

单晶 SiC 基片的集群磁流变平面抛光加工

潘继生¹ 阎秋生¹ 徐西鹏² 童和平¹ 祝江停¹ 白振伟¹

1. 广东工业大学, 广州, 510006

2. 华侨大学脆性材料加工技术教育部工程研究中心, 厦门, 361021

摘要: 基于集群磁流变效应超光滑平面抛光理论及研制的试验装置, 对单晶 SiC 基片进行了平面抛光试验研究。研究表明, 金刚石磨料对单晶 SiC 基片具有较好的抛光效果; 加工间隙在 1.4mm 以内抛光效果较好, 30min 抛光能使表面粗糙度值减小 87% 以上; 随着加工时间的延长, 表面粗糙度越来越小, 加工 30min 时粗糙度减小率达到 86.54%, 继续延长加工时间, 加工表面粗糙度趋向稳定。通过优化工艺参数对直径为 50.8mm(2 英寸)6H 单晶 SiC 进行了集群磁流变平面抛光, 并用原子力显微镜观察了试件加工前后的三维形貌和表面粗糙度, 发现经过 30min 加工, 表面粗糙度 R_a 从 72.89nm 减小至 1.9nm, 说明集群磁流变效应超光滑平面抛光用于抛光单晶 SiC 基片可行有效且效果显著。

关键词: 单晶 SiC; 集群磁流变; 平面抛光; 表面粗糙度

中图分类号: TG749; TH161

DOI: 10.3969/j.issn.1004-132X.2013.18.016

Cluster Magnetorheological Effect Plane Polishing on SiC Single Crystal Slice

Pan Jisheng¹ Yan Qiusheng¹ Xu Xipeng² Tong Heping¹ Zhu Jiangting¹ Bai Zhenwei¹

1. Guangdong University of Technology, Guangzhou, 510006

2. Engineering Research Center for Brittle Materials Machining,
Huaqiao University, Xiamen, Fujian, 361021

Abstract: The super smooth plane polishing theory and its test equipment of the cluster magnetorheological effect were applied in the plane polishing process of SiC single crystal. The results show that diamond abrasive has good polishing effects for SiC single crystal slice. The working gap vaule within 1.4mm can get good machining results, which can get more than 87% of surface roughness reduction within 30min. Also, the surface roughness becomes smaller by extending the finishing time, 86.4% of the surface roughness reduction is attained by 30min, but extend the finishing time, surface roughness tends to be stable. At last, cluster magnetorheological effect test equipment was used to polish 2 inches 6H-SiC single crystal slice with above optimizing process parameters. By using atomic force microscopy to measure the three-dimensional morphology and surface roughness of the slice before and after processing, it is found that surface roughness R_a downs to 1.9nm from 72.89nm after 30min, which proves that using cluster magnetorheological effect plane polishing test equipment to polish SiC single crystal is feasible and the results are obvious.

Key words: SiC single crystal; cluster magnetorheological; plane polishing; surface roughness

0 引言

SiC 是继 Si、GaAs 之后发展起来的第三代半导体材料, 具有大的禁带宽度、高饱和电子漂移速度、高击穿电场强度、高热导率、低介电常数和强抗辐射能力等优良的特性, 在高温、高频率、大功率、抗辐射、不挥发性存储器件及短波长光电子器件和光电集成等应用场合是理想的半导体材料之一, 特别是在极端条件和恶劣环境下应用时, SiC 器件的特性远远超过了 Si 器件和 GaAs 器件^[1-2]。

作为半导体衬底材料的单晶 SiC 基片, 要求表面超光滑且无缺陷、无损伤, 才能满足外延膜生长的要求。SiC 基片的表面加工质量直接影响到

器件的性能, 表面微小的缺陷均会遗传给外延生长膜而成为器件的致命缺陷^[3-4]。但是, 单晶 SiC 硬度仅次于金刚石, 其莫氏硬度达到 9.2, 并且化学稳定性高, 常温下能抵抗酸性腐蚀剂, 故单晶 SiC 基片的平坦化加工成为其应用所必须解决的关键问题。

本文基于集群磁流变超光滑平面抛光新工艺方法^[5-7], 对单晶 SiC 基片进行集群磁流变平面抛光加工, 研究加工过程参数对表面粗糙度的影响, 分析集群磁流变抛光加工单晶 SiC 基片的可行性和有效性。

1 加工原理及试验条件

1.1 加工原理

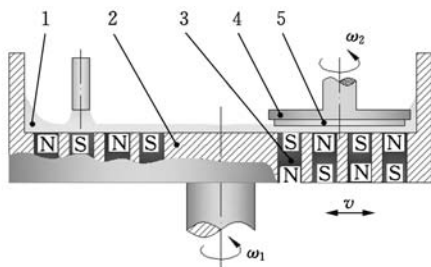
集群磁流变超光滑平面抛光的原理是基

收稿日期: 2012-03-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U1034006, 50875050)

于磁流变效应将磨料微粒混入磁流变液作为抛光工作液,以小尺寸磁性体为基体形成磁流变效应研磨刷约束聚集游离磨料,运用集群作用原理由多点磁流变效应研磨刷的阵列组合构成抛光盘,在其表面形成磨料均匀弥散分布的黏弹性介质层——柔性磁流变抛光垫,实现对磨粒姿态、运动轨迹、滞留时间和磨料浓度的控制,实现高效率和高精度超光滑抛光加工。

集群磁流变平面抛光加工原理如图 1 所示,磁性体镶嵌在抗磁材料抛光盘基体上,工件和抛光盘绕各自的轴线旋转,工件与抛光盘在一定幅度内摆动,磁流变抛光工作液注入工件与抛光盘之间。

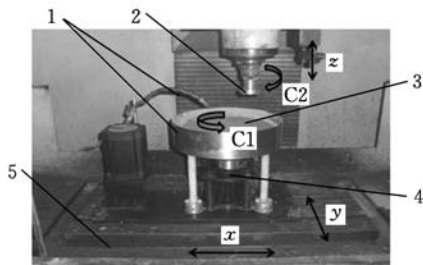


1. 柔性磁流变抛光垫 2. 抗磁抛光盘基体
3. 集群磁性体 4. 工件主轴 5. 工件

图 1 集群磁流变平面抛光工艺原理

1.2 试验装置

集群磁流变平面抛光试验装置基于集群磁流变平面抛光工艺原理设计,利用数控铣床的伺服运动和编程控制实现抛光加工过程需要的运动,研制的试验装置如图 2 所示。



1. 磁流变工作液循环系统 2. 工件装夹装置 3. 抛光盘
4. 可调磁场系统 5. 机床本体

图 2 集群磁流变平面抛光加工试验装置

加工表面的三维形貌和微观粗糙度采用美国 Veeco 公司的 DI/MultiMode 原子力显微镜进行观察,工件表面粗糙度采用 Mahr XT20 表面粗糙度轮廓仪进行测量,磁场强度使用 LZH630H 特斯拉计进行测量。

1.3 磁流变抛光工作液

磁流变液由微米级尺寸的铁磁性粒子分散于载液中,并加入表面活性添加剂,形成非胶体悬浮液,载液为硅油或水,分别得到油性或水性磁流变

液,磁流变抛光工作液是在磁流变液中混入一定比例的磨料得到的。试验中制备水基磁流变抛光工作液,主要成分包括铁磁粒子(羰基铁粉)、载液(水)、磨粒(金刚石粉)、分散剂(甘油)和防锈剂等。

2 试验结果分析

在集群磁流变平面抛光过程中,磨料种类、抛光时间、加工间隙、磁强强度、工件与抛光盘转速比、铁粉浓度和磨料浓度均会影响到加工效果^[8],前期研究已经得出了转速比、铁粉浓度和磨料浓度的最优经验值。

为了分析集群磁流变平面抛光对单晶 SiC 基片抛光的效果,在选取合理的转速比、铁粉浓度和磨料浓度的基础上,通过选取不同的磨料种类、抛光时间、加工间隙等基本工艺参数对单晶 6H-SiC 研磨片进行了抛光试验,并对工艺参数进行了优化。

为了便于比较试验效果,本文采用试验前粗糙度 Ra_b 与试验后粗糙度 Ra_a 的变化率 ΔRa ^[9] 来评估试验效果:

$$\Delta Ra = \frac{(Ra_b - Ra_a)}{Ra_b}$$

2.1 不同磨料种类对加工效果的影响

集群磁流变平面抛光与其他抛光方法一样,磨料对抛光加工效果及工艺流程具有决定性作用。为此选取二氧化硅(平均粒径为 $3.5\mu\text{m}$)、氧化铝(平均粒径为 $3\mu\text{m}$)、氧化铈(平均粒径为 $3\mu\text{m}$)和金刚石(W4)四种磨料,分别配制不同种类磨料相同体积比的水基抛光工作液,在抛光盘端面磁场强度约 0.2T、抛光盘转速为 60r/min、工具头转速为 350r/min、工件摆速为 1m/min、摆幅为 10mm、加工间隙为 1.4mm、加工时间为 30min 和工件原始粗糙度 Ra 约为 41.9nm 的工艺条件下,抛光加工 30min 后,通过比较表面粗糙度值来反映不同磨料对单晶 SiC 的抛光效果,加工效果如图 3 所示。

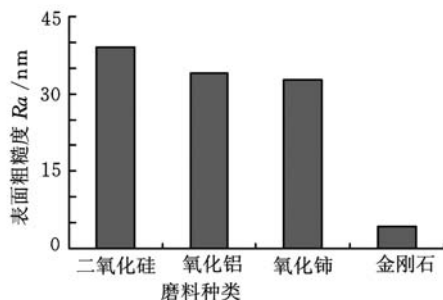


图 3 不同磨料在相同加工条件下获得的表面粗糙度

由图 3 可见,硬度比单晶 SiC 高的金刚石磨料抛光效果最显著,在 30min 内能使粗糙度 Ra

减小到 4.2nm;而硬度较低的磨料对单晶 SiC 的抛光效果相对较差,从而验证了金刚石磨料适合于单晶 SiC 材料的集群磁流变抛光。

2.2 加工间隙对加工效果的影响

如上所述,集群磁流变平面抛光加工过程中工件与抛光盘是非接触的,其相隔距离定义为加工间隙。在抛光盘端面磁场强度约 0.2T、抛光盘转速为 60r/min、工具头转速为 350r/min、工件摆速为 1m/min、摆幅为 10mm、加工时间为 30min 和原始粗糙度 R_a 约为 42nm 的工艺条件下,对同一批次的 6H-SiC 研磨片采用不同的加工间隙得到的表面粗糙度变化情况如图 4 所示。

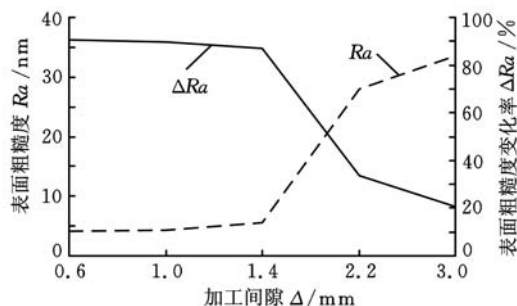


图4 不同加工间隙对 R_a 和 R_a 变化率的影响

从图4可以看出,相同的条件下随着加工间隙的增大,表面粗糙度变化率越来越小,加工表面粗糙度越来越接近原始表面,加工间隙小于 1.4mm 时表面粗糙度变化率较大,30min 内能使表面粗糙度变化率达到 87% 以上。因为相对于某一磁性体,磁场在空间内是指数级衰减的,不同的加工间隙磁场强度差别很大。根据磁畴理论^[10-11],在外加磁场作用下,磁流变液发生相变的三个临界磁场分别为 H_{c1} 、 H_{c2} 和 H_{c3} 。当 $H < H_{c1}$ 时,磁流变液完全处于流体状态,铁磁颗粒随机分布,此时的磁流变液无法完成对单晶 SiC 的抛光;当 $H_{c1} < H < H_{c2}$ 时,磁流变液开始形成链状结构,链与颗粒共存且随机分布,此时的磁流变液可以实现对单晶 SiC 的抛光,但表面粗糙度变化率极低;当 $H_{c2} < H < H_{c3}$ 时,磁流变液开始形成柱状结构,柱与链共存,加工间隙在 1.4~3mm 范围内的磁流变液处于此种状态,此时的磁流变液可以较有效地实现对单晶 SiC 的抛光,适合于粗糙度变化率较小的单晶 SiC 抛光;当 $H > H_{c3}$ 时,颗粒全部形成柱状结构,加工间隙在小于 1.4mm 范围内的磁流变液处于此种状态,此时的磁流变液的剪切力最大,可以高效地实现对单晶 SiC 的抛光,适合于粗糙度变化率较大的单晶 SiC 抛光。因而,单晶 SiC 材料的集群磁流变抛光,适宜把加工间隙控制在 1.4mm 以内。

2.3 不同加工时间对加工效果的影响

对同一批次的 4H 单晶 SiC 进行加工试验,在抛光盘端面磁场强度约 0.2T、抛光盘转速为 60r/min、工具头转速为 350r/min、工件摆速为 1m/min、摆幅为 10mm、加工间隙为 1.4mm 和原始粗糙度 R_a 约为 42nm 的加工条件下,采用不同加工时间获得的结果如图 5 所示。

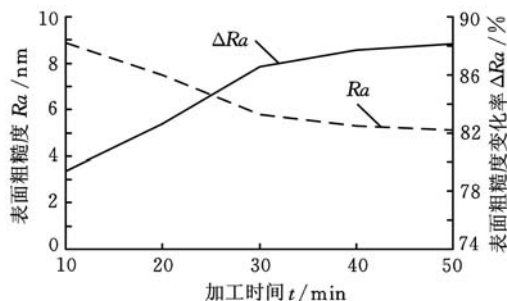


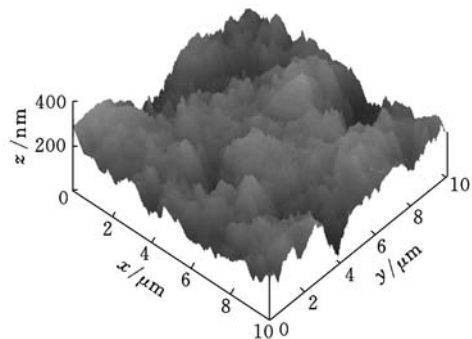
图5 抛光前后粗糙度变化值和变化率

由图5可见,随着加工时间的延长,表面粗糙度值越来越小,加工 10min 后表面粗糙度值由 42nm 减小到 8.9nm,减小幅度超过了 1 个数量级,粗糙度变化率达到 79.35%,之后随着加工时间的延长,加工表面粗糙度值均匀减小,加工 30min 时粗糙度减小率达到 86.54%,继续延长加工时间加工表面粗糙度趋向稳定。这是因为在加工初期前 30min 内,由于工件表面凸起的尖峰处抛光压力较大,抛光垫在这些地方的切削作用较强,因此工件表面粗糙度在此段时间内急速减小;随着工件表面凸起的尖峰高度减小,磨粒的切削作用较之前减弱,因此在 30~50min 内,工件表面粗糙度减小开始平缓,但表面质量还是有所改善,50min 时表面粗糙度变化率达到 88.17%。理论上讲,在加工条件不变、表面粗糙度减小到一定程度后,即使加工时间再长,表面粗糙度也趋近于饱和值。因而,对于单晶 SiC 的集群磁流变抛光,宜将加工时间控制在 30~40min 之间。

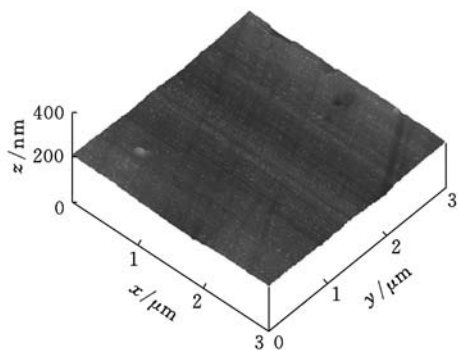
2.4 单晶 SiC 基片集群磁流变平面抛光加工表面分析

选取磁场强度约 0.2T、抛光盘转速为 60 r/min、工具头转速为 350 r/min、工件摆速为 1m/min、摆幅为 10mm、加工间隙为 1.4mm、原始粗糙度 R_a 约 42nm 和加工时间为 30min 的优化工艺参数,对 50.8mm(2 英寸)6H 单晶 SiC 进行了集群磁流变平面抛光,并采用美国 Veeco 公司的 DI/MultiMode 原子力显微镜观察试件表面的三维形貌和表面粗糙度,加工前后的三维表面形貌和粗糙度如图 6 所示。由图 6 可见,抛光后加工表面平滑均匀,经过 30min 加工表面粗糙度

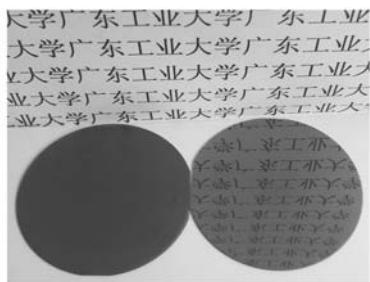
Ra 从 72.89nm 减小到 1.9nm, 减小了一个数量级, 表明集群磁流变平面抛光加工单晶 SiC 基片不但可以获得超光滑表面而且抛光效率比较高, 是一种有效的抛光加工方法。



(a) 6H-SiC 未抛光前 AFM 三维形貌及粗糙度值



(b) 6H-SiC 抛光后 AFM 三维形貌及粗糙度值



(c) 6H-SiC 抛光前后的镜面效果比较图

图 6 6H-SiC 基片集群磁流变抛光加工效果

3 结论

(1) 对于单晶 SiC 基片的集群磁流变平面抛光, 金刚石磨料具有较好的抛光效果, 可以有效减小表面粗糙度。

(2) 抛光盘与工件表面之间的加工间隙决定加工效果, 加工间隙在 1.4mm 以内抛光效果较好, 30min 抛光能使表面粗糙度值减小 87% 以上。

(3) 随着加工时间的延长, 表面粗糙度越来越小, 抛光 30min 表面粗糙度值减小 86.54%, 继续延长加工时间表面粗糙度趋向稳定, 对于单晶 SiC 的集群磁流变抛光, 适宜把时间控制在 30~40min 之间。

(4) 对 50.8mm (2 英寸) 单晶 SiC 基片集群

磁流变平面抛光工艺参数进行优化, 经过 30min 抛光, 表面粗糙度 Ra 从 72.89nm 减小到 1.9nm, 说明集群磁流变效应超光滑平面抛光对单晶 SiC 基片可行有效。

参考文献:

- [1] Zolper J C. Emerging Silicon Carbide Power Electronics Components[C]//Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2005. Twentieth Annual IEEE. Austin TX, 2005: 11-17.
- [2] 张波, 邓小川, 张有润, 等. 宽禁带半导体 SiC 功率器件发展现状及展望[J]. 中国电子科学研究院学报, 2009, 4(2): 111-118.
Zhang Bo, Deng Xiaochuan, Zhang Yourun, et al. Recent Development and Future Perspective of Silicon Carbide Power Devices—Opportunity and Challenge[J]. Journal of CAE IT, 2009, 4(2): 111-118.
- [3] 姜守振, 徐现刚, 李娟, 等. SiC 单晶生长及其晶片加工技术的进展[J]. 半导体学报, 2007, 28(5): 810-814.
Jiang Shouzhen, Xu Xiangang, Li Juan, et al. Recent Progress in SiC Monocrystal Growth and Wafer Machining[J]. Chinese Journal of Semiconductors, 2007, 28(5): 810-814.
- [4] 赵小宁, 李秀清. 国外军事和宇航应用宽带隙半导体技术发展[J]. 半导体技术, 2009, 34(7): 621-625.
Zhao Xiaoning, Li Xiuqing. Overview of the Development of Wide Band-Gap Semiconductor Technology for Military and Aeronautical Applications in Advanced Countries[J]. Semiconductor Technology, 2009, 34(7): 621-625.
- [5] 杨勇. 集群磁流变效应研磨盘的结构优化及研抛加工实验研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2009.
- [6] 严杰文. 集群磁流变效应平面研抛加工特性研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2010.
- [7] 柴京富, 阎秋生, 张鹏程. 磁流变效应微砂轮的磨粒半固着机理研究[J]. 中国机械工程, 2010, 21(22): 2726-2730.
Cai Jinfu, Yan Qiusheng, Zhang Pengcheng. Research on Abrasive Semi-bond Mechanism of MR Effect-based Tiny-grinding Wheel[J]. China Mechanical Engineering, 2010, 21(22): 2726-2730.
- [8] 吴战成. 集群磁流变效应超光滑抛光加工研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2011.
- [9] Jain V K, Ranjan P, Suri V K, et al. Chemo-mechanical Magneto-rheological Finishing (CMMRF) of Silicon for Microelectronics Applications [J]. CIRP Annals—Manufacturing Technology, 2010, 59(1): 323-328.

矩形件优化排样的自适应遗传模拟退火算法

董德威 颜云辉 张 尧 李 骏

东北大学, 沈阳, 110819

摘要: 针对理论上属于 NP 完全问题的矩形件优化排样问题, 提出了一种基于小生境技术的自适应遗传模拟退火算法。研究了将矩形件在板材上的排列方式转换为特定编码的方法, 利用遗传模拟退火算法进行全局优化概率搜索, 考虑到算法中交叉概率和变异概率的选择影响到算法收敛性, 提出了自适应的交叉概率和变异概率, 并通过小生境技术对子辈个体是否替换父辈个体加以控制, 最终得到矩形件排样的最优次序和排放方式, 采用最低水平线策略的启发式排样算法实现自动排样。排样实例表明, 该优化排样算法行之有效, 具有广泛的适应性。

关键词: 矩形件优化排样; 自适应遗传模拟退火算法; 小生境技术; 启发式算法

中图分类号: TP391.7

DOI: 10.3969/j.issn.1004-132X.2013.18.017

Adaptive Genetic Simulated Annealing Algorithm in Optimal Layout of Rectangular Parts

Dong Dewei Yan Yunhui Zhang Yao Li Jun

Northeastern University, Shenyang, 110819

Abstract: Aiming at the optimal layout problem of two dimensional rectangular parts, which is a NP-complete problem, an adaptive niched genetic simulated annealing algorithm was presented. This paper translated the layout of rectangular parts on a rectangle into a special coding of genetic algorithm, the proposed approach automatically looked for the best sequence of the rectangular parts and each part's optimum rotation by the genetic simulated annealing algorithm. Considering the choice of crossover probability and mutation probability affected algorithm convergence, the adaptive crossover probability and mutation probability were put forward. The niche technology controlled whether the child individual replacement the parent individual or not. Finally, the lowest horizontal algorithm completed the automatic layout. Examples indicate that the algorithm is effective and practical.

Key words: optimal layout of rectangular parts; adaptive genetic simulated annealing algorithm; niche technology; heuristic algorithm

0 引言

矩形件优化排样是在给定的矩形板材上将矩形件按最优方式进行排布, 要求零件排放在板材内, 各个零件互不重叠, 并满足一定的工艺要求, 最大限度地利用板材, 以达到节约材料、提高效益的目的。对于非矩形的不规则件排样问题, 可以

通过求取其最小包络矩形的方法简化预处理, 并对一些形状互补的不规则件构造矩形排样单元进行优化组合, 使不规则件组合在最小包络矩形中所占的面积比例尽可能大, 对组合后的图形再求取最小包络矩形, 从而将不规则件排样问题转化为矩形件的排样问题。排样问题广泛应用于机械制造、轻工、家具、服装以及印刷等行业。因此, 研究矩形件在板材上的优化排样具有重要的现实意义。

排样问题实质上是一个组合优化的二维布局

收稿日期: 2012-03-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50574019); 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2008AA04Z135); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(N100603002)

(编辑 陈 勇)

[10] Zhu Y, Gross M, Liu J, et al. Role of Nucleation in the Structure Evolution of a Magnetorheological Fluid[C]//Proceedings of 5th International Conference, Electro - Rheological Fluids, Magneto - Rheological Suspensions and Associated Technology. Sheffield, 1995: 747-759.

[11] Zhu Y, Gross M, Liu J. Nucleation Theory of Structure Evolution in Magnetorheological Fluid[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 1996, 7(5): 594-598.

作者简介: 潘继生, 男, 1980 年生。广东工业大学机电学院讲师、博士研究生。研究方向为精密制造技术及机械传动系统设计。阎秋生, 男, 1962 年生。广东工业大学机电学院教授、博士研究生导师。徐西鹏, 男, 1965 年生。华侨大学副校长、教授、博士研究生导师。童和平, 男, 1986 年生。广东工业大学机电学院硕士研究生。祝江停, 男, 1985 年生。广东工业大学机电学院硕士研究生。白振伟, 男, 1985 年生。广东工业大学机电学院博士研究生。