

# 基于 TOC 及启发式规则的生产计划与控制方法

## Production Planning and Control Method Based on TOC and Heuristic Rules

北京航空航天大学机械工程及自动化学院 芮剑锋 杨建军  
中航工业庆安集团公司 石艳

**[摘要]** 为解决复杂产品制造系统面临的多品种、小批量的生产计划与控制问题,参考 APS 的计划模型,提出了一种基于 TOC 及启发式规则的生产计划与控制方法。该方法通过在不同的计划与调度层面集成传统生产计划与控制方法、TOC 理论和启发式规则的特性,辅助车间快速有效地实现生产作业控制。该方法最终实现于制造执行系统(MES)平台,通过在某制造企业的应用,验证了其可行性和有效性。

**关键词:** 计划与控制 TOC 启发式规则

**[ABSTRACT]** To solve the problem of production planning and control with multi-variety and small batch in a complex product manufacturing system, a production planning and control method based on TOC and heuristic rules are proposed from the reference to the APS model. This method integrates the traditional production planning and control methods, TOC theory, and the characteristics of heuristic rules in different planning and dispatch layers, so the assisting workshop can rapidly and effectly realize the production control. This method implements in MES platform. After an effective application in a manufacturing enterprise, its feasibility and effectiveness are verified.

**Keywords:** Planning and scheduling TOC Heuristic rules

复杂产品制造系统多采用面向订单、多品种、小批量的生产组织方式;具有产品设计和制造周期较长、结构与工艺差异较大、工艺稳定和工艺定额数据精准性差、在制数量庞大、生产安排困难等特点,使生产计划与作业的控制面临极大的挑战。如何解决复杂环境下生产计划与控制,是需要进行深入研究的问题。

针对这些存在的问题,众多学者基于 MRP、JIT、TOC、APS 等理论提出了各种计划与控制方法,研究的重点包括模式探索、算法改进、模型研究等,然而这些成果在实际生产中的有效应用并不广泛<sup>[1-2]</sup>。主要的原因包括以下几个方面:现有的研究往往比较注重理论本身或者算法相关问题,很少关注企业系统性的应用研究;

现有研究中所采用的调度方法往往在性能上难以适应车间大数据量的计算需求,而且算法的柔性较差,鲁棒性不足;所开发调度系统在用户的体验与交互性方面有所欠缺,难于支撑用户对系统边界条件的补充定义、求解结果和过程的干预。

基于 APS 的原理,针对复杂产品制造系统计划不稳定的情况,尝试针对实际生产车间的应用需求建立一种基于约束理论(TOC)及启发式规则的生产计划与控制方法。该方法在计划层面采用 MRP 计算需求,在随后的作业控制中融入 DBR 方法,通过在交货期约束下的瓶颈资源排产拉动非瓶颈资源的排序,帮助企业提高产销率;瓶颈资源的任务快速排产和非瓶颈资源的任务快速排序采用可配置的启发式规则组合模型,利用启发式规则调度简单、快速、灵活的特点,快速实现车间生产任务的基于有限能力的计划与调度。

## 1 计划与控制方法概述

### 1.1 传统方法的不足及 APS 的提出

在现有的 ERP 中,通常将计划按照时间的长短分成不同的阶段,采用了物料需求计划、能力需求计划、有限能力排程等手段来达到满足订单的目的<sup>[3]</sup>。这种控制模式对于产品结构稳定、成品类型少且组合件类型少的生产企业较为适用,而对于生产不稳定且产品类型与数量庞大的企业而言,这种模式则难以满足其需求。

高级计划与排程(APS)的出现在一定程度上弥补了这一缺陷。APS 是一种基于供应链管理和约束理论的先进计划与排产工具,包含了大量的数学模型、优化及模拟技术,优势在于基于约束的实时计划与预警功能。通过与现有的 ERP 及 MES 系统的集成,APS 能够很好地解决复杂产品制造系统中的生产计划与控制方面的难题,有关 APS 的文献目前已经很多,是当前生产计划与控制领域的一个研究热点。采用 APS 的计划与控制模型见图 1。

### 1.2 基于 TOC 及启发式规则的计划与控制方法

APS 通用的模型在实现层面采用了以下 3 种模式:(1)基于模拟仿真的模式;(2)基于 TOC 的模式和扩展;

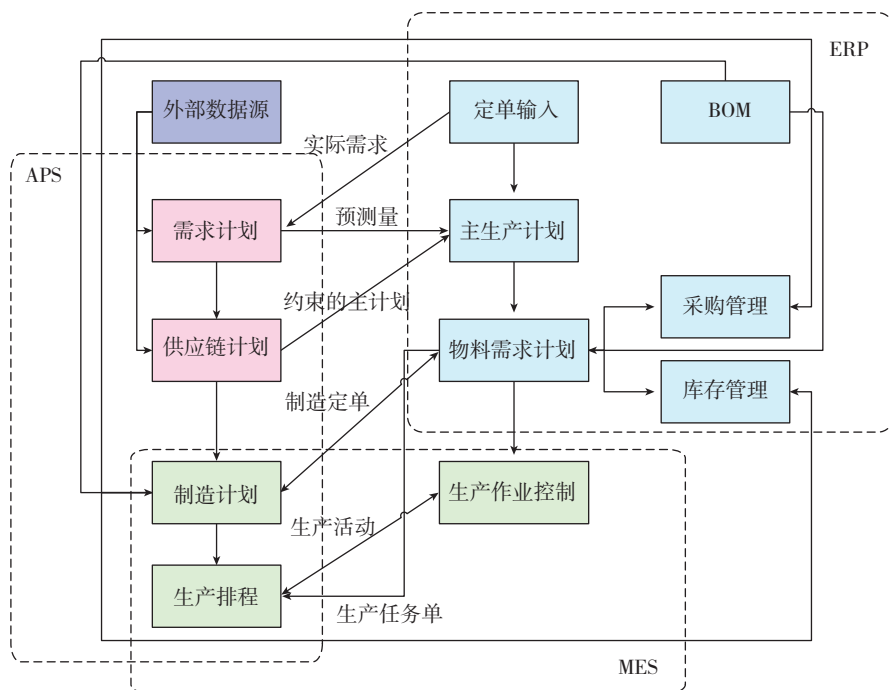


图 1 APS下的计划与控制模型  
Fig.1 Planning and control model under APS

这种方法在框架上参考了 APS 的通用模型,对具体功能进行了细化,同时针对企业的应用现状做了一些适用性的调整。总的来说,这一方法结合了传统计划方法、TOC 理论以及启发式规则的优点:MRP 模式能够得到面向订单和订单交付的每一项零部件精确的净需求;而 TOC 则抓住了生产过程中瓶颈资源制约的关键环节,最大程度地提高有效产出,实现全局优化;启发式规则的应用使车间作业控制更加灵活、快速和柔性。

## 2 基于 TOC 的计划控制方法

基于 TOC 与启发式规则的生产计划与控制方法的车间控制层面采用了 TOC 理论中的 DBR 方法。DBR 是一种基于 TOC 理论,以系

(3) 基于数学建模 - 算法的模式<sup>[4]</sup>。3 种模式中 TOC 模式较适用于多品种、小批量、具有多层 BOM 的复杂产品制造环境。本文参考 APS 的通用计划模型,采用 TOC 理论作为基础,同时针对 TOC 理论在瓶颈资源快速排产和非瓶颈资源快速排序方面的不足,结合基于规则的启发式调度,提出了基于 TOC 和启发式规则的离散制造车间计划与控制方法,见图 2。

基于 TOC 及启发式规则的计划与控制方法的核心,是利用瓶颈资源拉动车间整体计划和有效产出。在长期计划层面以 MRP 为核心,采用订单—主生产计划—物料需求计划的经典模式得到零部件的净需求<sup>[5]</sup>,随后可利用 TOC 缓冲模型的发货缓冲和装配缓冲计算出零部件的齐套/交付计划<sup>[6]</sup>。在短期作业控制层面以 TOC 为核心,以短期计划窗口期内的任务为输入,利用齐套/交付计划进行负荷计算并辨别瓶颈资源,随后利用启发式规则调度进行瓶颈资源的有限能力排产,基于排产的结果和交付计划,再次利用启发式规则对非瓶颈资源进行作业排序,最后在瓶颈排产与非瓶颈排序的作业指导下进行车间的作业控制,并将加工信息反馈到系统中来,为下一轮的作业控制提供实时信息。

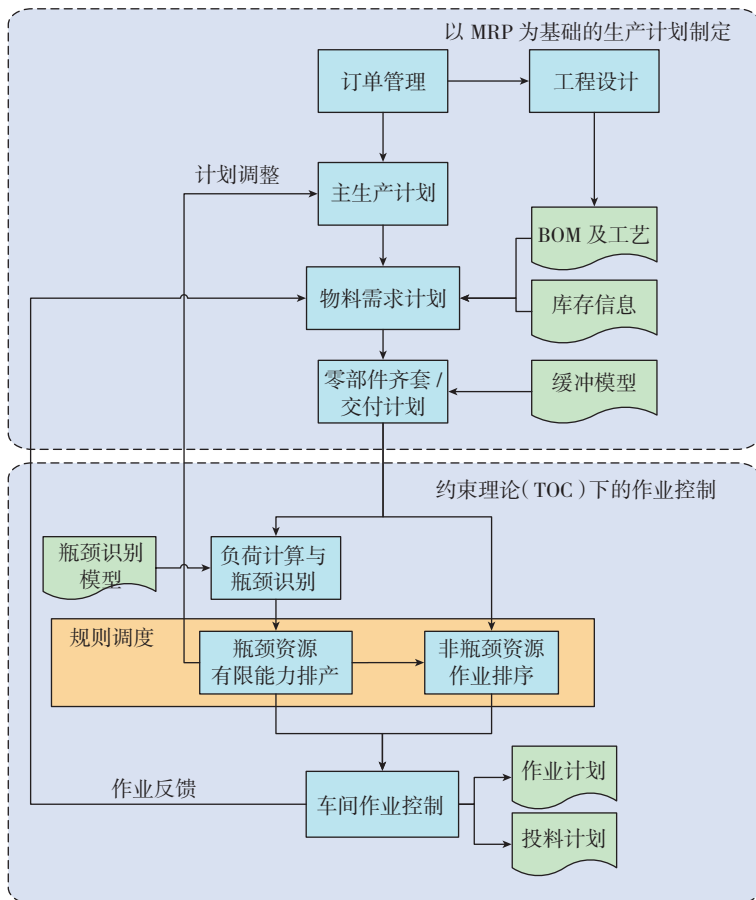


图 2 基于TOC和启发式规则的计划与控制方法框架  
Fig.2 Planning and control method frame based on TOC and heuristic rules

统瓶颈为重点,围绕制约环节挖潜进行整体优化并实现持续改善的一套工作方法<sup>[7]</sup>。本文主要针对多瓶颈下 DBR 的实现问题进行讨论。

### 2.1 多瓶颈下的 DBR 实现

现有 DBR 方法大多考虑单个瓶颈下的计划与控制,但实际的系统中往往存在着多个瓶颈,且这些瓶颈之间存在着一定的工艺顺序关联,这种情况下的 DBR 系统实现更为复杂。

多瓶颈资源下的排产方法主要包括 3 个步骤:首先,针对所有瓶颈资源进行短周期的粗排产;然后,在排产结果中分析瓶颈资源的任务之间是否存在顺序关联,针对存在顺序关联的瓶颈资源工序,计算其工序间的松弛分配情况;最后,针对过松或过紧的松弛分配,调整排产并得到最终的排产结果。

在瓶颈资源排产的基础上,还要针对多瓶颈下的作业控制提出相关的策略。以 2 个瓶颈同时存在于某一产品的工艺路线中为例,可以将产品的所有工序分为瓶颈前工序、瓶颈间工序以及瓶颈后工序。对于瓶颈前工序,采用拉式作业控制;对于瓶颈后的工序,采用推式作业控制;对于瓶颈间的工序,以前、后瓶颈的计划节点为基点,按照前紧后松的策略确定各个工序的计划节点,保证瓶颈计划的实行。多瓶颈下的生产计划与控制示意图见图 3。

### 2.2 DBR 的其他关键问题

复杂产品制造系统的一个很大的特点是生产物流的不稳定性和不平衡性,而这正是 TOC 理论以及 DBR 方法关注的重点——追求物流的平衡。为了有效地实施 DBR 方法,达到上述要求,还需要在瓶颈识别、瓶颈资源排产、非瓶颈资源的作业排序等方面深入研究。

#### (1) 瓶颈资源的识别。

首先利用 MRP 方法,在无限能力的条件下给出粗略的物料需求计划,进而得出各个工作中心在未来一段时间的总负荷,根据相关经验,按照前松后紧的策略将

负荷分布在时间轴上,可得到工作中心基于时间轴的负荷率曲线,由此分析出瓶颈所在。

#### (2) 瓶颈资源的有限能力排产。

在瓶颈资源任务量较少时,可以根据人工的经验进行手工排产;而当任务量较大,工艺、工时数据不太准确的情况下,可采用启发式的规则调度,计算量小且快速,但无法保证结果的质量;当工艺、工时数据十分准确时,可采用人工智能优化算法。无论采用何种策略,首要目标都是最大程度地保证瓶颈资源的高利用率,同时兼顾成本、时间等相关目标。

#### (3) 非瓶颈资源的作业排序。

对于非瓶颈资源而言,应当基于瓶颈资源的排产计划以及零部件的齐套 / 交付计划制定自身的作业计划,这样同时保证了瓶颈资源的计划执行和零部件的按时交付;此外,作业排序还应该同时兼顾调度中一些常见的目标,如成本、制造周期等,因此还需将一些辅助的规则(成本相关、工时相关等)应用到作业排序中来。上述需求可以利用启发式规则的分层组合实现。

## 3 启发式规则的分层组合

DBR 方法中,瓶颈资源的排产和非瓶颈资源的作业排序是两个重要的步骤,这两部分内容中,启发式规则都起到了重要的作用。

启发式规则调度的优点是不必进行大量的计算,避开了“组合爆炸问题”,只要选择了合适的规则便可产生相应的调度策略,方便易行<sup>[8]</sup>。本文在现有的启发式规则的基础上,采用了可配置的分层规则作用方式,提高启发式规则应用的有效性和适应性。

### 3.1 可配置的分层规则

目前确定的调度规则已经超过 100 多种,其中运用较为广泛的主要有 FCFS、SPT、LPT、EDD、SCR、MWKR、LWKR 及 MOPNR 等。不同的调度规则具有不同适用条件,用于满足不同的调度目标。单独的规则作

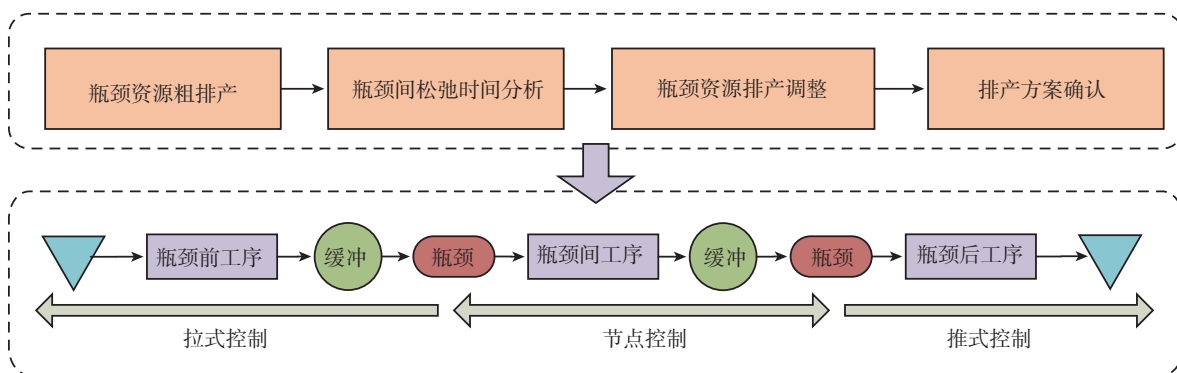


图 3 多瓶颈下的 DBR 方法

Fig.3 DBR method under multi-pottleneck

用往往只能满足一类目标,而在现有规则的基础上做一些新的方法设计则能得到改善。本文采用一种可配置的分层组合法,将现有的基本调度规则按照当前需求组合起来,用于车间现场的调度。分层组合法示意图如图4所示。

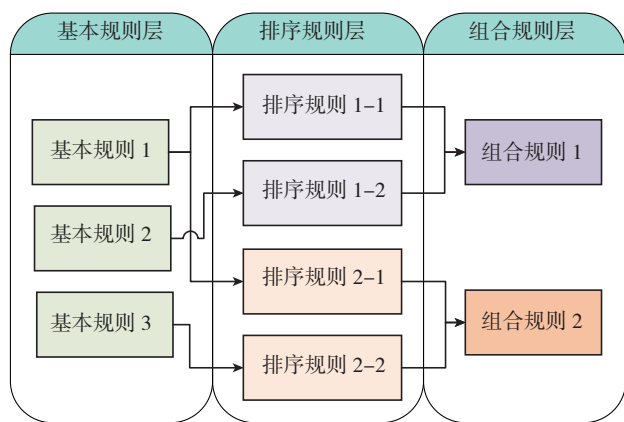


图4 启发式规则的分层组合  
Fig.4 Layer combination of heuristic rules

基本规则层可配置多个常用的基本规则,如FCFS、SPT、EDD等,按照其标准的公式计算出在制任务的基本优先级;在基本规则的基础上,根据实际的经验对其基本优先级的数值进行敏感度设置和数值过滤,得到多个排序规则,通常可定义2个,分为主排序规则和辅助排序规则,分别考虑首要因素和次要因素;组合规则层将各个排序规则按照次序组合起来,并最终指派到相关的车间或资源,通过不同的作用方式,生成任务队列,指导车间或资源的派工与生产准备。

在具体实现时,采用面向对象的软件设计原则,将基本规则抽象为接口,供排序规则调用;在排序规则层,调用基本规则的接口获取基本优先级,设置数值敏感度及相关限制值,得到排序优先级;最终在组合规则层中按照一定的作用方式完成对作业任务的排序。上述各个参数及相关接口的实现都可以由用户按照自身需求进行配置,提高了启发式规则的适用性。

### 3.2 分层规则的作用方式

指派到车间或资源的组合规则可以有多种不同的作用方式,较为实用的有顺序作用方式和查表作用方式。两种作用方式示意图见图5。

#### (1) 顺序作用方式。

顺序作用方式按照排序规则的主次顺序依次计算任务的优先级。在生成任务队列时,首先按照主排序规则的优先级排序,得到一个较为粗略的队列;随后按照辅助排序规则的优先级排序,对已有队列进行更为细致的划分。以非瓶颈资源的作业排序为例,主规则应该基

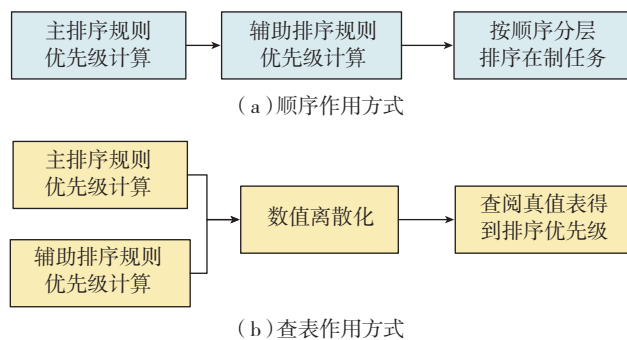


图5 两种不同的规则作用方式  
Fig.5 Action mode of two different rules

于瓶颈资源排产和零件的产出计划来制定,辅助规则可以考虑工时优先规则,提高非瓶颈资源的加工流畅性。

#### (2) 查表作用方式。

查表作用方式综合考虑主排序规则和辅助排序规则,将两者的值组合起来,通过查阅定义好的真值表得到最终的排序优先级。这种方式实际上平等地考虑了2个排序规则,没有主次之分。基本规则计算出来的值需要对其进行离散化,将其分为不同的等级。需要注意的是,等级的划分不可过细,避免维护大量的真值表数据,而且过细的数据分级在实际应用中并没有太大的意义。

两种作用方式各有特点。顺序作用方式按照主次顺序考虑控制目标,层次分明、逻辑清晰;查表作用方式同时兼顾2种控制目标,详细定义每一种组合下的优先级,能够将实际的经验很好地融入系统,但需要定期人工维护真值表。

## 4 系统实现与验证

为了验证上述方法在实际生产中的应用效果,本文在MES系统中构建了基于上述方法的计划与调度子系统,并在相关工厂进行了应用与验证,见图6。

该系统基于J2EE平台,采用了Spring等开源框架,具有很好的开放性。在模型层,参考PSLX规范及SP95规范实现了相关的数据模型,具有很好的通用性,能够表达离散制造车间中的大多数问题;在核心业务逻辑层,构建了大量的通用业务接口,供上层业务逻辑调用;在表现层,使用了JSP、报表工具、JGantt插件等多种展现工具,提供了良好的用户图形化接口。

该系统在某航空制造企业中得到了应用。该企业现有的产品种类达1000多个,零件的制造周期平均在3个月左右,在制零件批次数量长期保持在3万以上,面临着较大的供货压力。通过系统在该企业的实施,零组件的准时交付率达到90%以上,零件生产周期平均缩短了30%左右,证明了本文论述方法的有效性与实用性。

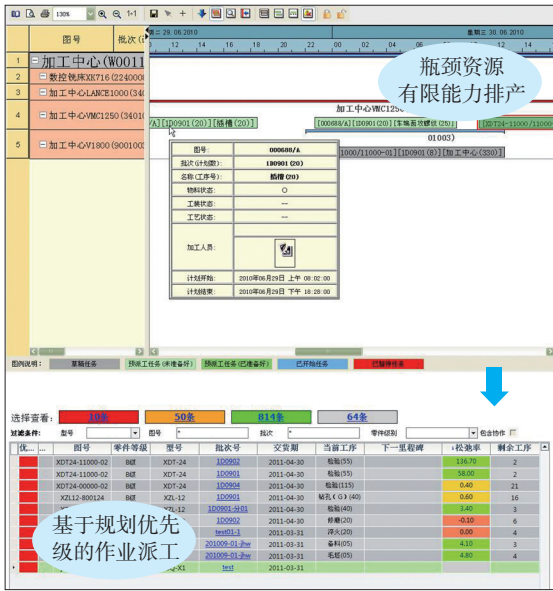


图 6 MES中的车间计划与调度子系统典型界面  
Fig.6 Typical interface of workshop planning and dispatch subsystem in MES

## 5 结束语

本文分析了复杂产品制造系统的生产计划与控制的应用现状,总结了在实际应用方面的难点与不足;尝试建立基于 TOC 及启发式规则的复杂产品制造系统生产计划与控制方法;设计实现了相关计划与调度系统(或软件模块)并在工厂得到了应用。经实践证明,该方法对解决多品种、小批量离散制造企业在基础数据缺乏、数据样本庞大、扰动因素繁多环境下的车间计划与控制问题具有较好的应用前景和价值。

### 参考文献

[1] 刘亮,齐二石.基于 APS 与 MES 集成的车间生产计划和调度方法研究.制造技术与机床,2006(9),24-28.  
 [2] Sehrageheim E, Cox J, Ronen B. Process flow industry scheduling and control using theory of constraints. International Journal of Production Research, 1994, 32 (8): 1867-1877.  
 [3] Wiendahl H P. 面向负荷的生产控制.肖田元,范玉顺,姚小冬,译.北京:清华大学出版社,1999.  
 [4] 蔡颖.ERP 高级计划:APS 供应链优化引擎.广州:广东经济出版社,2004.  
 [5] Rondeau P J, Litteral L A. Evolution of manufacturing planning and control systems: From reorder point to enterprise resource planning. Production and Inventory Management Journal, 2001, 42(2): 1-7.  
 [6] 李爱华,尹柳营.DBR 技术中确定缓冲大小的模型.中国管理科学,1998,6(1):16-20.  
 [7] Sehrageheim E, Ronen B. Drum-buffer-rope shop floor control. Production and Inventory Management Journal, 1990 (3): 18-22.  
 [8] 吴秀丽.柔性作业车间动态调度问题研究.系统仿真学报,2008,20(14):3828-3829.

(责编 深蓝)

(上接第 75 页)

表 10 压力表 BYQ-21 主要技术参数

序号	项目	技术参数值
1	压力测量范围	0~25MPa
2	使用温度	-55~80℃
3	寿命指标	8 年 /2500 飞行小时
4	保证期	2 年 /250 飞行小时
5	常温时检测点上的允许误差	检测点为 10MPa 时为 ± 1MPa
6	环境适应性	通过了 GJB150 规定的环境试验

(4)按照 GJB150 要求,结合灭火瓶的实际工作环境,完善灭火瓶的试验技术条件,完善结果如表 11 所示。

表 11 改进前后球形灭火瓶的试验技术条件

项目	原技术条件	改进后技术条件	备注
工作温度	-55 ~ +60 ℃ (不符合 GJB)	按 GJB150 要求改为 -55 ~ +70 ℃	
冲击试验	不符合 GJB150.18-1986	按 GJB150.18-1986 要求 确定试验条件	每年抽 2 件 进行
振动试验	不符合 GJB150.16-1986	按 GJB150.16-1986 要求 确定试验条件	每年抽 2 件 进行
停放试验	常温下停放 72h 后进行重量和压力 检查	常温下停放 72h 后进行 重量和压力检查;增加高 低温环境下的停放检查 要求	每批抽 2 件, 高低温停放 时间分别不 少于 4h

## 4 设计改进验证结果

按设计改进后的新结构新标准生产球形灭火瓶,进行地面验证试验和装机验证试验。

### 4.1 地面验证试验

用 2 件改进后的球形灭火瓶,进行地面验证试验。试验项目包括:常温、高温、低温环境下的密封性能试验,高温工作性能试验,冲击试验,振动试验。试验过程及试验后灭火瓶状态正常,未出现安全阀自爆和压力表泄漏等故障。

### 4.2 装机验证试验

将 24 件(3 架机)改进后的球形灭火瓶装机使用,连续 6 个月跟踪检查它们的工作情况。截至目前,外场反映改进后的灭火瓶装机工作良好,未出现泄漏故障。

通过以上各项试验验证说明某型飞机球形灭火瓶设计改进合理。

### 参考文献

[1] 李鹏,王晓平,周亮.某型飞机球形灭火瓶设计改进.航空维修工程,2010,46(4):30-31.

(责编 小城)