舵机滚珠丝杠在内部热源作用下响应特性

蒋　刚[1],赵旭阳[2],贾　斐[2],仇原鹰[2],吴欣凯[1]
(1.上海航天精密机械研究所,上海 201600;2.西安电子科技大学 机电工程学院,陕西 西安 710071)

摘　要: 舵机滚珠丝杠在运行过程中由于摩擦作用和电机运行产生的内部热源会导致其结构温度上升和变形,是影响滚珠丝杠副运行精度的因素之一。本文基于有限元理论建立舵机滚珠丝杠副模型,并通过在ANSYS Workbench中插入命令流的方式实现了在滚珠丝杠上施加移动摩擦热载荷,获得了滚珠丝杠副在内部热源作用下的温度、变形和应力响应特性。结果表明:滚珠丝杠轴向热流密度呈双峰趋势,且其高温区域主要集中在螺母行程范围内的中间区域;随着转速的增加,滚珠丝杠各处温度及其波动幅度加大;丝杠最大热应力位于与轴承配合的轴肩最外侧处。

关键词: 滚珠丝杠; 内部热源; 温度响应; 热变形; 热应力
中图分类号: TH 136　　**文献标志码:** A　　**DOI:** 10.19328/j.cnki.2096-8655.2022.06.017

Response Characteristics of Ball Screw in Steering Gear under Internal Heat Source

JIANG Gang[1], ZHAO Xuyang[2], JIA Fei[2], QIU Yuanying[2], WU Xinkai[1]
(1.Shanghai Spaceflight Precision Machinery Institute, Shanghai 201600, China;
2.School of Mechano-Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, Shaanxi, China)

Abstract: When a ball screw in steering gear is in operation, the internal heat generated by friction and the electrical motor will lead to the temperature rise and thermal deformation of the ball screw pair, which may further reduce the running accuracy of the ball screw pair. In this study, a model for a ball screw pair in steering gear is established based on the finite element method, and the moving frictional thermal load is applied to the ball screw by inserting the command stream in ANSYS Workbench. The responses of the temperature, deformation, and stress are analyzed. The results show that the axial heat flux of the ball screw shows a bimodal trend, and the high temperature area is mainly concentrated in the middle of the nut moving range. With the increase in the rotational speed, both the temperature and the fluctuation magnitude of the ball screw increase. Besides, the maximum thermal stress of the ball screw is located at the edge of the shaft shoulder.

Key words: ball screw; internal heat source; temperature response; thermal deformation; thermal stress

0　引言

舵机是飞行器制导控制系统的执行机构,其中滚珠丝杠副由于效率和传动精度高等优点,近年来被广泛作为其传动机构主要形式[1]。然而,舵机滚珠丝杠在服役工况中,端部驱动电机功率损耗、丝杠轴承摩擦、丝杠与丝杠螺母间的摩擦[2]均会产生热量,形成内部热源,导致滚珠丝杠的温度上升,结构产生热变形和应力应变,影响滚珠丝杠的运行精度,甚至发生卡滞或卡死的情况,导致滚珠丝杠副驱动力矩急剧增加或整个传动系统失效,严重影响系统的传动效率及运行平稳性。因此研究滚珠丝杠在内部热源作用下的特性及其影响规律,对保证其运行精度和可靠性具有一定的工程参考价值。

目前,针对舱段舵机滚珠丝杠热特性研究有限,且多数研究集中于机床领域。其中,国外学者对滚珠丝杠副的热特性研究主要集中在温升特性、热变形以及误差补偿方面。DU等[3]考虑了热源发热和热传递机制,在给定的热载荷和边界条件下采用

收稿日期: 2020-10-17; **修回日期:** 2020-10-29
作者简介: 蒋　刚(1990—),男,硕士,主要研究方向为强度环境与可靠性试验分析。
通信作者: 仇原鹰(1958—),男,博士,教授,主要研究方向为机械CAD/CAE/CAM、机电一体化。

ANSYS分析得到滚珠丝杠副的稳态与瞬态温度分布和热变形。二宫瑞穗等[4]研究了影响螺杆摩擦产热的关键因素，并计算获得了结构温升值及变形量。SANTOS等[5]首先基于摩擦热和对流换热的原理，使用有限元方法(FEM)对机器的热特性进行建模，并使用温度传感器和热成像技术对其进行了验证，其次通过实验和数值模型2种不同的方法对滚珠丝杠系统的热弹性行为进行建模并验证。MIN等[6]考虑了轴承与其支座之间的热接触电阻，通过有限元方法开发了集成热模型，分析了滚珠丝杠进给驱动系统的温度分布，特别是确定了滚珠丝杠副、滚动轴承和导轨中摩擦力引起的功率损耗的理论方法。

在国内，西南交通大学的何震[7]对某机床上的滚珠丝杠进给系统进行了研究，分析了螺母处于某一固定位置时，该滚珠丝杠进给系统的温度场以及热变形。李龙刚[8]以空心滚珠丝杠为研究对象，在空心滚珠丝杠上施加移动载荷，得到其温度场分布，并且通过热-结构耦合分析得到其应力应变响应。在此基础上，针对不同工况下滚珠丝杠热响应特性及其影响规律进行研究。缪亚雄等[9]通过施加移动载荷分析了高速进给机床丝杠传动系统的温度场和热变形。

综上所述，利用有限元软件对滚珠丝杠运行过程中的响应特性进行仿真分析是研究滚珠丝杠性能的一种有效方法[10-13]。本文以舵机内的滚珠丝杠副为研究对象，通过在有限元软件ANSYS Workbench中插入命令流的方式，模拟了滚珠丝杠上的螺母在移动过程中的摩擦生热现象，分析了滚珠丝杠在内部热源作用和不同转速下的温升特性，并根据热-结构耦合仿真分析得到其热变形和热应力响应规律。

1　有限元模型的建立

对舵机内滚珠丝杠副进行三维建模，其主要由滚珠丝杠、螺母和电机支座等组成，各部件的材料类型及参数见表1。

表1　各部件的材料类型及参数

Tab. 1　Materials and parameters of the components

部件	滚珠丝杆、螺母、轴承	电机支座、螺母支座、联轴器、导柱
材料类型	铬钢GGr15	铝LY12
导热系数/(W·m^{-1}·℃$^{-1}$)	36.5	148.0
热膨胀系数/(m·℃$^{-1}$)	1.12×10^{-5}	2.3×10^{-5}
比热容/(J·kg^{-1}·℃$^{-1}$)	460	875
弹性模量/GPa	210	71
密度/(kg·m^{-3})	7 820	2 270
泊松比	0.30	0.33

舵机滚珠丝杠副实物样件如图1所示。由于舵机滚珠丝杠的结构较为复杂，要精确获得其温度场的分布较为困难，因此对模型进行了适当的简化。

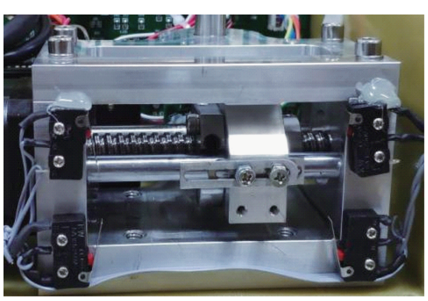


图1　舵机滚珠丝杠副实物样件

Fig. 1　Physical sample of the ball screw in steering gear

舵机滚珠丝杠副模型的网格划分如图2所示。其中，对于螺母、电机支座以及滚珠丝杠等规则的回转体，分别采用六面体和多区域扫掠型划分方法，划分后网格单元数为74 589，节点数为291 556，网格平均精度符合分析要求。

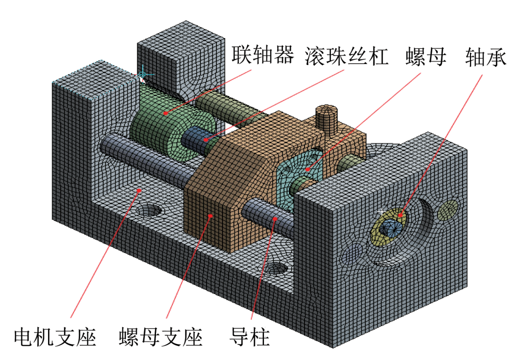


图2　舵机滚珠丝杠副模型

Fig. 2　Finite element model for the ball screw in steering gear

滚珠丝杠在实际运行过程中,螺母在滚珠丝杠上往复移动,造成螺母与丝杠之间的摩擦热源随着时间移动变化。因此,对于丝杠上移动摩擦热源,使用ANSYS参数化设计语言(ANSYS Parametric Design Language,APDL),以命令流形式来实现将螺母的摩擦热量等效为热流密度施加在丝杠表面,具体移动热源实现原理如图3所示。首先,在螺母的行程范围内将滚珠丝杠按照丝杠导程进行切片操作,切分成n等分;其次,采用Name Selection对各导程进行命名调用;最后,根据螺母每次需要移动的时间,采用TIME命令设置每个载荷步的结束时间,每个载荷步下,在丝杠表面施加螺母摩擦热q。同时,通过使用Do循环命令来实现热源的往复移动。

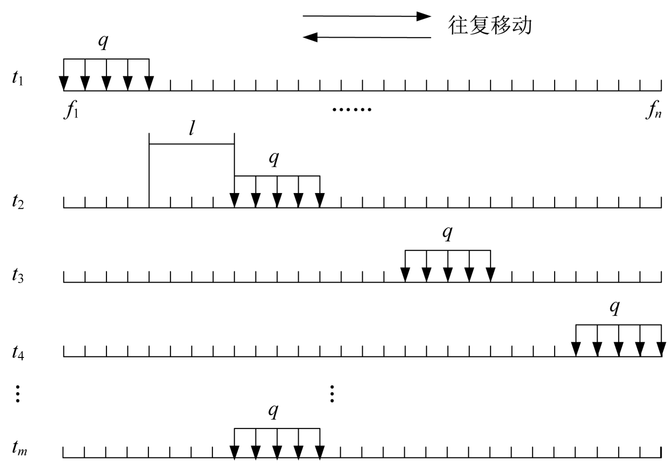


图3 移动热源实现原理图

Fig. 3 Schematic diagram of the moving heat source

2 舵机滚珠丝杠副的温度场分析

2.1 确定工况下滚珠丝杠的温升特性

本部分以滚珠丝杠在1 000 r/min转速下的工况为例进行分析研究。电机功率损耗热量通过导热的形式传输至丝杠端,且其主要与电机转速、电机输出力矩、机械效率相关,电机发热量Q的计算公式如下[10]:

$$Q=\frac{M_{\mathrm{T}}\cdot n}{9\ 550}(1-\eta) \tag{1}$$

式中:M_{T}为电机输出力矩;n为电机转速;η为机械效率。

滚动轴承摩擦主要是由于轴承内外圈转动时,轴承内部各元件对该运动的总阻力而产生的热量,因此该部分热量不仅与轴承的摩擦力矩有关,还与滚珠丝杠的转速成正比[15],其发热量具体计算为

$$Q=1.047\times10^{-4}nM \tag{2}$$

式中:M为摩擦力矩,由载荷相关力矩和转速润滑性质相关力矩两部分组成。

滚珠丝杠螺母副发热量计算表达式与滚动轴承摩擦热相似,其中,螺母副摩擦力矩由驱动力矩和、阻力矩部分组成[16]。

考虑舵机滚珠丝杠工作过程中其内部热源类型和位置,确定丝杠、螺母及其支座与周围空气为强制对流换热,而电机支座与空气为自然对流换热。

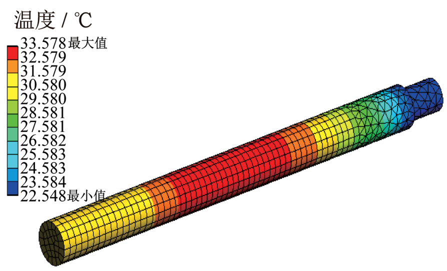
当滚珠丝杠副的轴向力为50 N时,计算获得滚珠丝杠副在1 000、1 500和2 000 r/min转速情况下的发热量见表2。

表2 不同转速下不同位置处发热量

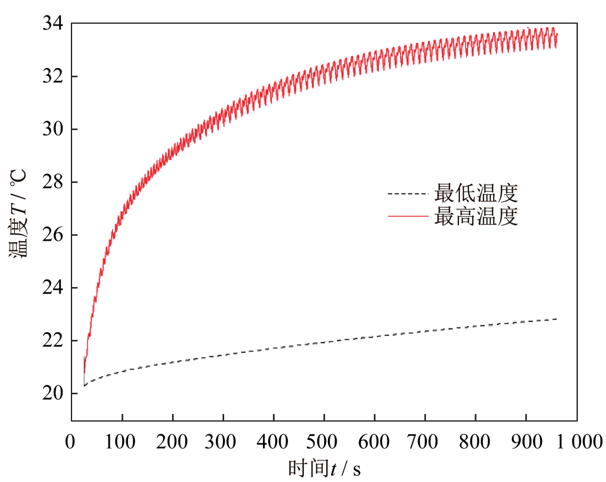
Tab. 2 Heat emitted at different rotational speeds

转速/(r·min^{-1})	1 000	1 500	2 000
前后轴承/(W·m^{-3})	402 856.3	604 284.5	805 712.6
螺母副/(W·m^{-2})	4 421.9	6 619.3	8 825.8
电机/(W·m^{-2})	880	1 320	1 760

滚珠丝杠在 1 000 r/min 转速下的温度分布云图和响应曲线如图 4 所示。由图 4(a)可知,当室温为 20.0 ℃时,滚珠丝杠最终时刻的最高温度约为 33.6 ℃,最低温度约为 22.6 ℃。因螺母的摩擦热源,滚珠丝杠的最高温度集中在中间的螺母行程区域内,两端的温度较低。随着丝杠的持续运行,如图 4(b)所示,滚珠丝杠的温度随之上升,且逐渐趋于稳定。同时由于移动热源的存在,丝杠的最高温度位置呈现出在一定范围内波动现象,波动幅度从 0 ℃逐步增加至 1.0 ℃左右。



(a) 滚珠丝杠温度分布云图

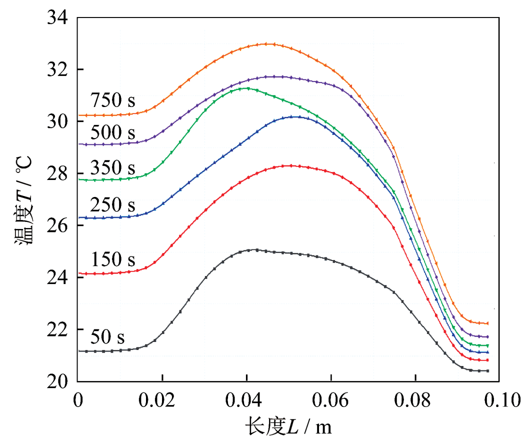


(b) 滚珠丝杠温度响应曲线

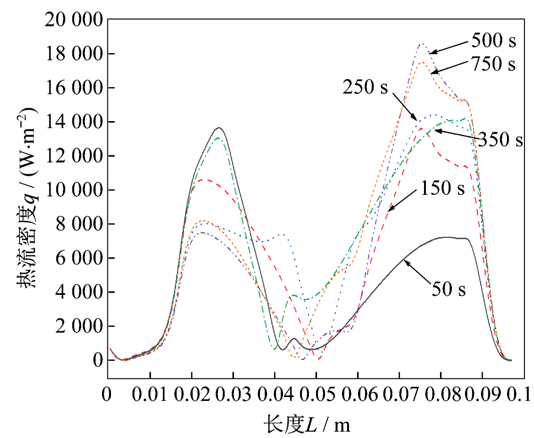
图 4　1 000 r/min 滚珠丝杠温度分布及温度变化

Fig. 4　Distribution and response of the temperature of the ball screw at the rotational speed of 1 000 r/min

不同时刻下滚珠丝杠沿轴向路径的温度曲线和热流密度曲线如图 5 所示。由图 5(a)可知,沿着滚珠丝杠的轴向路径,中间区域温度较高,左端区域温度次之,右端区域较低。随着时间的增加,滚珠丝杠轴向路径温度逐渐抬升,且左端区域和中间区域温度上升幅度较大,右端区域上升幅度较小,在螺母行程范围内,由于移动热源的存在,滚珠丝杠中间区域的最高温度位置会随着时间而变化。由图 5(b)可知,滚珠丝杠轴向的热流密度分布为一种双峰曲线,即中间区域和两端的热流密度较低,而中间到两端区域内的左侧区域和右侧区域的热流密度逐渐增大,且热流密度的大小与温度梯度密切相关,可以看出温度梯度较大的区域其热流密度较大,而温度梯度较小的区域其热流密度也就较小,符合傅里叶定律。



(a) 不同时刻滚珠丝杠轴向路径的温度



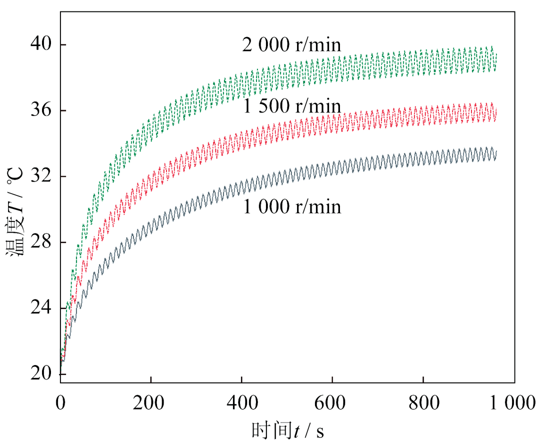
(b) 不同时刻滚珠丝杠轴向路径的热流密度

图 5　不同时刻滚珠丝杠轴向路径的温度和热流密度

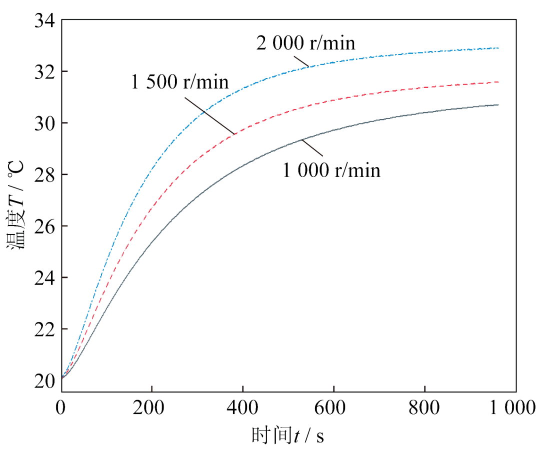
Fig. 5　Temperature and heat flux distribution along the axial direction of the ball screw at different time

2.2　不同工况下滚珠丝杠的温升特性

在不同转速下,舵机滚珠丝杠副各处的摩擦情况不同,则滚珠丝杠的温升特性存在差异。对比 1 000、1 500 和 2 000 r/min 3 种不同转速对舵机滚珠丝杠温升的影响,不同转速下滚珠丝杠最高温度和左端位置处温度变化曲线,如图 6 所示。由图 6 可知,随着转速的增加,滚珠丝杠达最高温度从 33.6 ℃升高至 39.5 ℃,并且其温度波动幅度也随之加大。



(a) 不同转速下滚珠丝杠最高温度变化



(b) 不同转速下滚珠丝杠左端节点温度变化

图 6 不同转速下滚珠丝杠的温度变化曲线

Fig. 6 Transient responses of the temperature of the ball screw at different rotational speeds

3 舵机滚珠丝杠的热变形和应力分析

3.1 确定工况下滚珠丝杠的热变形和应力

通过分析滚珠丝杠的装配关系,对其采用两端约束的方式,考虑到螺母在实际运动过程中,会对滚珠丝杠产生一定的约束,因此对螺母处采用了一种移动约束方法。移动约束与移动热源的实现方法相似,关于移动约束的载荷步设置和移动距离等都和移动热源相同,不同的是将施加螺母热流密度修改为对滚珠丝杠在该长度范围内的径向约束,即DY、DZ约束。

滚珠丝杠在1 000 r/min转速下的热变形分布云图如图7所示。可以看出,丝杠最大总热变形为2.9 μm,而X轴方向即轴向最大热变形为2.8 μm,由此可知在舵机滚珠丝杠运行时产生的热变形中,轴向变形占主要部分,其会导致滚珠丝杠的运行精度降低。但滚珠丝杠径向热变形若较大时,也可能会导致滚珠丝杠出现卡死现象。

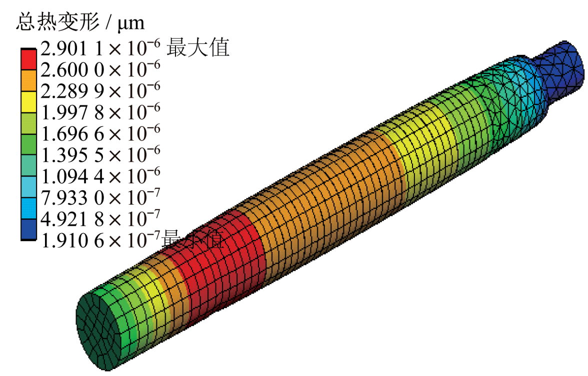


图 7 滚珠丝杠总热变形分布云图

Fig. 7 Total thermal deformation distribution of the ball screw

滚珠丝杠在1 000 r/min转速下的von-Mises应力分布云图如图8所示。滚珠丝杠受热变形后,由于约束的存在会造成一定的应力集中。由图可知,在该转速下滚珠丝杠的最大von-Mises应力约为55.7 MPa。舵机滚珠丝杠的材料为GGr15钢,其抗拉强度为861.3 MPa,屈服强度为518.4 MPa。因此在1 000 r/min转速的工况下,滚珠丝杠产生的热应力远小于其抗拉强度和屈服强度。同时,可以看出滚珠丝杠最大应力主要集中在与轴承配合的轴肩最外侧处,且此处的热应力与中间区域的热应力差值较大,约为中间区域的1.6倍。

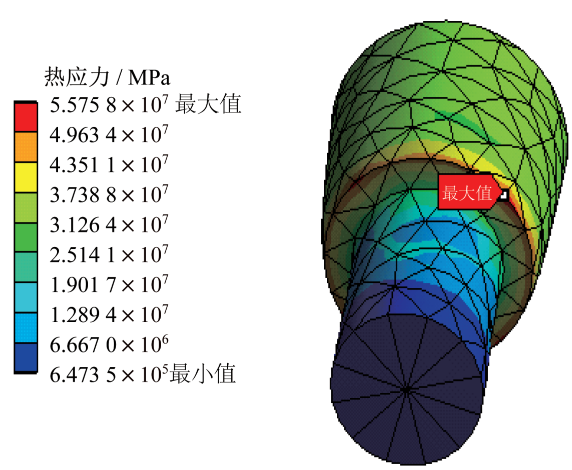


图 8 滚珠丝杠局部位置热应力云图

Fig. 8 Local thermal stress distribution of the ball screw

3.2　不同工况下滚珠丝杠热变形和应力应变

不同转速下滚珠丝杠最终时刻热变形值见表 3。随着转速的增加,滚珠丝杠热变形也随之增大,其中 1 500、2 000 r/min 转速下其最大热变形为 2.98、3.18 μm。

表 3　不同转速下最终时刻热变形

Tab. 3　Thermal deformation at different rotational speeds

转速/($r\cdot min^{-1}$)	1 000	1 500	2 000
最终时刻热变形/μm	2.90	2.98	3.18

不同转速下滚珠丝杠最终时刻热应力值见表 4。可以看出滚珠丝杠热应力随着转速的提高而增加,其中 1 500、2 000 r/min 转速下其最大 von-Mises 应力为 64.4、75.8 MPa,均小于滚珠丝杠的抗压强度和屈服强度。

表 4　不同转速下滚珠丝杠最终时刻的热应力

Tab. 4　Final thermal stress of the ball screw at different rotational speeds

转速/($r\cdot min^{-1}$)	1 000	1 500	2 000
最终时刻热应力/MPa	55.7	64.4	75.8

不同转速下滚珠丝杠最大热应力响应曲线如图 9 所示。滚珠丝杠在 1 000、1 500 和 2 000 r/min 3 种转速下的最大热应力随时间变化趋势相似。但随着转速的增加,其最大热应力值在整个运行过程会明显的增大。

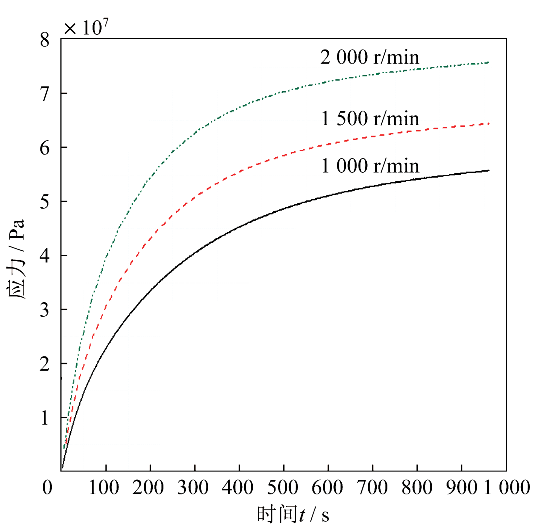


图 9　不同转速下滚珠丝杠最大热应力响应曲线

Fig. 9　Transient response curves of the maximum thermal stress of the ball screw at different rotational speeds

4　结束语

通过建立舵机滚珠丝杠副的有限元模型,提出了一种利用有限元软件进行螺母移动热源和移动约束仿真的方法,分析了滚珠丝杠副的温升特性,并根据热-结构耦合方法,得到滚珠丝杠在内部热源作用下的热变形和热应力。仿真结果对于预测滚珠丝杠的卡滞或卡死位置,改善滚珠丝杠的传动效率和运动平稳性具有指导意义。具体总结出以下方法及结论:

1) 通过在 ANSYS Workbench 中的 Mechanical 中编写 APDL 程序,将螺母的摩擦热量等效为热流密度施加在丝杠表面,以命令流形式实现了对螺母在滚珠丝杠上移动摩擦生热现象的仿真,从而建立了螺母移动热源的仿真方法。同时通过 APDL 命令流施加了螺母的移动约束,得到滚珠丝杠在内部热源作用下的热变形、热应力和热应变。

2) 滚珠丝杠运行时会产生一定的热量,使得滚珠丝杠各部分的温度上升。由于热源位置、热量大小以及接触的不同,滚珠丝杠各处的温度分布也会不同,高温区域主要集中在中间区域的螺母行程范围内。滚珠丝杠轴向的热流密度分布为一种双峰曲线,即中间区域和两端的热流密度较低,而中间到两端区域内的左侧区域和右侧区域的热流密度逐渐增大,随着滚珠丝杠转速的增加,滚珠丝杠各处的温度也随之升高,且温度波动幅度加大。

3) 由于温度分布不均以及约束的存在,滚珠丝杠会产生热变形和热应力,在热变形中轴向变形占主要部分,其会导致滚珠丝杠的运行精度降低,而其应力最大值则位于与轴承配合的轴肩最外侧处。

参考文献

[1] 段小帅,黄建,刘海.滚珠丝杠舵机传动机构形式分析研究[J].导航定位与授时,2017,4(5):39-42.

[2] 夏军勇,吴波,胡友民,等.多变化热源下的滚珠丝杠热动态特性[J].中国机械工程,2008(8):955-958.

[3] DU Z C, YAO S Y, YANG J G. Thermal behavior analysis and thermal error compensation for motorized spindle of machine tools[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2015, 16(7): 1571-1581.

[4] 葛继承,二宫瑞穗.滚珠丝杠的摩擦和温升[J].机床,1981(3):26-29,20.

(下转第 160 页)