

数控机床某些特性对零件加工质量的影响分析^{*}

Impact Analysis of Characteristics of CNC Machine Tool on Machining Quality

中航工业成都飞机工业集团公司数控加工厂 陈代鑫 刘 适 陈龙波 刘 宇 吉 红

[摘要] 近年来,数控机床因素导致零件发生质量问题的案例在生产实践中屡见不鲜,但对于这些问题却缺乏可靠的分析方法。通过对数控机床的特性进行研究,总结出对产品质量影响最大的几个方面,对解决因机床原因引起产品质量问题的分析方法进行了探讨,并成功应用于工程实践中。

关键词: 数控机床 刚度 热变形 静态特性 动态特性

[ABSTRACT] Parts failure of CNC machining which is caused by machine tools factors are commonly observed in recent years, but reliable methodologies that could solve these problems are highly lacked. The main factors that have great impact on machining quality is summarize based on analysis of characteristics of CNC machine tools. The procedure to solve machining problems from the perspectives of machine tools characteristics is discussed. Two case studies from industry, which is caused by static and dynamic characteristic of machine tools, is discussed as well.

Keywords: CNC machine tool Strength Thermal deformation Static characteristic Dynamic characteristic

在生产实践中遇到的一些复杂现场问题,有相当一部分与数控机床的特性有关,由于数控机床结构复杂,综合了微电子、计算机、自动控制、自动检测及精密机械等多学科的技术成果,造成现场问题往往难以分析,没有一套解决该类问题的系统方法,导致其成为影响零件加工质量的一个突出矛盾。

1 机床特性对零件加工质量的影响

数控机床的特性对零件加工质量的影响,主要表现为一些长期性、系统性的复杂问题,产品质量始终不稳

定,这些问题与机床本身的结构、运动特性密切相关,通过长期生产实践中得到的经验以及相关的理论研究发现,数控机床的刚度、热特性及静、动态特性,是造成这些问题的主要因素。

1.1 造成零件加工质量问题的数控机床主要特性及其影响

(1) 数控机床刚度。

机床刚度可定义为机床抵抗变形的能力,刚度越好则机床结构在同样激振力作用下,产生的振幅越小,抗振能力越好^[1]。数控加工是一个动态过程,刚度直接影响加工系统动态稳定性,刚度差往往会出现机床振动、噪声大、刀具磨损严重、零件表面质量差等问题,这在航空薄壁结构件的高速加工或难加工材料零件的加工中表现尤为明显。

(2) 数控机床热特性。

热特性是指在切削加工中,由于机床各部件温升引起的热变形的特性。热变形使机床上刀具与工件之间原来相对正确的位置产生了变化,从而造成了加工误差。加工中的热变形是不可避免的,只能靠补偿的办法去尽量减小,目前生产中往往是通过人为偏置加工原点来对热变形进行补偿,存在很大的质量风险。受热变形影响最大的是加工与主轴方向垂直的一些零件结构,如零件的腹板、筋高等,由于航空结构件的壁薄、公差较小,极易造成零件的这些部位尺寸超差。

(3) 数控机床静态特性。

数控机床的静态特性主要表征了数控机床在静止或准静止状态下的静态精度,如工作台面的平面度、导轨的直线度、重复定位精度等,它综合反映了机床的机械坐标系的几何精度及进行切削运动的主轴部件在机械坐标系中的位置和定位精度。机床静态误差通常的表现就是零件在相同部位出现几乎等量的尺寸误差,且所有在该机床加工的零件都会出现类似的尺寸误差,导致成批次的质量问题。

(4) 数控机床动态特性。

数控机床的动态特性是在加工过程中机床对程序指令的响应特性和运动过程中表现出来的动力学特性。由于加工中各进给轴随零件形状的不同而瞬时启停或

^{*} “高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项引进技术——航空大型复杂结构件高效加工工艺应用试验研究(2010ZX04016-011)项目资助。

改变速度,就需要伺服系统具有良好的动态特性,能够快速跟随指令信号驱动执行机构产生相应运动。跟随误差 e 是动态特性误差的主导因素,是指伺服系统发出的指令位置与系统输出的实际位置之间的稳态误差,其计算公式为:

$$e = \frac{v}{k_s}, \quad (1)$$

式中, k_s 表示伺服系统速度增益,它是数控机床伺服系统特性的一个重要参数,反映了伺服系统速度变化快慢的程度。从式(1)可看出, k_s 越大, e 越小,但 k_s 过大,会使系统稳定性变差。数控机床是通过多轴联动来合成刀具运动轨迹的,各个坐标轴自身存在的跟随误差,会反映到合成的运动轨迹上,形成轮廓误差,在实际加工中出现的零件轮廓误差和光洁度问题,往往与机床的动态特性有关^[2-3]。

1.2 基于数控机床主要特性造成零件质量问题的分析思路

大量实践经验证明,工艺问题和机床问题占数控生产现场问题的绝大部分,在解决这些问题的过程中逐渐摸索出了分析问题的思路,即通过问题的现象,对导致该现象的常见原因进行一一排除,找出最可能的原因并进行假设,通过理论计算、试验、仿真等多种方法证明假设,复现问题,证明分析结论,并进一步找到解决问题的方法。对于工艺问题而言,由于现在具有比较先进的仿真软件,对于程序编制不合理、编制错误等问题比较容易分析和判断,而切削参数、零件变形等是目前工艺问题较为突出的影响因素,因此可以把分析重点放在这些因素上。对于机床问题而言,通过前文对机床特性的总结,可以发现各个特性对于加工的影响是不同的,也具有较为鲜明的特点,因此,在分析问题时应紧紧抓住这些特点,锁定某一个特性,展开重点分析。

当出现质量问题时,先检查是否是工艺编程、人为因素问题(这类问题通常较易分析),再考虑是否机床问题。通过对大量案例总结发现,机床不同特性造成的加工问题的表现形式具有相应的特点,如加工中的不稳定问题(振动、噪声、弹刀、拉刀等)常和机床的动刚度特性有关;零件的腹板尺寸超差往往是由机床的热特性和静态特性不稳定导致;零件的轮廓、型面误差等问题,往往需要从机床的静、动态特性上开展分析。因此,在分析问题时可结合问题现象,从机床主要特性入手逐步排除,图1为现场问题的一般分析流程图。

综上所述,将现场问题分为工艺问题、机床问题、其他问题3大类,采取排除法按照由易到难的顺序进行分析,由于机床问题常常较为复杂,常常放在最后,在分析时也要紧紧抓住机床的特性对应的常见问题现象,逐步

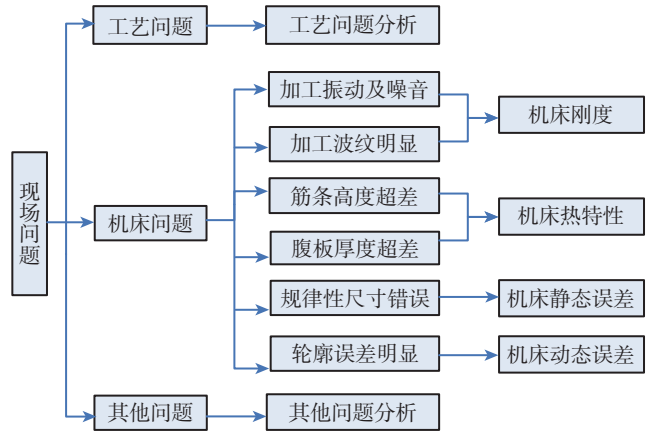


图1 现场问题分析流程图

Fig.1 Processing diagram of machining failure analysis

挖掘,通过试验、仿真等多种形式证明分析结论,从而更好地对问题展开分析。

2 基于数控机床主要特性解决现场质量问题的方法实践

2.1 数控机床静态误差造成的零件质量问题案例

某机床在加工某零件时发现零件缘条表面质量较好,厚度尺寸正常,但缘条内外形测量超差,凸台1与2之间,凸台3与4之间外形超小,实测超出公差范围0.05~0.25mm;凸台2与3之间测量结果偏上差;内形测量情况则与外形测量情况正好相反(图2)。

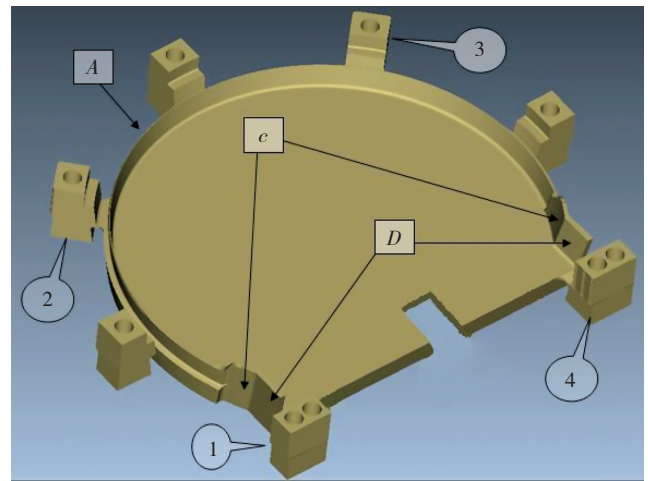


图2 零件测量及超差部位示意图

Fig.2 Illustration of measurements and machining failure

2.1.1 原因分析

按照前述思路,首先排查工艺问题,通过对加工程序、刀具、工艺孔精度、装夹精度等进行分析后未发现明显问题,监控加工过程也可排除人为因素,因此,将分析重点放到机床上。检查机床的静态精度后发现,机床A、

B 轴转心距与机床理论转心距(350.60mm)存在差异,从 A 摆角方向检测为350.16mm;从 B 摆角方向检测为350.80mm。为验证转心距误差对加工的影响,使用仿真软件模拟故障现象。在Vericut软件中将仿真机床模型的 A 、 B 摆角转心距按照实测情况设置,如图3所示,仿真结果如图4所示,红色部位上的测量点基本上都超差或临近超差,与现场加工情况吻合。可见 A 、 B 摆角转心距对零件的加工造成了直接影响。后续经过检查机床传动机构发现,机床 B 轴电机连接处有2根连接销断裂,造成了转心距的误差。

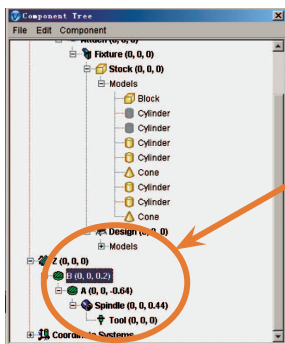


图3 在仿真软件中按实际情况设置机床转心距值
Fig.3 Setting machine tool rotary center distance value in simulation software according to real statistics

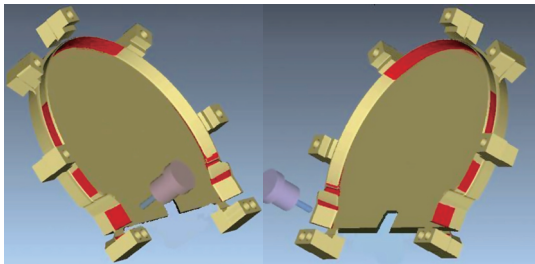


图4 仿真结果超差部位示意图
Fig.4 Simulation results of machining failure

2.1.2 问题解决办法

通过维修部门的维修更换连接销,对机床摆角精度进行了调整,试切后发现问题得到了解决,零件加工合格。

2.2 数控机床动态特性造成的零件质量问题案例

某机床在加工某零件腹板孔时,名义尺寸为18.5mm(孔径公差: +0.21~0mm)的孔径实际加工出的尺寸为18.75~18.76mm,孔径超大,如图5所示。

2.2.1 原因分析

排除工艺及人为因素后,检查机床静态精度均符合要求,为了排除该问题是一次偶发故障的可能性,进行了试切,使用性能较好的铝板及刀具,在现场严密全程监控下(确保现场操作),运行相同程序(转速 $S=9000\text{r/min}$,进给 $F=2200\text{mm/min}$,径向切深 $a_e=0.5\text{mm}$,

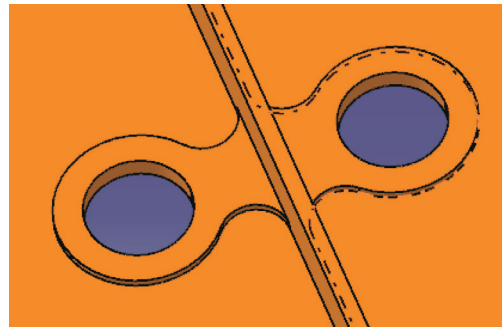


图5 零件孔径超大

Fig.5 Results of larger diameters of machined holes

轴向切深 $a_p=2\text{mm}$),铣孔4个,结果测出孔径尺寸为18.755~18.765mm,均超大,可见该问题并非一次偶发故障。现场反映近一年来该机床铣孔普遍存在超大趋势,铣大孔(孔径大于50mm)误差较小,铣小孔(孔径小于20mm)误差则较大,通过降低进给速度可以缓解这一问题。可见,该问题是一个系统性的问题,孔径为典型的轮廓尺寸,从机床特性的角度看,与轮廓精度相关性最大的即机床的动态特性,因此,从机床的动态特性上展开了详细分析。

从问题现象上看,进给速度对孔轮廓尺寸精度有一定影响,为此,先从理论上进行分析,如图6所示插补圆弧可表示为:

$$R = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (2)$$

两联动轴 X 、 Y 的速度分别为 $v_x=vsin\alpha$, $v_y=v\cos\alpha$,合成的轮廓加工速度为:

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} \quad (3)$$

从伺服进给系统特性可知,当两轴进给系统的增益相等时,圆运动误差最小。在上述条件下,可求圆运动误差。

如图6所示,指令位置为 A ,实际位置为 A' ,三角形 $\triangle OAA'$ 是直角三角形,则:

$$\overline{AA'} = \sqrt{e_x^2 + e_y^2} \quad (4)$$

式中, e_x 、 e_y 分别为 X 轴、 Y 轴方向上的跟随误差,因为 $e = \frac{v}{k_s}$,由几何关系可得:

$$R^2 - R'^2 = \overline{AA'}^2 = \left(\frac{v \cos \alpha}{k_s}\right)^2 + \left(\frac{v \sin \alpha}{k_s}\right)^2 = \left(\frac{v}{k_s}\right)^2 \quad (5)$$

因 $\Delta R = R - R'$, $R' + R \approx 2R$,可得:

$$\Delta R = \frac{v^2}{2Rk_s^2} \quad (6)$$

由式(6)可知,增大系统增益 k_s ,减小切削速度 v ,可以减小圆运动半径的误差 ΔR 。在 v 、 k_s 一定的情况下,圆运动的半径 R 越大时,则 ΔR 越小, R 越小时则 ΔR 越大。这一结论印证了现场通过降低速度能够改善孔

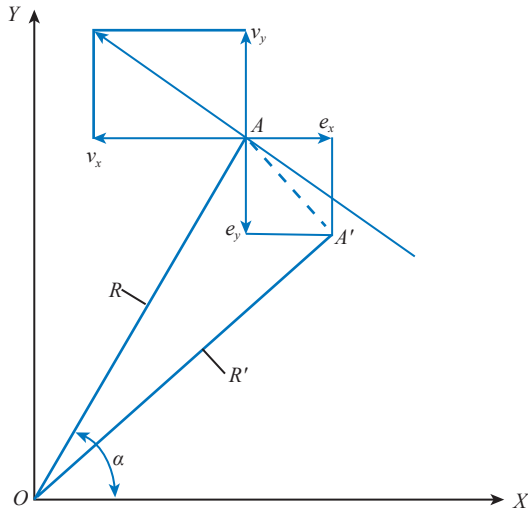


图6 圆弧轮廓插补示意图

Fig.6 Explanation of arc contour interpolation

径尺寸的现象^[2,4-7]。

为了在生产实践中验证上述结论,通过试加工做了对比试验,在其他条件相同的情况下,分别调整孔径大小及进给速度,测量实际孔径尺寸如表 1 所示。

表1 对比试切结果统计表

孔径理论尺寸	67.000	30.000	26.000	22.000	18.57
$F=2200\text{mm/min}$ 时 孔径实测值 (超大值)	67.020 (0.020)	30.145 (0.145)	26.190 (0.190)	22.190 (0.190)	18.765 (0.195)
$F=440\text{mm/min}$ 时 孔径实测值 (超大值)	67.02 (0.020)	30.035 (0.035)	26.045 (0.045)	22.045 (0.045)	18.640 (0.070)

可以发现,孔径越大,加工误差受速度变化的影响越小,孔径越小,则加工误差受速度影响越大。

为了进一步验证这一结论,采取将速度设为恒定值调整孔径和将孔径设为恒定值调整速度这两种方式进行了两次试切。

(1) 将进给速度设置为 $F=1800\text{mm/min}$, 不同孔径对应的超差值如图 7 所示。

由图 7 可以明显看出: 恒定进给速度条件下, 超差值随孔径尺寸的减小而不断增大。

(2) 调整不同的进给速度加工直径为 $\phi 10$ 的孔, 得到如图 8 所示的结果。

由图 8 可以明显看出: 加工相同直径的孔, 超差值随进给速度的增加而不断增大。

2.2.2 问题解决办法

通过理论分析及试切验证可发现,通过降速和提高速度放大倍数 k_s 能够减小误差,在后续的生产实践中,优化了加工程序的进给速度,从而加工出了合格的孔径,满足了产品质量要求。

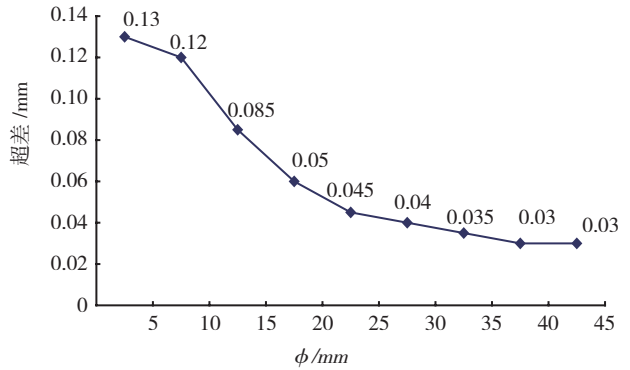


图7 恒定速度下的孔径超差值

Fig.7 Machining errors of different holes diameters at constant cutting speed

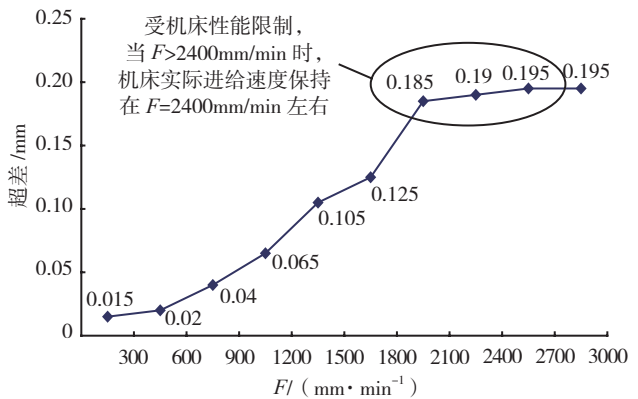


图8 不同进给速度加工 $\phi 10$ 孔的超差值

Fig.8 Machining errors with diameter of 10 mm at different cutting speed

3 结论

通过典型案例可以看出,按照本文所述的分析方法,能较快的对一些涉及机床特性的现场问题进行排查,解决现场实际问题。通过对数控机床的特性进行的研究及生产实践的验证,我们发现,在对一些较为复杂的问题进行分析时,应该首先从现象出发,逐步展开,分析其是否由机床的某一特性造成,只要找准突破口,问题就不难解决,这对分析问题来说也是一条捷径。当然,对加工造成影响的机床特性还有其他一些方面,仍需要开展更多深入研究,才能更好地解决生产实际问题。

参考文献

[1] 宋德文. 如何提高机床结构的动刚度. 安徽机电学院学报, 2001, 16(3):62-65.
 [2] 白恩远, 王俊元, 孙爱国. 现代数控机床伺服及检测技术(第

(下转第 70 页)

3.3 机器体系的构建

李耀东等人^[15]长期开展综合集成研讨厅的具体化与实用化的工作,经过多年的探索和实践,已经从软硬件和体系结构上实现了综合集成研讨平台。结合本课题实际,采用分布关联式的大系统体系结构,以多媒体技术、信息融合技术、综合集成技术、网络技术、数据库、评价方法模型库、知识库为基础,以综合集成的思想和方法为指导来进行系统设计,并且要有很好的可扩展性、可维护性、智能性、结构健壮性及通用性。

从具体技术角度上课题组最终搭建的机器体系主要包括:在微机环境下建立 Windows 网络操作系统;软件开发以 Visual C 和 C++ 语言为主,数据库采用 Oracle 开发;利用 PowerDesigner 工具构建后台数据库;使用可视化开发方法进行系统菜单设计和操作界面设计,实现人机交互^[16];以 Visual Studio 2008 为开发平台,编程实现各模块功能;使用面向对象软件开发方法中的 MVC 三层架构将系统的界面层、业务逻辑层、数据层分开,降低系统耦合度,提高代码可移植性和系统的可维护性;采用软件重用和组件连接的方法,将系统最终用户可能用到的一些常用工具集成到系统中,提高系统的可用性;最后得到系统初始版本。

4 结束语

本文在对 AVEEPS 问题分析的基础上,提出了 AVEEPS 综合集成研讨厅,强调螺旋式推进和其质变过程,研究的最终目的是为了解决 AVEEPS 问题。AVEEPS 综合集成研讨厅的提出对宇航元器件是否满足特定的工程应用问题给出科学、客观的评价结果起到了一定的帮助作用,实践也证明将综合集成研讨厅应用于 AVEEPS 工作具有很强的理论价值和应用价值。

参考文献

[1] 于景元. 钱学森综合集成体系. 西安交通大学学报, 2006, 26(6):40-47.
 [2] 于景元, 周晓纪. 从综合集成思想到综合集成实践. 管理学报, 2005, 2(1):4-10.
 [3] 于景元, 刘毅, 马昌超. 关于复杂性研究. 系统仿真学报, 2002, 14(11):1417-1424.
 [4] 王慧敏, 唐润. 基于综合集成研讨厅的流域初始水权分配群决策研究. 中国人口·资源与环境, 2009, 19(4): 42-45.
 [5] 徐玖平, 卢毅. 地震灾害系统分析与评估的综合集成模式. 系统工程理论与实践, 2009, 29(11):1-18.
 [6] 周剑, 朱耀琴, 唐卫清. 基于综合集成研讨厅的武器装备系统综合. 系统工程理论与实践, 2010, 30(8):1492-1499.
 [7] 李元左. 关于空间军事系统综合集成研讨厅体系的研究. 中国软科学, 2000(3):12-14.
 [8] 魏法杰, 周艳. 综合集成研讨厅在条件保障项目评价中的应

用研究. 管理学报, 2004, 1(3):363-368.

[9] Yu J, Zhou X, Feng S. Man-machine collaborated knowledge creation in HWMSE. Journal of Systems Science and Systems Engineering, 2005, 14(4):462-475
 [10] 于景元, 周晓纪. 从定性到定量综合集成方法的实现和应用. 系统工程理论与实践, 2002, 22(10):26-32.
 [11] 苗东升. 系统科学精要. 北京: 中国人民大学出版社, 1998.
 [12] 于景元, 周晓纪. 综合集成方法与总体设计部. 复杂系统与复杂性科学, 2004, 1(1): 20-26.
 [13] 顾基发. 意见综合—怎样达成共识. 综合集成与复杂系统专辑, 2001, 16(5):340-348.
 [14] 熊才权, 李德华. 综合集成研讨厅共识达成模型及其实现. 计算机集成制造系统, 2008, 14(10):1913-1918.
 [15] Li Y, Dai R. Framework for a man-computer cooperative information retrieval system for on-line discussion systems. International Journal of Computer Processing of Languages, 2007, 17(4):273-286.
 [16] 戴超凡, 王明利. 研讨信息交互式可视化平台设计与实现. 计算机工程, 2010, 36(14):238-240.

(责编 亦非)

(上接第 62 页)

通过 Catia 中 DMU 运动机构的分析, 该机构能够在上面的空间中进行姿态调节, 这对理论设计进行了很好的验证。

4 结论

结论表明, 该设计能够在一定的空间范围内进行任意姿态的调节, 即能够在一定空间区域内对各处曲率不同的薄壁零件进行装夹, 从而为此类零件的机加工难装夹问题的解决提供了一种可行方案。

参考文献

[1] 淮妮, 张小粉, 白瑀. 薄板类零件夹具的设计. 价值工程, 2012(2):191-201.
 [2] 韩志仁, 戴良景, 张凌云. 飞机大型蒙皮和壁板制造技术现状综述. 航空制造技术, 2009(4):64-66.
 [3] 欧阳洁, 聂玉峰, 车刚明等. 数值分析. 北京: 高等教育出版社, 2009.

(责编 亦非)

(上接第 66 页)

2 版). 北京: 国防工业出版社, 2005.
 [3] 陈思羽, 龙泽明. 数控机床系统增益对进给伺服系统的影响. 机械工程师, 2008(1):45-46.
 [4] 张萌. 数控机床运动误差检测与分析[D]. 洛阳: 河南科技大学, 2008.
 [5] 孙建仁. 数控机床进给伺服系统特性影响加工精度的分析. 兰州理工大学学报, 2004, 30(3):45-47.
 [6] 孙兴伟, 董蔚, 王可, 等. 数控机床零件轮廓加工精度的分析与控制. 制造技术与机床, 2010(1):61-63.
 [7] 朱年军, 王可, 崔海. 数控伺服系统跟随及轮廓误差分析. 机床与液压, 2006(10):20-21, 23.

(责编 深蓝)