

相关技术

船用柴油机可靠性研发技术优化研究

畅晓鹏, 张 伟, 邱 耀

(上海船用柴油机研究所, 上海 201108)

摘 要: 针对船用柴油机可靠性与质量脱节、可靠性需求识别难及可靠性技术状态管理的问题, 在研究柴油机可靠性与质量标准的基础上, 提出了可靠性技术与典型质量工具的融合方法; 构建了适用于船用柴油机的可靠性需求工程, 并分析了可靠性需求的工程阶段和所需的可靠性分析项目; 研究了可靠性与产品技术状态管理的关联, 并提出了可靠性技术状态管理方法。结合船用柴油机研发现状, 提出了可靠性研发技术优化建议。

关键词: 可靠性; 质量; 需求工程; 技术状态管理

中图分类号: U664.121 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2021)05-0039-05

Optimization Research in the Reliability Development of Marine Diesel Engine

Chang Xiaopeng, Zhang Wei, Qiu Yao

(Shanghai Marine Diesel Engine Research Institute, Shanghai 201108)

Abstract: Aiming at the problems of disconnection between reliability and quality, difficulty in identifying reliability requirements and reliability technology state management, a fusion method of reliability technology and typical quality tools is proposed based on the study of diesel engine reliability and quality standards. The reliability requirement engineering for marine diesel engine is constructed, and the reliability requirement engineering stage and required reliability analysis items are analyzed. The relationship between reliability and product technology state management is studied, and the reliability technology state management method is proposed. Combined with the research and development status of marine diesel engine, the optimization suggestions of reliability research and development technology are put forward.

Key words: reliability; quality; requirement engineering; technology state management

0 引言

长期以来, 在船用柴油机研发流程中, 可靠性和质量各自按照固有的标准体系实施, 交集很少, 关联度不高。可靠性设计分析人员与质量管理人员分属不同的部门, 可靠性设计分析与质量管理工作脱节严重。

传统的船用柴油机可靠性需求识别和要求的提出通常借鉴已有型号, 较少从船舶动力装置用户的实际需求出发, 导致船用柴油机可靠性需求识别不

准确; 而且船用柴油机的研发设计链较长, 涉及的上下游单位和接口较多, 在需求传递过程中信息有偏差, 导致用户真正的可靠性需求无法得到有效识别、验证和跟踪管理。同时, 由于船用柴油机可靠性技术状态管理缺失, 专业设计人员往往把可靠性设计分析工作当作一次性任务, 而没有进行充分的设计分析迭代循环, 无法体现“可靠性从设计中来, 到设计中去”的原则。

基于上述问题, 本文结合船用柴油机研发现状, 提出可靠性研发技术优化建议。

1 可靠性技术与典型质量工具融合

在 2009 年发布的装备质量管理体系要求中,首次提出将可靠性作为装备通用质量特性之一纳入质量管理,使得可靠性与质量的融合得到了快速的发展。目前,可靠性研发中常用的故障模式影响分析技术已纳入质量管理五大工具,并在车辆行业形成规范。同时,用于识别客户需求的质量功能展开亦广泛应用于可靠性要求的识别和确认。可靠性逐渐成为产品质量保证的核心,但可靠性与质量之间的融合度还是有限,尤其是在船用柴油机可靠性研发流程中未能有效引入质量管理方法,使得可靠性设计分析与产品研发要求依然存在较大差距。

汽车行业质量管理体系已把可靠性工作计划纳入产品质量先期策划中,把故障模式影响分析技术作为重要的五大质量分析工具之一,在车辆用柴油机供应商中全面推广,取得了良好的效果。汽车可靠性标准也把质量功能展开、统计过程控制等常用质量工具纳入可靠性技术中,使得可靠性技术与质量工具的融合具备了一定的技术基础。

典型的可靠性技术与质量工具的融合如图 1 所示。

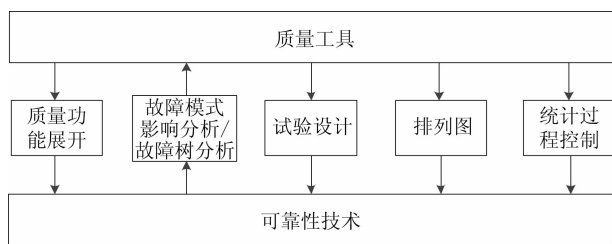


图 1 可靠性技术与典型质量工具的融合

1.1 质量功能展开

质量功能展开是把用户的需求转化为船用柴油机设计要求、零部件特性、工艺要求、生产要求的多层次演绎分析方法,是典型的质量工具。通过质量功能展开技术,可将用户需求转化为船用柴油机可靠性要求,并逐级分解到柴油机产品各层级,为船用柴油机要求的验证和确认试验提供依据。在可靠性关键技术——健壮设计的方法体系中,质量功能展开是开展健壮设计的先导步骤,可以确定产品研发的关键环节、关键零部件和关键工艺,为船用柴油机研发设计提供重点控制对象和方向。

1.2 故障模式影响分析和故障树分析

故障模式影响分析和故障树分析均是在可靠性工程中已广泛应用的分析技术。如,某大型汽车公司大约 50% 的质量改进是通过故障模式影响分析

和故障树分析来实现的。通过故障模式影响分析和故障树分析,能够找出影响船用柴油机质量和可靠性的各种潜在质量问题,从而采取针对性的设计和工艺纠正措施,提高船用柴油机的质量和环境适应性能力。

1.3 试验设计

试验设计是研究如何制定适当试验方案以便对试验数据进行有效的统计分析的数学理论与方法。试验设计法已有 70 余年的历史,在美国和日本被广泛应用于农业、制药、化工、机械、冶金、电子、汽车、航空、航天等几乎所有工业领域。美国汽车行业标准 QS 9000 “汽车行业质量管理体系”中已将试验设计列为必须应用的技术之一。试验设计在船用柴油机可靠性工程中,常用于可靠性试验方案的优化。

1.4 排列图

排列图的全称是“主次因素排列图”,是用来对影响产品质量的各种因素进行排序,从而找出主要因素并由此确定质量改进方向的一种方法。排列图作为可靠性分析技术,通常用于船用柴油机故障模式统计分析和故障风险排序。

1.5 统计过程控制

统计过程控制是由美国休哈特博士于 20 世纪 20 年代提出的,并逐渐成为在线质量控制的基本方法。根据统计过程控制理论:产品质量特性的波动是出现质量问题的根源,质量波动具有统计规律性,通过控制图可以发现异常,找出异常的原因并予以排除。统计过程控制可与工艺故障模式影响分析结合,用于船用柴油机工艺故障原因的分析 and 过程控制。

将典型质量工具与可靠性技术融合,能够弥补船用柴油机现有可靠性标准体系中设计分析技术的不足,同时将质量控制与改进中发现的问题及时有效地反馈到船用柴油机研发设计中去。

2 船用柴油机可靠性需求工程

在船用柴油机研制过程中,当用户提出明确的可靠性需求时,研制人员能够按照相应的可靠性设计分析标准和流程开展相关可靠性工作;但当用户未提出明确的可靠性需求,或可靠性需求隐含在其它产品需求中时,研制人员常常无章可循,甚至认为无须开展可靠性工作。可靠性要求是船用柴油机使用方从可靠性角度向生产方提出的研制目标,是进行可靠性设计、分析、制造、试验和验收的依据。研制人员只有在透彻地了解这些要求后,才能

将可靠性需求正确地反映到柴油机设计研发中，并按要求有计划地实施相关的组织、监督、控制及验证工作。可靠性要求来源于用户需求和船用柴油机研制要求。开展可靠性工作时，首先须要识别用户需求中明确或隐含的可靠性要求，因此有必要借鉴需求工程中需求识别、分析、确认、跟踪及持续改进技术，研究船用柴油机可靠性要求的识别和实现技术。

需求工程是指应用已证实有效的技术、方法进行需求分析，确定用户需求，帮助分析人员理解问

题并定义目标系统的所有外部特征的一门学科。它通过合适的工具和记号系统地描述待开发产品及其行为特征和相关约束，形成需求文档，并对用户不断变化的需求演进给予支持。将可靠性工程与需求工程结合，形成可靠性需求工程，其对应的阶段和分析技术如表 1 所示。

将需求工程应用于可靠性，能够识别用户或船用柴油机隐含的可靠性需求，从而采用有效的设计分析技术，满足船用柴油机的可靠性要求并持续改进，保证用户的可靠性需求得到满足。

表 1 可靠性需求工程阶段及分析技术

阶段	阶段说明	目的	对应的可靠性设计分析技术
需求获取	对现有系统进行观察，对任务进行分析，从而开发、捕获和修订用户需求。	识别用户或产品隐含的可靠性需求。	质量功能展开、标杆对照法、焦点小组、任务分析、市场调研、环境特征分析。
需求分解建模	将用户需求转化为产品各层级的要求。	采用有效的设计分析技术，满足产品可靠性要求。	故障模式影响分析、故障树分析、可靠性分配、可靠性建模、可靠性预计、概率设计（应力-强度干涉模型）、耐久性分析、有限元分析、降额设计、帕累托分析、健壮设计、故障容错设计、试验设计。
需求验证	有效性检查，一致性检查，可行性检查和确认验证性。	保证用户的可靠性需求得到满足。	环境应力筛选、加速试验、可靠性增长试验、可靠性研制试验、可靠性鉴定试验、统计过程控制、帕累托分析、可靠性评估。
需求管理	支持需求演进，如需求变化和可跟踪性问题。	持续改进产品可靠性，以满足不同用户的可靠性需求。	需求跟踪矩阵、故障记录、报告与纠正措施系统。

3 可靠性技术状态管理

可靠性是设计赋予船用柴油机的固有质量特性，可靠性要求的识别、分析、实现和保证与船用柴油机的功能、性能设计密不可分。船用柴油机设计涉及的部门和人员较多，其技术状态的变化常常无法及时反馈到船用柴油机的可靠性分析工作中，导致研发设计和可靠性分析脱节，可靠性工作变成事后补课或临时应急，失去应有的作用。因此，有必要将技术状态管理融入可靠性设计分析工作中，对船用柴油机的可靠性技术状态进行有效管理，解决可靠性与产品研发设计不同步的问题。

船用柴油机技术状态^[6]是指在技术文件中规定的并在船用柴油机中达到的物理特性和功能特性。而船用柴油机技术状态管理是指应用技术和行政管理手段对船用柴油机技术状态进行标识、控制、审核和纪实的活动。在实施技术状态管理中涉及两个基本管理要素：一是技术状态项目，二是基线。基线是指已批准的并形成文件的技术描述。技术状态管理中，一般要考虑三个基线：

功能基线、分配基线和产品基线。为了保证在船用柴油机全寿命周期内技术状态能够得到有效管理和控制，本文在国军标技术状态管理标准的基础上，进行适用性分析和调整，引入生产基线和使用基线。

3.1 功能基线

功能基线是指经过正式评审和批准的功能技术状态文件，通常包括船用柴油机研制总要求和整机初步设计规范。功能基线在船用柴油机的方案设计阶段建立。功能基线确定后，船用柴油机的总体功能即可确定，并可开展初步的功能分解，进行功能故障模式影响分析和初步的可靠性预计工作，将可靠性指标作为设计约束条件之一，进行各种设计方案的权衡分析，最终确定优化的设计方案。

3.2 分配基线

分配基线指经过正式评审和批准的分配技术状态文件，通常包括船用柴油机详细研制规范、可靠性工作计划、初步试验方案、任务书及大纲等。分配基线一般在技术设计阶段建立，产生船用柴油机的详细设计信息，包括零部件清单、性能参数等。

分配基线确定后,船用柴油机的各产品层级组成即确定,伴随各产品层级(含零部件)的可靠性设计分析活动亦同步开展,例如可靠性分配、零部件可靠性预计、硬件故障模式影响分析、故障树分析、降额设计、容差分析等。

3.3 产品基线

产品基线指经过正式评审和批准的产品技术状态文件,通常包括船用柴油机产品规范、材料规范、工艺规范、产品图样、详细试验方案、任务书及大纲等。产品基线一般在产品设计定型时基本建立,在产品生产定型时最终建立,对应于船用柴油机施工设计阶段。产品基线确定后,将开展主要的可靠性分析和验证活动,例如工艺故障模式影响分析、环境应力筛选、可靠性研制试验、仿真分析及可靠性增长试验等。

3.4 生产基线

生产基线指经过正式评审和批准的生产技术状态文件,通常包括船用柴油机生产制造计划、生产制造作业卡片、生产检验指导书、生产管理规范等。生产基线一般在生产定型时基本建立,在大批量生产前最终建立。生产基线确定后,将开展主要的可靠性分析和验证活动,例如生产设备的故障模式影响分析、可靠性鉴定和验收试验、统计过程控制等。

3.5 使用基线

使用基线指经过正式评审和批准的使用技术状态文件,通常包括船用柴油机使用手册、船用柴油机维护手册、设备运行与操作规程、保障资源配置说明书等。使用基线一般在交付使用时建立。使用基线确定后,将开展主要的可靠性分析和验证活动,例如使用故障模式影响分析、使用可靠性信息收集、使用可靠性评估、使用可靠性改进等。

通过可靠性技术状态管理,能够保证来自不同设计人员、船用柴油机不同产品层级的各项可靠性设计分析活动的规范化和有效性。同时可使在生产制造、使用维护中发现的可靠性问题及时反馈到船用柴油机的研发设计中。

4 船用柴油机可靠性研发技术优化实践案例

某型号船用柴油机在各研制阶段,通过质量功能展开和故障模式影响分析的有效结合,将需求工程、质量工程、技术状态管理与可靠性工程技术融合。图 2 所示为在此基础上进行的产品研发技术优化实践。

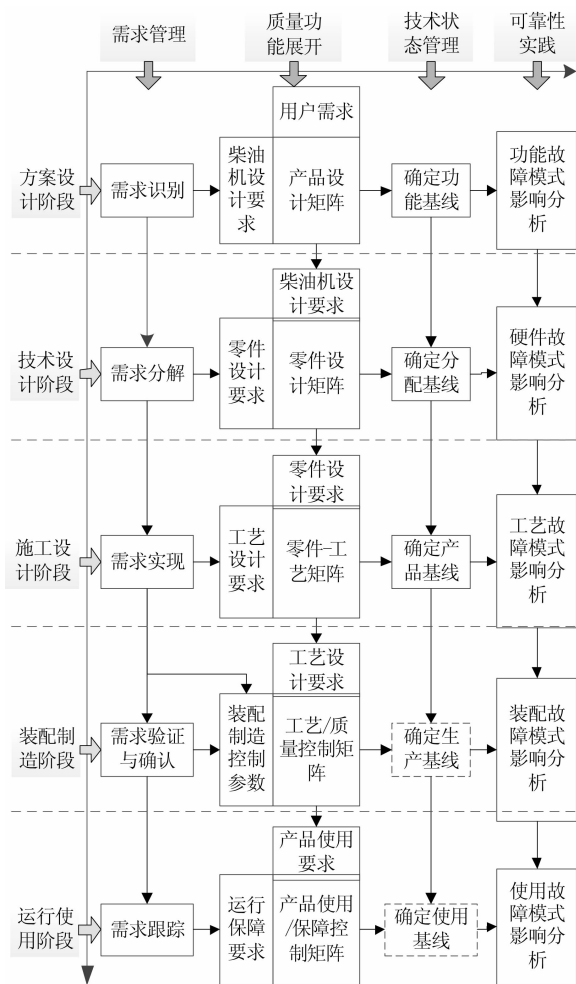


图 2 船用柴油机设计过程中的需求工程、质量功能展开、技术状态管理及可靠性融合实践

4.1 方案设计阶段

通过质量功能展开识别用户需求,建立用户需求与船用柴油机总体设计要求的相关性矩阵,将用户需求转化为产品设计要求,为确定产品功能基线提供输入,并开展船用柴油机功能故障模式影响分析工作。

4.2 技术设计阶段

通过质量功能展开分解产品需求,建立船用柴油机总体设计要求与各组成单元设计要求的相关性矩阵,将船用柴油机总体设计要求转化为零部件设计要求,为确定产品分配基线提供输入,并开展船用柴油机硬件故障模式影响分析工作。

4.3 施工设计阶段

通过质量功能展开进一步分解产品需求,建立船用柴油机零部件设计要求与柴油机工艺设计要求的相关性矩阵,将零部件设计要求转化为工艺实现设计要求,为确定产品实现基线提供输入,并开展船用柴油机工艺故障模式影响分析工作。

4.4 装配制造阶段

通过质量功能展开建立船用柴油机工艺设计要求与生产制造要求的相关性矩阵，将工艺实现设计要求落实到产品生产制造过程中，为确定生产基线提供输入，并开展船用柴油机装配制造故障模式影响分析工作。

4.5 使用运行阶段

通过质量功能展开建立船用柴油机使用要求与运行保障要求的相关性矩阵，为确定使用/保障基线提供输入，并开展船用柴油机使用故障模式影响分析工作。

在船用柴油机的整个研发周期，通过质量功能的逐级展开，从如何满足需求的角度阐明了用户需求的层级实现；通过故障模式影响分析，从无法满足需求的角度阐明了如何预防和控制需求偏差影响因素。船用柴油机可靠性研发技术优化的实践，有效解决了可靠性与质量脱节、可靠性需求识别难及可靠性技术状态管理问题。

5 船用柴油机可靠性研发技术优化建议

在船用柴油机设计过程中，继承产品、自主研发以及外协外购同时存在，设计接口多，管理协调任务重，靠现有的标准体系无法有效开展系统并行研发工作，应借鉴其它行业柴油机研发的各种先进理念和技术手段^[1]，在保证进度和质量的前提下，探索适用于船用柴油机的研发体系，具体建议如下。

(1) 可靠性与质量融合。将经过实践证明或行业可靠性标准认可的典型质量工具（如质量功能展开、统计过程控制、产品质量先期策划、试验设计等）与船用柴油机可靠性设计分析技术（如故障模式影响分析、故障树分析、可靠性试验等）在船用柴油机研制各阶段进行融合，使质量和可靠性工作相互协调补充，贯穿产品研发设计全过程。

(2) 构建可靠性需求工程。将可靠性与需求

工程结合，满足船用柴油机研制各阶段的可靠性要求，保证用户的可靠性需求能够贯穿产品全寿命周期。在船用柴油机现有可靠性设计分析技术体系中，重点补充可靠性需求识别和跟踪管理技术，将质量功能展开工具应用于船用柴油机可靠性需求识别和分解；将需求跟踪矩阵应用于船用柴油机可靠性需求跟踪和管理。

(3) 可靠性技术状态管理。在功能基线、分配基线和产品基线划分的基础上，补充船用柴油机生产基线和使用基线，从船用柴油机全寿命周期视角，根据技术状态变化，协调安排可靠性设计分析活动进程及与研发设计的交互，保证船用柴油机可靠性技术状态与产品研发同步。

6 结论

本文在研究柴油机可靠性与质量标准的基础上，结合船用柴油机研发现状，提出了可靠性研发技术优化建议。首先，介绍了常用的可靠性技术和典型质量工具，并提出了可靠性与质量融合的方法，弥补了现有可靠性标准体系中设计分析技术的不足。其次，构建了可靠性需求工程，并分析了其对应的阶段和技术项点，保证用户的可靠性需求得到满足，持续改进船用柴油机的可靠性，以满足不同用户的可靠性需求。然后，研究了可靠性与产品技术状态管理的关联，并提出了可靠性技术状态管理方法，保证可靠性技术状态与船用柴油机研发同步。最后，结合某船用柴油机可靠性研发实践和研发现状，将需求工程、质量工程、技术状态管理与可靠性工程技术融合，进行了船用柴油机可靠性研发技术优化的实践，解决了可靠性与质量脱节、可靠性需求识别难及可靠性技术状态管理问题。

参考文献

- [1] 古莹奎. 柴油机可靠性分析及风险评价 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2012.