

文章编号:1006-7329(2003)05-0069-06

城市污水生物除磷脱氮系统剩余污泥量的计算

许 劲¹, 罗 平², 孙俊贻³

(1.重庆大学 城市建设与环境工程学院,重庆 400045; 2.重庆大学 化学化工学院,重庆 400044; 3.重庆大学 土木工程学院,重庆 400045)

摘要:剩余污泥量的计算是活性污泥法工艺设计的关键,而活性污泥法是同时生物除磷脱氮的主体工艺形式,因此,准确计算生物除磷脱氮系统的剩余污泥量十分必要。结合昆明市污水处理厂的运行实际,分析比较了传统算法、污泥龄法和数学模型法在计算城市污水生物除磷脱氮系统剩余污泥量时的准确性,建议现阶段采用污泥龄法进行计算,提出修正系数 $K(0.75 \sim 1)$ 与具体工艺形式有关,并给出 K 的几个建议值,同时指出数学模型法(ASM2)应是发展方向。

关键词:城市污水;生物除磷脱氮;剩余污泥量;污泥龄法;数学模型法;产率系数;修正系数 K

中图分类号:X703

文献标识码:A

Surplus Sludge Volume Calculation of Biological Phosphorus and Nitrogen Removal Process for Municipal Wastewater

XU Jing¹, LUO Ping², SUN Jun-yi³

(1. College of Urban Construction and Environmental Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China; 2. College of Chemistry and Chemical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China; 3. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: Since the key to the design of activated sludge process is surplus sludge volume calculation, while activated sludge systems are main forms in biological P and N removal process (BPNRP), it is necessary to calculate excess sludge production of BPNRP. Combined with the operating experience of wastewater treatment plants in Kunming, this paper analyzes and compares the precision of traditional calculating method, sludge retention time method and mathematical models in surplus sludge volume calculation of BPNRP for municipal wastewater. Then, it suggests that the sludge age method is suitable at present and points out that adjusted coefficient $K(0.75 \sim 1)$ is related to specific process and several values of K are given. At the same time, it also points out that activated sludge mathematical model ASM2 is the orientation of development.

Keywords: municipal wastewater; biological phosphorus and nitrogen removal process; surplus sludge volume; sludge retention time method; mathematical model method; sludge yield index; adjusted coefficient K

近年来氮、磷的过量排放已造成日益严重的水体富营养化,而生物方法除磷脱氮由于其处理效率高、运行成本较低、污泥处理相对容易,受到广泛重视,目前已经发展了诸如A/O、A²/O、Bardenpho、UCT、VIP、SBR及氧化沟等较为成功的除磷脱氮工艺。我国新颁布实施的国家《污水综合排放

* 收稿日期:2003-07-03

作者简介:许 劲(1968-),女,湖北武汉人,博士生,主要从事水污染控制系统的教学与研究。

标准》(GB8978-1996)已公布了非常严格的磷酸盐排放标准和较严格的氨氮排放标准,明确指出适用于所有排污单位,这意味着今后绝大多数城市污水处理厂要考虑除磷处理,大部分要考虑氨氮的硝化处理或脱氮处理,同时具有除磷脱氮功能的城市污水处理厂将占绝大多数。同时,由于活性污泥法是目前污水生物处理的最主要方法,其工艺设计的关键是先要正确求得系统所产生的剩余污泥量^[1],因此,确定城市污水除磷脱氮工艺产生的剩余污泥量就显得十分必要,而目前这方面可供参考的资料和运行数据非常有限。即是结合昆明市污水处理厂的实际运行情况,对此作点探讨。

活性污泥工艺剩余污泥量的计算目前大致有三种方法:传统计算法、污泥龄法和数学模型法。三种方法在实际运用中难易程度及计算结果的精确度均不同,直接关系到设计水平、基建投资和处理的可靠性。描述城市污水生物除磷过程的活性污泥法数学模型 ASM2,由于假设异养生物不能在厌氧条件下生长,故不能模拟一个完整的厌氧系统,仅能模拟作为好氧和缺氧系统中一部分的厌氧区^[2],因此,为使三种设计方法具有可比性,本文将设计对象统一为需要同时除磷脱氮处理的城市污水。另外迄今为止,几乎所有的除磷脱氮型工艺都包含厌氧、缺氧和好氧三种基本状态的交替,这些工艺之间的主要差异是这三种状态的组合方式和数量分布的时空变化,以及回流的数量、方式和位置不同,所以这一限定具有实际意义。以下将借用活性污泥法剩余污泥量的计算方法,并结合生物除磷脱氮系统的特点,选用或修正计算公式,再将计算结果与实际值相比较,最后得出结论。

1 活性污泥法剩余污泥量的计算方法

1.1 传统计算法

这是国内外最早流行的设计方法,几十年来设计人员已运用该法设计了很多污水处理厂,充分说明其适用性及在一定前提条件下的正确性。但是,传统计算法存在很大的缺陷,它没有考虑进水悬浮固体、污泥龄、污水水质及生物处理系统的特性等因素对污泥量及污泥组成的影响,而认为所有的剩余污泥只是由有机物降解产生,因此,若用于生物除磷脱氮系统或污泥龄较长的系统时,往往会导致设计数据与实际运行数据出现较大偏差,影响污水处理厂的正常运行^[3,4]。传统计算法的计算公式为:

$$\Delta X = Y(S_a - S_e)Q - K_d V X_v$$

式中: ΔX ——每日排放的挥发性污泥量(VSS),kg/d;

$(S_a - S_e)Q$ ——每日的有机污染物降解量,kg/d;

VX_v ——曝气池内混合液中挥发性悬浮固体总量 kg, $X_v = MLVSS$, V 为曝气池容积, m^3 ;

Y ——产率系数,即微生物每代谢 1 kg BOD 所合成的 MLVSS kg 数;

K_d ——活性污泥微生物的自身氧化率(或衰减系数), d^{-1} 。

在实际计算中,当选用工艺的污泥龄 θ_c 较长时,可能会出现 $\Delta X < 0$ 的计算结果,如昆明市第一污水处理厂和第四污水处理厂,这与工程实践相矛盾。

1.2 污泥龄法

随着氮磷去除要求的不断提高,污泥龄已成为活性污泥系统设计和运行的关键参数。但由于我国在污水处理领域起步较晚,尚无十分成熟的运行管理经验,严重缺乏对数据的分析与积累,现行设计规范推荐的某些典型的经验参数范围太大,实际计算时难以取值,影响了污泥龄法的推广使用。而德国是世界上环境保护工作开展较好的国家,在污水的除磷脱氮方面积累了很多值得借鉴的经验,据介绍,德国目前使用的 ATV 标准中的计算公式可以为我所用。ATV 将活性污泥法剩余污泥的组成为三部分^[5]:

1) 由降解有机物而引起的异养性微生物的污泥增值量(不计自养性微生物的增值)为:

$$Y_H \cdot Q \cdot BOD_{5,t}(\text{污泥增值}) - b_H \cdot X \cdot MLSS \cdot V \cdot f_{T,H}(\text{内源呼吸衰减量})$$

2) 活性污泥代谢过程惰性残余物(约占污泥代谢量的 10% 左右)为: $0.1 \cdot b_H \cdot X \cdot \text{MLSS} \cdot V \cdot f_{T,H}$ 。

3) 曝气池进水中不可降解的惰性悬浮固体,其量约占悬浮固体总量的 60% 左右: $0.6 \cdot Q \cdot \text{SS}$ 。

因此,剩余污泥量可表达为:

$$SP = Y_H \cdot Q \cdot \text{BOD}_{5,i} - b_H \cdot X \cdot \text{MLSS} \cdot V \cdot f_{T,H} + 0.1 \cdot b_H \cdot X \cdot \text{MLSS} \cdot V \cdot f_{T,H} + 0.6 \cdot Q \cdot \text{SS}$$

式中: $X = (Y_H \cdot Q \cdot \text{BOD}_{5,i} - b_H \cdot X \cdot \text{MLSS} \cdot V \cdot f_{T,H}) / SP$ 。

由于 $SP = \text{MLSS} \cdot V / \theta_c$,故可求得剩余污泥量 SP 为:

$$SP = Y_H \cdot Q \cdot \text{BOD}_{5,i} + 0.6 \cdot Q \cdot \text{SS} - 0.9 \cdot b_H \cdot Y_H \cdot Q \cdot \text{BOD}_{5,i} \cdot f_{T,H} / (\theta_c^{-1} + b_H \cdot f_{T,H})$$

折算到每去除 1 kgBOD₅ 的污泥产量 SP_i 为:

$$SP_i = Y_H + 0.6 \cdot \frac{\text{SS}}{\text{BOD}_{5,i}} - \frac{0.9 \cdot b_H \cdot Y_H \cdot \theta_c \cdot f_{T,H}}{1 + b_H \cdot Y_H \cdot \theta_c \cdot f_{T,H}}$$

式中: Q 为进水流量, m^3/d ; X 为异养性微生物在活性污泥中所占的比例; V 为曝气池容积, m^3 ; θ_c 为污泥龄, d ; Y_H 为异养性微生物的增值率, $\text{kg SS}/\text{kg BOD}_5$, $Y_H = 0.6$; b_H 为异养性微生物的内源呼吸速率, $b_H = 0.08 \text{ L}/\text{d}$; $f_{T,H}$ 为异养性微生物生长温度修正系数, $f_{T,H} = 1.072^{(T-15)}$ (T 为温度, $^\circ\text{C}$); SS 为曝气池进水悬浮固体浓度, kg/m^3 ; $\text{BOD}_{5,i}$ 为进水 BOD_5 浓度, kg/m^3 ; $\text{BOD}_{5,e}$ 为出水 BOD_5 浓度, kg/m^3 。

通常 $Y_H = 0.6$ 、 $b_H = 0.08 \text{ L}/\text{d}$,则公式可写成:

$$SP_i = 0.6 \cdot \left(\frac{\text{SS}}{\text{BOD}_{5,i}} + 1 \right) - \frac{0.072 \cdot 0.6 \cdot \theta_c \cdot f_{T,H}}{1 + 0.08 \cdot \theta_c \cdot f_{T,H}}$$

这实际上就是污泥的总产率系数 Y ,由此可以看出,剩余污泥的产量取决于曝气池进水的 SS/BOD_5 值、污泥龄、污水水温等因素。考虑到我国活性污泥工艺污水处理厂的剩余污泥产量比德国等西方国家要少,且生物除磷脱氮系统所产生的污泥量略高于其他活性污泥系统,故实际应用时须乘以一个不大于 1 的修正系数 K (K 值与具体工艺形式有关):

$$Y = K \cdot 0.6 \cdot \left(\frac{\text{SS}}{\text{BOD}_{5,i}} + 1 \right) - \frac{0.072 \cdot 0.6 \cdot \theta_c \cdot f_{T,H}}{1 + 0.08 \cdot \theta_c \cdot f_{T,H}}$$

因此,剩余污泥量 $SP = Y \cdot Q \cdot (\text{BOD}_{5,i} - \text{BOD}_{5,e})$ ($\text{kg SS}/\text{d}$)

1.3 数学模型法

国际水质协会 IAWQ 于 1995 年推出了活性污泥 2 号模型 (ASM2),它完整地包含了城市污水处理的碳、氮、磷的去除,可以作为城市污水生物除磷脱氮系统的机理研究、工程设计和运行管理的理论工具。但是,由于 ASM2 相当庞大复杂,包含了 19 种物质、19 种反应、22 个化学计量系数及 42 个动力学参数,模型中尚有许多组分不能直接测定或准确测定,使用时很不方便;而 ASM1 共有 13 种组分、19 个参数,其中 8 个参数基本恒定,几乎所有组分都可出现在进入活性污泥系统的进水中,相应的测定方法及有关参数的确定方法都较标准,另外,据有关文献报道,城市污水生物除磷脱氮系统的产泥量与其他活性污泥系统相比,大约多 8.5% ~ 13%^[3]。因此在计算剩余污泥量时,可使用 ASM1 求得近似结果。ASM1 认为,系统所产生的剩余污泥主要由以下几部分组成^[3,4]:

1) 来自进水的固定性悬浮固体和不可生物降解 $V \text{ SS}$ 将全部截留在活性污泥絮体内,由此产生的污泥量为 $X_I = \text{TSS}(1 - f_v + f_v f_{vm})$ ($\text{kg SS}/\text{d}$);

2) 活性污泥中的活性部分包括异养微生物和自养微生物,异养微生物 ($X_{B,H}$) 由可生物降解有机物转化而来,其产生量为 $X_{B,H} = \text{BOD}_5 Y_H / (1 + \theta_c b_H)$ (kgVSS/d);如有硝化发生,硝化菌量(自养菌, $X_{B,A}$)为 $X_{B,A} = \text{TKN} Y_A / (1 + \theta_c b_A)$ (kgVSS/d);

3) 内源衰减残留物含量为 $X_P = f_P b_H \theta_c X_{B,H}$ (kgVSS/d);

因此,活性污泥总量为 $X_T = X_I + X_{B,H} + X_{B,A} + X_P$ (kgVSS/d)。考虑每天出水携带的悬浮物

总量为 X_{EF} (kgVSS/d), 则

4) 剩余污泥量为 $X_w = X_T - X_{EF}$ (kgVSS/d)。

式中: f_v 为进水 SS 中挥发部分所占比例, 0.7; f_{wv} 为进水 VSS 中不可好氧生物降解部分所占比例, 0.3; Y_H 为异养微生物产率系数, 0.65 kgVSS/kgBOD₅; Y_A 为硝化菌产率系数, 0.1 kgVSS/kgNH₃-N; b_H 为异养微生物内源衰减系数, 0.15 d⁻¹ (15 ℃); b_A 为硝化菌衰减系数, 0.035 d⁻¹ (15 ℃); f_p 为微生物体不可生物降解部分所占比例, 0.2。

2 案例示范

为了保护和治理滇池, 昆明的城市污水处理厂全部具有除磷脱氮功能, 均按 A²/O 工艺设计运行, 工艺段的组合型式多样化。昆明是我国目前城市污水处理率最高的城市之一(约 60%), 已建成投产的四座污水处理厂日处理污水 36.5 万 t, 另外二座污水处理厂建成后, 昆明市的污水处理率将达到 80%。这四座污水处理厂少则已运行 3~5 年, 最长达 10 年, 相对而言已积累了较多的运行管理经验及水质水量等数据, 因此选择它们作为本文的研讨对象。又因第三、第四污水处理厂采用相同处理工艺(ICEAS), 两者选其一即可, 故下文的分析与计算均以昆明市第一、第二和第四污水处理厂为例。

昆明市污水处理厂设计水质和实际水质见表 1。由于实际进水水质过低, 因此将污泥处理水回流, 以提高进水浓度, 此时混合进水浓度见表 2(以昆明市第四污水处理厂为例), 各污水处理厂工艺流程示意图 1~3。

表 1 昆明市污水处理厂设计水质与实际运行水质

水质指标 (mg/L)		BOD ₅	COD _{Cr}	SS	TN	TP
设计值	进水	180	360	200	30	8
	出水	< 15	< 30	< 10	< 10	< 0.5~1
实际值	进水	60~80	100~200	200	30	4~8
	出水	< 10	< 15	< 10	15	0.5

表 2 昆明市第四污水处理厂实际混合进水水质

水质指标 (mg/L)	BOD ₅	COD _{Cr}	SS	TN	TP
进水	190.41	518.6	416.4	41.37	6.52
出水	3.57	19.6	3.3	16.77	0.28

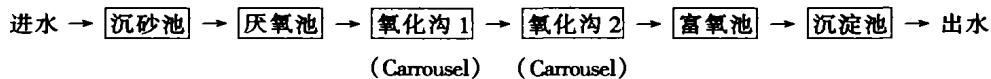


图 1 昆明市第一污水处理厂工艺流程示意图

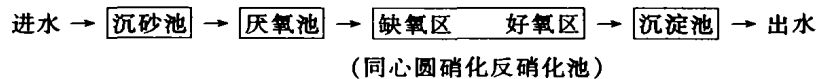


图 2 昆明市第二污水处理厂工艺流程示意图



图 3 昆明市第四污水处理厂工艺流程示意图

由于传统算法的计算结果与实际运行相差太大, 表明在除磷脱氮的活性污泥法系统中不宜采用该法, 现以昆明市第二污水处理厂为例做个简单说明^[4]。原设计用传统方法(表观产率 $Y_{obs} = 0.65$ kgSS/kgBOD₅)计算出剩余污泥量为 9.26 t/d, 由于无初沉污泥, 建成的化学除磷系统一直未运

行,故也无化学污泥,因而每天排放的污泥应全部为剩余污泥(其他三个污水处理厂同二厂),但是该厂每天实际排泥量为,含水率 80%的污泥 15~20 车,每车 5 t,约合干污泥 15~20 t。因此,以下将集中讨论污泥龄法和数学模型法,并统一按混合进水 $BOD_5 = 150 \text{ mg/L}$ 、 $SS = 250 \text{ mg/L}$ 及出水 $BOD_5 = 10 \text{ mg/L}$ 、 $SS = 15 \text{ mg/L}$ 计算剩余污泥量,而昆明市第一、第二、第四污水处理厂的流量分别为 $5.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 、 $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 、 $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,年均污水水温 $15 \text{ }^\circ\text{C}$ 。一般,城市污水的 VSS/SS 为 0.75 左右,但由于昆明第五自来水厂从滇池取水,用气浮法去藻类,藻渣排入明通河,进入第二污水处理厂,而藻渣属不可降解物,一方面引起昆明第二污水处理厂污泥量增加,另一方面也使得该厂进水 VSS/SS 值的降低,因此,二厂污水的 VSS/SS 值取为 0.7。

由于昆明市近期是合流制排水系统,进水 BOD_5 值很低,除磷脱氮所需碳源不足。为避免外加碳源、充分利用原有碳源,在昆明的污水处理中,其好氧曝气采用泥龄长、负荷低的延时曝气方式 ($\theta_c = 20 \sim 30 \text{ d}$)^[6],污水处理一厂在实际运行时 $\theta_c > 30 \text{ d}$ ^[7]。而这种运行方式似乎与其处理出水 TP 基本上低于 1 mg/L 、出水 TN 不能达标的实际情况相矛盾,因为国内外的运行实践表明,对同时除磷脱氮的城市污水处理厂,要获得良好的出水氮磷指标,污泥龄宜控制在 $8 \sim 15 \text{ d}$,即 $\theta_c = 8 \sim 15 \text{ d}$,而以较短的污泥龄可达到更好的除磷效果^[3,8]。

现将昆明市第一、第二和第四污水处理厂的剩余污泥量分别按传统算法、污泥龄法和数学模型法计算的主要结果列于表 3。

表 3 生物除磷脱氮污水处理厂剩余污泥量计算表

污水处理厂名称	传统算法 $Y(\text{kgVSS}/\text{kgBOD}_5)$ $K_d(\text{d}^{-1})$ $\Delta X(\text{t SS}/\text{d})$	污泥龄法 $Y(\text{kgSS}/\text{kgBOD}_5)$ $0 < K \leq 1$ $SP(\text{t SS}/\text{d})$	数学模型法 $X_w(\text{t SS}/\text{d})$	实际剩余污泥量 (t SS/d)
昆明市污水一厂 $Q = 5.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ $\theta_c = 40 \sim 30 \text{ d}$ VSS/SS = 0.75	$Y = 0.4$ $K_d = 0.1$ $\Delta X < 0$	$K = 0.75$ $Y = 0.79 \sim 0.82$ $SP = 6.08 \sim 6.3$	8.74	6.1
昆明市污水二厂 $Q = 10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ $\theta_c = 25 \sim 8 \text{ d}$ VSS/SS = 0.7	$Y = 0.55, K_d = 0.05$ $\Delta X = 5.6$ 或 $Y_{obs} = 0.65$ (原设计选用值) 则 $\Delta X = 9.26$	$K = 1$ $Y = 1.22 \sim 1.39$ $SP = 17.1 \sim 19.5$	16.7~19.5	15~20
昆明市污水四厂 $Q = 10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ $\theta_c = 25 \sim 20 \text{ d}$ VSS/SS = 0.75	$Y = 0.5$ $K_d = 0.08$ $\Delta X < 0$	$K = 0.95$ $Y = 1.16 \sim 1.19$ $SP = 16.3 \sim 16.7$	16.3~16.7	16.3

从表 3 可知,城市污水处理厂生物除磷脱氮工艺剩余污泥量的计算不应采用传统法。而借用 ASM1 进行计算的数学模型法,当 $\theta_c < 30 \text{ d}$ 时,计算结果与实际剩余污泥量相当吻合,但当 $\theta_c \geq 30 \text{ d}$ 时,计算值明显偏大,表明此时 ASM1 中的各项动力学参数值不再适合计算生物除磷脱氮系统的剩余污泥量,而应有所变化,如产率系数减小、衰减系数增大等,这与生物处理的原理是一致的。当然,最好能积累和分析我国生物除磷脱氮城市污水处理厂的运行数据,组织力量监测分析各种污水水质,确定有关参数,直接用 ASM2 进行计算,这应该是今后的发展方向。

当 K 取 $0.75 \sim 1$ 的不同数值时,污泥龄法能够比较精确地计算出生物除磷脱氮系统的剩余污泥量,而 K 值取决于具体的工艺形式,如典型的 A^2/O 工艺, $K = 1$; ICEAS 工艺, $K = 0.95$; 具有相当长污泥龄的氧化沟工艺, $K = 0.75$ 等,需要根据更多的实际运行数据加以系统总结。

3 结论

1) 城市污水生物除磷脱氮工艺剩余污泥量的计算,现阶段宜采用污泥龄法,而数学模型法(ASM2)应是发展方向。两种方法在计算活性污泥法剩余污泥量时,均从分析剩余污泥的组成入

手,有充分的理论依据。

2) 污泥龄法是经验和理论相结合的计算方法,污泥产率系数 Y 值的计算公式是根据理论推导而来,概念清晰,但它是根据德国的污水水质和实验得出的,在用于我国城市污水生物除磷脱氮工艺时,需乘以修正系数 $K(0.75 \sim 1)$, K 的取值与具体工艺形式有关,如典型的 A^2/O 工艺, $K = 1$; ICEAS 工艺, $K = 0.95$; 具有相当长污泥龄的氧化沟工艺, $K = 0.75$ 等。

$$Y = K \cdot 0.6 \cdot \left(\frac{SS}{BOD_{5,i}} + 1 \right) - \frac{0.072 \cdot 0.6 \cdot \theta_c \cdot f_{T,H}}{1 + 0.08 \cdot \theta_c \cdot f_{T,H}}$$

3) 当城市污水生物除磷脱氮系统的 $\theta_c < 30$ d 时,可以利用 ASM1 计算剩余污泥量。

参考文献:

- [1] 朱明权. 利用 COD 指标进行活性污泥法系统的设计[J]. 中国给水排水, 1999, 15(2): 18 - 24.
- [2] 杨青, 甘树应, 陈季华. 活性污泥法模型的发展[J]. 上海环境科学, 2001, 20(4): 199 - 200.
- [3] 郑兴灿, 李亚新. 污水除磷脱氮技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998.
- [4] 许劲. 关于城市污水处理厂设计的若干问题讨论[J]. 给水排水, 2001, 27(7): 15 - 18.
- [5] 周冰莲. 活性污泥法剩余污泥量的计算[J]. 中国给水排水, 1999, 15(6): 53 - 55.
- [6] 张统. 污水处理工艺及工程方案设计[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.
- [7] 施成忠. 昆明第一污水厂氧化沟工艺运行实践及分析[J]. 中国给水排水, 1997, 13(3): 17 - 18.
- [8] 王洪臣. 城市污水处理厂运行控制与维护管理[M]. 北京: 科学出版社, 1999.

(上接第 46 页)

参考文献:

- [1] 夏逸鸣, 赵惠麟, 左晓宝. 悬挂结构地震反应的样条有限条分析[J]. 东南大学学报, 2000, 20(3): 7.
- [2] 刘郁馨, 吕志涛. 中央核筒悬挂建筑结构分析[J]. 南京建筑工程学院学报, 1998, (1): 1 - 6.
- [3] 李宏男, 宋本有. 高层建筑利用悬挂质量摆的减震研究[J]. 地震工程与工程振动, 1995, 15(4): 56 - 61.
- [4] 王玉朋, 魏琰. 悬挂质量结构的抗震计算及减震性能分析[M]. 北京: 地震出版, 1991.
- [5] 周坚, 伍孝波, 刘娜. 高层建筑悬挂结构体系的非线性动力分析[J]. 工程力学(S0), 2002, 376 - 381.
- [6] 张晖, 宋伯龙, 苏少军. 悬挂结构层间减震控制实验及分析[J]. 建筑结构学报, 1997, (5): 59 - 65.
- [7] 康希良. 悬挂体系地震效应的有限元分析[J]. 工程抗震, 1994(2): 4 - 8.