

阀体制造单元研究与应用

袁晓东, 赵保科, 刘 英
(西安航天发动机厂, 陕西 西安 710100)

摘 要: 基于制造单元模式鲁棒性理论, 采用层次分析法 (AHP) 与模糊评价法研究了影响制造单元模式稳定性的因素, 得出了制造单元系统稳定性评判准则, 即制造单元鲁棒性因子 $I_j > 70\%$, 产品不合格率 $< 5\%$, 单元制造过程中生产准备时间 $F_j \leq 0$ 。阀体制造单元模式运行与计算显示阀体制造单元鲁棒性因子 $I_j = 94\%$, 表明: 阀体制造单元系统处于稳定运行状态; 阀体制造单元模式生产周期降低了 78.5%; 生产成本比原来降低了 31.8%; 阀体生产制造与组织管理能力得到了明显提高; 不仅提高了阀体制造生产效率, 亦提高了阀体制造生产经济效益。

关键词: 制造单元; 阀体; 层次分析法; 评判准则

中图分类号: V434-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2015) 06-0073-07

Research and application of manufacturing cell for valve body

YUAN Xiaodong, ZHAO Baoke, LIU Ying
(Xi'an Space Engine Factory, Xi'an 710100, China)

Abstract: Based on the robustness theory of manufacturing cell mode, the factors that affect the stability of the manufacturing cell mode were researched by means of analytic hierarchy process (AHP) and fuzzy evaluation method, and then the stability criteria of manufacturing cell system was obtained, that is, manufacturing cell robustness factor $I_j > 70\%$, product disqualification rate $< 5\%$ and preparation time during cellular manufacturing $F_j \leq 0$. Operation and calculation results of valve body manufacturing cell mode indicate that its robustness factor I_j is 94%, that means valve body manufacturing cell system is in stable operation; the production cycle and cost reduced by 78.5% and 31.8% respectively; the capability of the valve body manufacturing and organization management is significantly improved, which improves valve body production efficiency and economic benefits.

Keywords: manufacturing cell; valve body; analytic hierarchy process; judge criterion

收稿日期: 2014-07-21; 修回日期: 2015-08-10

作者简介: 袁晓东 (1969—), 男, 高级工程师, 研究领域为液体火箭发动机工艺

0 引言

航天产品是以研制和批产并行的模式进行生产的，在该模式下即要完成新产品的开发和研制，又要完成批产产品的生产与交付。为了适应现代数字化制造生产模式，提高生产效率，保证产品质量，则要求对航天产品及其质量进行数字化控制和管理。为此，世界各国著名公司纷纷引入和开发出了数字化制造单元模式，并取得了骄人的技术成果和巨大的经济效益。我们在阀体制造领域通过引入与应用单元制造模式，解决了阀体研制与量产之间的矛盾，缩短了阀体制造周期，减少了在制品，降低了库存，提高了阀体制造生产资源利用率、生产效率和经济效益。

1 单元制造模式运行机理及其系统稳定性评判准则

1.1 单元制造模式运行机理

单元制造模式应用成组理念，将具有相同生产过程的制造任务和制造资源集中在一定的生产面积上，按工艺流程顺序和要求布置生产设备，形成制造单元，通过零件或人员流转以实现具有该工艺流程的一类零件族的系列生产过程，其构成要素一般包括：产品与工艺、设备与设施、布局与物流、人员与组织、文件与数据、环境与安全、生产运作、质量保证，信息化系统等，制造单元的构成要素见图1。单元化制造系统研究的关键过程^[1-4]是对单元运行产品生产特点进行分析，建立工艺布局，进行生产组织，然后进行工艺管理、物流管理、人员管理、设备管理，并制定有效的质量控制措施。在单元试运行或运行一段时间后，对制造单元实施方案进行调整、优化、评估和持续改进，通过单元制造能力的不断提高以实现企业生产能力的持续提升与发展。

鲁棒性概念是英国剑桥大学邓肯·麦克法兰和基恩·格洛弗在二十世纪八十年代应用控制论研究有界系统不确定性衡量程度时提出的概念。两位学者通过研究固定控制器中不确定性对象及其影响因素，最终找到了使其满足控制品质的技术和方法。鲁棒性是指系统在扰动或不确定的情

况下，系统仍能保持行为的能力，即系统的健壮性，它是系统在异常和危险情况下生存的关键因素。在单元制造系统运行之前，必须对制造系统进行鲁棒性计算，以找到导致制造单元系统运行处于非稳定工作状态的因素，并予以控制，将其对系统的影响降低到最小程度。在多品种、中小批量制造模式下，各种不确定性因素（如设备状态变化、人员变动和紧急插单等）均会引发制造单元能力和需求的实时变化，从而导致制造单元中某一工序在某一时间段内停滞，甚至会打乱整个制造单元的生产节拍。所以，不仅需要对当前各个制造单元生产能力和需求进行评估，还需要对一定时间段内制造单元相对变化程度进行预测，即在单元制造系统运行之前，需要研究整个制造生产单元的鲁棒性因子。

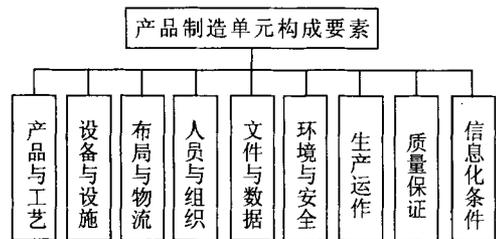


图1 制造单元要素构成示意图
Fig. 1 Manufacturing cell elements

单元制造系统运行过程中，制造单元加工能力越大，不稳定性因素（需求）越少，则该生产单元的鲁棒性更稳定。反之，制造单元鲁棒性更差。依据这一特性，以制造单元加工能力、时间和影响因子为参数，制造单元j的鲁棒性因子I_j的数学模型：

$$I_j = C_j / D_j = \frac{\sum_{i=1}^{N_j} n_{ij} * T_{ij} + \sum_{i=1}^{N_j} C_{cij}(t)}{\sum_{i=1}^{N_j} [n_{ij}(1+f_{ij})E_{ij} + F_{ij}] + \sum_{i=1}^{N_j} C_{Dij}(t)} \quad (1)$$

式中：C_j为制造单元j的生产能力；D_j为制造单元j的生产负荷；N_j为制造单元j所加工的产品种类的数量；n_{ij}为第i种产品在制造单元j所需加工的数量；f_{ij}为第i种产品在制造单元j的不合格品率；E_{ij}为第i种产品在制造单元j所需的单位加工时间；F_{ij}为第i种产品在制造单元j所

需的单位生产准备时间; $C_{Dij}(t)$ 为制造车间实时工况变化引起的制造单元 j 的生产需求时间变动量; T_{ij} 为第 i 种产品在制造单元 j 的计划可用时间; $C_{cij}(t)$ 为制造车间实时工况变化引起的制造单元 j 的生产能力时间变动量。

1.2 单元制造系统稳定性评判准则

影响制造单元鲁棒性因子 I_j 的主要因素有: 产品不合格率 f_j , 产品生产准备时间 F_{ij} 和生产时间变动量 C_{Dij} 。为使制造单元处于稳定工作状态, 需要对这些因素进行量化控制与评价, 制造单元稳定运行的各因素取值范围为: 制造单元鲁棒性因子 $I_j > 70\%$; 产品不合格率 $< 5\%$; 在单元制造过程中, 生产准备时间 $F_{ij} \cong 0$ (在每个零件生产前, 生产过程中所用刀具、数控程序、毛坯均已完成)。实际生产时间变动量 $C_{Dij}(t)$ 要基于设备、人员、过程、质量等全面考虑, 一般要求实际生产时间变动量 $C_{cij}(t) \leq$ 计划生产时间变动量 $C_{Dij}(t)$ 。

制造单元建立后, 必须定量描述以单元为核心的制造模式的制造能力, 制定合理的评价指标, 通过对指标的评价以发现制造单元的薄弱环节, 并采取有效措施予以解决, 保障制造单元长远发展。单元制造的评价指标选取原则要遵循持续改进的思想与理念, 评价指标要体现企业在实施单元前后的综合制造能力。选取了 2 个一级指标, 11 个二级指标 (见图 2), 作为单元制造的评价指标体系。

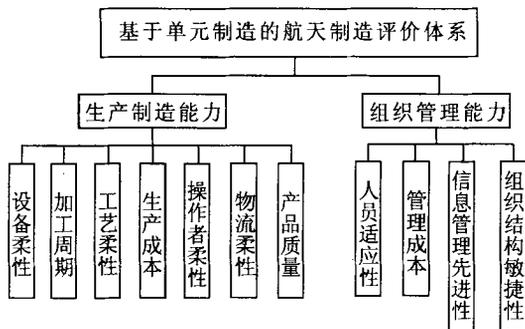


图 2 单元制造评价指标层次结构图

Fig. 2 Hierarchical structure of cellular manufacturing evaluation indexes

单元化制造系统作为一个复杂系统, 需要采

用科学的评价方法, 对评价指标和实施标准进行评价与评判。目前多指标综合评价有六类方法, 即层次分析法、灰色系统评价法、模糊综合评价法、主因素分析法、人工神经网络和基于粗糙集理论的评价方法。制造单元评价指标之间具有复杂的阶梯层次结构关系, 指标数量多, 既有定性指标又有定量指标, 为此采用层次分析法 (analytic hierarchy process, AHP) 研究和分析阀体制造单元指标之间的层次关系。例如生产能力一般划分为: 加工制造周期、生产成本和设备柔性等, 设备柔性又分为设备扩充性和通用性, 采用层次分析法可以进行多级指标权数确定。单元制造系统中存在着许多模糊因素, 仅仅通过定性或者定量很难对系统性能直接进行评判, 如对所构建单元化制造系统敏捷性评判, 一般是采用模糊评价法中的隶属函数和隶属度概念来解决这种模糊因素问题的。该方法以精确的数学语言定性描述不确定因素, 解决了各项指标量纲统一化的问题^[9]。

制造单元指标评价方法为三级模糊综合评价法, 三级模糊综合评价模型见公式 (2) ~ 公式 (4)。

一级模糊评价模型

$$\tilde{B}_j = W_{jst} \tilde{R}_{js} = (w_{j1} \cdots w_{jst}) \begin{pmatrix} r_{js1} \\ \vdots \\ r_{jst} \end{pmatrix} = b_{js} \quad (2)$$

二级模糊评价模型

$$\tilde{B}_j = W_{jst} \tilde{R}_j = (w_{j1} \ w_{j2} \cdots w_{js}) \begin{pmatrix} r_{j1} \\ r_{j2} \\ \vdots \\ r_{js} \end{pmatrix} = b_j \quad (3)$$

三级模糊评价模型

$$\tilde{B} = W_j \tilde{R}_j = (w_1 \ w_2) \begin{pmatrix} r_1 \\ r_2 \end{pmatrix} = b \quad (4)$$

式中: j 表示一级指标数; s 表示二级指标数; t 表示三级指标数; w_{jst} 表示指标的评价分值; r_{jst} 表示评价指标的之间关联值。

2 阀体制造单元

在液体火箭发动机中,电磁阀控制推进剂或控制气体进入推力室、燃气发生器和其他部件,关闭时切断推进剂或控制气体的供应。因此,阀体加工精度直接影响着发动机工作的可靠性。电磁阀阀体年产量为数千件,种类几十余种,采用阀体制造单元模式进行生产。

2.1 阀体结构

电磁阀阀体两端为磁性材料,中间为隔磁材料,通过焊接连成一体,由入口接嘴、绕线窗口、引线槽、对外接口(法兰或接嘴)、阀芯、挡铁、阀座密封和电磁响应部分组成,阀体内腔与阀芯装配精度要求为 μm 量级,阀体结构见图3。根据电磁阀阀体结构类似性,将阀体分为3类,即铣法兰型,简单型和铣法兰+侧嘴型。

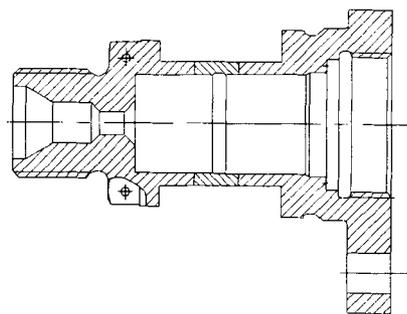


图3 阀体结构示意图

Fig. 3 Valve body structure

2.2 阀体制造单元

2.2.1 阀体制造单元工艺流程

为适应单元化生产,遵循使每一个工序和其他工序能够实现同步化流动生产,即实现“一个流”生产作业,必须对三类阀体进行单元化制造工艺流程优化。表1为阀体制造工艺流程。

表1 阀体制造工艺流程

Tab.1 Technological process of valve body manufacturing

| 零件名称 | 机加工序数量 | 工序数量 | 机床 |
|------|------------------|-------|------------|
| 阀体 | 19个工序(传统机加工工艺流程) | 6个车加工 | 6台车床 |
| | | 3个铣加工 | 3台铣床 |
| | | 10个钳工 | 2个钻床 1台刻字机 |
| | 7个工序(单元制造模式工艺流程) | 5个车工序 | 4台数控车床 |
| | | 1个铣工序 | 1台数控铣床 |
| | | 1个钳工序 | 1台钻床 |
| | | | |

由表1可见,将原19个传统机加工序流程优化缩减为7个单元制造模式流程工序,优化后的单元制造模式流程工序为7个,单元制造模式流程工艺流程框图见图4。

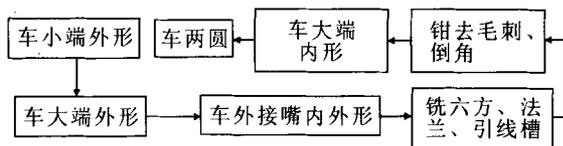


图4 阀体单元制造工艺流程框图

Fig. 4 Flow sheet of valve body cellular manufacturing

2.2.2 阀体制造单元设备布局

在进行设备布局前,必须对设备负荷能力进行计算。根据图4阀体单元制造工艺流程框图,对阀体单元的负荷能力进行统计计算,计算结果见表2。

图5是阀体制造单元设备负荷能力柱状图,由图5可见,阀体流水线的平均生产能力为20件/天。

电磁阀阀体U形单元平面布局见图6。

表 2 单元化加工工序内容及设备负荷能力表

Tab. 2 Cellular manufacturing processes and facility loading capacity

| 工序号 | 工序内容 | 工序用时/min | 使用机床 | 机床负荷 (件/天) | 备注 |
|------|------------|----------|-------------|------------|-----------------------------|
| 工序 1 | 车小端外形 | 5 | S1-360 数控车床 | 120 | |
| 工序 2 | 车大端外形 | 10 | S1-360 数控车床 | 30 | |
| 工序 3 | 车外接嘴内外形 | 28 | EX108 数控车 | 21 | 工序 2 和工 序 7 合并在一 个机床上 |
| 工序 4 | 铣六方、法兰、引线槽 | 30 | GX1000 数控铣床 | 20 | |
| 工序 5 | 去毛刺、倒角 | 28 | 钻床 | 21 | 加工 |
| 工序 6 | 车大端接嘴内外形 | 30 | T42 车加工中心 | 20 | |
| 工序 7 | 车两圆 | 5 | S1-360 数控车床 | 30 | |

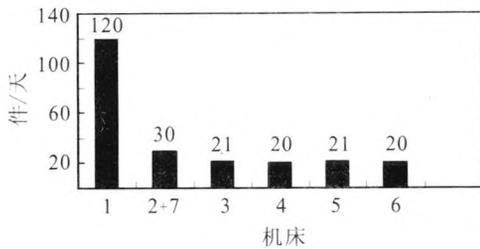


图 5 阀体制造单元设备负荷能力柱状图

Fig. 5 Histogram for facility loading capacity of valve body manufacturing cell

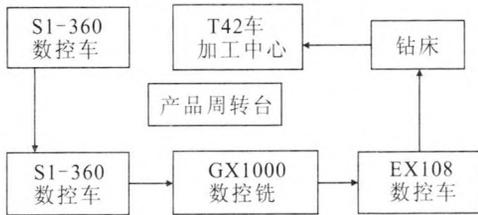


图 6 阀体制造单元设备布局图

Fig. 6 Facility layout of valve body manufacturing cell

2.2.3 阀体制造单元管理

在阀体制造单元内, 工艺管理采用工艺规程进行工序拆分, 单元化内每位操作者均可以看到用于指导本工序操作的工艺规程。操作者对刀具和工装进行管理, 并定期更换与检查。物流管理由操作者负责, 采用“拉式生产”, 单件流转, 操作者自行传递产品。

2.2.4 阀体制造单元质量控制

在阀体量产前, 实施首件三检, 以确认数控加工程序和刀具选择的正确性, 然后进行单元化批量加工。操作者对加工的零件进行 100% 自检, 自检工序步骤被列入节拍, 并明确为标准动作。专职检验员在单元制造过程中, 进行巡检, 并完成 10% 产品的抽检任务。在单元完成制造后, 对产品实施全尺寸测量。

阀体制造单元在 7 个工序之间设置了一名专门检验员, 对产品进行首检、巡检和抽检。单元完成制造后, 产品进入总检, 由专职检验员进行全检。

2.2.5 阀体制造单元鲁棒性因子 I_j 计算

依据制造单元鲁棒性控制模型, 对阀体制造单元鲁棒性因子按公式 (1) 进行了计算。阀体制造单元阀体品种有三种, 即 $N_j=3$, 其他各因子依据阀体制造单元系统实际运行值来确定, 可计算得出阀体制造单元鲁棒性因子 I_j , 见表 3。

制造单元鲁棒性因子 $I_j > 70%$ 标志着制造单元系统运行处于稳定状态, 由表 3 可见, 阀体制造单元的鲁棒性因子 $I_j=94%$, 表明阀体制造单元系统处于稳定运行状态。

3 阀体制造单元运行结果

图 7 是阀体制造单元加工周期与合格率统计结果。由图可见, 阀体制造单元生产效率提高了 5 倍, 产品合格率为 99.5%。

表3 阀体制造单元鲁棒性因子计算结果

Tab. 3 Calculation results of robustness factor for valve body manufacturing cell

| 因子 | N_j | n_{ij}/min | f_{ij} | E_{ij} | F_{ij}/min | $C_{Dij}(t)/\text{min}$ | T_{ij} | $C_{Cij}(t)$ |
|-------|-------|---------------------|--------------|-------------|---------------------|-------------------------|-------------|--------------|
| 影响因素 | 3 | $n_{11}=126$ | $f_{11}=1\%$ | $E_{11}=30$ | $F_{11}=5$ | $C_{D11}=20$ | $T_{11}=20$ | $C_{C11}=20$ |
| | | $n_{21}=123$ | $f_{21}=0$ | $E_{21}=35$ | $F_{21}=10$ | $C_{D21}=15$ | $T_{21}=15$ | $C_{C21}=30$ |
| | | $n_{31}=126$ | $f_{31}=0$ | $E_{31}=32$ | $F_{31}=10$ | $C_{D31}=20$ | $T_{31}=20$ | $C_{C31}=20$ |
| I_j | 94% | | | | | | | |

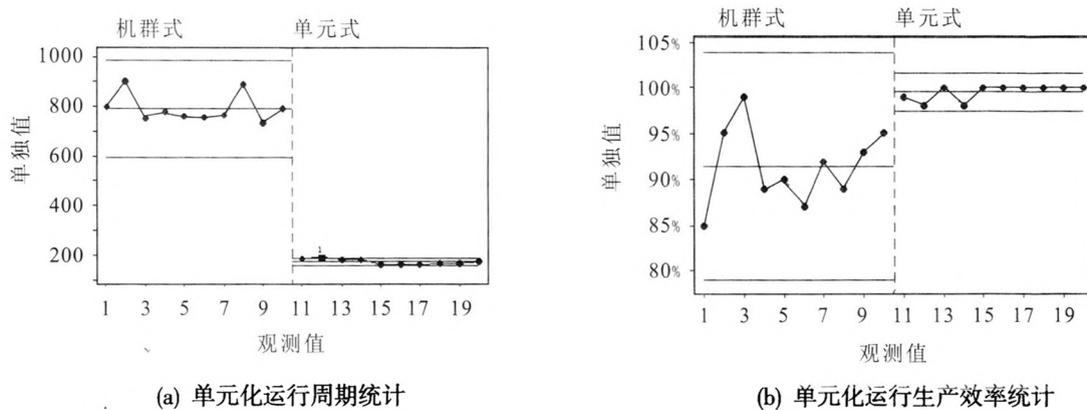


图7 阀体制造单元加工周期与合格率统计结果

Fig. 7 Statistical results of production cycle and qualification rate of valve body manufacturing cell

阀体制造单元制造周期评分与生产成本评分计算。

加工制造周期评分：

$$Tb' = \frac{1/Tb}{1/Tb+1/Tc} \times 10 = \frac{1/791.8}{1/791.8+1/179.1} \times 10 = 1.84$$

$$Tc' = \frac{1/Tc}{1/Tb+1/Tc} \times 10 = \frac{1/179.1}{1/791.8+1/179.1} \times 10 = 8.15$$

(5)

式中： Tb' 为传统机加模式制造周期评分值； Tc' 为单元制造模式制造周期评分值； Tb 为传统机加模式制造周期； Tc 为单元制造模式制造周期。

生产成本评分：

$$Cb' = \frac{1/Cb}{1/Cb+1/Cc} \times 10 = \frac{1/968}{1/968+1/560} \times 10 = 3.64$$

$$Cc' = \frac{1/Cc}{1/Cb+1/Cc} \times 10 = \frac{1/560}{1/968+1/560} \times 10 = 6.34$$

(6)

式中： Cb' 为传统机加模式生产成本评分值； Cc' 为单元制造模式成本评分值； Cb 为传统机加模式生产成本； Cc 为单元制造模式生产成本。

计算结果表明： $Tb' < Tc'$ ， $Cb' < Cc'$ ，即阀体制造单元模式生产周期和成本均降低了。

根据一级、二级、三级模糊综合评价模型公式(2)~(4)和单元制造的评价能力指标层次结构图2中的指标，计算阀体单元制造模式与传统机加工模式生产制造能力和组织管理能力 b' 与 b 值。

$$b = (5.42 \quad 6.32) \begin{pmatrix} 5.37 \\ 4.98 \end{pmatrix} = 60.579 \quad (7)$$

$$b' = (6.79 \quad 5.14) \begin{pmatrix} 7.32 \\ 8.42 \end{pmatrix} = 92.98 \quad (8)$$

计算结果表明： $b' > b$ ，即阀体制造单元模式生产制造与组织管理能力均优于传统机加模式。

4 结论

以制造单元模式鲁棒性理论为基础,采用层次分析法 (Analytic hierarchy process, AHP) 与模糊综合评价法研究了影响制造单元系统稳定性的因素,得出了制造单元系统稳定性运行的评判准则,即制造单元鲁棒性因子 $I_j > 70\%$, 产品不合格率 $< 5\%$, 生产准备时间 $F_j \cong 0$ 。阀体制造单元模式的运行和计算表明: 阀体制造单元鲁棒性因子 $I_j = 94\%$, 表明阀体制造单元系统处于稳定运行状态; 阀体制造单元模式生产周期降低了 78.5%; 生产成本比原来降低了 31.8%; 阀体生产制造与组织管理能力得到了明显提高; 不仅提高了阀体制造生产效率, 而且提高了阀体制造生产经济效益。

参考文献:

- [1] 刘飞. 先进制造系统[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2006.
 - [2] 王国平, 胡新平. 首都航天机械公司集成制造系统顶层设计[J]. 航天制造技术, 2005: 9-10.
 - [3] 王国平, 胡新平, 刘欣, 等. 传统组件制造单元在首都机械公司的实践[J]. 航天制造技术, 2006: 4-6.
 - [4] 周平来, 刘胤, 尉世厚, 等. 太阳翼基板单元制造模式实践研究[J]. 航天制造技术, 2012(12): 5-7.
 - [5] 刘志峰, 李钢. 绿色设计与绿色制造[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999.
 - [6] 刘胜军. 精益“一个流”单元生产 [M]. 深圳: 海天出版社, 2009.
 - [7] 刘志峰, 李钢. 绿色设计与绿色制造[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999.
 - [8] 马玉敏, 陈斌森. 单元化制造系统评价体系[J]. 同济大学学报, 2003(11): 1324-1327.
-
- [9] IBRAHIM A A, JOG M A. Nonlinear breakup model for a liquid sheet emanating from a pressure-swirl atomizer[J]. Journal of Engineering for Gas Turbine and Power, 2007, 129(4): 945-953.
 - [10] 刘娟, 孙明波, 李清廉, 等. 基于 VOF 方法分析离心式喷嘴结构参数对性能影响[J]. 航空动力学报, 2011, 26(12): 2826-2833.
 - [11] STAPPER B E, SOWA W A, SAMUELSON G S. An experimental study of the effects of liquid proportion on the breakup of a two-dimensional liquid sheets [J]. ASME Journal of Engineering of Gas Turbines and Power, 1992, 114(1): 39-45.
 - [12] RIZK N K, LEFEBVRE A H. Prediction of velocity coefficient and spray cone angle for simplex swirl atomizers[J]. International Journal of Turbo and Jet Engines, 2004(1/2): 65-74.
 - [13] 张贵田. 高压补燃液氧煤油发动机[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
 - [14] KIM D, IM J H, KOH H. Effect of ambient gas density on spray characteristics of swirling liquid sheets[J]. Journal of Propulsion and Power, 2007, 23(3): 603-611.
 - [15] YOON Y, JEUNG I S. Effects of ambient gas pressure on the breakup of sprays in like-doublet and swirl coaxial injectors [C/OL]. International Symposium on Energy Conversion Fundamentals. Istanbul, Turkey, June 21-25, 2004[2015-03-02]. <http://www.researchgate.net/publication/235065914>.
 - [16] 刘娟, 李清廉, 王振国, 等. 基于 VOF 方法模拟离心式喷嘴内部流动过程[J]. 航空动力学报, 2011, 26(9): 1986-1994.

(编辑: 王建喜)

(上接第 26 页)

(编辑: 陈红霞)