

GJB 4239《装备环境工程通用要求》在直升机研制中的应用研究

丁杰, 陈圣斌, 郝宗敏

(中国直升机设计研究所, 江西 景德镇 333001)

摘要: 根据直升机及直升机型号的特点, 结合直升机环境工程及传统研制、设计经验, 提出了直升机及直升机型号研制中贯彻 GJB 4239 的具体实施程序和方法, 试图将 GJB 4239 的通用要求转化为直升机和直升机型号系统、部件/设备环境适应性分析、设计、试验及管理具体实用, 易于操作的工程技术要求, 并提出直升机研制中环境试验与评估的实施要求和方法。

关键词: 直升机; 环境适应性; 环境适应性分析与设计; 实验室环境试验

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2017.11.004

中图分类号: TJ01

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2017)11-0020-07

Application of GJB 4239 “General Requirements for Equipment Environmental Engineering” in Helicopter Development

DING Jie, CHEN Sheng-bin, HAO Zong-min

(China Helicopter Research and Development Institute, Jingdezhen 333001, China)

ABSTRACT: Based on characteristics of helicopter and helicopter model, in combination with environmental engineering and traditional development experience of helicopters, the paper put forward specific procedures and methods to implement the requirements of GJB 4239 in development of helicopters, tried to turn general requirements of GJB 4239 into specific and practical technical requirements on environmental adaptability analysis, design, test and management of component and equipment for helicopters, and proposed implementation requirements and methods of environmental test and evaluation in helicopter development.

KEY WORDS: helicopter; environmental adaptability; analysis and design; lab environment test

环境适应性与可靠性、维修性、测试性、保障性等都列为装备质量的通用特性, 因此, 直升机研制中应按照 GJB 4239《装备环境工程通用要求》编制直升机型号研发的环境适应性大纲, 以便在直升机研发过程中实现直升机系统产品/设备环境适应性控制, 消除它们对环境风险的敏感性, 使直升机在预定的环境条件下安全可靠地工作^[1]。

自 20 世纪 50 年代以来, 国内外均按照上述标准或相似的标准对航空器的产品/设备进行环境试验,

以控制产品/设备对环境风险的敏感性。事实证明, 仅靠环境试验并不能消除或降低环境对产品/设备造成的损伤或失效。例如, 现代民用客机由气象或环境因素引发的飞行事故占总飞行事故的 3%, 直升机尤甚, 其飞行事故中有 5% 是环境因素造成的^[2-3]。到 20 世纪 70—80 年代, 西方国家在航空器的研发中, 都引入了温度、湿度、振动应力多因素综合的可靠性环境试验, 但环境对可靠性的影响也未如愿得到明显改善。造成这种现象的原因是多方面的, 首先, 从环境

收稿日期: 2017-08-10; 修订日期: 2017-08-29

作者简介: 丁杰 (1989—), 男, 福建南平人, 工程师, 主要研究方向为直升机可靠性、维修性、安全性、测试性、综合保障及环境适应性。

控制的角度来看,因其不是从环境对产品功能和性能造成的故障机理为出发点,而是过度地强调通过产品后期实物样机的试验来发现故障,采取纠正措施以消除和降低环境风险,显然,这种本末倒置的方法成效有限。另外,产品环境试验温度是标准给定的温度 $-55 \sim +70^{\circ}\text{C}$ (直升机一般为 $+55 \sim -45^{\circ}\text{C}$),而不是按产品在飞机和直升机上实际工作的环境温度进行环境试验。实际上有的产品在机上的工作温度可能高于标准规定的温度。例如,某型直升机的电源滤波器安装在发动机舱内,其温度高于标准规定的温度,尽管通过了环境试验,但使用中,滤波器内的固化剂熔化了,造成滤波器内的元器件故障。凡此种种,产品在其寿命预期的环境作用下,不能实现其预定功能和性能或使其不能安全可靠地工作也就不足为奇了^[4]。

2001 年,我国颁发了 GJB 4239《装备环境工程通用要求》^[5],该标准对产品的环境适应性从工程管理、环境分析、环境适应性设计、环境试验与评价等四个层面共计 20 个工作项目,提出了环境控制的相关要求。在直升机型号研制中,认真贯彻这一标准,按照该标准的要求,制定直升机型号研发的环境适应性大纲,可使直升机环境及环境控制实现四个转化^[6]。

1) 从以往传统的基于环境试验的单一的环境控制转化为环境适分析、环境适应性设计、环境试验与评价的全面、系统的环境控制。

2) 从以往传统的通过环境试验激发环境故障转化为环境故障机理、故障原因及故障影响的事前积极主动的分析。

3) 从以往过度强调定型时的环境试验的环境控制转化为从方案论证阶段起,贯穿于整个研发阶段的环境适应性的全程监控。

4) 从以往单独的环境控制理念转化为与可靠性、安全性等多专业融合共同实现产品在规定条件下(环境条件等),在预定时间,实现产品安全可靠地工作。

1 环境适应性要求

环境适应性要求是直升机型号研发的环境适应性设计依据,是环境适应性试验的目标。因此,在方案论证阶段,首先应确定环境适应性参数和参数指标,以便设计部门将环境适应性要求转化为环境适应性设计措施,并通过后期的环境试验确认/验证环境适应性设计的有效性,评估直升机型号是否满足使用方或用户要求。为此,研制方应和使用方或用户在方案论证阶段,首先应建立直升机型号的环境适应性参数和参数指标^[7-8]。

1.1 参数指标的确定

按 GJB 4239《装备环境工程通用要求》5.2 环境

分析相应工作项目(工作项目 201-203)的工作内容、环境适应性要求,参数指标的确定程序如图 1 所示。

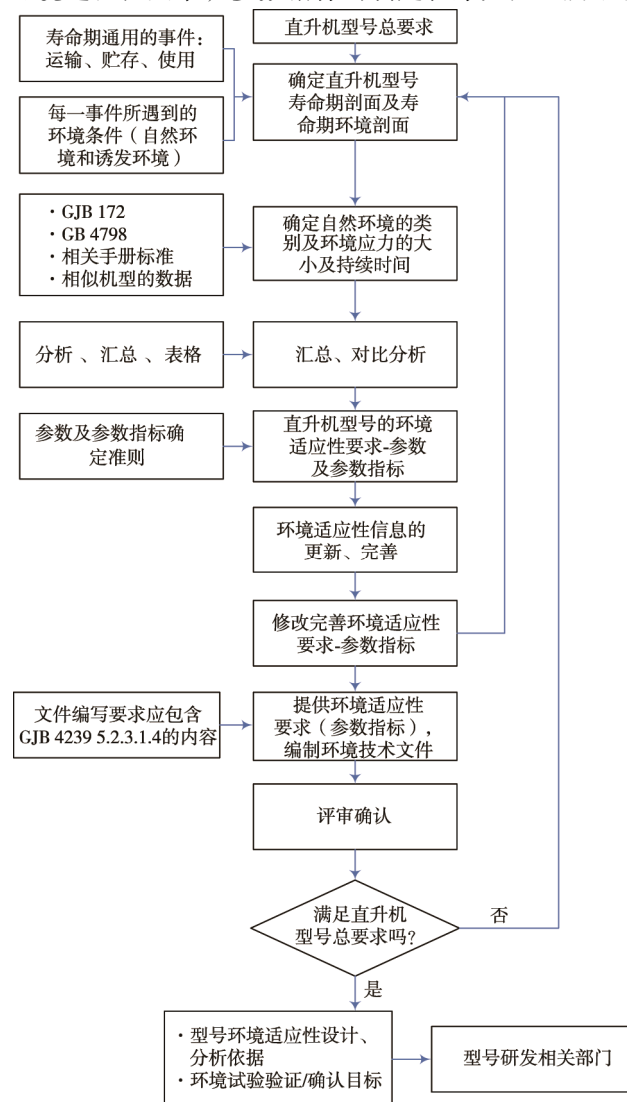


图 1 环境适应性要求-参数指标确定程序

1.2 程序中各项工作的实施

GJB 150 包括近 20 种环境类型,从现有直升机型号来看,包括了温度、湿度、盐雾、霉菌、沙尘、淋雨、冲击、加速度、炮振等动力学环境类别。在目前直升机型号总要求中,往往在总要求的环境条件一节中,仅列出温度、湿度、“三防”等极少数的环境类型及要求。这少数的环境类型及其要求,不能完整地表述直升机型号的环境特征,也就不能确保直升机型号环境适应性的控制,不能消除环境风险的敏感性。因此,研制部门和使用方必须将直升机总要求的相关参数指标转换成环境适应性要求:如由飞行高度可以确定低气压高度;由旋翼转速可以确定振动水平;根据直升机的型号,可以确定使用类别,如舰载机在海上执行任务,便可确定盐雾、霉菌等相应要求。

1.2.1 寿命期剖面及寿命期环境剖面

1) 寿命期剖面。这里的寿命期剖面,是指研制方将直升机交付用户使用,在直升机寿命期内所经历的事件,这些事件包括运输、贮存及使用(执行任务)等。

2) 寿命期环境剖面。寿命期环境剖面,是指寿命期内各个事件可能遭遇的不同环境类型,包括自然环境和诱发环境。自然环境是指自然界中非人为因素构成的环境,而诱发环境是指人为活动、平台、其他设备或设备自身产生的局部环境。就直升机而言,如直升机由汽车、火车或船舶运输到用户基地,那么这些载体的振动、冲击、卸装过程中的意外跌落等即为诱发环境。如直升机自行转场飞行,直升机自身的振动、着陆时的冲击、悬停时扬起的沙尘等都是诱发环境。

某型直升机剖面及寿命期环境剖面见表1。

表1 某型直升机的寿命剖面及寿命期环境剖面

	运输 (自行转场飞行)	贮存 (机库)	使用 (搜索救护)
自然 环境	高温、低温、 淋雨、沙尘	高温、低温、 酸雨、沙尘	高温、低温、 酸雨、沙尘
诱发 环境	振动、冲击、噪音、 气压(低气压)	—	振动、冲击、 噪音、加速度

1.2.2 环境参数指标

在建立了使用文件,收集了基本相同或相似直升机的环境类别及其数据之后,接下来便要确定直升机型号具体的环境类型及量值。下面仍以某型直升机为例,描述其环境类别及量值的确定步骤。

1) 确定直升机综合的环境类别。根据直升机的特点,确定寿命期的环境类别,现在必须整合为整机的环境类别。由表1可以看出,该型机的运输、贮存、使用都具有相同的自然环境,仅仅诱发环境小有区别,即运输时,表现出低气压环境类别,而使用时多了一项机动飞行时的加速度环境类别。由上分析,表征某型直升机环境特征的环境类别为高温、低温、气压、淋雨(酸雨)、沙尘、振动、冲击、加速度、噪音等。

2) 确定各类环境类别的量值——参数指标。在确定了全机综合的环境类别之后,便要确定相应的量值,以形成整机的环境适应性要求。就某型直升机而言,作为教练机,每飞行小时平均起降5次,且又是操作不熟练的学员,学员操作粗糙,因此直升机着陆时的冲击较大。直升机振动是其主要特点,通常低频大振幅造成损伤较大,直升机飞行速度低,机动飞行时,加速度也较小。此外,直升机的噪音也是其显著特点。

根据某型直升机的上述特点,最终可形成环境类别的相应量值:高温为+50℃、低温为-40℃、气压为8000m气压高度、振动、冲击、每小时5次起降、

加速度、噪音。

通过以上的讨论分析,可以得出确定直升机环境适应性要求时,应遵循如下基本原则:全面完整、系统地分析直升机型号在其寿命期可能发生的所有事件及其遭受的环境类型、量值及持续时间;根据环境类型、量值和持续时间,选择表征直升机型号环境适应性的环境类型;选择基本相同或相似机型作为直升机型号环境适应性的比较基准;对于难以量化的环境要求,可根据GJB 150的相应要求进行剪裁,基于型号特征及以往经验,选择相应的环境要求。

2 环境适应性设计

通过以上讨论分析,便能确定直升机型号的环境适应性要求。为确保直升机型号在预期的环境条件达到其预期的性能和功能和/或不破坏的能力,便应通过环境适应性设计,将直升机型号的适应性要求转化为环境适应性设计措施来实现。

根据GJB 4239《装备环境工程通用要求》5.3环境适应性设计工作项目301—303的要求,实施环境适应性设计的程序如图2所示。

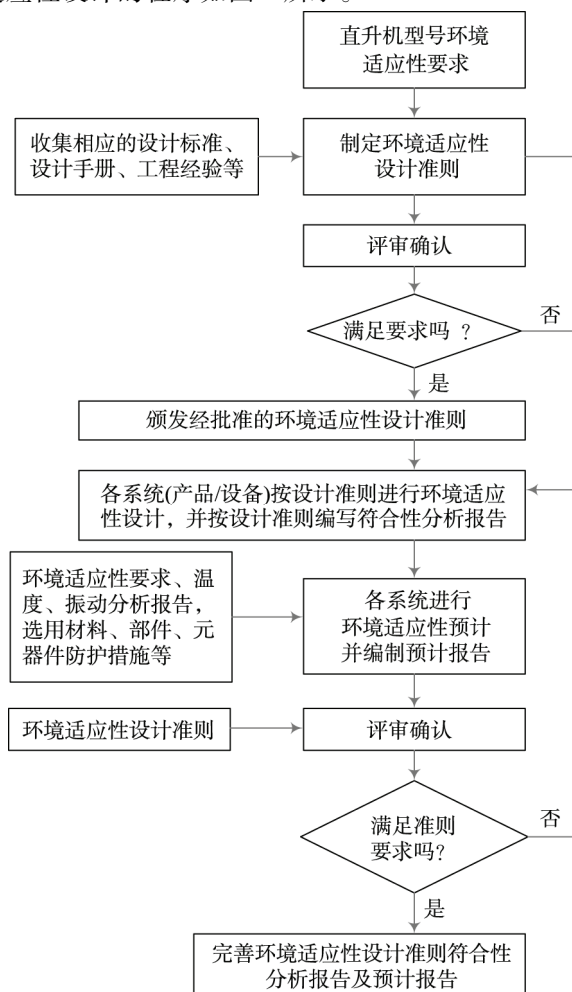


图2 直升机环境适应性设计程序

环境适应性设计准则, 事实上是直升机型号环境适应性的设计技术或设计方法, 用于指导、规范型号的环境适应性工作, 将影响环境适应性设计。设计准则的编写, 是实现型号环境适应性的重要工作内容, 是环境适应性设计及其检查评审的依据。通常, 需组织有经验的技术人员, 完成准则的编写工作。

2.1 基本原则

编制环境适应性设计准则应遵循下列原则。

1) 准则内容应反映直升机的特点。直升机的飞行特点为低空、低速, 低空飞行会经常遭遇到雨水的影响, 因此, 淋雨要求或水密性要求应予以充分考虑。旋翼扬起的砂尘是影响动部件安全可靠工作的因素之一, 因此准则中应充分考虑防砂尘的设计措施。振动是直升机的显著特点, 通常表现为低频大振幅。此外, 直升机的噪音也是环境条件的显著特征, 因此, 准则中应关注直升机的降噪设计措施。

2) 准则内容应反映直升机型号特点。不同直升机型号具有不同的环境特征, 如对于武装直升机, 炮振是其显著特征; 对于舰载直升机, 高温湿热、盐雾、霉菌等是较严酷的环境条件; 对于教练机, 冲击是其环境特征。

3) 准则内容应吸取国内外以往直升机型号的经验教训。在以往的型号设计中, 由于没有充分考虑环境条件对直升机使用的影响, 曾发生过环境条件对直升机部件/设备造成损伤、故障/失效的经验教训。如某型直升机发射导弹的尾气流诱发的低气压使机身后部的货舱门意外打开。准则中应从这些事故或故障中吸取教训, 提出相应的环境适应性设计措施, 避免发生类似的后果。

4) 准则内容应将可靠性工作的故障模式及影响分析、故障树分析中所发现的问题及其设计改进措施作为准则的设计要求。例如, 故障树分析中, 发现的振动疲劳损伤在盐雾条件下, 会使结构的剩余强度急剧下降, 使部件未到规定的翻修时间便严重破坏, 因此, 应考虑双重环境应力的组合作用造成的损伤^[9]。

5) 准则内容, 应按安全性的优先顺序, 考虑相应措施。当环境应力造成的安全性风险不可接受时, 应首先采取设计措施消除风险; 当没有有效的设计技术消除风险时, 应通过加入安全装置或告警装置来消除或降低风险; 当上述措施都无效时, 应通过使用限制或者维修方式等控制措施来降低风险。例如, 直升机飞行中, 通过设计措施无法避免遭受到暴风雨, 此时, 应安装气象雷达、实时监控周围的气象变化。当飞行前方有暴风雨时, 改变航向或就近着陆, 避开暴风雨造成的风险。

2.2 制定直升机型号的环境适应性设计准则

目前直升机型号都没有制定完整、系统的环境适

应性设计准则, 用以指导和规范型号的环境适应性设计。根据直升机型号可靠性维修性等通用特性设计准则的编制经验, 该设计准则应包括两个部分, 即一般要求和详细要求。一般要求为直升机型号环境适应性总体、基本和通用性要求。详细要求为环境适应性设计不同环境类别设计技术、设计方法的表述, 通常是具体实施的设计措施。

环境适应性设计的一般要求如应通过型号的环境适应性分析, 确定环境风险敏感性的环境类别及量值(环境适应性参数指标); 应将环境适应性工作纳入直升机型号研制规划进行统一安排、统一协调, 确保与性能、可靠性等并行设计。在具体的型号研制中, 应根据型号特点, 做全面综合考虑, 提出完整、系统的一般要求。

对于环境适应性设计的详细要求, 应根据型号适应性要求所确定的环境类别, 提出该型机各类环境适应性设计的详细要求。

现以热设计为例, 说明应包括的内容。热设计的详细要求包括: 热分析、热测试、散热、散热器、电子/电气设备的热设计等。其中, 热分析包括如下要求: 热分析时应考虑环境因素、邻近设备、组件元器件的热作用, 电应力及发热和散热方式等因素; 定量热分析, 确定各设备舱或设备的工作温度, 以便考虑机上、设备舱的冷却方式; 定性热分析, 确定设备对热的敏感性, 提出合理设计措施; 电子设备的热计算, 可按 GJB/Z 27 的方法进行。这里仅列出了部分内容, 其他要求见参考文献[10]。

2.3 制定环境适应性设计内容

1) 各系统、部件/设备应按型号环境适应性设计准则进行环境适应性设计, 贯彻设计准则的设计措施, 将型号的环境适应性要求设计到系统、部件/设备中, 以消除或降低产品对环境风险的敏感性。

2) 各系统、部件/设备完成设计之后, 应按表 2 的方式对照检查设计与准则要求的相符性, 最终形成系统、部件/设备的环境适应性设计准则符合性报告。

表 2 环境适应性设计准则符合性说明表

准则条款编号	条款内容	符合性说明
--------	------	-------

3) 必须指出, 各系统、部件/设备的环境适应性设计应充分包括环境适应性的各种试验, 以及可靠性试验等所获取的信息, 对试验中所发现的薄弱环节采取相应的设计措施予以纠正。

2.1.4 环境适应性预计

环境适应性设计完成之后, 通过环境适应性预计以评估直升机型号各系统、部件/设备环境适应性设

计是否满足环境适应性的要求,即是否满足直升机型号各种环境类型量值(环境适应性参数指标)的要求。

根据产品在机上舱内所处的最严酷工作环境及环境类型及量值,与组成产品的零部件/元器件相关手册提供的定量的耐环境极限能力进行比较分析,确定产品能否承受最严酷工作环境的作用或者承受最严酷工作环境作用的余量。

根据直升机型号环境适应性要求,该型机环境温度为+50℃,某一电子产品设置在机身中下部电子设备舱内(舱内有许多电子设备)。通过热分析计算(GJB/Z 27),该舱内最严酷的工作环境温度为50℃+舱内电子设备工作时的温升(诱发环境温度),这一最严酷的工作环境温度为+90℃。然后列出该电子设备组成的元器件,并根据相关手册(如MIL-STD-217或GJB 299)查得各个元器件的最高温度或极限温度值。如果所有元器件的极限温度都超过+90℃,那么该产品便满足环境适应性要求的;如果这一电子设备有个别(重要的)或多个元器件不能承受90℃的高温,那么,必须更改设计,选择更高极限温度的元器件或者产品采取自冷却方式(设备内设置冷却风扇,如A350直升机的静止变流器便设有微型电风扇)进行降温以满足环境适应性要求;如果这一电子设备舱有多个电子设备不能满足这一工作环境+90℃的要求,舱内必须采取强迫通风(如引入冷气或加装冷却风扇等)方式降低温度。如法国SA321超黄蜂直升机,其电子设备舱内便装有冷却风扇进行降温。

3 环境试验与评价

3.1 环境试验类型、种类及试验项目的确定

直升机型号按照环境适应性要求完成了环境适应性设计后,便要通过相应的环境试验,检查和评估环境适应性设计是否满足环境适应性要求。为此,GJB 4239提出了环境试验与评估要求。

按GJB 4239,环境试验包括自然环境试验、使用环境试验和实验室环境试验三大试验类型。基于环境试验可进行剪裁的原则,下面将根据直升机及直升机型号的特点进行相应分析,以确定其环境试验类型、种类及试验项目。

1) 环境试验类别的选择。基于自然环境试验、使用环境试验和实验室环境试验的定义、用途及应用时机^[1],便不难发现,实验室环境试验的目的为:发现环境设计的薄弱环节,提出改进措施,消除或降低对环境风险的敏感性,以满足环境适应性要求;确保首飞安全,即通过试验发现在工作环境下,其重要/关键件的工作温度、振动等是否达到其极限值,危及飞行安全或影响飞行;确认和验证环境适应性设计是否满足环境适应性要求,为部件/设备定型提供依据。

可以看出,剪裁选择实验室环境试验来确认/验证型号环境适应性设计是否满足环境适应性要求。

2) 实验室环境试验和试验种类的选择。按GJB 4239的要求,实验室环境试验包括环境适应性研制试验、环境响应特性调查试验、直升机安全性环境试验、环境例行试验、环境鉴定试验等5种类实验室环境试验。在上述的实验室环境试验的5个种类中,环境适应性研制试验、直升机安全性环境试验及环境鉴定试验,与直升机型号研制密切相关,通过这些试验能满足实验室环境试验的目的,以确保直升机型号环境适应性的固有特性。环境响应特性调查试验的试验要求是通过温度和振动试验来确定产品对温度和振动环境特性的响应特性及产品耐环境极限能力,可结合其他试验种类一起安排,如产品功能性能试验,电源特性试验等,因此这一试验可以删除。另一试验种类,即环境例行试验,是批生产出厂检验后的试验,通过这种试验以检查产品工艺稳定性。这与研发阶段,确保产品环境适应性的固有特性——环境适应性设计没有直接关系。因此,这一试验种类也可剪裁删除。根据上面的分析,直升机和直升机型号的实验室环境试验,可选择环境适应性研制试验、直升机安全性环境试验、环境鉴定试验这三类试验。

3) 实验室环境试验各种环境类别相应试验项目的剪裁。直升机型号部件/设备实验室环境试验所选择的试验种类是在型号研制阶段实施的,因此,应根据每一试验种类试验的时机、试验目的来选择每一试验种类所相应的试验项目。通常,按下列原则对GJB 150A的试验项目进行剪裁。

a. 环境适应性研制试验。环境适应性研制试验是在型号研制的早期进行的,其目的是寻找部件/设备耐环境应力的薄弱环节,并通过设计予以改进。基于GJB 150A列举的近20项试验项目故障机理的分析研究,陆航某型直升机研制过程中认为,高温(工作高温和贮存高温)、低温(工作低温和贮存低温)及振动功能环境试验项目能达到上述目的^[11]。

b. 直升机安全性环境试验。该项试验通常是在直升机型号首飞前实施的,其目的是对飞行安全的关键/重要的部件/设备选择的环境因素及其相应的试验项目进行试验,以确保首飞安全。因此,所选择的试验项目为:试验会使部件/设备很快产生破坏或很快影响其正常功能;不选择长时间才产生影响或破坏的试验项目,也不选择对飞行安全影响不大的试验项目。基于GJB 150A近20项试验项目的故障机理的分析研究,拟选择高温、低温(工作)试验,湿度/温度试验,温度冲击试验,振动功能试验,加速度试验,冲击试验等这几类试验。

c. 环境鉴定试验。环境鉴定试验的目的是确认/验证部件/设备满足成品技术协议书规定的环境适应

性要求；为部件/设备定型提供重要决策信息。该项试验是在部件/设备设计定型批生产之前进行。通常剪裁的项目有：所有部件/设备应进行高、低温试验，温度冲击试验，加速度试验，振动、冲击、三防试验等；有气密要求的电子/电气和有气密性要求的部件

应进行温度-湿度-高度试验；安装在机外或安装在机内贴近蒙皮的部件/设备应进行太阳辐射、淋雨、沙尘、结冰试验。

通过上述分析，直升机型号研制阶段的环境试验项目的剪裁见表 3。

表 3 环境试验项目

		高温		低温		温度/ 高度/ 温度	温度 冲击	湿 热	霉 菌	盐 雾	砂 尘	加 速 度	振动			冲 击	太阳 辐射	淋 雨	结 冰
		贮存	工作	贮存	工作								振动 功能	振动 耐久	运输 振动				
环境适应性试验	研制早期	√	√	√	√								√			√			
响应特性试验	研制中期		√		√								√						
安全性试验	中、后期		√		√	√	√					√	√			√			
鉴定试验	后期、定型	√	√	√	√		√	√	√	√		√	√	√		√			

注：“√”表示必须选择的项目，未标示“√”表示项目由研制方与部件/设备转承制方协调确定；环境响应特性调查试验，可与“环境适应性研制试验”或“安全性环境试验”结合进行

4) 部件/设备的实验室环境，试验种类及试验项目的确定。实际工作中，对于一个具体的部件/设备，应根据其特点，对表 3 所确定的试验种类及试验项目，还应详细分析。如有必要，可作进一步的剪裁。例如，某些机械部件对温度变化并不敏感，就可不选择高低温试验项目。所选择的环境试验项目，包括每一环境项目的参数指标或量值，都应给定在成品协议书

3.2 制定部件/设备的实验室环境试验大纲

当直升机型号具体产品的环境适应性要求及环境试验的试验种类和试验项目确定之后，另一项重要的工作，便是制定各个部件/设备的实验室环境试验大纲，规定各种环境试验的实施。每一具体部件/设备的环境试验大纲应经订购方批准或认可，并得到承制方或研制部门的会签确认。

部件/设备环境试验大纲至少应包括如下内容：试验件的技术状态及数量；各试验项目顺序安排；各试验项目试验方法及试验程序；试验设施要求，设备、仪器、仪表及精度要求；试验数据记录要求；试验件故障或破坏判别准则；试验过程的组织管理和监控要求；试验过程中，被试验产品故障或其他原因试验中断的处理。

3.3 直升机型号环境适应性评价

如前所述，实验室环境试验是为了确认部件/产品的环境适应性设计是否满足规定的合同文件要求，实验室环境试验条件有下列原因或限制：实验室应用的环境条件；接口关系；负载等。这就不能完全模拟真实的使用（工作）环境和工作状态，与其他设备接口及相邻设备的影响。这样，实验室环境试验不能表

征真实使用环境中部件/设备的环境适应性^[1]。因此，应进行自然环境试验和使用环境试验，并收集有关使用信息，全面评估部件/设备在贮存、运输和各种使用状态的环境中的环境适应性^[1]。

GJB 4239 规定根据自然环境试验和使用环境试验的结果来评估部件/设备的环境适应性无疑是合理的，但目前的条件并不成熟。

1) 这两项试验没有如同 GJB 150 环境适应性实验室试验方法这样的标准给出相应的试验程序、试验时间和判别准则。

2) 自然环境试验和使用环境试验这两种试验需经过长时间的试验，才能表现出环境适应性特征，如盐雾、霉菌及振动环境条件对产品的影响。

基于自然环境试验和使用环境试验来评价部件/设备的环境适应性，目前尚有困难，但在直升机的实际使用中，可以收集、分析部件/产品因环境引起的故障，并通过机理研究，找出故障原因，采取相应措施，消除或减少环境损伤风险，以保持部件/设备环境适应性的固有特性。

4 结论

通过上述分析研究，可以得出以下结论。

1) 环境适应性是直升机的固有特性，是通过设计和管理实现的。

2) 应尽早地开展环境适应性分析、设计及试验（研制试验）工作，以便及时发现环境适应性的薄弱环节，采取相应的措施，以确保在寿命期内各种预定环境作用下实现预定性能、功能及不被破坏的能力。

3) 应明确使用方或研制方（承制方）和转承制方（部件、设备研制单位）的工作责任和义务，各方

紧密协作,确保研制中环境适应性工作有效有序地进行。

4) 环境适应性分析、设计和试验应与直升机型号的工程设计并行实施,确保环境适应性特征设计到直升机系统、部件/设备之中。

参考文献:

- [1] 祝耀昌. 产品环境工程概论[M]. 北京: 航空工业出版社, 2003.
- [2] STANTON N A, DHARRIS P M. Salmon Prediction Design Induced Pilot Error Using HET (Human Error Temper) — A New Formal Human Error Identification Method for Flight Desks[J]. The Aeronautical Journal, 2006(2): 107-114.
- [3] 前田 直人. 人間中心コックピットの研究[J]. 航空技術, 2005, 604: 26-35.
- [4] 陈圣斌, 周晓光, 曾曼成. 直升机人-机-环系统可靠性分析研究专题报告[R]. 景德镇: 中国直升机设计研究所, 2008: 18-35.
- [5] GJB 4239—2001, 装备环境工程通用要求[S].
- [6] 张燕, 李颖, 杨晓然. 国内外装备环境工程标准化比较研究[J]. 装备环境工程, 2009, 6(4):1-4.
- [7] 祝耀昌, 孙建勇. GJB 4239《装备环境工程通用要求》及其应用分析(一)[J]. 航空标准化与质量, 2006(6): 32-37.
- [8] 祝耀昌, 徐明, 任占勇. 加强环境适应性基础技术研究发挥环境工程对型号的保障作用[J]. 航空标准化与质量, 2001(5): 24-29.
- [9] 刘正勤. 环境工程与产品可靠性的相关性研究[J]. 环境技术, 2013(s1): 15-18.
- [10] 艾鍼世, 王思渊. 直升机可靠性维修性型号规范汇编热设计准则[K]. 景德镇: 中航总公司第六〇二研究所, 1994: 89-91.
- [11] 李尧. 飞机温度环境适应性要求分析和确定方法[J]. 可靠性和环境通讯, 2009(4): 51-57.