

球头铣刀铣削轮廓曲面的有效切削速度分析

杨炬, 胡小秋, 程寓, 方静弦

南京理工大学; 工信部高端装备制造技术协同创新中心

摘要: 对球头铣刀加工轮廓曲面的有效速度进行研究, 考虑到球头铣刀倾角变化和工件曲率半径变化, 建立了球头铣刀切削凹凸轮廓曲面的干涉模型。采用相对加工倾角的方式解决了高角度铣削的干涉问题, 并根据实际有效切削直径得到凹凸轮廓曲面的有效切削速度。研究表明: 采用小切入角度和大切出角度切削加工曲面时, 有效切削速度较小; 铣削加工凹曲面时受切深影响较大, 凸曲面主要受前后刀轨影响较大。

关键词: 球头铣刀; 轮廓曲面; 曲率半径; 刀具干涉; 有效切削速度

中图分类号: TG714; TH162.1

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1000-7008.2019.11.010

Study on Effective Cutting Speed of Milling Contour Surfaces of Ball-end Milling Cutter

Yang Ju, Hu Xiaoqiu, Cheng Yu, Fang Jingxian

Abstract: The effective cutting speed of machining contour surfaces is studied with ball-end milling cutter in this paper. Considering the variation of the inclination angle of the ball-end milling cutter and the radius of the curvature of work-piece, the interference model of concave and convex contour surface milling by ball-end milling cutter is established. The interference problem of high-angle milling is solved by means of the relative machining inclination angle, and according to the actual effective cutting diameter, the effective cutting speed of machining the concave-convex contour surface is obtained. The research results show that the effective cutting speed is small when milling the curved surface with a small plunging angle and a large cutting-out angle, and the concave surface is more affected by the depth of cut during the milling process, and the convex curved surface is mainly affected by the front and rear tool rails.

Keywords: ball-end milling cutter; contour surface; radius of curvature; tool interference; effective cutting speed

1 引言

凹凸轮廓曲面由于弧形的美观性和良好的功能特性, 广泛应用于航天和汽车行业^[1], 如航空发动机的叶片存在大量的凹凸曲面。考虑到其几何特殊

性, 在不同类型凹凸曲面情况下, 曲面曲率和加工倾角会对切削刃的有效速度产生影响, 而有效切削速度也会影响表面完整性、切削力和切削温度等^[2]。

球头铣刀用于仿形和特殊用途铣削加工时, 复杂曲面具有较好的自适应性, 尤其适用于加工航空发动机叶片。为此, 越来越多的学者对球头铣刀斜面铣削进行研究, 建立了一系列关于表面完整

收稿日期: 2019年5月

- [6] Umbrello D, Rotella G. Experimental analysis of mechanisms related to white layer formation during hard turning of AISI 52100 bearing steel[J]. *Journal of Materials Science*, 2012, 28(2): 205-212.
- [7] Anand Ramesh, Shreyes N Melkote. Modeling of white layer formation under thermally dominant conditions in orthogonal machining of hardened AISI 52100 steel[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2008, 48(3-4): 402-414.
- [8] 陈涛, 刘献礼, 李素燕, 等. 高速硬切削加工表面白层形成机理研究[J]. *机械工程学报*, 2015, 51(23): 182-188.
- [9] Darken L S, Gurry R W. *Physical chemistry of metals*[M]. New York: McGraw-Hill Book Company, 1953: 396-397.
- [10] 段春争, 张方圆, 寇文能, 等. 高速硬切削表面白层马氏

体相变研究[J/OL]. *吉林大学学报(工学版)*: 1-9 [2019-03-22]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/22.1341.t.20181114.1410.017.html>.

- [11] 张凌飞. 硬态干式切削材料被加工表面白层的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2004.

第一作者: 宋陶然, 硕士研究生, 四川大学机械工程学院, 610041 成都市

First Author: Song Taoran, Postgraduate, School of Mechanical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610041, China

通信作者: 殷鸣, 博士, 副教授, 四川大学机械工程学院, 610041 成都市

Corresponding Author: Yin Ming, Doctor, Associate Professor, School of Mechanical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610041, China

性^[3,4]、振动和变形^[5,6]及刀具磨损^[7]的模型。虽然研究的理论和模型逐渐趋于成熟,但是仅对斜面进行了研究,不能代替实际曲面加工,还需对球头铣刀铣削复杂曲面进行研究。王亮^[8]提出了一种适用于三维曲面加工的刀具切触区域半解析模型,通过改进 Z-Map 模型来实现三维曲面的铣削力预测,但仅考虑了刀具本身,未考虑到切削用量变化的影响;Ikua B. W. 等^[9]建立了球头铣刀铣削凹凸轮廓曲面的模型,研究了各种切削条件和切削方式的影响,结果表明,在凹凸曲面轮廓加工中,切削力分量随位置角增大而减小,而在斜面中分量无变化,但忽略了对球头铣刀速度进行修正;郑阳^[10]在研究五轴加工复杂薄壁曲面时,考虑了残留高度与行距用于规划刀具在曲面上的走刀路径和优选切削用量,因不需要考虑刀具倾角及曲面曲率,该方法能快速建立模型。

应用球头铣刀加工凹凸轮廓曲面时,将伴随球头铣刀倾角的变化和工件曲率半径的变化,从而很难以自动规划的走刀路径和优选的切削用量描述凹凸轮廓曲面铣削过程。因此,加工复杂曲面时过切和干涉问题不可避免^[11]。

本文在文献[7]的斜面切削基础上,根据球头铣刀倾角和工件曲率半径的变化,建立球头铣刀切削轮廓曲面的干涉模型,采用相对加工倾角的方式解决高角度铣削的干涉问题,根据实际有效切削直径得到凹凸轮廓曲面的有效切削速度。轮廓曲面切削见图1和图2。

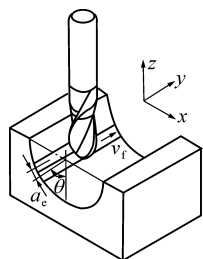


图1 凹曲面切削

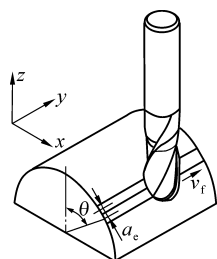


图2 凸曲面切削

2 球头铣刀切削干涉模型

在加工斜面、凹凸曲面和复杂变曲率的曲面过程中,刀具和工件均会产生干涉。实际生产中通常采用小于 30°的刀具倾角^[12],避免刀具与工件发生干涉。但此方法的加工效率较低,不能实现批量生产,因此需要对球头铣刀建立切削干涉模型。

2.1 斜面干涉

如图3所示,当球头铣刀倾斜切削平面时,其铣削等效为球头铣刀切削斜面。随着斜面倾角增加会发生干涉,因此,需找出球头铣刀铣削斜面的干涉临

界角。干涉角 θ 与切削深度 a_p 的关系式为

$$a_p \geq r - r \sin \theta \quad (1)$$

取刀具半径 $r = 5 \text{ mm}$,由式(1)得到干涉角 θ 和切削深度 a_p 的关系曲线(见图4)。

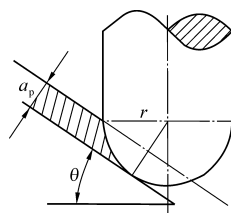


图3 斜面干涉

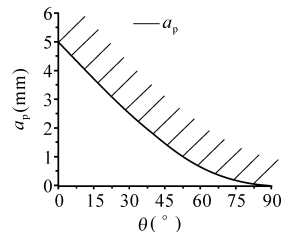


图4 干涉角与切削深度关系曲线

2.2 凹曲面干涉

根据文献[13]中的球头铣刀铣削轮廓曲面模型,建立球头铣刀铣削凹曲面的模型。建模时需充分考虑曲率半径 R 。当球头铣刀所在切削位置的倾角逐渐增加时就会发生干涉(见图5)。因此,需找出球头铣刀铣削凹曲面的干涉临界角。曲率半径和干涉角的关系式为

$$[r + (R + a_p - r) \sin \theta]^2 + (R + a_p - r)^2 \cos^2 \theta \leq R^2$$

经整理得

$$\theta \leq \arcsin \frac{R^2 - (R + a_p - r)^2 - r^2}{2r(R + a_p - r)} \quad (2)$$

当切削深度 $a_p = 0.5 \text{ mm}$,得到曲率半径和干涉角的关系曲线见图6。

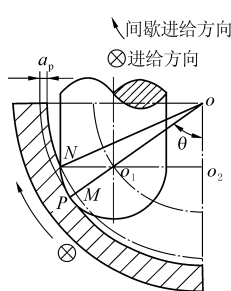


图5 凹曲面干涉

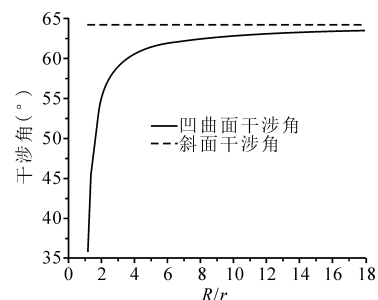


图6 曲率半径和干涉角关系曲线

由图6可知,当 $R/r \gg 6$ 时,干涉角增加缓慢并趋于稳定,曲率半径与干涉角变化不显著。因此,只需考虑 $1 \leq R/r \leq 6$ 区间的曲线,并加以借鉴参考。当 $R/r = 1$ 时,安全范围非常小,极易发生干涉,且刀具半径对干涉角的变化起到决定性作用。此时,干涉角在 35°左右,证明了实际加工过程中需取小于 30°的倾角。当 $1 < R/r < 2$ 时,安全范围有所增加,干涉角在该区间内上升最快,曲率半径开始发挥作用。当 $2 < R/r < 6$ 时,随着 R 的增加,安全范围进一步增大,但曲线上趋势已经开始放缓,曲率半径对

干涉角的变化作用开始弱化。当 $R/r \gg 6$ 时,曲率半径对干涉角变化不敏感,且当凹曲面曲率半径趋于无穷大时变为斜面干涉角。

2.3 凸曲面干涉

与球头铣刀铣削凹曲面模型类似,建立球头铣刀铣削凸曲面模型时,不仅要考虑曲率半径,还需考虑前后走刀的刀路轨迹。当球头铣刀所在切削位置的倾角逐渐增加时会发生干涉,且发生干涉的条件要比凹曲面更加严格(见图7)。因此,需找出球头铣刀铣削凸曲面的干涉临界角。

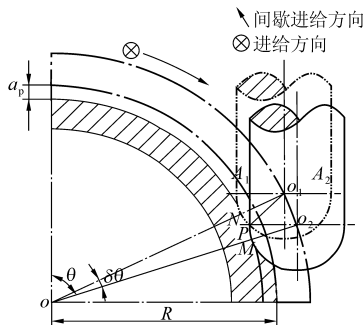


图7 凸曲面干涉

曲率半径和干涉角的关系式为

$$\begin{cases} \angle OO_1P + \angle OO_2P + \delta\theta = \angle O_1PO_2 \\ \angle OO_1P \geq \angle OO_2P \\ \angle OO_2P = 90^\circ - \theta \\ (R + r - a_p)\delta\theta = r\angle O_1PO_2 \\ (R - a_p)\delta\theta = a_e \end{cases}$$

化简可得

$$\theta \leq 90 \left(1 - \frac{a_e}{\pi r} \right) \quad (3)$$

由式(3)可知,当凸轮廓等角度切削的名义行距 a_e 和球头铣刀半径 r 和一定时,所有凸曲面干涉角与凸曲面的曲率无关。因此,可以直接根据前后走刀轨迹来恒定名义行距进行切削。取 $a_e = 1\text{mm}$, $\theta = 90 - \frac{18}{\pi} = 84.2704^\circ$ 。

3 球头铣刀有效切削速度模型

由于涉及角度较广,特别是在高角度铣削时均会发生干涉。为解决干涉问题,采用凹凸曲面加工方式(见表1)。在该加工方式中,考虑了刀具干涉、曲率半径和加工倾角等因素。表中,12(7.5°) < 56.32°表示凹曲面半径 $R = 12\text{mm}$,名义行距间的最大角度为7.5°,由式(2)和式(3)得出的干涉角为56.32°。此处名义行距与斜面模型行距不同,轮廓切削的行距按照等角度划分,取名义行距 $a_e =$

1mm。根据公式推算出凹曲面 $\theta = \frac{18 - a_e}{\pi(R - r + a_p)}$ 和凸曲面 $\theta = \frac{18 - a_e}{\pi(R + r - a_p)}$,因此凹凸曲角度均不同。

表2为相对加工角与曲率的对应关系,取表1的临近干涉角度作为刀具与工件的相对加工角。在临近干涉角度之前,刀具和机床绝对坐标系保持相对一致;在临近干涉角度之后,均采用该相对加工倾角。

表1 加工方式

类型	凹曲面									
半径	12(7.5°) < 56.32°					16(4.5°) < 58.96°				
角度(°)	15	30	45	60	75	09	27	45	63	81
类型	凹曲面									
半径	19(3.75°) < 60.01°					23(3°) < 60.88°				
角度(°)	15	30	45	60	75	06	24	42	60	78
类型	凸曲面									
半径	6(5°) < 84.27°					8(4.5°) < 84.27°				
角度(°)	10	30	50	70	90	09	27	45	63	81
类型	凹曲面									
半径	14(3°) < 84.27°					20(2.25°) < 84.27°				
角度(°)	06	24	42	60	78	09	27	45	63	81

表2 相对加工角与曲率对应关系

类型	凹曲面				凸曲面			
面曲率半径 $R(\text{mm})$	12	16	19	23	6	8	14	20
相对加工角 $\beta(^\circ)$	45	54	60	60	70	81	78	81

3.1 凹曲面有效切削速度

切削速度影响切削温度和刀具磨损。当球头铣刀铣削复杂曲面时,切削速度变化会带来叠加影响。实际加工中,通常采用球头铣刀的有效直径。尤其是在小切削条件下,根据有效切削直径来计算切削速度尤为重要。有效直径计算为

$$D_e = 2r \cos \left[\arcsin \left(\frac{2ra_p - a_p^2 - 2r^2 - 2Ra_p + 2Rr}{2r(R + a_p - r)} \right) - \theta \right] \quad (4)$$

取最大切削速度为60m/min,并根据公式 $v_e = \frac{\pi n D_e}{1000}$,用刀具的最大直径来计算转速。此时恒定机床转速为2000r/min。球头部分与凹曲面未加工表面相接触的最大直径即为球头铣刀的有效直径,并可根据有效直径计算出凹曲面的有效切削速度。为此,建立基于曲率半径和角度变化的凹曲面球头铣刀有效直径模型(见图8)。

根据凹曲面的加工方式,临近干涉角之后的角度均用此相对加工倾角。由于凹曲面的特殊性,在刀具切出凹曲面的过程中,伴随着切深的变化,刀具有效直径逐渐变小。因此,建立基于曲率半径和角度变化的凹曲面的球头铣刀有效直径模型见图9。

凹曲面刀具有效直径变化的临界角度(即 M_1 正好落在 OA 上),计算式为

$$D_{lim} = 180^\circ - \arccos \left[\frac{-r \sin \left(-\beta + \arcsin \left(\frac{2Rr + 2a_p r - 2Ra_p - 2r^2 - a_p^2}{2r(R + a_p - r)} \right) \right)}{R + a_p - r} \right] \quad (5)$$

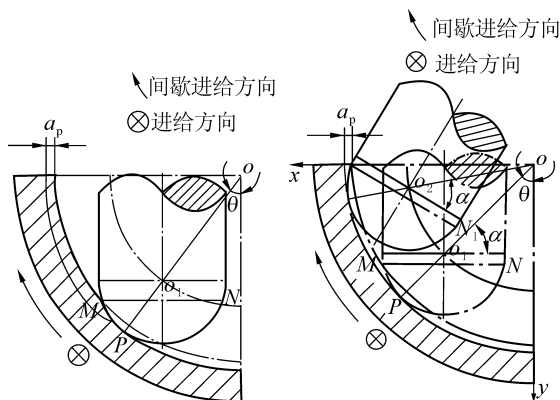


图8 凹曲面有效直径 图9 凹曲面有效直径临界处

求解临界角度的有效直径,即求解在笛卡尔坐标中 M_1 和 N_1 的最短距离。根据横坐标之差,求解 $x_{M1} - x_{N1}$ 。再通过余弦定理求最终有效直径。根据所得到的凹曲面有效直径,得到凹曲面有效切削速度(见图10)。计算式为

$$\begin{cases} x_{M1} = (R + a_p - r) \sin \theta \\ + \sqrt{(R + a_p - r)^2 \sin^2 \theta - [(R + a_p)^2 - 2(R + a_p)r]} \\ 2(R + a_p - r) \sin \theta - 2(R + a_p) \times \\ x_{N1} = \frac{\tan(\theta + \beta - 90^\circ) - x_{M1} + \tan^2(\theta + \beta - 90^\circ)}{1 + \tan^2(\theta + \beta - 90^\circ)} \\ D_{e1} = \frac{x_{M1} - x_{N1}}{\cos(\theta + \beta - 90^\circ)} \end{cases} \quad (6)$$

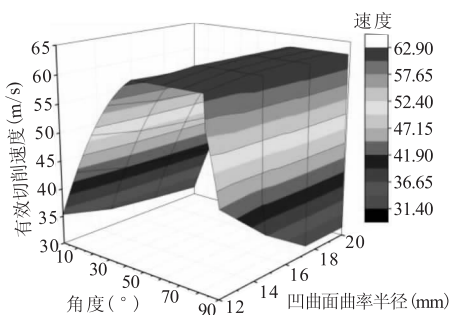


图10 凹曲面有效切削速度

由图10可知,在凹曲面铣削过程中,不同曲率的凹曲面均满足“三段式”(即上升阶段—平稳阶段—下降阶段)切削速度趋势。在上升阶段,角度和曲率起主要作用,且凹曲面曲率半径越大,有效切削速度越小;在平稳阶段,曲率半径起主要作用,且曲率半径增大,有效速度略微增加;在下降阶段,切

深和球头铣刀半径起限制作用,且曲率半径越大,下降幅度越大。

3.2 凸曲面有效切削速度

与凹曲面有效直径模型类似,球头部分与凸曲面未加工表面相接触的最大直径为球头铣刀的凸曲面有效直径,并可根据有效直径计算出凸曲面的有效切削速度。为此,建立基于曲率半径和角度变化的凸曲面球头铣刀有效直径模型见图11。有效直径计算式为

$$D_e = -2r \cos \left(180^\circ + \frac{90^\circ}{(R - a_p)\pi} + \arccos \left(\frac{(R + r - a_p) \left[1 - \cos \frac{180^\circ}{(R - a_p)\pi} \right]}{2r \sin \frac{90^\circ}{(R - a_p)\pi}} \right) - \theta \right) \quad (7)$$

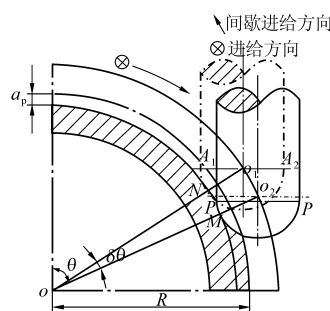


图11 凸曲面有效直径

根据凸曲面的加工方式,临近干涉角之后可采用此相对加工倾角。调整加工策略,并在刀具切出凸曲面的过程中,伴随着切深的变化,刀具仅与前后走刀的刀路轨迹有关。凸曲面刀具有效直径变化的临界状态见图12。

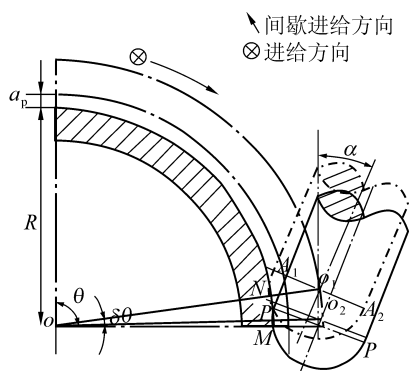


图12 凸曲面有效直径临界处

由图13可知,相对于凹曲面的“三段式”,不同曲率的凸曲面均为上升阶段—平稳阶段。在上升阶段,角度起主要作用,且角度越大其上升速度越大;在平稳阶段,凸曲率半径起主要作用,且随着曲率半径增大,有效速度略微增加,当 $R \gg 2r$ 时,有效速度不再明显增加。

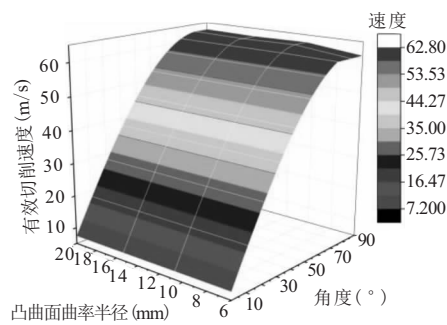


图 13 凸曲面有效切削速度

4 结语

针对球头铣刀加工轮廓曲面的有效速度进行了研究。结果表明:在凹凸曲面铣削过程中,不同曲率的凹曲面均满足“三段式”(即上升阶段—平稳阶段—下降阶段)切削速度趋势,而凸曲面有效切削速度满足上升—平稳趋势;当凹曲面曲率半径 $R > 12\text{mm}$ 时,有效切削速度在 83° 之后开始下降,此时需适当提高转速用于恒定有效切削速度;铣削加工凹曲面时,切削深度对其影响较大,尤其在小半径大角度的凹曲面的拐点处,有效切削速度通常会发生突变,后期自由轮廓曲面铣削时需对刀具轨迹进行补偿,而铣削加工凸曲面时,前后刀轨对其影响较大;当轮廓曲面同时存在凹凸曲面时,应优先考虑加工凹曲面,以保证整体加工质量;当铣刀与工件的切入角较小或切出角较大时,应适当提高转速以获得较为平稳的有效切削速度,提高整体加工效率。

本文加工方式可用于等曲率轮廓曲面,可将其扩展到不同曲率轮廓曲面加工。后续将继续研究球头铣刀的表面完整性、切削温度和刀具磨损等,并通过试验和仿真来研究模型的完整性。

参考文献

- [1]高东方. 变切削参数铣削加工中刀具磨损辨识[D]. 沈阳:沈阳工业大学,2005.
- [2]Ravai Nagy S, Paşca Ioan, Lobontiu M, et al. Experimental research of effective cutting speed influence on surface roughness in ball end milling of C45 material with hardness 54 HRC[J]. Applied Mechanics & Materials, 2014, 657: 53 – 57.

- [3]陈晓晓. 基于加工过程建模的模具钢多轴高速铣削表面完整性研究[D]. 济南:山东大学,2014.
- [4]Fujita T, Kuromi R, Usuki H, et al. Study on analysis of cutting mechanism of ball end mill for concave and convex spherical surface using 3D-CAD[J]. Key Engineering Materials, 2017, 749: 136 – 140.
- [5]胡林华. 钛合金超精切削金刚石刀具磨损及其超声振动抑制的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2015.
- [6]Kim G M, Cho P J, Chu C N. Cutting force prediction of sculptured surface ball-end milling using Z – Map[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2000, 40 (2): 277 – 291.
- [7]冯闯. 基于钛合金切削的硬质合金球头铣刀磨损研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2015.
- [8]王亮. 基于CWE半解析模型的曲面加工铣削力预报[D]. 大连:大连理工大学,2013.
- [9]B W Ikua, H Tanaka, F Obata, et al. Prediction of cutting forces and machining error in ball end milling of curved surfaces-I theoretical analysis[J]. Precision Engineering, 2001, 25(4): 266 – 273.
- [10]郑阳. 五轴数控加工复杂薄壁曲面切削参数研究与仿真[D]. 鞍山:辽宁科技大学,2015.
- [11]冯慧泽. 铣削变曲率面硬态模具钢的让刀误差预测研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2016.
- [12]董久虎, 湛永祥, 李双跃, 等. 球头铣刀加工倾角对汽轮机叶片变形影响[J]. 机床与液压, 2013(17): 53 – 55.
- [13]Hao H, Wang B, Tang W. Prediction of instantaneous milling force taking runout into account in peripheral milling of curved surface[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 79(1 – 4): 49 – 56.

第一作者:杨炬,硕士研究生,南京理工大学机械工程学院,210094 南京市

First Author: Yang Ju, Postgraduate, School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China

通信作者:胡小秋,副教授,南京理工大学机械工程学院,210094 南京市

Corresponding Author: Hu Xiaoqiu, Associate Professor, School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China