

模拟同步带的半实物仿真测试研究

严璐 张爱军 李坤龙

(南京理工大学机械工程学院 南京 210094)

摘要:针对永磁同步电机测试过程中加载负载繁琐、效率低下的问题,设计了一种硬件在环的半实物仿真测试系统和模拟负载的测试方案。研究同步带带载模型,对同步带空载的工况建模并实验,以验证模型准确性和测试系统合理性。首先分析并建立同步带的传统动力学模型及虚拟样机模型,针对这两种建模方法,对比选择更精确的模型。将模型解算结果加载到测试系统中,得到模拟负载的测试数据,与实测同步带测试数据对比,验证了所建模型的准确性。

关键词:半实物仿真;电机测试;模拟负载

中图分类号: TP306 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8040

Hardware-in-the-loop simulation test for synchronous belt

Yan Lu Zhang Aijun Li Kunlong

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: This paper presented a hardware-in-the-loop simulation testing system with artificial load to solve the problem, complex loading style and low efficiency in traditional PMSM testing system. A model for synchronous belt was designed and relevant experiments was done to verify the accuracy of the model and the rationality of the testing system. Traditional dynamic model and virtual prototype model were built. Then they were compared and a more accurate model was adopted to load in the testing system. The comparison between the simulation and actual test verified the accuracy of the model.

Keywords: hardware-in-the-loop simulation; motor test; artificial load

0 引言

在专业应用领域,经常会采用永磁同步电机作为专业设备的驱动源,所以在电机的设计、生产、运行及维修过程中,必须根据有关项目的驱动设备的技术指标要求,对所选取电机的各种参数和技术指标进行必要的试验测试。由于工业现场应用种类繁多,各种带载机构不仅结构复杂,难以复现;并且相同的带载机构,机构的大小稍有不同,测试结果也不同。所以,动态模拟负载系统对提高测试效率、降低测试成本、减小人工操作复杂度具有重要意义。

在传统电机测试过程中,惯性负载一般使用飞轮模拟,但存在惯量调节不方便、不能无级调整,成本较高,安装、使用及维护困难的问题^[1]。针对这些问题,一些专利提出自动微调可变转动惯量式飞轮系统^[2],通过移动飞轮辐条上的质量块改变飞轮转动惯量^[3]。但实

际应用场合中,纯惯性负载的情况较小,因而该方法有很大局限性。针对非惯性负载,文献[4]设计了一种通过弹性元件变形产生的弹性力来模拟工作负载的模拟测试方法。但这种模拟对弹性元件材料要求很高,并且通过复杂的有限元计算后,得到的数据不具有通用意义。为了使一次加载可以多次测试,并且适用于不同工况下的测试,RYU H M首先采用伺服电动机作为加载元件并组成电动伺服负载模拟器^[5]。在伺服电机测试过程中,需要控制的陪测电机机械特性是负载转矩和负载惯量。

本文结合电机控制特性,设计一种模拟同步带带载的半实物仿真测试系统^[6-7]。使用一台伺服驱动器模拟负载的机械特性,采用对拖的形式,将模拟负载加载到被测电机上。首先针对同步带带载测试,分析两种同步带建模方法:传统状态方程解算和多体动力学仿真。根据状态方程的建模过程如下:分析同步带力学模型,对力学模型进行

收稿日期:2017-04

简化,得到系统状态方程。多体动力学建模采用虚拟样机技术,使用 ADAMS 软件建立同步带模型,通过计算机解算得到系统模型。为了验证模拟负载合理性,搭建在环仿真的硬件架构,将模拟负载的测试结果与同步带实测的结果进行对比^[8]。

1 动力学方程建模法

1.1 负载转矩分析

同步带是弹性体,因此可将同步带简化为弹簧和刚性轴结合的运动体。同步带简化的运动模型如图 1 所示。

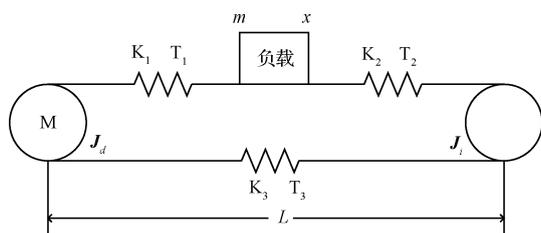


图 1 同步带运动模型

对上图所示模型进行运动分析,得到动力学方程为:

$$\begin{cases} M_d = (T_1 - T_3) \cdot r + J_d \cdot \ddot{\theta}_d + c_d \cdot \dot{\theta}_d + \\ c_{x3}(\dot{\theta}_i - \dot{\theta}_d) + f_d \\ T_1 - T_2 = m\ddot{x} + c_{x1}(\dot{\theta}_d - \dot{x}) + f_x \\ (T_2 - T_3) \cdot r = J_i \cdot \ddot{\theta}_i + c_i \cdot \dot{\theta}_i + \\ c_{x2}(\dot{x} - \dot{\theta}_i \cdot r) + f_i \end{cases} \quad (1)$$

式中: M_d 为电机输出转矩, r 为主动轮和从动轮的半径, J_d, J_i 分别为主动轮和从动轮的转子惯量, c_d, c_i 分别为主动轮和从动轮的阻尼系数, f_d, f_i 分别为主动轮和从动轮与同步带的摩擦力, $c_{x1}, c_{x2}, c_{x3}, T_1, T_2, T_3$ 分别为三段同步带的阻尼系数,以及传动过程中带张力与预紧力的差值, m, x 分别为负载的质量和位置。其中 T_1, T_2, T_3 可以用下列方程表示:

$$\begin{cases} T_1 = k_1 \cdot (\theta_d - x) \\ T_2 = k_2 \cdot (x - \theta_i \cdot r) \\ T_3 = k_3 \cdot (\theta_d - \theta_i \cdot r) \end{cases} \quad (2)$$

当负载运动到同步带 x 位置时, k_1, k_2, k_3 可以表示为:

$$\begin{cases} k_1 = k_b / (L - x) \\ k_2 = k_b / x \\ k_3 = k_b / L \end{cases} \quad (3)$$

将上述等式联立,可得:

$$M_d = J_d \ddot{\theta}_d + c_d \dot{\theta}_d + k_2 \dot{\theta}_i + f_d \quad (4)$$

式中: J_d, c_d, k_2 为与上述已知量的相关表达式, f_d 为系统中库伦摩擦与黏滞摩擦总和。

1.2 负载惯量分析

惯量即刚体绕轴转动的度量,通常用 J 表示。转动惯量只取决于刚体的形状、质量分布和转轴的位置,而与刚体绕轴的转动状态(如电机转速)无关。

同步带带载是典型的切向带载运动。切向负载结构如图 2 所示。

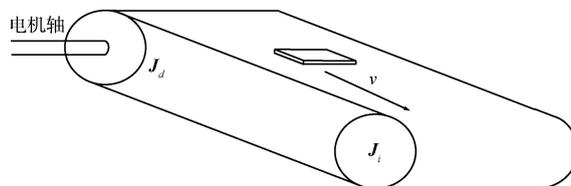


图 2 同步带运动负载结构示意图

对图 2 所示同步带带载运动进行惯量分析,电动机轴上的惯量为:

$$J = J_d + J_i + J_l \quad (5)$$

式中: J_d, J_i 分别为主动轮和从动轮转动惯量, J_l 为同步带和负载相对于电机轴的惯量。同步带和负载是电机轴的摩擦负载,根据惯量计算公式,可得:

$$J_l = \mu(G_B + G_L)r \quad (6)$$

式中: μ 为静摩擦系数, G_B, G_L 分别为同步带和负载重量(N)。由此可知,同步带带载的负载惯量是常量,与负载所在位置无关。

1.3 模型分析

同步带在系统传动过程中会发生多种变形,既有大的平动和转动,又具有弹性变形的特点。根据有限元思想,同步带可离散成许多刚性带元和柔性连接模型。而上述动力学方程建模过程中,为了方程解算方便,将同步带等效成一个弹簧和两段刚性轴相连的运动体。这种建模方式忽略了各刚性带元之间的相互作用,对于同步带中张紧力的分析不准确,尤其是同步带启动瞬间的瞬时冲击影响分析不准确。在同步带进入啮合阶段时,同步带与带轮产生接触力,接触力与接触面积、弹性滑动、材料差异、带齿误差等因素密切相关,上述建模方法无法对其准确模拟,因而舍弃了对接触力影响的考量。

除此之外,同步带传动还有许多传统建模方法无法或不便于建模分析的影响因子,模型的准确性因此大大降低。

2 利用虚拟样机建立负载模型

同步带系统是柔性多体系统,柔性系统中柔性效应的引入带来的刚-柔耦合问题是柔性多体系统动力学中研究的热点和难点。国内外学者对于柔性多体系统的研究也主要围绕着建模、数值计算以及柔性多体系统的振动控制等几个方面展开。针对同步带的虚拟样机技术主要用在同步带设计阶段,用仿真数据优化同步带结构,从而得到

减小同步带振动的效果^[9-10]。本文使用 ADAMS 对同步带进行仿真,研究带传动系统传动比、张紧力变化、带的动力学行为对系统性能的影响^[11]。

2.1 同步带虚拟样机建模

ADAMS/Machinery 模块是完全集成到 ADAMS/View 模块环境中,包含多个专业的建模功能模块。模块通过几何形状创建、子系统连接等自动化操作来引导用户进行预处理,方便用户更加高效地创建通用机械部件。

常用的同步带系统一般由主动轮、从动轮、胶带等装置构成。使用 Machinery 模块的 Belt 组件可以方便添加构建并设置主从动轮宽度、齿间距、同步带长度、材料阻尼系数、摩擦系数等。本次建模的同步带对象相关参数如表 1 所示。

定义完成的模型如图 3 所示。该模型将同步带离散为若干个带元,采用柔性连接的方式连接相邻带元。同步带的应用场合大部分要求定位准确,本实验选择自定义函数驱动主动轮,驱动函数为常值函数: Motion = 720 d。

模型在 Simulation 模块仿真,仿真设置输出步长时应综合考虑系统要求。步长太大不能反映样机的高频响应,步长太小会大大增加仿真分析时间,同时使输出文件很大。一般每个响应循环至少应该有 5~10 步输出,线性分析本系统自然频率后,设置仿真时间 3 s,输出步长为 0.000 6 s。



图 3 ADAMS 建立的同步带模型

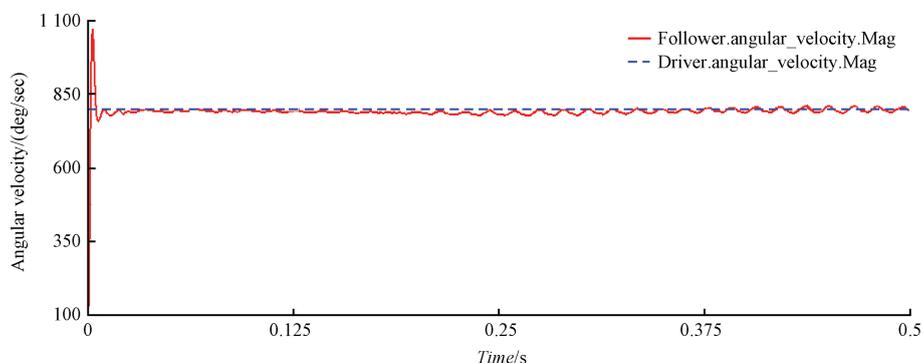


图 4 主从动轮角速度对比

表 1 被模拟同步带的相关参数

参数名	数值	单位
J_d	0.8×10^{-4}	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$
J_i	0.8×10^{-4}	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$
m	0	kg
r	0.025	m
L	0.9	m
k	33	$\text{N} \cdot \text{m}/\text{rad}$
G_B	13.5	N

2.2 模型分析

如图 4 所示为主动轮和从动轮角速度对比。可以看出,主动轮始终以给定的速度匀速转动,而从动轮的转速经历了一个波动阶段,与实际测试情况吻合。产生该现象的原因是,当主动轮启动时,带中的张紧力迅速达到最大值,从动轮的转速因此从零迅速上升至较大值。随着从动轮的转动,带中的张紧力减小并稳定在一个值上波动,而从动轮的转速也因此呈现一定的波动性和周期性。

为了分析接触力对同步带运动的影响,取同步带 51 和 52 号带元的接触力图做分析。由图 5 可知,相邻带元

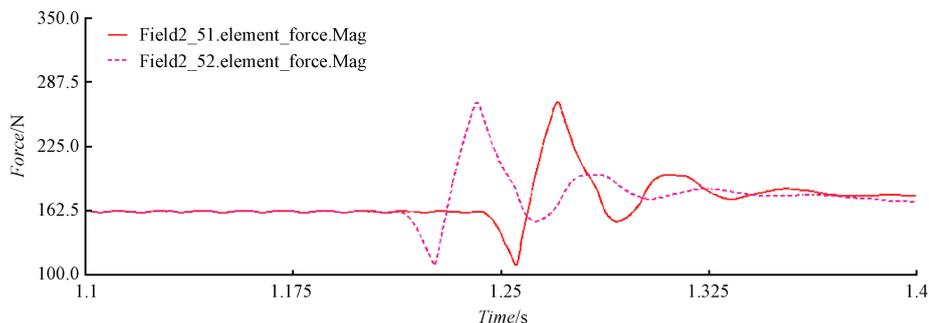


图5 相邻带元接触力示意图

之间接触力的产生有先后顺序,且慢慢达到最大。说明接触力只在带轮与带块相互接触时才能产生。带轮与带轮齿的不同接触面积导致接触力在数值上的大小波动,与实际情况吻合。

3 硬件架构

交流伺服控制系统是一个高阶、非线性、强耦合的多输入多输出系统,磁路饱和、逆变器死区效应等难以建模的非线性因素导致建立传统数学模型不仅十分复杂而且准确度低^[6]。因而传统纯数学仿真难以评估控制系统实际性能。因此,硬件在回路(hardware-in-loop,

HIL)仿真逐渐成为评估交流伺服控制系统的重要工具。硬件在回路仿真将物理对象加入控制仿真回路中,由于介入了难以建立数学模型的部分,仿真结果置信度较高。

在 X86 服务器上运行 PharlapS 实时系统,控制程序和负载模拟部分均以图形化方式编程 LabVIEW 软件实现,接口统一,测试验证伺服性能便捷^[12-15]。为了实现控制过程电流交-直-交的转换,设计一块自动测试板实现驱动器功率模块的功率转换功能。自动测试板同时采集电机测试数据。模拟负载的测试系统硬件结构如图 6 所示。

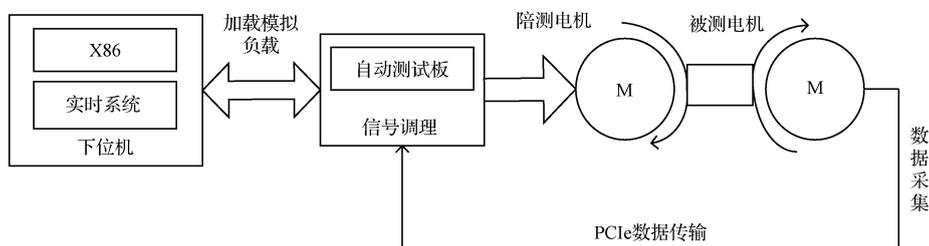


图6 模拟负载测试系统硬件架构

4 实验验证

将 ADAMS 仿真后的主动轮力矩值和计算得到的负载惯量值,加载到负载模拟的测试系统中,以模拟负载的形式进行测试。为了更直观的验证模拟负载的准确性,首先测量被模拟的同步带实际运行情况,在电机各参数保持不变的情况下,以模拟负载的方式进行测试。两次测试过程都以被测电机编码器反馈作为测试反馈值,与给定脉冲对比。实测同步带测试结果如图 7 所示。在修正阻尼系数,带元数等模型参数后,模拟同步带得到的测试结果如图 8 所示。

通过计算,得到两组测试分别的动态性能数据如表 2 所示。

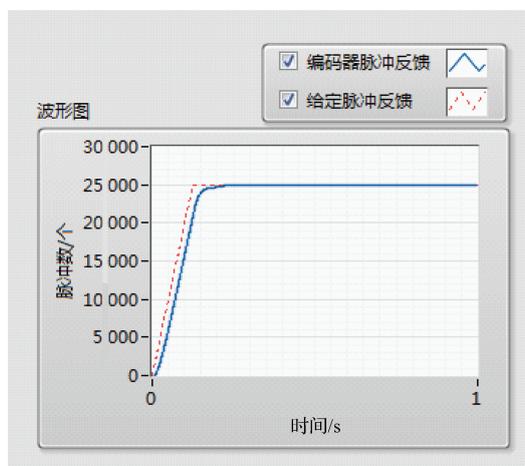


图7 实测同步带结果

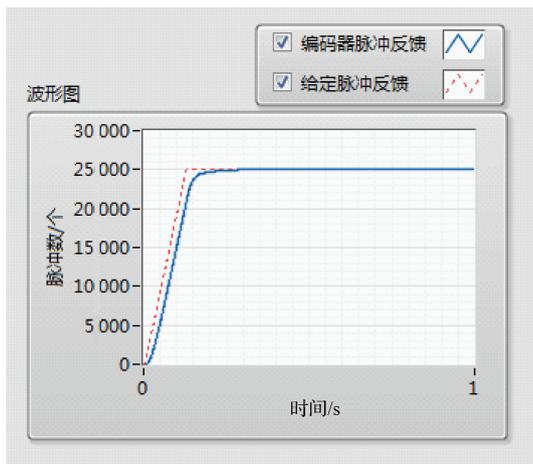


图8 模拟同步带结果

表2 同步带实测与模拟负载测试结果对比

	上升时间/	定位完成	峰值时间/	稳态误差/
	s	时间/s	s	个
实测同步带	0.36	0.44	0.44	1
模拟同步带	0.35	0.4	0.4	1

5 结论

实验结果表明,利用 ADAMS 对同步带模型进行离散化处理,使带元之间的柔性连接更加真实。同时解决了状态解算建模方法中,带元与带轮的接触力解算难题。容易得到结论:这种基于虚拟样机技术对同步带传动动态特性的研究方法和传统的研究方法相比,具有明显的优越性,可以得到全面的同步带传动动态参数,对后期模拟负载测试系统的研究工作有很大的参考价值。

参考文献

- [1] 刘燕. 动态负载模拟系统的控制及研究[D]. 镇东: 江苏科技大学, 2015.
- [2] 苏建. 自动微调可变转动惯量式飞轮系统: 中国, 101236133[P]. 2008-08-06.
- [3] 束建芳. 转动惯量可变的飞轮在飞轮调节实验中的

应用[J]. 机械工程师, 2015(11): 31-32.

- [4] 范东林. 一种负载模拟器的设计[J]. 机械工程师, 2013(12): 152-154.
- [5] RYU H M, KIM S T, SUL S K, et al. Dynamic load simulator for high-speed elevator system. [C]. Proceedings of the Power Conversion Conference, 2002: 885-889.
- [6] 朱渊渤. 永磁同步电机伺服控制系统的研究与开发[D]. 无锡: 江南大学, 2012: 15-17.
- [7] 包贵浩, 苏东林, 戴飞, 等. 飞机油量表电磁兼容半实物仿真预测平台设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(2): 152-158.
- [8] 蔡源春, 周云山, 张飞铁, 等. 基于硬件在环仿真技术的无级变速器试验系统研究[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(5): 960-961.
- [9] 马志平, 葛正浩, 姚增凯, 等. 同步带传动的虚拟样机建模与动态性能研究[J]. 机械传动, 2013(3): 31-33.
- [10] 张凯凯. 同步带传动的动态性能研究[D]. 西安: 陕西科技大学, 2012: 13-15.
- [11] 郭卫东. ADAMS2013 应用实例精解教程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2015: 127-163.
- [12] 李国清, 杨国胜, 王勇. 基于 LabVIEW 的雷达自动测试系统[J]. 国外电子测量技术, 2009, 28(2): 31-34.
- [13] 陈福彬, 柴海莉, 高晶敏. 基于 LabVIEW 的自动化测试平台的设计[J]. 国外电子测量技术, 2012, 31(11): 9-10.
- [14] 李红刚, 张素萍. 基于单片机和 LabVIEW 的多路数据采集系统设计[J]. 国外电子测量技术, 2014, 33(4): 62-67.
- [15] 王丽, 郭红霞. 基于 LabVIEW 的汽车动力性能测试系统研究[J]. 国外电子测量技术, 2017, 36(2): 41-48.

作者简介

严璐, 1992 年出生, 工学硕士在读, 主要研究方向为仪器测试技术、电机测试系统等。
E-mail: meyanlu@126.com