

双电机驱动消除技术及其在数控设备中的应用*

Double-Motor Anti-Backlash Driving Technology and Its Application in NC Machine Tool

北京航空制造工程研究所 105 室 薛汉杰

[摘要] 根据传动间隙对设备的影响,提出了一种采用双电机驱动消除机械间隙的新方法,并以伺服主从驱动技术为理论基础,论述了双电机驱动消除技术的原理和实现手段。最后,介绍了在西门子 840D 数控系统和 611D 伺服系统环境下,双电机驱动消除技术在自动制孔设备中的实际应用情况。

关键词: 数控设备 主从驱动 双电机驱动 消除

[ABSTRACT] To avoid the effect of backlash, an electric way of driving system with double-motor is put forward. Based on master-slave control theory, the technology of double-motor anti-backlash driving and its implementation are discussed. As an example, the using of the technology in a large automatic drilling machine with SIEMENS 840D NC and 611D servo is introduced.

Keywords: NC machine tool Master-slave drive Double-motor drive Anti-backlash

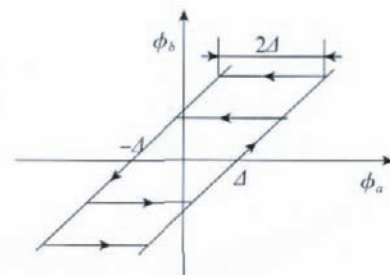
随着航空航天技术的发展,以及新材料、新工艺的不断发明和应用,为适应越来越复杂的工艺要求,作为加工设备的数控机床也不断朝着高速、高精度的方向发展。在数控设备高速运动的情况下,驱动系统的传动间隙对系统性能的影响将更加突出,这可能造成系统震荡而无法工作,严重时甚至会损坏设备结构。因此,在设备的研制和生产中必须考虑传动间隙的消除方法。结合设备调试情况,本课题对主从驱动及双电机驱动消除(电子消除)技术原理及其在数控设备中的应用进行论述。

1 传动间隙影响数控设备的原理分析

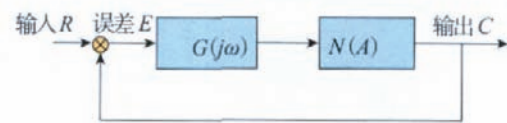
伺服系统中传动间隙的表现形式具有多样性,为方便分析,将伺服传动系统中所有间隙等效为 1 个来考虑。用 2Δ 来表示传动间隙的宽度,传动间隙的特性如图 1 (a) 所示,其中 ϕ_a 和 ϕ_b 分别为电机输入轴转角和

系统输出轴转角。在控制学领域,间隙是一个非线性环节,采用描述函数法对系统进行稳定性分析,则系统线性部分的频率特性可以表示为 $G(j\omega)$,传动间隙(非线性部分)的描述函数可以表示为 $N(A)$,其中 A 表示系统非线性环节输入转角的振幅。伺服系统闭环情况下的方框图可用图 1 (b) 来表示,系统的闭环特征方程为

$$1+G(j\omega)N(A)=0。$$



(a) 传动间隙特性



(b) 传动间隙方框图

图 1 传动间隙简单分析

Fig.1 Simple analysis of backlash

根据控制系统奈奎斯特稳定判据(Nyquist Stability Criterion),在奈奎斯特平面上分别绘出线性环节 $G(j\omega)$ 和非线性环节 $-1/N(A)$ 的频率特性曲线,如图 2 所示。如果 2 条特征曲线不相交,表明间隙的存在不会影响到系统的稳定性,而且 2 条曲线离得越远,系统的稳定裕量越大,稳定性就越高;如果相交,则表明间隙的存在会影响系统的稳定性。

传动间隙限制了系统精度的提高,而在传动间隙不可避免的情况下,如何采取措施尽可能地消除传动间隙就非常必要。

除了在设计传动机构时尽量减小间隙外,大多采用机械消除的方法,即利用消除齿轮和弹簧预紧等方法来

* “十一五”国防基础科研项目。

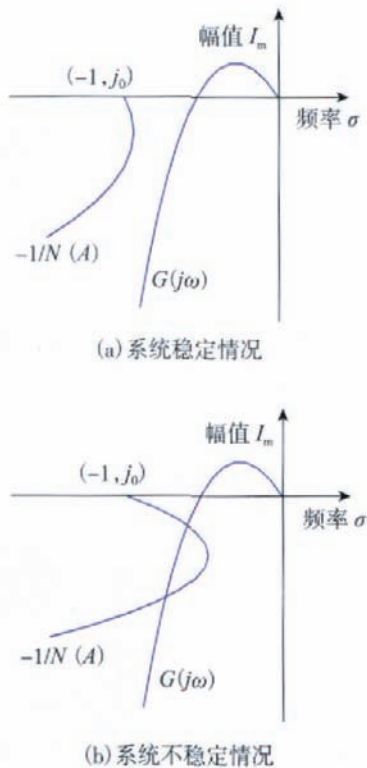


图2 存在间隙环节的系统稳定性分析图
Fig.2 Stability analysis of system with backlash

消除间隙。这些方法可以有效地消除传动间隙的静态误差,但在高精度快速随动系统(如高精度快速重复定位伺服控制、精密跟踪型雷达天线伺服驱动)中,电机驱动负载频繁换向,即使采用机械消除措施仍难以克服间隙造成的瞬态误差。在高速运动的设备中,随着传动部件的磨损和环境因素的影响等,消除作用会逐渐降低甚至失去。电气控制系统也可以通过补偿手段对传动间隙进行一定补偿,但并不能完全消除间隙,而且只能采用固定值进行间隙补偿,对消除磨损和环境因素的影响等并不能起到很好的效果。

2 主从驱动及双电机消除的原理及实现

目前,随着双电机主从驱动技术的广泛应用,双电机驱动消除也越来越多地被采用。与机械消除方法相比,双电机驱动消除方法降低了传动机构的复杂性,省去了为消除传动间隙而附加设计的消除机构,采用先进的电气控制方法替代传统的机械消除方法,间接地实现了机床控制的零间隙传动。

主从驱动的结构形式如图3所示。在坐标移动方向上采用2个相互机械连接的伺服电机完成驱动进给。在进给过程中控制系统仅对主动轴进行位置环的控制,

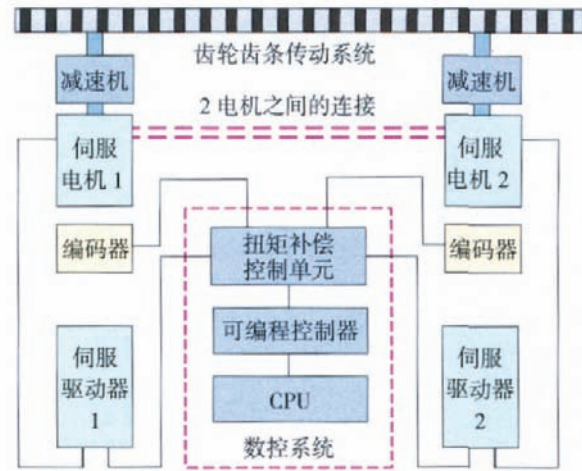


图3 主从驱动结构形式
Fig.3 Structure of master-slave drive

实现坐标的精确定位。从动轴仅根据主动轴的运行速度指令实现速度环的控制,并根据负载分配情况完成输出扭矩的控制(电流环控制)。系统不考虑从动轴与主动轴之间的位置偏差。

采用主从驱动方式,即2个伺服电机共同承担负载。采用扭矩补偿控制器实现伺服电机之间的扭矩平衡分配,且扭矩补偿控制器根据伺服电机的具体性能分配相应的负载扭矩。一般地,在同一坐标进给上应尽量采用同型号、同性能的伺服电机,以简化系统的设置。当主、从伺服电机性能不相同,需要根据其扭矩平衡系数调整扭矩匹配。

主从驱动控制的原理如图4所示。与一般伺服轴的控制相比,主从驱动控制采用一个扭矩补偿控制器为主、从轴提供偏置扭矩,同时对主、从轴速度控制器反馈的速度输出值 i_{set} 以及张力扭矩的设定值进行计算,并将其计算值输出 n_{Δ} 实时传递到主、从轴上,与位置控制器的输出 n_{set} 叠加后作为速度环的设定输入,这样就保证了从动轴获得的速度指令在任何情况下都能与主动轴保持协调一致,从而实现了2个伺服电机的协调运行。

由图4可知,当位置设定值为0时,位置控制器的输出 $n_{set}=0$,此时扭矩补偿控制器为主、从轴提供的扭矩刚好大小相等、方向相反,系统输出的扭矩合力为 $\Sigma M=0$ 。当位置控制器输出 $n_{set} \neq 0$ 时,主、从轴上的速度控制器输入值分别为 $n_{set} + n_{\Delta}$ 和 $n_{set} - n_{\Delta}$ 。随着系统输出扭矩的增加,扭矩补偿控制器的输出 n_{Δ} 逐渐变小,当系统输出的扭矩与设定的张力扭矩相等时,扭矩补偿控制器的输出变为0,此时,位置控制器传递到主、

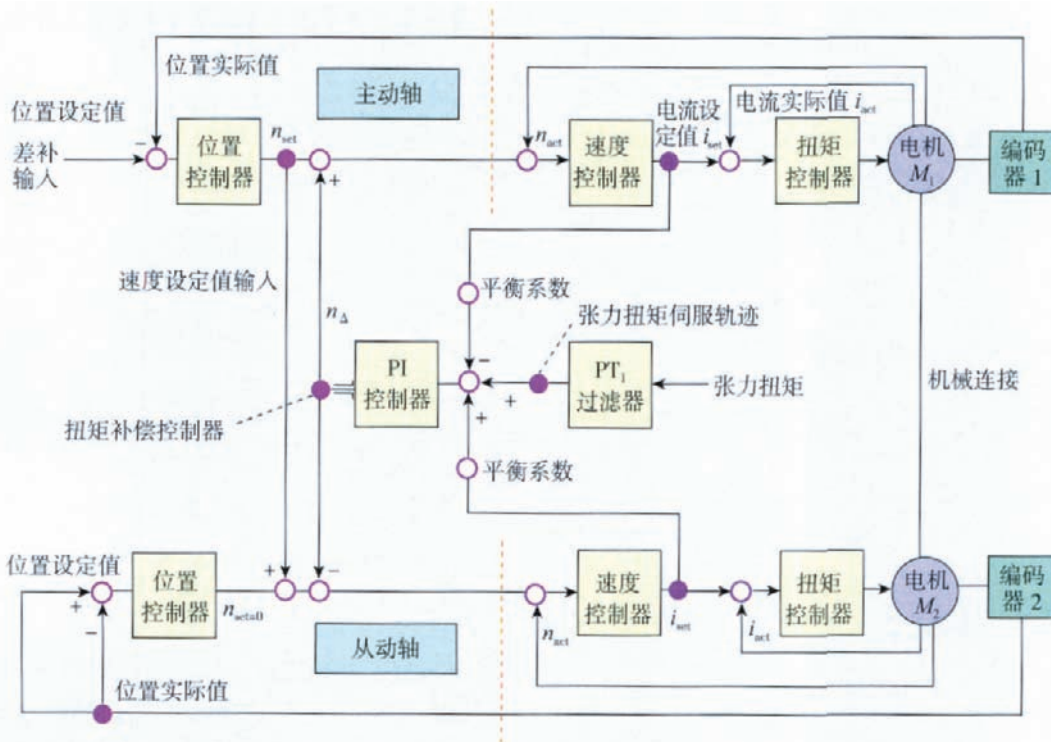


图4 主从驱动控制原理图

Fig.4 Control principle chart of master-slave drive

从轴上的输出值 n_{set} 相等,即主、从轴输出的扭矩大小相等,方向相同。扭矩补偿控制器的参数需要根据系统的实际情况进行设置,以获得最优化的控制效果。张力扭矩针对扭矩补偿控制器进行设置,用于保持主从驱动方式下2个伺服电机之间的扭矩平衡。

主从驱动技术主要有2大应用:(1)增大系统的驱动能力;(2)通过在主、从电机之间增加伺服张力来消除齿轮侧隙,即双电机驱动消除功能。下面将对双电机驱动消除功能的原理及应用进行论述。

双电机消除的驱动采用2套伺服系统构成的联动系统,如图5所示,2个伺服电机分别驱动小齿轮1和小齿轮2,共同驱动大齿轮(负载)。在静止状态下,2个小齿轮的驱动扭矩大小相等、方向相反,这样对于单个小齿轮来说,在其驱动扭矩方向上是不存在传动间隙

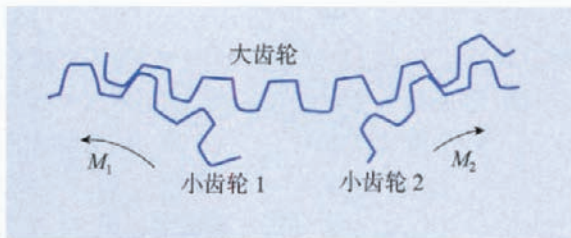


图5 齿轮传动消除方式示意图

Fig.5 Diagram of anti-backlash with double-gear drive

的。当朝某一方向运动时,伺服电机驱动相应的小齿轮(假设为小齿轮1)转动,同时克服小齿轮2的反向扭矩,带动大齿轮运动,反之亦然。可以看出,不论朝哪个方向运动,在伺服运行过程中,总有1个小齿轮与大齿轮始终保持单面贴合,从而保证系统的无间隙传动。

为实现上述的消除控制,最理想的方案是采用2个伺服电机分别作为正向驱动和反向驱动的动力电机。正向驱动电机在系统反向运动时保持输出一个足以消除传动间隙的正向扭矩,而反向驱动电机在正向运动时保持输出一个足以消除传动间隙的反向扭矩,如图6(a)中的双电机消除理想消除曲线所示,2个伺服电机各自承担系统正、负方向上的驱动扭矩,同时在系统运动方向与本身驱动相反时提供消除传动间隙的反向扭矩。在这个理想的方案中,任意时刻都有1个伺服电机处于反向出力状态,相当于对驱动电机附加了1个额外的负载,所以要求每个驱动电机的功率都大于系统实际所需功率,即 $W_{总} = W_{驱动} + W_{消除}$,实际上是增加了系统实现的成本(增加了1套伺服驱动系统,电机实际驱动能力降低)。因此,在实际的消除应用中一般都不采用这种理想的方案,而是采用一种更为经济的近似方案。

当系统在单方向运动时,伺服系统输出的驱动扭矩方向保持不变,经传动系统传递后也保持不变,所以并

不存在传动间隙问题,只有当伺服系统输出的驱动扭矩变换方向,传动系统朝相反方向传递扭矩时,间隙问题才凸显出来。基于此点,在实际的消除控制应用中,当伺服系统输出的驱动扭矩改变方向时,可以考虑通过伺服系统的协调控制对2个伺服电机施加1个足以克服间隙的偏置扭矩。在此偏置扭矩的作用下,2个伺服电机实施换向过程中的消除驱动,当换向过程完成后,2个伺服电机协同出力,共同承担系统负载。

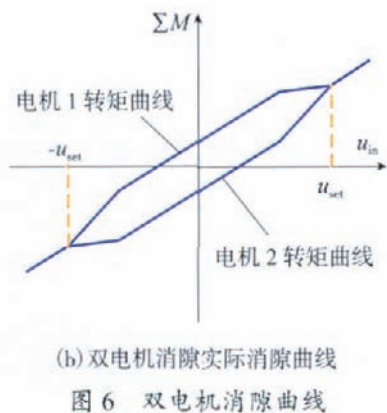
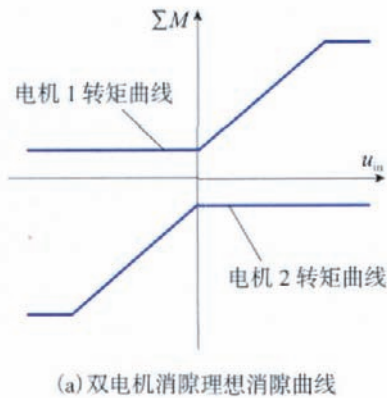


图6 双电机消除曲线

Fig.6 Curves of double-motor anti-backlash

如图6(b)中的双电机消除实际消除曲线所示,当系统处于停止状态时,2个伺服电机的驱动扭矩大小相等、方向相反,即在2电机之间具有一定的张力扭矩,其大小刚好可以消除2个方向上的间隙。当系统从负向转为正向运动, $u_{in}>0$ 且较小时,随着 u_{in} 的逐渐增大,伺服电机1的驱动扭矩逐渐增加,伺服电机2的反向驱动扭矩逐渐减小,而且伺服电机2的驱动扭矩方向变为与伺服电机1的相同。当 $u_{in}>u_{set}$ 时,2个伺服电机的驱动扭矩变为大小相等、方向相同,此时伺服系统完成换向过程;当系统从正向转为负向运动时,系统执行上述相同的过程,只是2个伺服电机的角色发生调换。这样在系统的正、负向运动中都消除了传动间隙,从而使伺服

表1 双电机驱动消除方法与机械消除方法的比较

比较项目	机械消除	双电机驱动消除
消除效果	提高系统静态性能	提升系统静、动态性能
结构复杂性	结构复杂,体积庞大	结构简单,体积小
消除成本	高精度减速机构	普通减速箱
后期维护性	定期调整,维护量大	不需要维护
对电气系统要求	单电机,大驱动容量	双电机,小驱动容量
应用局限性	受磨损、环境等的影响大	受影响很小

系统具有良好的动、静态性能。

表1为双电机驱动消除方法与机械消除方法的比较,由表1可以看出,采用双电机驱动消除方法具有以下优点:

(1)可以有效消除由传动间隙带来的定位精度误差,确保系统经过长期运行磨损后,即使齿轮间隙变大也不会影响定位精度;

(2)以普通精度的减速齿轮箱代替具有机械消除功能的高精度减速机构,驱动系统的结构简单、成本减小,并且不需要定期调整机械消除机构,后期的维护费用大大降低;

(3)采用2套伺服驱动系统共同承担系统负载,每个伺服电机仅负担系统最大功率的1/2,可以选择较小容量的伺服驱动器和伺服电机;

(4)特别是对于高精度、高速随动系统,伺服电机驱动负载频繁换向,难以克服由间隙造成的瞬态误差,而采用双电机驱动消除方法可以有效地解决此问题。

3 双电机驱动消除技术应用情况

双电机驱动消除技术在本所承担的柔性装配项目中的自动制孔设备的研制上已得到应用。该自动制孔设备用于飞机翼面类部件的钻孔、测量、定位等操作,其控制系统采用SIEMENS 840D数控系统和611D伺服系统。设备在X坐标方向上采用移动立柱式结构,但由于移动立柱质量大(超过20t),采用单电机驱动方式会造成驱动电机的容量过大,而采用机械消除机构也会增加系统驱动结构的复杂性,提高制造成本,因此在系统总体设计时考虑在X坐标方向上采用主从驱动方式,利用双伺服电机实现增大系统驱动能力和双电机驱动消除功能。

X轴采用齿轮齿条传动,2套驱动系统配置如下:

- 1个伺服驱动器:2×18A双轴功率模块;
- 2个伺服电机:额定扭矩22.5N·m,转速3000r/

min, 功率 5.7kW;

- 2 个减速机: 减速比 70:1;
- 1 个光栅尺反馈: FAGOR LOP-1040.

由于采用主从驱动及双电机驱动消除技术, 选择的 X 向伺服电机功率比较小, 采用普通减速机且没有额外的机械消除措施。

在调试中发现, 当采用半闭环控制方式(以伺服电机编码器构成位置闭环反馈)时, 由于传动间隙反映不到位置环, 故控制系统不作调整, X 轴移动较平稳, 但是其反向间隙非常大, 超过 0.2mm。当采用全闭环控制方式(以光栅尺构成位置闭环反馈), 进给速度为 2 000mm/min 时, 移动 X 轴, 当进给倍率达到 2% 时系统即出现振动, 且振动有加剧的趋势。对坐标驱动参数进行优化后, 情况有所好转, 在上述速度条件下, 当进给倍率达到 60% 时系统开始出现振动。当 X 轴改变方向时振动更加剧烈, 此时通过系统状态参数发现, 2 个伺服电机虽然处于主从驱动状态下, 但消除功能尚未激活。分析可知, 传动间隙的存在已影响到系统的稳定, 造成系统振动。在消除功能未激活情况下, X 轴移动实际速度与实际位置监测结果如图 7 和 8 所示。由于传动间隙的影响, 系统频繁大幅度调整伺服电机的运行速度, 造成系统不

稳定振动。

将消除功能激活后, 当采用全闭环控制方式时, 仍以上述进给速度移动 X 轴, 在进给倍率达到 120% 时, 除了在启动时有轻微振动外, 在移动过程中运行平稳。通过对坐标驱动参数的进一步优化, 系统运行效果良好, 进给速度为 5 000mm/min, 进给倍率达到 120% 情况下, X 轴运行平稳。在消除功能激活的情况下, X 轴移动的实际速度与实际位置监测结果如图 9 和 10 所示。采用双电机驱动消除后, X 轴运行平稳, 消除效果良好, 实测 X 轴反向间隙为 0.002mm。

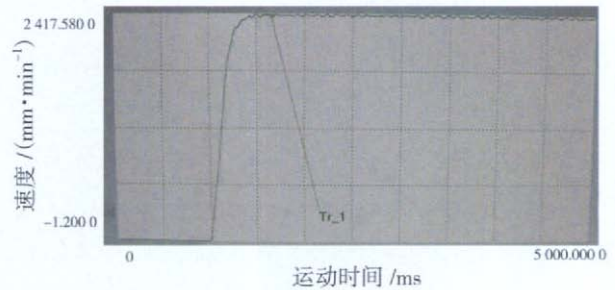


图 9 消除后 X 轴实际运行速度监测
Fig.9 Velocity monitoring of X axis with anti-backlash

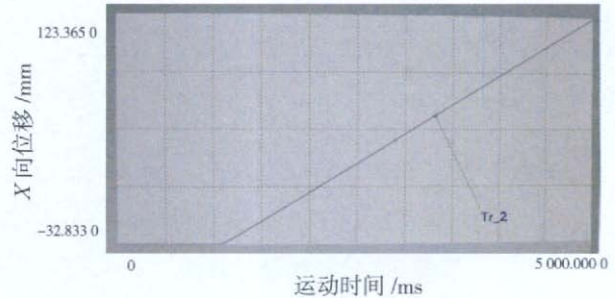


图 10 消除后 X 轴实际位置监测
Fig.10 Position monitoring of X axis with anti-backlash

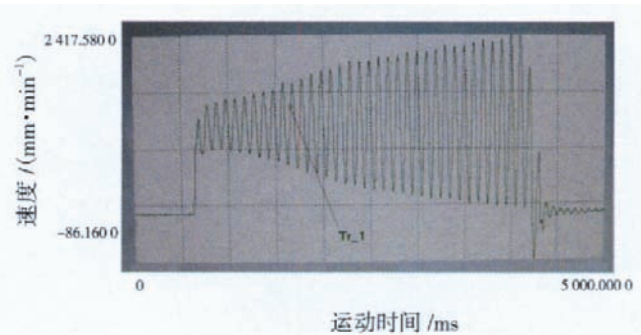


图 7 未消除时 X 轴实际运行速度监测
Fig.7 Velocity monitoring of X axis with backlash

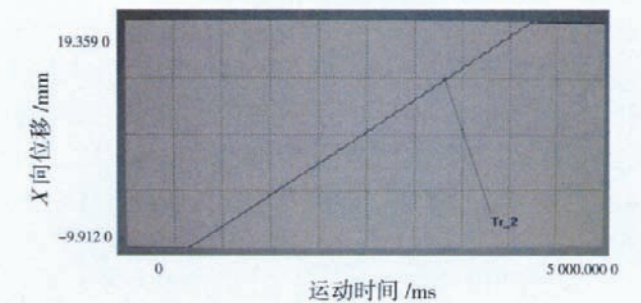


图 8 未消除时 X 轴实际位置监测
Fig.8 Position monitoring of X axis with backlash

4 结论

(1) 坐标的进给采用主从驱动方式时, 尽量采用相同性能的伺服驱动器和伺服电机, 这样可以简化系统参数的设置;

(2) 激活双电机驱动消除功能时必须保证 2 个伺服电机已处于机械连接状态, 并已经施加负载, 否则由伺服控制器输出的偏置扭矩会使电机突然转动, 造成潜在危险;

(3) 2 个伺服电机之间的偏置扭矩应根据系统实际
(下转第 91 页)

3.3 航空再制造发动机的维修思想与维修方式

维修思想^[4]是指用可靠性理论探索再制造发动机使用规律,制订合适的维修对策,消除过度维修,避免维修不足。建立适合再制造发动机的维修管理和技术理论,制订使用法规,进行信息管理、质量控制、资源管理和效能分析,收集、分析再制造发动机出现的故障性质与类型,加强监控与诊断,从而为航空再制造发动机的应用打好基础。

维修方式^[4]是指航空再制造发动机维修活动的基本形式和方法,包含维修组织机构、再制造发动机维修法规和再制造发动机维修方法这几个方面,分为定时维修、视情维修和事后维修3类。

(1) 定时维修。以再制造发动机使用设计件为基准,按照预定的时间、内容,对发动机进行约期性的维修。

(2) 视情维修。以可靠性分析为基础,按照再制造发动机的特点,选定的技术参数变化情况,或监控一个或几个特征参数的变化,确定需要采取的维修措施。这种维修方式提高维修的针对性,较好地发挥再制造发动机的潜力。

(3) 事后维修。在航空再制造发动机的非关键部件出现故障时采取维修措施,可以有效地发挥再制造发动机的潜力。

航空再制造发动机的维修方式应以定时维修为主,视情维修和事后维修为辅,以便最大限度地保证再制造发动机的使用安全。

航空再制造发动机的维修保障与普通发动机不同。再制造发动机由于采用了先进的表面工艺,因而需要采取不同的保障方法,如更换航空滑油,采用添加纳米材料的新型滑油,保护再制造发动机的运动结合面。另外,需加强再制造发动机的定时探伤工作,采用适当的无损探伤手段,扩大探伤范围,及时发现事故隐患。在进行再制造发动机的表面清洗工作时,应严格使用专用清洁剂,防止再制造发动机因表面处理工艺失效而使再制造发动机性能下降。

3.4 适合进行再制造工艺处理的航空发动机的范围确定

航空发动机的再制造优势体现在节约经济成本和时间成本2个方面,适合进行再制造工艺处理的航空发动机的范围确定,也应从这2方面考虑。从经济成本方面考虑,进行再制造处理的航空发动机原造价非常昂贵,应用再制造技术可以节约大量费用;从时间成本方面考虑,生产新的航空发动机时间周期很长,而进行再制造处理可以节约大量的生产时间。

适合进行再制造工艺处理的航空发动机的要求是:

(1) 针对某种型号的航空发动机的要求。首先,生产该型新发动机的制造单价高;其次,部队使用成熟,到寿封存发动机数量大,可进行批量生产。

(2) 针对单台航空发动机的要求。首先,该发动机到寿前技术状况良好;其次,对其进行技术性能的详细评估,清查发动机的履历文件,核实该发动机在使用过程中没有发生过严重故障,确定发动机确实具有进行再制造的能力。

4 结束语

航空再制造发动机作为一个全新的概念,在国内还没有得到广泛重视。但在美、英、德等一些技术发达国家较早就开始大力研究航空发动机的再制造技术,目前,已经从理论研究过渡到生产出工程样机的阶段。综上所述,我们必须尽快制订相关标准和要求,早日实现国内军用航空发动机的再制造生产。

参 考 文 献

- [1] 储伟俊. 再制造技术是实现资源再生的一种有效保证. 再生资源研究, 2001(2): 27-28.
- [2] 史佩京, 徐滨士, 刘世参, 等. 基于装备多寿命周期理论的发动机再制造工程及其效益分析. 装甲兵工程学院学报, 2006, 20(6): 70-74.
- [3] 史佩京, 徐滨士, 刘世参, 等. 面向装备再制造工程的可拆卸性设计. 装甲兵工程学院学报, 2007, 21(5): 12-15.
- [4] 陈学楚. 装备系统工程. 北京: 国防工业出版社, 1998. 199-235.
- [5] 章国栋, 陆廷孝, 屠庆慈, 等. 系统可靠性与维修性的分析与设计. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1990. 14-33.

(责编 俯芷)

~~~~~  
(上接第 88 页)

情况合理选择,如果偏置扭矩选择得太小,则不足以完全克服系统传动摩擦等的影响,消除效果不理想;如果偏置扭矩选择得太大,则会由于2伺服电机相互作用而消耗掉伺服电机的驱动容量,并造成电机发热;

(4) 扭矩增益控制器的  $P$  参数和  $I$  参数需根据系统负载情况设置,多次调整,以达到最优的消除效果;

(5) 在主从驱动方式下,为了获得尽可能好的控制响应,应保证主动轴和从动轴具有相同的增益;

(6) 主从驱动、双电机消除功能及其参数可以通过 PLC 设置,而对一些特殊的情况,如设备静摩擦等影响较大时,可以在静止和启停状态下改变消除参数,以获得好的消除效果。  
(责编 良辰)