

机电系统可靠性设计在机械工程中的应用

郭强 610322199103173916

摘要

机电系统可靠性设计作为现代机械工程领域的核心技术之一，直接决定了机械设备的运行稳定性、使用寿命与维护成本。本文通过梳理机电系统可靠性设计的核心内涵与技术框架，分析其在机械工程不同场景中的应用路径，结合工程实践案例总结可靠性设计的实施效果，结果表明，科学应用可靠性设计方法能够有效降低机电系统故障发生率，提升机械工程整体质量。本文研究可为机械工程领域机电系统的设计优化提供参考。

关键词：机电系统；可靠性设计；机械工程；应用实践

一、机电系统可靠性设计的概述

机械工程领域的机电系统是由机械结构、电子控制单元、传感装置与动力输出模块共同组成的耦合系统，相比传统纯机械结构，机电系统功能集成度更高，零部件之间的耦合关系也更为复杂，任意一个环节发生失效都可能导致整个系统停机，甚至引发安全事故。可靠性设计正是以预防系统失效、提升系统稳定运行能力为核心目标的设计方法，区别于传统先设计后验证的被动改进模式，可靠性设计将可靠性指标要求贯穿于方案设计、零部件选型、结构优化、试验验证的全流程，从源头上提升机电系统的耐受能力。

机电系统可靠性设计的核心指标通常包括可靠度、失效率、平均无故障工作时间（MTBF）与使用寿命四个维度，不同应用场景对可靠性指标的要求存在显著差异：例如工业生产流水线中的重载机电设备要求平均无故障工作时间不低于数千小时，而航空航天领域的机电控制装置对失效率的要求可以达到 10^{-9} 级别。可靠性设计的常用方法包括失效模式与影响分析（FMEA）、故障树分析（FTA）、概率可靠性设计、冗余设计等，这些方法可以针对不同的系统结构匹配适配的分析路径，实现可靠性指标的量化管控。

二、机电系统可靠性设计在机械工程中的应用方向

2.1 重载工业机械机电系统的可靠性优化

重载工业机械是机械工程领域的典型应用场景，包括矿山采掘设备、港口起

重机械、冶金轧钢设备等，这类设备长期处于高负载、多粉尘、强腐蚀的恶劣工况下，机电系统的失效风险远高于普通设备，因此对可靠性设计的需求更为迫切。在这类机电系统设计中，可靠性设计首先体现在零部件层面的可靠性选型，针对动力传动部件、核心电子控制单元，需要根据工况计算载荷波动范围，选择符合可靠性裕度要求的零部件，例如针对起重机械的起升机构减速器，通过概率可靠性设计方法计算齿轮接触强度与弯曲强度的可靠度，将可靠度指标设定为 0.99 以上，避免齿轮断齿等重大失效问题。

其次，重载工业机电系统通常采用冗余设计提升可靠性，例如针对起重机械的起升制动系统，设计双回路制动结构，当其中一个制动单元发生故障时，备用制动单元可以立即介入，避免重物坠落事故；针对控制系统的供电模块，设计双电源冗余切换结构，保障主电源故障时系统仍能维持安全运行。国内某港口集团对 40 吨岸边集装箱起重机进行可靠性升级改造，应用故障树分析梳理了 12 类核心失效模式，针对起升机构、行走机构的关键节点优化了可靠性设计方案，改造后设备的平均无故障工作时间从原来的 420 小时提升至 980 小时，年故障停机时间减少了 62%，维护成本降低了 45%，充分体现了可靠性设计的应用价值。

2.2 智能制造装备机电系统的可靠性提升

随着机械工程领域向智能制造方向转型，数控加工中心、工业机器人、自动化流水线等智能装备得到广泛应用，这类装备的机电系统融合了运动控制、机器视觉、网络通讯等多个功能模块，系统复杂度大幅提升，可靠性设计成为保障智能装备生产稳定性的核心支撑。在智能制造装备的可靠性设计中，失效模式与影响分析方法应用最为广泛，设计团队会针对每一个零部件、每一个功能模块梳理潜在失效模式，分析失效对系统整体功能的影响程度，针对高风险失效模式提前制定防控措施。

2.3 汽车机电系统的可靠性设计应用

汽车工业是机械工程的重要分支，现代汽车已经发展为高度集成的机电一体化产品，从动力总成到底盘控制，再到智能驾驶系统，都依赖复杂的机电系统支撑，可靠性设计直接关系到汽车的行驶安全与用户体验。在汽车机电系统设计中，可靠性设计贯穿于从研发到量产的全流程，例如针对新能源汽车的三电系统，即电池、电机、电控，可靠性设计要求极为严格，针对电池管理系统（BMS），通过故障树分析梳理了过充、过放、短路、温度异常等多种失效模式，设计多层次保护机制，当某一个监测单元失效时，备用单元可以及时触发保护动作，避免发生热失控等安全事故。

针对传统燃油车的动力传动机电系统，可靠性设计主要针对变速箱、发动机控制系统，通过疲劳可靠性试验验证零部件的使用寿命，针对频繁动作的换挡机构，采用可靠性增长设计方法，通过多轮试验改进不断降低失效率，保障变速箱的使用寿命达到汽车整体设计要求。某自主品牌新能源汽车在研发过程中，针对电机控制系统应用了可靠性设计方法，通过裕度设计将电子元件的负载裕度提升了 30%，经过 1000 小时连续老化试验，失效率控制在 0.1% 以下，达到了国际先进水平。

三、机电系统可靠性设计应用的问题与优化方向

当前我国机械工程领域机电系统可靠性设计的应用已经取得了显著进展，但仍然存在一些不足，首先是部分中小制造企业对可靠性设计的重视程度不足，受成本与研发周期限制，仍然沿用传统的设计模式，没有将可靠性指标纳入设计要求，导致产品投入市场后故障频发，反而增加了售后成本；其次，可靠性设计的基础数据积累不足，可靠性设计需要大量的零部件失效数据、工况载荷数据作为支撑，我国部分领域的基础数据库建设仍然不够完善，导致可靠性分析结果的精度有待提升。

针对这些问题，未来机械工程领域机电系统可靠性设计的优化方向主要包括三个方面：第一，推动可靠性设计的标准化与普及化，针对不同类型的机电系统制定统一的可靠性设计规范，引导中小制造企业将可靠性设计纳入研发流程；第二，加强可靠性基础数据平台建设，整合行业内的失效数据、试验数据，为可靠性设计分析提供数据支撑；第三，结合人工智能、大数据技术升级可靠性设计方法，通过数字孪生模拟机电系统的全生命周期运行过程，提前识别潜在失效风险，进一步提升可靠性设计的精准度。

四、结论

机电系统可靠性设计是提升机械工程产品质量、降低失效风险的核心技术，在重载工业机械、智能制造装备、汽车制造等多个机械工程领域都已经得到广泛应用，并且取得了显著的应用效果，能够有效提升产品的平均无故障工作时间、降低故障发生率与维护成本。未来随着机械工程产品向集成化、智能化方向发展，机电系统的复杂度会进一步提升，可靠性设计的重要性也会更加凸显，不断完善可靠性设计方法、推动可靠性设计的普及应用，对提升我国机械工程领域的整体技术水平具有重要意义。

参考文献

- [1] 谢里阳. 机械可靠性设计[M]. 北京: 高等教育出版社, 2012.
- [2] 陆朝荣, 王少萍. 机电系统可靠性工程研究进展[J]. 机械工程学报, 2020, 56(14): 1-12.
- [3] 张质文, 虞和谦. 起重机械设计手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [4] 李川. 智能制造装备机电系统可靠性设计方法与应用[J]. 中国机械工程, 2018, 29(12): 1423-1430.