

不锈钢导管安装感应钎焊过程控制

Process Control of On-Site Induction Brazing of Stainless-Steel Tubes

北京航空航天大学机械工程及自动化学院 张伟 齐铂金 许海鹰

[摘要] 研制开发了基于 PLC 的数字智能 PID 控制算法,与全桥逆变直流调功技术、光纤传光和辐射测温技术相结合,实现了钎焊过程的数字化精确控制。试验结果表明,该方法很好地满足了工件的钎焊特性,改善了焊接区域的温度场分布,减少了焊接缺陷,提高了焊接质量。

关键词: 感应钎焊 导管连接 过程控制 PID

[ABSTRACT] Combined with the full bridge inverse-transformation and direct-current power adjusting technique and the fiber infrared temperature-measuring technology, a digital intelligent PID control method based on PLC is developed to realized the precise control of brazing process. The experiment results show that this control method not only excellently satisfies the tubes process characters, but also improves the uniformity of the temperature distribution on tubes, decreases welding defaults, and improves joint welding quality.

Keywords: Induction brazing Tubes connection Process control PID

在某型号飞机总装现场安装位置焊接导管时,采用夹具固定导管,并通过夹具和导管输送惰性气体保护导管接头的内外表面,软式电缆在夹具上绕制成感应圈,内部通水并与功率传输电缆相连进行感应钎焊^[1]。导管焊接区域的钎焊温度及温度场分布的均匀性能否满足工艺要求是保证焊接质量的关键。受夹具长度的限制,感应线圈的匝数最多为 8 匝,匝数较少,其边缘效应导致工件加热不均匀^[2]。

传统的感应钎焊大都采用恒功率控制方法,加热过程钎焊电源输出功率不变,工件升温不受控。受感应圈缠绕状态、匝数,工件的材料和规格,以及其他工艺参数的影响,采用恒定功率加热工件,导管接头达到同一保温温度的加热时间不可控,并且还存在重复性差、温度超调大、控制精度差、不利于工件均匀加热等缺点,使导管接头容易出现未焊透、

焊瘤、过热、过烧等缺陷。

本课题根据不锈钢导管安装感应钎焊工艺,母材和钎料的钎焊性能,以及均匀加热的要求,设计了一种新型不锈钢导管安装感应钎焊过程控制方法。采用光纤温度传感器测得的实时钎焊温度信号闭环负反馈调节感应钎焊电源的输出功率,使钎焊过程按预设的加热曲线升温,从而实现了钎焊过程的精确控制,很好地满足了工件的钎焊特性,改善了焊接区域的温度场分布,减少了焊接缺陷,提高了焊接质量。

1 导管安装感应钎焊系统组成

针对安装位置导管连接的特点,研制了一套导管安装感应钎焊系统,其系统组成如图 1 所示。

该系统采用双逆变串联主电路结构,主要包括逆变直流电源、IGBT 逆变方波电源、感应加热回路和控制电路。第一级 IGBT 全桥式逆变直流电源将三相工频交流电变换成稳定、可控的电压源。第二级 IGBT 逆变方波电源将逆变直流电源的输出再次变换为约 20kHz 的交流方波,然后经高频变压器耦合到感应加热回路,实现对工件的感应加热。感应加热回路主要包括谐振电容 C、同轴电缆、延长电缆,以及软式感应线圈和夹具等。控制电路主要包括频率自动跟踪闭环控制电路、钎焊过程控制电路和电源保护电路等。

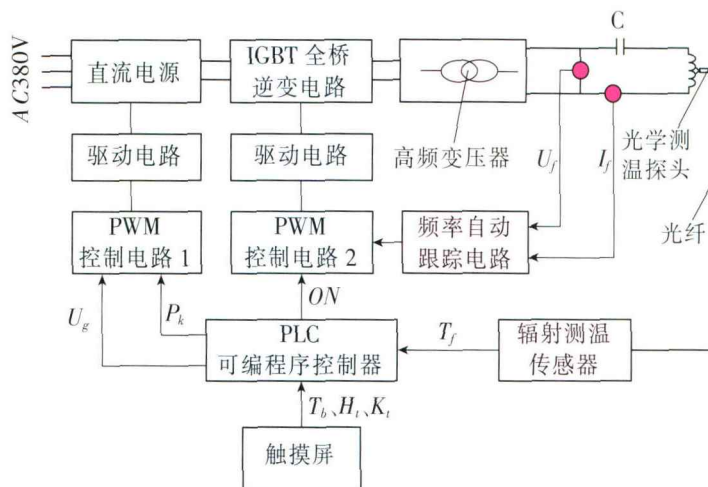


图 1 导管安装感应钎焊系统结构

Fig.1 Schematic of on-site induction brazing system of tubes

2 钎焊过程控制原理

2.1 钎焊性分析

不锈钢导管和套管的材料均是奥氏体不锈钢 1Cr18Ni9Ti。钎料为 BCu35NiMnCo 带状钎料,厚度为 0.8mm,其化学成分见表 1。

表 1 BCu35NiMnCo 钎料的化学成分 %

Cu	Ni	Mn	Si	B	Co	Fe	P
34.26	29.81	28.01	0.99	0.18	4.92	1.07	0.16

2.2 热回复

Ni-Cu-Mn-Co 钎料的熔点为 1 000℃,在高温条件下使用时,会发生与再结晶相关的热回复,其热回复程度可以用再结晶晶粒半径 r 的大小来评价^[1]。再结晶晶粒半径 r 的大小可由下式表示

$$r = \left[r_0^2 - \frac{AU}{4KQ} \cdot e^{-\frac{t}{KQ} r_0^2} + \frac{AU}{4KQ} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

式中, t 为加热时间, A 为与界面能有关的常数, U 为晶界迁移激活能, K 为 Boltzmann 常数, Q 为与热功率有关的常数。

由上式可见,当 $t \rightarrow 0$ 时钎缝金属即能达到额定的钎焊温度,则 $r \rightarrow r_0$,即钎焊接头回复软化的倾向将被抑制,从而保证了高温强度。因此,在低温段需要大功率加热,使 Ni-Cu-Mn-Co 钎料在短时间内达到高温区,以减小回复软化。

2.3 均匀加热

无论使用何种钎料,在钎料固相线温度以下 50~100℃ 温度范围内,为了使钎料熔化时工件内外温度基本一致,使毛细作用能够很好地发挥,加热速率不宜过快^[4]。对 Ni-Cu-Mn-Co 钎料而言,在 800~900℃ 温度范围内,应当采用小功率缓慢加热,使导管焊接区域的温度场能够通过热传导的作用逐步均匀。

2.4 “偏析”

差热分析结果表明,BCu35NiMnCo 钎料的初熔点在 902℃ 附近,完全熔化的液相线温度则在 1 030~1 040℃ 之间,钎料的熔化温度区间约为 130~140℃,熔化温度区间较大。为了保证不同组分与母材之间的扩散时间和程度基本一致,避免焊缝区产生“偏析”现象,在固液两相共存段应当提高加热速率,使钎料在短时间内快速脱离两相共存区。

2.5 加热曲线

根据上述分析,将不锈钢导管安装感应钎焊过程分为低温段、均温段、固液两相共存段、保温前段、保温和冷却等 6 个阶段,并分别予以控制,如图 2 所示。

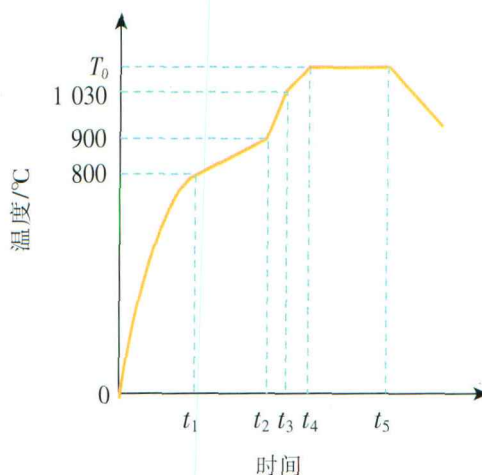


图 2 不锈钢导管钎焊过程加热曲线

Fig.2 Heating curve of brazing process of stainless-steel tubes

在图 2 中,温度 T_0 为设定的钎焊温度,约为 1 060℃。在 0~ t_1 时间段,采用大功率进行加热,使工件以最快速率自由升温至 800℃,然后采用温度反馈闭环调节感应加热电源的输出功率,使工件按照预设加热曲线升温。

采用预设加热曲线控制钎焊过程具有以下优点:

- (1) 在低温段(0~ t_1),采用最大功率对工件加热,可快速达到 800℃,以减小回复软化;
- (2) 在均温段(t_1 ~ t_2),采用小功率缓慢加热,充分发挥热传导的作用,改善焊接区域温度场的分布;
- (3) 在固液两相共存段(t_2 ~ t_3),提高加热速率,使钎料快速脱离两相区,可避免“偏析”;
- (4) 在保温前段(t_3 ~ t_4),再次降低加热速率,使工件缓慢升温至保温温度,以减小保温初期的温度超调量,从而可减少焊瘤、过热和过烧等缺陷。

3 钎焊过程控制实现

3.1 辐射测温温度传感器

为了避免受到强电磁场的干扰影响,并考虑到导管安装位置感应钎焊现场环境及测温探头的安装尺寸等情况,本课题的温度检测系统采用了光纤传光与辐射测温相结合的测温方法,实现了远距离温度信号的高抗干扰传输和精确测量。

测温系统选取套管中间位置作为测温点。通过夹

具上的测温孔,光学测温探头获取套管外表面的光信号,经过透镜会聚于光纤的接收端面,再经光纤传送到辐射测温温度传感器进行温度信号 T_j 的计算,然后经隔离的 485 通信接口传输至可编程序控制器 (PLC) 进行温度的显示和闭环控制。

3.2 钎焊过程控制实现

为了实现导管安装感应钎焊过程加热时间、钎焊温度和保温时间,以及升温曲线的精确控制,本课题采用光纤传光和辐射测温技术、数字 PID 控制技术、全桥逆变调功技术、PLC 控制技术等技术完成了钎焊过程控制系统的设计,其工作原理如图 3 所示。

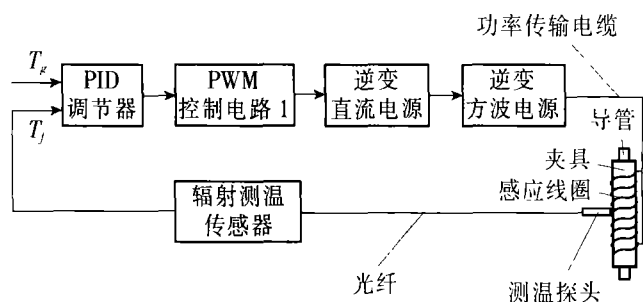


图 3 钎焊过程控制工作原理

Fig.3 Scheme of brazing process control

钎焊过程控制是这样实现的:通过触摸屏设定工件的钎焊温度 T_0 、加热时间和保温时间等工艺参数,然后传输至 PLC。PLC 接收这些参数后,程序自动计算出感应钎焊过程的升温曲线 T_g (如图 2 所示),并将 T_g 作为数字 PID 调节器的给定输入,而温度反馈信号作为 T_j 数字 PID 调节器的反馈输入。数字 PID 调节器的输出经数/模变换后输出电压信号 U_g ,并传输至全桥逆变直流电源的 PWM 控制电路,对直流电源的输出电压进行调节,从而实现感应加热电源输出功率的调节,使工件按照预设的曲线升温,达到精确控制钎焊过程的目的。

3.3 PID 控制算法

在感应钎焊中,导管的温度变化涉及到磁、电、热传递等物理过程,影响因素很多,在一定程度上具有非线性、时变性和不确定性以及大的纯滞后性,采用常规的 PID 控制会导致控制作用不及时,引起系统的超调和振荡,难以得到好的控制性能。

本课题在数字 PID 控制算法中引入了智能控制的概念,提出了一种适合导管安装感应钎焊的智能 PID 控制算法^[9]。图 4 即为智能 PID 控制原理框图。首先对温度传感器反馈的温度信号 T_j 与温度给定值 T_g

进行偏差量计算,然后对偏差量进行趋势判断,并通过判断调整 PID 控制参数。

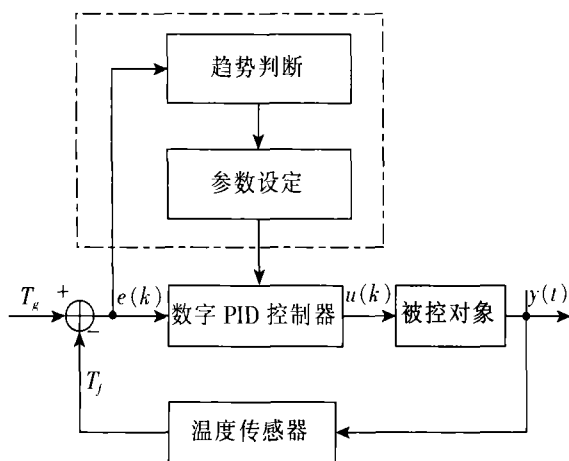


图 4 智能 PID 控制原理框图

Fig.4 Control principle of intelligent PID

定义: $\Delta e(k) = e(k) - e(k-1)$

$$\Delta u(k) = pK_p \Delta e(k) + iK_i \Delta e(k) + dK_d [\Delta e(k) - \Delta e(k-1)]$$

式中, $e(k)$ 为温度误差, $\Delta e(k)$ 为误差增量, $\Delta u(k)$ 为控制增量, K_p, K_i, K_d 分别为比例、积分、微分常数, p, i, d 分别为调整系数。

设定 2 个误差限 M_1, M_2 , 且 $M_1 > M_2$, 则

(1) 当 $e(k) \times \Delta e(k) > 0$ 时, 说明误差在朝误差绝对值增大的方向变化。

· 如果 $|e(k)| < M_2$, 说明尽管误差朝绝对值增大的方向变化, 但误差绝对值本身并不大, 控制器可实施一般的控制作用。此时, 设定 $p = i = d = 1$, 则

$$\Delta u(k) = K_p \Delta e(k) + K_i \Delta e(k) + K_d [\Delta e(k) - \Delta e(k-1)] \quad (2)$$

· 如果 $|e(k)| \geq M_2$, 说明误差比较大, 应加强比例环节的调节作用, 以达到迅速减小误差绝对值的目的。此时, 设定 $p = k_0, i = d = 1$, 则

$$\Delta u(k) = k_0 K_p \Delta e(k) + K_i \Delta e(k) + K_d [\Delta e(k) - \Delta e(k-1)] \quad (3)$$

式中, k_0 为放大系数, 且 $k_0 > 1$ 。

(2) 当 $e(k) \times \Delta e(k) < 0, \Delta e(k) \times \Delta e(k-1) > 0$, 或者 $\Delta e(k) = 0$ 时, 说明误差在朝误差绝对值减小的方向变化, 或者已经达到平衡状态。此时, 设定 $p = i = d = 0$, 控制器输出保持不变, 即

$$\Delta u(k) = 0 \quad (4)$$

(3) 当 $e(k) \times \Delta e(k) < 0, \Delta e(k) \times \Delta e(k-1) < 0$, 时, 说明误差处于极值。

· 如果误差的绝对值较大, 即 $|e(k)| > M_2$, 实施较强的控制作用。此时, 设定 $p=k_1, i=d=0$, 则

$$\Delta u(k) = k_1 K_p \Delta e(k), \quad (5)$$

式中, k_1 为增益系数, $k_1 > 1$;

· 如果误差的绝对值较小, 即 $|e(k)| < M_2$, 实施较弱的控制作用。此时, 设定, $p=k_2, i=d=0$, 则

$$\Delta u(k) = k_2 K_p \Delta e(k), \quad (6)$$

式中, k_2 为抑制系数, $0 < k_2 < 1$ 。

(4) 如果 $|e(k)| > M_1$, 说明温度误差的绝对值已经很大, 此时无论误差变化趋势如何, 控制器都应按最大(或最小)输出, 以达到并迅速调整误差的目的, 使误差绝对值以最大速度减小。此时, 设定, $p=k_3, i=d=0$, 则

$$\Delta u(k) = k_3 K_p \Delta e(k), \quad (7)$$

式中, k_3 为放大系数, 且 $k_3 > k_0 > k_1 > k_2$ 。

数字 PID 控制器输出控制增量 $\Delta u(k)$, 则控制量 $u(k)$ 为

$$u(k) = u(k-1) + \Delta u(k). \quad (8)$$

输出控制量 $u(k)$ 经 PLC 内部的 D/A 转换电路转换成模拟量 U_g , 对逆变直流电源的输出电压进行调节, 从而实现工件输入功率和钎焊过程的控制。

采用智能 PID 控制算法后, 可以根据反馈温度与给定温度之间的误差趋势来调整 PID 控制参数, 具有控制速度快, 稳定所需时间短, 控制精度高, 适应性强, 能够进行在线特征辨识和参数自整定等特点, 很好的满足了导管安装感应钎焊温度控制的要求。

4 工艺试验

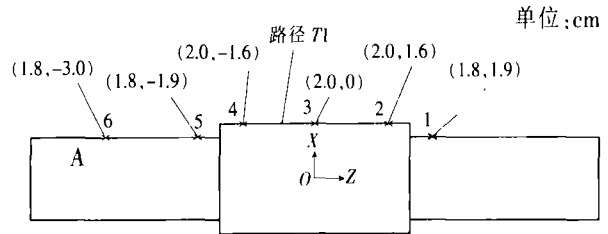
4.1 温度测试

采用恒定功率和预设加热曲线 2 种控制方法对工件进行加热, 同时利用六点同步测温仪对工件表面轴向路径 T1 上的温度分布进行了实时测量。图 5 为热电偶安装示意图, 1~6 点为热电偶测温点。图 6 为采用 2 种控制方法加热至保温温度时实测温度对比。

由图 6 可见, 采用预设的加热曲线控制钎焊过程, 可以得到更均匀的温度场分布, 有利于发挥钎料的毛细作用。

4.2 焊接试验

导管安装钎焊系统研制成功后, 在现场进行了大量的工艺试验。图 7 为焊后的典型试样图片。



附注: A 为路径 T1 的起点, 1~6 点为热电偶测温点。

图 5 热电偶安装

Fig.5 Installation of thermocouple

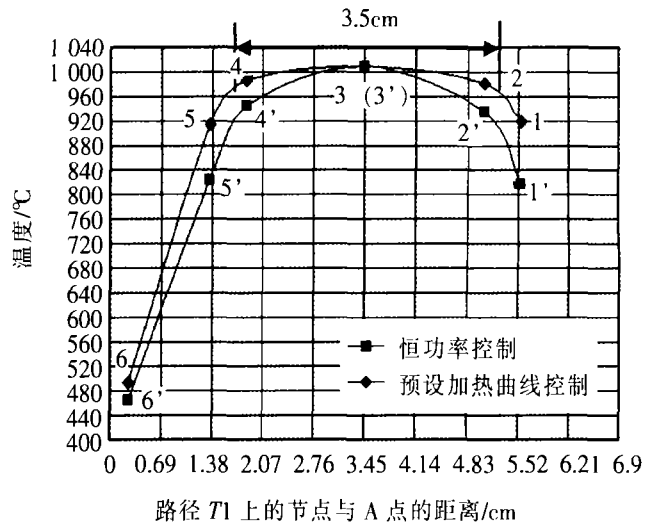


图 6 2 种控制模式下实测温度对比

Fig.6 Temperature comparison under 2 control modes

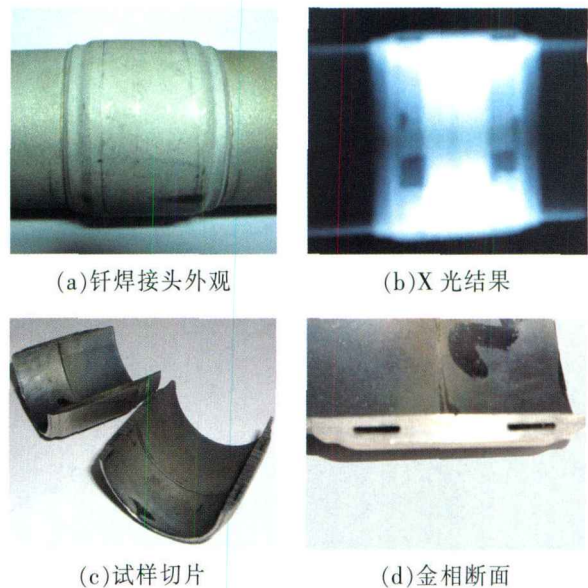
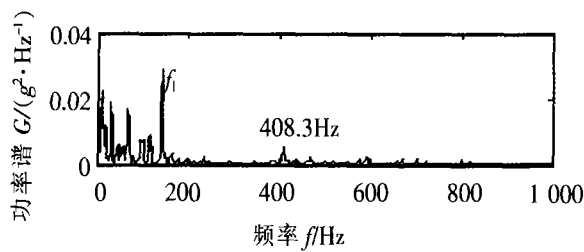


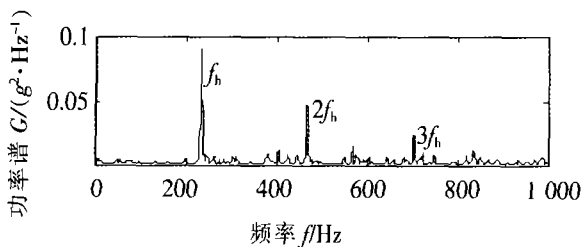
图 7 焊后试样

Fig.7 Brazed joint sample

(下转第 88 页)



(a) 低压转子信号



(b) 高压转子信号

图4 分离出的低压、高压转子振动信号功率谱
Fig.4 Power spectrum of seperated low and high pressure rotor vibration signals

动超标的主要原因。但是,在图4(a)中还存在着一些难以确定的频率成分,如408.3Hz既不是低压转子的倍频也不是高压转子的倍频,对此还不能做出很好的解释。分离信号的频谱为单个源信号的频谱,谱特征的物理含义明显,依据分离信号的频谱识别发动机状态及故障,特别是早期故障尤为有效。

4 结论

盲分离方法是信号处理中的一种很有前途的新兴技术,它可以从众多混杂的信号中较为清晰地再现源信号,为数据分析提供高质量的信息。本文通过对某型涡轮风扇发动机振动信号应用Fast ICA算法进行盲分离,分离出了航空发动机的低、高压转子振动信号,证明了盲分离方法应用于航空发动机振动信号分析的可行性和有效性。但这只是一个初步尝试,在实际应用中还有很多问题需要进一步考虑,其中,如何正确估计源信号的数目以及选用合适的混合模型是应用研究的关键。相信随着盲分离基本原理的进一步完善以及更多应用研究的开展,它必将在发动机状态监测和故障诊断领域发挥巨大的作用。

参 考 文 献

[1] Hyvärinen A. Fast and robust fixed-point algorithms for independent component analysis. IEEE Trans. on Neural Networks. 1999, 10(3):626-634.

[2] Hyvärinen A, Oja E. Independent component analysis: algorithms and applications. Neural Networks 2000, 13: 411-430.

[3] 张希军,吴志真,雷勇. 航空发动机试车中转子故障诊断. 计算机测量与控制. 2005(11):1 182-1 185.

[4] 张宝诚. 航空发动机试验和测试技术. 北京:北京航空航天大学出版社,2005.

[5] 杨福生,洪波. 独立分量分析的原理与应用.北京:清华大学出版社,2005.

[6] 钟秉林,黄仁. 机械故障诊断学. 北京:机械工业出版社,2002.

(责编 淡蓝)

(上接第74页)

由图7可见,钎焊接头焊后,表面保护良好,无氧化色,钎脚均匀,无焊瘤;从X光照片可见,导管接头内部无气孔、未焊透、夹渣、裂纹和疏松等缺陷;剖开后的导管接头可见,内部保护良好,无焊瘤、溶蚀;从金相断面图片可见,焊缝层上无裂纹、疏松、气孔和未焊透等缺陷。

现场大量试验结果表明,采用预设的加热曲线和数字智能PID控制方法控制不锈钢导管的钎焊过程,温度控制精度高、重复精度高、运行稳定、可靠,可以减少焊接缺陷,提高焊接质量。

5 结论

(1)根据不锈钢导管安装感应钎焊工艺,母材和钎料的钎焊性能,以及均匀加热的要求,建立了不锈钢导管安装感应钎焊过程的加热曲线,将其分为低温段、均温段、固液两相共存段、保温前段、保温和冷却等6个阶段,并分别予以控制。

(2)针对导管安装感应钎焊的特点,在数字PID控制的基础上引入智能控制技术,提高了控制精度,很好地满足了钎焊过程温度控制的要求。

(3)现场试验表明,采用预设的加热曲线控制不锈钢导管钎焊过程,可减少焊接缺陷,提高焊接质量。

参 考 文 献

[1] 赵晶. 导管安装位置感应钎焊控制技术研究. 北京:北京航空航天大学机械工程及自动化学院,2002.

[2] 张榴晨,徐松. 有限元法在电磁计算中的应用,北京:中国铁道出版社,1996.

[3] 王忠平,王红霞,邸彤. Ni-Cu-Mn-Co 高温钎料的工艺钎焊性分析. 航空精密制造技术,2004,40(3):11-13.

[4] 邹儂. 钎焊(修订版). 北京:机械工业出版社,1989.

[5] 黄颖,杜润生. 基于智能数字PID算法的温度控制系统. 自动化与仪表. 2005,1:33-36.

(责编 依然)