

(美) D. F. 盖格 著

科学出版社

直流电动机 速度控制锁相环路



直流电动机 速度控制锁相环路

〔美〕 D. F. 盖格 著

杨兴瑶 译

科学出版社

1985

内 容 简 介

这是一本系统叙述电动机速度控制锁相环路理论和工程问题的专著。书中着重阐明了具有数字积分器的锁相环路分析和设计方法。全书共分七章,主要包括光电测速器、相位-频率检测电路、频率锁定环路、计算机辅助设计、测量和实践等内容。此外还有有关控制系统稳定性和电动机传递函数等附录。全书内容深入浅出,书中附有一些设计实例,有较大的参考价值。

本书可供从事自动控制、工业自动化和计算机应用等方面的工程技术人员以及大专院校有关专业的师生参考。

D. F. Geiger

PHASELOCK LOOPS FOR DC MOTOR SPEED CONTROL

John Wiley & Sons, Inc., 1981

直 流 电 动 机 速 度 控 制 锁 相 环 路

[美] D. F. 盖格 著

杨兴瑞 译

责任编辑 杨兴瑞

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1985年12月第一版 开本:787×1092 1/32

1985年12月第一次印刷 印张:6 5/8

印数:0001—3,550 字数:146,000

统一书号:15031·688

本社书号:4522·15—8

定价: 1.60 元

译 者 的 话

锁相环路最初应用在通讯、广播电视、雷达、遥测遥控和精密测量仪表等方面，但真正应用到电动机速度控制领域并日趋完善则是七十年代以后的事。这是和集成电路与计算机技术的迅猛发展分不开的。

电动机锁相速度控制系统与一般模拟式控制系统相比，具有给定信号精度高、调速精度高以及易于实现程序和计算机控制等一系列优点，因此，自它出现以来就受到国内外各方面的重视。目前，锁相技术已广泛应用于摄影机、录音机、计算机外围设备、天文和卫星观测站、光纤拉丝机、造纸机等等单机或多机同步传动系统中，并且在某些系统中还实现了微型计算机和自适应控制。

虽然锁相环路速度控制系统发展很快并且已有大量的文章发表，但是迄今国内尚没有一本比较完整叙述这一领域内容的书籍。鉴于上述情况，我们翻译出版了这本书。书中叙述的重点是具有数字积分器和数字-模拟转换器的锁相环路设计方法。在介绍光电测速器时分析了误差来源并提出解决办法，在分析锁相环路时，将锁相伺服系统与普通模拟式位置伺服系统和速度控制系统进行比较，从而有利于对物理概念的理解。此外，书中在介绍设计方法时还附有一些设计实例，以便于设计者参考。

本书由北京航空学院浦迈俊同志详细审阅校订。在翻译过程中还得到了南京航空学院林道垣同志和华东工程学院冯纘刚、朱宗正、杨成梧等同志的热情支持和帮助，译者在此表

示衷心的感谢。

由于译者水平有限，书中难免有错误和不妥之处，恳请读者批评指正。

译 者

1984年5月于南京

序 言

在六十年代初, 科尔摩根公司 (Kollmorgen Corporation) 的精密单片集成电路公司电动机部 (PMI* Motors Division) 就曾制成并出售第一台取名为“S-1 伺服”的商用电动机控制锁相环路(PLL)系统。虽然采用相-频检测器一般能得到优良的性能, 但是对一种新的系统进行伺服补偿常常是麻烦的, 且需进行大量的试探估算。由于建立能够满足不同用户性能要求的系统需要工程时间, 因此, PMI 在六十年代后期就开始减少出售 S-1 伺服系统, 到1970年实际上已停止出售这种系统。

然而, 人们对锁相伺服系统的兴趣并未中止, 用户仍经常向 PMI 询问该系统的定价或在应用中请求给予帮助。这就导致在 1977 年人们对电动机锁相控制系统重新引起重视。这方面的进展包括有以下几个阶段:

(1) 因为把伺服系统看作是运动的位置伺服系统, 并常常采用速率阻尼来促使系统稳定, 所以就产生了用速率阻尼来设计系统的想法。这一步是进一步完善系统的阶段。

(2) 采用带有数字-模拟转换器的可逆计数器来代替相-频检测器, 从而产生了频率锁定环路。

(3) 对锁相环路的分析观点从运动的位置伺服系统转向具有积分的速度伺服系统。这时采用 ω (角速度, 弧度每秒) 作为独立变量。

(4) 以通用项来进行分析 (适于计算机求解), 代替在各

* PMI 即 Precision Monolithics Inc. 的缩写。——译者注

种情况下的图解处理方法。

(5) 增加了四象限速度检测器和运算放大器相位控制电路。

对上述这些发展作出贡献的有 Frank Bock, 他首先提出用可逆计数器来代替相位检测器。库利特半导体 (Kulite Semiconductor) 公司的 Howie Bernstein 在分析方法上给予了极重要的指导。由此导致采用计算机辅助设计方法来代替各种情况下的图解分析方法。

其它一些作出贡献的还有 PMI 电动机部的 Frank Arnold, 他始终坚持采用锁相环路, 而不仅仅是采用频率锁定环路; Mark Stern 不断地提出一些丰富的想法和建议, 加利福尼亚圣约瑟的运动控制公司 (Motion Control Inc., San Jose, California) 的 Hans Waagen——前任 PMI 应用总工程师, 对资料进行了最初的编辑, 对完善系统提出了很多建议, 并帮助我树立了能做好这件工作的信心。PMI 工程部的 Connie Owens 打印了本书大部分手稿。她的热情合作给了我极大的帮助。

D. F. 盖格

1981年6月于纽约华盛顿港

目 录

第一章 电动机控制锁相环路引论	1
1.1 通讯锁相环路与电动机控制锁相环路的比较	4
1.2 独立变量选择 θ 还是 ω ?	7
第二章 光电测速器	10
2.1 基本概念	10
2.2 光电测速器误差的来源	12
2.3 同心度误差分析	14
2.4 误差的消除方法	16
2.5 光敏晶体管带宽的改善	20
2.6 光源	26
第三章 来自光电测速器上的信息复现	28
3.1 速度敏感电路	28
3.2 方向敏感电路	31
3.3 四象限速度敏感电路	33
3.4 电路的工作原理分析	34
3.5 相位检测器概述	40
3.6 乘法器型相位检测器	41
3.7 开关型相位检测器	43
3.8 相-频检测器	46
3.9 相-频检测器的主要问题	51
3.10 数字积分器及锁定检测	52
第四章 采用光电测速器的速度伺服系统	58
4.1 动态分析	58

4.2	静态分析	62
4.3	静态分析和动态分析组合	64
第五章	频率锁定环路	72
5.1	相位锁定	75
5.2	闭环响应	88
第六章	计算机辅助设计 (CAD)	92
6.1	“PLL DESIGN” 程序	93
6.2	“ANGL, MAGN, CLR” 程序	98
6.3	举例	108
第七章	测量和实践	117
7.1	示波器显示技术	117
7.2	颤动	119
7.3	扭转谐振	120
附录 A	控制系统稳定性问题概要	125
A.1	传递函数法	125
A.2	稳定性准则	128
A.3	直接法	131
A.4	奈奎斯特稳定准则	132
A.5	相对稳定性	139
A.6	伯德图法	145
附录 B	位置、速度和锁相伺服系统	153
B.1	作为运动的位置伺服系统的锁相环路	153
B.2	锁相环路同普通速度伺服系统的比较	159
附录 C	永磁式直流电动机的传递函数	162
C.1	静态方程	162
C.2	动态方程	164
附录 D	与惯性无关的设计	167
D.1	与惯性无关的锁相环路设计步骤	168

D.2 设计举例.....	177
附录 E 二次项和二阶系统	182
E.1 二次项.....	182
E.2 二阶系统.....	187
附录 F PMI 电动机(U12M4H 型)工程数据及图片	194
参考文献	198
补充参考文献	199
单位换算及符号表	201

第一章 电动机控制锁相环路引论

自从第一台直流电机问世以来,电动机的速度控制就成为运动控制中活跃的一个领域。机械调速器及其后来的直流测速负反馈(包括它的所有类似方案)在速度控制方法中占主导地位。这种常规速度伺服系统在给定速度和实际速度之间常常存在有误差。尽管这个误差在增大增益后可以减小,但却不能使其减小到零。增益达到某一数量级后,系统会变得不稳定。

存在有限误差的问题,可以通过在伺服系统前向支路上引入纯积分环节来加以解决。纯积分环节产生无限大直流增益而同时具有低的支流增益(见附录B)。这就避免了出现振荡(由于交流增益低),同时又使伺服系统没有稳态速度误差*(由于直流增益无限大)。

看来似乎所有的问题都已经解决了。但实际上并不是这样。测速发电机是性能相当差的速度传感器,它们经常受到模拟式元件所固有的各种无法预料的变化影响。空气隙和温度的变化以及电刷的磨损都会引起测速机输出斜率(或称梯度,即电势常数)的改变。既然伺服系统的工作完全依赖于对速度的了解,因此,能力相当差的模拟式测速发电机是提高系统性能的主要限制,这不能靠改善电子线路的办法来克服。由于这种原因,锁相环路电动机控制系统就受到了重视。

* 本书所指的速度误差是指速度控制系统给定速度与实际速度之间的误差,与普通位置伺服系统中所指的速度误差(等速跟踪下的角度误差)不同。

——译者注

锁相环路(PLL)电动机速度控制系统展示了现代化的速度控制方法。整转数的速度精度是极高的, 给定速度和实际速度之间的误差为零。分转数(低于一转)的速度精度取决于光电测速器的质量。电动机锁相伺服系统的原理结构示于图1-1。在电动机的轴上装有一个光电圆盘, 盘面有 N 条径向刻线。发光二极管(LED)或白炽灯装在圆盘的一面, 光敏元件和光栅装在圆盘的另一面。当圆盘旋转时, 光线交替地从圆盘-光栅组穿过或被其遮挡。由此产生的光敏三极管输出, 其

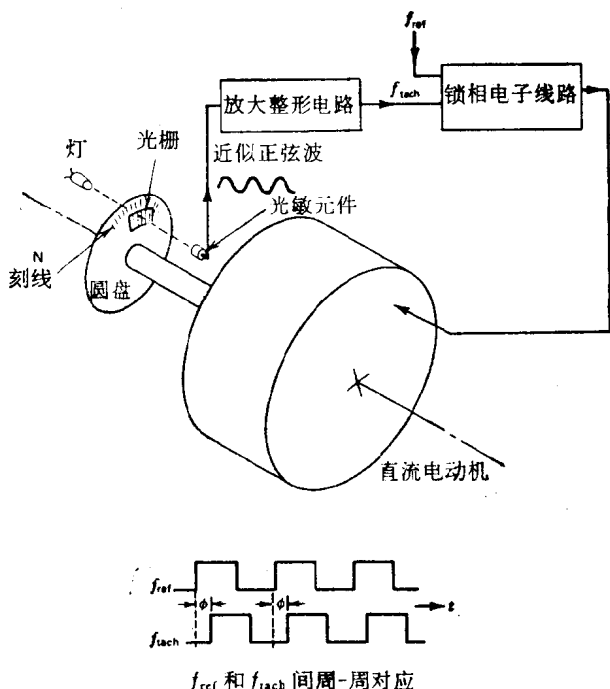


图1-1 锁相伺服系统的原理结构图。电动机-光电测速器组可看作电压(或电流)控制振荡器。由此产生的输出频率(f_{tach})同参考频率(f_{ref})进行比较, 并通过电子线路使 f_{ref} 与 f_{tach} 之间有周-周对应的关系

波形为近似正弦波，通常要进行放大和整形。此波形的频率(f_{tach})与电机转速成正比 [$f_{tach} = (N \times \text{rpm})/60$ ，这里 N 为刻线的密度；rpm为每分钟转数]。

锁相电子线路的作用是检测 f_{tach} 与 f_{ref} 之间的差值并驱动电动机，使测速器的频率与参考频率之间有周-周对应的关系。因此，电动机的角速度与参考振荡器的角速度之间能够精确地同步。瞬时精度取决于光电测速器的质量和配置的准确程度(见第二章)。

这种系统优越的主要原因在于它把光电测速器作为速度敏感元件。光电测速器的性能要比发电机类型的测速机好得多。如果光电圆盘在电动机轴上安装正确，那么它所产生的频率就正比于电动机的速度。空气隙、温度以及磁场强度等的改变对光电测速器的输出完全没有影响。相反，模拟式测速发电机却直接受到上述一些因素的影响。

电动机速度控制采用锁相技术具有下列一些优点：

(1) 对于每分钟几转以上的速度，光电测速器是最好的速度传感器。它没有机械接触(即无磨损)，没有磁传感器(即同步器)所共有的速度电压的问题。

(2) 容易得到非常稳定和精确的参考信号源。一个高质量的频率合成器(其精度为百万分之几)，可以很容易地由一些集成电路片和一块晶体构成(注意，在采用模拟式测速机的常规伺服系统中，参考电压源的精度要求仅以千分数计，而晶体振荡器的频率精度则以百万分数计)。

(3) 通过改变参考频率的大小，可以连续地调节速度。

(4) 采用非常简单的电子线路就可以发挥出直流电动机的所有优点(高的起动转矩，良好的动态控制性能)，而又能够提供极高的速度精度。

锁相环路主要有两个缺点：

(1) 伺服系统锁相环路对于参数变化还有些敏感。在惯性负载情况下,这种变化可能引起振荡,必须对环路参数作某些调整。本书附录 D 中提供的方法可以使这种困难减小到最低程度。

(2) 光电测速器还相当贵。一个中档的光电测速器的价格约为高质量直流测速机的两倍。

1.1 通讯锁相环路与电动机控制 锁相环路的比较

在很多文献中都有关于锁相环路的介绍和分析,但这些环路多数是属于通讯环路方面的。在通讯中应用的锁相环路与电动机速度控制中应用的锁相环路之间存在着本质的差别。在电动机控制的场合下,电动机-光电测速器组可以被看作是带有惯性的电压控制振荡器(VCO),带有惯性的 VCO 在文献中尚未见论述。普通通讯环路中的 VCO 可以根据指令很快地改变其频率,但电动机-光电测速器组 VCO 却不能这样。这一点使伺服系统的锁定过程大为复杂。

通讯环路中应用的 VCO,其传递函数为

$$f_o = k\nu \quad (1-1)$$

式中 f_o ——输出频率(Hz);

k ——常数(Hz/V);

ν ——输入电压(V)。

在目前这种情况下系统没有储能,因此理论上 VCO 的频率可以瞬时改变。

如果电动机-光电测速器组用来作为电流控制振荡器,则其传递函数为

$$\frac{f_{tach}}{I} = \frac{NK_T}{2\pi} \frac{1}{Js + K_D} \quad (1-2)$$

式中 f_{tach} ——测速器的输出频率 (Hz);

I ——电动机电流 (A);

K_T ——电动机转矩常数 (oz-in./A);

s ——拉普拉斯算子;

J ——转动惯量 (oz-in-sec²);

K_D ——电动机阻尼常数 (oz-in./rad/sec);

N ——圆盘刻线密度。

由于系统中的储能作用而引进了一个附加极点。这个极点使此时的环路在各个方面都变得复杂了。此外,极点的位置与所用的特定惯性负载有关。当从一种应用场合变到另一种应用场合时,极点的位置也改变。

电动机控制锁相环路的通用方块图如图 1-2 所示。系统中产生三种误差信号: 速度误差 (A 点)、速度积分误差 (B 点) 和速度重积分误差 (C 点)。它们在加法器 Σ_4 中相加, 并经过跨导放大器 A_1 放大, 然后由电动机变换为轴的转动, 再通过光电测速器 N 构成反馈。 A_1 是把输入电流变换为输出

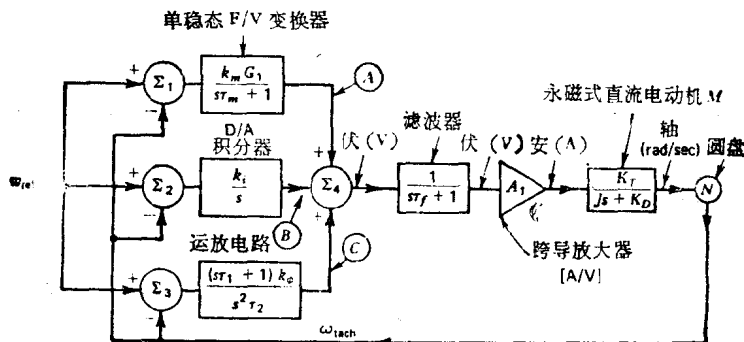


图 1-2 适于分析用的锁相环路方块图

电压的跨导放大器， M 是永磁式直流电动机。电动机与光电测速器可以看作是一个电流控制振荡器，因为这里电动机是由电流源 A_1 驱动的。

很明显，这种电动机控制锁相环路与普通的锁相环路相比，在很多方面是不同的。图 1-2 所示的方块图及其对应的伺服系统的逐渐形成是经历过一段时间的，采用这一精确图形的原因也是多方面的。其中一种最重要的考虑是，还找不到用于电动机速度控制的满意的相位检测器（见第三章有关相位检测器部分）。要进一步看清楚为什么要这样画方块图可参见附录 B 和第五章。

在通讯环路中误差检测器是一个真正的相位检测器，其输出同参考频率和测速器频率间的相位差成比例。相位检测器用来复现参考信号相位中包含的信息。用数学公式表达就是一个真正的相位检测器应有如下的关系：

$$\varepsilon = \theta_{\text{ref}} - \theta_{\text{tach}} \quad (1-3)$$

式中 ε 为相位差。在电动机控制环路中没有参考信号相位的信息。因此，电动机速度控制不需要锁相，而只需要对频率误差进行积分。这就降低了一些对误差检测器提出的严格条件。一个简单的积分器有如下关系：

$$\varepsilon = \int (\omega_{\text{ref}} - \omega_{\text{tach}}) dt + K \quad (\omega = 2\pi f) \quad (1-4)$$

将上述积分器用在锁相环路中，将迫使 f_{ref} 和 f_{tach} 之间的误差减小到零。但是，由于式中 K 不是精确给定的，甚至可能是漂移的，因此，积分器产生不了 f_{tach} 和 f_{ref} 之间的相位对应，该相位对应需由辅助方法产生。许多不同类型的误差检测器都是可行的，它们各有利弊。有关这方面的内容将在第三章中叙述。下面仅作一综述。

1. 乘法器型检测器 将要锁定的两个信号相乘（从而得

到两信号的积),并传送到低通滤波器中去。这在通讯环路中能产生满意的结果,但在电动机速度控制中是不能用的。其原因是,在失锁时该检测器产生不了加速或减速用的直流信号。而且,即使通过辅助方法使电动机加速了,也很可能把频率锁定在谐波频率上,从而使电动机轴有错误的速度。

2. 相-频检测器 这种检测器能给出加速和减速用的直流信号,它不会出现谐波锁定。但是,它在频域内会有严重的非线性。这就使锁定过程大为复杂。因此,对于电动机控制来讲相-频检测器也不是应优先采取的方案。

3. 计数器和数字-模拟转换器式检测器 这不是一个真正的相位检测器,而是一个积分器。它采用一个数字式可逆计数器(通常 8 比特长)和一个数字-模拟转换器(也是 8 比特长),就能给出方程(1-4)形式的输出,同时有助于设计者克服其它相位检测器所固有的问题。

1.2 独立变量选择 θ 还是 ω ?

图 1-2 所示的伺服系统可以用两种观点来进行研究。一种是以相位 θ 作独立变量的真正锁相伺服系统,另一种是以频率 ω 作独立变量的锁频伺服系统。

(1) 相位伺服系统(θ 作独立变量)是把测速器的相位对准参考频率的相位。当相位差是常数时,根据定义,频率就是一致的,在 f_{tach} 和 f_{ref} 之间存在周-周对应的关系。这种观点在文献中被广泛采用,但在电动机控制分析中不宜采用。

(2) 频率伺服系统(ω 作独立变量)在其信号路径上有一个纯积分器。纯积分器使 f_{ref} 和 f_{tach} 之间的误差减小到零。同时,在测速器频率和参考频率之间存在周-周对应关系。相位由辅助方法控制。这对电动机控制来讲是一种较好的方