

Gongcheng Jixie Biansu Xitong
Guanjian Jishu Yanjiu

工程机械变速系统 关键技术研究

李 华 张庆功 姚 进

著



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

Gongcheng Jixie Biansu Xitong
Guanjian Jishu Yanjiu

工程机械变速系统 关键技术研究

李 华 张庆功 姚 进

著



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

中国·武汉

内 容 简 介

本书围绕工程机械变速系统的关键技术展开研究,共十章。第1章为工程机械及其变速系统概述;第2章到第6章对目前工程机械采用的主流变速技术进行了分析和研究,包括液力变矩器及其匹配、动力换挡变速箱传动方案的分析及设计、动力换挡变速箱的换挡品质、变速系统热平衡、液力机械复合传动分析与设计等方面的内容;第7章到第10章对未来的工程机械的变速技术进行了探讨,涉及半环面型牵引式无级变速单元、双腔半环面型机械复合传动方案、双腔半环面型机械复合传动性能、双腔半环面型机械复合无级变速器设计等方面的内容。

本书适合高等学校工程机械专业、机械设计制造及自动化专业以及其他相关专业的学生学习,也可供从事工程机械设计及研究的工程技术人员学习和参考。

图书在版编目(CIP)数据

工程机械变速系统关键技术研究/李华,张庆功,姚进著. —武汉:华中科技大学出版社,2014.5
ISBN 978-7-5680-0042-0

I. ①工… II. ①李… ②张… ③姚… III. ①工程机械-液压传动系统-变速传动-研究
IV. ①TH137

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 100218 号

工程机械变速系统关键技术研究

李华 张庆功 姚进 著

责任编辑:姚同梅

封面设计:刘 卉

责任校对:祝 菲

责任监印:张正林

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)81321915

录 排:武汉三月禾文化传播有限公司

印 刷:湖北恒泰印务有限公司

开 本:710mm×1000mm 1/16

印 张:12 插页:2

字 数:251千字

版 次:2014年7月第1版第1次印刷

定 价:38.00元



本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务
版权所有 侵权必究

前 言

工程机械广泛应用于铁路、公路、桥梁、港口、水利工程建设及矿山开发等领域，在国民经济建设中发挥着重要作用。新中国成立以来，经过几十年的发展，我国已经成为工程机械大国，工程机械的产量和保有量都居世界第一。但我国还不是工程机械强国，与国外先进水平相比，我国工程机械的技术水平还存在很大的差距。

变速系统是工程机械的核心部分，直接关系到工程机械的作业效率、燃油消耗和驾乘舒适性。目前，国内工程机械所用高档变速箱主要为进口产品或中外合资企业的产品，导致工程机械整机厂的关键设备受制于人。因此，不断提高技术水平，开发出具有自主知识产权的高档工程机械变速产品具有十分重要的意义。

在有关车辆变速系统的技术资料中，针对汽车的较多，而关于工程机械的则较少。笔者有幸与国内某大型工程机械企业合作，联合开发了系列工程机械动力换挡变速箱，收集了一些资料，积累了一定的经验。笔者愿意将自己对工程机械变速系统的肤浅认识与读者分享，期望抛砖引玉，为相关领域的专业技术人员提供技术参考。

本书针对工程机械液力机械变速系统展开研究，包括两个大的组成部分，一部分为液力机械有级变速系统，另一部分为液力机械无级变速系统。本书的主要内容由四川大学的李华、姚进以及西华大学的张庆功讨论确定。第1章由姚进完成，第2章到第7章由李华完成，第8章到第10章由张庆功完成。

本书出版得到了四川省应用基础研究项目(2012JY0085)、四川省科技支撑计划项目(2013GZ0055)、中央高校基础研究项目(2010SCU2011)和西华大学四川省重点实验室开放研究基金资助项目(szjj2013-039)的大力支持，在此表示衷心感谢。

由于笔者水平有限，加之时间仓促，书中不妥、疏漏和错误之处难免，敬请广大读者批评指正。

李 华 张庆功 姚 进

2014 年 4 月

目 录

1 工程机械及其变速系统概述	(1)
1.1 工程机械的工作特点及对变速系统的要求	(1)
1.2 工程机械变速系统的分类及特点	(3)
1.3 工程机械变速系统的关键技术	(7)
参考文献	(13)
2 液力变矩器及其匹配	(15)
2.1 引言	(15)
2.2 工程机械液力变矩器	(15)
2.3 液力变矩器的匹配	(21)
2.4 小结	(23)
参考文献	(23)
3 动力换挡变速箱传动方案的分析及设计	(24)
3.1 引言	(24)
3.2 典型的工程机械动力换挡变速箱传动方案分析	(25)
3.3 基于图论的变速箱传动路线分析	(40)
3.4 动力换挡变速箱传动方案设计	(45)
3.5 定轴式动力换挡变速箱的端面布局	(50)
3.6 小结	(55)
参考文献	(56)
4 动力换挡变速箱的换挡品质及闭锁研究	(57)
4.1 引言	(57)
4.2 多片湿式摩擦离合器及其充油过程	(58)
4.3 摩擦离合器闭合过程的动力学分析	(60)
4.4 三自由度动力换挡变速箱的离合器工作分析	(63)
4.5 液力变矩器闭锁控制	(66)
4.6 小结	(69)
参考文献	(70)

5 牵引制动型液力变矩器的设计及系统热平衡	(71)
5.1 引言	(71)
5.2 新型牵引制动型液力变矩器设计	(74)
5.3 新型牵引制动型液力变矩器制动工况的动力学分析	(76)
5.4 新型牵引制动型液力变矩器制动工况的仿真	(77)
5.5 液力机械变速系统的热平衡	(83)
5.6 小结	(86)
参考文献	(86)
6 液力机械复合传动分析及新型复合传动设计	(88)
6.1 引言	(88)
6.2 分速汇矩式液力机械复合传动分析	(88)
6.3 分矩汇速式液力机械变矩器的传动特性分析	(98)
6.4 新型液力机械复合传动的设计与分析	(105)
6.5 小结	(114)
参考文献	(114)
7 半环面型无级变速单元研究	(116)
7.1 引言	(116)
7.2 半环面型无级变速单元调速方法	(116)
7.3 半环面型无级变速单元接触应力分析	(121)
7.4 小结	(127)
参考文献	(127)
8 双腔半环面型机械复合无级变速传动方案研究	(128)
8.1 引言	(128)
8.2 分矩汇速式无级变速传动方案分析	(128)
8.3 分速汇矩式无级变速传动方案分析	(143)
8.4 方案优选	(160)
8.5 小结	(160)
参考文献	(161)
9 双腔半环面型机械复合无级变速传动性能分析	(162)
9.1 引言	(162)
9.2 机械复合无级变速传动机构	(162)
9.3 机械复合无级变速传动性能参数	(163)

9.4	机械复合无级变速传动性能优化建模	(166)
9.5	性能比较分析	(168)
9.6	小结	(170)
	参考文献	(170)
10	双腔半环面型机械复合无级变速器设计	(171)
10.1	引言	(171)
10.2	设计要求	(171)
10.3	分矩汇速轮系传动比确定	(171)
10.4	性能参数计算	(172)
10.5	系统保护方式及动力选择	(173)
10.6	机械复合无级变速器参数设计	(174)
10.7	机械复合无级变速器运动学仿真	(178)
10.8	小结	(182)
	参考文献	(182)

1 工程机械及其变速系统概述

1.1 工程机械的工作特点及对变速系统的要求

1.1.1 工程机械的种类

工程机械是各种施工机械的总称,是装备工业的重要组成部分。概括地说,凡土石方施工工程、路面建设与养护、流动式起重装卸作业和各种建筑工程所需的综合性机械化施工工程所必需的机械装备,均称为工程机械。工程机械主要用于国防建设、交通运输建设、能源工业建设和生产、矿业等原材料工业建设和生产、农林水利建设、工业与民用建筑建造、城市建设、环境保护等领域。

世界各国对工程机械的称谓基本相同,其中美国和英国将其称为建筑机械与设备,德国将其称为建筑机械与装置,俄罗斯将其称为建筑与筑路机械,日本将其称为建设机械。在中国,部分产品也称为建设机械,机械行业根据国务院组建该行业时的批文将其统称为工程机械,一直延续到现在。各国对工程机械行业划定产品的范围大致相同,中国的工程机械产品与其他各国的相比较还增加了铁路线路工程机械、叉车与工业搬运车辆、装修机械、电梯、风动工具等。

中国工程机械行业产品主要是从通用设备制造专业和专用设备制造业大类中列出来的。1979年,国家计委和第一机械工业部对中国工程机械行业发展编制了“七五”发展规划,产品范围涵盖了工程机械行业18大类产品,并且在“七五”发展规划后的历次国家机械工业行业规划中都确认了工程机械行业的18大类产品,其产品范围一直延续至今。这18大类产品包括挖掘机械、铲土运输机械、工程起重机械、工业车辆、压实机械、路面机械、桩工机械、混凝土机械、钢筋和预应力机械、装修机械、凿岩机械、气动工具、铁路线路机械、市政工程与环卫机械、军用工程机械、电梯与扶梯、工程机械专用零部件、其他专用工程机械。

1.1.2 工程机械的工作特点

作为工程建设的机械设备,工程机械的主要工作特点体现在以下几个方面。

(1) 工作条件恶劣。工程机械经常在野外作业,很大一部分时间在潮湿、泥泞、多尘、高温或低温等恶劣的环境中工作。

(2) 载荷变化剧烈。工程机械工作时,载荷变化剧烈,经常出现突变,并经常出现冲击载荷。如装载机、挖掘机等设备,在铲斗掘进物料时会受到较大的冲击载荷。

(3) 工作过程中换挡、换向频繁。很多工程机械的工作属于循环作业,工作过程周期性地变化,需要频繁地换向、换挡。以轮式装载机为例,完成提升、装卸和降落三项动作所用的时间一般为 10 s 左右,完成一个工作循环仅需 20 s 左右,每天换挡、换向操作高达数千次。

(4) 工作强度大,经常连续长时间地工作。在施工过程中,因为季节、天气、工期等原因,工程机械经常需要每天 24 h 不停地工作,工作强度非常大。

1.1.3 变速系统的功能

变速系统是车辆传动系统中最主要的部件,它的主要功能体现在以下几个方面。

(1) 改变传动比,满足不同行驶条件对牵引力的需要,使内燃机尽量工作在有利的工况下,满足可能的行驶速度要求,在较大范围内改变车辆行驶速度的大小和汽车驱动轮上力矩的大小。内燃机的特性是转速变化范围较小,而转矩变化范围更是不能满足实际路况需要。而由于车辆行驶条件不同,要求行驶速度和驱动力矩能在很大范围内变化。例如:在高速公路上车速应能达到 100 km/h,而在市区内,车速常在 30 km/h 左右;空车在平直的公路上行驶时,行驶阻力很小,当满载上坡时,行驶阻力很大。

(2) 实现倒车行驶,满足车辆倒退行驶的需要。内燃机曲轴一般都是只能向一个方向转动的,而车辆有时需要倒退行驶,因此,往往要利用变速箱中设置的后退挡来实现反方向行驶。

(3) 中断动力传递。在内燃机启动、怠速运转、车辆换挡或需要停车进行动力输出时,中断向驱动轮传递动力。

(4) 实现空挡。当离合器接合时,变速箱可以不输出动力。例如,可以保证驾驶员在内燃机不熄火时松开离合器踏板,离开驾驶员座位。

1.1.4 工程机械对变速系统的要求

变速系统作为工程机械的核心部件之一,直接关系到工程机械的作业效率、燃油消耗和驾乘舒适性。工程机械对它的变速系统主要有以下几个方面的要求:

(1) 能够承受过载或冲击载荷。由于工程机械所受载荷经常发生突变,要求其变速系统具有良好的适应性,在过载或承受较大冲击载荷时,内燃机不会熄火。

(2) 换挡、换向快速平稳,换挡时不切断动力或动力中断时间极短。从提高工作效率的角度考虑,换挡和换向越快越好;从驾驶员的驾乘舒适性和延长车辆传动系统寿命的角度考虑,换挡和换向应当越慢越好。兼顾两方面的要求,对工程机械变速系统的换挡和换向操作要求是既平稳又快捷,在换挡时最好不要切断动力。

(3) 具有良好的可靠性和维护、维修性。工程机械对保证工程建设的质量和进度具有决定性的作用,如果出现故障引起停工,会给用户带来巨大的经济损失。用户对工程机械的要求是可靠性高、维护性好,希望工程机械能够长时间无故障地工作,

即使出现了故障,也能快速修复。

(4) 具有较高的传动效率。工程机械的功率普遍较大,油耗很大,每年消耗的燃油相当可观。在石化能源日益枯竭和环保要求日益严格的今天,人们对工程机械的传动效率提出了越来越高的要求。其变速系统应具有较高的传动效率,能够充分利用内燃机的功率,功率损失小,节约能源,排放少。

1.2 工程机械变速系统的分类及特点

工程机械一般在野外工作,主要以内燃机作为动力源。以内燃机为动力源的车辆变速系统包括四种:纯机械变速系统、液力机械变速系统、液压机械变速系统和电传动变速系统。

由于工程机械的工作条件恶劣,载荷复杂多变,如果采用纯粹的机械变速装置(如传统的齿轮变速箱)与内燃机直接相连,则很难满足工作要求。纯机械传动在工程机械上应用很少,工程机械的变速系统主要分为三种类型:液力机械变速系统、液压机械变速系统、电传动变速系统。

1.2.1 液力机械变速系统

液力机械变速系统主要由液力变矩器(hydrodynamic torque converter, HTC)和变速箱(gear box)两部分组成。有的技术资料把这种系统称为双变系统。

液力变矩器的雏形最初由德国人费丁格尔提出。20 世纪初由于船舶工业发展的需要,费丁格尔提出了一种减速装置,即把离心式水泵和水轮机叶片合装于一个壳体内,用原动机带动离心式水泵,用水泵从集水槽中抽上来的水去冲击水轮机叶片,从而使水轮机旋转,水轮机则带动工作机转动。后来科技工作者对其进行了改进,将水泵和水轮机集成在一个封闭的腔体中,再加上导轮,形成了液力变矩器。

液力变矩器一面世,就大量应用在各种车辆,尤其是工程机械的传动系统中,它用在传动系统中具有许多突出的优点:

(1) 液力传动具有良好的启动性能,内燃机所受的载荷随着内燃机转速提高逐步增加,能够实现车辆的平稳启动。其微动操纵性能较好,容易调整车辆位置并接近目标(如自卸汽车)。

(2) 液力变矩器是一种自动变速装置,具有无级变速和变矩能力,使车辆具有自动适应外载荷的能力。

(3) 变矩器是一种柔性传动装置,可阻隔内燃机的扭转振动,降低冲击振动和传动系的动载荷,延长传动部件的使用寿命。

(4) 液力传动可防止内燃机过载熄火,具有良好的低速性能,能提高恶劣路面的通过性。

(5) 液力变矩器体积小,功率密度大。它属于叶片式流体机械,其传输功率与转

速的三次方成正比,与叶轮直径的五次方成正比,因此功率密度很大。

(6) 液力变矩器的各组成部分之间靠液体传递运动与动力,无机械磨损,工作可靠,使用寿命长。

液力变矩器也有一些缺点,主要体现在以下几个方面:

(1) 液力变矩器的传动效率低,最高效率一般不超过 90%,特别是在高速轻载和低速重载时的传动效率都很低,在极端情况下甚至为零。

(2) 液力变矩器吸收的功率和内燃机转速成固定关系,不易调节,因此很难调整行走输出功率和工作装置输出功率之间的匹配关系。

(3) 液力变矩器输入和输出之间无刚性联系。不能利用内燃机惯性来克服外界阻力,且利用内燃机来进行制动的效果较差,不能实现反拖启动。

1.2.2 液压机械变速系统

液压机械变速系统主要由液压泵、液压马达和变速箱三大部分组成,三者以串联方式连接。内燃机向液压泵提供动力,然后液压泵将内燃机提供的机械能转化液压能,液压马达将液压能转化为机械能并传递给变速箱。根据液压油是否与油箱相通,液压传动系统可以分为开式系统和闭式系统两种。闭式系统的效率比开式系统的高,但其成本较高、技术较复杂。液压泵和液压马达的组合形式通常有定量泵变量马达、变量泵定量马达和变量泵变量马达等几种。

液压泵和液压马达基于液体压力能的改变而工作,液力变矩器基于液体动量矩的改变而工作。有些技术资料也将基于液体压力能的改变的传动称为静液压传动,将基于液体动量矩的改变的传动称为动液压传动。一般来讲,静液压传动技术具有以下优点:

(1) 布局灵活方便,输入、输出元件间可用柔性管道连接,相对位置受机械结构牵制较少,有时还可有多个相对独立的输入端和输出端。

(2) 无级调速范围较宽,且可根据不同需要得到相应的较硬或较软的调节特性,对不同机械的适应性好。

(3) 输出转矩与转速可以进行在相当大程度上与输入转速无关的调节,从而使内燃机能经常在稳定、高效的工况下运行,对节能、降噪、减少排放及延长内燃机寿命均有利。

(4) 液压介质本身兼有润滑、冷却、防锈等功能,全系统自身密封,能适应多尘、潮湿、盐雾和水下等恶劣环境下的作业。

(5) 静液压传动装置的最大输出转矩只与系统压力有关,基本不受输入转速和输入功率的影响,适宜于在高海拔环境下工作。内燃机的功率下降和外特性的变化对于装有静液压传动装置的车辆与行走机械的影响仅限于最高车速的下降,而车辆与行走机械原有的最大牵引力仍能得以保持。

(6) 可利用动力传动装置本身实现可控制的制动(从最高车速到完全静止),制

动力矩与驱动力矩相当,此种制动不会引起部件磨损。

当然,静液压驱动技术的也存在一些缺点,主要体现在以下几个方面:

(1) 价格高,液压系统的主要零部件结构比较复杂、精密,需要采用优质的材料和优良的制造技术。

(2) 静液压传动装置的稳态传动效率较低,因而不宜用于长距离稳定行驶的车辆与行走机械(如长途运输的卡车等)。

(3) 元件和管道接头存在向外界泄漏油液、污染环境的风险,传动装置本身的噪声亦较难控制。

(4) 维修保养所要求的技术水平较高。

1.2.3 电传动变速系统

电传动技术是指用电动机驱动生产机械、交通运输车辆等设备运作的技术。电传动变速系统主要由原动机、发电机、电动机和控制装置组成。工程机械电传动变速系统将内燃机产生的机械能转化为电能,再通过电动机将电能转化为机械能,从而驱动车辆或其他施工设备运行。电传动技术诞生于第二次工业革命时期,目前技术已日臻成熟。

按不同电能转化形式,电传动变速系统可分为如下四类:

(1) 直-直电传动系统,即直流发电机-直流电动机传动系统。直流发电机发出的直流电,直接供给直流电动机,发电机与电动机之间无功率变换装置。常采用改变电动机电枢端电压或改变电动机励磁的方法进行调速。直-直电传动系统具有良好的调速性能,在调速精度要求较高的系统中应用较多。

(2) 交-直电传动系统,即交流发电机-直流电动机传动系统。由交流发电机发出的三相交流电,经过整流器整流变成直流电后,供给直流电动机。这种系统与直-直电传动系统相比,运行可靠,维修简便。

(3) 交-交电传动系统,即交流发电机-交流电动机传动系统。由交流发电机发出三相交流电经交-交变频器,变换成频率、电压不同的交流电,供给交流电动机。

(4) 交-直-交电传动系统,即交流发电机-整流器-逆变器-交流电动机传动系统。交流发电机发出的三相交流电,经整流器变成直流电,再经过逆变器逆变,变成频率可调的三相交流电,驱动交流电动机。系统需要改变运行速度时,只要改变逆变器触发频率即可。交-直-交电传动系统自20世纪90年代开始至今,得到了广泛应用,具有可靠性高、技术先进、工艺成熟、运行可靠、维护方便等优点,是目前应用最广的电传动变速系统。

电传动变速系统用于工程车辆驱动,具有一些明显的优点,主要体现在以下几个方面:

(1) 传动链短,中间环节少,结构简单。电传动不需要变速箱及传动轴,只要有电缆的软连接即可,容易布置,灵活方便。

(2) 具有无级变速的特性,可使车辆运行平稳。

(3) 具有恒功率控制的特性,功率可得到充分利用。

(4) 电传动变速系统由于能够方便地测定转速和转矩,并且可实现反馈控制,所以能使内燃机经常处于最佳工况。

(5) 电传动变速系统调速性能好、响应速度快,从零转速至额定转速所需时间较短,有助于车辆快速启动。

电传动变速系统也存在一些缺点,主要体现在以下几个方面:

(1) 电传动的成本较高,需要消耗大量的非铁金属。

(2) 相对液力机械变速系统和液压机械变速系统,电传动变速系统具有自重大、功率密度小的不足。

(3) 发电机和电动机的体积较大,需要较大的安装空间。

1.2.4 三种变速系统的比较及应用

液力机械变速系统、液压机械变速系统、电传动变速系统都有各自的优点与缺点,其中任何一种变速系统都不可能完全取代其他两种。从不同角度对三种传动变速系统的比较如下。

(1) 从布局灵活性方面比较,液压机械变速系统和电传动变速系统优于液力机械变速系统。液力机械变速系统需要将内燃机、液力变矩器和变速箱刚性连在一起,而液压机械变速系统和电传动变速系统可将主要组成部件分离布置,以柔性管道或电线连接。

(2) 从牵引特性方面比较,液力机械变速系统的牵引特性较“软”,而液压机械变速系统和电传动变速系统的牵引特性则较“硬”。载荷变化对液力机械变速系统的输出转速影响较大,对液压机械变速系统和电传动变速系统的影响相对较小。

(3) 从功率密度方面比较,液力机械变速系统和液压机械变速系统的功率密度较大,电传动变速系统的功率密度较小。

(4) 从传动效率方面比较,液力机械变速系统的单点传动效率较高,液压机械变速系统和电传动变速系统的高效区域较宽。液力机械变速系统只有一个能量转化设备,而电传动变速系统和液压机械变速系统都有两个能量转化设备,因此它们的最高效率比液力机械变速系统的低。电传动变速系统和液压机械变速系统的调节性能良好,可以在较宽的范围内以较高的效率传动。但在液力机械变速系统采用综合式液力变矩器、闭锁离合器并与多挡位变速箱等设备配套后,液压机械变速系统和电传动变速系统在传动效率上并不占优势。

(5) 从制造成本方面比较,液力机械变速系统的成本最低,液压机械变速系统和电传动变速系统的成本较高。液力变矩器有铸造和冲压焊接两种制造方式,由于它的工作压力小(一般不超过 2 MPa),制造成本很低。工程机械所用的液压马达和液压泵一般都工作于高压(30 MPa 以上),制造成本较高。电传动变速系统的体积大、

自重大,需要消耗大量非铁金属,成本很高。

基于成本、效率、维护性、安装空间等多方面的原因,液力机械变速系统在工程机械变速系统中居主体地位。液力机械变速系统主要应用于装载机、平地机、铲运机、挖掘装载机、推土机、矿用自卸车等机械。液压机械变速系统主要应用于工作平台需要回转或需要在原地转向的滑移式机械,如挖掘机、滑移式装载机。电传动变速系统主要应用于大吨位的矿用自卸车。载重在 200 t 以上的国产矿车大多数采用电传动变速系统。

1.3 工程机械变速系统的关键技术

我国工程机械变速系统的技术水平整体较低,主要体现在以下几个方面:

(1) 技术力量薄弱,自主创新能力较差。国内工程机械变速箱厂家所用技术为国外厂家已淘汰技术或 20 世纪 80 年代和 90 年代的技术。自主开发的产品大多属于模仿或仿制产品,缺乏创新性。

(2) 产品可靠性较差,传动效率较低。平均无故障工作时间和油耗水平与国外同类产品相差甚远。

(3) 换挡操作方式落后。国内工程机械变速箱的主流换挡方式为机液换挡,部分高档产品的换挡方式为电液换挡,以卡特彼勒为代表的国外先进企业,早已实现了自动换挡。

(4) 产品智能化水平低,缺乏信息处理的能力。国外高档工程机械具有较高的智能,将内燃机、液力变矩器、变速箱纳入一个体系,可以实现智能换挡、故障自诊断等功能。

总之,我国工程机械变速系统仅处于发达国家 20 世纪 80 年代末的水平。要改变现状,就需要加强对工程机械变速系统的研究,在关键技术领域缩小与国外先进产品之间的差距。从我国技术现状出发,应从三个大的方向着手进行研究:高档液力机械变速产品;将复合传动技术与工程机械变速系统相结合的产品;适用于工程机械的无级变速产品。

1.3.1 高档液力机械变速产品的研发

液力机械变速方式在工程机械变速系统中占主导地位,只有少部分产品采用液压机械变速或电传动变速方式。国产工程机械所需的高档液力和机械变速系统主要为国外进口产品或中外合资企业的产品,开发高档液力机械变速系统需要从以下方面着手。

(1) 变速箱传动路线设计。变速箱的传动路线设计也称为传动方案设计,是变速箱设计的第一个环节,也是最重要的环节。传动方案直接决定变速箱的挡位数目、结构形式、制造成本和传动效率。德国 ZF 公司(ZF Friedrichshafen AG,也称采埃孚公司)是全球领先的传动产品供应商,非常重视变速箱的传动方案研究与设计工

作。以 ZF 公司为代表的国外先进企业,申请了大量有关传动方案的专利,它们的目标是尽可能将所有可行的传动路线申请为自己的专利,这使它们在新产品开发中处于十分有利的地位。

(2) 换挡控制技术研究。工程机械作业时,换挡、换向频繁,对操作人员有较高的要求,由人工控制换挡到自动换挡是技术发展的必然。科学高效地换挡必须解决三个方面的技术问题:科学的控制策略,正确的换挡时机,平稳的换挡过程。

(3) 液力机械变速系统的效率研究。液力机械变速系统的传动效率不高,主要原因在于液力变矩器的传动效率值较低且波动幅度较大,如何提高液力变矩器在工作过程中的效率是一个关键的技术问题。

(4) 进一步提高产品的可靠性。经过几十年的发展,国产工程机械变速箱的质量和可靠性都有很大的提高,但与国外同类产品相比,还存在着很大的差距。

1.3.2 复合传动技术与工程机械变速系统的结合

1. 复合传动的概念

所谓复合传动,就是指将不同的动力源组合或同一动力源驱动的不同形式的功率流组合,使它们共同工作于同一个工作系统中的传动形式。任何一种单一的传动形式都有其优点和缺点,不可能适应所有工作情况。在对各种类型传动深刻理解的基础上,从总体上分析研究各类传动的本质特征,针对不同的应用领域,将两种或两种以上的传动方式组合在一起构成变速系统,能达到扬长避短、优势互补的目的。

2. 功率分流与合流的方式

复合传动的核心是不同形式的功率流的分解与组合,也就是功率分流与合流。

功率分流与合流需要功率分流与汇流机构,机械传动中的功率分流与汇流机构主要有定轴轮系和行星轮系两种。

图 1-1 所示为利用定轴轮系实现分流和汇流的情况。其特点是:当轮系结构一定时,各元件转速成固定比例关系,一个元件的转速固定后,其他元件的转速就确定了,不能改变。但是各元件传递的力矩值不成固定比例关系。

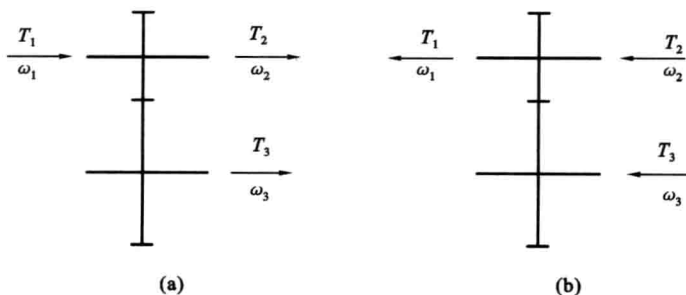


图 1-1 利用定轴轮系实现分流和汇流

(a) 分流;(b) 汇流

图 1-2 所示为利用行星轮系实现功率分流和汇流的情况。其特点是:行星排的三元件中,各力矩成固定比例关系,在一个元件的力矩大小确定后,其他两个元件的力矩大小也就确定了。但是各元件的转速并不成固定比例关系,在一个元件的转速确定后,其余两个元件的转速可以发生变化。

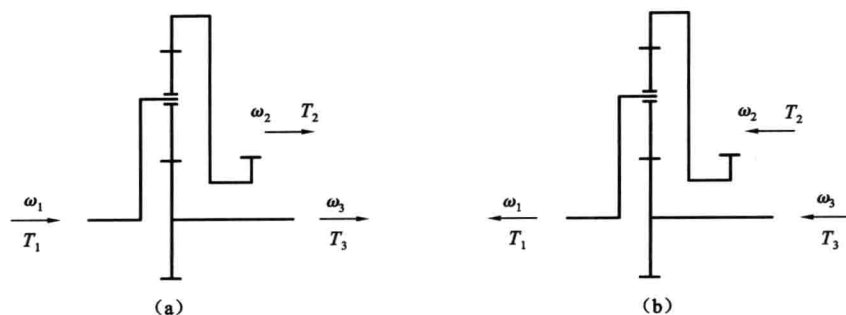


图 1-2 利用行星轮系实现分流和汇流

(a) 分流; (b) 汇流

按照分流机构与汇流机构的结构不同,复合传动可以分为表 1-1 所示的四种方式。

表 1-1 复合传动的方式

传动方式	分流机构	汇流机构
分矩汇速式	定轴轮系	行星轮系
分速汇矩式	行星轮系	定轴轮系
分矩汇矩式	定轴轮系	定轴轮系
分速汇速式	行星轮系	行星轮系

3. 复合传动的类型及特点

根据传动介质的不同,复合传动可以分为机械-电力复合传动、机械-液力复合传动、机械-液压复合传动和机械-机械复合传动等主要类型。

1) 机械-电力复合传动

机械-电力复合传动是混动式混合动力传动的一种形式,它通过机械和电力两路功率流传递内燃机输出的能量,既能保证内燃机工作在效率较高的区域,又能充分利用机械功率流传递效率高、传递可靠的优点,可大幅提高车辆的燃油经济性和动力性能。目前研究较多的混合动力汽车大多数采用的是机械-电力复合传动方式。机械-电力复合传动经能量管理系统的协调控制,能合理分配能量源,实现多个动力源与部件的合理匹配,以适应不同工况,达到整车动力性、经济性和排放性最佳。机械-电力复合传动系统作为解决能源消耗、环境污染等诸多方面问题的一种方案,已成为目前轿车行业研究的重点。采用机械-电力复合传动的汽车有两套动力系统和相对普通车辆而言较复杂的管理控制系统,结构复杂,技术含量高,价格昂贵。

2) 机械-液力复合传动

单纯的液力传动或机械传动都不能满足工程车辆的要求。工程车辆现有的传动方式是在液力元件之后串联一个机械式变速器,构成串联型机械-液力复合传动变速系统。当外载荷变化时,改变机械变速器的挡位,就可使液力变矩器工作于高效区。这种方式与纯机械传动相比,增大了传动系统的柔性,减小了对传动系统的冲击;与纯液力传动相比,提高了传动效率,具有更好的经济性。这种传动方式有两个不足之处:一是传动系统传递的所有功率都要经过效率较低的液力变矩器,没有实现功率分流,从原理上限制了系统的传动效率——不能超过液力变矩器的高效点效率值;二是变速器的挡位有限,当外载荷变化时,换挡操作不能使液力变矩器总是工作于高效区。

3) 机械-液压复合传动

机械-液压复合传动系统将来自内燃机的输入功率分成两路传输,一路经液压无级调速机构(如变量泵和变量马达),另一路经机械传动机构(如定轴轮系),两路功率在差动轮系处汇合,从而实现机械-液压复合传动系统的无级变速,使内燃机和外载荷优化匹配。采用机械-液压复合传动系统不仅能降低驾驶员的操作强度、改善作业质量,而且能够提高车辆的动力性能和燃油经济性,减少内燃机的排放污染。由于液压介质的可压缩性、对温度的敏感性和不可避免的泄漏等因素,很难保证液压系统在高温和低温下均具有良好的工作稳定性。另外,液压传动中能量需经过“机械能→液压能→机械能”的变换,液压能在传递过程中存在压力和流量损失,所以液压传动路线中能量损失较大,传动效率较低。此外,液压元件制造精度要求高,使用和维护要求较高。

4) 机械-机械复合传动

机械-机械复合传动系统一般采用摩擦式无级变速与机械啮合传动集成的结构方式。G. Montriota 和 V. H. Mucino 等人提出了一种适用于汽车的采用带式无级变速单元与机械啮合传动机构集成的复合传动方案,其中,输入功率一部分经主轴直接传到差动轮系中心轮,另一部分经定轴轮系和无级变速单元传到差动轮系的内齿圈,两部分功率在差动轮系汇合后经行星架输出。他们通过对速比和输入功率分流比的研究,从理论上验证了功率分流式无级变速系统的可行性和优点。20 世纪 90 年代,台湾成功大学机械工程研究所提出了一种适用于摩托车的机械复合无级变速器设计方案,并进行了传动效率和运动学分析。A. J. Fox 在 V. H. Mucino 等人提出的机械复合无级变速方案的基础上,通过添加离合器和改变离合器的接合次序,得到四种工作模式,但结构变得相对复杂。尽管通过将金属带式无级变速器与定轴轮系并联构成机械复合无级变速器,提高了整个系统的输出转矩,但金属带式无级变速器传递的极限转矩偏小,这决定了由金属带式无级变速传动与机械啮合传动复合的无级变速器在传递大转矩方面能力有限。

4. 复合传动技术的研究现状

复合传动技术在机械传动中的应用已有几十年的历史。早在 1968 年,Kress 将无级变速单元与行星齿轮进行复合,并且在农业机械上首次实现了用液压传动与行