

五相步进电机转速稳定度的分析与测试

Analysis and test of Five Phase Stepping motor rotation stability

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所) 汪逸群 颜昌翔

WANG Yi-qun YAN Chang-xiang

摘要: 为了满足空间光学扫描机构低速平稳扫描的驱动需求,对候选五相步进电机的转速稳定度进行了分析与测试。首先,从理论上研究了步进电机转速波动的原因及转速成分,给出了抑制电机速度波动的策略;接着基于 1.5" 绝对式光电轴角编码器建立了转速稳定度检测系统;对已采取转速波动抑制措施的五相步进电机速度进行了检测,测试结果表明步进电机在低频谐振区速度波动明显,但适当提高转速可明显提高转速稳定度,配以高精度大速比谐波减速器后可以满足工程需求。

关键词: 步进电机; 扫描机构; 转速稳定度; 速度检测

中图分类号: TP399

文献标识码: B

Abstract: In order to meet the driving requirement of space optical scanning mechanism, rotation stability of candidate five stepping motor has been analysis and tested. Firstly, rotation fluctuating reasons and speed components have been researched from theory and the strategies of restraining rotation fluctuation have been proposed. Secondly, a rotation stability detecting system has been built based on 1.5" absolute optoelectronic encoder. Via the system the speed of five phase stepping motor, which was drove by rotation fluctuation strategies, has been tested. According to testing results, rotation fluctuation of stepping motor is very obvious during low frequency resonance area. When increasing the speed, rotation stability of five phase motor is improved very much. Incorporating high precision harmonic reducer, five phase stepping motor can be used in space engineering.

Key words: Stepping motor; Scanning mechanism; Rotation stability; Speed test

1 引言

从广义上讲,步进电机是一种受电脉冲信号控制的无刷式直流电动机,也可看作是在一定频率范围内转速与控制脉冲频率同步的同步电机。它具有控制原理简单、机械结构坚固耐用、快速起停、精确步进、抗干扰能力强等优点。近年来,更是发展了步进电机细分驱动技术,显著的减小了步进电机的步距角,提高了进给分辨率,增加了电机运行的平稳性,而谐波减速器等高性能减速装置的发展则进一步提高了步进电机的负载能力。这些极富吸引力的特性使步进电机成为航天遥感中的首选。

随着我国航天遥感事业的快速发展,对驱动装置的运动性能提出了更高要求。工业控制中常用的伺服电机与高精度光电编码器所组成的闭环控制系统虽然可以满足指标要求,但高精度的基准源、抗干扰设计等无疑都将大大增加驱动电路的复杂程度,降低了系统的可靠性。因此对步进电机性能潜力的进一步挖掘成为航天工程师们努力的方向之一,高性能五相混合式步进电机在一定程度上满足这种需求。相对二相步进电机而言,五相电机的运行性能有显著提高,主要表现为:分辨率提高、起动停止频率提高、运行频域增宽、振荡趋势减弱、噪声下降、运动平稳性提高、定位转矩减少,可以满足某些空间光学扫描机构、天线指向机构等精密空间运动机构的驱动需求。这类机构对转速平稳度的要求极为严格,而步进电机本身固有的振荡特性始终困扰着航天控制工程师。本文试图对五相混合式步进电机的转速稳定度进行研究,对其影响作出充分的分析与评估,确定它

是否能满足任务要求,进一步来说,这对电机选型及关键参数的选取也具有一定的指导意义。

2 五相步进电机转速波动的原因及对策

2.1 五相步进电机的振荡机理分析

步进谐振一直是步进电机最显著的特点之一,在物理上表现为电机转速的波动(一般称为振荡或抖动等),单步运行时甚至会导致位置上的前后振动,从而直接威胁步进电机的转速平稳度。研究发现步进电机的转速中包含三种成分:其一为平均分量;其二为衰减的自由振荡分量;其三为不衰减的、由绕组切换所引起的强迫振荡分量。其中平均分量直接构成电机的平均转速,而后两项是危害电机转速平稳度的振荡分量。当步进电机的运行频率较高,转速的振荡表现为低频的自由振荡,如果没有外界干扰,经过一段时间后振荡将基本平息,在这个区间电机运行相对平稳。当步进电机的运行频率比较低时,转速的振荡表现为低频的自由振荡和绕组切换同频率的强迫振荡的混合效应。当步进电机的运行频率进一步降低,两种振荡分量直接相加,电机发生共振,即所谓的低频共振现象。当电机处于极低频运行状态,则电机的每一步都和单步运动一样,转子要经历一个“起步加速-惯性运动-减速制动”的过程,而造成转速波动的本质原因是由电机转矩波动导致的加速度波动。因此,对于步进电机来说,低速区间更容易出现振荡、丢步等严重影响转速稳定度的现象,而往往空间活动机构的转速很慢,为了降低对传动装置速比的要求,需要步进电机在低频区间进行工作,因此如何抑制低频振荡变得非常重要。

2.2 抑制振荡的措施

汪逸群: 硕士

要克服步进电机的振荡,可以采取各种阻尼方法,吸收电机转子的多余能量,从而对电机振荡进行有效抑制。目前,常用的阻尼方法主要有如下几类:

合理选择电机:电机相数对低频影响突出,相数和运行拍数增加,步距角减小,振荡趋势减小,电机的稳定度增加。通常半步驱动时振荡比整步驱动时弱。选用步进电机时,通过选择相数及通电方式尽量避开低频振荡区。五相步进电机的振荡区间比二相电机更窄,而且振荡幅度明显降低。

机械阻尼:它的实质是通过机械方式将转子上多余的能量吸收或消耗掉,以加速转子振荡的衰减。包括惯性阻尼、粘性阻尼和涡流阻尼。最简单的方法是在电机的转轴上应用机械阻尼手段,如用一些外加的阻尼器或制动器。上述三种方式都是将转子上多余的能量吸收或消耗掉,以加速转子振荡的衰减,这种方法比较简单,也容易调节。但加长了系统尺寸,增加了加速时间,减小输出转矩,增加位置误差,总之难以尽善尽美。

电子阻尼法:基本思路就是在转子到达平衡点之前对电机施加上一通电状态来获得反向减速转矩,然后再恢复当前通电状态,从而使电机转速迅速稳定。这种方法的关键在于寻求一个适当的换相时机以获得合适的加、减速时间长度。这种方法简单,不增加系统惯量,但减小了最大转速,还可能增加发动机的热量,可靠性也有待进一步的测试和验证。

调频调压电路:为了提高电机的高频工作能力,往往采用减小时间常数的方法。如提高驱动电源的高压幅值,以增加高频时注入绕组的有效电流。结果高频端的出力提高了,但在低频端使主振区的振荡加剧,甚至形成失步。因此发展成一种调频调压电路,即在低频时为低压,避免绕组吸收多余的能量而产生低频振荡,高频时为高压,以增加高频端输出转矩,使电机达到固定参数所决定的最大步进频率。

细分驱动电路:所谓细分,即由矩形波供电改为阶梯波供电,绕组中电流经过若干个阶梯升到额定值,或以同样的阶梯从额定值下降到零。这样明显提高了步进电机的分辨率,而且由于每一单步增量小,对电机转速稳定度的提高是有好处的。此外它还可以抑制绕组切换所引起的强迫振荡分量,扩大电机稳定运行的范围,即使在谐振区电机也不容易失步。作为感性负载来说,这也缓解了电机绕组中电流的突变,从而在一定程度上降低绕组的温升以及反向电动势对功放器件的危害。值得注意的是在开环系统中,细分技术并没有提高精度,由于步进电机的步距误差是不变的,因而无论怎样细分,最后的精度是受这个误差限制的。对于一个步距角精度为5%的电机,即使采用细分,其定位精度最好时也只能是5%,这是由电机制作工艺所决定的。

3 转速稳定度的检测

在空间扫描机构中,一般要求低速平稳扫描,扫描完毕后快速返回,在某些特定场合下要求快速返回的速度与扫描速度比值达到一百,这就对步进电机的性能提出了极高要求。因为步进电机在低速时有振荡和失步现象,而高速时输出力矩下降明显。在如此宽的速度区间内要满足性能指标要求,一方面要选择性能优良的五相混合式步进电机,并采用调频调压电路及细分驱动电路进行驱动,以提高电机的工作特性;另一方面要对电机不同频率下的转速稳定度进行测试,找到平稳的低转速区间,结合

电机矩频特性及驱动要求,设计速比合适的减速器,以满足空间扫描机构低速平稳扫描和快速返回的双重指标要求。

为了考察候选步进电机性能并找出电机的平稳转速区间,建立了一套电机测试装置,该装置由一台精度1.5°绝对式光电轴角编码器、一套自行开发的测试软件及相关工装组成。

3.1 测试装置组成及工作原理

如图1所示,整个测试装置由1.5°绝对式光电轴角编码器、纯力偶联轴器以及配套测试软件组成。

测试时步进电机通过纯力偶联轴器与编码器输入轴相联,机械安装完毕后系统上电。上位机在启动步进电机之前向编码器发送数据采集命令,开始通过RS-422进行数据采集工作,编码器系统按照系统频率将步进电机的角位移数据信息发送给上位机,发送频率为2KHz。采集系统工作正常后,电机控制电路上电控制步进电机按预设频率匀速运转,采集完成后由上位机发送命令停止编码器系统的数据发送,电机停转。

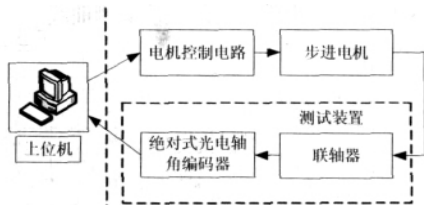


图1 测试装置组成框图

利用存储在上位机磁盘上的一系列角度位移及时间信息,可以采用数值差分的原理计算获得步进电机的实时角速度,差分公式见式(1)。

$$\omega = \theta'(t) \approx \frac{\theta(t + T_s/2) - \theta(t - T_s/2)}{T_s} \quad (1)$$

其中 ω 为角速度, θ 为某时刻的角度值, T_s 为角位置的取样时间间隔。可见,采用差分的方法,可以很方便地求得步进电机的实时角速度。值得注意的是取样时间间隔 T_s 的选取十分关键,应根据步进电机转速、编码器精度和测速精度综合考虑后决定。 T_s 太小,则编码器自身测角误差会造成测速误差过大,而 T_s 太大,则会淹没步进电机的转速波动信息,无法获得良好的检测效果。一般来说,应在满足编码器测速精度的前提下尽量降低 T_s 的值,以获得丰富而真实的速度信息。此外还应根据检测结果进行适当的滤波以消除电子噪声的影响,截至频率需对系统仔细分析后决定。

3.2 步进电机转速测试试验

根据空间扫描机构的工作速度和减速器传动比,本文选取了9°/s、18°/s、36°/s、180°/s四种转速工况下对电机的转速稳定度进行测试,测试结果如图2、图3、图4、图5所示,转速相对误差分别为6.7%、4.4%、2.2%、9.7%。由测试结果可以看出,虽然已采取了多种速度波动抑制措施,但在低频谐振区,电机的速度波动依然很明显,特别是9°/s、18°/s这两种工况下,电机的速度稳定度不能满足扫描速度波动允差4%以内的要求。当电机转速为180°/s时其转速稳定度虽然优于1%,但对谐波减速器减速比要求太高,如扫描机构的工作速度为0.1°/s时,要求减速器达到1800,而且扫描机构高速返回时,其转速高达3000r/min(返回速度与扫描速度比值为100时),显然步进电机无法达到如此高转速。因此最终选择36°/s为电机工作转速,并设计速度为360的谐波减速器以满足驱动需求。

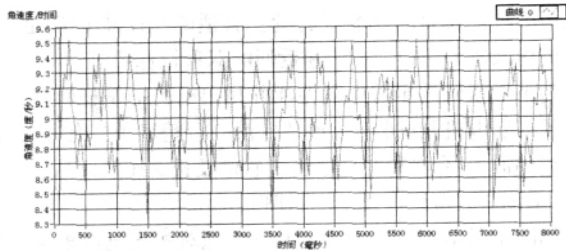


图2 9%/s 时五相步进电机转速实测曲线

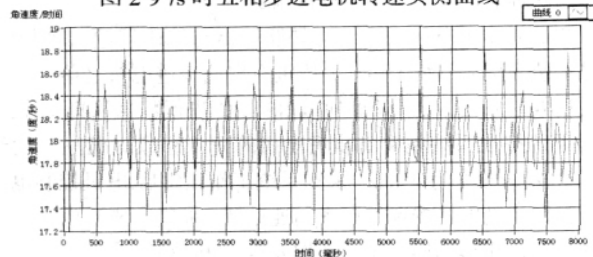


图3 18%/s 时五相步进电机的转速实测曲线

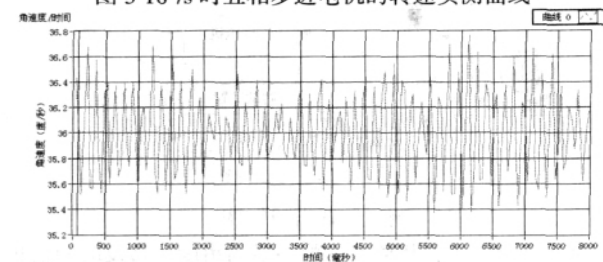


图4 36%/s 时五相步进电机的转速实测曲线

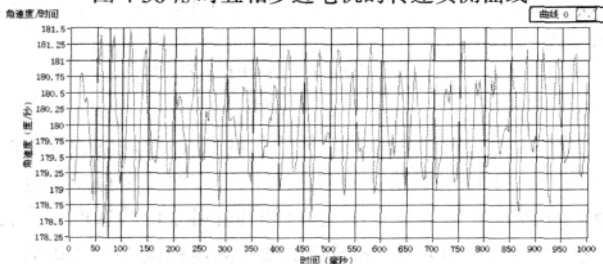


图5 180%/s 时五相步进电机的转速实测曲线

4 结论

本文结合空间扫描机构的驱动需求,对五相步进电机的振荡机理进行了研究,并给出了相应的对策。根据实际应用采取了增加机械负载、使用调频调压电路及电子细分技术等措施抑制了五相步进电机的速度波动。基于1.5°绝对式光电轴角编码器设计了一套转速稳定度检测装置,对候选的五相步进电机进行检测,结果表明在低频共振区适当提高步进电机转速可以明显的提高转速稳定度。对于要求速度稳定度高的应用场合来说,实测电机不同转速时速度波动数据,结合工程需求选择合适的速度区间,可以满足空间光学扫描机构低速平稳扫描的驱动需求。

本文作者创新点:本文根据空间光学扫描机构的需求,在对五相步进电机速度波动的原理及对策进行深入研究的基础上,提出了综合运用步进精度高的电机、调频调压电路和电子细分技术等稳速技术的方法满足了低速平稳扫描和高速快速返回的特殊要求。基于高精度绝对式光电轴角编码器研制了一套转速稳定度的测试系统,该系统测试精度高、测试过程简单可靠。依靠该系统对五相步进电机在不同频率下的转速稳定度进行了测试,为电机的选用提供了有益参考。

参考文献

- [1]梅晓榕,柏桂珍,张卯瑞.自动控制元件及线路[M].北京:科学出版社,2007.
- [2]潘今宇.步进电机的转速稳定度研究[J].红外,2004,7: 28-34.
- [3]秦文刚.步进电机驱动系统速度稳定度的研究[D].上海交通大学硕士论文,2006,1-2.
- [4]郭稳涛,何怡刚.基于THB6064H和单片机的步进电机控制系统设计[J].微计算机信息,无,无,105-106.
- [5]陈秋明.步进电机的振荡机理和矢量控制.
- [6]夏利.步进电机低频振荡及阻尼方法初探[J].沈阳工业大学学报,1994,16(3):73-78.

作者简介:汪逸群(1983-),男,汉族,湖北鄂州人,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所助理研究员,硕士,主要从事精密仪器设计方面的研究。颜昌翔(1973-),男,汉族,湖北洪湖市人,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所研究员,博士,主要从事空间光学遥感技术方面的研究工作。

Biography:WANG Yi-qun (1983-), male (han ethnic), E Zhou city, Hu Bei Province, Assistant researcher of Chang chun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics. Master. Research area: fine instrument design.

(130033 吉林长春 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所) 汪逸群 颜昌翔

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, Changchun, Jilin, 130033, China)WANG Yi-qun YAN Chang-xiang

通讯地址:(130033 吉林长春 吉林省长春市东南湖大路 3888 号 长春光机所空间一部) 汪逸群

(收稿日期:2010.05.14)(修稿日期:2010.08.14)

(上接第161页)

- [8]Richard Von Mises .Mathematical theory of probability and statistics[M].Academic Press,New York and London,1964.
- [9]汤蕴璆,史乃.电机学[M].北京:机械工业出版社,2001.
- [10]王成山,孙玮,王兴刚.含大型风电场的电力系统最大输电能力计算[J].电力系统自动化,2007,31(2):17-21
- [11]王锡凡.现代电力系统分析[M].北京:科学出版社,2003.
- [12]胡泽春,王锡凡,张显,等.考虑线路故障的随机潮流[J].中国电机工程学报,2005,25(24):27-33.

作者简介:卢继平(1960-),男,北京人,教授,研究方向为电力系统继电保护与控制,风电场并网电压稳定性。

Biography:LU Ji-ping (1960-), Male, Beijing, Professor, Major and research area: relay in power system ,voltage stability in power system integrated with wind farms.

(400030 重庆 重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室) 卢继平 丁 然

(State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400030, China) LU Ji-ping DING Ran

通讯地址:(400030 重庆 重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室) 卢继平

(收稿日期:2010.03.31)(修稿日期:2010.07.01)

欢迎投稿 欢迎订阅