

基于不同本构模型的弹性联轴器刚度特性分析

李昊,肖光辉,贺才春,涂奉臣

(株洲时代新材料科技股份有限公司,湖南 株洲 412000)

摘要:分别采用Mooney-Rivlin, Odgen和Yeoh橡胶材料本构模型对永磁同步直驱系统用弹性联轴器进行有限元建模和径向刚度仿真计算,并将仿真计算结果与试验结果进行对比。分析得出,采用Mooney-Rivlin和Odgen模型得到的弹性联轴器径向刚度与试验值偏差较大,采用能够模拟大变形的Yeoh模型得到的弹性联轴器径向刚度与试验值偏差较小, Yeoh模型适用于弹性联轴器及同类产品进行力学性能分析。

关键词:弹性联轴器;径向刚度;本构模型;Mooney-Rivlin模型;Odgen模型;Yeoh模型

中图分类号: TB123; O241.82

文献标志码: A

文章编号: 1000-890X (2020) 07-0529-05

DOI: 10. 12136/j. issn. 1000-890X. 2020. 07. 0529



OSID开放科学标识码
(扫码与作者交流)

永磁同步直驱系统由于不采用齿轮箱等传动装置,因此具有传动效率高、维护量小、噪声低等优点,但其牵引电机直接与轮轴连接而驱动,使得牵引电机需要承受轮轴一体化带来的大量级复杂振动冲击,大大降低了牵引电机的功能可靠性和缩短了使用寿命。因此,对永磁同步直驱系统进行减振设计十分必要,而使用弹性联轴器对牵引电机进行弹性安装是一种风险小、可行性高的方案。

弹性联轴器是机械传动系统中的核心组成部分之一。其主要作用是将主动轴的转矩传递给从动轴,同时还有补偿两轴相对位移和缓冲振动等功能^[1]。弹性元件是弹性联轴器中的关键部件,其刚度和阻尼在很大程度上决定了联轴器的性能^[2]。当前弹性元件按照所采用的材料可分为金属弹性元件和非金属弹性元件两类。前者强度高、载荷传递能力强,但是成本较高、阻尼较小,维护起来比较困难。考虑到橡胶阻尼性能好、质量小,永磁同步直驱系统用弹性联轴器采用橡胶材料弹性元件。

橡胶材料作为超弹性材料,具有大变形、非线性

性和不可压缩等特性。其应力与应变的关系呈明显的非线性关系,力学性能的影响因素也较多^[3],环境条件、应变历程、加载速率等因素都会对其力学性能造成影响。

目前,通过本构模型和利用有限元软件进行仿真计算成为橡胶材料力学性能分析的主要方法之一。由于现有橡胶材料本构模型种类较多,不同本构模型的仿真对计算结果差异较大,在橡胶材料力学性能的仿真计算中选择合适的本构模型成为关键。

本工作使用不同的橡胶材料本构模型对包含橡胶材料弹性元件的永磁同步直驱系统用弹性联轴器进行了刚度仿真计算,并与试验结果进行对比,根据刚度的仿真值与试验值偏差来选择弹性联轴器力学性能分析适合的橡胶材料本构模型。

1 橡胶材料本构模型

作为一种典型的非线性材料,单一的弹性模量不足以表征橡胶材料弹性,因为硬度、载荷和频率等因素都会对橡胶材料弹性造成影响^[4]。目前橡胶材料本构模型大多都是根据唯象理论建立的,该理论假设橡胶材料在未发生变形时是各向同性且不可压缩的。在该理论基础上,橡胶材料本构关系可以用应变能密度函数表达出来^[5-6]:

$$W = W(I_1, I_2, I_3) \quad (1)$$

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2017YFB1200903)

作者简介:李昊(1992—),男,山西忻州人,株洲时代新材料科技股份有限公司助理工程师,工学硕士,主要从事车辆减振降噪技术研究。

E-mail: 619958342@qq.com

其中,自变量满足

$$\begin{cases} I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \\ I_2 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_1^2 \lambda_3^2 \\ I_3 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2 = 1 \\ \lambda_f = 1 + \gamma_f \end{cases} \quad (2)$$

式中, I_1, I_2, I_3 分别为第一、第二、第三变形张量不变量, $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 分别为第一、第二、第三主伸长率, γ_f 为主应变, f 可取1—3。

目前通过应变能密度函数建立的橡胶材料本构模型主要有Mooney-Rivlin, Odgen和Yeoh模型等。

1.1 Mooney-Rivlin模型

Mooney-Rivlin模型是目前最简单的超弹模型,待定参数较少,在工程上应用较为广泛。该模型^[7]可以用来模拟几乎所有橡胶材料的力学行为,其应变能密度函数模型如下:

$$W = \sum_{i+j=1}^{N_1} C_{ij} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j + \sum_{l=1}^{N_1} \frac{1}{d_l} (J - 1)^{2l} \quad (3)$$

常用的二项式为

$$W = C_{10} (I_1 - 3) + C_{01} (I_2 - 3) + \frac{1}{d_1} (J - 1)^2 \quad (4)$$

式中: C_{ij} 和 d_l 为材料参数(d_l 为压缩参数),由试验数据拟合得出^[8]; J 为材料变形后与变形前体积比,材料不可压缩时, $J=1$; N_1 为多项式阶数; $i=0, 1, 2, \dots, N_1$; $i+j=1, 2, \dots, N_1$; $l=1, 2, \dots, N_1$ 。

1.2 Odgen模型

Odgen模型可以通过调整多项式阶数来自由拟合试验数据,其应变能密度函数模型如下:

$$W = \sum_{\eta=1}^{N_2} \frac{2\mu_\eta}{\alpha_\eta^2} (\lambda_1^{\alpha_\eta} + \lambda_2^{\alpha_\eta} + \lambda_3^{\alpha_\eta} - 3) + \sum_{m=1}^{N_2} \frac{1}{d_m} (J - 1)^{2m} \quad (5)$$

式中: μ_η, α_η 和 d_m 为材料参数(d_m 为压缩参数),由试验数据拟合得出; N_2 为多项式阶数; $\eta=1, 2, \dots, N_2$; $m=1, 2, \dots, N_2$ 。

由于 N_2 增大时计算精度会提高,造成计算时间延长,甚至导致模型收敛困难,因此工程上一般不建议使用 $N_2 \geq 4$ 的Odgen模型进行仿真计算。

1.3 Yeoh模型

Yeoh模型也是较为常用的橡胶材料本构模型,其应变能密度函数式^[7,9]如下:

$$W = \sum_{n=1}^{N_3} C_{n0} (I_1 - 3)^n + \sum_{k=1}^{N_3} \frac{1}{d_k} (J - 1)^{2k} \quad (6)$$

常用的二项式为

$$W = C_{10} (I_1 - 3) + C_{20} (I_2 - 3) \quad (7)$$

式中: C_{n0} 和 d_k 为材料参数(d_k 为压缩参数),由试验数据拟合得出; N_3 为多项式的阶数; $n=1, 2, \dots, N_3$; $k=1, 2, \dots, N_3$ 。

由Yeoh模型可以得到较为典型的S形应力-应变曲线,较为符合橡胶材料高度非线性的超弹性力学特性,因此是工程中经常选用的本构模型之一。

2 弹性联轴器刚度分析

永磁同步直驱系统用弹性联轴器主要由3部分组成,如图1所示。其中,楔形橡胶环为橡胶/金属硫化件,电机侧连接盘一端与电机转子部分固定,另一端与楔形橡胶环固定;轮轴侧连接盘一端与车轴固定,另一端与楔形橡胶环固定。因此,具有减振作用的楔形橡胶环与轮轴及电机共同组成



(a) 左侧视图



(b) 右侧视图

1—电机侧连接盘;2—楔形橡胶环;3—轮轴侧连接盘。

图1 弹性联轴器侧视图

一个减/隔振系统。

为降低计算的复杂性,对模型中不影响计算精度的局部细节几何特征进行合理简化,例如采用圆角和倒角等。在有限元软件Abaqus中建立弹性联轴器的三维模型并划分网格,总共划分得到243 758个单元,如图2所示。其中,橡胶元件单元类型为C3D8H,为保证结果可靠,选用两种不同硬度的橡胶材料进行仿真计算,材料参数分别按照Mooney-Rivlin, Odgen和Yeoh本构模型进行拟合。

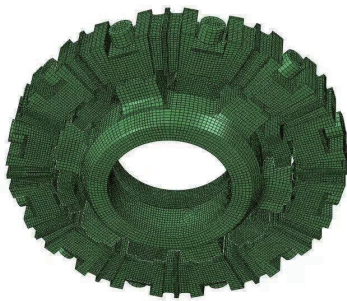


图2 弹性联轴器网格单元

为了模拟实际工作情况,仿真计算分两步进行:第1步模拟联轴器的装配过程,即使用螺栓将楔形橡胶环与电机侧连接盘、轮轴侧连接盘固定起来,此过程会对橡胶材料进行较大的预压缩;第2步则在固定电机侧连接盘的同时对轮轴侧连接盘的参考点施加径向位移载荷,载荷值为3 mm。设定输出参考点的位移及反力,便可得到相应的力-位移曲线。

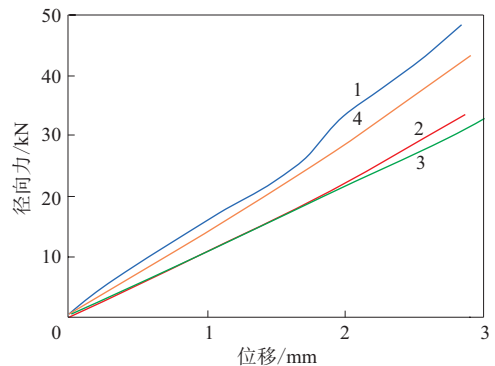
为了比较3种橡胶材料本构模型的适用性,使用与仿真计算所用材料参数对应的橡胶材料分别制作联轴器试样1和2,并在刚度试验机上进行试样的径向刚度试验,试验现场如图3所示。

试验得到的弹性联轴器径向力-位移曲线与



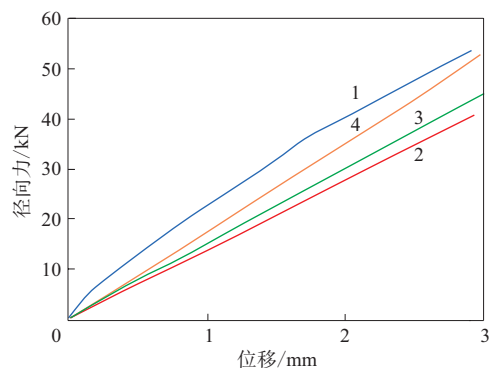
图3 径向刚度试验现场

使用3种橡胶材料本构模型计算得到的弹性联轴器径向力-位移曲线如图4和图5所示。



1—试验曲线;2—Mooney-Rivlin模型仿真曲线;3—Odgen模型仿真曲线;4—Yeoh模型仿真曲线。

图4 试样1径向力-位移曲线



注同图4。

图5 试样2径向力-位移曲线

3 使用不同橡胶材料本构模型的弹性联轴器径向刚度仿真偏差对比

从图4和5可以看出,弹性联轴器径向力-位移曲线近似为直线。利用最小二乘法将使用3种橡胶材料本构模型仿真曲线与试验曲线拟合成一次函数,比较仿真值与试验值偏差。

弹性联轴器试样1和2的径向刚度试验数据拟合结果如下:

$$\begin{cases} Y_1 = 16.415x + 0.762 \\ Y_2 = 19.111x + 3.149 \end{cases} \quad (8)$$

式中, Y_1 和 Y_2 分别为试样1和2的径向力, x 为位移。

即试验测得弹性联轴器试样1和2的径向刚度分别为16.415和19.111 $\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1}$ 。

弹性联轴器试样1利用Mooney-Rivlin, Odgen

和Yeoh模型得到的径向刚度拟合结果为:

$$\begin{cases} y_1^1 = 11.144x + 0.018 \\ y_1^2 = 10.884x + 0.045 \\ y_1^3 = 14.262x + 0.006 \end{cases} \quad (9)$$

式中: y_1 为试样1的径向力; y_1 上标1,2,3分别代表Mooney-Rivlin, Odgen, Yeoh模型; x 为位移。

弹性联轴器试样2利用Mooney-Rivlin, Odgen和Yeoh模型得到的径向刚度拟合结果为:

$$\begin{cases} y_2^1 = 13.840x + 0.035 \\ y_2^2 = 15.009x + 0.100 \\ y_2^3 = 17.615x + 0.010 \end{cases} \quad (10)$$

式中: y_2 为试样2的径向力; y_2 上标1,2,3分别代表Mooney-Rivlin, Odgen, Yeoh模型。

使用不同橡胶材料本构模型的弹性联轴器径向刚度仿真偏差如表1所示。

表1 使用不同橡胶材料本构模型的弹性联轴器
径向刚度仿真偏差

本构模型	径向刚度/(kN·mm ⁻¹)	仿真偏差/%
试样1		
Mooney-Rivlin	11.144	32.1
Odgen	10.884	33.7
Yeoh	14.262	13.1
试样2		
Mooney-Rivlin	13.840	27.6
Odgen	15.009	21.5
Yeoh	17.615	7.80

从表1可以看出,对于两种橡胶材料硬度的弹性联轴器,采用Odgen和Mooney-Rivlin模型仿真计算得到的径向刚度与试验值偏差都远大于使用Yeoh模型仿真计算时得到的径向刚度与试验值偏差。这说明对于本工作所研究的用于永磁同步直驱系统的弹性联轴器而言,在楔形橡胶环通过螺栓装配产生预压而发生较大变形后,Odgen和Mooney-Rivlin模型无法很好地拟合其刚度特性,

而Yeoh模型则能较好地拟合。

4 结语

采用Mooney-Rivlin, Odgen和Yeoh橡胶材料本构模型对永磁同步直驱系统用弹性联轴器径向刚度进行计算与分析,可知不同的橡胶材料本构模型对弹性元件的力学性能分析结果相差很大。由于弹性联轴器在装配过程中对楔形橡胶环产生较大的压缩,采用Mooney-Rivlin和Odgen模型仿真计算得到的刚度与试验值偏差较大;采用Yeoh模型能够较准确地拟合联轴器刚度特性。因此,针对本工作研究的弹性联轴器, Yeoh模型能够更好地描述其装配后的力学性能,也适用于同类产品相关性分析。

参考文献:

- [1] 杨江兵. 挤压和扭转复合式弹性联轴器设计与研究[D]. 重庆:重庆大学, 2013.
- [2] 潘飞. 新型钢丝绳弹性联轴器设计及其弹性阻尼元件特性试验研究[D]. 重庆:重庆大学, 2015.
- [3] 侯传伦, 戚援, 王慎, 等. 基于Mooney-Rivlin模型和Yeoh模型的橡胶弹性车轮刚度特性分析[J]. 内燃机与配件, 2018(11): 38-40.
- [4] 张良, 李忠华, 马新强. 橡胶Mooney-Rivlin超弹性本构模型的参数特性研究[J]. 噪声与振动控制, 2018, 38(22): 69-72.
- [5] 黄建龙, 解广娟, 刘正伟. 基于Mooney-Rivlin模型和Yeoh模型的超弹性橡胶材料有限元分析[J]. 橡胶工业, 2008, 55(8): 467-471.
- [6] 王国权, 刘萌, 姚艳春, 等. 不同本构模型对橡胶制品有限元法适应性研究[J]. 力学与实践, 2013, 35(4): 42-49.
- [7] 袁泉, 徐中明, 张志飞. 基于本构模型的橡胶衬套刚度分析[J]. 世界科技研究与发展, 2014(5): 485-487.
- [8] 徐立, 吴桂忠. 有限元分析中橡胶应变能函数的若干形式[J]. 橡胶工业, 1999, 46(12): 707-711.
- [9] 侯传伦, 戚援, 王慎, 等. 基于Mooney-Rivlin模型和Yeoh模型的橡胶弹性车轮刚度特性分析[J]. 内燃机与配件, 2018(11): 38-40.

收稿日期: 2020-04-24

Stiffness Characteristic Analysis of Resilient Coupling Based on Different Constitutive Models

LI Hao, XIAO Guanghui, HE Caichun, TU Fengchen
(Zhuzhou Times New Material Technology Co., Ltd., Zhuzhou 412000, China)

Abstract: The rubber material constitutive models, Mooney Rivlin, Odgen and Yeoh models, were

applied to study the properties of the resilient coupling used in the permanent magnet synchronous direct drive system, the radial stiffness of the resilient coupling was calculated, and the simulation results were compared with the test results. The analysis results showed that the radial stiffness of the resilient coupling obtained by Mooney Rivlin and Odgen models deviated greatly from the testing results, while the radial stiffness obtained by Yeoh model which could simulate large deformation had only small deviation. Yeoh model was more suitable for the mechanical property analysis of the resilient coupling and similar products.

Key words: resilient coupling; radial stiffness; constitutive model; Mooney-Rivlin model; Odgen model; Yeoh model

赛轮越南工厂300万套轿车子午线(PCR)轮胎扩产项目首胎下线 2020年5月25日,赛轮集团越南工厂300万套PCR轮胎扩产项目首条半钢子午线轮胎正式下线,下线首胎规格为235/55R18 BH15。

据悉,300万套PCR轮胎扩产项目是赛轮集团越南工厂2020年重大项目之一。项目建设过程中,集团副总裁、生产中心总经理谢小红定期组织远程会议,安排项目进度,提供资源支持;项目组部分成员放弃春节休假,克服新冠肺炎疫情影响,按期完成老设备的搬迁及新设备的安装调试工作,保障了项目节点的顺利达成。越南工厂300万套PCR轮胎扩产项目采用行业一流的技术与设备,以生产高端、大规格半钢子午线轮胎为主。该项目全部达产后,能够有效满足市场需求。

(本刊编辑部)

两大轮胎项目列入湖北省2020年省级重点建设计划名单 据湖北省发改委网站报道,2020年5月20日,湖北省发改委印发了《湖北省2020年省级重点建设计划》,共安排项目410个,总投资13 291亿元,年度计划投资2 263亿元,较2019年分别增长38.5%、3.4%和9.5%。

其中,两个轮胎建设项目进入计划名单,分别为荆门年产1 446万条高性能轮胎及配套项目和佳顺轮胎年产300万条全钢轮胎项目。

据悉,荆门项目在玲珑轮胎的生产基地,总投资54.0亿元,2020年计划投资5亿元,截至目前,该轮胎新工厂已经部分投产。佳顺轮胎项目于2019年11月8日奠基,是湖北奥莱斯轮胎有限公司下属产业,总投资为20亿元,2020年计划投资4亿元。

(本刊编辑部)

一种低压缩永久变形高抗撕硅橡胶弹性体及其制备方法 由平湖阿莱德实业有限公司申请的专利(公布号 CN 110862691A,公布日期 2020-03-06)“一种低压缩永久变形高抗撕硅橡胶弹性体及其制备方法”,涉及的硅橡胶弹性体配方为:有机聚硅氧烷 100,片状硅酸盐填料 45~70,结构化控制剂 5~10,热稳定助剂 0.5~3,交联密度调节剂 1~5,硫化剂 3~8。其制备步骤为:将有机聚硅氧烷、片状硅酸盐填料、结构控制剂、热稳定助剂和交联密度调节剂在密闭式捏合机内混合均匀,得到硅橡胶混合料;将硅橡胶混合料移至密炼机中混炼均匀后进行分段高温热处理(抽真空),将胶料冷却至常温;在开炼机中加入硫化剂后再经硫化即制得硅橡胶弹性体。该硅橡胶弹性体具有优异的抗压缩永久变形性能和抗撕裂性能。

(本刊编辑部 赵 敏)

一种橡胶-钢纤维混凝土组合板及其制作方法 由河海大学申请的专利(公布号 CN 110206218A,公布日期 2019-09-06)“一种橡胶-钢纤维混凝土组合板及其制作方法”,涉及的橡胶-钢纤维混凝土组合板包括橡胶挖孔板、钢纤维混凝土、预留螺栓通孔、连接螺栓、定位马凳、浇筑模板、板连接件和塑料隔离管。先将橡胶挖孔板成组合板的骨架,再安装浇筑模板和浇筑钢纤维混凝土形成橡胶-钢纤维混凝土组合板,该组合板既可以工厂预制也可以现场浇筑。该橡胶-钢纤维混凝土组合板抗震能力和耗能能力强,且受地震损害后可以重新安置,即敲碎震损钢纤维混凝土后进行修复处理。

(本刊编辑部 赵 敏)