

DFMEA在发动机设计中的应用

徐桂红¹, 刘兴华¹, 陈晓彤²

(1. 北京理工大学发动机实验室, 北京 100081; 2. 北京运通恒达科技有限公司, 北京 100089)

摘要: 分析了在发动机设计中实施设计故障模式及后果分析(DFMEA)的困难,以节流阀体的改进设计为主线,提出了确定DFMEA详细分析对象的方法,减少了分析对象的数量,节省了工作时间;对DFMEA流程以及严重度的判定进行了改进并提出将其所分析的项目划分为基础项和衍生项新概念,利用改进的DFMEA方法,分析出节流阀体的故障原因与影响,并提出了相应的建议措施,结果表明,DFMEA更适于在内燃机行业的使用与推广。

关键词: 故障模式; 后果分析; 分析对象; 流程; 严重度; 节流阀体

中图分类号: TK402 **文献标志码:** B **文章编号:** 1001-2222(2006)03-0019-05

设计故障模式及后果分析(DFMEA)是一种以预防为主的安全性设计分析技术,该技术的应用有助于企业提高产品质量,降低成本,缩短研发周期。目前,DFMEA已在航空航天以及国外的汽车行业得到了较为广泛的应用,并显示出了巨大的威力;但在国内汽车行业并没有系统地展开,也没有发挥其应有的作用。作者通过对国内汽车行业的设计、开发以及故障模式及后果分析(FMEA)的使用现状进行了调研,发现共存在以下几个方面的问题:

① 进行了一定的工作,但并没有与设计工作相结合,使DFMEA工作流于表面;

② 对DFMEA的理解不够深入,不知该如何继续开展;

③ DFMEA的前期准备工作不足,使其无法深入开展。

针对国内DFMEA的工作现状,作者对现有的DFMEA方法进行了一定的改进,并加入自己的理解使其具有更强的工程实施性,该方法在某国产汽油机的改进型上进行了实施,收到了较好的效果。本研究以DFMEA在该国产汽油机节流阀体的改进设计中的实施为例,对改进后的DFMEA的实施方法和流程进行阐述。

1 DFMEA基本原则^[1]

DFMEA是在最初生产阶段之前,确定潜在的或已知的故障模式,并提供进一步纠正措施的一种规范化分析方法;通常是通过部件、子系统/部件、系

统/组件等一系列步骤来完成的。最初生产阶段是明确为用户生产产品或提供服务的阶段,该阶段的定义非常重要,在该阶段开始之前对设计的修改和更正都不会引起严重的后果,而之后对设计的任何变更都可能造成产品成本的大幅提高。

DFMEA应当由一个以设计责任工程师为组长的跨职能小组来进行,这个小组的成员不仅应当包括可能对设计产生影响的各个部门的代表,还要包括外部顾客或内部顾客在内。DFMEA的过程包括产品功能及质量分析、分析故障模式、故障原因分析、确定改进项目、制定纠正措施以及持续改进等6个阶段。

2 实施DFMEA存在的困难

发动机为完成其相应的功能,组成结构复杂,零部件的数量也很庞大,如不加选择地对所有的零部件和子系统都实施DFMEA,将会耗费大量人力、物力和时间,对于初次实施DFMEA的企业几乎是不可能完成的工作。为此,需要开发一种方法,能够从发动机的子系统/零部件中选择出优先需要进行分析的对象。

发动机由曲柄连杆机构、配气机构、燃油供给系统、进气系统、冷却系统和润滑系统等组成,各机构和系统完成相应的功能。子系统的下级部件或组件通常需要配合完成相应的功能,在描述这些部件或组件的功能时,不仅应该描述其独立完成的功能,还应描述与其他部件配合完成的功能。

收稿日期: 2005-12-23; 修回日期: 2006-03-10

作者简介: 徐桂红(1979—),女,山东省潍坊市人,在读博士,主要研究方向为发动机系统可靠性研究。

组成发动机的零部件种类很多,不仅包括机械零部件还有电子元件,电子部件的故障模式已经较为规范和完整,但机械系统及其零部件的故障模式相当复杂,不仅没有完整且规范的描述,二者之间还有一定的重复,为 DFMEA 工作的开展带来了困难,故需要为机械系统及其零部件建立相应的故障模式库。

3 实施 DFMEA 的准备工作

由于在发动机设计中实施 DFMEA 要遇到较多困难,故作者建议,在具体实施 DFMEA 之前,需要做好建立较为完善的故障模式库并确定 DFMEA 的详细分析对象等准备工作。

3.1 建立故障模式库的方法

发动机的组成零部件多、结构复杂,大多数零部件在运行时还会有相互作用,导致零部件、子系统和系统的故障模式不仅复杂,各层次的故障模式还会相互重复,需要为发动机建立一个故障模式库;该模式库不仅应该包含发动机中所有子系统和零部件的故障模式,还能够反映出该故障模式究竟属于哪一个零部件或系统,其建库流程如图 1 所示。

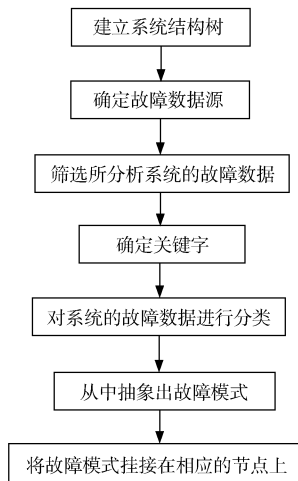


图 1 建立故障模式库的流程

3.1.1 建立系统结构树

为建立故障模式库,首先要建立系统的结构树,它并不依赖于某一特定的产品,而是依据同一类产品建立。如建立一个汽油机的结构树时,应考虑该厂所有的汽油机,分析出其共同特点后建立结构树;对于组成结构有重大改变的产品,可以考虑为其改变的部分建立一个分支,挂接在系统结构树的相应节点上。

以汽油机的节流阀体为例,该阀体大致都由阀体、怠速控制阀、节气门位置传感器等组成,细节部分会有所不同,节流阀体的系统结构树如图 2 所示。

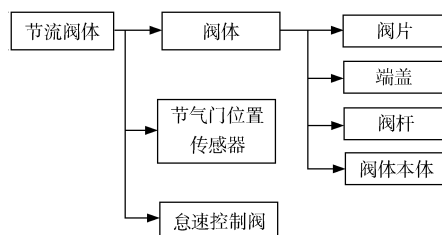


图 2 节流阀体的系统结构树

3.1.2 确定故障数据源

为确定故障模式,先要找到相应的数据源;建议选择同类产品的试验数据或三包数据,因为这两种数据中较为详细地记录了产品在试验和使用过程中出现的故障。由于发动机可靠性试验的成本很高,一般企业中都不会有充分的试验数据;尽管三包数据记录的不是十分规范,但通过归纳和整理,仍然可以从中抽象出故障模式。所以,在试验数据不充足的情况下,一般推荐采用三包数据。

3.1.3 筛选所分析子系统的故障数据

一般来讲,故障数据来自于系统,需要将故障数据逐层筛选,才能最终得到系统、每一级子系统以及零部件的故障数据,为确定其故障模式作准备。

3.1.4 确定关键字

三包数据来自于不同的维修点,并非由专业的试验人员收集,难免存在不规范的现象,比如对于“密封不严”这一故障现象,故障数据中就会有“密封不严、不密封、密封性差、密封性不好”等多种描述。针对这种现象,建议数据归纳人员先要了解各种故障现象的描述,在此基础上确定关键字,对所选子系统的故障数据进行归类。关键字确定的原则是,能筛选到 95% 以上的同种故障现象,尽量做到不遗漏;不同故障现象间尽量做到不重复。因此,筛选同一种故障现象很可能需要确定几个关键字。

3.1.5 对系统的故障数据进行分类

依据确定的关键字对系统的故障数据进行分类,分类后的故障数据就可以用来抽象出故障模式。

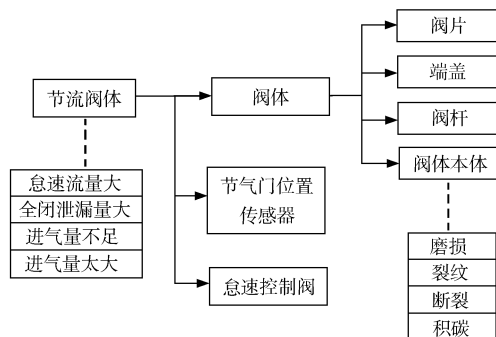
3.1.6 故障模式的抽象

根据分类后的故障数据,可以抽象出相应的故障模式。故障模式要求用术语表示,汽车产品可以参照标准 QC-900;标准中没有的故障模式,需由工程师商量之后统一确定。

3.1.7 故障模式挂接在系统结构树的节点上

系统、子系统及零部件等不同层次都会有相应的故障模式,需要将其挂接在相应的节点上,至此故障模式库就搭建完成。随着分析工作的深入和故障数据的持续归纳,故障模式库会越来越完整。

对节流阀体的故障数据进行以上的处理之后,得到了各级组件及零部件的故障模式,建立了节流阀体的故障模式库,图 3 示出故障模式库的一部分。



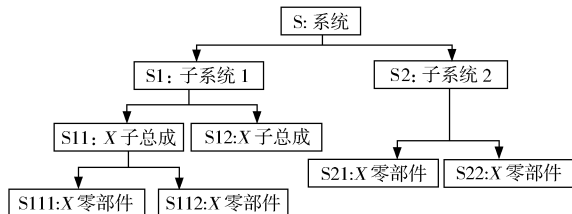
需要指出,实施 DFMEA 时分析对象的故障模式不仅来源于故障模式库,还来自于工作小组的分析。

3.2 确定 DFMEA 的详细分析对象

根据实施 DFMEA 需要耗费大量时间的具体情况,本研究的参考文献[2]提出了一种新方法来确定需要详细实施 DFMEA 的对象;思路是对系统进行逐级分析,根据一定的标准确定需要详细分析的分支(以下称为重要分支),对重要分支一直细化到最底层,不可再分的重要分支即为需要详细分析的对象。方法分为 3 步,即建立系统的组成结构树、确定阈值、选择所需分析的对象。

3.2.1 建立系统的组成结构树

此处系统的组成结构树与第 3.1.1 节中的系统结构树类似,但本质上不同。这里的系统组成结构树是与系统的组成完全相同,依照系统的结构和功能逐级向下建立,直到系统的零部件为止(称为组成结构树的叶结点)。组成结构树的示意图见图 4。



图中的系统由子系统 1 和子系统 2 组成,两个子系统分别完成相应的功能。子系统 1 由子总成 1 和 2 组成,子总成 1 又可以向下划分为零部件;子系统 2 由两个零部件组成。其中 S12, S21, S22, S111 和 S112 都是该组成结构树的叶结点。

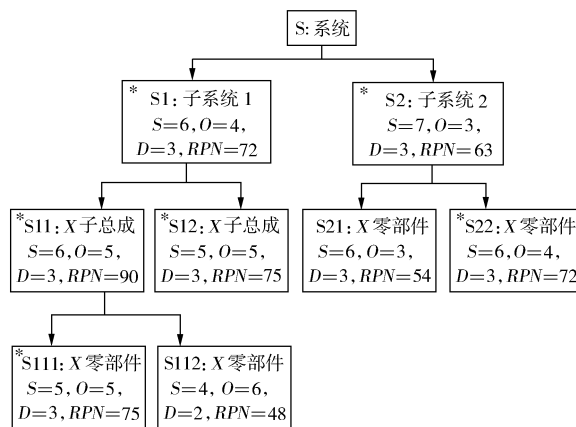
3.2.2 确定阈值

阈值是确定重要分支所依据的条件。根据 DFMEA 的原理,推荐确定重要度(S)和风险顺序数(RPN)两个参数的阈值,只要某分支的 S 和 RPN 两参数中的任意一个等于或超过阈值,该分支就被确定为重要分支。除 S 和 RPN 以外,DFMEA 中还有发生度(O)和探测度(D)两个参数,S 用来描述故障后果,O 表明故障原因的发生概率,D 是对探测措施有效程度的度量,RPN 是 S, O, D 3 者的乘积。O 和 D 的阈值根据类似产品的故障数据确定,原则是要比 DFMEA 中的阈值低。

3.2.3 选择所需分析的对象

对产品的组成结构树逐级向下分析,首先确定第一级分支的所有的 S, O, D 值,并计算得到 RPN 值;然后根据第 3.2.2 节中的阈值来确定哪一个分支为重要分支,被确定为重要分支的仍然重复以上过程直到组成结构树的叶结点,非重要分支则不再继续分析。

以图 2 所示的系统组成结构树为例,选择需要分析的对象。假设 S 和 RPN 的阈值分别为 6 和 70,组成结构树中分支的各参数情况如图 5 所示,有“*”的部分为重要分支。



由图可见,子系统 S1 的 S 和 RPN 都达到阈值,被确定为重要分支;子系统 S2 的 RPN 虽未达到阈值,但 S 已经超过阈值,也被确定为重要分支;

S12, S22 和 S111 被确定为分析对象,需要对其进行详细的 DFMEA。

分析节流阀体的故障数据,确定 S 和 RPN 的阈值分别为 5 和 30,分析结果见图 6。由分析结果可知,需要对节气门位置传感器、怠速控制阀、阀片、阀体本体进行详细的 DFMEA。

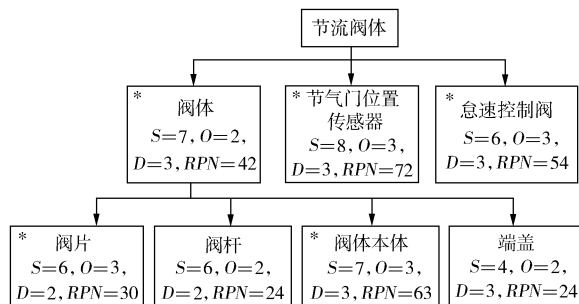


图 6 确定节流阀体分析对象

4 实施 DFMEA 的流程

为增加 DFMEA 的可用度,使初次进行 DFMEA 的工作人员也能顺利地实施 DFMEA,针对发动机设计的特点,对 DFMEA 的流程进行了进一步的归纳和改进(见图 7)。

为加深对实施阶段的理解,提高分析效率,将实施阶段分成确定基础项、确定衍生项及生成 DFMEA 报告等 3 步。

实施阶段中,功能、潜在故障模式、潜在故障影响、故障原因和现有控制措施等 5 个加“*”的为基础项,它们的分析是决定 DFMEA 实施成功与否的关键; S, O, D, RPN 和建议的纠正措施为衍生项;基础项确定之后,衍生项可以随之确定。

4.1 分析基础项

4.1.1 功能

分析项目的功能,用尽可能简明的文字来说明被分析项目满足设计意图的功能;阀体的功能是与阀片配合保证最小流量;与怠速控制阀配合保证怠速流量;与节气门位置传感器配合保证主进气量。

4.1.2 潜在故障模式

每项功能会对应一种或一种以上的故障模式,填写故障模式要遵循“破坏功能”的原则,即尽量列出破坏该功能的所有可能的模式;故障模式大部分来源于故障模式库,还有一部分是新出现的故障模式以及小组分析的结果,阀体的潜在故障模式为磨损、裂纹、断裂以及积碳等。

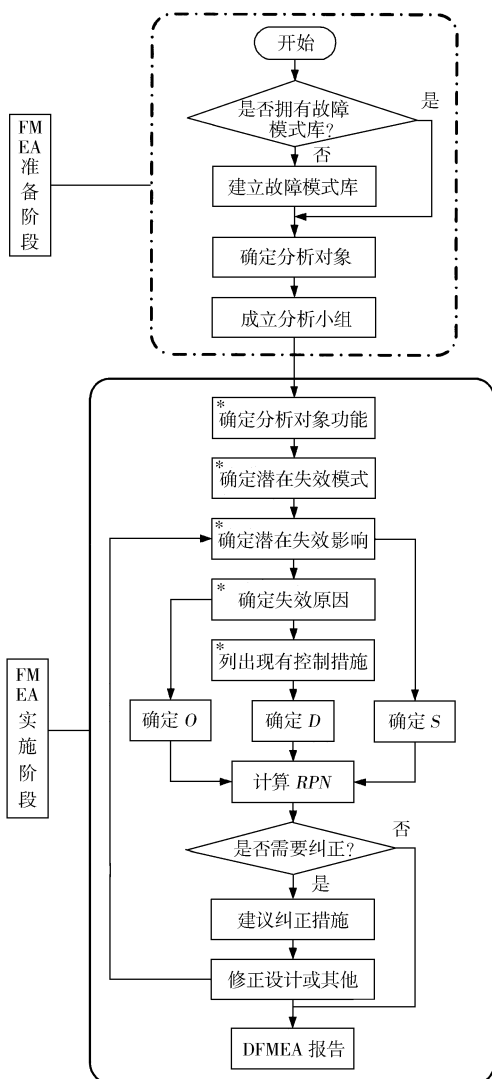


图 7 DFMEA 流程

4.1.3 潜在故障后果

每种故障模式都会有相应的故障后果;分析故障后果时,应尽可能分析出故障的最终影响,即最严重的影响;阀体的潜在故障后果为发动机无力、燃油消耗率高、怠速高。

4.1.4 潜在故障起因

所谓故障的潜在起因是指设计薄弱部分的迹象,其结果就是故障模式;根据阀体结构和对其进行的功能分析,可以知道阀体磨损的潜在故障原因为,阀体喉口与阀片直径不匹配;阀杆与阀片螺钉孔的位置不匹配;怠速控制阀与怠速通道的孔径不匹配;怠速通道的孔系不同轴。

4.1.5 现有控制措施

根据故障的潜在起因可确定预防与探测的措

施,这些都是已有的或将要有的措施。

阀体的现有控制措施为配合设计阀体喉口和阀片直径,保证其配合间隙;配合设计阀杆和阀片螺钉孔位置,保证其同心度;配合设计怠速控制阀和怠速通道的孔径,保证其配合间隙。

4.2 分析衍生项

根据潜在故障后果确定 S , 根据潜在故障原因以及同型产品的三包数据确定 O , 根据探测措施确定 D ; 根据确定的 S, O, D 计算得到 RPN 值。如果需要修正, 可以提出适当的建议措施, 作为改进的依据, 最后生成统一的 DFMEA 报告。

美国汽车工业行动集团(AIAG)颁布的 FMEA 标准中, 提供了严重度、 O 和 D 的评定准则^[3], 其中, O 准则非常直观, 根据计算得到的频率即可得。

D 和严重度判定准则的操作性较差, 作者推荐企业根据 AIAG 的 D 准则, 结合企业现有的控制措施制定适用于企业自身的 D 判定准则。

至于严重度的判定, 提倡仍沿用 AIAG 的准则, 但为了增强其可操作性, 作者对其进行了进一步的归纳总结, 生成如图 8 所示的流程; 根据该流程即可很容易地判定每种故障的严重度。

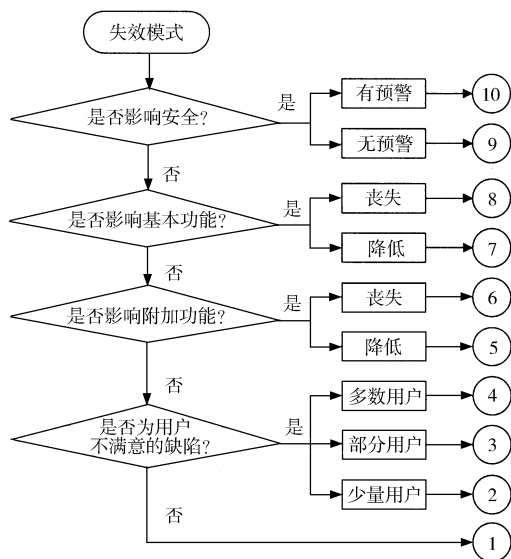


图 8 严重度判别流程

阀体磨损的严重度 影响了发动机的基本功能, 但未完全丧失, 所以严重度为 7;

阀体磨损的 O 根据故障数据的统计结果, 结合专家组的分析, 确定 O 为 3;

阀体磨损的检测度 现有的控制措施除硬度检测外, 均为对两零部件的配合检测, 有较多的机会能

找出潜在的起因, 检测度为 4。

专家组确定 S 和 RPN 的阈值为 7 和 80, 当 S 超过 7(含 7), RPN 超过 80(含 80) 时, 必须对其进行改进。因此, 提出了以下建议措施:

a) 阀体喉口和阀片直径、阀片和阀杆影响全闭泄漏量, 除保证其配合间隙外, 还应通过设计保证装配后阀体喉口和阀片的同轴度, 并进行全闭泄漏量检测;

b) 怠速控制阀和怠速通道影响怠速流量, 先需要通过设计保证怠速通道孔系的同轴度, 然后保证怠速控制阀和怠速通道的同轴度和间隙。

完成以上分析后, 要根据建议措施对设计进行修正(实际采取的措施可能与建议措施不同), 修正后再重复以上步骤, 直至 S 和 RPN 低于确定的 DFMEA 的 S 和 RPN 阈值。

4.3 生成 DFMEA 报告

完成每轮 DFMEA 之后, 要及时生成 DFMEA 报告, 包括需改进的零部件、建议措施和改进措施等。

5 结论

a) 提出的确定详细 DFMEA 对象的方法, 大大减少了 DFMEA 分析对象的数量和分析时间;

b) 将 DFMEA 准备工作纳入 DFMEA 的流程, 并将 DFMEA 的分析项目分成基础项和衍生项加以分析, 增强了 DFMEA 的工程实用性, 使初次进行 DFMEA 工作的小组也能顺利实施 DFMEA;

c) 对原有 DFMEA 严重度的判定准则进行的说明和改进, 使判定更加直观和准确。

参考文献:

- [1] Stamatis D H. Failure Mode and Effect Analysis FMEA from Theory to Execution (故障模式影响分析 FMEA 从理论到实践) [M]. 陈晓彤, 姚绍华, 译. 北京: 国防工业出版社, 2005: 103-121, 226-251.
- [2] Campatelli G A. Reliability Improvement of Diesel engine Using the FMEA Approach [J]. Qual. Reliab. Eng. Int., 2004(20): 143-154.
- [3] AIAG. Potential Failure Mode and Effects Analysis (Third Edition) [M]. Michigan: Automotive Industry Action Group, 2001.

(下转第 27 页)

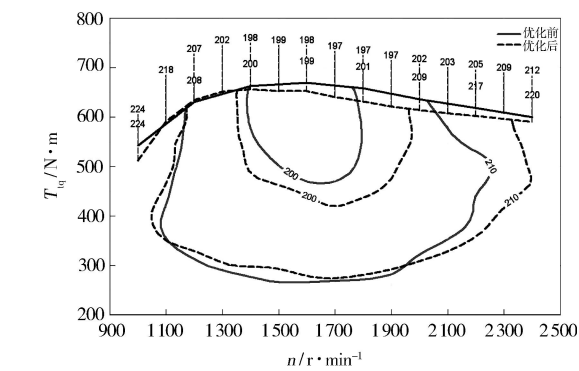


图 6 优化前后的 b_e MAP 对比

6 结束语

系统研究了基于模型标定方法的 3 个阶段即试验设计、统计建模和标定优化;工程实践表明,基于模型标定方法可以有效提高车用发动机电控系统的

标定质量和效率,是一种省时省力的方法。

参考文献:

[1] 李国岫. 车用发动机电控系统优化标定方法的研究[J]. 柴油机设计与制造,2005,14:7-10.

[2] 张京永. 高压共轨柴油机稳态标定与优化方法的研究[D]. 北京:清华大学,2003.

[3] 颜伏伍,任 明. 电控发动机自动标定系统设计[J]. 武汉理工大学学报(信息与管理工程版). 2004,26(4): 36-39.

[4] 王俊席,冯 静. 电控发动机标定系统的研发[J]. 柴油机,2003(3):12-16.

[5] 张跃涛,王绍光. 发动机自动化性能试验及标定系统[J]. 清华大学学报(自然科学版),2001,41(8):94-96.

[6] 冯宗磊,杨福源. 发动机的组合神经网络建模[J]. 清华大学学报(自然科学版),2005,44(11):24-27.

Application Study of Model-based Calibration Method
for Common Rail Diesel Engine

WU Jian-ying¹, YANG Fu-yuan¹, CHEN Xiao-xun², OU YANG Ming-gao¹

(1. Automobile Engineering Department, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Commercial Vehicle R&D Center, Dongfeng Motor Company Limited, Shiyan 442001, China)

Abstract : This paper presents using model-based calibration method to optimize the fuel economy of common rail diesel engine and systemically introduces three stages of model-based calibration method, including experiment design, engine statistical modeling and calibration optimization. The test result shows that the engine fuel consumption is significantly improved and the time for calibration becomes shorter.

Key words : model; calibration optimization; common rail; diesel engine [编辑: 段金栋]

(上接第 23 页)

Application of DFMEA in Engine Design

XU Gui-hong¹, LIU Xing-hua¹, CHEN Xiao-tong²

(1. Lab of Engine Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. Beijing Yuntong Forever Science Technology Co. Ltd., Beijing 100089, China)

Abstract : Difficulties of design failure mode and effect analysis(DFMEA) application of engine design are analyzed, and some research has been made in the improved design of throttle valve casing of one Chinese made gas engine. The method of Defining detailed DFMEA object is provided, which reduces the DFMEA's object number, and save time on DFMEA. The DFMEA's flow and severity determinant rule are improved, and the basic item and related item in analysis process are proposed, which make DFMEA more suitable in engine design. The improved DFMEA is used to analyse the throttle valve casings failure cause, effect and some recommend corrective actions are attained successfully.

Key words : failure mode; effect analysis; analysis object; flow; severity; throttle valve casing [编辑: 张玉花]