

机械系统运动精度可靠性理论分析与评价方法

杨炎晓

西安明德理工学院机械设计制造及其自动化 陕西 西安 710124

【摘要】：本文聚焦于机械系统运动精度可靠性，深入探讨其理论分析与评价方法。首先阐述机械系统运动精度可靠性的基本概念与重要性，分析影响运动精度可靠性的因素，包括加工误差、装配间隙、结构变形及磨损等。接着详细介绍运动精度可靠性分析的理论方法，如应力-强度干涉模型、故障树分析、失效模式与影响分析等，并探讨基于物理模型、数据驱动及考虑不确定性的动态可靠性分析方法。最后研究运动精度可靠性的评价方法，包括定性评价、定量评价及综合评价，通过实际案例验证评价方法的有效性，为机械系统的设计与优化提供理论支持与实践指导。

【关键词】：机械系统；运动精度；可靠性；理论分析；评价方法

DOI:10.12417/3083-5526.25.06.025

1 引言

在现代工业生产中，机械系统作为重要的组成部分，广泛应用于各个领域，如航空航天、汽车制造、机械加工等。机械系统的运动精度可靠性直接关系到产品的质量、生产效率以及安全性。高精度的机械系统能够确保产品符合设计要求，减少废品率，提高生产效率；同时，可靠的机械系统可以避免因故障导致的生产中断和安全事故，保障生产的顺利进行。然而，由于机械系统在制造、装配和使用过程中存在诸多不确定性因素，如加工误差、装配间隙、结构变形、磨损等，这些因素会对机械系统的运动精度产生影响，进而降低其可靠性。因此，深入研究机械系统运动精度可靠性的理论分析与评价方法具有重要的现实意义。

2 机械系统运动精度可靠性概述

2.1 基本概念

机械系统运动精度可靠性是指在规定的条件下和规定的时间内，机械系统完成规定运动功能时，其运动精度指标满足设计要求的概率。这里的运动精度指标可以包括位置精度、方向精度、轨迹精度、速度精度和加速度精度等。例如，在冲压设备自动送料系统中，送料辊的位置精度和速度精度直接影响冲压件的质量和生产效率。如果送料辊的位置偏差过大，可能导致冲压件尺寸超差；速度波动过大，则可能影响冲压的节奏和稳定性。

2.2 重要性

机械系统运动精度可靠性的重要性体现在多个方面。首先，对于高精度加工设备，如数控机床、精密磨床等，运动精度可靠性直接决定了加工零件的精度和质量。如果机床的运动精度不可靠，加工出的零件可能无法满足设计要求，导致产品报废，造成经济损失。其次，在航空航天领域，机械系统的运动精度可靠性关系到飞行器的飞行安全和性能。例如，飞机起落架的收放机构、舵面的操纵机构等，其运动精度和可靠性必须得到严格保证，否则可能导致飞行事故。此外，在汽车制造、

电子设备生产等行业，机械系统的运动精度可靠性也对产品的质量和生产效率有着重要影响。

2.3 影响运动精度可靠性的因素

影响机械系统运动精度可靠性的因素众多，主要包括加工误差、装配间隙、结构变形和磨损等。加工误差是在零件制造过程中产生的，如尺寸误差、形状误差和位置误差等。这些误差会导致零件的实际尺寸和形状与设计要求不符，从而影响机械系统的运动精度。装配间隙是在零件装配过程中产生的，由于零件之间的配合不可能完全紧密，会存在一定的间隙。装配间隙会使零件在运动过程中产生相对位移，导致运动精度下降。结构变形是由于机械系统在受力或受热等作用产生的变形。例如，在重载或高温环境下，机械系统的构件可能会发生弹性变形或塑性变形，从而影响其运动精度。磨损是机械系统在长期使用过程中，零件表面相互摩擦导致材料损失。磨损会使零件的尺寸和形状发生变化，增加装配间隙，降低运动精度。

3 机械系统运动精度可靠性理论分析方法

3.1 应力-强度干涉模型

应力-强度干涉模型是机械可靠性设计中常用的理论方法，也可应用于机械系统运动精度可靠性的分析。在该模型中，将机械系统的运动精度指标视为强度，将影响运动精度的各种因素（如加工误差、装配间隙等）视为应力。当应力小于强度时，机械系统的运动精度满足设计要求，系统可靠；当应力大于强度时，机械系统的运动精度不满足设计要求，系统不可靠。通过建立应力和强度的概率分布模型，计算它们的干涉面积，可以得到机械系统运动精度的可靠度。例如，在分析平面连杆机构的运动精度可靠性时，可以将连杆的长度误差、铰链间隙等作为应力，将机构允许的最大位置误差作为强度，利用应力-强度干涉模型计算机构的运动精度可靠度。

3.2 故障树分析 (FTA)

故障树分析是一种用于分析系统故障原因和后果的逻辑

方法,也可用于机械系统运动精度可靠性的分析。通过构建故障树,将机械系统运动精度不满足设计要求作为顶事件,然后分析导致顶事件发生的各种中间事件和基本事件,并建立它们之间的逻辑关系。例如,在冲压设备自动送料系统中,送料精度超差可以作为顶事件,其可能的基本事件包括送料辊的加工误差、驱动机构的故障、压紧装置的压力不足等。通过对故障树的分析,可以找出导致机械系统运动精度不可靠的关键因素,为系统的改进和优化提供依据。

3.3 失效模式与影响分析(FMEA)

失效模式与影响分析是一种系统化的方法,用于识别系统中可能出现的失效模式及其对系统性能的影响。在机械系统运动精度可靠性分析中,FMEA可以用于分析各个零部件可能出现的失效模式,以及这些失效模式对机械系统运动精度的影响程度。例如,在分析机器人运动系统时,可以对机器人的关节、连杆、传动部件等进行FMEA分析,识别出可能导致运动精度下降的失效模式,如关节磨损、连杆变形、传动误差等,并评估它们对机器人末端执行器位置精度和轨迹精度的影响。根据FMEA分析结果,可以采取相应的措施来提高机械系统的运动精度可靠性,如改进零部件的设计、选择更合适的材料、加强维护和保养等。

3.4 动态可靠性分析方法

3.4.1 基于物理模型的动态可靠性分析

基于物理模型的动态可靠性分析方法是通过建立机械系统的物理模型,考虑系统的动态特性(如振动、冲击、疲劳等)对运动精度的影响,利用数学方法分析系统在不同工况下的可靠性。例如,在分析高速旋转机械的运动精度可靠性时,需要考虑转子的不平衡、轴承的振动等因素对转子运动轨迹的影响。通过建立转子的动力学模型,利用有限元分析或多体动力学分析方法,可以模拟转子在不同转速和载荷下的运动状态,计算其运动精度的可靠度。

3.4.2 基于数据驱动动态可靠性分析

随着传感器技术和数据采集技术的发展,基于数据驱动动态可靠性分析方法越来越受到关注。该方法通过在机械系统上安装各种传感器,实时采集系统的运动数据(如位置、速度、加速度等),利用机器学习、深度学习等算法对采集到的数据进行分析和处理,挖掘数据中蕴含的信息,实现对机械系统运动精度可靠性的评估和预测。例如,通过对数控机床加工过程中的运动数据进行实时监测和分析,可以及时发现机床运动精度的变化趋势,预测可能出现的故障,提前采取维护措施,避免因运动精度下降导致的产品质量问题。

3.4.3 考虑不确定性的动态可靠性分析

机械系统在运行过程中存在各种不确定性因素,如载荷变化、环境突变、材料性能的波动等,这些不确定性因素会对系

统的运动精度可靠性产生影响。考虑不确定性的动态可靠性分析方法通过引入概率论、模糊数学、证据理论等不确定性分析方法,建立基于不确定性模型的可靠性分析方法,提高可靠性分析结果的准确性和可靠性。例如,在分析机械系统在随机载荷作用下的运动精度可靠性时,可以利用蒙特卡洛模拟方法,通过随机抽样模拟载荷的变化情况,计算系统在不同载荷下的运动精度可靠度。

4 机械系统运动精度可靠性评价方法

4.1 定性评价方法

4.1.1 专家评审

专家评审是一种常用的定性评价方法,通过邀请相关领域的专家对机械系统的运动精度可靠性进行评估。专家根据自己的经验和知识,对系统的设计、制造、装配、使用等方面进行全面分析,识别可能存在的风险和问题,并提出改进建议。例如,在新型机械产品研发过程中,可以组织专家对产品的设计方案进行评审,评估其运动精度可靠性的潜在风险,为产品的优化设计提供指导。

4.1.2 问卷调查

问卷调查是通过向相关人员(如设计人员、制造人员、使用人员等)发放问卷,收集他们对机械系统运动精度可靠性的看法和意见。通过对问卷结果的分析,可以了解系统在不同方面的优势和不足,为系统的改进提供参考。例如,在机械系统投入使用一段时间后,可以向使用人员发放问卷,了解他们对系统运动精度的满意度和存在的问题,以便及时进行维护和改进。

4.2 定量评价方法

4.2.1 可靠度计算

可靠度是衡量机械系统运动精度可靠性的重要指标,通过可靠度计算可以定量地评估系统在规定条件下和规定时间内完成规定运动功能的概率。可靠度计算可以根据前面介绍的理论分析方法,如应力-强度干涉模型、故障树分析等,建立相应的数学模型,利用概率论和数理统计的方法进行计算。例如,利用应力-强度干涉模型计算平面连杆机构的运动精度可靠度时,需要先确定应力和强度的概率分布,然后通过积分计算它们的干涉面积,得到机构的可靠度。

4.2.2 平均故障间隔时间(MTBF)和平均修复时间(MTTR)

平均故障间隔时间和平均修复时间是评价机械系统可靠性的另外两个重要指标。MTBF是指系统发生两次故障之间的平均时间,反映了系统的可靠性水平;MTTR是指系统发生故障后修复所需的平均时间,反映了系统的可维护性。通过对机械系统在实际运行过程中的故障数据进行统计分析,可以计算出系统的MTBF和MTTR。

4.3 综合评价方法

4.3.1 层次分析法 (AHP)

层次分析法是一种将定性分析和定量分析相结合的综合评价方法，适用于多目标、多准则的复杂系统评价。在机械系统运动精度可靠性综合评价中，可以将评价目标分解为多个层次，如目标层、准则层和指标层。目标层是机械系统运动精度可靠性的综合评价；准则层可以包括设计可靠性、制造可靠性、装配可靠性、使用可靠性等；指标层则是具体的评价指标，如加工误差、装配间隙、故障率等。通过建立层次结构模型，构造判断矩阵，计算各指标的权重，最后进行综合评价。

4.3.2 模糊综合评价法

模糊综合评价法是一种基于模糊数学的综合评价方法，适用于处理具有模糊性的评价问题。在机械系统运动精度可靠性评价中，由于一些评价指标具有模糊性，如运动精度的“高”、“中”、“低”等，难以用精确的数值进行描述。模糊综合评价法通过建立模糊评价矩阵，利用模糊合成运算，将模糊的评价指

标进行量化处理，得出综合评价结果。例如，在评价冲压设备自动送料系统的运动精度可靠性时，可以将送料精度、速度稳定性、可靠性等评价指标进行模糊化处理，建立模糊评价矩阵，通过模糊综合评价法计算系统的运动精度可靠性综合评价得分。

5 结论

本文对机械系统运动精度可靠性的理论分析与评价方法进行了深入研究。首先阐述了机械系统运动精度可靠性的基本概念和重要性，分析了影响运动精度可靠性的因素。接着介绍了运动精度可靠性分析的理论方法，包括应力-强度干涉模型、故障树分析、失效模式与影响分析以及动态可靠性分析方法等。然后研究了运动精度可靠性的评价方法，包括定性评价、定量评价和综合评价方法。通过实际案例分析，验证了理论分析和评价方法的有效性。研究表明，采用科学合理的理论分析和评价方法，可以准确评估机械系统的运动精度可靠性，找出影响可靠性的关键因素，为系统的改进和优化提供依据，从而提高机械系统的性能和可靠性。

参考文献：

- [1] 黎钰,彭鑫阳,王泽鑫,等.考虑运动副间隙的折叠翼机构运动精度可靠性分析[J/OL].湖南工业大学学报,2026,(04):1-9[2026-03-08].
- [2] 陈放,郭雪飞.叉车转向机构运动精度可靠性分析[J].中国设备工程,2025,(23):188-189.
- [3] 徐向前,王宁博,印寅,等.考虑间隙的起落架收放机构运动精度可靠性分析[J].南京航空航天大学学报,2024,56(05):909-921.
- [4] 张正禄,张松林.关于测量中可靠性理论的哲学思想[J].测绘科学,2012,37(03):54-55.
- [5] 毛正平,李永堂,白墅洁.机械系统典型运动过程动态分析与数字仿真[J].机械工程与自动化,2006,(05):6-9.