

学科间信息传递的参数化空间散乱数据插值法^{*}

Parameterized Space Scatterd Data Interpolation Method for Interdisciplinary Information Transferring

西北工业大学工程力学系 李磊 于明 李元生 敖良波 岳珠峰

[摘要] 耦合信息传递是实现耦合系统求解的关键技术之一,本课题研究了参数空间散乱数据插值方法。为了避免三维插值空间平整性导致的插值误差,将三维耦合界面进行参数化处理,在参数空间中构造插值函数进行插值传递。针对径流式叶片的特点,进行了温度插值传递。从插值效果看,这种基于参数空间的数据插值方法保证了较高的插值精度。比较了反距离加权平均、kriging 插值函数的插值效果。两种插值函数均达到了较高的插值精度,插值得到的结构表面温度场与原始温度场相比,除局部存在误差外基本保证一致,并且 kriging 插值函数由于对插值空间开展了最小无偏估计,较高地保证原始插值曲面的特性。

关键词: 多学科设计优化 散乱数据插值 参数空间 Kriging 反距离加权平均

[ABSTRACT] Parameterized space data interpolation method for coupling information transferring on interdisciplinary surface is studied. The coupling surface is parameterized in order to improve interpolation precision. Taking centrifugal blade as subject, temperature is transferred from fluent to structure on based of two interpolation functions. The interpolation effect of inverse distance weighting average function and Kriging function are compared. The result shows that precisions of the two interpolation functions are both high. The distributions of temperature from the two interpolations are matched with origin distribution from fluent. Compared with inverse distance weighting average function, Kriging function guarantees the character of origin temperature yield due to the smallest unbiased estimation of interpolation space.

Keywords: Multidisciplinary design optimization Scatted data interpolation Parameter space Kriging Inverse distance weighting average

多学科设计优化是近年来发展起来的用于解决多场耦合构件设计问题的方法论,由于可以有效地提高设计精度、缩短设计周期,而被广泛应用在航空航天领域。它通过一定的解耦策略,将系统进行有机的分解,形成现有理论能够处理分析的子系统,并根据子系统间耦合关系,利用耦合信息传递或一致性约束实现耦合系统的重构。按照数据类型和传递方法,耦合信息分为温度、气压的标量信息^[1]、变形的向量信息^[2-4]、功率的积分量信息等,本课题针对子系统间标量信息的插值传递开展研究。

由于各子系统往往利用数值方法求解,耦合信息需要在耦合界面上通过节点进行传递,不规则的网格划分导致节点间数据传递成典型的散乱数据插值问题,耦合界面(插值空间)的平整性以及插值函数的构造形式直接影响着插值精度。为了降低由于插值空间不平整性引起的插值误差,Bock^[5]、李立洲等^[6]将耦合界面进行参数化实现了降维处理,提高了空间曲面的插值。径流式叶片由于体积小、结构简单、单级压比高,在航空航天中应用广泛,其内部存在流-热-固耦合。本课题在前人参数化插值方法的基础上,以弦长参数化方法实现插值空间的参数化,在参数空间中分别构造 Kriging 插值函数、反距离加权插值(DW)函数,实现了径流式叶片温度场的传递。

1 参数化空间散乱数据插值方法

对于结构复杂的耦合构件,耦合截面往往呈现空间特性,直接在三维空间中插值常常达不到一定的插值精度。图 1 给出了两个学科的耦合界面,在学科 1 上节点数据已知,学科 2 上节点数据未知,利用学科 1 节点(采样点)来求解学科 2 节点(插值点)的数据属于典型的散乱数据插值问题。参数化空间插值传递方法进行数据传递,首先利用曲面的参数化^[7-8]方法,将空间曲面 $S(x, y, z)$ 投影到二维空间 (u, v) 上,在二维参数空间上构造函数 $F(u, v)$ 以代替在三维插值空间中构造插值函数 $F(x, y, z)$,有效避免空间曲面曲率引起的插值误差,提高了插值精度。

^{*} 博士后基金(20100471634)、西工大基础研究基金(JC20100231)、863 计划(2009AA04Z418)、西北工业大学种子基金项目资助。

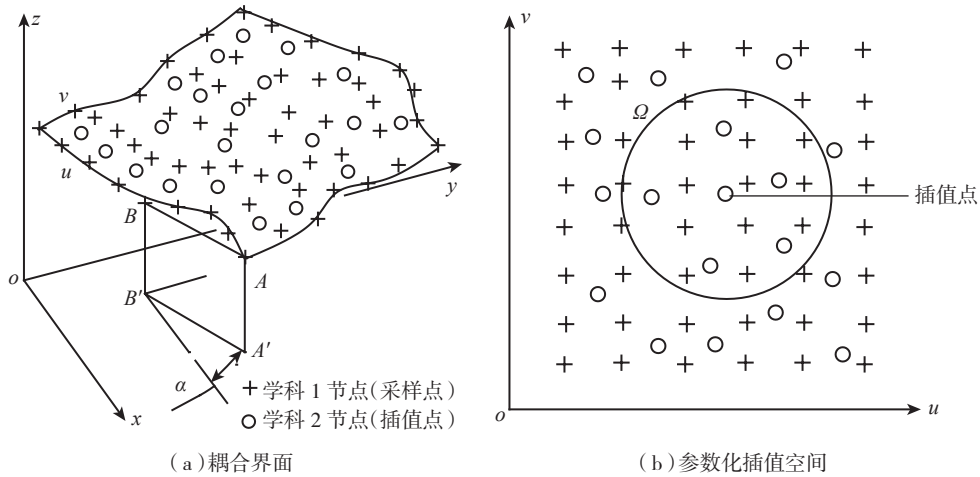


图1 学科间的耦合界面
Fig.1 Coupling interface between disciplinary

2 插值函数

散乱数据插值在地理、气象学中应用广泛,存在几何方法、函数方法、统计学方法、随机模拟方法等多种插值函数^[9],插值函数的特性直接决定了插值函数的适用性和插值精度。反距离加权平均函数^[9]反映样本点对插值点的影响程度,以插值点距样本点的距离作为权重构造插值插值函数。kriging 插值函数突破了多项式插值和统计学的限制,考虑了插值空间的规律性和随机性,避免了多项式插值函数构造光滑插值曲面而产生的误差,保证了较高的插值精度。

Kriging 插值函数由线性回归模型与相关模型组成:

$$F(x) = f(x) + z(x), \quad (1)$$

其中, $f(x)$ 为回归模型,体现了插值空间全局近似; $z(x)$ 为随机过程,表征全局模型的局部偏差。回归模型通常取多项式的线性组合:

$$f(x) = \mathbf{p}^T(x) \mathbf{a}, \quad (2)$$

其中, $\mathbf{p}^T(x)$ 为坐标 x 的基函数, \mathbf{a} 为系数向量; 相关模型 $z(x)$ 是均值为 0、方差为 σ^2 的随机函数。 $z(x)$ 的协方差为:

$$\text{Cov}(z(x_i), z(x_j)) = \sigma^2 \mathbf{R}[R(x_i, x_j)],$$

其中, \mathbf{R} 为对角线为单位 1 的对称相关矩阵, $R(x_i, x_j)$ 为相关函数,常常选用简化的高斯模型:

$$R(x_i, x_j) = \exp(-\theta r_{ij}), \quad (3)$$

其中, θ 为待求的相关参数, r_{ij} 表示两点间距离。 kriging 函数的估计形式见公式(6),其求解过程详见文献:

$$\tilde{F}(x) = \mathbf{p}^T(x) \tilde{\mathbf{a}} + \mathbf{r}^T(x) \mathbf{R}^{-1} (\mathbf{F}_s - \mathbf{P}_s \tilde{\mathbf{a}}), \quad (4)$$

其中, $\mathbf{P}_s = [p_i(x_j)]$ 为选取节点基函数的

函数值矩阵, $\mathbf{r}^T(x)$ 为表示未知数据节点与已知数据节点距离向量:

$$\mathbf{r}^T(x) = [R(x, x_1), \dots, R(x, x_n)], \quad (5)$$

基函数系数 $\tilde{\mathbf{a}}$ 估计为:

$$\tilde{\mathbf{a}} = [\mathbf{P}_s^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{P}]^{-1} \mathbf{R}_s^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{F}_s. \quad (6)$$

方差 $\hat{\sigma}^2$ 估计形式如下:

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{(\mathbf{F}_s - \mathbf{P}_s \tilde{\mathbf{a}})^T \mathbf{R}^{-1} (\mathbf{F}_s - \mathbf{P}_s \tilde{\mathbf{a}})}{n}. \quad (7)$$

当假设 $f(x)$ 为一常数时, \mathbf{P}_s 简化为单位列向量。

$\tilde{F}(x)$ 是一个关于相关参数 θ 的函数, θ 通过求解优化问题:

$$\begin{aligned} \min & \frac{n \ln \hat{\sigma}^2 + \ln |\mathbf{R}|}{2} \\ \text{s.t.} & 0 \leq \theta \end{aligned} \quad (8)$$

得到。

3 算例分析

以离心式压气机的径流式叶片为对象,实现了耦合界面上温度从流体域向结构域的传递。耦合界面上流场网格和结构网格如图 2 所示。图 3 给出了经 CFD 计

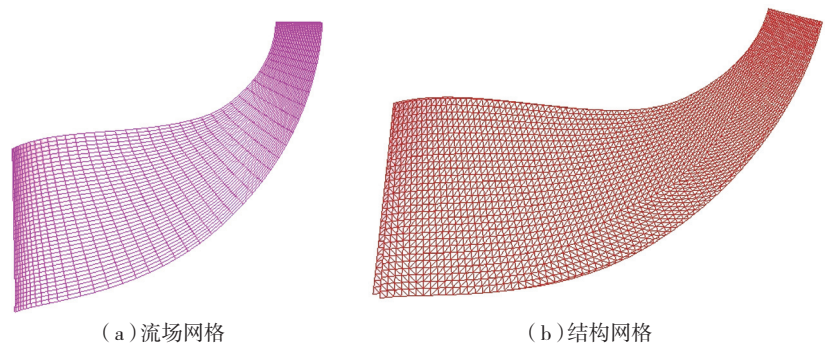


图2 耦合界面上的网格
Fig.2 Mesh on coupling interface

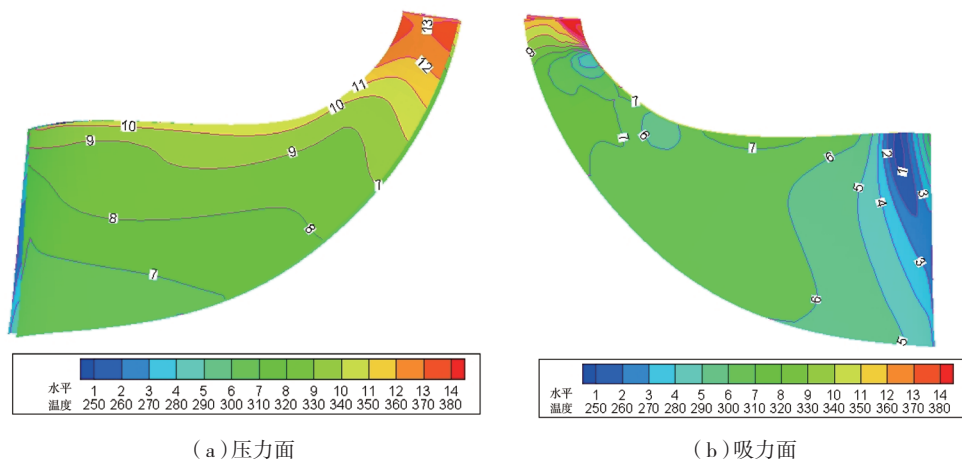


图3 流场表面温度分布
Fig.3 Distribution of surface temperature on fluid field

算的流场耦合界面上压力面、吸力面温度的分布。

众多学者开展了离散曲面的参数化方法的研究,提出了弦长参数化方法、正交投影法、Floater 保形参数化方法、Harmonic 调和参数化方法等,由于弦长参数化方法非常适用于无规则的散乱数据点参数化问题,并且本课题所研究的径流式叶片空间曲率变化较小,因此本课题用弦长的参数化方法实现插值空间的参数化(见图4)。

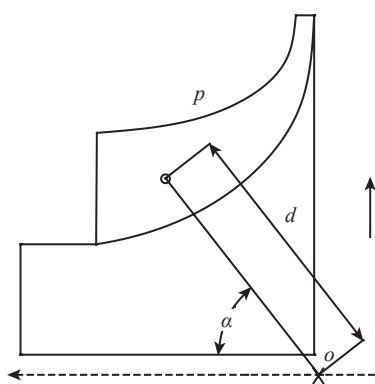


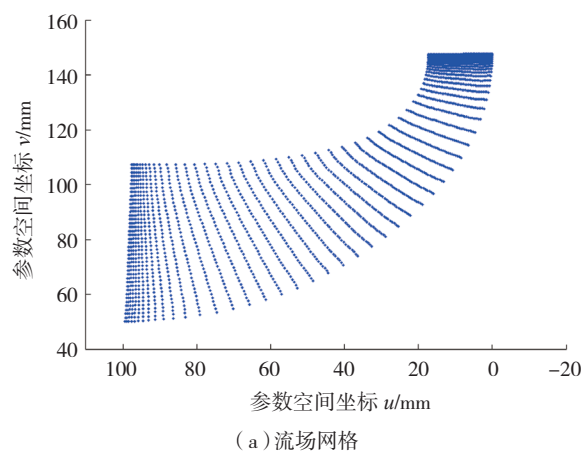
图4 参数化方法示意图
Fig.4 Diagram of parameterized method

$$\begin{cases} u = d \cdot \cos(\alpha) \\ v = d \cdot \sin(\alpha) \end{cases} \quad (9)$$

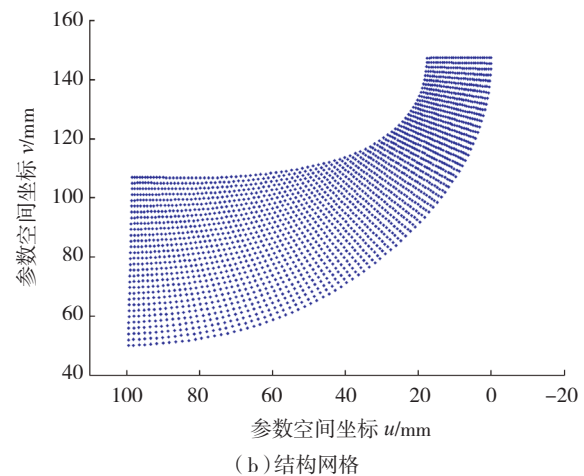
其中, d 为弦长, α 为弦长在流向和展向空间坐标平面投影与轴线的夹角。图5给出了用弦长参数化方法得到的参数化的流场、结构耦合界面。

图6(a)给出了流场耦合界面参数化空间的温度分布,图6(b)给出了Kriging插值函数得到的结构耦合界面参数化空间的温度分布,图7给出了kriging函数插值误差MSE分布图。图8、9给出了插值后叶片结构域的温度分布。

从图中可以看出,2种插值函数得到的结构表面温度分布符合流场气动表面温度分布,只是在尾缘处存在一定的插值误差。Kriging方法得到的温度分布更加平滑,更接近流场的温度分布,从MSE分布图上看仅在边界处存在较大的插值误差。为了进一步确定插值精度,



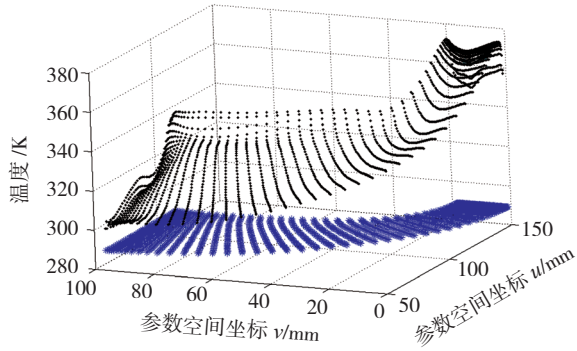
(a) 流场网格



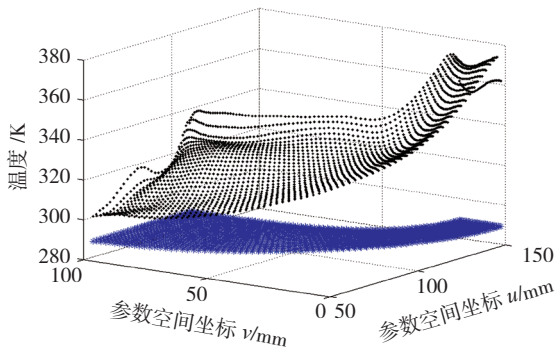
(b) 结构网格

图5 参数化的耦合界面网格

Fig.5 Parameterized mesh grid on coupling interface



(a) 流场表面温度分布



(b) Kriging 插值效果

图6 参数空间温度分布 (压力面)

Fig.6 Distribution of temperature on parameterized space (pressure side)

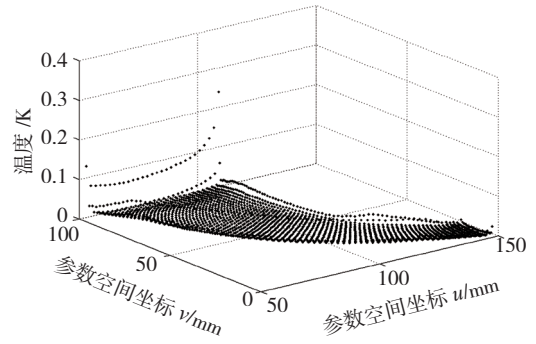
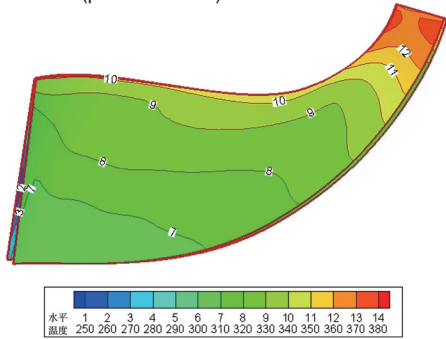


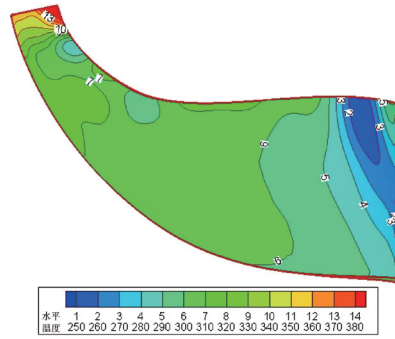
图7 MSE分布 (压力面)

Fig.7 Distribution of MSE (pressure side)

估计了结构表面所有节点的温度传递误差,表1和表2分别给出了插值前后压力面和吸力面温度数据的统计结果。从表中可以看出,插值函数在插值后的结构表面温度最大值、最小值基本保持一致,均值有一定的偏差。从插值精度看,反距离平均方法和 kriging 方法均达到一定的插值精度,压力面插值精度要高于吸力面,这主要是因为压力面温度梯度变化较为缓慢。从计算时间来看,反距离加权平均方法需要时间较短,kriging 方法由于需要进行最小无偏估计花费计算时间最长。在开展优化设计时反距离加权平均插值函数在满足插值精



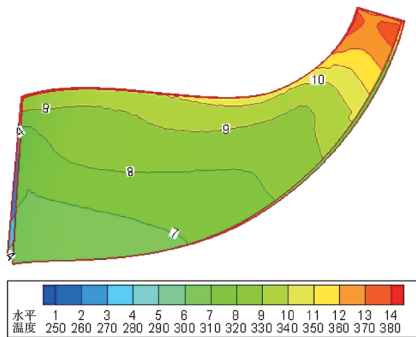
(a) 压力面



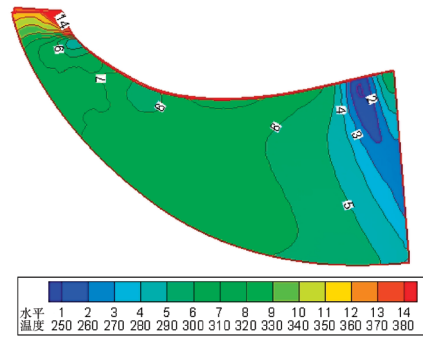
(b) 吸力面

图8 Kriging得到的叶片表面温度

Fig.8 Surface temperature on blade obtained by kriging interpolation



(a) 压力面



(b) 吸力面

图9 DWAF插值方法得到的叶片表面温度

Fig.9 Surface temperature on blade obtained by DWAF interpolation

表1 压力面插值效果统计 K

压力面	最大值	最小值	均值	
插值前	375.03	300.82	337.93	
插值后	DW	374.65	301.89	330.85
	Kriging	375.19	302.24	330.89

表2 吸力面插值效果统计 K

吸力面	最大值	最小值	均值	
插值前	388.55	245.16	312.27	
插值后	DW	388.23	246.38	303.36
	Kriging	392.18	250.20	303.35

度的同时可以节约大量的计算时间。

4 结束语

本课题针对多学科设计优化中耦合信息的传递问题,研究了参数空间插值方法。将耦合界面进行参数化处理有效降低了插值空间的维度,避免了三维空间曲率导致的插值误差,提高了插值精度,并方便于插值函数的构造。以径流式叶片对象,提出了一种参数化方法,实现了叶片温度场的传递。结果表明在所提出的参数化方法上进行的耦合信息传递,保证了较高的插值精度。Kriging 插值函数由于在插值空间进行了最小无偏估计,较好地保证了原始温度分布的特性,得到的温度分布更为平滑。与 Kriging 插值函数相比,反距离加权平均插值函数花费的时间较少,更适合在优化分析中采用。

参考文献

- [1] Samareh J A. A Unified Approach to Modeling Multidisciplinary Interactions. AIAA-2000-4704.
- [2] Samareh J A. Aerodynamic Shape Optimization Based on Free-form Deformation. AIAA-2004-4630.
- [3] 李立州,王婧超,韩永志,等. 基于网格变形技术的涡轮叶片变形传递. 航空动力学报,2007(22):2101-2104.
- [4] Hsu S Y, Chang C L, Samareh J. A Simplified Mesh Deformation Method Using Commercial Structural Analysis Software. AIAA 2004-4409.
- [5] Bock S. Approach for coupled heat transfer/heat flux calculations//Paper of the RTO AVT Symposium on Advanced Flow Management: Part B-Heat Transfer and Cooling in Propulsion and Power Systems. Norway, 2001.
- [6] 李立州,王婧超,吕震宙,等. 学科间载荷参数空间插值传递方法. 航空动力学报,2007(22):1050-1054.
- [7] Floater M S. Parametrization and smooth approximation of surface triangulations. Computer Aided Geometric Design, 1997(14):231-250.
- [8] 王国瑾,汪国昭,郑建民. 计算机辅助几何设计. 北京: 高等教育出版社,2001.

教育出版社,2001.

[9] 李新,程国栋,卢玲. 空间内插方法比较. 地球科学进展, 2000(15):260-265.

[10] 攀成,栾茂田,黎勇,等. Kriging 插值无网格方法及其在力学边值问题中的应用. 岩石力学与工程学报,2007(26):195-200.

[11] 杜宇健,萧德云. Kriging 算法在温度场计算中的应用分析. 计算机辅助设计与图形学学报,2004(16):1153-1158.

[12] Giunta A A, Watson L T. A comparison of approximation modeling techniques. Polynomial Versus Interpolating Models. AIAA-98-4758.

[13] 晏冬梅. 三角网格曲面参数化技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学,2005.

(责编 小颖)

(上接第76页)

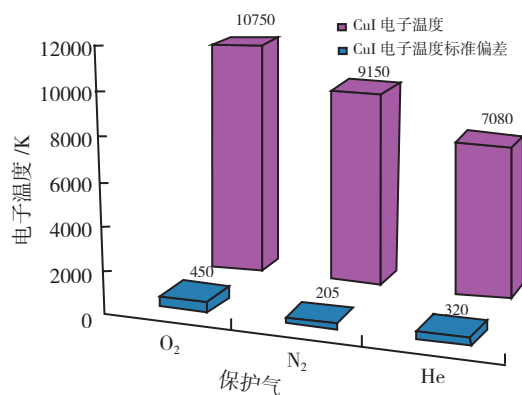


图4 不同保护气下通过相应谱线强度计算的CuI电子温度^[32]

Fig.4 CuI electron temperature calculated through comparison of corresponding spectral line intensities of plasma concerning changing of shielding gas type

种简单而常见的方法,已被国内外学者应用到激光焊接等离子体研究的领域中。由于激光等离子体电子温度、密度在空间上存在的梯度变化和时间上的不稳定性,给测量带来了一定的困难。由此可以看出:当前激光焊接等离子体光谱诊断工作大多只获得电子的平均温度、密度,即只对等离子体进行了单点测量,未考虑到电子温度、密度随时空的变化,致使测量的结果也存在一定的差异;本课题还探索了不同工艺参数下等离子光谱特征。今后应着重从以下2个方面开展激光焊接等离子光谱诊断工作:

(1) 研究激光焊接等离子体电子密度、温度随着空间的分布和时间的演变;

(2) 建立激光焊接工艺参数与激光焊接等离子体光谱特征的关系,进而通过光谱诊断对激光焊接质量进行监测。

本文共有参考文献32篇,因篇幅有限,未能一一列出,如有需要,请向本刊编辑部索取。(责编 岭雾)