

[文章编号] 1003-4684(2024)02-0029-05

插齿机主运动机构的动平衡优化策略

丁国龙¹, 曾立竹¹, 叶梦传¹, 王 维²

(1 湖北工业大学机械工程学院, 湖北 武汉 430068; 2 宜昌长机科技有限责任公司, 湖北 宜昌 443003)

[摘 要] 在插齿过程中插齿机由于主运动机构动不平衡产生了不平衡惯性力, 从而引起机床振动和噪声。为此, 通过对插齿机主运动机构进行平衡分析, 计算曲柄旋转一周的曲柄销与连杆的总不平衡量, 采用积分求解和均值求解两种优化计算方法, 以均方差作为评价指标制定优化策略。插齿机 YKW51160 主运动机构的平衡量优化实例计算表明, 积分优化法与均值优化法计算的平衡块的不平衡量相近, 相差不超过 $0.2 \text{ kg} \cdot \text{m}$, 积分优化后的不平衡量均方差为 0.614, 波动更小, 减振效果更好。

[关键词] 曲柄连杆机构; 机构动平衡; 不平衡量; 积分优化法

[中图分类号] TH111, TH113 **[文献标识码]** A

高速插齿机主运动机构采用的是曲柄滑块机构。在插齿加工过程中, 曲柄滑块机构同时进行着高速旋转运动和往复运动, 如果运动部分质量中心与回转中心不重合, 将产生惯性力等, 导致运动的不平衡, 从而引起振动、噪声, 或降低机床寿命。

国内外许多学者对机构动平衡进行了研究。压力机高速冲压时大惯性的滑块会加大机身的变形, 陆杨^[1-3]等通过离心惯性力平衡法准确计算出动平衡滑块的质量和行程; 郭瑞琴^[4-6]等用二副构件的质量矩平衡替代平面连杆机构摆动力平衡, 构造出一般平面机构的摆动力完全平衡条件; 刘军^[7-8]等分析发动机曲轴动平衡, 并通过改进曲轴中心孔加工工艺法和钻孔去重法实现动平衡; 侯隆韬^[9-10]等针对航空发动机转子因加工、装配或运行原因引起的动不平衡, 采用四点平衡法进行优化; Kochev I S^[11]提出平衡机构摆动力和摆动力矩的评价指标; Nehe-miah P^[12]等通过质量重新分布法和惯性配重法对机构摆动力进行平衡。从以上研究可以看出, 机构的动不平衡问题可以通过动平衡理论与优化方法相结合的策略进行平衡。

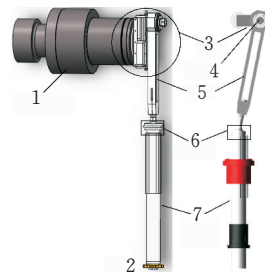
尽管动平衡研究成果较多, 但插齿机主运动机构的动平衡理论和动平衡方法较少。因此, 从插齿机主运动机构的结构出发, 结合机构动力学理论、动平衡理论、动平衡优化方法和优化评价指标, 能形成一套完整的插齿机主运动机构动平衡优化策略。

1 插齿机主运动机构动平衡分析

插齿机运动过程分为五种: 主运动、展成运动、圆周进给运动、径向进给运动、让刀运动^[13]。其中, 主运动体现为插齿刀随主轴上下往复运动, 对工件进行插削。插齿机主轴的往复冲程运动通过交流变频电机驱动曲柄滑块机构实现。对于大齿宽齿轮插削加工, 主运动的行程较长, 则需要调节曲柄滑块机构的曲柄杆长来实现加工功能。

1.1 主运动的机械结构

以 YKW51160 长行程数控插齿机为例(主运动机械结构如图 1 所示), 与驱动电机连接的主轴作为原动件, 其旋转运动通过曲柄滑块机构转化为直线运动, 连杆通过球面副与做往复运动的滑块连接。为了适应加工不同齿宽齿轮的需要, 采用丝杠螺母结构调节曲柄的工作半径。



1—驱动电机; 2—插齿刀; 3—曲柄; 4—曲柄销; 5—连杆;
6—球面副; 7—滑块(刀轴)

图 1 YKW51160 主运动机构的机械结构

[收稿日期] 2022-06-07

[基金项目] 湖北省重点研发计划(2020BAB034)

[第一作者] 丁国龙(1968—), 男, 湖北武汉人, 工学博士, 湖北工业大学教授, 研究方向为齿轮传动、数控加工技术及齿轮加工装备研发。

[通信作者] 曾立竹(1995—), 男, 湖北宜昌人, 湖北工业大学硕士研究生, 研究方向为插齿加工技术。

表 1 YKW51160 的结构参数

参数	符号	数值
曲柄最大长度/m	E	0.23
连杆长度/m	L	1.00
曲柄质量/kg	m_1	97
曲柄销质量/kg	m_2	2
连杆质量/kg	m_3	45
曲柄角速度/($\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$)	ω_{ob}	31.42

插齿刀回程到工件的上出头位置, U 和 U_1 最小, 为 $8.81 \text{ kg} \cdot \text{m}$ 。

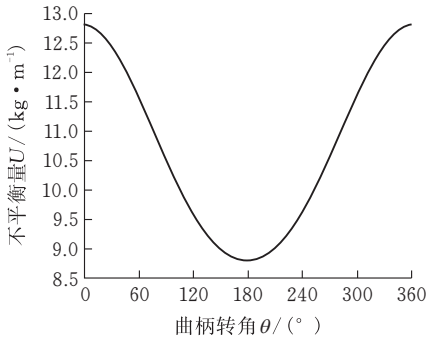


图 5 时变不平衡量 U

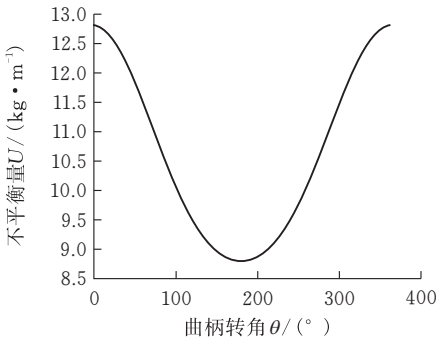


图 6 时变不平衡量 U_1

一个周期内, 在曲柄转角为 0° 和 180° 时, 曲柄与连杆重合, U_2 为 0; 转角为 90° 时, 曲柄与连杆垂直, U_2 最大, 为 $1.95 \text{ kg} \cdot \text{m}$ (图 7)。

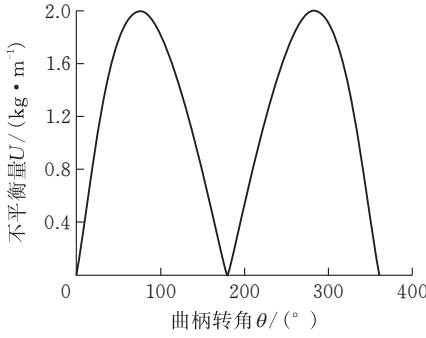


图 7 时变不平衡量 U_2

在一个周期内, 沿曲柄方向的不平衡量分量 U_1 的幅值, 比沿曲柄垂直方向的分量 U_2 更大, 优先考虑平衡 U_1 。一般在结构上进行改进, 如图 8 所示, 在曲柄的反向延长线上添加两块等质量的平衡块, 以达到降低动不平衡量的目的。平衡块通过螺栓连

接在导轨上 (图 8)。

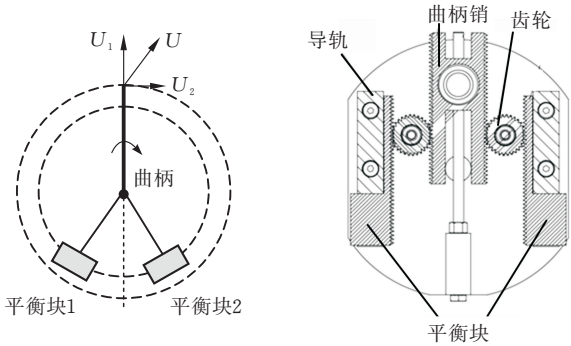


图 8 平衡块安装

当平衡块的不平衡量 U_p 过大时, 可以降低曲柄转角为 0° 时的幅值, 但曲柄转角为 180° 时, 沿着曲柄反方向的不平衡量又会因为平衡块而增大; 当平衡块的不平衡量 U_p 过小时, 又达不到动平衡的目的。因此, 需要选择合理的 U_p 。

2.2 YKW51160 的动平衡优化方法

本文分别采用积分优化法和均值优化对 YKW51160 进行动平衡优化。

2.2.1 积分优化法 由于一个周期内连杆和曲柄销的不平衡量随曲柄转角的变化是一条连续光滑的曲线, 考虑整个周期内的动平衡优化, 积分优化法是将连杆和曲柄销的不平衡量 $U(\theta)$ 在 $[0, 2\pi]$ 上的定积分与平衡块的不平衡量 U_p 在 $[0, 2\pi]$ 上的定积分差值设为 U_e , 将残余不平衡量 U_d 作为优化目标, U_d 越小, 表明在一个周期内主运动机构的动平衡波动较小:

$$U_e = \int_0^{2\pi} U_d \theta - \int_0^{2\pi} U_p d\theta \tag{18}$$

$$U_d = \frac{U_e}{2\pi} \tag{19}$$

优化目标为 U_e 最小, 优化目标函数用 $\min f(U_p)$ 表示

$$U_e = \min f(U_p) = U_d \tag{20}$$

设 U_{\max} 为 U 的最大值, U_p 的约束条件为:

$$U_p \in (0, U_{\max}) \tag{21}$$

设置梯度为 k , 等差数列 $S_k = \{0, k, 2k, \dots, (n-1)k, nk\}$ 。其中, $(n-1)k < U_{\max} \leq nk$, U_p 分别取 S_k 中的全部元素, 得到优化结果的集合为 $S_p = \{f(0), f(k), f(2k), \dots, f((n-1)k), f(nk)\}$ 。集合为 S_p 中的最小元素, 即为优化结果。优化流程如图 9 所示。

实例计算中, $k=0.1, n=128$ 。通过 MATLAB 编程求解后, 当平衡块的不平衡量为 $10.7 \text{ kg} \cdot \text{m}$ 时, 最优解 $\min=0.144 \text{ kg} \cdot \text{m}$ 。

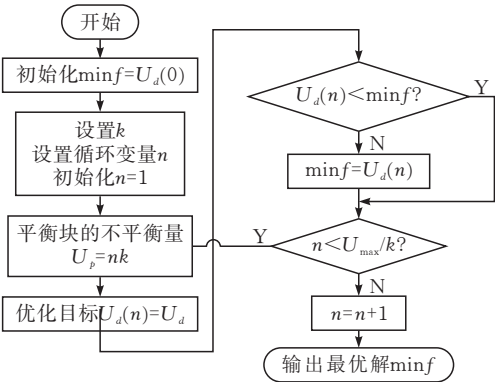


图9 积分优化流程

2.2.2 均值优化法 均值优化法是将一个周期内连杆和曲柄销的不平衡量 U 的最大值和最小值的平均值作为平衡块的不平衡量 U_p ,

$$U_p = \frac{U_{\min} + U_{\max}}{2} = 10.8$$

(22)

将积分优化法和均值优化法优化后的不平衡量进行对比,如图10所示,积分优化法与均值优化法的优化结果相近。

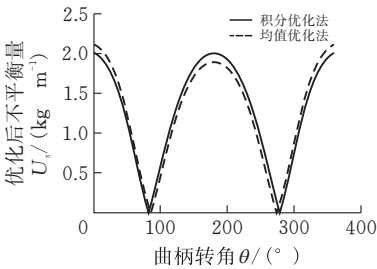


图10 优化结果对比

对比一个周期内优化后的不平衡量 $U_s(\theta)$ 的最小值、最大值、平均值、均方差等统计指标,对比结果如表2所示。采用积分优化法优化使不平衡量的幅值降低,且均方差更低。较小不平衡量波动能减小主运动机构的振动。

表2 优化后的统计指标对比

统计指标	积分优化法	均值优化法
最小值/(kg·m)	0.005	0.008
最大值/(kg·m)	2.000	2.110
平均值/(kg·m)	1.287	1.279
均方差	0.614	0.616

3 结论

1)插齿机主运动机构中的曲柄旋转一个周期,连杆和曲柄销的不平衡量最大值和最小值分别出现在曲柄转角为 0° 和 180° 时,且沿曲柄方向的不平衡量分量占比更大。

2)研究了积分优化方法,并用于插齿机主运动的动平衡结构优化中,积分优化方法与均值优化方法的优化结果相近。因此,将积分优化方法应用在

机构动平衡优化上是可行的。
3)将机构动力学理论、动平衡理论、优化方法、优化评价指标相结合,形成一套完整的插齿机主运动机构的动平衡优化策略。通过优化策略精确计算出平衡块的不平衡量,从而减小主运动机构的振动与噪声,为解决插齿机主运动机构的动不平衡问题提供了工程化可行方案。

[参 考 文 献]

[1] 陆杨,王邵君.闭式双点高速精密数控压力机动平衡机构设计[J].金属加工(热加工),2015(09):46-47.

[2] 沈惠平,聂亚彪,李菊,等.基于有限位置法的冲压机构摆动动力完全平衡设计[J].农业机械学报,2021,52(04):384-391.

[3] CHAUDHARY H, SAHA S K. Balancing of shaking forces and shaking moments for planar mechanisms using the equimomental systems[J]. Mechanism & Machine Theory, 2008, 43(03):310-334.

[4] 郭瑞琴,孔宪文.平面连杆机构摆动动力完全平衡的质量矩替代法[J].机械传动,2000(01):9-12.

[5] FARMANI M R, JAAMIALAHMADI A, BABAIE M. Multi-objective optimization for force and moment balance of a four-bar linkage using evolutionary algorithms[J]. Journal of Mechanical Science & Technology, 2011, 25(12):2971-2977.

[6] 孔宪文.空间连杆机构摆动动力与摆动力矩的近似平衡[J].郑州大学学报(自然科学版),2000(01):57-60.

[7] 刘军,赵靖.发动机曲轴动平衡质量分析及解决[J].时代汽车,2021(18):143-145.

[8] 陈旭,张科,于江,等.某发动机曲柄连杆机构一阶不平衡力优化[J].重庆理工大学学报(自然科学),2013,27(10):6-9.

[9] 侯隆韬.航空发动机转子动平衡方法探究[J].机电信息,2020(14):68-69.

[10] 肖理杰.一种民用航空发动机转子动平衡方法[J].航空维修与工程,2019(11):65-67.

[11] KOICHEV I S. Optimum balancing of a class of multi-loop linkages by function cognate transformations[J]. Mechanism & Machine Theory, 1991, 26(03):285-297.

[12] NEHEMIAH P. Shaking Force and Shaking Moment Balancing of Planar Mechanisms with High Degree of Complexity[J]. Jordan Journal of Mechanical & Industrial Engineering, 2012,6(01):17-24.

[13] 蒙文,易传云,钟瑞龄,等.高速插齿机主运动静压导轨的设计[J].机床与液压,2010,38(08):49-50.

Dynamic Balance Optimization Strategy of Gear Shaper Main Motion Mechanism

DING Guolong¹, ZENG Lizhu¹, YE Mengchuan¹, WANG Wei²

(1 *School of Mechanical Engineering, Hubei Univ. of Tech., Wuhan 430068, China*;
2 *Yichang Changji Machine Technology Co.LTD, Yichang 443003, China*)

Abstract: The main movement of the gear shaper is achieved by means of a crank slider mechanism. Because the mass centers of crank pin and connecting rod do not coincide with the rotating centers, the unbalanced inertia force will be produced during the process of gear insertion. Vibration and noise of the lathe will cause, and the improvement of gear insertion machining accuracy will be restricted. Therefore, the mass equivalent analysis of the crank pin and connecting rod was carried out to calculate the total unbalance between the crank pin and connecting rod when the crank rotates once. In order to obtain the optimal balance effect, it adopted an optimization strategy that integral solution and mean solution were two optimization calculation methods and mean variance was evaluation index. The calculation of dynamic balance of main movement mechanism of gear shaper YKW51160 shows that the unbalance of balancing block calculated by integral optimization method is similar to that calculated by mean optimization method. and the fluctuation of unbalance after integral optimization is smaller and the vibration reduction effect is better.

Keywords: crank slide mechanism; dynamic balance of mechanism; unbalance; integral optimization method

[责任编辑：张 众]

(上接第 28 页)

Effect of Process Parameters on the Microstructure and Mechanical Properties of Magnesium-Steel Joint by Friction Stir Lap Welding

ZHAO Yifan^{1,2,3}, HU Xinbin^{1,2,3}, SHEN Xiaokun^{1,2,3}

(1 *School of Materials and Chemical Engineering, Hubei Univ. of Tech., Wuhan 430068, China*;
2 *Hubei Provincial Key Laboratory of Green Materials for Light Industry, Wuhan 430068, China*;
3 *Hubei Engin. Laboratory of Automotive Lightweight Materials and Processing, Wuhan 430068, China*)

Abstract: The dissimilar metals of 2.5 mm AZ31B magnesium alloy and 2 mm DP600 high strength steel were welded by friction stir lap welding. The effects of process parameters on the microstructure, binding mechanism and mechanical properties of magnesium/steel lap joints were investigated by OM, SEM, XRD, tensile test and hardness test. The results show that the connection mechanism of magnesium/steel joints was mechanical bonding. The tensile properties of the joints decreased when the welding feed rate increased; The tensile properties of the joints first increased and then decreased when the rotation speed increased. The maximum shear failure load of 295.8 N/mm was reached at the feed speed of 80 mm/min and the rotation speed of 900 r/min. The grain refinement at the interface was significant, and the hardness is significantly higher than that of the base metal.

Keywords: magnesium alloy; high strength steel; friction stir lap welding; joint performance

[责任编辑：张 众]