

伺服压力机加工工艺的 Bezier 模型及其优化研究

尚万峰¹, 赵升吨²

(1. 西安科技大学机械工程学院, 710054, 西安; 2. 西安交通大学机械工程学院, 710049, 西安)

摘要: 为实现伺服压力机的柔性化加工, 在建立的基于轨迹规划理论的伺服压力机柔性工艺 Bezier 曲线数学模型中, 按照冲裁、拉深等工艺的加工要求, 优化设计了非线性多变量多约束的 Bezier 曲线. 以拉深工艺为例, 构建其 Bezier 曲线的非线性目标函数和约束条件, 采用变容差遗传算法优化设计得到了满足工艺要求的最佳输入和输出柔性加工曲线. 通过实例验证了该建模方法的有效性, 为不同伺服压力机的工艺曲线设计提供了一种可行的解决方案.

关键词: Bezier 模型; 伺服压力机; 优化; 柔性化加工

中图分类号: TH112 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2012)03-0031-05

Servo Press Processing Bezier-Model with Optimum

SHANG Wanfeng¹, ZHAO Shengdun²

(1. School of Mechanical Engineering, Xi'an University of Science & Technology, Xi'an 710054, China;

2. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To achieve flexible process of servo press, a general mathematical Bezier-model is established for different flexible technological curves of servo press following trajectory planning theory. Then a nonlinear multi-variable and multi-constraint Bezier curve is optimized in accordance with different processing requirements of blanking, drawing etc. Drawing Bezier curve design is taken as an example, whose optimum objective function is constructed and solved with flexible tolerance genetic algorithm, and then the optimum input and output technological curves are gained for the processing design purpose. Thus the effectiveness and feasibility of the proposed servo press processing Bezier-model are verified.

Keywords: Bezier model; servo press; optimum; flexible process

面对产品个性化、多样化、小批量化和多种型号共线生产的发展趋势^[1], 越来越多的企业要求压力机能够具有更大柔性来满足不同工艺的要求, 以弥补传统冲压模式固定、工艺适用性差^[2]等缺点. 随着电子技术、控制技术和各种调速技术的快速发展, 伺服压力机的出现为传统机械压力机的可控化、柔性化提供了可行的解决方案.

目前, 对伺服压力机的研究主要侧重在机构优化及控制系统方面, 而对于伺服压力机冲压工艺的优化设计方面的研究则较少. 文献[3]对多种冲压工艺进行了描述, 并建立了开放式的冲压工艺程序库.

文献[4]运用非均匀有理样条(Non-Uniform Rational B-Splines, 简称 NURBS)曲线规划冲压工艺, 通过调节权因子和节点矢量微调节工艺曲线, 使冲压能够平滑合模. 对于已知的加工材料和加工要求, 不同的冲压工艺任务应该对应最佳的加工特性曲线. 文献[5-6]分析了经典平面凸轮从动系统恒速和变速输入的运动特性, 并举例优化设计了两组工艺曲线. 对于不同的伺服压力机结构和工艺要求, 不同工艺曲线模型的调节因子也应当是不同的, 而目前这些调节都是根据经验设定的. 因此, 本文提出了采用 Bezier 曲线轨迹规划方法建立伺服压力机冲压

收稿日期: 2011-07-01. 作者简介: 尚万峰(1979—), 女, 博士, 讲师. 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50575175); 陕西省重大科技创新项目专项资金资助项目(07ZKC(2)03-04); 陕西省教育厅科学研究计划资助项目(2010JK686).

网络出版时间: 2012-01-16

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20120116.0950.001.html>

工艺的通用数学模型,来优化设计电机输入和滑块输出的工艺特性曲线.

1 Bezier 曲线轨迹规划方法

常见的曲线规划方法有 Bezier、B 样条和 NURBS,三者关系如图 1 所示. Bezier、B 样条是 NURBS 的特列,NURBS 相对于其他 2 种方法构建的模型较复杂,且计算繁琐. 另一方面,Bezier 又是 B 样条的特列,Bezier 曲线中的每个控制点都会影响整个曲线的形状,而 B 样条中的控制点只会影响曲线的部分细节,有更高的建模灵活性,但是对于构造特定的加工工艺曲线,会导致曲线控制点最优解的不唯一性. 因此,本文采用 Bezier 曲线轨迹规划方法对伺服压力机的加工工艺曲线进行建模.

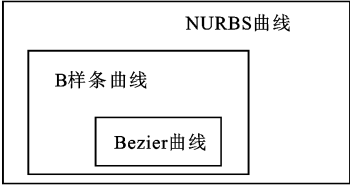


图 1 Bezier、B 样条和 NURBS 曲线的关系

Bezier 曲线轨迹规划方法将函数逼近与几何表示结合起来,使得设计师在工程设计中能比较直观地意识到所给条件与设计曲线之间的关系,从而能够方便地控制输入参数来改变曲线的形状^[7].

假设给定空间 $n+1$ 个点 $\theta_0, \theta_1, \dots, \theta_n$,可构造的参数曲线函数为

$$\theta(t) = \sum_{i=0}^n \theta_i B_{i,n}(t) \tag{1}$$

式中: $B_{i,n}(t)$ 是 n 次 Bernstein 基函数,即

$$B_{i,n}(t) = \frac{n!}{i!(n-i)!} t^i (1-t)^{n-i}, \quad t \in [0,1] \tag{2}$$

将点 $\theta_0, \theta_1, \dots, \theta_n$ 作为曲柄输入角度 $\theta(t)$ 的控制顶点,并构成特征多边形,可以通过改变任一控制点的位置来改变曲线的形状,这种曲线或曲面的构造方法被称为 Bezier 曲线轨迹规划方法. 当 t 在区间 $[0,1]$ 上变动时,产生的曲线称为 Bezier 曲线,但按照式(1)和式(2)得到 $\theta(t)$ 的常规算法则不是数值稳定的算法流程,因为 $B_{i,n}(t)$ 的计算过程中会引起浮点除法,从而导致误差产生. 对于高精度的、小工作行程等特点的加工工艺,这种由模型设计而造成的计算误差是不允许的. 因此,本文采用图 2 的递推计算来分析式(2)的函数结构.

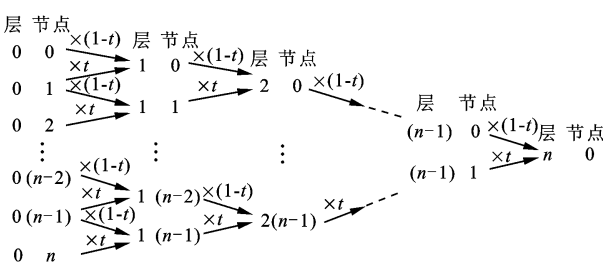


图 2 Bezier 函数递推层次关系

在图 2 中,第 0 层第 i 个节点($i=0,1,\dots,n$)为控制点 θ_i 的输入值,经过 n 层迭代计算到达第 n 层,节点 n 为最后结果,即 $\theta(t)$,具体的递推公式可表示为

$$\theta_i^k = \begin{cases} \theta_i & k = 0 \\ (1-t)\theta_i^{k-1} + t\theta_{i+1}^{k-1} & k = 1,2,\dots,n \\ i = 0,1,\dots,n-k \end{cases} \tag{3}$$

式(3)中最后的迭代结果 θ_0^n 就是 $\theta(t)$,即为 t 时刻曲线上对应的点.

2 伺服压力机加工工艺的 Bezier 模型

2.1 伺服压力机曲柄输入参数模型

由于伺服机构的输入为曲柄旋转运动,因此可定义一个回转周期内 $\theta(t)$ 的轨迹为一个 n 阶 Bezier 曲线,其中 t 为一个回转周期内的归一化时间. 伺服机构要求滑块输出运动特性(如位移、速度、加速度等)尽可能地连续,且越平滑越好. 采用 Bezier 曲线 n 阶连续可微的特性,以确保曲柄在时间 $[0,1]$ 范围内的角速度与角加速度皆为连续,即

$$\omega(t) = \frac{d\theta(t)}{dt} = \sum_{i=0}^n \theta_i \frac{dB_{i,n}(t)}{dt} \tag{4}$$

$$a(t) = \frac{d^2\theta(t)}{dt^2} = \sum_{i=0}^n \theta_i \frac{d^2 B_{i,n}(t)}{dt^2} \tag{5}$$

其中

$$\frac{dB_{i,n}(t)}{dt} = \frac{n!}{(i-1)!(n-i)!} t^{i-1} (1-t)^{n-i} - \frac{n!}{i!(n-i-1)!} t^i (1-t)^{n-i-1} \tag{6}$$

$$\begin{aligned} \frac{dB_{i,n}(t)}{dt} &= \frac{n!}{(i-2)!(n-i)!} t^{i-2} (1-t)^{n-i} - \\ &2 \frac{n!}{(i-1)!(n-i-1)!} t^{i-1} (1-t)^{n-i-1} + \\ &\frac{n!}{i!(n-i-2)!} t^i (1-t)^{n-i-2} \end{aligned} \tag{7}$$

2.2 伺服压力机滑块输出参数模型

伺服压力机的传动机构以经典的曲柄肘杆机

构^[8]为例,如图 3 所示,基本结构参数为 X 、 Y 、 l_1 、 l_2 、 l_3 、 l_4 、 θ 、 δ 、 β 、 γ 。该曲柄肘杆机构有 2 个运动回路,方程可列为

$$\left. \begin{aligned} l_3 \cos \beta + l_4 \cos \gamma &= L \\ l_3 \sin \beta - l_4 \sin \gamma &= 0 \\ l_1 \cos \theta + l_2 \cos \delta &= l_4 \sin \gamma + X \\ l_1 \sin \theta + l_2 \sin \delta &= Y - l_3 \cos \beta \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

则可以推出滑块距离上铰接点 C 的距离为

$$L(\theta) = l_3 \cos \beta + l_4 \cos \left(\arcsin \left(\frac{l_3 \sin \beta}{l_4} \right) \right) \quad (9)$$

式中

$$\left. \begin{aligned} \beta &= 2 \arctan \frac{Q + (Q^2 + N^2 - M^2)^{1/2}}{M + N} \\ Q &= 2 l_1 l_3 \cos \theta - 2 X l_3 \\ N &= 2 Y l_3 - 2 l_1 l_3 \sin \theta \\ M &= l_3^2 + l_1^2 + X^2 + Y^2 - l_2^2 - \\ &\quad 2 X l_1 \cos \theta - 2 Y l_1 \sin \theta \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

由于压力机传动机构的输入参数只有电机角度或转速,而且 $\theta(t)$ 在设备的工作状态下是变化的,因此式(9)可以看作相对于 $\theta(t)$ 的函数表达式。假设该压力机传动机构的下死点为滑块位移曲线的零起始点,则滑块位移的表达式可写为

$$s(\theta) = L(\theta_L) - L(\theta) \quad (11)$$

当滑块位于传动机构的下死点时,曲柄与水平方向的夹角

$$\theta_L = \frac{3}{2} \pi - \arctan \frac{X}{Y} - \arccos \frac{(l_2 - l_1)^2 + X^2 + Y^2 - l_3^2}{2(l_2 - l_1)(X^2 + Y^2)^{1/2}} \quad (12)$$

加工工艺 Bezier 曲线由控制顶点 $(\theta_0, \theta_1, \cdots, \theta_n)$ 控制曲柄在一个回转周期内的位置,根据 Bezier 曲线的特性,代表起始与终止位置的 $\theta_0 = 0$ 、 $\theta_n = 2\pi$ 必须成立,并将剩余的控制顶点 $\theta_1, \theta_2, \cdots, \theta_{n-1}$ 设计为伺服机构工艺曲线的未知优化变量。因此,滑块的位移 s 、速度 v 、角速度 a 的变化可表示为关于 $\theta_1, \theta_2, \cdots, \theta_{n-1}$ 的函数,即传动机构的 Bezier 曲线模型如下

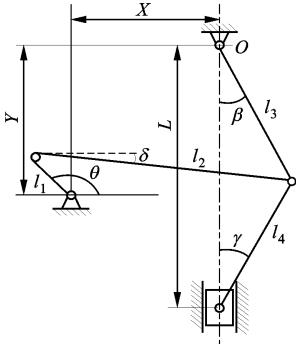
$$s(t) = s(\theta_1, \cdots, \theta_{n-1}, t) \quad (13)$$

$$v(t) = v(\theta_1, \cdots, \theta_{n-1}, t) = \dot{s} \quad (14)$$

$$a(t) = a(\theta_1, \cdots, \theta_{n-1}, t) = \ddot{s} \quad (15)$$

3 拉深工艺 Bezier 曲线模型的优化设计

在拉深过程中,工件的壁缘部分因受到坯料压



X :肘杆上铰接点与曲柄铰接点的水平距离; Y :肘杆上铰接点与曲柄铰接点的垂直距离; l_1 :曲柄长度; l_2 :连杆长度; l_3 :上肘杆长度; l_4 :下肘杆长度; θ :曲柄输入角度; δ :连杆与水平方向夹角; β :上肘杆与垂直方向夹角;

γ :下肘杆与垂直方向夹角

图 3 曲柄肘杆机构示意图

板的压力牵制,有时会有褶皱现象发生,而底部拉深部分则会因坯料的流动与过度变形造成异常变化,往往产生拉深破裂的情形。为避免褶皱与破裂的发生,采用的主要方法就是控制坯料塑性流动的速度,使拉深速度在允许加工速度内以近似等速度运动。

本文以钢材为例,给出了符合伺服压力机拉深加工的输入角度和转速函数,并设定此时曲柄输入的平均转速为 2π rad/s,从而构建了 Bezier 曲线的优化模型。

3.1 建立拉深工艺的优化目标函数

在机械压力机中,质量最大的运动部件滑块做加速度运动时所产生的惯性力会造成较大的振动,进而影响冲压产品的精度与模具寿命,因此应以最小化滑块输出加速度的峰值作为优化目标。最小化

$$f(\theta_1, \theta_2, \cdots, \theta_9) = p(a(t)) \quad (16)$$

式中 p 为 $a(t)$ 的峰值函数。

3.2 建立拉深工艺的约束条件

采用等式与不等式限制条件来定义传动系统的输入与输出的期望运动特性。

3.2.1 工艺曲线连续性限定 由于选用 Bezier 曲线作为电动机和曲柄的输入角度曲线,曲柄输入的运动连续性已经自动满足,但曲线首尾端($t = 0$, $t = 1$)则例外,因此为保证这 2 个边界点处的曲线连续,利用式(4)与式(5)的角速度与角加速度构建的等式约束条件为

$$h_1(\theta_1, \theta_2, \cdots, \theta_9) = \omega(1) - \omega(0) = 0 \quad (17)$$

$$h_2(\theta_1, \theta_2, \cdots, \theta_9) = a(1) - a(0) = 0 \quad (18)$$

式(17)、式(18)可确定曲柄和滑块在回转的 2 个相

邻周期内,速度和加速度是连续平滑的。

3.2.2 滑块回程率限定 由于滑块回程率愈大,回程用时愈短,机构的工作效率愈高,为了保证拉深工作区间的慢速加工过程,同时满足加速度的光滑过渡和对电机无过大冲击,因此本文设定滑块的回程率为0.55。滑块在运动周期的0.55倍时间点快速回程,则等式约束条件可表示为

$$h_3(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_9) = s(t_r) - s_s = s(0.55) - 0.045 = 0 \text{ m} \quad (19)$$

3.2.3 滑块工作区间的速度范围及恒速限定 对于拉深工艺,需保证在拉深工作区间内滑块近似等速运动,则约束条件为

$$g_1(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_9) = \int_{s(t)=D_s}^{s(t)=D_f} |v(t) - v_{D_s}| dt - \epsilon < 0, \quad \epsilon = v_{D_s}/10 \quad (20)$$

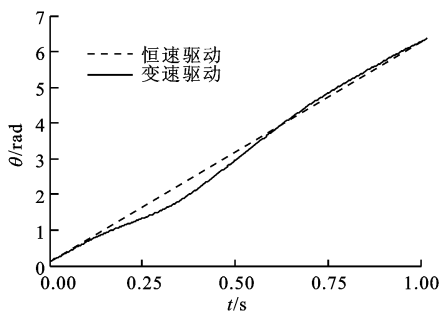
式中: v_{D_s} 为起始拉深加工点的损失速度; D_s 为起始拉深加工点,距离下死点0.03 m处; D_f 为终止拉深加工点,距离下死点0.01 m处。约束条件 g_1 使得滑块在拉深工作区间 $D_s < s < D_f$ 内可以接近等速度运动,为保证在拉深加工范围内,滑块的速度不得超过钢质材料的容许值^[9],将约束条件设为

$$g_2(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_9) = |v_{D_s}| > 0.092 \text{ m/s} \quad (21)$$

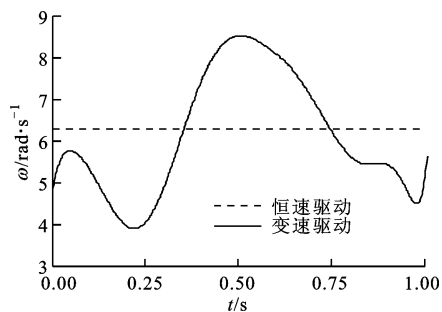
$$g_3(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_9) = |v_{D_s}| < 0.253 \text{ m/s} \quad (22)$$

3.3 拉深工艺优化结果

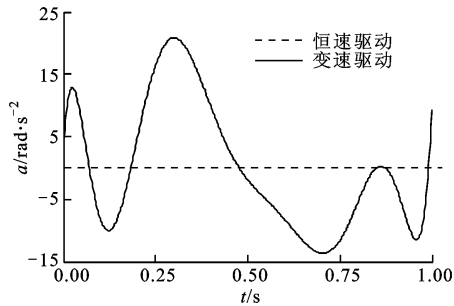
将传动机构的基本几何参数 X 、 Y 、 l_1 、 l_2 、 l_3 、 l_4 ,分别取为0.04、0.24、0.175、0.615、0.19和0.198 m,由于式(16)~式(22)构成的优化目标含有等式约束,且是多变量的非线性约束问题,所以选用可变容差遗传算法^[10]来求解该优化问题,得到的最优解 $(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_9) = (1.213 \ 2, -1.029 \ 6, 7.773 \ 8, -10.989 \ 2, 22.046 \ 8, -19.290 \ 4, 27.514 \ 7, -12.900 \ 4, 17.618)$,其对应的曲柄输入与滑块输出运动特性分别如图4和图5所示。



(a) 曲柄输入转角

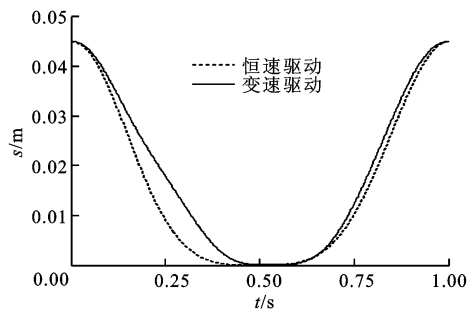


(b) 曲柄输入转速

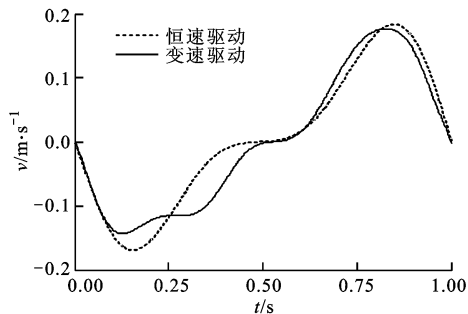


(c) 曲柄输入加速度

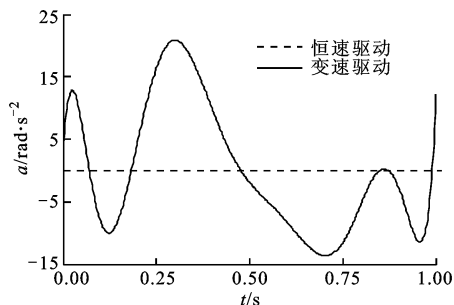
图4 拉深工艺输入运动特性曲线



(a) 滑块输出位移



(b) 滑块输出速度



(c) 滑块输出加速度

图5 拉深工艺输出运动特性曲线

从图4和图5中可以看出,输入和输出工艺曲线满足式(17)、式(18)的首尾相等、过渡平滑连续,从而滑块实现了慢速加工和快速回程.在图5中预设的拉深加工区间($0\text{ m}<s<0.01\text{ m}$)内,滑块近乎等速度运动,且速度介于钢材的允许加工速度范围内,完全符合要求,表明该拉深工艺 Bezier 曲线的优化模型设计合理,能够满足实际加工的需求,可以为大批量工艺曲线的优化和设计提供一种可行的解决方案.

4 结 论

本文采用 Bezier 曲线轨迹规划方法对伺服压力机加工工艺建立了一般数学模型,并优化设计了伺服压力机曲柄输入运动曲线和滑块输出运动曲线.拉深工艺实例的优化设计表明,该 Bezier 曲线轨迹规划方法是可行和有效的,可为大批量地工艺曲线优化和设计提供一种可行的解决方案,为伺服压力机的柔性化发展提供了理论依据.

参考文献:

- [1] 孙友松,何寄平,方雅,等. 交流伺服驱动与成形装备节能 [J]. 锻压装备与制造技术, 2009(5): 29-31.
SUN Yousong, HE Jiping, FANG Ya, et al. The AC servo drive and energy-saving of the forming equipment [J]. Metal Forming Equipment & Manufacturing Technology, 2009(5): 29-31.
- [2] 赵升吨,王军,何予鹏,等. 机械压力机节能型气压式制动方式设计理论 [J]. 机械工程学报, 2007, 43(9): 16-20.
ZHAO Shengdun, WANG Jun, HE Yupeng, et al. Design theory of an energy-saving pneumatic power brake mode for mechanical press [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(9): 16-20.
- [3] 王前进,潘晓涛,孙友松. 4 000 kN 伺服机械压力机冲压工艺库的研究 [J]. 机械工程师, 2011(4): 27-29.
WANG Qianjin, PAN Xiaotao, SUN Yousong. Research on stamping process program library of 4 000 kN servo mechanical press [J]. Mechanical Engineer, 2011(4): 27-29.
- [4] 陈岳云,郭为忠,高峰. 基于 NURBS 曲线的伺服压力机冲压过程建模与加工工艺轨迹规划 [J]. 上海交

通大学学报, 2009, 43(1): 138-142.

CHEN Yueyun, GUO Weizhong, GAO Feng. NURBS-based feature modeling and trajectory planning for ram motion of servo mechanical presses [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2009, 43(1): 138-142.

- [5] YAN H S, YEH C C. Integrated kinematic and dynamic designs for variable-speed plate cam mechanisms [J]. Journal of Mechanical Engineering Science, 2011, 225(1): 194-203.
- [6] YAN H S, TSAI W J. Motion adaptation of cam-follower systems by varying input speeds [J]. Journal of Mechanical Engineering Science, 2008, 222(3): 459-472.
- [7] PRAUTZSCH H, BOEHM W, PALUSZNY M. Bezier and B-spline techniques [M]. New York, USA: Springer, 2002: 5.
- [8] 何德誉. 专用压力机 [M]. 北京:机械工业出版社, 1994: 100-102.
- [9] WICK C, BENEDICT J T, VEILLEUX R F. Tool and manufacturing engineers handbook [M]. Dearborn, USA: Society of Manufacturing Engineers, 1983: 163.
- [10] 尚万峰,赵升吨,申亚京. 变容差遗传算法求解多约束问题的研究 [J]. 西安交通大学学报, 2007, 41(11): 1267-1270.
SHANG Wanfeng, ZHAO Shengdun, SHEN Yajing. Genetic algorithm and flexible tolerance algorithm hybridized for global optimization problems with multiple constraints [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2007, 41(11): 1267-1270.

[本刊相关文献链接]

交流伺服系统脉冲序列位置控制研究. 2009, 43(12): 35-39.
大范围视觉伺服方法在空间机器人上的应用. 2009, 43(1): 85-89.
三角 Bézier 曲面粗加工刀轨生成算法. 2011, 45(3): 70-74.
三作用多泵多马达输出转速和转矩的理论分析. 2011, 45(3): 81-84.
离心泵四面体网格质量衡量准则及优化算法. 2011, 45(1): 100-105.
伺服系统 Hammerstein 非线性模型及参数辨识方法研究. 2010, 44(3): 42-46.

(编辑 管咏梅)