

基于 Hough 变换的航空发动机管线三维反求建模技术*

3D Reverse Modeling Technology of Aeroengine Pipeline Based on Hough Transform

郑州航空工业管理学院机电工程学院 刘元朋 刘建伟 孙新 蒋志强

[摘要] 探讨了基于反求工程技术的管线三维反求建模策略,提出了基于 Hough 变换技术的管线平面、圆柱面特征的识别方法,以及管线的 CSG 模型构建技术,进而实现了对航空发动机管线的三维反求建模。经实践证明,该方法可以精确、有效地实现对航空发动机管线测量数据的反求建模。

关键词: 航空发动机管线 三维反求建模 Hough 变换

[ABSTRACT] In this article the new methods based on reverse engineering technology have been presented which can be used for more efficient semiautomatic reconstruction of aeroengine pipelines from point clouds. The key technologies are investigated and developed, including extensions of Hough transform for the automatic detection of planes and cylinders, CSG fitting for model reconstruction in the point clouds of aeroengine pipelines. The testing results show that the presented system is accurate and efficient in reverse modeling of aeroengine pipeline.

Keywords: Aeroengine pipeline 3D reverse modeling Hough transform

航空发动机管线连接着发动机各部件,是输送流体,完成发动机运行、控制、操纵等功能的系统。美国 GE 发现引起空中停车事件的原因中,50% 是由于管线等附件失效引起的^[1],因此,自 20 世纪 80 年代起国外航空发动机制造公司越来越重视发动机管线的设计^[2]。现代航空发动机通常有 100~250 根管线,尺寸从 $\phi 4\text{mm}$ 到 $\phi 150\text{mm}$,长度从十几厘米到几米。对于管道的设计和制造来说,受发动机敷设空间的限制,其空间形状极不规则,不易在二维图纸上表达,常存储为实物样件。一个管线样件往往需要进行多次反复修改和重制,因此其样件数据对后续的发动机改型、维修等工作也具有非常重要的意义。在市政工程^[3-4]、工业装置^[5-6]中也存在着大量的管线,由于种种原因,这些管线往往只有设计图

纸甚至只有工装实物,这给后期的管线维护和设计改进带来了极大困难。通过反求工程建立管线系统的数字化模型,可充分发挥数字化的优势,利用数字化设计、数控加工、虚拟装配等数字化手段,缩短管线的改进周期。

反求工程通常包括数据采集、数据处理和 CAD 模型重建 3 个主要环节,在管线反求建模方面,郝思宝^[5]和耿欣^[6]等提出了管线系统测量的有效解决方案, Lee 等^[7]提出了弯曲管线的反求建模方法, Goulette^[8] 等对简单管线系统的重建进行了研究,他指出管线系统重建的关键在于按照球、圆柱、圆锥、圆环等曲面将测量点集分割成相应的数据子集。法国 MENSIS 公司针对工业管路反求建模开发了 3Dipsos 系统,该系统具有数据获取和反求重建的功能,该系统已经成功用于钢厂管路的反求重建。但是 3Dipsos 系统在数据分割上主要还是依靠人工交互的方式。

本文基于 Hough 变换理论(Hough Transform, HT)提出了管线平面和圆柱面特征的识别方法,进而探讨了管线三维模型的重建技术,实现了对航空发动机管线系统的三维反求建模。

1 Hough 变换

Hough 变换是由 Paul Hough 于 1962 年提出的一种非常有效的从图像中提取特定几何图形(如直线、圆等)及其特征的方法。它是通过数据的积累来提取特征的,可用于提取能用解析式 $f(\mathbf{p}, \mathbf{c}) = 0$ 表示的几何图形,其中 \mathbf{p} 为图像的坐标矢量, \mathbf{c} 为参数矢量。其基本思想包括 3 个步骤:图像空间每一个坐标点对应参数空间的一条曲线或曲面轨迹;在参数空间里设定一个累加器单元,给参数空间的参考点进行计数;选择参数空间的一个局部最大值,得到一个几何图形 f 的参数矢量。Hough 变换的优先是抗噪性能比较好,缺点是存储量和计算量都比较大。

2 管线系统反求建模

航空发动机管线三维反求建模的目的是基于测量数据处理得到航空发动机管线的原始设计模型,虽然管线空间形状很复杂,但是其表面几何图形却很规则,管

* 河南省基础与前沿技术研究计划项目(122300410313)、河南省教育厅科学技术研究重点项目(14A410009)资助。

线表面的主要几何图形为平面、圆柱面、圆锥面和圆环面,纯粹的自由曲面型管线非常少,因此管线的三维反求建模的主要问题是特征曲面的识别提取,特别是平面和圆柱面特征的识别。

2.1 总体方案

基于 HT 的管线三维反求建模方法的总体流程示意图如图 1 所示。该流程输入的数据为管线的散乱点云数据。该路线主要通过基于 HT 方法识别管线的平面特征和圆柱面特征,在特征曲面识别的基础上,根据管线的特征约束条件,进行 CSG 拟合处理获取管线的三维模型,进而在 CAD 软件中重构管线的模型。

2.2 基于 HT 的特征识别

(1) 平面识别。

平面方程为:

$$f(\mathbf{p}_i, \mathbf{n}_1, \omega) = \mathbf{p}_i \cdot \mathbf{n}_1 + \omega = x_i n_x + y_i n_y + z_i n_z - \omega = 0 \quad (1)$$

其中, $\mathbf{n}_1 = (n_x, n_y, n_z)$ 向量表示平面的单位法向量, ω 为坐标原点到平面的垂直距离, \mathbf{p}_i 为平面上任一点坐标。如果单位法向量 \mathbf{n}_1 转变为球坐标形式则为:

$$\mathbf{n}_1 = \begin{pmatrix} \cos \alpha \sin \beta & \sin \alpha \sin \beta & \cos \beta \end{pmatrix} \quad 0 \leq \alpha < 2\pi, 0 \leq \beta \leq \pi \quad (2)$$

由式(1)和式(2)可以得到:

$$\omega_i = x_i \cos \alpha_i \sin \beta_i + y_i \sin \alpha_i \sin \beta_i + z_i \cos \beta_i \quad (3)$$

由球坐标可知,对于一个固定值 β ,球面上对应一个圆曲线,它是 α 的函数。为了实现对球坐标的均匀采样,假设 β 参数空间采样数为 n_β ,则对应任意一个 β_j 的 $n_{\alpha j}$ 为:

$$n_{\alpha j} = f(\sin \beta_j) = 2n_\beta \sin \beta_j + 1 \quad (4)$$

基于 HT 变换的平面提取流程如下:

步骤 1: 将整个参数空间 (α, β, ω) 量化为 $n_\alpha \times n_\beta \times n_\omega$ 个子空间 $A_{i,j,k}$, 每个子空间对应的参数为 $C_{i,j,k} = (\alpha_i, \beta_j, \omega_k)$, 其累计平面数 $N_{i,j,k}$ 设置为 0, 其中

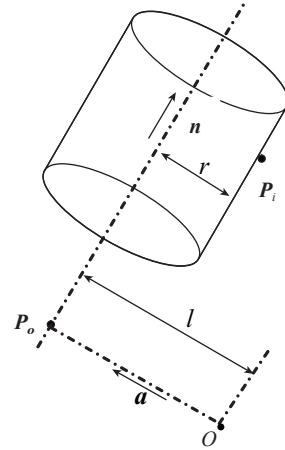


图2 圆柱面参数化

Fig.2 Parameterization of cylindrical surface

$i = 0, 1, \dots, n_{\alpha j} - 1, j = 0, 1, \dots, n_\beta - 1, k = 0, 1, \dots, n_\omega - 1$ 。

步骤 2: 在点云中随机选取不共线的 3 个点 (p_1, p_2, p_3) , 求得其确定的平面参数所在的子空间 $A_{i,j,k}$, 该子空间对应的平面数为 $N_{i,j,k} + 1$ 。

步骤 3: 若存在某个子空间累计平面数超过预先指定的阈值 N_{max} , 或迭代次数超过最大迭代次数 T_{max} , 则转步骤 4, 否则转步骤 2。

步骤 4: 累计平面数最多的子空间参数即为找到的平面 P 。

(2) 圆柱面识别。

圆柱面的方程为:

$$f(\mathbf{p}_i, \mathbf{p}_0, \mathbf{n}, r) = |(\mathbf{p}_i - \mathbf{l}_a) \times \mathbf{n}| - r = 0 \quad (5)$$

其中, $\mathbf{p}_0 = \mathbf{l}_a$ 表示圆柱面轴线上任距离坐标原点 O 最近的点, 其方向向量为 \mathbf{a} , 距离参数为 l , \mathbf{n} 表示圆柱面轴线的单位方向向量, r 表示圆柱面半径(见图 2)。为了使得到的参数具有相互独立性, 因此对圆柱面距离进行了重新参数化。

$$\mathbf{n} = \begin{pmatrix} \cos \alpha \sin \beta & \sin \alpha \sin \beta & \cos \beta \end{pmatrix} \quad 0 \leq \alpha < 2\pi, 0 \leq \beta \leq \pi \quad (6)$$

$$\mathbf{a} = \begin{pmatrix} \cos \theta \sin \varphi & \sin \theta \sin \varphi & \cos \varphi \end{pmatrix} \quad 0 \leq \alpha \leq 2\pi, 0 \leq \varphi \leq \pi \quad (7)$$

由此可知,圆柱面由 5 个互相独立的参数 $(\alpha, \beta, \varphi, \theta, l)$ 确定。HT 变换的空间复杂度和时间复杂度分别为 $O(s^t)$ 和 $O(s^{t-1}n)$, 这里 n 为点的数量, s 为沿着一个 Hough 维度的参数数量, t 为 Hough 空间的维度。因此,在测量点固定情况下,尽量降低 s 和 l 来提

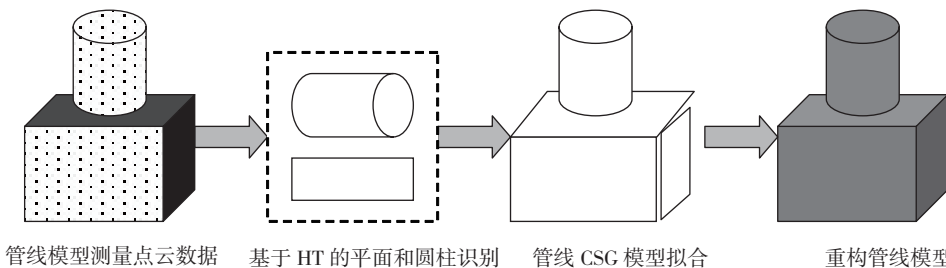


图1 管线系统三维反求建模流程

Fig.1 Flowchart of 3D reverse modeling of pipeline system

高 HT 算法的运行效率。

高斯映射是指将曲面上任一点的单位法向量的起点平移到坐标原点的过程。高斯图是指应用高斯映射将曲面上的所有点转换后,由点的法向量终端在单位球面上所生成的图像,也就是说高斯图是单位球上的一个点集。不同类型的曲面其高斯图具有不同的分布规律(见图 3):平面的高斯图重合于一个点;圆柱面的高斯图均匀分布在一个空间平面(过坐标原点)与单位球面的交线(即为一个圆)上。

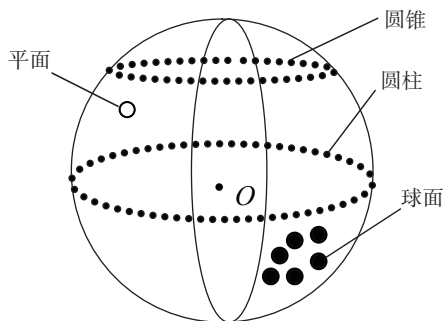


图3 高斯映射
Fig.3 Gaussian mapping

通过高斯图可以将圆柱面参数求解分为两部分:圆柱轴线方向向量 n 求解和其他参数求解。由高斯图可知,圆柱的轴线方向向量为过坐标原点的平面法向量,它可以采用基于 HT 变换的平面提取流程求取 (α, β) 。

其他参数求解提取则是基于提取的圆柱轴线方向向量 n ,通过奇异值分解^[9]得到新的正交直角坐标系 (u, v, n) ,然后将点云投影到 (u, v, n) 中,进而在投影坐标空间 (u, v) 中利用基于 HT 的圆的识别方法确定 (φ, θ, r) ,其具体流程如下。

步骤 1: 在基于 HT 变换的平面提取流程中,针对提取的圆柱轴线方向向量 n ,提取其 N 个紧邻点。

步骤 2: 将 N 个紧邻点投影到坐标空间 (u, v, n) 中,并利用文献 [10] 中的算法提取圆的参数 (u, v, r) ;

步骤 3: 将 (u, v, r) 反向映射到原始坐标系中,求取 (φ, θ, r) 。

步骤 4: 根据提取的参数 $(\alpha, \beta, \varphi, \theta, l)$ 确定的圆柱面,从测量点云中去除相应的点集,若剩余点云数量超过预设阈值,则转步骤 1,否则结束。

2.3 管线 CSG 模型构建

实体表示最常用的两种表示模式为:边界表示 (B-rep) 和构造的实体几何 (CSG)。通过 HT 方法识别的平面、圆柱面由于受噪声、算法精度等影响,得到的模型和原始设计模型还存在一定出入。在这种情况下通过引入约束条件对得到的模型进行布尔运算,进而构造出管线的 CSG 模型。

表1 管线参数及其类型

管线特征	参数	类型
平面	法向量	方向
	平面任一点坐标	位置
圆柱面	轴线方向	方向
	半径	长度
	轴线上任一点坐标	位置

表2 管线特征之间常见约束关系

几何约束	约束方程
方向向量 d_1 与 d_2 平行	$d_1^T d_2 = 1$
方向向量 p_1 与 p_2 之间的夹角值固定	$d_1^T d_2 = \cos \alpha$
位置 p_1 与 p_2 重叠	$\ p_2 - p_1\ = 0$
位置 p_1 与 p_2 间的距离值固定	$\ p_2 - p_1\ = l$
方向向量 d 单位化	$d^T d = 1$
长度或夹角 s 的值固定	$s = \alpha$
长度或夹角 s_1 与 s_2 相等	$s_1 = s_2$
(p_1, d_1) 与 (p_2, d_2) 的轴线重叠	$d_1^T d_2 = 1$ 且 $(p_2 - p_1)^T \times d_1 = 0$

CSG 拟合函数可以描述为:

$$f(v) = \sum_{i=1}^m \left(\lambda_i \sum_{j=1}^n d(p_{ij}, s_i) \right), \quad (8)$$

其中, v 表示所有未知数组成的向量, m 为测量数据中包含的平面、圆柱面等基本几何形状个数, λ 为分段拟合的权值, k 表示第 i 个基本几何形状对应的测量数据点的数目, $d(p_{ij}, s_i)$ 表示点 p_{ij} 到第 i 个基本几何形状的距离。设参与拟合的各个基本几何形状之间存在的约束表示为 $C_k(v) = 0, (j = 1, 2, \dots, t)$, 那么式 (8) 约束求解问题可以转化为求解以下约束优化问题:

$$\begin{aligned} \min f(v) \\ \text{s.t. } C_j(v) = 0 (j = 1, 2, \dots, t) \end{aligned} \quad (9)$$

管线常见的几何形状参数及其类型见表 1, 相应的约束条件见表 2。应用拉格朗日乘子法将约束优化问题(式(9))转换为无约束优化问题(式(10)),即可对管线进行 CSG 拟合约束求解。

$$\begin{aligned} \min F(v, \mu, M) \\ = \min \left(f(v) + \sum_{j=1}^t \mu_j C_j(v) + \frac{M}{2} \sum_{j=1}^t (C_j(v))^2 \right). \end{aligned} \quad (10)$$

(下转第 101 页)

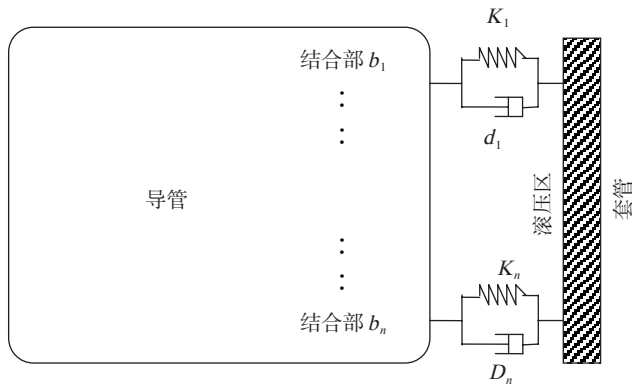


图7 悬臂梁模型

Fig.7 Cantilever-beam model

式试验初期共振频率会发生快速下降,容易根据试验标准判定试件失效,使得试验测试无法进行下去。

采用了逐渐增加量级(低于正式测试时的量级)的振动预试验,可以使试件滚压连接处得到充分锻炼,进而使得导管和套管之间的滚压连接区变得更加紧密和稳定。

经过预试验的试件依据频率下降 1% 为失效准则完成了振动疲劳极限测定,但对其功能是否失效,需经过金相分析、充压检查才能确定。

4 结论

通过焊滚压钛合金管振动疲劳试验研究,得到:

(1) 在 2×10^7 循环基数下,可靠度为 95% 的滚压导管振动疲劳极限为 115MPa;

(2) 由于滚压区连接的不稳定性导致受试的滚压导管的动力学特性不一致,使得试验数据的成对性较低,在进行解析时应将滚压导管连接点处理成工程弹性边界;

(3) 对于具有连接特征的发动机结构部件,应探讨具体结构的失效准则,以提高产品的使用机率;

(4) 采用振动失效的方法使滚压连接处得到锻炼,可确保滚压连接刚度性能的稳定。

参考文献

- [1] 北京航空材料研究院,发动机叶片及材料振动疲劳试验方法.北京:中华人民共和国航空工业部,1984.
- [2] 张荣霞,吴为,曾元松,等.钛合金导管内径滚压连接数值模拟与试验研究.航空制造技术,2011(16):90-93.
- [3] 邵闯,邱明星.金属连接导管振动疲劳极限测试方法研究.实验力学,2013,28(3):403-408.
- [4] 李益萱,邵闯,张治君,等.振动环境中钛合金导管的连接特性试验研究.振动工程学报,2012,25(S):237-240.
- [5] 李玲,蔡力钢,郭铁能,等.机械结合部动态刚度辨识与实验研究.振动工程学报,2012,25(5):488-496.

(责编 深蓝)

(上接第 97 页)

3 管线反求建模试验

为了验证文中提出的算法,采用 Atos 三维光学扫描仪对某型号发动机管线进行了测量,获得 100 万个采样点的点云数据,利用本文提出的算法进行平面和圆柱面检测。为了避免过度分割,对 Hough 变换的参数空间进行了约束处理:参与 Hough 运算的最小点集数量为 2000 个,距离阈值为 1mm,角度阈值为 10rad。一个圆柱面表面采样率至少为 30%、采样点数最小为 80 个,圆柱半径取值区间为 [4mm,150mm],圆柱长度取值区间为 [10mm,100mm]。通过测试大约 55%~60% 的点被自动检测出所属平面和圆柱面特征,其余为发动机管线其它特征所属点集。平面和圆柱面是航空发动机管线的常见特征,利用 Hough 变换实现平面和圆柱面特征的自动提取有利于提高航空发动机管线的重建效率。

4 结论

本文基于反求工程和 Hough 变换技术,系统地探讨了航空发动机管线三维反求建模方法,提出了基于 Hough 变换的管线平面、圆柱面特征的识别提取方法,最后基于约束求解模型对管线进行了 CSG 拟合重建,为航空发动机管线的数字化建模奠定了理论基础。本文所提出方法已经应用于某些航空发动机管线的数字化建模,并取得了良好的效果。

参考文献

- [1] 孔瑞莲.航空发动机可靠性工程.北京:航空工业出版社,1996.
- [2] 陈志英.面向并行工程的航空发动机外部系统设计研究[D].北京:北京航空航天大学,2003.
- [3] 扈震,徐狮.地下管网设施三维精细化模拟技术研究.中国给水排水,2012,28(17):68-72.
- [4] 罗凌燕,贺军政,李育东.城市地下管线三维快速建模技术研究及应用.测绘通报,2012(9):87-89.
- [5] 郝思宝,何春林,杨红军.基于三维激光扫描的工业管线测量应用研究.测绘与空间地理信息,2013,36(7):60-63.
- [6] 耿欣,曲兴华,江炜,等.大型管道快速测量与建模技术研究及应用.仪器仪表学报,2013,34(2):338-343.
- [7] Lee I K, Kim K J. Shrinking: another method for surface reconstruction//Proceedings of Geometric Modeling and Processing. Beijing: IEEE Computer Society, 2004:259-266.
- [8] Goulette F. Automatic CAD modeling of industrial pipes from range images//Proceedings first international conference on recent advances in 3D digital imaging and modeling. Ottawa: IEEE, Piscataway, NJ, United States, 1997:229-233.
- [9] 邱启荣.矩阵论与数值分析:理论及其工程应用.北京:清华大学出版社,2013.
- [10] 程鹏.复杂背景下的圆形识别技术研究[D].南京:南京大学,2013.

(责编 深蓝)