

一种凉水塔风机半自动防反转机构的研制与应用

胡关华 周乐海 陈平

云南水富云天化有限公司装备运维中心, 中国·云南 水富 657800

摘要: 针对云南水富云天化有限公司合成氨装置凉水塔改造后风机停机反转的问题, 研制了一种基于机械齿挂钩控制的半自动防反转机构。该机构通过外啮合式棘轮机构、齿式棘轮组织、三角形齿单向驱动及分体式止逆棘爪的协同作用, 结合 316 不锈钢耐蚀材质与高精度加工工艺, 实现风机反转的快速制动与正转时的自动分离。实验验证表明, 该机构制动标偏平均为 0.83, 加工精度误差 $\leq 0.05\text{mm}$, 制动成功率 100%。现场应用 6 个月内, 凉水塔风机开停机进入风筒操作次数从 20 次降至 0 次, 消除了人员安全风险, 避免经济损失 36.46 万元, 且具有广泛的同类型设备推广价值。

关键词: 凉水塔风机; 逆转控制; 棘轮机构

Development and Application of a Semi-Automatic Anti-Reverse Mechanism for Cooling Tower Fans

Hu Guanhua, Zhou Lehai, Chen Ping

Yunnan Shuifu Yuntianhua Co., Ltd., Equipment Operation & Maintenance Center, China Yunnan Shuifu 657800

Abstract: To address the problem of fan reverse rotation after shutdown following the cooling tower retrofit of the ammonia synthesis unit at Yunnan Shuifu Yuntianhua Co., Ltd., a semi-automatic anti-reverse mechanism based on a mechanical gear hook control was developed. This mechanism, through the collaborative action of an external meshing ratchet mechanism, a toothed ratchet arrangement, triangular tooth unidirectional drive, and a split-type anti-reverse pawl, combined with corrosion-resistant 316 stainless steel material and high-precision manufacturing processes, achieves rapid braking during fan reverse rotation and automatic disengagement during forward rotation. Experimental results show that the mechanism has an average braking deviation of 0.83, machining accuracy error $\leq 0.05\text{ mm}$, and a 100% braking success rate. During six months of on-site application, the number of operations of starting and stopping the cooling tower fans into the wind duct decreased from 20 times to 0, eliminating personnel safety risks, preventing economic losses of 364,600 CNY, and demonstrating broad promotion value for similar equipment.

Keywords: Cooling tower fan; Reverse rotation control; Ratchet mechanism

0 引言

凉水塔作为工业循环水系统的核心降温设备, 其运行稳定性直接影响生产装置的长周期安全运行。云南水富云天化有限公司(以下简称“云天化”)2024 年对合成氨装置凉水塔进行升级改造, 将 1977 年投用的美国马利 600 型木结构横流凉水塔, 更换为上海庭亚 TAIFX-3200 \times 5 型钢结构凉水塔。改造后因填料箱结构优化, 进水方式由“上进水”调整为“中部进水”, 导致风机停机后塔内底部气压失衡, 气流扰动引发风机叶片反向旋转, 实测反转转速最高达 220rpm。

为解决风机反转问题, 改造初期采用“人工制动+绳

索固定”方案: 风机停机后, 维修人员需进入直径超 4m 的风筒内, 用绳索将叶片拴固于护栏; 启动前需 3 人协同操作(1 人入筒解绳、1 人传递信号、1 人启动电机)。该方案存在显著安全隐患: 通过技术查新(联络上海尔华杰机电装备制造有限公司及检索科技创新项目数据库)发现, 国内尚无针对该类型凉水塔风机的专用逆转控制装置, 现有防止电机逆转的技术(如齿轮减速机防逆转结构、滚珠式单向离合装置)因结构复杂、耐湿腐蚀性差等问题, 无法适配凉水塔高湿、多粉尘的工况。基于此, 作者 QC 小组以“消除安全风险、提升设备可靠性”为目标, 开展凉水塔风机逆转控制器的研制工作, 最终开发出一种结构简

单、安全可靠的半自动防反转机构。

1 相关技术基础

1.1 凉水塔工作原理

凉水塔通过“空气-水逆流换热”实现循环水降温：干燥冷空气由塔顶风机引入，与塔内自上而下喷洒的循环水形成对流；部分循环水蒸发吸热，将热量随气流排出系统，剩余水经填料层收集后返回循环系统，实现水资源循环利用。改造后的上海庭亚 TAI FX-3200×5 型凉水塔核心参数为：塔体高度 8m，风筒直径 4.2m，风机电机功率 55kW，设计循环水流量 1500m³/h，出水温度控制≤ 32℃。

1.2 风机反转相关概念

1.2.1 反转危害

风机反转时，不仅叶轮与风筒内壁易发生摩擦，导致叶片变形、风筒磨损，且反转转速（220rpm）显著低于正常运行转速（1450rpm），使得飞溅润滑式轴承箱无法有效输送润滑油，极易引发轴承缺油烧毁；同时，反转状态下启动电机需额外克服反向力矩，启动力矩会增加 30%~50%，若多次启动则可能导致电机烧毁，所以在反转时启动就只能借助木条等工具与裸露在外的联轴节接筒摩擦，强制制动，摩擦会造成玻璃纤维材质的联轴节接筒表面磨损、产生异常异响，严重时甚至引发联轴器变形，对风机传动系统稳定性构成直接威胁。

1.2.2 现有技术不足

早期采用的第一种方法是在反转需启动电机时，通过人力用木条等工具与玻璃纤维材质的联轴器接筒摩擦，但此方法不仅易损坏联轴器接筒，且整体制动效果不佳；后续改进的方法是在风机停止的一瞬间维修人员进入风筒内，用绳子将叶片拴在护栏上，该方法虽避免了木条对联轴器接筒的损坏，但仍存在操作时效性强、安全性低的不足。除此之外，其他现有技术还存在明显短板：部分技术通过木条与叶轮摩擦减速，却需 5~8min 才能使风机停转，制动效率极低；依赖滚珠与滑槽配合实现单向传动的技术，在凉水塔高湿环境下易出现滚珠锈蚀卡涩问题，导致制动成功率降至 85% 以下；还有部分技术因结构复杂，需定期更换液压油，不仅维护成本高，且难以适应凉水塔户外露天的安装与运行环境。

2 半自动防反转机构的设计

2.1 总体方案选型

基于“技术可行性、工况适配性、成本经济性”原则，提出两种总体方案并进行对比（表 1），最终选择机械齿挂钩控制系统作为核心方案。

表1总体方案对比分析

方案类型	核心技术	工况适应性	制动成功率
机械齿挂钩控制系统	外啮合式棘轮机构+分体式止逆棘爪	耐高湿、抗粉尘，不受环境温度影响（-10~60℃）	99.99%
抱刹轮毂摩擦控制系统	外内抱刹轮毂+弹簧调节机构	高湿环境下摩擦系数下降15%~20%，制动稳定性差	99.99%

2.2 核心机构组成与参数设计

2.2.1 机构整体结构

半自动防反转机构由防转轮、外啮合式棘轮机构、支撑组件、保险杆、弹簧、转轴架 6 部分组成（图 1）：

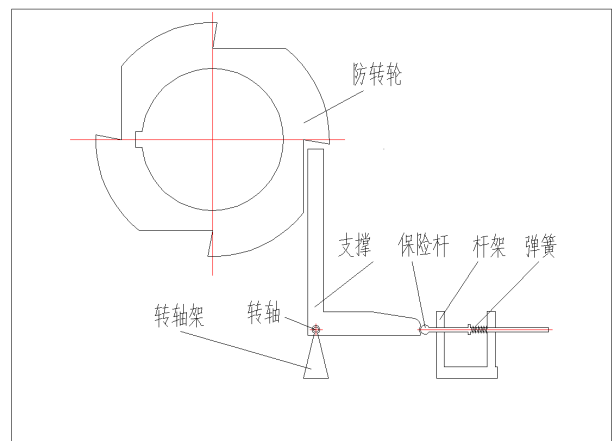


图1 半自动防转机构图

防转轮：安装于风机联轴节端轴上（键连接），直径 300mm，齿数 4，齿形为三角形（自锁角 15°）；

外啮合式棘轮机构：包括棘轮（材质 316 不锈钢）和棘爪（材质 40Cr，表面淬火硬度 HRC55~60），实现单向制动；

支撑组件：由竖臂（长度 400mm）和横臂（长度 200mm）组成，材质 45# 钢（厚度 15mm），焊接于转轴架上；

保险杆：直径 20mm，配备弹簧（刚度系数 5N/mm），实现棘爪与棘轮的自动分离与锁定。

2.2.2 关键参数设计

棘轮机构参数：基于风机实测反转扭矩（180N·m）设计。棘轮采用 4 个驱动齿，分度圆直径 $d=mz$ （模数 $m=5\text{mm}$ ，齿数 $z=4$ ），故 $d=20\text{mm}$ ；齿顶高 $h_a=m=5\text{mm}$ ，齿根高 $h_p=1.25m=6.25\text{mm}$ ，全齿高 $h=2.25m=11.25\text{mm}$ ^[9]。

制动功能定位：本机构用于防止风机反转，而非制动停机。当风机发生反转时立即触发，棘爪迅速切入棘轮，实现机械互锁，限制反转运动。

切入条件控制：切入动作的触发逻辑与可靠性通过模拟实验充分验证，具体控制要求如下：切入触发场景设

定为风机正传即将停止阶段，当风机转速降至 30rpm 以下时，启动切入准备程序；一旦风机出现反转趋势，棘爪会在弹簧弹力的主动驱动下，自动嵌入棘轮（防转轮）齿槽内，从而直接阻断风机反转，实现防反转功能。同时，为避免机械结构因载荷冲击受损，将整个切入过程中的冲击载荷严格控制在 120kg 以内，确保各部件运行安全性与耐久性。

材质选择：

防转轮、棘爪：采用 316 不锈钢（含钼 2%~3%），耐酸碱盐腐蚀（在 1mol/L 硫酸、盐酸中腐蚀率 $\leq 0.003\text{mg}/(\text{dm}^2 \cdot \text{d})$ ）；

支架、转轴架：选用 45# 钢（厚度 15mm），焊接固定于钢梁上，要求径向 / 轴向承受 15kg 力时无晃动；

弹簧：采用 60Si2Mn 钢，疲劳寿命 $\geq 10^4$ 次，适应凉水塔温度波动环境。

2.3 工作原理

2.3.1 防反转制动过程

当风机停机后开始反转，待转速降至 0~30rpm 时，操作人员拉动保险杆（向右位移 15mm），使支撑竖臂靠近防转轮，棘爪切入棘轮齿槽；由于棘轮齿形为三角形（自锁角 15° ），棘爪与棘轮啮合后限制防转轮继续反转，风机在 3~5s 内停转，实现制动。

2.3.2 正转自动分离过程

风机启动时，防转轮随电机正转，其齿面推动棘爪带动支撑竖臂向右旋转（旋转角度 $\leq 30^\circ$ ）；支撑横臂向下位移，保险杆在弹簧力作用下（弹力 15N）自动复位，圆头端进入横臂斜面，进一步推动支撑竖臂远离防转轮（安全距离 $\geq 50\text{mm}$ ）；同时，保险杆限制支撑竖臂向左旋转，

避免其重新靠近转轴，确保风机正常运行。

3 实验验证与实施过程

3.1 模拟实验验证

3.1.1 机械齿制动性能测试

为确保测试符合实际工况且避免部件损坏（若直接模拟 220rpm 高转速反转，棘爪插入棘轮瞬间会因冲击力过大导致报废），本次测试针对风机反转初始阶段的低转速场景设计，具体方案如下：在钳工平台搭建模拟实验台，通过皮带联动转轴模拟风机反转过程，且将反转转速设定为接近实际反转初始阶段的低转速 28rpm（该转速既符合棘爪正常切入的安全转速范围，又能真实反映制动标偏情况）；随后安装棘轮机构与支撑组件，重点测试棘爪切入棘轮时的位置偏差（制动标偏），测试结果如表 2 所示。

3.1.2 材质抗腐蚀测试

对 316 不锈钢零件进行腐蚀实验：分别浸泡于 13.4mol/L 氨水、1mol/L 硫酸、1mol/L 盐酸、4mol/L 氯化钠溶液中，测试 24h 后的腐蚀率，结果如表 3 所示。

结果表明 316 不锈钢在凉水塔典型腐蚀介质中腐蚀率 $\leq 0.003\text{mg}/(\text{dm}^2 \cdot \text{d})$ ，满足抗腐蚀要求（目标值 $\leq 0.05\text{mg}/(\text{dm}^2 \cdot \text{d})$ ）。

3.2 现场实施过程

技术方案审批：2024 年 6 月编制《凉水塔风机逆转控制技术改进报告》，明确安装位置（电机端半联轴器后 70mm 空隙）、材质参数与施工流程，获公司技术部审批通过；

零部件加工：委托专业厂家加工棘轮、棘爪等零件，用游标卡尺与千分尺检测加工精度，10 次测试误差均 $\leq 0.05\text{mm}$ （表 4）；

表2 机械齿制动标偏测试结果 (n=9)

测试序号	反转转速 (rpm)	制动标偏 (mm)	测试序号	反转转速 (rpm)	制动标偏 (mm)
1	28	0.04	6	28	0.03
2	28	0.02	7	28	0.05
3	28	0.04	8	28	0.04
4	28	0.03	9	28	0.03
5	28	0.02	平均值	-	0.034

表3 316不锈钢腐蚀率测试结果 (n=16)

腐蚀介质	零件外径腐蚀率 (mg/(dm ² ·d))	零件内孔腐蚀率 (mg/(dm ² ·d))
13.4mol/L氨水	0.002~0.003	0.001
1mol/L硫酸	0.001~0.002	0.001
1mol/L盐酸	0.001~0.002	0.001
4mol/L氯化钠	0.002~0.003	0.001

表4 零部件加工精度测试结果 (单位: mm)

测试序号	介入前状态	介入结果 (是否成功防止反转)	测试序号	介入前状态	介入结果 (是否成功防止反转)
1	即将反转 (0 rpm)	是	6	即将反转 (0 rpm)	是
2	即将反转 (0 rpm)	是	7	即将反转 (0 rpm)	是
3	即将反转 (0 rpm)	是	8	即将反转 (0 rpm)	是
4	即将反转 (0 rpm)	是	总计	8次测试	成功率: 100%
5	即将反转 (0 rpm)	是			

表5 支架稳固性测试结果 (单位: mm)

测试序号	径向晃动	轴向晃动	测试序号	径向晃动	轴向晃动
1	0	0	5	0	0
2	0	0	6	0	0
3	0	0	7	0	0
4	0	0	8	0	0

表6 制动成功率测试结果

测试序号	介入转速 (rpm)	介入成功率	测试序号	介入转速 (rpm)	介入成功率
1	0	100%	5	0	100%
2	0	100%	6	0	100%
3	0	100%	7	0	100%
4	0	100%	8	0	100%

表7 挂钩时间测试结果

测试序号	介入转速 (rpm)	挂钩时间 (s)	测试序号	介入转速 (rpm)	挂钩时间 (s)
1	0	2.5	6	0	2.8
2	0	2.3	7	0	2.6
3	0	2.7	8	0	2.4
4	0	2.9	9	0	2.5
5	0	2.6	10	0	2.7
平均值	-	2.6			

支架安装: 将 45# 钢支架焊接于凉水塔风机平台钢梁上, 径向 / 轴向施加 15kg 力测试, 8 次测试均无晃动 (表 5);

机构组装与调试: 2024 年 7 月完成 5 台风机的防反转机构安装, 测试制动成功率与挂钩时间 (表 6、表 7)。

4 结语

研制的半自动防反转机构通过“外啮合式棘轮机构 + 三角形齿自锁”设计, 实现了风机反转的快速制动 (3~5s 停转) 与正转自动分离, 制动成功率 100%, 挂钩时间 ≤ 30s, 满足凉水塔高湿、多粉尘工况需求; 材质选择 316 不锈钢与 45# 钢, 加工精度误差 ≤ 0.05mm, 确保机构耐腐蚀性与结构稳定性, 6 个月现场应用无故障; 机构彻底消除人员入筒作业风险, 开停机进入风筒次数从 20 次降至 0 次, 避免经济损失超 36.46 万元, 具有显著的安全与经济

效益。

参考文献:

- [1] 于波, 王如振, 赵建宁. 新型磁阻电机在凉水塔风机中的应用[C]// 第七届全国石油和化工电气设计与应用论文大赛入选论文集, 2024.
- [2] 王晓兵, 马鸿武, 张永举等. 某厂凉水塔风机频繁烧毁的原因分析及对策[J]. 中国设备工程, 2024(8):18-20.
- [3] 闫伟阳. 卧式空冷永磁调速器在冷却塔风机上的应用分析[J]. 装备制造技术, 2024(8):129-131.
- [4] 白庭河, 达宇博. 大型循环水凉水塔内部空气流场数值模拟及优化研究[J]. 化工机械, 2024, 51(4):533-538.
- [5] 吴仙, 陈丰巍, 曹令臣等. 提升三循凉水塔冷却性能的方法与测试[J]. 化学工程与装备, 2023(7):178-180.
- [6] 于波, 王如振, 赵建宁. 新型磁阻电机在凉水塔风

机中的应用[C]// 第八届全国石油和化工电气技术大会 .东营市海科瑞林化工有限公司, 2024.

叙永县人, 大专、研究方向: 研究关键机械部件的故障智能诊断与剩余寿命预测模型。

作者简介: 胡关华 (1986.05-), 男, 汉族, 四川省