

端面驱动卡盘零件挠度变形安全性与加工精度分析

冯小庭,刘宏利,刘明玺

(西安铁路职业技术学院,陕西 西安 710026)

摘要:端面驱动卡盘在轴类零件加工过程中,会使工件产生挠度变形,对其安全性使用及加工精度有明显影响。以自行设计的一种四点浮动端面驱动卡盘为例,对工件挠度变形进行安全性分析,计算出安全加工所允许工件最大挠度变形以及挠度变形对加工精度影响,并对挠度变形误差补偿修正,对允许最大挠度变形和补偿修正后加工精度进行实验验证。

关键词:端面驱动卡盘;工件挠度变形;安全性;加工精度

中图分类号:TH161 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2023)05-0060-04

Analysis of Deflection Deformation Safety and Machining Accuracy of End Drive Chuck Parts

FENG Xiaoting, LIU Hongli, LIU Mingxi

(Xi'an Railway Vocational & Technical Institute, Xi'an 710026, China)

Abstract: In the process of machining shaft parts, the end drive chuck will cause deflection deformation of the workpiece, which has a significant impact on its safe use and processing accuracy. Taking a self-designed four-point floating end face drive chuck as an example, analyzes the safety of deflection deformation of the workpiece, calculates the maximum deflection deformation as allowed for safe machining and the influence of deflection deformation over machining accuracy. Deflection deformation error is compensated, and the maximum allowable deflection deformation and compensated and corrected machining accuracy are verified by experiments.

Keywords: end drive chuck; workpiece deflection deformation; safety; machining accuracy

0 引言

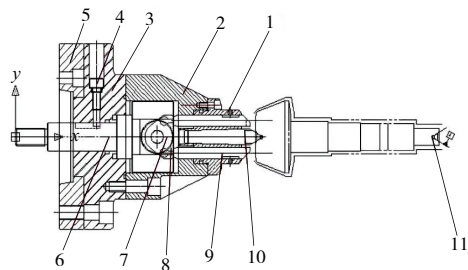
与传统外圆夹持传动卡盘相比,端面驱动卡盘在轴类零件加工时,无需掉头,定位精度高,高速切削时没有离心力失效的问题,受到了广泛应用。端面驱动卡盘在加工过程中,采用卡盘驱动销与尾座的顶紧力进行夹紧,在顶紧力、切削力背向力共同作用下,工件产生挠度变形。工件挠度变形过大,容易造成驱动销悬空和打滑的现象,引发安全事故,同时挠度变形对加工精度有明显的影响。因此工件最大允许挠度变形的计算对卡盘安全使用以及保证加工精度有着现实的意义。

大量文献对端面驱动卡盘设计以及运动做了分析研究。邹俊俊^[1]在CATIA中对其工作状态进行了模拟与分析。刘宏利等^[2]建立了端面驱动卡盘几何模型,并对卡盘夹紧运动进行了分析。冯小庭等^[3]对端面驱动卡盘所需顶紧力进行分析计算。

本文以自行设计的四点浮动端面卡盘为例(专利号ZL2017 2 055925.1),根据切削力和背向力的经验公式,结合卡盘驱动销与尾座顶紧力对工件挠度变形进行分析,获得了允许最大挠度变形公式,同时对工件挠度变形进行分析计算,并通过挠度变形方向对刀具进给补偿进行实验验证。

1 端面驱动卡盘设计

卡盘工作原理如图1所示^[4-5]。



1—顶尖座;2—卡盘外壳;3—卡盘连接体;4—限位销;
5—连接盘;6—推杆;7—连接轴;8—旋转块;
9—驱动销;10—顶尖;11—车床尾座顶尖。

图1 端面自找平驱动卡盘结构原理图

1) 定位原理:卡盘采用卡盘顶尖10和尾座顶尖11进行定位,具有定位快速和定位精度高的特点。

2) 夹紧驱动原理:驱动销9与尾座顶尖11实现零件轴向夹紧,其中驱动销9提供端面驱动力。

基金项目:西安铁路职业技术学院项目(XTZY21G02)

第一作者简介:冯小庭(1985—),男,陕西榆林人,讲师,实验师,硕士,研究方向为机电一体化,fengxiaoting4309@126.com。

3) 端面浮动找平原理^[6-7]:当驱动销9两侧不平时,在驱动销的推力作用下,旋转块8绕着连接轴7转动,带动驱动销往复运动,从而实现浮动找平,浮动找平过大时,会影响端面驱动卡盘顶紧可靠性,本端面驱动卡盘设计最大允许浮动找平范围为3mm。

2 工件挠度变形安全性分析与精度分析

车刀加工轴类零件受力如图2所示, F_v 为机床主切削力; F_p 背向力; F_t 为进刀抗力。其值可依据经验式(1)来确定。

$$\begin{cases} F_v = 9.81 C_{F_v} \times a_p^{x_{F_v}} \times f^{y_{F_v}} \times v_c^{\lambda_{F_v}} \times K_{F_v} \\ F_p = 9.18 C_{F_p} \times a_p^{x_{F_p}} \times f^{y_{F_p}} \times v_c^{\lambda_{F_p}} \times K_{F_p} \\ F_t = 9.18 C_{F_t} \times a_p^{x_{F_t}} \times f^{y_{F_t}} \times v_c^{\lambda_{F_t}} \times K_{F_t} \end{cases} \quad (1)$$

式中 C_{F_v} 、 x_{F_v} 、 y_{F_v} 、 λ_{F_v} 、 K_{F_v} 等是与机床切削相关的常数,可在机械加工工艺手册中查到^[8]。

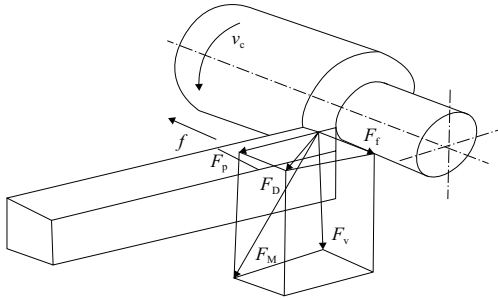


图2 轴类零件加工车刀受力

2.1 工件挠度变形安全性分析

卡盘在工作过程中,所受到的轴向顶紧力和刀具径向力,都会对工件挠度变形产生影响,使得工件端面转过一定角度。卡盘设计浮动找平范围为3mm,超过驱动销浮动找平范围,会使某个驱动销完全脱离端面,可能造成顶紧力失效。因此有必要对工件挠度加以分析。工件在载荷条件下产生的挠度变形与转角示意图如图3所示。根据端面驱动装夹工件方式,可将工件和卡盘尾座顶尖视为简支梁模型,尾座可视为固定支座,驱动销可视为移动支座。

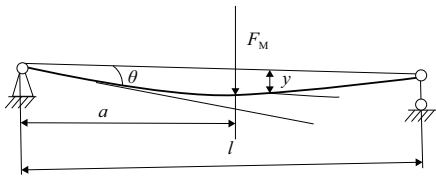


图3 载荷作用下产生挠度变形与转角

1) 顶紧力产生挠度。端面驱动卡盘在顶紧工件时,如图4所示,在卡盘驱动销和尾座顶紧力作用下产生弯曲变形^[9],其中 F_1 、 F_2 、 F_3 、 F_4 为4根驱动销在工件端面的顶紧力,弯矩见式(2),式中 F 为尾座顶紧力,与4个驱动销顶紧合力相等,轴向 F_t 为进刀抗力对工件也产生弯曲变形,进给抗力与顶紧力相比忽略不计。

$$M = nFy \quad (2)$$

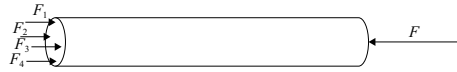


图4 工件顶紧受力情况

针对工件小变形,推导如式(3)所示。

$$\frac{M}{EI} = \frac{d^2y}{dx^2} \quad (3)$$

式中: M 为工件所受弯矩; n 为驱动销数; y 为挠度; x 为工件轴向的变形量; E 为被加工材料弹性模量; I 为材料截面的惯性距。

工件挠度计算公式如式(4)所示,式中 C_1 和 C_2 为依赖于边界条件的积分常数^[10]。

$$y_1 = C_1 \sin \sqrt{\frac{nF}{EI}} + C_2 \cos \sqrt{\frac{nF}{EI}} \quad (4)$$

将工件边界条件积分常数确定,工件挠度曲线可推导得式(5)。

$$y_1 = C_1 \sin \frac{\pi x}{l} \quad (5)$$

2) 工件受车刀径向力产生的挠度。工件在加工时受力情况如图5所示,工件工作受力状况,可将工件看做简支梁受集中荷载产生弯曲变形,根据材料力学关于简支梁挠度变形公式可推导出,工件两端产生的约束力与车刀径向力产生挠度见式(6),式中 $F_M = \sqrt{F_v^2 + F_p^2}$, a 为车刀距端面距离, l 为工件长度, $b = l - a$ 。

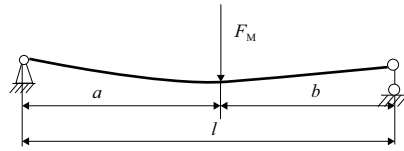


图5 工件加工时受力

$$y_2 = -\frac{nF_M bx}{6EI} (l^2 - a^2 - b^2) \quad (6)$$

工件变形很小,且在弹性变形范围内,几个载荷同时作用下的挠度和转角,分别等于单独载荷作用下的叠加,工件动态切削下总挠度 y , 见式(7);挠度在长度上的一次微分为转角,转角 θ 见式(8)。由图4可知驱动销不脱离工件表面见式(9),式中 R 为驱动销距圆心距离, h 为驱动销微量嵌入工件表面的深度。

$$y = y_1 + y_2 \quad (7)$$

$$\theta = \frac{dy}{dx} \quad (8)$$

$$2\sin\theta R \leq h + 3 \quad (9)$$

将 y_1 、 y_2 和代入式(5),车刀在 $x = \left(1 - \frac{\sqrt{3}}{3}\right)l$ 处产生最大转角,整理得端面转角式(10),只有满足式(10)工件挠度变形才不会使驱动销脱离顶紧端面。

$$2\sin\theta R \left[\pi c_1 \cos \frac{\pi}{2} + \frac{F_M ab (l+b)^2}{6EI} \right] \leq h + 3 \quad (10)$$

将 $F_M = \sqrt{F_v^2 + F_p^2}$ 、式(1) F_v 机床主切削力与 F_p 背向力带入式(10)得到最终允许最大挠度变形式(11)。

$$2\sin\theta R \left[\pi c_1 \cos \frac{\pi}{2} + \frac{\sqrt{(9.81C_{F,V} \times a_p^{x_{F,V}} \times f^{y_{F,V}} \times v_c^{z_{F,V}} \times K_{F,V})^2 + (9.18C_{F,P} \times a_p^{x_{F,P}} \times f^{y_{F,P}} \times v_c^{z_{F,P}} \times K_{F,P})^2} ab(l+b)^2}{6EI} \right] \leq h+3 \quad (11)$$

经分析计算,对长轴类零件分析端面转角较为准确,短轴分析时挠度变形很小,分析误差较大。一般短轴加工时,不对挠度变形引起端面转角分析^[11]。因为驱动销可以浮动找平,在卡盘浮动找平的范围内,本端面驱动卡盘不会对挠度和端面转角产生影响,其产生转角与等效合力产生转角相同。

2.2 工件挠度变形加工精度分析

工件挠度变形对加工精度有较大影响,图6(a)为工件在尾座顶紧力 F 与驱动销顶紧力以及背向力与主切削力合力 F_M 作用下,产生了挠度变形;已变形的工件在加工过程中,中间进给力变小,会造成零件两头小中间大,因挠度变形形成零件外圆轮廓如图6(b)所示。

加工径向误差就等于工件的挠度变形,工件总的挠度变形见式(7)。

$y=y_1+y_2$, y_1 为顶紧力引起挠度变形, y_2 为背向力与主

$$y=C_1 \sin \frac{\pi x}{l} + \frac{nbx(l^2-a^2-b^2)}{6EI} \times \sqrt{(9.81C_{F,V} \times a_p^{x_{F,V}} \times f^{y_{F,V}} \times v_c^{z_{F,V}} \times K_{F,V})^2 + (9.18C_{F,P} \times a_p^{x_{F,P}} \times f^{y_{F,P}} \times v_c^{z_{F,P}} \times K_{F,P})^2} \quad (13)$$

经分析,挠度变形与加工误差相同,因此如式(13)所示,误差为关于 x 轴函数,越靠近工件中间误差越大,适应于短轴且弹性模量较大材料。对于长轴类零件则可在数控机床编程中设置挠度变形径向刀具补偿进给,来减小误差。

3 实验验证

3.1 工件挠度变形公式验证

实验原理:根据式(11)在顶紧力一定的情况下,通过车刀增加切削厚度来增加径向力,即 F_M 的值,直至工件挠度变形,其中某个驱动销脱离工件表面,工件脱落。采用 Labview 软件建立实验数据的处理与分析平台,实验系统如图7所示^[12]。



图7 实验系统简图

应变式测力仪完成切削力信号的提取;多通道动态电阻应变仪完成信号的变换;采集卡完成信号的传递。

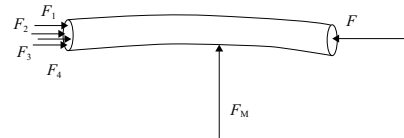
实验过程:进行数据处理与分析之前需要先完成测力仪的标定、采集车削切削力实验数据。测力仪进行静态和动态标定。静态标定的目的是为了获得静态标定曲线。采用长800mm、直径50mm、30号钢长轴零件毛坯250件为实验材料;分为5组在单爪1000N、1100N、1200N、1300N、1400N顶紧力作用下,经测量,驱动销微量嵌入工件表面深度分别为0.480mm、0.525mm、0.566mm、0.604mm、0.645mm5组数据;将5组数据以及对应驱动销脱离端面 F_M 值代入式(11)。

数据处理:表1为顶紧力1000N、机床进给120

切削力合力 F_M 作用下引起挠度变形,将式(5)、式(6)带入式(7),两个方向力产生挠度方向一致,得式(12)。

$$y=C_1 \sin \frac{\pi x}{l} + \frac{nF_M bx}{6EI} (l^2-a^2-b^2) \quad (12)$$

将 $F_M = \sqrt{F_V^2 + F_P^2}$ 、式(1) F_V 机床主切削力与 F_P 背向力带入式(12)得到最终允许最大挠度变形式(13)。



(a) 工件受力挠度变形示意图



(b) 因挠度变形形成加工外圆轮廓

图6 工件挠度变形图

m/min、转速1000r/min,根据不同切削深度 a_p 得到的切削力 F_V 、背向力 F_P 和进刀抗力 F_f 。记录工件脱落顶紧力失效时切削深度 a_p 以及对应切削力。同理其余4种单爪顶紧力作用下得到工件脱落时的切削力。将数值代入式(11)得到允许最大挠度变形实测值与理论计算比值如图8所示。

表1 切削深度 a_p 对切削力 F 的影响

切削深度 a_p /mm	主切削力 F_V /kg	背向力 F_P /kg	进给抗力 F_f /kg
0.25	37.17	14.27	9.90
0.45	91.03	38.88	31.27
0.65	153.05	59.99	51.53
0.85	256.43	80.25	74.26
1.05	378.09	129.38	110.79

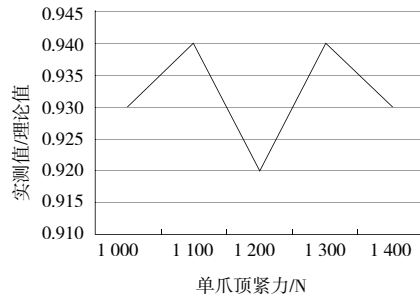


图8 实测值与理论值比值

上述数据可知,实测值和理论值比值测量均值0.930,因未考虑机床振动等原因,实测值与理论值比值偏小。但数据接近于1,说明式(11)在取一定安全系数下可作为允许最大挠度变形的参考公式。

3.2 工件挠度变形引起误差公式验证

实验原理:通过单片机控制机床移动步进电机脉冲数对误差进行补偿^[13],根据挠度变形曲线式(13),转换成车刀径向进给的函数,从而补偿因零件挠度变形径向进给量,这样通过单片机控制步进电机脉冲数,理论上可消除因挠度变形引起的圆柱度误差。零件加工后测量工件圆柱度误差即可完成对挠度变形公式验证。系统补偿程序框图如图9所示。

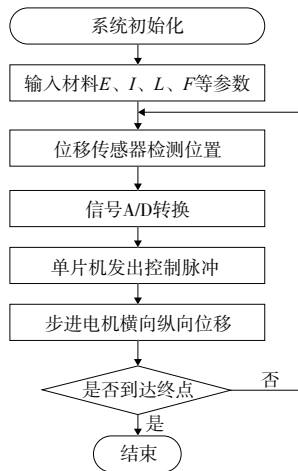


图9 程序框图

实验过程:用本端面驱动卡盘加工工件,长度分别为900 mm、800 mm、700 mm、600 mm、500 mm,直径为50 mm,30号钢长轴零件毛坯各50件,加工至直径42 mm。

数据处理:测量5组工件平均圆柱度误差,如图10所示。

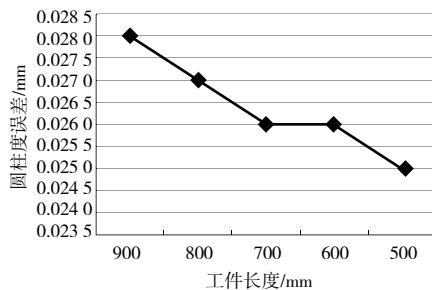


图10 5组工件平均圆柱度误差

由上述数据可知,工件长度变短工件圆柱度误差下降,

符合预期;通过补偿工件挠度变形径向进给量后,因挠度变形引起加工误差可低至设计允许的范围内,证实工件挠度变形公式能够较为准确反映挠度变形实际情况。

4 结语

本文通过理论分析计算,得到工件挠度变形允许最大挠度变形公式,以及挠度变形引起加工误差公式,并对允许最大挠度变形公式实验验证,对挠度变形引起加工误差进行补偿修正,并对修正结果实验验证。这对端面驱动卡盘的安全使用以及加工精度的保证有现实的意义。但是力学模型的精度以及实验数据精确采集方面还存在不足,可在后续研究中进一步探究。

参考文献:

- [1] 邹俊俊. 基于 CATIA 的一种端面驱动式机床夹具设计[J]. 机械制造,2015,53(5):61-63.
- [2] 刘宏利,刘明玺,丁万霞,等. 一种四点浮动端面驱动特种夹具设计与应用[J]. 自动化技术与应用,2018,37(4):21-25.
- [3] 冯小庭,刘宏利,刘明玺. 端面驱动卡盘顶紧力分析[J]. 机械制造与自动化,2021,50(5):56-58.
- [4] WANG Z Y, WANG D M, CHEN B, et al. A clamping force estimation method based on a joint torque disturbance observer using PSO-BPNN for cable-driven surgical robot end-effectors [J]. Sensors, 2019, 19(23):5291.
- [5] 杨润党. 虚拟数控车削加工过程建模与仿真系统的研发[D]. 镇江:江苏大学,2003:21-27.
- [6] 艾兴. 高速切削加工技术[M]. 北京:国防工业出版社,2003.
- [7] BYUN J, LIU C R. Improving chucking accuracy and repeatability by reducing kinematic redundancy[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering,2010,132(6):064501-064505.
- [8] 孟少农. 机械加工工艺手册-第1卷[M]. 北京:机械工业出版社,1991.
- [9] 徐冬. 核电汽轮机焊接转子车削加工变形分析及其控制[D]. 上海:上海交通大学论文集,2017:47-53.
- [10] 罗伯特·诺顿. 机械设计[M]. 5版. 北京:机械工业出版社,2016.
- [11] 王健健,张建富,冯平法,等. 楔式动力卡盘静态夹持精度建模与综合[J]. 西安交通大学学报,2013,47(3):90-95.
- [12] 陈金英,史利娟,仲丛和,等. 数控车削力实验数据的处理与分析[J]. 煤矿机械,2010,31(11):50-51.
- [13] 许鹏,邓志平. 细长轴加工的单片机误差补偿系统设计[J]. 机床与液压,2011,39(22):91-92.

收稿日期:2022-03-31