

交流伺服系统特性分析与测试

王传军

(上海电科电机科技有限公司, 上海 200063)

摘要: 分析了交流伺服系统的基本原理和电气性能特点。介绍了交流伺服系统主要性能评价指标和测试方法。据此, 根据 GB/T 16439—2009《交流伺服系统通用技术条件》中交流伺服系统试验测试的要求和特点, 设计和搭建了用于交流伺服系统测试用的平台, 并且介绍了在该平台实现交流伺服系统性能试验的方法。测试系统的设计实现为类似试验站的研制提供了重要参考。

关键词: 交流伺服系统; 伺服特性分析; 特性测试

中图分类号: TM 306 **文献标志码:** B **文章编号:** 1673-6540(2018)06-0117-05

Analyze of Servo System and Measure

WANG Chuanjun

(Seari Motor Science and Technology Co., Ltd., Shanghai 200063, China)

Abstract: The fundamental and the electric capability of ac-servo system were analyzed; meanwhile, the main performance evaluation index and test methods of AC servo system were introduced. Accordingly, according to the requirements and characteristics of the AC servo system test in GB/T 16439-2009 "General specification for AC servo system", a test platform for AC servo system testing was developed, and the methods of AC servo system with the platform were introduced. The design of the test system provides an important reference for the development of similar test stations.

Key words: AC servo system; servo characteristics analysis; characteristics testing

0 引言

伺服系统的控制性能, 体现在稳定性、准确性、快速性等方面, 即转矩控制性能、转速控制性能和位置控制性能。根据国家标准, 可以从伺服系统的静态性能和动态性能来划分。常见动态性能指标包括超调量、峰值时间、上升时间、调整时间、下降时间、频带宽度、谐振峰值、振荡次数等, 静态指标则包括定位精度、速度和转矩的稳态平均误差、转速和转矩波动系数等^[1]。

1 伺服系统构成分析

交流伺服系统一般由电流环、速度环和位置环组成。最内环是电流环, 其给定一般来自速度环的输出; 电流环实现对给定电流的跟踪, 并对直

流母线电压的波动、反电动势的影响以及被控对象的非线性等因素起到抑制作用。受到开关器件以及控制算法执行时间的限制, 一般伺服系统的逆变频率为 5~20 kHz, 电流环的带宽受到永磁同步电机的影响一般不超过 5 kHz。中间环是速度环, 其给定一般来自位置环的输出, 也接收来自外部模拟量或者多段速的给定, 实现对给定速度的跟踪, 并抑制负载扰动对系统的影响, 一般速度环带宽不超过 400 Hz。最外环是位置环, 其位置给定来自外部脉冲或总线控制时直接写入的绝对位置值, 实现对位置给定的精确定位。由于多环结构的带宽从内到外逐次递减, 且符合香农采样定律, 故位置环的带宽一般不超过 100 Hz^[2]。交流伺服系统控制结构如图 1 所示。

作者简介: 王传军(1973—), 男, 高级工程师, 研究方向为电机试验。

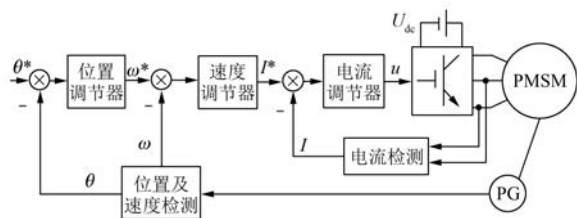


图1 交流伺服系统控制结构图

2 交流伺服系统主要指标^[3]

2.1 正反转速差率

正反转速差率指伺服系统在额定电压下空载运行,不改变转速指令的量值,仅改变电动机的旋转方向,测量电动机的正、反两方向的转速平均值 n_{cw} 和 n_{ccw} ,按式(1)计算正反转速差率:

$$K_n = \frac{|n_{cw} - n_{ccw}|}{n_{cw} + n_{ccw}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: K_n ——正反转速差率;

n_{cw} ——电动机顺时针旋转时的转速平均值;

n_{ccw} ——电动机逆时针旋转时的转速平均值。

2.2 转速调整率

伺服系统工作在额定转速条件下,仅电源电压变化,或仅环境温度变换,或仅负载变化,电动机的平均转速变化值与额定转速的百分比分别为电压变化的转速调整率、温度变化的转速调整率、负载变化的转速调整率,其计算公式如下:

$$\Delta n = \frac{|n_i - n_N|}{n_N} \times 100\% \quad (2)$$

式中: Δn ——转速调整率;

n_i ——电动机的实际转速;

n_N ——电动机的额定转速。

2.3 转矩波动系数

伺服系统稳态运行时,对电动机施加恒定负载,瞬时转矩的最大值为 $T_{\max}$,最小值为 $T_{\min}$,则转矩波动系数 K_{Γ} 为

$$K_{\Gamma} = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{T_{\max} + T_{\min}} \times 100\% \quad (3)$$

式中: K_{Γ} ——转矩波动系数;

$T_{\max}$ ——瞬态转矩的最大值;

$T_{\min}$ ——瞬态转矩的最小值。

2.4 转速波动系数

伺服系统稳态运行时,瞬时转速的最大值为 $n_{\max}$,最小值为 $n_{\min}$,则转速波动系数 K_{fn} 为

$$K_{fn} = \frac{n_{\max} - n_{\min}}{n_{\max} + n_{\min}} \times 100\% \quad (4)$$

式中: K_{fn} ——转速波动系数;

$n_{\max}$ ——瞬态转速的最大值;

$n_{\min}$ ——瞬态转速的最小值。

2.5 转速变化的时间响应

转速响应时间是评价伺服系统的关键指标之一。转速变化的时间响应是指伺服系统空载条件下,对转速指令输入阶跃信号,转速变化的时间响应过程中响应时间、超调量和建立时间,如图2所示。

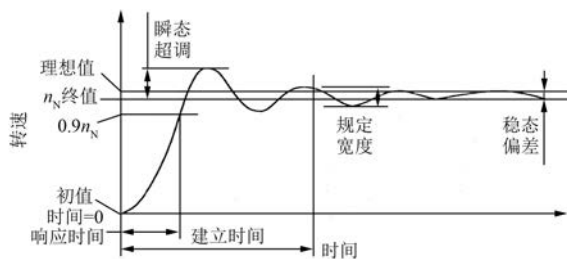


图2 阶跃输入的时间响应曲线

2.6 频带宽度

频带宽度是伺服系统能响应的最大的正弦波频率,是衡量伺服系统响应的一个重要参数。试验是在伺服系统输入量为正弦波时,随着正弦波信号的频率逐渐升高,对应的输出量的相位滞后逐渐增大同时幅值逐渐减小,相位滞后增大至 90° 时或者幅值减小至低频段幅值 $1/\sqrt{2}$ 时的频率。

2.7 静态刚度

静态刚度用来衡量和评价伺服系统单位位移所能抵抗的静态外力大小。试验是在伺服系统处于空载零速锁定状态,对电动机轴端正转方向或反转方向施加连续转矩 T_0 ,测出转角的偏移量 $\Delta\theta$,则静态刚度 K_s 为

$$K_s = \frac{T_0}{\Delta\theta} \quad (5)$$

式中: K_s ——静态刚度;

T_0 ——连续转矩;

$\Delta\theta$ ——转角的偏移量。

3 交流伺服系统测试的设计

3.1 交流伺服测试系统的设计

测试系统设计原则是依据 GB/T 16439—2009《交流伺服系统通用技术条件》标准要求,满足 0.75~110 kW 交流伺服系统的性能试验。

交流伺服控制系统由电流环、速度环和位置环组成,因此伺服特性的测试主要以这 3 个环为对象。为了实现 GB/T 16439—2009 中定义的各种性能参数的测量,伺服系统需要在如下几种典型运动状态下稳定工作。典型运动状态有位置控制模式下的阶跃响应、梯形响应、正弦波响应;速度控制模式下的阶跃响应、正弦波响应、连续交替正反转;电流控制模式下的阶跃响应、正弦波响应等。除此以外,典型运动状态还应包括各种控制模式下的被动运动,主要指转矩负载扰动响应、惯量参数扰动影响、温度变化响应等^[4]。

通过分析伺服系统的性能指标,可得在测试时所应采取的技术和方法。测试的基本思路:根据交流伺服系统需要测试的性能让待测伺服系统按某个方式动起来,再通过传感器把表征这些性能的特征参数检测出来,进行分析和显示。据此,本文设计了图 3 所示的交流伺服系统性能测试电气原理图。该系统主要包括 1TY 调压器、电参数测量单元、转矩转速传感器及由 S120 构成的陪试系统。

3.2 工作原理

系统采用 S120 伺服系统(陪试系统)与被试交流伺服系统(被试系统)实现双机对拖的直接负载模式,其中陪试系统由西门子 S120 的四象限整流模块、功率模块和伺服电机组成,在上位机控制下可工作于转矩模式、转速模式及位置模式,可为被试电机提供任意形式的负载,同时将能量回馈电网。在负载模式下系统工作原理如下:

(1) 加载试验时陪试系统工作于转矩模式,被试系统处于电动状态。1TY 调压器输出的 50 Hz 交流电经过电参数测量单元进入被试伺服驱动器,被试伺服驱动器输出经过电参数测量单元驱动被试电机,被试电机带动陪试电机旋转。此时陪试电机作为交流发电机向外发出任意频率的交流电,然后由陪试逆变整流为直流电,再由四象限整流单元逆变为 50 Hz 的交流电回馈至电网。

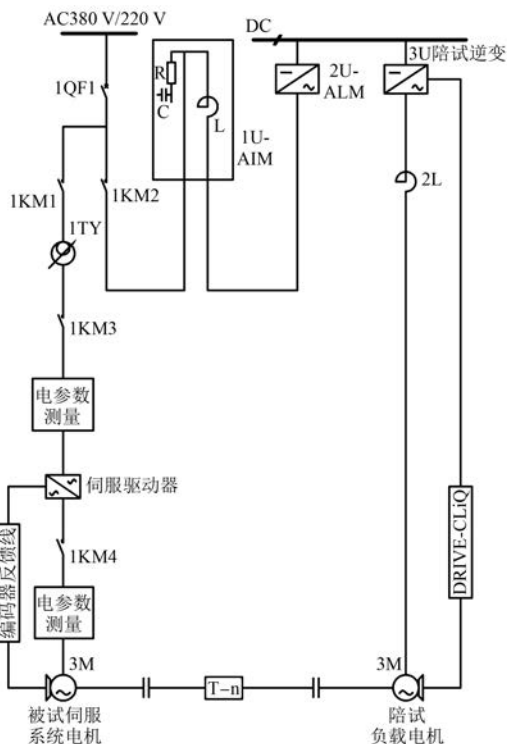


图 3 交流伺服系统性能测试电气原理图

(2) 当被试电机处于发电状态时,交流电网 50 Hz 交流电经四象限整流单元整流为直流电,由陪试逆变单元逆变为三相交流电源供给陪试电机,此时陪试电机作为交流电动机拖动被试电机旋转,被试电机作为发电机向外发出任意频率的交流电。由于被试交流伺服一般不具备馈电能力,因而在特殊试验(如反向电动势常数)时需要断开伺服驱动器输出端以免损坏被试伺服驱动器。

在单机模式下其工作原理如下:1TY 调压器输出的 50 Hz 交流电经过电参数测量单元进入被试伺服驱动器,被试伺服驱动器输出经过电参数测量单元驱动被试电机旋转。

3.3 硬件选型及设计

3.3.1 调压器

考虑一般交流伺服系统供电电压等级不同和电压变化的转速调整率试验项目,因而需要为被测交流伺服系统提供连续可调的稳压电源。同时需要满足最大被试功率 110 kW 的交流伺服系统短时工作区(2~3 倍额定功率)性能试验。据此本文选择为电机试验而研制的 TYSA-250 kVA 三相感应调压器,输出电压 0~520 V。该调压器具有短时过载能力强、输出电压平滑性好、畸变率小

等优点,能够满足 400 V 电压等级的电机或驱动器 1.3 倍过电压的试验项目。

3.3.2 陪试系统

针对伺服系统“快”、“稳”、“准”的性能测试需求,负载系统需要具备更高性能的动态特性。Sinamics S120 是西门子公司推出的全新的集 V/f、矢量控制及伺服控制于一体的驱动控制系统,多轴资源共享的理念和模块化的设计使其能实现高效而又复杂的运动控制,性能远远超过同类系统。考虑最大 110 kW 被试系统功率短时工作区试验,系统设计需选择 300 kW 馈电能力的主动型整流单元。考虑不同功率段的伺服系统试验,因而设计需考虑试验系统功率匹配问题以提供快速稳定精确的控制能力,为此系统设计需提供多套可选负载系统并根据被试伺服系统进行匹配。

3.3.3 测量系统

交流伺服驱动器输出一般均为 PWM 波输

出,故电参数测量需选择宽带功率分析仪。该系统电参数测量采用 Anyway 宽带功率测试系统,可有效确保试验的宽频率范围、宽幅值范围及低功率因数等测试要求。由宽带功率传感器及宽带功率分析仪构成,宽带功率传感器在传感器内部即将被测信号数字化,并以光纤为介质将数字量上传至宽带功率分析仪,对数字量进行分析、运算,并以数值、图表、波形等方式显示被测参量信息。

转矩转速传感器采用进口 kistler 品牌带轴角测量功能的双量程传感器,第一量程精度 0.05 级,第二量程精度 0.1 级。考虑不同功率段伺服电机试验匹配问题,系统配置 2 000/400、1 000/200、50/10 N·m 3 种规格转矩转速传感器。

为了实现交流伺服系统的自动测试和分析,系统还需要其他辅助仪器仪表,如转矩转速测量仪、信号发生器和存储示波器等。交流伺服系统性能测试框图如图 4 所示。

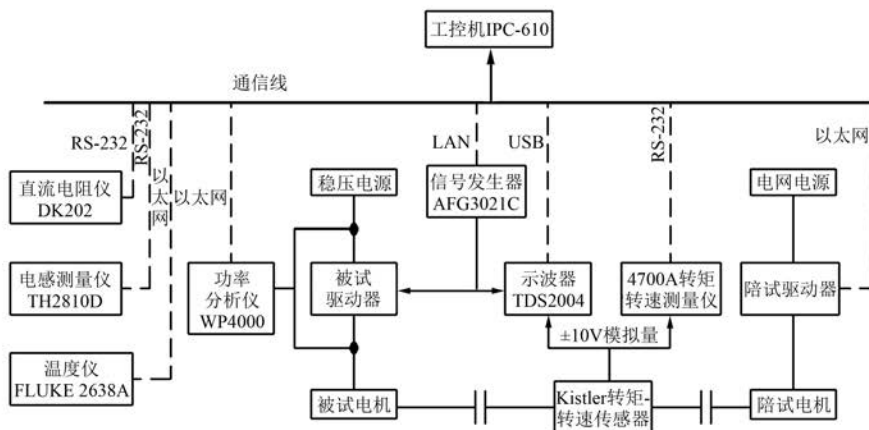


图 4 交流伺服系统性能测试框图

图 4 中,被试电机、转矩转速传感器以及陪试电机同轴安装。AFG3021C 可在上位机控制下发生任意波形以起动的被试伺服系统,同时通过 TDS2004C 存储示波器进行数据采集、存储。Kistler 转矩-转速传感器用于测量被试电机的转矩、转速和转角,4 700 A 转矩转速测量仪通过高速串行通信的方式反馈于上位机。采用银河电气 Anyway 宽频高精度功率分析仪 WP400 进行伺服系统的电参数测量,通过以太网传输至上位机。上位机可通过 USB 方式采集四通道存储示波器 TDS2004C 的波形数据进行分析处理。

4 交流伺服系统性能试验的实现

4.1 正反转速率测试

将被试电机与转矩转速传感器通过联轴器连接起来,被试伺服系统置于转速模式,通过转速指令或信号发生器(模拟量输入时)起动的被试电机正向转动,待转速平稳后通过上位机定时定间隔采集转矩转速传感器转速 n_{cw} 。改变转向,同样测取反向转速 n_{ccw} ,代入式(1)即可求出被试伺服系统的正反转速率 K_n 。

4.2 转矩波动系数测试

将被试电机、负载电机和转矩转速传感器通

过联轴器连接起来,被试伺服系统置于转矩模式,陪试系统置于转速模式,起动陪试系统将被试电机拖至给定转速,通过转矩指令或信号发生器(模拟量输入时)给被试电机施加连续工作区中规定的最大转矩,通过示波器截取电机一圈(360°)时间(由转速求得)内的转矩波形进行分析处理,找出转矩的最大值 $T_{\max}$ 和最小值 $T_{\min}$,代入式(3)即可求出转矩波动系数 K_T 。

4.3 转速波动系数测试

将被试电机和转矩转速传感器通过联轴器连接起来,被试伺服系统置于转速模式,起动被试系统,在额定转速下空载运行稳定后,通过示波器截取稳定运行期间内的转速波形进行分析处理,找出转速的最大值 $n_{\max}$ 和最小值 $n_{\min}$,代入式(4)即可求出转速波动系数 K_n 。

4.4 转速变化的时间响应测试

将被试电机与转矩转速传感器通过联轴器连接起来,被试伺服系统置于转速模式,利用外部开关触发、转速指令或信号发生器启动被试电机至额定转速,通过存储示波器录波功能进行转速变化曲线采集,然后将采集数据上传至上位机分析处理。

4.5 频带宽度试验

将被试电机与转矩转速传感器通过联轴器连接起来,被试伺服系统置于转速模式。利用信号发生器 AFG3021C 产生标准正弦波给被试伺服驱动器速度模拟量输入通道,正弦波幅值调整为电机 $0.01 n_N$ 对应的模拟量电压,起始频率 1 Hz,增幅 0.1 Hz,调节存储示波器使信号发生器输出的正弦波与转矩转速传感器的转速(模拟量,近似正弦波)信号同步。旋转信号发生器频率调节旋钮,随着指令正弦波频率提高,电动机转速的波形曲线对指令正弦波曲线的相位逐渐增大,而幅值逐渐减小,相位滞后增大至 90°时的频率作为伺

服系统 90°相移的频带宽度;幅值减小于 1/2 的频率作为伺服系统-3 dB 频带宽度。

4.6 静态刚度测试

将被试电机、负载电机和转矩转速传感器通过联轴器连接起来,被试伺服系统置于位置模式零速锁定状态,陪试系统置于转矩模式,记录下此时转矩转速传感器轴角 θ_1 ,通过陪试系统将被试伺服加载至连续工作区最大输出转矩 T_0 ,记录此时转矩-转速传感器的轴角 θ_2 ,则

$$\Delta\theta = |\theta_2 - \theta_1| \quad (6)$$

将 T_0 和 $\Delta\theta$ 代入式(5)即可求出被试伺服系统的静态刚度 K_s 。

5 结 语

伺服系统的控制性能在工业领域正在起着越来越关键和重要的作用,对伺服系统性能特性测试的研究也有着越来越重要的实用价值。本文从交流伺服系统的基本原理着手,对交流伺服系统的电气性能特点和测试方法进行了研究,设计搭建了用于交流伺服系统测试用的硬件平台,并介绍了如何在该平台进行交流伺服系统各种性能试验的方法。该测试平台根据 GB/T 16439—2009《交流伺服系统通用技术条件》的标准要求而设计,满足标准的试验要求。

【参考文献】

- [1] 曹宇,李叶松.伺服系统特性测试分析平台设计[J].微电机,2013,46(10): 78-83.
- [2] 覃海涛.交流伺服系统自调整技术研究[D].武汉:华中科技大学,2011.
- [3] 交流伺服系统通用技术条件:GB/T 16439—2009[S].
- [4] 滕福林,胡育文,李宏胜.伺服系统性能测试和分析平台[J].电气传动,2011,41(1): 45-49.

收稿日期: 2018-03-27

中文核心期刊 中国科技核心期刊 中国学术期刊(光盘版)

全国优秀科技期刊 华东优秀科技期刊

中国科学引文数据库来源期刊 中国学术期刊综合评价数据库来源期刊

中文核心期刊 / 中国科技核心期刊
专业缔造权威 服务创造价值
高效节能 绿色电机

我们专注于 电机技术的研究
电机系统节能的解决方案
电机与控制技术

电机智能制造
电机绿色制造

.....

《电机与控制应用》

创刊于1959年，是上海电器科学研究所（集团）有限公司主办的具有专业权威的电工技术类科技期刊。每月10日出版，国内外公开发行人，邮发代号4-199。

杂志集合了上电科在技术研发、产品检测、标准制定及专业人才等各方面
的优势资源，专业服务于行业与用户，为我国中小型电机行业的技术
进步与发展做出了巨大贡献，在电机及控制应用领域享有很高的
荣誉，具有很大的影响力。

编辑部地址：上海市武宁路505号9号楼6楼
电话：021-62574990-745
E-mail: 392483864@qq.com

邮编：200063
传真：021-62432316



扫码关注电机与控制应用