

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.08.011

舰船用空气压缩机公共底架设计研究*

李 奇, 李小仁, 姜慧君, 邢志胜

(合肥通用机械研究院 压缩机技术国家重点实验室, 安徽 合肥 230088)

摘要:针对舰船用空气压缩机振动、噪声和安全性问题,对舰船用空气压缩机公共底架的设计进行了研究,利用现代计算工具对一型公共底架的结构设计进行了不同的舰船环境下静力学、动力学和模态计算,研究分析了舰船在倾斜、摇摆环境条件下公共底架的应力、应变的变化,强调公共底架的设计在满足强度要求的同时应具有足够的刚度,通过开孔、加筋在满足机组结构强度的基础上,调整公共底架的模态可以有效地减小机组的振动和噪声,提出了按静 G 法校核在冲击环境下公共底架的承受能力可行性,安装孔和安装螺栓的设计选型将直接影响到机组的抗冲击能力。研究结果表明,该方法能够使舰船空气压缩机噪声进一步降低和提高舰船用空气压缩机抗冲击安全性、其他类似的压缩机设计时可以参考。

关键词:空气压缩机;公共底架;设计研究

中图分类号:TH122; TH138.21

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2016)08-0969-04

Base chassis design of air compressor in warship

LI Qi, LI Xiao-sa, JIANG Hui-jun, XING Zhi-sheng

(State Key Laboratory for Compressor Technology, Hefei General Machinery Research Institute, Hefei 230088, China)

Abstract: Aiming at the problem of ships with air compressor vibration and noise and security issues, the design of the chassis was studied. Statics, dynamics and modal calculation were analyzed using modern computing tools to different type of structure design of the chassis of the marine environment, the ship under the condition of tilt, swing environmental public chassis of the change of the stress, strain, focuses on the design of the chassis and the request of structure strength should have enough stiffness. The chassis modal was adjusted through opening and reinforcement in the unit on the basis of structural strength to effectively reduce the vibration and noise of the units. Static G method was proposed as the check in the shock environment public chassis of feasibility of the design of the mounting holes and installing bolts, which will affect the impact resistant ability of the unit. The research results show that this method can make the ship air compressor noise reduction and further increasing the safety of the ship impact resistant with air compressor and other similar compressor design can refer to.

Key words: air compressor; base chassis; design research

0 引 言

舰船上所使用的空气压缩机(以下简称空压机)是特殊的一类船机电设备、主要用于鱼雷、导弹和火炮的反射,对于潜艇还用于为上、下沉浮提供高压气源,是潜艇重要的生命保障设备,空压机除了能够适应正常工作环境,还要求在倾斜、摇摆等环境条件下正常运转和舰船受冲击条件下能够安全地运行,按照 GJB1060.1 抗冲击标准分级,空压机属 A 类设备,由此

可以看出在舰船上空压机是极其重要的安全、保障设备,特别是 20 世纪 80 年代马岛战争后世界各主要海军国家重新认识到舰船抗冲击等环境条件的重要性^[1],国内舰船设备近些年也加强了舰船适应性、可靠性考核要求,抗冲击考核是设备基座设计的关键和关注的重点。

舰船空压机多以往复式高压压力为主,通过多级压缩完成从大气压力的空气升至高压力的压缩空气,因此除驱动电机、压缩机主机外,需配有冷却器、分离器等多种必要的辅机部件,要适应倾斜、摇摆和承受冲击

收稿日期:2016-01-05

基金项目:国家“十二五”重点项目预研基金(10101020503)

作者简介:李 奇(1960-),男,安徽合肥人,教授级高级工程师,主要从事高压压缩机及相关设备的研究与开发. E-mail: liqiyj@163.com

等环境条件,空压机机组常采用一体化设计,即机组所含的主机、电机、辅机零部件集成在一个公共底架上,作为往复结构的空压机不可避免地会有不平衡力的存在,所引起的惯性力会导致机组的强烈振动并通过公共底架向船体或浮筏传递,当有外界爆炸引起的非接触爆炸冲击也会通过公共底架传递至空压机组,因此公共底架的设计既要承受机组的振动又要承受爆炸的冲击力,其结构设计的好坏十分重要,应该引起人们的广泛重视,近年有柴油机和制冷装置等船用设备的机组机架设计相关研究报道^[3-5],空压机方面未见有报道,公共底架的设计理论依据较少,不合适的设计有可能会引起机组过度的振动和噪声,冲击时空压机局部紧固件会有断裂的可能,公共底架刚度不足引起的过度变形的可能而引起传动负载的增加甚至传动失效。

本研究针对空气压缩机振动、噪声和安全性问题,对舰船用空气压缩机公共底架的设计进行研究。

1 公共底架的设计要求

舰船用空压机组常采用卧式结构、压缩机与电机通过联轴器联接,公共底架的设计结构应保证驱动电机与空压机良好的对中性、按要求径向跳动应小于 0.05 mm、传动机构不得阻碍运动部件的正常工作、同时应考虑操作方便和使用安全,冷却器、油水分离器等辅件设置在机组两边、对称布置,零部件之间通过管路连接,空压机的公共底架一般设计用槽钢或其他型钢做为基本的框架结构如图 1 所示。

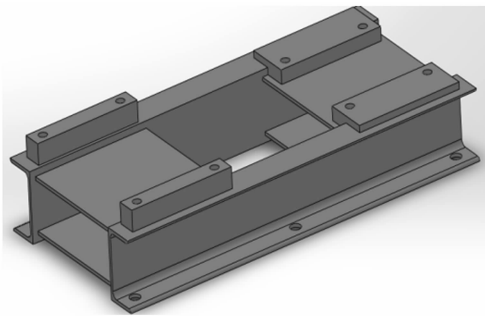


图 1 某型空压机组公共底架

由于往复压缩机不平衡的惯性力和惯性力矩的存在、通过公共底架向外传递,特别是立式压缩机还存在有在旋转方向上的倾复力矩、二阶不平衡惯性力引起的不平衡力矩在轴向引起振动,公共底架的设计应该在强度、刚度上得到充分的保证。为了便于空压机和辅机之间的连接,公共底架侧面或底面开有大小不同的孔口;为了使公共底架设计经济、合理,设计人员常在型钢间增加肋片来提高公共底架刚度,在倾斜和摇摆情况下、公共底架要受到横向、纵向力的影响,其应

力、应变相对水平位置状态也将要发生一定的变化,冲击时公共底架连接的紧固件还会产生过高的应力,这些是公共底架设计方案中需要特别予以重视的。

2 设计计算与研究分析

某型空压机主要技术参数如表 1 所示,其公共底架材料选用 Q235 - A 普通型钢焊接成型,空压机和电机通过联轴器直接连接并分别安装在公共底架上,公共底架通过均布的紧固螺栓安装固定连接船体上,在正常情况下公共底架主要受到的是垂向重力作用,但在倾斜、摇摆的情况下公共底架将同时受到横向和纵向的应力,空压机运转时,驱动电机的力矩与空压机的阻力矩不平衡会产生机组的加速、减速,根据达兰倍尔原理^[6],在驱动力矩大于负载力矩时系统加速,相反、当负载力矩大于驱动力矩时,系统减速,电机拖动空压机负载时转动力矩平衡方程如下式所示:

$$M_D = M_L + J \frac{d\omega}{dt} \quad (1)$$

空压机可以通过设计飞轮增加惯性转矩,减小旋转的角速度的变化^[7]。

表 1 某型空压机组技术参数

项目	数值	备注
流量/(m ³ · min ⁻¹)	22	
压力/MPa	30	
功率/kW	5.5	
转速/(r · min ⁻¹)	1 450	
连接方式	直联	联轴节
长度尺寸/mm	650	
高度尺寸/mm	300	
宽度尺寸/mm	500	
机组重量/kg	210	

电机转动力矩 M_D 由下式确定^[8]:

$$P = \frac{M_D n_D}{9 550} \quad (2)$$

空压机的转动阻力矩 M_L 是一个随转角周期变化值,可由动力计算获得,惯性转矩 J 由下式确定:

$$J = \frac{GD^2}{4g} \quad (3)$$

2.1 静力学分析

通过 SolidWorks 建立公共底架设计模型,对于形状规整、结构对称的模型可以采用传统的有限元解析方法计算,但计算量大,而且非常耗时,当结构复杂、简化模型偏离实际较多时有时可能会产生较大的计算误差。而现代的计算方法对于复杂的结构适应性要更强、计算更加快捷,通过利用 ANSYS 等现代计算工具,可进行快速地计算、以便进一步分析应力的大小和分

布,当局部结构的设计调整时,计算结果较整体模型的计算结果要更为准确,依据表 1 的技术参数和式(2)确定的公共底架的受力和力矩条件,用 ANSYS Workbench 计算结果如图 2 所示。

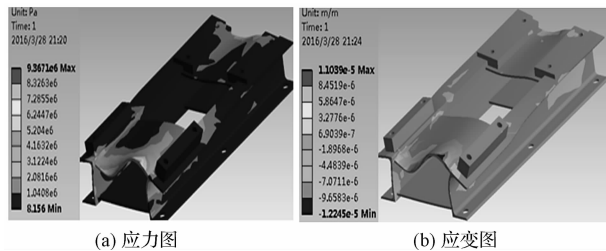


图 2 水平状态下应力、应变

从而可以得到公共底架正常状态下的应力、应变情况,其最大压力和应变位于空压机端前上连接板处,最大应力为 9.36 MPa,最大应变 0.11 $\mu\text{m}/\text{m}$ 。

舰船倾斜、摇摆环境条件如表 2 所示。

表 2 舰船倾斜、摇摆环境条件

船型	倾斜、摇摆	角度/ $^{\circ}$	周期/s
水面舰船	纵倾	± 5	
	横倾	± 15	
	纵摇	± 10	4 ~ 10
	横摇	± 45	3 ~ 14
潜艇	纵倾	± 10	
	横倾	± 15	
	横摇	± 45	3 ~ 14

在横向极限状态时的应力、应变如图 3 所示。

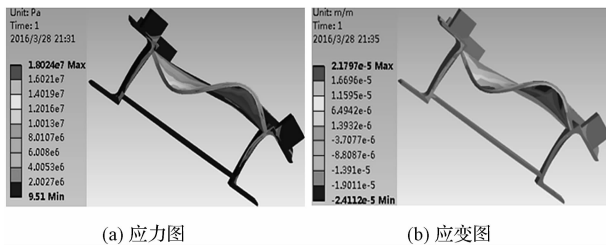


图 3 横向倾斜状态下应力、应变

可见,最大应力达 18.0 MPa,应变 0.22 $\mu\text{m}/\text{m}$,其最大应力、应变位置基本没有变化,仍位于公共底架前端,应力数值相应增加了约一倍,应变值变化也较大,但其压力和应变仍处在一般碳钢结构公共底架要求的安全范围内。

在纵向极限状态时应力、应变如图 4 所示。

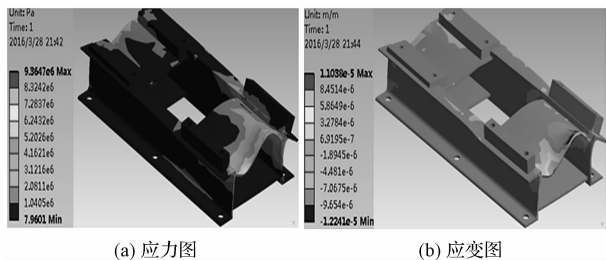


图 4 纵向倾斜状态下应力、应变

可见,最大应力为 9.36 MPa,最大应变 0.11 $\mu\text{m}/\text{m}$,从计算结果看纵向时应力基本上没有变化,应力、应变的方向和位置稍有变化,这些应是公共底架设计是需要考虑的因素。

2.2 动力学分析

公共机架可以视为一个单质量弹簧系统,为避免和减小振动,本研究所设计的公共底架的固有频率应大于机组的扰动频率,空压机的不平衡惯性力不仅会引起振动,还会引起噪声,除在低频段空气引起的噪声外,在中、高频(3 000 Hz 范围内)仍有一定的峰值^[9-10],因此存在振动引起的空压机噪声。通过在公共底架上开孔、加肋将有助于优化公共底架的结构设计、调整公共底架的固有频率,以便避开机组扰动频率,降低空压机组振动引起的噪声;据 GJB1060.1 公共底架固有频率应大于系统的截止频率^[11],否则被认为基座的设计具有潜在的危险,截止频率按下式计算:

$$f_c = 20.5 \frac{17.01 + m_a}{2.72 + m_a} \quad (4)$$

式中: m_a —模态质量。

当 $m_a = 0.021 \text{ t}$,截止频率计算值为 $f_c = 127.2 \text{ Hz}$,因此若公共底架固有频率大于截止频率,可以认为设计是安全的,不会引起空压机组的过度的振动,但如果固有频率接近扰动频率的倍数则仍有可能引起机组的振动使噪声增加。

本研究利用 ANSYS Workbench 分别计算了不同情况下的公共底架结构模态,原设计状态公共底架的模态和分别开孔、加肋后公共底架的模态频率,为满足结构设计的要求,公共底架的侧面和底面需要开孔,开孔后固有频率降低,当接近设备固有频率或整数倍时可能引起振动的增加,而通过加筋可以提高固有频率、有可能远离设备固有频率而使振动减小,从而降低噪声。公共底架通过开孔、加肋后不同结构调整的前 6 阶模态计算统计结果如表 3 所示。

表 3 公共底架模态计算统计

模态频率	原设计/Hz	开孔/Hz	加肋/Hz
第 1 阶	285.8	263.51	708.9
第 2 阶	470.1	440.8	719.5
第 3 阶	577.1	531.1	766.8
第 4 阶	672.3	594.6	768.1
第 5 阶	727.5	723.3	789.3
第 6 阶	815.9	794.7	920.7

可以看出公共底架计算模态频率均高于截止频率,充分说明开孔和加肋可以调整公共底架的固有频率,从而避开系统的干扰频率,空压机应特别考虑第 1 阶和第 2 阶的频率不应为系统扰动频率的整数倍,在空压机的转速为 1 450 r/min 时,扰动频率在 24 Hz 的

整数倍频率为 48 Hz、96 Hz、192 Hz、384 Hz、768 Hz, 从表 3 统计数据看开孔有使设备固有频率减小、可能更接近扰动频率而使振动增加, 加筋可以使设备固有频率远离扰动频率而避开共振, 设计时需要注意开孔的同时要增加筋肋来改变公共底架的模式, 避开共振、降低噪声。

2.3 抗冲击校核计算

公共底架在受到冲击时, 设备与公共底架连接处的紧固件的应力最大^[12], 计算抗冲击时可以按静 G 法、时域分析法和动力学设计分析法, 按静 G 法进行校核更为简单而实用, 冲击加速度值 A_0 的计算公式如下式所示:

$$A_0 = 169.2 \frac{(17.01 + m_a)(5.44 + m_a)}{(2.72 + m_a)^2} \quad (5)$$

当 $m_a = 0.021 \text{ t}$ 时, $A_0 = 2\,094 \text{ mm}^2/\text{s}$, 则:

横向加速度: $A_x = 0.4A_0 = 837.6 \text{ m/s}^2$;

纵向加速度: $A_y = 0.2A_0 = 418.8 \text{ m/s}^2$ 。

电机和空压机通过底脚安装螺栓固定在公共底架上、受到冲击时, 分别在横向和纵向受到的冲击力为:

横向冲击力: $F_x = m_s \times A_x = 175\,896 \text{ N}$;

纵向冲击力: $F_y = m_s \times A_y = 87\,948 \text{ N}$ 。

若空压机或电机各选择 4 只 M12 螺栓安装、则冲击时各螺栓所承受的应力值分别为:

横向应力: $\sigma_x = 389.15 \text{ MPa}$;

纵向应力: $\sigma_y = 194.57 \text{ MPa}$ 。

由上述计算实例可得, 为满足冲击条件要求选择的紧固螺栓强度等级应该大于 400 MPa, 选用 4.8 级精度的螺栓被认为是安全的。

3 结束语

本研究通过研究分析表明舰船用空压机公共底架设计的重要性, 通过静力学分析, 表明设备在倾斜、摇摆环境条件下公共底架的应力、应变较正常状态更加复杂、多变。同时提出了设计公共底架时应同时进行舰船倾斜、摇摆条件下的校核计算, 保证公共底架的设计强度和刚度。

本研究利用现代计算工具 SolidWorks、ANSYS Workbench 可以快速、便捷计算出公共底架各种状态

的模式变化, 通过开孔、加肋可以在满足机组结构设计的同时调整公共底架的各阶固有频率以避开机组扰动频率、减小机组振动和噪声, 机组平均降噪达 (3 ~ 5) dB(A), 该技术在 WP220、WP270、WP22L、CCS-200/40、CZS-48/15 等多种型号舰船用空气压缩机上应用, 振动噪声均得到了进一步改善, 获得了良好的应用效果。

舰船用空压机公共底架设计时要考虑抗冲击安全的能力, 最大冲击应力集中在设备与公共底架连接处紧固螺栓, 其冲击应力要远大于静态时的应力, 通过静 G 法校核计算选定足够强度的紧固螺栓是保证公共底架能否承受抗冲击基本条件。

参考文献 (References):

- [1] 张晓阳, 刘建湖, 潘建强, 等. 各主要海军国家设备抗冲击标准之评述[J]. 船舶力学, 2011, 15(11): 1322-1334.
- [2] 董梅. 舰船指控设备机械结构设计的几个问题[J]. 兵工自动化, 2014, 33(10): 33-36.
- [3] 吴广明, 梅永娟, 朱新进, 等. 某柴油机基座结构抗冲击计算, 中国舰船研究, 2006, 1(4): 41-43, 61.
- [4] 胡秀英. 舰船电子设备高强度冲击试验和抗冲击设计探讨, 装备环境工程, 2007, 4(5): 40-43.
- [5] 王旭飞, 刘菊荣, 张东生, 等. 一种氨水吸收式制冷机机架的有限元分析, 化工机械, 2015, 42(4): 554-557, 573.
- [6] 李浚源. 电力拖动原理[M]. 武汉: 华中工学院出版社, 1983.
- [7] 郁永章. 活塞式压缩机[M]. 北京: 机械工业出版社, 1982.
- [8] 成大先. 机械设计手册(第5卷)[M]. 3版. 北京: 化学工业出版社, 1994.
- [9] 胡忆洛, 胡振泉, 李奇, 等. 串联高压空压机降噪减振技术研究[J]. 流体机械, 2005, 33(7): 27-29.
- [10] 吴华根, 罗江锋, 关丽莹, 等. 螺杆空压机转子受力有限元计算研究[J]. 流体机械, 2014, 42(2): 43-46.
- [11] 海军装备论证研究中心标准规范研究室. GJB1060.1 舰船环境条件要求机械环境[S]. 国防科学技术委员会, 1991.
- [12] 吴广明, 郑新元. 舰船基座抗冲击计算研究[J]. 船舶与海洋工程, 2006, 22(3): 16-18.

[编辑: 李辉]

本文引用格式:

李奇, 李小仁, 姜慧君, 等. 舰船用空气压缩机公共底架设计研究[J]. 机电工程, 2016, 33(8): 969-972.

LI Qi, LI Xiao-sa, JIANG Hui-jun, et al. Base chassis design of air compressor in warship[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2016, 33(8): 969-972.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>