

第 1 章 引 言

1.1 概 述

履带车辆已经在建筑业、农业、航空航天和军事等领域广泛应用,发挥着举足轻重的作用。同时,伴随着经济和工业制造水平的不断提升,履带车辆的使用需求也逐渐增多。随着石油储备的日益减少和生态环境的不断恶化,如何减轻车辆带来的污染、减少车辆对石油的依赖已经成为越来越多人关注的热点。世界各国已为乘用车制定了平均燃油消耗标准^[1],虽然针对履带车辆等非道路机动设备并没有严格的能耗标准,但美国、欧盟等相继制定了严格的排放标准^[2-3],并将逐渐提高排放标准的要求。中国在 2014 年实施了《非道路移动机械用柴油机污染物排放限值及测量方法》^[4],规定了第三阶段污染物排放标准,并提出了第四阶段的要求。受内燃机自身热效率的限制,传统燃油车辆较难满足日益严格的能耗和排放标准,寻找合理的清洁能源替代方案成为了研究热点。

新能源车辆能够在降低油耗的同时,大大减少污染物的排放,其作为传统燃油车辆的替代品受到了各国的重视。近年来,汽车电传动技术发展迅速,但在目前的电机及能量存储装置的技术条件下,纯电机驱动存在续航里程短等缺陷。因此,基于机电复合传动(electro-mechanical transmission, EMT)的混合动力技术是现阶段车辆实现节能减排的最优方案之一^[5]。混合动力汽车通常搭载两个或者两个以上的动力源,多个动力源可以分别或一起工作。目前广泛采用的是油电混合动力技术,即通过内燃机与电机分别或者联合驱动车辆。由于电机的加入,混合动力汽车(hybrid electric vehicles, HEV)的发动机工作点可以进行调节与控制,使发动机工作在最佳效率区间,提升了混合动力汽车的燃油经济性,减少了发动机负载率频繁变化带来的排放^[6]。

混合动力技术已经在乘用车领域广泛应用并取得了突出的节能减排效果,但在履带车辆中的发展则相对较慢。实际上,1942 年的德国虎式坦克

VK4501(P)就已经装配了混合动力驱动系统^[7],但并未量产。在随后的几十年中,虽然针对混合动力履带车辆的研究不断开展,但混合动力履带车辆都未能实现大规模的生产应用。2008年,美国卡特彼勒公司推出了一款混合动力履带式推土机^[8],并以其优异的可靠性、作业能力和节能效果,引发了履带车辆领域的变革。虽然随后混合动力履带车辆的研究和生产广泛开展,但由于履带车辆传动系统复杂程度较高,目前混合动力履带车辆的研究仍然处于初级阶段。

不同于轮式车辆,混合动力履带车辆传动系统设计中的复杂因素较多,提升系统的综合传动效率及实现良好的直驶和转向性能是研究的重点和难点。综合传动效率对混合动力履带车辆的节能减排效果有重要影响,而直驶和转向是履带车辆控制的重要组成部分,履带车辆需通过改变左、右两侧履带速度差实现主动转向,通过控制速度差的大小实现不同的转向半径^[9]。这些性能要求为履带车辆传动系统设计和车辆控制带来了难度。混合动力履带车辆的传动系统构型可分为串联式、并联式和混联式结构,目前较为常见的是串联式混合动力结构,并联式混合动力结构偶有使用。但串联式混合动力结构存在能量的二次转换,并联式混合动力结构的低速运行效率较低。转向则多通过添加动力耦合机构,或通过专用转向机构及转向电机实现。除此之外,如何根据履带车辆的行驶性能需求选择最优的混合动力传动系统构型方案也是混合动力履带车辆传动系统设计的研究方向。基于混合动力履带车辆机电复合传动系统设计的研究主要包括以下几个方面的关键内容:

(1) 混合动力履带车辆传动系统的拓扑构型优化

混合动力履带车辆的传动系统构型方案较多,根据车辆的动力性、经济性等要求快速选择最适合的构型方案尤为重要。履带车辆的传动系统构型选择与轮式车辆不同,需在保证其实现转向的同时综合多因素分析,在众多候选拓扑构型方案中快速选择最优构型。但针对不同拓扑构型,动力学模型也不完全相同,若采用穷举分析方法将面临效率差、可行性低等瓶颈。

(2) 混合动力履带车辆的能量管理策略设计

履带车辆在行驶中,需要建立相应的能量管理策略以满足其行驶安全性、舒适性和经济性的要求。混合动力履带车辆的能量管理策略必须综合考虑直驶和转向工况。在传统能量管理策略的制定中,一般采用基于规则的策略,但无法保证能量管理策略的通用性和最优性。因此,需针对混合动力履带车辆直驶、转向的具体性能要求设计其能量管理策略,在满足基本驾

驶需求的同时,最大限度地实现策略设计的最优性和实时性。

(3) 混合动力履带车辆传动系统的参数匹配优化

传动系统参数的正确匹配不仅可以提升混合动力车辆的节能减排潜力、达到更好的控制效果,还可以进一步降低传动系统中电力电子系统的功率等级、优化传动系统动力元件的布置空间、降低成本。但由于机电复合传动系统中的参数种类多,参数值的变化范围大,参数匹配中的计算量较大,需在保证参数匹配全面准确的同时实现快速高效优化。

本书针对混合动力履带车辆的拓扑构型优化、能量管理策略制定、参数匹配优化开展了研究,提出了机电复合传动系统的综合优化设计方法。首先,提出了一种具有双输出的基于行星传动的混联式混合动力履带车辆机电复合传动系统构型,该构型省去了转向机构,提升了综合传动效率。其次,为分析不同拓扑构型的动力学特征,针对大规模拓扑构型优化问题,提出了不同拓扑构型的自动动力学建模方法。基于该自动建模方法,进一步针对履带车辆的行驶特性,提出了构型分析与特性筛选方法。随后,提出了基于功率流效率评价的近似最优能量管理策略,用于快速求解履带车辆传动系统不同拓扑构型的最优控制律,并进行燃油经济性的比较分析。最后,利用基于递进规则的迭代优化算法,实现了拓扑构型、能量管理策略及参数匹配的协同优化。通过设定和优化目标函数,得到最终的最优构型方案,实现了履带车辆机电复合传动系统的优化设计。

1.2 混合动力履带车辆传动系统的研究现状

混合动力履带车辆可以通过多动力源的匹配优化提高各个驱动动力元件的能量利用效率,提升动力性和燃油经济性。因此,混合动力履带车辆的发展受到了国内外民用和军用领域的重视。

在民用方面,履带车辆通常作为大型工程机械应用于基础设施开发建设、农业生产作业等方面。早在1961年,苏联的车里雅宾斯克公司就设计完成了DET-250电传动推土机,通过发动机带动发电机发电,驱动电机直接驱动车辆行驶^[10]。随后,相继有多家工程机械公司开启了混合动力履带车辆的研究,但由于当时的技术水平尚不能保证系统稳定性,并未大规模生产应用。2004年,日本的小松公司率先研制完成了第一款履带式液压混合动力挖掘机^[11],并在2008年实现了试运行,与普通型液压挖掘机相比,可减少20%以上的能源消耗。在2008年,美国的卡特彼勒公司量产了第一

款履带式混合动力推土机 D7E,极大地影响了履带式工程机械的发展^[12]。D7E 的传动系统结构如图 1.1 所示。

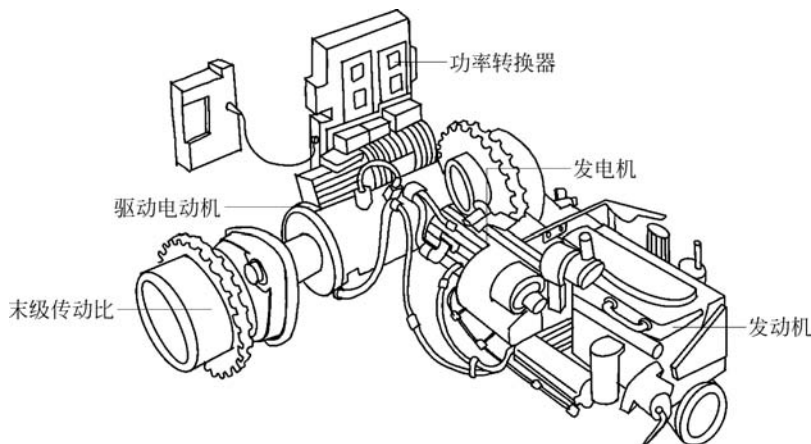


图 1.1 D7E 动力总成系统构成

实际上 D7E 并没有配备储能单元,涡轮增压柴油机通过发电机发电,产生的电能一部分通过转换为直流电用于空调系统等用电附件的供电,其余全部通过两台电动机分别驱动两侧履带前进。研究结果显示,相比于传统的液力驱动履带式推土机 D8T,D7E 的 CO_2 和 NO_x 的排放可以减少约 25%,综合工况下的平均节油效果为 20%~30%^[13]。2009 年,美国凯斯公司在巴黎工程机械展中发布了最新研制的 CX210B 履带式电油混合动力挖掘机,传动系统采用电机驱动,储能元件为超级电容。采用超级电容替代蓄电池,燃料消耗可以减少 20%^[14]。混合动力履带车辆的节能减排效果好,可靠性逐渐提升,引起了各工程机械公司的广泛关注,混合动力履带式工程机械的研究渐进开展,并不断成熟。国外各大厂商都推出了各自的混合动力履带式工程机械产品,如表 1.1 所示,混合动力履带式工程机械车辆的发展进入了快车道。

在我国,混合动力履带式工程机械的研究起步较晚。2007 年,詹阳动力推出了一款混合动力履带式挖掘机 JY621H^[15]。2010 年,潍柴动力集团与山推工程机械公司联合国内众多的研究院所,开始研制国内首台混合动力履带式推土机 SD-24^[16-17]。三一重工集团、山河智能装备股份有限公司也分别在 2009 年和 2010 年发布了自主研发的混合动力挖掘机,整体节能效果均在 20%以上^[18]。柳工等其他公司也逐渐推出了各自的混合动力履带式挖掘机、推土机等。国内各大厂商的混合动力履带式工程机械产品及

相应的节油率如表 1.1 所示。

表 1.1 国内外各大厂商的混合动力履带式工程机械产品^[15-18]

国 外			国 内		
公司(年份)	类型	结构 (节油率)	公司(年份)	类型	结构 (节油率)
日本小松 (2004)	混合动力挖掘机 (PC200-8H)	并联式 (25%)	詹阳动力 (2007)	混合动力挖掘机 (JY621H)	串联式 (20%)
日本日立建机 (2004)	混合动力挖掘机 (EX200)	并联式 (25%)	山河智能 (2010)	混合动力挖掘机 (SWE210-H)	并联式 (20%)
美国卡特彼勒 (2008)	混合动力推土机 (D7E)	串联式 (25%)	中联重科 (2010)	混合动力挖掘机 (ZE205E-H)	并联式 (30%)
美国凯斯 (2009)	混合动力挖掘机 (CX210B)	串联式 (20%)	国机重工 (2014)	电传动推土机 (D320)	串联式 (15%)
美国约翰迪尔 (2014)	混合动力推土机 (650K)	串联式 (—)	潍柴与山推 (2014)	混合动力推土机 (SD-24)	串联式 (20%)
美国卡特彼勒 (2015)	混合动力挖掘机 (Cat336D2-XE)	串联式 (25%)	山重建机 (2014)	混合动力挖掘机 (MC386HH-8)	串联式 (29%)

在军用方面,对混合动力履带车辆的需求更为迫切。由于现代战争的需要,电装甲和电火炮等电动化设备的应用将会为未来陆地战争带来战略优势,各国也在争相研发高性能、电动化的履带战斗车辆。混合动力传动系统能够在不牺牲履带车辆的性能和行进距离的基础上,节省大量的燃油。在伊拉克战争中,美国投入的坦克部队每天消耗将近 100 万加仑的燃油,需要相当大数量的运油车,后勤保障压力极大。另外,混合动力技术可以有效降低动力元件的空间占用率,为电武器等电附件预留更多空间。早在 1916 年,法国军方便研制了“圣沙蒙”突击坦克,该坦克作为世界上第一款配备电传动装置的战斗式履带车辆,省去了变速箱,通过发电机发电,利用左右两个直流电机实现了较好的操纵性能。但由于其电传动的布置不合理,导致战斗效果较差^[19]。随后,德国的 K 型重型坦克、法国的 2C 重型坦克等均采用了类似的电传动装置,但都未能取得良好的作战效果^[20]。进入 20 世纪以后,混合动力履带车辆的研究呈现快速发展的局面。1999 年,德国伦克公司推出了用于装甲战车的机电复合传动系统 EMT600,采用了一台主驱动电机和一台转向电机^[21]。2006 年,伦克公司推出了一款全新的混合动力传动系统 REX,该系统构建了一个由单排行星齿轮、两台电动机/发电机、发机构成的功率分流式混联混合动力驱动系统,在不同的驾驶工况下可以分别

或者共同驱动两个电机工作。这项技术的提出为履带车辆机电复合传动技术提供了新的发展方向^[22]。美国国防部在 2003 年提出了未来战斗系统 (Future Combat System, FCS) 的设想,投入巨额经费设计未来战车^[23]。英国 BAE 公司 2010 年曾经为美军设计了 GCV 陆战混合动力战车。该战车采用串联式混合动力结构,通过轮边电机驱动负重轮实现分布式驱动,但由于研究经费限制等原因,该结构虽然受到了广泛的好评,但并未付诸应用^[24]。

目前,混合动力履带车辆传动系统按照工作方式,可以分为串联式混合动力、并联式混合动力和混联式混合动力结构。串联式混合动力结构只能由电动机驱动车辆行进,发动机通过发电机可以给电动机供电或者将能量储存在储能系统中^[25]。由于发动机的转速与输出轴的转速相对解耦,可以在运行中维持发动机工作在较高的效率区间。但由于存在机械能与电能之间的能量二次转换,全过程的工作效率相对较低^[26]。

并联式混合动力结构可以通过发动机和电动机分别或者同时驱动车辆。这种耦合方式可以使发动机的转矩直接用于驱动车辆。发动机在高速高负载区工作时,除满足正常驱动需求外,可以将额外的能量储存在储能系统中备用。但是由于发动机的转速始终与车辆的行驶速度相关,在低速低负载工作状态下,发动机的效率较低、油耗较高^[27]。

混联式混合动力结构一般有两种主要的布置方式:一种是通过在单轴或双轴结构中添加自动离合器,实现串联式、并联式和混联式模式之间的切换;另一种是通过行星齿轮结构耦合,使动力元件与行星齿轮排的节点(太阳轮、齿圈和行星架)连接,并在各个节点间添加离合器形成多模式构型。混联式结构可以综合串联式和并联式的优点,在不同功率需求下维持发动机工作在高效率区。混联式混合动力履带车辆的整体工作效率高、油耗低,但由于结构复杂、制造难度高、控制较难,并未广泛生产^[28]。

在针对混合动力履带车辆的数十年研究探索中,履带车辆的传动系统主要形成了如图 1.2 所示的四种具体的构型方案。

结构 1 通过发动机带动发电机发电,驱动左右两侧牵引电机,转向通过控制左右两侧的电机转速实现。结构 2 通过发动机带动发电机发电,并通过牵引电机向两侧履带传递动力。转向则由专门的转向电机驱动齿轮传动产生两侧履带转速差实现。结构 3 与结构 2 原理相同,只是将一个牵引电机变为两个,分别驱动左、右两侧履带。上述三种结构均为串联式结构,结构 4 除了可以通过电动机向两侧履带传递动力外,还可以在闭合离合器后直接通过发动机驱动车辆,其转向方式与结构 1 类似^[29-30]。

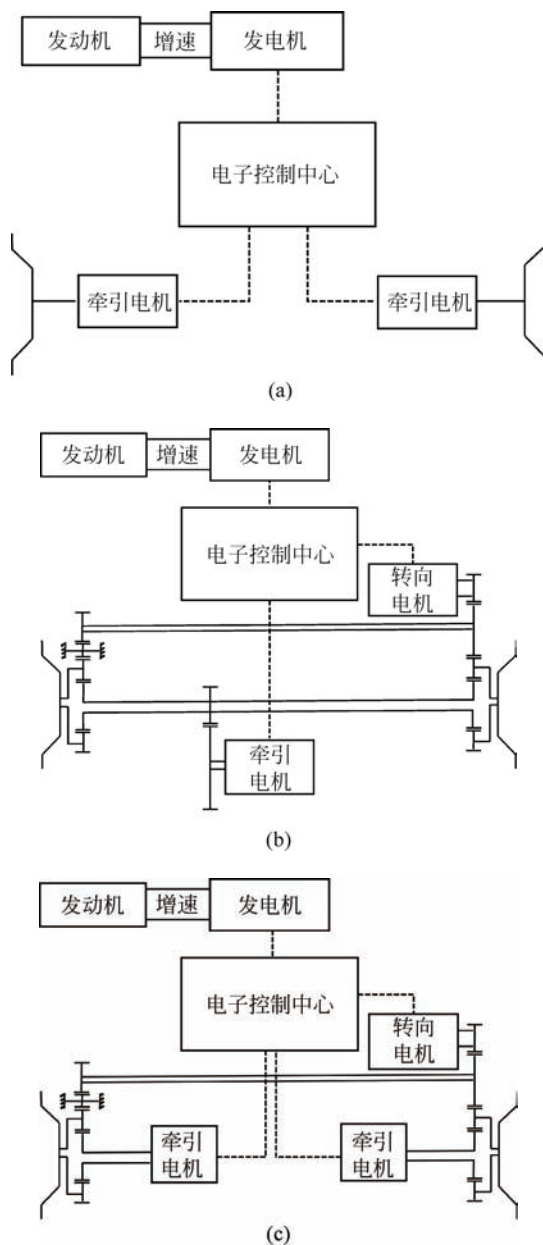


图 1.2 履带车辆机电复合传动系统的几种主要结构示意图^[30]

(a) 结构 1; (b) 结构 2; (c) 结构 3; (d) 结构 4

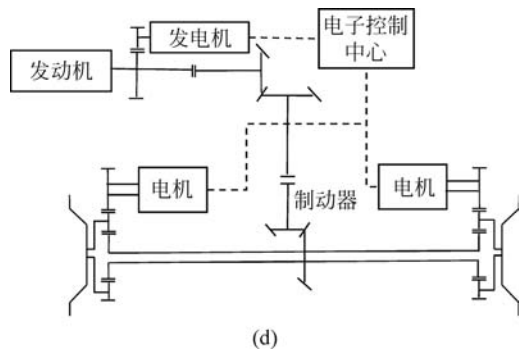


图 1.2(续)

目前,混合动力履带车辆中的应用较多集中于结构 1 和结构 2,但是结构 1 由于双侧电机相互独立,转向时的再生功率和驱动功率无法互相补偿,造成电机的功率较大。而结构 2 中由于转向机构具有转向横轴,给布置的灵活性带来了负面的影响。这两种方案被认为对轻型的履带车辆传动系统比较适用。

基于以上两种主要结构,很多研究人员通过改进机电复合传动系统以得到更好的效果。改进后的方案主要有两种,如图 1.3 和图 1.4 所示。第一种方案保留了双侧电机驱动的特征,与上文中的结构 1 相比,其在两个电机中间添加了转向功率耦合机构,可以利用功率耦合机构实现转向功率的机械回流,从而降低了两侧牵引电机的功率等级。但由于增加了功率耦合机构,结构比较复杂,并且该方案为串联式混合动力方案,能量的二次转换

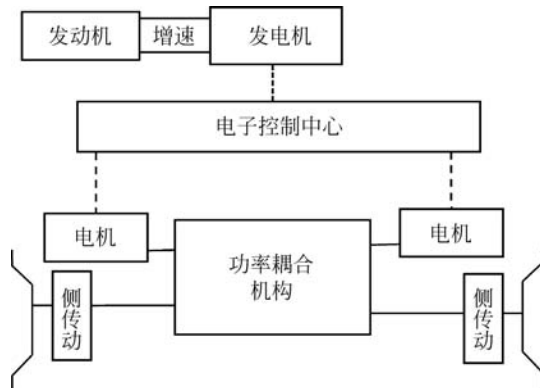


图 1.3 经过改进后的第一种机电复合传动系统结构

仍会使传动效率较低^[31],英国的 QinetiQ 公司推出的 E-X-drive 传动系统即采用了该方案。第二种改进方案则在结构 4 的基础上,将发动机、电机、输出轴与行星传动耦合,形成混联式结构。该结构使综合传动效率增加,发动机部分功率以机械能形式传递,降低了电机的功率等级要求。但转向的实现依然需要通过转向横轴及永磁同步转向电机,空间布置的灵活性受限^[32],上文所说的德国伦克公司的 REX 传动系统即采用的该方案。

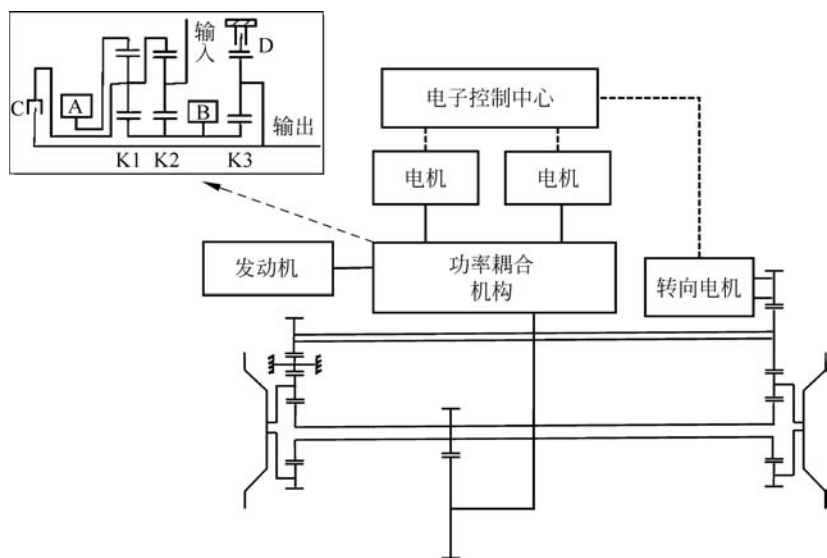


图 1.4 经过改进后的第二种机电复合传动系统结构

改进后的两种方案均使用了行星传动耦合装置,如何选择相应的行星齿轮传动结构,以及如何将动力元件与齿轮排节点相互连接等,一直是混合动力履带车辆机电复合传动系统的研究重点。对于串联式方案而言,早在 1981 年 Sturgill 即提出了通过液压系统实现大功率转向要求的结构,利用液压系统蓄能器短时提供较大功率的特性,可实现恶劣条件下的机动转向,液压系统的加入使系统变得更加复杂^[33]。2011 年 Gai 提出了在两侧驱动电机中间添加行星传动耦合装置的方法,克服了额外转向机构和转向电机造成的结构复杂问题。该方案可实现履带车辆转向时的再生功率的机械回流,仿真表明其电机功率需求仅为双侧独立电机驱动方案下电机功率需求的 0.65 倍^[34-35]。2012 年 Enrico 设计了一套机电复合传动系统。一个电机用于直接驱动,另一个电机用于实现差速转向,也可以减小对电机的功率等

级要求。但与此同时,上述两种通过行星传动耦合装置降低电机功率的方案导致直线行驶的极限性能大幅降低^[36]。

串联式方案中存在能量的二次转换,造成系统的整体效率不高,混联式方案可以克服该问题,故近些年逐渐出现了基于行星传动的混联式混合动力履带车辆机电复合传动系统的设计。Schmidt 在 2000 年提出了一种具有单输出的双模式机电复合传动系统构型方案。其转向系统与直驶驱动系统分离,通过控制行星传动结构中的离合器开闭切换模式,该混联式方案可以实现较高的能量传递效率^[37]。

北京理工大学的 Han 和 Xiong 等人在 2011 年后相继提出了一种双模式混合驱动的传动系统构型方案及其控制策略。该构型采用了基于行星传动的功率分流模式,降低了电机的功率等级。同时根据混合驱动装置功率分流的特性,对电机的转速、转矩和功率等参数匹配进行了深入的研究。但该结构仍旧需要采用额外的转向机构实现转向,动力系统的直线行驶与转向行驶机构相互分离,也使基于行星传动的构型更加复杂^[38]。

随着研究的不断深入,已经有越来越多的履带车辆采用了混合动力机电复合传动系统。但综合上述各种方案的优缺点,目前混合动力履带车辆机电复合传动系统的设计仍旧存在很多的挑战,如何在保证良好转向性能的同时,减小传动系统结构复杂性,提升综合传动效率是研究的重点。本书提出了一种新型的混合动力履带车辆机电复合传动系统的构型,并针对混合动力履带车辆建立了构型设计的方法。拓扑构型的寻优、能量管理策略的制定和参数匹配优化的方法是传动系统构型设计中存在的三个难点,接下来的 1.3 节将围绕这三个难点展开论述。

1.3 混合动力车辆传动系统优化设计研究现状

目前针对混合动力履带车辆传动系统最优设计的研究非常少,而对于混合动力轮式车辆传动系统的研究相对比较成熟,发展较为迅速,研究多集中于传动系统的成本、效率、能量管理策略等方面。虽然履带车辆与轮式车辆的动力学特性相差很大,但相应的传动系统设计方法有很多相似之处。

混合动力汽车从最初串联式和并联式传动系统的大量研究和应用,逐渐在近些年转向混联式传动系统。据统计,2016 年美国售出的混合动力车型中有 85% 以上都是基于行星齿轮传动的混联式混合动力车^[39]。其中,最具代表性的混联式车型是丰田的第一代普锐斯(Prius)。自从 1997 年 12