

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2015.09.012

基于 TRIZ 理论的乳化液泵曲轴偏心问题研究^{*}

孙晓盼¹, 李 晶^{1*}, 刘红卫², 王善凯¹, 范晓健¹

(1. 西安工程大学 机电工程学院, 陕西 西安 710048; 2. 西安康本科技公司, 陕西 西安 710048)

摘要:针对由乳化液泵曲轴偏心引起的曲轴强度不足、振动及寿命缩短问题,对乳化液泵曲轴偏心问题进行了研究,展开了基于 TRIZ 理论的冲突分析。首先利用装置复杂性与系统稳定性之间的冲突,得到导致偏心问题产生的实质,即轴颈局限于对轴心位置的调整,通过维数变化原理加以解决,利用空气轴承或磁悬浮轴承代替原支撑结构来解决曲轴的偏心问题;然后从方案中择优,利用监控的困难程度与生产率之间的冲突继续进行分析,通过物理或化学参数变化原理确定采用磁悬浮轴承;最后对磁悬浮轴承用于此曲轴进行适用性分析。研究结果表明该方案可以满足所需支撑和减小偏心的要求,并且可对乳化液泵曲轴新型支撑结构的设计提供理论参考。

关键词:曲轴偏心;磁悬浮轴承;TRIZ;冲突

中图分类号:TH133;TH122

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2015)09-1206-04

Study of crankshaft eccentric problem of emulsion pump based on TRIZ theory

SUN Xiao-pan¹, LI Jing¹, LIU Hong-wei², WANG Shan-kai¹, FAN Xiao-jian¹

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China;

2. The Technology Company of Xi'an Kangben, Xi'an 710048, China)

Abstract: Aiming at the problems that the insufficient strength of crankshaft, vibration and shorten the life span which were caused by the eccentric of emulsion pump crankshaft, a study was conducted on the eccentric crank. Conflict analyses of the eccentric problem of emulsion pump crankshaft were carried out on the theory of theory of innovation and problem sloving (TRIZ). First the conflict which between complexity of device and stability of the system was used to obtain the essence of the problem which the shaft neck was confined to adjust the axial position. The issue could be solved by air bearings or magnetic bearings instead of the original supporting structures through the principle of changing dimension. Then the optimal one was selected relying on the conflict which was between the degree of difficulty of monitoring and the low productivity. The scheme choose magnetic bearings by the principle of parameter variation. At last, the applicability analysis of the optimal scheme was completed. The results indicate that the magnetic bearings can fulfill the requirements to supporting and reducing eccentric. The scheme can also provide theoretical reference for the designing of new supporting structures of the crankshaft of emulsion pump.

Key words: crankshaft eccentric; magnetic bearing; theory of innovation and problem sloving (TRIZ); conflicts

0 引 言

乳化液泵是综采工作面的重要设备,是支护设备的动力源,曲轴是乳化液泵的关键零件,其工作性能直接影响着乳化液泵的整体性能^[1]。在实际工作中,由

于曲轴受力情况极为复杂,再加上曲轴的制造及装配误差,致使曲轴的偏心问题总是难以解决。目前对于曲轴偏心问题的改进措施一直局限于传统的基本方法,如采用改进加工工艺、改进装夹方式、优化曲轴的制造结构^[2-4]。改进夹具及装夹方式可使加工制造的精度提

收稿日期:2015-04-03

基金项目:陕西省自然科学基金资助项目(2014JM9364)

作者简介:孙晓盼(1990-),女,河南鹤壁人,主要从事曲轴支撑结构优化设计方面的研究。E-mail:sunxiaopan515@163.com

通信联系人:李 晶,女,教授,硕士生导师。E-mail:ljing62@126.com

高,或利用三维建模及仿真将曲轴结构进行优化,虽可有效缓解偏心影响,但解决偏心影响的程度有限。

发明问题解决理论^[5-7] (TRIZ) 总结出各种技术发展进化遵循的规律模式以及解决各种矛盾的创新原理和法则,建立一个实现创新开发综合理论体系。利用 TRIZ 理论来创新解决曲轴的偏心问题,以一种全新的思路,创造轴颈多维调整的空间,使问题得到初步解决,继而在结构中加入反馈机制使问题得以解决。这种开放性的思维方法可以用在其他多种技术领域,将会带来巨大的技术变革,对提高制造、技术能力具有重大影响。

笔者对乳化液泵曲轴偏心问题进行了研究,展开了基于 TRIZ 理论的冲突分析。

1 乳化液泵曲轴箱概述

影响曲轴偏心的原因贯穿曲轴生产、安装与运行的整个过程。在生产阶段,会由于装夹方式、操作误差等使曲轴产生加工误差;在安装阶段,由于各部件安装误差的积累,也会导致曲轴产生定位误差;在曲轴工作运行中,通过误差的综合作用,将会导致曲轴的实际工作位置偏离理论工作位置,产生偏心现象,继而产生扭矩、强度刚度减弱及振动噪音问题。

曲轴原有支撑结构如图 1 所示。

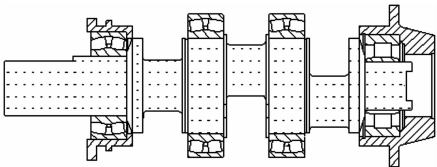


图 1 曲轴原有支撑结构

曲轴于曲轴箱中采用多点支撑,共四套轴承,均匀分布,受力合理,延长了运行寿命。左边三套均采用双列调心滚子轴承,右边采用圆柱滚子轴承。左一轴承通过轴承杯将轴支撑,中间两套轴承直接将曲轴支撑,最右轴承通过轴承套将轴支撑。由于左、右两端轴承杯和轴承套的使用,如此通过支撑结构的层层嵌套使得误差叠加,增加了安装误差,导致左、右两端轴颈产生了位置误差;并且因为轴承与轴颈是过盈配合,之间没有间隙,没有调整实际轴颈轴心线到理论位置的余地,这就使得误差无法校正。加上通过对曲轴进行考虑偏心的静力学分析,结果两处较大应力分别发生在最左端轴颈和靠近最右曲拐的轴承处,并且最左端轴颈处最易发生较大变形,靠近最右曲拐的轴承处最易发生强度和刚度不足^[8]。实践表明,曲轴最左端和最右轴颈处最易出现断裂现象。各种原因显示左、右两端支撑轴颈的轴承处最易出现偏心,曲轴偏心会导致曲轴不满足所需的强度要求。

2 利用 TRIZ 分析曲轴轴颈位置的调整

曲轴通过与轴承、轴承杯、轴承套固定于箱体,通过层层嵌套使得装置安装的复杂性提高。现欲改善这一性质,使装置结构变得简单,但这会使系统的稳定性下降,即随之恶化的是系统的稳定性。所以得出欲改善的参数:36 装置的复杂性;欲恶化的参数:13 稳定性。查矛盾矩阵如表 1 所示。

表 1 13、36 矛盾矩阵表

工程参数	13 稳定性
36 装置的复杂性	2、22、17、19

得发明原理:2 分离原理,22 变有害为有益原理,17 维数变化原理,19 周期性作用原理。经分析,其中对该问题有明显帮助作用的是 17 维数变化原理:将一维空间中运动或静止的物体变成二维空间中运动或静止的物体,将二维空间中的物体变成三维空间中的物体。

由于原来的轴承与曲轴轴颈是过盈配合,轴承与轴颈之间没有间隙,没有调整实际轴径轴线到理论位置的余地。本研究联系 TRIZ 理论,利用 17 维数变化原理,寻找一种新的曲轴支撑结构来代替原来曲轴两端的支撑轴承,增加轴颈的自由度数目,使曲轴轴颈处于一个可调的空间中,同时又可以保证曲轴正常工作。

2.1 解决方案

曲轴的转动由减速器带动,轴承对曲轴轴颈只起支撑作用,根据发明原理的指引寻找符合要求的支撑结构,现找出两种:分别是空气轴承和磁悬浮轴承。下面针对这两种结构分别进行阐述。

2.1.1 空气轴承

空气轴承是一种用气体作为润滑介质的滑动轴承,是一种非接触系统,由于气体的粘度较低、摩擦功耗小,可保持极高的径向和轴向旋转精度。在高速旋转机械、节能环保等领域越来越受到广泛的应用和关注。

为满足轴与轴承的工作表面相对静止的时候也具有承载能力和刚度的要求,该方案以空气静压轴承且应用广泛的小孔节流空气轴承作为研究对象^[9]。气膜压力由外部气源供给,压缩空气经节流器进入轴承间隙,形成具有一定压力的静压气膜,产生润滑和支撑作用;压力空气最后连续地从轴承外边缘排入大气,泄压的缝隙极小,保证了转动轴的悬浮。

当曲轴上作用负载时,轴心会偏离轴承中心产生一偏心量,此时轴承一侧的气膜间隙变小而另一侧间隙变大,流体阻抗也对应地一侧增加而另一侧减小,即在偏心方向附近形成压力差;同时,由于节流器的阻抗没有变化,轴承间隙减小侧气腔压力升高而另一侧压

力降低,此时存在的压力差支承了负载,当压力气膜产生的总浮力与负载相平衡时工作轴承达到平衡位置^[10]。轴颈可在该间隙中做轻微的位置调整以达到使轴颈尽量处于正确位置的目的。

2.1.2 磁悬浮轴承

磁悬浮轴承是由磁悬浮技术发展而产生的一种高性能机电一体化轴承。其工作原理是利用磁悬浮特性,使轴颈稳定悬浮于磁悬浮轴承中,轴颈得以在空间中调整位置,以达到减小曲轴偏心误差目的。并且无磨损,不需要润滑和密封,结构紧凑;对轴的加工精度要求低,制造成本较低。

为保证曲轴强度,本研究使用一体式曲轴,材料为42CrMo 钢,对曲轴左、右两端的支撑轴颈进行淬火后再激磁就会得到硬磁性;磁悬浮轴承利用磁体的磁性,但磁极间不可避免会产生耦合效应,为降低该负面影响,对定子的数目和结构都有定性的要求;磁极数一般选为 8 的倍数,梯形槽可使铁芯齿部的磁通密度分布均匀,并且其径向尺寸小,所以定子槽采用梯形槽。磁悬浮轴承结构简图如图 2 所示。

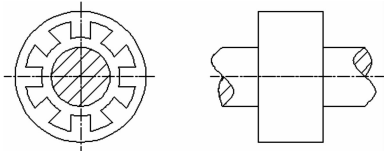


图 2 磁悬浮轴承结构简图

3 利用 TRIZ 分析轴承的检测控制系统

空气轴承与磁悬浮轴承分别利用其电气比例阀控制系统与电磁控制系统来保证轴颈处于正确位置,前者利用空气来实现其控制功能,后者则利用电磁感应来实现功能,两者具有不同的监测控制机理,致使运用两种控制系统的难易程度不同,装置进行检测控制的简易与否对泵体的工作效率有着直接的关系。笔者利用 TRIZ 语言来描述这一问题即监控的困难程度与生产率的矛盾,欲改善的参数:39 生产率,欲恶化的参数:37 监控的困难程度;查矛盾矩阵如表 2 所示。

表 2 37、39 矛盾矩阵表

工程参数	37 监控的困难程度
39 生产率	35、18、27、2

得发明原理:35 物理或化学参数的改变、18 机械振动、27 廉价替代品、2 抽取;经分析对本方案作用最大的是 35 物理或化学参数的改变:改变物体的物理状态;改变物体的浓度或粘度;改变物体的柔性、温度、压力。

运用到本方案中即考虑改变物体的物理参数。空

气轴承与磁悬浮轴承采用不同的物理参数来实现控制,即前者采用介质气体,后者采用电磁感应,所以可以据此在两者中选择最为理想的方案,以下对两者的检测控制机理分别进行阐述。

3.1 空气轴承检测控制系统

电气比例阀可以在转子运转过程中方便准确的去控制轴承的供气压力,经控制原件对电气比例阀的控制以调节供气量和供气压力,将偏移轴颈迅速调整至正确位置。空气静压轴承的基本设计原理是气体润滑理论,空气轴承反馈控制如图 3 所示。

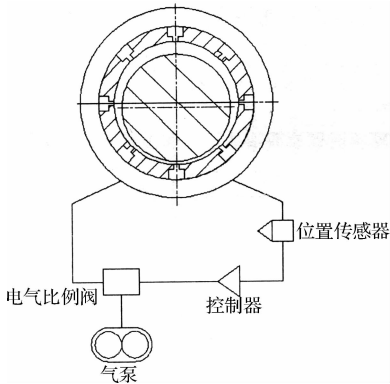


图 3 空气轴承反馈控制

润滑膜内气模力分布服从三次多项式,气膜力随偏心量、转速变化的表达式如下^[11]:

$$f(\lambda, \omega) = a + b\lambda + c\omega + d\lambda^2 + e\omega^2 + g\lambda\omega + h\lambda^3 + i\omega^3 + j\lambda\omega^2 + m\lambda^2\omega$$

(1)

式中: λ, ω —转子的偏心量和转速; f —气体轴承的气膜力; $a, b, \dots, m$ —多项式系数;该曲轴由减速器带动旋转,转速为一固定值,当 ω 为常数时:

$$f(\lambda) = \alpha + \beta\lambda + \delta\lambda^2 + \varepsilon\lambda^3$$

(2)

式中: $\alpha, \beta, \delta, \varepsilon$ —多项式系数,以此对供气量进行调节。

3.2 磁悬浮轴承检测控制系统

磁悬浮轴承的调节控制运用机电一体化的方式将机械部分和电气部分结合起来,将运行、检测与控制联系起来,借以达到所需的目的^[12]。机械部分由轴颈转子和带线圈的定子组成,电气部分由传感器、控制器和放大器等组成。磁悬浮轴承反馈控制如图 4 所示。

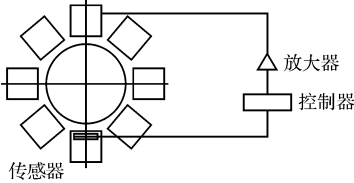


图 4 磁悬浮轴承反馈控制

轴颈悬浮在轴承中,采用数字 PID 控制算法进行控制^[13],由位移传感器监测转子轴心轨迹,一旦转子

偏离所要求的位置,传感器就发出信号,伺服控制系统根据参考信号(转子要求的位置信号)与传感器信号之差值来调整定子线圈中的电流,迅速调节磁场力,使物体始终稳定在一定的范围之内,实现对转子的实时监控。

4 结果分析

4.1 方案选择

综合两次 TRIZ 的应用,由于空气轴承需要控制气体的量与压力,属于气压的传动与控制,相比之下,磁悬浮轴承采用电磁感应的数字控制系统更为精准;并且空气轴承设备对制造、使用的要求比较高;且其结构不如磁悬浮轴承紧凑。因此适用于本场合,最佳解决方案为磁悬浮轴承。

4.2 适用性分析

该乳化液泵曲轴在工作中会受到很大的径向力及较小的轴向力。依据电磁感应原理,曲轴旋转切割磁感线,曲轴磁悬浮轴承支撑结构如图 5 所示。磁悬浮轴承可以给曲轴提供周向的径向力,即磁悬浮轴承可以满足对曲轴的径向定位需求。左边轴承支撑处,依靠轴承杯、磁悬浮轴承外圈和压盖将曲轴轴向固定;中间两普通调心滚子轴承依照原来结构依旧保持轴向固定曲轴的能力;右边轴承支撑处,依靠轴承座、磁悬浮轴承外圈和孔用卡簧将曲轴轴向固定,曲轴系安装结构可以满足曲轴的轴向定位;所以磁悬浮轴承可以满足所需的功能要求。

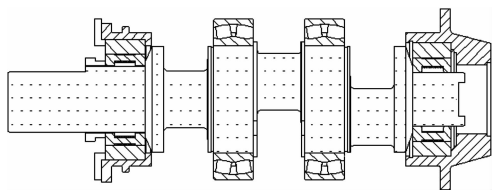


图5 曲轴磁悬浮轴承支撑结构

5 结束语

本研究在明确了解乳化液泵偏心曲轴的基础上,利用 TRIZ 理论对产生曲轴偏心的原因及方案的选择分别进行矛盾分析,得出了磁悬浮轴承的解决方案。经分析,磁悬浮轴承可以有效作为曲轴的支撑,并且此技术方法与思路也可为其他类似轴的支撑结构的优化

设计提供参考。磁悬浮轴承自产生以来,经过快速发展,现已能够满足各种场合的使用;文中没有涉及磁悬浮轴承的安装使用问题,在实际工作中应详细地加以考虑。

将实际问题与 TRIZ 理论结合起来,利用 TRIZ 来寻找问题的突破点,根据发明原理得到问题的新型解决方法。事实表明 TRIZ 理论为产品创新方案的设计提供了一种切实有效的创新工具,伴随着新材料和新技术的不断产生和发展,相信依据 TRIZ 理论还会得出更加切实可行的创新方案,能够为产品的改进和创新提供更加宽广的思路。

参考文献(References):

- [1] LI Wen-ying, WEI Jin-hong. Control strategy for multi-pump emulsion power station in coal mine face[J]. *Journal of Coal Science and Engineering (China)*, 2011, 17(4): 443-446.
- [2] 梁化春,汪怀伦,梅碧舟,等. 曲轴偏心轴颈加工工艺方案探讨[J]. *锻压装备与制造技术*, 2009(1): 30-31.
- [3] 黄敏,田玉琴. 曲轴偏心检具的设计[J]. *金属加工(冷加工)*, 2009(15): 59-63.
- [4] 余青华,刘宝秋,刘英吉. 基于 Pro/E 的钻井泵曲轴结构优化[J]. *石油矿场机械*, 2012, 41(4): 76-79.
- [5] 徐荣滨. 曲轴连杆式低速大扭矩液压马达滑靴副的设计分析[J]. *液压气动与密封*, 2015(1): 34-35.
- [6] 徐起贺,任中普,戚新波. TRIZ 创新理论使用指南[M]. 1 版. 北京:北京理工大学出版社, 2011.
- [7] 黄伟,朱龙,候亮. 基于专利与 TRIZ 集成的产品创新与优化设计[J]. *机电工程*, 2011, 28(7): 774-778.
- [8] 张利锋,李晶,唐朝飞. 基于 Ansys Workbench12 乳化液泵曲轴的有限元分析[J]. *西安工程大学学报*, 2014, 28(6): 760-764.
- [9] 王瑚. 高精度空气静压轴承的设计[J]. *航空精密机械工程*, 1984(3): 22-31.
- [10] 刘海艳. 高速静压气体轴承-转子系统稳定性研究[D]. 大连:大连海事大学轮机工程学院, 2012.
- [11] 于贺春,马文琦,赵广,等. 船舶增压器静压气体轴承-转子系统动力学特性研究[J]. *振动与冲击*, 2011, 30(12): 1-6.
- [12] PRASAD M B, SUDHA M. Product design using theory of innovation and problem solving (TRIZ) technology for induction machine[J]. *Intelligent Systems and Control*, 2012(12): 44-48.
- [13] 周伟,杨小飞. 磁悬浮轴承控制系统的硬件设计[J]. *机电工程*, 2009, 26(7): 83-87.

[编辑:洪炜娜]

本文引用格式:

孙晓盼,李晶,刘红卫,等. 基于 TRIZ 理论的乳化液泵曲轴偏心问题研究[J]. *机电工程*, 2015, 32(9): 1206-1209.

SUN Xiao-pan, LI Jing, LIU Hong-wei, et al. Study of crankshaft eccentric problem of emulsion pump based on TRIZ theory[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2015, 32(9): 1206-1209.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>