

基于尺寸工程技术的降成本方法

徐庆增^{1,2}, 张洋洋^{1,2}, 徐俊义^{1,2}, 傅晓磊^{1,2}

1. 内燃机可靠性国家重点实验室, 山东 潍坊 261061;

2. 潍柴动力股份有限公司, 山东 潍坊 261061

摘要:为降低发动机生产成本,提高产品竞争力,从产品设计、加工、装配等环节分析降低产品成本的方法,利用几何公差正向设计、精准设计、公差分析、公差分配、尺寸链计算等尺寸工程技术实现设计与工艺的平衡、精度与成本的平衡,并以某柴油机信号盘为例进行验证。结果表明:在保证满足信号盘功能要求的前提下,应用尺寸工程技术并对公差进行优化后,单件成本减低15元,该方法在降低成本和废品率等方面效果显著。

关键词:尺寸工程技术;降成本;几何公差;结构设计;加工工艺;测量检验

中图分类号:TK406

文献标志码:A

文章编号:1673-6397(2024)04-0089-07

引用格式:徐庆增,张洋洋,徐俊义,等.基于尺寸工程技术的降成本方法[J].内燃机与动力装置,2024,41(4):89-95.

XU Qingzeng, ZHANG Yangyang, XU Junyi, et al. Cost reduction method based on dimensional engineering technology[J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2024, 41(3): 89-95.

0 引言

随着经济全球化与同质化竞争的加剧,各汽车主机厂以及配件厂承受的生产成本压力越来越大,如何在保证产品质量的前提下降低成本成为重要研究方向。产品零部件公差的合理性是提高产品质量和降低成本的源头。在产品开发中应用尺寸工程,可在设计前期有效识别和管理制造偏差,最大限度地消除“无法制造”问题^[1-2],并给整个设计团队提供快速、并行的交流,大大降低制造和装配变动对产品功能要求的影响,进而减少从概念设计到投入市场的时间、提高质量和降低成本^[3-4]。如何利用尺寸工程技术降低成本在我国发动机行业处于探索阶段,具有广阔的研究前景。

1 相关概念

1.1 尺寸工程技术

尺寸工程以既定或预期的制造能力为出发点,合理分配和制定公差要求,并设计恰当的加工、装配工艺,使产品达到既定的匹配和功能要求;并且通过应用尺寸链分析和公差虚拟仿真分析技术,对尺寸设计和尺寸要求进行风险评估和预防^[5-6]。

尺寸工程技术基于并行工程概念^[7],以尺寸闭环管理为主线,是贯穿产品全生命周期的系统化工程,采用它可以在新项目详细设计阶段提前识别并解决与功能尺寸相关的风险,实现公差正向设计、公差正向分配、公差工艺最优化,最终实现设计与加工工艺的平衡、设计与装配工艺的平衡、精度与成本的平衡。

尺寸工程技术发展30多年以来,已在乘用车、汽车零部件、航空航天、电子电器、军工装备、医疗设备等领域取得了成熟发展与广泛应用,成为汽车等制造企业正向研发中不可或缺的核心技术。

收稿日期:2023-10-16

第一作者简介:徐庆增(1987—),男,山东潍坊人,高级工程师,主要研究方向为尺寸工程技术,E-mail:xuqz@weichai.com。

1.2 几何尺寸和公差

几何尺寸和公差是尺寸工程技术的核心与基础。几何尺寸和公差是在设计、制造和检测过程中用于描述零件的尺寸、形状、位置和定位策略等特征的一种精准的工程技术语言。应用几何尺寸和公差可以降低产品制造成本、提质增效^[8-9]。通常公差越大产品制造成本越低。

2 尺寸工程技术在降低产品成本中的应用

2.1 设计意图落地控制模型

尺寸工程工作围绕产品设计意图落地展开。产品设计意图可总结为用最低的成本制造出最优秀的产品。在数字化智能制造时代,尺寸工程技术对设计意图落地产生的影响越来越大。本文中基于尺寸工程技术与几何公差规范提炼出的设计意图落地控制技术模型如图1所示。产品设计过程用来表达设计意图,产品加工过程用来实现设计意图,产品测量过程用来检测设计意图,产品装配过程用来验证设计意图。该模型以设计意图表达为核心,同时兼顾工艺可行性、测量可行性、装配可行性;以几何公差规范作为内部逻辑实现设计意图传递;以尺寸工程技术作为外部驱动实现尺寸闭环管理。

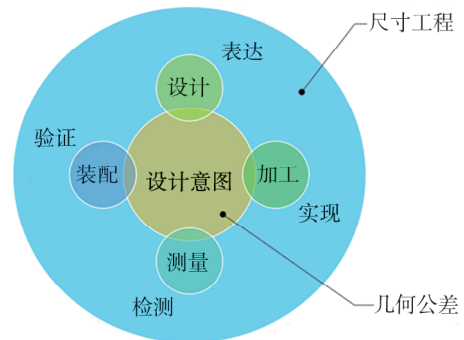


图1 设计意图落地控制技术模型

2.2 基于设计的降成本方法

2.2.1 成本影响因素分析

产品成本的影响因素较多,各因素占比对生产成本影响的分析如表1所示^[10]。由表1可知,对产品成本影响最大的是设计过程,设计水平直接影响工艺可行性、工艺路线选择、工艺过程设计、检验方案策划、检验方案实施、装配工艺设计与装配效率、装配效果等过程,进而影响产品的成本。

表1 成本影响因素占比分析

影响因素	设计	材料	人工	其它
占比/%	70	20	5	5

2.2.2 降成本逻辑

设计过程决定了产品和零部件的结构形式、公差设计方案、材料选择、热处理工艺、加工工艺等,进而决定产品的成本。本文中重点探讨在产品设计过程中,应用尺寸工程技术降低产品成本的方法,特别是几何公差正向设计、几何公差精准设计、公差分析、公差分配在产品研发与生产过程中的应用。

现有制造业生产模式如图2所示。结构设计制定以后,进行零部件图纸绘制工作。现阶段,图纸中几何公差设计方案是否满足要求、公差是否合适等均缺少专业分析。公差设计方案依赖下游生产环节(加工、测量、装配)的验证,在生产环节发现零部件干涉或无法保证功能尺寸等问题后,将这些问题反馈给研发端的设计部门,设计部门根据问题现象分析原因,进行相应优化,再继续进行生产环节的验证,反复循环,直到生产环节不再继续暴露同样问题。

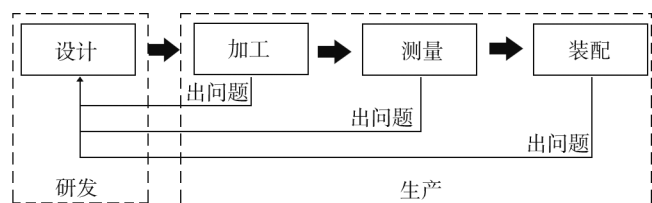


图2 现有制造业生产模式

在“研发设计—生产验证—研发优化—生产验证……”循环过程中,产生时间、人工和成本的浪费,其中成本浪费主要有以下几类:1)公差系统设计不合理,原工艺无法满足要求,需更改工艺,造成模具新开或修改浪费;2)公差设计偏严,导致零部件加工难度大、合格率低、废品率高、返修率高,导致综合成本高(如工装成本高、夹具成本高、刀具成本高);3)公差设计偏松,导致零部件装配困难、装配干涉,或装配

后功能尺寸超差概率高、功能尺寸批量失效、零部件报废及装配验证资源的浪费等问题;4)几何公差基准设计不合理,导致工艺基准转换过多,进而引起加工过程公差累积偏大;5)结构或几何公差设计不合理,导致设计方案反复优化,进而导致生产环节相应反复优化;6)公差设计不合理,直接影响测量方案的制定,导致检具和检验资源浪费等。

理想制造业生产模式如图3所示。理想制造业生产模式下^[11],在制定结构设计方案的同时,同步开展尺寸工程分析以及公差设计、公差分析、公差分配等工作,在设计阶段充分考虑功能尺寸的可达性、关键尺寸与公差的可工艺可行性、关键尺寸与公差的测量方案可行性、装配工艺可行性等,然后将形成的最优几何公差设计

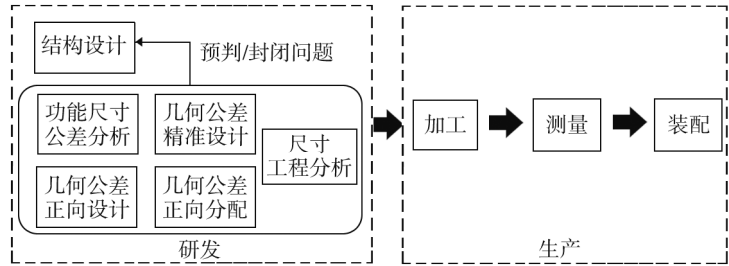


图3 理想制造业生产模式

方案向下游传递,在满足设计意图的前提下使零件的几何公差最大,实现精度与成本的平衡。通过尺寸工程技术的应用,在研发阶段尽量对更多的问题进行预判并解决,减少传递到生产环节的问题,降低反复设计造成的成本浪费。

综上,现有制造业生产模式缺少与结构设计同步的尺寸工程分析工作,设计过程中存在几何公差设计偏小导致加工难度大、废品率高、成本高,或几何公差设计偏大导致功能失效等风险。在设计阶段应用尺寸工程技术进行问题预判与分析、封闭,可有效平衡公差精度与生产成本,并保证产品质量,避免进入生产环节后,因公差工艺可行性差引起的试制浪费,进而大大减少因设计不合理与设计方案反复带来的生产浪费。

2.2.3 基于几何公差设计降成本的方法

2.2.3.1 几何公差正向设计

几何公差正向设计指的是零部件所有几何公差的设计方案都应有理有据,不能通过参考经验值、参考相近类似零件、参考工艺能力等方式制定。几何公差设计应在遵循满足功能要求的前提下尽量放松原则^[12],而非数值越严越好、要求越多越好。几何公差正向设计方法可总结为四步法:1)定功能,即确定零部件功能、精度要求、约束关系、结构特点、工艺特点等;2)定基准,即基于约束关系与功能,第一基准支撑零件,第二基准对齐零件,第三基准限制移动;3)定几何公差,即根据设计意图,按需选取,宁缺毋滥;4)定公差,应首先满足功能要求,其次兼顾工艺,宁松毋严。

2.2.3.2 几何公差精准设计

几何公差精准设计,指的是在正向设计基础上,充分利用几何公差规范更精准地表达设计意图。几何公差正向设计过程中,还应辅以最大实体要求、最小实体要求、基准偏移、包容原则、可逆要求、双向公差、组合公差、复合公差、未规定偏置量的偏置公差带设计原则、规定偏置量的偏置公差带设计原则等几何公差规范进行精准设计。最大实体要求与可逆要求的应用案例如图4所示。

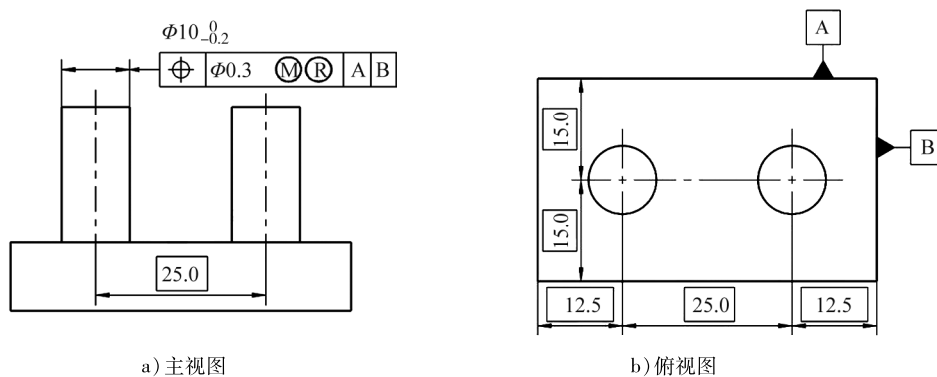


图4 最大实体要求与可逆要求应用案例

2.2.3.3 几何公差正向分析

公差分析以尺寸链计算为基础,将分析对象尺寸作为封闭环,将现有设计方案中所有相关零部件的尺寸作为组成环,通过尺寸链的建立与计算,得出组成环的上、下偏差,进而将该偏差与分析对象的设计要求作对比,用于判断现有设计是否能够满足设计意图。

按照不同分类维度,尺寸链有如下几种类型:1)按尺寸链各环的几何特征和所处空间位置,可分为直线尺寸链、角度尺寸链、平面尺寸链、空间尺寸链;2)按尺寸链相互联系,可分为独立尺寸链、并联尺寸链;3)按尺寸链的应用范围,可分为设计尺寸链、工艺尺寸链、装配尺寸链。直线、独立、装配尺寸链示意如图5所示。

如果现有设计不满足设计意图,则应结合各组成环的贡献度与敏感度,通过优化结构与几何公差设计方案使封闭环的上、下偏差平移或减小或平移并减小,达到封闭环的上、下偏差的设计要求。

如果现有设计满足设计意图,且封闭环上下偏差的分布范围相对设计意图有明显的设计余量,则可以对部分组成环的公差进行放松、或对部分组成环的公差的过程控制能力要求进行放松,进而在保证设计意图的前提下,降低这些零部件的设计要求,进而降低成本。

2.2.3.4 几何公差正向分配

公差分配是指对相关零部件之间或同一个零部件内部进行几何公差的协同设计与优化。在公差分析过程中,基于尺寸链计算,结合相关零部件结构特点、加工工艺、加工难度等,对有配合关系的多个特征的公差进行分配。

公差分配实现了精度与成本的平衡,对优化结构设计、公差设计、工艺设计起到决定性作用,且开展公差分配,有利于保证和提高产品的一致性。

对于孔、轴配合的零部件,在同等条件下,孔的加工难度大于轴的加工难度,所以公差分配首选推荐方案为孔公差大于轴公差,如 $\Phi 10H7$ 孔与 $\Phi 10m6$ 轴形成过渡配合配合, $\Phi 10E8$ 孔与 $\Phi 10m7$ 轴形成间隙配合。

2.3 基于工艺的降成本方法

工艺环节是设计意图落地的实现过程,从工艺方面降成本涉及内容比较广泛,本文中只分析尺寸工程及几何公差对成本的影响。

2.3.1 合理设计工装、夹具的精度

合理设计定位工装与夹具的精度是降成本的有效方法之一^[13]。定位工装与夹具的精度不仅是某定位销直径的精度,更重要的是需要从公差配合、边界求解、定位销布置位置(降低定位销位置的敏感度)角度综合分析,系统地确定精度,提高产品的合格率与一致性。

2.3.2 工艺基准与设计基准统一

理想状态下工艺基准与设计基准应完全统一^[14],但是受限于设计水平、零件结构、各生产企业工艺设计经验、认知水平、读图能力、操作习惯、设备选择等,很多零部件实际加工过程中会发生工艺基准与设计基准不统一的问题;更有甚者,部分生产企业的工艺人员没有工艺尺寸链概念,在进行工艺设计时比较随意,导致累积公差较大,最终导致投入产出比较低,或者按照图纸检验时合格率较低。

2.3.3 正确理解公差

部分生产企业对几何公差理解错误,或几何公差设计存在错误但是工艺人员未能识别,导致生产企业按照自己的理解进行了错误的工艺设计。如某平面要求区域平面度为 $0.1/(100 \times 100)$,但是某生产企业错误的以为该平面整体平面度为 0.1 ,导致工艺过设计。

2.4 基于测量检验的降成本方法

测量环节是对设计意图是否落地的验证过程。从测量方面降成本主要包括测量项制定、测量方案制

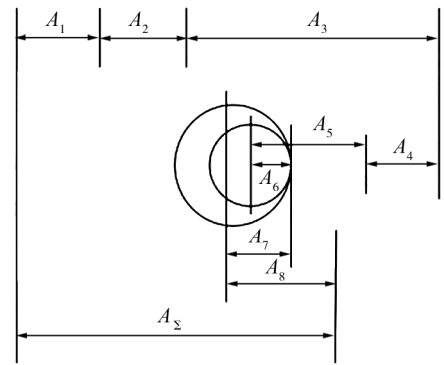


图5 直线、独立、装配尺寸链示意图

定、测量方法制定、测量设备选择等方面的优化^[15]。

测量方法错误直接导致综合成本上升:1)合格品被误判为废品,导致废品率升高,直接影响成本;2)废品被误判为合格品,导致废品被装配到产品上,加大了装配干涉与功能尺寸失效的风险,甚至引起产品报废、客户抱怨、产品市场口碑下滑等严重问题。

测量环节中功能检具的合理设计与使用也会产生降成本效果,功能检具测量效率高,可以节省三坐标测量仪的使用以及节省工人工时。反之,功能检具设计错误,可导致严重误判风险和检具报废造成的成本浪费。

3 实例分析

3.1 原信号盘设计方案现状

某柴油机信号盘原设计方案加工工艺为普通走丝线切割,对应产品合格率只有 67%,高废品率导致成本增加。原信号盘几何公差设计方案如图 6 所示。由图 6 可知:信号盘齿顶圆相对中间止口的同轴度为 $\Phi 0.05$,齿侧角度公差为 $\pm 0.1^\circ$ 。

3.2 信号盘优化

3.2.1 分析步骤

1)识别影响信号盘合格率的关键因子;2)在三维公差仿真软件中建模,分析原有设计方案对应的信号齿角度偏差;3)放松关键因子的公差,判断发动机读取信号精度是否超出要求;4)判断该公差工艺可行性;5)迭代循环上述步骤,最后得出满足信号精度要求且工艺可行前提下的关键因子的公差。

3.2.2 优化结果

公差分析模型树如图 7 所示。由图 7 可知:装配约束关系为凸轮轴装配到机体轴承孔内,前端盖一面两销装配到机体前端,信号盘、转速传感器均通过孔轴间隙配合安装到凸轮轴和前端盖上;信号齿用于判断凸轮轴转速及相位,其周向精度应满足要求,而齿顶圆同轴度与齿侧角度是影响该周向精度的重要因素。

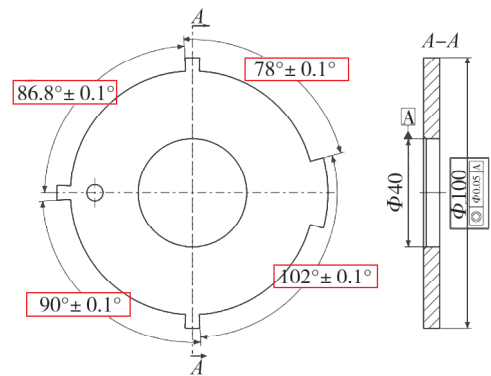


图 6 原信号盘几何公差设计方案

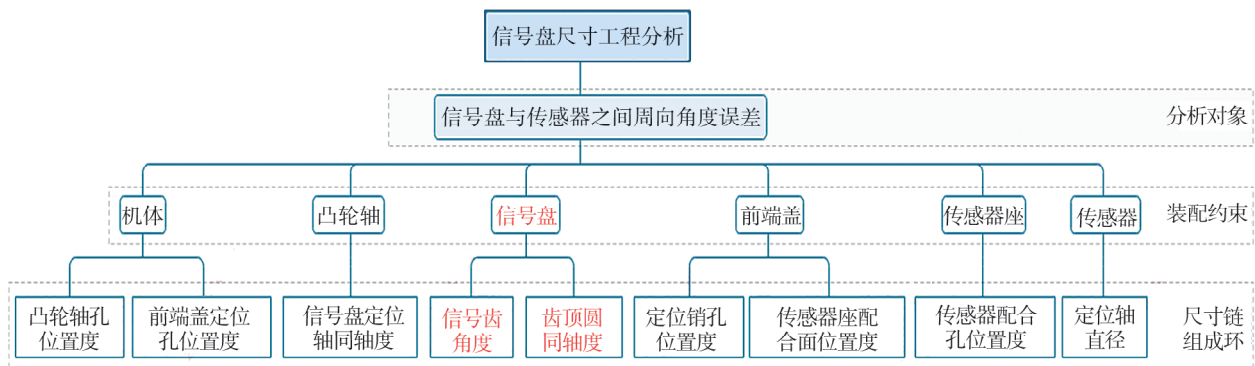


图 7 信号齿径向角度偏差公差分析模型树

对各组成环零部件特征进行公差转化及尺寸链计算,采用相关软件对 20 000 个原信号盘信号齿径向角度偏差进行分析,结果如图 8 所示。由图 8 可知:信号齿与转速传感器在径向方向角度偏差有 99.7%(即 3σ) 的概率分布在 $(-1.02^\circ, 0.78^\circ)$ 。计算原信号盘的过程能力指数 C_{pk} 为 1.95,远高于不小于 1.33 的要求^[16],属于过设计,可适当放宽要求,降低成本。

对影响信号盘合格率的齿顶圆同轴度、齿侧角度公差进行优化,信号盘的齿顶圆同轴度公差由 $\Phi 0.05$ 优化为 $\Phi 0.20$ 、齿侧角度公差由 $\pm 0.1^\circ$ 优化为 $\pm 0.5^\circ$,且无需更改加工工艺。优化后的几何公差设计方案如图9所示。优化后信号盘信号齿径向角偏差分布为 $(-1.51^\circ, 1.38^\circ)$, C_{pk} 为1.35,满足设计要求。按优化后信号盘方案进行生产,产品合格率提高到99%,单件成本可降低15元。

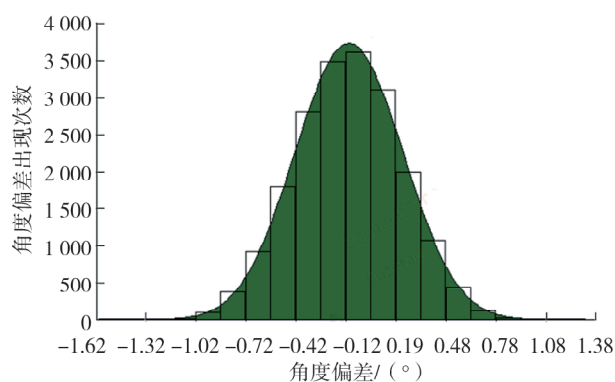


图8 原信号盘信号齿径向角度偏差

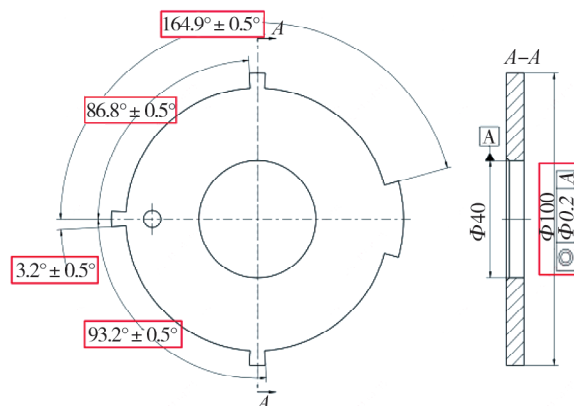


图9 优化后几何公差设计方案

4 结束语

基于尺寸工程技术的降成本方法研究涵盖了设计意图落地、结构设计、定位精度设计与分析、公差设计、公差分析、公差分配、尺寸链计算、过程能力控制、加工工艺研究、测量技术研究、装配验证等领域。所有问题的分析与解决都是从人-机-料-法-环-测各个方面进行综合分析,最终实现问题的系统解决以及降成本方案的系统提供。

尺寸工程技术与几何公差标准作为正向设计与降成本的有效工具,在提高发动机生产一致性、降低成本等方面发挥重要作用。

参考文献:

- [1] REISINGER M. The process of dimensional management[J]. ZEV Rail-Glasers Annalen, 2009, 133(4): 160-163.
- [2] CURTIS M. Dimensional management: a comprehensive introduction[M]. New York, USA: Industrial Press Inc., 2002.
- [3] 李朝旺,杨志宏,王林博,等. 尺寸工程技术综述与展望[J]. 计算机集成制造系统, 2014, 20(3): 464-470.
- [4] 陈钰,王艳伟,崔翠,等. 浅析尺寸工程在汽车产品开发中的应用[J]. 汽车工艺与材料, 2024(3): 26-31.
- [5] 李明,胡敏,龙从林,等. 尺寸工程的现状与发展[J]. 汽车工艺与材料, 2023(3): 1-8.
- [6] 王地川,李斌花. 汽车尺寸工程体系概述[J]. 汽车零部件, 2023(6): 84-87.
- [7] 吴云飞. 几何尺寸与公差在底盘副车架中的应用[J]. 汽车制造业, 2021(8): 7-9.
- [8] 全国产品尺寸和几何技术规范标准化技术委员会. 产品几何技术规范(GPS): 几何公差: 形状、方向、位置和跳动公差标注: GB/T 1182—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- [9] 全国技术产品文件标准化技术委员会. 机械制图尺寸公差与配合注法: GB/T 4458—2003[S]. 北京: 中国标准出版社, 2003.
- [10] 游津梁. 基于战略成本动因分析的Y公司成本管理研究[J]. 现代营销(下旬刊), 2023(7): 137-139.
- [11] 张俊红. 内燃机制造工艺学[M]. 天津: 天津大学出版社, 2009.
- [12] 王丹, 韩学军. 机械加工工艺[M]. 北京: 机械工业出版社, 2022.
- [13] 蔡复之. 使用数控加工技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 1995.
- [14] 陆亦工. 公差配合与测量技术[M]. 北京: 国传媒大学出版社, 2015.
- [15] 赵丹. 公差配合在机械设计与机械制造中的应用研究[J]. 科技展望, 2016, 26(23): 95.
- [16] 杨晶晶, 陈继东, 李峙. 汽车制造过程中的螺纹连接质量监控及预警[J]. 汽车零部件, 2024(3): 64-67.

Cost reduction method based on dimensional engineering technology

XU Qingzeng^{1,2}, ZHANG Yangyang^{1,2}, XU Junyi^{1,2}, FU Xiaolei^{1,2}

1. State Key Laboratory of Engine Reliability, Weifang 261061, China;

2. Weichai Power Co., Ltd., Weifang 261061, China

Abstract: To reduce engine production costs and improve product competitiveness, methods for reducing product costs are analyzed from product design, processing, assembly, and other aspects. Dimensional engineering techniques such as geometric tolerance forward design, precision design, tolerance analysis, tolerance allocation, and dimension chain calculation are used to achieve a balance between design and process, accuracy and cost. A diesel engine signal panel is used as an example for verification. The results show that, while ensuring the functional requirements of the signal panel are met, the application of dimensional engineering technology and optimization of tolerances can reduce the cost of a single piece by 15 yuan. This method has significant effects in reducing costs and scrap rates.

Keywords: dimension engineering technology; cost reduction; geometric tolerancing; structure design; processing technology; measurement and inspection

(责任编辑:臧发业)

.....
(上接第 82 页)

Analysis of longitudinal control strategy of the intelligent vehicle

PANG Tongjia, WANG Jinbo*, TIAN Yuyang, ZHANG Weihai

School of Automotive Engineering, Shandong Jiaotong University, Jinan 250357, China

Abstract: To address the issues of poor adaptability and slow response when using traditional proportional integral derivative (PID) control for the longitudinal operation of intelligent vehicles, based on combined PID control and fuzzy control theory, a simulation control model is established using MATLAB/Simulink, the upper controller take the deviation and rate of deviation between the desired speed and actual speed as input parameters for the fuzzy controller in the simulation model. Based on fuzzy rules, the upper controller outputs proportional, integral, and derivative coefficients, which are weighted with the traditional PID controller algorithm to produce the desired acceleration of the vehicle. The lower controller switches the vehicle's drive or braking through an acceleration-braking calibration table. A vehicle operation platform is built using Carsim, and the simulation control model is integrated with the vehicle operation platform. Simulations comparing traditional PID and fuzzy PID longitudinal control strategies are conducted at desired speeds of 5, 10, 16, and 25 m/s. The results show that the average speed deviation of the traditional PID control strategy is approximately 0.122 m/s, while the average speed deviation of the fuzzy PID control strategy is about 0.015 m/s. The use of the fuzzy PID control strategy significantly improves control accuracy, and the response speed is faster.

Keywords: longitudinal movement; fuzzy-PID; controller; intelligent vehicle

(责任编辑:胡晓燕)