

螺杆压缩机设计理论与关键技术的研究和开发

邢子文, 吴华根, 束鹏程

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 基于螺杆压缩机热、动力学的理论研究,建立了螺杆压缩机工作过程中热力学、动力学计算的数学模型,并在螺杆压缩机工作过程指示图录取、压力脉动测试、转子轴向力测量、油分布的可视化等实验研究基础上,揭示了螺杆压缩机热、动力性能与转子型线等设计参数之间的内在规律,建立了完整的螺杆压缩机设计理论.在设计理论的指导下,开发了转子型线设计、刀具刃形设计、SC-CAD设计等技术和软件,与本行业知名企业合作开发系列产品,并实现大批量生产,使新产品广泛应用于制冷空调、空气动力和石油化工等领域,实现了我国螺杆压缩机产品的更新换代,推动了我国压缩机行业的技术进步和产业结构优化.

关键词: 螺杆压缩机;设计理论;关键技术;产品开发

中图分类号: TH455 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2007)07-0755-09

Research and Development on Design Theory and Key Technology of Screw Compressors

Xing Ziwen, Wu Huagen, Shu Pengcheng

(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Following the theoretical research on working process of screw compressors, the mathematical models for simulation of the thermodynamic performance and dynamic characteristics of the screw compressor are proposed, which are experimentally verified by means of recording the indicator diagrams (p - V diagrams) with a small pressure sensor embedded in the female rotor, the measurement of pressure pulsation in the discharge chamber and the forces acting on the rotors, and the visualization experiment on oil distribution in the compressor. It indicates the relation between the performance and the design parameters of the screw compressor. Simultaneously, the key technology for screw compressor is developed including profile design method, the cutter design, the soft package of SCCAD. Up to now, more than 50 models of twin screw compressor products have been developed and mass manufactured to meet the requirement of refrigeration, aerodynamic and petrochemical industry.

Keywords: screw compressor; design theory; key technology; development of series products

螺杆压缩机是一种消耗电力的机械设备,具有结构简单、可靠性高及操作维护方便等一系列独特的优点,被广泛应用于制冷空调和空气动力、石油、化工等工业领域.从1960年开始,螺杆压缩机在国外逐渐批量生产和应用,在宽广的容量和工况范围内,逐步替代了活塞压缩机等其他种类的压缩机^[1].

从1978年开始,我国螺杆压缩机生产企业在参考国外进口样机结构的基础上,以“单边不对称摆线——销齿圆弧”型线为核心,设计生产了一些螺杆压缩机产品,虽在一定程度上满足了市场需求,但存在着转子型线、主机设计技术、制造工艺落后等问题,导致产品的能耗高、噪声大.在我国能源紧缺、环

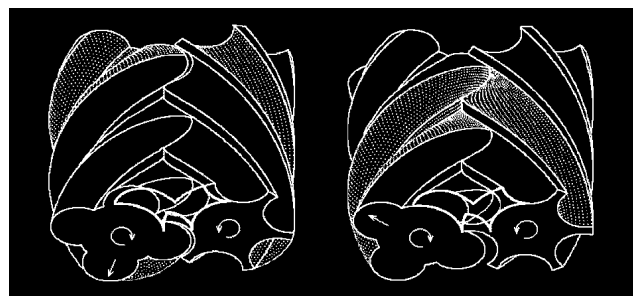
环境保护要求日益高涨的社会发展大趋势下,该种技术产品已不能满足我国国民经济发展要求,因此不得不从国外进口大量的螺杆压缩机应用于国内不同的工业领域。国际上知名压缩机生产厂商对我国采取了技术保密,严重阻碍了我国螺杆压缩机技术的发展。因此,研究开发具有我国自主知识产权的新一代高效、环保的螺杆压缩机,十分符合我国民族工业发展的战略要求。

1 螺杆压缩机设计理论研究

1.1 理论研究

螺杆压缩机是一种新型的回转容积式压缩机,工作过程如图1所示,图中转子断面为排气断面,阳转子按顺时针旋转,阴转子按逆时针旋转,阴、阳转子相互啮合,同步旋转,形成工作腔的容积变化,实现吸气、压缩、排气的工作过程。螺杆压缩机的实际工作过程受到多种因素的影响,是一个复杂的变质量热力过程。因此,要准确理解和计算螺杆压缩机的工作过程,需要建立融合螺杆压缩机热力性能和动力特性的数学模型。

1.1.1 工作过程数学模拟 对螺杆压缩机工作过程的理论研究,应当建立全面考虑泄漏、传热、喷油、补气、部分负荷、工质物性、螺杆转子型线、结构参数等影响因素的热力学模型,创立可以全面分析螺杆压缩机工作过程的数学模型及其仿真软件,解决螺杆压缩机性能预测、设计优化的难题,从而为开发螺



(a)吸气过程结束、
压缩过程开始

(b)压缩过程中

(c)压缩过程结束、排气开始

图1 螺杆压缩机的工作过程

杆压缩机系列产品奠定基础。螺杆压缩机工作过程数学模型的基本控制方程组如式(1)所示^[2]。

$$\left. \begin{aligned} \frac{dp}{d\theta} &= \left(\frac{1}{v_g} \left[\left(\frac{\partial h_g}{\partial v_g} \right)_{T_g} - \frac{(\partial h_g / \partial T_g)_{v_g} (\partial p / \partial v_g)_{T_g}}{(\partial p / \partial T_g)_{v_g}} \right] \frac{dv_g}{d\theta} - \frac{1}{V_g} \left[\sum \frac{dn_{g,i}}{d\theta} (h_{g,i} - h_g) - \frac{dQ_g}{d\theta} \right] \left(1 - \frac{1}{v_g} \frac{(\partial h_g / \partial T_g)_{v_g}}{(\partial p / \partial T_g)_{v_g}} \right)^{-1} \right. \\ \frac{dT_g}{d\theta} &= \left(\left[\frac{1}{v_g} \left(\frac{\partial h_g}{\partial v_g} \right)_{T_g} - \left(\frac{\partial p}{\partial v_g} \right)_{T_g} \right] \frac{dv_g}{d\theta} - \frac{1}{V_g} \cdot \right. \\ &\quad \left. \left[\sum \frac{dn_{g,i}}{d\theta} (h_{g,i} - h_g) - \frac{dQ_g}{d\theta} \right] \right) \left(\left(\frac{\partial p}{\partial T_g} \right)_{v_g} - \frac{1}{v_g} \left(\frac{\partial h_g}{\partial T_g} \right)_{v_g} \right)^{-1} \\ \frac{dT_l}{d\theta} &= \frac{1}{M_l} \left(\sum T_{l,i} \frac{dM_{l,i}}{d\theta} - T_l \sum \frac{dM_{l,o}}{d\theta} - \right. \\ &\quad \left. T_l \frac{dM_l}{d\theta} - \frac{1}{C_l} \sum \frac{dQ_l}{d\theta} \right) \\ \frac{dM_g}{d\theta} &= \frac{dM_{g,i}}{d\theta} - \frac{dM_{g,o}}{d\theta} \\ \frac{dM_l}{d\theta} &= \frac{dM_{l,i}}{d\theta} - \frac{dM_{l,o}}{d\theta} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

1.1.2 螺杆压缩机排气压力脉动数值计算 排气压力脉动是引起螺杆压缩机噪声和振动的主要因素,对其进行研究有助于了解螺杆压缩机噪声和振动的产生机理,不仅为管路系统的振动分析提供依据,更为螺杆压缩机排气流道和孔口的设计奠定基础,从而降低噪声和振动。在对排气压力脉动进行了深入的理论研究后发现,平面波动理论并不适合螺杆压缩机排气压力的脉动分析,其振幅超出了平面波动理论的适用范围,因此提出了“采用一维非定常气流方程组”(如式(2)所示)来模拟计算螺杆压缩机的排气压力脉动^[3],有助于理解排气压力脉动机理,为降噪奠定理论基础。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) &= 0 \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u^2 + p) &= -\rho \Psi \\ \frac{\partial}{\partial t} \left(\rho e + \frac{1}{2} \rho u^2 \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left[\rho u \left(e + \frac{u^2}{2} + \frac{p}{\rho} \right) \right] &= \rho q \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

1.1.3 螺杆压缩机转子受力计算 螺杆压缩机在工作过程中,转子由于受到气体压力的作用而承受所有的气体力,并传递至轴承,因此转子受力的大小影响了螺杆压缩机的性能、振动及轴承寿命。为了研究螺杆压缩机在工作过程中转子受力情况,理解转子型线对于转子受力的影响,提高螺杆压缩机的可靠性及其运行寿命,对螺杆压缩机的受力机理进行

了深入的研究,提出了螺杆压缩机转子受力的有限元计算方法,解决了螺杆压缩机进行动力计算的难题,能更准确理解转子型线中齿曲线组成对于螺杆转子受力的影响程度.转子网格的有限元划分如图2所示.

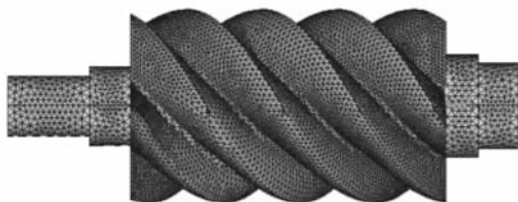
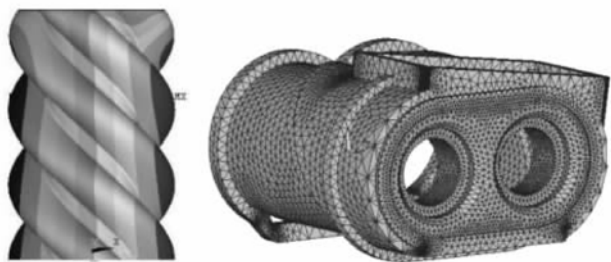


图2 螺杆转子受力计算网格划分

1.1.4 螺杆压缩机转子受热变形计算 在螺杆压缩机中,转子变形主要是受热膨胀,由于转子热变形的存在使热态间隙值并不等于设计值,这就往往导致不合理的间隙设计.间隙过大会造成泄漏增加,容积效率下降;间隙过小又容易发生烧伤咬死现象,无法保证转子可靠运行.由于螺杆转子形状的复杂性,很难实现转子热变形量的直接测量,因此有必要对转子的热变形进行理论研究,以便为转子啮合间隙的设计提供理论依据,提高螺杆压缩机的性能和可靠性.为计算转子热变形,首先要确定转子的稳态或瞬态温度场,为此提出利用有限元方法确定三维温度场,并进行转子热变形计算的数学模型.对转子的受热变形的计算,可有效用于指导螺杆压缩机设计过程中转子啮合间隙、齿顶间隙、端面间隙的分布和设置.螺杆压缩机中螺杆转子及机壳的热变形计算结果及网格划分如图3所示^[4].



(a)转子

(b)机壳

图3 转子及机壳的热变形计算结果和网格划分

1.2 试验研究

为了对理论研究中建立的数学模型进行验证和完善,并研究无法用数学模型进行精确描述和计算的螺杆压缩机内油的分布情况等,需要开展一系列的试验研究.为此,需要对试验和测试方法进行创新

研究,在国际上首先对螺杆压缩机进行了工作过程 p - V 指示图的录取、排气压力脉动测量、转子受力测量和压缩机内油分布可视化研究.

1.2.1 螺杆压缩机工作过程 p - V 指示图测录 目前国际上录取螺杆压缩机指示图的方法一般是在机壳沿着螺旋线的方向安装多个压力传感器进行测量,然后联接各个传感器所测得的部分转角指示图,形成完整的螺杆压缩机工作过程指示图.由于考虑到多个传感器之间的差异误差以及指示图的联接误差,本项目研究了螺杆压缩机的结构特点,突破了旋转信号与静止信号的转换技术,提出了“在阴转子齿槽底部安装单个压力传感器”的螺杆压缩机 p - V 指示图录取方法,依靠安装在阴转子排气端齿槽底部的压力传感器,使传感器随转子作高速旋转,利用滑环装置把传感器的旋转信号转换为静止信号进行压缩腔压力的测量,这样仅依靠一个传感器就能测得完整工作过程的 p - θ 曲线图,再利用工作腔容积 V 与阳转子转角 θ 的几何关系,得到工作过程的 p - V 指示图,达到了较好的测量精度. p - V 指示图直接反映了螺杆压缩机工作过程中的气体泄漏、热交换情况和工作腔压力随转角变化的规律,表征了螺杆压缩机工作过程的完善程度^[5].

压力传感器的实际安装如图4所示, p - V 指示图录取系统如图5所示.螺杆制冷压缩机在不同负荷工况下,实测 p - V 指示图如图6所示,在补气工况下,实测 p - V 指示图与理论计算的比较如图7所示.



图4 压力传感器安装

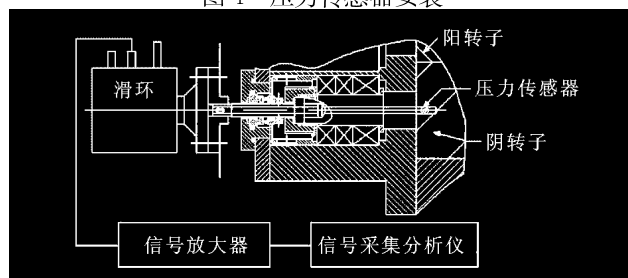
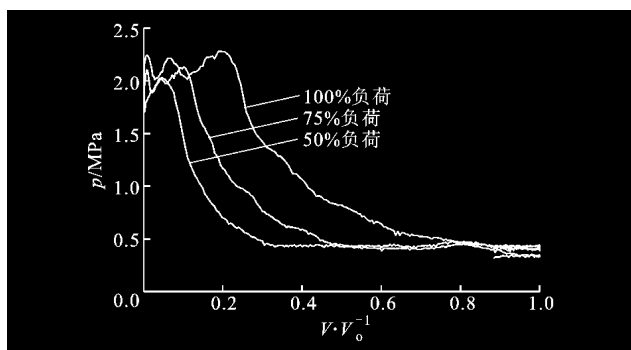
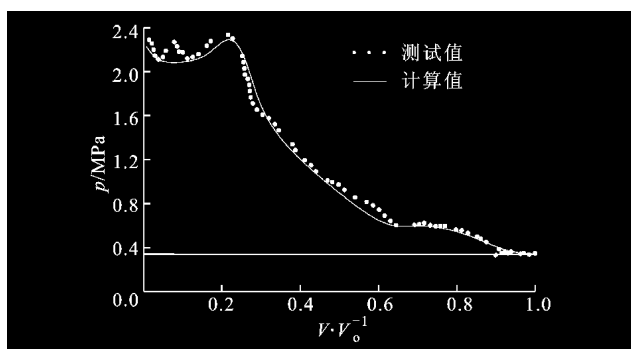


图5 指示图录取系统

图6 不同负荷下 p - V 指示图图7 实测 p - V 指示图与理论计算比较

1.2.2 螺杆压缩机排气压力脉动测量 为了解排气压力脉动对螺杆压缩机噪声和振动的影响,从而降低噪声和振动,为螺杆压缩机排气流道和孔口的设计奠定基础,对排气压力脉动进行了深入的试验研究,依靠安装于排气口的微型压力传感器实测了螺杆压缩机排气压力脉动情况,并对排气压力脉动计算模型进行了验证.图8所示为不同排气下的压力脉动测量结果,图9为排气压力脉动实测值与理论计算值的比较

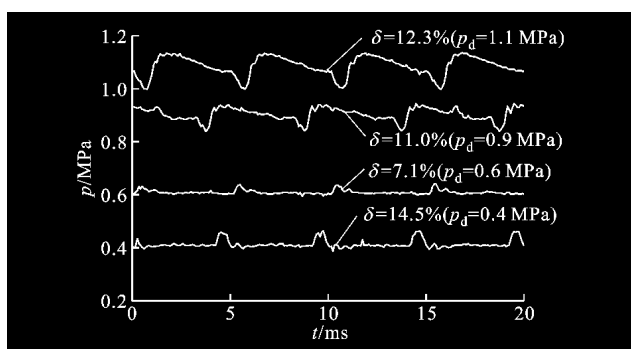


图8 不同排气下的压力脉动测量结果

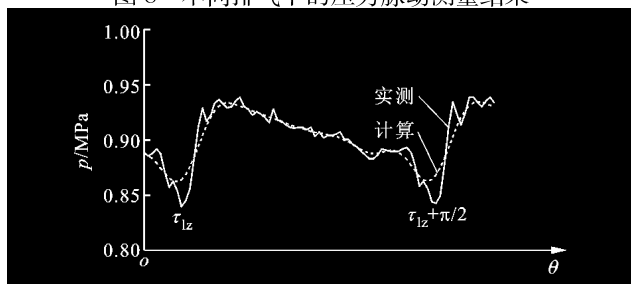


图9 压力脉动实测值与理论计算值的比较

论计算值的比较^[3].

1.2.3 螺杆压缩机转子受力测试 为了提高螺杆压缩机的可靠性及其运行寿命,对工作过程中螺杆转子的受力情况进行了试验研究,并在国际上首次利用力传感器,成功测录了不同工况下转子受力的真实情况,明确了工作过程中转子受力的变化规律,为螺杆压缩机的转子型线设计和轴承选配提供了坚实的基础.

由于压缩机转子所受轴向力全部由排气端面的轴承所承受,因此在排气端轴承座的两轴承之间对称放置两测力传感器,就可以测得转子受力随阳转子转角变化的规律.图10显示了转子轴向力测试传感器的安装,图11给出了阳转子受力的实测值与理论计算值的比较.

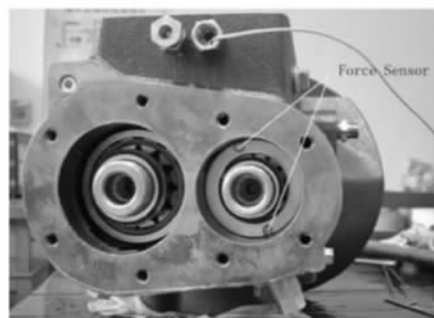


图10 测力传感器安装

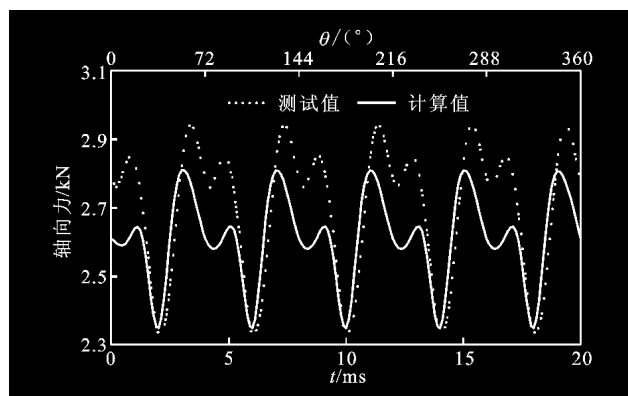


图11 阳转子轴向力实测值与计算值的比较

1.2.4 螺杆压缩机内油分布可视化研究 在螺杆压缩机中,润滑油的雾化和分布在很大程度上影响着螺杆压缩机的间隙分布、泄漏、效率和可靠性,考虑到无法用数学模型对螺杆压缩机内的油分布进行准确的描述和计算,本项目利用 PIV 激光测试装置以及自行设计搭建的油分布可视化试验台,在国际上首次进行了螺杆压缩机油分布的可视化研究,获得了喷油对于螺杆压缩机泄漏的影响程度,从而得到了螺杆压缩机内间隙的分布规律,既提高了螺杆

压缩机的热力性能,同时也提高了螺杆压缩机的可靠性。

图 12 示出了润滑油的雾化、速度场,图 13 给出了螺杆压缩机内的油分布情况。

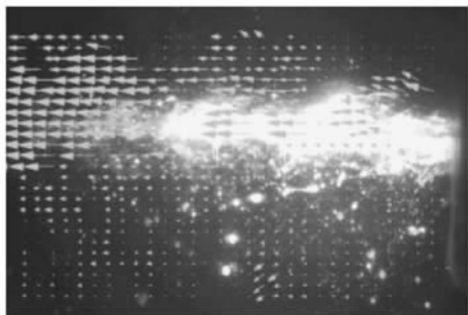


图 12 润滑油雾化和速度场

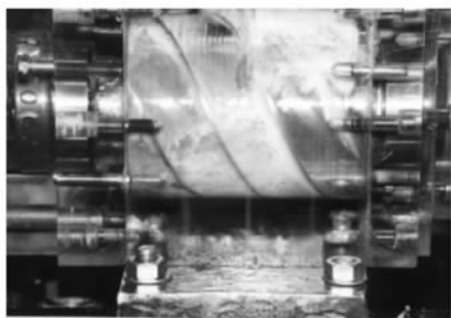


图 13 螺杆压缩机内的油分布

基于螺杆压缩机热、动力学的理论研究,利用螺杆压缩机工作过程指示图测录、压力脉动测量、转子受力测试和油分布的可视化等创新试验研究,建立并验证了螺杆压缩机工作过程、压力脉动、螺杆转子受力和变形的数学模型,精确地揭示了螺杆压缩机热、动力性能与转子型线、结构参数等设计参数之间的内在规律,形成了完整的螺杆压缩机设计理论,奠定了螺杆压缩机系列产品开发的基础。

2 关键技术开发

在螺杆压缩机设计理论的指导下,提出并攻克了实现螺杆压缩机系列产品开发的多项关键技术,主要包括螺杆转子型线设计方法、螺杆转子刀具刃形设计技术、调节和润滑技术,以及 SCCAD 设计软件开发等。开发的关键技术通过鉴定,结论为:取得了系统的创新成果,解决了许多关键技术,达到了国际同类技术的领先水平。

2.1 螺杆转子型线设计方法

前述螺杆压缩机设计理论研究表明,螺杆转子型线对压缩机热力性能和动力特性有着决定性的影

响,因此转子型线设计是开发高性能螺杆压缩机的关键技术之一。文献[6]提出的“通过定量比较转子几何特性、热力和动力性能,以二次曲线及其共轭包络线组成齿曲线的型线设计方法”,避免了传统型线组成齿曲线中的点和直线,解决了准确预测转子型线对于压缩机热力性能和动力性能影响的难题。

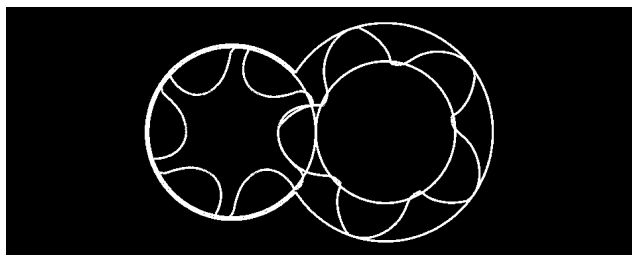
传统的螺杆压缩机型线设计方法,仅根据影响热力性能的泄漏对型线参数进行优选,而本项目研究中的螺杆压缩机转子型线设计技术是在通过全面比较目前国际上知名型线的基础上,凭借对螺杆压缩机精确的研究成果,不仅从影响热力性能因素出发,更进一步地注意到了有关型线参数对转子间力矩分配的影响,使得利用该技术设计的转子型线在热力性能、动力特性以及批量加工方面具有更大的优越性。螺杆转子型线设计技术的核心内容如下:①组成齿曲线的选择;②据热力性能设计转子型线;③据动力特性设计转子型线。

应用转子型线设计技术成果,成功设计并推广应用了多种新型螺杆转子型线,具有代表性的型线如图 14 所示。

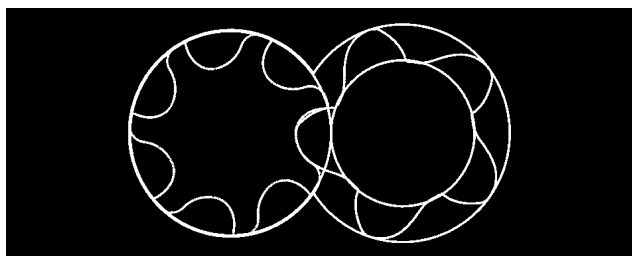
2.2 螺杆转子刀具刃形设计技术

螺杆压缩机设计理论表明,转子间隙对压缩机的性能有重大的影响,而该间隙受加工、热膨胀、喷油等因素的影响,因此决定间隙的刀具刃形设计技术是螺杆压缩机产业化的关键技术之一。本项目提出用“不等距法”设计啮合间隙和在节圆附近设置驱动带的转子刀具刃形设计技术,有效地提高了转子加工的精度和效率,改善了螺杆压缩机的性能和可靠性。

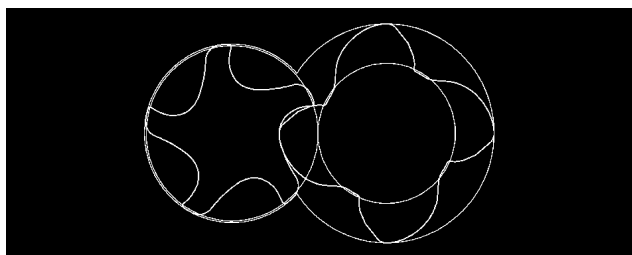
螺杆转子刀具刃形是加工转子时,保证转子型线精度的关键,因此刀具刃形的设计对螺杆压缩机的性能有重大影响。为了补偿加工误差和转子工作时的变形,需要在理论型线的基础上,设定各点的间隙,并根据由此得到的实际型线进行转子的刀具刃形设计。传统的间隙设定方法是等距型线法和等距型面法,两种方法都没有考虑型线各部分变形量的不同。在本项目的啮合间隙设定中,则对型线各部分的变形进行了具体的分析和计算,形成了设定啮合间隙的“不等距法”,并把此方法应用于刀具刃形的设计中。另外,本项目还提出了在节圆附近设置宽度为 2~4 mm 的驱动带的刀具刃形设计方法,保证了阴、阳转子仅在节圆附近以纯滚动的方式接触和传递力矩,对进一步降低噪声和提高 COP,起到了帮助作用。利用上述螺杆转子刀具刃形设计技术,根据



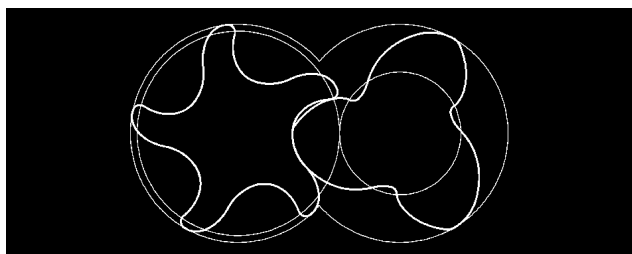
(a)开启式螺杆制冷压缩机转子型线



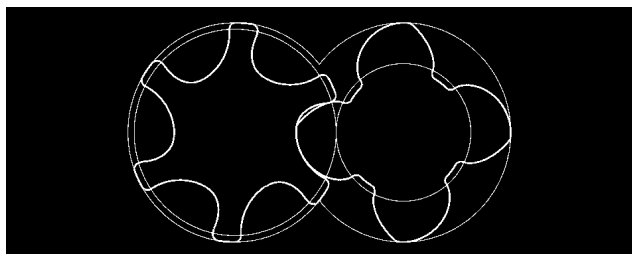
(b)封闭式螺杆制冷压缩机转子型线



(c)喷油螺杆空气压缩机转子型线



(d)燃料电池用无油空气压缩机转子型线



(e)螺杆工艺压缩机转子型线

图14 成功设计和应用的螺杆转子型线

某转子型线及其啮合间隙(如图15所示)设计的刀具刃形如图16所示^[7]。

2.3 螺杆压缩机调节和润滑技术

螺杆压缩机在运行过程中,会受到外界使用工况变化的影响,为了保证压缩机的运行效率,必须调

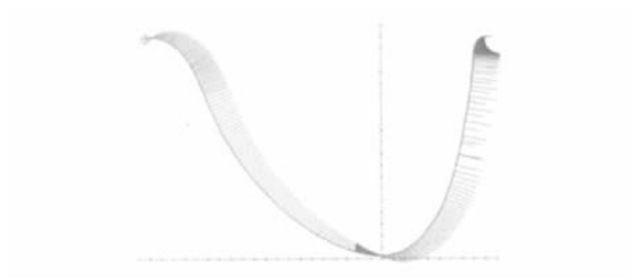
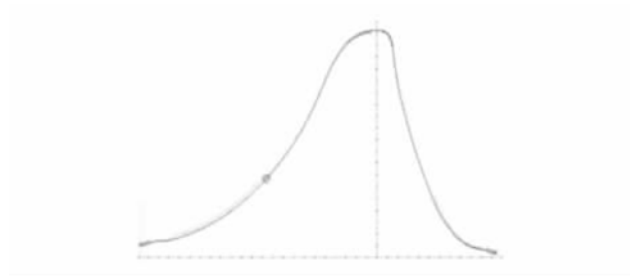
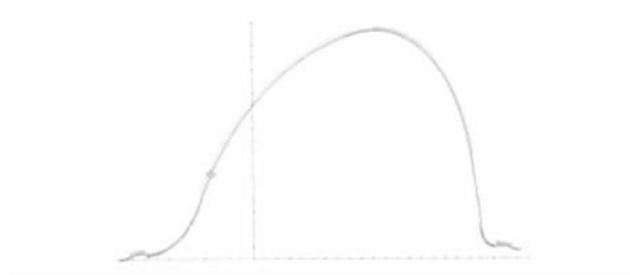


图15 型线啮合间隙分布



(a)阳转子刀具刃型



(b)阴转子刀具刃型

图16 刀具刃形

节其自身的运行工况。另外,螺杆压缩机的润滑系统也关系到机器的性能和可靠性。本项目研究了螺杆压缩机能量和内容积比调节的机理,提出并实现了“仅通过控制相关油路上的电磁阀,即可同时调节压缩机能量和内容积比的一种新颖的能量调节机构”;基于对螺杆压缩机启动及运行时供油问题的研究,开发了“油泵供油结合压差供油的润滑系统”,解决了单一润滑系统的不足,并同时拥有各自的优点。

针对螺杆制冷压缩机应用工况的不同,本项目开发了一种新颖的能量调节机构。该调节机构设有3个出油口,并合理配置在油腔相关位置。根据螺杆压缩机运行工况的变化,通过控制这3个出油口线路上的电磁阀,可自动进行能量和内容积比的调节,使螺杆压缩机在正常工况、高温工况、低温工况、最大压差工况下运行时都能保持较高的效率,实现了在变工况运行时的节能效果。这种调节机构的提出,解决了在变工况时螺杆压缩机由于内容积比不匹配

造成的过压缩或者欠压缩带来的损失,保证了螺杆压缩机运行功耗的最小化,提高了螺杆压缩机运行效率,取得了良好的节能效果。

另外,在螺杆压缩机系统中,原来采用的润滑系统分为油泵系统和压差系统。油泵系统在机组启动时能立即给轴承等供油,但一旦油泵发生故障,机组运行就相当危险,而且流量固定,造成了在高压下工作时油量不足,低压下工作时油量过剩,耗功增加。压差系统正好相反,排压越高,油流量越大,但在机组刚启动时没有足够的供油量。为了保证螺杆压缩机启动时有足够的油量,在变工况运行时仍有合适的油量供应,降低机组功耗,提高机组可靠性,因此本项目开发了油泵供油结合压差供油的润滑系统,克服了两者的缺陷同时拥有了各自的优点。为了保证整个润滑系统的可靠运行,本项目还开发了一种专用的双作用转子活塞油泵,具有效率高、可靠性好的特点。

2.4 螺杆压缩机设计计算软件开发

螺杆压缩机设计理论表明,在确定螺杆转子型线、吸排气孔口及啮合间隙等设计参数时,需要综合考虑这些设计参数对压缩机热力性能和动力特性的影响,这只有经验丰富的专业人员利用前述的复杂模型和程序才能完成。然而,实现成果广泛应用的关键之一,就是需要使生产企业的工程师有自主设计能力。为此,本项目开发了具有自主知识产权的 SCCAD 螺杆压缩机设计计算软件,把前述的螺杆压缩机设计理论和关键技术等内容进行集成,是国际上最先进的螺杆压缩机设计计算软件,能快速进行螺杆压缩机的设计计算,缩短设计周期,降低设计成本,解决了螺杆压缩机生产企业自主设计螺杆压缩机的窘境^[8]。

SCCAD 软件的核心内容是螺杆转子型线、几何特性、热力性能、转子受力、转子变形以及转子刀具刃形等 6 项设计计算模型及程序,具体内容如下。

(1) 转子型线计算。根据对型线的基本要求和使用寿命的特殊要求,给定某转子型线上的组成齿曲线,根据啮合原理和包络条件,求出另一转子上的共轭型线曲线。根据转子型线计算程序,可计算出转子型线上各点的坐标值及表明该点啮合位置的阳转子转角,同时还可计算出型线在各点的斜率,以供其他程序使用。

(2) 几何特性计算。由 SCCAD 软件中的几何特性计算程序读入转子型线计算结果,再考虑转子结构参数(如长径比、扭转角)和孔口参数,进一步计算

出诸如接触线长度、泄漏三角形面积、吸排气孔口面积及基元容积的变化等几何特性。

(3) 工作过程热力性能预测。在几何特性计算的基础上,以基元容积为研究对象,对工作过程中的吸排气流动、通过不同间隙的泄漏、喷油与被压缩气体间的换热等现象,进行系统的理论分析和试验验证,从而得到描述螺杆压缩机工作过程特性的一组偏微分方程,求出工作过程中压缩腔内气体的压力、温度等微观性能参数,并求出压缩机的排气量、轴功率等宏观热力性能参数。

(4) 转子受力计算。SCCAD 软件的转子受力分析程序,是在工作过程模拟基础上,利用有限元方法,通过详细划分受力面积和精确确定作用在这些微元面积上的压力,得到转子受力和支撑转子的轴承负荷。

(5) 转子变形计算。在工作过程模拟和转子受力分析的基础上,利用有限元方法,计算阴阳转子的变形,其计算结果对刀具刃形的修正具有重要的意义。

(6) 刀具刃形计算。利用端面型线的数据和转子结构参数,计算刀具刃形,因而适用于任何类型的转子端面型线。该程序利用“不等距法”计算啮合间隙,并合理分配转子间隙,在节圆附近设置了宽度为 2~4 mm 的驱动带,而且独到地处理刀具刃形计算中常出现的干涉和断点问题,得到了光滑过渡的刀具刃形。

SCCAD 软件运用 Visual Basic 程序设计语言开发了基于 Windows 的窗式用户界面,图 17 为 SCCAD 软件的主界面及转子型线计算程序的输入数据对话框。



图 17 SCCAD 软件的主界面及转子型线计算程序的输入数据对话框

3 系列产品开发

在掌握螺杆压缩机设计理论和攻克了多项关键技术之后,与知名企业合作,开发了 36 个型号的开

启式、18个型号的封闭式螺杆制冷压缩机和15个型号的螺杆空气压缩机,并改进了一种螺杆工艺压缩机,实现了大批量生产,产品普遍节能5%~8%,噪声下降5~10 dB,多项产品通过鉴定,结论为:达到国际同类产品先进水平.其中,开发的“螺杆制冷空调机组”被评为中国名牌,“螺杆式冷水机组”成为中国制冷空调工业协会推荐产品.

3.1 螺杆制冷压缩机系列产品开发

针对国内原来生产的开启式螺杆制冷压缩机产品噪声大、能耗高和不得不从国外大量进口封闭式螺杆制冷压缩机的情况,本项目与行业知名企业合作,成功开发了36个型号的开启式螺杆制冷压缩机和18个型号的封闭式螺杆制冷压缩机,其主要性能指标达到了国际同类产品的先进水平,不仅满足了国内市场需求,而且半封闭式螺杆制冷压缩机还批量出口日本.

开启式螺杆制冷压缩机的典型产品如图18所示.该类系列产品利用本项目提出的“通过定量比较转子几何特性、热力和动力性能,以二次曲线及其共轭包络线组成齿曲线的型线设计方法”,设计出了具有优越性能,且利于批量加工的开启式螺杆制冷压缩机的转子新型线,并应用了本项目开发的新颖调节机构,可同时调节压缩机能量和内容积比,使螺杆压缩机在正常工况、高温工况、低温工况、最大压差工况下运行时都能保持较高的效率,实现了在变工况运行时的节能效果.另外,该系列产品应用了本项目的油泵供油结合压差供油的润滑系统,避免了启动时油量过少和油量不随机组工况变化等缺点,保证螺杆压缩机启动时有足够的油量,在变工况运行时仍有合适的油量供应,降低了机组功耗,提高了机组可靠性.



图 18 开启式螺杆制冷压缩机典型产品

封闭式螺杆制冷压缩机的典型产品如图19所示.该系列产品利用本项目提出的转子型线设计新方法,专门设计了性能优越的转子型线.同时,应用

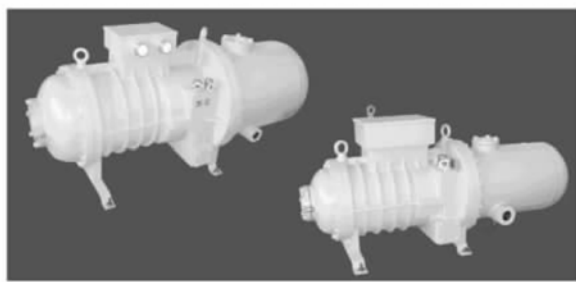


图 19 封闭式螺杆制冷压缩机典型产品

本项目开发的转子刀具刃形设计技术,使该系列螺杆压缩机的性能得到了提高,且噪声下降.

3.2 螺杆空气压缩机系列产品开发

我国国内生产螺杆空气压缩机的企业很多,主要以进口螺杆机头进行组装为主.针对这种情况,本项目研究了螺杆空气压缩机运行的动力特性和油分布对泄漏的影响,应用了螺杆压缩机型线设计技术、油分布可视化研究成果及孔口配置技术,开发了12个型号的喷油螺杆空气压缩机,包括普通动力用和城市轻轨车辆用喷油螺杆空气压缩机,开发了3个型号的无油螺杆空气压缩机,包括国家“863计划”的燃料电池用螺杆空气压缩机等.

喷油螺杆空气压缩机的典型产品如图20和图21所示,该系列产品应用了本项目中油分布可视化研究成果,针对不同要求的螺杆空气压缩机分别优化配置了不同大小的喷油孔口以及其相应的喷油位



图 20 普通动力用喷油螺杆空气压缩机典型产品



图 21 城市轻轨车辆用喷油螺杆空气压缩机典型产品

置,保证了合适的喷油量以及良好的雾化效果,起到了润滑、密封和冷却的作用.特别是利用本项目中螺杆压缩机动力特性的研究成果对螺杆空气压缩机的型线进行了进一步的改进,一方面保证螺杆转子之间力矩的合理分配,另一方面尽量降低了转子所受的气体轴向力,提高了螺杆空气压缩机的使用寿命.

无油螺杆空气压缩机的典型产品如图 22 所示.本项目研究了高转速无油润滑螺杆压缩机压缩过程中的泄漏、传热和螺杆转子型线技术,间隙设定技术以及转子变形的研究成果,研制成功了无油螺杆压缩机以及无油螺杆压缩-膨胀机组,并应用于“863 计划”的电动汽车专项——燃料电池用螺杆压缩机子项目中.

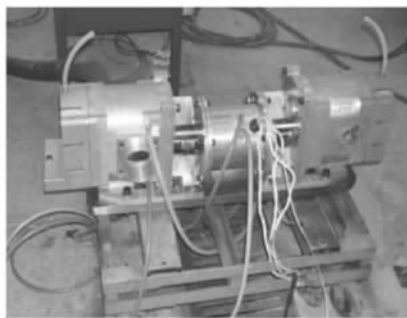


图 22 燃料电池用无油螺杆空气压缩机

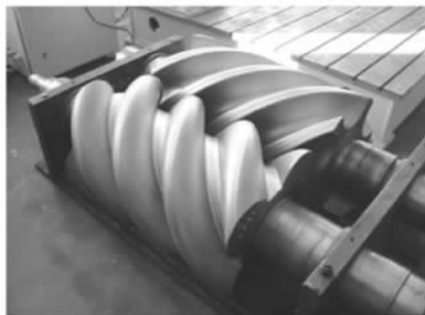
3.3 螺杆工艺压缩机改进

螺杆工艺压缩机主要应用于石油化工企业,由于其设计开发的难度大,因此国内的螺杆工艺压缩机全部依赖进口.在本项目技术的支持下,对美国德莱赛兰公司生产的喷水螺杆解析气压缩机进行了改进,该螺杆工艺压缩机是中国石化镇海炼化化工股份有限公司 PSA 装置的核心设备之一,针对这种压缩机的具体应用场合,专门设计了一种高效的转子新型线.改进后的压缩机运行可靠,排气量大幅上升,耗水量明显下降,有效提高了 PSA 装置产量,降低了运行成本,具有明显的经济效益.

改进后的镇海炼化化工股份有限公司 PSA 装置中的螺杆工艺压缩机转子及其机组如图 23 所示.

4 结 论

开展螺杆压缩机的设计理论研究,对其工作过程进行了数学模拟和试验测录,对压力脉动、转子受力、喷油等进行了理论和试验研究,精确地揭示了螺杆压缩机热动力性能与转子型线等设计参数之间的内在规律,形成了完整的螺杆压缩机设计理论.在设



(a) 螺杆转子



(b) 螺杆机组

图 23 螺杆工艺压缩机转子及其机组

计理论指导下,提出并攻克了多项关键技术,包括转子型线设计技术、转子刀具刃形设计技术、调节和润滑技术,以及 SCCAD 设计计算软件等,解决了行业的共性难题,最终实现了螺杆压缩机系列产品开发和大批量生产,使新产品广泛应用于制冷空调、空气动力和石油化工等领域.

参考文献:

- [1] 邢子文. 螺杆压缩机——理论、设计及应用[M]. 北京:机械工业出版社, 2000.
- [2] Wu Huagen, Xing Ziwen, Shu Pengcheng. Theoretical and experimental study on indicator diagram of twin screw refrigeration compressor[J]. International Journal of Refrigeration, 2004, 27(4): 331-338.
- [3] Wu Huagen, Xing Ziwen, Peng Xueyuan, et al. Simulation of discharge pressure pulsation within twin screw compressors[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, 2004, 218(4): 257-264.
- [4] 杨炳春, 李建风, 邢子文, 等. 无油螺杆空气压缩机转子变形分析 [J]. 压缩机技术, 2005(1): 8-11.
Yang Bingchun, Li Jianfeng, Xing Ziwen, et al. Deflection analysis on the rotors of oil-free screw air compressor[J]. Compressor Technology, 2005(1): 8-11.
- [5] Peng Xueyuan, Xing Ziwen, Cui Tiansheng, et al.

- Analysis of the working process in an oil-flooded screw compressor by means of an indicator diagram[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, 2002, 216(6): 465-470.
- [6] 邢子文, 彭学院, 束鹏程. 螺杆压缩机新型线的设计[J]. 压缩机技术, 1997(1): 9-12.
- Xing Ziwen, Peng Xueyuan, Shu Pengcheng. Research and design on the rotor profile of twin screw compressor[J]. Compressor Technology, 2007(1): 9-12.
- [7] 彭学院, 吴华根, 邢子文. 加工螺杆转子的滚刀刃形设计[J]. 西安交通大学学报, 2003, 37(1): 103-104.
- Peng Xueyuan, Wu Huagen, Xing Ziwen. Design of the hobbing tool profile for manufacturing screw rotors[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2003, 37(1): 103-104.
- [8] 邢子文, 彭学院, 束鹏程. 螺杆压缩机设计计算机软件的研究与开发[J]. 西安交通大学学报, 1999, 33(11): 38-42.
- Xing Ziwen, Peng Xueyuan, Shu Pengcheng. Software package for design of twin screw compressors[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1999, 33(1): 31-34.

(编辑 荆树蓉)