



红河学院
HONGHE UNIVERSITY
学术文库丛书



直升机 减速器微量润滑研究

管文 著



科学出版社



红河学院
HONGHE UNIVERSITY
学术文库丛书

红河学院学术著作出版基金资助出版

直升机减速器微量润滑研究

管 文 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

直升机减速器润滑系统出现故障,齿轮、轴承将处于无润滑油工作状态,使减速器在短时间内破坏,造成灾难性的后果。为此,许多国家均对武装直升机减速器有 30~60 min 的干运转能力要求。本书采用微量润滑方式,对齿轮油的多种极压抗磨添加剂进行摩擦学行为研究。

本书共 6 章。第 1 章分析直升机传动系统干运转的国内外研究现状,第 2 章进行试验系统设计,第 3 章进行极压抗磨剂对不同航空油的油雾润滑试验研究,第 4 章进行极压抗磨剂对航空油的油气润滑试验研究,第 5 章对含极压抗磨剂的油气润滑用于直升机润滑系统应急措施的可行性分析,第 6 章对直升机减速器应急方案进行总结。

本书可供航空领域、表面工程领域、润滑领域的技术人员和管理人员参考,也可作为科研人员、高等工科院校教师的科研参考书及相关专业研究生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

直升机减速器微量润滑研究/管文著. —北京:
科学出版社, 2015. 5

ISBN 978-7-03-044192-8

I. ①直… II. ①管… III. ①直升机—减速装置—润滑—研究 IV. ①V275

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 089149 号

责任编辑:王艳丽 王晓丽
责任印制:谭宏宇 / 封面设计:殷 靓

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

南京展望文化发展有限公司排版

江苏凤凰数码印务有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015 年 5 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2015 年 5 月第一次印刷 印张: 6 3/4

字数: 145 000

定价: 48.00 元

红河学院学术文库编委会

主 任:甘雪春

副主任:安学斌

委 员:

陈 灿	彭 强	田志勇	张灿邦	张平海	张永杰
何 斌	马洪波	杨六金	刘 卫	吴伏家	刘艳红
路 伟	龙庆华	洪维强	王 全	杨文伟	雷明珍
张 谛	梁 健	孙玉方	徐绍坤		



《红河学院学术文库》总序

甘雪春

红河学院地处红河哈尼族彝族自治州州府蒙自市,南部与越南接壤。2003年升本以来,学校通过对高等教育发展规律的不断探索、对自身发展定位的深入思考,完成了从专科到本科、从师范到综合的“两个转变”,实现了由千人大学向万人大学、由外延扩大到内涵发展的“两大跨越”,走出了一条自我完善、不断创新的发展道路。在转变和跨越过程中,学校把服务于边疆少数民族地区的经济社会发展、服务于桥头堡建设、服务于培养合格人才作为自己崇高的核心使命,确立了“立足红河,服务云南,辐射东南亚、南亚的较高水平的区域性、国际化的地方综合大学”的办学定位,凸显了“地方性、民族性、国际化”的办学特色,目前正在为高水平的国门大学建设而努力探索、开拓进取。

近年来,学校结合区位优势和独特环境,整合资源和各方力量,深入开展学术研究并取得了丰硕成果,这些成果是红河学院人坚持学术真理、崇尚学术创新,孜孜以求的积累。为更好地鼓励具有原创性的基础理论和应用理论研究,促进学校深入开展科学研究,激励广大教师多出高水平成果和支持高水平学术著作出版,特设立“红河学院学术著作出版基金”,对反映时代前沿及热点问题、凸显学校办学特色、充实学校内涵建设等方面的专著进行专项资助,并以《红河学院学术文库》的形式出版。

学术文库凸显了学校特色化办学的初步成果。红河学院深入实施“地方性、民族性、国际化”特色发展战略,着力构建结构合理、特色鲜明、创新驱动、协调发展的学科建设体系,不断加大力度推进特色学科研究,形成了鲜明的学科特色,强化了特色成果意识。学术文库的出版在一定程度上凸显了我校的办学特色,反映了我校学者在研究领域关注地方发展、关注民族文化发展、关注边境和谐发展的胸怀和

视域。

学术文库体现了学校力争为地方经济社会发展做贡献的能力和担当。服务社会是大学的使命和责任。学术文库的出版,集中展现了我校教师将科研成果服务于云南“两强一堡”建设、服务于推动边疆民族文化繁荣、提升民族文化自信、助推地方工农业生产、加强边境少数民族地区统筹城乡发展的追求和担当,进一步为促进民族团结、民族和谐贡献智慧和力量。

学术文库反映了我校教师在艰苦的条件下努力攀登科研高峰的毅力和信心。我校学者克服了在边疆办高等教育存在的诸多困难,发扬了蛰居书斋,沉潜学问的治学精神。这批成果是他们深入边疆民族贫困地区做访谈、深入田间地头做调查、埋头书斋查资料、埋头实验室做研究等辛勤耕耘的成果。在交通不畅、语言不通、信息缺乏、团队力量薄弱、实验室条件艰苦等不利条件下,学者们摒弃了“学术风气浮躁,科学精神失落,学术品格缺失”的陋习,本着为国家负责、为社会负责、为学术负责的担当和虔诚,展现了追求学术真理、恪守学术道德的学术品格。

本次得到学校全额或部分资助并入选文库的著作涵盖文学、经济学、政治学、教育学等学科门类的七部专著,是对我校学术研究水平的一次检阅。尽管未能深入到更多的学科领域,但我们会以旺盛的学术生命力在创造和进步中不断进行文化传承和科技创新,以锲而不舍的精神和舍我其谁的气质勇攀科学高峰。

“仰之弥高,钻之弥坚;瞻之在前,忽焉在后”,对学术崇高境界的景仰、坚韧不拔的意志和自身的天分与努力造就了一位位学术大师。红河学院人或许不敢轻言“大师级”人物的出现,但我们有理由坚信:学校所有热爱科学研究的广大师生一定能继承发扬过去我们在探索路上沉淀的办学精神,积蓄力量、敢于追梦,并为努力实现“国门大学”建设的梦想而奋勇前行。当然,《红河学院学术文库》建设肯定会有一些问题和不足,恳请各位领导、各位专家和广大读者不吝批评指正,以期帮助我们共同推动更多学术精品的出版。



FOREWORD

前言

传动系统是直升机的三大重要动部件之一,也是最易受损的部件之一,它直接影响直升机的安全性。当润滑系统出现故障时,整个传动系统将处于无润滑油工作状态,由于急剧的温升热膨胀,可能使齿轮失去工作间隙,引起接触表面塑性变形、胶合或过度磨损,使减速器在短时间内破坏,造成灾难性的后果。美国、欧洲、日本和俄罗斯等国家和地区均对武装直升机有 30~60 min 的干运转能力要求,即在失油条件下,传动系统(主减速器及尾传动减速器)能工作一定的时间,以便飞行员脱离作战环境,寻找着陆点。

十年前,国内多家单位、多名专家研究这一课题,结果不理想后纷纷放弃。最近几年,作者一直从事直升机减速器微量润滑研究。本书是在美国 Morales 和 Handschuh 等对直升机减速器进行抗磨剂的油雾润滑基础上继续进行的。到目前为止,含抗磨剂的油雾润滑只有美国 Morales 和 Handschuh 等研究过,并且现在一直在进行添加剂的油雾润滑方面研究,历时已 10 年之久。我们进行的含抗磨剂的油雾润滑在国内属第一次开展,而含抗磨剂的油气润滑用于直升机传动系统干运转在国内外均是首次。油雾和油气润滑耗油量少,能减轻直升机的质量;压缩空气能很好地散热,故润滑效果好;油雾和油气润滑目前仅局限于对基础油或切削液,而在基础油或切削液中加入不同性能添加剂的油雾润滑和油气润滑的研究却极少;极压抗磨剂的研究目前仅局限于浸油等充分润滑情况,油雾和油气润滑条件下抗磨剂的研究一直未得到关注。本书的创新点在于所做研究是上述两者研究情况的综合。

本书由管文博士撰写。本书的研究,得到国家重点基础研究发展计划(973 计

划,2007CB607600)和中国科学院兰州物理化学研究所开放基金的资助。本书的撰写,得到戴振东、吴伏家、周海三位教授支持。本书的出版,得到红河学院学术著作出版基金的资助。在此一并表示衷心感谢!

由于书中介绍的内容尚处于研发阶段,存在争议也属正常。书中存在疏漏或不妥之处,敬请读者批评指正。作者邮箱 gwgw2005@126.com。

管 文
2015 年 3 月



CONTENTS

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 直升机传动系统干运转的国内外研究现状	2
1.1.1 增加一套应急的液压润滑系统	2
1.1.2 稀油润滑	5
1.2 课题的提出	6
第 2 章 试验系统设计	9
2.1 试验路线设计及试验装置	9
2.1.1 试验路线设计	9
2.1.2 试验装置	10
2.2 试验材料	13
2.2.1 磨损试样	13
2.2.2 极压抗磨添加剂	14
2.2.3 试验用基础油	18
2.3 试验参数的确定	18
2.3.1 试样形状及表面处理	18
2.3.2 试验环境	19
2.3.3 试样的赫兹接触应力和相对滑动速度	20

第 3 章 极压抗磨剂对不同航空油的油雾润滑试验研究 22

3.1 引言 22

3.1.1 油雾形成原理 22

3.1.2 油雾润滑的优点 23

3.1.3 油雾润滑的缺点 23

3.2 极压抗磨剂对 DOD-L-85734 航空油的油雾润滑试验研究 24

3.2.1 试验材料 24

3.2.2 试验设备与试验方法 24

3.2.3 结果与分析 25

3.3 极压抗磨剂对 926 航空油的油雾润滑 29

3.3.1 试验材料和方法 29

3.3.2 4.5% 添加剂的油雾润滑 30

3.3.3 2% 添加剂的油雾润滑 34

3.3.4 不同含量极压抗磨添加剂的油雾润滑抗磨效果对比 36

3.4 极压抗磨剂对不同航空油的适应性 39

3.4.1 试验材料和试验方法 39

3.4.2 结果与分析 40

3.5 结论 44

第 4 章 极压抗磨剂对航空油的油气润滑 46

4.1 引言 46

4.2 极压抗磨剂对 DOD-L-85734 航空油的油气润滑 47

4.2.1 试验材料和试验方法 47

4.2.2 结果与分析 48

4.3 极压抗磨剂的最佳抗磨含量测定 52

4.3.1 T391 的最佳抗磨含量测定 52

4.3.2 T202 的最佳抗磨含量测定 56

4.3.3 T321 的最佳抗磨含量测定 59

4.3.4 T307 最佳抗磨含量测定 64

4.4	结论	68
第5章	含极压抗磨剂的油气润滑用于直升机润滑系统应急措施的可行性	69
5.1	引言	69
5.2	含极压抗磨剂的油气润滑与油雾润滑抗磨效果对比	69
5.2.1	试验材料	69
5.2.2	试验方法	70
5.2.3	结果与分析	70
5.3	极压抗磨剂最佳抗磨量的油气润滑与基础油对比	75
5.3.1	润滑性能	75
5.3.2	磨损性能	77
5.3.3	磨损表面的 XRD 图谱	78
5.3.4	最佳抗磨含量抗磨剂的抗磨机理	80
5.4	含极压抗磨剂的油气润滑用于直升机传动系统干运转的可行性	80
5.5	结论	82
第6章	直升机减速器润滑系统应急方案设计	83
6.1	直升机减速器润滑系统应急方案	83
6.2	结束语	88
参考文献		90

第 1 章

绪 论

直升机传动系统通常包括主减速器、中间减速器、尾减速器、动力输入轴、主旋翼轴和尾传动轴。不同的直升机,传动系统也不尽相同^[1]。直升机传动系统的作用是将发动机的功率和转速按需要传递给主旋翼、尾桨和各个附件。

传动系统是直升机的重要动力部件,其性能和可靠性直接影响直升机的性能和可靠性^[2-5]。

1. 主减速器

主减速器的主要作用是将一台或多台发动机的功率合并在一起,并按需要分别传给主旋翼、尾桨和相关附件。主减速器主要由以下部分组成:① 齿轮减速器;② 改变运动方向的锥齿轮传动;③ 离合器;④ 驻车制动装置;⑤ 润滑系统。对军用直升机,除了具有正常的润滑系统,还应具备应急润滑系统^[6-8],以提高直升机的生存力和战斗力。

2. 中间减速器

中间减速器通常由一对圆锥齿轮、轴承和齿轮箱等构成。主要作用是改变运动方向,也可改变转速。中间减速器通常采用飞溅式润滑,没有设置专门的冷却装置。当然,不是所有的直升机都有中间减速器。

3. 尾减速器

尾减速器主要由一对圆锥齿轮、轴承、操纵系统和齿轮箱等构成。尾减速器通常采用飞溅式润滑,没有设置专门的冷却装置。

4. 传动轴

传动轴包括动力输入轴、主旋翼轴和尾传动轴。

1.1 直升机传动系统干运转的国内外研究现状

传动系统是直升机的三大重要动部件之一,也是最易受损的部件之一,它直接影响直升机的安全性。当润滑系统出现故障时,整个传动系统将处于无润滑油工作状态,由于急剧的温升热膨胀,可能使齿轮失去工作间隙,引起接触表面塑性变形、胶合或过度磨损,使减速器在短时间内破坏,造成灾难性的后果。美国、欧洲、日本和俄罗斯等国家和地区均对武装直升机有 30~60 min 的干运转能力的要求^[9-11],即在失油条件下,传动系统(主减速器及尾传动减速器)能工作一定的时间,以便飞行员脱离作战环境,寻找着陆点。目前,国外一些机型的直升机干运转能力据报道已达到或超过 1 h^[12],如超级美洲豹 EC225 的干运转能力为 52 min;UH-60 黑鹰、阿帕奇 AH-64A、EH-101 的干运转能力接近 1 h;贝尔 AH-1 G/S 的干运转时间可达 4 h。但以上机型的直升机传动系统干运转的解决方案均未见报道。我国直升机的干运转能力是否超过 30 min,也未见报道。本书查到了两种应急技术方案:一是增加一套应急的液压润滑系统。该方案已在法国某海上反潜直升机上采用^[13]。二是油雾润滑技术^[14,15]。美国 NASA 研究报告显示 Morales 和 Handschuh^[16]在 1993~2011 年一直从事航空油的油雾润滑抗磨剂^[17,18]的研究。

1.1.1 增加一套应急的液压润滑系统

图 1.1 润滑方案曾经在法国某型号直升机主减速器上使用。正常工作状态

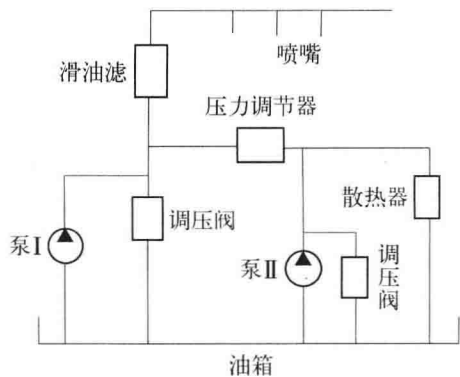


图 1.1 液压应急润滑系统(a)

下,油泵Ⅰ的润滑油通过主减速器内部油路对齿轮、轴承进行润滑。油泵Ⅱ的润滑油经过散热器冷却后流回油箱,油泵Ⅱ在正常工作状态下,只起冷却润滑油的作用。当油泵Ⅰ供油不足时,油泵Ⅱ的润滑油通过压力调节器进行补充供油,以保持主减速器的供油压力和流量稳定。油泵Ⅰ的润滑油经过主减速器的内部油路,故不易被破坏。当外部油路遭破坏后,油泵Ⅰ的润滑油仍可单独对减速器的齿轮、轴承润滑,只是外部油路破坏后,润滑油不再被冷却和散热。

该方案的缺陷:① 正常工作状态时,两个泵一直处于运转的状态,导致油泵电机的功率损耗大,也降低了油泵的寿命;② 泵Ⅰ出口处的油液没有被直接冷却,故该方案对齿轮、轴承的冷却散热效果差。

图 1.2 曾是法国另一种型号的直升机主减速器润滑方案:通过两套独立的外部供油系统为主减速器供油。由于油滤中设有防止润滑油倒流的单向阀,故当一条油路失效后,另一条油路可单独供油。其缺陷是:① 两条油路均是外部管路,极易受到敌方的攻击破坏,造成两套油路同时失效,故该方案的安全性不足;② 设置两套散热器,增加了直升机的质量。

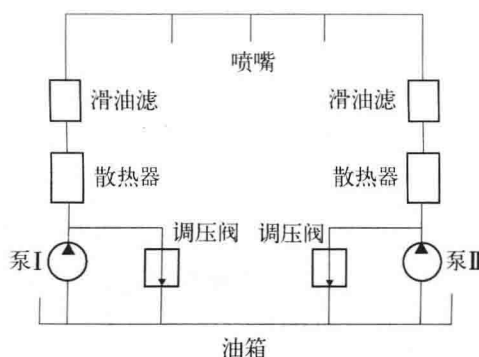


图 1.2 液压应急润滑系统(b)

图 1.3 这种润滑方案的润滑系统在主减速器正常工作时,由主油泵单独供油,润滑油经外部管路,由散热器冷却后,对主减速器的齿轮和轴承进行润滑和冷却。当主油泵供油不足,使油路压力降低时,辅助泵补充供油。辅助泵提供的润滑油通过主减速器的内部油路,对减速器的齿轮和轴承进行润滑。当外部油路或散热器被破坏而发生油液泄漏时,主油泵停止供油(因油面降低,主油泵吸不到油),此时,辅助泵单独供油,以维持主减速器齿轮和轴承的基本润滑需求。辅助泵提供的润滑油通过主减速器的内部油路。

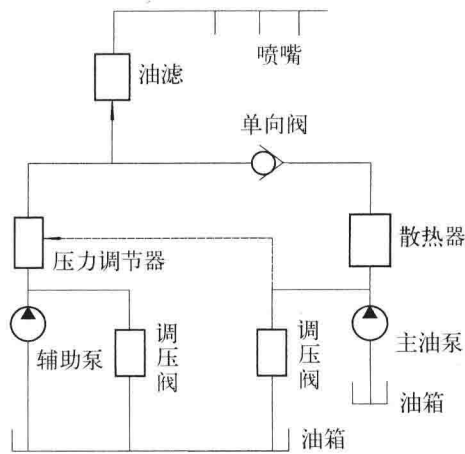


图 1.3 液压应急润滑系统(c)

与图 1.1 方案对比,图 1.3 方案有明显的优势:① 散热器安装在主油泵的出口处,使进入主减速器的润滑油冷却,故图 1.3 方案的齿轮和轴承的散热效果比图 1.1 方案好;② 图 1.3 方案的辅助泵只起辅助作用,是间歇供油,故降低了辅助泵电机的功率损耗,也降低了成本,且提高了辅助泵的使用寿命。图 1.1 方案和图 1.3 方案的应急润滑系统均没有冷却散热装置,因此应急润滑的时间不会太长。齿轮、轴承产生的摩擦热使润滑油的温度升高很快,导致润滑油的性能下降,润滑油的黏度也降低。润滑油的黏度降低导致润滑油的流速快,使润滑油停留在摩擦副的时间短,进而导致润滑作用降低。

以上三种方案的主油泵和辅助泵均共用一个油箱,如油箱破坏,则三种方案均不具备“应急润滑”的功能。以上三种方案是否达到 30 min 的运转能力,也没有报道。目前,不断有直升机的传动系统干运转能力接近或超过 60 min 的报道,显然不是法国采用的方案,但法国采用的方案使直升机减速器的改进相对容易。

我国目前也正进行直升机减速器应急润滑系统的设计改进,主要办法是借鉴国外直升机主减速器的设计方案。东安集团采用了法国海上反潜直升机主减速器的润滑油路图 1.3,对我国某型号直升机主减速器进行了下列改进:① 将原来的单级润滑油泵改为由主油泵和辅助泵组成的复合式双联润滑油泵;② 在润滑油滤上增加了一个单向阀。东安集团通过对我国某型直升机主减速器的改进,使我国直升机主减速器也具有了应急润滑的功能。目前我国以图 1.3 方案改进的直升机主减速器已进入了批量生产。

1.1.2 稀油润滑

1. 稀油润滑的应急系统

1993 年卡门航空公司 (Kaman Aerospace Corp) 发表了发动机端部齿轮箱和输入/附件齿轮箱干运转能力的实验结果: 增加齿轮侧向间隙、选用热强度高的材料、采用应急润滑系统保持传动零件有正常润滑的 40% 供油量, 可以达到 30 min 的干运转能力。但具体的方案未见公开。

2. 含抗磨剂的油雾润滑

美国 Morales 和 Handschuh 的 NASA 报告显示: 1993~2011 年, 其一直进行航空油的油雾润滑抗磨剂的研究, 如 2001 年用磷酸酯、2007 年用聚苯硫醚混合物作添加剂, 在航空钢直齿轮上进行油雾润滑试验研究。其试验原理及试验装置见图 1.4 和图 1.5。

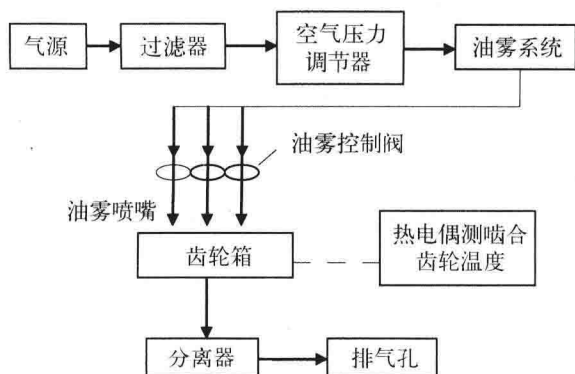


图 1.4 Morales 等的油雾润滑系统原理

美国格林研究中心 2007 年将 4 种成分的聚苯硫醚混合物^[19] (图 1.6) 添加到航空润滑油中, 搅拌均匀, 在 2 个齿面渗碳的 AISI9310 航空钢直齿轮上进行喷油雾润滑试验 (图 1.7), 齿轮齿数为 28、转速为 10 000 r/min、最大接触应力为 1.2 GPa。试验结果显示: 齿轮运转 35 h 后, 主动齿轮磨损量仅 8 mg、从动齿轮磨损量仅 6 mg, 试验过程中的热电偶温度上升到 107℃后就基本保持恒定。

但也许是印刷错误, 图 1.6 所示的聚苯硫醚混合物被中国科学院兰州物理化学研究所及我国多家化工研究部门确认为“错误”或“不存在”。

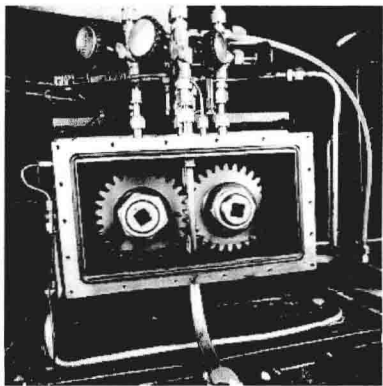


图 1.5 Morales 等使用的油雾润滑装置

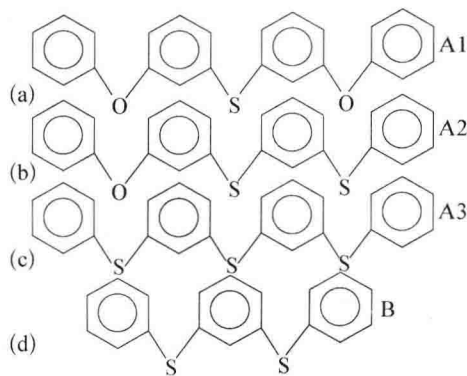


图 1.6 聚苯硫醚混合物

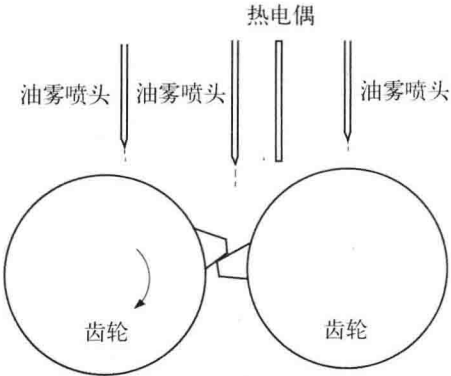


图 1.7 添加剂为硫醚的油雾润滑

2007 年, Mullen 和 Cooper 申请的美国专利 *Secondary lubrication system with injectable additive*, 称发明的油雾润滑装置在使用磷酸酯作抗磨添加剂、直升机在小平飞状态下, 能使直升机传动系统在失油后飞行达 60 min。

上述这些研究表明: 美国是采用油雾润滑方式解决直升机传动系统干运转难题的, 但出于国防、经济和技术考虑, 具体的技术细节未见公开报道。

1.2 课题的提出

在美国油雾润滑基础上, 本书采用了一种新的技术——含抗磨剂的油气润滑^[20-24], 并与含抗磨剂的油雾润滑进行摩擦学的性能对比。