

# 天线伺服系统多电机同步控制方法<sup>\*</sup>

邓先荣

(南京电子技术研究所, 南京 210013)

【摘要】针对天线伺服系统多电机驱动时容易激发差速振荡的问题,在现有多电机同步控制方法的基础上,提出了和速负反馈控制法、间接差速负反馈控制法和直接差速负反馈控制法,其共同特点是实现简单,响应速度快,同步精度高,抗负载扰动能力强,适用于转速、电流双闭环调速控制系统多电机的转速同步控制。以上三种方法分别运用到不同的天线伺服系统,均获得很高的定位精度和跟踪精度,具有很高的推广价值。

【关键词】伺服系统;同步控制;差速振荡

中图分类号:TN821 文献标识码:A

## Methods of Synchronization Control with Multi-motor Drivers in Antenna Servo System

DENG Xian-rong

(Nanjing Research Institute of Electronics Technology, Nanjing 210013, China)

【Abstract】Three useful methods of synchronization control which solve the problem of speed-deviation oscillation with multi-motor drivers in antenna servo system are introduced in this paper. It has been successfully used for some antenna servo systems, and the performance of the system was improved greatly. Therefore, it will be of value to popularize and use.

【Key words】servo system; synchronization control; speed-deviation oscillation

## 0 引言

多电机同步控制系统在工业生产中广泛存在,从驱动电机之间的连接关系来看一般可以分为两类<sup>[1]</sup>:一类是各电机之间相互独立,电机之间不存在物理连接,采用多电机同步驱动主要是生产工艺或功率的需要,如钢厂的连铸机、轧钢机等都属于这类同步驱动;另一类是各电机间存在柔性的物理连接,各电机的工作状态有相互影响,彼此之间存在着严重的耦合作用,如许多工厂的生产线、装配线或纺织、印染、造纸的锭翼和卷绕等就属于这类同步驱动。对多电机的同步控制研究,尤其是对第二类同步控制的研究,大致分为4种<sup>[2]</sup>:1)基于同一给定电压的并联运行方法,各电机的速度环采用同一给定电压,这种方法线路简单,实现容易,但启动同步跟随性好,抗负载扰动能力差;2)基于同一给定电压的串联运行方法,以前一台电机的转速输出作为下一台电机的速度给定,这种方法简单易行,但启动过程跟随性能不是很理想,抗负载扰动不十分理想;3)基于补偿原理的控制方法,在各电机采用同一给定电压或以前一台电机的转速输出作为下一台

电机的速度给定的基础上,比较主从电机的转速,其差值经补偿器加到从或主电机的控制输入端,这种方法使同步控制精度和抗负载扰动能力都得到了很大的提高,在实际应用中使用最广泛,补偿的方式方法不同效果也有差异;4)基于现代控制理论的控制方法。

一般天线伺服系统为保证其低速平稳性,快速响应能力和连续稳定可靠跟踪,也往往采用双电机或多电机同时驱动负载的方法,以消除齿隙非线性对系统性能的影响,所以也存在多电机同步控制的问题。但电机连接方式却与一般工业应用差异很大,首先电机间是有物理连接的,且这种连接相对于工业应用来说还是刚性的,所以其同步控制要求及其面临的问题也是有很大差异的,而目前在这方面进行深入研究的文献倒不多见,文献<sup>[3]</sup>在采用轮轨式传动的雷达伺服系统中对多电机同步控制问题曾进行了探讨并取得了满意的控制效果,本文尝试就天线伺服系统中的多电机同步控制问题做些深入研究。

## 1 多电机同步问题

天线伺服系统是雷达或其他跟踪设备的重要组成

部分,对系统的跟踪精度和测角精度起着关键作用。天线伺服系统与其他伺服系统相比有其突出特点:1)低速平稳性要好,目标刚出地平线时,天线方位几乎不动,而目标过顶时,俯仰也几乎不动,此时如果出现低速爬行现象,就很难保证跟踪质量(由于地面杂波的影响信噪比本来就不高),甚至丢失目标2)快速响应能力要强,当目标过顶时,方位要在很短的时间内将天线调转 $180^\circ$ ,否则就会因动态滞后过大而丢失目标3)超调量要小,尤其是高工作频率的大口径天线,波束很窄,如果超调过大,在发现目标时就很难及时切入自动跟踪。随着电力电子技术的不断进步和计算机技术的高速发展,天线伺服系统也已由直流驱动向交流驱动发展,由模拟系统向数字系统发展,并有向更高精度发展的趋势<sup>[4]</sup>。

天线伺服系统大多采用高速电机作执行元件,而用大速比减速器来匹配负载的低转速需要。但这种减速器由于轴承间隙,齿轮的侧向间隙等因素会存在空回,从而会引入非线性特性,以致严重损害系统的精度,而机械消除又很难达到满意的效果,所以一般采用双电机联动来实现电消除,有时受电机或功放的功率限制也会采用多电机。每只电机都通过各自的减速箱耦合到一只大齿轮盘,从而驱动天线。理论上讲,这种链接属于刚性联接,转速应该是一致的,但由于功率放大器的一致性和传动链的抗扭特性差异,以及所受负载扰动的不同,电机间仍可能存在转速差。这种细微的转速差对一些工业生产设备来说也许是可以接受的,但对高精度的天线伺服系统来说却是不可忍受的,且因刚性联接的关系很容易激发差速震荡而影响系统的稳定性。所以实现多电机的转速同步控制对天线伺服系统来说是至关重要的。

## 2 多电机同步控制方法

文献[2]对目前工业生产设备中经常采用的多电机同步控制方法进行了很好的总结,其中的第一和第二类方法,就其控制效果来说,根本不适用于天线伺服系统中的多电机同步控制;第四类方法因其可实现性也都不合适;第三类控制法,是在保留各电机速度环的基础上,针对电机间的速度差或直接对各电机的速度调节器进行针对速度差的补偿性改进<sup>[5,6]</sup>,或直接对反馈的差速信号进行智能化调节<sup>[1,7]</sup>,在不容易激发差速震荡的调速系统中,这些方法应该是很好的,不过用于天线伺服系统的多电机同步控制时就有激发差速震荡的可能性,因它们都是通过速度环来调节速度差的,响应仍不够快。

本文在现有的第三类方法的基础上,结合作者多年工程实现经验,提出了和速负反馈控制法、间接差速负反馈控制法和直接差速负反馈控制法,它们的共同特点是实现简单,响应速度快,同步精度高,抗负载扰动能力强,适用于转速、电流双闭环调速控制系统多电机的转速同步控制。下面以两台电机为例,分节进行介绍,其中的符号说明如表1所示。

表 1 电器符号说明

ASR、ASR <sub>i</sub> ( $i=1, 2$ )	转速调节器	ACR <sub>i</sub> ( $i=1, 2, 3, 4$ )	电流调节器
SM <sub>i</sub> ( $i=1, 2, 3, 4$ )	伺服电机	TG <sub>i</sub> ( $i=1, 2, 3, 4$ )	测速发电机
PA <sub>i</sub> ( $i=1, 2, 3, 4$ )	功率放大器	A、A <sub>i</sub> ( $i=1, 2$ )	放大器
T	偏置力矩	$n_{set}$	速度给定
$\alpha_i$ ( $i=1, 2, 3, 4$ )	电流反馈	$\beta_i$ ( $i=1, 2$ )	速度反馈

### 2.1 和速负反馈控制法

和速负反馈控制法原理如图1所示,两电机均运行于对等的力矩控制模式,将两电机的测速发电机测的速度信号相加后,作为速度反馈信号,构成调速系统的速度环,速度误差信号经速度调节器调整后,同时加到两电机的电流环给定端,以对两电机的转速同时进行修正。也就是,利用两电机的速度均衡来消除速度差,从而达到两电机转速同步的目的。

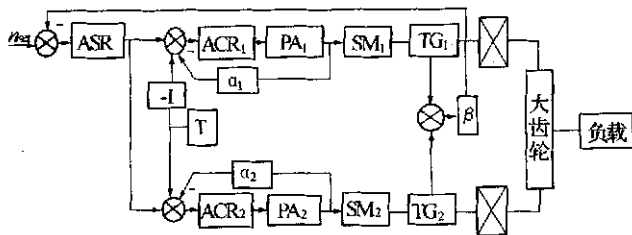


图 1 双电机和速负反馈原理图

和速负反馈法线路简单,容易实现,各电机共用一个速度调节器,通过对电机电流的及时调整而实现对其速度进行对等控制,能使两台电机的转速时刻保持一致,具有很好的动态特性和抗负载扰动能力。不足的是,由于采用和速负反馈的方法实现速度闭环,一定程度上会忽略掉电机间的正反速度差,对电机和传动链的配套一致性要求会高一点,或者说,电机间的互换性稍差。

### 2.2 间接差速负反馈控制法

间接差速负反馈控制法原理如图2所示,两电机运行于对等模式,各自具有其独立的速度环和电流环,将它们的速度调节器输出求差,并引入到各自的速度环给定处,由于它们的速度给定和速度调节器完全一样,所以速度调节器的输出差等价于电机的转速差,于是间接构成差速负反馈,其增益可调,从而使两电机转

速一致。也就是,间接利用两电机的速度差来消除速度差,从而达到两电机转速同步的目的。

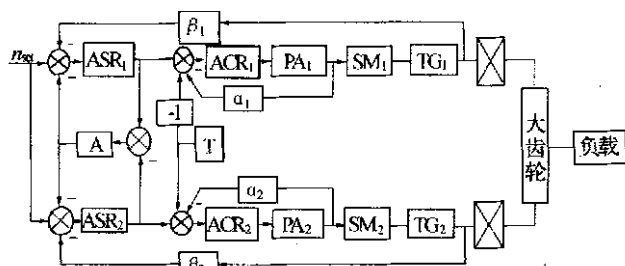


图2 双电机间接差速负反馈原理图

间接差速负反馈法线路简单,容易实现,充分保留了  
了两台电机的速度环,实现速度的对等控制,巧妙得到  
速度差并提前进行及时修正,能使两台电机的转速时  
刻保持一致,具有很好的动态特性和抗干扰能力。不  
足的是,其前提是建立在电路参数、电机和传动链的一  
致性基础上的,所以在实际运用时应尽量保证电路参  
数、电机和传动链的一致性。

### 2.3 直接差速负反馈控制法

直接差速负反馈控制法原理如图 3 所示,两电机采用主从驱动方式,主电机的速度环保留并作为系统的速度环,从电机运行于力矩模式,速度调节器的输出同时作为主从电机的电流给定,另外将两电机的测速发电机测的速度信号求差,并引入各电机的电流给定处,构成差速负反馈,其增益可调,从而使两电机转速相同。也就是,直接利用两电机的速度差来消除速度差,从而达到两电机转速同步的目的。

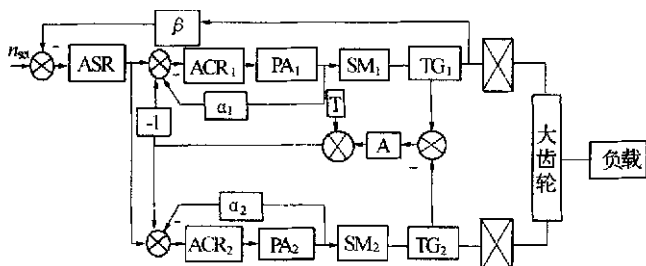


图3 双电机差速负反馈原理图

直接差速负反馈法线路简单,容易实现,由于电流环的响应要比速度环的响应快得多,所以将差速信号引到电流给定处能够尽可能快的抑制两电机转速的不同步。不足的是,由于采用的是主从驱动方式,从电机没有速度环,其速度全靠主电机控制,响应会略有滞后,对外部扰动会相对敏感一些。但采取差速信号的快速引入并得到及时响应一定程度上能弥补此不足之处。

分组,先对组内电机用差速负反馈法进行转速同步,再对组间电机同样用差速负反馈法进行进一步的转速同步,从而实现所有电机的转速同步。四台电机的差速负反馈原理如图4所示。

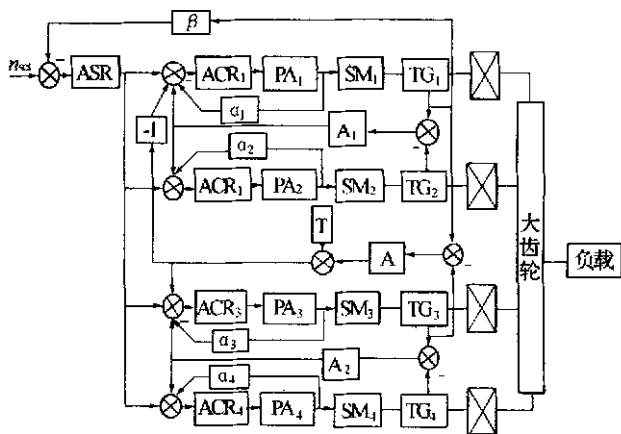


图 4 四电机差速负反馈原理图

### 3 工程实践

一套小口径天线遥感卫星地面接收系统,其最大角速度  $15^{\circ}/\text{s}$ ,最大角加速度  $10^{\circ}/\text{s}^2$ ,带宽 1.5 Hz,精度  $0.005^{\circ}$ ;主要工作方式有:手动控制、手动置位、程序引导、自动跟踪等。方位、俯仰均采用双电机同步驱动控制方案,用稀土永磁直流电机-测速机组作执行元件和测量元件,功率驱动采用 IGBT 功率模块,以 PWM 方式进行调速。调试过程中发现 (1)用其中的一台电机驱动,另一台作为负载时,由于齿隙偏大,很容易激发极限环振荡 (2)用两台电机并行驱动并采用电消隙时,有效地抑制了极限环振荡,却很容易激发差速振荡。后来采用如图 1 所示的和速负反馈控制法系统才得以稳定工作,并最终达到指标要求。系统已运行多年,为用户创造了很好的经济效益。

在另一套同样口径天线的遥感卫星地面接收系统中,伺服系统指标要求相同,方位、俯仰也采用双电机同步驱动,不同的是,采用了自控式变频同步电机(又称无刷直流电机)做执行元件,无刷测速发电机作反馈元件的交流驱动方案。本文采用如图 2 所示的间接差速负反馈法进行电机转速的同步控制同样取得了预期的控制效果,并满足或超过了指标要求。这套系统其伺服控制性能比国外天线有过之而无不及,深受用户好评。

## 4 结 语

一般天线伺服系统为保证其低速平稳性,快速响

(下转第 51 页)

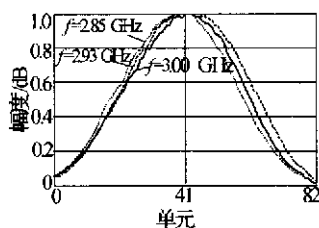


图8 三个频率口径分布测试结果

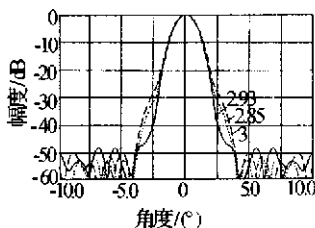
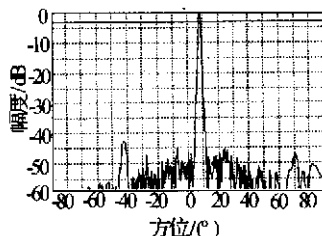
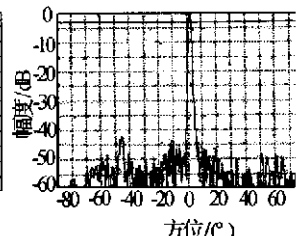


图9 三个频率实测主瓣



a. 低频端



b. 高频端

图10 平面近场测瓣测试结果

## 5 结 论

通过对波导窄边缝隙天线频率特性的分析计算,比较了不同  $G_0$  值的天线口径幅度分布、波瓣、效率及增益。分析计算结果和试验结果均表明,要获得较宽的增益带宽和副瓣带宽应选取较小的  $G_0$ 。进行缝参数设计,相反,如果要求的带宽较窄,则应选取较大的  $G_0$ 。设计缝参数以获得高增益。

致谢:在本文的天线试验过程中得到向广志、金林、顾卫军等专家的指导和帮助,在此表示衷心感谢!

## 参 考 文 献

- 1 Johnson R C, Jasik H, Eds. Antenna engineering handbook. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 1984
- 2 Stevenson A F. Theory of slots in rectangular waveguides. J Appl Physics, 1948, 19(1): 24-28
- 3 金 林. 低副瓣波导窄边缝隙行波阵的设计计算. 天线技术, 1997(13): 1-7
- 4 Jan Cheng-Geng, Powen Hsu, Wu Ruey-Beei. Moment method analysis of sidewall inclined slots in rectangular waveguides. IEEE Trans AP, 1991, 39(1): 68-73
- 5 Raju G S N, Ajay Chakraborty, Das B N. Studies on wide inclined slots in the narrow wall of rectangular waveguides. IEEE trans, 1990, 38(1): 24-29
- 6 钟顺时, 费桐秋, 孙玉林. 波导窄边缝隙天线的设计. 西北电讯工程学院学报, 1976(2): 165-184
- 7 黄 径. 超低副瓣波导窄边裂缝阵列天线. 现代雷达, 1994, 16(1): 101-104

郑雪飞 男, 1968年生, 高级工程师, 1990年毕业于电子科技大学电磁场与微波技术专业。研究方向为低副瓣相控阵天线、毫米波天线和天线测量技术等。

(上接第47页)

应能力和连续稳定可靠跟踪,也常采用双电机或多电机同时驱动负载方法,以消除齿隙非线性对系统性能的影响,所以存在多电机同步控制问题,但其电机连接方式与一般工业应用相比却是刚性链接,所以其同步控制主要是抑制差速振荡。和速负反馈控制法、间接差速负反馈控制法和直接差速负反馈控制法,实现简单,响应速度快,同步精度高,抗负载扰动能力强,均能很好地抑制天线伺服系统双电机驱动中的差速振荡。用于多电机同步控制时,将电机分成两台一组,先控制组内同步,再控制组间同步,从而实现多电机同步。它们同样适用于其他工业生产设备的多电机同步控制。

本文的三种方法分别运用到不同的天线伺服系统,均很好地抑制了天线伺服系统双电机驱动中的差速振荡,从而获得了很高的定位精度和跟踪精度。

如果扬长避短,将和速负反馈法和直接差速负反馈法或将间接差速负反馈法和直接差速负反馈法结合起来运用,应该能起到更佳的效果。这将是下一步要进行工程验证的工作。

## 参 考 文 献

- 1 文 方, 姜孝华. 多级电机同步驱动控制系统. 电气传动, 2000(5): 14-17
- 2 刘福才, 张学莲, 刘立伟. 多级电机传动系统同步控制理论与应用研究. 控制工程, 2002, 9(4): 87-90
- 3 万 其, 程望东. 雷达伺服多电机速度同步和防滑设计. 现代雷达, 2003, 25(11): 39-40
- 4 刘世挺. 雷达伺服控制技术的新发展. 火控雷达技术, 2002(31): 33-35
- 5 李从心, 凌 健. 时变大惯量速度同步控制系统. 上海交通大学学报, 2001, 35(7): 966-968
- 6 刘立伟, 刘福才, 张学莲. 内模控制在多电机同步驱动系统中的应用. 燕山大学学报, 2002, 26(3): 264-267
- 7 刘福才, 张学莲. 基于模糊PID补偿控制的多电机同步驱动系统. 电子技术, 2002(8): 29-31

邓先荣 男, 高级工程师, 1993年毕业于东南大学自动化所自动控制理论及应用专业, 工学硕士。现从事低轨卫星无源跟踪伺服系统, 同步卫星跟踪伺服系统的设计研究工作。

## 如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深, 让许多工程师望而却步, 然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上, 我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识, 借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))专注于微波射频和天线设计人才的培养, 推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程, 化繁为简, 直观易学, 可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛, 让天线设计不再难...



### HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书, 课程从基础讲起, 内容由浅入深, 理论介绍和实际操作讲解相结合, 全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程, 可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计, 让天线设计不再难...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

### CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程, 由经验丰富的专家授课, 旨在帮助您从零开始, 全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程, 边操作边讲解, 直观易学; 购买套装同时赠送 3 个月在线答疑, 帮您解答学习中遇到的问题, 让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



### 13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程, 培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合, 全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作, 同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习, 可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试...

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



## 关于易迪拓培训:

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,一直致力和专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;后于 2006 年整合合并微波 EDA 网([www.mweda.com](http://www.mweda.com)),现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 ADS、HFSS 等专业软件使用培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司,以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

## 我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年, 10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养,更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果,又能免除您舟车劳顿的辛苦,学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲,结合实际工程案例,直观、实用、易学

## 联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>