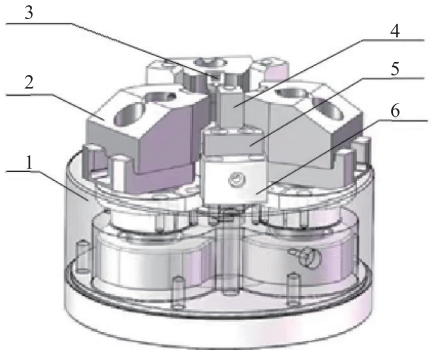
小为目标函数，对夹具夹紧力进行优化。

本文以汽车差盖夹具的柔性化设计为聚焦点，以减少夹具变形磨损为目标，设计了一种摇臂式浮动卡盘夹具，该夹具以夹持部作为同心基准，将制动器作为端面基准，从而使得夹具牢固夹持铸造锻造等脱模斜面。夹具的夹爪镶嵌超硬质合金，爪钉配合卡盘后拉牵引结构能保证工件即使在重切削状态下也不会上浮，此外该夹具有多种夹持组合方式，简单更换调试可替换成二爪、三爪、求心型和补偿型夹具，高效满足汽车差盖生产线加工需求。

2 整体结构与工作原理

2.1 整体结构设计

汽车夹具包括定位元件、夹紧装置、对刀引导元件、连接元件和夹具体等[11]。摇动牵引式浮动夹具可实现工件的精准定位和固定，有效控制变形并保障安全生产环境。本文主要对浮动卡盘及卡爪进行优化设计。夹具整体设计如图 1 所示。



1—浮动卡盘　2—卡爪　3—合金牙
4—爪钉　5—定位块　6—定位盘

图 1　夹具整体设计

在全自动汽车差盖加工生产过程中，首先桁架机器人将待加工差盖放置在卡盘本体上，差盖受到爪钉的支撑及夹持作用从而实现初步定位。然后浮动盘左右旋转卡爪使其适应汽车差盖形状和尺寸，卡爪摆动机构能够克服外径偏差，自动找正实现多点夹持，从而保证差盖稳定夹持。此外卡盘卡爪带有后拉牵引功能，使工件定位面紧靠定位块，同时可以保证夹持工件稳定。

2.2 差盖夹具工况分析

根据汽车差盖夹具工作过程进行有限元分析前的工况分析。其加工过程可分为三个工况：夹紧、旋转和切削加工[12]。切削力的大小可以用经验公式求得，切削合力分解图如图 2 所示。

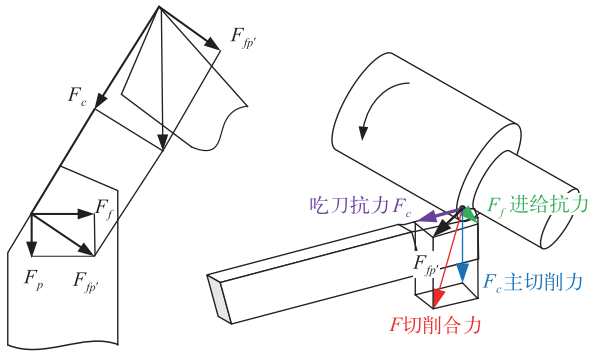


图 2　切削合力分解图

车削时的切削力经验公式：

$$F_C = 9.81 \times C_{F_C} \times a_p^{xF_C} \times f^{yF_C} \times v^{nF_C} \times K_{F_C} \quad (1)$$

$$F_p = 9.81 \times C_{F_p} \times a_p^{xF_p} \times f^{yF_p} \times v^{nF_p} \times K_{F_p} \quad (2)$$

$$F_f = 9.81 \times C_{F_f} \times a_p^{xF_f} \times f^{yF_f} \times v^{nF_f} \times K_{F_f} \quad (3)$$

$$F = \sqrt{(F_C^2 + F_p^2 + F_f^2)} \quad (4)$$

式中，a_p 为切削深度，f 为进给量，v 为切削速度，C_{F_C}、C_{F_p}、C_{F_f} 为决定于被加工金属和切削条件系数，x_{F_C}、y_{F_C}、n_{F_C} 为主切削力公式中 a_p、f、v 的指数，x_{F_p}、y_{F_p}、n_{F_p} 为背向力公式中 a_p、f、v 的指数，x_{F_f}、y_{F_f}、n_{F_f} 为进给力公式中 a_p、f、v 的指数，K_{F_C}、K_{F_p}、K_{F_f} 为三个分力计算公式中，当实际加工条件与经验公式的条件不符时各种因素对切削力的修正系数的积。根据机械加工工艺手册与实际工况，确定公式中的系数及指数，见表 1。

表 1　车削时的切削力公式中的系数和指数

加工材料	刀具材料	加工形式	主切削力 F_C				背向力 F_P				进给力 F_f			
			C_{F_C}	x_{F_C}	y_{F_C}	n_{F_C}	C_{F_p}	x_{F_p}	y_{F_p}	n_{F_p}	C_{F_f}	x_{F_f}	y_{F_f}	n_{F_f}
结构钢及铸铁	高速钢	外圆纵车、横车及镗孔	1 766	1	0.75	0	922	0.9	0.75	0	530	1.2	0.65	0
		切槽及断新	2 175	1.0	1.0	0								
		成型切削	1 874	1.0	0.75	0								

加工过程中背吃刀量 a_p=2mm，进给量 f=0.5mm/min，切削速度 v=200m/min，汽车差盖的最大直径200mm，汽车差盖如图 3 所示。

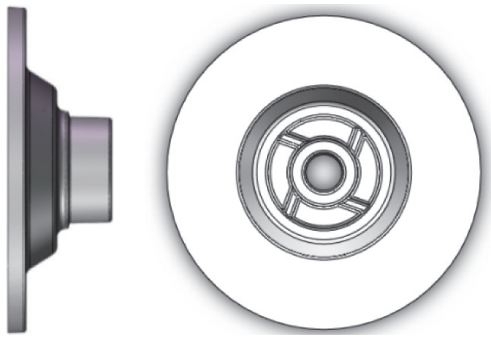


图 3　汽车差盖

根据分析计算，最终确定夹具最大切削力为 500N。切削力三个分力中除去主切削力的两个分力较小，主切削力是计算设计机床夹具的主要依据，因此对于切削加工工况，本文只研究主切削力 500N 作用下的汽车差盖车削夹具工况。

3　关键零部件设计

3.1　浮动卡盘

浮动卡盘是由卡盘本体、卡爪和浮动机构等组成[13]，其中卡盘本体与机械加工设备相连接[14]。卡爪为可移动部件，通过卡盘本体上旋转形成夹紧力。浮动机构连接卡盘本体与活动爪，使活动爪沿着卡盘本体表面浮动，调整夹持力的大小和位置，浮动卡盘结构如图 4 所示。

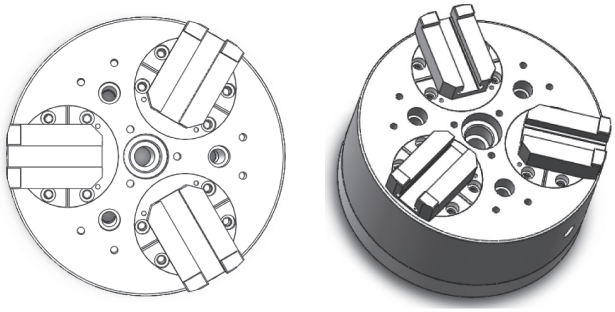


图 4　浮动卡盘

汽车零部件中存在大量表面非标准圆度的工件，本文设计的浮动盘可在工件表面两个方向旋转达到 5°，自动补偿卡爪夹紧角度，从而确保夹紧力均衡及夹持稳定性，浮动卡盘自动补偿机构如图 5 所示。

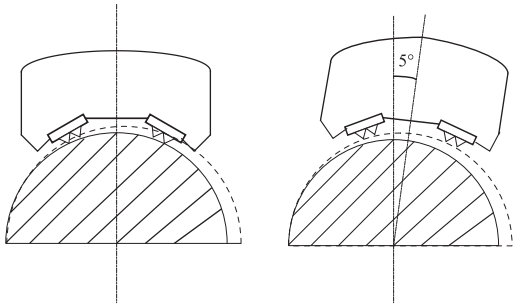


图 5　浮动卡盘自动补偿

3.2　夹具卡爪

摇动牵引式浮动夹具设计三卡爪机构，均匀分布在卡盘圆周。卡爪的中央凸轮部分可与汽车差盖的中心配合，卡爪的中心设计半圆形凸轮，具有锥形导向面，从而确保卡爪的稳定性和准确性[15]。卡爪可强力夹持锥形工件，夹持部位最大允许脱模斜度为 10°（锥度 20°）。爪牙配备超硬合金爪钉，和卡爪配合夹紧工件，提升夹持效果。卡爪结构如图 6 所示。

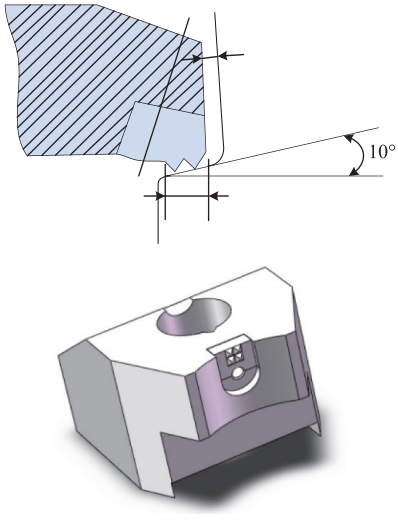


图 6　卡爪结构

4　夹具夹紧过程仿真分析

4.1　有限元模型建立

1）几何模型的建立：夹具在 SolidWorks 软件中完成建模后，去除不必要的约束，对构件的几何模型进行简化，从而削减工作量和建模时间，提高计算效率和准确性。结构简化时，真实反映各结构件主要特征并且不影响整个装配体强度与刚度，简化后的夹具模型如图 7 所示。

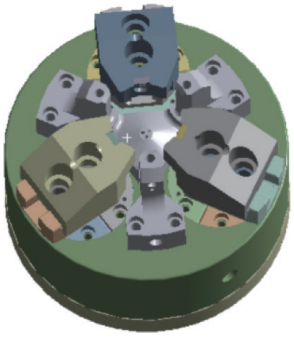


图 7　夹具几何模型

2）网格划分：Ansys 中网格化是将几何模型从连续体转变为离散体的关键步骤，网格划分涉及网格单元形状及其拓扑类型等，模型网格化的质量会影响最终的仿真结果，本文采用 Mesh 软件进行网格划分。此外网格化密度过高则计算量过大，影响仿真效率；密度过低则模型离散体失真，影响仿真精确程度，本文综合精度与效率两方面，确定总体网格尺寸为 7mm，并对重点部分进行局部加密。工作区进行网格划分后，节点数 284 250，单元数 154 770，满足计算要求，网格划分结果如图 8 所示。

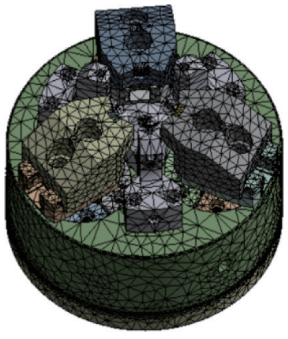


图 8　夹具网格划分

3）施加载荷：汽车差盖加工可分为夹紧、旋转和切削加工三个工况。夹具对差盖毛坯定位完成后，三个夹爪在拉杆的拉力下向下运动，实现工件的夹紧。夹具夹紧工件后，机床主轴开始匀速旋转。不同的工况下，施加的载荷不同，载荷不仅包括向下的力和角速度外，也受到切削力的影响，在卡盘外壳的下表面进行全约束，防止夹具发生位移。夹具模型约束与加载效果如图 9 所示，三种工况下卡爪与爪钉均承受外部载荷，在夹紧与旋转工况中，卡爪与爪钉所受载荷基本一致，切削加工时卡爪比夹紧与旋转两种工况附加承受 500N 主切削力。

4.2　夹具的仿真结果分析

在夹紧过程中，工件受到夹紧力的作用容易产生变形。夹紧力越大，说明工件受到的力会越大，就会产生工件和夹具的形变。

夹具整体的等效应力云图如图 10 所示，三种工况下夹具的最大等效应力基本相同，发生在夹具的爪钉上，在切削加工时，夹具的最大值等效应力的数值 213.16MPa，由于这一数值小于钢材的屈服强度，所以不会产生强度失效的现象。

夹具整体位移云图如图 11 所示，从图中可以看出爪钉和卡爪在集中力载荷和离心力的作用下，均发生了一定的形变，但满足设计要求。最大位移出现在爪钉上部分的边缘处，位移值为 0.060 251mm。夹具整体弹性应变云图如图 12 所示，从图中可以看出三种工况下，夹具的最大弹性应变基本相同，最大弹性应变出现在爪钉上部分的边缘处，爪钉在集中力载荷和离心力的作用下，发生了一定的形变，形变量为 0.001 08mm，符合设计要求。

通过三维建模、网格化、施加载荷等步骤，实现夹具模型在 Ansys 软件中的有限元仿真分析，并且获得了三种工况下汽车差盖车削夹具各零件的应力应变位移分布。通过对比发现，三种工况下夹具各零件的应力分布基本一致，均在合理范围内，能够满足设计要求。结合

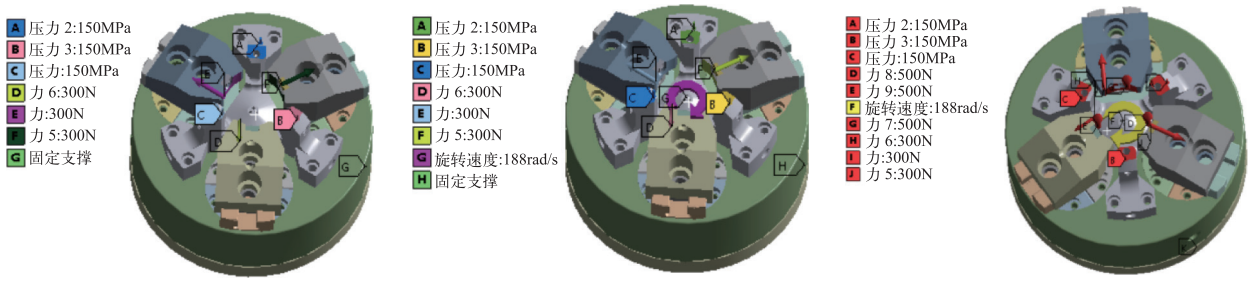


图 9　夹具约束示意图

夹具结构设计图与仿真分析图可知，夹具在定位时自动补偿卡爪夹紧角度的功能，能够确保夹紧力均衡及夹持稳定性，此外夹具内部的卡爪摆动机构能够克服外径偏差，可实现多点夹持，适用于高速切削。摇动牵引式浮动夹具推广应用，将有助于提高汽车差盖生产线的制造精度与效率。

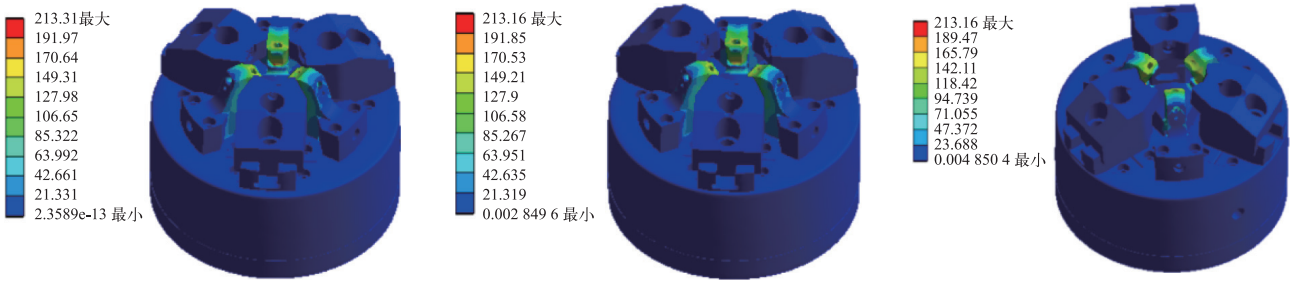


图 10　夹具等效应力云图

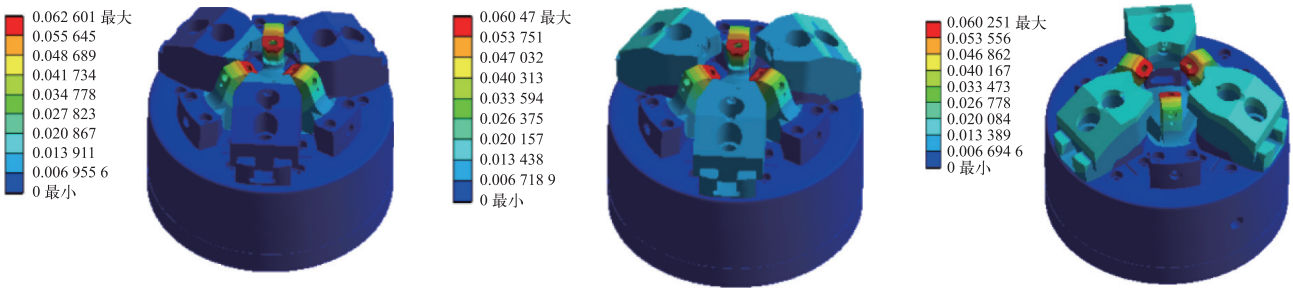


图 11　夹具总变形云图

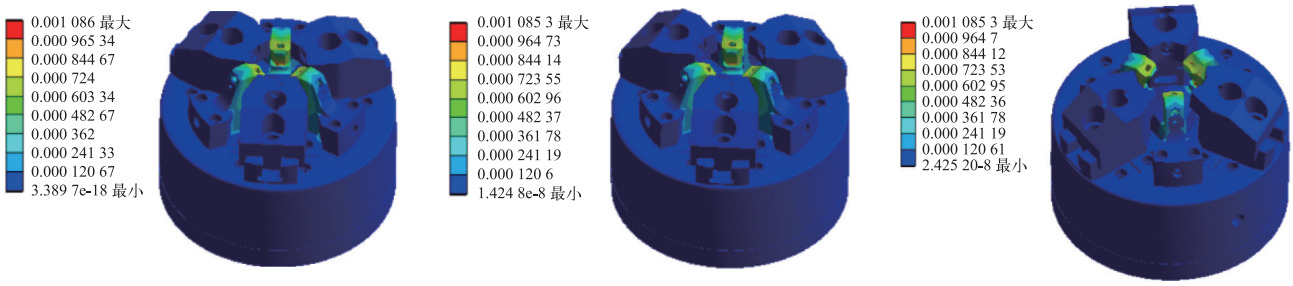


图 12　夹具弹性应变云图

5　结束语

本文以汽车差盖夹具的柔性化设计为聚焦点，以减少夹具变形磨损为目标，针对浮动卡盘及卡爪进行优化，设计了一种新型摇臂式浮动卡盘夹具，促进工件的精准定位与固定。该夹具以夹持部作为同心基准，将制动器作为端面基准，能够使得夹具牢固夹持铸造锻造等脱模斜面。夹具可在工件表面两个方向旋转达到 5°，夹持部位最大允许脱模斜度为 10°。通过 Ansys 软件对摇动牵引式浮动夹具进行了静力学仿真，得到了夹具的最大应力 213.16MPa 及最大变形 0.060 251mm。夹具整体的等效应力值均小于材料的疲劳强度，满足设计的强度要求。

IM

参考文献

[1] 王帅，洪荣晶，张浩．数控铣齿机夹具定位精度的仿真和测量 [J]．机械设计与制造，2024，(6)：262-264，270．

[2] 尚振国，蔡卫国，安相华，等．组合夹具设计“虚实结合”

实验平台开发 [J]. 实验技术与管理，2022，39 (10)：122-129，162.

[3] 冯凌云，郭灿彬，朱旭义，等. 基于快换夹具和视觉的机器人装配工作站仿真设计 [J]. 组合机床与自动化加工技术，2021 (8)：126-130，134.

[4] 柳伟，钱郁，刘劲松，等. 汽车发动机舱软管干涉试验用六自由度可调式夹具设计及仿真 [J]. 制造业自动化，2020，42 (9)：122-126.

[5] 张珂，牛长青，刘思源，等. 薄壁异形件自动化夹具的仿真分析及优化 [J]. 机械设计与制造，2020 (3)：214-219.

[6] 王晓慧，吴冬祖，兰国生，等. 基于定位法线的工件自由度分析几何定理及应用 [J]. 机械工程学报，2017，53 (9)：157-163.

[7] MA C G，ZUO S G，HE R，et al. Application of ANSYS secondary development in magnetic density analysis of permanent magnet synchronous motor [J]. Advanced Materials Research，2011：125-128.

[8] 王强，王永恒，陈建，等. 快速柔性化车身焊接夹具平台设计研究 [J]. 制造技术与机床，2020，691 (1)：187-192.

[9] LI D，BAI G，LIAO Q，et al. Geometric and combined analysis of the color-flip ball[C]//Advances in Reconfigurable Mechanisms and Robots I. Springer London，2012：793-803.

[10] 秦国华，张卫红，周孝伦. 夹紧方案的数学建模及夹紧力的优化设计 [J]. 机械科学与技术，2005，24 (4)：439-446.

[11] 吴宝海，郑志阳，张阳，等. 面向薄壁零件加工变形与振动控制的智能装夹技术研究进展 [J]. 机械工程学报，2021，57 (17)：21-34.

[12] WU D B，WANG H，PENG J S，et al. Machining fixture for adaptive CNC machiningprocess of near-net-shaped jet engine blade[J]. Chinese Journal of Aeronautics，2020，33 (4)：1311-1328.

[13] 何强，李向东，李安玲，等. 中凸变椭圆机床夹具设计与仿真分析 [J]. 机床与液压，2014，42 (17)：112-114.

[14] 王强，王永恒，陈建，等. 快速柔性化车身焊接夹具平台设计研究 [J]. 制造技术与机床，2020，691 (1)：187-192.

[15] 牛韬，孙见君，张玉言. 汽车轮毂柔性加工自动化生产线开发技术分析 [J]. 机械制造与自动化，2017，46 (6)：216-218.

收稿日期：2024-05-07