

doi: 10.7690/bgzd.2022.09.008

高速列车车体底盘连接板高速高效加工方法

陈洪海, 张大舜, 孟凡军, 张磊, 谭传杰, 李福坤, 桑蒙, 郭波
(长春设备工艺研究所数字化制造技术研究室, 长春 130012)

摘要: 针对高速列车车体底盘连接板的加工问题, 提出一种高速高效的加工方法。基于工艺系统模态分析和铣削过程动力学模型分析, 采用切削加工中的再生颤振理论, 对加工过程的颤振稳定域进行仿真, 给出与铣削加工过程工艺参数相关的颤振稳定域结果; 在动力学仿真计算的基础上, 以主要的加工工艺参数主轴转速、进给量、轴向切削深度、径向切削深度为设计变量, 以最小加工时间为优化目标进行优化计算, 得到满足一定优化目标和优化条件的工艺参数, 重点以数控加工工艺参数的优化选择、金属材料去除率增加为目标的数控高速高效加工。结果表明, 该方法可形成铝合金高效切削数据手册、铝合金典型零件高效数控加工的程序和工艺规范。

关键词: 颤振稳定域; 动力学仿真; 优化目标; 工艺参数

中图分类号: TP391.99 **文献标志码:** B

High-speed High-efficiency Processing Method for Connecting Plate of High-speed Train Chassis

Chen Honghai, Zhang Dashun, Meng Fanjun, Zhang Lei, Tan Chuanjie, Li Fukun, Sang Meng, Guo Bo
(Digital Manufacturing Technology Laboratory, Changchun Institute of Equipment and Technology, Changchun 130012, China)

Abstract: A high speed and high efficiency machining method is proposed to solve the problem of machining the connecting plate of the chassis of high-speed train. Based on the modal analysis of technological system and the dynamic model of milling process, the chatter stability domain of milling process is simulated by using the theory of regenerative chatter in cutting process, and the results of chatter stability domain related to technological parameters of milling process are given. On the basis of dynamic simulation, the main machining process parameters such as axial speed, feed rate, axial cutting depth and radial cutting depth are taken as design variables, and the minimum machining time is taken as optimization target to carry out optimization calculation, and the process parameters meeting certain optimization objectives and optimization conditions are obtained. It focuses on the optimization of CNC machining process parameters and the increase of metal material removal rate as the goal of high-speed and efficient CNC machining. The results show that the method can form the data handbook of aluminum alloy efficient cutting, the program and process specification of efficient CNC machining of typical aluminum alloy parts.

Keywords: chatter stability domain; dynamic simulation; optimization target; process parameters

0 引言

针对列车车体大型铝合金关键件加工, 国内清华大学、山东大学已有所研究^[1], 但主要针对加工设备结构的研制, 对于其加工工艺的优化和效率的提高并没有深入研究。笔者采用切削加工中的再生颤振理论, 对加工过程的颤振稳定域进行仿真^[2], 给出与铣削加工过程工艺参数相关的颤振稳定域结果。如果一味地追求高切削参数和效率, 将产生严重的刀具变形以至于破坏机床, 所以在保证机床和刀具寿命前提下, 以最小加工时间为优化目标进行优化计算, 得到满足一定优化目标和优化条件的工艺参数, 通过高效数控切削优化实验进行切削参数

的优化选择^[3], 形成铝合金高效切削数据手册、铝合金典型零件高效数控加工的程序和工艺规范。

1 总体方案设计

针对企业铝合金关键零件, 开展铝合金材料铣削高速高效技术的研究, 通过高效数控切削优化实验、生产现场实验进行切削参数的优化选择, 实现加工效率提高 1 倍以上, 形成铝合金高效切削数据手册、铝合金典型零件高效数控加工的程序和工艺规范。具体实施方案如图 1 所示。

2 工艺特性分析

车体底盘连接板是整个车体牵引部分的安装基

收稿日期: 2022-05-08; 修回日期: 2022-06-23

基金项目: 吉林省科技厅重点研发项目(20200401124GX)

作者简介: 陈洪海(1982—), 男, 吉林人, 硕士, 副研究员, 从事机械加工及电气控制研究。E-mail: 173965139@qq.com。

体^[4]，其 3 维模型及 2 维投影如图 2 所示。加工内容繁多，既要完成车体总成面铣，又要完成各配合部位的加工，保证底盘与侧墙、端墙等的装配精度。同时，底盘连接板等关键部件需要安装在底架底部，在其加工完成后，还需对底盘连接板等安装位置进行钻孔、攻丝等 2 次加工^[5]。加工部位多，有台阶平面、型腔、沟、槽、孔等多种工艺特征，存在加工面积大、精度不易控制、加工效率低、单件铣削加工时间很长等问题。

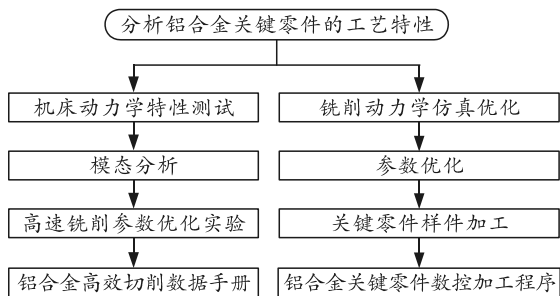
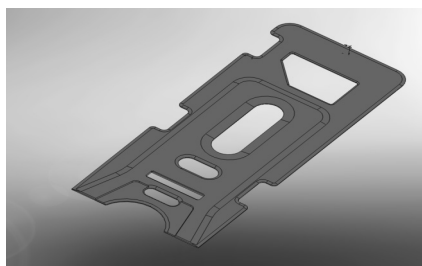
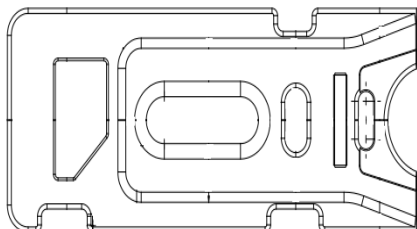


图 1 铝合金关键零件数控加工实施方案



(a) 底盘连接板 3 维模型



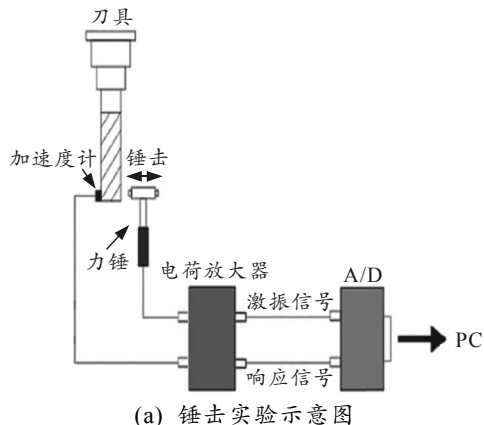
(b) 底盘连接板 2 维投影

图 2 底盘连接板和侧墙结构件的 3 维模型及 2 维投影

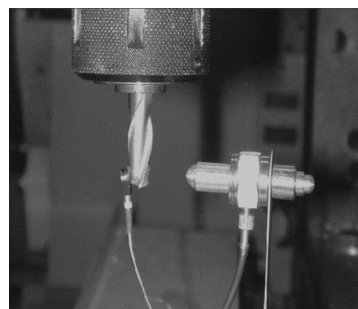
3 采用再生颤振理论对颤振稳定域进行仿真

切削参数通过锤击试验，应用 DynaCut V1.0 和 SimuCut V1.0 软件仿真优化后得到^[6]，再通过切削试验调整后应用于生产。主要应用数控机床加工动力学特性测试分析软件系统和铣削加工动力学仿真系统，以工厂现行生产的结构件为研究对象，进行切削加工参数仿真与优化试验^[7]。立铣加工颤振稳定域时域仿真验证实验在国内某厂五坐标立式加工中心上进行，该机床最高转速为 18 000 r/min；实验用刀具为直径 $\phi 12$ 的硬质合金整体铣刀、2 齿、螺旋角 30° ，安装悬伸长度 70 mm；工件材料为

AL7075-T6，由切削力系数辨识实验获得切削力系数为^[8]： $K_{tc}=796 \text{ N/mm}^2$ ， $K_{rc}=168 \text{ N/mm}^2$ ， $K_{ac}=222 \text{ N/mm}^2$ ， $K_{te}=27.7 \text{ N/mm}^2$ ， $K_{ae}=1.5 \text{ N/mm}^2$ 。测试系统：MSC-1 冲击力锤，相应 500 kg 力传感器；YD67 小型加速度计，灵敏度为 0.3 PC/ms^{-2} ，频率范围为 $1\sim 18\,000 \text{ Hz}$ ；DLF-3 型四合一两通道电荷放大器；USB 接口四通道数据采集器 AD8304；数控加工动力学特性测试分析系统 DynaCut V1.0。其锤击实验示意图及照片如图 3 所示。



(a) 锤击实验示意图



(b) 锤击实验照片

图 3 锤击实验示意图及照片

以用于铣削型腔的 $\phi 20$ 硬质合金立铣刀为例^[9]，通过锤击试验得到其在 GM2580 机床上的顺铣情况下切宽分别为 $100\%D$ 、 $50\%D$ 、 $25\%D$ 时的颤振稳定域曲线。在进给 (X 方向) 和垂直于进给 (Y 方向) 2 个方向进行锤击实验以获取铣削加工系统动态特性如图 4 所示，从而获取机床/刀具系统 X 、 Y 方向 FRF，实验得到颤振稳定域曲线如图 5 所示，由正交多项式整体识别算法辨识出的模态参数。对槽铣条件下 ($\varphi_{st}=0$ ， $\varphi_{ex}=\pi$) 的颤振稳定域进行仿真^[10]，得到的颤振稳定域时域解如表 1 所示，显示颤振稳定域时域解、分析解与实验结果均非常一致。针对北京机床研究所生产的机床型号 GM2580 加工中心为对象，铣刀类型为圆柱螺旋立铣刀，齿数为 3，铣刀半径为 10 mm，铣刀悬臂长度 30 mm，铣刀螺旋角为 55° ，刀具 R 角半径 0.5 mm，刀具材料

CB25, 刀具型号 $\phi 20$, 在此条件下时域仿真结果 如下:

表 1 不同切削条件下时域仿真结果

序号	切削参数							切削过程仿真结果							数据状态		
	径向切宽/mm	轴向切深/mm	主轴转速/(r/min)	切削线速度/(m/min)	进给量		Y向切削力峰值/N	XY平面切削力峰值/N	切向力峰值/N	最大转矩/Nm	最大切削功率/W	材料去除速率/(cm^3/min)	主轴功率利用率	仿真	实验	应用	
					每齿进给量/mm	进给速度/(mm/min)											
1	16	0.5	4 500	282.74	0.05	675	36.69	38.52	43.71	0.44	205.98	5.40	0.94	●	▲	★	
2	16	0.5	4 500	282.74	0.10	1 350	58.14	60.36	63.41	0.63	298.81	10.80	1.36	●	▲	★	
3	16	0.5	4 500	282.74	0.15	2 025	79.88	82.46	83.11	0.83	391.63	16.20	1.78	●	●	●	
4	16	0.5	4 500	282.74	0.20	2 700	101.72	104.64	102.80	1.03	484.45	21.60	2.20	●	●	●	
5	16	0.5	4 500	282.74	0.25	3 375	123.60	126.87	122.50	1.23	577.28	27.00	2.62	●	●	●	
6	16	0.5	4 500	282.74	0.30	4 050	145.50	149.12	142.20	1.42	670.10	32.40	3.05	●	●	●	
7	12	0.5	4 500	282.74	0.05	675	36.69	38.52	33.59	0.34	158.30	4.05	0.72	●	▲	★	
8	12	0.5	4 500	282.74	0.10	1 350	58.13	60.36	55.18	0.55	260.01	8.10	1.18	●	▲	★	
9	12	0.5	4 500	282.74	0.15	2 025	79.88	82.46	76.76	0.77	361.73	12.15	1.64	●	●	●	
10	12	0.5	4 500	282.74	0.20	2 700	101.72	104.64	98.35	0.98	463.45	16.20	2.11	●	●	●	
12	12	0.5	4 500	282.74	0.25	3 375	123.60	126.87	119.93	1.20	565.17	20.25	2.57	●	●	●	
13	12	0.5	4 500	282.74	0.30	4 050	145.50	149.12	141.52	1.42	666.88	24.30	3.03	●	●	●	
14	8	0.5	4 500	282.74	0.05	675	36.69	38.01	33.08	0.33	155.87	2.70	0.71	●	▲	★	

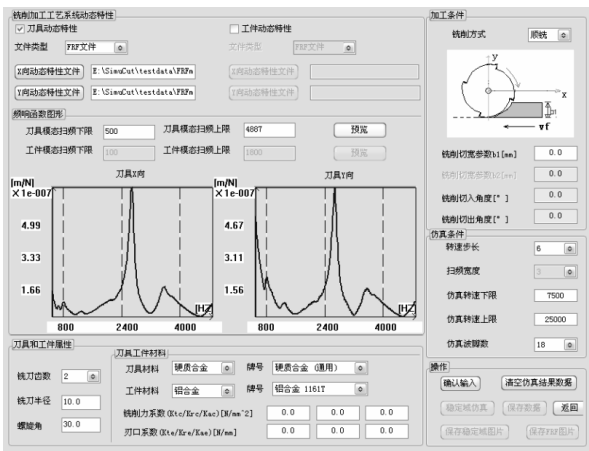


图 4 铣削加工系统动态特性

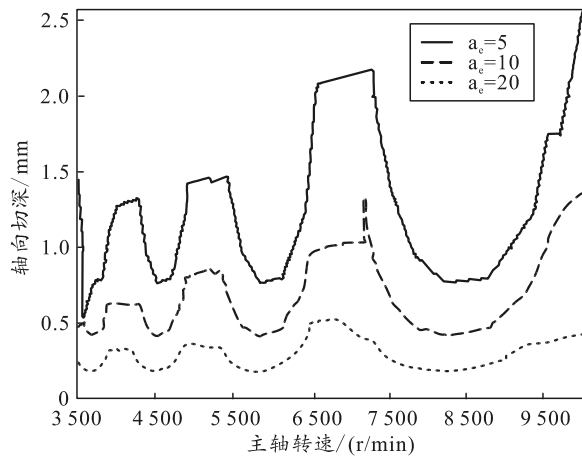


图 5 颤振稳定域曲线

4 实验与分析

经过仿真和结合切削实验, 得出优化后的切削参数如表 2 所示。刀具材料采用硬质合金, 规格为 $\phi 20 \text{ mm} \times 120 \text{ mm}$; 铣刀齿数为 3, 刀柄型号 BT50。仿真得到的颤振稳定性叶瓣图显示: 在工艺系统主模态固有频率的谐波频率(对应于主轴转速 2 000~3 500 r/min)处, 存在较大的稳定性叶瓣, 且越靠近固有频率, 稳定叶瓣越大, 越有利用价值。粗加工

时, 选择对应于工艺系统谐振频率的主轴转速, 可获得较高的加工效率。

表 2 经过试验调整后的应用切削参数

主轴转速/(r/min)	进给速度/(mm/min)	切深/mm	切宽/mm
2 000~3 500	500~1 000	10~20	0.2~2

5 结论

笔者在铣削加工动力学仿真分析的基础上, 以铣削加工中诸如主轴转速 n 、每齿进给量 f_i 、径向切深 a_e 、轴向切深 a_p 和切削层数 N_p 等工艺参数为设计变量, 以最小工件加工时间为优化目标函数, 以铣削加工动力学仿真结果作为约束条件, 将复杂的切削参数优化问题分解成相对简单的多阶段条件极值问题进行处理, 方便、有效地实现了切削参数优化的计算。在优化问题所涉及的约束条件中, 引入能反映铣削加工振动特性的颤振稳定域约束, 以反映高速铣削加工的动力学特性, 使得工艺参数的最终优化结果更加科学有效。与完全依赖工艺人员经验确定切削参数的方法相比, 这种基于动力学仿真的切削参数优化方法具有较为明显的应用优势。

参考文献:

- [1] 李国杰. 中国“走出去”面临的挑战与对策研究[D]. 重庆: 重庆师范大学, 2017: 15-18.
- [2] 胥军, 胥祥. 中国高铁发展概述[J]. 硅谷, 2014(1): 8, 150.
- [3] 国务院. 中国制造 2025 路线图[N]. 中国联合商报, 2018: 20-25.
- [4] 华亮, 姜建宁. 机车车辆概论[M]. 北京: 北京交通大学出版社, 2010: 100-105.
- [5] 叶鹏飞, 王煜, 吕庆玉, 等. 高速列车车体用铝合金型材的生产工艺[J]. 轻合金加工技术, 2009, 37(9): 40-43.