

民用飞机辅助发电机多功能试验装置的设计与实现

Design and Realization of A Newly Multifunction Test Equipment for Civil Aircraft Auxiliary Power Unit Generator

刘朝勇 / Liu Chaoyong

(上海飞机设计研究院,上海 201210)

(Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China)

摘要:

根据民用飞机辅助发电机(APU GEN)试验需求,设计并实现了专用于APU GEN试验的APU GEN多功能试验装置,该装置可远程操控,不仅具有冷却功能和加热保温功能,而且还具有润滑油流量连续可调节功能、联锁控制以及保护功能,能较好地满足APU GEN的试验需求。该装置的成功实现,不仅保障了民用飞机电源系统设计验证工作,而且还积累了我国民用飞机电源系统试验配套设施研制经验,对我国民用飞机电源系统试验具有重要的指导意义。

关键词:多功能;冷却;加热;流量调节;联锁控制

[Abstract] A newly multifunction test equipment used for Auxiliary Power Unit Generator(APU GEN) is designed and realized in this paper. The equipment controlled remotely is not only has the cooling and heating function, but also has the ability of adjusting the oil flow into the APU GEN continuously and interlock control. The equipment also has the interlock protection function for APU GEN. In a word, the equipment can meet the APU GEN test requirements very well. The successful realization of the equipment is very important for the civil aircraft electrical power system lab test. It is not only much helpful in verification of the civil aircraft electrical power system design, but also important for research & development of the civil aircraft electrical power system test equipment.

[Key words] Multifunction; Cooling; Heating; Oil Flow Adjustment; Interlock Control

0 引言

随着民用航空业的快速发展,人们对民用飞机的安全性要求越来越高。为满足民用飞机供电安全性要求,飞机电源系统均采用主交流通道供电为主、以辅助发电机(APU GEN)为主要部件的辅助交流通道供电和以冲压空气涡轮发电机为主要部件的应急交流发电系统等为备份的多余度供电设计。

在民用飞机电源系统设计研制过程中,电源系统试验室试验是不可或缺的,它不仅是电源系统设计验证的重要手段,也是电源系统适航取证必不可少的试验验证项目。

本文针对民用飞机电源系统APU GEN试验需

求,设计并实现了一种能够满足APU GEN试验用的多功能冷却加温装置,该装置能保证APU GEN在试验室条件下按试验要求长时间正常运行。

1 APU GEN 多功能试验装置需求分析

APU GEN因自身结构所限,没有内置的液压泵,润滑油流进APU GEN和流出APU GEN均需要在外部动力源作用下完成。为了保证润滑油运行通畅,工作过程中APU GEN不应出现润滑油堵积现象。此外,APU GEN还有在高温条件下的试验需求。

根据APU GEN的试验需求,需要配置APU

GEN 多功能试验装置,该装置应不仅能实现 APU GEN 润滑油工作回路的通畅、润滑油流量的连续可调,还应能实现加热保温功能。此外,APU GEN 多功能试验装置还应具有对 APU GEN 的保护功能。

因拖动台工作噪声较大,为改善操作人员工作环境,APU GEN 多功能试验装置的操作应通过操作控制台远距离操作控制。

2 APU GEN 多功能试验装置设计分析

根据上面分析,APU GEN 多功能试验装置应具有冷却、加热保温和润滑油流量连续可调节等功能,因此,在设计 APU GEN 多功能试验装置时,应分别进行润滑油回路、润滑油冷却、润滑油加热保温和润滑油循环流量连续可调节等设计。

2.1 润滑油回路

因 APU GEN 没有内置油泵,润滑油的循环需要外置动力源。因此,在 APU GEN 试验多功能装置的润滑油工作回路中须配置进油泵和回油泵。同时为满足 APU GEN 工作时不能出现内部积油现象,在选择进油泵和回油泵时应让进油泵的输出能力小于回油泵的输出能力,以确保 APU GEN 润滑油出油压力的负压力差值在规定的范围内。该负压力差值范围的选取应以 APU GEN 正常工作时润滑油温度上升均匀并最终达到稳定为基准。

2.2 润滑油冷却

为改善冷却效果,还需对 APU GEN 润滑油进行冷却处理。本文在进油回路和出油回路中各配置一个冷却性能良好的热交换器,用循环水冷却方式实现对润滑油的冷却。

2.3 润滑油加热保温

为了实现加热保温功能并避免加热过快后润滑油碳化现象的发生,应采用间接均匀加热方式。因此,本文将循环润滑油储油箱设计成复式油箱,内箱体作为循环润滑油储油箱,在外箱体中配置电加热器并加入加热油作为加热层。

其中,为了便捷实现保温和快速加热功能,将 10kW 的加热器分为四组,均匀分布在外箱体四个方向,快速加热时四组加热器同时工作,温度保持及补偿时只需一组加热器工作。

2.4 润滑油流量调节功能

APU GEN 多功能试验装置的润滑油流量连续

调节功能需通过变频器配合 3 节操作控制台中微调旋钮对进油回路的进油泵电动机工作转速进行远程调节来实现。

2.4.1 变频调速原理

三相交流电动机定子绕组中的三相交流电在定子气隙圆周上产生一个旋转磁场,这个旋转磁场的转速称为同步转速,记为 n_0 ,实际电动机转速 n 要低于同步转速,故一般称这样的三相交流电动机为三相异步电动机。

异步电动机的同步转速 n_0 遵从电机学^[1]基本关系:

$$n_0 = 60f/p \quad (1)$$

其中, f 为电源交变频率(下同), p 为电机定子磁极对数(下同)。电机学中常用的转差率 s 定义为:

$$s = (n_0 - n)/n_0 \quad (2)$$

故实际转速为:

$$n = (60f/p)(1-s) \quad (3)$$

结合式(1)~(3),假定磁极对数 p 不变,调节 f ,就可以实现实际转速 n 的调节,这就是变频调速原理。

2.4.2 变频器选型设计

变频器^[2-4]可以分为“交-直-交”型和“交-交”型,其中“交-直-交”型变频器由整流电路(将输入的交流电源整流为直流电源)、中间过渡电路、逆变电路(将前一级整流得到的直流电源逆变成频率任意可调的交流电源)、控制电路和接口电路等几部分组成;而“交-交”型变频器是把频率固定的交流电直接转换成频率任意可调的交流电。

在变频选型设计中,应充分考虑安全性、可靠性、可操作性和可维护性。本文选用 ABB ACS 400 序列的“交-直-交”型变频器对进油工作油路中的进油泵电动机输出转速进行变频调节。

2.5 联锁控制和保护功能设计

在 APU GEN 多功能试验装置设计时,还应考虑对润滑油回路的冷却和加热保温控制设计以及对 APU GEN 的保护功能设计。

2.5.1 润滑油回路的连锁控制

在 APU GEN 正常运行时,APU GEN 多功能试验装置应对 APU GEN 进行冷却。当润滑油进油温度达到需要进行冷却的温度值后,用于监控润滑油进油温度的二次智能仪表发出触发信号,该触发信号控制安装在冷却水进水支路中的电磁阀的接通,

此时,冷却水回路开始对润滑油进行冷却。

APU GEN 在高温试验时,需断开冷却水,开启加热器加热再进行保温。这序列的控制均可以利用可编程逻辑控制器便捷完成,但这增加了研制成本。本文利用手动操作方式和自动控制方式相结合的方法实现上述控制功能。

APU GEN 高温试验时,将二次智能仪表的温度报警上限值设置到高于试验高温值 20℃,以保证冷却水控制电磁阀处于关闭状态、将冷却水进水手动开关关断,手动开启 4 组加热器进行加热。当温度升至试验温度上限值时,关闭 4 组加热器,并将加热器控制方式选为自动方式,然后将二次智能仪表的低温报警温度设置为试验温度下限值,利用下限超温触发信号控制一组加热器实现保温功能。

2.5.2 保护功能

为保证 APU GEN 的正常工作,APU GEN 多功能试验装置应向 APU GEN 拖动台操作系统提供 APU GEN 运行状态下的润滑油循环冷却进口温度、出口温度、进口压力、出口压力、APU GEN 进油口和出油口温度差等重要参数信号,以实现联锁保护功能。一旦上述信号参数出现异常或者超过规定值,APU GEN 拖动台操作系统应自动进行紧急停车处理,以实现 APU GEN 的保护。

2.6 操作控制台

因试验现场噪声较大,为对操作人员进行噪声防护,对 APU GEN 多功能试验装置及其操作控制台采取分离设计,APU GEN 多功能试验冷却保温装置和 APU GEN 拖动台摆放在一起,操作控制台摆放在工作人员操作间。

为方便运行,APU GEN 多功能试验装置应具有手动控制和自动控制功能,并能实现对循环润滑油进行流量连续调节功能,同时,还应具有 APU GEN 多功能试验装置运行状态参数显示功能。

2.6.1 APU GEN 多功能试验装置操作控制功能设计

为便于操作,操作控制台上应采用手拨开关、按钮和微调旋钮开关等元件实现操作控制功能。其中,手拨开关用于控制方式选择和起/断开加热器;按钮用于接通/断开电源;微调旋钮开关用于连续并可微调润滑油循环流量。

2.6.2 APU GEN 多功能试验冷却保温装置运行状况监控功能设计

根据 APU GEN 试验需求,APU GEN 多功能试

验装置应对以下信号参数进行监控显示:

- 1) APU GEN 润滑油进油温度;
- 2) APU GEN 润滑油出油温度;
- 3) APU GEN 润滑油进出油温差;
- 4) APU GEN 润滑油进油压力;
- 5) APU GEN 润滑油出油压力;
- 6) APU GEN 润滑油循环流量;
- 7) 复式油箱温度。

其中,温度信号应配置温度传感器进行采集,压力信号通过配置压力传感器进行采集,流量信号通过流量传感器采集。以上信号均经过二次智能仪表完成参数显示。

其中,APU GEN 润滑油进油温度显示二次智能仪表的上限超温和下限超温触发信号分别用于控制电磁阀和一组加热器以分别实现冷却和保温功能;APU GEN 润滑油进出油温差和 APU GEN 润滑油循环流量信号需通过二次智能仪表输出给 APU GEN 拖动台控制系统,以实现保护功能。

3 APU GEN 多功能试验装置的实现

基于前两节的设计考虑,APU GEN 多功能试验装置应由进油工作油路、回油工作油路、复式循环油箱、冷却水工作回路等组成,原理如图 1 所示。

其中,进油工作油路由油箱、进油油泵及电机、单向阀、油滤、输出压力调节装置和连接管路等组成;回油回路由回油油泵及电机、过滤器和连接管路等组成。

为了实现 APU GEN 多功能试验装置的运行状态监控功能,分别在进油工作回路配置了温度传感器、压力传感器和流量传感器,在回油工作回路中配置了温度传感器和压力传感器。在其操作控制台上配置了相应的二次显示仪表进行参数显示,并利用二次仪表的通信输出接口将 APU GEN 润滑油进出油温差和 APU GEN 润滑油循环流量信号以 RS-485 总线方式传输给 APU GEN 拖动台操作系统,以实现保护功能。

为实现 APU GEN 多功能试验装置的加热保温功能,在复式油箱中均匀分布了 4 组电阻加热器。其中,在保温状态下,可以选用一组加热器加热;在加热状态在,可选用 4 组加热器实现快速加热。

为实现 APU GEN 润滑油循环流量的连续可调节功能,本文选用 ABB ACS 400 序列的变频器对进油工作油路中的进油泵电动机输出转速进行变频

调节。该型变频器具有安全可靠、人机界面良好、容易操作、频率连续可调和控制功率大等优点,能很好地满足 APU GEN 润滑油循环流量的连续调节要求。

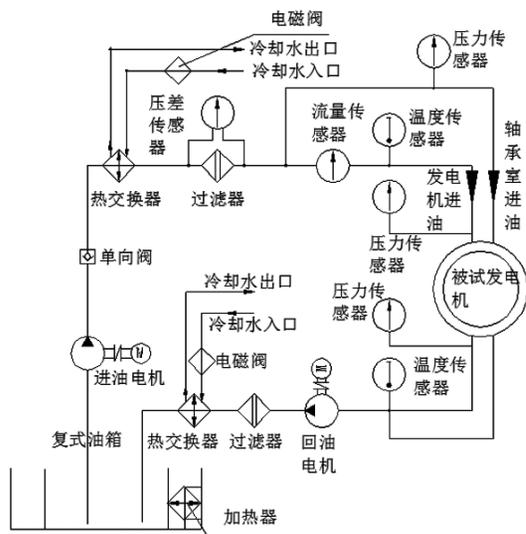


图1 APU GEN 多功能试验装置原理图

4 APU GEN 多功能试验装置的运行实例

为验证 APU GEN 多功能试验装置的设计是否满足 APU GEN 的试验需求,本文对 APU GEN 多功能试验装置进行了性能、联锁控制功能和保护功能等 3 个方面的考核。

4.1 性能和联锁控制功能考核

在试验室条件下,APU GEN 润滑油循环出油温度和进油温度之差不超过 11℃,润滑油循环流量在 8L/min ~ 10.2L/min。

为便于验证联锁控制功能,定义了以下 2 种控制条件:

1) 正常试验条件下,将 APU GEN 进油温度大于 30℃ 定义为开启冷却水的条件;

2) 保温条件下,将 APU GEN 进油温度低于 180℃ 定义为开启 1 组加热器加热保温的控制条件。

在该项考核中,分别对 APU GEN 多功能试验装置进行了空载和加载运行。在上述 2 种状态的运行中,润滑油循环流量调节精度可达 0.01L/min,并可以实现连续可调,当 APU GEN 进油温度大于 30℃ 时,电磁阀接通,水冷却系统工作,冷却工作正常。

正常运行时,APU GEN 多功能试验装置的各项数据记录分别见表 1 和表 2。

表 1 APU GEN 多功能试验装置空载运行记录

| 转速 | 进油温度 | 出油温度 | 温差 | 进油压力 | 出油压力 | 流量 | 运行时间 |
|-------|------|------|------|-------|--------|------|------|
| 2 000 | 23.6 | 22.2 | -1.4 | 0.615 | -0.004 | 8.85 | 2 |
| 4 000 | 24.8 | 24.1 | -0.7 | 0.581 | -0.008 | 8.92 | 2 |
| 4 000 | 27.5 | 33.6 | 6.1 | 0.560 | -0.011 | 9.06 | 2 |
| 6 000 | 27.6 | 36.6 | 9.0 | 0.528 | -0.015 | 8.93 | 2 |
| 6 000 | 28.7 | 29.5 | 0.8 | 0.480 | -0.035 | 9.16 | 2 |
| 8 000 | 30.6 | 31.3 | 0.7 | 0.455 | -0.035 | 8.91 | 2 |
| 8 000 | 28.4 | 31 | 2.6 | 0.453 | -0.035 | 9.03 | 2 |

表 2 APU GEN 多功能试验装置加载运行记录

| 转速 | 进油温度 | 出油温度 | 温差 | 进油压力 | 出油压力 | 流量 | 运行时间 |
|--------|------|------|-----|-------|--------|------|------|
| 12 000 | 29.8 | 31.2 | 1.4 | 0.445 | -0.035 | 9.03 | 2 |
| 12 000 | 29.2 | 34.8 | 5.6 | 0.438 | -0.035 | 9.23 | 2 |
| 12 000 | 30.7 | 36.2 | 5.5 | 0.444 | -0.035 | 9.11 | 2 |
| 12 000 | 31.4 | 36.2 | 4.8 | 0.453 | -0.035 | 9.41 | 2 |
| 12 000 | 30.1 | 38.2 | 8.1 | 0.447 | -0.035 | 9.13 | 6 |
| 12 000 | 30.8 | 38.6 | 7.8 | 0.480 | -0.035 | 9.66 | 13 |
| 12 000 | 30.7 | 37.4 | 6.7 | 0.490 | -0.035 | 9.48 | 23 |

注:(1)表 1 和表 2 中转速、温度、压力、流量和时间对应的单位分别为 r/min、℃、MPa、L/min 和 min;

(2)表 1 和表 2 中的转速是指 APU GEN 输入转速,单位为 r/min,当转速小于 12 000r/min 时,为 APU GEN 多功能试验装置空载运行,当转速等于 12 000r/min 时,为 APU GEN 多功能试验装置加载运行;

(3)表 1 和表 2 中的温差=出油温度-进油温度。

加热保温时,先手动起动 4 组加热器并关闭冷却循环水系统后,可以在 20min 内将润滑油加热到 200℃,实现了快速加热功能。随后,手动关闭 4 组加热器,并将加热器的控制方式转换为自动控制方式。当 APU GEN 进油温度低于 180℃ 时,APU GEN 进油温度显示二次智能仪表的下限超温报警触发信号控制 1 组加热器,可以将温度稳定在设置值 ±5℃ 范围内,实现了保温功能。

4.2 保护功能考核

在 APU GEN 拖动台系统运行后,人为地调小 APU GEN 多功能试验装置的润滑油循环流量到 7.8L/min(小于工作流量下限值),此时,进出油温差达 12℃,超过 11℃ 的规定值,拖动台系统出现自

动停车,保护功能正常。

在运行期间,APU GEN 及 APU GEN 多功能试验装置的各项指标都满足要求,APU GEN 工作正常。

5 结论

上述运行试验证实了本文提出的 APU GEN 多功能试验装置功能齐全,操作方便,安全可靠,能较好地满足 APU GEN 试验需求。

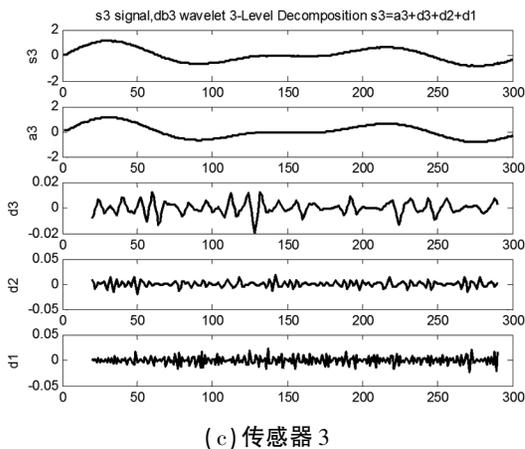
该设备的研制和实现,不仅保障了民用飞机电源系统的设计验证,丰富了民用飞机电源系统试验经验;而且对提升我国民用飞机电源系统试验室试验配套设施的研制能力和试验经验的积累等方面

均具有积极的意义。

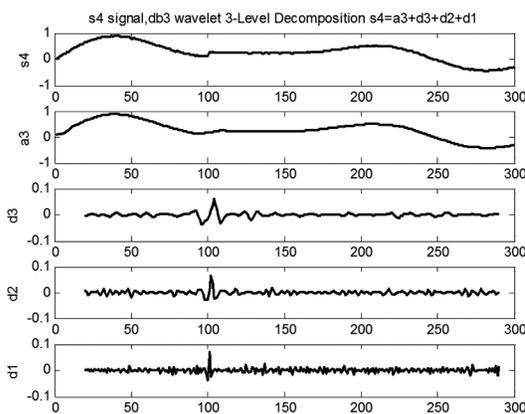
参考文献:

- [1] 吴大榕. 电机学(上册)[M]. 北京:水利电力出版,1979:18-50.
- [2] 沈洪勋,陈维泉,等. 变频调速[M]. 北京:纺织工业出版社,1989:3-8.
- [3] 杜金城. 电气变频调速设计技术[M]. 北京:中国电力出版社,2001:1-12.
- [4] 张燕宾. 变频调速应用实践[M]. 北京:机械工业出版社,2000:3-9.

(上接第 8 页)



(c) 传感器 3



(d) 传感器 4

图 7 大机动时小波变换故障诊断

5 结论

本文分析仿真表明,小波分析对低频非平稳信号的故障检测具有很强的诊断能力。其特点是对信号的多分辨率分析,便于对信号的总体和局部进行刻画,这对故障诊断具有很大的实际意义。小波分析方法为传感器的故障诊断提供了一种有效途径,而且不需要系统的数学模型。同时,小波分析方法不但能够用软件实现,也能够用硬件实现,可以应用在实时性要求很高的场合,因此,它提供的故障检测与诊断算法适合应用在全类飞机上,具有很大的实用价值和广泛的适用性。但是,小波分析又具有自身的缺点,尤其是对于传感器正常的突变,很可能会产生虚警。本文将硬件冗余与小波分析相结合设计了故障检测与隔离算法,这两种方法的优缺点相互补充,为解决低冗余度下故障检测与隔离提供了一条很好的途径。

参考文献:

- [1] Oded M. Golan, Moshe Idan, Ron Meir. Weak Model Based Approach For Fault Detection and Isolation of Sensors in Flight Control Systems[R]. AIAA-2000-4104.
- [2] 文传源. 现代飞行控制[M]. 北京:北京航空航天大学,2004.
- [3] 袁信. 导航系统[M]. 北京:航空工业出版社,1993.