

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2017.08.047

基于纯硬件电路的三余度信号表决器设计

杜永良*, 高亚奎

航空工业第一飞机设计研究院, 陕西 西安 710089

摘要: 针对数模混合式机载控制系统输出的多余度控制信号、模拟式机载控制系统设计中余度输入输出信号综合难度大的问题,对较典型的三余度信号设计了纯硬件的表决器。利用高增益运算放大器对最小及最大信号输入作用的正反饱和特性,并通过将正反饱和作用相互抵消的方法,实现了模拟三余度信号的中值选择;借助于继电器的对电压控制信号的自我识别方式,实现了三余度电压控制信号的多数表决。仿真及测试表明,所设计的三余度信号硬件表决器能够简单有效地解决数模混合式控制系统三余度指令输出的综合问题,以及模拟备份控制系统三余度信号的输入与输出表决,从而能够简化余度系统的设计,提高系统可靠性。

关键词: 纯硬件; 三余度; 表决器; 正反饱和; 信号自识别

中图分类号: V247.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-5453 (2017) 08-0047-05

随着电子电气技术的发展,越来越多的机载控制系统采用了电控技术。为了提高电控系统工作的可靠性与安全性,各系统均采用了余度技术,根据任务可靠性等级的不同,冗余度从二到四不等^[1-3]。一般来说,多余度的机载控制系统均采用了数模混合的控制方式,对输入的多余度信号,完成信号采集后,均通过数字处理器依照表决算法选择合适的信号进行输出,然而当多余度的控制器各自输出余度指令到执行部件时,由于工作环境、费用及复杂度等方面的因素,采用模数转换后进行余度表决,并将表决结果通过数模转换后再进行输出是不切实际的,因此,获取一个正确的指令执行对应操作就显得比较困难。

为解决多余度控制指令综合的问题,通常采用下列不同做法:方法一:利用在线监控技术对多余度部件(如控制器)进行在线监控^[4],当发现故障时通过附加硬件(一般为继电器)电路切断故障通道的输出并转换到正常通道输出;方法二:通过双通道控制双余度执行机构的输出,执行机构输出的机械行程通过机械方式来综合,当一通道电气系统故障时,控制效能降级^[5];方法三:对多台控制器的控制信号在作动器中通过磁通综合的方式来实现,常见的有三余度及四余度磁通综合,在多数信号正常的情况下,此法能够实现多余度控制器对单作动器的控制^[6];方法四:权限分配,不同

的控制器控制到不同舵面的作动器,当某通道失效时,仅丧失对对应舵面或通道的控制^[7]。上述方法分别具有以下优缺点:方法一实现简单,但要附加大量的继电器电路且需要软硬件监控部件的支持,制约表决切换可靠性的提高;方法二一般应用在双余度系统中,但需要机械信号的综合技术作为支撑;方法三一般以特殊定制的作动器为基础,且需要作动器的故障安全功能,应用受程度高;方法四表现为余度降级快,系统可靠性低,系统余度瓶颈大。

同样,对模拟式机载控制系统来说,余度信号选择一直以来都是个难题。

本文针对模拟控制系统,如模拟备份的电传飞行控制系统的模拟余度输入信号的表决、作动部件对模拟余度指令信号的综合,以及电磁阀门等控制对电压指令信号的综合需求出发,主要针对典型的三余度模拟信号以及电压指令信号的表决进行了研究。

1 常规三余度信号的表决算法^[8]

三冗余是冗余系统最常采用的形式。三余度模拟信号的表决通常是将三信号按照大小排列后,选择中值进行输出,即通常所说的中值选择;三余度离散量的表决,通常是

收稿日期: 2017-05-04; 退修日期: 2017-06-05; 录用日期: 2017-07-15

* 通讯作者. Tel: 18049472086 E-mail: duyiliang@163.com

引用格式: DU Yongliang, GAO Yakui. Design of triple redundancy signal-voter based on pure hardware circuit [J]. Aeronautical Science & Technology, 2017, 28 (08): 47-51. 杜永良,高亚奎. 基于纯硬件电路的三余度信号表决器设计 [J]. 航空科学技术, 2017, 28 (08): 47-51.

将离散量值加在一起,当大于等于 2 时,表决值取 1,当小于等于 1 时,表决值取 0,即通常所说的多数表决算法。

本文基于三余度模拟信号的中值选择,三余度电压指令的多数表决原则,分别对三余度模拟信号及三余度电压指令的纯硬件表决法进行描述。

2 三余度模拟信号表决电路设计

三余度模拟信号表决使用高增益的运算放大器,在一个反馈类型的电路中选择三值的中值作为正确输出,如图 1 所示。其中, S_1 、 S_2 及 S_3 代表三余度模拟信号,电路中 R_1 到 R_5 选择相同电阻值的电阻。

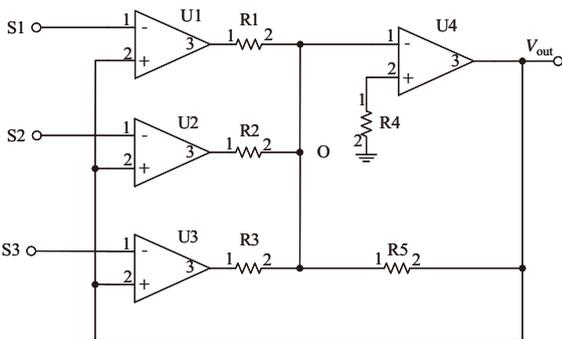


图 1 三余度模拟信号硬件表决电路

Fig.1 Triple redundancy analog signal hardware voter circuit

由于运算放大器开环的高放大增益,因此,当 U_4 输入 1 端输入电压大于或小于 0 时, U_4 输出将饱和;当 U_4 输入 1 端输入电压为 0+ 或 0- 时, U_4 能够输出特定值的电压值。

由于电路的对等性,可假设输入信号电压 $S_1 < S_2 < S_3$ 。当 V_{out} 小于最小输入电压 S_1 时,由于其反馈比较作用,则 U_1 、 U_2 、 U_3 输出均饱和为 $-15V$,若使得 U_1 、 U_2 、 U_3 及 U_4 输出端电流平衡, U_4 输出端的输出电流必将是 U_1 、 U_2 或 U_3 的 3 倍,则在各输出端形成如图 2 所示的等效电路。

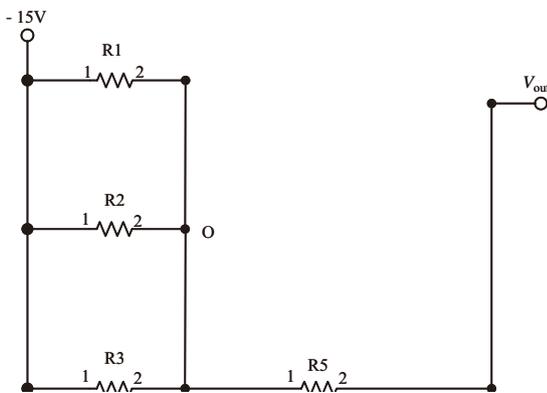


图 2 V_{out} 小于最小信号时等效输出电路

Fig.2 Equivalent output circuit when V_{out} is smaller than the minimum signal

由于电路中 R_1 到 R_5 值均为 R ,且运算放大器的工作范围使得 $V_{out} \leq 15V$,所以 O 点的电压必定小于 0,小于 0 的 O 点电压经运算放大器 U_4 后又会导致输出电压 V_{out} 饱和并达到 $+15V$, V_{out} 的增大,必将使得 V_{out} 不再小于所有三余度输入信号。

当 V_{out} 增大到最小输入电压 S_1 (S_1^- , S_1^+) 时,输出等效电路如图 3 所示。当 O 点的电压小于 0,也就是说 U_1 输出电压小于 $15V$ 时,运算放大器 U_4 深度饱和, V_{out} 输出为 $15V$,只有当 U_1 的输出电压接近 $15V$ 时, V_{out} 输出电压弱饱和,但仍为 $15V$,电路工作在平衡状态,出现这种情况的前提是最小输入电压 S_1 必须为 $15V$,否则 V_{out} 会继续增大当 V_{out} 增大到大于最小输入电压 S_1 ,小于输入电压 S_2 及 S_3 时同样 V_{out} 必须等于饱和电压才能使电路达到平衡,所以只有当 S_2 及 S_3 为 $15V$ 时才成立,否则 V_{out} 会继续朝着 S_2 增大当 V_{out} 增大到 S_2 时, O 点的电压为 0,运算放大器 U_1 正向饱和,输出 $+15V$ 电压,运算放大器 U_3 反向饱和输出 $-15V$ 电压, U_1 、 U_3 输出的作用相互抵消, V_{out} 的输出作用经电阻 R_5 过 O 点后到 R_2 形成回流, U_2 输出平衡在 $-S_2$,电路整体工作在平衡状态,中值被选择出来,如图 4 所示。由于运算放大器 U_1 到 U_3 为并列输入关系,故选择的中值不受连接关系的影响。

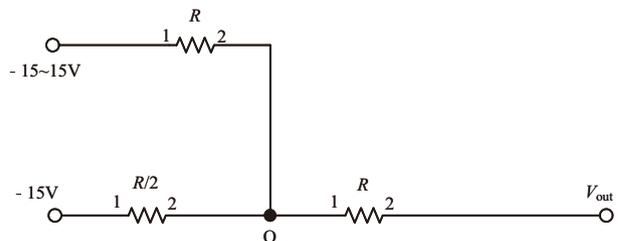


图 3 V_{out} 等于最小信号时等效输出简化电路

Fig.3 Simplified equivalent output circuit when V_{out} is equal the minimum signal

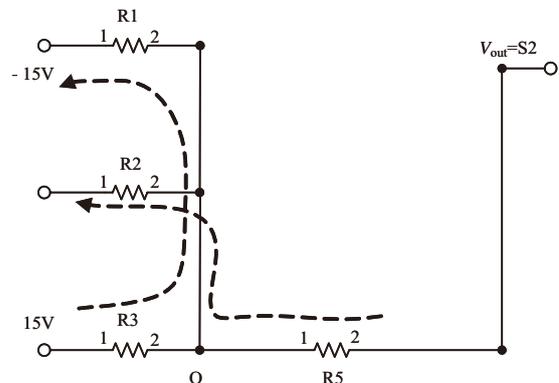


图 4 V_{out} 等于中值时等效输出电路

Fig.4 Equivalent output circuit when V_{out} is equal the middle signal

当 V_{out} 大于 $S3$ 时,反之亦然。图 5 给出了三冗余信号可容忍公差和一次故障的仿真情况。

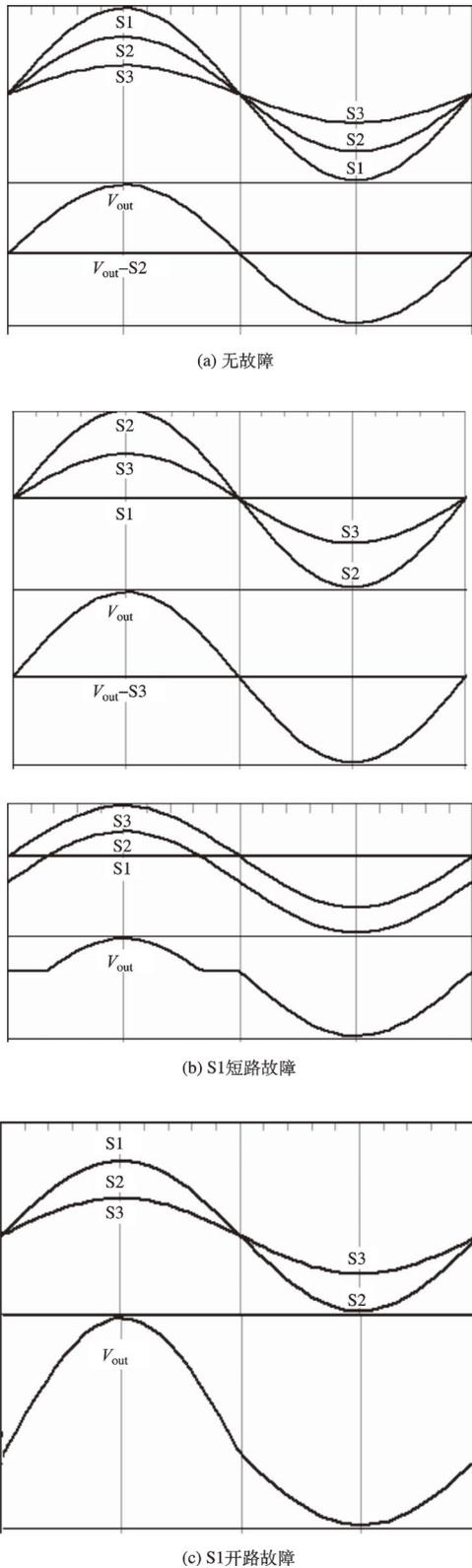


图 5 三冗余模拟信号表决器信号选择仿真图

Fig.5 Triple redundancy signal-voter signal selection simulation results

3 三冗余电压指令表决电路设计

用 $CS1, CS2$ 以及 $CS3$ 表示三冗余电压控制指令,各信号自身代表有效性,根据离散信号多数表决,也即 C_3^2 的理念,信号的表决可用式 (1) 表示。三选二有效的卡诺图如图 6 所示。

$$CS_V = CS1CS2 + CS1CS3 + CS2CS3 \quad (1)$$

式 (1) 是没有经过简化的形式,式 (1) 可以被合并简化为:

$$CS_V = CS1(CS2 + CS3) + CS2CS3 \quad (2)$$

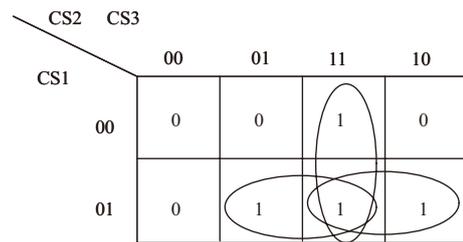


图 6 三选二有效的卡诺图

Fig.6 Three select two Karnaugh map

基于上述关系,通过继电器的逻辑功能实现电压指令的表决,实现电路如图 7 所示,其中 $R1, R2$ 和 $R3$ 代表继电器,NO 代表继电器的常开触点,常开触点代表对应继电器输入端的电压控制指令的有效性。当 $CS1, CS2$ 和 $CS3$ 仅一个输入有效时,有效的电压输出通道被截断;当 $CS1$ 和 $CS2$ 输入同时有效时,继电器 $R1$ 的常开触点 $R1_NO1$ 闭合,继电器 $R2$ 的常开触点 $R2_NO2$ 闭合,输出端 CS_V 输出有效的电压指令, $CS1, CS3$ 或 $CS2, CS3$ 的情况类似;当 $CS1, CS2$ 和 $CS3$ 三个输入均有效时,继电器 $R1, R2$ 和 $R3$ 对应的常开触点均闭合,输出端 CS_V 输出有效的电压指令。

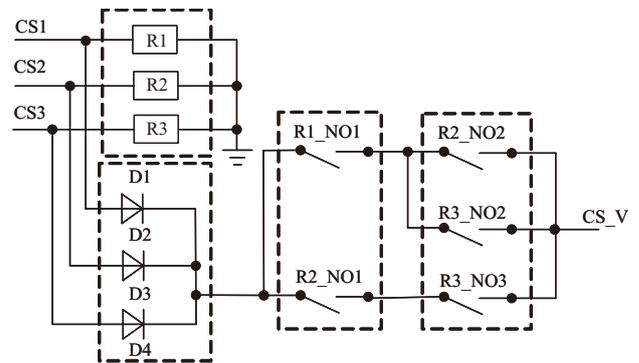


图 7 电压指令三选二电路原理图

Fig.7 Voltage command three select two schematic

4 硬件表决电路优点分析

对三冗余模拟信号表决传统的做法是,先将模拟信号

转换为数字信号,通过处理器进行中值选择后,将选择的中值信号转换为模拟信号输入,本文所设计的三余度模拟信号表决电路,以运算放大器的正反饱和特性通过最大最小值效用的抵消,实现中值信号的选择,相比传统方法,电路结构简单、体积小、生产成本低、电路可靠性高、信号选择表决无滞后、设计调试方便,且通用性强。

对电压指令的选择多采用切换的方式进行,通常是对输出控制器本身进行监控,当发现主控通道故障时切换到备用通道进行输出,或通过余度控制器实现对不同控制部件的控制,三余度电压指令表决器简化了控制器的设计逻辑,同时也能充分发挥电压指令的冗余效用。

因此,三余度模拟表决电路在三余度模拟控制系统以及由于不易于采用数字表决器而引起输出指令综合难度大的作动系统中的信号采集,具有较高的实用价值。三余度电压表决电路,能够有效实现余度控制器对电磁阀的控制,通过电压指令实现两态控制执行器的可靠控制,确保故障安全。

5 结论

仿真测试表明,所设计的三余度模拟信号表决电路,能够快速有效地实现三余度模拟信号的中值选择。理论分析和实际应用表明,所设计的电压指令表决电路基于继电器对电压信号的自我识别能力,结合三选二的逻辑综合,能够实现电压指令信号的多数表决功能。

三余度模拟信号表决及三余度电压指令表决,能够实现三余度模拟信号的中值选择及电压指令的多数表决,电路简单可靠,为简化当前三余度系统指令综合设计提供有效途径。

AST

参考文献

- [1] 赖雄鸣,苏健航,余艳群,等.前起落架转弯操纵系统设计及其余度控制技术研究[J].机械设计,2015(6):66-69.
LAI Xiongming, SU Jianhang, YU Yanqun, et al. Research on steering control system and dual-redundancy technology for nose landing gear [J]. Journal of Machine Design, 2015 (6) : 66-69. (in Chinese)
- [2] 房海华,黄蓝.双余度发动机状态监测技术的研究与应用[J].计算机测量与控制,2016,24(9):65-69.
FANG Haihua, HUANG Lan. Dual-redundancy engine condition monitoring technology's research and application [J]. Computer

Measurement & Control, 2016, 24 (9) : 65-69. (in Chinese)

- [3] 杜永良.基于低冗余度的传感器故障诊断研究[J].民用飞机设计与研究,2013(1):5-8.
DU Yongliang. Study of low hardware redundancy sensor fault detection [J]. Civil Aircraft Design & Research, 2013 (1) : 5-8. (in Chinese)
- [4] 吴琨,胡洪凯,张洪华,等.一种基于实时操作系统的星载计算机三机热备份容错方法 CN103473156A [P]. 2013.
WU Kun, HU Hongkai, ZHANG Honghua, et al. A fault-tolerant method for tri-redundant on-board-computer based on real-time operating system CN103473156A [P]. 2013. (in Chinese)
- [5] 史佑民,杨新团.大型飞机高升力系统的发展及关键技术分析[J].航空制造技术,2016,505(10):74-78.
SHI Youmin, YANG Xintuan. Big aircraft high lift control development and key technologies analysis [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 505 (10) : 74-78. (in Chinese)
- [6] 夏立群.DDV作动器余度数字伺服系统工程设计与实现[J].航空学报,2008,29(2):505-512.
XIA Liqun. Engineering design and realization of redundant digital servo system for DDV actuator [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2008, 29 (2) : 505-512. (in Chinese)
- [7] 耿志东.空客A320飞控系统原理及典型故障分析[J].江苏航空,2013(4):66-68.
GENG Zhidong. Airbus A320 flight control system principle and typical fault analysis [J]. Jiangsu Aviation, 2013 (4) : 66-68. (in Chinese)
- [8] 王道彬,陈怀民,康芳等.三余度飞控系统余度管理算法设计与实现[J].计算机测量与控制,2007,15(11):1621-1623.
WANG Daobin, CHEN Huaimin, KANG Fang, et al. Design and realization of triple-redundancy management method of flight control system [J]. Computer Measurement & Control, 2007, 15 (11) : 1621-1623. (in Chinese) (责任编辑 王潇一)

作者简介

杜永良(1979-)男,博士,高级工程师。主要研究方向:飞行控制系统设计。

Tel: 18049472086 E-mail: duyiliang@163.com

Design of Triple Redundancy Signal-voter Based on Pure Hardware Circuit

DU Yongliang*, GAO Yakui

AVIC The First Aircraft Institute, Xi'an 710089, China

Abstract: For the big difficulty of synthesizing redundant electrical redundant control signal in the digital-analog hybrid airborne control system and electrical redundant input signal in the analog airborne control systems, pure hardware voters for analog signal and voltage signal were designed in this paper based on triple redundancy. By using high-gain operational amplifier positive and negative saturated to the minimum and maximum signals, and thus offset the function of the two signals then the middle value was selected. By self-recognition of relays to voltage control, a majority voter was achieved. Simulation and test results shows that the design of the triple redundancy signal hardware voter can simply and effectively achieve the middle value of the three signal selection function in digital-analog hybrid and analog airborne systems, and thus simplify the design of the redundancy system.

Key Words: pure hardware; triple redundancy; voter; positive and negative saturation; signal self-recognition

Received: 2017-05-04; Revised: 2017-06-15; Accepted: 2017-07-15

*Corresponding author. Tel. :18049472086 E-mail: duyliang@163.com