

空间曲面电火花线切割 CAD/CAM 系统*

任福君^{1,2} 姜永成^{1,2}

(1. 哈尔滨理工大学机械动力工程学院 哈尔滨 150080;
2. 佳木斯大学机械工程学院 佳木斯 154007)

摘要: 为解决高速走丝电火花线切割机床加工空间曲面的难题, 实现大锥度空间复杂曲面零件的加工, 以空间曲面数学模型和数控模型为基础, 开发了一种计算机辅助设计/计算机辅助制造(Computer aided design/computer aided manufacturing, CAD/CAM)系统。其硬件系统以研制的数控转摆摆工作台为核心装置, 并与现有高速走丝电火花线切割机床结合, 组成空间曲面线切割加工系统。其软件系统可以根据上下导线的参数方程进行分析计算, 建立空间曲面的三维模型, 自动生成 NC 加工代码, 进行加工仿真和空间曲面零件的加工。利用本系统进行典型空间复杂曲面零件的加工试验, 结果表明加工结果与仿真结果基本相似。此外, 还分析数控模型以及回摆间隙角对加工误差的影响。这些工作为解决高速走丝电火花线切割加工空间曲面的难题打下基础。

关键词: 电火花线切割 计算机辅助设计/计算机辅助制造 空间曲面 数学模型 计算机仿真
中图分类号: TG156

0 前言

空间曲面零件是在很多领域得到广泛应用的关键零部件, 其设计和制造的难度都很大。这对生产加工设备提出了更高的要求, 国外慢速走丝电火花线切割机床加工空间曲面是利用特制的锥度切割装置实现的, 在国产高速走丝电火花线切割机床上并不适用^[1]。因此迫切要求开发能加工空间曲面的专用高速走丝电火花线切割计算机辅助设计/计算机辅助制造系统^[2]。目前在国内高速走丝电火花线切割机床上利用附加装置可以实现锥度切割和部分空间曲面零件的加工^[1,3]。要加工大锥度复杂空间曲面零件, 还需要对附加装置做深入研究。哈尔滨工业大学研制的两轴数控转摆工作台, 可以带动被加工零件绕一个定轴转动的同时又绕另一个轴摆动, 可以在电火花线切割机床上加工出一些形状复杂、上下表面形状异形空间曲面零件^[1]。但利用这些装置只能实现两轴数控联动, 只能加工部分空间复杂曲面零件, 要实现更大范围内的空间曲面零件的线切割加工目标, 还需开发以数控转摆摆工作台为主要核心的空间曲面电火花线切割加工 CAD/CAM 系统, 以实现加工出所有三导线曲面及其他大部分空间曲面零件的目的^[1,4-5]。

1 试验装置

1.1 配有数控转摆摆工作台的线切割机床

极坐标加工系统由一台快走丝数控电火花线切割机床和数控转摆摆工作台附加装置组成。复杂直纹曲面电火花线切割加工的运动坐标如图 1 所示。图 1 中, $\pm x$ 、 $\pm y$ 表示电极丝沿 x 、 y 两轴正反两个方向的切割运动; $+x$ 、 $+y$ 表示电极丝沿 x 、 y 轴正向的运动; $-x$ 、 $-y$ 表示电极丝沿 x 、 y 轴反向的切割运动; $\pm A$ 、 $\pm B$ 、 $\pm C$ 分别表示电极丝绕 x 、 y 、 z 轴顺时针和逆时针两个方向的转动; $+A$ 、 $+B$ 、 $+C$ 表示电极丝绕 x 、 y 、 z 轴顺时针方向的转动; $-A$ 、 $-B$ 、 $-C$ 表示电极丝绕 x 、 y 、 z 轴逆时针方向的转动^[1,3]。

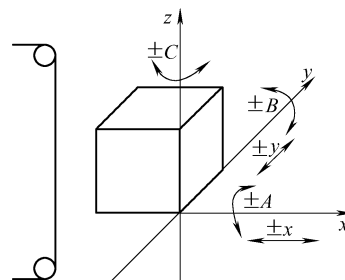


图 1 复杂直纹曲面电火花线切割加工的运动坐标

根据电火花线切割加工原理, 任何复杂直纹曲面的型面都可以通过电极丝的复合切割运动加工出来, 而切割加工复杂直纹曲面的复合切割运动形式可以通过上述电火花线切割加工运动参数表达出来, 并可以在配备了数控转摆摆工作台的高速走丝电火花线切割机床上加工出所需型面的工件。图 2 为配备了数控转摆摆工作台的五轴联动电火花线切割机床结构示意图。本加工系统共有五个联动轴(x 、 y 、

* 哈尔滨市重大科技攻关资助项目(2005AA1CG038)。20060912 收到初稿, 20070208 收到修改稿

A、B、C)，其中，A、B、C 分别为绕 x、y、z 轴的旋转轴。对应于系统中，x、y 轴是原有线切割机床的二维坐标平面轴，A、B、C 为转摆摆工作台的三个转轴^[1, 5]。

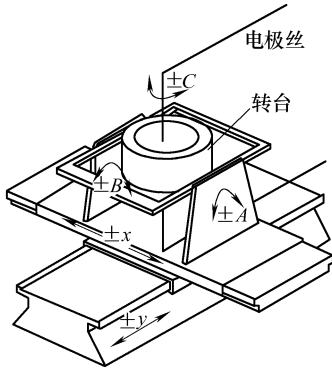


图2 配备了数控转摆摆工作台的五轴联动电火花线切割机床结构示意图

在进行空间曲面零部件加工时，一般将工件固定在转台上，其轴心为绕 z 轴旋转的 C 轴，加工过程中转台共旋转 360°，来实现分度回转等加工中经常出现的运动，并与 x、y 两轴的平动以及分别绕 x、y 旋转的 A、B 轴联动来加工以三导线曲面为主的多种复杂直纹曲面零件。

1.2 加工系统的硬件组成

图3为加工系统硬件框图。电火花线切割数控系统与通用的数控系统不同，它的主要任务是对脉冲电源系统和伺服控制系统进行有效的控制，达到对工件高效稳定加工的目的。个人机(Personal computer, PC)对电火花线切割数控系统来说是一个很好的选择，利用 PC 机本身的开放式结构就可以很容易地完成电火花线切割数控系统的大部分功能。本文采用了基于 PC 机的开放式体系结构和模块化设计，使系统获得了很好的加工稳定性、快速的实时响应性和很强的扩展性^[1]。

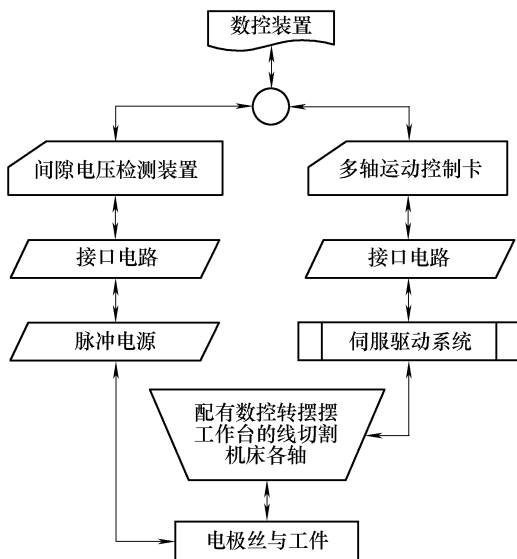


图3 加工系统硬件框图

2 空间复杂曲面加工用 CAD/CAM

加工空间曲面的形状数据以及加工仿真由 CAD 软件完成，CAM 软件则利用已通过仿真确定的合理有效的数据来计算加工点的轨迹，并生成可以被下位机识别的加工代码。

2.1 CAD 软件

作者基于 Windows 操作系统利用 Visual C++ 6.0 和 OpenGL 三维图形开发包开发了专用的空间曲面电火花线切割 CAD/CAM 软件^[1]，其中的 CAD 模块实现了空间复杂曲面的实体建模和加工仿真。

2.1.1 空间曲面电火花线切割加工数学模型

$\sum[(\pm x) + (\pm y) + (\pm A) + (\pm B) + (\pm C)]$ 是五轴联动加工系统的一般运动形式，而其他加工系统的运动形式都可以通过上式中参数的变换得出来。图4为电火花线切割五轴联动加工系统坐标系简图^[1]。其中 ϕ_0 为工件初始旋转角； ω 为工件旋转角速度； ρ 为上导线极坐标函数时， $\rho = \rho_1(\phi)$ ； ρ 为下导线极坐标函数时， $\rho = \rho_2(\phi)$ ； h 为上下导线距离， $h \neq 0$ ； h_0 为 t 时刻下导线与 $O_t x_t y_t$ 平面的距离。

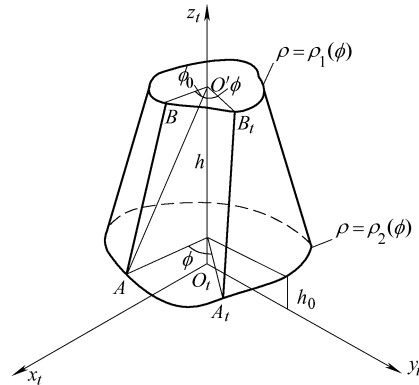


图4 电火花线切割五轴联动加工系统坐标系简图

通过建立动直线 $A_t B_t$ 运动轨迹方程得到的一般数学模型为：

A_t 点坐标为

$$\begin{cases} x'_A = \rho_2(\omega t) \cos \omega t \\ y'_A = \rho_2(\omega t) \sin \omega t \\ z'_A = h_0 \end{cases} \quad (1)$$

B_t 点的坐标为

$$\begin{cases} x'_B = \rho_1(\omega t + \phi_0) \cos(\omega t + \phi_0) \\ y'_B = \rho_1(\omega t + \phi_0) \sin(\omega t + \phi_0) \\ z'_B = h + h_0 \end{cases} \quad (2)$$

电极丝 $A_t B_t$ 在 t 时刻在 $O_t x_t y_t z_t$ 坐标系中的直纹面方程为

$$\begin{cases} x = (x'_B - x'_A)S \\ y = (y'_B - y'_A)S \\ z = hS \end{cases} \quad (3)$$

式(3)就是动直线扫过的直纹面的参变量方程,也就是五轴联动加工系统的普遍通用数学模型,其中 S 为参变量^[1]。

2.1.2 仿真模型

以式(3)为数学模型进行仿真编程获得的五轴联动加工系统的典型零件加工方式的仿真结果如图 5 所示^[1,3]。

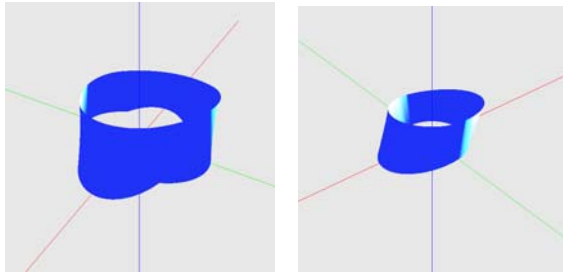


图 5 仿真结果图

2.2 CAM 软件

2.2.1 空间曲面电火花线切割加工数控模型

对于任意给定二条闭合上导线 $\rho = \rho_1(\phi)$, 下导线 $\rho = \rho_2(\phi)$ 及电极丝 l 构成的三导线转摆摆直纹面五轴联动加工系统, 建立的对下摆角 θ_1 、上摆角 θ_2 、纵向单向进给 m 的数控数学模型见式(4)~(6)。

$$\theta_2 = \arctan\left(\frac{y_0 \cos \phi - x_0 \sin \phi}{h}\right) \quad (4)$$

$$\theta_1 = \arctan\left(-\frac{y_0 \sin \phi + x_0 \cos \phi}{\sqrt{h^2 + x_0^2 \sin^2 \phi + y_0^2 \cos^2 \phi - x_0 y_0 \sin 2\phi}}\right) \quad (5)$$

$$m = l \cos \theta_1 = \rho_2(\phi) \cos \theta_1 = \rho_2(\phi) \times \sqrt{\frac{h^2 + \rho_1^2(\phi + \phi_0) \sin^2 \phi_0}{h^2 + \rho_1^2(\phi + \phi_0) + \rho_2^2(\phi) - 2\rho_1(\phi + \phi_0)\rho_2(\phi) \cos \phi_0}} \quad (6)$$

本文主要是对下摆角 θ_1 、上摆角 θ_2 、纵向单向进给 m 利用同一参数 ϕ (z 轴回转角度)实施数控^[1]。

2.2.2 NC 指令的计算

在控制系统体系结构中, 作为下位机的多轴运动控制卡(Programmable multi-axis controller, PMAC), 本身就是一台计算机, 它特有的很丰富的编程语言对大多数的 ISO 指令都提供支持。本文采用的是运动命令的方式编程。在这种方式下, 运动命令本身是由一个单字母轴定义符和后面跟随的一位或几位数值(常数或表达式)组成的。当执行一行时, 在同

一行指定的所有轴将协调一致地同时运动, 串联的行将顺序地执行。例如: X10 Y15A5B7C2 表明 x 、 y 、 A 、 B 、 C 各轴将按照各自的数值协调一致运动, 所以按照这一规则, 把数控模型中每一次转角的变化转化成各个轴的变化量即可完成 NC 指令的计算^[6-7]。

2.2.3 上下位机的通信

PMAC 运动控制器是一个拥有高性能伺服运动的控制器, 它提供运动控制、离散控制、内务处理、同主机的交互等数控的基本功能。PMAC 内部使用了一片 Motorola DSP56001 数字信号处理芯片, 它的速度、分辨率和带宽等指标远优于一般的控制器。PMAC 作为一个功能强大的运动控制器, 其提供了两种上下位机的通信方式, 用户可以采用动态链接库(PCOMM32)方式或采取 ActiveX 控件 PtalkDT 形式与 PMAC 通信。本文采用了以动态链接库的方式与 PMAC 进行通信。PMAC.DLL 拥有超过 1 000 个函数来完成各种控制功能, 这些函数都被封装在 runtime.cpp 内, 与上位机的联系由函数 RuntimeLink()来完成。图 6 为上下位机工作框图。

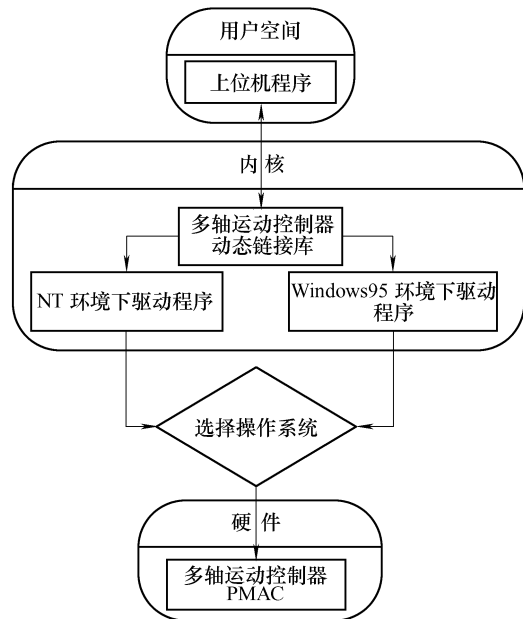


图 6 上下位机工作框图

2.2.4 CAD/CAM 系统的软件结构

在电火花线切割加工中, 系统的所有硬件设备, 包括伺服系统、脉冲电源控制及间隙电压检测装置、机床继电器等都在系统软件的控制下运行。系统软件是一个多任务系统, 每个任务负责控制一个硬件设备, 或者完成一组特定的操作, 这些任务的协调运行使电火花线切割加工过程得以实现。CAD/CAM 系统软件结构如图 7 所示^[1]。

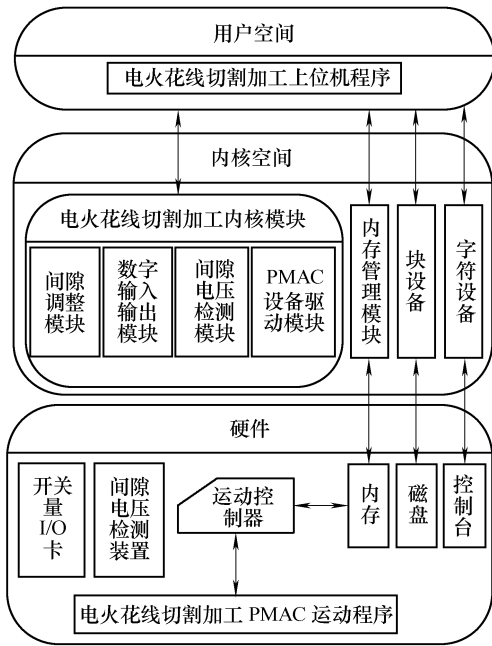


图7 CAD/CAM 系统软件结构

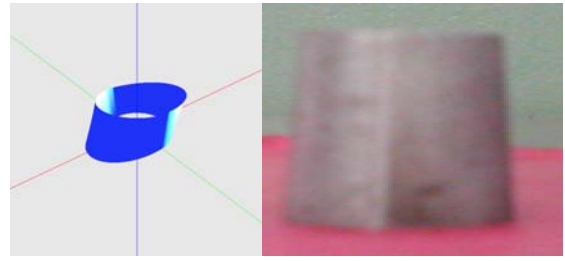


图8 仿真结果与加工结果的对比

3 空间曲面零件加工试验

3.1 加工方法及加工结果

加工试验的目的是通过空间曲面零件的加工试验来验证新开发的 CAD/CAM 软件的可靠性，以及数学模型和数控模型的正确性和有效性。首先通过 CAD 软件输入上下导线的参数方程，然后 CAD 软件自动画出三维图形并进行加工仿真。在确认获得满意结果后，通过 CAM 软件的后置处理模块生成下位机需要的加工代码，并下载到下位机中，由下位机逐行解释运行并命令执行元件完成加工。由图 5 可以看出，大多数的空间曲面零件的上下导线曲线不同而且彼此错位，显然，对于形状如此复杂的零件，采用其他加工方法很难加工，只能采用五轴联动电火花线切割加工。利用下表的试验加工参数进行实际的空间曲面零件加工，工件材料为 45 钢。仿真结果与加工结果的对比如图 8 所示。

表 试验加工参数

脉冲宽度 $t_f/\mu\text{s}$	8
脉冲间隔 $t_0/\mu\text{s}$	48
峰值电流 I_p/A	12
工件厚度 δ/mm	40
切削深度 $a_p/\mu\text{m}$	10
材料	钨
电极丝直径 d/mm	0.18
电极丝速度 $v_s/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	5, 10.3
电极丝张紧力 F_w/N	8.0

3.2 几个影响加工精度的因素

3.2.1 转摆摆工作台回摆及丝杠间隙对加工精度的影响

如图 8 所示，在加工中，由空间曲面零件的造型特征决定了数控转摆摆工作台必须经常回摆， x 、 y 两轴也要经常换向运动，才能实现加工空间曲面的目的。由于工作台以及丝杠的机械结构导致了在回摆及往复运动时有一定的回程间隙，这样会造成工件回摆角度产生一定偏差，使得实际加工得到的摆角要比期望的摆角小，导致试验加工得到的零件尺寸比仿真结果整体尺寸要大。经过实际测定证实了推理。要想改善加工状况不仅要提高工作台的制造精度，选用高精度丝杠更要从原理上提出根本的解决办法。

3.2.2 数控模型对加工精度的影响

如图 4 所示，经过时间 t 工件旋转 $\phi = \omega t$ 度，上导线 $\rho = \rho_1(\phi)$ ，下导线 $\rho = \rho_2(\phi)$ 分别得到一个极径值，通过在时间 t 前后上下导线各自极径的变化得到了 x 、 y 、 A 、 B 、 C 五轴各自的运动量，这样就确定了电极丝在 t 时刻的另一空间位置。两个位置间用直线连接，这条直线就是工件的实际行走路径。因此，数控模型决定了电极丝按照分度直线拟合运动而没有沿着上下导线的参数方程行走，造成了原理误差，实际加工中产生了微小加工波纹，尤其在上下导线由几段参数方程组成时，两段的交点处很容易造成工件形状的失真。

3.3 转摆摆工作台回摆产生的误差分析

除了由于电极丝的高速运转以及放电时对电极丝的形态产生影响外，如图 9 所示，转摆摆工作台在进行换向摆动时，电极丝回摆前与回摆后产生回摆间隙角 θ ，在这个角度内电极丝与工件没有形成放电，这必然会导致加工工件的尺寸误差。误差的大小与转摆摆工作台回摆精度以及放电参数有关。另外，由于加工中工件在不断的摆动，导致电极丝与工件的结合面大小一直在变化，因此，空间曲面零件加工是一个变尺寸的加工过程，而尺寸的变化必然会导致加工状态的变化，同样会导致被加工工件产生误差。

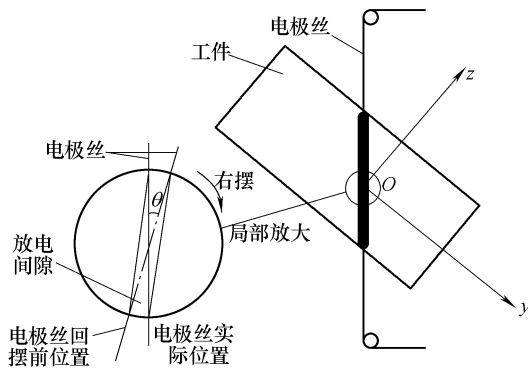


图 9 工作台回摆造成的加工误差

4 结论

(1) 提出了一种利用特制的数控转摆摆工作台与现有高速走丝电火花线切割机组合来加工空间复杂曲面的 CAD/CAM 控制系统的设计方法。

(2) 开发了五轴联动电火花线切割 CAD/CAM 软件, 研制了数控转摆摆工作台, 并进行了误差分析。

(3) 进行了空间曲面零件的加工试验, 得到的加工结果与仿真结果基本相似, 验证了 CAD/CAM 软件有很好的加工稳定性, 快速的实时响应性和很强的扩展性。验证了所建数学模型和数控模型的正确性以及数控转摆摆工作台设计的合理性。

(4) 分析出影响加工精度的主要原因有以下几点: 加工中, 由于工作台的回摆、丝杠的回程间隙导致了加工精度的降低; 电极丝由于工件摆动造成的形变, 也影响了加工精度; 由于工作台的摆动导致切割过程为变尺寸加工, 也对加工误差产生了不良影响。

参 考 文 献

- [1] 任福君. 空间曲面电火花线切割运动学及其应用[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2004.
- [2] 韩福柱, 程刚, 陈希明, 等. 电火花线切割机加工自由曲面的 CAD/CAM 软件[J]. 清华大学学报, 2005, 45(11): 1 472-1 475.
- [3] 任福君, 刘晋春, 赵万生, 等. 电火花线切割极坐标加工系统运动规律分析[J]. 制造技术与机床, 2000(2): 50-52.
- [4] 赵万生, 李论, 郭艳玲. 电火花线切割 CAD/CAM 集成系统的研究[J]. 电加工与模具, 2001(6): 9-12.
- [5] 任福君, 刘晋春, 赵万生, 等. 复杂曲面电火花线切割多轴加工计算机仿真研究[J]. 机械工程学报, 2000, 36(7): 78-85.

[6] 王旭亮, 谷安, 刘乐泉. 低速走丝电火花线切割机导丝嘴位置算法研究[J]. 电加工与模具, 2005(4): 13-15.

[7] 翟洪军, 任艳芳, 刘正坝, 等. 四轴 WEDM 机床运动分析及其在 NC 仿真中的应用[J]. 南京航空航天大学学报, 2005, 37(3): 371-375.

CAD/CAM SYSTEM FOR SPATIAL CURVED SURFACE IN WIRE CUT ELECTRONIC DISCHARGE MACHINING

REN Fujun^{1,2} JIANG Yongcheng^{1,2}

(1. College of Mechanical & Power Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080;

2. College of Mechanical Engineering, Jiamusi University, Jiamusi 154007)

Abstract: In order to solve the difficult problems of machining spatial curved surface parts in wire cut electronic discharge machining(WEDM), to get high tapered spatial complicated curved surface parts, an CAD/CAM system based on the mathematical models and numerical control(NC) models of spatial surface are developed. The NC turning and two sways table is the key part of system hardware, which can be composed of the spatial surface machining system with the normal WEDM with high speed (WEDM-HS). The system software can establish the 3D model by analyzing and calculating the equation of the upper and lower leads, and get the NC machining code automatically according to the model, then test it by machining simulation, and machining. Machining experiment of machining typical spatial complicated curved surface parts have done and the machining samples are like the simulation ones basically. Besides, the influence of the machining error by the NC model and the clearance angle of the sway back are analyzed. All these works provide an effective approach for us to resolve the problems of cutting spatial curved surface parts by WEDM-HS.

Key words: Wire cut electronic discharge machining (WEDM) CAD/CAM Spatial curved surface Mathematical model Computer simulation

作者简介: 任福君, 男, 1961 年出生, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为特种加工、智能机械和科学传播。主持国家和省级科研项目 16 项, 发表论文 70 余篇, 出版专著和教材 8 部, 获国家专利 15 项、省级以上科技进步奖 3 项。

E-mail: hljrenfujun@126.com; renfujun@tsinghua.org.cn