

基于激光扫描的轴流压缩机叶片反求技术探讨

宋 威 赖喜德 李广府 张 伟
(西华大学 能源与环境学院 四川 成都 610039)

摘 要:为解决轴流压缩机叶片改型设计、气动优化及运行过程的叶片修复等实际工程中需要基本实物的数字化模型问题,采用便携式激光扫描技术开发出一套高精度高效率的轴流压缩机叶片逆向设计流程。针对轴流压缩机叶片的几何特征和气动优化设计要求,采用激光三角法在叶片进气边、出气边及叶顶处添加辅助平面与标记点,提高了叶片点云数据采集效率;针对叶片的叶身区域拟合曲面精度低和榫头区域四边域曲面片自相交的问题,提出一种基于流线、轴面截线、轮廓及其延伸线的交互式叶片曲面片划分方法,按“探测轮廓及其延伸线-细分并延展轮廓线-构造曲面片-修理曲面片”流程远用人机交互添加辅助轮廓线的方法将榫头端面区域等非四边 N 边域用数个四边域子曲面表示,获得了满足工程需要的曲面模型。研究开发出了一套包括叶片点云数据采集、处理、各曲面重构、精度评价在内的轴流压缩机叶片高效率反求技术,该技术可以在大型轴流压缩机维修实际工程中应用。

关 键 词: 轴流压缩机叶片; 反求技术; 点云数据采集; 曲面重构

中图分类号: TK474. 8 文献标识码: A

引 言

轴流压缩机叶片作为保证轴流压缩机工作效率的核心部件,其几何型面的准确性对于气动力性能有决定性的影响。叶片设计长期依赖于叶栅风洞试验,周期过长^[1];实际运行中叶身极易损坏,其腐蚀断裂后的 CAD 模型不易获得,毁伤评估困难^[2]。反求技术(Reverse Engineering)作为一种根据测量数据重构实物三维 CAD 模型的方法,已成为解决这些问题的主要手段。

轴流压缩机叶片的反求过程主要由点云数据采集、处理与叶片曲面重构、精度评价组成。近年来,国内外学者对这两个部分进行了大量研究。叶片点云数据采集方法分为接触式测量和非接触式测量两种^[3-7]。其中接触式测量法数据采集精度高但探头

半径补偿繁琐,测量周期过长;非接触式测量法采集数据密度大,测量过程短,但对于叶片进出口边及叶顶等薄壁处点云无法有效采集。叶片曲面重构策略分为“点-线-面”和“点-三角网格-曲面片-曲面”两种,其中“点-三角网格-曲面片-曲面”更适用于快速曲面重构。常用的曲面重构方法有双三次 B-splines 法、最小能量法、三次 B-splines 法、NURBS 法等^[8-12]。其中文献[12]采用 NURBS 法拟合的叶片曲面精度高且易于局部修改,目前该方法已成为叶片类曲面重构最流行的技术。

在此基础上,本研究针对点云采集过程,采用非接触式测量法并在叶片进气边、出气边及叶顶附近添加辅助平面及定位点,提高边壁处点云数据采集效率;针对叶片曲面重构过程,提出一种基于流线、轴面截线、轮廓及其延伸线的交互式轴流压缩机叶片 NURBS 曲面拟合方法,采用“点-三角网格-曲面片-曲面”流程拟合叶片曲面,从而建立高质量的叶片三维数字化模型,开发出一套高精度高效率的轴流压缩机叶片逆向建模流程,以此提高轴流式压缩机叶片研发速度。

1 轴流压缩机叶片曲面三维测量方法

1.1 轴流压缩机叶片的特点

典型的轴流式压缩机叶片型面的组成包括雕塑曲面的工作面、背面,进气边、出气边变圆弧半径曲面、叶顶面、榫头端面、榫齿面、榫头与工作面、背面的过渡曲面。其中工作面和背面面积较大,曲率从进气边向出气边逐渐减小,变化平缓;叶顶为一面积小半径大的圆柱面的一部分;进气边和出气边曲面曲率变化大,面积小;榫头端面为平面;榫头与工作面、背面之间的过渡曲面处曲率变化很大;叶身厚度从叶顶到叶根处逐渐增加。

收稿日期: 2013 - 04 - 10; 修订日期: 2013 - 05 - 08

基金项目: 四川省教育厅成果转化培育项目(11ZZ002); 西华大学研究生创新基金(Ycjj2013105); 西华大学“西华杯”资助项目(2013407); 西华大学流体及动力机械省部共建教育部重点实验室学术成果培育项目(SBZDPY - 11 - 7)

作者简介: 宋 威(1987 -),男,湖北枝江人,西华大学硕士研究生。

1.2 轴流压缩机叶片三维坐标数据测量

1.2.1 测量设备

本研究所采用软件为 VXscan ,其相关参数由 Creafom 公司 Handyscan 3D 手持自定位三维扫描仪测得 ,如表 1 所示。

表 1 手持自定位三维扫描仪参数

Tab.1 Parameters of the hand self - positioned 3D scanner

参数名称	参数值
重量 /g	980
尺寸 /mm	160 × 260 × 210
测量速度 /次 · s ⁻¹	18 000
景深(扫描) /cm	30
容量精确性 /im · m ⁻¹	20
精度 /μm	50
功率 /mW	35

1.2.2 基于叶片特点的测量策略

本研究采用激光三角法 ,按照“曲率变化小的面优先扫描”的原则划分叶片各曲面测量顺序。由于轴流压缩机叶片工作面和背面面积大、曲率变化小 ,叶顶、叶片头部与出气边面积小、曲率变化大 ,因此先测量工作面和背面 ,然后测量叶顶、进气边及出气边 ,最后测量榫头。在叶片的工作面、背面、榫头贴适当数量直径为 5 mm 黑白色圆形定位点 ,用以在不同角度下对叶片进行全数据采集 ,如图 1 所示。在尺寸较小无法添加足够标记点的区域(叶顶)及薄壁无法完成扫描仪临边翻转测量的区域(进气边和出气边)添加辅助平面和定位点。



图 1 标记点布置

Fig.1 Arrangement of mark points

值得注意的是 ,叶身表面反光率很高 ,测量时 CCD 不易捕捉到反射回来的激光。因此 ,需要在叶片工作面、背面、进气边和出气边等处多次喷施着色剂。由于采用基于表面最优运算法则录入数据 ,数据采集精度与扫描时间正相关 ,对于进出气边及叶根过渡区域需多角度长时间扫描。

2 叶片曲面重构理论及流程

轴流压缩机叶片曲面重构本质上是根据离散的点云数据构建出连续、光顺的 CAD 模型 ,是叶片 RE 中的核心技术之一。根据参数域选择不同 ,其曲面重构分为三角形参数域曲面重构、四边形参数域曲面重构和非四边 N 边参数域曲面重构。三角形参数域曲面模型简单 ,构造灵活 ,边界适应性好 ,但交互定义过多且局部不可编辑。非四边 N 边参数域曲面模型是以三角平面片为基础的多面体 ,其理论尚不成熟 ,实际应用较少。四边形参数域曲面模型适用于有规则拓扑关系、沿曲面纵横方向均布的点云数据 ,分为 Beizer 曲面模型、B - Spline 曲面模型和 NURBS 曲面模型。其中 NURBS 曲面模型集合了 Beizer 曲面模型、B - Spline 曲面模型的优点 ,精度高且可调性好 ,可以精确表达大多数几何形体。由于轴流压缩机叶片结构复杂无法用单一 NURBS 曲面表示 ,因此本研究将叶片分为叶身(由多张雕塑曲面组成)和榫头(由多张平面与圆柱面组成)两部分构造曲面片。

文献 [13] 论述了基于曲率生成特征线构造水轮机曲面片的方法 ,其曲面重建效率高。文献 [14] 在此基础上提出基于流线和轴面截线构造水轮机矩形域曲面片的方法 ,重构曲面精度高 ,水力性能好。由于轴流压缩机叶片与水轮机叶片同属流体机械 ,叶身都由雕塑曲面构成几何特征相似 ,因此本研究采取基于流线和轴面截线的方法构建叶身部分曲面。文献 [15] 论述了交互法在 N 边域进行四边形区域划分中的运用。该方法简洁稳定 ,适用于小规模非四边 N 边域曲面片 ,为榫头端面等非四边 N 边域曲面片的处理提供了理论依据。本研究采用基于轮廓及其延伸线的方法 ,在榫头端面上运用人机交互添加辅助轮廓线的方法将该非四边 N 边域用数个四边域子曲面片表示。添加的辅助轮廓线需与区域内曲率变化较小的一对轮廓线尽可能平行。

分区域将上述曲面片拟合为 NURBS 曲面 ,并合并曲面输出叶片 CAD 模型。对输出的 CAD 模型

还应进行光顺性和精度检测,其逆向建模流程如图 2 所示。

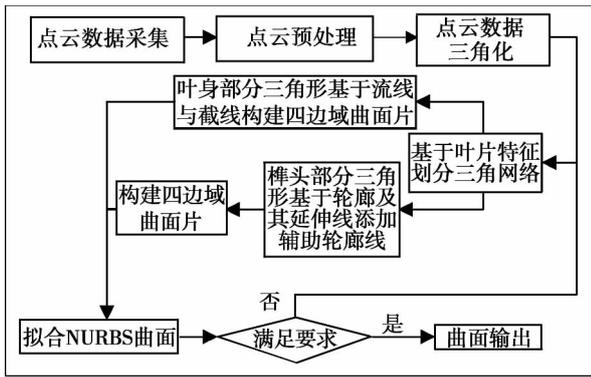


图 2 轴流压缩机叶片逆向建模流程

Fig. 2 Flow path of modeling the blades of an axial flow compressor

3 轴流压缩机叶片的曲面重构策略与方法

3.1 点云数据预处理

采集得到初始点云如图 3(a) 所示,数量为 2 783 966,属于散乱高密度点云,存在大量噪音点、异点以及冗余数据。为提高叶片精度、光顺性,减小数据处理量,必须对点云数据进行预处理,处理流程如图 4 所示。预处理后点云如图 3(b) 所示,数据精简率约为 30%,在较好保持原数据精度的条件下提高了曲面重建效率。

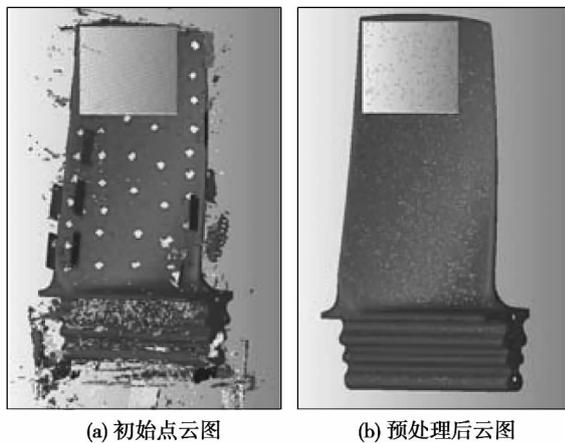


图 3 处理过程中叶片点云

Fig. 3 Point clouds of a blade in the process of treatment

3.2 曲面重构

轴流式压缩机叶片是典型的雕塑曲面类型零部

件,无法用单一的 NURBS 曲面表示,为提高效率和精度,基于叶片几何特征对叶片三角网格模型区域划分并在各区域构造独立的四边域曲面片,最终根据 NURBS 的理论,对叶片各区域矩形域曲面片格栅化并完成曲面拟合。



图 4 散乱高密度点云预处理流程

Fig. 4 Flow path of preprocessing point clouds scattered disorderly at a high density

3.2.1 点云数据三角化

轴流压缩机叶片边界和形状比较复杂,直接建立四边域模型不能反映实际曲面形貌,点云数据的三角化是实现此类复杂曲面重构的首要条件。本研究基于最小内角最大准则、空圆准则采用 Delaunay 三角化方法对预处理后的叶片点云进行三角剖分并对结果进行网格简化及优化处理^[16~17],处理流程如图 5 所示。最终得到叶片多边形模型如图 6 所示。从图 6 可看出,三角形无自相交,无高度折射边,钉状物很少,重构三角形模型符合实际需要。

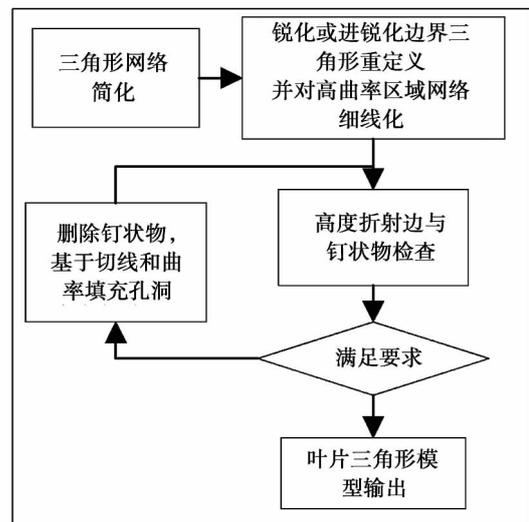


图 5 网格简化优化处理流程

Fig. 5 Flow path for mesh simplification and optimization treatment

3.2.2 叶片区域分块

对于轴流压缩机叶片等复杂雕塑曲面组成的零

件 在构建四边域模型之前,有必要基于叶片几何特征进行区域分块。文献[14]论述了反求工程中零件区域划分保持单凸单凹、特征单一的原则,文献[13]采用叶片正背面单独划分法针对轴流式水轮机叶片三角模型进行了区域划分,其结果有利于保证叶片流体动力性能,但其轮毂面结构过于简单,划分结果仍有局限性。本研究在此基础上结合某型号轴流压缩机叶片三齿榫头结构特点,对叶片区域分块,分块后如图7所示。从图7可看出,叶身部分划分为工作面、背面、叶根过渡面(两部分)、叶顶面;榫头部分划分为榫头端面(两部分),榫齿凸面(六部分),榫齿凹面(六部分),榫头顶面,榫头底面。

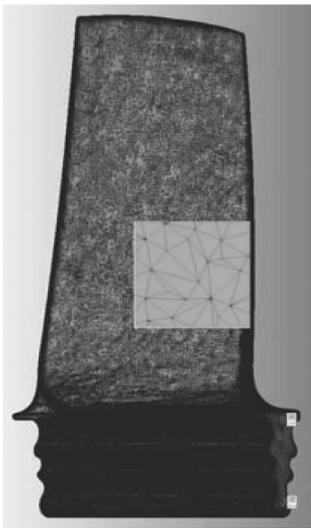


图6 叶片点云三角化
Fig. 6 Triangle mesh division of the point clouds of a blade

3.2.3 构造曲面片

轴流式压缩机叶片分为叶身和榫头两部分。叶身部分必须满足其流体动力学性能,重构曲面片的精度和光顺性要求高;榫头部分几何外形复杂,其端面形状为一多变量控制的非四边 N 边枞树形结构,其与周围各四边域曲面片过渡面必须达到 G^1 或 C^1 光顺。因此本研究提出了一种基于流线、轴面截线、轮廓及其延伸线的交互式叶片曲面片构造方法,步骤如下:

(1) 叶片分区探测轮廓及其延伸线。区域划分密,各区域面积小,分隔符与最小轮廓线提取距离不宜过宽。

(2) 细分并延展轮廓线。同一曲面片非相邻边划分段数尽量保证相等,将叶片工作面与背面区域内沿流线方向轮廓线划分为近似相等的17段,沿轴

线方向轮廓线划分为近似相等的28段,调节T形节点并延伸轮廓线构建出叶片进出口边及各区域之间过渡面。

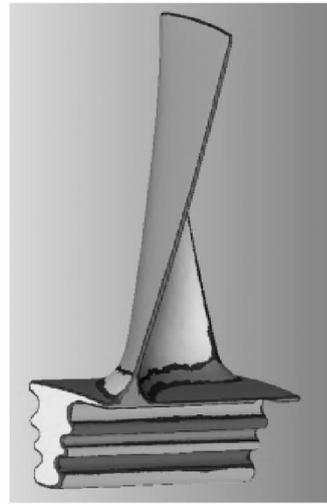


图7 叶片区域分块
Fig. 7 Zone division of a blade

(3) 构造曲面片。使用细分结果构建曲面片,得到各区域近正交的四边域曲面片。基于(2)中轮廓及其延伸线运用人机交互添加辅助轮廓线的方法将榫头端面区域等非四边 N 边域用数个四边域子曲面片表示。添加辅助轮廓线前后榫头端面区域内四边域曲面片构建情况如图8所示。从图8可看出,添加辅助轮廓线后,榫头端面区域被分为9个小区域,各区域内曲面片无自相交问题,小角度曲面片数量极少,符合NURBS曲面的拟合要求。

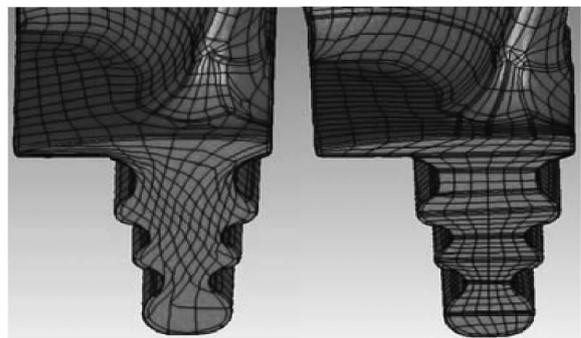


图8 加辅助轮廓线前后榫头端面曲面片变化
Fig. 8 Changes of the tenon end surface curved surface slice before and after the auxiliary contour lines are added

(4) 修理曲面片。运用升级/约束轮廓线、重定义曲面片、添加/删减路径等方法调整曲面片,使叶

片工作面与背面区域内曲面片边界按流线及轴面截线方向分布,并对所有曲面片执行松弛命令,构造曲面片如图 9(a) 所示。等分每个曲面片的相邻边,建立 $u、v$ 方向参数线构造格栅,最终将其拟合为 NURBS 曲面,如图 9(b) 所示。

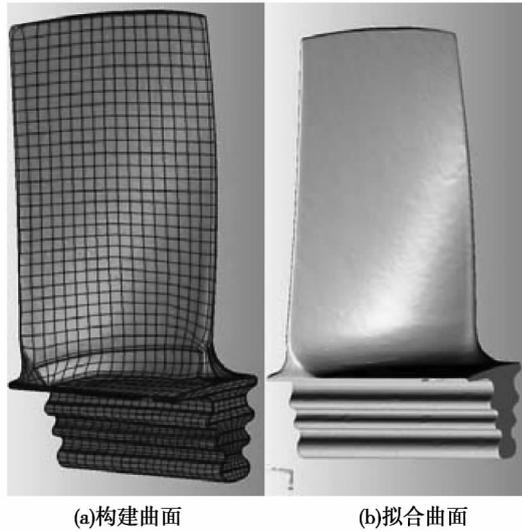


图 9 叶片曲面重构

Fig.9 Reconstruction of the curved surfaces of a blade

3D 比较。从图 10 可看出,其最大偏差为 0.745 mm,平均偏差为 0.029 mm,标准偏差为 0.052 mm,统计偏差分布如图 11 所示,90% 以上点云误差在 $-0.16 \sim 0.16$ mm 之间,误差较大点产生原因主要为测量中标记补偿偏差,满足拟合精度要求。采取斑马线法模拟一组平行的光源照射到叶片表面,从图 12 可看出,斑马纹走向一致,粗细变化均匀,无明显折皱,曲面光顺性满足工程要求。

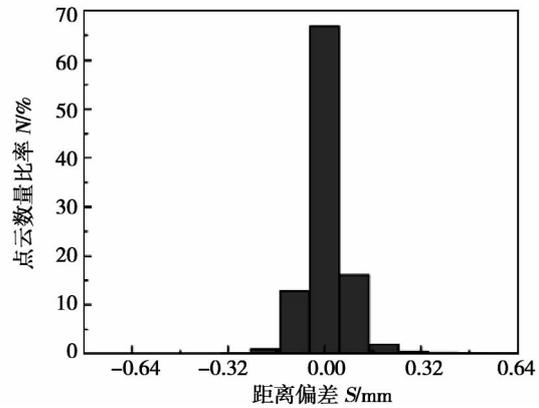


图 11 重构曲面与点云距离偏差分布

Fig.11 Distribution of the deviations in the distance between the curved surface reconstructed and the point cloud

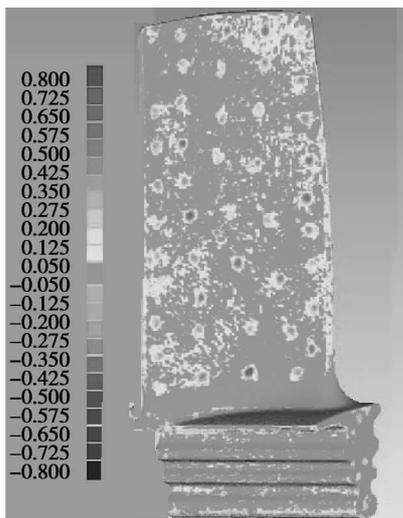


图 10 重构曲面与点云 3D 对比(mm)

Fig.10 3D Contrast of the curved surface reconstructed and point cloud(mm)



图 12 光顺性检验

Fig.12 Smoothness inspection

4 重构模型精度评估

对于叶片式流体机械,精度和光顺性一直是评价曲面重构质量的关键指标。本研究将原始点云数据设置为测试对象,重构曲面设置为参考对象进行

5 结 论

(1) 针对轴流压缩机叶片研发周期长、损伤评

估困难的问题,对叶片点云数据采集与曲面重构技术进行探讨,开发了一套高精度高效率的轴流压缩机叶片反求技术。

(2) 在叶片进气边、出气边及叶顶附近添加辅助平面与定位点,采用激光三角法采集轴流压缩机叶片点云数据,提高了高曲率变化区域点云数据提取效率。

(3) 提出了一种基于流线、轴面截线、轮廓及其延伸线的交互式叶片曲面片构造方法效率高,该方法重构出的曲面精度和光顺性好,实用性强。

(4) 该方法中对三齿榫头端面的曲面片划分还可应用于其它机械非四边 N 边域曲面的逆向设计中。

参考文献:

- [1] 陈党民. 轴流压缩机的国产化与关键技术[J]. 重大技术装备, 2007(1): 28-31.
CHEN Dang-min. Localization of axial flow compressors and key technologies [J]. Major Technical Equipment 2007(1): 28-31.
- [2] 李建荣, 任生谦. 轴流压缩机叶片腐蚀的修理工艺[J]. 风机技术, 1996(3): 29-30.
LI Jian-rong, REN Sheng-qian. Repairing procedure for corrosion and erosion on the blades of an axial flow compressor [J]. Blower Technology, 1996(3): 29-30.
- [3] 印玉明, 李明, 卓军等. 基于三坐标测量计对涡轮叶片测量的研究与实践[D]. 上海: 上海大学, 2003.
YIN Yu-ming, LI Ming, ZHUO Jun. Research and practice of the measurement of turbine blades by using a three-coordinates gauge [D]. Shanghai: Shanghai University, 2003.
- [4] 武俊平, 韩中合, 丁常富. 汽轮机叶片动态测量方法的比较分析[D]. 保定: 华北电力大学, 2003.
WU Jun-ping, HAN Zhong-he, DING Chang-fu. Comparison and analysis of the dynamic methods for measuring the blades of a steam turbine [D]. Baoding: North China University of Electric Power, 2003.
- [5] 黄英丽. 叶片型面 CMM 测量与误差处理技术[J]. 可再生能源, 2010, 10(5): 144-146.
HUANG Ying-li. Blade profile CMM measurement and error processing technology [J]. Renewable Energy Sources 2010, 10(5): 144-146.
- [6] 赖喜德. 叶片式流体机械的数字化[M]. 成都: 四川大学出版社.
LAI Xi-de. Digitalization of blade type fluid machines [M]. Chengdu: Sichuan University Press, 2007.
- [7] 王贞凯, 胡章洪. 水轮机叶片光电经纬仪测量及其数据处理技术[J]. 东方电气评论, 2004, 18(3): 137-140.
WANG Zhen-kai, HU Zhang-hong. Measurement of water turbine blades by using a photoelectric theodolite and its data processing technology [J]. Orient Electrical Review, 2004, 18: 127-140.
- [8] 王春林, 袁春元. 基于 Bezier 函数的流体机械叶片造型研究[J]. 水泵技术, 2005(1): 10-11.
WANG Chun-lin, YUAN Chun-yuan. Study of the modeling of blades in fluid machines based on Bezier function [J]. Water Pump Technology 2005(1): 10-11.
- [9] 阮劲松, 王春林. 基于 Bezier 函数的混流泵叶片造型研究[J]. 农机化研究, 2005(6): 104-105.
RUAN Jin-song, WANG Chun-lin. Study of the modeling of blades in a mixed flow pump Based on Bezier function [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research 2005(6): 104-105.
- [10] 彭芳瑜, 严思杰, 周云飞等. 基于能量法的大型叶片毛坯曲面重构[J]. 机械设计与制造工程, 2002(4): 47-49.
PENG Fang-yu, YAN Si-jie, ZHOU Yun-fei, et al. Reconstruction of the curved surfaces of a large-sized blade blank based on the energy method [J]. Mechanical Design and Manufacturing Engineering 2002(4): 47-49.
- [11] 李峻峰, 翁史烈, 宋华芬. 燃气轮机叶片造型的混合约束条件三次 B 样条设计法[J]. 船舶工程, 1996(3): 32-35.
LI Jun-feng, WENG Shi-lie, SONG Hua-fen. Cubic B spline design method for modeling the blades of a gas turbine under the hybrid constraint condition [J]. Ship Engineering, 1996(3): 32-35.
- [12] 齐杰非, 杨劲松, 刘国淦等. 应用 NURBS 实现飞机叶片的三维重构[J]. 光学精密工程, 2001, 9(3): 223-225.
QI Di-fei, YANG Jin-song, LIU Guo-gan, et al. 3D reconstruction of the blades of an aeroplane realized by using the NURBS [J]. Optic and Precision Engineering 2001, 9(3): 223-225.
- [13] 汪礼发, 赖喜德, 张惟斌等. 大型轴流式叶片曲面的反求与重构建模[J]. 大电机技术, 2012(1): 52-55.
WANG Li-fa, LAI Xi-de, ZHANG Wei-bin, et al. Reverse solution seeking and reconstruction modeling of the curved surfaces of a large-sized blade of axial flow type [J]. Large-sized Electric Machine Technology, 2012(1): 52-55.
- [14] 赖喜德, 李广府, 张惟斌等. 轴流式水轮机叶片曲面重构技术[J]. 排灌机械工程学报, 2012, 30(6): 721-725.
LAI Xi-de, LI Guang-fu, ZHANG Wei-bin, et al. Curved surface reconstruction technology for blades of water turbines [J]. Journal of Drainage and Irrigation Mechanical Engineering 2012, 30(6): 721-725.
- [15] 陈志远. N 边域曲面研究及基于网格的过渡曲面生成[D]. 长春: 吉林大学, 2005.
CHEN Zhi-yuan. Research of N -bordered curved surfaces and generation of transient curved surfaces based on meshes [D]. Changchun: Jilin University, 2005.
- [16] 刘少华, 程朋根. 基于最小内角动态判定的简单三角形剖分[J]. 计算机应用研究, 2004(4): 238-239.
LIU Shao-hua, CHENG Peng-gen, et al. Simple triangle division based on the dynamic judgement of a minimum internal angle [J]. Computer Application Research 2004(4): 238-239.
- [17] 胡子进, 王坚. 任意形状平面域不完全 Delaunay 三角化研究[J]. 华中理工大学学报, 1994, 22(10): 4-8.
HU Yu-jin, WANG Jian. Incomplete Delaunay triangulation study of a plane domain in any shape [J]. Journal of Central China University of Science and Technology, 1994, 22(10): 4-8.

(辉 编辑)

merical simulation ones that their Mach number distributions on the pressure surface are in relatively good agreement and the test value on the suction surface is slightly higher than the calculated ones. The relative position between the front and rear row cascade blades has a most important influence on the tandem cascade and it deserves an in-depth investigation. **Key words:** tandem cascade ,flow field characteristics ,numerical simulation ,oil flow display

基于激光扫描的轴流压缩机叶片反求技术探讨 = **Exploratory Study of the Reverse Solution-seeking Technology for Axial Flow Compressor Blades Based on the Laser Scanning** [刊 ,汉] SONG Wei ,LAI Xi-de ,LI Guang-fu ,et al(College of Energy Source and Environment ,West China University ,Chengdu ,China ,Post Code: 610039) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2013 ,28(5) . -455 ~460

To solve the problems relating to numerical models for blade modification design ,aerodynamic optimization and repairing based on a real object in actual engineering projects during operation of an axial flow compressor ,the portable type laser scanning technology was used to develop a high precision and efficiency flow path for reverse design of axial flow compressor blades. In compliance with the geometrical characteristics of and aerodynamic optimization design requirements for axial flow compressor blades ,the laser triangular method was adopted with auxiliary planes and marking points being added to the blade leading edges ,trailing edges and tips ,enhancing the point cloud data acquisition efficiency of the blade. In the light of the problem that the curved surface in the blade body zone had a low fitting precision and the curved surface pieces around the tenon area were of self-intersection ,an interactive method for dividing the curved surface pieces of the blade based on the flow streamlines ,meridian lines ,contour lines and their extension lines was proposed to express the tenon end surface area of non-four-edges but N-edges by using several curved surface pieces of four edges according to the flow path "detect the contour and its extension lines-subdivide and extend the contour lines-structure the curved surface pieces-repair them" with the method for man-machine interactively adding auxiliary contour lines being employed and obtain a model for the curved surface meeting the requirements for engineering projects. A high efficiency reverse solution-seeking technology for axial flow compressor blades was studied and developed ,including point cloud data acquisition ,processing ,curved surface restructuring and precision evaluation of a blade. The technology in question can be applied in an actual engineering project when repairing a large-sized axial flow compressor. **Key words:** axial flow compressor blade ,reverse solution-seeking technology ,point cloud data acquisition ,curved surface restructuring

微小流量喷嘴雾化特性实验方法 = **Method for Testing the Atomization Characteristics of a Micro Flow**