

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2023.03.007

基于摆角电机的直驱涡旋压缩机 相角调整方法*

蒋加祯, 蔡炯炯*, 刘凡渤, 陈浩, 瞿晓
(浙江科技学院 自动化与电气工程学院, 浙江 杭州 310023)

摘要:针对直驱涡旋压缩机动、静涡旋盘安装相角无法调整的问题,提出了一种基于摆角电机的直驱涡旋机相角调整方法。首先,提出了基于摆角电机的直驱涡旋机架构方案,分析了动涡旋盘型线特点及其相角调整的机理;然后,提出了动涡旋盘相角调整的方法,即通过动涡旋盘运行轨迹上任意 3 个非重合点,推算出了动涡旋盘的平动轨迹圆半径,在确定动涡旋盘的调整相角方向后,进行了相角调整寻优;最后,搭建了直驱涡旋压缩机相角调整的实验平台,对上述方法的可行性进行了验证。实验结果表明:当动涡旋盘的调整相角为 -4° 时,推算的平动轨迹圆半径达到最大 $R=4.686$ mm,理论计算平动轨迹圆半径 $r=4.721$ mm,两者之间相对误差为 0.73%。研究表明:利用该方法可有效调整涡旋压缩机动涡旋盘的相角。

关键词:涡旋压缩机;动涡旋盘相角;平动轨迹圆半径;摆角电机的直驱;相角调整方向;涡旋型线方程

中图分类号:TH45

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2023)03-0370-08

Phase angle adjustment method of direct drive scroll compressor based on swing angle motor

JIANG Jia-zhen, CAI Jiong-jiong, LIU Fan-bo,
CHEN Hao, QU Xiao

(School of Automation and Electrical Engineering, Zhejiang University of Science and
Technology, Hangzhou 310023, China)

Abstract: Aiming at the problem that the installation phase angle of the direct drive scroll and the fixed scroll could not get adjusted, a method of adjusting the phase angle of direct drive scroll based on swing angle motor was studied. Firstly, the architecture of direct drive scroll based on swing angle motor was proposed, the characteristics of the movable scroll profile and the mechanism of phase angle adjustment were analyzed. Then, the method of adjusting the phase angle of the orbiting scroll was proposed, that was, the radius of the orbiting scroll's translational trajectory circle was calculated through any three non-coincident points on the orbiting scroll's running trajectory, and the phase angle adjustment was optimized after confirming the direction of the adjusting phase angle of the orbiting scroll. Finally, an experimental platform for phase angle adjustment of direct-drive scroll compressors was built to verify the feasibility of the above methods. The experimental results show that, when the adjusted phase angle of the orbiting scroll is -4° , the calculated translational trajectory circle radius reaches the maximum $R=4.686$ mm, and the theoretical translational trajectory circle radius $r=4.721$ mm. The relative error between the two is 0.73%. The research results show that this method can effectively adjust the phase angle of the orbiting scroll compressor.

Key words: scroll compressor; phase angle of the moving vortex disk; translational trajectory radius; direct drive of swing angle motor; phase angle adjustment direction; vortex profile equation

收稿日期:2022-08-01

基金项目:浙江省自然科学基金资助项目(LY21E070002, LY17E070002);浙江省公益技术应用研究项目(LGG22E070006)

作者简介:蒋加祯(1995-),男,江苏泰州人,硕士研究生,主要从事机电控制系统方面的研究。E-mail:222007855017@zust.edu.cn

通信联系人:蔡炯炯,男,博士,副教授。E-mail:caijj@zust.edu.cn

0 引言

因具有压力稳定、容积率高、精密可靠、噪声低、重量轻等优点,近年来,涡旋压缩机被广泛应用于一些高端特殊的领域^[1,2],比如,低气密宇宙空间的飞船动力、战斗机空中二次点火、高铁气源和制动、燃料电池反应堆稳压气源等^[3,4]。

CREUX L 等人^[5]在发明专利的基础上,提出了一种涡旋体结构,并对涡旋体型线以圆渐开线的展开方式,以及涡旋机平动轨迹为圆形等重要基础构架进行了研究;但是该研究对所涉及的动、静涡旋盘相位角匹配未作具体的阐述。针对无油压缩机采用磁力驱动涡旋机的方式,窦汝桐等人^[6]分析了涡旋机中的关键理论参数,建立了涡旋机电磁铁差动方程,搭建了涡旋机的动力学模型,最后还进行了无油压缩机的辅助软件设计;但该研究并未阐述具体的驱动控制及相角匹配策略。颜禧龙等人^[7]提出了一种基于双直线电机的直驱式涡旋机架构,其直驱架构具有主动性强、灵活性好等优点,可降低动、静涡旋盘在设计、制造、安装方面的要求。在该结构的基础上,该文献研究了涡旋机切向主动密封控制方法,搭建了实物模拟样机,并进行了实验验证;但研究人员尚未考虑动静涡旋盘相位匹配的问题。

然而对于以上研究工作而言,在传统涡旋机运行过程中,动、静涡旋盘之间的相位配合是由动涡旋盘背面的自转机构来保证的^[8],该自转机构的实现需要满足合理设计、精密加工、高要求安装等条件^[9]。而采用直驱涡旋机架构,虽然省去了该中间传动和约束部件,但是会导致动、静涡旋盘相位关系无法直接约束,可能会导致气体泄漏甚至压缩机制完全失效。因此,涡旋盘之间的相位调整和匹配是直驱涡旋机研究中不可忽视的关键环节之一。

为了解决上述问题,笔者对直驱涡旋机的动、静涡旋体型线以及调整相角进行分析,并提出一种基于摆角电机的直驱涡旋压缩机架构和相角调整方法。

1 涡旋压缩机结构特性

针对直驱涡旋压缩机架构中动、静涡旋盘相角不可自动调整的问题,笔者提出一种基于摆角电机的直驱涡旋压缩机架构。

基于摆角电机的直驱涡旋压缩机架构示意图如图1所示。

图1中:与之前研究者提出的方案架构不同之处

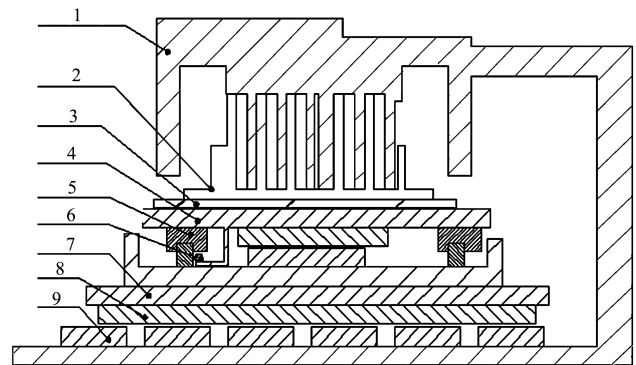


图1 基于摆角电机的直驱涡旋机架构示意图

1—静涡旋盘;2—动涡旋盘;3—摆角电机;4—X向电机;5—导轨滑块;6—光栅读数头;7—Y向电机;8—电机绕组;9—永磁体

在于,该方案架构在动涡旋盘与直线电机之间增添了1个有限摆角电机,用于涡旋机运行之前,其可以自动调整动、静涡旋盘的安装相位角。而原有的架构方案只有2个自由度(X向直线运动及Y向),因此,为了满足实际工艺的需求,现有的方案架构可以实现X向、Y向直线运动及Z轴的转动,从而达到3自由度运行的目的。

相比于传统旋转电机架构,摆角电机的直驱涡旋机架构多了1个有限摆角电机,这就使得摆角电机的直驱涡旋机架构方案可以解决动涡旋盘自动调整相角的问题,从而可以实现直驱涡旋机动静涡旋盘相位角可调的目的。

2 理论分析

2.1 动、静涡旋型线方程

直驱涡旋机动、静涡旋盘的实际壁厚中线曲线可以表示为^[10]:

$$\begin{cases} x = a[\cos(\theta) + \theta\sin(\theta)] \\ y = a[\sin(\theta) - \theta\cos(\theta)] \\ 0 \leq \theta \leq 6\pi \end{cases} \quad (1)$$

式中: θ —动涡旋盘平动转角,rad; a —动静涡旋盘基圆半径,mm。

考虑到涡旋体的壁厚,涡旋体内外壁涡旋曲线可以表示为^[11]:

$$\begin{cases} x_{in} = a[\cos(\varphi_{in} + \alpha) + \varphi_{in}\sin(\varphi_{in} + \alpha)] \\ y_{in} = a[\sin(\varphi_{in} + \alpha) - \varphi_{in}\cos(\varphi_{in} + \alpha)] \\ x_{out} = a[\cos(\varphi_{out} - \alpha) + \varphi_{out}\sin(\varphi_{out} - \alpha)] \\ y_{out} = a[\sin(\varphi_{out} - \alpha) - \varphi_{out}\cos(\varphi_{out} - \alpha)] \end{cases} \quad (2)$$

式中: (x_{in}, y_{in}) —涡旋体内壁面上的点; (x_{out}, y_{out}) —涡旋体外壁面上的点; α —渐开线发生角,rad; $\varphi_{out}, \varphi_{in}$ —

涡旋体外壁面转角和涡旋体内壁面转角,rad。

涡旋体啮合示意图如图 2 所示。

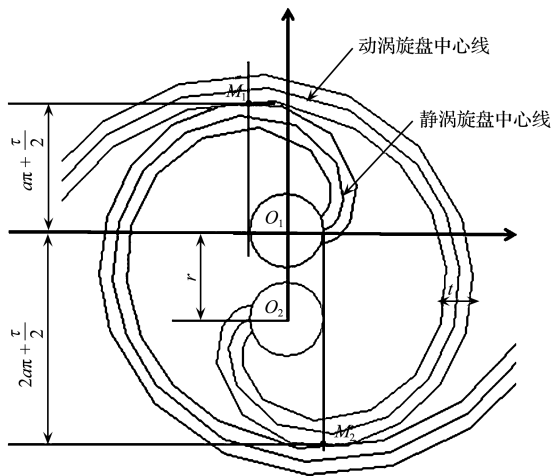


图 2 涡旋体啮合示意图

图 2 中:动涡旋盘转角在($\theta = \pi$)下的涡旋盘啮合示意图(在其他情况下也是适用的),图中 M_1 与 M_2 是对称的两个密封点(M_1 是静涡旋盘外侧线上的点, M_2 是动涡旋盘内壁线上的点)。

根据涡旋机动静涡旋盘点啮合的机理,在理论上,平动轨迹圆半径 r 可以表示为^[12]:

$$r = \left(2\pi a - \frac{t}{2} \right) - \left(\pi a + \frac{t}{2} \right) = \pi a - t \quad (3)$$

式中: a —基圆半径,mm; t —动静涡旋盘壁厚,mm。

因此,动涡旋盘平动半径 r (动静涡旋盘基圆圆心的距离 O_1O_2) 与动、静涡旋体参数相关(基圆半径以及壁厚有关)。

在动、静涡旋盘相位差 180° 位置时(实际运行中,动、静涡旋体相角保持不变),可确保涡旋盘正常啮合。因此,式(3)是动、静涡旋体正常啮合运行的必要条件^[13]。

2.2 相角调整机理分析

结合涡旋机的工艺需求^[14],涡旋盘运行机理是动涡旋盘的基圆圆心围绕静涡旋盘的基圆圆心,以半径 r 作平动运动,其中,平动半径 r 的大小跟涡旋盘型线参数相关。只有在动、静涡旋盘相位错开 180° 的情况下,满足涡旋机平动半径为理论计算半径 r 的条件,涡旋机才能正常啮合。

此处,笔者提出的摆角电机的直驱涡旋机架构与传统涡旋机的驱动方式不同。传统方法是利用旋转电机带动偏心轴,从而驱动涡旋机,以平动半径 r 进行平动运行;而在当前方案下,驱动涡旋机运行轨迹是需要预先根据实际工况学习得出。

根据涡旋线的原理可知,涡旋型线以渐开线方式展开,动涡旋盘运行轨迹依旧是圆形轨迹。

因此,在直驱方案中,在涡旋机动涡旋盘位于不同相角下,需要根据实际工况探寻平动轨迹圆半径。当动涡旋盘初始相位角调整到与静涡旋盘错开 180° 时,此时的涡旋机平动轨迹圆半径(最大)为理论计算平动半径 r 。

动、静涡旋盘间不同安装相角示意图如图 3 所示。

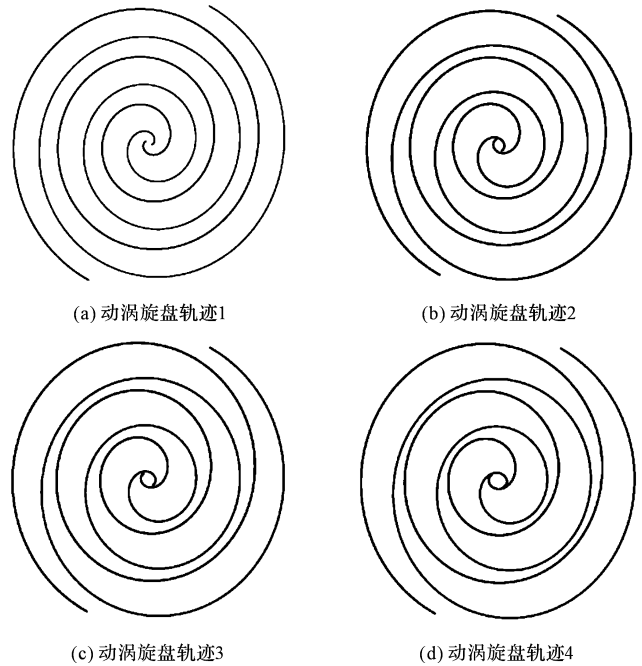


图 3 动、静涡旋盘间不同安装相角示意图

图 3 中:在不同安装相角下,动、静涡旋盘所对应的动涡旋盘运行轨迹分别为 1、2、3、4。

在不同相角下,对应的平动轨迹圆半径如图 4 所示。

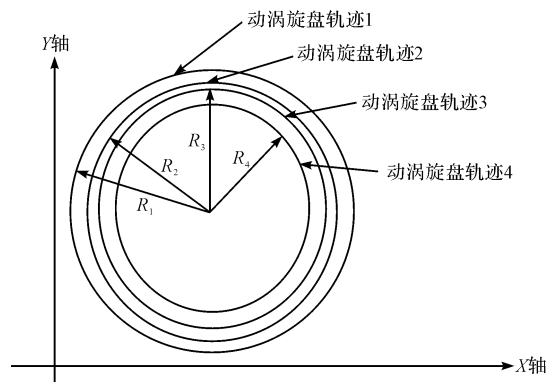


图 4 不同相角下对应的平动轨迹圆半径

图 4 中:根据动、静涡旋盘型线啮合原理^[15]可知,盘在不同相角下,动、静涡旋所对应的平动轨迹圆半径分别为 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 。

3 动涡旋盘相角调整方法

在直驱涡旋机架构中,静涡旋盘的位置是预先固

定的,动涡旋盘安装在可回转的摆角电机上,可根据静涡旋盘的实际位置,以此来匹配当前动涡旋盘的相角。

根据上述对动、静涡旋型线及调整相角机理分析可知:在不同的情况下,动涡旋盘的调整相位角所对应

的平动轨迹圆半径也不同。因此,在不同的安装相位角下,探究其所对应的平动轨迹半径具有重要的意义。

笔者提出的动涡旋盘相角调整方法流程图如图5所示。

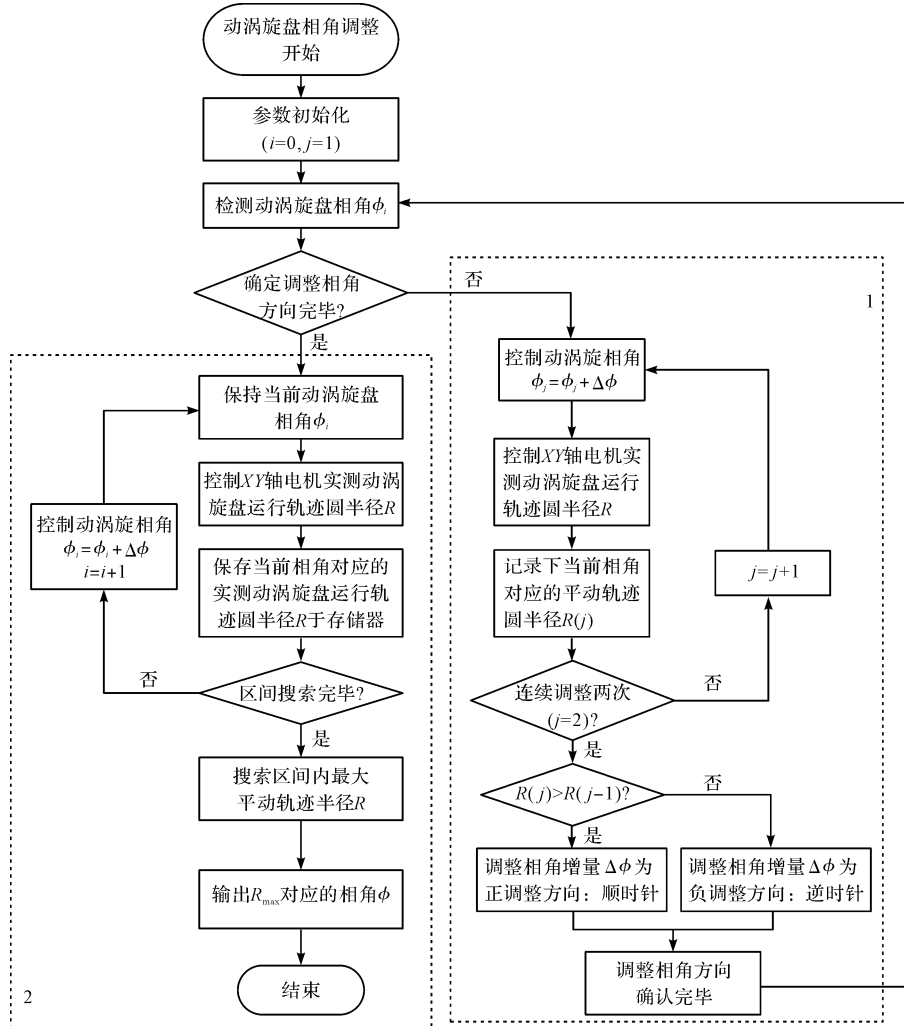


图5 动涡旋盘相角调整方法流程图

在图5中:

当动涡旋盘相角开始调整时,首先要判断相角调整方向是否确定;若未确定,则须进行图5中“1部分”的流程—动涡旋盘相角调整方向探寻,当确定相角调整方向后,然后返回检测涡旋机的调整相角,判断动涡旋盘相角调整方向是否确定;若已确定,最后进行图5中“2部分”的流程—动涡旋盘相角调整寻优,在寻优区间内搜索出最大平动轨迹圆半径所对应的当前动涡旋盘的调整相角,则当前调整相角为最佳。

具体的算法策略,详见下面的阐述。

3.1 相角调整方向探寻

3.1.1 平动轨迹圆半径推算

在不同的情况下,由于当前动涡旋盘相角所对应的平动轨迹圆半径是不同的,因此,笔者需要在当前动

涡旋盘相角下推算对应的平动轨迹圆半径。当动、静涡旋盘之间发生接触时,笔者记下动涡旋盘基圆圆心坐标的3个非重合的点,以此来推算平动轨迹圆的圆心及半径。

根据三点可以求出圆心和半径^[16,17]为:

$$\begin{cases} x_0 = \frac{x_1 + x_2 + x_3}{3} \\ y_0 = \frac{y_1 + y_2 + y_3}{3} \\ R = \sqrt{(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2} \end{cases} \quad (4)$$

式中: (x_0, y_0) —平动轨迹圆圆心; R —平动轨迹圆半径, mm; $(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3)$ —平动轨迹圆上的点。

推算圆心及半径示意图如图6所示。

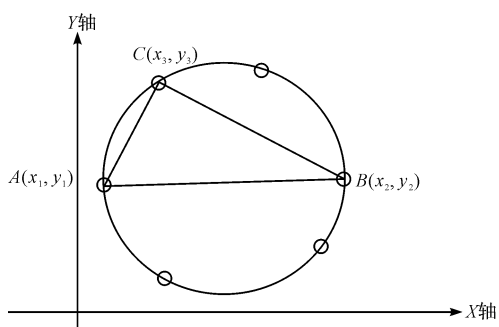


图 6 推算圆心及半径示意图

由图 6 可知:根据图中 A, B, C 三点即可推算出平动轨迹圆的圆心及半径。

3.1.2 相角调整方向确定

根据动涡旋盘相角调整流程图(图 5 中“1 部分”流程)中,笔者利用摆角电机调整动涡旋盘与静涡旋盘的相对位置角。当转动的方向不一样时,所推算出的平动轨迹圆半径大小的趋势也不一样。

确定调整相角探寻方向示意图如图 7 所示。

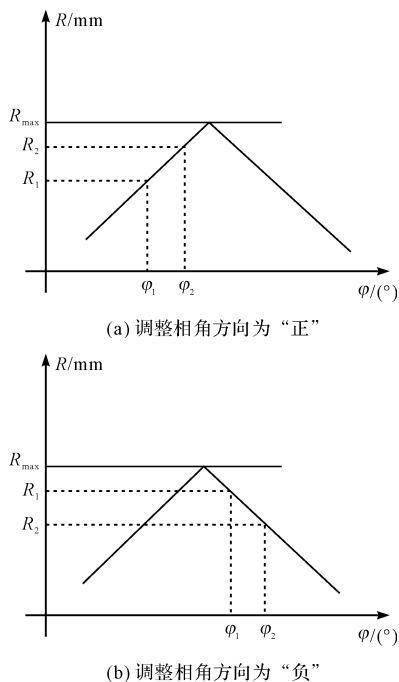


图 7 确定调整相角探寻方向示意图

笔者在此做出两种假设:

(1) 在图 7(a) 中,笔者分别检测调整相角(φ_1 和 φ_2),当 $\varphi_1 < \varphi_2$ 时, $R_1 < R_2$, 此时调整角度的方向就是从 φ_1 到 φ_2 进行角度递增,调整相角方向为“正”(递增量 $\Delta\varphi$ 为正);

(2) 在图 7(b) 中,笔者分别检测调整相角(φ_1 和 φ_2),当 $\varphi_1 < \varphi_2$ 时, $R_1 > R_2$, 此时调整角度的方向就是从 φ_2 到 φ_1 进行角度递减,调整相角方向为“负”(递增量 $\Delta\varphi$ 为负);当确定相角调整方向后,进行相角调

整寻优。

3.2 相角调整寻优

在动涡旋盘相角寻优中(图 5 中“2 部分”流程),笔者控制动涡旋盘每次增加 $\Delta\varphi$ 角度,记录当前相角 φ 下所推算对应的平动轨迹圆半径 R (推算方法同上);

当搜索完相角的调整区间时,全局搜索推算平动轨迹圆半径的最大值 R_{max} , 并且输出当前推算轨迹圆半径的最大值所对应的调整相角。

为了评价动涡旋盘相角调整的情况,笔者在此引入推算平动轨迹圆半径与理论计算平动轨迹圆半径的相对误差。

4 实验与结果分析

为了验证上述直驱涡旋压缩机相角调整方法的可行性,笔者从涡旋压缩机实物上拆下动、静涡旋盘,并将其安装在摆角电机的直驱架构上,然后进行模拟实验。

动涡旋盘安装在摆角电机上,可进行初始动静涡旋盘安装相角的调节。XY 二维平面电机(光栅移动 100 脉冲代表 $10 \mu\text{m}$)用于平动推算动涡旋盘运行轨迹圆半径,以及后续对涡旋机的运行轨迹进行识别。

笔者采用的实验平台示意图如图 8 所示。



图 8 实验平台示意图

1—静涡旋盘;2—静涡旋盘安装板;3—动涡旋盘;4—动涡旋盘支架;5—摆角电机;6—XY 轴平面电机

实验中的设备参数如表 1 所示。

表 1 实验设备参数

设备名称	型号
XY 轴平面电机	1FN3050-2WC00
运动控制板卡	AMP-204C
数据采集板卡	PCI-9112
工控机	GKJ-M
摆角电机电流	MIPVRS0084-030-00
变频器	MIK-DZI

4.1 相角调整方向探寻实验

4.1.1 平动轨迹圆半径推算实验

笔者通过控制 XY 轴电机来探寻动涡旋盘运行轨迹圆半径。

推算平动轨迹圆半径具体操作如下:当动涡旋盘安装好时,其坐标可由 XY 轴光栅反馈得知;当前动涡旋盘初始坐标为 (x, y) ,在保持当前调整相角下(保持摆角电机不动),推算出平动轨迹圆半径。

推算平动轨迹圆圆心过程的示意图如图 9 所示。

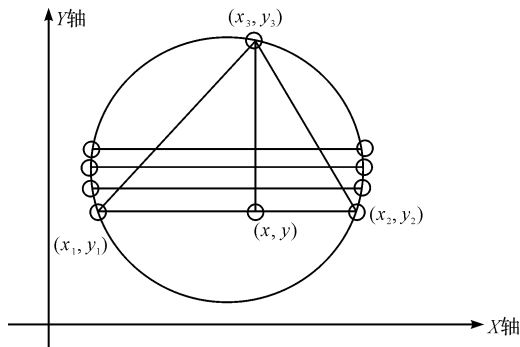


图9 推算平动轨迹圆圆心过程

在图 9 中:笔者首先需要确定动涡旋盘运行轨迹圆的圆心,以保持电机的 Y 轴不动,只移动 X 轴,控制电机向 X 轴负向移动。当动、静涡旋盘之间发生接触时(此时的直驱电机相电流增大),标记当前动涡旋盘的位置 (x_1, y_1) 为负接触点;

同理,向 X 轴正向移动得到 (x_2, y_2) 正接触点,然后电机返回初始位置 (x, y) 处,保持电机的 X 轴不动,只移动 Y 轴,控制电机向 Y 轴正向移动。当动、静涡旋盘之间发生接触时,标记当前动涡旋盘的位置 (x_3, y_3) 为 Y 轴正接触点,这样得到 3 个位置接触点坐标,即可推算平动轨迹圆的圆心和半径。

为了减小推算的误差,需要进行多次探寻推算。笔者控制动涡旋盘返回初始位置 (x, y) ,保持 X 轴不动,控制电机向 Y 轴正向移动一个步距(100 μm),重复上述过程,进行多次实验。

当动、静涡旋盘之间发生接触时,笔者记录当前坐标位置点,则该位置点坐标即为动涡旋盘平动轨迹圆上的点,通过任意 3 个非重合平动轨迹点,利用式(4)即可推算出平动轨迹圆的半径。

在不同的调整相角下,笔者分别推算出了对应的平动轨迹圆半径。

不同相角下,平动轨迹点及运行轨迹圆半径如表 2 所示。

表 2 不同相角下平动轨迹点及运行轨迹圆半径

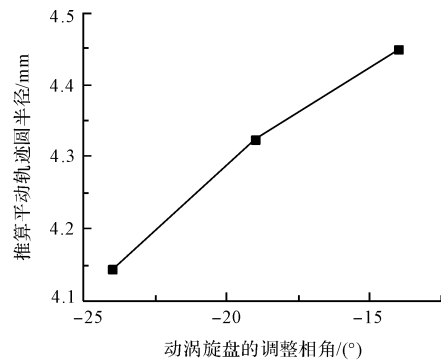
动涡旋盘的调整相角/ $^\circ$	采集动涡旋盘平动轨迹点	轨迹圆半径/mm
-24	A(-39 977,0)、B(38 748,0)、C(0,40 814)	4.154
-14	A(-42 549,0)、B(41 724,0)、C(0,44 031)	4.449
16	A(-39 770,0)、B(38 628,0)、C(0,42 841)	4.154
26	A(-37 093,0)、B(36 047,0)、C(0,39 714)	3.873

由表 2 可知:随着调整相角的变化,平动轨迹圆半径呈现先增大后减小的趋势。

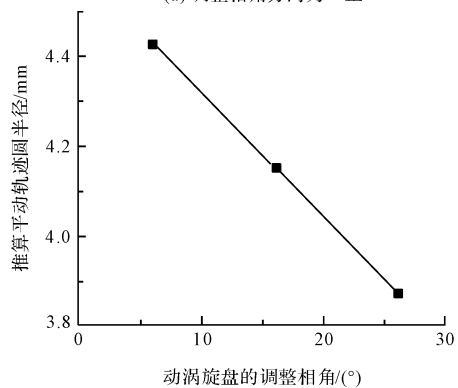
4.1.2 相角调整方向确定实验

为了提高搜索的效率,首先需要确定动涡旋盘相角的调整方向。采用逐步试探的方法,笔者首次调整摆角电机按照顺时针方向,依次递增 $\Delta\varphi$ 。

确定安装相角探寻方向实验如图 10 所示。



(a) 调整相角方向为“正”



(b) 调整相角方向为“负”

图 10 确定安装相角探寻方向实验

由图 10 可知:

(1) 当 $\varphi_1 < \varphi_2, R_1(-24) < R_2(-14)$ 时,调整角度的方向即为从 φ_1 到 φ_2 进行角度递增($\Delta\varphi$ 角度递增量为正);

(2) 当 $\varphi_1 < \varphi_2, R_1(16) > R_2(26)$ 时,调整角度的方向就是从 φ_2 到 φ_1 进行角度递减($\Delta\varphi$ 角度递增量为负)。

因此,笔者确定实验探寻方向按照图 7(a) 的方向趋势探寻。

4.2 相角调整寻优实验

为了验证动涡旋盘的调整相角与推算平动轨迹圆半径的关系,评价动涡旋盘相角调整的情况,笔者在寻优区间内保存调整相角所对应的平动轨迹圆半径的数据点,并经过3次反复实验,最后对所得到的实验数据进行整理。

笔者绘制出动涡旋盘的调整相角与平动轨迹圆半径关系图,如图11所示。

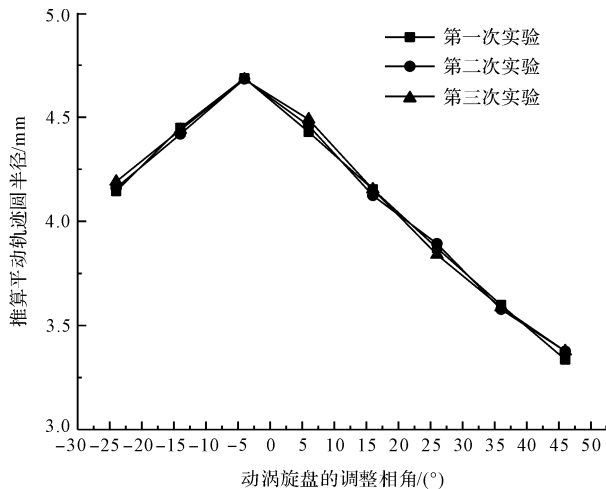


图11 动涡旋盘的调整相角与平动轨迹圆半径关系图

由图11中实验数据曲线关系可知:

- (1) 当动涡旋盘的调整相角在 $-24^{\circ} \sim -4^{\circ}$ 之间时,推算平动轨迹圆半径 R 的大小呈现上升的趋势;
- (2) 当动涡旋盘的调整相角在 $-4^{\circ} \sim 46^{\circ}$ 之间时,推算平动轨迹圆半径 R 的大小呈现下降的趋势;
- (3) 当动涡旋盘的调整相角在 -4° 时,取值最大的平动轨迹圆半径为 4.686 mm。

笔者推算出平动轨迹圆半径与理论计算平动轨迹圆半径的相对误差,如图12所示。

由图12可知:当动涡旋盘的调整相角在 -4° 时,推算平动轨迹圆半径与理论计算平动轨迹圆半径的相对误差为 0.73%。由此可见,利用该方法可有效调整涡旋压缩机动涡旋盘的相角。

分析可知,出现相对误差的原因初步认定是动、静涡旋盘顶面平行度不够好(动、静涡旋盘姿态倾斜,这是安装时出现的问题)。

5 结束语

针对直驱式涡旋机架构中动、静涡旋盘相角匹配

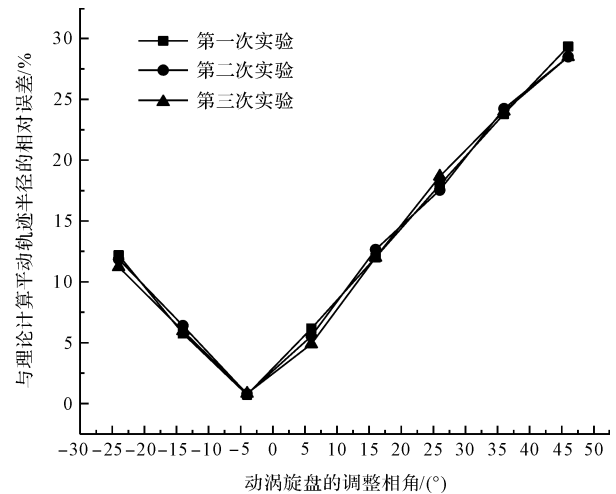


图12 推算与理论计算平动轨迹圆半径的相对误差

的需求,笔者提出了一种基于摆角电机的直驱涡旋压缩机相角调整机构和方案。

首先,笔者提出了基于摆角电机的直驱涡旋机架构方案,分析了动涡旋盘型线特点及其相角调整的机理;然后,提出了动涡旋盘相角调整的方法,进行了相角调整寻优;最后,搭建了直驱涡旋压缩机相角调整的实验平台,对上述方法的可行性进行了验证。

研究表明:

- (1) 利用该动涡旋盘相角调整方法,可以有效地对动、静涡旋盘初始安装相角进行调整和匹配;
- (2) 随着动涡旋盘的调整相角的变化,实测平动轨迹圆半径大小呈现先增大后减小的趋势。样机在调整相角为 -4° 时,推算平动轨迹圆半径取得最大值,且此时相对误差最小为 0.73%,调整相角为最佳。

从目前的研究结果来看,其相角调整还需要有一个寻优过程(需要花一段时间)。因此,在后续的研究过程中,笔者将从提高相角调整定位效率和效果的角度出发,对其结构和控制方法做进一步的优化。

参考文献 (References):

- [1] LAI C-F, HUANG A, LIANG K-I. The Development of Oil-less Scroll Compressors Used for Fuel Cells [C]//The 4th International Conference on Compressor and Refrigeration (ICCR.). Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2003:241-249.
- [2] 江 沂. 汽车空调用涡旋压缩机的研究[D]. 武汉:武汉理工大学汽车工程学院,2006.

(下转第421页)

本文引用格式:

蒋加祯,蔡炯炯,刘凡渤,等. 基于摆角电机的直驱涡旋压缩机相角调整方法[J]. 机电工程,2023,40(3):370-376,421.

JIANG Jia-zhen, CAI Jiong-jiong, LIU Fan-bo, et al. Phase angle adjustment method of direct drive scroll compressor based on swing angle motor[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2023,40(3):370-376,421.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>

- 2021,55(12):25-34.
- [10] 陈忠华,贾利明,时光,等. 波动载荷下弓网载流动态摩擦力模型[J]. 辽宁工程技术大学学报:自然科学版, 2021,40(1):48-55.
- [11] 战友,邓强胜,罗志伟,等. 基于GBDT的沥青路面抗滑性能感知模型研究[J/OL]. 土木工程学报:1-14. [2022-09-19]. <http://doi.org/DOI:10.15951/j.tmgxcb.21111144>.
- [12] AN ĐELKOVIĆ B R, SAMMARRAIE A A, MIL ĆI Ć D, et al. Consideration of the use of artificial intelligence methods for determining the friction coefficient of lubricated sliding bearings[J]. **IOP. Conference Series: Materials Science and Engineering**,2018,393(1):012-063.
- [13] 陈荟多,周东一,肖湘华. 基于广义回归神经网络的地铁屏蔽门通风量预测研究[J]. 中阿科技论坛:中英文, 2021(9):101-103.
- [14] 周敏,李世玲. 广义回归神经网络在非线性系统建模中的应用[J]. 计算机测量与控制,2007,108(9):1189-1191.
- [15] 吴玉厚,张珈翊,张丽秀,等. 旋转滑动摩擦副摩擦噪声影响因素实验研究[J]. 中国机械工程,2020,31(23):2814-2821.
- [16] 卢黎明,李夫,李中豪. 基于ADAMS的滚滑轴承摩擦转矩研究[J]. 机电工程,2020,37(9):1026-1031.
- [17] LUO W, FU Z. Application of generalized regression neural network to the agricultural machinery demand forecasting [J]. **Applied Mechanics and Materials**, 2013,278(1):2177-2182.
- [18] RUI H, SHIPING W, ZHIGANG Z, et al. A short-term power load forecasting model based on the generalized regression neural network with decreasing step fruit fly optimization algorithm [J]. **Neurocomputing**, 2017, 221(19):24-31.
- [19] YONGLI Z, JIANGUANG N, SANGGYUN N. A novel nonlinear function fitting model based on FOA and GRNN [J]. **Mathematical Problems in Engineering**,2019,201(3):1-10.
- [20] 谈智玲,陈才明,徐胜朝,等. 基于振动信号分析的滚动轴承寿命预测方法研究[J]. 华电技术,2021,43(5):36-44.
- [21] 朱正林,刘权,张欢. 基于优化广义回归神经网络的碟式太阳能温度预测研究[J]. 南京工程学院学报:自然科学版,2020,18(1):1-5.
- [22] 贾谦,阮琪,刘朝丰,等. 涡轮泵机械密封摩擦学性能的计算和试验研究[J]. 流体机械,2022,50(2):1-7.

[编辑:李辉]

本文引用格式:

张丽秀,李爽,魏晓奕,等. 石墨烯润滑油润滑下摩擦副摩擦因数预测模型[J]. 机电工程,2023,40(3):415-421.

ZHANG Li-xiu, LI Shuang, WEI Xiao-yi, et al. Prediction model of friction factor of friction pair lubricated by graphene lubricating oil [J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2023,40(3):415-421. [《机电工程》杂志: http://www.meem.com.cn](http://www.meem.com.cn)

(上接第376页)

- [3] KREJCI P, KUHNEN K. Inverse control of systems with hysteresis and creep [J]. **IEEE. Proceedings Control Theory and Applications**,2001,148(3):185-192.
- [4] FUKUTA M, SOTANIT, MOTOZAWA M. Leakage and friction characteristics at sliding surface of tip seal in scroll compressors[J]. **International Journal of Refrigeration**, 2021,125(5):104-112.
- [5] CREUX L. Rotary Engineer: US,801,182[P]. 1905-06-26.
- [6] 窦汝桐. 无油涡旋压缩机关键技术研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学机械工程学院,2017.
- [7] 颜禧龙,蔡炯炯,蒋加祯,等. 直驱控制涡旋压缩机位置识别方法研究[J]. 机电工程,2022,39(8):1145-1151.
- [8] 孙尚传,童恩东. 一种涡旋压缩机及其动静涡旋盘:中国, CN101691866B[P]. 2012-05-23.
- [9] 陈彦康. 无油涡旋压缩机几个关键技术难题分析[C]//上海市制冷学会2017年学术年会. 上海:上海制冷学会, 2017:166-169.
- [10] 李连生. 线段渐开线涡旋压缩机的几何理论[J]. 流体机械,1994,22(12):22-28.
- [11] 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.
- [12] ZHENG S Y, WEI M S, ZHOU Y, et al. Tangential leakage flow control with seal-grooves on the static scroll of a CO2 scroll compressor [J]. **Applied Thermal Engineering**,2022,208(5):118213.
- [13] 张国进. 涡旋式压缩机通用涡旋型线性控制系数研究[D]. 重庆:重庆理工大学机械工程学院,2015.
- [14] GE Ping, MUSA J. Tracking control of a piezoceramic actuator [J]. **IEEE. Transactions on Control Systems Technology**,1996,4(3):209-216.
- [15] 薛丽,王训杰. 涡旋压缩机传动系统的动静态特性研究[J]. 机电工程,2021,38(6):792-796.
- [16] 陈永平,朱建清. 基于外接圆半径差损失的实时安全帽检测算法[J]. 计算机科学,2022,49(S1):424-428.
- [17] 汤文亮,周琳颖. 基于三角形外接圆覆盖的改进APIT定位算法[J]. 传感技术学报,2015,28(1):121-125.

[编辑:李辉]