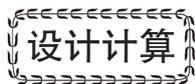


doi:10.3969/j.issn.1005-0329.2019.06.004



涡旋膨胀机齿头修正的理论研究

彭 斌

(兰州理工大学 机电工程学院, 兰州 730050)

摘 要:对圆渐开线涡旋型线的齿头修正展开了研究。首先从圆渐开线几何学出发,叙述了涡旋膨胀机的几何模型,探讨了涡旋齿齿头修正方法。为了提高涡旋机械的综合性能,着重分析了型线修正问题,研究了双圆弧修正与双圆弧加直线修正的修正参数的变化规律和修正面积系数的变化规律,为涡旋膨胀机的几何模型研究奠定了基础。

关键词:涡旋膨胀机;圆渐开线;修正;修正面积系数

中图分类号:TH45

文献标志码:A

Theoretical Investigation on Top Profile Modification of Scroll Expander

Peng Bin

(College of Mechanical and Electrical Engineering of Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract:The tooth head correction of the circular involute scroll profile was studied. First, starting from the circular involute geometry, the geometric model of the scroll expander was described, and the correction method of the wrap head was discussed. In order to improve the overall performance of the scroll fluid machine, the problem of wrap profile correction of scroll expander was analyzed. The variation rules of the correction parameters of the symmetrical circular arc shape and symmetrical circular arc plus straightline and the variation rules of the correction area coefficient were studied, which lays a foundation for the study of the geometric model of the scroll expander.

Key words:scroll expander; circle involute; correction; corrected area coefficient

0 引言

涡旋机械涡旋体的型线通常采用圆的渐开线^[1],该型线在加工时由于端部与刀具的干涉而造成过切,实际涡旋体外壁型线由圆渐开线构成,内壁型线由圆渐开线和刀具圆干涉圆弧组成,在中心部位形成了较大的余隙容积,内容积比和压力比较小,并使切削特性和受力特性恶化。为了消除这些不利影响,研究者们提出对齿端型线进行修正,涡旋型线的齿端修正是影响涡旋膨胀机性能的关键因素。针对涡圈型线为圆渐开线的涡旋膨胀机,专家学者们对其起始段的型线修正展开了深入研究。Morishita^[2]等通过建立涡旋型线的几何理论推出了其表达式。Takahisa

Hirano等提出了一种可以降低齿端接触应力的修正型线理论即PMP修正涡旋型线,主要是在涡旋型线的齿端用两段圆弧进行修正,修正后的齿端根部厚度增加。王君^[3]等研究了渐开线型线的双圆弧修正,从曲率半径和啮合转角两方面讨论了双圆弧修正对型线的影响,提出了修正角的概念。推导出了修正参数之间关系式以及修正后涡旋压缩机的各工作腔的容积计算式。还对多对圆弧修正进行了分析和探讨,指出可有效地同时提高压缩机的压缩比和涡旋齿齿端强度。高秀峰^[4]等研究了等 β 角圆弧类涡旋修正齿型,采用控制容积法分析了修正后的涡旋压缩机各工作腔的容积变化规律,推导出了修正后其气体作用力面积的求解程序。此外,还简单地分析了设有排气阀

收稿日期: 2018-07-18 修稿日期: 2019-05-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51275226, 51675254)

的涡旋压缩机排气角的确定,并指出涡盘始端修正后容积的计算公式比较复杂。上述研究表明,双圆弧修正的几何特性、动力特性等理论较为完善,这为双圆弧修正型线涡旋压缩机的实际加工生产奠定了理论基础。涡旋齿头修正的方法^[5]常见的为:双圆弧类修正、多对圆弧修正、组合型线修正等。修正后的涡旋齿端型线由圆渐开线与修正型线组合而成,减少了其齿端无用容积一余隙容积,提高了涡旋机械的内容积比和压力比,改善了其齿端的受力特性,从而获得较高的工作效率。目前国内外广泛使用的线型修正形式是圆弧的PMP (perfect meshing profile) 修正式及其各种衍生形式。由于涡旋齿中心部分是受力和变形最大的区域,修正型线的形状将直接影响膨胀机的热力特性和动力特性,而双圆弧的修正型线只是众多可能的修正曲线之一。因此,拓展现有修正型线的种类,在满足加工条件的前提下进行型线的创新设计,将为涡旋膨胀机提供更大的设计灵活性和性能提高的可能性。

本文主要探讨等截面涡旋膨胀机(涡旋型线为圆渐开线)的齿头修正方法,分别采用双圆弧修正与双圆弧加直线修正对其涡旋齿头进行修正,分析对比2种修正后膨胀机的齿头修正参数的变化规律和修正面积系数的变化规律。

1 几何模型

圆渐开线型线所对应的基准线方程如下:

$$\begin{cases} x = r_b (\cos\phi + \phi \sin\phi) \\ y = r_b (\sin\phi - \phi \cos\phi) \end{cases} \quad (1)$$

式中 r_b ——圆渐开线的基圆半径, mm;
 ϕ ——圆弧接点处展开角, rad。

基线确定后,根据法向等距线的特点,得出涡旋齿的内外侧型线方程^[6]。

型线内圈圆渐开线方程:

$$\begin{cases} x_1 = r_b [\cos\phi + (\phi + \alpha) \sin\phi] \\ y_1 = r_b [\sin\phi - (\phi + \alpha) \cos\phi] \end{cases} \quad (2)$$

式中 α ——型线发生角, rad。

型线外圈圆渐开线方程:

$$\begin{cases} x_0 = r_b [\cos\phi + (\phi + \alpha) \sin\phi] \\ y_0 = r_b [\sin\phi - (\phi + \alpha) \cos\phi] \end{cases} \quad (3)$$

图 1 所示为圆渐开线涡旋齿型线示意。

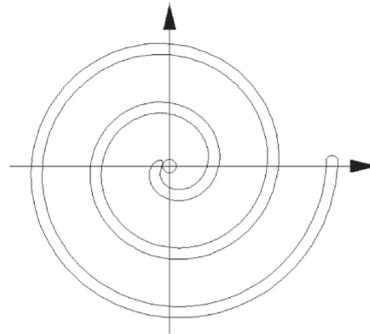


图 1 圆渐开线涡旋齿型线示意

2 双圆弧修正

图 2 为双圆弧修正的示意,取定中线展角 ϕ , $\phi + \pi$ 交涡旋型线外、内侧渐开线上点 C, A 和过 C, A 分别作基圆的切线 CD, AG, 交基圆于 D, G 两点, 连接 AC 并取 B 点满足 $2|_{OB} = R_{or}$, 连接 OB 并延长交 CD, AG 于 E, F 两点, 以 E, F 为圆心, 以 EB, FB 为分别为半径作修正圆弧 BC、连接圆弧 BA。

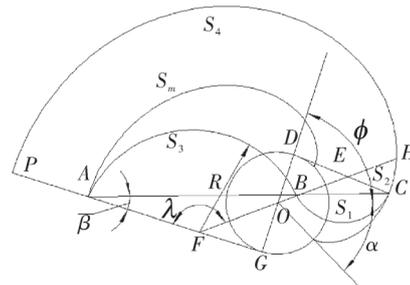


图 2 双圆弧修正

2.1 修正齿型的内在几何关系

如图 2 所示,双圆弧修正就是将起始段的涡旋型线用圆渐开线和修正型线代替,构成了相互完全啮合的 PMP 型线^[7-10]。渐开线型线的基本参数^[6]有 3 个,分别是 r_b, α, R_{or} 。其中 2 个是独立的,修正参数有 6 个,分别为 $\phi, \gamma, \lambda, \beta, R, r$, 只有一个独立的,它们之间有如下关系:

$$\begin{cases} R - r = R_{or} \\ \pi - 2\beta = \lambda \\ R = R_b / \sin\lambda - R_{or} / 2 \\ r_b (\phi + \alpha) - r = r_b \cot 2\beta \\ \phi = \cot\beta - \pi / 2 \\ \gamma = \phi - \lambda + \pi / 2 \end{cases} \quad (4)$$

式中 R_{or} ——动静涡盘基圆中心距离, mm;
 β ——修正底角, rad;
 λ ——圆弧中心角, rad;
 R ——修正大圆弧半径, mm;
 r ——修正小圆弧半径, mm;
 γ ——修正角, rad;

2.2 双圆弧修正后的齿头面积

由图 2 可得, 双圆弧修正后的齿端型线由大圆弧 BA 和小圆弧 BC 组成, 形成的修正涡旋齿为 APHCBA (S_m), 将 APHCBA (S_m) 分为 4 个部分: 扇形 BECB (S_1)、渐开线扇形 CEHC (S_2)、扇形 BFAB (S_3) 和渐开线扇形 PFHP (S_4), 对于不同齿形参数下的修正涡旋齿都可以用此法进行分块, 且每个子块图形简单、面积易求^[1]。整个修正涡旋齿的轴向投影面积为:

$$S_m = S_1 + S_2 - S_3 + S_4 \quad (5)$$

3 双圆弧加直线修正

图 3 为双圆弧加直线修正的示意, O_f 为静涡盘基圆中心, O_2 和 O_1 分别为修正圆弧与连接圆弧的圆心, l 为修正圆弧与连接圆弧的过渡直线长度。首先取定修正展角 ϕ , 通过计算求得点 C, D 的坐标, 通过点 C, D 做基圆切线交于内外壁线与 A, B, 过基圆圆心并与 x 轴成 γ 角的直线分别与直线 AD, CB 相交于点 O_2, O_1 , 即两修正圆弧的圆心。分别以 AO_2 和 O_2B 为半径做圆, 最后做出两圆的内切线 (即修正直线 EF)。

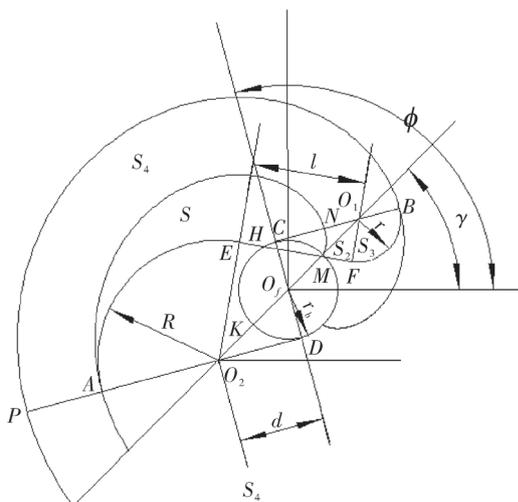


图 3 双圆弧加直线修正

圆弧加直线修正^[11-12]是将涡旋盘型线始端内外侧渐开线分别用大小不等的两段圆弧 AE, PB 和直线 EF 取代, 修正圆弧 AE 的半径为 R, 连接圆弧 PB 半径为 r。

3.1 双圆弧加直线修正齿型的内在几何关系

$$\begin{cases} \gamma = \phi - \tan^{-1}(d/r_B) \\ r = r_B(\phi + \alpha) - d \\ R = r + r_B(\pi - 2\alpha) \\ |O_1O_2| = 2(d^2 + r_B^2)^{1/2} \\ l = \left[|O_1O_2|^2 - (R+r)^2 \right]^{1/2} \end{cases} \quad (6)$$

3.2 双圆弧加直线修正后的齿头面积

如图 2 所示, 修正型线是由大圆弧 AE、小圆弧 FB、直线 EF 组成, 由图可得修正涡旋齿为 APBFEA (S_m), 将 APBFEA (S_m) 分为以下几个部分: ANMEA (S)、扇形 FO_1B (S_3)、三角形 MFO_1 (S_2)、近似三角形 MNO_1 (S_1) 和基体圆渐开线齿 NBPA (S_4)。整个修正涡旋的轴向投影面积为^[13]:

$$S_m = S + S_1 + S_2 + S_3 + S_4 \quad (7)$$

其中 $S = S_5 - S_{扇O_2AE} - S_{\Delta O_2EM} - S_{\Delta O_2DO_f} + 2S_{扇O_fKD} + S_{扇O_fKC}$

其中 S_5 为圆渐开线内壁型线从发生角 α 到渐开线展角 ϕ_A 所构成的面积, 结合圆渐开线的型线生成特性可得其计算式为^[6]:

$$S_5 = \int_{\alpha}^{\phi_A} \frac{1}{2} (r_B \phi)^2 d\phi \quad (8)$$

式 (7) 中各扇形和三角形的面积不再一一推导, 具体参考文献 [13]。

4 面积系数计算

修正齿面积系数 ξ 是用以描述型线修正后涡旋齿头面积的增加程度, 是有关涡旋型线基本参数的函数, 但与其基圆半径无关。修正和未修正的涡旋齿的投影面积是不一样的, 其区别是在中线展角为 $[10, \phi + \pi]$ 内的涡旋齿, 已由圆渐开线齿变为圆渐开线圆弧齿。为了描述修正和未修正的涡旋齿之间的面积关系, 定义了面积系数^[14], 它是修正后的圆渐开线圆弧齿面积与有相同中线展角范围的未修正圆渐开线涡旋齿面积之比^[1]。

其面积系数的计算方式为:

$$\xi = \frac{S_m}{S[0, \phi + \pi]} \quad (9)$$

式中 S_m ——修正后齿头轴向投影面积;

$S[0, \phi + \pi]$ ——中心展角取值为 $[0, \phi + \pi]$ 的齿头的轴向投影面积。

5 计算结果与分析

通过利用分块法对双圆弧修正和双圆弧加直线修正的修正齿头轴向投影面积做了分析计算。本文采用 MATLAB 软件,对修正圆弧半径变化和修正涡旋齿面积系数变化进行编程计算。

5.1 双圆弧修正的参数变化

图 4 所示为双圆弧修正的参数随圆弧接点处渐开线的展角变化的关系,图 5 所示为双圆弧加直线修正的参数随圆弧接点处渐开线的展角变化的关系, R 为修正圆弧半径, r 为连接圆弧半径, L 为修正直线长度。

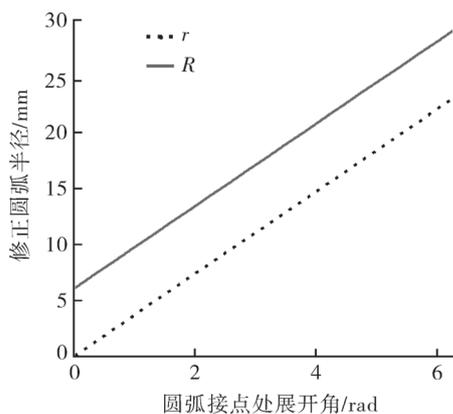


图 4 双圆弧修正参数变化

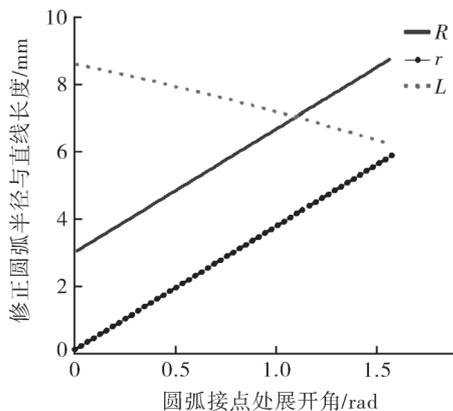


图 5 双圆弧加直线修正参数变化

定义连接圆弧与外侧渐开线接点处渐开线的展角为 φ 。 φ 角的大小不是随意定的,从 φ 的定义可知,首先要求 $\varphi \geq 0$;其次,理论上 φ 角的最大值是涡旋体外侧渐开线的终了展角。但是从工程实际出发,一般 $\varphi \leq 2\pi$ 。如图所示,当 φ 逐渐增大时,修正圆弧半径 R 和连接圆弧半径 r 也相应增大且呈线性变化,当 φ 逐渐增大时,修正直线的长度 L 却逐渐减小。因此,修正设计中选择合适的 φ 值是很重要的。

5.2 面积系数变化

图 6 所示为双圆弧修正的修正涡旋齿面积系数随修正角 γ 变化的关系,图 7 所示为双圆弧加直线修正的修正涡旋齿面积系数随修正角 γ 的关系。

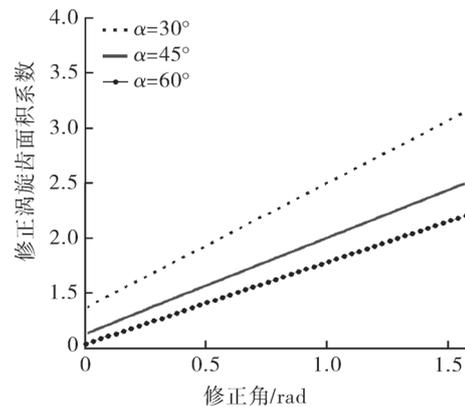


图 6 双圆弧修正涡旋齿面积系数变化

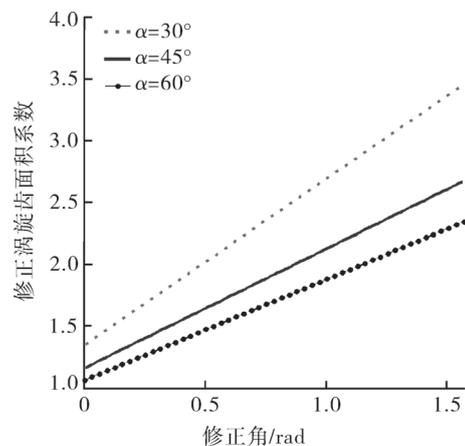


图 7 双圆弧加直线修正涡旋齿面积系数变化

分别取圆渐开线发生角 α 为 30° 、 45° 、 60° ,得到不同的渐开线发生角下修正涡旋齿面积系数随修正角 γ 之间变化关系,可见 ξ 是大于 1 的数,这表明修正涡旋齿的面积大于原来的圆渐开线

涡旋齿面积;双圆弧修正与双圆弧加直线修正中 ξ 都随渐开线发生角 α 的减小而增大,随修正角 γ 增加而接近于线性增加,且渐开线发生角 α 的越小,变化速度越快。

5.3 修正对比分析

图8所示为双圆弧修正的修正涡旋齿面积系数和双圆弧加直线修正涡旋齿面积系数随修正角 γ 变化的关系,不同修正方法的渐开线发生角 α 取定值 40° ,双圆弧修正与双圆弧加直线修正中 ξ 都随修正角 γ 的增大而增大,但双圆弧加直线修正的修正涡旋齿面积系数 ξ 的增加幅度明显大于双圆弧修正的修正涡旋齿面积系数 ξ 。这表明相同的几何参数下,双圆弧加直线修正涡旋齿的面积大于双圆弧修正涡旋齿面积。

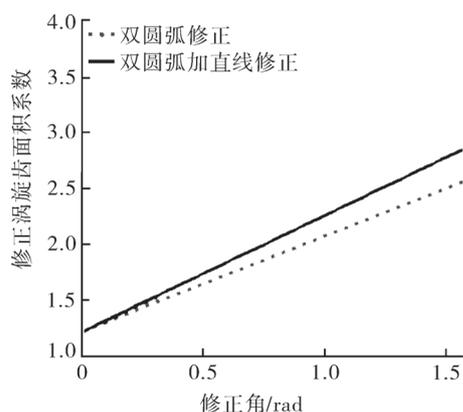


图8 修正涡旋齿面积系数对比

6 结论

(1) 本文探讨了等截面涡旋膨胀机(涡旋型线为圆渐开线)的齿头修正方法,分别采用双圆弧修正与双圆弧加直线修正对其涡旋齿头进行了修正,给出其修正涡旋齿面积系数的计算方法。

(2) 采用2种常见的修正方法对圆渐开线涡旋齿头进行修正,并分析计算了其修正后的齿头轴向投影面积。

(3) 修正面积系数与涡旋齿齿头的强度有关,修正面积系数越大,强度越大;随着圆弧接点处展开角 φ 的增加,修正面积系数越大,强度越大;因此考虑到涡旋齿齿头的强度,优先选用双圆弧加直线修正。

(4) 通过分块法对修正齿头轴向投影面积进行了分析计算,使用MATLAB编程得出修正圆弧半径变化和修正涡旋齿面积系数变化曲线,并对

两种修正面积系数进行简单的对比分析,得出双圆弧加直线修正相比双圆弧修正对膨胀机齿头的变化较明显。

参考文献:

- [1] 刘振全. 涡旋式流体机械与涡旋压缩机 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [2] Morishita, Sugihara E M. Scroll compressor analytical model [C] //1984 International Compressor Engineering Conference at Purdue University, 1984 487-495.
- [3] 王君, 刘振全. 涡旋压缩机渐开线类型线的双圆弧修正 [J]. 机械工程学报, 2005, 41 (9): 202-206.
- [4] 高秀峰, 刘卫华, 冯诗愚, 等. 涡旋齿端等 β 角圆弧类型线修正理论的研究 [J]. 西安交通大学学报, 2001, 35 (7): 750-754.
- [5] 吴昊. 涡旋压缩机对称圆弧加直线修正型线理论研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2015.
- [6] 李连生. 涡旋压缩机 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.
- [7] 江沂. 涡旋压缩机的齿端修正方法 [J]. 压缩机技术, 2006 (1): 20-22.
- [8] 王君, 彭斌, 李超, 等. 涡旋压缩机双圆弧修正的几何理论和压缩比研究 [J]. 兰州理工大学学报, 2004, 30 (6): 59-63.
- [9] Wang J, Liu Z Q. An analytical design method of wrap profile modification using symmetrical twin-circular arcs and error analysis for scroll compressors [J]. Journal of Shanghai Jiao tong University, 2005 (9): 1418-1421.
- [10] 冯诗愚, 顾兆林, 李云. 涡旋机械的涡旋体始端型线研究 [J]. 西安交通大学学报, 1998 (1): 88-92.
- [11] 吴昊, 刘向农, 王铁军, 等. 对称圆弧加直线修正型线涡旋压缩机脱啮角与排气角研究 [J]. 制冷学报, 2011, 32 (6): 20-24.
- [12] 强建国, 刘振全. EA-SAL修正涡旋齿端面积计算 [J]. 兰州理工大学学报, 2006, 32 (5): 36-39.
- [13] 彭斌, 李要红, 赵生显, 等. 基于圆渐开线涡旋膨胀机几何模型的研究 [J]. 流体机械, 2017, 45 (10): 18-24.
- [14] 王君. 多涡旋齿涡旋压缩机啮合型线理论研究 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2006.

作者简介: 彭斌 (1976), 男, 博士, 教授, 硕士研究生导师, 主要从事涡旋机械、低温余热发电技术的研究, 通信地址: 730050 甘肃省兰州市兰州理工大学机电工程学院, E-mail: pengb2000@163.com.