# 超磁致伸缩泵悬臂梁阀流固耦合特性分析

# 朱玉川 陈 龙 杨旭磊

南京航空航天大学,南京,210016

摘要:提出了一种采用悬臂梁式吸排油阀的超磁致伸缩液压泵结构,针对泵用悬臂梁阀工作时的流 固耦合特性,基于单自由度振动理论与流固耦合作用下阀片振动参数等效计算原则,对超磁致伸缩泵悬 臂梁被动阀进行了线性化数学建模,并在 MATLAB/Simulink 环境下进行了仿真研究。为研究其非线 性特性,基于流固耦合力学原理,建立了超磁致伸缩泵悬臂梁被动阀流固耦合数值模型,并利用 Comsol-CFD对其工作特性进行了数值求解。然后依据求解结果进行了深入分析,得到了阀片主要参数 对泵性能的影响规律,为超磁致伸缩泵悬臂梁被动阀的主要结构参数的设计与优化提供相关依据。最 后,通过不同厚度悬臂梁阀片在流固耦合作用下开启位移的线性理论结果与非线性数值结果的对比完 成了模型验证,实验测试了超磁致伸缩泵的流量特性与阻断压力特性,得到了该泵峰值驱动频率为 300 Hz左右。

关键词:超磁致伸缩材料;流固耦合;等效质量;开启压力 中图分类号:TH137 DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2015.03.003

# Fluid-solid Coupling Analysis of Cantilever Valve in GMM-based Hydraulic Pump

Zhu Yuchuan Chen Long Yang Xulei

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, 210016

**Abstract**: A novel structure of giant magnetostrictive pump (GMP) for the hybrid solid fluid actuator was designed. Aiming to fluid-solid coupling characteristics of cantilever valve in GMM-based pump, based on single degree of freedom vibration theory and equivalent calculation principle to parameters of cantilever valve, a linear model describing kinetic characteristic of cantilever valve was established and simulated. Further, aiming to the nonlinear characteristic of fluid-solid coupling of cantilever valve, a numerical model with Comsol-CFD was built, accordingly numerical investigation for cantilever valve was performed, thus, the interaction relationship among main parameters of cantilever valve and performance of GMM-based pump was obtained, which provides a reference for parameter design and optimization of cantilever valve in GMM-based pump. Finally, the validity of above-mentioned numerical results was validated by comparing the simulation results with the theoretical one.

Key words: giant magnetostrictive material(GMM); fluid-solid coupling; equivalent mass; cracking pressure

#### 0 引言

随着现代飞行器的飞速发展,固定翼与旋转 翼飞机越来越需要能够分布在机身的小型化高频

**收稿日期**:2014-04-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51175243);江苏省自然 科学基金资助项目(BK20131359);航空科学基金资助项目 (20130652011);南京航空航天大学基本科研业务费资助项目 (NS2013046)

> Wang Shulin, Chen Xinghua, Zhang Bing. Performance Analyze and Machinery Design of Submicro-actuator Based on Finite Element Analysis [J]. Machinery Design & Manufacture, 2009(1): 55-57.

- [13] 杨桂通. 弹性力学[M]. 北京:高等教育出版社, 2012.
- [14] 李兆霞,郭力. 工程弹性力学[M]. 南京: 东南大 学出版社, 2009.

宽作动系统,而基于智能材料的小型化高频宽电 静液作动器为此提供了有效途径<sup>[1-2]</sup>。

超磁致伸缩材料(giant magnetostrictive material, GMM)具有磁致输出应变大、输出力大、 响应速度快和能量传输密度高等特点,而超磁致 伸缩执行器(giant magnetostrictive actuator, GMA)是基于 GMM 的新型电-机转换器,其应用 研究已成为国内外研究的热点,目前以 GMM 与

[15] 崔承宇.防止角上产生应力集中的结构:中国, 200410078068.8[P]. 2005-05-11.

(编辑 郭 伟)

作者简介:顾大强,男,1963年生。浙江大学机械工程学院副教授。 研究方向为摩擦学、机电一体化、机械设计。发表论文 30余篇。 郑元态,男,1988年生。浙江大学机械工程学院硕士研究生。 古伟豪,男,1987年生。浙江大学机械工程学院硕士研究生。 GMA 为基础构建新型机载电静液作动器已经成 为可能。因此,面向先进飞行器作动系统发展趋 势以及航空领域对集成式机载液压作动系统的发 展需求,开展新型集成式电静液作动器的研究具 有显著现实意义,而驱动泵用单向阀性能是限制 驱动泵与作动器性能提升的主要瓶颈与关键 技术。

现有智能材料驱动泵大致可分为有阀泵与无 阀泵两类。有阀泵是利用阀的开合性能来控制流 体流动的;无阀泵是利用流体流过收缩入口和扩 张出口,并通过出流和入流状态下的压力差来实 现流体单向流动的,但在截止性能上无阀泵与有 阀泵的差距较大。其中有阀泵的工作阀根据其工 作原理又可以分成主动阀<sup>[3-4]</sup>与被动阀<sup>[5-7]</sup>。主动 阀通常通过驱动电源的相位差来吻合驱动元件的 工作状态,但是控制时序较为复杂,材料特性对阀 的截止性能以及阀片滞性影响较大;相比之下,被 动阀由于直接通过压差而实现阀的开合,具有结 构简单、装配方便等特性,实际应用较广。

Gerver 等<sup>[8]</sup>研制了一种利用磁致伸缩叠堆作 为驱动元件的泵,用薄不锈钢圆片做成阀片,该泵 的最大工作频率约为 150 Hz。Mauck 等<sup>[9]</sup>设计的 一种基于压电叠堆的电静液作动器能够输出约 4 W的功率,最大输出力能够达到 271.7 N,但它的 工作频率相对较低(在 100 Hz 以内),需要通过被 动阀进行频率校正。Sirohi 等<sup>[10-11]</sup>设计了一种利 用压电叠堆作为驱动元件的电静液混合作动器,输 出功率能够达到 2 5 W,最大输出力达到 138 N,并 且可以在一个相对较高的频率范围内工作(600~ 700 Hz),该作动器通过两通滑阀来控制液压缸的 双向运动。Lhermet 等<sup>[3]</sup>研发了一种应用于多电 飞机并配有主动阀的超磁致伸缩电静液作动器。

本文基于超磁致伸缩材料机理与容积式液压 泵工作原理,设计了一种面向集成式电静液作动 器的新型超磁致伸缩液压泵(giant magnetostrictive pump, GMP),并在对现行的各种智能材料 驱动泵所用单向阀详细分析的基础上,设计了一 种新型一体式悬臂梁被动单向阀。通过对悬臂梁 阀的线性化数学模型的理论分析与非线性流固耦 合的数值分析,确立了该悬臂梁式被动单向阀优 化设计准则与方法。

# 1 作动器与泵的结构及其工作原理

超磁致伸缩作动器由超磁致伸缩泵、液压缸、 蓄能器、管道及配件组成,如图1所示。其中超磁 致伸缩泵的具体结构如图2所示,驱动磁场闭合 磁路由顶针、滑块、外罩、导磁块、GMM 棒和底座 构成。



图 2 中,碟簧和顶针给 GMM 棒施加一定的 预压力,通过调节顶针使预压力达到一个合适的 值,可以增大 GMM 棒的输出位移和提高其磁机 耦合系数。当给线圈通入驱动电流,在磁场作用 下 GMM 棒产生一定伸缩位移,带动输出杆及与 其连接的活塞做往复运动。当输出杆左移时,泵 腔容积减小,在压力的作用下排油单向阀打开,油 液通过管道流入液压缸下端,推动液压缸活塞向 上运动。输出杆右移时,泵腔容积增大,吸油单向 阀打开,油液进入泵腔,此时排油单向阀关闭。

## 2 悬臂梁阀流固耦合线性模型研究

以排油单向阀为例,排油单向阀在泵中的剖 面模型如图 3a 所示,其等效模型如图 3b 所示。 吸油阀和排油阀在实际工作中都可看作是单自由 度的质量一弹簧一阻尼系统,由于流固耦合作用 还需要注意以下两点:①阀片的开合由阀口的内 外压差所决定;②由于阀片开合过程中阀片附近 的油液对阀片运动特性的影响,数学模型应以等 效阀片质量与等效阀片阻尼系数来表示。

在流固耦合作用下的等效阀片质量与等效阻 尼系数分别为 $m_{\rm R}$ 、 $\overline{B}_{\rm R}$ ,阀片的开口位移 $x_{\rm R}$ 以阀片 开口末端在x方向的位移量来表示,阀片的弯曲 变形刚度为 $k_{\rm R}$ ,油液推开阀片时与阀片的接触面 积为 $\overline{A}_{\rm R}$ ,阀口内外压力分别为 $p_{\rm 0}$ 、 $p_{\rm c}$ ,其中 $p_{\rm 0}$ 表 示大气压。根据牛顿定律可知阀片工作时的力平



 (a)排油单向阀示意图
 (b)排油单向阀等效模型

 图 3 悬臂梁式被动单向阀原理图

衡方程<sup>[12-13]</sup> 如下:

吸油阶段

 $\frac{\overline{m}_{R}\ddot{x}_{Ri} + \overline{B}_{R}\dot{x}_{Ri} + k_{R}x_{Ri} = (p_{0} - p_{c})\overline{A}_{R}}{x_{Ro} = 0}$   $p_{0} > p_{c}$ 

排油阶段

$$\frac{\overline{m}_{\mathrm{R}}\ddot{x}_{\mathrm{Ro}} + \overline{B}_{\mathrm{R}}\dot{x}_{\mathrm{Ro}} + k_{\mathrm{R}}x_{\mathrm{Ro}} = (p_{\mathrm{c}} - p_{\mathrm{0}})\overline{A}_{\mathrm{R}} \\ x_{\mathrm{Ri}} = 0$$

$$p_{\mathrm{c}} > p_{\mathrm{0}}$$

$$(2)$$

其中,x<sub>Ri</sub> 与 x<sub>Ro</sub> 分别为吸油阀阀片与排油阀阀片 的开口位移量。

悬臂梁阀片工作时,考虑流固耦合作用下附 着在阀片周围的液体的等效质量为<sup>[12]</sup>

$$\widetilde{m}_{\rm R} = \frac{\pi}{4} \rho f L_{\rm R} w_{\rm R}^2 \tag{3}$$

(1)

式中, $\rho$ 为油液的密度;f为驱动频率; $L_{R}$ 为阀片的长度;  $w_{R}$ 为阀片的宽度。

阀片的等效质量为<sup>[12]</sup>

$$\overline{m}_{\rm R} = 2.75(m_{\rm R} + \widetilde{m}_{\rm R}) \tag{4}$$

式中, m<sub>R</sub> 为阀片质量。

将式(3)代入式(4)可得

$$\overline{m}_{\rm R} = 2.75(\rho_{\rm R}V_{\rm R} + \frac{\pi}{4}\rho f L_{\rm R}w_{\rm R}^2)$$
(5)

式中, $\rho_{\rm R}$ 为阀片材料的密度; $V_{\rm R}$ 为阀片的体积。

其余参数如阀片的弯曲变形刚度  $k_{\rm R}$  与阀片等 效阻尼  $\overline{B}_{\rm R}$  可基于材料属性采用有限元法予以确 定。因为阀片厚度  $h_{\rm f}$  分别为 0.1 mm,0.12 mm, 0.15 mm,阀孔直径  $d_{\rm f} = 4$  mm, $h_{\rm f}/d_{\rm f} \ll 2$ ,故可以 将阀孔的出流看作薄壁孔口出流。根据伯努利方程 和连续性方程可得到薄壁孔口的节流方程:

$$Q = C_{q} A \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \tag{6}$$

式中, $\Delta p$ 为阀口内外压差; $\rho$ 为油液的密度; $C_q$ 为阀孔流 量系数;A为阀孔截面积。

根据式(6)可以推导出排油与吸油时的流量 ( $f \leq 300 \text{ Hz}$ )表达式<sup>[13]</sup>:

$$Q_{o} = C_{q} ux_{Ro} \sqrt{\frac{2}{\rho}} \sqrt{p_{c} - p_{0}}$$

$$x_{Ro} = \begin{cases} x_{Ro} & x_{Ro} \ge 0\\ 0 & x_{Ro} < 0 \end{cases}$$

$$(7)$$

$$Q_{i} = C_{q} u x_{Ri} \sqrt{\frac{2}{\rho}} \sqrt{p_{0} - p_{c}}$$

$$x_{Ri} = \begin{cases} x_{Ri} & x_{Ri} \ge 0\\ 0 & x_{Ri} < 0 \end{cases}$$
(8)

式中, w 为阀口面积梯度。

GMP相关参数的取值如表 1 所示。

表 1 GMP 相关参数的具体值

<b>泵腔直径</b> D <sub>c</sub> (mm)	40	泵腔高度 L <sub>c</sub> (mm)	0.5
<mark>有效体积模量</mark> <sub>βe</sub> (MPa)	400	阀片接触面积 $\overline{A}_{R}(mm^{2})$	82.24
阀片厚度 h <sub>f</sub> (mm)	0.1,0.12,0.15	阀片等效质量 m <sub>R</sub> (kg)	$3.33 \times 10^{-4}$
阀片等效阻尼 $\overline{B}_{R}(N \cdot s/m)$	0.4	阀片刚度 k <sub>R</sub> (N/m)	6.65 $\times 10^{3}$
阀孔流量系数 $C_q$	0.6	<u> 孔口面积梯度</u> <i>w</i> (mm)	3.14

在 MATLAB/Simulink 中编制仿真程序求 解,当输入压差为 16 kPa 与 32 kPa 阶跃时,悬臂 梁阀瞬态响应曲线分别如图 4 所示。



图 4 阶跃输入下悬臂梁排油阀的响应曲线

当输入正弦压差的幅值分别为 16 kPa 与 32 kPa,且频率为1 Hz 时吸排油悬臂梁阀的响应 曲线如图 5 所示。



图 5 正弦输入下悬臂梁吸油阀与排油阀的响应曲线

3 悬臂梁阀流固耦合非线性数值研究

#### 3.1 流固耦合模型的建立

流体流入阀中将阀片打开而出流的过程是一 个流体与阀片相互影响的复杂流固耦合过程。在 模型中需严格输入阀口的内外压差以及阀片开启 压力。有限元数值模拟中以排油阀为研究对象, 排油阀的有限元模型如图 6 所示,阀片材料分别 选择 304 不锈钢与铍青铜,相关参数如表 2 所示。



(a)有限元模型
 (b)网格模型
 图 6 GMP 排油阀的流固耦合模型

表 2 阀片材料的相关参数取值

名称	304 <b>不锈钢</b>	铍青铜
杨氏模量 E(GPa)	200	110
密度 $ ho_{ m R}$ (kg/m <sup>3</sup> )	8000	8950
泊松比 <sub>2</sub>	0.29	0.35
<b>厚度</b> h <sub>f</sub> (mm)	0.1,0.15	0.1,0.15

考虑在不同压差下阀的工作情况,仿真时将 阀的入口处设定一合适的压力值,而出口压力设 定恒为 0。由于在达到最高流速时流体的雷诺数 远小于 500,故可设置流体为层流流动;同时为简 化模型,假定流体为不可压缩流动。

- 3.2 流固耦合分析结果
- 3.2.1 不同阀片材料时的流场分析

图 7 是选定材料为 304 不锈钢和铍青铜阀片 的流固耦合速度云图。由图 7a 与图 7c 对比可知 在合适的相同压差作用下,铍青铜阀片所能达到 的最大开口位移要比 304 不锈钢阀片所能达到的 最大开口位移大,选用铍青铜阀片的排油阀中流 速要比选用 304 不锈钢阀片的排油阀中流速大; 由图 7c 以及表 2 的相关参数可知,由于铍青铜的 刚度比 304 不锈钢的刚度要低,所以其弯曲变形 较 304 不锈钢要大一些。

根据数值模拟结果,当阀片材料分别为 304 不锈钢与铍青铜时,阀口平均出流速度随压差的 变化曲线如图 8 所示,其中阀片厚度为 0.1 mm。

从图 8 中可以看出,采用 304 不锈钢阀片时 可承受最大压差为 35 kPa,选用铍青铜阀片时可 承受最大压差为 26 kPa;在承受最大压差时,液压 油在选用铍青铜材料阀片的排油阀中流过时流速 要小于在选用 304 不锈钢材料阀片的排油阀中流 过时流速。所以具体选用何种材料做阀片要具体 考虑实际中的压差以及材料的刚度特性等。由图 8 还可知,在不大于 16 kPa 的压差下,选用铍青铜 阀片的排油阀出口的平均流速明显大于选用 304 不锈钢阀片时的平均流速。而针对不同材料阀片 都有一个不同的额定压差值使得在该压差时阀口 平均出流速度达到最大,选用 304 不锈钢阀片的



图 8 阀口平均流速与压差及阀片材料的关系曲线 排油阀的额定压差值要明显大于选用铍青铜阀片 时的额定压差值,且在阀两端压差达到额定压差 之前阀口平均速度会随着压差上升而上升,但是 当压差大于额定压差值后,阀口平均速度会随之 下降。

3.2.2 阀片不同厚度时的流场分析

图 9 是不同压差、不同阀片(不锈钢)厚度 (0.12 mm,0.15 mm)下的被动阀流固耦合速度 云图。

由图 7(阀片厚度 0.1 mm)以及图 9(阀片厚 度 0.12 mm 与 0.15 mm)可知,在同等压差作用 下,阀片越厚,阀片的最大开口位移以及液压油从 阀中流过的速度就越小,但越厚的阀片可承受的 最大压差就越大,且将阀片打开所需的压力也 越大。

图 10 所示为根据数值模拟结果得到的阀口 平均流速与压差以及阀片厚度的关系曲线。可以 看出,对于同一阀片,增加阀两端的压差,阀口的 平均流速就增大;但是由于阀口空间的限制,当阀



图 10 阀口平均流速与压差及阀片厚度的关系曲线 片完全打开时,继续增加阀两端的压差,阀的流量 却会减小;故对于不同厚度的阀片都有一个额定 的压差值,在这个压差值时阀片被看作完全打开, 而此时流体黏性损失最小。

由图 10 可知,对于选用不同厚度阀片的阀, 其阀口平均流速相同时,越厚的阀片完全打开时 所需压差就越大,其阀口所能达到的平均流速也 越大,即阀的流量也就越大。

由以上分析可知,阀的工作性能依赖于阀片 的厚度与阀体的几何结构。尽管薄阀片完全打开 时所需要压差相对较小,但是其所能达到的最大 流量却比厚阀片受到更大的限制,因此在允许的 压力损失范围内可以通过比较流量需求来选择阀 片厚度。

- 4 模型验证与实验结果
- 4.1 模型验证

将以上非线性数值模拟结果与线性理论模型 结果进行对比,考虑不同厚度阀片在不同压差流 固耦合作用下阀片开启位移,对比结果如图 11~ 图 13 所示。



图 11 厚度为 0.1 mm 阀片位移与压差关系曲线



图 12 厚度为 0.12 mm 阀片位移与压差关系曲线



图 13 厚度为 0.15 mm 阀片位移与压差关系曲线

图 11~图 13 显示出最大开口位移与压差及阀 片厚度的关系曲线(其中阀片材料为 304 不锈钢,由 阀片安装空间决定的最大限制位移为2 mm)。

由图 11~图 13 可知,线性模型结果显示阀片位 移随压差而线性变化,而数值结果为非线性变化,但 两者结果相差不大,反映出理论模型与数值结果可 描述阀口附近液体流动与阀片开闭运动特性。

此外,同样可以看出,对于选用不同厚度的悬 臂梁阀时,其阀口或阀片的开口位移相同时,厚阀 片完全打开时所需的压差较大,且厚阀片所能承 受的最大压差或压差范围更大。

## 4.2 实验结果

在对 GMA 位移特性充分研究的基础上研究 GMP 的实际输出性能,测试时,给定输入幅值分 别为 2 V、3 V、4 V 的正弦电压,实验样机与一体 式悬臂梁单向阀如图 14 所示。



(a)超磁致伸缩泵 (b)一体式悬臂梁单向阀 图 14 实验样机

实验中通过量筒或流量计读取流量数据,通 过压力表读取阻断压力数据,并做好记录,最后将 所测的实验数据经 MATLAB 处理成流量与输入 电压和驱动频率的关系曲线,以及阻断压力与输 入电压和驱动频率关系曲线。

GMP 输出流量和阻断压力分别与输入电压、 驱动频率的关系曲线如图 15 所示(图中点表示实 测的数据,曲线是对数据点拟合后的四阶函数曲 线,*U* 为输入电压)。



从图 15 可以看出,在恒定输入电压下,GMP 的输出流量开始随着驱动频率的增大而上升,但 上升到一峰值后,却会随着频率的继续增大而下 降;不同大小的输入电压对应的 GMP 峰值流量 频率(简称峰值频率)也不同,而且随着输入电压 越大,峰值频率就越大,但是随着输入电压不断增 大其峰值频率增大幅度减小,GMP 的峰值频率在 300 Hz 左右;驱动频率相同时,随着输入电压的 增大 GMP 的输出流量也跟随增大,3 V 输入电压 相对于 2 V 输入电压流量增长比较明显,而 4 V 输入电压相对于 3 V 输入电压流量增大幅度相对 减小很多。

# 5 结论

(1)设计了面向电静液作动器的超磁致伸缩 驱动泵的结构,结合超磁致伸缩材料的工作机理, 研制了超磁致伸缩泵用一体式悬臂梁被动阀。

(2)根据超磁致伸缩驱动泵的工作原理建立 了驱动泵悬臂梁单向阀的线性化数学模型,通过 MATLAB/Simulink 对其运动特性进行了仿真研 究,得到了超磁致伸缩泵用一体式悬臂梁被动阀 恒定压力与正弦压力作用下运动特性。

(3)建立了超磁致伸缩泵悬臂梁被动阀非线 性数值模型。利用 Comsol-CFD 对不同压差、不 同厚度以及不同材料阀片等多种情况进行流固耦 合数值研究,在此基础上进行了深入分析,得到了 悬臂梁阀开启特性、阀片位移与阀口流速等特性 规律,分析了阀片主要结构参数对其性能的影响 机理,最后通过悬臂梁阀线性与非线性模型计算 结果对比对数值求解进行了验证。

(4)实验测试超磁致伸缩泵流量特性与阻断 压力特性,得到了 GMP 的峰值频率在 300 Hz 左 右,且峰值频率随输入电压幅值变化;驱动频率相 同时,随着输入电压的增大超磁致伸缩泵的输出 流量也相应增大。

参考文献:

- [1] 焦裕松,焦宗夏,范开华.航空科学技术学科发展报告 (2008-2009)[M].北京:中国科学技术出版社,2009.
- [2] Chaudhuri A, Yoo J H, Wereley N M. Design, Test and Model of a Hybrid Magnetostrictive Hydraulic Actuator [J]. Smart Materials and Structures, 2009,18(8):1-21.
- [3] Lhermet N, Claeyssen F, Fabbro H. Electro-fluidic Components Based on Smart Materials for Aircraft Electrohydraulic Actuators [C]//The 9th International Conference on New Actuators. Bremen, Germany,2004: 14-16.
- [4] Yoo J H, Sirohi J, Wereley N M. A Magnetor Heological Piezohydraulic Actuator[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2005, 16(11/12):945-953.
- [5] Chapman E G, Herdic S L, Keller C A, et al. Development of Miniaturezed Piezohydraulic Pumps[J]. Proceedings of the SPIE, 2005, 5762:299–310.
- [6] Kim G W, Wang K W. Switching Sliding Mode Force Tracking Control of Piezoelectric Hydraulic Pump Based Friction Element Actuation Systems for Automotive Trans -missions [J]. Smart Materials and Structures, 2009,18(8):1-15.

# 基于解析法的整体式叶轮侧铣高精加工技术

余道洋韩江赵韩

合肥工业大学,合肥,230009

摘要:提出了加工非可展直纹面刀轴矢量的解析解法,给出了解析解法的加工误差,并将其与"R偏置法"的侧铣加工方法的误差进行了比较。计算结果证明,该方法减小了理论误差。应用 MATLAB 绘制了依据该方法计算出的叶片刀轴轨迹。最后,通过数控加工试验验证了所提出方法的正确性。加工结果表明,加工误差在允许加工误差范围内,叶轮加工表面质量好。

关键词:侧铣;非可展直纹面;解析法;加工误差

中图分类号:TG659;TP273 DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2015.03.004

#### High Precision Machining Technology Based on Analytical Method for Integral Impeller with Flank Milling

Yu Daoyang Han Jiang Zhao Han

Hefei University of Technology, Hefei, 230009

Abstract: This paper proposed machining non-developable ruled surface cutter axis vector's analytical method, provided the analytical method's machining error and compared with the "R offset" flank milling method's error. The results prove that the proposed melhod can reduce the theoretical errors. Then the blade tool path trajectory was drew by the algorithm with MATLAB software. Finally, NC machining experiments verified the proposed algorithm, the machining results show that the machining errors are within the allowable machining error range and the machining surface quality of impeller is good.

Key words: flank milling; non-development ruled surface; analytical method; machining error

### 0 引言

目前,加工非可展直纹面的的刀位计算一般 根据直纹面母线的几何特性计算刀位数据。文献 [1]提出了用最小偏置原理求取刀轴矢量的方法, 使加工误差趋于最小。Bohez 等<sup>[2]</sup>针对直纹曲面 发展出五轴侧铣加工的路径规划方法,主要思路

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51275147);合肥工业大 学校基金资助项目(2012HGXJ0671)

- [7] Chaudhuri A. Self-contained Hybrid Electro-hydraulic Actuators Using Magnetostrictive and Electrostrictive Materials[D]. College Park, MD: University of Maryland, 2008.
- [8] Gerver M J, Goldie J H, Swenbeck J R, et al. Magnetostrictive water pump [J]. Proceedings of the SPIE, 1998,3329: 694-705.
- [9] Mauck L D, Lynch C S. Piezoelectric Hydraulic Pump Development[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2000, 11(10):758-764.
- [10] Sirohi J. Piezoelectric Hydraulic Hybrid Actuator for a Potential Smart Rotor Application[D]. College Park, MD: University of Maryland, 2002.
- [11] Sirohi J, Chopra I. Design and Development of a High Pumping Frequencies Piezoelectric-hydraulic

为:沿着曲面的直纹线搜索对应法矢量与两端点 的法矢量夹角相等的位置(作为刀刃接触点),以 此直纹线法矢量方向为刀具轴向。文献[3]提出 了"R偏置法"的侧铣直纹面算法并给出了加工误 差的计算公式。文献[4-5]在直母线两端点法矢 量方向上偏置一定距离得到两个偏置点,以这两 个偏置点的连线方向作为刀轴方向,刀轴方向的 求解采用数值迭代算法,但该算法存在迭代误差。 本文首先分析了"R偏置法"侧铣非可展直纹

> Hybrid Actuator[J]. Journal of Intelligent Material Systemand Structures, 2003, 14(3):135-147.

- [12] Thomas E W. Development of a Smart Material Electrohydrostatic Actuator Considering Rectification Valve Dynamtics and in Situ Valve Characterization[D]. Athens, Ohio: Ohio State University, 2008.
- Kim G W. Design and Nonlinear Force Control of Power-by-wire Piezoelectric-hydraulic Actuator for Auto-motive Transmissions [D]. Pennsylvania: Pennsylvania State University, 2009.

(编辑 郭 伟)

收稿日期:2013-08-30

作者简介:朱玉川,男,1974年生。南京航空航天大学机电学院 副教授。研究方向为智能材料电液控制技术。陈 龙,男,1988 年生。南京航空航天大学机电学院硕士研究生。杨旭磊,男, 1989年生。南京航空航天大学机电学院硕士研究生。