



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 103495516 A

(43) 申请公布日 2014. 01. 08

(21) 申请号 201310440196. 1

(22) 申请日 2013. 09. 24

(71) 申请人 盐城工学院

地址 224051 江苏省盐城市希望大道9号

(72) 发明人 曾勇 周海 查文炜 倪骁骅

许宁

(74) 专利代理机构 南京经纬专利商标代理有限公司

32200

代理人 杨海军

(51) Int. Cl.

B05B 13/04 (2006. 01)

G06F 19/00 (2011. 01)

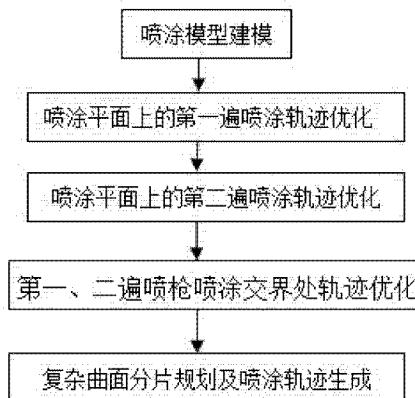
权利要求书3页 说明书10页 附图2页

(54) 发明名称

一种复杂曲面两遍自动喷涂轨迹优化方法

(57) 摘要

本发明涉及一种复杂曲面两遍自动喷涂轨迹优化方法,在获得第一遍喷涂轨迹参数的基础上,为了保证第二遍喷涂的均匀性,考虑到喷枪喷涂高度的变化,并以此建立三种第二遍喷枪喷涂模型,并以理想涂层厚度与实际涂层厚度方差最小为优化目标,求解获得第二遍喷枪喷涂轨迹参数,最后针对由复杂曲面分片得到的喷涂平面生成喷枪喷涂轨迹,使的复杂曲面在两遍喷涂工艺下的涂层均匀度进一步得到提升,从而提高产品表面的喷涂质量。



1. 一种复杂曲面两遍自动喷涂轨迹优化方法,包括如下步骤:

步骤 001. 运用实验方法对喷枪喷涂过程进行建模,获得喷枪针对喷涂平面的涂层厚度分布模型;

步骤 002. 根据涂层厚度分布模型,建立第一遍喷枪喷涂模型,并对其进行优化求解获得第一遍喷枪喷涂轨迹参数;

其特征在于,还包括如下步骤:

步骤 003. 获得第一遍喷涂涂层厚度分布,并以此获得第二遍喷枪喷涂实际喷涂高度;

步骤 004. 根据第二遍喷枪喷涂实际喷涂高度,获得第二遍喷涂涂层厚度分布;

步骤 005. 根据第二遍喷涂涂层厚度分布,建立三种两遍喷枪喷涂模型,并以理想涂层厚度与实际涂层厚度方差最小为优化目标,求解获得第二遍喷枪喷涂轨迹参数;

步骤 006. 针对复杂曲面进行分片,分成数个喷涂平面,针对各个喷涂平面,根据第一遍喷枪喷涂轨迹参数和第二遍喷枪喷涂轨迹参数分别获得第一遍喷涂轨迹和第二遍喷涂轨迹。

2. 根据权利要求 1 所述一种复杂曲面两遍自动喷涂轨迹优化方法,其特征在于:所述步骤 005 后、步骤 006 之前还包括如下步骤:

步骤 00501. 根据交界处相邻两片上所述第一遍喷涂涂层厚度分布和所述第二遍喷涂涂层厚度分布,获得交界处的涂层厚度分布,建立两遍交界处喷枪喷涂模型,并以理想涂层厚度与实际涂层厚度方差最小为优化目标,求解获得第一、二遍喷枪喷涂交界处轨迹参数;

所述步骤 006 中还包括如下内容:针对所述各个喷涂平面,根据第一遍喷枪喷涂轨迹参数、第二遍喷枪喷涂轨迹参数和第一、二遍喷枪喷涂交界处轨迹参数分别获得第一遍喷涂轨迹和第二遍喷涂轨迹。

3. 根据权利要求 2 所述一种复杂曲面两遍自动喷涂轨迹优化方法,其特征在于:所述第一遍喷枪喷涂轨迹参数和第二遍喷枪喷涂轨迹参数的求解通过黄金分割法进行求解;第一、二遍喷枪喷涂交界处轨迹参数的求解通过改进的带约束的模式搜索法进行求解。

4. 根据权利要求 1 或 2 所述一种复杂曲面两遍自动喷涂轨迹优化方法,其特征在于:所述步骤 006 中针对复杂曲面进行分片,分成数个喷涂平面包括如下步骤:

步骤 006-1. 针对所述复杂曲面进行三角网格化,获得各个三角面片的法向量与该三角面片的投影平面的法向量最大偏角为 α_{th} ,以及复杂曲面分片后面片间允许的最大法向夹角为 γ_{th} ;步骤 006-2. 任意指定一个三角面片为初始三角面片;

步骤 006-3. 以初始三角面片为中心,寻找其四周范围内的三角面片,并分别获得所寻找到的三角面片的法向量与初始三角面片的法向量之间的夹角 α_{oj} ;

步骤 006-4. 判断是否 $\alpha_{oj} \leq \alpha_{th}$,是则将该寻找到的三角面片与初始三角面片连接,得到分片面片,即喷涂平面,否则,寻找一个尚未连接的三角面片为新的初始三角面片,返回步骤 006-3,直到所有的三角面片连接成片为止。

5. 根据权利要求 4 所述一种复杂曲面两遍自动喷涂轨迹优化方法,其特征在于:所述步骤 006-4 之后还包括如下步骤:

步骤 006-5. 针对所述各个分片面片,分别获得相邻两个分片面片法向量之间的夹角 $\angle(n_j \hat{n}_{j+1})$,判断 $\gamma_{th} < \angle(n_j \hat{n}_{j+1}) < 90^\circ$ 是否成立,是则将该相邻两个分片面片还原成三角

面片,并以该相邻两个分片面片交界处的任意一个三角面片作为新的初始三角面片,返回步骤 006-3;否则该相邻两个分片面片即为获得的喷涂平面;

其中, n_j 和 n_{j+1} 分别表示相邻两个分片面片的法向量, $j \in \{1, \dots, J\}$, J 为所述分片面片的数量。

6. 根据权利要求 5 所述一种复杂曲面两遍自动喷涂轨迹优化方法,其特征在于:所述步骤 006 中针对喷涂平面,采用边界盒子法获得所述第一遍喷涂轨迹和第二遍喷涂轨迹。

7. 根据权利要求 2 所述一种复杂曲面两遍自动喷涂轨迹优化方法,其特征在于:所述步骤 00501 具体包括如下步骤:

步骤 00501-1. 根据交界处相邻两片上所述第一遍喷涂涂层厚度分布和所述第二遍喷涂涂层厚度分布,获得交界处的涂层厚度分布 $T_s(x, h^*)$ 如下:

$$T_s(x, h^*) = \begin{cases} T_{1,1}(x, h^*) + T_{2,1}(x, h^* + h) + [T_{1,2}(x, h^*) + T_{2,2}(x, h^*)] \cos \gamma & -\max(L_1, h + h^*) \leq x \leq 0 \\ T_{1,2}(x, h^*) + T_{2,2}(x, h^* + h) + [T_{1,1}(x, h^*) + T_{2,1}(x, h^*)] \cos \gamma & 0 \leq x \leq \max(L_1, h + h^*) \end{cases}$$

其中, $T_{1,1}$ 和 $T_{2,1}$ 分别表示第一遍和第二遍喷涂在喷涂平面 1 上的涂层厚度, $T_{1,2}$ 和 $T_{2,2}$ 分别表示第一遍和第二遍喷涂在喷涂平面 2 上的涂层厚度, h^* 为任意一次喷涂轨迹到两喷涂平面交界处的距离, h 为两遍喷涂轨迹的间距, γ 表示两喷涂平面的法向量夹角, L_1 和 L_2 分别表示喷枪在喷涂平面 1 上两遍喷涂时扩散在喷涂平面 2 上的涂膜边界到交界处的距离,具体如下:

$$L_1 = \frac{-3\sqrt{10}(h^* - 50)}{10\sin(\arctan 3 - \gamma)}, L_2 = \frac{-3\sqrt{10}(h^* + 14.7 - 50)}{10\sin(\arctan 3 - \gamma)}$$

h^* 取值范围如下:

$$h^* \in \{h_{\gamma\min}^*, h_{\gamma\max}^* \mid L_1 \in [x_m, x_{m+1}] \cap L_2 \in [x_n, x_{n+1}]\} \quad (1)$$

其中, m 和 n 为整数,且 $m \geq n$:

步骤 00501-2. 建立两遍交界处喷枪喷涂模型,并以理想涂层厚度与实际涂层厚度方差最小为优化目标,建立优化模型如下:

$$\begin{cases} \min E(h^*) = \int_0^{\max(L_1, h+h^*)} (T_s(x, h^*) - T_d)^2 dx \\ s.t. h^* \in \{h_{\gamma\min}^*, h_{\gamma\max}^* \mid L_1 \in [x_m, x_{m+1}] \cap L_2 \in [x_n, x_{n+1}]\} \end{cases} \quad (2)$$

其中, $h_{\gamma\min}^*$ 、 $h_{\gamma\max}^*$ 分别表示两喷涂平面的法向量夹角为 γ 情况下, h^* 的最小值、最大值;

步骤 00501-3. 根据式(1)和式(2)求解获得第一、二遍交界处喷枪喷涂轨迹参数。

8. 根据权利要求 1 所述一种复杂曲面两遍自动喷涂轨迹优化方法,其特征在于:所述步骤 004 具体包括如下内容:

根据 $T_s^2(x) = T_s^1(x) + \eta^1(x) T^2(x)$, 获得第二遍喷涂涂层厚度分布 $T_s^2(x)$;

其中, $\eta^1(x) = \left(\frac{H}{H_s} \right)$, $H_s = H - T_s^1(x)$, H 为第二遍喷枪喷涂理想喷涂高度, H_s 为第二遍喷枪喷涂实际喷涂高度, $T_s^1(x)$ 为第一遍喷涂涂层厚度分布, $T^2(x)$ 为第二遍喷涂理想涂层厚

度分布。

9. 根据权利要求 1 或 8 所述一种复杂曲面两遍自动喷涂轨迹优化方法,其特征在于:所述步骤 005 包括:根据第二遍喷涂涂层厚度分布,建立三种两遍喷枪喷涂模型,并以理想涂层厚度与实际涂层厚度方差最小为优化目标,求解获得第二遍喷枪喷涂轨迹参数,具体包括如下步骤:

步骤 005-1. 根据第二遍喷涂涂层厚度分布,建立三种两遍喷枪喷涂模型如下:

$$T_s^2(x) = \begin{cases} T_1^1 + \eta^1(x)T_1^2 & m_1 : h \leq x \leq \delta - R \\ T_1^1 + T_2^1 + \eta^1(x)T_1^2 & \begin{cases} m_1 : \delta - R \leq x \leq \delta - R + h \\ m_2, m_3 : h \leq x \leq h + \delta - R \end{cases} \\ T_1^1 + T_2^1 + \eta^1(x)(T_1^2 + T_2^2) & m_1, m_2, m_3 : h + \delta - R \leq x \leq R \\ T_2^1 + \eta^1(x)(T_1^2 + T_2^2) & \begin{cases} m_1, m_2 : R \leq x \leq R + h \\ m_3 : R \leq x \leq 2\delta - R \end{cases} \\ T_2^1 + \eta^1(x)T_2^2 & \begin{cases} m_1 : R + h \leq x \leq \delta + h \\ m_2 : R + h \leq x \leq 2\delta - R \end{cases} \\ T_2^1 + T_3^1 + \eta^1(x)T_2^2 & \begin{cases} m_2 : 2\delta - R \leq x \leq \delta + h \\ m_3 : R + h \leq x \leq \delta + h \end{cases} \\ T_2^1 + T_3^1 + \eta^1(x)(T_2^2 + T_1^2) & m_3 : 2\delta - R \leq x \leq R + h \end{cases}$$

其中, δ 为第一遍喷涂和第二遍喷涂的周期,模型数为 3, T_1^1 、 T_2^1 、 T_3^1 分别表示第一遍喷涂中第 1、2、3 段轨迹上的涂层厚度, T_1^2 、 T_2^2 分别表示第二遍喷涂中第 1、2 段轨迹上的理想涂层厚度, $\eta^1(x) = \left(\frac{H}{H_s} \right)$, $H_s = H - T_s^1(x)$, H 为第二遍喷枪喷涂理想喷涂高度, H_s 为第二遍

喷枪喷涂实际喷涂高度, $T_s^1(x)$ 为第一遍喷涂涂层厚度分布, h 为两遍喷涂时的轨迹偏距, R 为喷涂半径, $m_1 = \{0 \leq h \leq \delta - R\}$, $m_2 = \{\delta - R \leq h \leq 2(\delta - R)\}$, $m_3 = \{2(\delta - h) \leq h \leq \delta / 2\}$, m_1 、 m_2 、 m_3 分别表示三种第二遍喷枪喷涂模型下偏距 h 的取值范围;

步骤 005-2. 根据三种两遍喷枪喷涂模型,以理想涂层厚度与实际涂层厚度方差最小为优化目标,建立如下优化模型:

$$\min = \left\{ \min_{h_i \in m_i} E_i(h_i) = \int_{h_i}^{h_i + \delta} (T_s^2(x, h_i) - T_d)^2 dx \mid i = 1, 2, 3 \right\}$$

其中, T_d 为喷枪喷涂的理想涂层厚度, $T_s^2(x)$ 为第二遍喷涂涂层厚度分布;

步骤 005-3. 针对步骤 005-2 中的优化模型,求解获得第二遍喷枪喷涂轨迹参数,即 E 值最小时,两遍喷涂时的轨迹偏距 h 。

一种复杂曲面两遍自动喷涂轨迹优化方法

技术领域

[0001] 本发明涉及一种表面喷涂轨迹优化方法,具体涉及一种复杂曲面两遍自动喷涂轨迹优化方法。

背景技术

[0002] 喷涂机器人是涂装领域中一个非常重要的先进自动涂装设备,广泛运用在诸如汽车、造船、模具和航空航天领域中。对于表面有涂层的产品和零部件而言,除了其本体的尺寸参数和机械性能是评价质量好坏的重要指标,同时涂层均匀度也是评价一个产品质量好坏的一个重要指标。诸如针对汽车面漆的两遍喷涂工艺,通过对复杂曲面的分片处理和对两遍喷涂轨迹的优化,设计出一种两遍喷涂工艺下,复杂曲面上涂层均匀度最佳的喷涂轨迹优化方法是喷涂机器人的技术空白之一。

[0003] 目前,面向复杂曲面的喷涂轨迹优化已成为研究喷涂机器人的技术热点和难点,它直接决定了喷枪沿轨迹喷涂后的涂层质量。目前国内外针对复杂曲面的喷涂轨迹优化均是基于单遍喷涂工艺的基础上展开的,如公开号 CN101239346、CN101367076A 和 CN102500498A 分别提供的针对复杂曲面、非规则平面和非规则多面体的单遍喷涂轨迹优化方法,而在实际喷涂工艺中,为了达到某个喷涂要求,往往采用两遍喷涂的工艺方法,倘若简单地将单遍喷涂的轨迹优化方法叠加在两遍喷涂工艺上,并不能获得涂层质量最佳的两遍喷涂轨迹,针对两遍喷涂工艺的复杂曲面自动喷涂轨迹优化方法尚有提高的空间。

[0004] 因此,针对两遍喷涂工艺,若能设计一种最佳的两遍喷涂轨迹规划方法,进一步提高产品表面的喷涂质量,从而可以提高企业的经济效益。

发明内容

[0005] 针对上述技术问题,本发明所要解决的技术问题是提供一种针对复杂曲面,实现两遍喷涂轨迹优化,保证涂层均匀度的复杂曲面两遍自动喷涂轨迹优化方法。

[0006] 本发明为了解决上述技术问题采用以下技术方案:本发明设计了一种复杂曲面两遍自动喷涂轨迹优化方法,包括如下步骤:

[0007] 步骤 001. 运用实验方法对喷枪喷涂过程进行建模,获得喷枪针对喷涂平面的涂层厚度分布模型;

[0008] 步骤 002. 根据涂层厚度分布模型,建立第一遍喷枪喷涂模型,并对其进行优化求解获得第一遍喷枪喷涂轨迹参数;

[0009] 步骤 003. 获得第一遍喷涂涂层厚度分布,并以此获得第二遍喷枪喷涂实际喷涂高度;

[0010] 步骤 004. 根据第二遍喷枪喷涂实际喷涂高度,获得第二遍喷涂涂层厚度分布;

[0011] 步骤 005. 根据第二遍喷涂涂层厚度分布,建立三种两遍喷枪喷涂模型,并以理想涂层厚度与实际涂层厚度方差最小为优化目标,求解获得第二遍喷枪喷涂轨迹参数;

[0012] 步骤 006. 针对复杂曲面进行分片,分成数个喷涂平面,针对各个喷涂平面,根据

第一遍喷枪喷涂轨迹参数和第二遍喷枪喷涂轨迹参数分别获得第一遍喷涂轨迹和第二遍喷涂轨迹。

[0013] 作为本发明的一种优选技术方案:所述步骤 005 后、步骤 006 之前还包括如下步骤:

[0014] 步骤 00501. 根据交界处相邻两片上所述第一遍喷涂涂层厚度分布和所述第二遍喷涂涂层厚度分布,获得交界处的涂层厚度分布,建立两遍交界处喷枪喷涂模型,并以理想涂层厚度与实际涂层厚度方差最小为优化目标,求解获得第一、二遍喷枪喷涂交界处轨迹参数;

[0015] 所述步骤 006 中还包括如下内容:针对所述各个喷涂平面,根据第一遍喷枪喷涂轨迹参数、第二遍喷枪喷涂轨迹参数和第一、二遍喷枪喷涂交界处轨迹参数分别获得第一遍喷涂轨迹和第二遍喷涂轨迹。

[0016] 作为本发明的一种优选技术方案:所述第一遍喷枪喷涂轨迹参数和第二遍喷枪喷涂轨迹参数的求解通过黄金分割法进行求解;第一、二遍喷枪喷涂交界处轨迹参数的求解通过改进的带约束的模式搜索法进行求解。

[0017] 作为本发明的一种优选技术方案:所述步骤 006 中针对复杂曲面进行分片,分成数个喷涂平面包括如下步骤:

[0018] 步骤 006-1. 针对所述复杂曲面进行三角网格化,获得各个三角面片的法向量与该三角面片的投影平面的法向量最大偏角为 α_{th} ,以及复杂曲面分片后面片间允许的最大法向夹角为 γ_{th} ;

[0019] 步骤 006-2. 任意指定一个三角面片为初始三角面片;

[0020] 步骤 006-3. 以初始三角面片为中心,寻找其四周范围内的三角面片,并分别获得所寻找到的三角面片的法向量与初始三角面片的法向量之间的夹角 α_{oj} ;

[0021] 步骤 006-4. 判断是否 $\alpha_{oj} \leq \alpha_{th}$, 是则将该寻找到的三角面片与初始三角面片连接,得到分片面片,即喷涂平面,否则,寻找一个尚未连接的三角面片为新的初始三角面片,返回步骤 006-3,直到所有的三角面片连接成片为止。

[0022] 作为本发明的一种优选技术方案:所述步骤 006-4 之后还包括如下步骤:

[0023] 步骤 006-5. 针对所述各个分片面片,分别获得相邻两个分片面片法向量之间的夹角 $\angle(n_j \wedge n_{j+1})$,判断 $\gamma_{th} < \angle(n_j \wedge n_{j+1}) < 90^\circ$ 是否成立,是则将该相邻两个分片面片还原成三角面片,并以该相邻两个分片面片交界处的任意一个三角面片作为新的初始三角面片,返回步骤 006-3;否则该相邻两个分片面片即为获得的喷涂平面;

[0024] 其中, n_j 和 n_{j+1} 分别表示相邻两个分片面片的法向量, $j \in \{1, \dots, J\}$, J 为所述分片面片的数量。

[0025] 作为本发明的一种优选技术方案:所述步骤 006 中针对喷涂平面,采用边界盒子法(bounding-box)法获得所述第一遍喷涂轨迹和第二遍喷涂轨迹。

[0026] 作为本发明的一种优选技术方案:所述步骤 00501 具体包括如下步骤:

[0027] 步骤 00501-1. 根据交界处相邻两片上所述第一遍喷涂涂层厚度分布和所述第二遍喷涂涂层厚度分布,获得交界处的涂层厚度分布 $T_s(x, h^*)$ 如下:

[0028]

$$T_s(x, h^*) = \begin{cases} T_{1,1}(x, h^*) + T_{2,1}(x, h^* + h) + [T_{1,2}(x, h^*) + T_{2,2}(x, h^*)] \cos \gamma & -\max(L_1, h + h^*) \leq x \leq 0 \\ T_{1,2}(x, h^*) + T_{2,2}(x, h^* + h) + [T_{1,1}(x, h^*) + T_{2,1}(x, h^*)] \cos \gamma & 0 \leq x \leq \max(L_1, h + h^*) \end{cases}$$

[0029] 其中, $T_{1,1}$ 和 $T_{2,1}$ 分别表示第一遍和第二遍喷涂在喷涂平面 1 上的涂层厚度, $T_{1,2}$ 和 $T_{2,2}$ 分别表示第 1 遍和第 2 遍喷涂在喷涂平面 2 上的涂层厚度, h^* 为任意一次喷涂轨迹到两喷涂平面交界处的距离, h 为两遍喷涂轨迹的间距, γ 表示两喷涂平面的法向量夹角, L_1 和 L_2 分别表示喷枪在喷涂平面 1 上两遍喷涂时扩散在喷涂平面 2 上的涂膜边界到交界处的距离, 具体如下:

$$[0030] \quad L_1 = \frac{-3\sqrt{10}(h^* - 50)}{10 \sin(\arctan 3 - \gamma)}, \quad L_2 = \frac{-3\sqrt{10}(h^* + 14.7 - 50)}{10 \sin(\arctan 3 - \gamma)}$$

[0031] h^* 取值范围如下:

$$[0032] \quad h^* \in \{h_{\gamma \min}^*, h_{\gamma \max}^*\} | L_1 \in [x_m, x_{m+1}] \cap L_2 \in [x_n, x_{n+1}] \} \quad (1)$$

[0033] 其中, m 和 n 为整数, 且 $m \geq n$:

[0034] 步骤 00501-2. 建立两遍交界处喷枪喷涂模型, 并以理想涂层厚度与实际涂层厚度方差最小为优化目标, 建立优化模型如下:

$$[0035] \quad \begin{cases} \min E(h^*) = \int_0^{\max(L_1, h+h^*)} (T_s(x, h^*) - T_d)^2 dx \\ s.t. h^* \in \{h_{\gamma \min}^*, h_{\gamma \max}^*\} | L_1 \in [x_m, x_{m+1}] \cap L_2 \in [x_n, x_{n+1}] \} \end{cases} \quad (2)$$

[0036] 其中, $h_{\gamma \min}^*$ 、 $h_{\gamma \max}^*$ 分别表示两喷涂平面的法向量夹角为 γ 情况下, h^* 的最小值、最大值;

[0037] 步骤 00501-3. 根据式(1)和式(2)求解获得第一、二遍喷枪喷涂交界处轨迹参数。

[0038] 作为本发明的一种优选技术方案: 所述步骤 004 具体包括如下内容:

[0039] 根据 $T_s^2(x) = T_s^1(x) + \eta^1(x) T^2(x)$, 获得第二遍喷涂涂层厚度分布 $T_s^2(x)$;

[0040] 其中, $\eta^1(x) = \left(\frac{H}{H_s} \right)$, $H_s = H - T_s^1(x)$, H 为第二遍喷枪喷涂理想喷涂高度, H_s 为第二

遍喷枪喷涂实际喷涂高度, $T_s^1(x)$ 为第一遍喷涂涂层厚度分布, $T^2(x)$ 为第二遍喷涂理想涂层厚度分布。

[0041] 作为本发明的一种优选技术方案: 所述步骤 005 包括: 根据第二遍喷涂涂层厚度分布, 建立三种两遍喷枪喷涂模型, 并以理想涂层厚度与实际涂层厚度方差最小为优化目标, 求解获得第二遍喷枪喷涂轨迹参数, 具体包括如下步骤:

[0042] 步骤 005-1. 根据第二遍喷涂涂层厚度分布, 建立三种两遍喷枪喷涂模型如下:

$$[0043] \quad T_s^2(x) = \begin{cases} T_1^1 + \eta^1(x)T_1^2 & m_1 : h \leq x \leq \delta - R \\ T_1^1 + T_2^1 + \eta^1(x)T_1^2 & \begin{cases} m_1 : \delta - R \leq x \leq \delta - R + h \\ m_2, m_3 : h \leq x \leq h + \delta - R \end{cases} \\ T_1^1 + T_2^1 + \eta^1(x)(T_1^2 + T_2^2) & m_1, m_2, m_3 : h + \delta - R \leq x \leq R \\ T_2^1 + \eta^1(x)(T_1^2 + T_2^2) & \begin{cases} m_1, m_2 : R \leq x \leq R + h \\ m_3 : R \leq x \leq 2\delta - R \end{cases} \\ T_2^1 + \eta^1(x)T_2^2 & \begin{cases} m_1 : R + h \leq x \leq \delta + h \\ m_2 : R + h \leq x \leq 2\delta - R \end{cases} \\ T_2^1 + T_3^1 + \eta^1(x)T_2^2 & \begin{cases} m_2 : 2\delta - R \leq x \leq \delta + h \\ m_3 : R + h \leq x \leq \delta + h \end{cases} \\ T_2^1 + T_3^1 + \eta^1(x)(T_2^2 + T_1^2) & m_3 : 2\delta - R \leq x \leq R + h \end{cases}$$

[0044] 其中, δ 为第一遍喷涂和第二遍喷涂的周期, 模型数为 3, T_1^1 、 T_2^1 、 T_3^1 分别表示第一遍喷涂中第 1、2、3 段轨迹上的涂层厚度, T_1^2 、 T_2^2 分别表示第二遍喷涂中第 1、2 段

轨迹上的理想涂层厚度, $\eta^1(x) = \left(\frac{H}{H_s} \right)$, $H_s = H - T_s^1(x)$, H 为第二遍喷枪喷涂理想喷涂高

度, H_s 为第二遍喷枪喷涂实际喷涂高度, $T_s^1(x)$ 为第一遍喷涂涂层厚度分布, h 为两遍喷涂时的轨迹偏距, R 为喷涂半径, $m_1 = \{0 \leq h \leq \delta - R\}$, $m_2 = \{\delta - R \leq h \leq 2(\delta - R)\}$, $m_3 = \{2(\delta - h) \leq h \leq \delta / 2\}$, m_1 、 m_2 、 m_3 分别表示三种两遍喷枪喷涂模型下偏距 h 的取值范围;

[0045] 步骤 005-2. 根据三种两遍喷枪喷涂模型, 以理想涂层厚度与实际涂层厚度方差最小为优化目标, 建立如下优化模型:

$$[0046] \quad \min = \left\{ \min_{h_i \in m_i} E_i(h_i) = \int_{h_i}^{h_i + \delta} (T_s^2(x, h_i) - T_d) dx \mid i = 1, 2, 3 \right\}$$

[0047] 其中, T_d 为喷枪喷涂的平均涂层厚度, $T_s^2(x)$ 为第二遍喷涂涂层厚度分布;

[0048] 步骤 005-3. 针对步骤 005-2 中的优化模型, 求解获得第二遍喷枪喷涂轨迹参数, 即 E 值最小时, 两遍喷涂时的轨迹偏距 h 。

[0049] 本发明所述一种复杂曲面两遍自动喷涂轨迹优化方法采用以上技术方案与现有技术相比, 具有以下技术效果:

[0050] (1) 本发明设计的复杂曲面两遍自动喷涂轨迹优化方法, 提供了一种两遍喷涂工艺的自动喷涂轨迹优化方法, 使得复杂曲面在两遍喷涂工艺下的涂层均匀度进一步得到提升, 从而提高产品表面的喷涂质量;

[0051] (2) 本发明设计的复杂曲面两遍自动喷涂轨迹优化方法中, 在对复杂曲面分片的基础上, 针对相邻两个喷涂平面交界处的两遍喷涂, 提供了两遍喷涂轨迹的优化方法, 有效保证了交界处的两遍喷涂的涂层均匀度;

[0052] (3) 本发明设计的复杂曲面两遍自动喷涂轨迹优化方法中, 为了避免法向夹角较大两面片间的涂层均匀度较差, 在复杂曲面分片算法的基础上, 提供了考虑面片间最大夹角阈值的分片算法, 从而有效保证了面片交界处的涂层均匀度满足喷涂质量要求。

附图说明

- [0053] 图 1 是本发明设计的复杂曲面两遍自动喷涂轨迹优化方法的流程图；
 [0054] 图 2 是喷枪喷涂空间模型；
 [0055] 图 3 是喷枪在平面上的涂层生长速率模型；
 [0056] 图 4 是第一遍喷涂涂层叠加示意图；
 [0057] 图 5 是第二遍喷涂涂层厚度生长示意图；
 [0058] 图 6 是面片中两遍喷涂涂层叠加示意图；
 [0059] 图 7 面片交界处两遍喷涂轨迹规划示意图；
 [0060] 图 8 是面片交界处两遍喷涂涂层叠加计算示意图；
 [0061] 图 9 是边界盒子法示意图；
 [0062] 图 10 是喷枪轨迹生成示意图。

具体实施方式

- [0063] 下面结合说明书附图对本发明的具体实施方式作进一步详细的说明。
 [0064] 如图 1、图 2 和图 3 所示，本发明设计了一种复杂曲面两遍自动喷涂轨迹优化方法，包括如下步骤：
 [0065] 步骤 001. 运用实验方法对喷枪喷涂过程进行建模，获得喷枪针对喷涂平面的涂层厚度分布模型，具体如下；
 [0066] 喷涂过程中，喷枪形成的涂层生长速率模型直接影响到整个涂装生产的质量，因此显得至关重要。本发明是基于一种涂料空间分布为圆锥形的喷枪展开的，其喷炬截面为一圆形且在各方向上的覆盖范围相同。假设喷枪静止喷涂时的喷涂距离 H 、喷涂流量 Q 、喷射张角 ϕ 、喷涂倾角 α 恒定不变，如图 2 所示，其中 θ_s 是点 S 和喷枪的连线与喷枪中轴线的夹角， r 是平面上一点 S 到沿喷射方向喷枪中心投影点的距离。保持喷枪垂直静止，即 $\alpha = 0^\circ$ ，在平板上做喷涂实验，喷涂一段时间 t 后，测得喷涂范围内的各点涂层厚度值，拟合得到涂层厚度分布近似呈抛物线分布，如图 3 所示，其表达式为：

$$[0067] \quad T(r) = \begin{cases} D(1 - \frac{r^2}{R^2}) & |r| \leq R \\ 0 & |r| > R \end{cases}$$

- [0068] 其中： R 为喷涂半径； D 为喷幅内喷涂时间 t 下的最大涂层厚度
 [0069] 根据涂层厚度分布函数，此时喷枪流量 Q 可以表示为：

$$[0070] \quad Q = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^R D(1 - \frac{r^2}{R^2}) r dr d\theta}{t} = \frac{\pi R^2 D}{2t}$$

$$[0071] \quad \text{则：} D = \frac{2Qt}{\pi R^2}$$

- [0072] 因此，单位时间内的喷枪喷涂的涂层生长速率模型可表示为：

$$[0073] \quad f(r) = \frac{T(r)}{t} = \begin{cases} \frac{2Q}{\pi R^2} (1 - \frac{r^2}{R^2}) & |r| \leq R \\ 0 & |r| > R \end{cases}$$

[0074] 步骤 002. 根据涂层厚度分布模型, 建立第一遍喷枪喷涂模型, 并对其进行优化求解获得第一遍喷枪喷涂轨迹参数;

[0075] 工件表面上的涂层是喷枪在工件上来回或者回旋运动, 通过相邻轨迹间的涂层叠加获得的, 如图 4 所示。影响涂层厚度和均匀度的参数是喷枪速率和轨迹间距, 喷涂时, 需要对这两个参数进行优化。工件上任意一条轨迹上的涂层厚度可表示为:

$$\begin{aligned}
 T_i^1(x) &= 2 \int_0^{\sqrt{R^2 - (x - (i-1)\omega)^2} / v} f(r) dt \\
 [0076] \quad &= 2 \int_0^{\sqrt{R^2 - (x - (i-1)\omega)^2} / v} A [R^2 - (\sqrt{(vt)^2 + (x - (i-1)\omega)^2})^2] dt \quad (i-1)\omega - R \leq x \leq R + (i-1)\omega \\
 &= \frac{4A}{3v} [R^2 - (x - (i-1)\omega)^2]^{1.5}
 \end{aligned}$$

[0077] 第一遍喷涂后, 相邻轨迹间的涂层叠加后的涂层厚度可表示为:

$$[0078] \quad T_s^1(x) = \begin{cases} T_i^1(x) & (i-1)\omega \leq x \leq i\omega - R \\ T_i^1(x) + T_{i+1}^1(x) & i\omega - R \leq x \leq (i-1)\omega + R \\ T_{i+1}^1(x) & (i-1)\omega + R \leq x \leq i\omega \end{cases}$$

[0079] 若使工件上的涂层均匀度达到最佳, 这里分别取工件上任意一点 S 的涂层厚度与理想涂层厚度方差最小和喷涂后最大最小涂层厚度与理想涂层厚度差的平方和最小为优化目标函数:

$$[0080] \quad \begin{cases} \min_{\omega \in [R, 2R]} E_1(v, \omega) = \int_{(i-1)\omega}^{i\omega} (T_s^1(x, \omega, v) - T_d)^2 dx \\ \min_{\omega \in [R, 2R]} E_2(v, \omega) = (T_{\max} - T_d)^2 + (T_{\min} - T_d)^2 \end{cases}$$

[0081] 其中: i 表示工件上喷涂轨迹的轨迹段数; ω 表示相邻轨迹的垂直轨迹间距; v 表示喷枪沿轨迹的行走速率; $T_i^1(x)$ 和 $T_{i+1}^1(x)$ 分别表示相邻轨迹上的涂层厚度。

[0082] 为了在两遍喷涂工艺中进一步获得更好的涂层均匀度, 首先必须建立两遍喷涂后的涂层叠加模型, 而涂层叠加模型并不是恒定不变的。究其原因第一遍喷涂时, 工件表面上的涂层由重叠和独立区域相隔排列构成的, 而第二遍喷涂时, 每次喷涂轨迹上的重叠区和独立区又相互任意叠加, 随着两次喷涂轨迹偏距的不同, 涂层叠加模型也不同。

[0083] 步骤 003. 获得第一遍喷涂涂层厚度分布, 并以此获得第二遍喷枪喷涂实际喷涂高度;

[0084] 第二遍喷涂时, 每次喷涂得到的涂层厚度不能简单地进行叠加, 究其原因是工件表面的形状被第一次喷涂后的涂层分布所取代, 因此, 再进行下一次喷涂时, 涂层是在上一次喷涂的涂层上生长得到的, 这里面实际上是改变了喷枪喷涂的高度。设 H 为第二遍喷枪喷涂理想喷涂高度, H_s 为第二遍喷枪喷涂实际喷涂高度, 第一遍喷涂涂层厚度分布为 $T_s^1(x)$, 如图 5 所示, 由图可知 H_s 受到上一次喷涂后涂层厚度分布的影响, 有:

$$[0085] \quad H_s = H - T_s^1(x)$$

[0086] 步骤 004. 根据第二遍喷枪喷涂实际喷涂高度, 获得第二遍喷涂涂层厚度分布;

[0087] 根据 $T_s^2(x) = T_s^1(x) + \eta^1(x) T^2(x)$, 获得第二遍喷涂涂层厚度分布 $T_s^2(x)$;

[0088] 其中, $\eta^1(x) = \left(\frac{H}{H_s} \right)$, $H_s = H - T_s^1(x)$, H 为第二遍喷枪喷涂理想喷涂高度, H_s 为第二遍喷枪喷涂实际喷涂高度, $T_s^1(x)$ 为第一遍喷涂涂层厚度分布, $T^2(x)$ 为第二遍喷涂理想涂层厚度分布。

[0089] 步骤 005. 根据第二遍喷涂涂层厚度分布, 建立三种两遍喷涂后喷枪喷涂模型, 如图 6 所示, 并以理想涂层厚度与实际涂层厚度方差最小为优化目标, 求解获得第二遍喷枪喷涂轨迹参数, 具体如下:

[0090] 步骤 005-1. 根据第二遍喷涂涂层厚度分布, 建立三种两遍喷枪喷涂模型如下:

$$[0091] \quad T_s^2(x) = \begin{cases} T_1^1 + \eta^1(x)T_1^2 & m_1 : h \leq x \leq \delta - R \\ T_1^1 + T_2^1 + \eta^1(x)T_1^2 & \begin{cases} m_1 : \delta - R \leq x \leq \delta - R + h \\ m_2, m_3 : h \leq x \leq h + \delta - R \end{cases} \\ T_1^1 + T_2^1 + \eta^1(x)(T_1^2 + T_2^2) & m_1, m_2, m_3 : h + \delta - R \leq x \leq R \\ T_2^1 + \eta^1(x)(T_1^2 + T_2^2) & \begin{cases} m_1, m_2 : R \leq x \leq R + h \\ m_3 : R \leq x \leq 2\delta - R \end{cases} \\ T_2^1 + \eta^1(x)T_2^2 & \begin{cases} m_1 : R + h \leq x \leq \delta + h \\ m_2 : R + h \leq x \leq 2\delta - R \end{cases} \\ T_2^1 + T_3^1 + \eta^1(x)T_2^2 & \begin{cases} m_2 : 2\delta - R \leq x \leq \delta + h \\ m_3 : R + h \leq x \leq \delta + h \end{cases} \\ T_2^1 + T_3^1 + \eta^1(x)(T_2^2 + T_1^2) & m_3 : 2\delta - R \leq x \leq R + h \end{cases}$$

[0092] 其中, δ 为第一遍喷涂和第二遍喷涂的周期, 在数值上等于 ω , 模型数为 3, T_1^1 、 T_2^1 、 T_3^1 分别表示第一遍喷涂中第 1、2、3 段轨迹上的涂层厚度, T_1^2 、 T_2^2 分别表示第二遍喷涂中第 1、2 段轨迹上的理想涂层厚度, $\eta^1(x) = \left(\frac{H}{H_s} \right)$, $H_s = H - T_s^1(x)$, H 为第二遍喷枪喷涂理想喷涂高度, H_s 为第二遍喷枪喷涂实际喷涂高度, $T_s^1(x)$ 为第一遍喷涂涂层厚度分布, h 为两遍喷涂时的轨迹偏距, R 为喷涂半径, $m_1 = \{0 \leq h \leq \delta - R\}$, $m_2 = \{\delta - R \leq h \leq 2(\delta - R)\}$, $m_3 = \{2(\delta - h) \leq h \leq \delta / 2\}$, m_1 、 m_2 、 m_3 分别表示三种两遍喷枪喷涂模型下偏距 h 的取值范围;

[0093] 步骤 005-2. 根据三种两遍喷枪喷涂模型, 以理想涂层厚度与实际涂层厚度方差最小为优化目标, 建立如下优化模型:

$$[0094] \quad \min = \left\{ \min_{h_i \in m_i} E_i(h_i) = \int_{h_i}^{h_i + \delta} (T_s^2(x, h_i) - T_d)^2 dx \mid i = 1, 2, 3 \right\}$$

[0095] 其中, T_d 为喷枪喷涂的理想涂层厚度, $T_s^2(x)$ 为第二遍喷涂涂层厚度分布;

[0096] 步骤 005-3. 针对步骤 005-2 中的优化模型, 求解获得第二遍喷枪喷涂轨迹参数, 即 E 值最小时, 两遍喷涂时的轨迹偏距 h 。

[0097] 步骤 00501. 根据图 7 所示的面片交界处的喷涂轨迹规划方式和交界处相邻两片上所述第一遍喷涂涂层厚度分布和所述第二遍喷涂涂层厚度分布, 获得交界处的涂层厚度分布, 建立两遍喷涂后交界处喷枪喷涂模型, 如图 8 所示, 并以理想涂层厚度与实际涂层厚度方差最小为优化目标, 求解获得第一、二遍喷枪喷涂交界处轨迹参数, 具体包括如下:

[0098] 步骤 00501-1. 根据交界处相邻两片上所述第一遍喷涂涂层厚度分布和所述第二

遍喷涂涂层厚度分布,获得交界处的涂层厚度分布 $T_s(x, h^*)$ 如下:

[0099]

$$T_s(x, h^*) = \begin{cases} T_{1,1}(x, h^*) + T_{2,1}(x, h^* + h) + [T_{1,2}(x, h^*) + T_{2,2}(x, h^*)] \cos \gamma & -\max(L_1, h + h^*) \leq x \leq 0 \\ T_{1,2}(x, h^*) + T_{2,2}(x, h^* + h) + [T_{1,1}(x, h^*) + T_{2,1}(x, h^*)] \cos \gamma & 0 \leq x \leq \max(L_1, h + h^*) \end{cases}$$

[0100] 其中, $T_{1,1}$ 和 $T_{2,1}$ 分别表示第一遍和第二遍喷涂在喷涂平面 1 上的涂层厚度, $T_{1,2}$ 和 $T_{2,2}$ 分别表示第 1 遍和第 2 遍喷涂在喷涂平面 2 上的涂层厚度, h^* 为任意一次喷涂轨迹到两喷涂平面交界处的距离, h 为两遍喷涂轨迹的间距, γ 表示两喷涂平面的法向量夹角, L_1 和 L_2 分别表示喷枪在喷涂平面 1 上两遍喷涂时扩散在喷涂平面 2 上的涂膜边界到交界处的距离, 具体如下:

$$[0101] \quad L_1 = \frac{-3\sqrt{10}(h^* - 50)}{10\sin(\arctan 3 - \gamma)}, \quad L_2 = \frac{-3\sqrt{10}(h^* + 14.7 - 50)}{10\sin(\arctan 3 - \gamma)}$$

[0102] 在 γ 一定的情况下, 随着 h^* 的减小, L_1 和 L_2 逐渐增大, 导致在轨迹优化过程中交界处的涂层叠加模型发生不断变化, 其变化节点为:

$$[0103] \quad [x]_{(4i+j) \times 1} = \begin{pmatrix} 0 \\ h^* + \delta - R \\ h^* + \delta - R + h \\ h^* + R \\ h^* + R + h \\ \vdots \\ h^* + (i+1)\delta - R \\ h^* + (i+1)\delta - R + h \\ h^* + i\delta + R \\ h^* + i\delta + R + h \end{pmatrix} \quad i = \text{整数}, j = 0, 1, 2, 3, 4$$

[0104] 不同的涂层叠加模型对应的 h^* 取值范围如下:

$$[0105] \quad h^* \in \{h_{\gamma\min}^*, h_{\gamma\max}^* \mid L_1 \in [x_m, x_{m+1}] \cap L_2 \in [x_n, x_{n+1}]\} \quad (1)$$

[0106] 其中, m 和 n 为整数, 且 $m \geq n$:

[0107] 步骤 00501-2. 为使一定夹角 γ 面片交界处的涂层均匀度达到最佳, 以理想涂层厚度与实际涂层厚度方差最小为优化目标, 针对于某一涂层叠加模型, 建立优化模型如下:

$$[0108] \quad \begin{cases} \min E(h^*) = \int_0^{\max(L_1, h+h^*)} (T_s(x, h^*) - T_d)^2 dx \\ s.t. h^* \in \{h_{\gamma\min}^*, h_{\gamma\max}^* \mid L_1 \in [x_m, x_{m+1}] \cap L_2 \in [x_n, x_{n+1}]\} \end{cases} \quad (2)$$

[0109] 其中, $h_{\gamma\min}^*$ 、 $h_{\gamma\max}^*$ 分别表示两喷涂平面的法向量夹角为 γ 情况下, h^* 的最小值、最大值;

[0110] 步骤 00501-3. 根据式(1)和式(2)求解获得第二遍喷枪喷涂交界处轨迹参数, 可

以通过如下方法进行求解：

[0111] Step. 1 令 $m=n=0$ ；

[0112] Step. 2 由式 (1) 得 h^* 的约束条件, 若 $h^* \in [h_{\min}^*, h_{\max}^*]$, 则根据式 (2) 优化 h^* 的值, 下一步, 否则, 若 $h^* \in (-\infty, h_{\min}^*) \cup (h_{\max}^*, +\infty)$, 则转 Step. 4；

[0113] Step. 3 若优化后 $h^* \in (h_{\min}^*, h_{\max}^*)$, 则输出结果, 结束；否则, 转 Step. 4；

[0114] Step. 4 令 $m=m+1, n=m$, 下一步；

[0115] Step. 5 由式 (1) 得 h^* 的约束条件, 若 $h^* \in [h_{\min}^*, h_{\max}^*]$, 则根据式 (2) 优化 h^* 的值, 下一步, 否则, 若 $h^* \in (-\infty, h_{\min}^*) \cup (h_{\max}^*, +\infty)$, 则转 Step. 7；

[0116] Step. 6 若优化后 $h^* \in (h_{\min}^*, h_{\max}^*)$, 则输出结果, 结束；否则, 转 Step. 7；

[0117] Step. 7 令 $n=n-1$, 若 $n \geq 0$, 则转 Step. 5, 否则, 转 Step. 4。

[0118] 因为复杂曲面具有的某些点的曲率较大和复连通的特点, 为了使得喷涂轨迹规划便于实现, 喷涂轨迹优化前, 曲面一般需通过分片处理, 使得分片后的每个面片为单连通区域, 且可近似看成一个平面。

[0119] 步骤 006. 针对复杂曲面进行分片, 分成数个喷涂平面, 针对各个喷涂平面, 根据第一遍喷枪喷涂轨迹参数、第二遍喷枪喷涂轨迹参数和两遍喷涂后交界处喷枪喷涂轨迹参数分别获得第一遍喷涂轨迹和第二遍喷涂轨迹, 具体包括如下：

[0120] 步骤 006-1. 针对所述复杂曲面进行三角网格化, 获得各个三角面片的法向量与该三角面片的投影平面的法向量最大偏角为 α_{th} , 以及复杂曲面分片后面片间允许的最大法向夹角为 γ_{th} ；其中, 假设三角面片上的喷枪喷涂轨迹优化后, 最大涂层厚度、平均涂层厚度和最小涂层厚度分别为 T_{\max}, T_d, T_{\min} , 三角面片上任意一点 S 的涂层厚度为 T_s , 各个三角面片的法向量与该三角面片的投影平面的法向量最大偏角为 α_{th} , 三角面片上任意一点的涂层厚度满足：

$$[0121] \quad T_{\min} \cos(\alpha_{th}) \leq T_s \leq T_{\max}$$

[0122] 若曲面上任一点的涂层厚度满足：

$$[0123] \quad |T_s - T_d| \leq \Delta T_d$$

$$[0124] \quad \text{则} : T_{\max} - T_d \leq \Delta T_d \quad (3)$$

$$[0125] \quad T_d - T_{\min} \cos(\alpha_{th}) \leq \Delta T_d \quad (4)$$

[0126] 若式 (3) 成立, 可通过式 (4) 求解出 α_{th} 的值, 即：

$$[0127] \quad \alpha_{th} = \arccos\left(\frac{T_d - \Delta T_d}{T_{\min}}\right)$$

[0128] 其中： ΔT_d 表示允许的最大涂层厚度误差；

[0129] 步骤 006-2. 任意指定一个三角面片为初始三角面片；

[0130] 步骤 006-3. 以初始三角面片为中心, 寻找其四周范围内的三角面片, 并分别获得所寻找到的三角面片的法向量与初始三角面片的法向量之间的夹角 α_{oj} ；

[0131] 步骤 006-4. 判断是否 $\alpha_{oj} \leq \alpha_{th}$, 是则将该寻找到的三角面片与初始三角面片连接, 得到分片面片, 即喷涂平面, 否则, 寻找一个尚未连接的三角面片为新的初始三角面片, 返回步骤 006-3, 直到所有的三角面片连接成片为止；

[0132] 相邻两个分片面片法向量之间的夹角在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 范围内的面片交界处的涂层均匀度进行优化后发现,随着相邻两个分片面片法向量之间的夹角的增大,涂层厚度误差也越大,为了使得复杂曲面上两遍喷涂的涂层均匀度满足喷涂质量要求,继续执行如下步骤 006-5。

[0133] 步骤 006-5. 针对所述各个分片面片,分别获得相邻两个分片面片法向量之间的夹角 $\angle (n_j, n_{j+1})$, 判断 $\forall \alpha_{th} < \angle (n_j, n_{j+1}) < 90^\circ$ 是否成立,是则将该相邻两个分片面片还原成三角面片,并以该相邻两个分片面片交界处的任意一个三角面片作为新的初始三角面片,返回步骤 006-3;否则该相邻两个分片面片即为获得的喷涂平面。

[0134] 其中, n_j 和 n_{j+1} 分别表示相邻两个分片面片的法向量, $j \in \{1, \dots, J\}$, J 为所述分片面片的数量。

[0135] 本发明设计的复杂曲面两遍自动喷涂轨迹优化方法中,为了避免法向夹角较大两面片间的涂层均匀度较差,在复杂曲面分片算法的基础上,提供了考虑面片间最大夹角阈值的分片算法,从而有效保证了面片交界处的涂层均匀度满足喷涂质量要求。

[0136] 基于以上针对复杂曲面进行的分片过程后,任意一喷涂平面可表示为:

[0137] $A_i = \{P_o | \alpha_{oj} \leq \alpha_{th}, P_o \in M, P_j \in M\}$

[0138] 其中: A_i 表示第 i 个面片, P_o 为起始三角面片, P_j 为相邻三角面片, M 表示三角面片的总个数。这样,一个复杂自由曲面被分片成一个或者若干个近似平面片。三角面片连成片后,可运用 3L 算法对每一片进行处理,从而可得到平滑,且保持原有特性的曲面。

[0139] 复杂曲面被分片规划成若干个较大面片之后,针对每个较大面片,运用边界盒子法来生成喷枪轨迹,即:已知一个面片,用一个盒子完全将该面片(近似平面片)包括在内。如图 9 所示了基于一个面片的边界盒子法的原理。

[0140] 图 9 中的 FRONT 方向是喷枪的喷射方向;RIGHT 方向是沿着面片最长边的方向,其中喷枪轨迹的生成方法如图 10 所示,是用垂直于 RIGHT 方向一系列的平面去切割该面片,在该面片上得到一系列的交叉线,每条交叉线被一些采样点分为若干个部分,该采样点之间在切割方向上的距离即是路径生成后的相邻路径间的间距,最后沿着 RIGHT 方向将采样点进行连接就可得到该面片上的喷枪路径。

[0141] 在本发明中,所述第一遍喷枪喷涂轨迹参数和第二遍喷枪喷涂轨迹参数的求解通过黄金分割法进行求解;第一、二遍喷枪喷涂交界处轨迹参数的求解通过改进的带约束的模式搜索法进行求解。

[0142] 综上,本发明设计的复杂曲面两遍自动喷涂轨迹优化方法,提供了一种两遍喷涂工艺的自动喷涂轨迹优化方法,使的复杂曲面在两遍喷涂工艺下的涂层均匀度进一步得到提升,从而提高产品表面的喷涂质量。

[0143] 上面结合附图对本发明的实施方式作了详细说明,但是本发明并不限于上述实施方式,在本领域普通技术人员所具备的知识范围内,还可以在不脱离本发明宗旨的前提下做出各种变化。

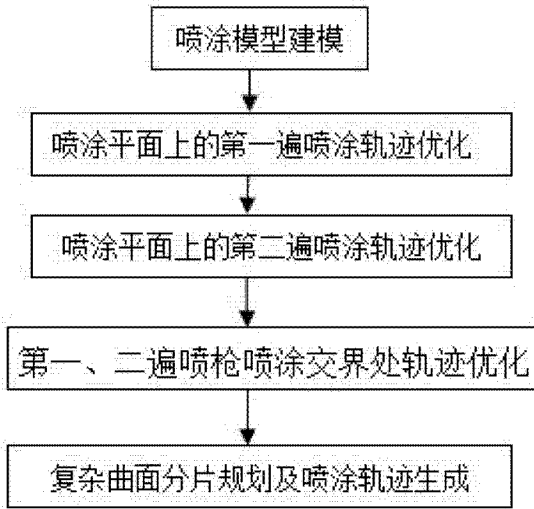


图 1

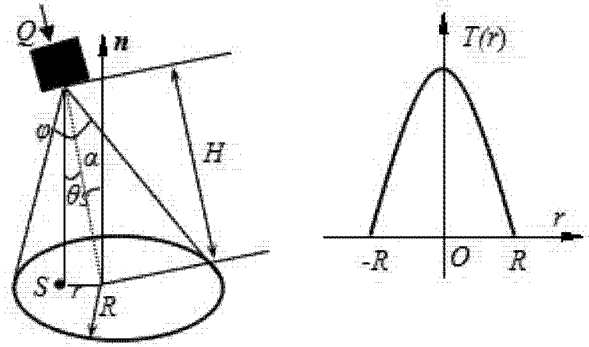


图 2

图 3

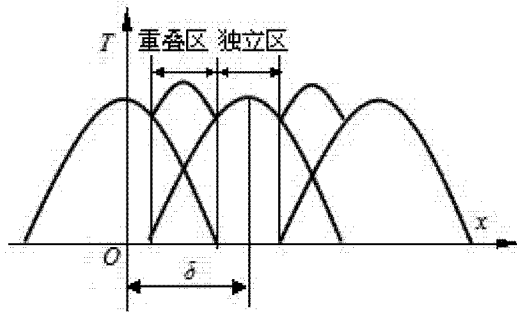


图 4

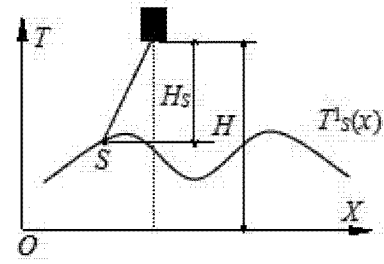


图 5

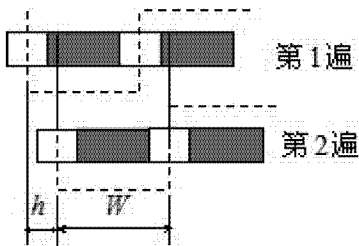


图 6

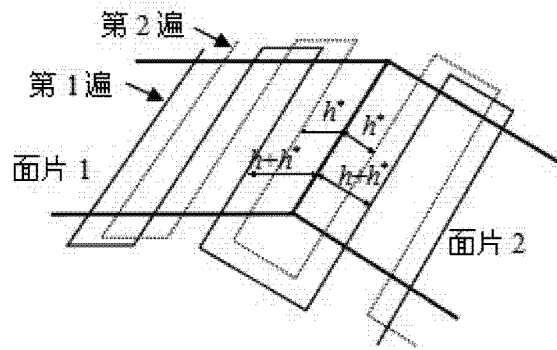


图 7

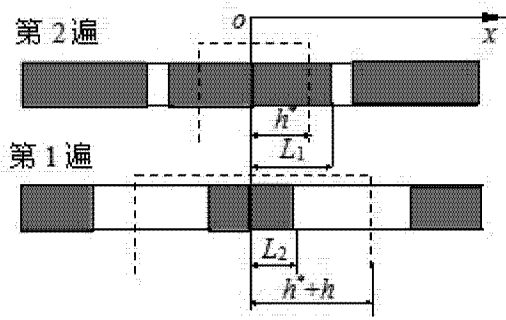


图 8

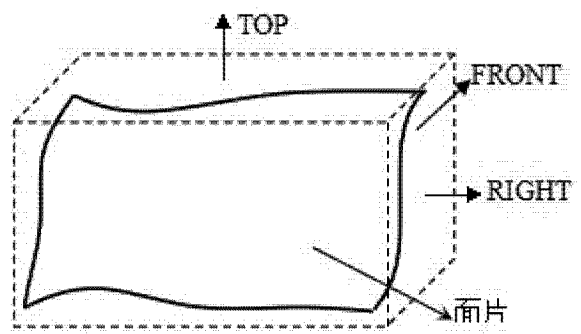


图 9

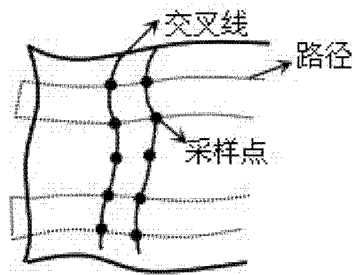


图 10