

文章编号: 1674-9057(2013)03-0560-05

doi:10.3969/j.issn.1674-9057.2013.03.029

混合动力挖掘机电动回转驱动器的研制

杨浩明¹, 汤善杰², 廖宏谊³

(1. 桂林市科学技术情报研究所, 广西 桂林 541002; 2. 桂林禾田建筑机械有限公司, 广西 桂林 541001;
3. 桂林电子科技大学, 广西 桂林 541004)

摘要: 采用混合动力技术是当代挖掘机研究发展的趋势。针对液电混合动力挖掘机的特点, 研制了一种带内置制动器的电动回转驱动器, 与桂柳工 922D 型混合动力挖掘机配套使用。运行结果表明: 挖掘机回转平稳可靠、满足实地作业要求。电动回转驱动器的研制建立在广泛收集国内外相关技术文献、专利文献和信息的基础之上, 特别对进口配套的回转驱动器在实际运行中出现的故障及主要失效原因作了专题考察和技术分析, 明晰了回转驱动器的研发目标和技术要点, 在行星减速器和内置制动器一体化集成结构的设计与计算、制造工艺及工装上取得多项技术突破与创新, 为混合动力挖掘机回转工作平台的驱动与制动提供了有效的解决方案。

关键词: 挖掘机; 电动回转驱动器; 内置制动器

中图分类号: TU621

文献标志码: A

随着我国经济建设的高速发展, 挖掘机作为工程施工的主要机械, 其应用实现了历史性的跨越。2002 年以来, 我国挖掘机销售量以年均 26% 的速率飞速增长^[1], 2011 年销售量高达 178 352 台^[2], 并且改变了以往我国挖掘机市场进口与外资品牌独大的格局, 国产品牌挖掘机的市场占有率已达到了 38.53%, 2012 年进一步提升到 48.07%^[3]。但在这蓬勃发展态势的背后存在着一个不容乐观的事实: 国产品牌挖掘机的核心部件仍然以进口配套为主。

回转驱动器是挖掘机的重要组成部分与核心部件。据统计: 液压挖掘机回转驱动器的回转工作时间约占整个工作时间的 50%~70%, 能量消耗约占总能耗的 25%~40%, 因回转引起的发热量约占液压系统总发热量的 30%~40%^[4]。在全球环境恶化、资源紧缺等问题日益突出的今天, 节能减排成为各大挖掘机生产厂商的关注焦点。研究和采用混合动力技术, 被认为是挖掘机最具前景的节能减排方案, 从而充分发挥不同动力源联合工作的优势, 提高能效、降低油耗, 减少有

害气体的排放。国内外知名的挖掘机生产厂商和科研机构纷纷开展对混合动力挖掘机的研究和开发, 并推出了多款样机或产品, 如国外的小松、住友建机、神钢、凯斯, 国内的山河智能、三一重工、中联重科、柳工等。

笔者等在“C 系列液压挖掘机回转驱动器的研制”项目所取得的成果基础上, 研制了一种适用于液电混合动力挖掘机的电动回转驱动器, 与柳工 922D 混合动力挖掘机配套运行, 使挖掘机回转工作台的驱动、制动更加稳定、安全、可靠, 满足实地施工作业要求。

1 主机混动控制方案

根据储能元件的不同, 混合动力技术分为液电混合动力与电动混合动力, 后者是目前应用与发展的主流。柳工 922D 混合动力挖掘机采用的是混联式的电动混合动力技术, 通过吸收回转制动能量, 能耗明显降低, 效率显著高于采用并联或串联形式的混合动力挖掘机^[5]。

图1为混联式动力系统控制原理图。系统主

收稿日期: 2013-05-28

基金项目: 广西科学研究与技术开发计划项目(0630004-7A-14)

作者简介: 杨浩明(1961—), 女, 高级工程师, 研究方向: 机械与自动控制, glyhm101@163.com。

引文格式: 杨浩明, 汤善杰, 廖宏谊. 混合动力挖掘机电动回转驱动器的研制[J]. 桂林理工大学学报, 2013, 33(3): 560-564.

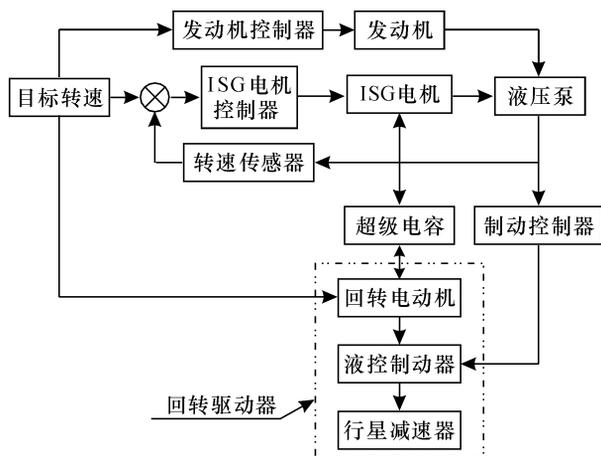


图1 混联式动力系统控制原理

Fig. 1 Principle of control algorithm of power system with parallel-series control strategy

要包括动力源系统、以电机驱动的电动回转系统和储存电能的超级电容系统3部分。由发动机和ISG (integrated starter generator) 电机构成的新的动力源来驱动液压泵系统,以提高发动机的燃油效率。电动回转系统回收回转制动过程中的动能,并储存在超级电容中。其控制要点:

(1) 通过控制档位旋钮确定和控制目标转速,令发动机始终在高效工作点下工作;

(2) ISG电动机以转速控制方式工作,在负载发生变化时,调节动力系统至目标转速;

(3) 回转电机采用速度控制方式,由超级电容驱动。

柳工922D型混合动力挖掘机的最大技术特点是在低负荷下,通过ISG电动机把发动机的能源储存在超级电容中,在高负荷下用ISG电动机支持发动机工作,从而达到负荷平均化的目的。整机回转采用新开发的电动回转驱动器,通过减少回转时的能量损失和存储回转制动能量来提高能源利用率。

2 回转驱动器研制

2.1 技术特点

通常的液压挖掘机回转驱动器由液压马达和行星减速器两部分组成,用以驱动挖掘机工作平台的回转运动。工作平台的制动则依靠液压马达内装的液力制动器及机械制动器实现,特别在挖掘机非工作期间则完全依靠机械制动器来实现驻车制动。柳工922D型混合动力挖掘机的回转工作

平台由电机驱动,需新开发带内置制动装置的电动回转驱动器来满足回转与驻车制动要求。该回转驱动器由回转电机和减速器两部分组成。减速器部分为液力制动器与行星减速器一体化集成结构,是研制的主攻方向。

2.2 信息收集与分析

在广泛收集国内外相关技术文献、专利文献和信息^[6-11]的基础上,对回转驱动器的原理和结构进行了深入研究,特别是对进口配套的回转驱动器在实际运行中出现的故障及主要失效原因、机理做了专题考察和技术分析。导致回转驱动器运行失效的常见故障有:回转迟滞、缓慢无力、漏油、发热等,其主要失效形式分析归纳有下述几点:

(1) 二级太阳轮轮齿弯曲强度不足,工作几百小时以后便有断裂失效发生;

(2) 输出轴齿形花键段轴颈强度不足,在强烈冲击下易扭断失效;

(3) 内齿圈与机座结合面在往复冲击载荷下易松动,导致润滑油渗漏;

(4) 一级行星轮的滚针轴承计算容量不足,易引起齿轮副传动失效。

2.3 行星减速器设计

针对回转驱动器的设计缺陷,在回转驱动器的结构设计和制造工艺方面(图2),重点开展了如下研究:行星减速器结构设计、齿轮副精确设计计算;密封结构、关键零部件材质与热处理工艺、液力制动器和行星减速器一体化集成结构、适合国内加工技术手段与条件的合理工艺与工装等;加工、检测、运行实验等适用工艺装备。在样机实验与运行考核过程中开展了“齿轮失效形式分析”、“点啮合齿轮仿真分析”等专题研究;对行星减速器零部件的结构、加工工艺、热处理工艺和材料选取等方面作了诸多改进创新,从而奠定了样机研发的成功基础,确保样机技术性能与可靠性具有不低于进口配套的一致先进水平。其要点如下:

(1) 在两级行星传动中设计了太阳轮与行星架同时浮动的结构,以提高均载效果;

(2) 一、二级行星轮设计了承载能力更强的滑动轴承加自吸式循环润滑结构,有效提高了承载容量与运行可靠性;

(3) 尝试将重载输出的二级行星轮由4个增

加到5个,作为提高运行可靠性的措施之一;

(4) 在一级行星架与二级太阳轮之间设计轴向限制结构,合理限制浮动零件的轴向位移,保证浮动结构的有效性 with 可靠性;

(5) 设计上充分加大二级齿轮副的太阳轮的正变位系数,有效提高了轮齿的弯曲强度与抗疲劳强度;

(6) 输出轴的轴承设计成双调心轴承结构,在完全满足承载容量的前提下,有利于提高装配工艺性、降低传动噪音和有效提高输出轴在强烈冲击载荷下的自适应能力;

(7) 输出轴的稀油密封部位设计成双骨架油封结构,提高了密封的可靠性;

(8) 与同类结构相比,输出齿轮轴的花键段轴径从Φ90 mm 加大到Φ100 mm,其危险截面的计算抗扭强度大幅提高近50%;

(9) 内齿轮齿面及一级行星架花键内齿面采用先进的双极辉光离子氮化工艺,以保证齿面的

耐磨耐蚀性;

(10) 研发了一级和二级行星架轴孔精镗加工的高精度回转分度工装,与加工中心配合,确保了行星架轴孔的尺寸精度、孔距精度和累积误差完全达到设计要求;

(11) 研制了适用于行星减速器的外场模拟负载运行与可靠性考核用实验台架,模拟实地作业运行中的负载、过载与冲击工况,保证行星减速器完全满足设计寿命要求。

2.4 制动器设计

2.4.1 结构与原理 采用液控制动器和行星减速器一体化集成结构,制动方式为机械摩擦制动,直接刹住一级输入轴及太阳轮。当挖掘机回转制动时,克服挖掘机回转平台的转动惯性,避免液力冲击,制动更加平稳。当挖掘机在较大坡度上停机驻车时自动锁紧,有效地防止回转平台在挖掘臂受风力、重力作用下发生转动。回转驱动器的制动器部分基本结构如图3所示。



图2 行星减速器结构
Fig.2 Structure of the planet reducer

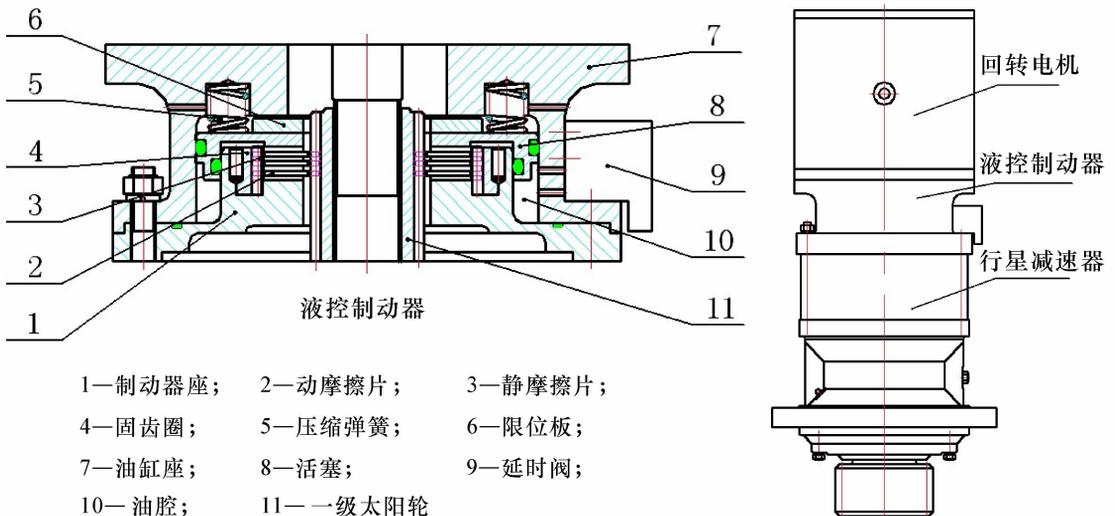


图3 电动回转驱动器液控制动器和行星减速器一体化集成结构

Fig.3 Integration structure of the electric rotary driver hydraulic control brake and planet reducer

工作时,高压油通过延时阀进入油腔,产生油压推动活塞克服弹簧力向上运动,消除作用在摩擦片上的压力,使得动摩擦片随着减速器的太阳轮一同转动,制动器处于解除制动状态。制动时,油压消失,活塞在弹簧力的作用下向下运动,将静、动摩擦片组压紧,产生的摩擦阻力使动摩擦片刹住太阳轮的转动,从而在刹车或驻车时实现回转工作平台的制动。

2.4.2 设计计算 设计制动力矩 $T_j = 80 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。由于结构限制,采用常闭的全盘式制动器,该结构紧凑、摩擦面积大、制动力矩大,改变限位板的厚度可改变弹簧的压缩量以达到调整制动转矩的目的。

(1) 摩擦力计算。由制动装置的结构决定摩擦面的外半径 $R_o = 65 \text{ mm}$, 内半径 $R_i = 40 \text{ mm}$, 摩擦副 $n = 6$, 考虑到经济性,摩擦片采用钢对钢的结构,由于是湿式制动,摩擦系数取 $\mu = 0.07$ 。可按式(1)计算摩擦力:

$$F_a = \frac{T_j}{n\mu R_e} \times 10^3, \quad (1)$$

$$R_e = \frac{2R_o^3 - R_i^3}{3R_o^2 - R_i^2}.$$

式中: F_a —轴向推力, N; R_e —摩擦盘有效半径, mm; T_j —制动转矩, $\text{N} \cdot \text{m}$; R_o 、 R_i —摩擦面的外、内半径, mm; n —摩擦副数目; μ —摩擦系数。当

$R_o \leq 1.8R_i$ 时,可取 $R_e = \frac{R_o + R_i}{2}$ 。

将数值代入上述各式,得到

$$\frac{R_o}{R_i} = \frac{65}{40} = 1.625 < 1.8,$$

$$R_e = \frac{R_o + R_i}{2} = \frac{65 + 40}{2} = 52.5 \text{ mm},$$

$$F_a = \frac{80}{6 \times 0.07 \times 52.5} \times 10^3 = 3628 \text{ N}.$$

(2) 弹簧力计算。选弹簧钢丝直径 $d = 3 \text{ mm}$, 中径 $D = 22 \text{ mm}$, 自由高度 $H = 44 \text{ mm}$, 工作高度 $H_1 = 22 \text{ mm}$, 节距 $p = 7.87$, 有效圈数 $n = 5$, 弹簧个数为 12, 由弹簧力计算公式,得

$$F = \frac{fGd}{8nC^3} = \frac{22 \times 79 \times 10^3 \times 3}{8 \times 5 \times (22/3)^3} = 330 \text{ N}. \quad (2)$$

式中: F —弹簧的工作载荷, N; f —工作载荷下的变形量, $f = 44 - 22 = 22 \text{ mm}$; G —切变模量, MPa, 材料 65 Mn 切变模量取 $79 \times 10^3 \text{ MPa}$; C —旋

绕比, $C = D/d$ 。

12 个弹簧的总弹簧力 $F_z = 12 \times 330 = 3960 \text{ N}$, $F_z > F_a$, 满足制动力的要求。

(3) 开启压力计算。根据结构设计,液压油缸的外径 $D_1 = 216 \text{ mm}$, 内径 $D_2 = 184 \text{ mm}$, 承受油压的环形面积

$$S = \pi \frac{D_1^2 - D_2^2}{4} = 3.14 \times \frac{216^2 - 184^2}{4}$$

$$= 10048 \text{ mm}^2. \quad (3)$$

由压强公式

$$P = \frac{F_z}{S} = 3960/0.01 = 396000 \text{ N/m}^2$$

$$= 0.396 \text{ MPa}. \quad (4)$$

取制动器解除制动的压力 $P \geq 0.5 \text{ MPa}$ 。

3 结束语

液压挖掘机回转驱动器的国产化研制取得了实质性进展, 并已形成与 3~20 t 主机配套的产品系列。通过长期实地运行考核, 表现出与进口配套件一致的性能与寿命等级。随着社会环保意识的加强和国家对挖掘机节能减排的要求, 混合动力挖掘机的研究应用已成为发展趋势, 其市场占有率预期将持续增长, 有较大的市场潜力。与之相应的电动回转驱动器的研制成功, 为混合动力挖掘机回转工作平台的驱动与制动提供了可靠的解决方案, 对混合动力挖掘机核心配套部件的技术发展与推广应用具有积极意义。

参考文献:

- [1] 中国工程机械商贸网. 告别喧哗与躁动 挖掘机回归理性盼春风 [EB/OL]. (2012-11-01). <http://news.21-sun.com/detail/2012/11/2012110108074166.shtml>.
- [2] 中国工程机械商贸网. 挖掘机状况及竞争格局分析 [EB/OL]. (2012-10-16). http://news.21-sun.com/detail/2012/10/2012102514255719_2.shtml.
- [3] 机械专家网. 依靠创新引领行业发展 多领域全面超越 [EB/OL]. (2013-03-29). <http://news.mechnet.com.cn/content/2013-03-29/120363.html>.
- [4] 郭勇, 陈艳军, 郝前华, 等. 挖掘机上车转动惯量的数学建模与分析 [J]. 广西大学学报: 自然科学版, 2012, 37(5): 928-935.
- [5] 张俊, 成凯, 王鹏宇, 等. 混合动力挖掘机混联式控制策略的研究 [J]. 矿山机械, 2011, 39(7): 43-51.

- [6] 陈健. 大型行星齿轮减速器齿轮断裂失效分析 [D]. 沈阳: 东北大学, 2008.
- [7] 伍山峰. 循环载荷作用下构件的失效寿命预估及可靠性分析 [D]. 北京: 铁道部科学研究院, 2000.
- [8] 王明清, 陈作越. 齿轮传动多模式失效的时变可靠性分析 [J]. 机械传动, 2011, 35 (4): 50 - 53.
- [9] 刘民治, 钟明勋. 失效分析的思路与诊断 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1999.
- [10] 钟群鹏, 宋光雄, 张峥, 等. 机械失效模式、原因和机理的诊断思路 and 主要依据 [J]. 北京航空航天大学学报, 2004, 30 (10): 913 - 918.
- [11] 罗春雷, 钟锡继, 吴伟传. 特大型电动轮矿用自卸车联合制动特性研究 [J], 广西大学学报: 自然科学版, 2012, 37 (2): 252 - 258.

Development of Hybrid-Powered Excavator Rotary Driver

YANG Hao-ming¹, TANG Shan-jie², LIAO Hong-yi³

(1. Guilin Institute of Science and Technology Information, Guilin 541002, China; 2. Guilin Hetian Construction Machinery Co., Ltd., Guilin 541001, China; 3. Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: Hybrid-powered technology is the trend of excavator development. According to the characteristics of liquid electric hybrid excavators, electric rotary driver with inner braker matches Liugong Model 922D dynamic excavator. The new excavator slewing is stable and reliable, and meets the field operation requirement. The development of the electric rotary driver is based on the extensive collection of technological references, patent document and information at home and abroad. After thematic investigations and technical analysis are made on the faults and the failure in actual running especially for the imported corollary rotary driver, the development and technique essentials of the rotary driver come to clarity. Several technical breakthroughs and innovations are made in the design and calculation of the integration structure for the planet reducer and the inner brake, manufacturing process and frock. This can provide an effective solution to the driving and braking of the dynamic excavator rotary working platform.

Key words: excavator; electric rotary driver; inner brake