

新制造环境下的装备质量与可靠性研究

吴甦¹, 王贇松², 张弛¹, 张纲^{1,2}

(1. 清华大学质量与可靠性研究院, 北京 100084;
2. 国家质量监督检验检疫总局产品质量监督司, 北京 100088)

摘要: 中国制造业大而不强的主要瓶颈之一是产品质量不高。而制约产品质量提高的重要因素是产品的可靠性。本文通过对产品可靠性形成机理的分析, 提出应在产品设计阶段引入可靠性设计; 为应对激烈的市场竞争, 为提高可靠性设计的效率, 提出了基于信息化的协同可靠性设计理论框架。

关键词: 中国制造; 质量; 可靠性; 设计; 信息化; 协同

中图分类号: F273 **文献标识码:** A

Research on the Quality and Reliability of Equipment under New Manufacturing Circumstances

Wu Su¹, Wang Yunsong², Zhang Chi¹, Zhang Gang^{1,2}

(1. Institute of Quality and Reliability, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Beijing 100088, China)

Abstract: The main obstacle restricting manufacturing industry in China from being stronger is such not good enough products' quality. One of the main issues that cause the low product quality is its relatively low reliability. Thus, based on the analysis on the mechanism of product reliability, we claim that reliability design should be incorporated at the very beginning of product design. In order to improve the efficiency of product design and to release the new products to the market more quickly, we propose a framework of coordinated reliability design supported by the information technology to gain the competitive advantages.

Key words: made in China; quality; reliability; design; informatization; coordination

一、前言

制造业是国民经济的重要支柱, 是国家综合实力与国际竞争力的重要体现。日本国民经济总产值约 49% 来源于制造业。2010—2012 年, 制造业对我国国内生产总值 (GDP) 的贡献率约为 44.6%^[1,2]。正因为制造业的重要性, 近几年, 为应对后经济危机时代经济发展的困境, 各国纷纷推出制造业振兴

计划, 如美国的“先进制造伙伴 (AMP)”计划, 德国的“工业 4.0”战略等。通过这些计划, 各国希望能够提振本国的制造业, 从而带动经济走出低谷。

自改革开放以来, 中国制造业发展迅速, 规模已跃居世界第一位^[3]。2010 年, 中国制造业产出占世界比重的 19.8%, 超过了美国 (19.4%)^[2]。2012 年中国制造业增加值为 2.08 万亿美元, 同样超过了美国 (1.91 万亿美元)^[3]。同时, 我国已建立

收稿日期: 2015-05-22; 修回日期: 2015-06-23

作者简介: 吴甦, 清华大学质量与可靠性研究院, 教授, 博士生导师, 研究方向为质量管理, 可靠性与设备维护, 制造工程等;

E-mail: wusu@tsinghua.edu.cn

本刊网址: www.engingsci.cn

起门类齐全、独立完整的制造体系，成为支撑我国经济社会发展的重要基石和促进世界经济的重要力量。因此，可以说我国已经成为了制造业大国。然而，与世界先进水平相比，我国还称不上是制造业强国^[3]。

进入新常态之后，我国制造业的发展面临诸多新的挑战，如资源和环境约束不断强化，市场竞争异常激烈，劳动力等生产要素成本不断上升，产能过剩，主要依靠资源要素投入、规模扩张的粗放发展模式难以为继，发达国家制造业回归本土，新兴制造基地迅速崛起等^[2,3]。为应对新的挑战，振兴中国制造业，2015年5月，国务院正式发布了《中国制造2025》，提出了制造强国战略：到新中国成立一百年时，把我国建设成为引领世界制造业发展的制造强国，为实现中华民族伟大复兴的中国梦打下坚实基础。

为实现这一宏大战略目标，首先应该找出导致中国制造业大而不强的根本原因，从而制定相应的应对措施。不难发现，制约中国制造业发展的重要原因之一，就是中国产品的质量与世界领先水平相比存在较大差距，产品档次不高，缺乏世界知名品牌^[3]。其中，重要的表征之一为中国制造产品的可靠性比较低。举例来说，我国客车首次故障里程一般为1 000~5 000 km，而国际先进水平是16 000~20 000 km；我国客车平均故障间隔里程为2 000~5 000 km，而国际先进水平为14 000~20 000 km。我国生产的数控机床平均无故障工作时间为500~600 h，而国外则在800~1 000 h。而有的先进的数控机床的平均无故障工作时间已经达到5 000~80 000 h^[4]。由此可见，我国的数控机床的可靠性与国外的数控机床存在较大的差距。

正因为中国制造产品的质量和可靠性与世界先进水平存在较大差距，《中国制造2025》将加强质量品牌建设列为九大战略任务和重点之一（另外八大战略任务包括：提高国家制造业创新能力、推进信息化与工业化深度融合、强化工业基础能力、全面推行绿色制造、大力推动重点领域突破发展、深入推进制造业结构调整、积极发展服务型制造和生产性服务业、提高制造业国际化发展水平）。

为实现中国速度向中国质量的转变，中国产品向中国品牌的转变，并最终实现中国制造由大变强

的战略任务，应当坚持以质量为先的指导思想，发展并实践先进的质量管理理念与方法。为此，本文在分析中国制造业质量与可靠性问题的基础上，提出了基于信息化的协同可靠性设计的理论框架，希望能够促进中国制造产品可靠性的提升。

二、中国制造业质量问题原因分析

按照ISO9001《质量管理体系要求》，质量是指一组固有特性满足要求的程度。可靠性则指产品在规定的条件下和规定的时间内，完成规定功能的能力^[5]。可靠性同时也被视为产品质量的重要属性之一。相对于产品质量中的外观、品牌和服务等需求，可靠性是一个更加客观的需求标准，可以通过量化的评价指标来衡量，它也可以直观上理解为“经久耐用”^[6]。可靠性的定义中非常重要的一点在于其强调的在“规定的时间内”能够完成规定的功能。因此，可靠性是产品质量在时间维度上的延伸，没有较高的产品可靠性，就没有较高的产品质量。

然而，我国制造业产品的可靠性与国际先进水平相比，还有很大的差距。以汽车行业为例，图1为美国麦格希金融服务集团旗下的J. D. Power所发布的2011—2014年中美两国汽车行业的PP100（每100辆车的问题数）值^[7-14]。需要说明的是，中国汽车行业的PP100值在计算时，包含中国制造的自主品牌和合资品牌（如一汽大众、上海通用、东风本田等）。2011—2014年，我国生产的汽车的PP100值均明显高于美国（分别高出51%、48%、60%和47%）。而且，从图1中，无法看出中国制造的汽车的可靠性有明显好转的迹象。无疑，较低的可靠性大大制约了中国制造由大变强的进程。

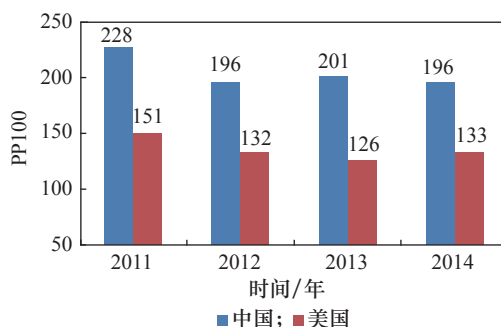


图1 中国与美国汽车行业PP100比较

三、提升中国制造业质量与可靠性的途径： 可靠性设计

(一) 可靠性形成机理分析

为了提升产品的可靠性，首先需要研究产品可靠性形成的机理。在可靠性视角下，产品的生命周期可划分为如图 2 所示的三个阶段。视产品被购买的时刻为零时刻。零时刻之后，顾客开始使用产品，开始对产品的质量进行感知。而这一感知的好坏，很大程度上取决于产品的可靠性。零时刻之前的产品生命周期可以划分为两个阶段：产品设计阶段和产品制造阶段。在产品设计阶段，首先要识别顾客的需求，在此基础上进行产品的功能设计和可靠性设计。在制造阶段，可以通过质量控制手段使得所生产出来的产品符合设计要求。

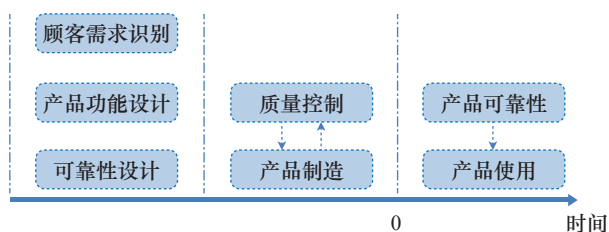


图 2 可靠性视角下的产品生命周期

那么，对产品可靠性起决定作用的是哪个阶段呢？毫无疑问，最主要的是在设计阶段。如果设计出来的产品本身的可靠性就很低，那么即使制造过程能够保证所有的产品参数都严格符合设计标准，也无法制造出具有高可靠性的产品，甚至可能造成严重的事故。例如，2011 年 7 月 23 日晚上 20 点 30 分左右发生的甬温线铁路交通事故造成 40 人死亡，200 人受伤。造成事故的原因是列控中心的数据采集板设计存在缺陷，在遭受雷击后，本应显示红灯，却错误地显示为绿灯^[15]。

所设计的产品的结构不同（如串联系统、并联系统、表决系统等），其可靠性可能相差很大。因此，要提高产品的可靠性，首先要采用恰当的方法设计出具有高可靠性的产品。然而，有些企业简化甚至取消了产品的可靠性设计，采取发现问题之后再修正的策略。企业这样做是因为当前市场的竞争异常激烈，只有缩短新产品的研发周期，快速抢占市场，才能够在竞争激烈的市场中获得先发优势。

但是，这样做往往会造成非常严重的后果，也必将损害企业的声誉，以及中国制造的声誉。由此可见，不仅需要可靠性设计，更需要快速高效的可靠性设计。只有这样，才能够在提升中国制造业质量的同时，取得更好的经济效益。

技术的发展，尤其是信息技术的发展，已成为新一轮工业革命的催化剂。如果能够将信息技术应用到可靠性设计中，实现可靠性设计的信息化，将大大提高可靠性设计的效率和效果，同时也会大大降低可靠性设计的成本。事实上，在可靠性设计当中，信息的作用是不可忽视的。在可靠性设计的各个阶段，信息的可用程度是不同的。每一阶段适用的可靠性设计方法，都有其特定的输入信息和输出信息。前一阶段的输出信息往往构成后一阶段的输入信息。如能将这些信息有效集成，实现可靠性设计各阶段的高效协同，将能够大大提高可靠性设计的速度。因此，协同可靠性设计能够帮助企业既缩短产品开发时间，快速抢占市场，又保证产品的高可靠性。这将有助于大大提升企业的声誉以及中国制造业的整体声誉。

在协同可靠性设计的理论框架下，可靠性设计可以划分为不同的阶段。根据产品开发所处的阶段不同，所适用的方法也不同。下面简要介绍几种适用的方法，并说明各种方法之间的协同和信息共享。

(二) 可靠性设计方法

1. 初步故障分析 (PHA)

一般而言，在产品开发的初期，能够获得的信息是非常有限的。因此，虽然在该阶段进行的可靠性分析要能够增加对产品特征的了解，但不应对输入信息有过多的要求。可满足该方法之一的方法是初步故障分析^[16]。该方法最初由美国陆军开发，并随后推广到了其他行业。初步故障分析法是一种半量化分析方法，能够识别可能发生的故障，根据严重程度对其进行排序，并考虑故障控制措施。

初步故障分析法包括四步：准备、故障识别、后果及频率估计、风险排序。由于初步故障分析法能够获得所有故障的列表，包括它们可能在哪里发生，以及它们可能发生其后果的严重程度。这将为随后的可靠性分析（如故障模式及影响分析 (FMEA) 和故障树分析）提供非常重要的信息^[17]。

2. 可靠性分配

可靠性分配是将产品的可靠性目标分配到其组件、零件,使得所有组件和零件装配成产品后能够达到产品最终可靠性目标的过程^[6]。产品的可靠性必然要由其零件、组件的可靠性来实现。经过可靠性分配之后能够获得关于其组件的可靠性要求,从而能够进行组件的相关可靠性设计。可靠性分配需要考虑产品中各零件、组件、子系统等结构。常用的可靠性分配方法有美国航空无线电公司(ARINC)法、美国电子设备可靠性咨询委员会(AGREE)法、冗余分配法等。

3. 故障模式及影响分析

故障模式及影响分析是一种研究故障的系统化方法。该方法在20世纪50年代由可靠性工程师在研究军事系统故障时提出^[18]。该方法的目的是对设计进行评价,使得设计在最终确定之前能够进行必要的修改。为此,在产品开发过程中,故障模式及影响分析越早进行越好。随着开发的推进,关于故障的信息能够持续不断地得到补充。这些信息不仅能够用于可靠性分析,而且能够用于后续的安全分析和维护中。故障模式及影响分析还可以包括不同故障模式的危害度(criticality)的分析及排序。危害度是对故障模式的严重程度及其发生频率的综合考量,包含危害度的分析称为故障模式影响及危害度分析(FMECA)。

故障模式及影响分析是一种自下而上的分析,尽可能包括所有的组件和子系统。为进行故障模式及影响分析,首先要分析每一个零部件可能发生的故障,以及如何发生故障。之后,要分析故障为什么会发生,可能的影响是什么,以及如何发现这些故障。另外,还要研究的是故障能否被抵消,以及它们是否危险。故障模式及影响分析能很好地揭示产品设计以及使用中应注意的问题。因此,它能够为很多别的可靠性分析提供有用信息,如故障树、可靠性框图等。故障模式危害度的分析结果将能够被用于制订对产品设计的必要修改以及使用中的必要维护活动。

4. 故障树分析

故障树分析是一种演绎分析法,其始于最终的故障事件,并追溯到最初级的故障^[19]。该方法于1962年为评测民兵一号导弹发射系统而开发^[17]。经过随后的改进,故障树分析已被广泛用

于各行业的风险和可靠性研究。其成功因素之一在于其能够基于对少数问题的分析,提供对整个系统的完整认识。

为了提高产品的可靠性,有必要在产品生命周期尽可能早的阶段开展故障树分析,并随着产品开发的进行而同步更新。在进行故障树分析时,随着故障追溯过程的进行,故障的原因事件被放入框图。根据事件之间的关系,这些事件被用“与”或者“或”门相连。通常,故障树分析追溯到产品不可再分的组件为止。基于故障树分析能够计算或估计出顶层事件发生的概率。当产品结构比较复杂时,故障树分析能够给出系统化的易读的分析结果。故障树分析能够用于改进产品设计,评价可能的预防措施,并为可靠性框图提供信息。

5. 可靠性框图

可靠性框图是以框图的形式表达组成系统的各组件之间的连接关系。根据可靠性框图能够分析组件的状态(工作或故障)是如何影响整个系统状态的^[18]。可靠性框图能够揭示的最有用的信息之一就是产品或系统的最小割集,即能够导致系统失效的最少组件的集合。这能够帮助识别系统的脆弱点,从而采取措施,以尽可能少的成本,获取尽可能大的可靠性的改进。

6. 可靠性增长

可靠性增长是一种物理测试方法,其目的是通过测试—分析—改进技术来提高产品的可靠性^[20]。在测试中,不断增加产品(或其组件)的工作负荷,直至故障发生。随后,对测试结果进行分析。如果未达到要求,将对其进行改进。不断重复这一过程,直至可靠性需求得到满足。可靠性增长实验可以与可靠性分配及其他方法相结合,以提高产品的可靠性,使其能够通过测试。

由于可靠性增长测试一定要有故障发生,因而非常昂贵的或数量非常少的产品(如卫星)不能对整个产品进行此类测试。这种情况下,可以对其子系统或组件进行可靠性增长测试。应该注意的是,即使各子系统均能通过可靠性增长测试,由这些子系统组成的产品,也有可能发生新的不可预知的故障。

7. 加速寿命实验

加速寿命实验通过使产品经受比其正常使用条件更强的负荷,而使其出现故障^[18]。加速寿命实验

能够提供如故障率、故障时间等重要的信息。这些信息是进行其他可靠性设计方法（如可靠性分配、故障树分析等）所必需的。通常，加速寿命实验可以分为两类：定性加速实验和定量寿命实验。定性加速实验一般用于识别可能的故障模式，因此不关心故障时间、故障率等定量指标。定量加速寿命实验又可以分为两类：加速使用率实验和负荷加速实验。当产品的使用是非连续时（如洗衣机、咖啡机等），可以使用加速使用率实验，即通过增加产品的使用频率使其出现故障。加速寿命实验的结果能够用于验证前期所进行的可靠性预测和估计，改进制造过程以及产品的设计（如果设计尚未定稿），以及制订产品使用过程中的维护方案。

8. 大数据方法的应用

传统可靠性领域通常将产品使用中产生的维修、保修等数据用于保修成本的预测和系统最优维护策略的制订。然而，随着工业化和信息化的快速发展，产品运行状态的监测工具和方法正发生日新月异的变化。这些发展使得能够获得关于产品使用过程中状态变化的海量数据。应用大数据方法，这些数据将不仅能满足传统的保修成本预测和设备维护策略制订的目的，同时还将能够为新产品的可靠性设计提供宝贵的信息。这将有助于进一步提升中国制造产品的可靠性。

（三）小结

由以上分析可以发现，产品可靠性设计的各个阶段之间是相互紧密联系的，各阶段所用的方法之间需要频繁进行信息的交流。一种方法输出的信息有误，或者虽然其直接输出的信息是正确的，但传递过程中出现了扭曲，都可能直接导致其他阶段的分析出现错误。因此，如果能够通过信息化手段，提高可靠性设计各阶段之间信息交流的效率 and 准确率，必将能够大大提高整个可靠性设计阶段的效率和正确率。这样，通过协同可靠性设计，就能够既缩短产品设计的周期，使得产品能够快速投放市场，又大大提高产品的可靠性。作为产品质量的重要决定因素之一，可靠性的提高必将能够大大提高中国制造产品的质量。

四、总结

本文分析了制约中国制造由大变强的主要因

素——产品质量问题，指出可靠性不高是产品质量的重要制约因素。通过分析产品可靠性的形成机理，提出产品的可靠性是由设计所决定的，因此应该进行可靠性设计。企业所面临的日趋激烈的市场竞争，要求企业缩短新产品开发周期以快速抢占市场。而新产品开发周期的缩短，不能以牺牲产品的质量和可靠性为代价。为此，在分析产品可靠性设计流程及其特性的基础上，笔者提出了基于信息化的协同可靠性设计的理论框架。通过可靠性设计各阶段的信息共享和有效协同，能够大大提高产品可靠性设计的速度，同时节约成本。这将使得企业能够大幅缩短产品开发的周期，同时又能够提高产品质量的重要决定因素——产品的可靠性。这将大大提升中国制造业的整体品牌和声誉，实现质量强国的战略目的。

在协同可靠性设计的理论框架下，笔者等给出了产品设计不同阶段应采取的可靠性设计方法。这些常用的可靠性设计方法，已经被广泛应用于各个行业。选择哪一种方法进行可靠性设计，取决于所处的产品生命周期的阶段、所期待的结果、产品的种类以及能获取到的资源。在生命周期的早期，方法的选择往往受制于所能掌握的信息。很多零部件可能都没有确定，而且在生命周期的后期，往往会进行修改。在后期，进行分析所需要的信息往往能够从其他相似的产品、前期进行的分析及测试中获取。因此，只有实现产品可靠性设计各个阶段的有效协同，才能够既保证产品的高可靠性，又保证产品设计的快速高效。

参考文献

- [1] 汪应洛, 刘子晗. 中国从制造大国迈向制造强国的战略思考 [J]. 西安交通大学学报 (社会科学版), 2013, 33 (6): 1-6.
- [2] 黄益敏, 齐二石. 工业工程视角下中国制造业发展困境与路径 [J]. 科学与科学技术管理, 2015, 36 (4): 85-94.
- [3] 制造强国战略研究项目组. 制造强国战略研究 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2015.
- [4] 马延斌. 国产数控机床可靠性现状及其改善对策研究 [J]. 科技创新与应用, 2014, 33 (1): 123-124.
- [5] Ebeling C E. An Introduction to Reliability and Maintainability Engineering [M]. New York: McGraw-Hill Companies, Inc., 1997.
- [6] 张根保, 何桢, 刘英. 质量管理与可靠性 [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2001.
- [7] Power J D, Associates. 2011 U.S. Vehicle dependability study (VDS) [EB/OL]. [2015-05-18]. <http://businesscenter.jdpower.com/news/pressrelease.aspx?ID=2011029>.
- [8] Power J D, Associates. 2012 U.S. Vehicle dependability study (VDS) [EB/OL]. [2015-05-18]. <http://businesscenter.jdpower.com/>

- news/pressrelease.aspx?ID=2012008.
- [9] Power J D, Associates. 2013 U.S. Vehicle sependability study (VDS) [EB/OL]. [2015-05-18]. <http://www.jdpower.com/press-releases/2013-us-vehicle-dependability-study>.
- [10] Power J D, Associates. 2014 U.S. Vehicle sependability study (VDS) [EB/OL]. [2015-05-18]. <http://www.jdpower.com/press-releases/2014-vehicle-dependability-study>.
- [11] Power J D, Asian Pacific. 2011 China vehicle sependability study (VDS) [EB/OL]. [2015-05-18]. <http://www.jdpower.com/press-releases/2011-China-Vehicle-Dependability-Dtudy-vds>.
- [12] Power J D, 亚太公司. 2012 年中国车辆可靠性研究报告 (VDS) [EB/OL]. [2015-05-18]. <http://China.jdpower.com/zh-hans/press-releases/2012-China-Vehicle-Dependability-Study-ch>.
- [13] Power J D, 亚太公司. 2013 年中国车辆可靠性研究报告 (VDS) [EB/OL]. [2015-05-18]. <http://China.jdpower.com/zh-hans/press-releases/2013-China-Vehicle-Dependability-Study-ch>.
- [14] Power J D, 亚太公司. 2014 年中国车辆可靠性研究报告 (VDS) [EB/OL]. [2015-05-18]. <http://China.jdpower.com/zh-hans/press-releases/2014-vehicle-dependability-study> 中国车辆可靠性研究 (vds).
- [15] 陆娅楠. 甬温线信号设备缺陷已纠正 [N]. 人民日报, 2011-08-01(9).
- [16] Rausand B M. Preliminary hazard analysis [EB/OL]. [2015-05-18]. <http://www.ntnu.no/ross/srt/slides/pha.pdf>.
- [17] MIL-STD-882D (2000) standard practice for system safety [S]. Washington D.C.: Department of Defense, 2000.
- [18] Rausand M, Hoyland A. System Reliability Theory—Models, Statistical Methods and Applications [M]. New Jersey: John Wiley & Sons, 2004.
- [19] Vesey W E, Goldberg F F, Roberts N H, et al. Fault Tree Handbook [M]. Washington D.C.: U.S. nuclear Regulatory Commission, 1981.
- [20] Murthy D N P, Rausad M, Osteras T. Product Reliability—Specification and Performance [M]. London: Springer, 2008.