

恒速传动调节器半物理仿真试验系统

黄凯 赵金伟 闫小卫 谈峰

(中国航发控制系统研究所 无锡 214063)

(联系电话 13812184527 E-mail 983039106@qq.com)

摘要: 为了对发动机恒速控制系统进行考核,建立了某型发动机恒速传动系统(ППО)的实验室工作环境,可模拟发动机实际转速环境下的控制系统特性。通过 EtherCAT 总线技术和虚拟仪器技术,将运行于计算机上的基于辨识的空气涡轮机数型模型、恒速调节器和转速模拟系统等连接,组建了半物理仿真试验平台。然后通过建模得出试验系统各部件的模型,利用 MATLAB 进行联合仿真,探索不同参数下的调节规律。最后该型发动机恒速传动系统的仿真和真实试验结果表明:该半物理仿真试验系统能够有效地模拟其真实发动机转速下的开环控制性能,以及在不同转速扰动下的闭环控制规律,为该型恒速控制系统的研制提供了试验支持。

关键字: 恒速控制; EtherCAT 总线; 半物理仿真; MATLAB; 转速扰动

引言

随着航空技术的迅速发展,飞机的飞行速度、高度和航程等均有很大提高,因而飞机对电气化和自动化的要求也在不断提高。这样一来,若再沿用低压直流电源系统,将会困难重重。为适应迅速发展的需求,在现代飞机上已经使用了优点较多的交流电源系统。但是由于发动机工作中,转速变化范围大,若不安装特殊传动装置,则交流发电机的工作转速也将变化很大,将使交流电的频率也在很大范围内变动,使得交流电源系统工作不稳定。为此,发动机上设置了恒速传动装置(包括恒速调节器和空气涡轮机)^[1]。

恒速调节器,在发动机上的作用是检测自身转速变化(对应传动机匣转速发生波动)后,其摇臂转角发生相应变化,经连杆去推动空气涡轮机节气门角度变化,调节空气涡轮机转速,从而保证传动机匣恒速^[2]。

而为了考量恒速传动装置的真实调节特性,引入半物理仿真的方法,即针对控制对象,将一部分实物引入仿真回路,其余部分以数学模型在计算机上描述,建立起一个模拟试验平台,实现实物系统与仿真系统的互动^[3]。半物理仿真试验兼有实物试验的真实性和模拟试验的安全性及经济性,且能避免复杂的建模和试车试验的高风险,因此变得越来越必要和受欢迎^[4]。

本文以某型发动机恒速传动系统(ППО)为研究对象,利用 EtherCAT 总线技术和虚拟仪器技术,将运行于计算机上的基于辨识的空气涡轮机数型模型、恒速调节器和转速模拟系统等连接,实现了对恒速传动系统实际工作环境的模拟,构建了某型发动机恒转速控制半物理仿真试验系统。并且对系统各部件进行建模,利用 MATLAB 进行仿真,探索调节规律。

1 半物理仿真试验系统组成及原理

恒速传动调节器半物理仿真试验系统主要由转速模拟系统、空气涡轮机数型模型、恒速调节器、测控系统等组成,如图 1 所示。

其中,恒速调节器为主要试验对象,转速模拟系统为恒速调节器模拟真实发动机高压转子转速,而空气涡轮机数型模型根据恒速调节器的摇臂角度变化实时调节转速模拟系统的转速,形成闭环控制。

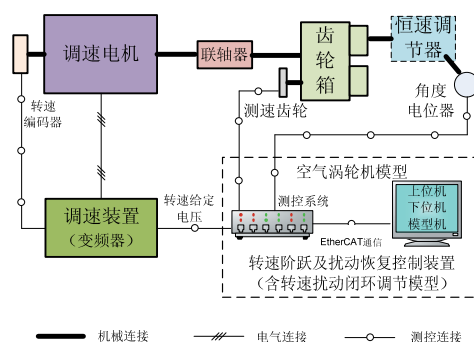


图1 系统组成原理图

测控系统将整个系统连接在一起，既采集半物理仿真过程中的传感器信号，又实现了对试验台的自动控制，它保证了试验系统的正常工作。

根据测控系统的控制要求，使得电传控制恒速调节器转速稳定于 $3760 \pm 20 \text{r/min}$ 。测控装置提供转速阶跃给定，以模拟转速扰动，恒速调节器感受到转速扰动，其摇臂转角发生相应变化，测控装置检测到摇臂角度变化方向及变化量（电压信号），软件程序模拟空气涡轮机的调节过程，按相应调节规律去消除阶跃给定信号（即控制恒速调节器恒速）。

1.1 转速模拟系统搭建

转速模拟系统由调速电机、联轴器、齿轮箱、调试柜组成，组成图参见图2。转速模拟系统接收测控系统的(0~10)V 直流电压给定信号，控制齿轮箱转速在 $0 \text{r/min} \sim 5000 \text{r/min}$ 范围内无级可调。

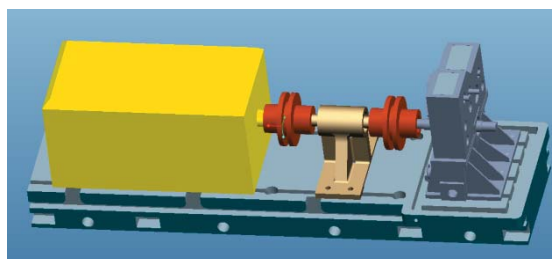


图2 转速模拟系统部件图

1.2 空气涡轮机数字建模

分析了常用的模拟调节器的离散化方法的优缺点，采用差分变换法，其中后向差分法比前向差分法有更好的稳定性，所以采用后向差分法^[9]。

扰动控制 I 传递函数：

$$\frac{\Delta n}{d} = K_y \frac{T_2 s + 1}{T_1 s + 1}$$

扰动控制 II 传递函数：

$$\frac{\Delta n}{d} = \frac{K_y}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}$$

分别得出扰动控制 I 的离散化方程为：

$$\Delta N(t) = [T_1 * \Delta N(t-1) + (K_y * T_2 + K_y * T) * \Delta d(t) - K_y * T_2 * \Delta d(t-1)] / (T_1 + T)$$

扰动控制 II 的离散化方程为：

$$\Delta N(t) = \{[(T_1 + T) * T_2 + (T_2 + T) * T_1] * \Delta N(t-1) - T_1 * T_2 * \Delta N(t-2) +$$

$$K_y * T * T * \Delta d(t) \} / [(T_1 + T) * (T_2 + T)]$$

软件闭环逻辑分别如下图 3 和图 4。

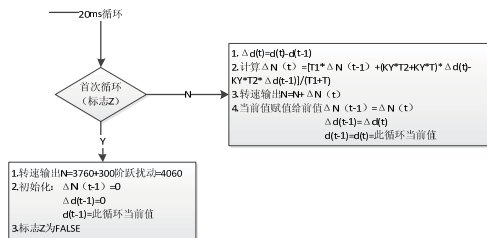


图 3 扰动控制 I 算法流程图

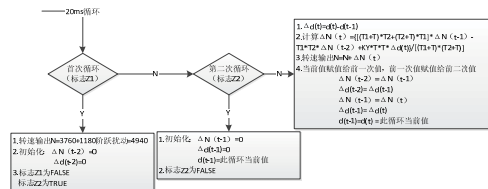


图 4 扰动控制 II 算法流程图

1.3 测控系统设计

1.3.1 硬件设计

控制装置包括转速传感器、角度电位器、测控模块和上位机等四部分。

测控模块选用基于 EtherCAT 的产品，采样周期为 1ms^[5]。

上位机作为控制主站，用一台笔记本电脑，可与 EtherCAT 耦合器进行网络连接^[6-7]。

测控架构图参见图 5。

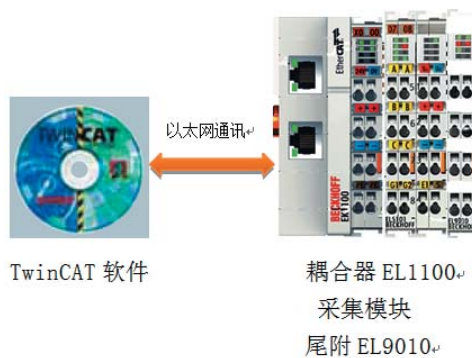


图 5 测控架构图

1.3.2 软件设计

软件设计包括两部分——基于 TwinCAT 的下位机软件配置、基于 Delphi 的上位机控制软件设计，架构图参见图 6。

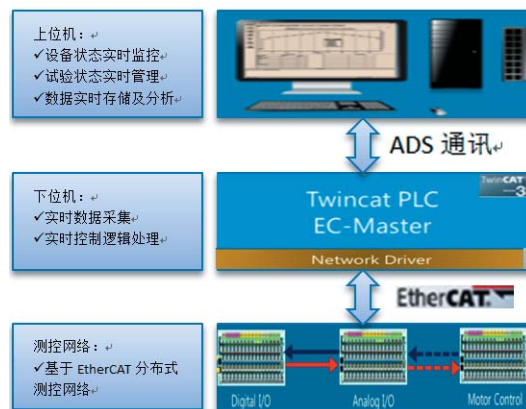


图 6 软件架构图

a) 下位机配置

下位机通过 TwinCAT 软件，将标准 Windows 变成实时操作系统，构建了下位机软件运行的实时环境,实时架构参见图 7。

同时 TwinCAT 作为主站，与 EtherCAT 端子模块构建成的从站，实现 EtherCAT 通讯^[8]。

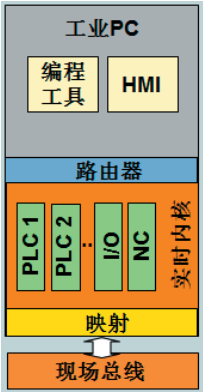


图 7 实时环境

b) 上位机软件

上位机软件采用 DelPhi 语言编写，通过 ADS 通讯和 TwinCAT 软件进行数据通讯，并对数据进行存储。

(1) 双缓存存储方法

通过 DelPhi 中编写的多媒体定时器功能，可以在每个多媒体定时器到时后（20ms）发出指令，将 PLC 中存储的数据读出，并存入文件。同时为了使读取的数据不丢失，采用了双缓存的原理，便于读和写分开操作，原理如图 8 所示。

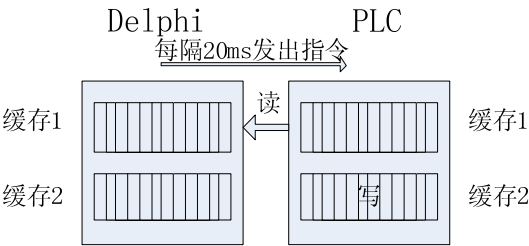


图 8 双缓存原理

(2) 变量通信

Delphi 和 TwinCAT PLC 之间利用 5 个参数进行通信，具体的对应关系如表 1 所示。

表 1 参数间对应关系表

TwinCAT 中参数	关系	Delphi 中参数
FSave	FSaveHandle 建立了 TwinCAT 和 Delphi 中参数的关系	FSaveValue=1 或 2
		FSaveName='FSave'
		FSaveHandle
FCount1	FCount1Handle	FCount1Value
		FCount1Name='FCount1'
		FCount1Handle
FCount2	FCount2Handle	FCount2Value
		FCount2Name='FCount2'
		FCount2Handle

TwinCAT 中参数	关系	Delphi 中参数
FVal1	FValue1Handle	FValue1
		FValue1Name='FVal1'
		FValue1Handle
FVal2	FValue2Handle	FValue2
		FValue2Name='FVal2'
		FValue2Handle

(3) ADS 接口函数

进行数据交互的时候，TwinCAT PLC 提供了 5 个 ADS 函数：AdsPortOpen 函数用于打开 TwinCAT 端口，获取端口号；AdsGetLocalAddress 函数用于获取本地 TwinCAT 地址配置信息（重点）；AdsSyncReadWriteReq 函数为同步读写请求函数，主要用于获取 PLC 中接口变量的句柄；AdsSyncWriteReq 函数用于同步方式向 PLC 中指定变量进行数据更新；AdsSyncReadReq 函数用于同步方式从 PLC 中获取指定变量的数据，其余同写方式。

2 系统 MATLAB 建模

仿真分两种情况，扰动控制 I（ $\pm 300\text{r/min}$ 阶跃扰动）和扰动控制 II（ 1180r/min 阶跃扰动），仿真逻辑图参见图 9、图 10。

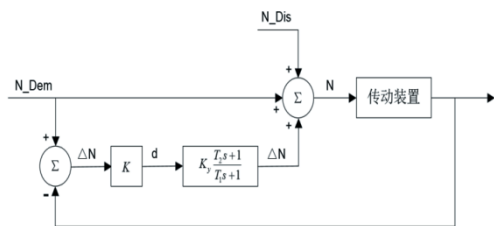


图 9 扰动控制 I 仿真逻辑图

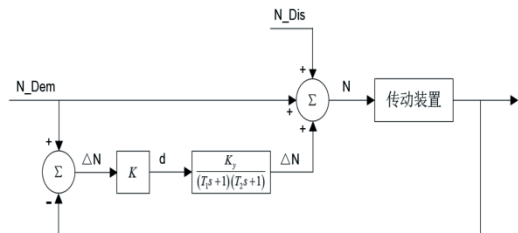


图 10 扰动控制 II 仿真逻辑图

2.1 恒速调节器建模

进行开环试验，得出恒速调节器不同转速下的角度变化规律。利用此数据进行插值建模，得到一个分段函数，函数曲线参见图 11 和图 12。

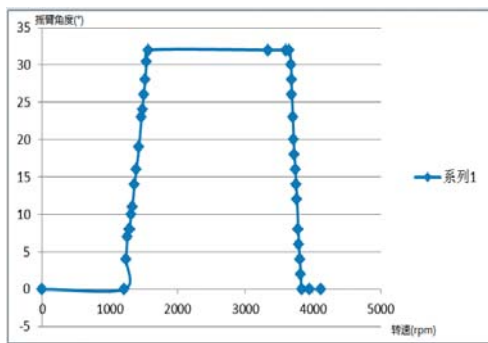


图 11 升转速时的角度变化曲线

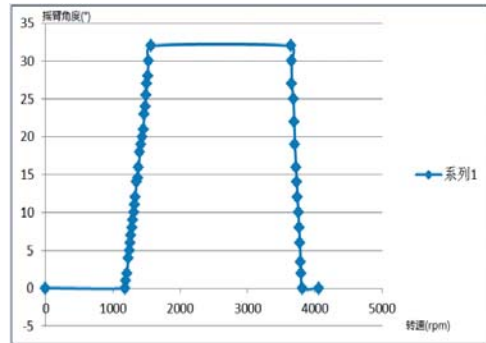
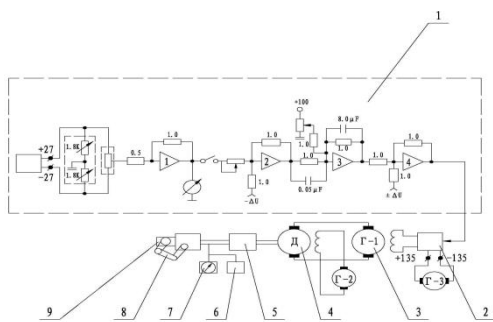


图 12 降转速时的角度变化曲线

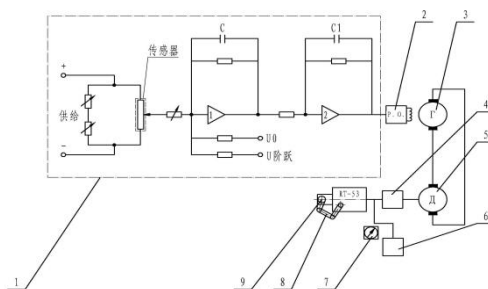
2.2 空气涡轮机建模

半物理仿真试验系统所使用的发动机数学模型必须具有良好的实时仿真运算能力。试验系统中使用的是空气涡轮机基于辨识试验法的数学模型。与部件建模相比，辨识建模的方法比较简单，无需获得空气涡轮机的部件特性，所获得的数学模型还具有求解快速的优点^[10]。



1-电子附加器；2-转速调节器；3-发电机；
4-电动机；5-减速器；6-回线示波器；
7-转速表；8-拉杆；9-转角变换器

图 13 扰动控制 I 等效模拟结构图



1-电子附加器；2-转速调节器；3-发电机；
4-电动机；5-减速器；6-回线示波器；
7-转速表；8-拉杆；9-转角变换器

图 14 扰动控制 II 等效模拟结构图

空气涡轮机两种扰动下的等效控制电路参见图 13 和图 14，由此得出两种控制下的传递函数，如下节。

2.2.1 扰动控制 I

扰动 I 恢复控制模型方程式如下：

$$\frac{\Delta n}{d} = K_y \frac{T_2 s + 1}{T_1 s + 1}$$

式中：\$T_1\$ 为第一放大器的时间恒量；

\$T_2\$ 为第二放大器的时间恒量；

\$K_y\$ 为放大系数，即节流门操纵杆转动一度每分钟的转速变化；

\$\Delta n\$ 为调节器的转速变化；

\$d\$ 为节流门操纵杆的转角变化。

2.2.2 扰动控制 II

扰动 II 恢复控制模型符合方程式如下：

$$\frac{\Delta n}{d} = \frac{K_y}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}$$

式中：\$T_1\$ 为第一放大时间常数；

\$T_2\$ 为第二放大时间常数；

\$K_y\$ 为放大系数，即节流门操纵杆转动一度每分钟的转速变化；

\$\Delta n\$ 为调节器的转速变化；

\$d\$ 为节流门操纵杆的转角变化。

2.3 转速模拟系统建模

转速模拟系统的等效电路如下图 15。

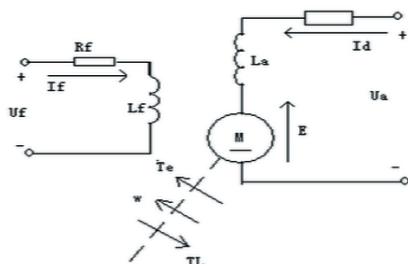


图 15 转速模拟系统等效电路

假设电机磁场恒定，并忽略电枢电感、粘性摩擦负载，进行简化后得出其传递函数：

$$W(s)=\frac{1/C_e}{T_m\times s+1}$$

式中： T_m 为传动系统的电气机械时间常数，为

$$T_m=\frac{J\times R_a}{C_e\times C_m}$$

C_e 为电势系数或转矩系数，为

$$C_e=K_e\times\phi$$

3 试验结果与分析

3.1 MATLAB 仿真结果

基于搭建的 Simulink 模型，进行 MATLAB 仿真。
阶跃扰动仿真结果如图 16 ~ 19 所示，分析结果参见表 2。

表 2 仿真结果

扰动方式	上升/下降时间	调节时间	稳态误差
+300r/min 阶跃	0.08s	0.7s	8.7r/min
-300r/min 阶跃	0.06s	0.5s	8.3r/min
+1180r/min 阶跃	0.1s	4.4s	10.3r/min
-1180r/min 阶跃	0.1s	3.28s	10.8r/min

300r/min 阶跃扰动仿真结果符合调节时间≤10s，稳态误差≤±12r/min；1180r/min 阶跃扰动仿真结果符合调节时间≤15s，稳态误差≤±12r/min。

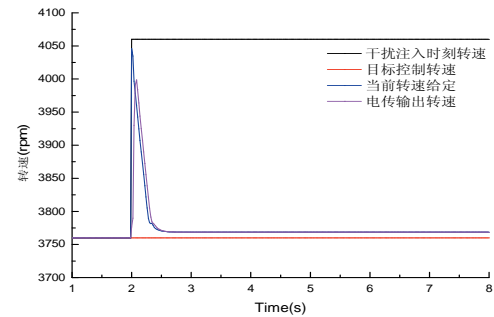


图 16 +300r/min 阶跃扰动仿真结果

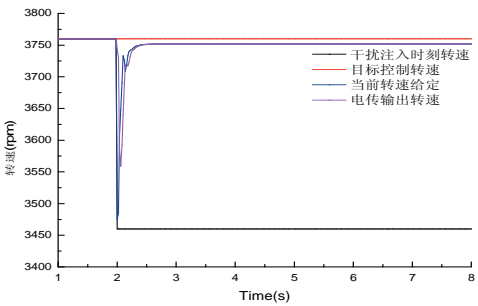


图 17 -300r/min 阶跃扰动仿真结果

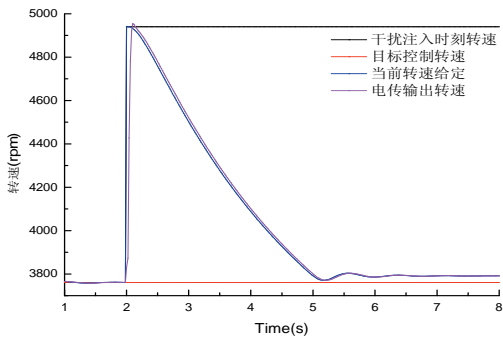


图 18 +1180r/min 阶跃扰动仿真结果

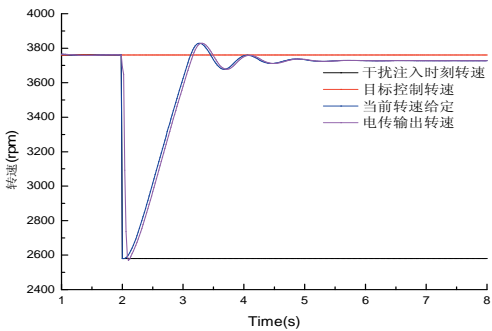


图 19 -1180r/min 阶跃扰动仿真结果

3.2 试验结果

阶跃扰动试验结果如图 20 ~ 23 所示，分析结果参见表 3。

表 3 试验结果

扰动方式	调节时间	稳态误差
+300r/min 阶跃	1.26s	9.233r/min
-300r/min 阶跃	2.04s	11.879r/min
+1180r/min 阶跃	13.08s	8.355r/min
-1180r/min 阶跃	11.32s	7.869r/min

300r/min 阶跃扰动试验结果符合调节时间 $\leq 10s$ ，稳态误差 $\leq \pm 12r/min$ ；1180r/min 阶跃扰动仿真结果符合调节时间 $\leq 15s$ ，稳态误差 $\leq \pm 12r/min$ 。

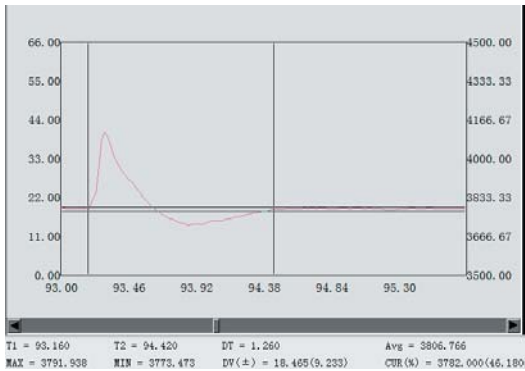


图 20 +300r/min 阶跃扰动试验结果

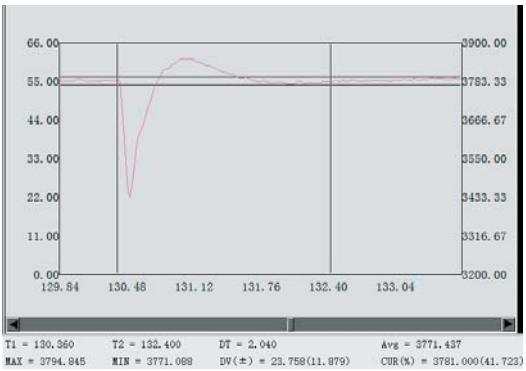


图 21 -300r/min 阶跃扰动试验结果

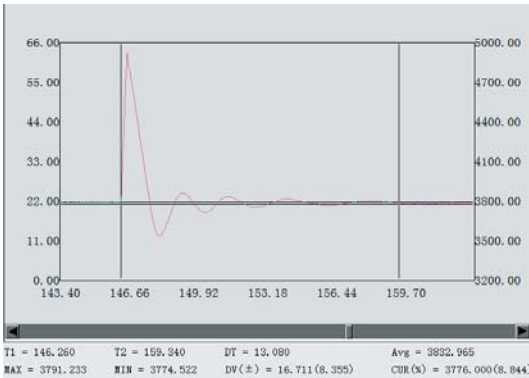


图 22 +1180r/min 阶跃扰动试验结果

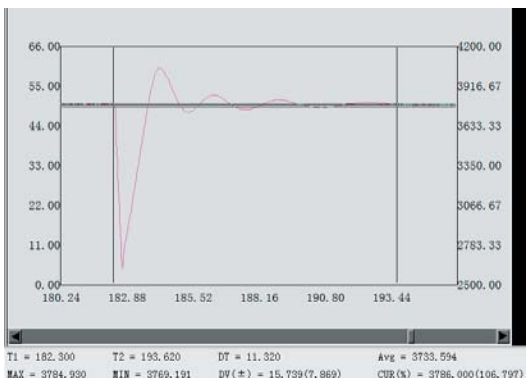


图 23 -1180r/min 阶跃扰动试验结果

4 结论

半物理仿真试验系统的设计、仿真、试验得出以下结论：

- (1) 搭建了某型发动机恒速传动调节器的半物理仿真试验环境——真实模拟了发动机高压转子转速，满足恒速调节器的转速试验环境需求；并且建立了空气涡轮机两种阶跃扰动下的数型模型，使恒速调节器的调节过程形成闭环；
- (2)对半物理系统的各部件——转速模拟系统、恒速调节器、空气涡轮机进行建模，并通过 MATLAB 进行联合仿真，探索不同参数下的调节规律，最终得出的仿真结果，满足用户需求；

(3)利用 MATLAB 仿真中的调节规律,对空气涡轮机模型进行修正,最终使运行于计算机上的基于辨识的空气涡轮机数型模型、恒速调节器和转速模拟系统等连接。组建的恒速传动调节器半物理仿真试验系统进行试验,试验结果同样符合需求。

参考文献

- [1] 梁云九.Д-30КП发机构造[M].长春:空军航空大学出版社,2005:30-51.
- [2] 樊思齐.航空发动机控制 [M].西安:西北工业大学出版社,2008:90-101.
- [3] 程涛.小型涡喷发动机数控调节器的半实物仿真[J].航空动力学报,2004,19(3):383-386.
- [4] 蔡开龙,谢寿生,胡金海等.涡扇发动机燃油综合控制系统半实物仿真试验系统[J].推进技术,2007,28(4):422-427.
- [5] BECKHOF 自动化新技术.德国:倍福产品选型手册,2011:310-400.
- [6] 王维建.工业以太网 EtherCAT 技术的原理及其实现[J].微计算机信息(测控自动化),2010,26(5-1):51-52.
- [7] 赵君,刘卫国,彭喆.基于 EtherCAT 总线的分布式测控系统设计[J].计算机测量与控制,2012.20(1):11-14.
- [8] 魏亚鹏,韩卫光.基于 TwinCAT 主站的 EtherCAT 实时以太网分析与研究[J].现代制造工程,2010(11):16-19.
- [9] 胡寿松.自动控制原理[M].北京:科学出版社,2013.3:51-69.
- [10] 赵琳,樊丁,陕薇薇.单轴航空涡扇发动机数学模型辨识 [J].推进技术,2008,29(6):733-736.