基于电流密度在线监控的电镀工艺过程控制系统

杜贵平[1,2]，李雄涛[1]，姜立军[1]
（1.华南理工大学，广州 510640；2.广州电器科学研究院，广州 510300）

［摘 要］ 针对电镀过程中由人为因素所引起的能耗问题，为提高镀件质量，节能降耗，研制了一种以高频开关电镀电源为核心的基于电流密度在线监控的电镀工艺过程控制系统。该系统由上位机、电流密度采集系统和数字化电镀电源装置组成，实现了电流密度的在线检测与控制。镀层变化和系统能耗实验表明：该系统实现了电镀工艺工程能量的合理配置，在额定输出范围内具有较低的单位能耗和较高的效率，工艺质量优良，对不同规格的电镀工件具有广泛的适应性。

［关键词］ 电流密度；在线监控；单位能耗
［中图分类号］TQ150.6 ［文献标识码］A ［文章编号］1001－3660(2010)01－0093－04

Control System for Electroplating Process Based on On-line Current Density Monitoring

DU Gui-ping[1,2], *LI Xiong-tao*[1], *JIANG Li-jun*[1]
(1. South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;
2. Guangzhou Electric Apparatus Research Insititute, Guangzhou 510300, China)

［**Abstract**］ In order to improve quality of workpieces and save energy, a control system for electroplating process based on on-line current density monitoring, using high-frequency switching electroplating power supply as the system platform, was presented. The system includes host computer and current density acquisition system and power supply, and realizes the on-line monitoring and control for current density. The experiments results of coating change and system energy consumption indicate that the control system achieves rational energy allocation of electroplating process engineering. Under the rated output condition, the test state that the system has lower energy consumption for unit-thickness and higher efficiency and the excellent process quality and a wind range of adaptability for the different specifications workpieces.

［**Key words**］ Current density; On-line monitoring; Unit energy consumption

目前我国电镀工业单位面积的能耗很高，与国外先进水平相差甚远[1]。电镀工业电能消耗超过生产成本的一半以上，而能耗主要集中在电源装备电能转换过程及工艺实施过程中。近年来，国家出台了一系列关于节能降耗方面的政策和规划，要求电镀工业朝着环保、节能的方向发展。以高频开关电源为平台的基于电流密度在线监控的电镀工艺过程控制系统，可降低电镀过程中电源装备电能转换和工艺实施过程中的电能消耗，迎合了电镀工业节能降耗的趋势。

在电镀生产中，电流密度是影响镀件质量的重要参数[2]。随着表面处理技术的发展，欲获得最佳的镀层质量就要求生产过程中频繁调节电源的参数[3]，使工件表面获得最佳的电流密度。

对电流密度进行监测的传统做法是通过电流密度测量仪或测量外电路的电流来实现，作业工人根据电流密度在线数据，控制电源输出，获取所需的电流密度曲线。这种工艺方法使得电镀电源普遍采用恒压控制模式，电镀工艺过程和电镀电源能量转换过程不能形成一个闭环系统，无法消除电镀过程中人为因素的影响和对电镀过程中的诸多变化因素进行及时补偿。

电镀工艺中如何消除人为因素的影响及减少过程能量损耗的需求，这对电源的智能化提出了更高的要求[4]。随着大功率高频开关电源的研制成功并开始在电镀行业应用，如何评价新型电源的使用效能，使电镀

［收稿日期］2009－07－14
［基金项目］“十一五”国家科技支撑计划项目(2008BAF34B09)；粤港关键领域重点突破招标项目(20070101-2)；广东省自然科学基金项目(04300691)
［作者简介］杜贵平(1968－)，男，甘肃会宁人，博士后，研究员，主要从事电化学电源装备及控制系统方面的研究工作。

过程向闭环可控的方向发展，最大限度地实现节能和获得稳定的镀层质量，实现电镀装备向高新技术方向转变，是目前急于解决的问题。

本文以自主研制的数字化高频开关电镀电源为核心，提出了基于电流密度在线监控的电镀工艺过程控制系统，实验表明，该系统能实现电镀工艺工程能量的合理配置，达到电镀过程中节能增效和提高工艺质量的目的。

1 电流密度在线检测的实现及原理

1.1 电流密度检测难点分析

电镀作业可分为挂镀和滚镀，挂镀时的电流密度检测相对简单，只要保证电流传感器与镀件处于同一电位即可。滚镀过程中的电流密度检测则比较复杂，因为镀件在滚笼中的随机碰撞接触产生的导电连接是随机性的，总电流处于波动状态，电流传感器放在滚笼中要与镀件处于等电位十分困难；此外，电镀的作业条件恶劣，存在腐蚀性液体和干扰电子信号放大器的强大电场，严重威胁到电流密度检测系统的可靠性，使得一般传感器很难在镀液中与镀件同步电镀并精确测量出对应电流密度的连续变化[5]。

电流密度检测系统的关键器件为电流传感器，基于霍尔效应制成的霍尔元件是迄今为止最典型的电流传感元件。但霍尔元件内阻较大，用其进行在线检测时，电流会改变镀件原有的工作状态；而且测量小电流时，霍尔元件的测量灵敏度会降低，这也限制了霍尔元件在电流密度测量上的应用。为此，需要选用一种内阻小，对被测电路影响小，测量微小区域内离子电子所产生的分布电流灵敏度高的电流型磁敏感元件。

1.2 电流密度采集系统

电流密度采集系统采用了磁敏感原理，即直流电流通过交流闭合磁路材料基体时，将会干扰影响原交流磁化过程，使材料磁导率变化，同时使次级输出电压出现有规律的变化[6]，该信号经过专用放大及偏置电路使输出电压与输入电流成线性变化关系，如此就能研制出磁敏型低阻的电流传感器[5]对电镀槽电流进行采集。一旦获取实时电镀电流，由于试件截面积已知，只要试件位置正确，可认为试件的电流密度即工件电流密度。因此，把试件置于需要测量的工件位置附近，即可获得该工件的电流密度；同样，亦可测得电流密度分布。

为了保护 DSP 接口输入电路，在电流密度采集系统的 VAD 输出段增加分压限幅电路，使得当电流传感器输入电流大于 10 mA 后，VAD 输出电压不超过 3.3 V。为了校正电路零点及放大量的漂移，本装置配有 5 mA 校正电流电路，当外输入电流开路为 0 时，可通过手动或计算机控制接通标准 5 mA 电流，使之通过电流传感器，这时输出电压 VAD 应为 1.65 V，如果零点及输出电压确实出现漂移，超出误差，可通过面板调零及调幅电位器的微调实现校正。电流密度采集系统电路原理图见图 1。

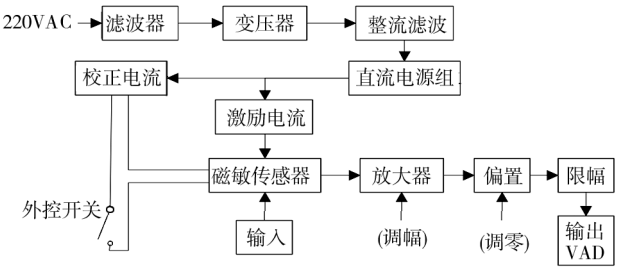


图 1 电流密度采集系统电路原理

Fig. 1 Circuit principle diagram of current density acquisition system

2 工艺过程控制系统设计

2.1 整体架构

电镀工艺过程控制系统主要由上位机监控、电流密度采集系统和数字化电镀电源装置组成，整体架构见图 2。

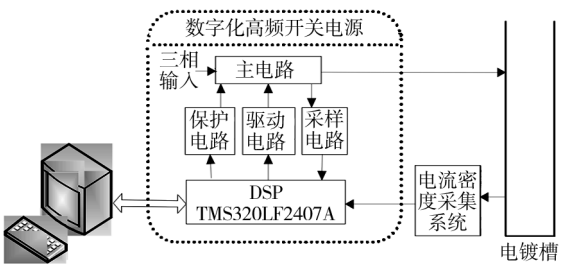


图 2 电镀工艺过程控制系统

Fig. 2 Structure of control system for electroplating process

高频开关电源基于 DSP 芯片 TMS320LF2407A 实现数字化控制，该芯片自带的 CAN 控制器能实现对上位机的通讯，把通过内置 10 位模数转换模块采集的电流密度数据实时传送给上位机。电镀作业者根据得到的实时参数，按工艺要求，在上位机上输出相应的控制指令，改变电源的运行状态，达到节能增效的目的。

2.2 恒电流密度控制模式的实现

恒电流密度的控制采用双闭环反馈控制模式，即将电流密度负反馈控制和电流峰值控制模式相结合，见图 3。通过外环误差比较器，电流密度反馈值控制因负载的变化而导致的输出电流的改变，因为反馈信

号是输出的平均电流密度值，因此可以得到精度较高的静态设置值，即控制电流的准确性高；内环的峰值电流在电感电流连续模式的情况下，与平均电流的大小成正比。因此，双环控制系统是一个能够实现全状态反馈的系统，可以实现误差平方积分指标最小，这符合最优控制规律。

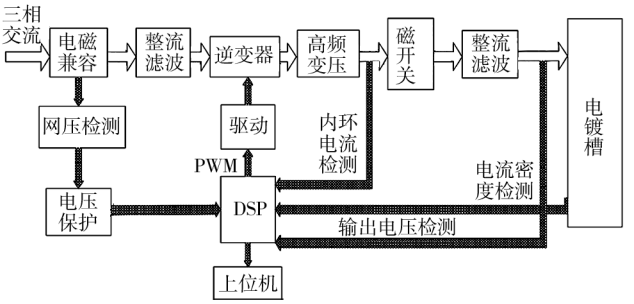


图 3　恒电流密度控制模式

Fig. 3 System diagram of constant current density control model

采用双环控制的逆变器在设置合适的斜率补偿之后，可以看成是一个由误差电流信号控制的电流源，电流内环对外环的影响可以视为内部的扰动。单独考虑根据外环电流密度的反馈进行电流闭环控制，从自动控制的角度，可将其看作是一个简单的二阶系统。而电流双闭环反馈控制系统是一个一阶控制系统，峰值电流内环反馈消除了外环单环反馈二阶变换系统中由电感引入的极点。由自动控制理论可知，电流双闭环反馈的一阶控制系统具有良好的稳定性能。

3　工艺过程控制的实验研究

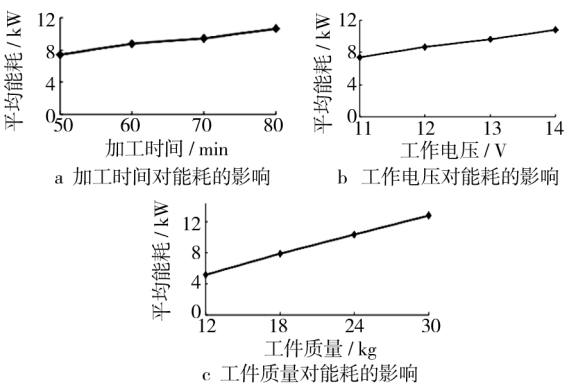
3.1　实验及结果

采用正交试验法研究高频电源在恒电流密度模式下镀层与能耗的对应关系。由于镀层质量主要体现在镀层厚度的获得及其稳定性，而镀层质量的制约因素除了电化学过程以外，最主要的影响因素为电镀时间、电镀电压及镀件表面积，因此选择电压、时间和工件质量为本试验的主要因素。高频开关电镀电源设计为额定输出电压 12 V，为了分析其输出性能，选择输出 11～14 V 作为实验条件，工作时间和工件质量的取值及实验原始数据见表 1。

表 1　恒电流密度模式下试验原始数据表

Tab. 1 Data table under constant current density control model

加工时间 /min	工作电压 /V	工作质量 /kg	平均电流 /A	膜厚 /μm	能耗 /kW
50	11	12	317.61	11.054 6	2.911
50	12	18	544.41	10.094 1	5.444
50	13	24	803.61	8.494 5	8.706
50	14	30	1 095.21	7.066 1	12.777
60	11	18	495.81	10.603 7	5.454
60	12	12	350.01	10.164	4.2
60	13	30	1 014.21	8.120 7	13.185
60	14	24	868.41	10.375 9	12.158
70	11	24	674.01	9.845 1	8.65
70	12	30	933.21	8.787 2	13.065
70	13	12	382.41	9.324 6	5.8
70	14	18	641.61	10.631 6	10.48
80	11	30	852.21	9.175 8	12.499
80	12	24	738.81	10.91 2	11.821
80	13	18	593.01	10.357 8	10.279
80	14	12	414.81	12.218 1	7.743

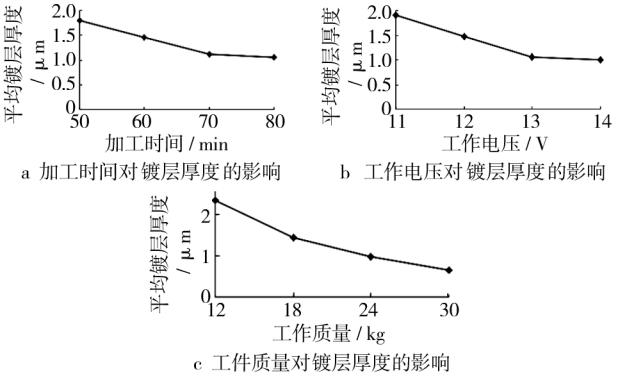


a 加工时间对能耗的影响　b 工作电压对能耗的影响

c 工件质量对能耗的影响

图 4　恒电流密度模式下能耗指标变化

Fig. 4 Change of energy consumption index under constant current density control model



a 加工时间对镀层厚度的影响　b 工作电压对镀层厚度的影响

c 工件质量对镀层厚度的影响

图 5　恒电流模式下单位能耗所得镀层厚度变化

Fig. 5 Change of coating thickness of unit energy consumptionunder constant current density control model

3.2　实验分析

3.2.1　能耗分析

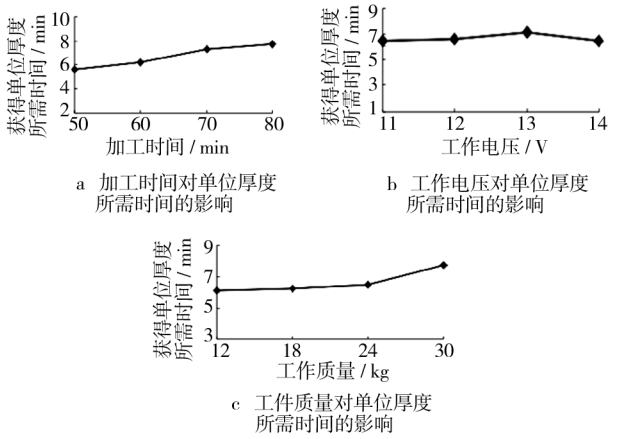
加工时间、电压及工件质量对能耗指标的影响情况见图 4，可以看出，在恒电流密度状态下，能耗随这 3 个因素呈线性变化，与实际情况相符。

图 5 分析了单位能耗下镀层厚度随 3 个因素变化的情况，可知在恒电流密度控制模式下，单位能耗下获

得的镀层厚度随 3 种因素取值的增加近似呈线性降低，表明电源设计为额定电压 12 V 可以得到理想的输出性能。

3.2.2 效率指标分析

图 6 为在恒电流模式下，电源工作效率的分析结果。可见，在恒电流密度模式下的电源，无论加工时间的取值怎么变化，都有稳定的工作效率。由于在电镀时，不同规格的工件获得理想镀层厚度所需的电镀时间是不同的，因此稳定的工作效率对不同规格的工件电镀不同时间的情况是有利的，表明恒电流密度模式下的电源的输出特性对工件形状的适应性广。在恒电流密度模式下，电源要保证镀槽内的电流基本均衡，随工件质量的变化，电源效率在某值上下波动，变化不大。从图 6 还可以看出，在该控制模式下，电源在 11～12 V 之间时有比较高的工作效率。



a 加工时间对单位厚度所需时间的影响

b 工作电压对单位厚度所需时间的影响

c 工件质量对单位厚度所需时间的影响

图 6 获得单位镀层所需时间随因素变化

Fig. 6 Time needed for unit coating with factor change

4 结 论

1）实验数据表明，采用恒电流密度控制模式的电镀工艺过程控制系统在额定输出范围内具有较低的单位厚度能耗和较高的效率，工艺质量优良且对不同规格的电镀工件具有广泛的适应性。

2）可根据工艺需求扩展系统功能，增加镀液温度、镀层厚度、应力等相关参数的在线监测，实现对多台电镀电源的协同控制。

[参 考 文 献]

[1] 方战强，任官平. 能源审计原理与实施方法[M]. 北京：化学工业出版社，2008.

[2] 杨国清. 精密电镀电流的检测与数据换算[J]. 电工技术学报，1999，14(2)：69－72.

[3] 向荣. 21 世纪我国电镀设备面临的挑战与对策[J]. 电镀与精饰，1999，21(5)：1－2.

[4] 杜贵平. 高频开关电镀电源及其关键问题探讨[J]. 新技术新工艺，2005，(6)：68－70.

[5] 邱安生. 电镀层质量参数在线测量技术研究[J]. 电镀与环保，1998，18(2)：29－32.

[6] 邱安生. 电镀电流参数在线测量[J]. 电镀与环保，2007，27(1)：32－36.

(上接第 92 页)

达 0.25 g/min，但是其整体速率不稳，呈一条抛物线，稳定性效果不好；1B43 最高蚀刻速率不高，低于 0.2 g/min，且速率不稳定(在失重为 1 g/L 时，速率就呈下降趋势)；1B42 的稳定性效果最理想，最高速率也可达到 0.2 g/min，而且速率稳定平台区比较长，直到腐蚀量为 3 g/L 才呈现下降趋势。图 4 上还可看出，1B42 蚀刻液对 1Cr18Ni9Ti 不锈钢的最大金属腐蚀量为 3 g/L，可以作为生产中何时更换或再生蚀刻液的一个判断指标。

3 结 论

1）根据蚀刻速率-腐蚀量的关系研究蚀刻液的稳定性具有操作简单、可靠性好的优点，适用于实验室操作。

2）在 3 种蚀刻速率适中的蚀刻液中筛选出了稳定性最好的蚀刻液 1B42，可以将其作为后续实验的依据，该蚀刻液的最大金属腐蚀量为 3 g/L。

[参 考 文 献]

[1] 周翠花，李代学. 光蚀刻不锈钢码盘制作中存在的问题及解决办法[J]. 光电工程，2002，29(2)：42－44.

[2] Dale L Hook，Thomas J Engler. High energy DF chemical laser gain generator and related method for its fabrication[P]. United States Patent：US 6 813 304 B2，2003-07-24.

[3] 田波. 微带蚀刻工艺影响因素探讨[J]. 表面技术，2004，33(4)：50－51.