

南水北调东线工程水泵机组结构选择*

仇宝云 黄季艳

(扬州大学水利学院 扬州 225009)

袁寿其

黄海田 陆一忠

冯旭松

(江苏大学流体机械中心)

(江苏省苏北供水局)

(江苏省水利厅)

摘要: 针对南水北调东线工程特点, 分析了其梯级泵站对主泵机组的要求。根据现有大型水泵机组应用情况和技术水平, 综合考虑可靠性、维修性、环保性和土建设备投资、运行费用等多方面因素, 从提高工程总体效益出发, 提出了梯级泵站主泵机组适宜的容量、泵型、机型、轴线形式和关键结构, 结论对工程的规划设计、设备选型和运行管理具有参考价值。

关键词: 梯级泵站 水泵机组结构 选择

中图分类号: TH132

0 前言

南水北调东线工程在江苏省扬州境内长江取水, 沿京杭大运河及其平行河道送水北上至山东、安徽、河北和天津, 解决生产和生活用水, 促进生态良性发展。工程最终规模是, 抽引江水 $1\,400\text{ m}^3/\text{s}$, $700\text{ m}^3/\text{s}$ 过黄河, $250\text{ m}^3/\text{s}$ 至天津。从长江到天津输水河道主干线全长 $1\,150\text{ km}$, 其中黄河以南 651 km , 地形以黄河为脊背向南北倾斜, 穿过黄河可自流到天津。引水口比黄河处地面低约 40 m , 从长江调水到黄河南岸规划设抽水泵站 30 处、13 个梯级, 总扬程 65 m , 设计总抽水能力 $10\,200\text{ m}^3/\text{s}$, 总装机容量 $1\,017.7\text{ MW}$, 沿线经过洪泽湖、骆马湖、南四湖和东平湖等湖泊, 用以调蓄水量。

平原地区长距离提升调水, 采用大型轴流式或混流式水泵, 工程占地小、效率高、作用大、管理方便, 自 20 世纪 60 年代以来已有了很大发展, 江苏、湖南、湖北、安徽和山东等省兴建了众多大型泵站, 特别是江苏省的江水北调工程已具规模, 在抗旱排涝、长距离调水、促进经济发展方面起了重要作用。国内外对大型水泵的研究主要集中在转轮水力能量及气蚀性能上。近年来, 有关科研单位和生产厂家开发出了系列高性能的轴流泵水力模型, 用于新建泵站和旧泵站更新改造, 我国大型水泵的水力性能已达到国际先进水平。但许多泵站机组结构形式还不尽合理, 影响正常使用; 泵机组关键部件可靠性差, 故障频繁发生, 设备完好率低, 维修

费用高; 有些泵站重外观、环境, 轻实用、效益, 个别泵站建成数年后机组一直不能正常运行。

南水北调东线工程是国家大型重点工程, 一定要汲取我国 40 年大型泵站建设和管理的经验, 根据工程特点和要求, 在正确规划前提下, 合理选用水泵及配套动力机的结构形式, 提高设备供水可靠性, 节省维护检修费用, 充分发挥工程效益。

1 工程对泵机组的要求

如图 1, 大型梯级泵站是该工程的“心脏”, 而大型水泵机组又是泵站的关键。水泵机组选用总体原则是, 在满足抽水能力和起动、停机断流、工况调节的前提下, 应具有较高的安全可靠性和运行效率, 不污染水体, 不影响环境。

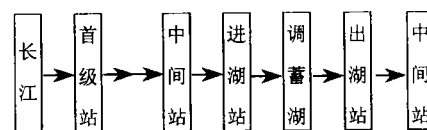


图 1 南水北调东线工程梯级泵站调水流程

本调水工程投资量大, 影响面广, 是受水区国民经济和生态环境的命脉, 供水可靠性直接影响受水区工农业生产和人民生活的用水。根据规划, 泵站机组平均年运行时间 $5\,000\sim6\,000\text{ h}$, 运行时间长, 运行费用大, 维护保养时间短。如果某一级泵站抽水流量不能保证, 则将影响其他梯级泵站乃至整个调水工程的正常运行。因此, 泵机组的可靠性是第一位的, 机组结构形式选择应首先考虑可靠性, 要求关键易磨易损部件故障少、寿命长。

其次, 泵机组应具有较好的安装性和维修性。

* 国家自然科学基金(50179032)和江苏省水利科技重点资助项目(2001055)。20020227 收到初稿, 20020625 收到修改稿

机组结构应便于安装操作和质量控制,有利于延长无故障工作时间和大修周期,便于维护检查和修理。对发生的故障,要求能很快查明原因并予排除,检修拆卸部件少、费用少、方便、简单,能在最短时间内恢复完好状态。

根据需求选择泵机组的调节功能。本工程年运行费用达 30~40 亿元,提高泵站效率对降低调水成本,减轻受水区负担,促进工程的良性和可持续发展有很大意义。在合理规划和优化调度前提下,可在以下三个方面保证泵站高效率运行:

①选用高效率水力模型。②机组性能及流道选型合理。③调节水泵工况,提高装置效率。目前我国大泵水力模型效率已经达到或接近发达国家的先进水平,要想再有明显提高不大可能。首级站受潮位影响,进湖站、出湖站受调蓄水位影响,扬程变化频繁,实现泵站高效运行的主要措施就是变工况经济运行。大型低扬程水泵工况调节方法:变转轮叶片角^[1]、变频调速^[2]、变可调前导叶角^[3]和采用双速电动机。泵站应根据自身特点选用机组的调节功能。

水污染是东线工程一大难题,国家采取了先治污后调水的策略。对于工程本身,就是要在输水过程中不污染水质,泵站建设和运行不给周边环境造成不良影响。这就给机组选择提出了环保要求。

2 大泵机组结构选用存在的问题

我国大泵机组在结构形式上还存在不少问题。许多结构设计对运行受力、安装检修和环境影响考虑少,可靠性差,故障发生频繁,检修费用高。

2.1 可靠性差

泵机组往往在抗旱和排涝的关键时刻发生故障,影响效能发挥。常见故障有如下几个方面^[4]。

(1) 水泵导轴承失效。油轴承频繁浸水:巴氏合金油润滑导轴承承载能力大,但结构复杂,安装难度大,特别是水密封结构不可靠,大量含泥沙的河水漏进导叶体轮毂腔,超过排漏能力,腔内水面上升,进入导轴承,造成轴承和轴颈严重磨损剥落,间隙增大,叶片碰壳。据统计,几乎所有大泵油轴承都发生过浸水事故,有的达 7~8 次之多。

水泵非金属水润滑导轴承承载能力低,用于卧式和斜式泵时,工作荷载大,易产生偏磨和损坏。如某 30° 斜轴泵站 P23 酚醛塑料轴承清水润滑,运行 300 h,轴承及轴颈出现明显偏磨和凹痕,运行 500 h,磨损 0.5 mm,停止运行,以防叶片碰壳。立式泵非金属导轴承虽然工作荷载小,采用河水润

滑,或采用清水润滑,但密封结构不好时,河水中的泥沙进入轴承间隙,经轴颈的挤压嵌入非金属轴承材料,磨损轴颈,被磨毛糙的轴颈反过来加速轴承的磨损,恶性循环,轴承磨损加剧,轴颈面层很快剥落,轴承间隙增大,造成叶片碰壳。

(2) 机械式叶片调节机构故障。大泵机械式叶片全调节机构最早设置在电动机轴与水泵轴之间,近年来上移至电动机顶部,调节小电动机固定安装,应用在江苏省刘老涧泵站^[5]、引江河泵站和江都抽水站第一、二站的改造工程、深圳东升供水工程中,结果表明这种结构容易发生漏油、滚动轴承损坏等故障,可靠性有待提高。

(3) 立式机组电动机推力轴承烧损^[6]。有些立式机组在高于设计扬程下运行容易发生电动机推力轴承推力瓦烧熔损坏事故。其原因是多方面的,安装质量差,推力瓦高差大,瓦面受力不均诱发因素,根本原因是轴承选型、结构设计问题。

2.2 安装维修性差

泵机组结构设计考虑不全面,造成安装与检修困难,机组部件不能按正常程序安装,安装质量不能保证。如江苏省江都第三抽水站 ZL13.5-8 型水泵,泵轴下部联轴器凸缘直径大于泵轴窝内径,泵轴无法从导叶体内吊装^[7];江苏省泗阳二站机组主轴凸缘直径大于电动机下机架孔径,主轴无法穿过,而定子搁在下机架上,机组垂直同心难以保证。

立式机组电动机无顶车和液压减载装置,大修采用四只千斤顶顶车,操作空间小,升高同步难;机组盘车需 20~30 名强壮劳力,劳动强度大。

机组设置不需要的功能结构,不但增加设备造价,而且增加安装维护的难度和出现故障的概率。有些结构长期闲置不用,疏于管理,失去原有功能。如水泵轮毂腔进水,调节机构锈死,结果反而增加了大修拆装难度。

机组结构维修性差,关键易磨损部件发生故障时,检修往往需要拆卸大部分或几乎所有部件,其工作量与机组大修相差无几。如完全井筒式水泵和箱涵式双向泵站,虽然可简化辅助设备系统,但水泵外无空间,安装检修困难,特别是水泵叶轮或轴承发生故障,难以检查发现,检修需要拆卸机组的几乎所有部件。

2.3 污染水体

水泵油润滑轴承,水封失效,浸水漏油,润滑油进入泵腔;全调节水泵轮毂与叶片根部的密封失效,轮毂内润滑油泄漏都会污染水体。

以上我国在大泵机组结构方面存在的问题,在本工程中应予以避免。

3 大泵机组结构形式选择

如图 2, 泵站设计参数确定情况下, 工程投资、管理、可靠性、维修性、运行费用等与机组结构的关系错综复杂, 其中, 可靠性的影响因素最多。

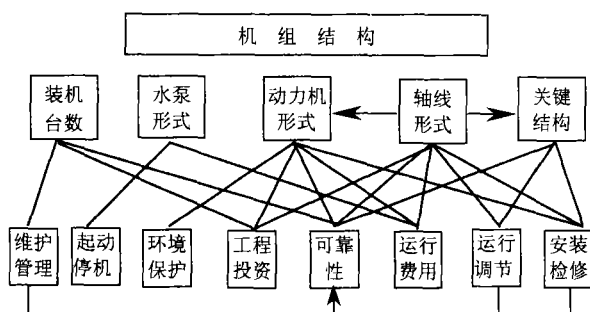


图 2 机组结构对泵站性能的影响

3.1 机组容量与单站台数

大泵叶轮直径 $D=1.54\sim 5.70$ m, 单泵流量 $q_v=7.0\sim 97.5$ m³/s, 配套功率 $P=0.8\sim 7.0$ MW, 额定转速 $n=75\sim 250$ r/min。机组大小的确定, 涉及多方面因素。站设计流量一定, 机组大小取决于机组台数。

机组太大, 台数过少, 站房基础开挖深, 运行保证率低。如江苏省皂河泵站只设 2 台机组, 1 台发生故障后, 抽水量仅为 50%; 若 1 台备用, 则因机组过大, 造成浪费。另一方面, 机组过大, 安装检修和运输困难, 有些关键部件技术性能不过关, 如 6HL 水泵转叶式接力器叶片调节机构经常发生漏油、振动等故障。相反, 一个泵站装机台数过多, 则运行管理不便, 站房太长, 占地面积大, 前池和出水池开挖长度大, 增加土建投资。综合考虑制造、安装、管理、技术条件成熟和抽送每千吨米水单位造价等因素, 选用叶轮直径 $D=2.8\sim 3.1$ m, 配套功率 $P=1.0\sim 3.0$ MW 左右, 单站台数 4~8 台较为合适。考虑到本工程的重要性和机组年运行时间长的特点, 每站应设置 1 台备用机组。

3.2 轴流式叶轮与混流式叶轮

轴流泵和混流泵特性有较大差异^[8]。轴流泵在小流量高扬程区域不稳定, 起动扬程高、功率大, 易振动, 停机用闸门或快速闸门断流时, 门体下降时刻和速度难以掌握, 容易造成闭阀运行, 引起动力机过载, 或造成机组倒转飞逸。而混流泵 $q_v\sim P$ 曲线比较平缓, 机组起动和停机断流比较容易, 高效区宽于轴流泵。在扬程、过流面积、流速相同的情况下, 导叶混流式叶轮产生的轴向力小于轴流式叶轮, 可以减小电动机推力轴承荷载。因此, 同等

情况下应优先采用混流式叶轮, 目前用于大型泵站的混流式水力模型很少。

轴流泵设计扬程 3.0~9.5 m, 混流泵设计扬程 6.0~16.0 m。水泵采用何种叶轮, 取决于工程规划的泵站设计扬程。相邻泵站相距远, 高差大, 泵站扬程高, 采用混流式叶轮为好。但泵站扬程过高, 靠近泵站出水侧的输水河道堤岸需要相应加高, 河面面积增大, 增加河道工程投资和输水渗漏、蒸发损失。相反, 泵站距离近、扬程低, 会增加泵站数量和建设费用及采用轴流泵的可能性。泵站地点选择还要考虑水文地质和交通情况。

水泵出口旋流影响出水水道水力损失^[9], 采用优化设计的后导叶, 保证出口水流具有较小的正向旋流, 可以减小水力损失, 提高装置效率^[10]。

江苏大学与江苏省水利厅合作, 为本工程开发出了高比转速导叶式斜流泵 211 水力模型。该模型最高效率为 85.3%, 效率大于 83% 的性能范围: 流量 $q_v=0.26\sim 0.47$ m³/s, 扬程 $H=4.6\sim 9.2$ m, 比转速 $n_s=650\sim 950$ 。研究结果表明: 211 模型与轴流泵模型相比, 具有三大特点: ①高效范围非常广。②小流量区域的不稳定性能显著减轻。③能适应扬程变化很大的场合。因此比较适合于本工程。

3.3 动力机

采用极数少、转速高的同步电动机作为大型水泵配套动力, 电动机体积小, 造价低, 但需要在电动机和水泵之间设置齿轮箱变速机构, 叶片调节机构设置困难, 齿轮变速箱噪声大、可靠性差, 安装维护要求高, 且消耗一部分功率, 因此国内只有少部分泵站采用。

国外有些大型泵站采用柴油机带动水泵。可以省去输变电设施, 建设周期短, 但柴油机故障率高, 噪声大, 运行时排放大量油烟, 柴油运输和储备烦琐, 易泄漏污染环境。该方案仅适合于运行时数较短的半临时性排涝泵站, 从可靠性、长久之计和环保角度考虑, 不适用于本工程。

大型水泵机组国内采用较多的是立式水泵配套立式同步电动机, 这种机组技术比较成熟, 在可靠性、维修性、调节性等方面具有其他形式机组无可比拟的优越性。

3.4 轴线形式

机组轴线形式有立式、斜式和卧式三种, 对比如表 1。立式机组站房高度大; 斜式和卧式机组站房高度较小, 但宽度增加。立式水泵来流由水平方向转为垂直方向, 出流由垂直方向转为水平方向(平直管出流)或再斜向下转为水平出流(屈膝管出流), 或转为斜向上再向下, 最后水平出流(虹吸管出流),

水流方向变化大；斜式水泵流道水流方向变化较小；卧式水泵采用平面 S 形流道、猫背式流道或做成贯流泵，水流方向变化小，特别是贯流泵，水流方向基本不变，流道转弯少，水力损失小。

表 1 机组轴线形式对比

轴线形式	流道水力损失	工况可调性	导轴承荷载	安装检修	电动机环境
立式	较大	好	小	容易	好
斜式	较小	不好	较大	较难	较好
卧式	较小	不好	大	较难	较差
(贯流式)	最小	较差	大	困难	最差

斜式和卧式机组因空间布置需要，采用体积小的高速同步电动机、齿轮箱变速间接传动，叶片调节机构设置困难，安装检修操作空间小，安装质量难以控制，结构受力条件差，电动机位置低，环境湿度大，对绝缘不利。特别是贯流泵(江苏省淮安第三抽水站采用)电动机对密封要求高，内壁结露很难解决，安装检修和运行维护困难。水泵导轴承荷载大，易偏磨，非金属轴承寿命短。可以说，国内应用的大型斜式和卧式水泵在可靠性和耐久性方面是不成功的。

采用相同叶轮，斜式和卧式水泵因流道转弯少、水力损失小，考虑到增设的齿轮变速箱传动效率 93%~96%，装置效率较立式高 2% 左右^[1]。但实际上因不便设置叶片调节机构，运行状态不能跟踪泵站扬程保持高效率，对于扬程变化频繁的泵站，斜式和卧式装置效率大部分时间还低于设置调节机构的立式装置。

本工程泵站机组年运行时数长，可靠性要求高，运行费用大，从这两方面考虑，斜式和卧式机组均不适合。

与斜式和卧式机组相比，采用同步电动机直联传动的立式机组安装基础和结构受力条件好，电动机体积可以较大，极数多，转速可与水泵匹配，虽然电动机造价和土建投资稍高，但可以省去变速机构，便于设置调节机构。电动机位置高，通风散热条件好，水泵周围操作空间大。站房结构与机组结构设计合理、配套，机组所有部件可从机坑吊装，电动机推力轴承、水泵导轴承、叶轮等重要易磨易损部件的拆装检修可以在对其他部件影响较小的情况下进行，减少检修费用和工作量及部件的拆装磨损。水泵导轴承荷载小，可以避免采用油润滑轴承，而采用水润滑非金属轴承，机组运行维护、工况调节和安装检修方便，具有较好的可靠性、经济性、安装性、维修性和环保性。1 台机组大修 1 次需 2~10 万元，本方案所节省的维修费用、灵活的工况调节

节省的运行费用及因设备完好率的提高而产生的经济效益和社会效益远远超过增加的工程投资。因此，立式直联机组是本工程最适宜的方案。

3.5 立式直联机组关键结构

电动机、水泵及泵站结构设计选择应相互照应，切不可因结构不合理影响受力条件、正常安装和维护检修。为方便机组安装检修，立式同步电动机宜设置顶车和液压减载装置，减小安装工作量和盘车力矩。为防止通风时空气中灰尘与油槽内润滑油产生的油蒸气混合，吸附在定子铁心和线圈上形成厚厚的油垢而影响散热和绝缘，延长大修周期，电动机应采用封闭风道空气冷却器通风方式^[12]。

电动机推力轴承设计荷载应按水泵在最高运行扬程时的轴向水推力与转动部分的自重之和选择，安全系数 $K > 1.2$ ^[6]，轴承及油槽结构、冷却器布置合理，冷却能力足够，有利于轴承热量的对流传输。

几种立式水泵结构特点如表 2。采用半井筒式立式水泵^[13]，便于所有部件在机坑内吊装。在泵盖(弯管处)及对应的筒壁设进人孔，方便对导轴承的检修和更换。叶轮外壳做成垂直面对开式，站房水泵层泵体外四周有较大的空间，便于叶轮外壳向两侧拉开，对叶片根部漏油、叶轮和外壳气蚀等故障检修处理。

表 2 立式水泵结构对比

结构形式	耗费金属	耗费砼	导轴承数	土建施工	安装检修	使用情况 (叶轮直径 D/m)
弯管式	最多	最少	2	容易	较易	≤1.8
半井筒式	较多	较少	1	较易	容易	2.0~3.1
全井筒式	较多	较多	1	一般	较难	3.0
垮工式	最少	较多	1	最难	一般	≥2.8
箱涵式	较少	最多	1	较难	最难	2.8~3.0

(特低扬程双向)

机械叶片调节机构系统简单，维护方便，是发展方向，但要应用到本工程，需要从机构合理设计和减小所需调节力方面着手，提高可靠性。油压叶片调节需要油压装置，系统复杂，但因其可靠性好，技术成熟，在机械式可靠性没有很好解决的情况下，本工程仍可考虑选用。

导轴承是大型水泵最为关键的易磨易损部件，大泵一般只设一只导轴承(弯管式水泵除外)，位于导叶体轮毂内。油润滑轴承水封不可靠，易进水损坏。立式机组水泵导轴承荷载小，如果河水水质好，泥沙含量少，机组小，非金属轴承可以直接采用河水润滑；立式机组泵轴径向不平衡力(导轴承荷载)与叶轮直径的 2.0~2.5 次方成正比^[14]，较大的机组水泵非金属导轴承必须采用清水润滑，清水压力大于泵内压力，并保证泥沙不进入轴承。传统的清水

润滑轴承上部水箱平板橡皮与不锈钢动环密封效果差,仍有部分泥沙进入轴承,磨损轴承和轴径。采用护管式结构^[15],清水润滑轴承使用寿命可以达到 30 000 h^[16]。立式泵轴承荷载主要与电动机定转子之间的气隙不均匀度、转动部件不平衡质量力、叶轮来流方向、叶片之间的角度差值等制造、安装质量有关,对泵轴径向荷载准确预测和控制^[14],有利于提高轴承设计水平,延长使用寿命。

4 结论

南水北调东线工程投资大,影响面广,其心脏部分——泵站年运行时间长,运行费用大,上下级泵站相互影响。为提高供水保证率,节省运行维修费用,要求泵机组具有较好的可靠耐久性、工况可调和安装维修性,并保证不污染水质和环境。经过综合比较分析,应优先采用混流泵。水泵叶轮直径 $D=2.8\sim 3.1$ m,配套功率 $P=1.0\sim 3.0$ MW 较为合适。立式同步电动机与立式半井筒式水泵直联机组,便于设置叶片调节机构,电动机设置顶车和液压减载装置,采用封闭风道、空气冷却器通风方式,合理设计选择推力轴承结构,水泵采用护管式清水润滑导轴承,站房与水泵结构配合,方便轴承和叶轮检修,能够满足本工程的要求。

参 考 文 献

- 1 仇宝云.全调节泵站变角经济运行.水泵技术,1993(4): 25~28
- 2 仇宝云,黄海田,莫岳平,等.高港泵站 1-3 号机组变频调速效益分析.灌溉排水,2000(4): 56~60
- 3 黄经国.用进口导叶可调节特性的大型混流泵.见:全国泵及泵站专业委员会 2001 学术年会交流论文,扬州:2001
- 4 仇宝云,王彤俊,魏强林,等.大型泵站常见故障分析.排灌机械,1999(2): 20~24
- 5 李二平.刘老涧泵站水泵机械式叶调机构改进.排灌机械,2000,18(1): 30~31
- 6 仇宝云.泵站电动机巴氏合金推力瓦烧损分析.扬州大学学报,2000,3(1): 62~64
- 7 仇宝云,于志忠,魏强林,等.大泵机组结构功能对机组安装的影响比较.水泵技术,1998(4): 12~15
- 8 武田裕久.大型混流一轴流泵的进展.电业社机械,1997,21(1): 22~26
- 9 Osami Kitoh. Experimental study of turbulent swirling flow in straight pipe. J. Fluid Mechanics, 1991(225): 445~479
- 10 仇宝云,刘超,袁伟声.大型水泵轴向后导叶叶片出口角对出水流动性能的影响.机械工程学报,2000,

36(7): 74~77

- 11 刘超.低扬程水泵及其装置的研究与发展.江苏农学院学报,1998,19(水利专辑): 5~12
- 12 仇宝云,汤正军,黄海田,等.大型水泵机组大修与大修周期分析.水泵技术,1998(3): 40~42
- 13 仇宝云.平原圩区大型立式泵机组结构分析与选用.流体机械,2000,28(2): 14~17
- 14 仇宝云.大型立式轴流泵导轴承荷载分析计算.农业机械学报,2000,31(1): 58~61
- 15 仇宝云,魏强林,汤正军,等.护管式清水润滑轴承在大型立式水泵中的应用.农业工程学报,1999,15(3): 256~258
- 16 魏强林,黄海田,仇宝云,等.P23 酚醛塑料轴承在大型立式水泵导轴承上的应用.水泵技术,1999(2): 26~28,39

STRUCTURE SELECTION OF PUMP UNITS OF SOUTH-TO-NORTH WATER TRANSFER PROJECT IN THE EAST OF CHINA

Qiu Baoyun Huang Jiyan Yuan Shouqi
(Yangzhou University) (Jiangsu University)
Huang Haitian Lu Yizhong
(North Jiangsu Water Supply Bureau)
Feng Xusong
(Jiangsu Water Conservancy Bureau)

Abstract: In the light of characteristics of south-to-north water transfer project in the east of China, the requirements of step pump stations of the project for pump units are analyzed. According to application situation of low head large pump units and technique level now available, reliability, maintainability, circumstance protection, investment, performance cost all considered, reasonable capacity, pump type, motor type, axial type and key structures of the pump units are advanced in order to promote benefits of the project. The results are well worth referencing to plan, equipment selection and performance maintenance of the project.

Key words: Step pump stations Structures of pump units Selection

作者简介: 仇宝云,男,1962 年出生,教授,博士生。主要从事大型水泵机组及装置结构和水力特性研究与教学工作。主持国家自然科学基金项目“南水北调东线工程水泵选择研究”及省、厅级课题 5 项,参加国家自然科学基金项目 1 项,获江苏省科技进步二、三等奖 3 项,厅市级奖 8 项,发表论文 60 多篇。