

# 环境适应性要求在型号中应用问题分析

李维宝<sup>1</sup>, 李明<sup>2</sup>, 李泽新<sup>3</sup>, 赵辛<sup>4</sup>

(1. 总参谋部陆航部装备发展办公室, 北京 100043; 2. 中国航空综合技术研究所, 北京 100028;  
3. 西测电子公司, 西安 710000; 4. 江西洪都航空工业集团有限公司, 南昌 330024)

**摘要:** 针对航空装备环境鉴定试验大纲审查中暴露的研制总要求或成品技术协议书中对“使用环境”、“环境要求”表述方面的问题, 阐述了环境适应性要求的内涵和合理的表征方法, 分析了目前型号中“使用环境”和“环境要求”等概念的不完整性及其带来的一些副作用, 提出了使用方和型号总师单位应尽快理解和掌握有关标准中环境适应性要求的正确表述方式, 并将其纳入相关文件的建议。

**关键词:** 环境适应性; 环境要求; 环境试验

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2014.05.016

**中图分类号:** V416.6      **文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2014)05-0081-06

## Analysis of Application Issues of Environmental Worthiness Requirements in Model Development

LI Wei-bao<sup>1</sup>, LI Ming<sup>2</sup>, LI Ze-xin<sup>3</sup>, ZHAO Xin<sup>4</sup>

(1. Army Aviation Materiel Stereotypes Office, Beijing 100043, China;

2. China Aviation Poly-technology Establishment, Beijing 100028, China; 3. Mapping Electronic, Xi'an 710000, China;

4. AVIC Jiangxi Hongdu Aviation Industry Group Corporation Limited, Nanchang 330024, China)

**ABSTRACT:** Targeting at the expression issues of "Service Environment" and "Environmental Requirements" in General Requirements for Model Development or Finished Technical Agreement exposed during the review of aviation equipment Environmental Qualification Test Program, the meaning, reasonable representation methods and index system of environmental worthiness requirements were described in this paper. Imperfections and some side effects of the current "Service Environment" and "Environmental Requirements" in model development were analyzed. It was suggested that the model consumer and chief engineer institutions should understand and master the correct expression of environmental worthiness requirements, and that the expression should be included in the related documents.

**KEY WORDS:** environmental worthiness; environmental requirements; environmental test

收稿日期: 2014-06-24; 修订日期: 2014-07-18

Received: 2014-06-24; Revised: 2014-07-18

作者简介: 李维宝(1968—), 男, 湖南桂阳人, 硕士研究生, 高级工程师, 主要研究方向为飞行力学和装备定型。

**Biography:** LI Wei-bao(1968—), Male, from Guiyang, Hunan, Master student, Senior engineer, Research focus: flight mechanics and materiel stereotypes.

近年来,为了适应国际、国内形势的变化和保证国家安全,我国军用装备,特别是航空装备的研制和生产任务迅速增加,每年都有大量的新武器、新装备需要定型。定型过程中的一个重要环节是对装备开展各种试验,以验证产品的功能、性能和各种使用特性是否满足研制总要求或技术协议书的要求<sup>[1-4]</sup>。环境鉴定试验是地面实验室试验中项目最多的一类。按照上级有关定型文件要求,开展环境鉴定试验前,首先应制订环境鉴定试验大纲,并通过专家审查,以作为地面实验室鉴定试验大纲的组成部分。环境鉴定试验大纲是一个非常重要的管理文件,编制的目的是使开展的一系列环境鉴定试验能够全面、准确地验证产品的环境适应性是否满足研制总要求或技术协议书的相关要求。

在试验大纲审查过程中,甚至在定型或鉴定审查过程中,常常发现技术协议书中的环境适应性要求提得不完整或者不合理,以至于试验大纲审查会变成了环境适应性要求的讨论会,严重影响了环境鉴定试验大纲审查工作。究其原因,一方面是型号总体单位对环境适应性要求内涵的理解有偏差,常常只提试验要求,并把试验要求看作环境适应性要求,这与目前没有相应的环境适应性要求标准对其进行规范有关。其次,型号总师单位未能充分分析产品寿命期环境和装备在平台上的环境及环境对其的影响,而且缺乏环境数据支持,致使考虑的环境种类不全面,有缺项,或者提出的环境量值不适当。第三个原因是有关部门未能对环境适应性要求进行认真地论证把关,就匆匆地纳入技术协议书中,这是管理上的原因。文中就装备环境适应性要求在型号应用中遇到的问题进行探讨。

## 1 环境适应性要求

### 1.1 内涵

环境适应性是装备在预定环境中功能和性能保持正常状态的能力<sup>[5-8]</sup>,是装备的质量特性之一。它是靠设计纳入产品的,取决于组成材料、元器件的耐环境作用能力,自身结构设计以及所采用的防护或环境控制措施。为了使研制和生产的装备具备这种能力,需要在装备的立项论证阶段就明确对这种能力的要求,即环境适应性要求,并作为战技指标纳

入研制总要求或技术协议书中。由此可见,环境适应性要求是描述装备(产品)应达到的环境适应性水平的一组定性要求和定量指标。它同功能、性能要求和可靠性等要求一样,是一种设计要求,也可更明确地称为环境适应性设计的最低要求,通常也是指设计用的最低环境条件。

### 1.2 地位

环境适应性作为重要质量特性通过设计纳入装备,必须要提出明确的要求。GJB 9001B《质量管理体系要求》的第七章《产品实现》中明确规定在策划产品的实现时,应明确“产品可靠性、维修性、保障性、安全性和环境适应性”等要求。上述各通用质量特性要求均应与产品的功能和性能等专用特性要求一起,作为战技指标纳入到装备研制总要求和配套产品的研制合同和协议书中,以作为产品设计人员设计产品的目标。环境适应性要求作为研制总要求或成品技术/协议书中战技指标的一部分,在产品定型时,同样必须验证研制出来的产品能否满足规定的要求,因此,也是定型时开展验证工作的目标和依据。环境适应性要求既是环境适应性设计的目标,又是环境适应性符合性验证的目标,定型阶段环境鉴定试验大纲应以研制总要求和成品合同/协议书中的环境适应性要求为依据,确定相应的试验项目、试验条件、试验方法和合格判据。制订环境鉴定试验大纲的目的是要确保其规定的一系列管理要求和试验要求能够全面、正确地验证和反映产品的环境适应性水平。管理要求包括实验室和试验人员资质、试验设备的选用和析定、受试产品的技术状态、试验过程、测试记录、中断处理、故障处理及试验组织管理和试验报告。

### 1.3 表征方法

目前在武器装备研制领域,得到普遍接受的环境适应性要求的表征方法是按照装备的层次分别提出的,即材料及其涂镀层、结构件、连接件的环境适应性要求和功能件(整机、系统和设备)的环境适应性要求两种类型。在祝耀昌等人<sup>[7]</sup>的文章中已有较为深入的探讨,在此不做赘述。作为支撑环境适应性要求表征的装备环境适应性要求指标体系,则是从整个装备和配套产品两个层次分别构建的,指标的差别主要体现在环境因素的类型上。整个装备

的环境适应性要求指标偏重于外界的气候环境因素,而配套产品的环境适应性要求指标则主要涉及装备不同位置的平台诱发环境。定性(包括失效判断)和定量(主要为应力强度)指标的描述方法和罗列方法可参考文献[2—5]的内容。

## 2 应用

### 2.1 概述

“环境适应性是质量特性之一”这一概念是1997年GJB 150十周年研讨会上提出的,2001年颁布的GJB 4239《装备环境工程通用要求》给出了明确的定义,2009年颁布的GJB 9001B《质量管理体系》进一步将环境适应性与可靠性等6个质量特性要求纳入质量管理体系,明确规定将此六性的要求确定、分析和设计、试验与评价等工作纳入型号研制质量管理体系各个阶段,以确保这些工作能够得到切实的贯彻实施。由于上述6个质量特性的各项工作实施的技术基础和可用的支持标准存在差异,目前型号中这六性在管理体系中的应用程度也大不一样,环境适应性的应用尤其不到位,存在较多问题。

### 2.2 应用现状

航空装备研制过程中环境适应性及其要求的应用尚处于初始阶段,大都使用传统的做法。由于概念的模糊、缺少相应标准的支持等,因此在航空装备研制总要求和成品技术协议书中,以“使用要求”、“使用环境”、“环境要求”或“环境技术要求”等形式提出。

1) 使用方提出的研制总要求中对整机和系统以“使用环境”或“使用要求”的形式提出。如××型号的某系统研制总要求的战技指标中,除了对系统自身功能性能指标等要求外,还列出了“使用环境、电磁兼容性、寿命及可靠性等要求”,而在“使用环境”中包括的内容为:新研的××系统的环境适应性满足GJB 150《军用设备环境试验方法》的有关规定和××型号的机载环境使用要求。具有防湿热、防盐雾和防霉菌的能力。使用环境温度为 $-40 \sim 60 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (舱内),和 $-40 \sim 45 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (舱外)。又如某型号装备战技指标的使用要求一节中提出了环境要求如下:工作温度为 $-40 \sim 60 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ;贮存温度为 $-55 \sim 70 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ;最大

使用高度为6000 m(4200 m);冷却方式为强制风冷;其他应满足GJB 150《军用设备环境试验方法》的相应规定和××型号环境条件要求。

2) 型号总师单位(或总体单位)与机载设备研制单位签订的成品技术协议书中以试验项目和试验条件的形式提出。这类协议书中的环境要求或环境技术要求,实际上是由总师(体)单位根据待研设备在机(弹)上的位置等,对其制订的“××型号环境要求”或“环境技术要求文件”剪裁得到的一系列环境试验项目及相应的环境条件。型号总师单位制订的“××型号环境要求”或“环境技术要求”文件本身就是一系列的试验项目和相应的试验条件,而不是前面所述的环境适应性要求,其试验项目和试验条件多半是GJB 150中选取或经适当调整后得到的。

### 2.3 现状分析

#### 2.3.1 研制总要求中与环境适应性要求相关的要求

从3.2节可以看出,使用方提出的研制总要求中的环境适应性要求比较笼统,而且大多要求的可操作性差。使用方提出的环境适应性要求实际包括4个方面。第一方面是可操作性较好的要求,一般是温度环境适应性要求,如工作温度和贮存温度范围,这种要求可以作为设计目标和验证设计符合的依据。第二方面是较为具体,但不完整的要求,如最大使用高度,这一要求仅明确了恒定低气压的环境适应性要求,没有明确研制的装备是否应适应低气压变化环境,即未提出对快速减压和爆炸减压环境的适应性要求。后者不仅取决于飞行高度,还取决于具体装备在机上的位置和本身结构特点,一般应由型号总师单位根据研制总要求中的高度要求,考虑上述因素进一步在成品协议中提出。第三方面是定性要求,例如“具有防湿热、防盐雾和防霉菌的能力”。第四方面是应满足GJB 150《军用设备环境方法》的相应规定和“××型号环境条件要求”。第四方面要求实际上仅规定了一个原则,即环境适应性要求和环境适应性试验验证方法应以GJB 150为依据。型号总师单位可根据这一原则结合具体装备的情况编写其型号“环境要求”文件。这一要求实际上是对下层产品的要求,需要由型号总师单位来具体化。

#### 2.3.2 技术协议书中与环境适应性要求相关的要求

目前,型号总师单位与成品研制单位签订的合同或成品协议中的环境适应性要求实际上是一系列的

试验项目和相应的试验条件及部分特殊的合格判据。大都是直接引用 GJB 150 各试验方法中的试验项目和试验条件,不仅包括试验采用的应力强度,还包括试验实施时应力施加的时间和施加的方向、次数等。

配套产品的环境适应性要求主要是应力强度的定量值,不应包括试验中施加应力的持续时间<sup>[7]</sup>。因此,合同或成品协议中的相关要求并不是环境适应性要求,而是环境适应性验证试验的试验条件。上述提到的特殊合格判据主要是指霉菌试验和盐雾试验特有的合格判据,如允许的长霉等级和腐蚀面积等。有关环境适应性要求与环境适应性验证要求示例见参考文献[9—13]。

### 3 问题分析

鉴于研制总要求和成品技术协议书中缺乏明确的环境适应性要求指标或只提出试验项目和试验条件,使型号研制生产过程中理应开展的环境适应性要求的确定和评审、环境适应性设计和环境分析工作不受重视或被忽略,设计定型中对环境适应性的分析和审查工作也不完善。

#### 3.1 环境适应性要求工作未得到重视

由于在研制总要求和成品技术协议书中未明确环境适应性要求或仅按 GJB 150 直接提出试验项目和试验条件,导致 GJB 4239 中规定的进行寿命期环境分析并确定环境适应性要求的工作不受重视,且一般不组织相应的评审工作,致使考虑的环境类型不全面或者提出的环境条件不准确,而且未经评审把关就纳入成品技术协议书中。到了产品设计定型或技术鉴定阶段,制订地面环境鉴定试验大纲时,需要对这些问题进行补救,从而花费很多时间来讨论环境试验项目和试验方法等方面的内容,影响了环境鉴定试验大纲的制订。此外,环境工程工作的项目实施程序,应是首先确定环境适应性要求,而后设计人员根据这一要求对产品进行环境适应性设计和开展相应的环境适应性研制试验,进而以环境适应性要求为基准,开展环境鉴定试验来验证研制的产品对环境适应性要求的符合性。简言之,即环境适应性要求是设计的依据,是环境鉴定试验验证的目标。然而一些评审人员并不了解上述实施程序,在会上倒过来讨论环境适应性要求的合理性和完整

性,殊不知,环境鉴定试验大纲评审专家不能干涉环境总师单位确定的适应性要求,只能考虑如何设计一个试验大纲来保证能够验证产品的环境适应性水平是否符合总师单位提出的环境适应性要求。

#### 3.2 客观上造成了环境工程工作就是环境鉴定试验工作的假象

由于研制总要求和成品技术协议书中的主要内容是依据 GJB 150 确定的相关试验项目,使人们片面地认为环境工程工作就是试验工作,环境试验工作的重点是设计定型和技术鉴定阶段的地面环境鉴定试验和批生产阶段的环境例行试验。设计人员不主动进行耐环境设计和利用环境试验手段帮助其提高产品的耐环境水平,而是从过关思维出发,按照合同中规定的试验项目和试验条件开展摸底试验,能过关就不再进行提高产品环境适应性的工作,基本不开展 GJB 4239 中规定的适应性研制试验和环境响应特性调查试验。其设计的产品一般没有耐环境应力裕度,更不主动用高加速试验的方法去确定产品的耐环境能力的极限和薄弱环节,设计人员对其设计研制产品的耐环境能力信息掌握得很少。

#### 3.3 影响定型过程中环境工程工作审查力度

产品设计定型或鉴定阶段,对环境鉴定试验文件和试验情况的审查相对来说比较重视,但对环境工程方面其他工作的审查就很简单,甚至忽视。例如在研制总结中一般都有可靠性、维修性、测试性、保障性和安全性的分析内容,有的还有专门的五性分析报告,绝大部分研制总结中没有环境适应性分析方面的内容。GJB 9001B《质量管理体系》中虽然规定了共性方面应有的必要的输出文件,但目前仅限于五性。

#### 3.4 使研制总结的符合性对照表中无法与五性一样纳入环境适应性要求

这一情况非常普遍,由于研制总要求和成品技术协议书中提出的不是环境适应性要求,而是环境适应性验证试验的项目和试验条件,因而研制单位无法合理地将合同中的内容纳入表中相应位置。可靠性、维修性等五性可作为产品的质量特性、连同其指标一起纳入符合性对照表。目前有的产品研制单位干脆不列,有的产品研制单位把这一项虽按合同

的提法列为环境要求,但由于提出的内容是试验项目,而不是应力指标,无法与可靠性等五性一样,只能硬将一系列环境试验项目、甚至包括试验条件填进去,由于环境试验项目和试验条件内容很多,许多单位就简化为见“××型号的环境要求”文件和“产品的成品技术协议书”。

## 4 结论

1) 环境适应性是装备的重要质量特性,与可靠性、维修性、测试性、保障性和安全性要求一样,通过开展相应的系统工程工作,即一系列环境工程工作,才能确保将其纳入产品。

2) 环境适应性要求指标是装备环境适应性的具体体现,它既是产品设计人员进行耐环境设计的依据,也是设计定型或鉴定阶段制订环境鉴定试验大纲时,规定试验项目、试验条件和试验方法的依据。因此应及早明确和准确提出环境适应性要求,这对进行环境适应性设计和开展环境试验,特别是环境鉴定试验尤其重要。

3) 环境适应性要求应当考虑寿命期各主要环境种类和相关环境应力强度。环境适应性要求可以是定性要求,也可以是定量要求,取决于环境的类型和特点。研制总要求中的环境适应性要求以定性要求为主体,尚可包括一些原则,如环境适应性要求的风险准则等。在没有实测数据支持的情况下,可以参考某些试验方法标准中的环境条件,以及规定试验按什么标准进行等。成品研制合同或协议书中的环境适应性要求以定量要求为主体,给出需要考虑的各类环境及其应力强度。自然环境适应性要求应给出从GJB 1172等标准中选用相应极值的风险率,像霉菌和盐雾这类环境应给出长霉等级和腐蚀程度的判定标准。

4) 目前航空装备成品技术协议书以试验项目和相应试验条件作为环境适应性要求是不恰当的,会带来许多问题。

## 5 建议

1) 自2001年颁布GJB 4239以来,环境适应性和环境适应性要求已逐渐被人们认可,并在型号研制中应用,2009年颁布的GJB 9001B进一步加快了其在型

号中的应用步伐,但总的说来,这一步太慢,不能适应我国航空装备研制的发展需要,因此相关部门应加大对GJB 4239和GJB 9001B的宣贯力度。

2) 使用方和型号总体单位负有确定装备及其配套产品环境适应性要求和试验验收要求的责任,环境适应性要求是装备环境工程工作的源头,源头不正确,会影响一系列的环境工程工作开展,因此建议使用方和型号总师单位首先要深入理解环境工程工作的内涵和环境适应性要求的指标体系及确定方法,提出完整、合理和准确的环境适应性要求,确保研制总要求和成品技术协议书中环境适应性要求的质量。

3) 标准制订单位应尽快出台环境适应性要求的具体表述方法和格式,以支持研制总要求和成品技术协议书中环境适应性要求的编写。

4) 建议装备定型管理机关在组织定型工作中,完善对环境工程工作(不仅限于环境试验)审查的要求,强化评审力度。

## 参考文献:

- [1] GJB 4239, 装备环境工程通用要求[S]. GJB 4239, General Requirements of Equipment Environmental Engineering [S].
- [2] 祝耀昌, 李敏伟, 游亚飞. GJB 4239的作用和存在问题分析[J]. 装备环境工程, 2008, 5(6): 1—6. ZHU Yao-chang, LI Min-wei, YOU Ya-fei. Analysis on the Roles and Deficiencies of GJB 4239[J]. Equipment Environmental Engineering, 2008, 5(6): 1—6.
- [3] 祝耀昌, 彭丽, 常海娟. 航空产品环境鉴定试验有效性评价方法探讨[J]. 航天器环境工程, 2013, 30(4): 346—352. ZHU Yao-chang, PENG Li, CHANG Hai-juan. The Validity Evaluation Method in Environmental Evaluation Tests for Aerial Product Set [J]. Spacecraft Environment Engineering, 2013, 30(4): 346—352.
- [4] 祝耀昌, 陈光章, 张伦武, 等. 武器装备环境工程[J]. 装备环境工程, 2006, 3(3): 3—8. ZHU Yao-chang, CHEN Guang-zhang, ZHANG Lun-wu, et al. Technical System of Materiel Environmental Engineering [J]. Equipment Environmental Engineering, 2006, 3(3): 3—8.
- [5] 祝耀昌, 孙建勇. 装备环境工程技术及应用[J]. 装备环境工程, 2005, 2(6): 1—9. ZHU Yao-chang, SUN Jian-yong. Materiel Environmental Engineering Technology and Its Application [J]. Equip-

- ment Environmental Engineering, 2005, 2(6): 1—9.
- [6] 祝耀昌, 常文君, 傅耘. 武器装备环境适应性与环境工程[J]. 装备环境工程, 2005, 2(1): 14—19.  
ZHU Yao-chang, CHANG Wen-jun, FU Yun. Environmental Suitability of Weapons and Environmental Engineering [J]. Equipment Environmental Engineering, 2005, 2(1): 14—19.
- [7] 祝耀昌, 王丹. 武器装备环境适应性要求探讨[J]. 航天器环境工程, 2008, 25(5): 416—422.  
ZHU Yao-chang, WANG Dan. The Environmental Worthiness Requirements with Respect to Weapon Materials [J]. Spacecraft Environment Engineering, 2008, 25(5): 416—422.
- [8] 傅耘, 祝耀昌, 陈丹明. 装备环境要求及其确定方法[J]. 装备环境工程, 2008, 5(6): 46—51.  
FU Yun, ZHU Yao-chang, CHEN Dan-ming. Materiel Environmental Requirements and Their Determination Method [J]. Equipment Environmental Engineering, 2008, 5(6): 46—51.
- [9] 祝耀昌, 张建军. 武器装备环境适应性要求、环境适应性验证要求和环境条件及其相互关系和讨论(一)[J]. 航天器环境工程, 2012, 29(1): 1—5.  
ZHU Yao-chang, ZHANG Jian-jun. Discussion of Relationships among Environmental Worthiness Requirement, Verification Requirement of Environmental Worthiness and Environmental Conditions of Materiel (Part One) [J]. Spacecraft Environment Engineering, 2012, 29(1): 1—5.
- [10] 祝耀昌, 张建军. 武器装备环境适应性要求、环境适应性验证要求和环境条件及其相互关系和讨论(二)[J]. 航天器环境工程, 2012, 29(2): 119—122.  
ZHU Yao-chang, ZHANG Jian-jun. Discussion of Relationships among Environmental Worthiness Requirement, Verification Requirement of Environmental Worthiness and Environmental Conditions of Materiel (Part Two) [J]. Spacecraft Environment Engineering, 2012, 29(2): 119—122.
- [11] 祝耀昌, 王建刚, 张建军. GJB 150A 与 GJB 150 内容对比和分析(一)[J]. 航天器环境工程, 2011, 28(1): 5—10.  
ZHU Yao-chang, WANG Jian-gang, ZHANG Jian-jun. A Comparative Study of GJB 150A and GJB 150 (Part I) [J]. Spacecraft Environment Engineering, 2011, 28(1): 5—10.
- [12] 祝耀昌, 王建刚, 张建军. GJB 150A 与 GJB 150 内容对比和分析(二)[J]. 航天器环境工程, 2011, 28(2): 110—114.  
ZHU Yao-chang, WANG Jian-gang, ZHANG Jian-jun. A Comparative Study of GJB 150A and GJB 150 (Part II) [J]. Spacecraft Environment Engineering, 2011, 28(2): 110—114.
- [13] 祝耀昌, 李明. 谈谈环境工程剪裁和环境试验剪裁[J]. 航天器环境工程, 2012, 29(5): 479—485.  
ZHU Yao-chang, LI Ming. Environmental Engineering Tailoring and Environmental Test Tailoring [J]. Spacecraft Environment Engineering, 2012, 29(5): 479—485.

(上接第 80 页)

- [36] CAMELLI F E, SOTO O, LOHNER R, et al. Topside LPD17 Flow and Temperature Study with an Implicit Monolithic Scheme [C]//41st AIAA Aerospace Sciences Meeting & Exhibit. Reno, Nevada, 2003.
- [37] SPALART P R, JOU W-H, STRELETS M, et al. Comments on the Feasibility of LES For Wings and on a Hybrid RANS/LES Approach [C]//1st AFOSR International Conference on DNS/LES. Ruston, LA, 1997.
- [38] STRELETS M. Detached Eddy Simulation of Massively Separated Flows [C]//39th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno, NV, 2001.
- [39] JAMES S F, STEVEN J H, IEUAN O, et al. Towards Fully Simulated Ship-Helicopter Operating Limits [C]//The Importance of Ship Airwake Fidelity the American Helicopter Society 64th Annual Forum. Montréal, Canada, 2008.
- [40] 杨春蕾, 朱仁传, 缪国平, 等. 基于 RANS 和 DES 法船体绕流模拟及不确定度分析[J]. 上海交通大学学报, 2012, 46(3): 430—435.  
YANG Chun-lei, ZHU Ren-chuan, MOU Guo-ping, et al. Uncertainty Analysis in CFD for Flow Simulation Around Ship Using RANS and DES [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2012, 46(3): 430—435.
- [41] 林铁平. 汽车外流场 DES 模拟研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2010.  
LIN Tie-ping. Detached Eddy Simulation of Vehicle External Flow Field [D]. Changsha: Hunan University, 2010.
- [42] 刘建. 采用 DES 类方法研究基本起落架非正常大范围分离流动 [D]. 北京: 清华大学, 2011.  
LIU Jian. Study of Unsteady and Massively Separated Flows Past Rudimentary Landing Gear Using DES-type Methods [D]. Beijing: Tsinghua University, 2011.