统,$u_{41}$ 为电子飞行仪表系统(EFIS,Electronic Flight Instrument System)面板和飞机中央电子监控(ECAM,Electronic Centralized Aircraft Monitoring)控制面板,在 A320 和 B737 的负荷评价等级分别为"一般"、"小". 原因是 A320 比 B737 多了 ECAM 控制面板,增加了飞行员操作的按钮.

$O_{15}$ 为通讯系统,在 A320 和 B737 的负荷评价等级分别为"一般"、"大". 在使用"内话/无线电开关"时,当 A320 不发射时,无需一直按着按钮,而 B737 无论是发射还是不发射都需要一直按着按钮,给飞行员带来了负荷.

$O_{114}$ 为起落架系统,$u_{141}$ 为起落架收放控制,在 A320 和 B737 中的负荷评价等级分别为"一般"、"大". 因为在 A320 中,起落架的收放控制只有"收上"和"放下",但是在 B737 中除此之外,还有"关断位(切断液压)"的操作.

$O_{21}$ 为仪表的可视性及醒目程度,$u_{152}$ 为导航显示器(ND,Navigation Display),$u_{164}$ 为引导机组快速辨明故障类型的显示,在 A320 中负荷评价等级为"一般",在 B737 中负荷评价等级为"大". $u_{151}$ 为主飞行显示器(PFD,Primary Flight Display),在 A320 和 B737 中负荷评价等级均为"大". 因为系统集成导致 PFD 显示的信息量很大,这对于飞行员来说在众多信息中识别有效信息、关键信息等来说负荷是很大的,因此无论是 A320 还是 B737,PFD 带给飞行员的负荷都很大. 而对于 ND,在 A320 中是自动调节的,而在 B737 中需手动调节,这导致在 B737 中飞行员的负荷

要大些. 而对于引导机组快速辨明故障类型的显示,由于 A320 中多了 ECAM,飞行员只需按照 ECAM 的指示来执行各种操作,但是 B737 中只告诉信息的位置,还需要飞行员自己判断操作.

表 6 给出了部分子子目标层的评价结果. 这些评价结果都反映了具体设计给机组工作负荷带来的影响.

**表 6　部分 A320 和 B737 子子目标层的模糊综合评价结果**

| 指标名称 | A320 模糊综合评价结果 | 评价等级 | B737 模糊综合评价结果 | 评价等级 |
|---|---|---|---|---|
| $u_{11}$ | {0.12,0.59,0.23,0.06,0.00} | 大 | {0.29,0.41,0.29,0.00,0.00} | 大 |
| $u_{41}$ | {0.00,0.06,0.47,0.29,0.18} | 一般 | {0.00,0.24,0.24,0.53,0.00} | 小 |
| $u_{141}$ | {0.00,0.18,0.47,0.35,0.00} | 一般 | {0.06,0.41,0.35,0.18,0.00} | 大 |
| $u_{151}$ | {0.06,0.59,0.29,0.06,0.00} | 大 | {0.00,0.71,0.29,0.00,0.00} | 大 |
| $u_{152}$ | {0.06,0.35,0.47,0.12,0.00} | 一般 | {0.00,0.53,0.35,0.12,0.00} | 大 |
| $u_{164}$ | {0.06,0.35,0.53,0.06,0.00} | 一般 | {0.12,0.35,0.29,0.24,0.00} | 大 |
| $u_{181}$ | {0.06,0.41,0.53,0.00,0.00} | 一般 | {0.21,0.38,0.35,0.06,0.00} | 大 |
| $u_{182}$ | {0.12,0.65,0.24,0.00,0.00} | 大 | {0.18,0.59,0.24,0.00,0.00} | 大 |
| $u_{193}$ | {0.00,0.35,0.47,0.18,0.00} | 一般 | {0.00,0.47,0.41,0.06,0.06} | 大 |
| $u_{194}$ | {0.00,0.47,0.35,0.18,0.00} | 大 | {0.06,0.35,0.41,0.18,0.00} | 一般 |

$u_{182}$ 为非正常情况下消耗脑力负荷的大小和持续的时间,在 A320 和 B737 中负荷评价等级均为“大”. 因为在非正常情况下,飞行员需要大量的思考,加上心理紧张,导致脑力负荷极大.

$u_{181}$ 为非正常情况下消耗体力负荷的大小和持续的时间,在 A320 和 B737 中负荷评价等级分别为“一般”、“大”. 因为 A320 是电传系统,没有很多操作需要使很大的力,而 B737 是机械传动,很多操作(比如双液压失效)需要很大的体力,而且 A320 的计算机系统会减少很多飞行员的体力负荷,比如单发失效时,A320 会自动补偿,而 B737 不能.

$u_{193}$ 为监控增压系统信息,在 A320 和 B737 中负荷评价等级分别为“一般”、“大”. 因为 A320 中,增压信息的调节显示在人工位时,只需判断“上升”和“下降”来调节上升和下降,信息比较直接. 而在 B737 中,需通过调节排气活门来调节上升和下降,信息的获取不是很直接. $u_{194}$ 为监控飞行操纵系统信息,在 A320 中负荷评价等级为“大”,在 B737 中负荷评价等级为“一般”. 原因是在 A320 中,飞行操纵由计算机完成,如升降舵副翼计算机(ELAC,Elevator Aileron Computer)、扰流板升降舵计算机(SEC,Spoiler Elevator Computer)、飞行增稳计算机(FAC,Flight Augmentation Computer)等来完成,因此飞行员需监控的飞行操纵信息比较多,而在 B737 中飞行操纵信息的监控一部分是靠仪表,一部分是靠感觉,判断飞机是否符合当时的状态.

## 4　结　论

基于 A320 和 B737,确定了民机机组工作负荷综合评价体系,包括评价指标体系及其权重系数. 应用模糊综合评级方法对 A320 和 B737 机组工作负荷进行了综合评价后发现:

1) 基本飞行操纵装置、PFD、非正常情况下消耗脑力负荷的大小和持续的时间 3 个指标的工作负荷等级均为“大”,建议 C919 在进行与这些指标相关的系统设计时应着重考虑其引起的机组工作负荷问题.

2) EFIS 面板、ECAM 控制面板、通讯系统、监控飞行操纵系统信息 4 个指标,A320 的工作负荷等级比 B737 的高,建议 C919 在进行与这些指标相关的系统设计时参考 B737 的设计.

3) 起落架收放控制、ND、引导机组快速辨明故障类型的显示、监控增压系统信息、非正常情况下消耗体力负荷的大小和持续的时间共 5 个指标,B737 的工作负荷等级比 A320 的工作负荷等级高,建议 C919 在进行与这些指标相关的系统设计时参考 A320 的设计.

### 参考文献 (References)

[1] Federal aviation administration. Minimum flight crew[R]. AC 25.1523-1,2005

[2] Roscoe A H. Assessing pilot workload. Why measure heart rate, HRV and respirootion? [J]. Biological Psychology,1992,34(2/3):259 - 287

[3] Williges R C, Wierwille W W. Behavioral measures of aircrew mental workload[J]. Human Factors,1979,21:549 - 574

(下转第 940 页)

体积在整个加载历程中的变化过程. 模拟结果所呈现出的宏观应变软化、应变局部化、自由体积分布和剪切带行为的特点,符合非晶合金自由体积理论预测结果以及实验观察. 本文方法模拟非晶合金剪切带是有效可行的.

## 参考文献(References)


[1] Greer A L. Metallic glasses [J]. Science, 1995, 267(5206): 1947 - 1953

[2] Johnson W L. Bulk glass-forming metallic alloys: science and technology[J]. MRS Bull, 1999, 24(10): 42 - 56

[3] Spaepen F. A microscopic mechanism for steady state inhomogeneous flow in metallic glasses[J]. Acta Metall, 1977, 25(4): 407 - 415

[4] Steif P S, Spaepen F, Hutchinson J W. Strain localization in amorphous metals [J]. Acta Metall, 1982, 30(2): 447 - 455

[5] Hays C C, Kim C P, Johnson W L. Microstructure controlled shear band pattern formation and enhanced plasticityof bulk metallic glasses containing in situ formed ductile phase dendrite dispersions [J]. Phys Rev Lett, 2000, 84(13): 2901 - 2904

[6] Zhang Z F, Zhang H, Pan X F, et al. Effect of aspect ratio on the compressive deformation and fracture behavior of Zr-based bulk metallic glass[J]. Philos Mag Lett, 2005, 85(10): 513 - 521

[7] Liu F X, Liaw P K, Wang G Y, et al. Specimen-geometry effects on mechanical behavior of metallic glasses[J]. Intermetallics, 2006, 14(8/9): 1014 - 1018

[8] Anand L, Su C. A theory for amorphous viscoplastic materials undergoing finite deformations, with application to metallic glasses [J]. J Mech Phys Solids, 2005, 53(6): 1362 - 1396

[9] Gao Y F. An implicit finite element method for simulating inhomogeneous deformation and shear bands of amorphous alloys based on the free-volume model[J]. Modelling Simul Mater Sci Eng, 2006, 14(8): 1329 - 1345

[10] Wu W F, Zhang C Y, Zhang Y W, et al. Stress gradient enhanced plasticity in a monolithic bulk metallic glass [J]. Intermetallics, 2008, 16(10): 1190 - 1198

[11] Dassault Systèmes Simulia Corp. ABAQUS V6.9 User's manual [M]. RI: Dassault Systèmes Simulia Corp, 2009


(编 辑:李 晶)

(上接第 919 页)


[4] CCAR-25-R3 中国民用航空规章第 25 部运输类飞机适航标准[S]
CCAR-25-R3 Civil aviation regulations part 25 airworthiness standards: transport category airplanes[S](in Chinese)

[5] The boeing company. Boeing 737 flight crew training manual [R]. FCT 737 (TM), 2006

[6] The airbus company. A318/A319/A320/A321 flight crew operating manual[R]. Fcom Rev041E, 2008

[7] 《飞机设计手册》总编委会. 飞机设计手册[M]. 北京:航空工业出版社, 2001
General editions of aircraft design manual. Aircraft design manual [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2001(in Chinese)

[8] Obsborne j, Collins S, Ratcliffe M, et al. What "ideas-about-science" should be taught in school science? A delphi study of the expert community[J]. Journal of Research in Science Teaching, 2003, 40(7): 692 - 720

[9] 郭亚军. 综合评价理论、方法及应用[M]. 北京:科学出版社, 2007
Guo Yajun. Comprehensive evaluation theory method and application[M]. Beijing: Science Press, 2007(in Chinese)

[10] 芦垟. 实用模糊数学[M]. 北京:科学技术文献出版社, 1989
Jin Lu. Practical fuzzy math [M]. Beijing: Science and Technology Document Press, 1989(in Chinese)

[11] 王黎静,郭奋飞,何雪丽,等. 大型客机飞行员操作程序综合评价,北京航空航天大学学报, 2010, 36(11): 1436 - 1439
Wang Lijing, Guo Fenfei, He Xueli, et al. Comprehensive evaluation of pilot operation procedures for commercial airliner[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2010, 36(11): 1436 - 1439(in Chinese)


(编 辑:李 晶)