

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.04.017

数控车削圆锥曲线牙型螺纹宏程序通用模版编制

李雅昔, 陈其

(商洛职业技术学院, 陕西 商洛 726000)

摘 要:数控车削双曲线、椭圆与抛物线等圆锥曲线牙型螺纹时,通常采用宏程序完成编程与加工。对此类螺纹的宏程序编制多针对某一类牙型进行分析,缺少一种三类牙型(双曲线、椭圆与抛物线)通用的编程模式,当牙型发生转变后,需重新建模编程。以 HNC-21T 数控系统为例,利用圆锥曲线的统一极坐标方程,对 3 类牙型构建了一个通用的宏程序编制模版。该模版程序结构简单,可方便地进行 3 种牙型转换,使圆锥曲线牙型螺纹宏程序编程难度降低,从而提高编程效率。

关键词:数控车削;螺纹加工;极坐标;统一方程;宏程序

中图分类号:TG519.1 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2026)04-0087-06

Development of a Universal Macro Program Template for Machining Conic Section Thread Profiles in CNC Turning

Li Yaxi, Chen Qi

(Shangluo Vocational & Technical College, Shangluo 726000, China)

Abstract:When machining thread profiles with conic sections as hyperbola, ellipse, and parabola in CNC turning, macro programs are commonly employed for programming and machining. Currently, the development of macro programs for these types of threads is mostly focused on analyzing a specific thread profile, lacking a universal programming model that can be applied to all three types of profiles (hyperbola, ellipse, and parabola). Whenever the thread profile changes, re-modeling and re-programming are required. Taking the HNC-21T CNC system as an example, a universal macro program template for the three types of profiles is constructed using the unified polar coordinate equation of conic sections. The template has a simple program structure, enabling convenient switching among the three thread profiles, thereby reducing the difficulty of macro program development for conic section thread profiles and improving programming efficiency.

Keywords:CNC turning; thread machining; polar coordinates; unified equation; macro program

0 引言

圆锥曲线牙型螺纹是一种特殊类型的螺纹,其螺纹形状基于圆锥曲线(如椭圆、抛物线、双曲线等)的几何特性设计而成。此类螺纹具有良好的密封性能与自锁性能,在抽水蓄能电站的承压管路、航空航天等领域应用广泛。在数控车削圆锥曲线牙型时,传统手动编程难以应对复杂曲线,使用 CAD/CAM 软件自动编程虽可完成加工^[1-3],但存在程序冗长、可读性差及参数修改不便等缺陷。宏程序虽能优化程序结构并提升程序适应性^[4-11],但现有研究多局限于单一曲线类型,缺乏通用性模型。如:文献[12-16]通过坐标转换,对椭圆形螺纹的走刀轨迹进行研究;文献[17-20]通过多次循环嵌套,实现了椭圆面上圆弧

形螺纹的宏程序编制;文献[21-22]对半圆形及双圆弧形螺纹进行研究,并通过仿真加工对所编写的宏程序进行验证。为突破这一局限,本文基于华中 HNC-21T 系统,引入圆锥曲线统一极坐标方程,构建了一种涵盖椭圆、双曲线及抛物线的通用宏程序编程模版,旨在显著提升代码的复用率与适应性。

1 数控车床工件坐标系与极坐标系之间的转换

1.1 数控车床工件坐标系与极坐标系之间的转换方法^[23]

根据工件结构,在数控工件坐标系 xOz 中建立相应的极坐标系。如图 1 所示,极轴为 $O'X'$,极点 O' 在数控车床工件坐标系 xOz 中的坐标值为 (x_0, z_0) ,极角 θ 逆时针方向旋转取正值。对数控

基金项目:陕西省教育厅科学研究计划项目(25JK0444);2025 年度商洛职业技术学院重大课题(JYKT202507)

第一作者简介:李雅昔(1975—),男,陕西渭南人,副教授,硕士,研究方向为机械设计与制造,644932782@qq.com。

车床工件坐标系 xOz 中的任意一点 $P(x, z)$, 其极坐标为 $P(\rho, \theta)$, 两坐标系可由式(1)进行转换

$$\begin{cases} x = x_0 + \rho \sin(\theta + \alpha) \\ z = z_0 + \rho \cos(\theta + \alpha) \end{cases} \quad (1)$$

式中: α 为极轴 $O'X'$ 与工件坐标系 z 轴的夹角(即极轴旋转角), 当极轴 $O'X'$ 顺时针方向旋转至 z 轴时, α 取正值; 反之, α 取负值。

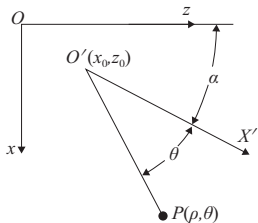


图1 极坐标与数控车床工件坐标的转换

表1 在圆锥曲线标准方程坐标系 $X_iO_iZ_i$ 中圆锥曲线极点的选取方法

抛物线	椭圆	双曲线
抛物线的焦点唯一, 以焦点为极点	以焦点所在坐标轴正方向一侧焦点为极点	以焦点所在坐标轴负方向一侧焦点为极点

1.3 圆锥曲线极点 O' 在工件坐标系中的坐标值 (x_0, z_0)

因圆锥曲线标准方程坐标系 $X_iO_iZ_i$ 与数控车床工件坐标系 xOz 通常不重合, 故需确定圆锥曲

1.2 极坐标中圆锥曲线极径的统一方程

在圆锥曲线标准方程坐标系 $X_iO_iZ_i$ 中构建极坐标系时, 为使三类圆锥曲线极径的统一方程保持一致, 参考表1确定极点位置。同时, 选取焦点 F 所在坐标轴为极轴, 该坐标轴正方向即为极轴方向。圆锥曲线上任意点 $P(\rho, \theta)$ 的极径统一极坐标方程如式(2)所示

$$\rho = \frac{ep}{1 + e \cos(\theta)} \quad (2)$$

式中: e 为圆锥曲线的离心率; p 为圆锥曲线的焦距。

线标准方程坐标系 $X_iO_iZ_i$ 坐标原点 O_i 在数控车床工件坐标系 xOz 中的坐标值 (x_1, z_1) 、极点 O' 在数控车床工件坐标系 xOz 中的坐标值 (x_0, z_0) , 其计算方法如表2所示。

表2 圆锥曲线极点在工件坐标系中的坐标值

曲线类型	椭圆	双曲线	抛物线
曲线图形			
(x_1, z_1)	$(\pm I, \pm K)$ O_i 在 O 下方: x_1 取“+I” O_i 在 O 左侧: z_1 取“-K”	$(\pm I, \pm K)$ O_i 在 O 上方: x_1 取“-I” O_i 在 O 右侧: z_1 取“+K”	$(\pm I, \pm K)$ O_i 在 Z 轴上: x_1 取“0” O_i 在 X 轴上: z_1 取“0”
(x_0, z_0)	$\begin{cases} x_0 = x_1 - c \times \sin \alpha \\ z_0 = z_1 + c \times \cos \alpha \end{cases}$	$\begin{cases} x_0 = x_1 + c \times \sin \alpha \\ z_0 = z_1 - c \times \cos \alpha \end{cases}$	$\begin{cases} x_0 = x_1 + 0.5p \times \sin \alpha \\ z_0 = z_1 - 0.5p \times \cos \alpha \end{cases}$

注: 表2中 α 为极轴 $O'X'$ 与工件坐标系 xOz 的夹角, 即极轴旋转角, 当极轴 $O'X'$ 顺时针方向旋转至 Z 轴方向时, α 取“+”。

1.4 极坐标与数控车床工件坐标系的转换

参考式(1)与式(2), 对圆锥曲线上任意点

$P(\rho, \theta)$ 的极坐标, 其在工件坐标系 xOz 中对应的直角坐标 $P(x, z)$ 可由式(3)确定

$$\begin{cases} x = x_0 + \frac{ep}{1+e\cos(\theta)} \sin(\theta+\alpha) \\ z = z_0 + \frac{ep}{1+e\cos(\theta)} \cos(\theta+\alpha) \end{cases} \quad (3)$$

2 构建圆锥曲线牙型宏程序通用模版

在华中 HNC-21T 数控系统中, G32(单行程螺纹切削指令)、G82(固定循环螺纹切削指令)与 G76(复合循环螺纹切削指令)均属于仿形加工,在加工圆锥曲线牙型螺纹时,螺纹刀必须使用与加工牙型相匹配的成型刀。本文采用主偏角为 93° 、刀尖角为 35° 的机夹外圆刀来加工圆锥曲线牙型螺纹,以增强刀具的通用性。同时,引入分层切削策略,以解决传统直进法和斜进法在车削螺纹时存在的散热不良、切削力过大以及排屑困难等问题。

2.1 粗车圆锥曲线牙型螺纹进刀路径设计

如图 2 所示,粗车圆锥曲线牙型螺纹时,进刀路径采用分层切削法。以圆锥曲线上加工起始点的极角 θ_1 (起始极角 #6) 每次增加 10° 为步距,将牙深分为若干层。首层采用直进法从点 a_1 进行螺纹粗车,然后刀具纵向赶刀 Δz (-0.5 mm),依次从点 $a_2, a_3, \dots, a_n$ 进行首层螺纹粗车,当 #12 的值减至小于 #14 时,终止首层螺纹粗车。当首层粗车终了后,起始极角 θ_1 再次增加 10° ,进行第 2 层螺纹粗车,依次从点 $b_1, b_2, \dots, b_n$ 进行第 2 层螺纹粗车。依次类推,加工第 3 层、第 4 层、……最后一层,当起始极角 θ_1 增至大于等于终止极角 θ_2 (#7) 时,不再进行螺纹粗车加工。

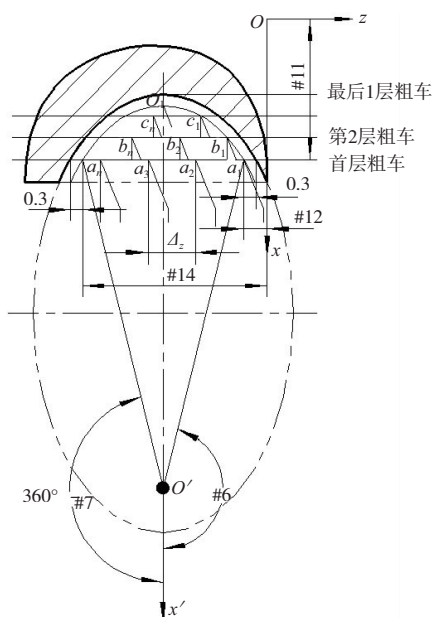


图2 粗车圆锥曲线牙型螺纹进刀路径

2.2 精车圆锥曲线牙型螺纹进刀路径设计

如图 3 所示,精车圆锥曲线牙型螺纹时,第 1 刀精车,以变量 #6(起始极角 θ_1) 的值,由宏程序自动计算圆锥曲线牙型螺纹上第 1 刀精车的切削起点 A_1 在数控车床工件坐标系中坐标 ($2 * \#11, -\#12$),结合公式 (3), #11 与 #12 的计算方法如下

$$\begin{cases} \#11 = [\#1] - \frac{[\#3] \times [\#4]}{1 + [\#3] \times \cos[\#6]} \sin([\#6] + [\#5]) \\ \#12 = [\#2] + \frac{[\#3] \times [\#4]}{1 + [\#3] \times \cos[\#6]} \cos([\#6] + [\#5]) \end{cases} \quad (4)$$

式中: #1 为圆锥曲线极点 O' 在数控车床工件坐标系 xOz 中的 X 坐标值(半径值); #2 为圆锥曲线极点 O' 在数控车床工件坐标系 xOz 中的 Z 坐标值; #3 为圆锥曲线的离心率; #4 为圆锥曲线的焦点距; #5 为圆锥曲线的极轴旋转角; #6 为圆锥曲线的起始极角。

第 1 刀精车结束后,刀具返回螺纹切削起刀点,变量 #6(起始极角 θ_1) 的值增加 0.5° ,由宏程序自动计算圆锥曲线牙型螺纹上第 2 刀精车的切削起点 A_2 在数控车床坐标系中的坐标 ($2 * \#11, -\#12$),依次类推,直至加工最后一刀(变量 #6 增至终止极角 θ_2)。

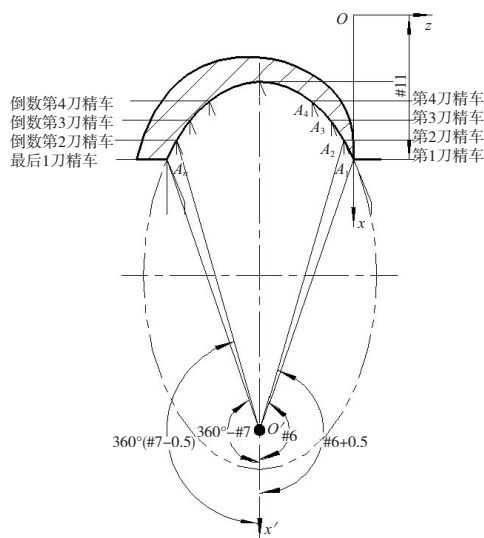


图3 精圆锥曲线牙型螺纹进刀路径

3 加工实例与验证

3.1 椭圆牙型工件加工实例

椭圆牙型工件如图 4 所示,椭圆的标准方程为 $\frac{x_1^2}{10^2} + \frac{z_1^2}{6^2} = 1$ 。椭圆标准方程坐标系为 $X_1O_1Z_1$,依据表 1 中有关圆锥曲线统一极坐标方程极点与极轴

的选取方法,在椭圆标准方程坐标系 $X_1O_1Z_1$ 中,选取椭圆焦点所在的坐标轴 X_1 轴为极轴, X_1 轴的正方向即为极轴 $O'X'$ 的方向,选取 X_1 轴正方向一侧的焦点作为极点 O' 。由表 2 中有关极轴旋转角的说明可知,椭圆极轴旋转角为 $\alpha = -90^\circ$ 。椭圆长半轴为 $a = 10 \text{ mm}$,短半轴为 $b = 6 \text{ mm}$ 。其余通用宏程序模版所需参数分析如下:半焦距为 $c =$

$\sqrt{a^2 - b^2} = 8 \text{ mm}$,离心率为 $e = \frac{c}{a} = 0.8$,焦点距为

$p = \frac{b^2}{c} = 4.5 \text{ mm}$,椭圆的起始极角为 $\theta_1 = 167.32^\circ$,

终止极角为 $\theta_2 = 192.68^\circ$,椭圆标准方程坐标系 $X_1O_1Z_1$ 的坐标原点 O_1 在数控车床工件坐标系 xOz 中的坐标值为 $(x_1, z_1) = (27, -4.8)$,极点 O' 在数控车床工件坐标系 xOz 中的坐标为 $(x_0, z_0) = (37, -3.6)$ 。

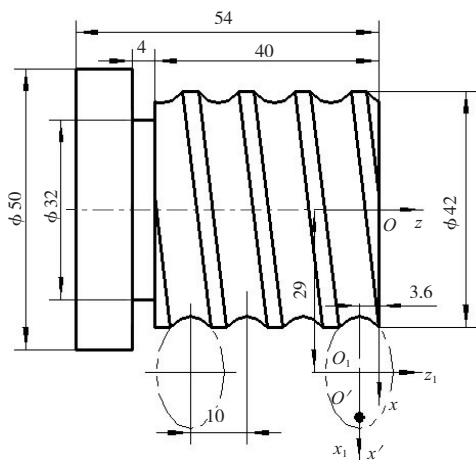


图 4 零件图(椭圆牙型螺纹)

该零件螺纹部分宏程序模版编写如下(零件外形与椭圆牙型螺纹光杆部分车削程序略):

```

O0001
%0001
.....
M03 S30
#1=37
#2=-3.6
#3=0.8
#4=4.5
#5=-90
#6=167.32+10
#7=192.68-10
#8=44
#9=10
#10=-41
G00 X[#8] Z[#9]
WHILE [#6 LE #7] DO

```

```

#11=#1-[#3*#4/[1+#3*cos[#6*3.1416/180]]]
* sin[#6+#5]*3.1416/180]
#12=#2+[#3*#4/[1+#3*cos[#6*3.1416/180]]]
* cos[#6+#5]*3.1416/180]-0.3
#13=#6+2*[180-#6]
#14=#2+[(#3)*[#4]/[1+#3*cos[#13*3.
1416/180]]]*cos[(#13)+#5]*3.1416/180]+0.3
WHILE[#12] GT [#14]
G95 G01 X[2*#11] Z[#12]+[#9] F15
G32 X[2*#11] Z[#10] F[#9]
G01 X[#8] F15
G00 Z[#12]+[#9]
#12=#12-0.5
ENDW
#6=#6+10
ENDW
G00 X[#8] Z[#9]
#6=167.32
#7=192.68 (
WHILE [#6 LE #7] DO
#11=#1-[#3*#4/[1+#3*cos[#6*3.1416/180]]]
* sin[#6+#5]*3.1416/180]
#12=#2+[#3*#4/[1+#3*cos[#6*3.1416/180]]]
* cos[#6+#5]*3.1416/180]
G95 G01 X[2*#11] Z[#12]+[#9] F15
G32 X[2*#11] Z[#10] F[#9]
G01 X[#8] F15
G00 Z[#12]+[#9]
#6=#6+0.5
ENDW
G00 X80
G00 Z120
M30

```

用 $\phi 50 \text{ mm}$ 的毛坯进行加工,加工后的零件如图 5 所示。



图 5 椭圆牙型加工结果

3.2 双曲线牙型与抛物线牙型工件加工实例

双曲线牙型工件如图 6 所示,双曲线的标准方程为 $\frac{x_1^2}{8^2} - \frac{z_1^2}{6^2} = 1$ 。依据表 1 中有关圆锥曲线统一极坐标方程极点与极轴的选取方法,在双曲线标准方程坐标系 $X_1O_1Z_1$ 中,选取椭圆焦点所在的坐标轴 X_1 轴为极轴, X_1 轴的正方向即为极轴 $O'X'$ 的方向,选取 X_1 轴负方向一侧的焦点作为极点 O' 。由表 2 中有关极轴旋转角的说明可知,双曲线的极轴旋转角为 $\alpha = 90^\circ$ 。

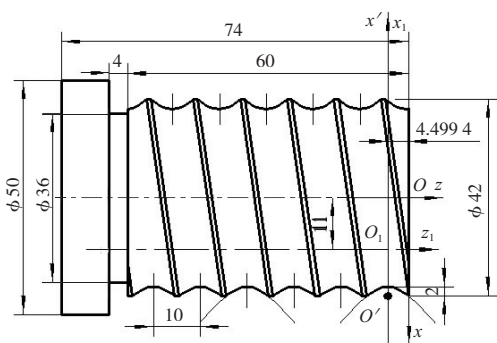


图 6 零件图(双曲线牙型螺纹)

如图 7 所示为抛物线牙型工件,抛物线的标准方程为 $z^2 = -10x$ 。在抛物线标准方程坐标系 $X_1O_1Z_1$ 中,选取焦点所在的坐标轴 X_1 轴为极轴, X_1 轴的正方向即为极轴 $O'X'$ 的方向,抛物线的焦点即为极点 O' ,抛物线的极轴旋转角度为 $\alpha = 90^\circ$ 。

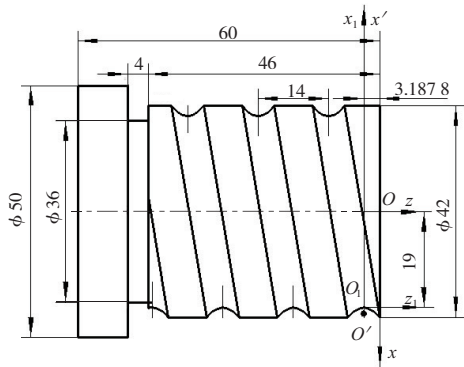


图 7 零件图(抛物线牙型螺纹)

图 6 与图 7 所示零件中,待加工圆锥曲线牙型螺纹所需各参数数值如表 3 所示,根据表 3 中各参数数值对宏程序模板的相应变量进行重新赋值后,以直径为 50 mm 的铝合金 6061 为毛坯,分别进行车削加工,图 8 与图 9 所示为加工完毕后所得的零件。

表 3 图 6 与图 7 中圆锥曲线牙型螺纹参数

参数	双曲线	抛物线
a, b, c	$a=8, b=6, c=10$	无此参数
(x_1, z_1)	$x_1=11, z_1=-4.499\ 4$	$x_1=19, z_1=-4.472\ 6$
(x_0, z_0)	#1= $x_0=21$ #2= $z_0=-4.499\ 4$	#1= $x_0=21.5$ #2= $z_0=-4.472\ 6$
离心率 e	#3= $e=1.25$	#3= $e=1$
焦准距 p	#4= $p=3.6$	#4= $p=5$
极轴旋转角 α	#5= $\alpha=90^\circ$	#5= $\alpha=90^\circ$
起始极角 θ_1	#6= $\theta_1=-90^\circ$	#6= $\theta_1=-83.26^\circ$
终止极角 θ_2	#7= $\theta_2=90^\circ$	#7= $\theta_2=83.26^\circ$
螺纹起刀点的 X 坐标值	#8=44	#8=44
螺纹导程	#9=10	#9=14
螺纹切削终点的 Z 坐标值	#10=-61	#10=-47

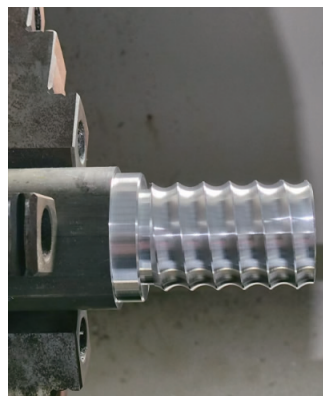


图 8 双曲线牙型加工结果



图 9 抛物线牙型加工结果

4 结语

本文在对传统的圆锥曲线统一极坐标方程进行优化的基础上,结合坐标系旋转与坐标系平移,构建了一种适用于抛物线、双曲线与椭圆三类圆锥曲线的通用数学模型。运用该数学模型,三类圆锥曲线牙型轮廓上任意位置一点 $P(\rho, \theta)$ 的极

坐标可快速转换为工件坐标系坐标。优化后圆锥曲线统一极坐标方程的一致性,有效减少了所编制通用宏程序模版中变量数量。在进行加工程序调试时,只需在该通用宏程序模板中调整圆锥曲线极轴旋转角、离心率、焦距等参数对应变量的赋值,即可完成加工程序的编制。经多次加工验证,该通用宏程序模版适用于各类圆锥曲线牙型螺纹的加工,并能大幅提升圆锥曲线牙型螺纹的编程效率。

参考文献:

- [1] 邹峰,孙武兵,张甜甜,等. Mastercam 软件在特殊螺纹加工中的应用[J]. 金属加工(冷加工),2024(7):61-65.
- [2] 闫博,冯能. 基于 CAXA 数控车软件的异形螺纹加工编程[J]. 设备管理与维修,2021(14):103-104.
- [3] 凌超强,卫滨,孙永辉,等. 使用 CAM 软件加工异形螺纹的方法[J]. 金属加工(冷加工),2023(4):68-73.
- [4] 张玲. 基于宏程序和 VERICUT 的空间螺旋槽四轴数控仿真加工技术研究[J]. 现代制造技术与装备,2025,61(1):104-106,110.
- [5] 曹智梅. 车削抛物线宏程序自动生成技术研究[J]. 机械工程与自动化,2024(6):40-42.
- [6] 崔亚军. 基于 A 类宏程序模态调用的模块化数控加工程序编制探究[J]. 模具制造,2025,25(5):56-58,61.
- [7] 杨春花. 基于宏程序的数控机床参数化编程技术应用[J]. 电脑编程技巧与维护,2025(4):27-29,114.
- [8] 刘云,胡建民,邹斌,等. 分析数控宏程序在数控车床上实现锯齿形螺纹的加工应用[J]. 中国金属通报,2025(3):112-114.
- [9] 杨香港. 宏程序在梯形螺纹加工中的应用[J]. 今日制造与升级,2024(11):72-75.
- [10] 张宣宣,顾燕,康徐红. 内椭圆数控加工方法研究[J]. 中国机械,2024(9):68-71,75.
- [11] 陈雄. 基于华中数控系统车削正弦曲线的宏程序编程研究[J]. 中国机械,2024(5):50-53.
- [12] 龙育才,田长青,朱永星. 椭圆异型螺纹数控宏程序编制的设计[J]. 轻工科技,2019,35(3):42-43.
- [13] 朱治法,孙艳华,杜春平. 宏程序车削异形螺纹的编程探索[J]. 桂林航天工业学院学报,2018,23(4):451-454.
- [14] 辜文娟. 基于华中数控系统车削椭圆的宏程序编程探究[J]. 科技与创新,2023(5):122-124.
- [15] 胡翔云,胡莹. 直线拟合椭圆轮廓曲线数控加工误差分析[J]. 模具制造,2024,24(1):73-75.
- [16] 张晖. 法兰盘椭圆型腔数控铣削工艺与编程研究[J]. 内燃机与配件,2023(24):45-47.
- [17] 韩雪松,钟丽珠,谌炎辉,等. 异形螺纹的三维建模与数控编程技术[J]. 机电工程技术,2023,52(7):230-233.
- [18] 陆家峰,郭长城. 异形螺纹的数控加工技术分析[J]. 造纸装备及材料,2022,51(5):108-110.
- [19] 黄振沛. 基于数控车削椭圆面螺纹零件加工的研究[J]. 煤矿机械,2017,38(6):76-78.
- [20] 李丽萍. 螺纹的数控仿真加工分析[J]. 机械工程与自动化,2024(6):77-79.
- [21] 王军强,王伟,韩亮. 大螺距半圆形截面螺纹加工方法[J]. 金属加工(冷加工),2019(11):50-53.
- [22] 岳瑞飞,年得君,余正存. 数控车削大螺距三角形螺纹加工方法研究[J]. 河南科技,2023,42(21):37-40.
- [23] 李雅昔. 基于统一极坐标方程的圆锥曲线宏程序通用模版编制[J]. 现代制造工程,2026(1):95-100,134.

收稿日期:2025-07-09

(上接第 80 页)

- [4] 曹永军,宋黎明,陈伟. 高危离心泵的工程设计方案研究[J]. 化工设备与管道,2022,59(6):66-71.
- [5] 韩威,杨杏,李刚,等. 基于 PCA 和威布尔分布的滚动轴承剩余寿命预测方法研究[J]. 机械制造与自动化,2022,51(4):61-64,77.
- [6] 桑勇,王占林. 航空液压泵加速寿命试验台的研制[J]. 液压气动与密封,2009,29(1):45-48.
- [7] Fan M, Dazin A, Bois G, et al. Instabilities identification based on a new centrifugal 3D impeller outflow model[J]. Aerospace Science and Technology, 2023, 140:108466.
- [8] 吴松,吕晶晶,李小康. 可靠性加速寿命试验综述[J]. 电子产品可靠性与环境试验,2021,39(1):94-100.
- [9] Ding C, Yang C Y, Tse S K. Accelerated life test sampling plans for the Weibull distribution under Type I progressive interval censoring with random removals[J]. Journal of Statistical Computation and Simulation, 2010, 80(8):903-914.
- [10] 马小兵,刘宇杰,王晗. 加速寿命试验三参数威布尔分布的极小变异-极大似然估计[J]. 装备环境工程,2023,20(5):12-18.

收稿日期:2024-03-12