

DOI: 10.13652/j.issn.1003-5788.2020.03.021

# 双螺杆压缩机转子啮合线对其性能参数的影响

Study on the influence of meshing line of rotors on its performance of twin screw compressor

于嘉川<sup>1,2</sup> 何雪明<sup>1,2</sup> 龙 骥<sup>1,2</sup>

YU Jia-chuan<sup>1,2</sup> HE Xue-ming<sup>1,2</sup> LONG Ji<sup>1,2</sup>

(1. 江苏省食品先进制造装备技术重点实验室, 江苏 无锡 214122; 2. 江南大学机械工程学院, 江苏 无锡 214122)

(1. *Jiangsu Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment and Technology, Wuxi, Jiangsu 214122, China*; 2. *School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China*)

**摘要:**根据双螺杆压缩机转子型线的啮合线上关键点的分布,将螺杆转子型线的啮合线分为5段。并详细讨论了每一段变化对转子型线性能参数的影响。最终得出:啮合线围成的面积越大,则面积利用系数越大,即阴阳转子齿间面积之和越大;对泄漏三角形面积产生影响的只有啮合线密封侧的3段;接触线长度的变化是比较复杂的,其与转子型线的线型有很大的关系。

**关键词:**双螺杆压缩机;转子;啮合线;性能;优化设计

**Abstract:** According to the distribution of the key points on the meshing line of the rotor profile of the twin screw compressor, the meshing line of the screw rotor profile was divided into five segments. The influence of the change of each segment on the performance parameters of the rotor profile was then discussed in detail. The resulted showed that the area utilization coefficient changes were associated with the area enclosed by the meshing line, which meant the sum of the area between the teeth of male rotor and female rotor changed to be larger. Only three segments of the sealing side of the meshing line had an effect on the area of the leakage triangle, and the changes of contact line length were complicated and closely related to the rotor profile.

**Keywords:** twin screw compressor; rotor; meshing line; performance; optimization design

双螺杆压缩机因其突出的性能优势,被广泛应用于制冷<sup>[1]</sup>、食品<sup>[2]</sup>等工业部门。作为核心零部件的螺杆转

子(也称阴阳转子),其设计直接决定了压缩机性能的优劣,而作为螺杆转子端面截线的转子型线更是研究压缩机运行性能和转子加工性能等问题的基础,因此,一直以来转子型线是螺杆压缩机行业研究的热点。

研究人员对双螺杆转子型线的设计及优化做了大量的工作,并取得了一定成果。Wu等<sup>[3]</sup>提出了一种利用两段摆线等距线来显式表达转子齿廓方程的方法,在设计阶段可灵活调整该复合曲线,并提出用无约束的连续最小化方法来实现转子齿形的优化。Litvin等<sup>[4-5]</sup>研究了用矢量方式来表达转子型线,并分析了转子型线的特点和螺杆转子间接触间隙对压缩机性能产生的影响。目前正向设计理论已经十分成熟,但是压缩机的性能并不能直接通过转子型线来判断,必须通过转子的啮合线才能判断,若要获得完整且性能较好的转子型线通常需要反复修改与验证,整个设计过程也就变得无比繁杂。因此,Zaytsev等<sup>[6-7]</sup>提出了一种通过已给定的啮合线来求取阴阳转子型线的反向设计方法,并研究啮合线与端面型线间的关系,并对转子端面型线进行了优化。李汗强<sup>[8]</sup>通过啮合线推导出了圆弧包络线的共轭曲线方程,并结合转子型线的优化设计对其传动性能进行分析,由此得出了螺杆压缩机传动性能与结构参数之间的关系,为转子型线的优化设计奠定了理论基础。近年来,何雪明等<sup>[9]</sup>研究了齿廓法线法,并在理论上推导了啮合线段为直线、圆弧、三次B样条曲线的阳转子型线方程。Hsu等<sup>[10]</sup>提出了从离散的测量轮廓点逼近阴阳转子轮廓的啮合间隙消除法(MCE),利用该方法可通过法向齿条计算得到两个转子之间的间隙,然后将法向补偿按比例分配到被测转子轮廓线上,以得到“理想”转子型线,避免在压缩机性能计算中出现数值发散。卢家伦等<sup>[11]</sup>研究出了一种用三次参数样条拟合来计算双螺杆压缩机阴转子型线的一阶导数,并根据一阶导数和包络条件通式计算其共轭型线

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(编号:51975251);江苏省食品先进制造装备技术重点实验室开放课题(编号:FM-201607)

**作者简介:**于嘉川,男,江南大学在读硕士研究生。

**通信作者:**何雪明(1966—),男,江南大学教授,硕士生导师,博士。E-mail:hxuem2003@163.com

**收稿日期:**2019-12-31

的方法。

对于双螺杆压缩机转子型线性能的优劣主要是考查其齿间容积是否具有优越的密封性,而对于双螺杆压缩机的性能,特别是转子型线性能参数的评判都是围绕啮合线方程展开的。此外,转子法或者齿条法设计螺杆转子型线的过程是先设计出转子型线,然后求得啮合线方程,最后通过啮合线方程来评判所设计的型线性能的优劣,根据评判结果返回去修改转子型线,如此反复,这一过程费时费力,而啮合线法就不会出现上述的问题,简化了设计流程。在使用啮合线法设计双螺杆转子型线时,虽然相对于转子法和齿条法简化了设计步骤,但是设计往往不会是一步到位的,因此需要对所设计的啮合线进行优化,以得到性能更加优秀的螺杆转子型线。研究拟对啮合线的各段进行修改,查看其会对性能参数带来怎样的影响,为由啮合线法设计转子型线时的优化设计阶段提供理论依据。

到转子端面上,它也是阴阳转子型线啮合时啮合点的轨迹,称为啮合线。

### 1 啮合线分段

双螺杆压缩机由阴阳转子相互啮合转动,通常由阳转子带动阴转子转动。当阴阳转子齿面啮合时,转子齿面接触形成的空间曲线称为接触线(图 1),将接触线投影

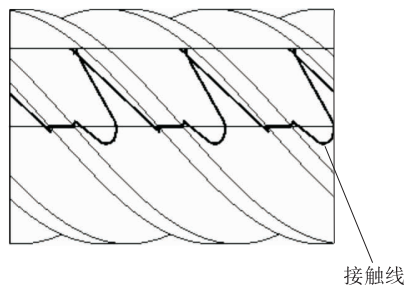


图 1 转子上的接触线

Figure 1 Contact line of the rotor surface

首先,以图 2 的复盛啮合线为例,对其进行分段,阴阳转子节圆的交点将啮合线分为左右两部分,在节圆交点处建立如图 2(a)所示的坐标系,以顺时针方向将啮合线分 5 段。 $A(F)$  点为阴转子齿顶圆和阳转子齿底圆交点, $B(E)$  点为阴阳转子节圆交点, $C$  点为啮合线下止点, $D$  点阴转子齿底圆和阳转子齿顶点。当阴阳转子齿数比和中心距确定之后, $B(E)$  点的位置随之确定,当阴阳转子的齿顶圆半径和齿根圆半径确定后, $A(F)$  点和  $D$  点的位置随之确定。图 2(b)和(c)对应的阳转子型线分段和阴转子型线分段。 $AB$ 、 $BC$ 、 $CD$  段为啮合线的高压侧,即密封侧; $DE$ 、 $EF$  段为低压侧,即传动侧。

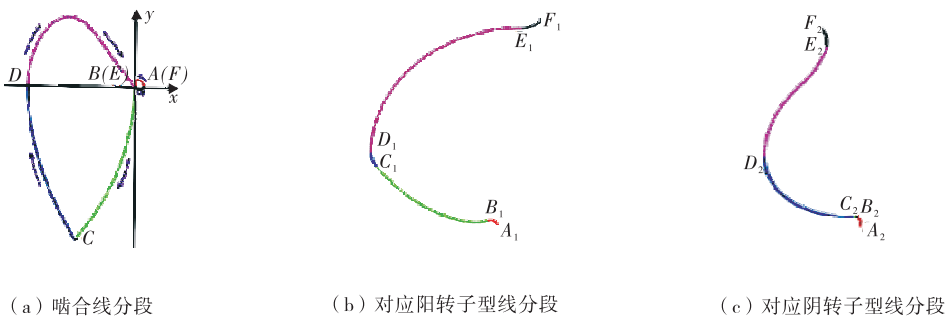


图 2 啮合线分段及对应的转子型线

Figure 2 Meshing line segments and corresponding rotor profile

## 2 啮合线各段对性能参数的影响

### 2.1 AB 段对性能参数的影响

在修改啮合线  $AB$ (图 3 中虚线部分)段时,将其分为左右两部分,分别对左右两部分向内部和外部进行调节(如图 4 所示),观察其对转子型线性能参数产生的影响。

从表 1 可以发现,啮合线  $AB$  段向原啮合线内部移动时,泄漏三角形面积和面积利用系数有减小的趋势;相反,向原啮合线外部移动时,泄漏三角形面积增大,面积利用系数也增大;而对于接触线长度,无论向里还是向外都是增大的,在对转子型线  $AB$  段进行分析之后发现, $AB$  段作为阴转子齿顶,阳转子齿底连接前一个齿曲线末端和后一个齿曲线始端的部分,阴阳转子型线采用的是

圆弧(阴)—圆弧包络线(阳)组合,且此处的齿曲线曲率较大,由此推论,在前后两齿曲线的阴转子齿顶与阳转子齿底连接且曲率较大的部分,圆弧—圆弧包络线组合形成的接触线长度是最短的,并查阅第 3 代典型型线发现,包括复盛型线、日立型线和 SRM-D 型线等在阴转子齿顶和阳转子齿底的前后两齿曲线连接部分采用的均为圆弧—圆弧包络线组合。

### 2.2 BC 段对性能参数的影响

从图 5 及表 2 可以发现,啮合线  $BC$  段向原啮合线内部移动时,泄漏三角形面积是减小的,而面积利用系数增大;啮合线  $BC$  段向原啮合线外部移动时,泄漏三角形增大,面积利用系数也增大;对于啮合线无论怎样变化,接

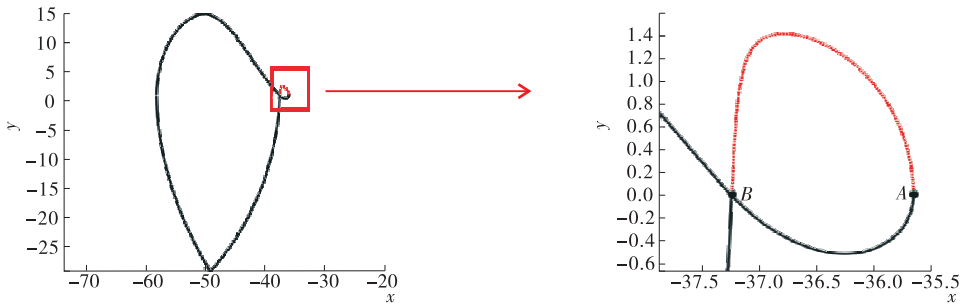


图3 啮合线 AB 段

Figure 3 Segment AB of meshing line

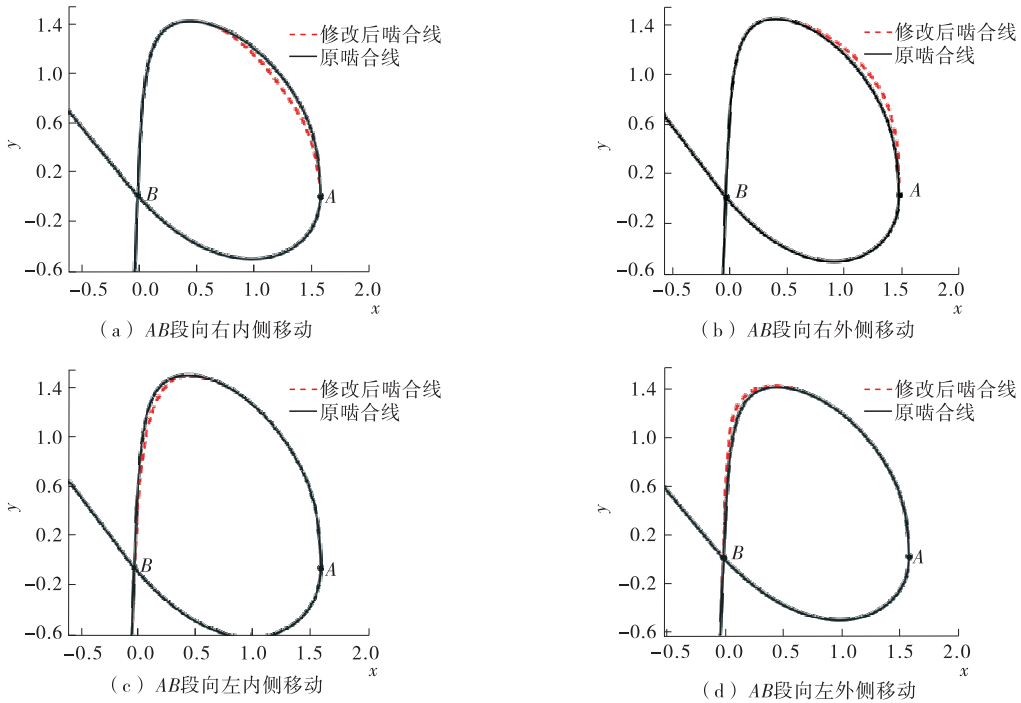


图4 啮合线 AB 段变化

Figure 4 Change of segment AB

表1 啮合线 AB 段变化对性能参数的影响

Table 1 Effect of the change of segment AB on performance

性能参数	接触线长度/mm	泄漏三角形面积/mm <sup>2</sup>	阳转子齿间面积/mm <sup>2</sup>	阴转子齿间面积/mm <sup>2</sup>	面积利用系数
原啮合线	149.787 7	5.192 5	608.974 7	625.902 0	0.459 7
向右内侧移动	151.690 7	5.070 7	604.899 3	620.186 1	0.456 1
向右外侧移动	150.565 1	5.611 2	612.350 1	630.491 7	0.462 7
向左内侧移动	151.785 9	5.181 4	608.908 6	625.821 4	0.459 6
向左外侧移动	149.983 4	5.201 5	609.027 7	625.966 6	0.459 8

触线长度都是增大的,由 BC 段阴阳转子齿曲线发现,在阴转子齿曲线上 BC 段仍作为齿顶的一部分,曲线类型为圆弧包络线,进一步印证了阴转子齿顶曲率较大的连接处,圆弧—圆弧包络线组合形成的接触线最短这一推论。

### 2.3 CD 段对性能参数的影响

从图 6 及表 3 可以发现,啮合线 CD 段向原啮合线内

部移动时,接触线长度减小,泄漏三角形面积减小,而面积利用系数下降;啮合线 CD 段向原啮合线外移动时,接触线长度增加,泄漏三角形面积增大,面积利用系数也增大。对啮合线 CD 段对应的转子型线进行分析,阳转子曲线为出现在齿顶的圆弧,阳转子齿顶相较于阳转子齿底,曲率较小,曲率变化相对平缓,阴转子曲线 CD 段处

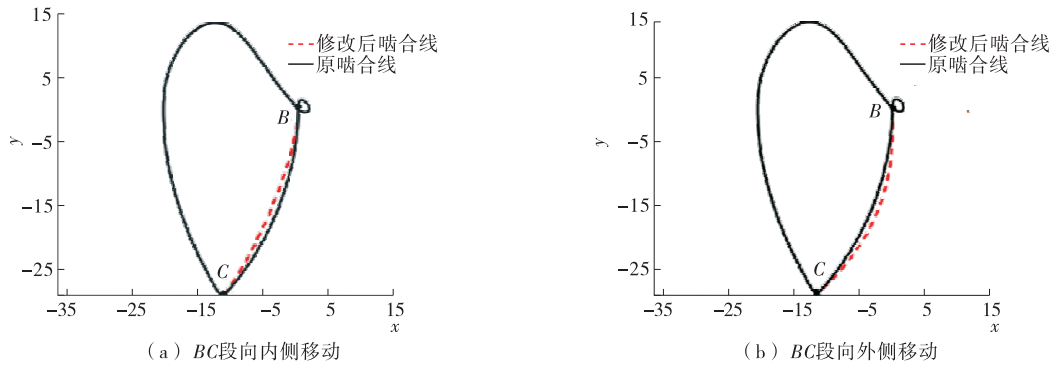


图 5 啮合线 BC 段变化  
Figure 5 Change of segment BC

表 2 啮合线 BC 段变化对性能参数的影响

Table 2 Effect of the change of segment BC on performance

性能参数	接触线长度/mm	泄漏三角形面积/mm <sup>2</sup>	阳转子齿间面积/mm <sup>2</sup>	阴转子齿间面积/mm <sup>2</sup>	面积利用系数
原啮合线	149.787 7	5.192 5	608.974 7	625.902 0	0.459 7
向内侧移动	149.864 6	5.149 7	601.652 2	619.872 9	0.454 8
向外侧移动	151.801 8	5.337 2	612.834 9	627.259 1	0.461 7

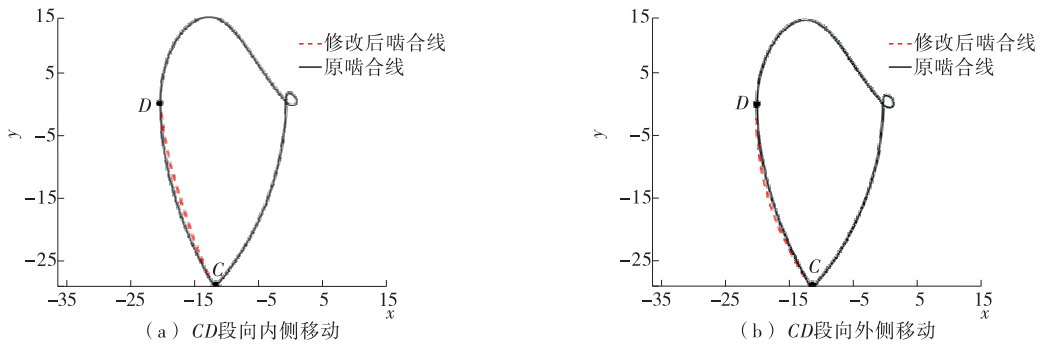


图 6 啮合线 CD 段变化  
Figure 6 Change of segment CD

表 3 啮合线 CD 段变化对性能参数的影响

Table 3 Effect of the change of segment CD on performance

性能参数	接触线长度/mm	泄漏三角形面积/mm <sup>2</sup>	阳转子齿间面积/mm <sup>2</sup>	阴转子齿间面积/mm <sup>2</sup>	面积利用系数
原啮合线	149.787 7	5.192 5	608.974 7	625.902 0	0.459 7
向内侧移动	149.567 6	4.946 0	579.610 1	620.222 5	0.446 7
向外侧移动	150.250 1	5.286 4	638.763 3	631.574 3	0.472 9

于密封侧的圆弧包络线,曲率变化平缓,因此啮合线 CD 段并没有出现像 AB 段和 BC 段相似的结论。

#### 2.4 DE 段对性能参数的影响

从图 7 及表 4 可以发现,啮合线 DE 段的变化对泄漏三角形面积没有影响;DE 段左右两段向右移动时,接触线长度变短,向左移动时,接触线长度变长;DE 段向原啮合线内部移动时,面积利用系数减小,向原啮合线外部移动时,面积利用系数增大。

#### 2.5 EF 段对性能参数的影响

从图 8、9 及表 5 可以发现,EF 段变化对泄漏三角形面积也无影响;EF 段向原啮合线内部移动时,面积利用系数减小,向原啮合线外部移动时,面积利用系数增大;EF 段与 AB 段相似,无论啮合线怎样移动,所得的接触线长度都是增大的,对转子型线 EF 段研究发现,阴阳转子型线 EF 段也是作为连接前后两个齿曲线的阴转子齿顶(阳转子齿底)曲率较大的部分,同样采用圆弧(阳)一

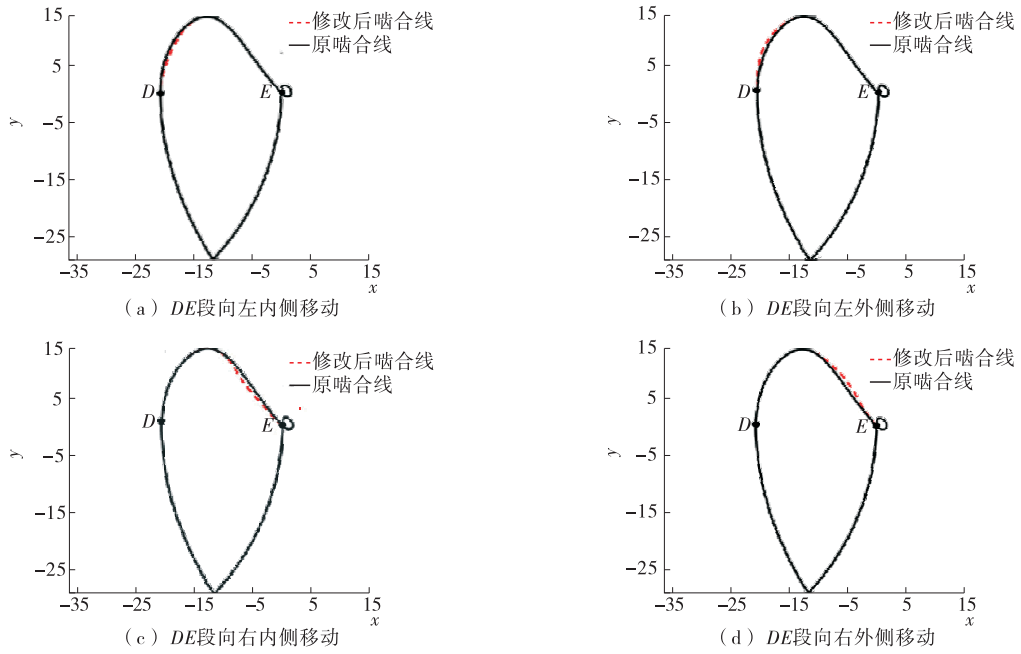


图 7 啮合线 DE 段变化

Figure 7 Change of segment DE

表 4 啮合线 DE 段变化对性能参数的影响

Table 4 Effect of the change of segment DE on performance

性能参数	接触线长度/mm	泄漏三角形面积/mm <sup>2</sup>	阳转子齿间面积/mm <sup>2</sup>	阴转子齿间面积/mm <sup>2</sup>	面积利用系数
原啮合线	149.787 7	5.192 5	608.974 7	625.902 0	0.459 7
向左内侧移动	149.257 6	5.192 5	565.229 6	618.171 5	0.440 6
向左外侧移动	152.989 2	5.192 5	637.688 6	638.905 0	0.475 3
向右内侧移动	150.465 5	5.192 5	594.835 1	614.010 2	0.450 0
向右外侧移动	149.263 8	5.192 5	621.664 0	636.882 4	0.468 5

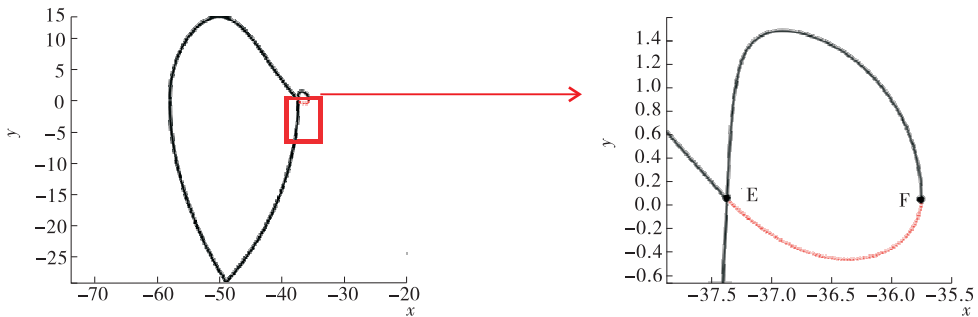


图 8 啮合线 EF 段(虚线部分)

Figure 8 Segment EF of meshing line(dotted line)

表 5 啮合线 EF 段变化对性能参数的影响

Table 5 Effect of the change of segment EF on performance

性能参数	接触线长度/mm	泄漏三角形面积/mm <sup>2</sup>	阳转子齿间面积/mm <sup>2</sup>	阴转子齿间面积/mm <sup>2</sup>	面积利用系数
原啮合线	149.787 7	5.192 5	608.974 7	625.902 0	0.459 7
向左内侧移动	154.538 7	5.192 5	606.628 1	622.945 8	0.457 8
向左外侧移动	151.321 7	5.192 5	611.559 8	629.132 0	0.461 9
向右内侧移动	152.296 2	5.192 5	601.802 4	615.845 0	0.453 3
向右外侧移动	149.928 7	5.192 5	612.717 1	631.141 7	0.463 1

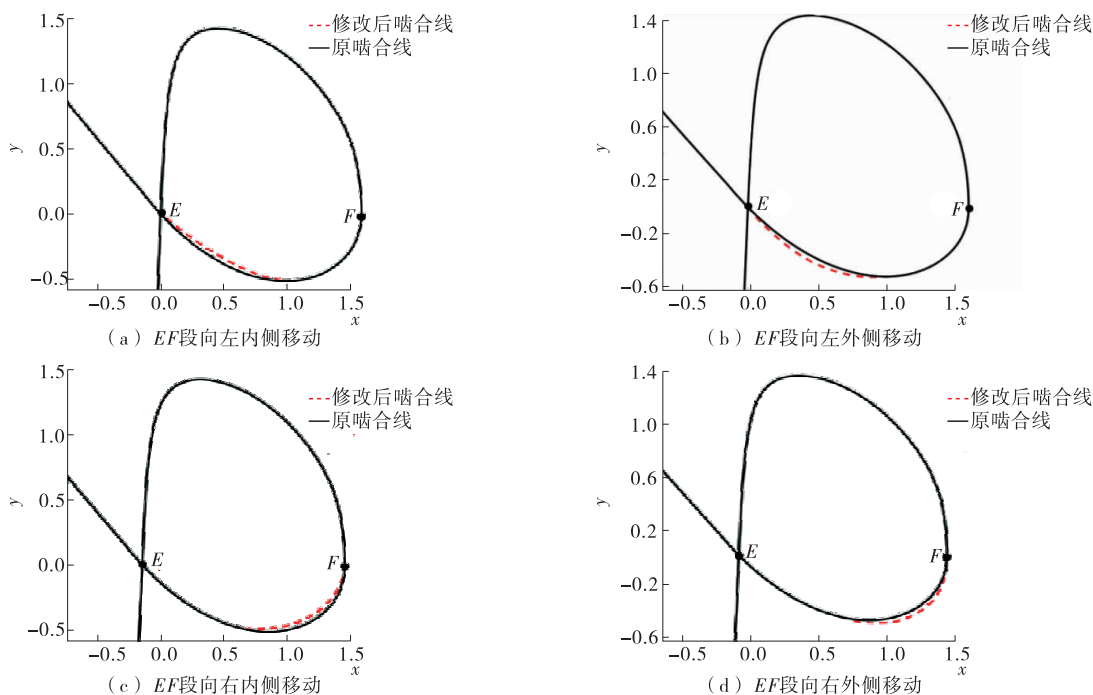


图 9 啮合线 EF 段变化

Figure 9 Change of segment EF

圆弧包络线(阴)的组合,由此,进一步论证了在阴转子齿顶(阳转子齿底)作为连接前后两齿的齿曲线曲率变化较大的部分,采用圆滑—圆弧包络线的曲线组合形成的接触线最短这一结论。

### 3 结论

(1) 当啮合线所围成的面积增大时,齿间面积利用系数增大,即阴阳转子齿间面积之和增大。

(2) 啮合线对泄漏三角形面积产生影响的只有位于密封侧的 AB 段、BC 段和 CD 段,且均向原啮合线内部移动时,泄漏三角形面积是减小的,而此时齿间面积利用系数是减小的,形成了相互制约的关系。

(3) 接触线长度的变化是比较复杂的,与组成转子型线的线型有很大的关系,其中,阴转子齿顶(阳转子齿底)处曲率较大并作为连接前后两齿齿曲线的部分,圆弧—圆弧包络线组合形成的接触线最短。

#### 参考文献

[1] 郭耀君, 谢晶, 朱世新, 等. 超低温制冷装置的研究现状和进展[J]. 食品与机械, 2015, 31(1): 238-243.  
 [2] 傅廷振, 林雨晨. 无油空压机技术为食品行业带来纯净气源[J]. 食品安全导刊, 2016(7): 72-73.  
 [3] WU Yu-ren, FONG Zhang-hua. Improved rotor profiling based on the arbitrary sealing line for twin-screw compressors[J]. Mechanical and Machine Theory, 2008, 43(6): 695-711.

[4] LITVIN Faydor L, FENG Pin-hao. Computerized design, generation, and simulation of meshing of rotors of screw compressor[J]. Mechanism and Machine Theory, 1997, 32(2): 137-160.  
 [5] GUIGGIANI M, LITVIN F L, FUENTES A, et al. Gear geometry and applied theory second ed; 2004 cambridge university press cambridge [J]. Mechanism and Machine Theory, 2007, 43(3): 390.  
 [6] ZAYTSEV D, INFANTE FERREIRA C A. Profile generation method for twin screw compressor rotors based on the meshing line[J]. International Journal of Refrigeration, 2004, 28(5): 744-755.  
 [7] ZAYTSEV D, INFANTE FERREIRA C A. Screw compressor rotors profile generation method based on pre-defined meshing line[C]// Xian Jiaotong University. Proceedings of the 3rd International Compressor Technique Conference. Xian: Xian Jiaotong University, 2001: 129-139.  
 [8] 李汗强. 圆弧包络线的传动性能分析及螺杆压缩机转子型线的优化设计[J]. 通用机械, 2006(1): 82-83, 89.  
 [9] 何雪明, 童洁, 戴进, 等. 双螺杆转子型线的反向优化设计及应用[J]. 机械设计与研究, 2015, 31(4): 151-157.  
 [10] HSU R H, WU Y R, CHENZ A, et al. A numerical method for reversely generating a pair of conjugated rotor profiles of twin-screw compressor from the measured profile data[J]. Procedia CIRP, 2017, 63: 483-487.  
 [11] 卢家伦, 田雅芬, 邢子文. 基于离散数据的双螺杆压缩机共轭转子型线计算[J]. 压缩机技术, 2019(3): 1-5.