

设计经验

DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.16.007

生物转盘最小转速和电机功率计算公式合理性探究

赵庆良^{1,2}, 吕佳琦², 李洋³, 王美玲⁴, 董志华⁵

(1. 城市水资源与水环境国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150090; 2. 哈尔滨工业大学环境学院, 黑龙江 哈尔滨 150090; 3. 中国市政工程中南设计研究总院有限公司, 湖北 武汉 430010; 4. 中国建筑出版传媒有限公司, 北京 100037; 5. 唐山市自来水公司, 河北 唐山 063000)

摘要: 生物转盘是污水生物处理中既古老又具有突出优点的工艺之一,在对其进行设计及实际运行时,常用的两个重要参数就是转盘最小转速和电机功率。然而,现行的《给水排水设计手册》(第5册,第三版)、《全国勘察设计注册公用设备工程师给水排水专业执业资格考试教材》(2020年版)、《排水工程》(下册,第五版)等较重要书籍中,转盘最小转速和电机功率的计算公式存在差异,读者一时很难判断出哪个计算公式是合理的表达形式,从而给教学、科研和设计等带来困惑。针对这一问题,通过查阅历史文献资料并对公式进行重新推演,确定了转盘最小转速和电机功率的正确计算公式。

关键词: 生物转盘; 最小转速; 电机功率; 计算公式

中图分类号: TU992.3 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2022)16-0047-05

Research on Rationality of Formulas for Minimum Speed and Motor Power Calculation of Rotating Biological Contactor

ZHAO Qing-liang^{1,2}, LÜ Jia-qi², LI Yang³, WANG Mei-ling⁴, DONG Zhi-hua⁵

(1. State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment, Harbin 150090, China; 2. School of Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 3. Central & Southern China Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Wuhan 430010, China; 4. China Architecture Publishing & Media Co. Ltd., Beijing 100037, China; 5. Tangshan Water Supply Company, Tangshan 063000, China)

Abstract: Rotating Biological Contactor (RBC) is one of the ancient and outstanding technologies in biological wastewater treatment. In its design and practical operation, the two important parameters commonly used are the minimum speed of the contactor and the motor power. However, the formulas for minimum speed and motor power calculation are quite different specified in the current *Water Supply and Drainage Design Manual* (Vol. 5, 3rd Ed.), *Water Supply and Drainage Professional Qualification Examination Textbook for the National Survey and Design Registered Public Equipment Engineers* (2020), *Wastewater Engineering* (Vol. II, 5th Ed.) and other important books, which makes it difficult for readers to judge which calculation formula is a reasonable expression, thus causing confusion in teaching, scientific research and design. To solve this problem, the correct formula for calculating the minimum speed and the motor power of RBC was determined by consulting the historical documents and deducing the formula again.

Key words: RBC; minimum speed; motor power; calculation formula

生物转盘(Rotating Biological Contactor, RBC)是一种生物膜法污水处理技术,它利用转盘上微生物的新陈代谢活动实现有机污染物的去除。生物转盘工艺概念最早诞生于德国,如今已得到较好的发展与应用。与活性污泥法相比,生物转盘具有运行时动力消耗和费用低、处理效率高、性能稳定、适应性强和运行管理简便等多种优点^[1],可作为污水二级处理工艺或与其他工艺联合使用。近年来,该工艺在小型城镇污水处理厂和农村污水治理中使用较多^[2],如张尊举等^[3]通过改进完善一款以农村家庭为处理单元的一体式污水处理装置——填料生物转盘,为实现农村家庭污水分散处理提供了技术参考;韦真周等^[4]也采用生物转盘工艺处理小城镇生活污水。

为了使生物转盘能够稳定运行并有效去除污水中的有机污染物,需要明确合理的设计参数,如转盘总面积、转盘盘片总数、转盘转速、电机功率、污水停留时间等。由于生物转盘的突出优点之一是动力费用较低,所以合理确定生物转盘所需电机功率(耗电量)是十分必要的。此外,转速是保证生物转盘运行良好的另一重要参数。转速过低时,污水达不到完全混合,传质效果不佳,生物膜与污水接触不充分,供氧能力不足;转速过高不仅耗电量,而且产生较大剪切力易使生物膜脱落,进而使处理效率变差,因此转盘最小转速应处于合理范围。

近日,有读者向中国建筑工业出版社编辑反映:该社出版的《给水排水设计手册》(第5册,第三版)、《全国勘察设计注册公用设备工程师给水排水专业执业资格考试教材》(2020年版)、《排水工程》(下册,第五版)中有关生物转盘最小转速和电机功率的计算公式表达存在相互不一致的问题,为此,出版社编辑与笔者进行沟通,需要对这些公式进行重新推演,旨在评判并统一相关公式的正确表达形式。综合考虑生物转盘的内容在教学、设计以及稳定运行等方面所具有的重要性,笔者对最小转速和电机功率这两个公式的正确表达形式及有关参数进行了探究,以确定这两个公式的正确表达形式。

1 现行计算公式

1.1 最小转速的现行计算公式

《给水排水设计手册》(第5册,第三版)中最小转速的表达如下:

$$n_0 = \frac{6.37F}{D} \left(0.9 - \frac{W'}{Q_1} \right) \quad (1)$$

式中: n_0 为转盘转速, r/min; F 为转盘总面积, m^2 ; D 为盘片直径, m; W' 为每个氧化槽的净有效容积, m^3 ; Q_1 为每个氧化槽的污水量, m^3/d 。

《全国勘察设计注册公用设备工程师给水排水专业执业资格考试教材》(2020年版)中最小转速的表达如下:

$$n_0 = \frac{6.37}{D} \times \left(0.9 - \frac{V'}{Q'} \right) \quad (2)$$

式中: V' 为每个接触反应槽净有效容积, m^3 ; Q' 为每个接触反应槽污水流量, m^3/d 。

《排水工程》(下册,第五版)中最小转速的表达如下:

$$n'_{\min} = \frac{6.37}{D} \times \left(0.9 - \frac{1}{N_q} \right) \quad (3)$$

式中: n'_{\min} 为转盘转速, r/min; N_q 为水力面积负荷, $m^3/(m^2 \cdot d)$ 。

由式(1)~(3)所表达的实质可以看出:式(1)比式(2)多了一个参数 F ,式(2)和式(3)的差异性在于采用了不同含义的“负荷率”(Q'/V' 或 N_q)。

1.2 电机功率的现行计算公式

《给水排水设计手册》(第5册,第三版)中电机功率的表达如下:

$$N_p = \frac{3.85R^4 n_0^2}{b \times 10^{12}} m_1 \alpha \beta \quad (4)$$

式中: N_p 为电动机功率, kW; R 为转盘半径, cm; m_1 为一根转动轴上的转盘数, 片; α 为同一电动机带动转动轴数; β 为生物膜厚度系数; b 为盘片间距, cm。

《全国勘察设计注册公用设备工程师给水排水专业执业资格考试教材》(2020年版)中电机功率的表达如下:

$$N_p = \frac{3.85R^4 n_0}{10d} m_1 \alpha \beta \quad (5)$$

式中: d 为盘片间距, cm。

《排水工程》(下册,第五版)中电机功率的表达如下:

$$N_p = \frac{3.85R^4 n'_{\min}}{d \times 10} m \alpha \beta \quad (6)$$

式中: m 为一根转动轴上的转盘数,片。

由式(4)~(6)所表达的实质可以看出:式(4)分子项采用的是最小转速 n 的平方(n_0^2),分母项采用的是 10^{12} ;而式(5)和式(6),却分别采用的是最小转速 n (n_0 或 n'_{\min})和 10 。

2 生物转盘最小转速计算公式的探讨

按照《排水工程》(下册,第四版)所述,生物转盘是20世纪60年代原联邦德国所开创的一种污水生物处理技术。原联邦德国斯图加特大学勃别尔(Pöpel)和哈特曼(Hartman)对生物转盘技术的实用化进行了大量的试验研究和理论探讨工作,并于1964年发表了题为《生物转盘的设计、计算与性能》的论文^[5],就此奠定了生物转盘技术发展的基础。

笔者通过查找原德文文献,获悉了生物转盘最小转速计算公式的推导步骤和方法。勃别尔(Pöpel)在开展生物转盘的有关实验研究中,通过改变流量和转速得到多组实验数据。通过对流量 q (m^3/h)、空间负荷 R_h [$m^3/(m^3 \cdot h)$]、转速 n (r/min)和线速度 V_R (m/min)等多组数据进行分析,得出 $(18-V_R)$ 与 R_h 之间的函数关系为:

$$18 - V_R = \frac{20}{R_h} \quad (7)$$

进而得出 V_R 的表达式为:

$$V_R = 20 \left(0.9 - \frac{1}{R_h} \right) \quad (8)$$

根据线速度 V_R 与转速 n 之间的关系:

$$V_R = n \pi D \quad (9)$$

最后得出转盘最小转速的表达式为:

$$n_{\min} = \frac{6.37}{D} \left(0.9 - \frac{1}{R_h} \right) \quad (10)$$

式中: n_{\min} 为转盘最小转速, r/min ; R_h 为空间负荷, $m^3/(m^3 \cdot h)$ 。

同年,勃别尔(Pöpel)公开的另一篇文献^[6]中也提到生物转盘最小转速的计算公式,其表达形式为:

$$n = \frac{6.37}{D} \left(0.9 - \frac{J_n}{Q_z} \right) \quad (11)$$

式中: n 为转盘最小转速, r/min ; J_n 为接触槽净

体积, m^3 ; Q_z 为污水流量, m^3/h 。

薛文源^[7]在《生物转盘接触法的设计计算》中提到的最小转速的表达式为:

$$n = \frac{6.37}{D} \left(0.9 - \frac{V}{g} \right) \quad (12)$$

式中: V 为氧化槽体积, m^3 ; g 为污水量, m^3/d 。

值得注意的是,式(10)、(11)和(12)中给出的 R_h 、 Q_z 和 g 为与污水流量相关的物理量,其单位(量纲)并不同。事实上,上述各式所涉及的 $1/R_h$ 、 J_n/Q_z 和 V/g 等项,其实质就是污水在接触氧化槽内的水力停留时间(HRT)。根据式(12),若满足 $n>0$,则HRT在数值上需小于0.9。若HRT的单位为h,即污水中有机物在生物转盘接触槽内发生生物氧化的时间小于0.9h,显然在如此短的时间内获得预期的处理效果是不现实的。因此,判定有关污水流量的单位采用 m^3/d 应该是正确的(事实上,在文献^[6]的第403页中,Pöpel又指出了 Q_z 为每日污水流量, m^3/d)。

根据式(10)、(11)和(12)的来源及公式表达的科学性与简洁性,笔者给出生物转盘最小转速的计算公式形式如下:

$$n_{\min} = \frac{6.37}{D} \left(0.9 - \frac{1}{N_h} \right) \quad (13)$$

式中: N_h 为生物转盘的水力负荷率(单位接触氧化槽在一日内所能承受并使转盘达到预期处理效果的污水量), $m^3/(m^3 \cdot d)$ 。

根据式(13)对式(1)、(2)、(3)进行判定。式(1)与式(13)相比多乘以了 F (盘片总面积)这一参数,应该删除[《给水排水设计手册》(第5册,第三版)的例【7-2】的计算也证实了这一点,并且《给水排水设计手册》(第5册,第二版)中该计算公式也无 F 项];式(2)与式(13)含义相同,是其另一种表达方法,建议统一为同一种表述形式;式(3)对 N_q 的定义存在问题,应修改为 N_h 。

3 生物转盘电机功率计算公式的探讨

通过查阅文献得知,最早由马倩如^[8]在《生物转盘耗电量计算》一文中推导出相对准确的电机功率计算公式。作者以轴功率与扭矩的关系为基础,通过每一盘片上产生的扭矩得出总扭矩的表达式,进而得出生物转盘功率计算公式。

扭矩 M_n 与轴功率 $N_{\text{轴}}$ 的关系为:

$$M_n = 97\,500 \frac{N_{\text{轴}}}{n} \quad (14)$$

式中: M_n 为扭矩, $\text{kg}\cdot\text{cm}$; n 为转速, r/min ; $N_{\text{轴}}$ 为轴功率, kW 。

生物转盘的总扭矩^[8]包括启动时产生加速度的惯性矩 M_1 、设备摩擦力产生的扭矩 M_2 和转盘与水剪切力产生的扭矩 M_3 。故总扭矩 M_n 的表达式为(一般不考虑启动时的 M_1):

$$M_n = M_1 + M_2 + M_3 \\ = 0 + (P_1 + P_2)r'3\% + \frac{6}{10^8b}nR^4Nac \quad (15)$$

式中: P_1 与 P_2 分别为轴承的内、外负荷, N ; r' 为转轴半径, cm ; 3% 为摩擦系数; N 为一根轴上转盘片数; a 为带动轴数, 根; c 为根据膜厚确定的系数, 分别为2(膜厚0~1 mm)、3(膜厚1~2 mm)和4(膜厚2~3 mm)。

若综合考虑电机效率的影响, 计算的轴功率 $N_{\text{计}}$ 与扭矩 M_n 的关系如下:

$$N_{\text{计}} = \frac{nM_n}{97\,500} \times \frac{1}{\eta_{\text{总}}} \quad (16)$$

式(16)中总效率 $\eta_{\text{总}}$ 包括转盘轴承效率(为0.98)、链条传动效率(为0.90)和减速器效率(为0.90)(按三级减速器计, 即有三轴、六个齿轮)。总效率按一台电机带两组、每组按二轴计, 得到 $\eta_{\text{总}}$ 为0.4。

$$\eta_{\text{总}} = \eta_1^8 \eta_2^4 \eta_3^3 = 0.4 \quad (17)$$

不同工厂组装虽然有差别, 但大致相同, 所以 $\eta_{\text{总}}$ 统一采用0.4。

根据式(16)对当时运行的10座采用生物转盘的废水处理厂的电机功率进行计算, 并与实测的电机功率进行比较, 发现误差均在30%以内。若从安全角度考虑, 式(16)需再乘以1.5作为最终的轴功率。进而, 在一台电机带动盘片不过多($N < 200$ 片)、转轴不粗($r' < 5\text{ cm}$)的情况下, 式(15)中的前项亦可忽略, 则推导出生物转盘电机功率 $N_{\text{电}}$ (kW)为^[8]:

$$N_{\text{电}} = \frac{nM_n}{97\,500} \times \frac{1}{\eta_{\text{总}}} \times 1.5 \\ = \frac{3.85R^4n^2Nac}{10^{10}b} \quad (18)$$

然而马倩如^[8]给出的式(18)尚存在两个问题: 一是式中的3.85只有在使用“安全系数”为2.5的情况下才能正确, 再根据马倩如^[8]在其文中表3实例计算中采用的系数也是2.5, 笔者认为式(18)中

的1.5应是笔误, 实际应是2.5; 二是式(18)中分母的计算值表达有误, 应将 10^{10} 更换为 10^{12} 。据此对式(18)进行重新推导计算, 得出生物转盘电机功率的计算公式为:

$$N_{\text{电}} = \frac{nM_n}{97\,500} \times \frac{1}{\eta_{\text{总}}} \times 2.5 \\ = \frac{n}{97\,500} \times \frac{6nR^4Nac}{10^8b} \times \frac{1}{0.4} \times 2.5 \quad (19) \\ = \frac{3.85R^4n^2Nac}{10^{12}b}$$

式(19)是基于平板式光滑材质的盘片总结出来的, 适用于一台电机带动盘片少于200片、转轴半径 $< 5\text{ cm}$ 的情形。超出公式使用条件时(如非平板结构的盘片结构), 可按《环境工程手册 水污染防治卷》^[9]确定, 机械驱动能耗约为 $0.5 \sim 0.8\text{ W/m}^2$ 。在技术上, 驱动装置需满足转盘盘体外缘线速度 $15 \sim 19\text{ m/min}$ [《室外排水设计标准》(GB 50014—2021)], 也可参考厂家样本。

根据式(19), 分别对式(4)、(5)和(6)进行判定: 式(5)和(6)中的有关最小转速(n_0 或 n'_{min})一项, 应表达成其平方形式, 即统一成 n^2 ; 式(5)和式(6)中分母项的10, 则应更改为 10^{12} 。

4 结语

针对现行重要参考文献中转盘最小转速和电机功率的计算公式存在差异的问题, 通过查阅历史文献资料并对公式进行重新推演, 确定了转盘最小转速和电机功率的正确的计算公式分别为式(13)和式(19), 可供教学、科研和设计专业人员参考。

参考文献:

- [1] 高浚淇, 郭家骅. 生物转盘法与生物滤池法的比较论述[J]. 科协论坛, 2010(9): 105-106.
GAO Junqi, GUO Jiahua. Comparison of rotating biological contactor and biological filter[J]. Science & Technology Association Forum, 2010(9): 105-106 (in Chinese).
- [2] 李菊, 胡颖铭, 彭子宸, 等. 四川省农村地区生活污水处理现状调研分析[J]. 四川环境, 2020, 39(5): 164-169.
LI Ju, HU Yingming, PENG Zichen, et al. Investigation and research of the current situation of rural domestic sewage treatment in Sichuan Province[J]. Sichuan Environment, 2020, 39(5): 164-169 (in Chinese).

- Chinese).
- [3] 张尊举,董亚荣,王滕,等. 填料生物转盘对农村家庭生活污水的处理[J]. 水处理技术, 2020, 46(2): 120-123.
- ZHANG Zunju, DONG Yarong, WANG Meng, *et al.* Treatment of rural domestic sewage by packing rotating biological contactor [J]. Technology of Water Treatment, 2020, 46(2): 120-123(in Chinese).
- [4] 韦真周,范庆丰,容继,等. 生物转盘处理小城镇生活污水工程实例[J]. 水处理技术, 2016, 42(2): 133-136.
- WEI Zhenzhou, FAN Qingfeng, RONG Ji, *et al.* A case history of treating urban sewage by rotating biological contactor[J]. Technology of Water Treatment, 2016, 42(2): 133-136(in Chinese).
- [5] PÖPEL F. Leistung, Berechnung und Gestaltung von Tauchtropfkörperanlagen, Forschungs- und Entwicklungsinstitut für Industrie- von Siedlungswasserwirtschaft sowie Abfallwirtschaft e. V. in Stuttgart [M]. München: Kommissionsverlag R. Oldenburg, 1964.
- [6] PÖPEL F. Aufbau, abbauleistung und bemessung von tauchtropfkörpern [J]. Schweizerische Zeitschrift für Hydrologie, 1964, 26: 394-407.
- [7] 薛文源. 生物转盘接触法的设计计算[J]. 工业用水与废水, 1979(4): 1-27, 29-30.
- XUE Wenyan. Design and calculation of rotating biological contactor[J]. Industrial Water & Wastewater, 1979(4): 1-27, 29-30(in Chinese).
- [8] 马倩如. 生物转盘耗电量计算[J]. 建筑技术通讯(给水排水), 1980(1): 23-25.
- MA Qianru. Energy consumption calculation of rotating biological contactor [J]. Water & Wastewater Engineering, 1980(1): 23-25(in Chinese).
- [9] 张自杰. 环境工程手册 水污染防治卷[M]. 北京: 高等教育出版社, 1996.
- ZHANG Zijie. Environmental Engineering Manual-Water Pollution Control [M]. Beijing: Higher Education Press, 1996(in Chinese).
-
- 作者简介:**赵庆良(1962-),男,辽宁朝阳人,博士,教授,副院长,主要研究方向为废水处理与资源化、污泥处理处置与资源化、微生物燃料电池等,主持完成国家级课题6项,发表学术论文300余篇,出版教材/著作6部,获得省部级科技奖励5项、2004年度黑龙江省杰出青年科学基金资助,曾获2010年全国优秀博士学位论文提名奖指导教师、2012年度第三届黑龙江省优秀研究生导师等荣誉。
- E-mail:** qlzhao@hit.edu.cn
- 收稿日期:** 2021-06-29
- 修回日期:** 2021-07-15

(编辑:孔红春)

**积极践行人与自然和谐共生理念
全面加强水生态文明建设**