精密离心机转盘/转臂结构变形规律研究

成永博，卢永刚，张映梅
（中国工程物理研究院 总体工程研究所，四川 绵阳 621900）

摘要：目的 研究不同转盘/转臂结构在离心载荷和温度载荷作用下的变形。**方法** 在充分调研国内外相关研究的基础上，分析几种转盘/转臂给定工程结构在离心载荷和温度载荷作用下的变形规律。**结果** 通过分析可以得到，不同转盘/转臂结构随离心载荷的增大变形增大，随温度的正向变化变形量增大，随温度的负向变化变形量负向减小。**结论** 同等载荷作用下的变形量主要由该种结构形式转盘/转臂材料分布决定。对比几种转盘/转臂结构可以看出，锥形辐射式加强筋转盘综合承载能力较优，可为工程选用。

关键词： 离心机转盘/转臂工程结构；离心载荷；温度载荷
DOI： 10.7643/issn.1672-9242.2015.05.015
中图分类号： TJ05；V416 **文献标识码：** A
文章编号： 1672－9242(2015)05－0088－07

Variation of Precise Centrifuge Plate/Arm

CHENG Yong-bo, *LU Yong-gang*, *ZHANG Ying-mei*
(Institute of System Engineering, CAEP, Mianyang 621900, China)

ABSTRACT: Objective To study the variation of different plate/arm structures under centrifugal and temperature loads. **Methods** Based on the study of domestic and overseas literatures, this paper analyzed several kinds of variation patterns of plate/arm structure under the centrifugal load and the temperature load. **Results** The results showed the variation of different plate/arm structures were enlarged when the centrifugal load increased and the variation was increased along with the positive temperature changing and decreased along with the negative temperature changing. **Conclusion** Under the same loading, the variation of the plate/arm depends on material distribution. The comparison of several kinds of the structure of the plate/arm shows the comprehensive carrying capacity of the conical ribbed plate is better, and this structure could be used for engineering.

KEY WORDS: centrifuge plate/arm structure; centrifugal load; temperature load

精密离心机是校准、检测线加速度计、惯性开关 等惯性仪表的主要设备，其加速度精度对被标定仪

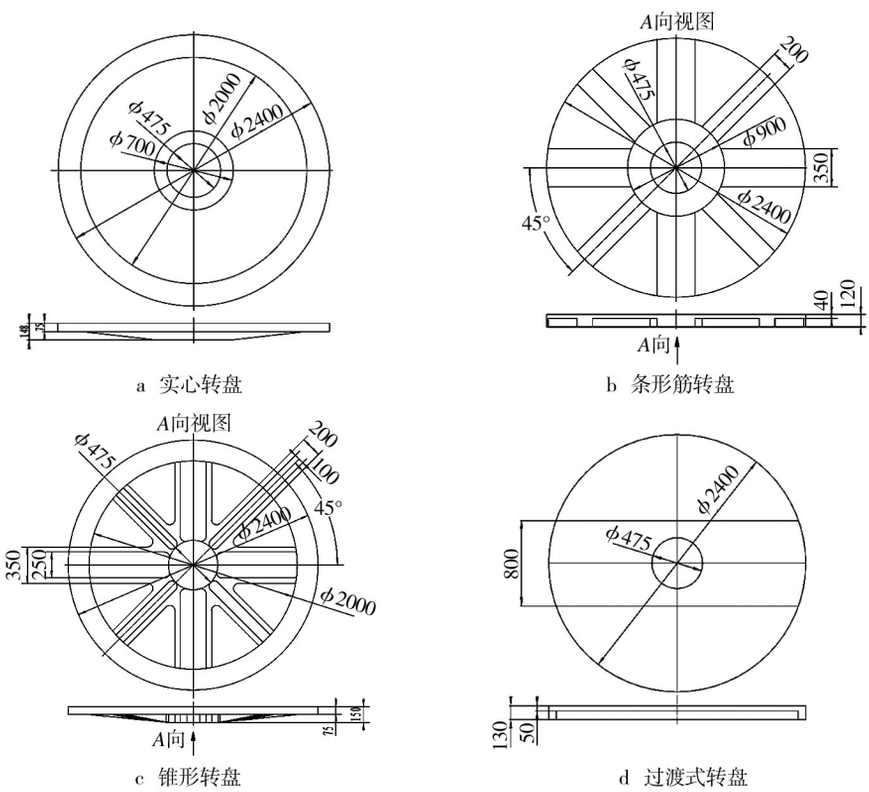
收稿日期： 2015-08-13；**修订日期：** 2015-08-23
Received: 2015-08-13; **Revised:** 2015-08-23
基金项目： 国家重大科学仪器开发专项(2011YQ130047)；中物院总体研究所创新与发展基金(12CXJ24)
Fund: Supported by National Fundamental Equipment Development Special Project (2011YQ130047) and Innovation and Development Fund of Institute of System Engineering (12CXJ24)
作者简介： 成永博(1985—)，男，陕西彬县人，硕士，主要研究方向为非标结构设计。
Biography: CHENG Yong-bo(1985—), Male, from Binxian, Shaanxi, Master, Research focus: non-standard structure design.

表精度有着直接影响。研究发现,离心机转盘/转臂半径变化对其加速度有主要影响,而运行中的离心机转盘/转臂半径变化主要取决于离心载荷及温度载荷。

成永博[1]在其学位论文中提出了影响离心机动态半径的几种因素,并指出离心载荷和温度变化引起的动态半径占总动态半径的99%。IEEE规范[2]提出了规则截面形状大臂受离心载荷和温度变化时尺寸变化量的理论式,动态半径的测量以光学测量和接近式测量为主。李向[3]为航天部研制的离心机动态半径光学测量系统和美国G460S型精密离心机[4]的光学测量系统代表了光学测量的最高精度。杨巨宝[5]和刘健[6—7]研制的微位移传感器测量法代表了其所能达到的最高精度。夏丹[8—9]研究了离心机转盘的结构优化问题,却并未揭示转盘结构对其变形的影响。文中基于工程中可能的转盘/转臂结构,研究各结构在离心载荷和温度载荷作用下的变形规律,以期为精密离心机转盘结构设计提供参考。

1　精密离心机转盘/转臂基本结构

精密离心机主要分为盘式和臂式两种结构。工程上常见的转盘结构有:锥形辐转盘、条形筋转盘、实心转盘、过渡盘式等4种;常见的转臂结构有:实心转臂和镂空转臂等2种。图1和图2分别给出了几种工程上的转盘和转臂(各转盘/转臂尺寸是在质量相等的条件下设计得到)。



a　实心转盘　　b　条形筋转盘

c　锥形转盘　　d　过渡式转盘

图1　转盘结构

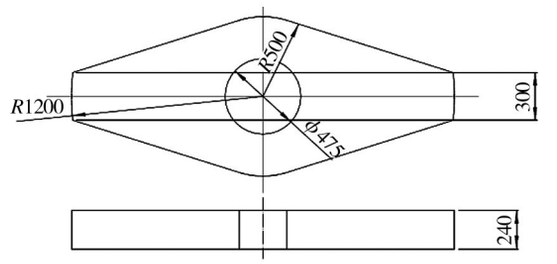
Fig.1　Swing structure

2　离心载荷对转盘/转臂变形的影响

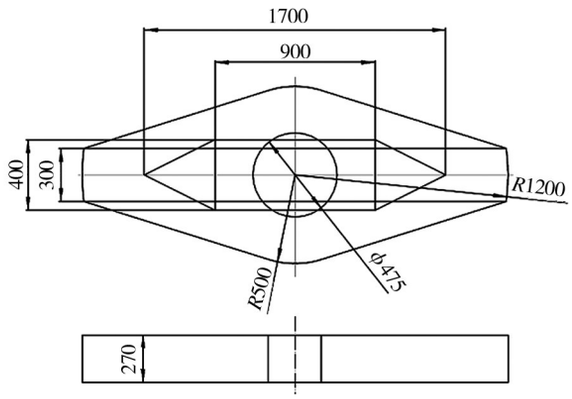
2.1　离心载荷对实心转盘的影响

实心加强转盘结构如图1a所示,转盘中心部分是锥形实心结构,然后沿径向至直径ϕ2000 mm处厚度逐渐递减。实心转盘在离心载荷作用下的变形云图和位移曲线分别如图3和图4所示。载荷确定时负载安装方位的变形最大。综合其变形曲线,可以看出,随着离心载荷增大,转盘位移绝对值呈线性增大,使得三维位移曲线呈现鱼嘴型。

另外,从变形曲线上可以看出,转盘沿负轴向发生弯曲。这是因为一方面重力作用使转盘变形趋势向下;另一方面,由于该结构的特点是材料多分布于下表面,使得下表面刚度大,受离心载荷作用时,下表



a　实心转臂结构



b　镂空转臂结构

图2　转臂结构

Fig.2　Turn arm structure

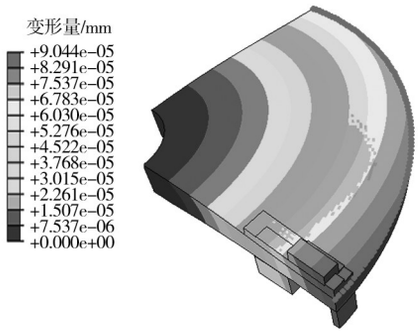


图3　实心转盘负载100g时变形

Fig.3　Position contour of the solid plate under 100g

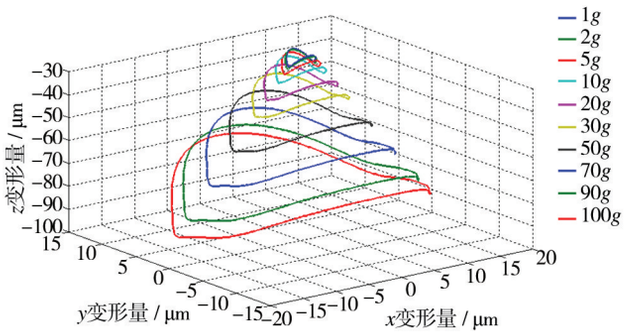


图4　实心转盘离心载荷作用下三维变形曲线

Fig.4　3D variation of the solid plate under centrifugal load

面变形量较小，这样就出现了向下弯曲的特点。

2.2　离心载荷对条形筋转盘的影响

条形筋转盘（图1b）的特点是转盘下表面在周向均布有四主、四副加强筋。在离心载荷作用下，条形筋转盘的变形情况如图5和图6所示。

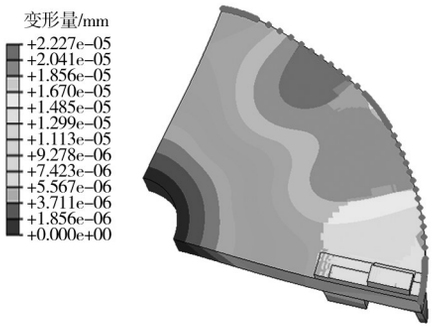


图5　条形筋转盘负载100g时变形

Fig.5　Position contour of the ribbed plate under 100g

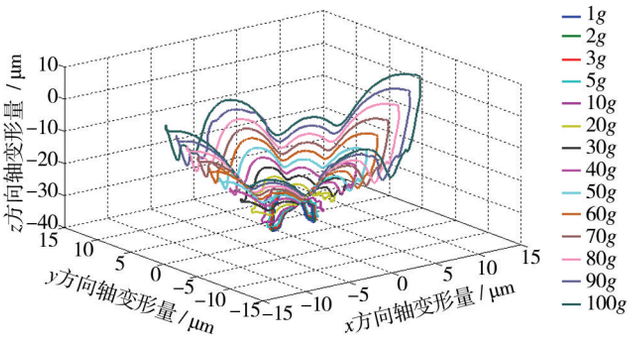


图6　条形筋转盘离心载荷作用下三维变形曲线

Fig.6　3D position curves of the ribbed plate under centrifugal load

条形筋等厚转盘变形最大点出现在负载安装方位。给定载荷下其边缘变形曲线波动明显，呈倒喇叭型；其轴向变形量随着载荷增大而增大；三维变形曲线具有四主波峰、四副波峰，分别对应于主、副加强筋位置。

2.3　离心载荷对锥形转盘的影响

锥形转盘的特点是在实心转盘结构基础上去除部分材料，于转盘下表面中心处形成加强筋，其结构如图1c所示。

离心载荷对该结构转盘的影响结果如图7和图8所示。其变形规律与前两种结构类似，最大变形量出现在负载安装方位，全载荷范围内变形曲线簇呈现出鱼嘴型，只有1个波峰。

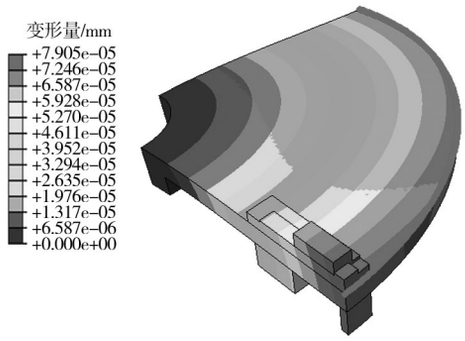


图7　锥形转盘负载100g时变形

Fig.7 Position contour of the conical ribbed plate under 100g

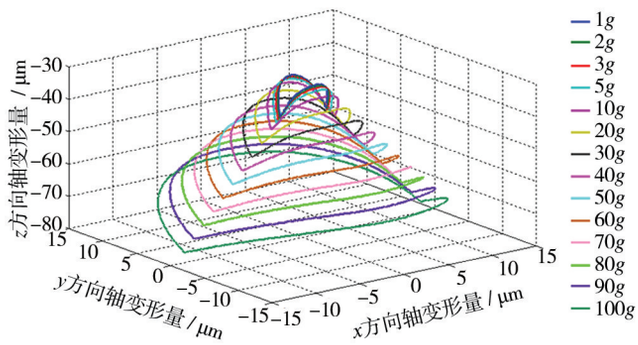


图8　锥形转盘离心载荷作用下边缘三维变形曲线

Fig.8　3D position curves of the conical ribbed plate under centrifugal load

2.4　离心载荷对过渡式转盘的影响

过渡式转盘结构如图1d所示,是盘式与臂式的过渡结构,在负载安装位置设置了等截面筋。过渡式转盘在离心载荷作用下的变形情况如图9和图10所示。由图10中曲线可知,载荷确定时,过渡式转盘轴向负向最大变形出现在负载安装方位,轴向最小变形出现在负载正交位置。

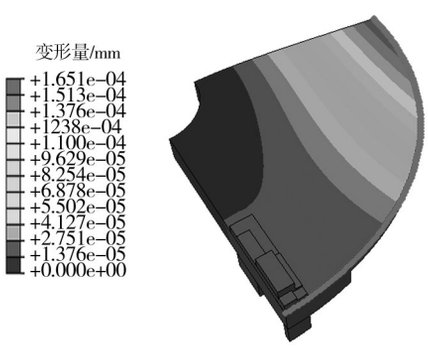


图9　过渡式转盘负载100g时变形

Fig.9　Position contour of the transitional plate under 100g

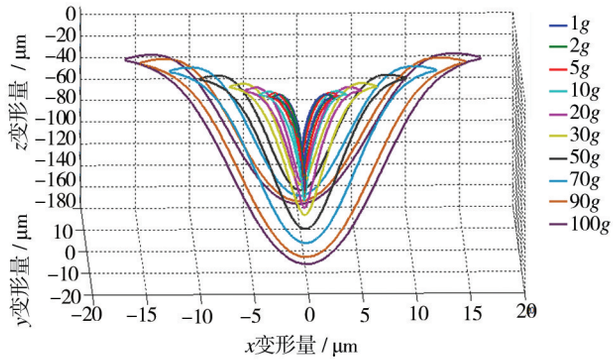


图10　过渡式转盘离心载荷作用下边缘三维变形曲线

Fig.10　3D position curves of the transitional plate under centrifugal load

2.5　实心转臂离心载荷作用变形规律

实心转臂结构如图2a所示,其厚度为240 mm,工作时负载安装于转臂两端工作台上。实心转臂在离心载荷作用下变形规律如图11和图12所示。由位移曲线可以看出,等质量设计使得厚度增加时,臂端的轴向变形量明显下降,且其最大最小位移差也减小为0.4 μm,即波动较小,轴向稳定性变好。

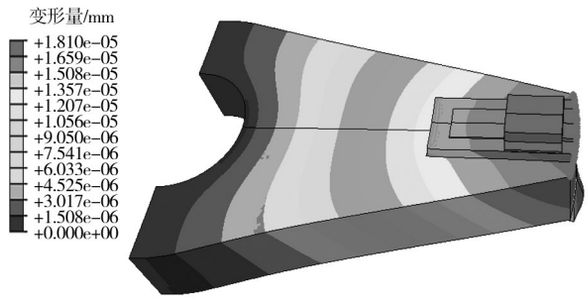


图11　实心转臂负载100g时变形

Fig.11　Position contour of the solid arm under 100g

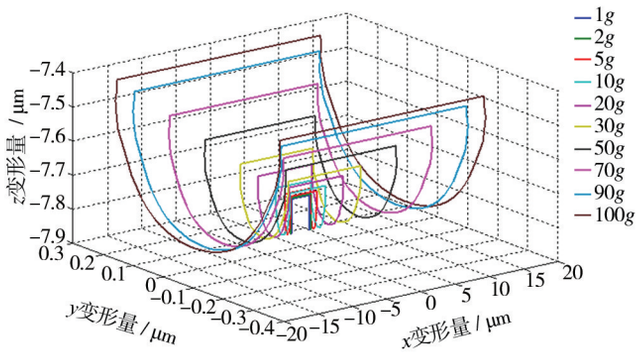


图12　实心转臂载荷作用下边缘三维变形曲线

Fig.12　3D position curves of the solid arm under loading

2.6 离心载荷对镂空转臂的影响

镂空转臂结构如图2b所示，将实心转臂径向中心部位去除部分材料得到，厚270 mm。镂空转臂受到离心载荷时变形图如图13和图14所示。图14中曲线变化趋势与实心转臂变形曲线（图4）变化规律一致，变形量最大均是在负载安装部位，而对应载荷下位移幅值均增大。

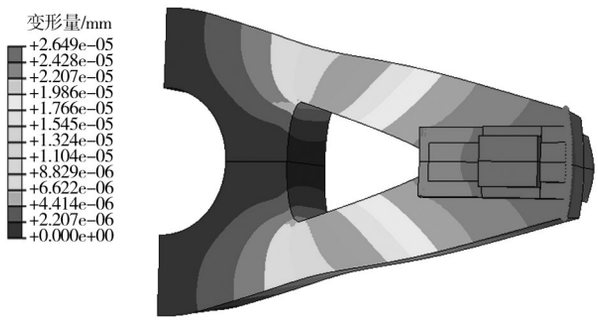


图13 镂空转臂负载100*g*时变形

Fig.13 Position contour of the chiseled arm under 100*g*

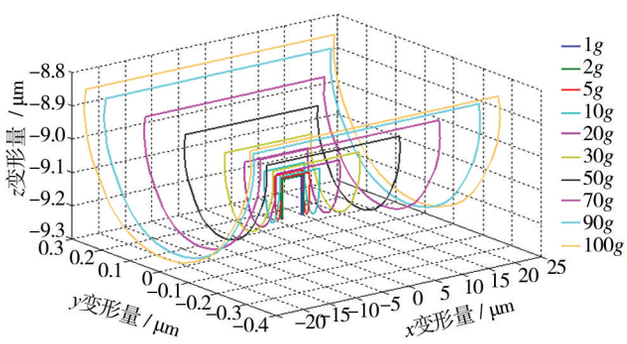


图14 镂空转臂载荷作用下边缘三维变形曲线

Fig.14 3D position curves of the chiseled arm under loading

2.7 离心载荷对转盘/转臂影响的小结

2.1节到2.6节主要分析了受离心载荷作用时，工程上各转盘/转臂结构的变形规律。各曲线反应出，同一结构受到确定载荷作用时，负载安装部位就是其最大变形位置，且转盘变形量随着离心载荷呈线性变化特点。

不同结构受离心载荷作用时的变形曲线，反应了该种结构的波动特性。从趋势上看，条形筋转盘盘面波动最大（动态下该结构盘面呈现出八峰八谷）；过渡式转盘出现两个较大波峰和两个波谷；实心转盘和锥形辐射式转盘变形曲线较为平滑，有两对峰谷。转臂结构变形不连续。

综合考虑各结构转盘/转臂综合变形及转盘的动态稳定性，可以确定，锥形转盘由于其综合性能稳定，径向变形以及轴向波动较小为优选转盘方案。

3 温度变化对转盘/转臂的影响

温度变化可引起材料的缩涨特性，进而对精密离心机结构尺寸产生影响，使其半径发生变化。下面根据离心机工作环境温度控制要求，分析温度变化范围为（20 ± 0.5）℃时的转盘 / 转臂的变形情况。

3.1 温度变化对实心转盘的影响

随温度变化时，实心转盘上表面边缘处变形曲线如图15所示。温度基准为20 ℃，随着温度变化，转盘外边缘线性变形。变形曲线簇为圆锥形，锥顶就是应于基准温度对应构型，温度降低时位移曲线沿轴向负向绝对值增大，升高时则相反。其原因是温度影响下的变形机理与离心载荷作用下的变形机理相同，即表面刚度不等。当温度降低时，转盘收缩尺寸减小，由于上、下表面刚度不同使盘面向上弯曲；当温度升高时转盘变形方向相反。

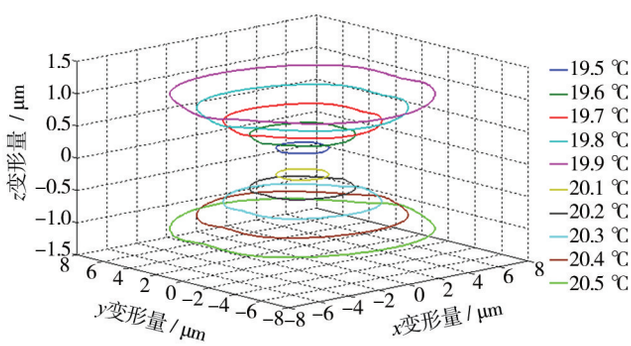


图15 实心转盘随温度变化的变形曲线

Fig.15 Position curves of the solid plate with temperature changing

3.2 温度变化对条形筋转盘的影响

条形筋转盘随温度变化时的边缘变形曲线如图16所示，其变形规律类似于实心转盘，盘面在温度降低时上翘，升高时下弯。另外，图16中曲线的波动性还反应出该种结构材料分布的特点。这与受离心载荷作用的结果类似。

3.3 温度变化对锥形转盘随的影响

温度对锥形转盘变形的影响曲线如图17所示，变

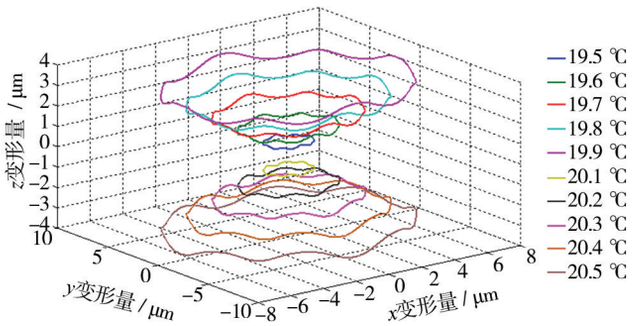


图16　条形筋转盘随温度变化的变形曲线

Fig.16　Position curves of the ribbed plate with temperature changing

化规律类似于实心转盘。温度变化量确定时,其变形量要略大些。

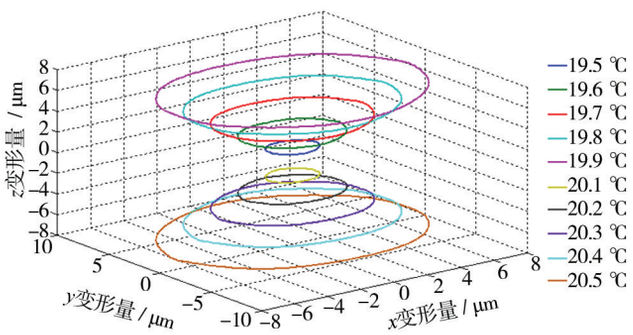


图17　锥形转盘随温度变化变形曲线

Fig.17　Position curves of the conical ribbed plate with temperature changing

3.4　温度变化对过渡式转盘的影响

过渡式转盘随温度变化的变形曲线如图18所示。环境温度增大时,位移曲线向下弯曲,类似马鞍形;温度减小时,反向变形曲线簇为倒马鞍形。

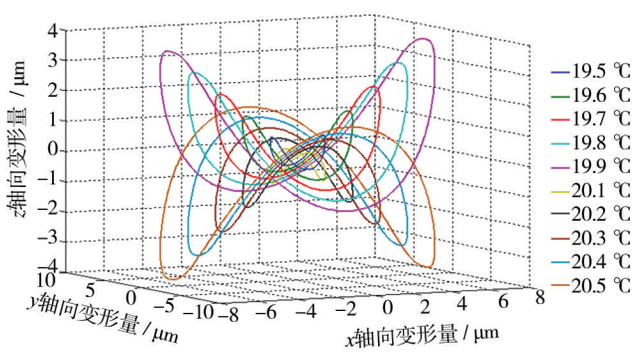


图18　过渡式转盘随温度变化变形曲线

Fig.18　Position curves of the transitional plate with temperature changing

3.5　温度变化对实心转臂的影响

实心转臂随温度变化时的变形曲线如图19所示。曲线表明,当温度低于标准温度时,转臂收缩,变形呈现负向减小特点;温度高于基准值时,变形呈现正向增大。另外,等质量设计的转臂较厚,臂端刚度大于转盘结构,其变形量较小。

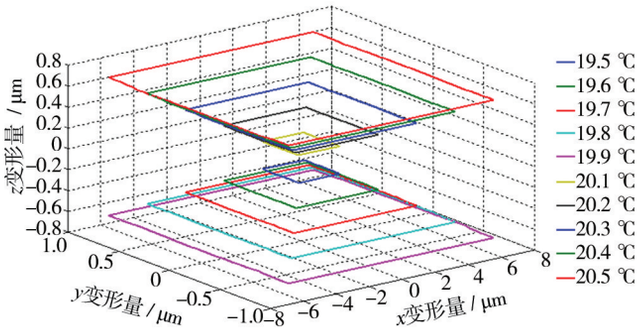


图19　实心转臂随温度变化的变形曲线

Fig.19　Position curves of the solid arm with temperature changing

3.6　温度变化对镂空转臂的影响

温度变化对镂空转臂的影响曲线如图20所示。该曲线与实心转臂变形曲线(图19)变化趋势相同,温度升高时,尺寸增大;温度降低时,尺寸减小。由于镂空结构其厚度大于实心转臂,其轴向变形量也大于实心转臂结构。

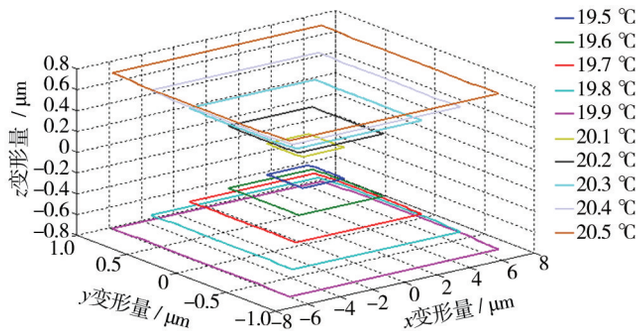


图20　镂空转臂随温度变化变形曲线

Fig.20　Position curves of the chiseled arm with temperature changing

3.7　温度变化对转盘/转臂影响的小结

分析了温度变化对转盘/转臂结构的影响。根据分析结果,当离心机温度偏离基准值时,转盘尺寸发生变化。温度升高使转盘尺寸增大,温度降低使转盘尺寸减小。同等温度变化时,各转盘/转臂变形形

式及变形量取决于其结构对材料分布的影响。

综上所述，温度变化对不同转盘／转臂结构的影响曲线，反应了该结构所处环境温度变化时盘面的变形量及平稳性变化差异。根据各结构的温度变形曲线，可以确定锥形辐射式加强筋转盘结构在整体温度性能方面较优。

4 结语

文中研究了几种转盘/转臂工程结构在离心载荷和温度载荷作用下的变形规律。通过分析发现，所有结构变形量随离心载荷变化与温度变化时呈线性关系。另外，同等载荷作用下变形量的差异取决于其结构形式导致的转盘/转臂材料分布状态。对比各结构在离心载荷和温度载荷作用下的变形规律可以看出，锥形辐射式加强筋转盘的综合承载能力较其他结构优，可为工程选用。

参考文献：

[1] 成永博. 基于多学科统一建模的精密离心机动态半径误差分离仿真研究[D]. 绵阳：中国工程物理研究院，2013.
CHENG Yong-bo. Simulation Research on Dynamic Radius Error Separation Techniques of Precision Centrifuge Based on the General Multi-discipline Modeling[D]. Mianyang: CAEP, 2013.

[2] IEEE Std 836TM—2009, IEEE Recommended Practice for Precision Centrifuge Testing of linear Accelerometers [S].

[3] 李向. 大型精密离心机相对臂长及失准角测量系统研究[D]. 北京：清华大学，1995
LI Xiang. The Study on the Measurement System of Relative Arm length and Angular deflection of Giant Precision Centrifuge[D]. Beijing: Tsinghua University, 1995.

[4] Genisco Technology Corporation. Instruction of Manual Model G-460S Precision Centrifuge[K]: 1—37

[5] 杨巨宝. 精密离心机半径值动态测试系统[J]. 宇航计测技术，1994，13(2)：5—10.
YANG Ju-bao. Dynamic Measurement System for the Radius of Precision Centrifuger[J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 1994, 13(2): 5—10.

[6] 刘健. 线加速度模拟转台——离心机动态半径测试的研究[D]. 天津：天津大学，2007.
LIU Jian. Study on Test Method of Dynamic Radius of Linear Acceleration Analogue Revolving Table-Precision Centrifuge [D]. Tianjin: Tianjin University, 2007.

[7] 刘健，王宝光，刘宇，等. 转台离心机动态半径测试方法的研究[J]. 宇航计测技术，2006，26(6)：1—4.
LIU Jian, WANG Bao-guang, LIU Yu, et al. Revolving Table Centrifugal Machine Dynamic Radius Measuring Method[J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2006, 26 (6): 1—4.

[8] 夏丹. 大过载精密离心机负载盘的优化设计[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2006.
XIA Dan. The Optimum Design of the Load Pan of Precision Centrifuge under Overload Condition[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006.

[9] 夏丹，刘军考，陈维山，等. 基于灵敏度分析的精密离心机负载盘优化设计[J]. 机械设计，2006，23(11)：7—10.
XIA Dan, LIU Jun-kao, CHEN Wei-shan, et al. Optimization Design of Loading Disc of Precision Centrifuge Based on Sensitivity Analysis[J]. Journal of Machine Design, 2006, 23 (11): 7—10.

（上接第77页）

(1): 116—119.

[7] 黎启胜，张映梅，卢永刚，等. 精密离心机结构安装误差对主轴回转精度的影响[J]. 机械设计与制造，2012(2)：5860.
LI Qi-sheng, ZHANG Ying-mei, LU Yong-gang, et al. Effect of Assembly Error of Precision Centrifuge Structure on Rotary Precision of Main Spindle[J]. Machinery Design & Manufacture, 2012(2): 5860.

[8] 杨亚非. 精密离心机上加速度计安装姿态误差和主轴姿态误差对测试的影响[J]. 宇航计测技术，2002，22(4)：30—34.
YANG Ya-fei. The Influence of Accelero-meters Fixing Attitude Errors and Main-axis Attitude Errors on Acceler-ometers Test on the Precision Centrifuge[J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2002, 22(4): 30—34.

[9] 杨亚非. 动不平衡对离心机精度的影响[J]. 测试技术学报，2008，22(2)：95—98.
YANG Ya-fei. Influence of Dynamic Unbalance on Centrifuge Accuracy[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2008, 22(2): 95—98.

[10] 李树森. 精密离心机静压气体轴承主轴系统动力学稳定性研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2002.
LI Shu-sen. Research on the Stability of Pressurized Bearing of the Precision Centrifuge Centrifuge[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2002.

[11] 郭茂政. 论惯性积的平移变换和旋转变换[J]. 大学物理，2004，23(6)：23—31.
GUO Mao-zheng. A Discussion on the Shifting Transformation and Rotating Transformation of Inertial Prouduct[J]. College Physics, 2004, 23(6): 23—31.